

钢铁行业节能减排先进适用 技术指南

（第一批）

二〇一二年九月

目 录

第一章	导言	1
1.1	编制目的	1
1.2	适用范围	1
1.3	编制依据	2
1.4	术语及定义	3
第二章	钢铁行业能源、资源消耗及产排污现状	5
2.1	行业类型的划分及说明	5
2.2	钢铁行业能源消耗情况	6
2.2.1	能源消耗现状	6
2.2.2	能源消耗水平	12
2.3	钢铁行业资源消耗情况	12
2.3.1	水资源消耗特点	12
2.3.2	矿石资源消耗特点	13
2.3.3	炼焦煤资源消耗特点	14
2.3.4	废钢资源消耗特点	16
2.4	钢铁行业污染物排放情况	17
2.4.1	污染物排放特点	17
2.4.2	污染物排放水平	20
第三章	钢铁行业技术发展现状	22
3.1	行业技术结构	22
3.2	行业技术水平	26
3.2.1	生产过程节能减排技术	26
3.2.2	资源能源回收利用技术	28
3.2.3	污染物治理技术	29
第四章	钢铁行业节能减排先进适用技术	31
第一节	焦化工序	31
1.1	煤调湿技术（CMC）	32
1.1.1	技术介绍	32
1.1.2	技术适用条件	36
1.1.3	节能减排效果	37
1.1.4	成本效益分析	37
1.1.5	技术推广应用情况	38

1.1.6 技术知识产权情况.....	39
1.2 捣固炼焦技术.....	40
1.2.1 技术介绍.....	40
1.2.2 技术适用条件.....	41
1.2.3 节能减排效果.....	42
1.2.4 成本效益分析.....	42
1.2.5 技术推广应用情况.....	44
1.2.6 技术知识产权情况.....	45
1.3 高温高压干熄焦技术.....	46
1.3.1 技术介绍.....	46
1.3.2 技术适用条件.....	48
1.3.3 节能减排效果.....	48
1.3.4 成本效益分析.....	48
1.3.5 技术推广应用情况.....	50
1.3.6 技术知识产权情况.....	50
1.4 焦炉煤气高效脱硫净化技术.....	51
1.4.1 技术介绍.....	51
1.4.2 技术适用条件.....	57
1.4.3 节能减排效果.....	57
1.4.4 成本效益分析.....	57
1.4.5 技术推广应用情况.....	59
1.4.6 技术知识产权情况.....	59
1.5 焦化酚氰污水处理技术.....	60
1.5.1 技术介绍.....	60
1.5.2 技术适用条件.....	65
1.5.3 节能减排效果.....	66
1.5.4 成本效益分析.....	67
1.5.5 技术推广应用情况.....	68
1.5.6 技术知识产权情况.....	69
第二节 烧结球团工序.....	70
2.1 小球烧结工艺技术.....	70
2.1.1 技术介绍.....	70
2.1.2 技术适用条件.....	72
2.1.3 节能减排效果.....	72

2.1.4 成本效益分析.....	73
2.1.5 技术推广应用情况.....	75
2.1.6 技术知识产权情况.....	76
2.2 降低烧结漏风率技术.....	76
2.2.1 技术介绍.....	76
2.2.2 技术适用条件.....	78
2.2.3 节能减排效果.....	78
2.2.4 成本效益分析.....	79
2.2.5 技术推广应用情况.....	80
2.2.6 技术知识产权情况.....	81
2.3 低温烧结工艺技术.....	82
2.3.1 技术介绍.....	82
2.3.2 技术适用条件.....	83
2.3.3 节能减排效果.....	83
2.3.4 成本效益分析.....	83
2.3.5 技术应用情况.....	85
2.3.6 技术知识产权情况.....	85
2.4 厚料层烧结技术.....	86
2.4.1 技术介绍.....	86
2.4.2 技术适用条件.....	86
2.4.3 节能减排效果.....	87
2.4.4 成本效益分析.....	87
2.4.5 技术应用情况.....	88
2.4.6 技术知识产权情况.....	89
2.5 链篦机-回转窑球团生产技术	90
2.5.1 技术介绍.....	90
2.5.2 技术适用条件.....	92
2.5.3 节能减排效果.....	92
2.5.4 成本效益分析.....	93
2.5.5 技术应用情况.....	95
2.5.6 技术知识产权情况.....	95
2.6 烧结余热回收利用技术（发电）	95
2.6.1 技术介绍.....	95
2.6.2 技术适用条件.....	101

2.6.3 节能减排效果.....	102
2.6.4 成本效益分析.....	103
2.6.5 技术应用情况.....	104
2.6.6 技术知识产权情况.....	105
2.7 球团废热循环利用技术.....	107
2.7.1 技术介绍.....	107
2.7.2 技术适用条件.....	109
2.7.3 节能减排效果.....	109
2.7.4 成本效益分析.....	109
2.7.5 技术应用情况.....	111
2.7.6 技术知识产权情况.....	111
2.8 烧结烟气湿法脱硫技术.....	111
2.8.1 技术介绍.....	111
2.8.2 技术适用条件.....	113
2.8.3 节能减排效果.....	113
2.8.4 成本效益分析.....	114
2.8.5 技术应用情况.....	115
2.8.6 技术知识产权情况.....	117
2.9 烧结烟气半干法或干法脱硫技术.....	118
2.9.1 技术介绍.....	118
2.9.2 技术适用条件.....	120
2.9.3 节能减排效果.....	121
2.9.4 成本效益分析.....	121
2.9.5 技术应用情况.....	124
2.9.6 技术知识产权情况.....	126
第三节 炼铁工序.....	127
3.1 高炉炼铁精料技术.....	128
3.1.1 技术介绍.....	128
3.1.2 技术适用条件.....	128
3.1.3 节能减排效果.....	128
3.1.4 成本效益分析.....	128
3.1.5 技术应用情况.....	129
3.1.6 技术知识产权情况.....	129
3.2 高炉浓相高效喷煤技术.....	129

3.2.1 技术介绍.....	129
3.2.2 技术适用条件.....	133
3.2.3 节能减排效果.....	134
3.2.4 成本效益分析.....	134
3.2.5 技术推广应用情况.....	136
3.2.6 技术知识产权情况.....	136
3.3 高炉脱湿鼓风技术.....	137
3.3.1 技术介绍.....	137
3.3.2 技术适用条件.....	141
3.3.3 节能减排效果.....	142
3.3.4 成本效益分析.....	142
3.3.5 技术推广应用情况.....	144
3.3.6 技术知识产权情况.....	144
3.4 高炉炉顶煤气干式余压发电技术（TRT）	144
3.4.1 技术介绍.....	144
3.4.2 技术适用条件.....	147
3.4.3 节能减排效果.....	147
3.4.4 成本效益分析.....	148
3.4.5 技术推广应用情况.....	149
3.4.6 技术知识产权情况.....	150
3.5 高炉热风炉双预热技术.....	151
3.5.1 技术介绍.....	151
3.5.2 技术适用条件.....	151
3.5.3 节能减排效果.....	151
3.5.4 成本效益分析.....	152
3.5.5 技术应用情况.....	153
3.5.6 技术知识产权情况.....	153
3.6 高炉煤气汽动鼓风技术.....	153
3.6.1 技术介绍.....	153
3.6.2 技术适用条件.....	154
3.6.3 节能减排效果.....	154
3.6.4 成本效益分析.....	155
3.6.5 技术推广应用情况.....	157
3.6.6 技术知识产权情况.....	157

3.7 高炉煤气干法布袋除尘技术.....	157
3.7.1 技术介绍.....	157
3.7.2 技术适用条件.....	158
3.7.3 节能减排效果.....	158
3.7.4 成本效益分析.....	160
3.7.5 技术推广应用情况.....	160
3.7.6 技术知识产权情况.....	160
3.8 转底炉处理含铁尘泥技术.....	162
3.8.1 技术介绍.....	162
3.8.2 技术适用条件.....	165
3.8.3 节能减排效果.....	167
3.8.4 成本效益分析.....	168
3.8.5 技术推广应用情况.....	169
3.8.6 技术知识产权情况.....	170
3.9 高炉渣综合利用技术.....	171
3.9.1 技术介绍.....	171
3.9.2 技术适用条件.....	174
3.9.3 节能减排效果.....	174
3.9.4 成本效益分析.....	174
3.9.5 技术推广应用情况.....	176
3.9.6 技术知识产权情况.....	177
第四节 炼钢工序.....	179
4.1 转炉“负能炼钢”工艺技术.....	180
4.1.1 技术介绍.....	180
4.1.2 技术适用条件.....	182
4.1.3 节能减排效果.....	182
4.1.4 成本效益分析.....	183
4.1.5 技术应用情况.....	184
4.1.6 技术知识产权情况.....	185
4.2 炼钢连铸优化调度技术.....	185
4.2.1 技术介绍.....	185
4.2.2 技术适用条件.....	187
4.2.3 节能减排效果.....	187
4.2.4 成本效益分析.....	188

4.2.5 技术应用情况.....	189
4.2.6 技术知识产权情况.....	190
4.3 高效连铸技术.....	190
4.3.1 技术介绍.....	190
4.3.2 技术适用条件.....	192
4.3.3 节能减排效果.....	192
4.3.4 成本效益分析.....	192
4.3.5 技术应用情况.....	194
4.3.6 技术知识产权情况.....	194
4.4 薄板坯连铸技术.....	194
4.4.1 技术介绍.....	194
4.4.2 技术适用条件.....	196
4.4.3 节能减排效果.....	196
4.4.4 成本效益分析.....	196
4.4.5 技术应用情况.....	198
4.4.6 技术知识产权情况.....	198
4.5 转炉烟气高效利用技术.....	198
4.5.1 技术介绍.....	198
4.5.2 技术适用条件.....	200
4.5.3 节能减排效果.....	200
4.5.4 成本效益分析.....	200
4.5.5 技术推广应用情况.....	201
4.5.6 技术知识产权情况.....	202
4.6 转炉烟气干法除尘技术.....	203
4.6.1 技术介绍.....	203
4.6.2 技术适用范围.....	205
4.6.3 节能减排效果.....	205
4.6.4 成本效益分析.....	205
4.6.5 技术推广应用情况.....	207
4.6.6 技术知识产权情况.....	208
4.7 电炉优化供电技术.....	209
4.7.1 技术介绍.....	209
4.7.2 技术适用条件.....	210
4.7.3 节能减排效果.....	210

4.7.4 成本效益分析.....	211
4.7.5 技术推广应用情况.....	211
4.7.6 技术知识产权情况.....	211
4.8 电炉烟气余热回收利用除尘技术.....	211
4.8.1 技术介绍.....	211
4.8.2 技术适用条件.....	212
4.8.3 节能减排效果.....	212
4.8.4 成本效益分析.....	213
4.8.5 技术推广应用情况.....	214
4.8.6 技术知识产权情况.....	215
4.9 废钢加工分类预处理技术.....	215
4.9.1 技术介绍.....	215
4.9.2 技术适用条件.....	216
4.9.3 节能减排效果.....	216
4.9.4 成本效益分析.....	216
4.9.5 技术推广应用情况.....	218
4.9.6 技术知识产权情况.....	218
4.10 钢渣处理及综合利用技术.....	219
4.10.1 技术介绍.....	219
4.10.2 技术适用范围.....	223
4.10.3 节能减排效果.....	223
4.10.4 成本效益分析.....	224
4.10.5 技术推广应用情况.....	225
4.10.6 技术知识产权情况.....	226
第五节 轧钢工序.....	228
5.1 连铸坯热装热送技术.....	229
5.1.1 技术介绍.....	229
5.1.2 技术适用条件.....	230
5.1.3 节能减排效果.....	231
5.1.4 成本效益分析.....	231
5.1.5 技术应用情况.....	233
5.1.6 技术知识产权情况.....	234
5.2 低温轧制技术.....	234
5.2.1 技术介绍.....	234

5.2.2 技术适用条件.....	235
5.2.3 节能减排效果.....	236
5.2.4 成本效益分析.....	237
5.2.5 技术应用情况.....	239
5.2.6 技术知识产权情况.....	239
5.3 热带无头轧制、半无头轧制技术.....	240
5.3.1 技术介绍.....	240
5.3.2 技术适用条件.....	243
5.3.3 节能减排效果.....	243
5.3.4 成本效益分析.....	244
5.3.5 技术应用情况.....	244
5.3.6 技术知识产权情况.....	247
5.4 在线热处理技术.....	248
5.4.1 技术介绍.....	248
5.4.2 技术适用条件.....	251
5.4.3 节能减排效果.....	253
5.4.4 成本效益分析.....	253
5.4.5 技术应用情况.....	254
5.4.6 技术知识产权情况.....	257
5.5 轧钢加热炉蓄热式燃烧技术.....	258
5.5.1 技术介绍.....	258
5.5.2 技术适用条件.....	259
5.5.3 节能减排效果.....	261
5.5.4 成本效益分析.....	261
5.5.5 技术应用情况.....	263
5.5.6 技术知识产权情况.....	263
5.6 轧钢氧化铁皮资源化技术.....	265
5.6.1 技术介绍.....	265
5.6.2 技术适用条件.....	267
5.6.3 节能减排效果.....	267
5.6.4 成本效益分析.....	268
5.6.5 技术推广应用情况.....	269
5.6.6 技术知识产权情况.....	269
5.7 塑烧板除尘技术.....	270

5.7.1 技术介绍.....	270
5.7.2 技术适用范围.....	272
5.7.3 节能减排效果.....	272
5.7.4 成本效益分析.....	272
5.7.5 技术推广应用情况.....	273
5.7.6 技术知识产权情况.....	274
第六节 综合性节能减排技术.....	275
6.1 能源管理中心及优化调控技术.....	275
6.1.1 技术介绍.....	275
6.1.2 技术适用条件.....	275
6.1.3 节能减排效果.....	275
6.1.4 成本效益分析.....	276
6.1.5 技术推广应用情况.....	277
6.1.6 技术知识产权情况.....	278
6.2 燃气-蒸汽联合循环发电技术（CCPP）	278
6.2.1 技术介绍.....	278
6.2.2 技术适用条件.....	279
6.2.3 节能减排效果.....	279
6.2.4 成本效益分析.....	280
6.2.5 技术推广应用情况.....	282
6.2.6 技术知识产权情况.....	282
6.3 全燃高炉煤气锅炉发电技术.....	282
6.3.1 技术介绍.....	282
6.3.2 技术适用条件.....	283
6.3.3 节能减排效果.....	283
6.3.4 成本效益分析.....	283
6.3.5 技术推广应用情况.....	285
6.3.6 技术知识产权情况.....	286
6.4 原料场粉尘抑制技术.....	286
6.4.1 技术介绍.....	286
6.4.2 技术适用条件.....	286
6.4.3 节能减排效果.....	287
6.4.4 成本效益分析.....	287
6.4.5 技术推广应用情况.....	288

6.4.6 技术知识产权情况.....	289
6.5 双膜法污水处理回用技术.....	289
6.5.1 技术介绍.....	289
6.5.2 技术适用条件.....	290
6.5.3 节能减排效果.....	290
6.5.4 成本效益分析.....	291
6.5.5 技术应用推广情况.....	291
6.5.6 技术知识产权情况.....	291
6.6 絮凝沉淀+V 型滤池污水处理技术	291
6.6.1 技术介绍.....	291
6.6.2 技术适用条件.....	292
6.6.3 节能减排效果.....	292
6.6.4 成本效益分析.....	292
6.6.5 技术推广应用情况.....	294
6.6.6 技术知识产权情况.....	294
第五章 工艺技术的优化组合分析.....	295
第一节 焦化工序.....	297
1.1 技术分类.....	297
1.2 技术组合优化分析.....	297
1.3 技术组合案例.....	298
第二节 烧结球团工序.....	299
2.1 技术分类.....	299
2.2 技术组合优化分析.....	299
2.3 技术组合案例.....	301
第三节 炼铁工序.....	302
3.1 技术分类.....	302
3.2 技术组合优化分析.....	302
3.3 技术组合案例.....	303
第四节 炼钢工序.....	306
4.1 技术分类.....	306
4.2 技术组合优化分析.....	306
4.3 技术组合案例.....	307
第五节 轧钢工序.....	309
5.1 技术分类.....	309

5.2 技术组合优化分析.....	309
5.3 技术组合案例.....	310
第六节 流程优化分析.....	312
6.1 钢铁制造流程中物质流的运行行为和特征.....	312
6.2 钢铁制造流程中能量流的运行行为和特征.....	316
6.3 钢铁制造流程动态-有序运行的物理框架及钢铁制造流程网络	321
第六章 重点关注的新技术.....	325
6.1 SCOPE21 炼焦技术	325
6.1.1 技术介绍.....	325
6.1.2 技术试验示范效果.....	326
6.1.3 成本效益分析.....	328
6.1.4 技术应用前景分析.....	328
6.1.5 技术知识产权情况.....	329
6.2 焦炉处理废塑料技术.....	329
6.2.1 技术介绍.....	329
6.2.2 技术试验示范效果.....	330
6.2.3 成本效益分析.....	330
6.2.4 技术应用前景分析.....	331
6.2.5 技术知识产权情况.....	331
6.3 烧结烟气选择性脱硫技术.....	332
6.3.1 技术介绍.....	332
6.3.2 技术试验示范效果.....	333
6.3.3 成本效益分析.....	334
6.3.4 技术应用前景分析.....	335
6.3.5 技术知识产权情况.....	335
6.4 烧结烟气循环富集脱硫技术.....	335
6.4.1 技术介绍.....	335
6.4.2 技术试验示范效果.....	338
6.4.3 技术应用前景分析.....	339
6.4.4 技术知识产权情况.....	339
6.5 烧结、电炉炼钢中二噁英类物质的减排技术.....	339
6.5.1 技术介绍.....	339
6.5.2 技术试验示范效果.....	344
6.5.3 成本效益分析.....	346

6.5.4 技术应用前景分析.....	346
6.5.5 技术知识产权情况.....	347
6.6 高炉喷吹焦炉煤气技术.....	348
6.6.1 技术介绍.....	348
6.6.2 技术试验示范效果.....	349
6.6.3 成本效益分析.....	350
6.6.4 技术应用前景分析.....	352
6.6.5 技术知识产权情况.....	353
6.7 高炉喷吹废塑料技术.....	353
6.7.1 技术介绍.....	353
6.7.2 技术试验示范效果.....	355
6.7.3 成本效益分析.....	356
6.7.4 技术应用前景分析.....	357
6.7.5 技术知识产权情况.....	358
6.8 高炉炉顶煤气循环技术.....	358
6.8.1 技术介绍.....	358
6.8.2 技术试验示范效果.....	359
6.8.3 成本效益分析.....	360
6.8.4 技术应用前景分析.....	360
6.8.5 技术知识产权情况.....	360
6.9 非高炉冶炼技术.....	360
6.9.1 Corex 熔融还原炼铁工艺.....	360
6.9.2 Finex 炼铁工艺	363
6.9.3 ITmk3 直接还原炼铁工艺.....	367
6.9.4 HIsarna 熔融还原工艺.....	370
6.9.5 ULCORED 直接还原工艺.....	371
6.10 薄带连铸技术.....	373
6.10.1 技术介绍.....	373
6.10.2 技术试验示范效果.....	375
6.10.3 成本效益分析.....	376
6.10.4 技术应用前景分析.....	377
6.10.5 技术知识产权情况.....	378
6.11 精炼干式真空泵脱气技术.....	378
6.11.1 技术介绍.....	378

6.11.2 技术试验示范效果.....	380
6.11.3 成本效益分析.....	380
6.11.4 技术应用前景分析.....	381
6.11.5 技术知识产权情况.....	381
6.12 炼钢熔渣粒化新技术.....	381
6.12.1 技术介绍.....	381
6.12.2 技术试验示范效果.....	383
6.12.3 成本效益分析.....	383
6.12.4 技术应用前景分析.....	383
6.12.5 技术知识产权情况.....	383
6.13 不锈钢渣干法处理技术.....	383
6.13.1 技术介绍.....	383
6.13.2 技术试验示范效果.....	384
6.13.3 成本效益分析.....	385
6.13.4 技术应用前景分析.....	385
6.13.5 技术知识产权情况.....	385
6.14 炉窑氮氧化物控制技术.....	385
6.14.1 技术介绍.....	385
6.14.2 技术试验示范效果.....	387
6.14.3 成本效益分析.....	388
6.14.4 技术应用前景分析.....	388
6.14.5 技术知识产权情况.....	388

第一章 导言

1.1 编制目的

随着我国国民经济的快速发展，工业化和城镇化进程逐步加快，今后 10 年我国仍将处在重化工业发展阶段，能源需求仍会增加，能源供给和经济发展的矛盾更加凸现。为实现我国经济快速、健康和可持续发展，降低单位国内生产总值能源消耗量将是我国经济发展的长期约束性指标。因此，钢铁行业在“十二五”期间要继续贯彻落实科学发展观，把节能减排作为转变发展方式的重要抓手。钢铁工业是能源消耗大户，约占我国总能耗的 10%~15%。钢产量的快速增长带来了能耗的急剧增加，同时，污染物排放问题也日益突出，产业发展与资源环境的矛盾日趋尖锐。如果不尽快调整产业结构、转变增长方式，产业的可持续发展将难以为继。节能减排是我国钢铁工业可持续发展的前提条件。

2010 年国家进一步推动钢铁业节能减排进程，先后发布了《国务院办公厅关于进一步加大节能减排力度加快钢铁工业结构调整的若干意见》（国办发〔2010〕34 号）及《钢铁行业节能减排指导意见》（工信部节〔2010〕176 号）与《钢铁行业生产经营规范条件》（工原〔2010〕第 105 号），对钢铁企业在能源消耗和资源综合利用、环境保护、生产规模等方面做了一系列规定，对改变目前我国钢铁工业发展模式，引导钢铁产业健康发展，节能降耗、治污减排、促进淘汰落后具有重要的现实意义。使其成为钢铁企业在选择节能减排生产工艺、技术改造、技术转让的主要依据。鼓励企业使用新技术、新工艺、新装备，提高我国钢铁行业节能减排技术和管理水平。加快研发和推广节能减排新技术、新工艺。推动钢铁行业技术进步和企业节能减排技术改造。进一步挖掘钢铁行业节能减排潜力及其实现的技术途径，为制定钢铁行业节能减排技术标准提供政策依据。中国工业与信息化部编制的“‘十二五’工业、通信业节能专项规划”明确指出：到 2015 年我国钢铁行业吨钢综合能耗将从 2010 年的 605 kgce/t 钢下降到 580 kgce/t 钢。这一目标的实现要靠节能减排技术以及配套的相关产业政策的实施方可完成，本指南的编制无疑为钢铁行业“十二五”节能减排目标的实现提供有力的技术支撑。

1.2 适用范围

本指南适用于我国钢铁生产主流程即：焦化、烧结球团、炼铁、炼钢、轧钢

等工序中，在淘汰高能耗和高污染的落后产能时，为新建项目的技术选择和已建项目的技术改造提供技术支撑。故本指南适用于所有钢铁生产企业。

（1）规划阶段

本指南为规划管理部门在控制总量、淘汰落后、技术改造时确定技术路线提供依据。

（2）立项审批阶段

本指南详细介绍了从焦化至轧钢生产过程中的先进节能减排适用技术，为钢铁企业和相关技术管理部门在技术改造、能源管理、环境影响评价报告编制和审批等方面提供技术依据。

（3）设计施工阶段

本指南为设计和施工单位在选择先进适用的节能减排工艺和技术参数时提供依据。

（4）运营管理阶段

本指南为能源管理部门在评价企业资源效率、能源效率和环境效率时提供依据。

1.3 编制依据

（1）节能环保相关法律、法规

- 1) 中华人民共和国节约能源法；
- 2) 中华人民共和国环境保护法；
- 3) 中华人民共和国清洁生产促进法；
- 4) 《能源中长期发展规划纲要（2004 年~2020 年）》（草案）（2004.6）
- 5) 《国务院关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知》（国发〔2011〕26 号）；
- 6) 《国务院办公厅关于进一步加大节能减排力度加快钢铁工业结构调整的若干意见》（国办发〔2010〕34 号）；
- 7) 《钢铁行业节能减排指导意见》（工信部节〔2010〕176 号）；
- 8) 《产业结构调整指导目录》（2011 年本，国发〔2011〕9 号）；
- 9) 《钢铁行业生产经营规范条件》（工原〔2010〕第 105 号）；

（2）钢铁行业节能环保技术标准

- 1) 《清洁生产标准 钢铁行业》（HJ/T189-2006）；
- 2) 《粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额》（GB 21256-2007）；

- 3) 《焦炭单位产品能源消耗限额》(GB 21342-2008);
- 4) 《碳素单位产品能源消耗限额》(GB21370-2008);
- 5) 《钢铁行业污染防治最佳可行技术导则》(GB21342-2008);
- 6) 《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2008);

1.4 术语及定义

(1) 节能减排先进适用技术

“节能减排先进适用技术”指在当前及未来一定时期内，在钢铁行业同类技术中处于先进水平，具有较高的资源能源利用效率、污染排放少、经济性好等特点，适应我国钢铁行业发展以及资源能源条件，成熟可靠，在钢铁行业内有一定推广潜力的技术。在引进国外先进技术时，不仅应该根据本国经济发展的需要，而且也应该考虑到我国经济的总体发展现状，如生产要素和技术的状态、市场的规模、社会文化环境及技术吸收和创新能力等因素，力求获得技术引进的最大效益。

(2) 生产过程节能减排技术

“生产过程节能减排技术”是指产品生产过程中降低物耗、能耗、减少污染物产生量的源头削减技术，具体包括低能耗、低污染的新工艺、新技术；原料替代、预处理；过程优化等技术。

生产过程节能减排技术包括如下指标：

- 1) 物耗能耗：该技术在资源、能源方面的消耗水平（用单位产品消耗量计）。
- 2) 相对节能量：该技术与其它高耗能技术相比的节能量（用单位产品节能量或百分比计）。
- 3) 产污情况：该技术的污染物产生情况（用单位产品产生量计）。
- 4) 相对减排量：该技术与其它高污染技术相比的减排量（用单位产品减排量或百分比计）。

(3) 资源能源回收利用技术

“资源能源回收利用技术”是指将企业生产过程中产生的余热、余压、废料、废水等经回收、加工、转化或提取，从而生成新的可被利用的资源、能源或副产品的这样一类技术。具体包括余热余压回收利用技术，高浓度废液处理回用技术、固体废弃物资源化技术等类型。

资源能源回收利用技术包括如下指标：

- 1) 资源能源回收率：该技术回收的物质的量占废物的比例（用%计）。
- 2) 节能量：该技术运用后可为企业带来的节能量（用年节能量或百分比计）。

- 3) 副产品产量：该技术运用后可为企业产生的副产品的量（用年产量计）。
- 4) 污染物减排量：该技术运用后可为企业带来的污染减排量（用年减排量或百分比计）。

（4）污染治理技术

“污染治理技术”是指通过化学、物理或生物等方法，将企业中已经产生的污染物进行削减或消除，从而使企业的污染排放达到环境标准或相关要求的这类技术。具体包括水污染控制技术、大气污染控制技术、固体废物末端处置技术等。

污染治理技术包括如下指标：

- 1) 污染物去除率： $(\text{进口浓度} - \text{出口浓度}) / \text{进口浓度}$ （用%计）。
- 2) 污染物减排量：该技术运用后可为企业削减污染物的量（用年削减量或百分比计）。
- 3) 污染排放水平：该技术运用后企业的污染排放水平（用浓度计，并与排放标准进行比较）。

（5）技术适用条件

指技术使用中的特定条件限制，如运行规模、对物料的性质（浓度、温度、压力等）的限定、上下游技术间的特定匹配关系、产品技术的使用环境要求等。

（6）成本效益分析

- 1) 单位投资：技术总投资/总产能（或总产品）
- 2) 单位运行费用：技术年运行费用/年产量或产值
- 3) 净效益：技术产生的年度总效益一年均成本
- 4) 投资回收期：技术在投入后获得回报的时间期限

（7）技术推广应用情况

- 1) 技术普及率：行业内采用该技术的企业数量/企业总量，或行业内采用该技术生产的产品量/产品总量。
- 2) 产品市场占有率：采用某项节能减排技术的产品在市场中所占的份额。
- 3) “十二五”预计推广比例：结合技术发展趋势和专家经验估计，预测技术在2015年底的技术普及率。

第二章 钢铁行业能源、资源消耗及产排污现状

2.1 行业类型的划分及说明

钢铁行业按其生产流程可分为两大类：高炉转炉流程，俗称长流程；电炉流程，俗称短流程。但按企业生产类型则划分为钢铁联合企业，特殊钢企业，普通电炉钢企业，独立的焦化，球团、炼铁、炼钢（生产到坯、锭）、轧钢（仅压延成型）以及钢材加工等。

本指南从能源、资源消耗角度对钢铁企业节能减排技术适用性进行筛选。因此，在行业划分上采用综合归类方法，分为高炉转炉类型，主要为钢铁联合企业。电炉类型，主要为特钢和普通电炉钢企业。并将独立企业“看作”是钢铁联合企业的某种生产工序，因为钢铁联合企业的所有节能减排技术均适合在这些独立企业中应用。

现今的钢铁企业类型，已不再是十几年前的长、短流程模式。在钢铁联合企业中，配有电炉生产工序已不是少数几家企业。电炉钢企业在近 10 年的发展中，特别是在行业重点大、中型企业中，绝大部分企业已变为高炉+电炉的生产方式，即：电炉配加热铁水是现今电炉钢企业特有的生产工艺流程。因此，本指南中的钢铁行业企业分类为：

- ◆ 钢铁联合企业
- ◆ 电炉钢企业（含特钢，并包括高炉）

在能源消耗水平上，分为国内先进、国内领先、国际先进。国际领先。

还需要指出的是，钢铁行业温室气体（CO₂）排放，目前行业已做了大量研究，但还不能给出类似国内准入、国内一般、国内先进、国际先进，这类比较指标。

在环保指标上，分为国内先进、国内领先、国际先进。国际领先。

在资源消耗上：

- ◆ 水资源：国内先进、国内领先、国际先进。国际领先。

◆ 矿石资源、焦煤资源、废钢资源：因世界各国资源禀赋不同和冶炼流程的区别，这里仅对这类资源特点和消耗进行描述，同时说明这类资源未来利用战略。

2.2 钢铁行业能源消耗情况

2.2.1 能源消耗现状

钢铁工业是国民经济的重要基础产业，是实现工业化的支撑产业，是技术、资金、资源、能源密集型产业。

“十一五”期间，我国钢铁行业的快速发展为我国国民经济发展提供了有利保障。同时，钢铁行业节能降耗工作也取得明显成效。至 2009 年，我国粗钢产量与 2005 年相比增长了 59.6%，而总用能量仅增长了 43%（国家统计局能源统计口径），吨钢综合能耗下降 12%，能源利用效率进一步提高。

随着我国经济快速发展，人口增加，工业化和城镇化进程的加快，特别是在今后 10 年，我国仍将处在重化工业发展阶段，能源需求仍会增加，能源供给和经济发展的矛盾更加凸现。为实现我国经济快速、健康和可持续发展，降低单位国内生产总值能源消耗量仍将是我国经济发展的约束性指标。

“十一五”期间，我国钢铁行业坚持以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导，认真贯彻落实科学发展观，取得了产量增长较快、结构优化、效益提高、节能减排效果明显、在国际钢铁界的地位和影响提高的显著成绩。2009 年，我国国内生产总值（GDP）比 2005 年增长了 78.6%，人均 GDP 已达到 3700 美元，比 2005 年翻了近一番。“十一五”钢铁行业发展业绩主要体现在以下几个方面：

- （1）钢产量的增长满足了国民经济的发展需要。
- （2）调整和优化了产品结构，高技术含量、高附加值品种钢材产量大幅度增长。
- （3）核心技术取得突破性进展。
- （4）满足了市场需求短缺产品的需要。
- （5）在技术进步方面，全行业已基本形成以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新和新产品研发体系，形成了科研基础设施建设加强、科技投入增加的良好格局。
- （6）联合重组取得重大进展。

综上所述，在国家《钢铁产业发展政策》引导下，我国钢铁行业“十一五”期间取得的成绩和进步将载入史册。同时，在钢铁产能快速增长的前提下，钢铁行业的工艺装备水平有了很大提高，为我国由钢铁大国转变为钢铁强国打下雄厚基础。

但也应清楚看到，我国钢铁行业在“十一五”期间产能依然为粗放型增长模式，

与国家要求钢铁行业发展目标存在一定距离。突出表现在产业集中度低、结构调整不力、淘汰落后产能困难、退出机制不畅、资源能源利用差距较大等方面。这些矛盾和问题将不可避免的延续到钢铁行业发展过程中，即在未来发展过程中，要紧密围绕国家转变经济发展方式、大力推动产业结构优化升级，促进产业联合重组，建立新的竞争优势；提升行业的自主创新能力，在产品技术、冶炼工艺、装备技术上实现跨越式发展；转变资源消耗型模式，走低能耗、少污染、低排放（低碳型）的可持续发展之路，实现由钢铁大国向钢铁强国的转变。

“十一五”期间钢铁行业积极贯彻国家钢铁产业政策，以大型化、现代化和采用先进节能技术，使各主体设施的工序能耗、吨钢综合能耗不断下降，综上所述，“十一五”期间在国家政策引导和财政资金支持下，我国钢铁行业的节能降耗取得了明显效果，进一步缩小了与国外先进钢铁行业在能源利用上的差距。我国钢铁行业能源消耗特点：

(1) 钢铁联合企业：煤的比重 85%以上，电 10%，其他 5%；这类企业，以国家限额标准限定值为基准的能源消耗特点，见图 2.1：

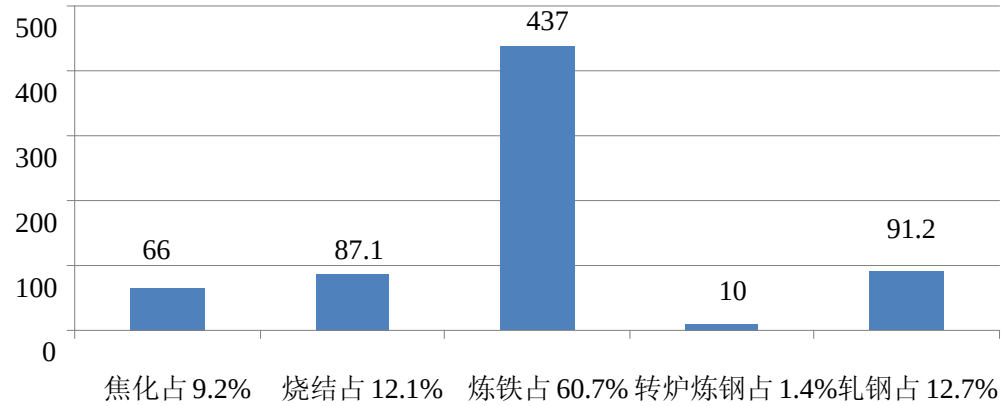


图 2.1 我国钢铁联合企业各工序能耗的变化（kgce/t 钢）

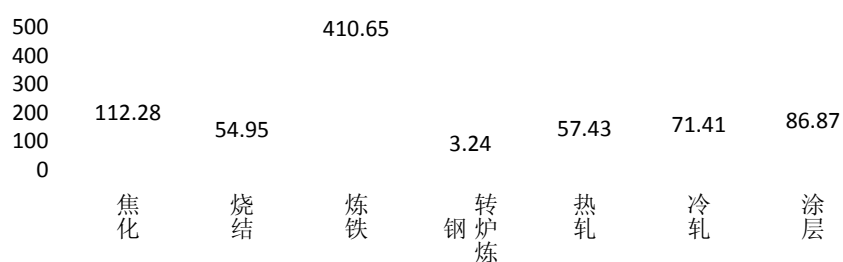


图 2.2 2009 年我国钢铁联合企业各工序能耗的变化 (kgce/t 产品)

图 2.2 表明，钢铁联合企业中，炼铁工序能耗最高，转炉炼钢工序能耗最低，各工序节能重点依次为炼铁、焦化、烧结、轧钢、炼钢。从降低吨钢能耗的占比上，各节能工序依次为炼铁、烧结、焦化、轧钢、炼钢。由于铁前各工序的吨钢能耗占企业能耗的 70%以上，因此钢铁联合企业的节能重点在铁前系统。

钢铁联合企业的节能对策（各生产工序主要节能措施）详见图 2.3。

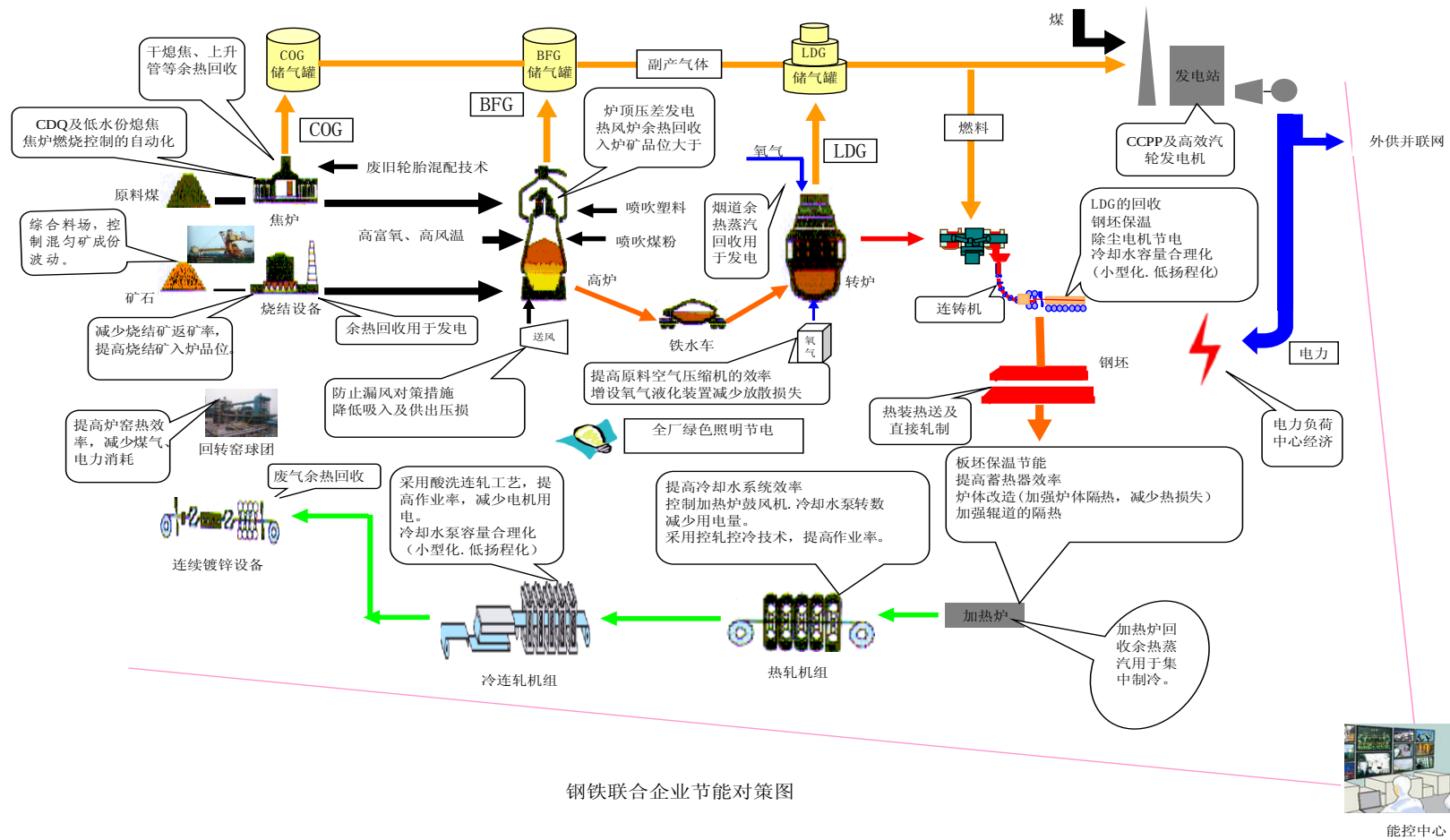


图 23 钢铁联合企业节能对策图

(2) **电炉钢企业**：煤的比重 15~60%，电的比重 20~70%，其他 15~20%；要说明的是电炉钢企业，如配建高炉后，煤的比重大幅增加，电的比重大幅下降；随着电炉吃热铁水的比例增加，电炉的冶炼电耗将由全废钢冶炼时的 520kWh/t 钢，下降到 200kWh/t 钢以下；企业能源结构会发生很大变化，吨钢能耗将由 220kgce/t 钢增加到 480kgce/t 钢。见图 2.4。

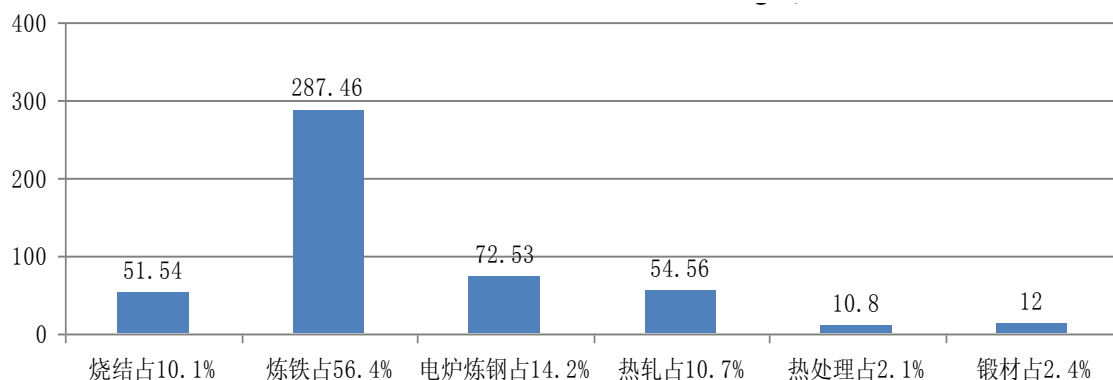


图 2.4 电炉钢企业各工序吨钢能耗的变化 (kgce/t 钢)

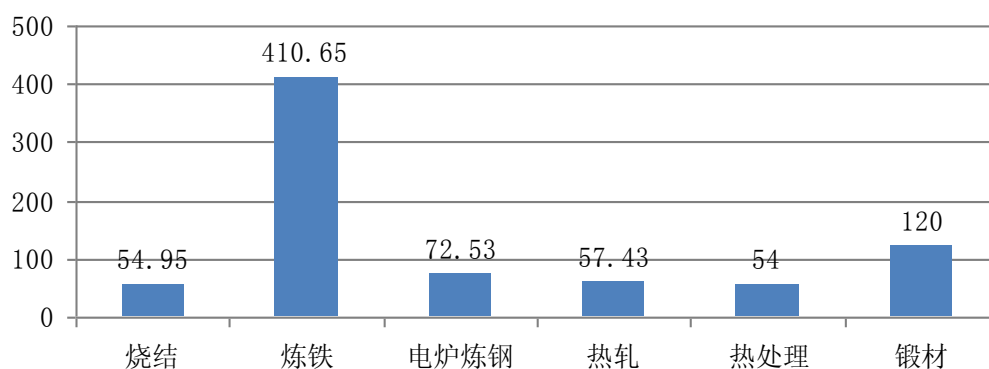
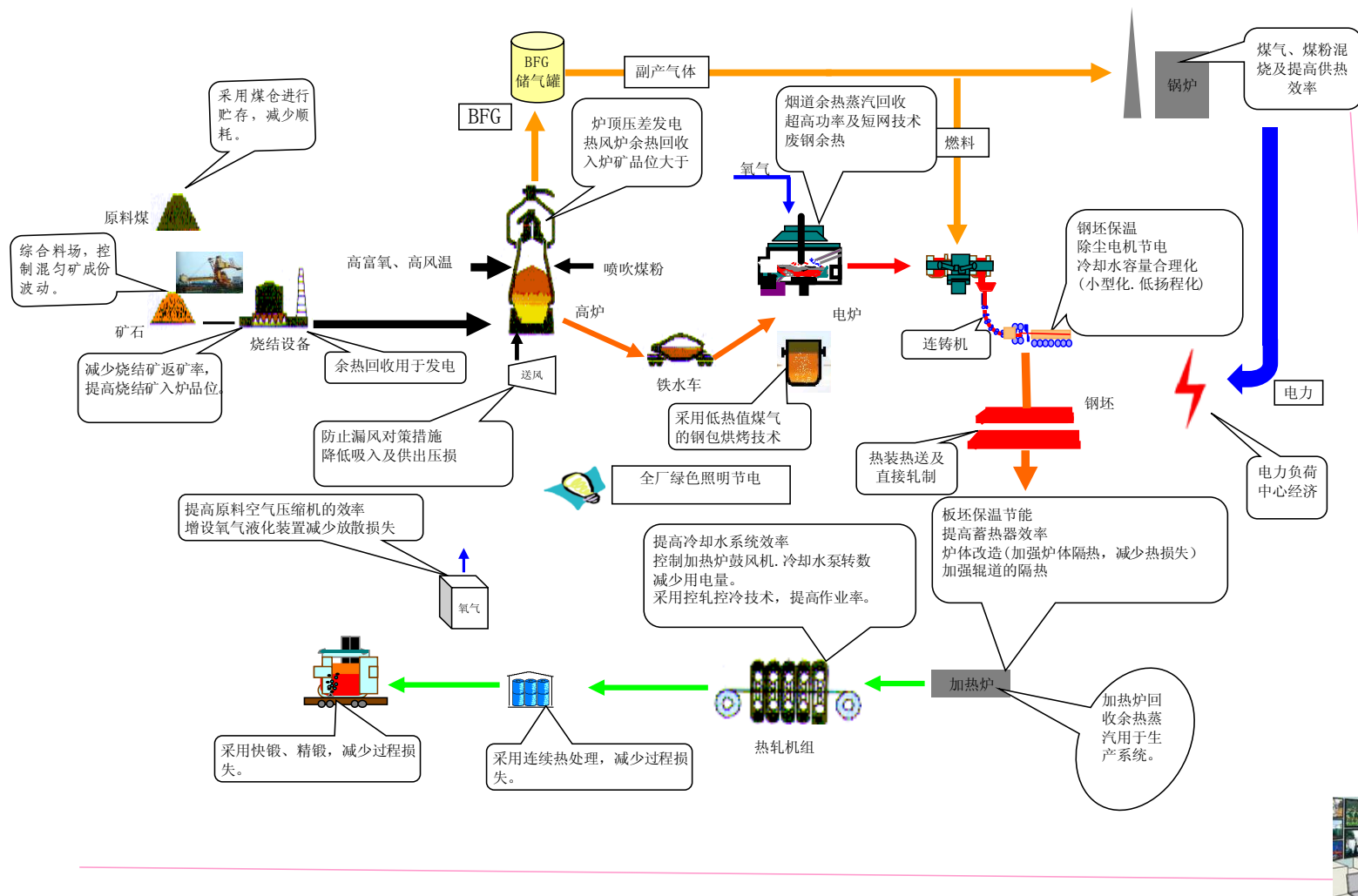


图 2.5 电炉钢企业各生产工序能耗 (kgce/t 产品)

图 2.5 表明，电炉钢企业配建高炉后，炼铁工序能耗最高。各工序节能重点依次为炼铁、电炉、热轧、烧结。由于配建高炉后，铁前各工序的吨钢能耗占企业能耗的 65%以上，因此电炉钢企业的节能重点也在铁前系统，其次是电炉炼钢工序。电炉钢企业的节能对策（各生产工序主要节能措施）详见图 2.6。



电炉钢企业节能对策图

图 2.6 电炉钢企业节能对策图

2.2.2 能源消耗水平

虽然“十一五”期间我国钢铁行业在节能减排上取得很大成绩，但仍存在以下问题：

一是淘汰落后产能的工作依然艰巨。我国钢铁行业还存有 1 亿多吨钢的落后产能，影响了钢铁行业能源利用效率进一步提高。

二是现代化能源管理手段还不能适应钢铁行业节能减排发展需要，企业能源管理工作有待进一步加强。

三是在能源利用上还存在不足和薄弱环节。如部分企业的工序能耗还未达到国家《限额》标准的要求，煤气损耗的绝对量（值）仍然较高，二次能源利用率还有待进一步提高，特别是低温余热利用方面还有一定潜力。在系统节电上，还存在落后的电器设备，企业电力调度尚未形成数字化、自动化的系统，及根据负荷容量合理调整供配电系统等。

四是能源统计口径不能真实反映钢铁行业能源利用效率提高的水平。目前钢铁行业能源消费统计数据主要依据：一是国家统计局公布《中国统计年鉴》中的黑色金属冶炼及压延加工业，其统计范围除钢铁生产企业外，还包括独立的烧结、球团、炼铁、炼钢、轧钢、钢材加工、钢材贸易等类型企业和铁合金企业。其次是钢铁工业协会代表国家发布的《中国钢铁工业年鉴》，其中铁、钢、材为全国产量，但能源消耗及指标仅为会员单位。由于各种统计口径的数据差异，至今很难科学评价出我国钢铁行业能源利用效率提高的真实水平。而以国家统计局黑色金属冶炼及压延加工业的终端能源消费量代表钢铁行业的能源利用水平，由于含有其他类型企业和铁合金企业的能源量，不能反映出钢铁生产企业实际能源消耗和利用水平。钢铁工业协会的能源统计仅为会员单位的能源消耗及指标，能较为真实反映出钢铁生产企业实际能源消耗和利用水平，但不能反映出对应全国铁、钢、材产量下的总能源消耗量和利用水平。因此，要科学评价我国钢铁行业能源利用效率提高水平，能源统计口径应做科学的调整。

2.3 钢铁行业资源消耗情况

2.3.1 水资源消耗特点

钢铁行业是水资源消耗大户，以长流程转炉钢为例，生产 1 吨粗钢用水达 200m^3 左右（含余热发电），经过循环利用，目前吨钢取新水一般在 $4\sim 10\text{m}^3$ 之间，先进水平能达 4m^3 以下，落后水平在 10m^3 左右。

钢铁企业主要生产用水工序有：原料场、焦化、烧结球团、炼铁、炼钢、轧钢；主要辅助生产用水工序的制氧站、余热发电、空压站等。每一个工序用水特

点不同。但钢铁企业用水主要由两部分组成，一部分是设备间接冷却水，在这里，水只是作为一种介质，用过的水只是水温升高，水质没有有害物质的污染。如焦化工序的煤气净化和化产品精制过程中的冷却用水；炼铁工序高炉炉体及热风炉、鼓风机等冷却用水；转炉氧枪及本体、电炉水冷炉壁及炉盖等、连铸结晶器及设备冷却水；轧钢加热炉、液压站及电机冷却水；制氧机、空压机、发电系统冷却等。这种水只需冷却降温后就可循环使用，水资源主要消耗在冷却塔蒸发、风吹等，损失量较少。另一部分是直接冷却水。使用过的水，除水温升高外，水中还含有污染物，不同工序污染物不同。如高炉冲渣水、高炉煤气洗涤水、转炉一次除尘水、连铸冲铁皮水及二次冷却水、轧钢冲氧化铁皮水及轧机冷却水、轧材冷却水等，这部分水需经沉淀、除油、过滤、降温等处理，它除了在水处理过程中有水损失外，在冷却过程中也有损失，如高温轧材表面冷却、连铸坯冷却、冲渣等，另外，由于水中含有污染物，在处理过程中会产生污泥等固体废弃物，固体废弃物中还会带走一部分水份，如高炉水渣含水率一般为 15%，转炉除尘泥、高炉除尘泥含水率好的达 20%左右，差的达 30%以上。因此，这部分的水损耗较大。

根据目前水处理技术水平和钢铁企业用水管理水平，在各工序均采取循环供水、梯级使用等节水措施后，钢铁企业各工序用水除了蒸发、风吹、渗漏、产品带走的水及循环水系统为了维持水质稳定而排出工序外的水量外，再无其它水消耗。而且排出的水，随着污水回用处理技术的发展，钢铁企业为了节水现基本建有全厂性综合污水处理厂，排水经处理后回用于生产水系统，一般回用率达 75%，有的还增加深度处理，除去盐份等，进一步加大回用水量。

各工序用水在钢铁企业中所占比例不同，而且由于采取的节水工艺不同、产品结构不同、产品深加工程度不同而不同，一般情况，轧钢工序、炼铁工序水的损耗量大。各工序用水占比例具体见表 2.1。

表 2.1 我国钢铁各工序用水占比表

工序名称	焦化	炼铁	炼钢	轧钢	其它
用水量占比例（%）	12~16	20~24	14~15	20~40	10~30

2.3.2 矿石资源消耗特点

(1) 我国铁矿资源类型和特点

- ◆ 我国铁矿石多为地下矿，开采难度大，成本高，资源税率高，而且平均品位低，仅为 32%左右。
- ◆ 中小型矿床多，超大型矿床少。

- ◆ 贫铁矿为主，富铁矿资源贫乏。
- ◆ 成因类型多，成矿条件复杂。
- ◆ 铁矿石组成成分复杂，多组分共（伴）生。
- ◆ 难选铁矿多。

（2）我国高炉冶炼原料特点

- ◆ 我国炼铁主要为高炉冶炼，高炉炉料结构以烧结矿为主（一般所占配比 70~80%），炉料结构虽与日本、韩国的炉料结构相似，但日本、韩国原料主要从澳大利亚、巴西等进口优质富矿粉作原料，我国烧结需配备一半左右国产铁精粉。欧盟和美国等由于原料条件和环保原因，逐步取消烧结系统，球团配比较高，烧结也采用进口优质富矿粉作原料，烧结机设备趋于大型化。
- ◆ 我国原料条件由于受市场供应、价格、运输等因素影响，不得不采用一些品质下降的低价矿、含多组分难冶炼铁矿粉，与进口优质富矿粉相比含铁品位低，有害杂质高，给后续污染物的处理带来巨大的压力。
- ◆ 由于钢铁企业铁矿石供应紧张、矿价上涨压力巨大，生产成本高涨。导致生产效益不佳。企业根据生产成本、利润和资源供应情况，采用低成本的冶炼战略，配加部分廉价矿冶炼，导致入炉品位有所下降。近年来高炉炼铁入炉品位波动较大，且入炉矿石有稳中下降的趋势，2009 年入炉矿石品位 57.62%，2008 年入炉品位 57.32%，2007 年入炉品位 57.71%。

（3）矿石资源利用趋势

未来 10 年随着我国经济发展，钢材刚性需求将会使我国钢产量保持较高水平，由于我国废钢积累量还不能满足工艺生产调整结构的需求，以长流程为主的生产结构，决定了我国矿石也处于高需求状态。因此，利用好国内外两种矿石资源仍将是我国钢铁行业长期资源保障的战略特点。预计未来 10 年我国自产与进口矿石的比例仍将保持在各为 50%的状态下。

2.3.3 炼焦煤资源消耗特点

（1）我国煤炭及炼焦煤资源概况

截至到 2008 年底，我国已查明煤炭资源储量分类及比例见表 2.2。

表 2.2 2008 年我国已查明煤炭资源储量及分类

项目	数量（10 ⁸ t）	所占比例%
全国总计	11750	100

一、炼焦用煤	2828	24.06
1. 气煤	1162	9.89
2. 肥煤	512	4.36
3. 焦煤	648	5.51
4. 瘦煤	441	3.75
5. 未分类	65	0.55
二、非炼焦用煤	8750	74.47
三、分类不明煤	172	1.47

（2）我国煤资源主要特点

①我国煤炭资源总量丰富，但人均占有量不高

我国煤炭资源储量丰富，查明煤炭资源储量 11750 亿 t，已探明可采储量约 2168 亿 t，仅次于美国和俄罗斯，约占世界已探明可采储量 11.50%。虽然我国已探明可采储量在世界主要产煤国家中占第 3 位，但由于我国人口众多，人均已探明可采储量只有世界人均已探明可采储量的一半左右（55%）。由此可见，我国人均煤炭可采储量并不丰富，仅居世界中下水平。

②煤炭资源分布不均

我国煤炭资源在地区分布上是极不平衡的，总体特征是北多南少，西多东少，山西和西北最富集。仅秦岭、大别山一线以北的煤炭储量就约占全国总储量 90.7%，且集中分布在晋、陕、蒙三省（区），约占全国 65%。而秦岭、大别山以南地区只占全国煤炭储量 9.3%，且集中分布在贵州和云南两省，约占秦岭、大别山以南地区储量 73%。

我国煤炭资源煤种齐全，有无烟煤、烟煤、褐煤等。在全国已经查证的煤炭资源储量中，低变质烟煤占 38~40%，主要分布于陕西、内蒙、新疆、山西、宁夏；中变质烟煤即炼焦用煤（包括气煤、肥煤、焦煤、瘦煤）占 25~27%，主要分布在山西、安徽、山东；贫煤和无烟煤占 20~22%，主要分布在山西、贵州、河南；褐煤占 15~16%，主要分布在内蒙和云南。由此可以看出，虽然我国煤炭资源煤类品种齐全，但分布结构不均衡。优质动力煤、化工用煤及炼焦用煤等优质煤资源数量较少，大部分集中在山西、陕西、内蒙等地。

③我国钢铁行业焦炭用炼焦煤查明资源储量特点

- ◆ 分布不均匀，在局部地区相对集中。山西省炼焦煤储量占全国炼焦煤储量 56.9%，其他储量较多的有安徽（占 8.4%）、山东（占 5.3%）、贵州（占 3.7%）、黑龙江（占 3.6%）、河北（占 3.3%）、河南（占 3.1%）等省。

- ◆ 煤种比例与需要相比极不协调。气煤占炼焦煤总储量的 40.7%，肥煤占 18.1%，焦煤占 23.2%，瘦煤占 15.9%。说明我国炼焦煤以高挥发分气煤为主，强粘结性肥煤和焦煤较少。
- ◆ 各煤种质量及可洗性差别较大。一般强粘结性肥煤和焦煤的灰分较高，可洗性较差。
- ◆ 在已探明可采的炼焦煤中，中灰、中硫炼焦煤居多，而低灰、低硫优质炼焦煤较少。

(3) 我国煤炭消费分析

2009 年我国生产煤炭 30.5 亿 t，约占世界煤炭总产量 43.5%，是世界最大产煤国家，已连续十年以上占居世界第一。

2009 年我国煤炭表观消费量为 31.4 亿 t，净进口约 8500 万 t，约占世界煤炭总消费量 44.5%。其中，炼焦煤占进口总量的 40%，供需矛盾日渐凸显，对我国钢铁行业的资源保障形成巨大制约。

目前我国在煤炭分类消费中，燃料（主要用于发电）比例最大，占煤炭总消费量 74~75%，煤化工占 25~26%。我国煤炭主要用途及主要产品构成见下图。

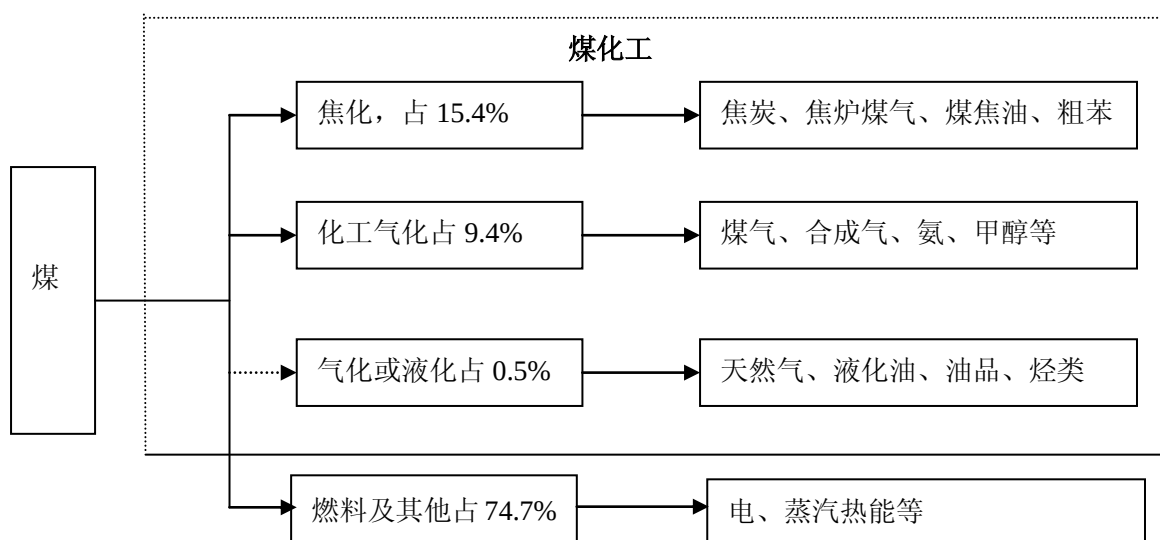


图 2.7 我国煤炭主要用途及产品构成

(4) 炼焦煤资源耗用趋势

- ◆ 预计今后随着我国宏观经济发展仍将保持较高速度增长，对煤炭及加工品需求也将继续保持稳步增长。
- ◆ 预计到 2015 年我国主焦煤仍将处于供不应求状态。

2.3.4 废钢资源消耗特点

废钢铁作为再生资源，是钢铁工业的重要原料之一，废钢铁的大量使用对降

低工业的能源消耗，降低铁矿石的消费量，以及减少环境污染等方面均具有重要意义。与世界发达国家相比，由于我国还处在工业化、城镇化的发展过程中，废钢积蓄量有限，造成我国废钢资源缺乏；废钢资源，以企业自产和社会废钢为主，折旧废钢比例较低，废钢平均回收率远低于世界平均水平。在世界发达国家，如欧洲各国、美国、日本等国家和地区，钢铁蓄积量较大，废钢资源丰富，基本能够满足钢铁工业发展所需要的废钢原料，而中国由于钢铁蓄积量相对较低，不能满足生产需要。

我国废钢加工利用水平与国外相比也有较大差距，主要表现在废钢的分选、切碎、打包、压块等、稳定化学成分、减少有害杂质等加工处理环节上。世界先进产钢国的废钢加工设备已趋向高效、节能等方向发展，入炉废钢的机械加工率达 95%以上，而我国废钢的加工绝大部分通过人工和简单机械完成，机械加工量不足废钢回收量的 10%。

2.4 钢铁行业污染物排放情况

2.4.1 污染物排放特点

由于钢铁企业大规模地使用大量的能源，多种污染物将不可避免地产生，给环境方面带来非常大的影响。在钢铁企业中的环境污染有大气污染、水污染、固体废弃物、噪声等，其中与大气污染有关的主要是烟尘、粉尘、硫化物、氮氧化物、二噁英等。水质污染主要是 COD、石油类、氨氮、酚氰等。钢铁企业不同生产工序产污节点不同，产生的污染物类别也不相同。下面分工序以流程图的形式说明产污节点及污染物类别。

（1）钢铁企业各工序产生的大气污染物

从图中可知，钢铁企业大气污染物主要来源于铁前系统，即焦化、炼铁、烧结球团等工序。污染物主要是粉尘、烟尘、有机气体、 SO_x 、 NO_x 、二噁英等。其中 SO_x 主要来源于烧结工序，一般占钢铁企业产生二氧化硫的 60~70%，企业无烧煤锅炉、焦炉煤气经脱硫后 H_2S 含量小于 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 以下时则占到 85%以上；二噁英主要来源于烧结（另电炉炼钢工序也产生）；这也是钢铁企业重点治理减排的对象，也是钢铁企业最具有减排潜力的地方。 NO_x 来自烧结和钢铁企业各种工业炉窑，随着钢铁企业能源结构的变化及工业炉窑蓄热技术的发展，目前 NO_x 以烧结工序排放为主， NO_x 浓度一般在 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ 左右，浓度较低。

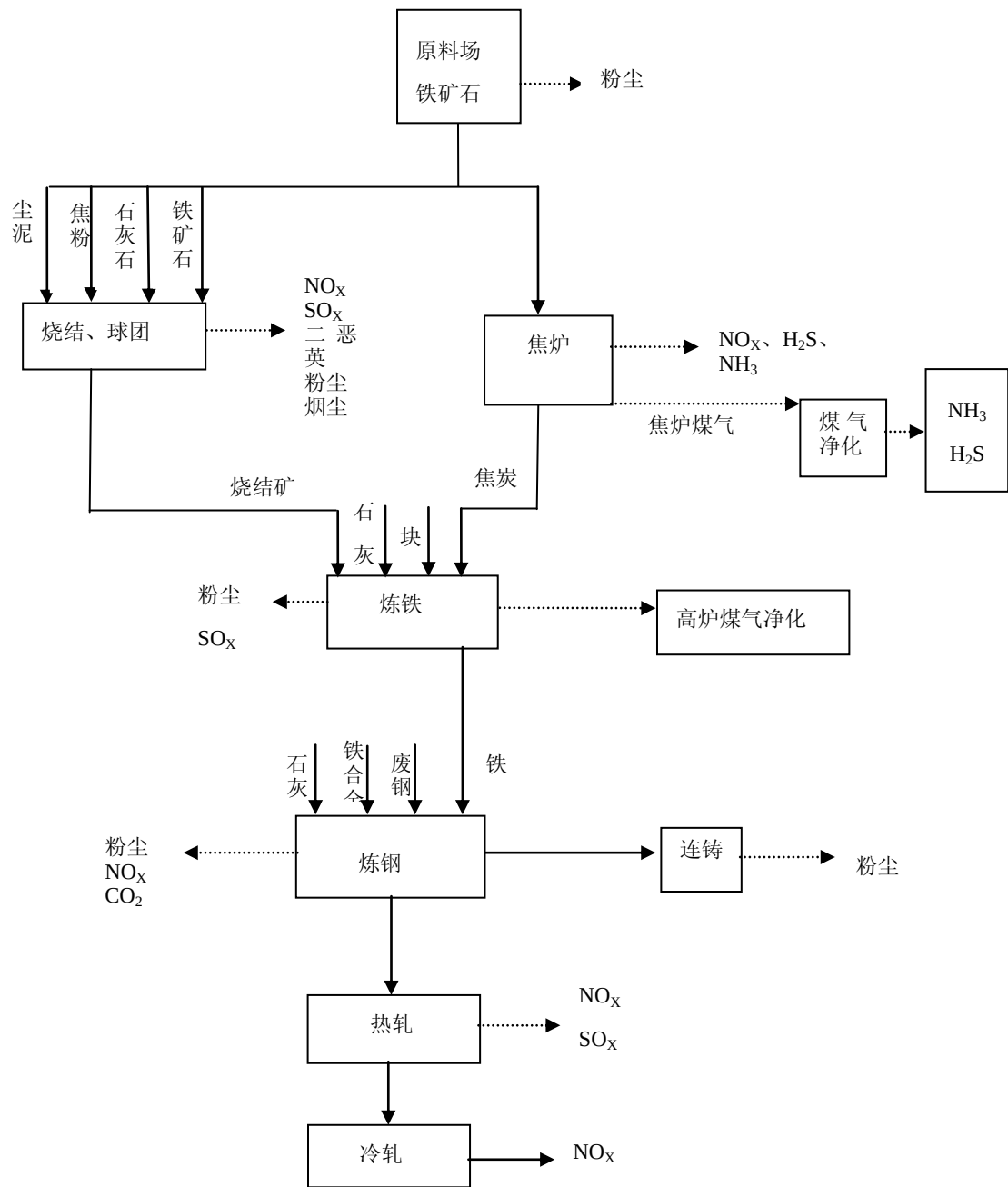


图 2.8 钢铁企业各工序产生的大气污染物

(2) 钢铁企业各工序产生废水中的污染物

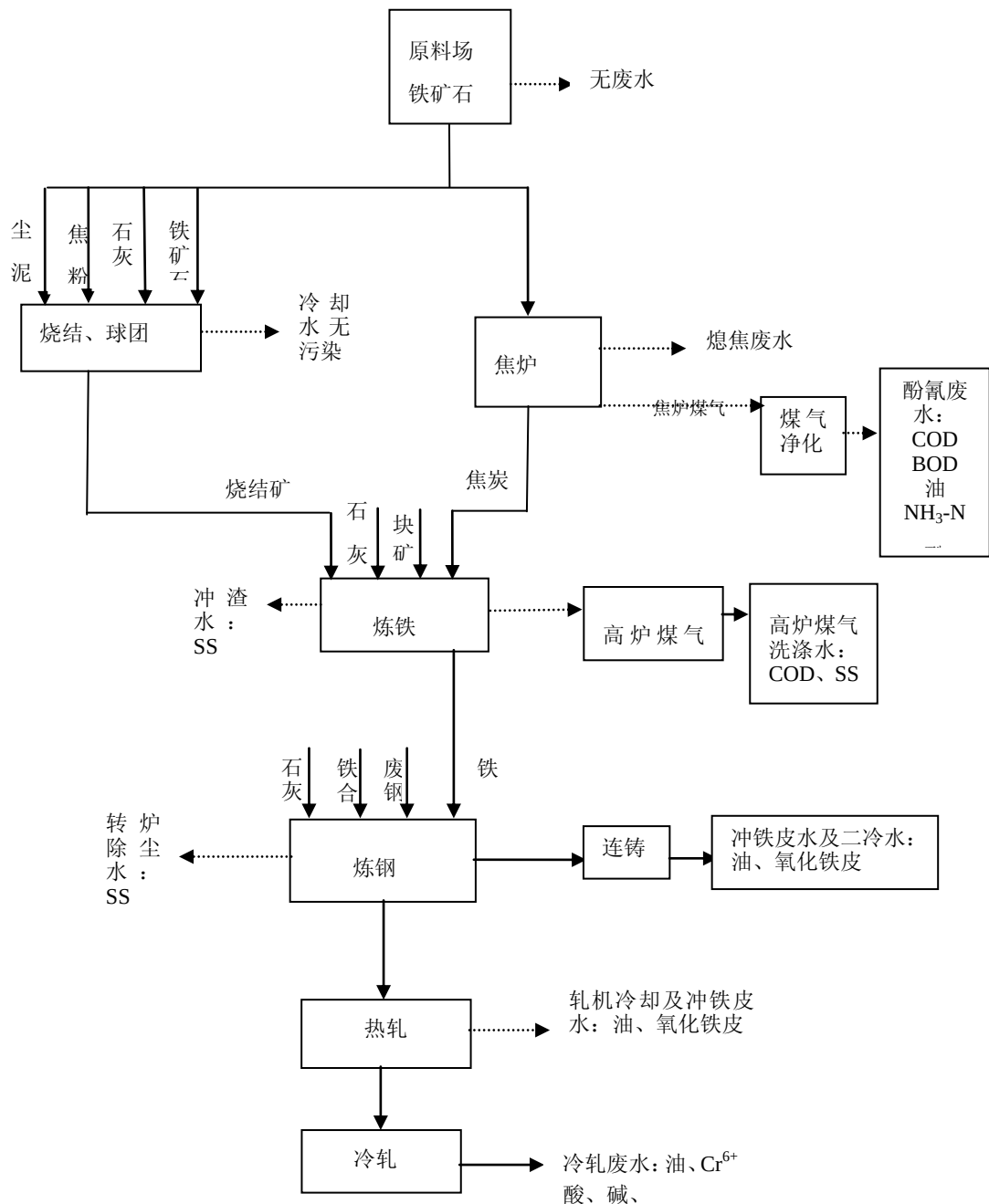


图 2.9 钢铁企业各工序产生的废水污染物

从钢铁企业废水排污节点可看出，钢铁企业废水污染物主要来源于焦化、炼铁、炼钢、轧钢工序。钢铁企业废水一般可经处理后循环使用，目前除最难治理的焦化酚氰废水和冷轧废水外，其它各工序废水循环利用率基本都在 95%以上。只有焦化酚氰废水和冷轧废水目前经处理后部分回用于低质水用户，部分排入污水处理厂，影响污水处理厂的效果，而且影响全厂污水回用。也是钢铁企业 COD、氨氮、石油类污染物的主要来源。目前可采取深度处理后回用于生产水系统，但

运行成本高，这是钢铁企业今后一段时间内重点减排 COD 的潜力所在。

(3) 固体废弃物产生及排放特点

钢铁生产固体废弃物，主要包括高炉渣、钢渣、各类尘泥、粉煤灰渣以及工业垃圾等。目前，我国钢铁工业面临着资源有限和环保的巨大压力，面对压力，我国钢铁企业以“减量、再用、循环”的原则探索着一种“资源—产品—再生资源—再生产品”循环经济模式。在降低消耗、减少废弃物产生量以及降低排放资源综合利用方面取得了很大成绩。其固体废弃物排放特点：

①**钢铁联合企业**，吨钢固体废弃物产生量约 600kg；其中，高炉渣 340kg/t 铁，转炉渣 150kg/t 钢，氧化铁皮 40kg/t 钢，含铁尘泥 50kg/t 钢，其他固废 20kg/t 钢（耐火材料等）。含铁固废通常返回铁前系统加以综合利用；高、转炉渣经加工进行综合利用；其他固废，均以工业固废填埋。

②**电炉钢企业**，吨钢固体废弃物产生量约 400kg；其中，高炉渣 400kg/t 铁（需按铁钢比折算到吨钢产生量上），电炉渣 160kg/t 钢，氧化铁皮 20kg/t 钢，含铁尘泥 20kg/t 钢，其他固废 10kg/t 钢（耐火材料等）。含铁固废通常返回铁前系统加以综合利用；高、电炉渣经加工进行综合利用；其他固废，均以工业固废填埋。

因此，在钢铁行业中，铁渣和钢渣是两项数量最大的固体废弃物，也是钢铁行业减量化的重点。当行（企）业铁钢比确定后，减量化的主要措施是实施“精料方针”，以从源头上减少物料消耗；并要实现装备的大型化，连续化和形成固废加工产业园区或基地。

2.4.2 污染物排放水平

(1) 水污染物排放水平

表 2.3 水污染物排放水平

污染物排放指标	单位	排放水平		
		国内平均	国内先进	国际先进
COD	kg/t 钢	0.09	0.02	0.008
氨氮	kg/t 钢	0.008	0.003	/

(2) 大气污染物排放水平

表 2.4 大气污染物排放水平

污染物排放指标	单位	排放水平		
		国内平均	国内先进	国际先进

SO ₂	kg/t 钢	2.0	1.0	/
烟粉尘	kg/t 钢	1.35	0.52	/

(3) 固体废弃物综合利用水平

我国钢铁行业固体废弃物减排与综合利用的水平指标及与国外先进钢铁企业相关指标对比，详见表 2.5。

表 2.5 钢铁行业固体废弃物减排与综合利用水平

减排与综合利用 指 标	单 位	综合利用水平		
		国内一般	国内先进	国际先进
吨钢固体废弃物产生量	kg/t 钢	580	530	510~540
吨铁高炉渣产生量	kg/t 铁	340	300	≤300
吨钢钢渣产生量	kg/t 钢	140	110	≤110
固体废弃物综合利用率	%	95	99	≥99
高炉渣利用率	%	98	100	100
钢渣利用率	%	93	99	100
尘泥及氧化铁皮利用率	%	99	100	100

由表 2.5 可以看出：

- ◆ 我国钢铁生产在固体废弃物减量化和综合利用方面，一般企业与先进企业相比存在明显的差距。而国内先进水平与国际先进水平已基本看齐。
- ◆ 在钢铁行业中，钢铁联合企业与电炉钢企业在吨钢固体废弃物产生量指标上差别很大，说明“短流程”工艺在减排与综合利用方面有较强的优势。即使同为钢铁联合企业或电炉钢企业，只要尽可能降低铁钢比（即生产过程减少物料消耗），也会带来显著的减排效果。
- ◆ 在固体废弃物种类中，钢渣（转炉、电炉）的综合利用率是最低的，因此未来减排的重点应放在提高钢渣综合利用上，利用率提高了，排放量自然减少，这是钢铁企业减排的重点。

第三章 钢铁行业技术发展现状

3.1 行业技术结构

“十一五”期间钢铁行业积极贯彻国家钢铁产业政策，以大型化、现代化和采用先进节能技术，使各主体设施的工序能耗、吨钢综合能耗不断下降。“十一五”期间在中国钢铁工业协会积极组织下，行业以推广“三干、三利用”为主要节能措施（三干”即干熄焦、高炉干法除尘、转炉干法除尘；“三利用”可燃气体、工业用水和工业废弃物的全面回收和综合利用），节能降耗取得了明显效果，进一步缩小了与国外先进钢铁行业在能源利用上的差距。

在环境保护方面，我国钢铁行业粉尘治理技术已达到国际先进水平，一般采用布袋除尘器和电除尘器。布袋除尘器除尘效率达 99.5%以上，废气排放烟粉尘浓度能控制在小于 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，电除尘器除尘效率 99%以上，运行管理好的企业废气排放烟粉尘浓度控制在 $80\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，好的在 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

烧结球团工序烟气脱硫技术目前有多种，但适合烧结烟气特点和国际环保治理趋势的脱硫技术应是具有脱除多种污染物潜力的干法脱除技术。主要有 LJS 循环流化床法，活性炭吸附法，SDA 法（适合小烟气量、低 SO_2 浓度）等。

钢铁企业废水末端治理技术较多。目前用于治理煤气洗涤、湿法除尘的技术主要是沉淀（沉淀池的型式有幅射式、斜管式、斜板式等）冷却，属于成熟处理技术，效果良好。用于连铸、轧钢冲铁皮及轧机冷却、二冷却的水处理技术主要有：沉淀、除油、过滤、冷却。沉淀有、旋流池、平流池式、稀土磁盘式、化学除油器等，属于成熟处理技术，效果均较好，采用也很普遍。

焦化酚氰废水治理技术较多，目前主要有 A_2/O 、 A/O_2 以及 $\text{O}-\text{A}/\text{O}$ 法，经处理后，COD 小于 $150\text{mg}/\text{l}$ ，氨氮小于 $15\text{mg}/\text{l}$ 。

冷轧废水治理技术主要是酸、碱废水中和处理技术；含油废水处理技术；含铬废水处理技术；酸、碱废水中和技术主要是采用一、二段中和曝气加混凝沉淀技术；含油废水处理技术主要是纸过滤加超滤然后进行生物处理或进入酸碱废水的后续处理系统的技术；含铬废水主要是采用化学还原处理技术。

综合污水处理回用技术是指将钢铁企业各工序循环水系统排污水、特殊废水处理后的排水及少量生活污水收集处理后回用于生产水系统的末端治理技术。目前钢铁行业综合污水处理工艺主要为絮凝、沉淀、过滤，主要去除 SS、COD 等，典型的效果好的是采用高密度澄清池+V 型滤池的工艺。为了提高钢铁企业综合污水回用率，保障回用水质安全，现又将部分综合污水脱盐后再进行回用，或供锅炉等用户使用。针对综合污水处理后的水质，最经济、高效的脱盐方法有膜分

离技术和电吸附技术。

围绕钢铁产业调整振兴规划和实现行业节能减排的战略目标，研究适用于我国钢铁工业实际情况的节能减排技术，经行业专家评估及筛选，提出适合在行业内推广的 46 项节能减排技术清单和 14 项重点关注的前沿新技术。这些节能技术主要分布在钢铁联合企业（长流程）即：烧结、焦化、炼铁、转炉炼钢、轧钢等主要工序（重点研究工序是前 3 个）。

电炉钢（短流程）即：烧结、炼铁、电炉炼钢、轧钢等主要工序，其中电炉钢企业如配建有烧结和炼铁工序，节能减排技术可参照联合企业相关工序。

研究基于工序的节能减排特征指标，通过节能减排技术筛选辅助系统，开展节能减排技术筛选与评估。根据钢铁生产企业特点、各类技术在生产过程中的功能及前沿性技术细分为，生产过程节能减排技术、资源能源回收利用技术、污染物治理技术、综合性节能减排技术及重点关注的新技术共计五大类，见表 3.1。

表 3.1 筛选出的钢铁行业节能减排技术清单

序号	技术名称	工序
一	生产过程节能减排技术	
1	煤调湿技术（CMC）	焦化
2	捣固炼焦技术	焦化
3	小球烧结工艺技术	烧结
4	降低烧结漏风率技术	烧结
5	低温烧结工艺技术	烧结
6	厚料层烧结技术	球团
7	链篦机-回转窑球团生产技术	炼铁
8	高炉炼铁精料技术	炼铁
9	高炉高效喷煤技术	炼铁
10	高炉脱湿鼓风技术	炼铁
11	转炉“负能炼钢”工艺技术	炼钢
12	炼钢连铸优化调度技术	炼钢
13	高效连铸技术	炼钢
14	薄板坯连铸技术	炼钢
15	废钢加工分类预处理技术	炼钢
16	电炉优化供电技术	炼钢

序号	技术名称	工序
17	连铸坯热装热送技术	轧钢
18	低温轧制技术	轧钢
19	热带无头轧制、半无头轧制技术	轧钢
20	在线热处理技术	轧钢
小计	20 项	
二	资源能源回收利用技术	
1	干熄焦技术	焦化
2	烧结余热回收利用技术（发电）	烧结
3	球团废热循环利用技术	球团
4	高炉炉顶煤气干式余压发电技术（TRT）	炼铁
5	高炉热风炉双预热技术	炼铁
6	高炉煤气汽动鼓风技术	炼铁
7	转底炉处理含铁尘泥技术	提高固废资源利用
8	高炉渣综合利用技术	提高固废资源利用
9	转炉烟气高效利用技术	炼钢余热资源利用
10	电炉烟气余热回收利用除尘技术	炼钢余热资源利用
11	钢渣处理及综合利用技术	提高固废资源利用
12	轧钢加热炉蓄热式燃烧技术	提高能源利用效率
13	轧钢氧化铁皮资源化技术	提高固废资源利用
小计	13 项	
三	污染物治理控制技术	
1	焦炉煤气高效脱硫净化技术	焦化
2	焦化酚氰污水处理技术	焦化
3	烧结烟气湿法脱硫技术	烧结
4	烧结烟气半干法或干法脱硫技术	烧结
5	高炉煤气干法布袋除尘技术	高炉
6	转炉烟气干法除尘技术	炼钢
7	塑烧板除尘技术	热轧
小计	7 项	

序号	技术名称	工序
四	综合性节能减排技术	
1	能源管理中心	综合管理
2	燃气-蒸汽联合循环发电技术	提高二次能源利用
3	全燃高炉煤气锅炉发电技术	提高二次能源利用
4	原料场粉尘抑制技术	铁前
5	双膜法污水处理回用技术	提高水资源利用
6	絮凝沉淀+V 型滤池污水处理技术	提高水资源利用
小计	6 项	
共计	46 项	
五	重点关注的新技术	
(一)	工艺过程节能减排技术	
1	SCOPE21 炼焦技术	焦化
2	非高炉冶炼技术	炼铁
3	薄带连铸技术	炼钢
4	精炼干式真空泵脱气技术	炼钢
(二)	资源、能源回收利用技术	
1	焦炉处理废塑料技术	焦化
2	高炉喷吹焦炉煤气技术	炼铁
3	高炉喷吹废塑料技术	炼铁
4	高炉炉顶煤气循环技术	炼铁
5	炼钢熔渣粒化新技术	炼钢
6	不锈钢渣干法处理技术	炼钢
(三)	污染物治理技术	
1	烧结烟气选择性脱硫技术	烧结
2	烧结烟气循环富集脱硫技术	烧结
3	烧结、电炉炼钢中二噁英类物质的减排技术	烧结、电炉
4	炉窑氮氧化物控制技术	各种炉窑
小计	14 项	
合计	60 项	

本指南通过对表 3.1 中的 46 项先进适用技术，在考虑到各种节能减排技术均具有“单向性”特征因素后，节能减排效果评估分析得出：

如选用的某项技术，将会放弃另一项技术的采用，体现的是“单向性”（高效喷吹煤粉和粒煤，CCPP 和全燃煤气锅炉的热电联产等）其节能效果只能选其一种；污染治理上的烧结脱硫减排选择活性炭方法后，不会再选用半干法等等。其次，技术节能运用在各生产工序上的所获得的直接效果是降低工序能耗，所以技术节能的潜力还要看对工序能耗降低的贡献率。因此，可以认为所有单项技术“十二五”期间都会得到选用，但其产生的节能效果应从各种技术得到应用的增长空间和各生产工序可实际获得的节能潜力来分析。因此，技术综合运用的节能潜力必然小于各单项节能技术累加的潜力。

由于污染物减排项目的效益会出现“负值”，且是相对于项目投资而言。如烧结脱硫效益为负值，自然不会有投资回收期的指标。又如，表中高炉精料技术，由于对应的是配矿技术部分，受进口铁矿石价格的变化，只能采用效益/费用比的方法进行经济评价。双膜法污水处理技术同样是受水质成分条件变化，也只能采用效益/费用比的方法进行经济评价。

3.2 行业技术水平

通过调查先进适用技术在市场中所占份额（技术普及率），技术水平和未来发展方向，将上述 60 项技术水平评价列于下表。分为：生产过程节能减排技术、资源能源回收利用技术、污染治理技术。

3.2.1 生产过程节能减排技术

表 3.2 生产过程节能减排技术清单

序号	技术名称	工序	技术水平等级			
			国内先进	国内领先	国际先进	国际领先
一	生产过程节能减排技术					
1	煤调湿技术（CMC）	焦化	✓			
2	捣固炼焦技术	焦化			✓	
3	SCOPE21 炼焦技术（前沿）	焦化				✓
4	小球烧结工艺技术	烧结			✓	
5	降低烧结漏风率技术	烧结	✓			
6	低温烧结工艺技术	烧结	✓			

7	厚料层烧结技术	球团		✓		
8	链篦机-回转窑球团生产技术	炼铁	✓			
9	高炉炼铁精料技术	炼铁	✓			
10	高炉浓相高效喷煤技术	炼铁	✓			
11	高炉喷吹焦炉煤气技术	炼铁				✓
12	高炉喷吹废塑料技术	炼铁				✓
13	高炉脱湿鼓风技术	炼铁	✓			
14	非高炉冶炼技术	炼铁				✓
15	精炼干式真空泵脱气技术	炼钢				✓
16	转炉“负能炼钢”工艺技术	炼钢	✓			
17	炼钢连铸优化调度技术	炼钢	✓			
18	高效连铸技术	炼钢	✓			
19	薄带连铸技术	炼钢				✓
20	薄板坯连铸技术	炼钢			✓	
21	废钢加工分类预处理技术	炼钢	✓			
22	电炉优化供电技术	炼钢	✓			
23	连铸坯热装热送技术	轧钢	✓			
24	低温轧制技术	轧钢	✓			
25	热带无头轧制、半无头轧制技术	轧钢			✓	
26	在线热处理技术	轧钢	✓			
27	能源管理中心	全厂		✓		

表 3.2 中的国内先进技术系指已在各生产工序中应用，其技术指标优于一般通用技术。其中，高炉脱湿鼓风技术应为国内先进，在应用上要结合企业自身环境条件和原燃料的特点进行选用。国内先进技术共计 15 项，占 27 项的 55.5%。

国内领先进技术系指，其技术达到国际一流水平，有很高的技术含量。如能源管理中心是以工业信息化技术带动企业整体能源利用效率提高，不但要结合企业工艺过程自动化程度满足产品要求，又要最大限度的降低能源消耗量；不但要提升企业自动化功能的技术水平，还要提高企业技术管理水平。

国内领先技术共计 2 项，占 27 项的 7.4%。

国际先进技术系指其技术和指标为世界公认先进水平，如高温高压干熄焦技术与一般中温中压技术相比，能源回收效率提高了 10%~15%，且有很好的经济

效益。国际先进技术共计 4 项，占 27 项的 14.8%。

国际领先技术系指，有重大工艺技术革命，使其生产过程产生更大幅度降低能耗或污染减排。可作为发展方向提出。其中，高炉炉顶煤气循环技术-新型无氮气高炉技术（TGR-BF）属于 CO₂ 减排技术，国外正在研发之中，国内也已开始研发。国际领先技术共计 6 项，占 22.2%。

上述生产技术，在国内先进等级中，属于工艺生产技术，不是所有钢铁企业均能适用，因此不能用市场份额的推广百分比进行表述。

3.2.2 资源能源回收利用技术

表 3.3 资源、能源回收利用技术清单

序号	技术名称	工序	技术水平等级			
			国内先进	国内领先	国际先进	国际领先
二	资源、能源回收利用技术					
1	高温高压干熄焦技术	焦化			✓	
2	焦炉处理废塑料技术	焦化				✓
3	烧结余热回收利用技术	烧结		✓		
4	球团废热循环利用技术	球团	✓			
5	高炉干式余压发电技术（TRT）	炼铁		✓		
6	高炉渣综合利用技术	炼铁	✓			
7	高炉热风炉双预热技术	炼铁			✓	
8	高炉汽动鼓风技术	炼铁	✓			
9	高炉炉顶煤气循环技术（前沿）	炼铁				✓
10	炼钢熔渣粒化新技术（前沿）	炼钢				✓
11	不锈钢渣干法处理技术	炼钢			✓	
12	燃气-蒸汽联合循环发电技术（CCPP）	提高二次能源利用			✓	
13	全燃高炉煤气锅炉发电技术	提高二次能源利用	✓			
14	转炉烟气高效利用技术	炼钢余热资源	✓			

		利用				
15	电炉烟气余热回收利用除尘技术	炼钢余热资源利用	✓			
16	轧钢加热炉蓄热式燃烧技术	提高能源利用效率	✓			
17	轧钢氧化铁皮资源化技术	提高固废资源利用	✓			
18	转底炉处理含铁尘泥技术	提高固废资源利用		✓		
19	钢渣处理及综合利用技术	提高固废资源利用	✓			
20	双膜法污水处理回用技术	提高水资源利用	✓			
21	絮凝沉淀+V型滤池污水处理技术	提高水资源利用	✓			

上表国内先进技术，共计 11 项，占 21 项的 52.4%。国内领先进技术中，共计 3 项，占 14.3%。国际先进技术 4 项，占 19%。国际领先技术 3 项，占 14.3%。

3.2.3 污染物治理技术

表 3.4 污染物治理技术清单

序号	技术名称	工序	技术水平等级			
			国内先进	国内领先	国际先进	国际领先
三	污染物治理技术					
1	焦炉煤气高效脱硫净化技术	焦化	✓			
2	焦化酚氰污水处理技术	焦化	✓			
3	烧结烟气湿法脱硫技术	烧结	✓			
4	烧结烟气半干法或干法脱硫技术	烧结	✓			

5	烧结烟气选择性脱硫技术	烧结				✓
6	烧结烟气循环富集脱硫技术	烧结				✓
7	烧结、电炉二噁英控制技术	烧结、电炉				✓
8	原料场粉尘抑制技术	铁前	✓			
9	高炉煤气干法除尘技术	高炉		✓		
10	转炉干法除尘技术	炼钢			✓	
11	塑烧板除尘技术	热轧	✓			
12	炉窑氮氧化物控制技术	各种炉窑			✓	

上表国内先进技术，共计 6 项，占 12 项的 50%。国内领先进技术 1 项，占 8.3%。国际先进 2 项，占 16.7。国际领先技术，共计 3 项，占 25%。

国际领先技术中，Corex、Finex、Hismelt 非高炉冶炼技术，从产品看（热铁水用于炼钢）可以归结为生产工艺技术；从减轻污染物排放水平上看，确比高炉流程占有较大优势；所以将此技术列为污染物减排技术。

第四章 钢铁行业节能减排先进适用技术

第一节 焦化工序

焦化就是将炼焦煤在隔绝空气中加热到 950~1050℃，经过干燥、热解、熔融、黏结、固化、收缩等阶段最终制得焦炭的过程。炼焦的产物是焦炭和粗煤气，1 吨煤约 75%变成焦炭、25%变成粗煤气。将粗煤气进行加工处理，可以得到多种化工产品和净焦炉煤气。

焦化厂是能源转换工厂，生产 1 吨焦炭要消耗 1.33~1.35t 洗精煤、185m³ 的焦炉煤气（或 970 m³ 高炉煤气），并产生 420 m³ 焦炉煤气，在巨大的能源转换过程中节能潜力很大。在焦化工序中，炼焦过程的能耗占整个焦化工序能耗的 70%~80%。所以，降低炼焦过程能源消耗水平是降低焦化工序能耗的重中之重。在炼焦过程中，能源的最大消耗主要是焦炉加热用煤气的消耗，煤气燃烧所产生的热量除了焦炉本体的散热和燃烧废气带走的热量外，绝大多数被焦炉的产物带出，其中焦炭的显热居第一位，荒煤气的显热居第二位，两者合计占焦炉总输出热量的 70%以上。

焦炉支出热具体可分成四个部分：

◆ 从焦炉炭化室推出的 950~1050℃红焦带出的显热（高温余热）占焦炉支出热的 37%。当采用湿法熄焦时，这部分热量被浪费掉，而干熄焦技术回收了其中 80%的热量。一般每熄 1 t 焦炭可产生 5.2 MPa、480℃的蒸汽 0.5 t 以上，降低焦化工序能耗 40 ~60 kg/t，节能效果非常显著。

◆ 从炭化室经上升管逸出的 650~700℃焦炉荒煤气带出热（中温余热）占焦炉支出热的 36%。为了冷却高温的荒煤气必须喷洒大量 70~75℃的循环氨水，高温荒煤气带出热因循环氨水的大量蒸发而浪费。因此，回收荒煤气余热技术将是低碳焦化重点研究和推广实施的技术。当前，人们在研究用导热油回收这部分热量，并加以充分利用。

◆ 180~230℃焦炉烟道废气带出热（低温余热）占焦炉支出热的 17%。新日铁室兰制铁所将其用于流化床煤调湿装置，济钢将其用于移动隔板式流化床分级煤调湿装置。

◆ 炉体表面热损失占焦炉支出热的 10%，应采取隔热措施，加强炉体保温，尽量减少炉体表面的热损失。

降低炼焦耗热量，加强余热的回收利用，提高水的重复利用率，减少电力、蒸汽和水等的消耗是炼焦工序节能降耗的方向。

焦炉荒煤气中含有许多种杂质，一般含硫化氢 $4\sim 8\text{g}/\text{m}^3$ ，含氨 $4\sim 9\text{g}/\text{m}^3$ ，含氰化氢 $0.5\sim 1.5\text{g}/\text{m}^3$ 。硫化氢及其燃烧产物二氧化硫对人身均有毒性，需要进行脱硫处理。

焦化废水的成分非常复杂，可生化性差，单独的物化法或单独的生化法都难以实现对废水的达标排放。因此，应采取各种工艺的合理组合，但最终的工艺选择应以废水特性、氨氮浓度、企业经济状况、现场条件、管理水平为依据。

因此，焦炉煤气的净化和焦化废水的处理是焦化工序减排的重要环节。

1.1 煤调湿技术（CMC）

1.1.1 技术介绍

煤调湿技术（Coal Moisture Control，简称CMC），是将炼焦煤在装炉前去掉一部分水分，使入炉煤水分控制在6%左右，并确保入炉煤水分稳定的一项技术。煤调湿技术不仅可增加装入煤的堆密度，提高焦炭强度，提高炼焦生产能力，而且可以减少焦化废水排放量，达到降低成本和节能减排、清洁生产的目的。

煤调湿技术不同于煤预热和煤干燥，其有严格的水分控制措施，能确保入炉煤水分的恒定。该技术通过直接或间接加热来降低并稳定控制入炉煤水分，并不追求最大限度地去去除入炉煤的水分，而只是把水分稳定在相对较低的水平，就可以达到增加效益的目的，又不会因水分过低而引起焦炉和回收系统操作困难。

煤调湿技术于20世纪80年代初在日本开始应用，历经了3种工艺技术的变革。

（1）第一代煤调湿技术

第一代CMC是热油干燥方式，其工艺见图1.1.1。利用热油回收焦炉上升管煤气显热和焦炉烟道气的余热。温度升高到 195°C 的热油通过干燥机将常温的煤预热到 80°C 。煤的水分由9%左右降到5.7%，调湿后的煤在运输过程中水分还将降低0.7%，装入煤水分保持在 $5\%\pm 0.7\%$ 。

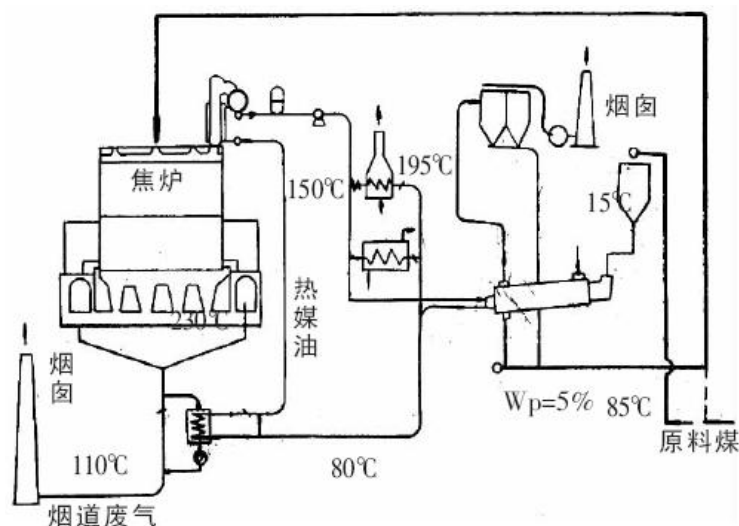


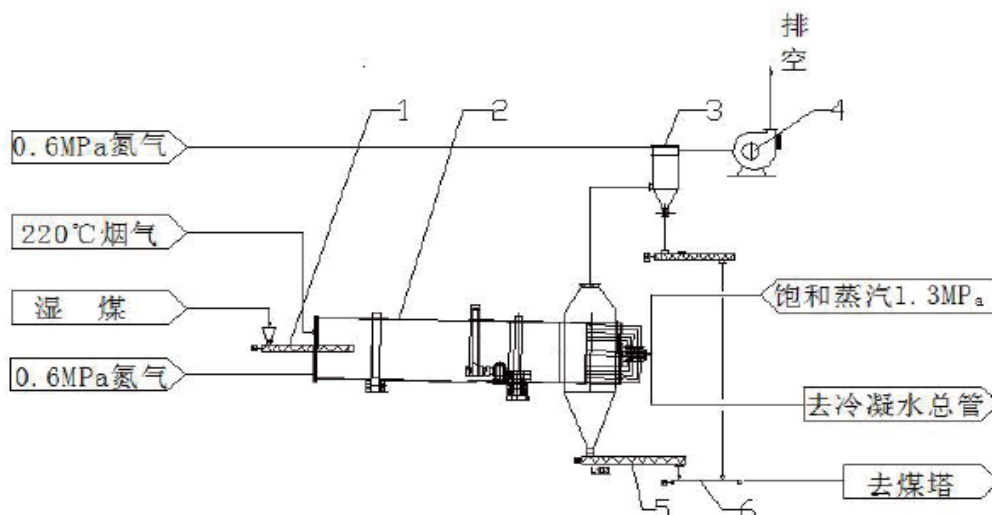
图1.1.1 热媒油式煤调湿工艺流程图

(2) 第二代煤调湿技术

第二代CMC是蒸汽干燥方式。利用干熄焦蒸汽发电后的低压蒸汽或其它低压蒸汽作为热源，在多管回转式干燥机中，蒸汽对煤料间接加热干燥。

其基本的工艺流程见图1.1.2，来自原料煤工序的湿煤经过进料螺旋输送机进入多管回转式干燥机，在干燥机体内，煤料与逆流运行的1.3MPa 饱和蒸汽环管充分接触，并进行热量交换。煤料从干燥机入口向出口方向移动，当物料到达干燥机出口时水分降至6.5%，经出料口排出，与收尘器分离下来的粉尘混合后一起送至煤塔。

从入口处进入的220°C烟道气作为携湿气在携湿的同时利用自身热量也给物料提供部分热量进行调湿。携湿后的烟道气由多管回转式干燥机的集尘罩顶部排出，排出的烟道气及夹带煤粉尘被引风机抽吸到布袋除尘器内进行气固分离。气固分离净化后的烟道气经引风机引至安全地点排放。调湿煤经输送、调湿等过程以后，采取了必要的除尘措施，防止粉尘飞扬。在输送过程中，带式输送机设防尘机罩进行全封闭，头部落料点处设收尘设施。



1 螺旋进料机；2 环管分体式蒸汽回转干燥机；3 布袋除尘器；4 干燥引风机；5 出料螺旋输送机；6 皮带输送机

图1.1.2 环管分体式蒸汽回转煤调湿工艺流程图

多管回转式干燥机是在普通回转圆筒干燥机内部安置了蒸汽加热管，加热管贯穿整个干燥机，以同心圆方式排成1~3圈，干燥所需热量由蒸汽加热管提供，是间接连续干燥机。加热管随筒体转动，进入干燥机的物料在转筒内受到加热管的升举和搅拌作用，被加热管提供的热量干燥，再借助于干燥机的倾斜度从加热口向出料口移动，从出料口排出。物料中汽化的二次蒸汽从排气口进入尾气处理系统，除去粉尘后放空；对易燃易爆易氧化工况，还可采用惰性气体闭路循环，多管回转式干燥机传热面积大，热效率高，因此适用于处理量大、连续干燥的物料。多管回转式干燥机内部的换热管组件为特制部件，采用直管与环管相结合，与采用直管固定换热管的蒸汽回转干燥机相比，增大了相同空间内的换热面积，保证了蒸汽与物料之间的充分热量交换，提高了干燥机的调湿效率。每一组换热管组件均可单独从进料端抽出，可以及时实现换热管的更换和维护。

环管分体蒸汽回转干燥机的主要特点有：

- ◆ 传热面积大，热效率高，热效率高达80%~90%；
- ◆ 填充率高、处理能力大，适用于连续操作；
- ◆ 干燥温度低，操作简单，使用方便；
- ◆ 气体仅作为带走挥发组分的携带气，气体用量小，粉尘回收设备简单；
- ◆ 密闭性能好，非常适用于易燃易爆易氧化的工况；
- ◆ 使用方便，易于检修，结构简单，加工成本低。

(3) 第三代煤调湿技术

在对前二代CMC技术实践和总结的基础上，新日铁开发投产了第三代也是最新一代的流化床CMC装置，取得了显著降低炼焦耗热量、提高焦炉生产能力和改善焦炭质量的效果，其工艺见图1.1.3。

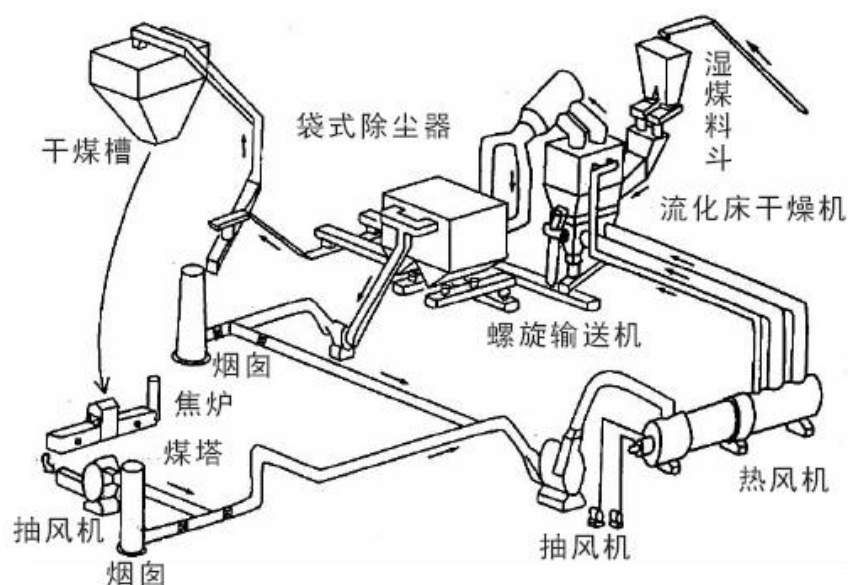


图1.1.3 流化床式煤调湿工艺流程图

水分为10%~11%的煤料由湿煤料仓送往2个室组成的流化床干燥机，从分布板进入的热风直接与煤料接触，对煤料进行加热干燥，使煤料水分降至6.6%。第三代CMC干燥用热源是由抽风机抽吸的焦炉烟道废气，其温度为180~230℃。本装置还设有热风炉，当煤料水分过高或焦炉烟道废气量不足或烟道废气温度过低时，可将抽吸的烟道废气先送入热风炉，用焦炉煤气点火，使高炉煤气燃烧，提高烟道废气的温度。

入炉煤料含水量设定为6.0%是为了防止调湿后煤料产生过多的粉尘。将CMC出口煤含水量设定略高于6.0%，是因为从CMC出口到焦炉的运输过程中会蒸发一部分水分。

流化床干燥机内的分布板是特殊钢材制作的筛板，干燥机的其他部分均可用普通碳钢材制作。在CMC的几个部位上设置有氧监测仪，自动报警，防止发生爆炸等不安全事故。

经过多年的生产实践，第三代 CMC 技术的效果是：

◆ 采用 CMC 技术后，煤料含水量每降低 1%，炼焦耗热量就降低约 50.0MJ/t（干燥）。当煤料水分从 10%下降至 6%时，炼焦耗热量相当于节省了 200MJ/t。

◆ 由于装炉煤水分的降低，使装炉煤堆密度提高，干馏时间缩短，因此，焦炉生产能力可以提高约 4%~10%。

- ◆ 改善焦炭质量，其 DI 值可提高 1~1.5 个百分点。
 - ◆ 煤料水分的降低可减少 1/3 的剩余氨水量，相应减少剩余氨水蒸氨用蒸汽 1/3。同时也减轻了废水处理装置的生产负荷。
 - ◆ 节能的社会效益是减少温室效应，平均每吨入炉煤可减少约 35.8kg 的 CO₂ 排放量。
 - ◆ 因煤料水分稳定在 6% 的水平上，使得煤料的堆密度和干馏速度稳定，有益于改善高炉的操作状态，有利于高炉的降耗高产。
 - ◆ 煤料水分的稳定可保持焦炉操作的稳定，延长焦炉寿命。
- 采用流化床 CMC 所带来的问题是：
- ◆ 煤料水分的降低，使炭化室荒煤气中的夹带物增加，使粗焦油中的渣量增加 2~3 倍，为此，设置了三相超级离心机，保证了焦油质量。
 - ◆ 炭化室炉墙和上升管结石墨有所增加，为此，设置了除石墨设施，有效地清除了石墨，保证了正常生产。
 - ◆ 调湿后煤料用皮带输送机送至煤塔过程中散发的粉尘量较湿煤增加了 1.5 倍。

日本开发的流化床 CMC 技术与乌克兰开发的沸腾床风动选择粉碎技术有许多相似之处，两家采用的技术措施都是对粉碎后的煤料进行预处理，前者的主要设备——流化床干燥机和后者的主要设备——沸腾床风选器都是箱型结构，其中的床体都是筛板。不同的是，前者是用热风与煤料直接接触，进行加热干燥；后者是用冷风与煤料直接接触进行选择粉碎。2007 年济钢集团利用焦炉烟道废气作热源与动力源，开发具有调湿、分级功能的流化床，实现废热资源化利用，2007 年 10 月完成工业化实验，投入生产运行取得较好效果。

1.1.2 技术适用条件

煤调湿技术是煤预热技术发展而来的。与第一代和第二代 CMC 相比，第三代流化床 CMC 技术工艺流程短，设备少且结构简单，具有投资省、操作成本低、便于检修、占地面积小及节能减排效果明显等优点。

根据煤调湿技术项目投资经济效益分析得知，只有炼焦煤水分含量超过 9.5% 的焦化企业，煤调湿技术投资内部收益率才能超过 8% 社会投资收益率，建设煤调湿装置才是经济的。为此，从投资回报率角度看，我国南方、沿海及东北地区比较适合建设煤调湿装置。

三种煤调湿技术的适用范围如下：

导热油煤调湿技术操作环节多、投资高。因此，现有导热油煤调湿技术需经改进后，才可以在独立焦化企业推广。

蒸汽煤调湿技术不节能还耗能，不能作为节能技术大力推广。可以用于有富余低压蒸汽的钢铁联合企业。

烟道气煤调湿技术（第三代煤调湿技术）已经成熟，是比较理想的节能环保技术，符合国家节能方针政策。

1.1.3 节能减排效果

- (1) 改善炼焦煤的粒度组成，各粒级煤质变化趋于均匀；
- (2) 装炉煤堆积密度提高约5%，提高焦炉生产能力4%~10%；
- (3) 提高焦炭强度： M_{40} 提高1%~2.5%， M_{10} 改善0.5%~1.5%；
- (4) 焦炭反应性降低0.5%~2.5%，反应后强度提高0.2%~2.5%；
- (5) 降低炼焦耗热量约5%；节约焦炉加热煤气，装炉煤含水量每下降1个百分点，炼焦耗热量可降低45~60MJ/t。当装炉煤含水量下降4个百分点时，可节省炼焦耗热量180~240MJ/t，相当于节约焦炉加热煤气（混合煤气热值4000kJ/m³）45~60m³/t，折合标煤6.1~8.2kg/t。
- (6) 减少废水排放，可减排蒸氨废水30~40kg/t，节约蒸氨用蒸汽6~8kg/t。
- (7) 提高高炉生产能力1%~2%。

1.1.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：焦炭年生产能力120万t，采用1套210 t/h煤调湿装置。项目总投资10243万元（含外汇120万美元），其中建设投资9850万元，建设期利息393万元。项目投资估算详见表1.1.1。

表1.1.1 煤调湿技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	9850.00	96.2%
1.1	建筑费用	2030.31	19.8%
1.2	设备费用	4886.66	47.7%
1.3	安装费用	1611.17	15.7%
1.4	其它费用	1321.86	12.9%
2	建设期利息	393.00	3.8%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	10243.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：可增加焦炭产量8%，降低煤气消耗6960万m³，提高焦炭

强度，降低焦比，年增加收入4060万元。采用煤调湿技术，将增加动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计3789万元，项目利润总额241万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）6.7年，财务内部收益率11.6%。

项目经济效益分析指标汇总详见表1.1.2。

表1.1.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	10243
1.1	建设投资	万 元	9850
1.2	建设期利息	万 元	393
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0
3	项目总资金	万 元	10243
4	资金筹措	万 元	10243
4.1	自有资金	万 元	4097
4.2	建设贷款	万 元	6146
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	4060
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	3789
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	304
5.4	达产年利润总额	万 元	241
5.5	达产年所得税	万 元	60
5.6	达产年净利润	万 元	181
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	6.7
6.2	财务内部收益率	%	11.6
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	5.1

1.1.5 技术推广应用情况

由于煤调湿技术显著的节能效果，近二十年来，日本先后开发了三代煤调湿技术，煤调湿技术在日本得到普遍的应用和推广。各厂煤调湿装置基本都是将装

炉煤水分由9%降到5%~6%。截至2009年12月，日本共有15家焦化厂，47组（座）焦炉，其中有33组（座）焦炉配置煤调湿装置，占炉组（座）总数的70.2%，其中流化床4套，间接加热回转式10套。

1983年9月，第一代导热油煤调湿装置在日本大分厂建成投产。日本新能源产业技术开发机构（简称NEDO）于1993~1996 年在我国重庆钢铁（集团）公司实施的“煤炭调湿设备示范事业”就是第一代煤调湿技术。处理能力140t/h，干燥器入口煤的水分11.0%，干燥器出口煤的水分6.5%，此套系统经调试后，由于多种原因没有顺利运行，现已闲置荒废。

第二代蒸汽干燥CMC技术最早于上世纪90年代初在日本君津厂和福山厂投产。2000年前后在日本运行的CMC绝大多数为此种型式。

1996年10月最新一代流化床CMC技术在日本北海制铁（株）室兰厂投产。我国济钢于2007年自行开发投产了处理能力300t/h气流床煤调湿装置。2009年济钢国际工程技术有限公司为昆钢建设投产了利用焦炉煤气加热的烟道废气做热源的、处理能力150t/h气流床煤调湿装置，项目投入运行确保焦炉生产顺行，取得很好的经济效益。2010年中冶焦耐工程技术有限公司和长沙通发高新技术开发有限公司完成了半沸腾流化床和全沸腾流化床煤调湿工业装置试验，现在已正式为华北某大型钢铁企业焦化厂进行工程设计，预计2011年底投产。2010年中冶焦耐工程技术有限公司还完成了振动风力分离煤调湿工业装置试验，现在已正式为东北某大型钢铁企业焦化厂进行工程设计，预计2012年中投产。此外近年来国家重点规划的大型钢铁项目中的焦化工序均预留了煤调湿用地，考虑采用第三代CMC技术。

2010年，该技术在钢铁联合企业中的普及率为9%左右。预计“十二五”期末，该技术在钢铁联合企业焦化厂中的推广比例将达到约60%。煤调湿工艺提倡选用以烟道气余热为热源工艺。

1.1.6 技术知识产权情况

煤调湿技术是 20 世纪 70 年代末，日本、美国、德国、法国和英国等相继研发的新技术。其中，日本是目前世界上使用最多、技术水平最高的国家。

表 1.1.3 列出了部分煤调湿专利。

表1.1.3 煤调湿专利申请情况表

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	煤湿度调节设备的水分控制方法	JP8277393 （A）	日本新日铁公司	1996.10.22

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
2	煤的气流分级与调湿技术的自动控制方法	CN101191058	济南钢铁公司	2007.11.20
3	一种稳定取得焦炉烟气用于煤分级调湿的方法	CN101191061	济南钢铁公司	2007.11.20
4	一种焦炉炼焦煤调湿、干燥方法及该方法所使用的设备	CN101831314A	兰州瑞德干燥技术有限公司；山西太钢不锈钢股份有限公司焦化厂	2009.03.12
5	煤调湿设备	KR20060117015（A）	韩国浦项钢铁公司	
6	煤调湿设备及方法	JP2006152153（A）	日本 JFE 公司	
7	煤水分控制技术	JP3131682（A）	日本中山钢铁公司	1991.06.05
8	半沸腾流化床风动分离干燥机	CN1834560	长沙通发高新技术开发有限公司；中冶焦耐工程技术有限公司	2006.04.21
9	炼焦煤料的气流分级和气流干燥装置	CN201560175U	中冶焦耐工程技术有限公司	2009-9-18
10	格板式给煤阀	CN201560001U	济钢集团国际工程技术有限公司	2009.11.05
11	流化孔板	CN201524555U	济钢集团国际工程技术有限公司	2009.11.05

1.2 捣固炼焦技术

1.2.1 技术介绍

将配合煤在捣固箱内捣实成体积略小于炭化室的煤饼后，由托板从焦炉侧推入炭化室内高温干馏，称为捣固炼焦。

煤料捣成煤饼后，一般堆密度可由顶装工艺散装煤的 0.75t/m^3 提高到 $1.00\sim 1.15\text{t/m}^3$ 。因煤料颗粒间距缩小，接触致密，堆密度大，有利于多配入15%~20%甚至更多的高挥发分煤和弱黏结煤，或者在配煤比不变的情况下，改善和提高焦炭质量。

与传统顶装炼焦相比，捣固炼焦具有如下特点：

1) 当配煤比相同时，捣固炼焦可以提高焦炭质量；入炉煤的质量越差，焦炭质量提高的幅度就越大；

2) 当焦炭质量相同时，捣固炼焦可以多用高挥发分或弱黏结性煤；所要求的焦炭质量越高，捣固炼焦多用高挥发分或弱黏结性煤的比例就越小。

3) 捣固炼焦的入炉煤成本低于顶装炼焦；

4) 捣固炼焦的烟尘治理难度大于顶装炼焦；

5) 捣固炼焦干扰焦炉正常稳定生产的因素要多于顶装炼焦。

捣固焦炉与顶装焦炉的炉体结构相同，只是炉体强度更大些，以抵抗更大的煤饼膨胀压力。

在焦炉机械方面，捣固焦炉比顶装焦炉多一台捣固机和炉顶导烟车，但没有装煤车。依据焦炉机械组合方式的不同，捣固焦炉可分三种，见表1.2.1。

表1.2.1 捣固焦炉按组合方式的分类

组合方式	焦炉机械配置
一体式	捣固装煤推焦机（SCP机）、导烟车、拦焦车、熄焦车
分体式 I	固定捣固站、装煤推焦车、导烟车、拦焦车、熄焦车
分体式 II	固定捣固站、装煤车、推焦车、导烟车、拦焦车、熄焦车

目前，我国4.3米捣固焦炉多采用分体式 I，固定捣固站内设置国产捣固机和国产装煤推焦机。

我国5.5米捣固焦炉多采用分体式 II，固定捣固站内设置国产捣固机或引进的德国捣固机，装煤机和推焦机均为国产。

我国6.25米捣固焦炉均采用一体式，其捣固装煤推焦机引进德国技术图纸和关键设备、由国内制造厂制造组装。现在也有些焦化厂为了降低机械制造费用，提出6.25米捣固焦炉也采用分体式 II——即固定捣固站内设置引进的德国捣固机，而装煤机和推焦机由国内制造。

1.2.2 技术适用条件

1) 用60%~70%的高挥发分气煤或1/3焦煤，配以适量的焦煤、瘦煤，要求挥发分在30%左右，黏结指标Y值为11~14mm，这样的煤料捣固效果最好。

2) 捣固煤料粉碎度应保持：粒度 $\leq 3\text{mm}$ 占90%~93%， $\leq 0.5\text{mm}$ 应在40%~50%。对难于粉碎的煤料要在配煤前预粉碎。

3) 捣固煤料最合适的水分为8%~11%，最好控制在9%~10%。水份不足时，要在运煤胶带上增加喷水设备。为保证雨季时，煤料水分不宜过大，应设置防雨煤棚。

4) 应尽量保持配煤煤种的稳定，频繁变换煤种容易影响焦炭质量和生产操作。

1.2.3 节能减排效果

采用捣固炼焦可以多用15%~20%的弱黏结煤。每吨焦炭耗煤按1.34吨计，则18070万吨冶金焦耗炼焦精煤24214万吨。如果采用捣固炼焦多用15%弱黏结性煤，则节省强黏结性煤3632万吨。

1.2.4 成本效益分析

攀钢于2009年投产2×62孔JND55-07型5.5m复热式捣固焦炉，炭化室宽度500mm，年产焦炭135万吨，配有170t/h的干熄焦装置。其捣固焦炉比顶装焦炉多配15%~20%的弱黏结性煤，由此，捣固配煤成本较顶装配煤至少低35元/t煤。

表1.2.2 攀钢高炉应用捣固焦炭和顶装焦炭对比

序号	捣固焦比例 %	铁平均产量 t/d	利用系数 t/m ³ ·d	焦比(干) kg/t	煤比 kg/t	综合焦比(干) kg/t
1	0	3108	2.590	440	117.1	533.7
2	37.7	3114	2.595	431.6	117.4	525.5
3	100	3157	2.632	425.6	129.1	528.9
1、2比较		+6	+0.005	-8.4	+0.3	-8.2
1、3比较		+49	+0.042	-14.4	+12	-4.8

攀钢使用捣固焦炭后，高炉的综合冶炼强度有明显改善。

涟钢焦化厂采用2×65孔5.5米复热式捣固焦炉，平均宽度554mm，年产焦炭130万吨，于2009年投产。2010年上半年，涟钢捣固焦炉入炉煤比6米顶装焦炉多用10%瘦煤，相应少用10%主焦煤。采用湿熄焦时，捣固焦炭质量比采用干熄焦的6米顶装焦炭还好，CRI<25，CSR>68。捣固焦炭直供3200m³高炉，高炉生产指标明显改善，焦比320kg/t、煤比160 kg/t、小块焦比30kg/t，炼铁燃料比510 kg/t。

(1) 投资估算

项目案例：2×64孔5.5m单热式捣固焦炉，年产焦炭约130万吨，配套处理能力为160t/h干法熄焦装置，新型湿法熄焦作为备用。

工程总投资为109021.43万元，其中：固定资产投资为101102.41万元(其中焦化部分83391.59万元，干熄焦部分17710.82万元)，铺底流动资金3472.88 万元，建设期贷款利息 4446.14 万元，详细费用见表1.2.3和表1.2.4。

表1.2.3 焦化工程投资组成

工程费用名称	投资，万元	占固定资产投资比例，%

固定资产投资		83391.59	100.00
其中	建筑工程	28306.35	33.94
	安装工程	12651.72	15.17
	设备购置费	37537.96	45.01
	其它费用	2895.56	3.47
	预备费	2000.00	2.41

表1.2.4 干熄焦工程投资组成

工程费用名称		投资, 万元	占固定资产投资比例, %
固定资产投资		17710.82	100.00
其中	建筑工程	2992.53	16.90
	安装工程	2594.35	14.65
	设备购置费	10726.04	60.56
	其它费用	1067.90	6.03
	预备费	330.00	1.86

(2) 经济效益分析

项目经济效益分析指标汇总见表1.2.5。

表1.2.5 经济效益分析指标汇总表

序号	指 标 名 称	单 位	指 标
1	投资		
1.1	固定资产投资	万元	101102.41
1.2	流动资金	万元	11576.25
1.3	建设期利息	万元	4446.14
2	财务预测指标		
2.1	销售收入	万元/a	215697.03
2.2	原材料费用	万元/a	148597.51
2.3	动力费用	万元/a	6307.57
2.4	销售税金及附加	万元/a	14045.34
2.5	总成本费用	万元/a	167260.59
2.6	利润总额	万元/a	32374.58
2.7	所得税	万元/a	10683.61

序号	指标名称	单位	指标
2.8	税后利润	万元/a	21690.97
2.9	全投资内部收益率(税前)	%	29.41
2.10	全投资内部收益率(税后)	%	22.64
2.11	全投资回收期(税前)	年	5.13
2.12	全投资回收期(税后)	年	6.02
2.13	净现值($i_c=7\%$, 税前)	万元	255457
2.14	净现值($i_c=7\%$, 税后)	万元	161441
2.15	投资利润率	%	27.64
2.16	投资利税率	%	39.51

从以上计算结果可以看出,全投资内部收益率(税后)为22.64%,高于基准收益率。在其20年的生产经营期内,平均年实现利润总额32374.58万元,达产年上缴销售税金及附加14045.34万元,平均年上缴所得税10683.61万元,平均年实现税后利润21690.97万元,全部投资在第6.02年可收回,税后净现值为161441万元,投资利润率为27.64%。综上所述,采用捣固炼焦工艺经济效益良好。

1.2.5 技术推广应用情况

中国煤炭资源虽比较丰富,但以动力煤为主,约占保有储量的72.21%,而炼焦煤资源占中国煤炭资源总量的27%,这表明在中国炼焦煤资源中,目前真正可以利用的资源量比例较低。我国炼焦煤、尤其是强黏结性煤供不应求,大大促进了可多用弱黏结性煤的捣固炼焦工艺的发展。20世纪末,我国只有20几座小型捣固焦炉,目前已投产300多座,产能超过2亿吨,位居世界第一位。然而,90%以上的捣固炼焦产能建在独立焦化厂,钢铁企业采用捣固炼焦工艺的寥寥无几。其主要原因是:

- ◆ 捣固焦炉的寿命比顶装焦炉短;
- ◆ 捣固焦炉的稳定生产不如顶装焦炉;
- ◆ 捣固焦炉的装煤烟尘治理难度大于顶装焦炉;
- ◆ 国内外尚没有大型高炉长期全部使用捣固焦炭的生产实践经验;
- ◆ 过去中国焦炭产量小,强黏结性煤即焦煤和肥煤的供应充足;
- ◆ 钢铁企业焦化厂入炉煤成本是由钢铁公司承担,而不是仅由焦化厂承担。

- ◆ 但是,目前,我国钢铁企业开始接受和采用捣固炼焦工艺,其原因是:
- ◆ 炼焦煤供应已成为我国焦化业可持续发展的重大问题;尤其国内优质焦煤供应已成为影响炼焦生产、焦炭质量和炼焦成本的重要因素;

◆ 上百家采用捣固焦炉的独立焦化厂多年的生产操作实践与教训，为钢铁企业焦化厂选用捣固炼焦提供了经验，增强了使用信心；

◆ 我国捣固焦炉的大型化——5.5米捣固焦炉（每孔年产焦炭1.01万吨）、6.25米捣固焦炉（每孔年产焦炭1.2万吨），使钢铁企业采用大型焦炉成为可能。

总之，尽管捣固炼焦技术还存在许多难题，但其可以多配用弱黏结性煤，具有可持续发展的潜力，因此，深深吸引着钢铁业焦化厂。21世纪初，我国还只是小型钢铁企业采用捣固炼焦，后来发展至中型钢铁企业，现在一些大型钢铁企业也在策划建设大型捣固焦炉。

我国捣固炼焦年产能已超过2亿吨，但钢铁企业应用较少，不到全国总产能的5%。预计“十二五”期末，推广比例将达到15%~20%。

1.2.6 技术知识产权情况

我国拥有捣固炼焦技术的单位主要是中冶焦耐工程技术有限公司、赛鼎工程有限公司（原化学工业第二设计院）、北京众联盛化工工程有限公司和一些捣固焦炉机械制造厂，共有专利109项。表1.2.6列出了部分捣固炼焦专利。

表1.2.6 部分捣固炼焦专利

序号	技术名称	公开(公告)号	申请(专利权)人	申请日期
1	炼焦煤饼捣固用弹性凸轮摩擦转动式捣固机	CN2647859	中冶焦耐工程技术有限公司	2003.09.29
2	捣固焦炉的燃烧室—炭化室单元	CN2799555	中冶焦耐工程技术有限公司	2005.06.24
3	一种双 U 型管的捣固焦炉除尘导烟车	CN101045870	中冶焦耐工程技术有限公司	2007.04.13
4	机侧无上升管型捣固焦炉炉头捕集装置	CN201292338	中冶焦耐工程技术有限公司	2008.11.13
5	5~6.5 米高炭化室捣固焦炉炉门	CN2837302	中冶焦耐工程技术有限公司	2005.07.14
6	一种捣固装煤车的减振装置	CN101319142	太原重工股份有限公司	2008.07.18
7	捣固焦炉机侧炉门及炉顶烟尘捕集装置	CN201144206	中冶焦耐工程技术有限公司	2007.12.12

1.3 高温高压干熄焦技术

1.3.1 技术介绍

(1) 技术概况

在炼焦生产中，高温红焦冷却有两种熄焦工艺：一种是传统的采用水熄灭炽热红焦的工艺，简称湿熄焦，另一种是采用循环惰性气体与红焦进行热交换冷却焦炭，简称干熄焦（英文缩写 CDQ）。

传统湿法熄焦采用水直接熄灭炽热红焦，不但热能不能回收，而且吨焦产生 0.3~0.4 吨水蒸汽夹带大量烟尘及少量硫化物等有害物质放散，既严重污染大气及周围环境，同时还大量消耗水。

1986 年宝钢一期工程从日本引进干熄焦设备标志着我国干熄焦技术应用的开始，随后上海浦东煤气厂、济钢、首钢等又引进了俄罗斯、乌克兰、日本的干熄焦技术。在此基础上，原国家经贸委与原国家冶金局组织鞍山焦耐院等有关单位成立开发干熄焦技术一条龙协作组，对引进技术进行改进和创新，开发了具有我国自主知识产权的干熄焦技术。2004 年随着采用我国自主研发的干熄焦技术与设备的示范工程—马钢和通钢干熄焦装置的顺利投产，标志着我国实现了干熄焦技术与设备的国产化，以后又实现了设备的大型化和系列化。目前，我国已能自主设计、制造和建设 50~260t/h 各种规模的干熄焦装置，干熄焦技术日趋成熟。

干熄焦锅炉是整个干熄焦系统中的重要组成部分，也是整个余热利用工艺的核心设备之一。随着国内焦炉的日益大型化，干熄焦装置和干熄焦锅炉的单机容量也日趋大型化，这为高温高压锅炉在干熄焦工程中的应用提供了技术上可行的前提条件。在同等熄焦条件下，高温高压锅炉所产蒸汽的发电量比中温中压锅炉所产蒸汽的发电量高约 10%-15%。在能源利用方面，高温高压锅炉占具优势。

2006 年前，我国已投产的干熄焦装置中，都采用中温中压锅炉，2006 年随着济钢 150t/h 高温高压干熄焦锅炉的顺利投产，标志着我国干熄焦锅炉进入了高温高压时代。目前，我国已投产的干熄焦装置中，采用高温高压锅炉的仅占 10%。高温高压干熄焦锅炉应用比例低的主要原因是：

① 按照国家标准 GB/T 754-2007 《发电用汽轮机参数系列》，中温中压新蒸汽的流量推荐范围是 20~120t/h，而高温高压是 100~410t/h。常用干熄焦装置的生产能力主要为 75~190 t/h，其生产新蒸汽流量范围为 41~102t/h，正好在中温中压新蒸汽流量推荐范围内。

② 采用高温高压锅炉，其锅炉本体管道、主蒸汽管道等材质相应提高；汽轮发电机材质提高；高温高压阀门施工难度大；需要高素质操作人员；强制循环水泵和锅炉给水泵因流量小、压力高、温度高，国产化难度大，国外生产厂家少。

③ 干熄焦锅炉参数选择与蒸汽用途有关。如果干熄焦产生的蒸汽直接进入公司蒸汽动力管网，则蒸汽压力稍高于动力管网蒸汽压力即可，不一定高温高压。

④ 焦化企业几乎都是常压设备及低温低压锅炉，对操作高温高压锅炉生疏。

(2) 技术基本原理

干熄焦工艺流程方框图见图 1.3.1。

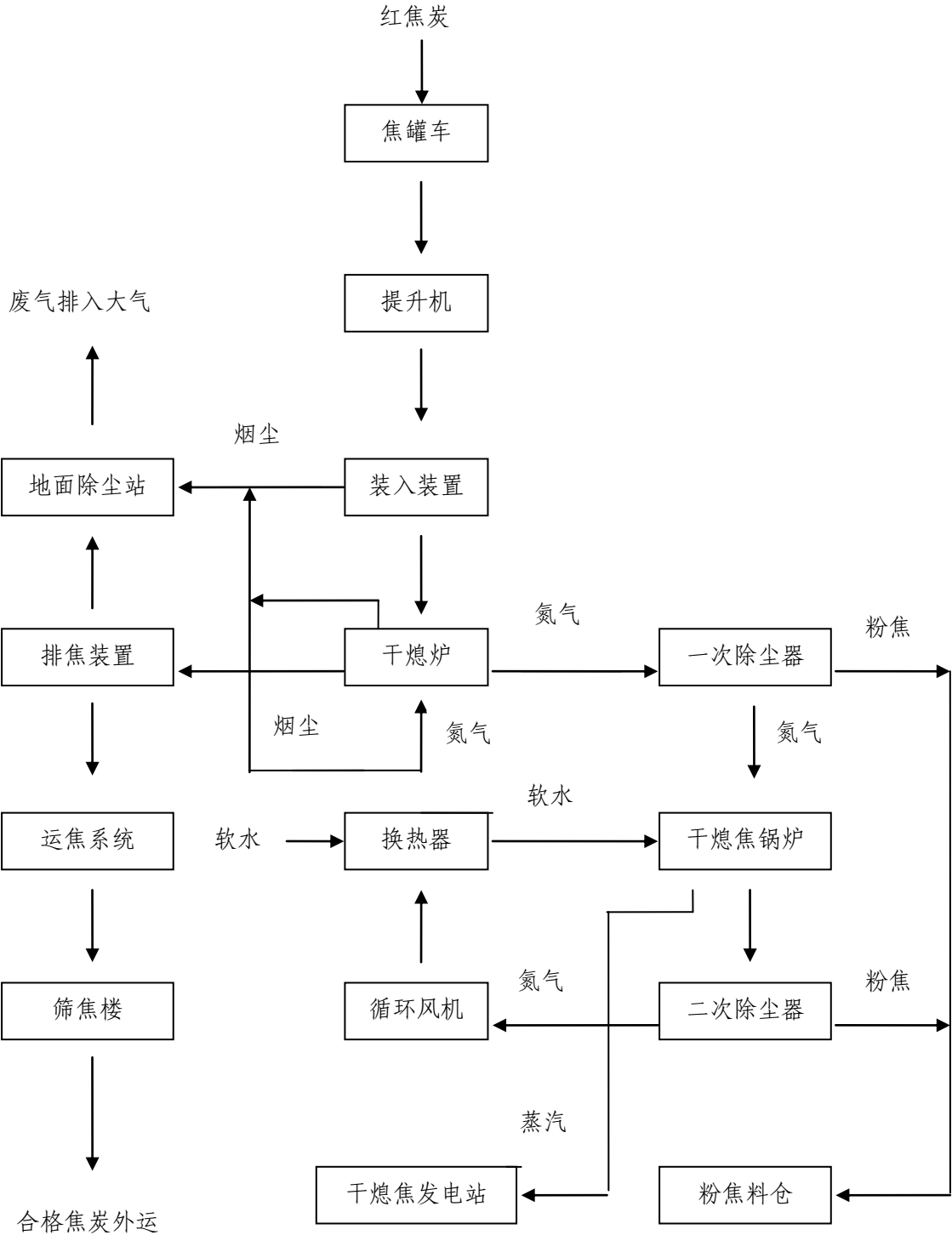


图1.3.1 干熄焦工艺流程

干法熄焦是采用惰性气体将焦炭冷却并回收焦炭显热的工艺。推出炭化室的焦炭落入干熄焦用焦罐车的焦罐内，并通过装料装置送入干熄炉冷却室，采用惰性气体与焦炭换热，冷却的焦炭由排焦装置连续排出并送下一工序。加热后的惰性气体可进入余热锅炉换热回收蒸汽并发电，冷却后的惰性气体返回熄焦工序。

1.3.2 技术适用条件

从干熄焦技术本身看，适用于所有年产 30 万吨焦炭以上常规顶装焦炉、捣固焦炉以及热回收焦炉。但若考虑到企业整体投资经济效益、酚氰废水出路等综合因素，干熄焦技术比较适用于大中型钢铁联合企业直属焦化厂。

《焦化行业准入条件》（2008 年修订）中明确规定钢铁企业新建焦炉要同步配套建设干熄焦装置，但对独立焦化企业没有明确要求，也是考虑到企业实际情况。

1.3.3 节能减排效果

（1）节能效果

干熄焦生产过程中消耗的能源介质有焦炭（烧损）、水、电、蒸汽、压缩空气、氮气等，回收的能源介质是蒸汽或电力。回收减自身消耗后，每吨干熄焦净回收能量 35~45kgce。

据初步估算，按 8744 万 t 焦炭采用干熄焦技术，直接节能效果是：

- ① 回收中高压蒸汽 4372~5246 万 t；
- ② 节约熄焦用水 3497~3935 万 m³；
- ③ 净回收标煤约 349 万 t。

（2）环保效果

干熄焦利用惰性气体，在密闭系统中将热焦炭熄灭，并配合良好的除尘设施，可将熄焦过程对环境的污染降到最低水平，减少了常规湿法熄焦过程中排放的含酚、HCN、H₂S、NH₃ 的废气。同时，干熄焦产生的蒸汽相当于替代了燃煤锅炉产生的蒸汽，从而降低燃煤对周围环境的影响。

据初步估算，按 8744 万 t 焦炭采用干熄焦技术，直接环保效果是：

- ① 少排放大气污染物 0.57~0.60 万 t；
- ② 回收中高压蒸汽可代替燃煤蒸汽锅炉，相当于节约动力煤 729~875 万 t（按 1 吨动力煤产 6 吨中高压蒸汽计），即少排放大气烟尘 1.28~1.53 万 t、SO₂ 10.9~13.1 万 t、CO₂ 1020~1225 万 t。

1.3.4 成本效益分析

（1）投资估算

干熄焦技术处理能力不同则建设投资不同,根据大量工程案例可知,处理单位焦炭建设投资范围在 120~140 元/t 焦炭之间。

现以 2010 年 1 月设计的某焦化厂高温高压干熄焦工程为例。该厂 1 号、2 号焦炉年产焦炭 135 万吨,配套建设处理能力为 170t/h 焦炭的干熄焦装置一套(含发电装置)。工程总投资 17262 万元,其中固定资产投资 16848 万元,铺底流动资金 64 万元,建设期贷款利息 350 万元。

表1.3.1 高温高压干熄焦工程投资组成表

项目		投资额(万元)	占基本费用比例(%)
固定资产投资		16848	100
其中	建筑工程	3104	18.42
	安装工程	2333	13.85
	设备购置费	10311	61.20
	其他费用	1102	6.53
	建设期利息	350	
	铺底流动资金	64	
	合计	17262	

本干熄焦工程的吨焦投资为 128 元。

(2) 经济效益分析

表1.3.2 高温高压干熄焦工程技术经济评价

序号	指标名称	单位	指标
1	固定资产投资	万元	16848
2	建设期利息	万元	350
3	流动资金	万元	212
4	销售收入	万元/年	8433
5	销售税金及附加	万元/年	828
6	原料费用	万元/年	1469
7	动力费用	万元/年	1782
8	总成本费用	万元/年	5099
9	利润总额	万元/年	2430
10	所得税	万元/年	607
11	税后利润	万元/年	1822

序号	指标名称	单位	指标
12	全投资内部收益率（税前）	%	18.67
13	全投资内部收益率（税后）	%	15.80
14	全投资回收期（税前）	年	6.24
15	全投资回收期（税后）	年	6.90
16	投资利润率	%	13.96
17	投资利税率	%	18.67

从计算结果可以看出，本干熄焦工程全投资内部收益率（税后）为 15.80%，高于基准收益率。在其 20 年的生产经营期内，平均实现利润总额 2430 万元，达产年上缴销售税金及附加为 828 万元，平均年上缴所得税 607 万元，平均年实现税后利润 1822 万元，全部投资在第 6.90 年即可回收，税后净现值 12116 万元，投资利润率为 13.96%。因此，干熄焦是一项工艺技术先进，环保和节能效益显著的建设项目，同时具有较好的经济效益。

1.3.5 技术推广应用情况

为实现焦化行业节能减排，近年来国家有关部委出台了一系列推广应用干熄焦技术的鼓励措施，如：2005 年《焦化行业准入条件》中规定新建或改扩建焦炉，原则上要同步配套建设干熄焦装置；2008 年新修订的《焦化行业准入条件》中规定钢铁企业新建焦炉要同步配套建设干熄焦装置并配套建设相应除尘装置；《产业结构调整指导目录》（2007 年）鼓励类目录中有干法熄焦技术应用；《国家钢铁产业发展政策》（2005 年）中规定焦炉必须同步配套干熄焦装置并匹配收尘装置。

2010 年，我国钢铁企业焦化厂高温高压干熄焦率仅为 10%左右。预计“十二五”期末，高温高压干熄焦技术的推广比例将达到 30%~40%，为提高能源利用效率，“十二五”期间，新建干熄焦装置宜采用高温高压干熄焦锅炉及发电机组。

1.3.6 技术知识产权情况

目前我国共有 3 家企业拥有干熄焦技术知识产权：

- ◆ 中冶焦耐工程技术有限公司，该公司申请了 7 项与干熄焦有关的专利。
- ◆ 北京中日联节能环保工程技术有限公司。
- ◆ 济南钢铁有限公司。

在我国的专利中，与干熄焦技术相关的专利就达 72 项之多。表 1.2.3 列出其中的 12 项。

表1.3.3 干熄焦技术相关的专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	干熄焦方法及装置	CN1694943	日本新日铁公司	2002.08.29
2	干熄焦设备的排气通道部分的结构	CN1532262	日本新日铁公司	2004.09.29
3	一种干熄焦用红焦装入除尘装置	CN101205471	中冶焦耐工程技术有限公司	2008.06.25
4	一种新结构的干熄炉	CN101705102A	中冶焦耐工程技术有限公司	2009.11.16
5	一种新型结构的干熄炉壳体	CN101709222A	中冶焦耐工程技术有限公司	2009.11.16
6	干熄焦室	CN1084545	首钢总公司	1994.03.30
7	一种干熄焦系统连续排焦运行的方法	CN101665703	鞍钢股份有限公司	2008.09.01
8	干熄焦罐烟道局部检修方法及其设备	CN1266084	上海宝钢集团公司	2000.03.23
9	一种干熄焦提升机的起升机构	CN1766036	太原重型机械集团有限公司	2005.09.16
10	干熄焦车载式焦罐旋转装置	CN1858155	马鞍山钢铁股份有限公司	2005.05.01
11	干熄焦高温高压锅炉自然循环装置	CN201028467	济南钢铁股份有限公司	2007.04.24
12	干熄焦带轮焦罐定位导向装置	CN201753337U	济钢集团国际工程技术有限公司	2010.08.14

1.4 焦炉煤气高效脱硫净化技术

1.4.1 技术介绍

焦炉煤气作为钢铁产业的副产品具有极高的利用价值，脱硫、脱氰后焦炉煤气的可燃分高、杂质低的特点更为明显。炼焦生产时，煤料中含硫 0.5%~1.2%，其中 20%~45%的硫以硫化物转到荒煤气中，形成气体杂质。这些硫化物如不脱除将形成严重的空气污染，在使用中硫化氢能引起设备腐蚀和催化剂中毒，导致生产成本增加和产品质量下降。脱硫后的焦炉煤气可以广泛应用在发电、化肥、甲醇、氢和直接还原铁等领域，并且脱硫产生的硫磺可作为原料生产硫酸。

（1）焦炉煤气脱硫方法

① 干法脱硫

目前常用的脱硫剂为氧化铁,而其他脱硫剂如活性炭、分子筛、氧化锰、氧化锌等脱硫剂都较昂贵,较少使用。

干法二次脱硫主要用于湿法一次脱硫的后续处理或对煤气中 H_2S 含量要求严格的场合。二次脱硫的脱硫剂也与一次脱硫有所不同（多用活性炭吸附）。经二次脱硫后， H_2S 含量可降至很低，此种煤气可用于甲醇的合成。

干法脱硫的基本过程是将焦炉煤气通过含有氢氧化铁的脱硫剂，使氢氧化铁与硫化氢反应生成硫化铁或硫化亚铁，当饱和后，使脱硫剂与空气接触，在有水分存在时，空气中的氧将铁的硫化物转化成氢氧化物，脱硫剂再生连续使用。

② 湿法脱硫

按煤气处理的先后顺序，湿法脱硫又分为两种：一种为前脱硫，即先脱除硫化氢，再进行其他化学产品的回收；另外一种为后脱硫，即先进行其他化学产品的回收，再脱除硫化氢。其基本流程如图 1.4.1 所示。

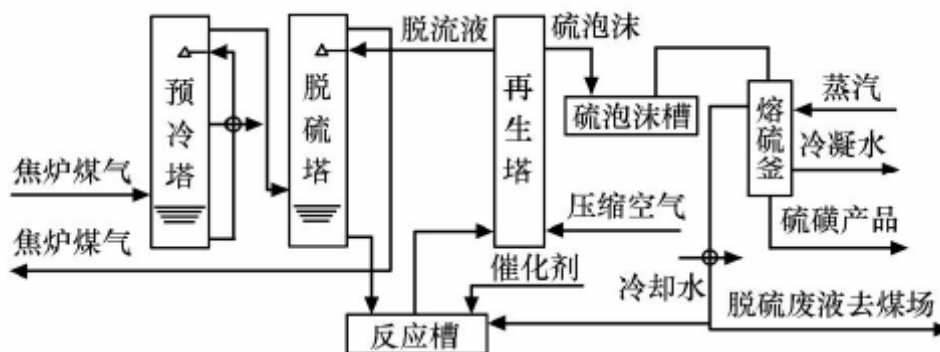


图1.4.1 湿法脱硫基本流程图

随着煤焦化行业的快速发展,国内外焦炉煤气脱硫脱氰技术及其防止二次污染的废液(废气)处理技术已达 50 余种,有代表性的约 10 余种。下面介绍湿法脱硫一些典型工艺的方法及其特点,以便合理选择符合生产实际的脱硫脱氰工艺技术。

◆ AS 法

氨-硫化氢循环洗涤法(简称 AS 法)由德国研制开发,在我国已广泛应用。其脱硫过程是利用焦炉煤气中的氨,用洗氨液吸收煤气中 H_2S , 富含 H_2S 和 NH_3 的液体经脱酸蒸氨后再循环洗氨脱硫。

AS 循环脱硫工艺为粗脱硫,操作费用低,脱硫效率在 90%以上,脱硫后煤气中的 H_2S 在 $200 \sim 500 \text{ mg/m}^3$, 可以通过控制氨水浓度和改善操作条件,或与干法脱硫串联使用来满足工业和民用对煤气净化的要求。利用 AS 法进行粗脱硫可以节省精脱硫脱硫剂的消耗。

◆ ADA 法及改良 ADA 法

ADA 法是以蒽醌二磺酸钠(ADA)为催化剂,以稀碳酸钠溶液为吸收剂的脱硫、脱氰方法。在 ADA 法溶液中添加适量的偏钒酸钠、酒石酸钾钠($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6$)和 FeCl_3 作为吸收液进行脱硫、脱氰,称改良 ADA 法。

国内 ADA 法及改良 ADA 法普遍应用于民用煤气净化工艺中,脱硫效率在 98%以上。其缺点是悬浮液的硫磺颗粒小,回收困难,易造成过滤器堵塞;有副反应发生,使脱硫液消耗量增大;有机硫和 HCN 的脱除效率差;脱硫废液处理困难,国内工业化装置多采用提盐工艺,但流程长、操作复杂、能耗高、操作环境恶劣、劳动强度大、所得盐类产品如硫氰酸钠和硫代硫酸钠品位不高,经济效益差,易造成二次污染;有细菌积累;腐蚀严重。可通过控制适当的工艺参数,实现对副反应的控制,以保证脱硫工艺运行的最佳效益。

◆ FRC 法

FRC 法由日本研制开发,它是利用焦炉煤气中的氨,在催化剂苦味酸的作用下脱除 H_2S , 利用多硫化铵脱除 HCN。其脱硫效率高达 99%以上、脱氰效率为 93%。煤气经脱硫塔后, H_2S 可降到 20 mg/m^3 , HCN 可降到 100 mg/m^3 。催化剂苦味酸耗量少且便宜易得,操作费用低;再生率高,新空气用量少,废气含氧量低,无二次污染。但因苦味酸是爆炸危险品,运输存储困难,且工艺流程长、占地多、投资大,使该技术的使用受到一定的限制。

◆ TH 法

该技术由 Takahax 法脱硫脱氰和 Hirohax 法废液处理两部分组成。脱硫是以煤气中的氨为碱源,以 1,4-萘醌 2-磺酸钠为催化剂的氧化法脱硫脱氰工艺。其工艺特点是:脱硫效率 96%以上,脱氰效率 85%;比其他流程的硫铵产量高;流

程比较简单，操作费用低，蒸汽耗量少。TH 法脱硫工艺的不足是：处理装置在高温高压和强腐蚀条件下操作，对主要设备的材质要求高，制造难度大；吸收所需液气比和再生所需空气量较大，废液处理操作压力高，故整个装置电耗大，投资和运行费用高。

◆ 栲胶法（TV 法）

栲胶法由我国自主开发，是目前国内使用较多的脱硫方法之一。其原理是以栲胶为主催化剂，湿式二元氧化脱硫法以栲胶的碱性氧化降解物为中间载氧体，并作为钒的络合剂与碱钒配成水溶液，将气态硫化氢吸收并转化为单质硫。其特点是硫容高、副反应少、传质速率快、脱硫效率高且稳定、原料消耗低、腐蚀轻、硫回收率高等，在管理、脱硫液组分含量、溶液循环量及设备满足工艺要求的情况下，栲胶脱硫不易堵塞设备、管道。栲胶法的操作弹性大；栲胶资源丰富，价廉易得；可使 H_2S 降低至 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，脱硫效率达 99% 以上。栲胶需要熟化预处理，因此栲胶质量及其配制方法得当与否是决定栲胶法使用效果的主要因素。P 型和 V 型栲胶不需预处理可以直接加入系统。

◆ PDS 法

PDS 法由我国自主开发，是以双核酞菁钴磺酸盐为脱硫催化剂的脱硫方法。PDS 催化活性好、用量小、无毒。其工艺特点是脱硫脱氰能力优于 ADA 溶液；抗中毒能力强，对设备的腐蚀性小；易再生，易分离单质硫，回收率高，有机硫脱除率在 50% 以上；可单独使用，不加钒，无废液排出；无堵塔；脱硫成本只有 ADA 法的 30% 左右，运行经济，是非常具有竞争力的方法。当 PDS 质量浓度大于 3.0×10^{-6} 时，脱硫效率可达 98% 以上。

PDS 脱硫催化剂具有较高的硫容，适用于高硫焦炉煤气的初脱硫，但不适用于精脱硫。该方法碱耗低，副盐硫氰酸钠和硫代硫酸钠提取方便、质量优。该方法经过不断改进和完善，PDS 可以和 ADA、栲胶联合使用，效果很好。催化剂也已由最初的原型，发展到目前的 P-400，888 型等。通过脱硫液的 pH 值和总碱度、进塔煤气温度和循环脱硫液温度、循环脱硫液与煤气的液气比的控制，选择 PDS 溶液和碱液加入方式，及时收集硫泡沫，可以优化 PDS 法煤气脱硫装置的运行。将洗苯塔作为捕雾器，减少洗苯贫油的杂质量和煤气中的焦油雾、萘及苯族烃等物质，防止 PDS 中毒。用旋风分离器进行捕雾，降低煤气夹带脱硫液，减少 PDS 和碱的消耗，降低生产成本。

◆ HPF 法

HPF 法由国内自主开发，是以氨为碱源、HPF 为复合催化剂的湿式液相催化氧化脱硫脱氰工艺，已成功应用于多家国内焦化企业，是目前采用较多的脱硫工艺。

HPF 法脱硫工艺流程为：经鼓风机加压后的煤气进入预冷塔，在塔内被冷却至 30~35℃。预冷后的煤气进入脱硫塔，与塔顶喷淋下来的脱硫液逆流接触以吸收煤气中的硫化氢（同时吸收煤气中的氨作为碱源）。脱硫后煤气含硫化氢约 300mg/m³。

为了保证脱硫再生过程的正常进行，在反应槽中加入一定量的催化剂、对苯二酚、PDS、FeSO₄ 等。

吸收了 H₂S、HCN 的脱硫液从塔底流出，进入反应槽，然后用泵送入再生塔底，同时自再生塔底部通入压缩空气，使溶液在塔内得以氧化再生。再生后的溶液从塔顶经液位调节器自流回脱硫塔循环使用。

浮于再生塔顶部扩大部分的硫磺泡沫，利用位差自流入泡沫槽，再生后的尾气在再生塔顶直接对空放散，浮于再生塔顶部扩大部分的硫泡沫沿硫泡沫管自流至硫泡沫槽，硫泡沫在泡沫槽内分离后。用泵送至熔硫釜，硫泡沫在熔硫釜内经加热脱水分离后，废液自顶部排出，送入废液槽。硫泡沫在熔硫釜继续加热至硫磺熔融，放料冷却后装包。

总的来说，HPF 法脱硫催化剂活性高，运行成本低，综合经济效益好。脱硫脱氰效率高，脱硫后煤气中 H₂S 和 HCN 含量可分别降至 200 mg/m³ 和 300 mg/m³ 以下，脱硫效率为 98%左右，脱氰效率在 80%左右。腐蚀小、废液量较少，可直接掺入炼焦配煤中，具有废液处理操作简单、无污染、投资少、占地省、运行费用低等特点。工艺流程较为简单，使用设备较少，操作和维护也更为简单、方便，可大幅度降低煤气净化过程中的蒸汽消耗量。若增设废气处理装置和脱硫废液回兑配煤的装置，可使 HPF 工艺成为真正的无污染工艺，是非常具有竞争力的方法。其缺点是存在硫磺泡沫多、产品质量低、熔硫操作环境差。

◆ OPT 法

OPT 法是由国内自主开发，以氨为碱源，采用 OP 型复合催化剂、脱硫废液提盐的湿式氧化脱硫脱氰法。脱硫效率在 99%以上，脱氰效率也高达 98%~99%，是一种高效率、低成本、低能耗的脱硫脱氰法。

◆ 真空碳酸钾法(VACA)

真空碳酸钾法是使用碳酸钾溶液直接吸收煤气中的 H₂S 和 HCN，属于湿式吸收法脱硫工艺。吸收液在真空状态下解析出 H₂S 和 HCN 酸性气体，酸性气体可用克劳斯炉法生产硫磺或制取硫酸。脱硫碱源采用 KOH 溶液，活性高，反应速度快，脱硫脱氰效率高。富液再生在真空状态下解析，操作温度低，热源可由初冷器上段的煤气供给，节能效果好。对设备材质的要求不高，大部分设备可采用碳钢制作。系统中氧含量较少，且操作温度低，故副反应的速度慢，生成的

KCNS 等副盐类废液极少,可以兑入剩余氨水中,经蒸氨后送酚氰污水处理装置,不需要单独设置废液处理装置。

(2) 硫回收方法

脱硫后的富液再生后,单质硫以硫泡沫的形式析出,硫泡沫中的单质硫需经过后续的回收处理才可以得到工业用的硫膏。常用的硫回收方法如下:

① 熔硫釜连续熔硫

此法是焦化企业普遍采用的硫回收方式。由再生塔溢流出的硫泡沫进入熔硫釜,经过蒸汽间接加热,底部放料,产出硫膏;脱硫液由上部溢流回循环槽中,实现循环使用。其优点是处理量大,可连续操作,工艺成熟。其缺点是工作环境恶劣,蒸汽耗量大,硫膏品质不稳定,含水量较大。

② 膜过滤

此法多用戈尔膜,硫泡沫经膜过滤后,脱硫液循环使用,产出单质硫膏。其优点是硫回收效果好,操作简便。其缺点是戈尔膜需进口,生产成本低。硫回收精度要求高时可选用戈尔膜法,如果用其他膜代替,过滤效果不佳。

③ 真空过滤

此法用真空过滤机过滤硫泡沫,所需真空负压由真空泵提供。脱硫液被吸入过滤机内桶,回流至循环槽循环使用,单质硫膏留在外桶,由刮板刮落至溜槽,装袋外运。其优点是不需蒸汽,硫膏含水量少,操作简便。其缺点是操作环境差、电耗高。

④ 克劳斯法

克劳斯法是通过两步反应,将含硫气体引入高温燃烧炉进行燃烧,使气体降温后再进入催化床层反应转化生成单质硫。为提高 H_2S 的转化率,可采用克劳斯三级或四级转化。对含 25% H_2S 的进料酸气,采用三级克劳斯反应的总回收率,一般为 96%左右,尾气尚存低含量的 H_2S ,需配用低含量 H_2S 尾气处理技术,才能保证达到环保要求。

⑤ Scot 硫回收工艺

Scot 硫回收工艺由壳牌石油公司开发,其工艺过程是将含硫气体通过加热燃烧炉加热并送入反应器,单质硫和所有硫化物在高温下被还原气转化为 H_2S ,然后进行冷却吸收、硫回收。几乎所有的硫化物都被转化为单质硫。其特点是操作可靠性和稳定性高,硫回收率高,设计灵活,可应用于不同硫含量的气体和不同的溶剂。硫回收率达 95%~99.9%,超级 Scot 工艺甚至可达到 99.95%,可以满足严格的硫排放标准。该方法已在我国多家企业应用,在能耗、设备、运行上尚需改进。

焦炉煤气湿法脱硫技术和回收硫工艺需根据焦炉煤气的处理量、煤气的用途、环保要求，并结合商业成本进行选择。在选择时应兼顾工艺流程简单、使用设备少、操作和维护方便、工艺操作可靠、能耗低等因素。改进 HPF 法脱硫脱氰工艺及采用粗脱硫与精脱硫相结合较适合我国的国情。

1.4.2 技术适用条件

焦炉煤气脱硫工艺通常在焦化企业脱硫工段中进行。目前我国焦化企业很少采用干法脱硫技术用于一次脱硫，一般用做二次脱硫，主要用于湿法一次脱硫的后续处理或对煤气中 H_2S 含量要求严格的场合。经二次脱硫后， H_2S 含量可以降低至很低。

湿法脱硫技术由于其吸收剂和催化剂的不同，方法繁多。使用哪种技术需要根据焦炉煤气的处理量、煤气的用途、环保要求、并结合商业成本进行选择。在选择时应兼顾工艺流程简单、使用设备少、操作和维护方便、工艺操作可靠、能耗低等因素。

1.4.3 节能减排效果

焦炉煤气脱硫技术主要的节能减排效果有：

- (1) 防止设备的腐蚀，减少设备维修费用，降低生产成本，提高回收产品的质量和产量。
- (2) 提高焦炉煤气的品质，减少焦炉煤气燃烧后产生的污染。有效降低煤气燃烧后产生的二氧化硫等有害物质，保护周边环境。
- (3) 降低钢铁企业用煤气中硫化氢的含量，可以使钢铁企业生产出优质钢材。
- (4) 回收后的硫磺可用于医药、化工等领域。

1.4.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：焦炭年生产能力 100 万 t，采用焦炉煤气高效脱硫净化技术。项目总投资 7799 万元，其中建设投资 7500 万元，建设期利息 299 万元。

项目投资估算详见表 1.4.1。

表1.4.1 焦炉煤气高效净化技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	7500.00	96.2%
1.1	建筑费用	1545.92	19.8%

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1.2	设备费用	3720.80	47.7%
1.3	安装费用	1226.78	15.7%
1.4	其它费用	1006.49	12.9%
2	建设期利息	299.00	3.8%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	7799.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：可生产硫磺 2000~2600t，减排 SO₂，减少设备腐蚀，提高钢材产品质量，年增加收入 2698 万元。采用焦炉煤气高效脱硫净化技术，将增加动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 1962 万元，项目利润总额 720 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）5.0 年，财务内部收益率 16.8%。

项目经济效益分析指标汇总详见表 1.4.2。

表1.4.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	7799
1.1	建设投资	万 元	7500
1.2	建设期利息	万 元	299
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0
3	项目总资金	万 元	7799
4	资金筹措	万 元	7799
4.1	自有资金	万 元	3120
4.2	建设贷款	万 元	4679
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	2698
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	1962
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	162
5.4	达产年利润总额	万 元	720

序号	项目名称	单 位	指标
5.5	达产年所得税	万 元	180
5.6	达产年净利润	万 元	540
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	5.0
6.2	财务内部收益率	%	16.8
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	3.8

1.4.5 技术推广应用情况

20 世纪 70 年代末以来，我国一些焦化企业为配合大容积焦炉的投产，先后引进了 AS 循环洗涤（氨-硫化氢循环洗涤）、FRC（苦味酸法）、索尔菲班、VACA 法（真空碳酸钾法）等脱硫脱氰国外先进技术，同时国内也先后自主开发了 PDS（酞菁钴磺酸铵）和 HPF 等脱硫脱氰工艺。

据统计，我国新建或改造焦化企业在 1985-1995 年间采用 AS 法、PDS 比较多，1994-2005 年间采用 HPF 法和 PDS+栲胶比较多，2004-2008 年间采用 VACA 法比较多。从分企业看，大中型钢铁企业采用 AS 法、HPF 法、VACA 法比较多，独立焦化企业采用 HPF 法和 PDS+栲胶比较多。其他脱硫脱氰工艺也有不少企业采用。目前，我国炼焦企业焦炉煤气高效脱硫净化技术的普及率约为 50%。

预计“十二五”期末，焦炉煤气高效脱硫净化技术的推广比例将达到约57%，新建或改造焦化企业将有50%采用HPF脱硫工艺的焦化厂增加废液脱盐装置。

1.4.6 技术知识产权情况

我国中冶焦耐和无锡焦化厂自主开发了以焦炉煤气中氨为碱源，以对苯酚、PDS（酞菁钴磺酸铵）、硫酸亚铁为复合催化剂的脱硫脱氰工艺（简称HPF脱硫工艺）。

中冶焦耐开发了脱硫脱氰效率高、流程简单、操作可靠、设备投资较低的具有中国特色的真空碳酸钾法脱硫工艺。其再生是将再生塔底部脱硫贫液抽出，送至初冷器上段与荒煤气间接换热。换热后脱硫贫液通过再生塔底部闪蒸装置，产生蒸汽，作为脱硫液再生热源，节能效果显著。

鞍山热能研究院与苏州钢铁厂焦化分厂联合研究了以氨为碱源、OP型复合催化剂、脱硫废液提盐的湿式氧化脱硫脱氰工艺（简称OPT工艺）。

1.5 焦化酚氰污水处理技术

1.5.1 技术介绍

(1) 技术概况

在焦化生产中，焦化废水（也称污水）主要由两个渠道产生，一是来自炼焦用煤所含水分，二是焦化生产用水和蒸汽所产生水。若按其水质不同大致可分为三大类：

◆ 不与物料直接接触的设备和工艺用水、用汽形成的冷凝水，这类水在生产过程中未被污染，可重复使用或直接排放。例如焦炉煤气和化学产品蒸馏间接冷却水、苯和焦油精制过程中间接加热用蒸汽冷凝水等。

◆ 接触煤、焦粉尘等物质的废水，一般经过澄清处理后可重复使用。如除尘洗涤水、熄焦水等。

◆ 含有酚、氰、硫化物和有机油类的酚氰废水，这类废水量较大，数量稳定，成分复杂，含有毒有害、难降解的有机物多，是焦化废水治理的重点，也是难点。如剩余氨水、煤气终冷直接冷却水、粗苯和焦油精制加工过程中的直接蒸汽冷凝分离水、设备清洗水等。

由于第一、第二类废水对环境危害极小，因此无需治理，重点只需对第三类污水进行集中治理。据统计，焦化废水排放量与焦炭生产规模有关，也与煤气净化工艺中如蒸氨、蒸汽加热方式等有关。吨焦酚氰废水产生量在 0.3~0.5 立方米之间。近年来，随着企业规模扩大以及蒸氨加热方式等的改变，吨焦酚氰废水产生量呈下降趋势。

目前焦化酚氰废水的处理方法主要有物理化学法、生化法。物理化学法主要有混凝、气浮、吸附、焚烧和高级氧化法；生化法主要有活性污泥、A/O、A²/O、A/O²、O-A/O、生物流化床、生物酶、生物铁、固定细胞技术、MBR 等法。为加强治理效果，实际工程中大多采用物理化学法和生化法联合治理，以生化法为主，物理化学法辅助或作为预处理和后处理。

我国从二十世纪七十年代起开始对焦化酚氰废水进行治理，当时大多采用普通活性污泥法，主要以生物脱酚为主。到了八十年代中后期，为解决焦化废水中的氨氮问题开始 A/O 生物脱氮工艺的研究，九十年代初期，焦化废水生物脱氮技术开发成功，并在宝钢化工公司焦化废水改造工程得到成功运用，至今全国焦化行业均采用 A/O 生物脱氮技术，A²/O、A/O² 以及 O-A/O 是以 A/O 为基础的衍生工艺，采用其他方法很少。为突出重点，本指南主要涉及普通活性污泥、A/O、A²/O、A/O² 以及 O-A/O 法，其他处理方法不包含在本指南范围内。

(2) 技术基本原理

① 普通活性污泥处理技术

普通活性污泥处理技术是焦化废水生物处理最早开发的传统方式，最初开发是以脱酚为目的，所以又称生物脱酚。主要由曝气池、二次沉淀池和污泥回流管线和设备三部分组成。废水和二次沉淀池来的回流污泥混合后再进入曝气池内，进水与回流污泥通过扩散曝气或机械曝气作用进行混合，混合液推流前进，流动过程中进行有机物的吸附、絮凝和氧化作用来去除污染物。

典型普通活性污泥法焦化废水处理工艺流程方框图见图 1.5.1。

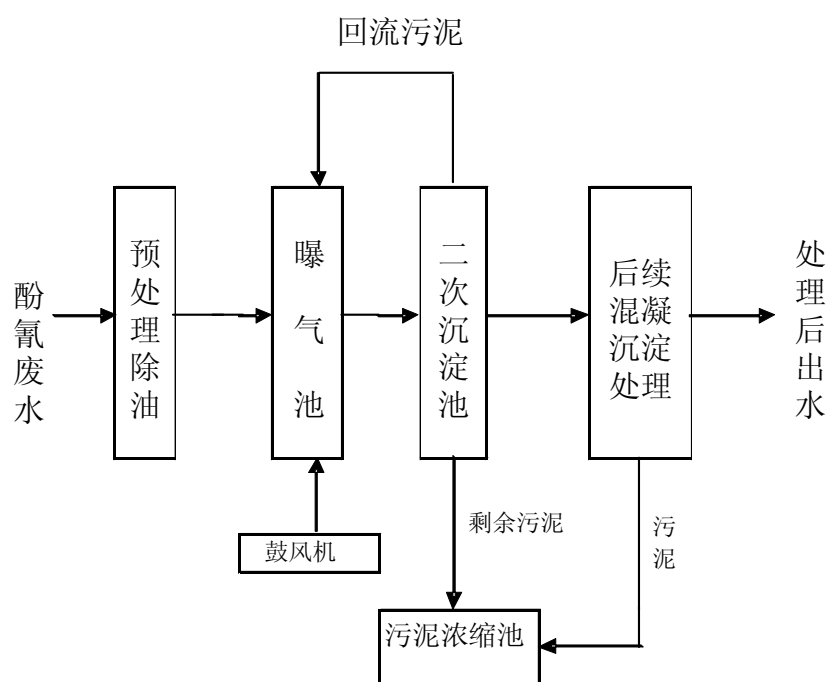


图1.5.1 典型普通活性污泥法焦化废水处理工艺流程方框图

② A/O（缺氧/好氧）生化处理技术

采用 A/O 生化处理技术时，废水首先进入缺氧池，然后进入好氧池。在好氧池中，发生硝化反应，氨氮被氧化为亚硝酸盐氮和硝酸盐氮，部分回水返到缺氧池。在缺氧池中，回水中的硝态氮利用原水中的有机碳进行反硝化反应，硝态氮被还原为氮气。

按照硝化液回流形式可以分为内循环和外循环两种工艺。

内循环是好氧硝化液经二沉淀池分离后泥、水单独回流，上清液回流至缺氧池，污泥回流至好氧池，实际工程中好氧池采用活性污泥工艺，而缺氧池则为生物膜工艺。典型内循环 A/O 焦化废水处理工艺流程方框图见图 1.5.2。

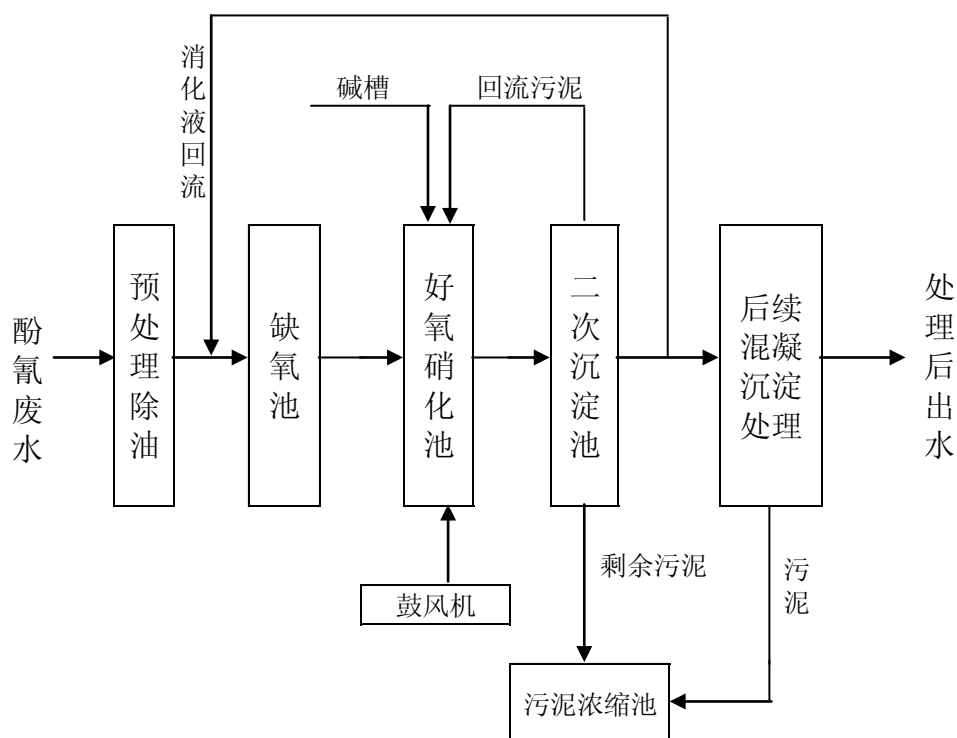


图1.5.2 典型内循环A/O 焦化废水处理工艺流程方框图

外循环是好氧池泥水混合硝化液回流至缺氧池，实际工程中好氧池和缺氧池均采用活性污泥工艺。典型外循环 A/O 焦化废水处理工艺流程方框图见图 1.5.3。

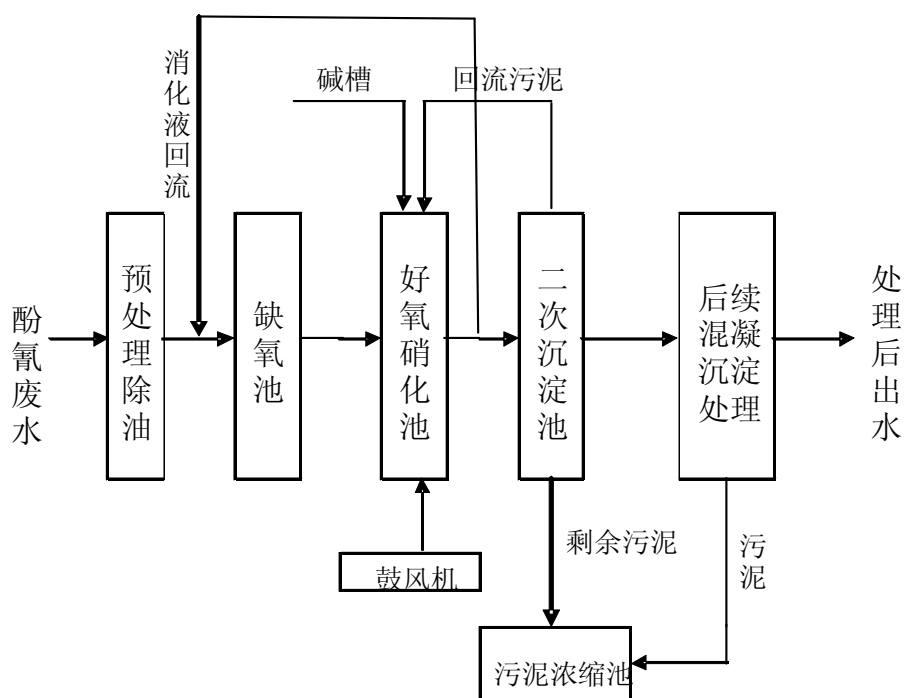


图1.5.3 典型外循环A/O 焦化废水处理工艺流程方框图

③ A^2/O （厌氧-缺氧/好氧）生化处理技术

A^2/O 工艺是 A/O 工艺的一种改进工艺。与 A/O 工艺相比，在缺氧池前多了一个厌氧池，目的是起水解酸化作用。复杂的环芳烃类有机物在好氧条件下较难生物降解，通过厌氧酸化处理，可以将其转化为小分子、易生物降解的有机物，提高焦化废水的可生物降解性。

典型 A^2/O 焦化废水处理工艺流程方框图见图 1.5.4。

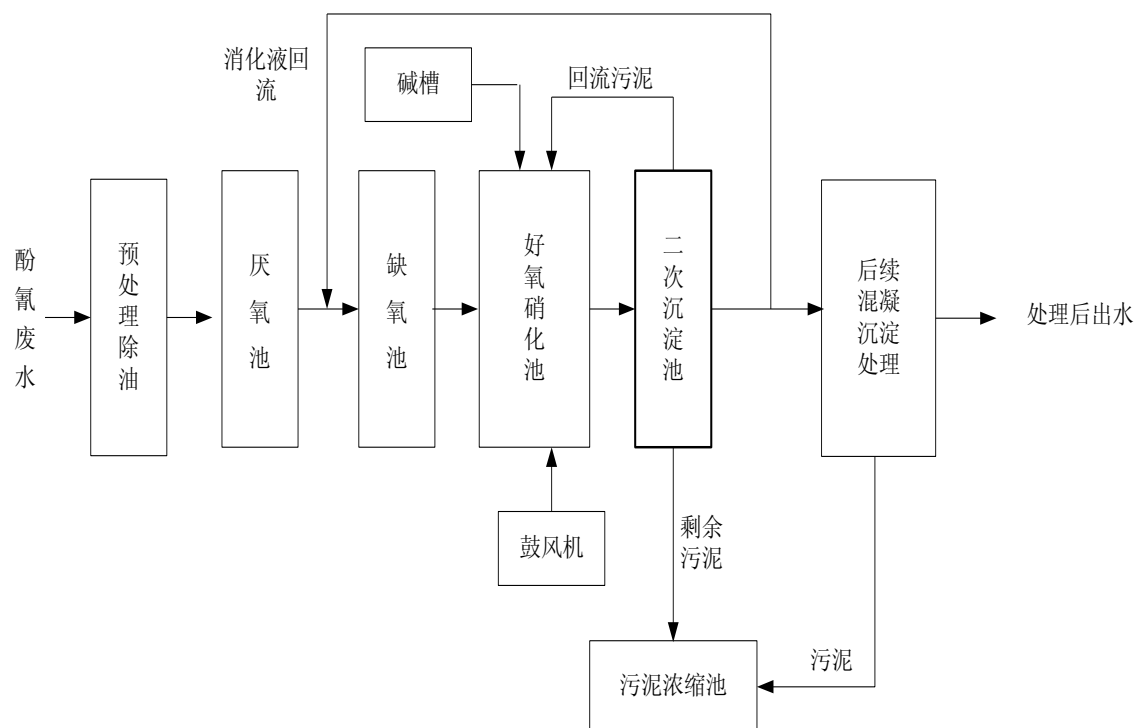


图1.5.4 典型 A^2/O 焦化废水处理工艺流程方框图

④ A/O^2 （缺氧/好氧-好氧）生化处理技术

A/O^2 工艺也是 A/O 工艺的一种改进工艺，其中 A 段为缺氧反硝化段，第一个 O 段为硝化段，一段硝化液回流至缺氧段进行反硝化，第二个 O 段好氧时为了防止亚硝酸盐外排，同时进一步降低 COD，硝化段分为两段起到水质缓冲作用，增加了生化工艺耐水质冲击性能。工程中通常 A 段采用生物膜法，第一个 O 段采用活性污泥法，第二个 O 段采用生物膜法。

典型 A/O^2 焦化废水处理工艺流程方框图见图 1.5.5。

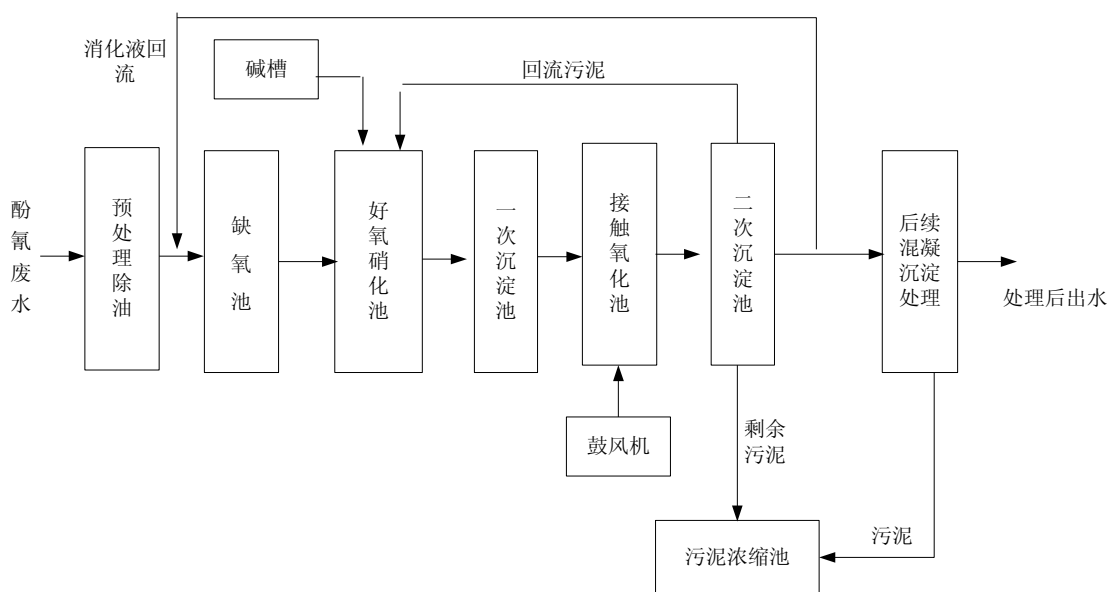


图 1.5.5 典型 A/O₂ 焦化废水处理工艺流程方框图

⑤ O-A/O（初曝-缺氧/好氧）生化处理技术

O-A/O 工艺也是 A/O 工艺的一种改进工艺，由两个独立的生化处理系统组成，第一个污泥系统由初曝池（O）+初沉池构成，第二个污泥系统由缺氧池（A）+好氧池（O）+二次沉淀池构成，其中 A 段通常采用生物膜法，第一个 O 段采用初曝+生物膜法，第二个 O 段采用接触氧化法。初曝池根据工艺需要降解进水 COD 和有毒有害物质，A/O 系统实现脱氮并进一步去除 COD 和其它污染物。第一个好氧系统投加以活性炭为生物载体，在曝气搅拌条件下，促进微生物成膜和代谢，从而实现单位体积内较高的混合液污泥浓度（MLSS）和较好的生物传质性，使来水水质波动对后续 A/O 系统影响降低到最小。O-A/O 作为一种双污泥系统工艺，抗冲击能力强。由于一段好氧降解了部分有机物，降低了缺氧反硝化的碳氮比，将降低总脱氮率。

典型 O-A/O 焦化废水处理工艺流程方框图见图 1.5.6。

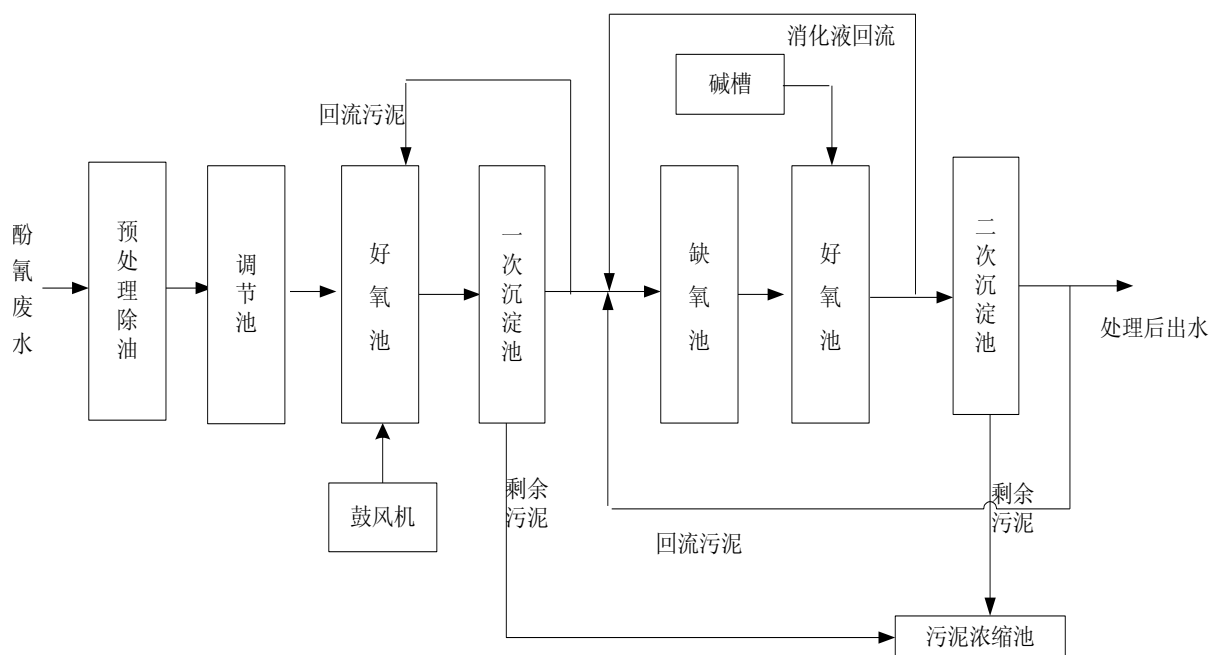


图 1.5.6 典型 O-A/O 焦化废水处理工艺流程方框图

1.5.2 技术适用条件

就一般而言，大多生化处理技术适用于所有常规机焦炉、半焦（兰炭）焦炉以及产生酚氰废水的焦化企业。

（1）普通活性污泥处理技术

对焦化废水进水要求不高，能有效降解焦化废水中的酚、氰、COD 等，运行费用低，缺点是对氨氮没有去除效果，对 COD 有机物去除率不高，系统抗冲击能力差、操作运行不稳定。目前焦化行业基本完成了 A/O 工艺改造，实现脱氮的目的。

（2）A/O 生化处理技术

能有效去除酚、氰、COD 及有机污染物，缺点是缺氧池耐水质冲击性差，废水进入时需稀释，出水 COD 浓度偏高。

（3）A²/O 生化处理技术

能有效去除酚、氰、COD 及有机污染物，出水 COD 可达标，缺点是当进水 COD 或 NH₃-N 高时，进水需要进行稀释，流程长，运行费用较高。

（4）A/O² 生化处理技术

能有效去除酚、氰、COD 及有机污染物，出水 COD 可达标，缺点是进水也需要稀释，流程长，运行费用较高。

（5）O-A/O 生化处理技术

该工艺微生物密度高，分解能力强；实现短程硝化反硝化、短程硝化-厌氧

氨氧化，具有高效、节能、去除污染物速度快、抗毒害物质和系统冲击能力强、不需要添加稀释水，其产泥量可比常规工艺减少 70%~90%，缺点是流程长，运行费用较高。

1.5.3 节能减排效果

酚氰废水处理过程中消耗的能源介质有水、电、蒸汽、氮气等，除去水中有害杂质主要有化学含氧量（COD）、酚、氰（ CN^- ）、氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）、油类、硫化物、悬浮物（SS）等。各种生化处理技术具体减排效果如下：

（1）普通活性污泥处理技术

进水 COD 小于 2200mg/L 时，COD 去除率 60%-70%，配合预处理措施，COD 去除率可提高到 85%~95%，出水 COD 通常在 200mg/L 以上，难以达到国家排放标准。

（2）A/O（缺氧/好氧）生化处理技术

进水 COD 小于 2200mg/L 左右时，配合预处理措施，COD 去除率可达到 90% 以上，出水 COD 约 150mg/L。

（3） A^2/O （厌氧-缺氧/好氧）生化处理技术

当进水水质稳定，COD 低于 2000mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于 150mg/L 时，配合预处理等措施，酚、氰处理效率 99.8% 以上，氨氮去除率大于 97%，COD 去除率大于 95%，出水 COD 低于 100mg/L， $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于 5mg/L。

当进水 COD 大于 3500mg/L 或 $\text{NH}_3\text{-N}$ 大于 245mg/L 时需要进行稀释。

（4） A/O^2 （缺氧/好氧-好氧）生化处理技术

当进水水质稳定，配合预处理等措施，出水可控制 COD 低于 100mg/L， $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于 5mg/L。同 A^2/O 治理工艺一样，当进水 COD 或 $\text{NH}_3\text{-N}$ 偏高时需要对进水进行稀释。

（5）O-A/O（初曝-缺氧/好氧）生化处理技术

抗冲击能力强，可耐受进水 COD 达 4500mg/L， $\text{NH}_3\text{-N}$ 达 300mg/L，不需添加稀释水。使用 NaOH 调节 pH。当进水 COD 低于 4500mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于 650mg/L；出水可控制 COD 低于 100mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于 5mg/L。

据统计，目前焦化行业大多数企业酚氰废水处理装置实际有害杂质除去率达到 85%-98%，只有极少数企业低于 80%。现将大部分企业经酚氰废水处理装置（A/O、 A^2/O 、 A/O^2 以及 O-A/O 法）处理前后污染物浓度变化情况统计见表 1.5.1。

表1.5.1 2009年焦化废水处理前后污染物浓度变化及企业达标统计情况

序号	水中有害杂质名称	处理前 污染物浓度 (mg/L)	处理后 污染物浓度 (mg/L)	GB13456-92 (一级/二级) (mg/L)	企业达标率 统计
1	悬浮物 (SS)				
2	挥发酚	300-700	0.1-0.5	0.5	90% 以上 达标
3	氰化物 (CN ⁻)	6-20	0.08-0.5	0.5	95% 以上 达标
4	化学含氧量 (COD)	2000-4500	60-150	100/150	85% 以上 达标二级
5	油类	20-50	2-8	8/10	95% 以上 达标二级
6	氨氮 (NH ₃ -N)	80-300	7-25	15/25	80% 以上 达标二级
7	pH 值		6-9	6-9	96% 以上 达标

据初步估算，其直接减排效果是：

- ◆ 减少挥发酚污染物排放 4.6~7.1 万 t；
- ◆ 减少氰化物污染物排放 0.09~0.18 万 t；
- ◆ 减少化学含氧量污染物排放 30.46~45.69 万 t；
- ◆ 减少油类污染物排放 0.30~0.51 万 t；
- ◆ 减少氨氮污染物排放 1.22~3.04 万 t。

1.5.4 成本效益分析

(1) 投资估算

焦化废水处理技术因采用生化处理技术不同或处理能力不同则建设投资不同，根据大量工程案例统计可知，除普通活性污泥处理技术建设投资偏低外，其余 4 种 A/O 生化处理技术处理焦炭单位建设投资在 10~14 元/t 焦炭之间。

为简化计算，焦化废水处理技术处理单位焦炭建设投资取值为 9.8 元/t 焦炭。即焦化废水处理技术总投资 13 元/t 焦炭，其中建设投资 9.8 元/t 焦炭，建设期利息 0.24 元/t 焦炭（建设期贷款比例 60%），铺底流动资金 2.95 元/t 焦炭。投资估算详见表 1.5.2。

表1.5.2 焦化废水处理项目总投资估算表

序号	项目名称	总投资（元/t 焦炭）
一	建设投资	9.8
1	建筑费用	3.2
2	设备费用	3.3
3	安装费用	2.2
4	其他费用	1.1
二	建设期利息	0.24
三	铺底流动资金	2.95
四	项目总投资	13

（2）经济效益分析

焦化废水处理项目经济效益包括：年节约熄焦水 $0.4\text{Nm}^3/\text{t}$ 焦炭，则年收入合计 0.94 元/t 焦炭。焦化废水处理项目建设，增加了水处理药剂及水、电等动力费用，同时增加了人工成本、固定资产折旧、修理等费用，增加管理费、财务费等费用，上述各项费用合计 2.40 元/t 焦炭（达产年）。经测算，项目达产年年利润总额为-1.45 元/t 焦炭。

1.5.5 技术推广应用情况

为促进焦化行业广泛使用焦化污水处理技术，近二十年来国家有关部委出台了一系列强制措施：

（1）《钢铁工业水污染物排放标准》（GB13456-92）中对焦化行业废水排放中悬浮物、挥发酚、氰化物、化学含氧量、油类、氨氮以及 pH 值有严格指标规定。

（2）《焦化行业准入条件》（2008 年修订）有具体如下规定：

① 常规机焦炉企业应按照设计规范配套建设含酚氰生产污水二级生化处理设施、回用系统及生产污水事故储槽（池）。

② 半焦（兰炭）生产企业氨水循环水池、焦油分离池应建在地面以上。生产污水应配套建设污水焚烧处理或蒸氨、脱酚、脱氰生化等有效处理设施，并按照设计规范配套建设生产污水事故储槽（池），生产废水严禁外排。

③ 酚氰废水处理合格后要循环使用，不得外排。外排废水应执行《污水综合排放标准》（GB8978-1996）。排入污水处理厂的达到二级，排入环境的达到一级标准。

预计“十二五”期末，酚氰废水处理措施在焦化企业的覆盖率将达到 100%，但构成将有所变化，其中：约 43%焦炭产量采用 A/O²（含少量 A²/O²、A²/O³ 等），约 15%焦炭产量采用 O-A/O，约 5%焦炭产量将采用新型生化处理技术。

1.5.6 技术知识产权情况

目前我国共有 3 家以上企业拥有酚氰废水处理技术知识产权：

（1）中冶焦耐工程技术有限公司拥有 A²/O 和 A/O² 法酚氰废水处理技术知识产权；

（2）山西化学工业第二设计研究院拥有 A/O² 和 O-A/O 法酚氰废水处理技术知识产权；

（3）北京首钢国际工程技术有限公司拥有 A/O 和 A/O² 法酚氰废水处理技术知识产权。在我国专利中，与焦化废水处理技术有关的专利达 94 项之多。

第二节 烧结球团工序

烧结工序能耗约占冶金总能耗 12%，是仅次于炼铁的第二大耗能工序。由于近年来我国钢铁产量激增，烧结矿的产量也随之大幅增加，节能减排压力日趋增加。烧结和球团工序实现节能环保主要从三个方面考虑，一个降低能耗；二是余热利用技术、三是烧结废气脱硫技术。

目前，我国钢铁企业烧结厂通过实施精料方针，已广泛应用厚料层烧结、降低漏风率，减少固体燃料用量等清洁生产技术。单位烧结矿二氧化硫排放量得到一定控制，但钢铁行业烧结工序二氧化硫排放总量仍在增加。据调查，全国钢铁行业烧结工序二氧化硫排放总量 2005 年约 72 万吨，2009 年增加至约 84 万吨。因此，钢铁企业要将烧结脱硫工作提上重要日程。同时烧结烟气脱硫方法众多，至今没有一种成熟的技术适合烧结厂，针对烧结生产过程中多种污染排放导致的严重环境污染问题，开发高效、低成本的适合我国烟气特点脱硫新技术仍然极为迫切。

另外，烧结工序中有 50%左右的热能被烧结烟气和冷却机废气带走。除去热风烧结、热风点火、热风保温所用热风之外，热风还有大量剩余，所以通过技术创新最大限度地回收烧结环冷机的烟气余热，实施和推广烧结烟气余热利用技术是未来“十二五”的发展方向。

2.1 小球烧结工艺技术

2.1.1 技术介绍

随着高炉强化冶炼和喷煤量的提高，炼铁对原料的要求越来越高。国外钢铁企业大多数采用 100%富矿粉烧结，普遍采用厚料层及低温烧结技术，因而生产的烧结矿还原性好、强度高、成分稳定、粉末少。目前我国多数烧结厂采用细精矿或部分细精矿为烧结原料。由于掺进了部分细精矿，烧结混合料透气性不好，采用传统的烧结工艺很难实现低温厚料层烧结。

解决掺进细精矿后透气性差的有效办法是：将烧结混合料造成小球。即“小球烧结工艺”，其特点是：通过改变现有混合机工艺参数及内部结构，延长混合料在混合机内的有效滚动距离，改善混合料在混合机内的滚动状态，使烧结混合料造成 3mm 以上小球比例大于 75%，通过蒸汽预热，燃料分加，偏析布料，提高料层厚度等方法，实现厚料层、低温、匀温、高氧化性气氛烧结。通过这种方法烧出的烧结矿，上下层烧结矿质量均匀。烧结矿主要固结方式为：针状、柱状铁酸钙固结及 Fe_2O_3 再结晶形成的晶桥固结，兼有高碱度烧结矿和球团矿的优点，

因此这种烧结矿强度高、还原性好。

小球烧结工艺技术是将铁精矿、富铁矿、熔剂（石灰石或白云石）、返矿、生石灰和少部分固体燃料加水混合制成小球团，然后将小球团和固体燃料混合，混合后用偏析布料法将小球料布在烧结机上，然后点火烧结，制造出小球烧结矿，其工艺流程为：

（1）备料配料：小球烧结工艺对原燃料的要求与普通烧结方法类似。一般要求铁矿粉品位高、成分稳定、杂质少、粒度合理。要求熔剂有效 CaO 高、杂质少、成分稳定，粒度不应过大，以利于加水消化和混匀。要求燃料固定碳含量高、灰分低、挥发份低、硫份低且成分稳定。燃料粒度问题是一个关键问题，我国烧结厂焦粉粒度较细，一般粒度小于 3mm 的焦粉占 80%左右。烧结生产实践证明，焦粉粒度太细，对烧结矿质量和能耗都不利。细磨焦粉不仅投资高，增加成本，而且影响作业率。因此，从燃料粒度对小球烧结的影响方面考虑，还是普通烧结法的燃料粒度效果更好。配料时根据高炉所要求的碱度来调整熔剂的配入量，配料时配入少量焦粉，其余为含铁原料。

（2）混合造球：根据小球传热分析及烧结工艺的热工特点，小球粒径不宜过大，一般 3~12mm 占 75%左右。为满足这个要求，采用了以下两项技术：

①将烧结厂原来的圆筒混合机改造为强力圆筒混合造球机，从而解决造球的问题。具体技术措施为：调整混合机的倾角和转速，使其达到最佳的状态，其目的是为了延长造球时间，增加混合料造球速度，提高造球效果。在混合机的进料端安装导料装置，防止混合料出现倒料和漏料现象。在混合机内安装强化造球挡料装置，该装置可以避免混合料出现抛料现象，使混合料处于强迫滚动运动状态。在混合机出料端安装多层强化挡圈，该装置具有强化制粒和对造好的球过筛作用。

②在圆筒混合机内采用雾化喷水造球技术。我国在混合机内加水一般都采用在管道上打眼的方法，使给水呈注流状，这种加水方式不利于烧结混合料成球，烧结混合料成球机理与球团不尽相同，球团需要先造母球，加水呈滴状，即滴水成核（母球）。而烧结混合料中仅返矿量就占很大一部分，再加上部分富矿粉及其他粗颗粒原料，造球的核是足够的。烧结混合料成球主要是尽快促进核（母球）长大，雾状水分布均匀，显然有利于核（母球）快速长大。另外，混合机混合造球时间很短，一般为 1~3 分钟，注流状加水方式使水加在局部，等到水散开后发挥造球作用时，混合料大部分已从混合机出料端卸出。因此，注流状加水方式不利于混合料成球。

（3）二次配加焦粉及小球和焦粉混合：二次配加焦粉可根据现场设备情况，采用以下两种方式：①将二次配入的焦粉加在一、二次混合机之间的送料皮带上。

②将二次配入的焦粉用皮带机从二混的出料端加入到二混内的最佳位置。

生产中普遍采用的是第一种方法，大部分的焦粉是第二次配入混合料，二次配加的焦粉和从一次混合造球机出来的小球料全部进入二次混合造球机，进一步混合和造球。因为一次混合料中有一定量的小球，因此，绝大部分焦粉处于外层和球粒之间，使得焦粉燃烧充分、速度快、效果好。

(4) 偏析布料：偏析布料就是使混合料沿料层高度偏析分布，即烧结料层上部混合料粒度偏小，下部混合料粒度偏大。这种布料方法可以提高烧结料层透气性，使碳在料层中分布更加合理。为了实现偏析布料，对烧结厂现有的泥辊加反射板布料器进行改造，使布料泥辊处于最佳高度。通过对反射板的倾角和长度进行必要的调整，利用球状物曲线运动更快的原理，适当改变反射板的形状，增加小球在水平方向上的运动速度。由于小球直径越大，运动速度越快，因此，有利于实现偏析布料。

(5) 点火烧结：小球料布到烧结机上以后，进行点火烧结。由于采用燃料分加新技术，使绝大部分焦粉处于小球外层和球粒之间，这样小球料容易点火，点火温度比普通烧结法低 50~100℃，有利于提高烧结料层的透气性。另外，在烧结机上不设置小球干燥段，可以减少投资，提高烧结机产量。

(6) 破碎、热筛、冷却、冷筛和成品小球烧结矿：采用剪切式单辊破碎机将小球烧结矿破碎到 130mm 以下，再用热筛对小球烧结矿进行筛分。热筛后，小球烧结矿冷却到 150℃ 以下再进行筛分整粒处理，最终得到成品小球烧结矿，该产品直接送至高炉原料仓作为高炉的炼铁原料。

2.1.2 技术适用条件

小球烧结工艺技术在我国主要适用于采用细精矿或以部分细精矿作为烧结原料的烧结厂。通过小球烧结工艺，可以改善烧结混合料的透气性，进而提高烧结矿的产量和质量。

2.1.3 节能减排效果

小球烧结工艺技术可以实现以下效果：①改善烧结料层透气性，提高烧结速度和产量；②有利于增加料层厚度和降低固体燃料消耗量以实现低温烧结；③由于小球自身依靠固相扩散固结，而小球间为液相粘结，故可提高烧结矿强度，增加成品率；④可以降低烧结矿中 FeO 含量，改善其还原性；⑤可以用低负压抽风烧结，节省电耗。

小球烧结新工艺的产品既可是碱性矿也可是酸性矿。各项指标均优于普通烧结矿和普通球团矿。采用小球烧结技术：

烧结机增产 4%~8%，FeO 含量降低 5%~7%，还原度提高 10%~15%；

转鼓强度提高 5%，固体燃料节约 10%~15%；

高炉中配加小球烧结矿 40%可增产 8%，焦比降低 5kg/t 铁。

以我国最早采用小球烧结工艺的安钢集团水冶钢铁公司 $2 \times 24\text{m}^2$ 烧结机为例，采用小球烧结工艺后，料层厚度由 500mm 增加到 600mm，在单位风量只增加 2.85%的情况下，平均利用系数由 $1.99\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 提高到 $2.13\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，增加了 7.04%。烧结矿 FeO 含量下降的情况下，转鼓强度从 71.3%提高到 72.5%，烧结矿冶金性能得到了改善。从烧结过程来看，烧结机废气温度提高了 7°C ，平均综合返矿率降低了 5.3 个百分点，其中热返矿率降低 9 个百分点，成品率相应提高。由于小球烧结工艺采用了热废气对料层进行预热和保温，料层透气性好，料层厚度提高了 100mm。因料层提高而产生的自动蓄热作用使热量使用率进一步提高，燃料配比因此而降低，烧结固体燃料由 51kg/t 下降到 46kg/t，同时也有利于烧结矿 FeO 含量的降低和还原性的提高。

小球烧结工艺不仅带来了燃料消耗的降低，同时由于减少了燃料带入的硫量，增强了烧结过程的氧化气氛。透气性提高和烧结过程的均匀进行，均有利于烧结脱硫，实施小球烧结工艺以后，烧结矿含硫量降低了。

2.1.4 成本效益分析

(1) 投资估算

根据工程案例可知，小球烧结工艺技术总投资 125.00 元/100t 烧结矿，其中建设投资 119.63 元/100t 烧结矿，建设期利息 0.00 元/100t 烧结矿（建设投资全部采用自筹资金），铺底流动资金 5.37 元/100t 烧结矿。投资估算详见表 2.1.1。

表 2.1.1 小球烧结工艺技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/100 吨烧结矿）
一	建设投资	119.63
1	建筑费用	22.22
2	设备费用	69.63
3	安装费用	11.11
4	其他费用	16.67
二	建设期利息	0.00
三	铺底流动资金	5.37
四	技术总投资	125.00

(2) 经济效益分析

采用小球烧结工艺技术，100 吨烧结矿可节省焦粉 5kg/100 吨烧结矿 年。节

省焦粉收入 427.35 元/100 吨烧结矿 年。小球烧结工艺技术项目建设，增加了固定资产折旧、修理等费用，增加管理费等费用，上述各项费用合计 110.56 元/100 吨烧结矿 年（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 308.80 元/100 吨烧结矿 年，投资内部收益率 183.83%（税后），投资回收期（含建设期 1 年）1.6 年。经济评价总表见表 2.1.2.

表 2.1.2 小球烧结工艺技术经济评价指标

序号	项 目	单 位	项 目
一	总投资	元/100t 烧结矿	125.00
1	建设投资	元/100t 烧结矿	119.63
2	建设期利息	元/100t 烧结矿	0.00
3	铺底流动资金	元/100t 烧结矿	5.37
二	生产追加流动资金	元/100t 烧结矿	12.53
三	总资金	元/100t 烧结矿	137.53
四	资金筹措	元/100t 烧结矿	137.53
1	自有建设资金	元/100t 烧结矿	119.63
2	建设期利息	元/100t 烧结矿	0.00
3	自有流动资金	元/100t 烧结矿	17.90
4	建设资金贷款	元/100t 烧结矿	0.00
5	流动资金贷款	元/100t 烧结矿	0.00
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/100t 烧结矿	427.35
2	不含税总成本费用	元/100t 烧结矿	110.56
3	销售税金及附加	元/100t 烧结矿	7.99
4	利润总额	元/100t 烧结矿	308.80
5	所得税	元/100t 烧结矿	77.20
6	税后利润	元/100t 烧结矿	231.60
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	1.6
2	投资内部收益率	%	183.83

2.1.5 技术推广应用情况

小球烧结技术在我国有两种主要流程：

①利用专设的圆盘造球机，外裹煤焦粉，然后烧结。该流程在 1995 年在安阳钢铁公司 2 台 24m^2 烧结机和酒钢 1 台 132m^2 烧结机上采用这种工艺技术。

②用烧结厂原来的圆筒混合机造球。此流程只在其结构上适当改造，采用水雾化造球技术提高了造球效果，因而不需要新增圆盘造球机，既省投资，又适合老厂采用；生球里有内配煤粉，球外又裹煤粉，这种流程已在山东泰钢、唐钢、马钢等烧结厂应用。

应用本项技术较全面的是济钢一烧两台 90m^2 烧结机，并取得了较显著经济效益。小球烧结工艺技术的三种关键技术在我国的应用情况分别为：

（1）采用强力圆筒混合造球机和雾化喷水器造球技术及效果

新型小球烧结法关键技术就是要将烧结混合料制成直径为 3mm 以上的小球，烧结料层高度大于 600mm 。为了将混合料制成小球，强力圆筒混合造球机专利技术应运而生。该技术广泛应用到上海梅山、鞍钢、马钢、莱钢、杭钢、南钢、合钢、北台、泰钢等企业。

（2）烧结机布料泥辊上部矿槽内蒸汽预热混合料技术

新型小球烧结法要求烧结料层厚度 600mm 以上。我国烧结厂烧结料层厚度大部分也都在 450mm 以上。因此提高烧结混合料温度，减少烧结料层中过湿带对料层透气性的不利影响是相当重要的。该技术具有以下特点：加蒸汽地点离烧结机最近，热损失最小；该技术可使蒸汽能够最大限度和混合料接触，蒸汽热利用率最高，可达 95% 以上；采用该技术后，小球表面湿度增加，可以降低气体通过料层的阻力，提高烧结料层的透气性；在蒸汽量不变的情况下，该技术可使混合料温度提高 $20\sim 30^\circ\text{C}$ ，即布到烧结机上的混合料温度可达 $75\sim 90^\circ\text{C}$ ；由于矿仓壁处阻力较小，蒸汽较容易通过，可以缓解混合料粘矿仓壁和堵矿仓的现象。

该技术已在武钢 1 台 435m^2 烧结机和 1 台 360m^2 烧结机，马钢 1 台 300m^2 烧结机，重钢 2 台 105m^2 烧结机，上海梅山 1 台 135m^2 烧结机，涟钢 2 台 40m^2 烧结机和 1 台 130m^2 烧结机，湘钢 2 台 90m^2 烧结机，凌钢 1 台 52m^2 烧结机，莱钢 105m^2 烧结机等 10 多台大中型烧结机上应用。

（3）石灰分加和燃料分加技术

石灰分加和燃料分加是新型小球烧结法关键技术之一。该技术工艺过程是将铁矿物、返矿、添加剂、部分石灰和固体燃料加水混合造球，制成直径大于 3mm 的小球，并且在小球表层外裹一定比例的石灰和固体燃料，然后进行烧结。

目前，由于各种原因的影响，截止 2010 年，我国小球烧结工艺技术普及率仅能达到 40% 左右，但是从其对钢铁生产带来的效果来看，推广前景广阔，“十

二五”期末预计该技术推广比例将达到约 70%。

2.1.6 技术知识产权情况

目前，我国有几家钢铁研究和设计单位拥有小球烧结工艺技术的知识产权。所申请的相关专利如下表所示：

表 2.1.3 小球烧结工艺技术知识产权

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	全磁铁精矿小球烧结矿制造方法	CN1074713	冶金工业部钢铁研究总院	1993 年 02 月 18 日
2	一种烧结混合料或小球团料的预热方法	CN1214371	冶金工业部钢铁研究总院	1998 年 07 月 14 日
3	酸性小球外滚生石灰烧结工艺	CN1201765	冶金工业部鞍山冶金设计研究院、唐山钢铁股份有限公司烧结厂	1998 年 06 月 10 日
4	一种改进的混合机用滚筒	CN2601728	邯郸钢铁股份有限公司	2003 年 03 月 11 日

2.2 降低烧结漏风率技术

2.2.1 技术介绍

目前，国内外所使用的烧结机，普遍存在着能耗高、效率低、产品质量差、利用系数低等问题，其根本原因是烧结机漏风。国内烧结机漏风率一般都在 50% 左右，这种有害漏风，已经成为烧结行业的一大世界性难题，它最终制约着烧结生产能力的提高，造成生产成本的上升，各种消耗升高。烧结工序的电耗 70%~80% 都消耗在主抽风机上，而这些都与漏风有关。如果折算成成本，全国烧结厂每年为此损失 40 亿元以上，而且也极大地增加了环境保护负担。我国是世界第一产钢大国，天然富矿少，铁矿石加工以烧结工艺为主，解决烧结行业漏风问题是实现清洁生产的重要课题。

通过对烧结抽风系统的研究分析，可以认为漏风主要集中在以下几个部位：

（1）风机与烧结风箱之间的漏风

该部分漏风主要是由于管道的磨损和热胀冷缩变形及放灰系统密封不好、管理不到位等所造成的。其漏风率因厂而异，但基本都在 5%~10% 左右。

（2）头尾密封装置与台车底面之间的漏风

目前对于头、尾密封，烧结厂普遍采用的是弹性支撑或配重式密封装置。弹性活动密封板由于频繁受冲击力作用，又长期受高温废气的热冲击，导致弹性下降、台车梁变形而影响密封效果，这部分漏风约占烧结机总风量的 10%左右。

（3）烧结台车本体漏风

这是烧结系统漏风的最关键部位。由于台车栏板变形致使栏板与台车体之间、上下栏板之间形成缝隙造成漏风；篦条销子与台车栏板之间间隙配合不严所造成的漏风；由于栏板结构、材质不合理出现的栏板裂缝所造成的漏风；由于台车与台车之间栏板变形，以及因设计时台车体与栏板两端各留有 1mm 的间隙，在栏板与台车体装配后产生 2mm 的间隙，造成台车与台车之间漏风。这些漏风影响很大，处理也极其困难，约占总风量的 30%左右。

（4）台车与风箱滑道之间的漏风

这也是烧结机的主要漏风部位之一，漏风率随着烧结机长宽比例的增大而增大。国内外很多烧结工作者对此都进行过多方面的研究：例如改进润滑效果、改进斜滑道、改进板簧密封等。但由于传统烧结机设计不符合运动学原理，存在变速运动和滑板的不灵活等原因，因此漏风率很高，估计在 10%以上。

由于烧结工艺原理的原因，从源头上彻底治理烧结漏风难度非常大。为了有效降低烧结漏风率可通过以下几个方面开展工作：

（1）抽风机至烧结机风箱之间漏风治理

这部分为机械式漏风，如果安装精确并维护得当，该处漏风不会很大。但经过长时间运转后，在不同部位会出现明显的漏风（约 10%左右），对此生产现场可视情况不同进行必要的堵漏。

（2）烧结机头尾漏风治理

该处漏风约为 10%左右。其治理方案可以将现有的弹簧式密封结构改造成全金属柔磁性密封装置。该装置采用了密封板与箱体精巧的无漏风连接结构，迷宫磁力柔性体的良好弹性和磁阻力矩，能使密封板始终紧紧的压向台车底部，始终保持良好的密封。

（3）烧结台车系统全密封

台车车体漏风由四部分组成，按照常规思路可提供的治理方案如下，这些可以根据具体情况选择使用：

①台车栏板与台车体之间（两端严重）由于在交变应力作用下，栏板变形翘曲使栏板与台车体之间（含两端）产生缝隙而漏风。曾经有人尝试过带有“止”型口的栏板，但是效果不理想。推荐的方案是将台车与栏板制造成迷宫件的复合栏板，保证在栏板翘曲后与台车体不产生缝隙，即达到了完全密封。

②台车压篦条的销子孔，每块台车有 6 个，无论如何装置，该处都有漏风，

且在销子掉落后将出现一个大孔洞，漏风更严重。采用的方案是在台车一端预先埋铸一块不锈钢销，另一端预埋钢板与焊接相结合，这样可以使该处不漏风。

③台车体与栏板端部漏风。由于制造时已产生 2mm 的缝隙，加之栏板变形后，端部缝隙增大，造成漏风。该处可考虑采用两种方案：一种是将两相接触的栏板端部做成镶嵌式（即迷宫结构）或弹压式结构（视栏板端的厚度而定）；另一种补充方案是在两栏板的侧面设置一耐高温的软连接结构，一端固定在一个台车端部侧面，另一端搭在另一台车侧面，在负压作用下，即自动紧紧压在台车端部的侧缝上面。

另外，针对台车栏板的竖向裂缝，可采用由两种材质组合的复合栏板，即使用的两种材质在同等温度下变形不同，进行复合（在栏板中间埋铸一块薄钢板）。

④台车滑板与风箱滑道密封。为解决该处漏风曾经有人尝试过在台车密封槽内安装密封橡胶条的办法，但存在使用过程摩擦阻力大、密封件不耐高温等问题。也有人尝试过将台车滑道改为板簧的形式，但是效果都不太理想。

⑤全封闭多级磁力密封技术。为了有效治理烧结漏风，提高密封效果，又不致增加改造工作量，在上述方案基础上推荐采用全封闭多级磁力密封技术方案。该方案设计的依据是全封闭理论、迷宫密封、热风烧结理论。方案实施不改动台车，仅在原有基础上进行。它不但能实现烧结机的密封，还能实现烧结过程热风的综合利用，具有节能、降耗、提高产品质量的多重功效。实施该方案后，烧结机即可以实现无滑道和滑板，是烧结密封的一种突破，理论上可以达到无漏风的目的。

2.2.2 技术适用条件

烧结漏风率较高在我国烧结厂中普遍存在，因此该技术普遍适用于我国烧结生产企业。降低烧结漏风率技术重点在于对相关设备的改造和技术操作管理。可根据烧结生产过程中漏风的具体情况对相关设备作相应的改造和维护，最终实现降低烧结漏风率的目的。

2.2.3 节能减排效果

在烧结生产过程中，根据计算每吨干混合料的理论空气需要量为 800m^3 ，按照一般情况考虑，以每吨干料的烧成率为 85%，烧结饼的成品 70% 计算，每吨成品烧结矿的空气需要量为 1345m^3 ，但在实际生产中空气消耗量大大超过这个数值，其主要的原因是烧结设备漏风严重。对不同原料和不同型式的风机，均有合理的容许漏风率，约在 15%~30%。因此，控制烧结漏风率会直接降低烧结生产的电耗和固体燃料消耗。

风机电耗与烧结漏风率有着直接的关系。在烧结机漏风率下降 10%时，多数情况下每吨烧结矿的电耗可降低 1.5kWh/t 以上。如日本新日铁大分 2 号烧结机采取降低漏风率的措施后，漏风率降低了 13.5%，电耗降低了约 2.5kWh/t，相当于每降低 10%漏风率，电耗降低了 1.85kWh/t。我国鞍钢三烧将漏风率从约 50%降至 40%左右以后，电耗由 21.9kWh/t 降至 20.2kWh/t，即降低 10%的漏风率，电耗降低 1.7kWh/t。莱钢集团银山型钢公司烧结厂两台 265m² 烧结机分别于 2004 年 5 月和 2005 年 2 月建成投产，初期由于各方面原因漏风率均达到 60%左右。后经过降低漏风率改造后，取得了较为明显的效果。电耗由之前的 44.17kWh/t 降低到 41.49kWh/t，无烟煤消耗由之前的 69.66kg/t 降低到 59.64kg/t，煤气单耗由之前的 0.053GJ/t 降低到 0.049GJ/t。

另外，降低烧结漏风率，不仅会带来烧结生产中的直接节能减排效果，也通过改善烧结矿的质量，以及提高固体燃料的完全燃烧程度来获得间接的节能减排效果。

2.2.4 成本效益分析

（1）投资估算

根据工程案例可知，降低烧结漏风率技术生产单位烧结矿（100 吨烧结矿）建设投资约 66.67 元/100 吨烧结矿。

降低烧结漏风率技术总投资 78.06 元/100 吨烧结矿，其中建设投资 66.67 元/100 吨烧结矿，建设期利息 0.00 元/100 吨烧结矿（建设投资全部采用自筹资金），铺底流动资金 11.39 元/100 吨烧结矿。

投资估算详见下表。

表 2.2.1 降低烧结漏风率技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/100 吨烧结矿）
一	建设投资	66.67
二	建设期利息	0.00
三	铺底流动资金	11.39
四	技术总投资	78.06

（2）经济效益分析

采用降低烧结漏风率技术，100 吨烧结矿可节省焦粉 1.25kg/100 吨烧结矿年，增加产量 3%。以上各项收入合计 311.97 元/100 吨烧结矿年。降低烧结漏风率技术项目建设，增加了电等动力费用，同时增加了固定资产折旧、修理等费用，增加管理费等费用，上述各项费用合计 255.81 元/100 吨烧结矿年（达产

年)。

经测算，达产年年利润总额为 54.13 元/100 吨烧结矿 年，投资内部收益率 55.20%（税后），投资回收期（不含建设期 1 年）2.1 年。经济评价见下表。

表 2.2.2 降低烧结漏风率技术经济评价指标

序号	项 目	单位	项 目
一	总投资	元/100t 烧结矿	78.06
1	建设投资	元/100t 烧结矿	66.67
2	建设期利息	元/100t 烧结矿	0.00
3	铺底流动资金	元/100t 烧结矿	11.39
二	生产追加流动资金	元/100t 烧结矿	26.58
三	总资金	元/100t 烧结矿	104.64
四	资金筹措	元/100t 烧结矿	104.64
1	自有建设资金	元/100t 烧结矿	66.67
2	建设期利息	元/100t 烧结矿	0.00
3	自有流动资金	元/100t 烧结矿	37.97
4	建设资金贷款	元/100t 烧结矿	0.00
5	流动资金贷款	元/100t 烧结矿	0.00
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/100t 烧结矿	311.97
2	不含税总成本费用	元/100t 烧结矿	255.81
3	销售税金及附加	元/100t 烧结矿	2.03
4	利润总额	元/100t 烧结矿	54.13
5	所得税	元/100t 烧结矿	13.53
6	税后利润	元/100t 烧结矿	40.60
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	3.1
2	投资内部收益率	%	55.20

2.2.5 技术推广应用情况

众所周知，在烧结工序总能耗中固体燃料消耗约占 75%~80%，电力消耗占 13%~20%，点火燃耗约占 5%~10%，而抽风机又是烧结厂的耗电大户，因此降

低漏风率是节电的有效措施。我国烧结机的漏风率一般为 50%~55%，个别的高达 60%以上。据计算约有 30%以上的风量没有经过烧结料层而使风机做了大量的无用功，浪费了大量的电力。漏风率对抽风机电耗的影响各厂情况不同。烧结机大小不同，漏风率也不一样。而且，降低烧结漏风率可以提高烧结机烟气温度，在保证烧结废气除尘所需温度条件下，可以实现烧结机尾部高温段废气显热回收、烧结余热蒸汽发电等。如果能将烧结余热回收进行充分利用，则钢铁行业每年可节约能源约 900 万吨标准煤。

通过降低烧结漏风率，可以有效的实现热风烧结及厚料层烧结等工艺。由于降低烧结漏风率的过程中对烧结机的密封装置做了合理的改进，热空气吹到烧结台车点火后的料面上后进入烧结料层，表面料层可以具有长时间的高温保温时间，高温有利于烧结反应进行。通常热风温度控制在 250℃左右，生产实践表明，仅通过热风烧结吨矿可节约固体燃料 6kg/t 左右。而厚料层烧结操作过程中，料层厚度提高后可以充分利用烧结的“自动蓄热”，延长高温烧结时间，改善了烧结的条件，同时厚料层增加了料层蓄热能力，降低了配碳量，氧化物氧化放热的效果得到了增强。

烧结机的漏风率对烧结生产的各项经济技术指标影响很大，会使生产率下降、电耗增加、产生噪音使工作环境恶化等。国内大部分烧结机的漏风率在 50%以上，有的甚至高达 70%，日本钢铁企业烧结机漏风率仅为 30%。所以有效降低烧结机漏风率已成当务之急，降低烧结漏风率的技术在全国推广的非常普遍，目前的推广应用比例已达 60%以上。“十二五”期末预计该技术推广比例将达到 100%。

2.2.6 技术知识产权情况

目前我国许多钢铁设计单位均拥有建设烧结机的过程中进行关于降低烧结漏风率工作的知识产权。对于降低烧结漏风率的改造项目，一般烧结生产企业均自行进行相关工作。

另外，还有一些科研工作者做了本技术领域有关研究工作，申请了相关专利如下所示：

表 2.2.3 降低烧结漏风率技术知识产权

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	烧结机密封台车滑道密封装置	CN2544239	王喜鹏	2002 年 06 月 05 日
2	烧结机的中部支撑式首尾密封装置	CN101782328A	吴琳	2010 年 03 月 13 日

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
3	烧结机首、尾密封的上盖板角度自动调节式动密封装置	CN2662172	刘恩陶	2003 年 12 月 02 日
4	一种烧结双楔双簧式弹性密封装置	CN201246960	杨润泉	2008 年 08 月 08 日
5	一种烧结双楔弹簧板式密封装置	CN1530624	杨志欣	2003 年 03 月 13 日
6	运动灵活的烧结机首、尾密封装置	CN2722166	刘恩陶	2004 年 06 月 29 日
7	烧结机用头尾部密封板	CN2896177	刘柱艳	2006 年 03 月 24 日
8	烧结机台车双密封游板	CN201173696	王世利	2008 年 03 月 12 日
9	烧结机台车密封装置	CN86208905	湘潭钢铁厂	1986 年 11 月 10 日
10	烧结机风箱滑道	CN200996794	中冶长天国际工程有限责任公司	2007 年 01 月 24 日
11	一种烧结相邻台车体间的弹性密封装置	CN2564799	杨润泉	2002 年 08 月 28 日
12	烧结机滑道密封装置	CN2202288	攀钢研究院	1994 年 07 月 16 日
13	一种烧结弓形弹簧板式头尾密封装置	CN201016556	杨润泉	2006 年 08 月 28 日

2.3 低温烧结工艺技术

2.3.1 技术介绍

低温烧结是在较低烧结温度（1200℃）条件下，发展氧化性气氛，促进固相反应，使烧结矿形成以低温纤细状铁酸钙为主粘结相，去粘结其他矿物质，形成交织多相结构的生产工艺，具有显著节能和改善烧结矿性能的两大优点。

整个烧结过程是在较低温度和较高氧化氛围的条件下进行的，因而能够充分发展铁酸钙系列的粘结相，减少硅酸盐粘结相，保证烧结矿具有良好的强度和还原性。另外，低温高氧化烧结，抑制了 FeO 生成，使烧结矿 FeO 含量较低，软化和熔化温度升高，软熔性得到改善，烧结矿的高温还原性也得到改善，烧结能耗也得到降低。高炉使用这种烧结矿，不但能降低焦比，而且也可以提高生铁产量。低温烧结可以解决传统烧结方法透气性差、能耗高、系数低、烧结矿质量差、环保外排负荷大的问题，而且可以改善烧结矿质量性能。

2.3.2 技术适用条件

该技术对现有和新建烧结机均具有适用性，应用条件：

1) 烧结混合料要充分混匀，稳定成分。在物料一次混合前进行润湿，提高混合料的粘性及亲水性能，将一次混合机的功能变为混匀和造球。

2) 采用高品位、低硅的含铁物料。

3) 熔剂、燃料粒度要细，小于 3mm 粒级要大于 85%，燃料的固定碳含量要高，C 固>80%。混合料造球效果要好，使混合料具有良好的透气性。

4) 烧结矿的碱度要在 1.8-2.0 范围内。

5) 要有理想的加热曲线，采用低温低负压点火，点火温度控制在 $1050\pm 50^{\circ}\text{C}$ ，料层温度不超过 1250°C ，并要保证混合料在 1100°C 以上的温度下有 3min 以上的反应时间。

6) 所配加添加剂主要由燃煤气化剂、增氧剂、助燃剂、增强剂等四部分功能成分组成。一般添加剂配加量为烧结矿的万分之三至七。可以使烧结矿冶金性能改善、固体强度提高、低温还原粉化率降低，高炉焦比可下降 2%~3%。

7) 发展针状铁酸钙最佳条件为：低温（磁铁矿原料 $1230\sim 1250^{\circ}\text{C}$ ，赤铁矿原料 $1250\sim 1270^{\circ}\text{C}$ ），高碱度（ $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.8\sim 2.2$ ），合适的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ （0.1~0.2），较长的高温（ 1100°C ）保持时间（2~3min）。

2.3.3 节能减排效果

低温烧结具有显著节能和改善烧结矿性能的两大优点。由于企业烧结机大小不同，而且使用的原料和生产条件不同，实施该技术后节能效果差距也很大。

如太钢 2000 年在不能有效提高烧结料层的情况下（500mm）实施低温烧结技术，降低了燃料配比，提高了烧结矿质量，烧结固体燃耗降低了 9kg/t 左右。而且可以降低后续工序炼铁的焦比，太钢实施低温烧结技术后， 900°C 还原度由 76.77% 提高到 78%~86%，提高了 2.09%，这对高炉增铁节焦十分有利（高炉生产中烧结矿还原度每提高 10%，焦比降低 8%~9%）。 550°C 低温还原粉化降低了 1.6%，低温还原强度高，入炉后可以改善高炉上部透气性。

如安钢 2001 年实施后效果：烧结机的垂直烧结速度和成品率得到了提高，利用系数提高了 $0.2\text{t}/\text{m}^2\text{h}$ ；固体燃耗降低 7kg/t，FeO 降低 2%；另外，采用低温烧结后，烧结矿的还原性提高，低温还原粉化率降低，软化区间变窄。

2.3.4 成本效益分析

（1）投资估算

项目案例：烧结矿年生产能力 100 万吨，采用低温烧结工艺技术。项目总投资

资 120 万元，其中建设投资 120 万元。项目投资估算详见下表。

表 2.3.1 低温烧结工艺技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	120.00	100.0%
1.1	建筑费用	0.00	0.0%
1.2	设备费用	86.58	72.2%
1.3	安装费用	17.32	14.4%
1.4	其它费用	16.10	13.4%
2	建设期利息	0.00	0.0%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	120.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：按照烧结降低固体燃料消耗 5.8kg/t 计算，年增加收入 496 万元。采用低温烧结工艺技术，将增加折旧费、维修费、摊销费等，各项费用合计 236 万元，项目利润总额 254 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）0.7 年，财务内部收益率 149.9%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 2.3.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单位	指标
1	项目总投资	万元	120
1.1	建设投资	万元	120
1.2	建设期利息	万元	0
1.3	铺底流动资金	万元	0
2.	生产流动资金	万元	0
3.	项目总资金	万元	120
4.	资金筹措	万元	120
4.1	自有资金	万元	120
4.2	建设贷款	万元	0
4.3	流动资金贷款	万元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万元	496
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万元	236

序号	项目名称	单位	指标
5.3	达产年销售税金及附加	万元	57
5.4	达产年利润总额	万元	254
5.5	达产年所得税	万元	64
5.6	达产年净利润	万元	191
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	0.7
6.2	财务内部收益率	%	149.9
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	0

2.3.5 技术应用情况

本技术非常成熟，属于上世纪 80 年代的应用技术，目前我国约 60%企业在应用该技术。“十二五”期末预计该技术推广比例将达到约 90%。

太钢 2000 年 5 月在 1#烧结机应用该技术，在不能有效提高烧结料层的情况下，放慢了机速，关小风机闸门，降低燃料配比，结果表明：烧结矿质量大大提高，烧结固体燃耗降低 9kg/t 左右。

安钢 2001 年开始在 90/105m² 烧结机应用该技术。其效果如下：

1) 利用系数：实行低温烧结后，烧结机的垂直烧结速度和成品率得到了提高，利用系数提高了 0.2t/m² h，主要原因为①配加部分进口粉矿有利于混合料原始透气性的提高；②烧结矿的矿物组成得到改善，铁酸钙含量大幅度增加；③因低温烧结法的粘结相生成温度比普通烧结法低，故配碳量降低，烧结温度降低，料层透气性得到改善。

2) FeO 含量和固体燃耗：固体燃耗降低 7kg/t，FeO 降低 2%，FeO 降低的原因是：①燃料添加量降低，使烧结温度降低，同时，燃料粒度合格率提高，在混合料中的分布得到改善，使烧结温度分布比较均匀；②料层透气性变好，烧结过程中的氧化气氛加强，烧结矿中铁酸钙，赤铁矿含量增加；③进口粉矿的加入，混合料中 FeO 含量有所降低；④严格控制点火温度在 1200℃以下。

2.3.6 技术知识产权情况

本技术目前我国许多钢铁企业和设计单位都已经掌握，涉及的专利较少，国内专利共检索到 2 个发明专利：

表 2.3.3 低温烧结技术知识产权

序	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期

号				
1	低温烧结赤铁矿和褐铁矿粉的方法	CN1096329	南京第二钢铁厂	1993-12-17
2	超低温烧结矿化节能添加剂	CN1523123	董素华;王琳	2003-12-15

2.4 厚料层烧结技术

2.4.1 技术介绍

厚料层烧结技术是通过加高烧结机台车栏板，增加料层厚度，从而利用料层的自动蓄热，减少混合料中的配碳量，发展烧结料层中的氧化气氛，因而厚料层烧结具有降低固体燃耗和提高烧结矿质量等方面的优点。

2.4.2 技术适用条件

该技术对现有和新建烧结机均具有适用性。

实施厚料层烧结技术需采取如下改善料层透气性的相应措施：

(1) 改善烧结前物料的准备，强化混合制粒，以改变混合料的粒度组成，提高其透气性；一般情况燃料破碎粒度控制在（ $\leq 3\text{mm}$ 粒级） $\geq 75\%$ ，石灰石破碎粒度（ $\leq 3\text{mm}$ 粒级） $\geq 85\%$ ，基本满足了生产的要求（南钢案例）。

(2) 配加少量石灰以强化烧结过程。

(3) 将混合料预热使达到露点（ 60°C ）以上的温度，以消除烧结过程中过湿层对透气性的不利影响；研究和生产表明，混合料温度每提高 10°C ，烧结固体燃料消耗减少 2kg/t ，利用系数提高 5% 左右。预热采用的方式有蒸汽预热混合料、生石灰预热混合料等。

(4) 使用偏析布料工艺和松料装置改善装料粒度分布及密实度，从而提高料层的透气性。

(5) 适当增大抽风机能力以克服由于加厚料层所增加的阻力，以免导致抽风量下降而减慢烧结速度。

(6) 增加保温炉和热风炉。在烧结温度下，随着保温时间的不同，针状铁酸钙的生成量也不断变化。试验证明，在烧结温度下要保持 $2\sim 3\text{min}$ ，才能满足厚料层烧结的要求。增加保温炉和热风炉可以延长高温作用时间，有利于铁酸钙的生成。保温炉温度一般控制在 $380\sim 450^{\circ}\text{C}$ 之间，热风炉温度一般在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 左右。

2.4.3 节能减排效果

厚料层烧结不仅使热利用率提高，燃料消耗相应降低，而且因烧结过程自动蓄热量增加，高温保持时间延长，表层返矿量相对降低，减少了烧结过程不均匀带来的影响，使烧结矿的结构均匀，质量提高，成品率和转鼓强度提高，固体燃料降低。

料层厚度越高，烧结固体燃料愈低。料层由 500mm 增加到 800mm 以上时，工序能耗由 80.74kgce/t 烧结矿降低到 56.51kgce/t 烧结矿。烧结料层每提高 10mm，燃料可降低 1~3kg/t。但综合考虑烧结矿各项指标，烧结料层厚度宜控制在 700~750mm。

2.4.4 成本效益分析

（1）投资估算

项目案例：烧结矿年生产能力 100 万吨，采用厚料层技术。项目总投资 240 万元，其中建设投资 240 万元。项目投资估算详见下表。

表 2.4.1 厚料层烧结技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	240.00	100.0%
1.1	建筑费用	0.00	0.0%
1.2	设备费用	173.16	72.2%
1.3	安装费用	34.63	14.4%
1.4	其它费用	32.21	13.4%
2	建设期利息	0.00	0.0%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	240.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：按照增产 5% 计算，年增加收入 250 万元。采用厚料层技术，将增加折旧费、维修费、摊销费等，各项费用合计 54 万元，项目利润总额 196 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）1.6 年，财务内部收益率 66.2%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 2.4.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单位	指标
1	项目总投资	万元	240

序号	项目名称	单位	指标
1.1	建设投资	万元	240
1.2	建设期利息	万元	0
1.3	铺底流动资金	万元	0
2.	生产流动资金	万元	0
3.	项目总资金	万元	240
4.	资金筹措	万元	240
4.1	自有资金	万元	240
4.2	建设贷款	万元	0
4.3	流动资金贷款	万元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万元	250
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万元	54
5.3	达产年销售税金及附加	万元	0
5.4	达产年利润总额	万元	196
5.5	达产年所得税	万元	49
5.6	达产年净利润	万元	147
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	1.6
6.2	财务内部收益率	%	66.2
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	0

2.4.5 技术应用情况

本技术属于上世纪 80 年代的技术，目前我国钢铁企业 70%在应用，只是节能效果有很大差距。“十二五”期末预计该技术推广比例将达到约 90%。

上世纪 80 年代世界各国烧结料层厚度多数在 450~600mm，个别高达 700mm，我国由于资源特点，主要使用细铁精矿粉烧结，故过去较长时期料层厚度停留在 200~250mm，直到 70 年代末期，首钢、鞍钢等烧结厂在使用细精矿粉的条件下，先后进行厚料层烧结工艺的探索并取得显著效果。到 1983 年，我国烧结料层已由原来的平均 220mm 增高到 300mm 以上，使每吨烧结矿的固体燃料消耗由 89kg 降低到 70kg，烧结矿的 FeO 含量由平均 17%下降到 13.45%，小于 5mm 粉末由 17%下降到 14%。

南钢 180m² 烧结机年设计生产能力 203.8 万吨，利用系数 1.3t/m² h，台车栏板设计高度 620mm，其实际布料厚度随着原料状况的变化，经历了 580mm、600mm、620mm、660mm 几个时期，且铺底料厚度也由原来的 50mm 左右，降为目前的 35mm 左右，相对提高了布料厚度。随着近年来铁矿石市场的变化，含铁原料粒度变粗，烧结料层透气性提高，以往的布料厚度已不适合目前的生产要求。因此，180m² 烧结作业区利用 2008 年 10 月份中修机会，把原有的 620mm 台车栏板提高到 720mm，同时抬高了点火炉高度。通过采取加强原料准备，强化混合料制粒，提高混合料温度，采取偏析布料等一系列措施，实现了 720mm 厚料层烧结生产。

表 2.4.3 南钢实施厚料层技术前后节能效果比较

时间	利用系数	固体燃耗	FeO (%)	转鼓指数	槽下返矿率 (%)
2008.1~9 月	1.398	67.18	8.89	75.84	22.584
2009.1~2 月	1.527	64.58	8.72	76.09	19.530
相比	+0.129	-2.6	-0.17	+0.25	-3.054

2006 年首钢炼铁厂一烧车间烧结机进行了厚料层技术改造。将烧结料层厚度由 550mm 提高到 700mm，并相应进行了布料系统、熔剂消耗系统及一混雾化水系统等一系列改造。一烧车间厚料层改造前后主要指标见下表。

表 2.4.4 首钢一烧车间厚料层改造前后主要指标对比

项目	料层厚度/mm	利用系数/ (t m ⁻² h ⁻¹)	TFe/%	FeO/%	转鼓指数/%	固体燃耗/ (kg t ⁻¹)	返矿率 /%
改造前	550	1.340	56.92	9.56	87.13	49.63	9.95
改造后	700	1.358	57.40	8.44	87.18	40.91	8.38

由上表可见，改造后，不但提高了烧结矿产量和质量，而且大幅度降低了各种消耗，其中固体燃耗下降了 8.72kg/t。

2.4.6 技术知识产权情况

本技术专利共检索到两个专利，一个为发明专利，一个为实用新型专利：

表 2.4.5 厚料层烧结技术知识产权

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期

1	厚料层烧结法生产技术	CN101063182	深圳市中金岭南有色金属股份有限公司韶关冶炼	2007-04-06
2	用于超厚料层烧结试验的烧结杯	CN201454547U	宝山钢铁股份有限公司	2009.06.12

2.5 链篦机-回转窑球团生产技术

2.5.1 技术介绍

(1) 概况

我国球团生产工艺主要有链篦机—回转窑、带式焙烧机和竖炉 3 种。竖炉工艺具有投资低、周期短、见效快、可利用低热值煤气和固体燃料等特点，一直是我国球团的主要生产工艺，非常适合中小钢铁企业的快速发展；但竖炉存在单机生产能力低，生产规模小，原料适应性差，环境污染大，产品品质难以满足大型高炉生产需要等固有缺点。链篦机—回转窑球团具有原料适应性很强，燃料可使用高热值煤气，也可以 100%使用煤粉，在矿山和厂区均能建设，产品质量高，设备可以大型化等优点。近年来我国球团发展迅猛主要得益于链篦机—回转窑球团的发展。带式焙烧机在我国一直发展缓慢，目前总共只有 3 台。原因主要是带式焙烧机焙烧需要高热值煤气或重油，天然气和重油是稀缺资源，价格昂贵；此外，带式焙烧机耐高温特殊合金用量大、档次高，需进口解决，投资要比链篦机—回转窑高。

链篦机-回转窑系统是一套链篦机、回转窑和冷却机组成的联合装置。生球在链篦机上干燥、脱水和预热，继而在回转窑内高温固结，最后进入冷却机冷却而获得成品球团矿。大型链篦机-回转窑球团代表着我国球团装备的发展方向。

(2) 链篦机-回转窑氧化球团工艺流程

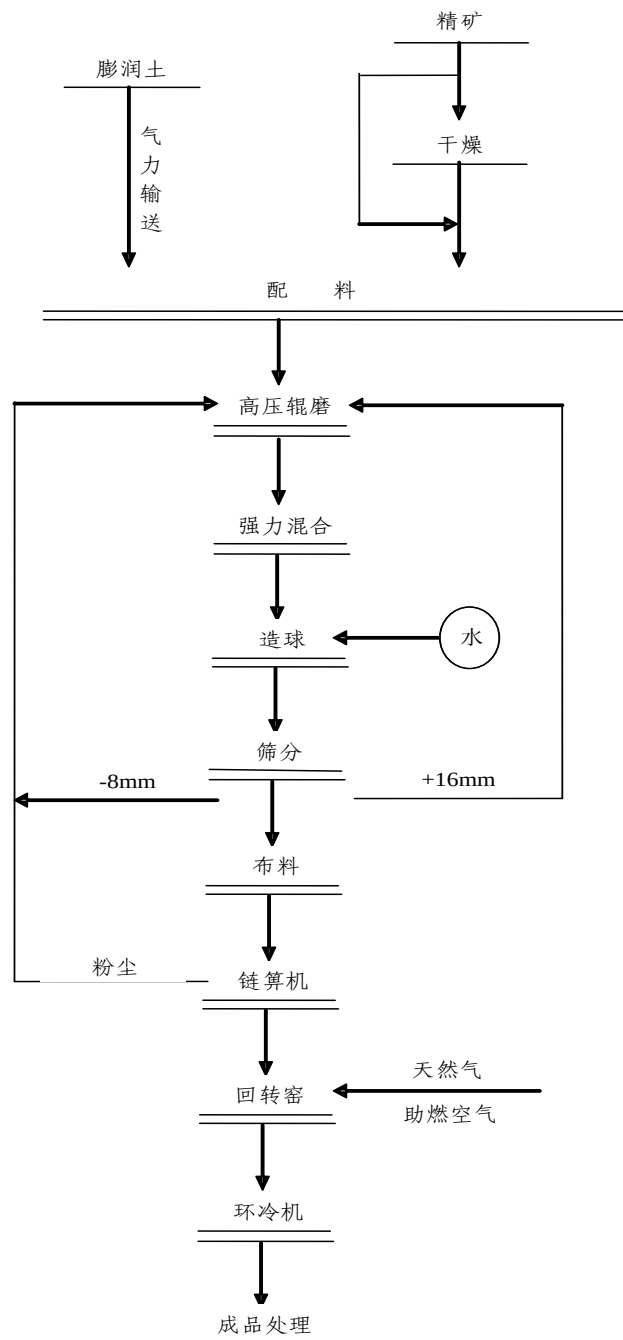


图 2.5.1 链箕机—回转窑氧化球团生产线

工艺流程见图 2.5.1。来自原料场的铁精矿直接运至配料室或经干燥再运至配料室；膨润土通过气力输送至配料室。铁精矿和膨润土在配料室按重量比例自动配料，配成的混合料经高压辊磨和强力混合后，送入造球室，采用圆盘造球机进行造球。生球由胶带机运至链箕机头部，先经过大球辊筛筛除 $>16\text{mm}$ 的大球，再由梭式布料机布到宽皮带机上，通过宽皮带机将 $<16\text{mm}$ 的生球均匀布到辊式筛分布料机上，在辊式筛分布料机筛分段筛除 $<8\text{mm}$ 粉料以及大球筛筛除的 $>16\text{mm}$ 部分由胶带机运输，经高压辊磨和强力混合后返回重新造球。 $8\sim 16\text{mm}$

的合格生球则经布料辊均匀地布到链篦机篦床上，进入链篦机炉罩后，依次经过鼓风干燥段、抽风干燥段和预热段，预热球具有一定强度后，进入回转窑焙烧，球团焙烧用高热值的天然气，焙烧后的球团矿经布料斗均匀布到环冷机台车上，冷却后的成品球团矿进入成品处理系统。

2.5.2 技术适用条件

链篦机-回转窑氧化球团生产线适用范围非常广泛。建设规模前者可以从 30 万吨一直到 500 万吨，既可以适应小型矿山或钢铁企业建设，也可以适用于大型矿山和大型联合钢铁企业建设。

链篦机-回转窑氧化球团生产线对铁矿的种类适应性也非常强，既可以处理磁铁矿，也可以处理赤铁矿，还可以处理两种矿的混合矿。而竖炉球团以处理磁铁矿为主，赤铁矿一般情况下配加不超过 15%左右。

链篦机-回转窑球团生产线对燃料适应性也非常强。既可以用高热值燃气，也可以用煤粉，球团竖炉适应于使用低热值的气体或液体燃料。

2.5.3 节能减排效果

（1）节能效果

链篦机-回转窑球团生产线生产过程中消耗的主要能源介质为煤粉或高热值煤气（焦炉煤气、天然气等），球团竖炉可使用低热值煤气（高炉煤气或高转混合煤气），其它能源载体为电力、水、蒸汽、压缩空气等，其中，电力和燃料能源约占全部所耗能源的 90%以上。

采用链篦机-回转窑球团工艺一般生产吨球团矿能源消耗为 20~25kgce/t，比我国传统的竖炉球团生产工艺要节省 10kgce/t，按照全国 2 亿吨球团矿生产量计算，可节约 200 万吨标准煤。如果球团竖炉对排矿显热回收利用尚有近 10kgce/t 的潜力可挖。

球团矿生产工艺节能不仅仅体现在球团生产工艺本身。多使用球团矿替代烧结矿会大幅降低吨钢综合能耗。按照吨烧结矿能耗 55kgce/t 计算，如果入炉炉料结构中，球团矿比例由 15%提高到 25%，则吨钢综合能耗可以降低 3kgce/t，按照粗钢产量 6 亿吨计算，可以节约 180 万吨标准煤。

球团矿的使用可以提高高炉入炉矿品位，增加高炉炉料透气性，对降低焦比效果非常明显。根据经验，入炉矿铁品位每提高 1%，高炉渣量减少 30kg/t，焦比下降 0.8%~1.2%，产量增加 1.2%~1.6%，增加喷煤量 15kg/t。这一效果对我国生铁产量超过 5 亿吨的产铁大国来说，效果是非常惊人的。该部分节能量由高炉精料技术统一考虑，本节不再单独计算。

（2）环保效果

烧结和球团生产过程中，主要产生的污染物是废气和烟粉尘。球团矿的生产过程比烧结矿更加环保，主要体现在以下几个方面：

①球团矿制造过程粉尘产生量少

球团矿焙烧是先制成一定形状和粒级的生球，造球过程是在密闭状态下进行的，而且没有破碎和筛分整粒系统，产生的粉尘量相对烧结矿生产要少很多，外排废气中所含粉尘量较低；从全厂生产环境看，球团矿生产厂比烧结厂要干净。

②废气中有害成分较少

烧结、球团生产过程都是氧化脱硫的过程，铁矿石和煤焦粉中约有 80%~95% 的硫经烧结、球团过程排放到大气中。但是，球团矿生产的铁精矿一般都经过细磨和精选，含硫量相对较低，一般在使用不同热值煤气的前提下，SO₂ 排放浓度能够满足排放要求，不需设置脱硫设施。即使浓度超过排放标准，球团脱硫处理烟气量要比烧结少，球团脱硫设施能比烧结脱硫设施节省投资。

烧结生产过程由于有二噁英的生产条件，因此，烧结生产过程产生大量的二噁英，是钢铁企业二噁英的主要产生源之一。而球团生产过程中不含氯离子，缺少二噁英的生产条件，不会产生二噁英。

2.5.4 成本效益分析

(1) 投资估算

链篦机-回转窑技术总投资 251.97 元/t 球团，其中建设投资 180.00 元/t 球团，建设期利息 12.38 元/t 球团（建设投资贷款 60%），铺底流动资金 59.59 元/t 球团。投资估算详见下表。

表 2.5.1 链篦机-回转窑技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/t 球团）
一	建设投资	180.00
1	建筑费用	32.40
2	设备费用	111.60
3	安装费用	23.40
4	其他费用	12.60
二	建设期利息	12.38
三	铺底流动资金	59.59
四	技术总投资	251.97

(2) 经济效益分析

采用链篦机-回转窑技术，生产单位球团年收入 1153.85 元/t 球团 年。链篦机

-回转窑技术项目建设，增加了铁精粉、膨润土等原材料及水、电等燃料动力费用，增加了工资及福利费用、固定资产折旧、修理等费用，增加管理费、财务费用等费用，上述各项费用合计 1098.95 元/t 球团 年（达产年）。

经测算，达产年年利润总额 51.82 元/t 球团 年，贷款偿还期结束后年利润总额 54.34 元/t 球团 年，投资内部收益率 15.07%（税后），投资回收期（含建设期 2 年）8.5 年。经济评价总表见下表。

表 2.5.2 链篦机-回转窑技术经济评价指标

序号	项 目	单位	项 目
一	总投资	元/t 球团	251.97
1	建设投资	元/t 球团	180.00
2	建设期利息	元/t 球团	12.38
3	铺底流动资金	元/t 球团	59.59
二	生产追加流动资金	元/t 球团	139.04
三	总资金	元/t 球团	391.02
四	资金筹措	元/t 球团	391.02
1	自有建设资金	元/t 球团	28.82
2	建设期利息	元/t 球团	12.38
3	自有流动资金	元/t 球团	59.59
4	建设资金贷款	元/t 球团	151.18
5	流动资金贷款	元/t 球团	139.04
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/t 球团	1153.85
2	不含税总成本费用	元/t 球团	1098.95
3	销售税金及附加	元/t 球团	3.07
4	利润总额	元/t 球团	51.82
5	所得税	元/t 球团	12.96
6	税后利润	元/t 球团	38.87
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	8.5
2	投资内部收益率	%	15.07
3	贷款偿还期	年	5.2

2.5.5 技术应用情况

自 2000 年首钢建窑成功以来，由于其工艺特点符合我国球团矿产量大，原料杂等实际情况，链篦机—回转窑球团工艺获得了迅猛发展。据不完全统计，目前全国已建成 140 余条链篦机—回转窑生产线，产能已占我国球团矿总产能的一半以上。主要单窑生产规模以 100~240 万吨年产量为主，其中规模最大的为武钢鄂州球团厂年产 500 万吨球团铁矿的链篦机—回转窑生产线。

截止 2009 年底，我国链篦机-回转窑球团生产线生产能力占全国球团生产能力的比例为 62%，设备数量占全国球团设备数量的 40%。

由于链篦机-回转窑球团生产线是我国球团的发展方向，“十二五”期间，竖炉球团工艺的比例将进一步降低，链篦机-回转窑球团生产能力所占比例进一步提升。“十二五”期末预计该技术推广比例将达到约 60%。

2.5.6 技术知识产权情况

我国已经能自主设计、制造和建设 500 万吨链篦机-回转窑球团生产线。大型链篦机-回转窑球团生产线主要设计厂家为中冶长天和中冶北方设计院。

表 2.5.3 链篦机-回转窑技术知识产权

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	链篦机-回转窑-环冷机烘炉装置及其烘炉方法	101900489A	中冶北方工程技术有限公司	2010-09-08
2	链篦机-回转窑环冷机均匀放料装置	CN201548074U	鞍钢集团矿业公司	2009-11-24
3	球团生产中链篦机速度自动控制装置	CN101643838	新兴河北工程技术有限公司	2009-09-12
4	一种球团焙烧链篦机布料筛分装置	CN201032379	任志国	2007-03-19
5	大直径圆盘造球机	CN2608116	济钢集团国际工程技术有限公司	2003-02-09

2.6 烧结余热回收利用技术（发电）

2.6.1 技术介绍

烧结余热利用是指将烧结生产工序中产生的废气热量加以回收再利用的技术，主要分两大部分，如图 2.6.1 所示：一是占总带入热量约 24%的烧结烟气显热。烧结过程中，随着物理化学反应的进行，烧结烟气温度、成分等不断变化，

当烧结进行到最后，烟气温度明显上升，机尾风箱高温段排出的废气温度可达 300~400℃；另一部分是占烧结过程带入总热量约 45%的烧结矿显热。从烧结机尾部卸出的热烧结矿平均温度为 600~800℃，在冷却过程中，烧结矿显热变为冷却废气显热，高温段废气温度为 350~420℃。因此，烧结机尾风箱烟气和烧结矿显热是烧结余热回收的重点。

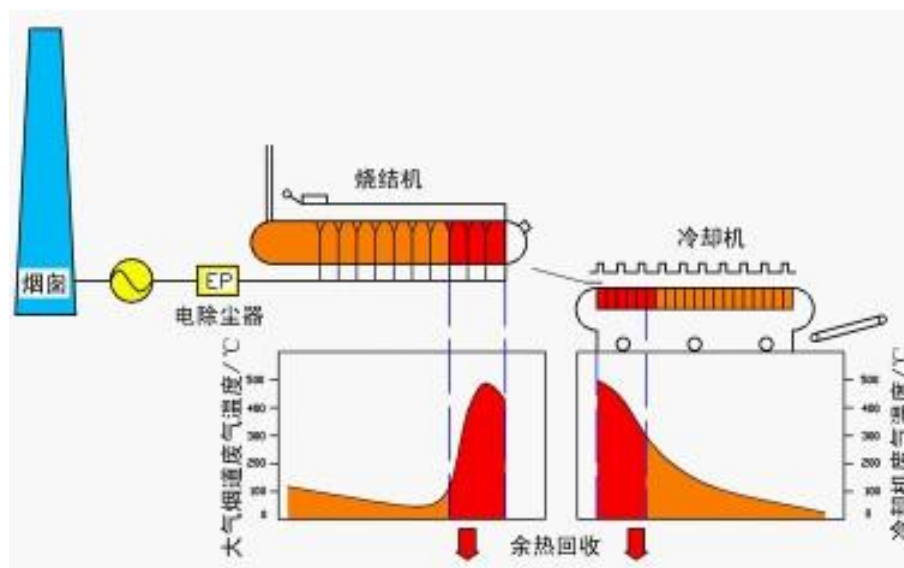


图 2.6.1 烧结生产工序烟气余热回收示意图

1 余热回收基本方式

余热利用有两种方式：第一种是热利用，即利用余热来助燃、预热、干燥、供热、供暖等。（1）用作点火炉助燃空气：将冷却机废气除尘后，输送至点火炉空气管道内，以节省点火燃料。一般可节约点火燃料 10%以上；（2）预热烧结混合料：在点火炉前设置预热炉，冷却机废气由鼓风机送入预热炉内，对混合料进行预热，以提高混合料温度，降低固体燃料消耗；（3）热风烧结：此方法是在烧结机点火后，继续以 300~1000℃热风或热废气向料层提供热量，进行烧结；（4）产生蒸汽供暖、供热：该方法通过余热锅炉产生蒸汽，送至管网供全厂使用。第二种是动力利用，即将热能用作余热锅炉或其它余热回收装置的热源，生产蒸汽将其转化为电或机械能，如余热发电。

烧结烟气热利用，主要停留在生产低品质蒸汽的水平上，此时仍然有大量高温废气或富余低压蒸汽排放，这不仅是对可用能源的浪费，而且还会对环境造成热污染。而烧结企业对烟气余热进行动力利用，既能有效提高余热回收率，实现企业节能减排，又能提高企业自供电率，取得良好的效益。从能源利用的有效和经济性角度看，利用余热发电是最为有效的余热利用方式。

2 烧结废气余热用于烧结过程

废气直接用于烧结过程，点火前，将 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的热气流以 $0.7\sim 1.0\text{Nm}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 的空速掠过并预热料层。经过 1~2 分钟，表层生料完全干燥后点火。这样，既缩短烧结时间，又因焦炭燃烧温度提高而扩大了烧结带。

下图为日本某烧结机废气预热生料的流程图。废气取自环冷机的第二个排气筒，回收风机前未设除尘器， 300°C 高温废气分别送预热、点火和保温炉段。

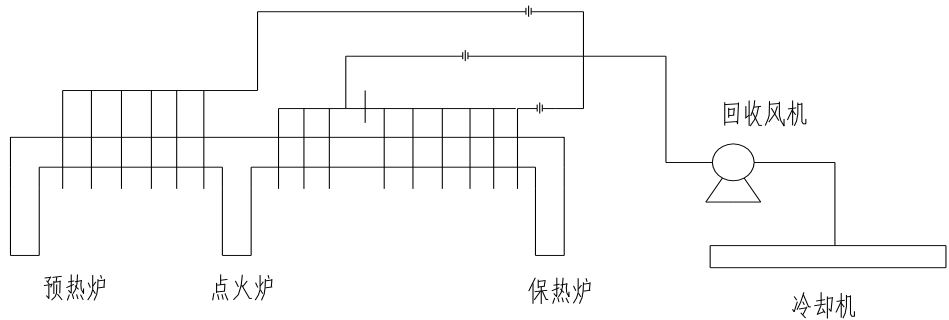


图 2.6.2 日本某烧结机废气预热生料流程示意图

适用范围：废气直接用于烧结过程工艺适用于现有和新建烧结机。

技术特点：通常用 300°C 左右的废气作为点火保温的助燃气与用常温空气相比可节省 25%~30% 的煤气消耗量。同时，因焦炭完全燃烧，提高了燃烧效率，降低了消耗量，所以总的效果是焦炭和焦炉煤气的单位消耗分别降低 4.8kg/t 烧结矿和 $1.0\text{Nm}^3/\text{t}$ 烧结矿。

3 烧结废气余热产生蒸汽

（1）环冷机废气余热锅炉

高温废气从环冷机上部的两个排气筒抽出经重力式除尘器进入余热锅炉进行热交换。锅炉排出的 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的废气由循环风机送回环冷机风箱连通管循环使用。用远程手动操作调节废气量。系统中专设一台常温风机，其作用是当余热回收设备运行时补充系统漏风。余热回收设备不运行而烧结生产仍在进行时，可打开余热回收区的排气筒阀门，启用该风机以保证环冷机的正常运行并使它卸出冷烧结矿的温度低于 150°C 。

适用范围：环冷机废气余热锅炉的余热回收工艺适用于现有和新建烧结机。

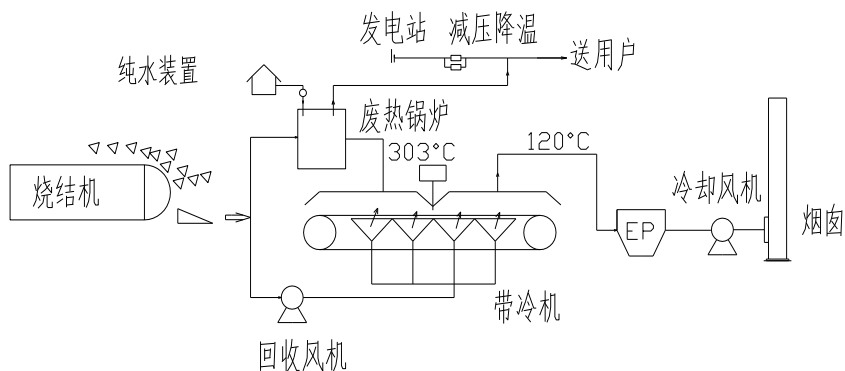


图 2.6.3 环冷机废气余热锅炉余热回收工艺流程示意图

(2) 烧结主排废气余热锅炉

烧结主排烟气从热回收区抽出经重力除尘处理，进入余热锅炉进行热交换，锅炉排出 150~200℃ 的低温烟气再经循环风机返回烧结机主排烟管。系统中设有旁通管，当最后一个风箱由于漏风而使温度下降时，可将此风箱的烟气送回至前面合适的主排烟管道，以保证抽出的烟气温度在一个较高的水平上。当最后一个风箱温度回升时，这部分烟气仅可继续回收利用。此外，在热回收区与非回收区之间不设隔板，用远程手动操作调节烟气量。从而保证稳定操作不影响烧结生产，同时确保主电除尘器入口烟气温度在露点以上。

适用范围：该工艺适用于现有和新建烧结机。

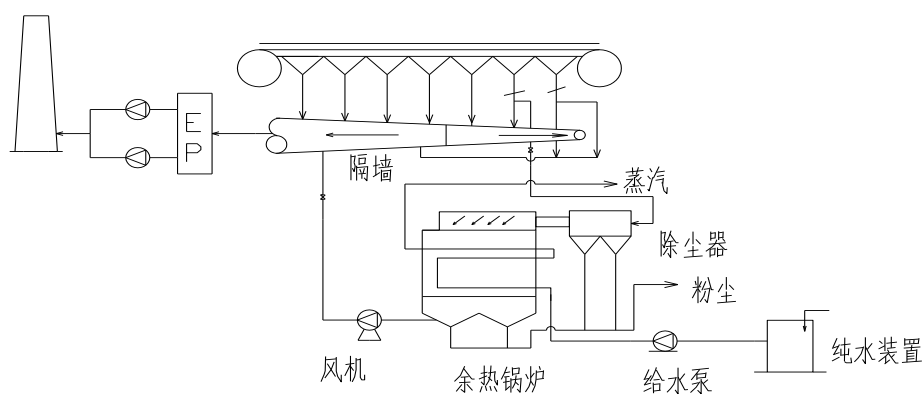


图 2.6.4 烧结主排废气余热锅炉余热回收工艺流程图

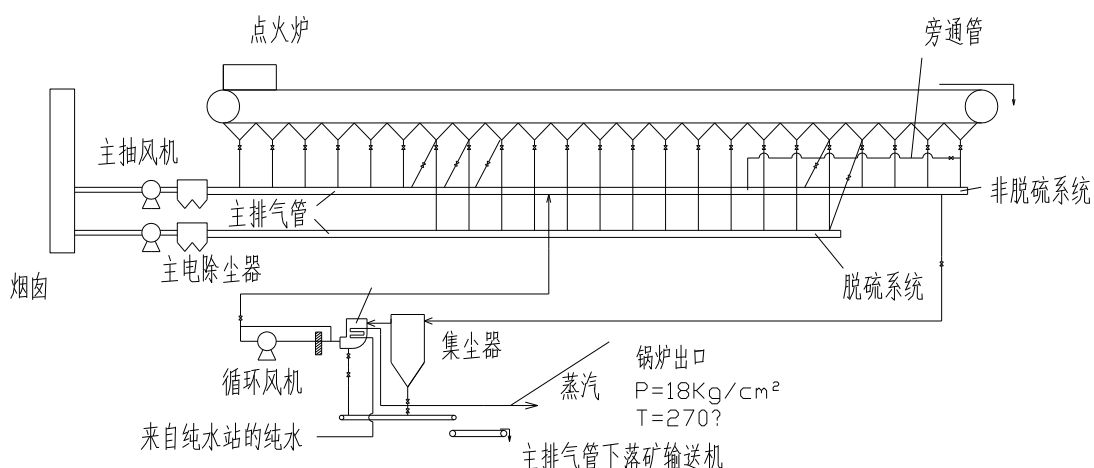


图 2.6.5 宝钢 495m 烧结机主排废气余热回收

4 烧结烟气余热发电

(1) 系统组成

烧结机和冷却机余热回收发电系统主要由烟气系统、锅炉热力系统、汽轮发电系统、热工仪表及自动化系统和纯水系统等组成，如图 2.6.6 所示。

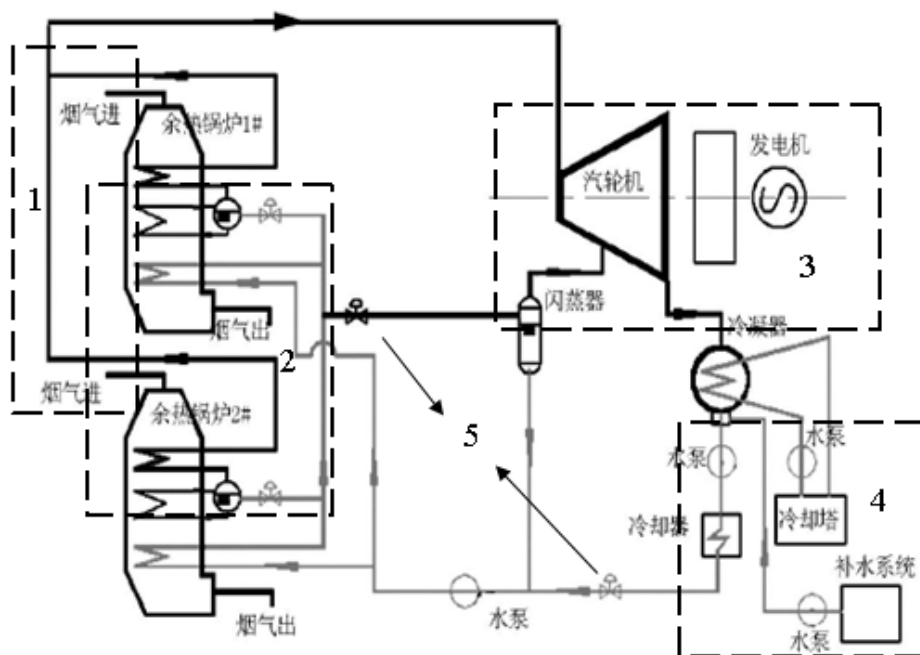


图 2.6.6 烧结烟气余热发电系统组成

注：1-烟气系统；2-锅炉热力系统；3-汽轮发电系统；4-纯水系统；5-热工仪表及自动化系统；

①烟气系统

每台烧结机和冷却机需配备一套烟气回收输送系统。从烧结机和冷却机烟气高温段引出的烟气通过烟气母管送入余热锅炉顶部，经过炉膛，从锅炉下部排出，

换热后的烟气通过管道接至风机，加压后，接至烟囱排出，或者尾气采用再循环，作为烧结热风或烧结矿冷却风等用途，实现烟气循环利用。

②锅炉热力系统

烧结机和冷却机高温烟气进入余热锅炉，加热受热面中的水，水吸热变为高温高压的蒸汽再进入汽轮机发电，完成联合循环。

③汽轮机发电系统

余热锅炉产生的蒸汽通过外网送至汽机间的蒸汽母管，汇合作为主蒸气送入汽轮机。汽机排汽经过冷凝器后，形成冷凝水，经过冷凝水泵运行抽气器和轴封加热器后，由锅炉给水泵送至余热锅炉。

④热工仪表及自动化系统

烧结机和环冷机烟气余热回收工艺过程的实现需要测量、调节、控制、连锁、保护等自动化仪表的控制。包括：汽机间内汽机、发电机组以及相应设施的仪表控制；余热锅炉、除盐水系统和循环水系统等辅助车间的自控。

⑤纯水系统

原水经过滤、脱气、阴阳离子交换处理生成纯水进入纯水箱,纯水经过除氧器、水泵、换热管束和过热器产生过热蒸汽,进入汽轮发电机组发电后,乏汽经冷凝器和凝结水泵返回纯水箱。

(2) 工艺流程

下面以某公司烧结余热回收系统为例,介绍烧结机尾部高温段烟气和环冷机烟气余热动力回收工艺流程,如图 2.6.7 所示。

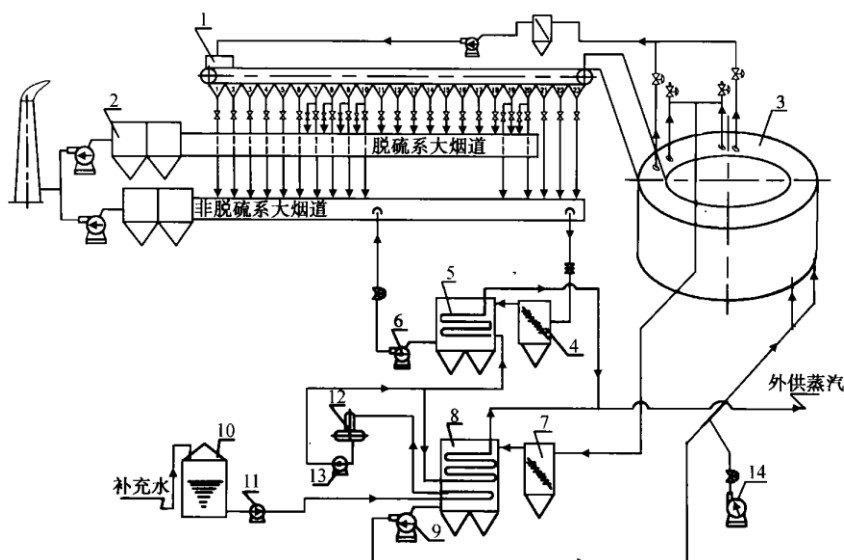


图 2.6.7 某公司烧结余热回收装置工艺流程图

注: 1-烧结机; 2-主电除尘器; 3-环冷机; 4-主排除尘器; 5-主排余热锅炉; 6-主排引风机;
7-环冷除尘器; 8-环冷余热锅炉; 9-环冷引风机; 10-储水箱; 11-补充水泵; 12-除氧器; 13-

锅炉给水泵；14-备用风机

烧结机尾部烟气余热回收是将烧结机主烟道尾部几个温度较高的风箱的烟气抽出，经除尘器后布置的余热锅炉产生蒸汽，再将换热后的烟气送回主烟道或用于热风烧结。烧结机台车下面设有脱硫烟道和非脱硫烟道。供余热回收的高温烟气是从非脱硫大烟道引出进入余热锅炉。300~400℃的烟气把余热锅炉内的软水加热为过热蒸汽后，温度降为 170~190℃，经引风机、电动蝶阀和烟道（直径为 3100mm）输入非脱硫大烟道。再经电除尘器、主排风机和烟囱排入大气。过热蒸汽经由管网，送至汽轮机发电。在余热锅炉系统发生故障停机时，可以关闭主排余热锅炉前后的电动闸阀和电动蝶阀，确保烧结工艺能继续正常生产。由挡板式除尘器和余热锅炉收集的铁矿粉尘约 1t/h，经两条埋刮板输送机转送至返矿皮带机回收利用。

烧结矿的冷却方法很多，从方法上来分，有自然冷却和强制通风冷却两类；从冷却的地点和设备来分，有烧结机外冷却和烧结机上冷却两种。而目前烧结厂多采用的是鼓风环式冷却机。

2.6.2 技术适用条件

烧结机废气和冷却机烟气余热回收工艺主要取决于：

（1）烧结机的生产运行情况和冷却机的处理能力

烟气余热回收技术适用于大、中型烧结机。实践证明烧结机生产稳定性差，烟气温度很不稳定，需要余热回收系统有应对方案，不然，排烟温度会跟随生产波动而变化，导致余热回收效率底下。对于冷却机，应考虑热烧结矿处理量、給料温度、风机技术规格和台数等。总之，由于各烧结机、冷却机建设水平差异很大，所用工艺差别较大，烧结机烟气余热是否回收要视生产运行具体情况、主烟道设计等考虑。

（2）烟气温度和流量的分布

除受烧结工艺参数（如配碳量等）影响，还受到烧结机漏风率的影响。烧结机漏风率高，特别是烧结机尾部风箱漏风率高，将造成大烟道内烟气流量增加，烟气温度下降。烧结台车和首尾风箱（密封板）、台车与滑道、台车与台车之间的漏风占烧结机总漏风量的 80%以上。

（3）烟气除尘

进入抽风系统的废气，含有大量粉尘，必须有效捕集和处理。否则，管路系统将会堵塞，风机转子和余热锅炉磨损，严重影响烧结生产的正常进行。为保证电除尘器正常工作并维持较高的除尘效率，需降低漏风率，控制主排烟气流量和入口端烟气温度与成分。

此外，对于烧结机，还需考虑烟气脱硫，这也是烧结机机尾余热发电技术的

瓶颈。烧结烟气中存在 SO_x ，其冷凝液是浓度很高的硫酸溶液，不仅会出现粘结积灰现象，而且会对设备及金属构件产生严重的低温性均匀腐蚀，因此余热回收过程中对烟气温度要注意进行测算，确保流经机头电除尘器以及烧结机主抽风机时，不致于结露。电除尘器入口端烟气温度一般控制在 $80\sim 100^\circ\text{C}$ （低 SO_2 烟气）或者 120°C （高 SO_2 烟气）。

一般烧结废气余热用于烧结过程适用于新旧烧结机，而烧结烟气余热发电适用于大型烧结机，如大于 180m^2 的烧结机。

2.6.3 节能减排效果

烧结烟气余热回收，能进一步强化节能减排，提高钢铁生产过程的资源、能源利用效率。

烧结烟气余热发电技术平均每吨烧结矿产生的烟气余热回收后可发电 20 千瓦时，折合吨钢综合能耗可降低约 8 千克标准煤，能够大力促进钢铁企业实现节能降耗目标。国家计划用 3 年时间在重点大中型钢铁企业中有针对性地推广此项技术，预期在钢铁行业的推广比例达到 20%，形成 157.5 万吨标准煤的节能能力。

以马钢两台 300m^2 烧结机带冷余热发电工程为例：

（1）经济效益

2006 年全年累计发电 6100.51 万 kWh，已产生经济效益 2367 万元，测算如下：

经济效益 = (发电量 - 自用电量) $\times$ 销售电价

其中：实际发电量：6100.51 万 kWh

自用电量：2282.26 万 kWh

销售电价：0.62 元/kWh

2006 年全年产生的经济效益 = $(6100.51 - 2282.26) \times 0.62 = 2367$ （万元）。

（2）社会与环境效益

余热利用发电后，可节约近 3 万吨标煤/a，这意味着每年减少 CO_2 排放约 8 万吨，减少 SO_2 排放约 300 吨，同时可回收含铁粉尘 10t/月。

昆钢第三烧结厂 5MW 低温余热电站：

经济效益

年标定发电量为 5340 万千瓦时，产生经济效益万元，测算如下：

经济效益 = (发电量 - 自用电量) $\times$ 销售电价

其中：

年发电量：5340 万 kWh；自用电量：1340 万 kWh；销售电价：0.62 元/kWh；

年经济效益 = $(5340 - 1340) \times 0.62 = 2480$ （万元）；

年减排二氧化碳 3.73 万吨，相当于年节约标煤 1.45 万吨。

唐钢 415m² 环冷机余热发电工程：

(1) 经济效益

年全年累计发电 10080 万 kWh，已产生经济效益 5215 万元，测算如下：

经济效益=（发电量-自用电量）×销售电价

其中：

余热锅炉总容量：51.4（过热蒸汽）+21（饱和蒸汽）t/h；发电机运行容量：12.6MW；年发电小时数：8000h；年发电量：10080 万 kWh；自用电量：1668.8 万 kWh；销售电价：0.62 元/kWh

年经济效益=（10080-1668.8）×0.62=5215（万元）。

(2) 社会与环境效益

年减排二氧化碳 6.933 万吨，相当于年节约标煤 3.22 万吨，减排 SO₂0.644 万吨，减排 NO_x 0.04282 万吨，减排粉尘 0.2652 万吨。

2.6.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：烧结矿年产 100 万 t，采用烧结余热回收技术。项目总投资 1223 万元，其中建设投资 1200 万元，建设期利息 23 万元。

项目投资估算详见下表。

表 2.6.1 采用烧结余热回收技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	1200.00	98.1%
1.1	建筑费用	247.35	20.2%
1.2	设备费用	595.33	48.7%
1.3	安装费用	196.28	16.0%
1.4	其它费用	161.04	13.2%
2	建设期利息	23.00	1.9%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	1223.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：年发电量 1800×10⁴kWh，增加收入 918 万元。增加烧结余热回收设施，将增加动力费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 568 万元，项目利润总额 338 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）3.1 年，

财务内部收益率 31.9%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 2.6.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单位	指标
1	项目总投资	万元	1223
1.1	建设投资	万元	1200
1.2	建设期利息	万元	23
1.3	铺底流动资金	万元	0
2.	生产流动资金	万元	0
3.	项目总资金	万元	1223
4.	资金筹措	万元	1223
4.1	自有资金	万元	489
4.2	建设贷款	万元	734
4.3	流动资金贷款	万元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万元	918
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万元	568
5.3	达产年销售税金及附加	万元	125
5.4	达产年利润总额	万元	338
5.5	达产年所得税	万元	85
5.6	达产年净利润	万元	254
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	3.1
6.2	财务内部收益率	%	31.9
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	2.3

2.6.5 技术应用情况

以前国内只有部分较大型的烧结厂设置了余热回收系统，且都没有将回收的蒸汽用于发电。近年来太钢、兴澄特钢、马钢等先后建了饱和蒸汽发电机组。

2004 年，马钢第二炼铁总厂在两台 300m² 烧结机上开工建设了国内第一套余热发电系统，该系统于 2005 年 9 月 6 日并网发电。废气锅炉采用卧式自然循环汽包炉，汽轮发电机组采用多级、冲动、混压、凝汽式。2006 年全年累计发

电 6100.51 万 kWh，产生经济效益 2367 万元。该余热电站采用了自然循环废气锅炉，烟风系统和汽水系统综合了热风循环技术、闪蒸余热发电技术和汽轮机补汽技术，能很好地适应烧结余热电站出力波动性较大的特性，使余热电站在烧结机运行参数经常调整的情况下也能够长期稳定运行。

济钢第二烧结厂 320m² 烧结机余热发电工程于 2006 年 5 月 20 日开工，2007 年 3 月 27 日完成 168 小时实验，系统运转逐渐趋于稳定。该工程在烟风系统和汽水系统中采用了热风循环技术和双压补汽技术，选用一台 Q390/400-36.4(10.4)-2.06 (0.39) /375 (141.1) 双压余热锅炉和一台 NZ9.0-2.0/ (0.4) +QFW-10-2A 补汽凝汽式汽轮发电机组，设计发电能力 8200kW，日发电量可达 15 万 kWh，能负担烧结厂 35%~40%的用电量。另外昆钢三烧、昆钢集团玉溪新兴钢铁厂烧结余热电站也于近期投入运行，国内还有鞍钢、山东莱钢、淄博张钢等多个烧结余热电站正在建设当中。

目前国内部分较大型的烧结厂设置了余热回收发电系统，发电技术采用率为 20%， “十二五”期末预计该技术推广比例将达到约 35%。

2.6.6 技术知识产权情况

目前，我国钢铁工业的烧结余热发电领域，已经实现全部拥有自主知识产权、全部采用国产设备。济钢于 2007 年 4 月建成了国内第一套具有自主知识产权的烧结余热发电装置，并掌握 6 项专利技术，2010 年 7 月 4 日济钢第二套 400m² 烧结机余热发电工程发电并网成功，该项目利用环冷机产生的 400~430℃ 高温烟气，采用余热锅炉回收废气余热生产蒸汽，环冷机配备 1 套余热锅炉系统，余热发电设 1 台 14MW 汽轮机，15MW 汽轮发电机组。采用双压余热锅炉，提高余热能量利用率，减少对环境的热污染。采用补汽凝汽式汽轮发电机组，提高发电量。采用电液调节系统（DEH）汽轮机，增强了自动化程度和运行可靠性。

昆钢集团第三烧结厂 5MW 低温余热电站是第一个全部拥有自主知识产权技术和全部采用国产设备的余热发电工程以及济钢集团国际工程技术有限公司承接的鞍钢股份有限公司西区烧结余热发电技术改造工程顺利投产达标，标志着我国钢铁企业在烧结低温余热发电节能技术，以及工业余热利用领域的技术研发、产业转化方面开始迈向国际先进行列。

表 2.6.3 烧结余热回收利用技术部分知识产权

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	一种对烧结低温余热利用的改进方法	CN101818994A	昆明理工大学	2010-05-04

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
2	烧结冷却机废气的余热利用方法及其装置	CN101825399A	中冶长天国际工程有限责任公司	2010-04-21
3	一种烧结余热发电系统及方法	CN101806230A	湖南永清环保股份有限公司	2010-03-19
4	一种烧结烟气余热利用系统无引风机烟气引出方法	CN101832572A	湖南永清环保股份有限公司	2010-03-19
5	一种烧结余热梯级利用装置	201637286U	昆明阳光基业股份有限公司	2010-03-18
6	烧结过程中余热资源分级回收与梯级利用的方法及其装置	CN101655320	东北大学	2009-09-15
7	带式鼓风烧结机的余热回收热交换装置	CN201488582U	焦作东方金铅有限公司	2009-07-08
8	一种烧结烟气净化和余热回收工艺	CN101532782	中冶赛迪工程技术股份有限公司	2009-04-22
9	烧结机带/环冷机余热回收/发电工程系统装置	CN201344733	中国船舶重工集团公司第七〇三研究所	2008-10-14
10	烧结环冷余热梯级回收发电系统及工艺	CN101344359	首钢总公司	2008-08-20
11	烧结机主抽引风余热回收利用设备	CN201246965	中冶北方工程技术有限公司	2008-06-13
12	烧结冷却机热风全循环式余热回收利用工艺及设备	CN101294773	中冶北方工程技术有限公司	2008-06-10
13	烧结机余热回收蒸汽发生装置	CN201059535	中钢集团鞍山热能研究院	2007-06-08
14	烧结机机冷余热回收装置	CN2357302	首钢总公司	1998-11-25
15	低温烟气选择性富集利用式烧结环冷机	CN201555452U	济钢集团国际工程技术有限公司	2009-10-27
16	烧结鼓风环冷机风箱与台车柔磁性密封装置	CN201527178U	济钢集团国际工程技术有限公司	2009-10-23
17	一种烧结余热发电中提高烧结余热效能的方法	CN101329139	济钢集团国际工程技术有限公司	2007-06-22
18	一种烧结余热发电除氧器用蒸汽发生装置	CN201103885	济钢集团国际工程技术有限公司	2007-07-13

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
19	一种烧结余热发电中保证烟气高温的控制装置	CN201072302	济钢集团国际工程技术有限公司	2007-07-13
20	一种烧结余热发电中带冷机尾部烟气循环装置	CN201072302	济钢集团国际工程技术有限公司	2007-07-13
21	一种烧结矿带冷机与烟罩的密封机构	CN201072300	济钢集团国际工程技术有限公司	2007-07-13
22	一种烧结余热发电中烟气风量的控制装置	CN201072301	济钢集团国际工程技术有限公司	2007-07-13
23	一种烧结余热发电用带冷机上烟罩的密封方法	CN1010934143	济钢集团国际工程技术有限公司	2007-07-13

2.7 球团废热循环利用技术

2.7.1 技术介绍

（1）概况

主要介绍链篦机-回转窑球团生产工艺废热循环利用技术。

采用链篦机-回转窑工艺生产氧化球团矿，为保证工艺可靠、设备良好运行、生产稳定，除所使用的含铁原料、粘接剂和煤粉符合工艺要求之外，最关键的就是热工系统的合理控制，其中链篦机-回转窑-环冷机之间的废热循环利用对热工制度影响非常大。

（2）工艺流程

一般球团矿生产线工艺流程包括：铁精矿及膨润土输入（链篦机-回转窑需煤粉制备）、精矿干燥、精矿碾压、配料、混合、造球、生球筛分及布料、生球干燥及预热、氧化焙烧、冷却、成品球团矿输出等主要工序。其中，废烟气循环使用主要是指冷却段和焙烧段产生的费用循环利用。

图 2.7.1 是典型的链篦机-回转窑球团矿废热循环流程图：

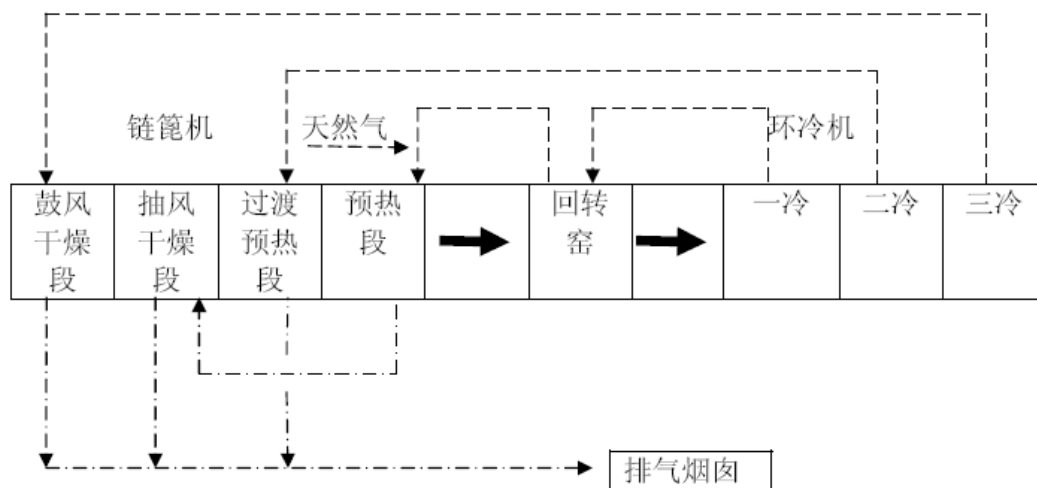


图 2.7.1 链篦机-回转窑球团废热循环利用流程图

①链篦机室（生球干燥与预热）

生球的干燥与预热在链篦机上进行，链篦机炉罩分为四段（或三段）：鼓风干燥（UDD）段、抽风干燥段（DDD）、过渡预热（TPH）段、预热（PH）段。生球进入链篦机炉罩后，依次经过各段时被逐渐升温，从而完成了生球的干燥和预热过程。

链篦机炉罩的供热主要利用回转窑和环冷机的载热废气。回转窑的高温废气供给链篦机 PH 段，在 PH 段炉罩设有天然气烧嘴，以弥补热量的不足。从 PH 段排出的低温废气又供给 DDD 段，环冷机 I 段的高温废气供给回转窑窑头作二次助燃风，II 段中温废气供给 TPH 段，III 段低温废气供给 UDD 段，先进的气流循环系统使热能得到了充分利用，从而大大降低了能源消耗。

②回转窑室（焙烧）

生球在链篦机上经过干燥、预热后送入回转窑内进行高温氧化焙烧，回转窑内温度控制在 1300~1500℃之间。回转窑供热采用烟煤（或高热值燃气），燃煤经磨细后从窑头（卸料端）用高压空气喷入。煤粉喷枪采用调焰性能好的四通道烧嘴，同时由来自环冷机冷却段一的高温废气作为二次风，分为两股由烧嘴上方及下方平行引入窑内，为回转窑提供一个均匀稳定的温度场，既能保持较长的高温焙烧带又可防止局部超高温。加之球团在窑内不断翻滚使其得到均匀焙烧，从而达到 2500N/个球以上的抗压强度。

③环冷机室（冷却）

从回转窑排出的球团温度 1250℃左右，必须冷却至 100℃以下方可进行储存和运输。高温球团的冷却采用风冷，在一台环式鼓风冷却机上完成。球团在进入冷却机前先经设在窑头箱内的固定筛将可能产生的大于 200mm 的大块筛除后，再通过环冷机布料斗均匀布在环冷机台车上，球团布料高度约 760mm。环冷机

分为三个冷却段，各段配有 1 台鼓风机，球团矿从转料到卸料途经三段冷却后被冷却至 100℃ 以下。每段冷却产生的废气余热利用已在前面各段中叙述。

2.7.2 技术适用条件

上述球团废热循环利用针对所有链篦机-回转窑球团生产线全部适用。单机（窑）生产能力大的链篦机-回转窑球团生产线适用效果更佳，节能效果更加明显。

上述球团废热循环利用随着链篦机-回转窑球团建设时一起建设，属于“三同时”项目，是链篦机-回转窑球团建设不可分割的一部分。球团竖炉废热循环利用可在现有球团竖炉进行改造实施，也可在建设过程中完成。

2.7.3 节能减排效果

（1）节能效果

链篦机-回转窑球团生产线生产过程中消耗的主要能源介质为煤粉或高热值煤气（高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气、天然气等）、电力、水、蒸汽、压缩空气等，其中，电力和煤粉能源约占全部所耗能源的 90% 以上。

采用氧化球团废热循环利用工艺技术主要可以降低燃料消耗，根据经验，平均每吨球团矿可以降低 3kgce，按照全国 1 亿吨球团矿生产量计算，可节约 30 万吨标准煤。

（2）环保效果

烧结和球团生产过程中，主要产生的污染物是废气和烟粉尘。球团废热循环利用工艺技术由于避免回转窑段和环冷机段的高温废气直接排向大气，减少了高温烟尘的排放。此外，高温的废气循环减少了除尘点数量，有利于减少环保治理装置的投资，并有利于集中除尘，减少粉尘排放量。

2.7.4 成本效益分析

（1）投资估算

球团废热循环利用工艺技术以链篦机-回转窑为例，是随着链篦机-回转窑球团生产线同步建设，一般不单独建设或改造。

根据目前我国链篦机-回转窑球团生产线的投资估算，球团废热循环利用工艺技术需要的建设投资约占球团生产线投资的 5%，即球团废热循环利用工艺技术建设投资约 9.00 元/t 球团。

球团废热循环利用技术总投资 9.09 元/t 球团，其中建设投资 9.00 元/t 球团，建设投资全部采用资本金，铺底流动资金 0.09 元/t 球团。投资估算详见下表。

表 2.7.1 球团废热循环利用技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/t 球团）
一	建设投资	9.00
1	建筑费用	1.62
2	设备费用	5.58
3	安装费用	1.17
4	其他费用	0.63
二	建设期利息	0.00
三	铺底流动资金	0.09
四	技术总投资	9.09

(2) 经济效益分析

采用球团废热循环利用技术，平均每吨球团矿可以降低燃料消耗 3kgce/t 球团，则年收入 2.12 元/t 球团 年。球团废热循环利用技术的实施，增加了工资及福利费用、固定资产折旧、修理等费用，增加管理等费用，上述各项费用合计 1.13 元/t 球团 年（达产年）。

经测算，达产年年利润总额 0.96 元/t 球团 年，税后投资内部收益率 13.32%，投资回收期（不含建设期）6.8 年。经济评价总表见下表。

表 2.7.2 球团废热循环利用技术经济评价指标

序号	项 目	单位	项 目
一	总投资	元/t 球团	9.09
1	建设投资	元/t 球团	9.00
2	建设期利息	元/t 球团	0.00
3	铺底流动资金	元/t 球团	0.09
二	生产追加流动资金	元/t 球团	0.20
三	总资金	元/t 球团	9.29
四	资金筹措	元/t 球团	9.29
1	自有建设资金	元/t 球团	9.00
2	建设期利息	元/t 球团	0.00
3	自有流动资金	元/t 球团	0.29
4	建设资金贷款	元/t 球团	0.00
5	流动资金贷款	元/t 球团	0.00

序号	项 目	单位	项 目
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/t 球团	2.12
2	不含税总成本费用	元/t 球团	1.13
3	销售税金及附加	元/t 球团	0.04
4	利润总额	元/t 球团	0.96
5	所得税	元/t 球团	0.24
6	税后利润	元/t 球团	0.72
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	7.8
2	投资内部收益率	%	13.32

2.7.5 技术应用情况

链篦机-回转窑球团生产线建设时一般都同时建设废热循环利用工艺技术，目前链篦机-回转窑球团生产线废热循环利用工艺技术的比例能够达到 40%以上。“十二五”期末预计该技术推广比例将达到约 80%。

2.7.6 技术知识产权情况

我国已经能自主设计、制造和建设 500 万吨链篦机-回转窑球团生产线。大型链篦机-回转窑球团生产线主要设计厂家为中冶长天和中冶北方设计院，小型球团生产线设计厂家主要有山东瑞拓有限公司。部分大型链篦机-回转窑球团设备制造需要进口，进口公司为美卓公司。

2.8 烧结烟气湿法脱硫技术

2.8.1 技术介绍

湿法脱硫技术是脱硫剂（钙、钠、铝、镁的氢氧化物或氨）与烟气中二氧化硫在液态下发生反应，生成的副产品为湿态。湿法脱硫系统布置在烧结主抽风机与烟囱之间，原烟气引自主排风机的出口处，经处理后的净烟气返回主排气管的烟囱入口处。原有的主排风管成了脱硫系统的旁路。在一定条件下脱硫系统与主排气系统可相对独立，互不影响。

湿法脱硫工艺主要有烟气系统、SO₂ 吸收系统、浆液制备系统、脱硫副产物（脱水或蒸发和结晶）处置系统、事故浆液及排空系统、废水处理系统（如果有）、

工艺水系统、仪控系统及其他公辅系统等组成。

湿法脱硫工艺（氨法除外）所采用的浆液制备系统、烟气系统、事故浆液系统及废水处理系统等基本相差不多，有区别或不同的是 SO_2 吸收系统及脱硫副产物的处置系统。

湿法脱硫技术优点是：脱硫效率很高，其本可稳定在 95% 的脱硫效率，工艺比较经典成熟。其缺点是：总图位置、一次投资、运行成本一般比干（半干）法脱硫工艺要大；产生成份复杂的废水；必须合理解决“磨（损）、堵（塞）、腐（蚀）、漏（跑、冒、滴、漏）”这湿法系统的四大难题。针对全烟气脱硫的湿法系统，烟囱必须进行防腐处理或增设湿烟囱。

本指南从节能环保和使用成熟角度以石灰石（石灰）—石膏法、DS-钢渣法脱硫法为代表进行介绍。

（1）石灰石/石灰-石膏法

石灰石/石灰-石膏法是工业化应用最早的 SO_2 脱除技术，属于湿法脱硫技术中的一种。脱硫剂为石灰石或石灰。

主要原理是烟气中的 SO_2 与石灰或石灰石浆液反应，脱硫产物亚硫酸钙，也可氧化为石膏回收利用，可用作建材或水泥添加剂，经过脱硫的烟气除雾后排出烟囱，其典型的工艺流程见图 2.8.1。

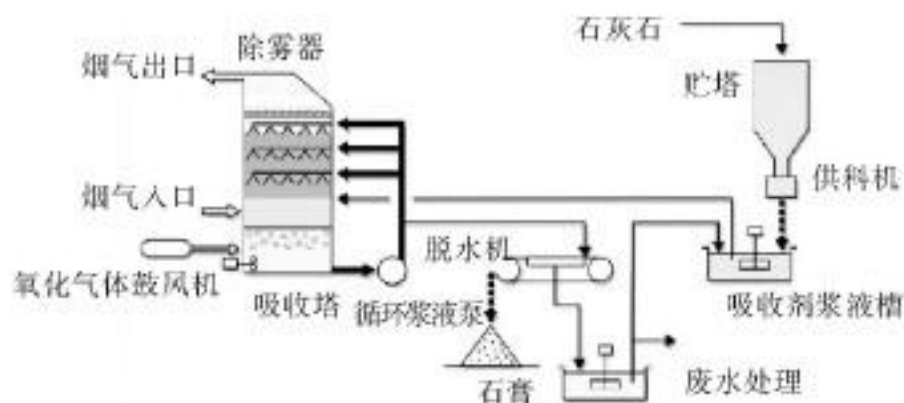


图 2.8.1 石灰石/石灰-石膏法示意图

石灰石/石灰-石膏法具有脱硫剂价廉易得、系统稳定可靠。但其投资及运行费用较高，系统复杂，占地面积大，副产物石膏在我国没有销路，直接抛弃产生二次污染和硫资源浪费。

（2）DS-钢渣法脱硫法

DS-钢渣法脱硫技术是一种治理烟气中 SO_2 的新技术，已在国内钢厂烧结机脱硫中成功应用。脱硫剂为炼钢转炉渣，也可用类似性质的炼铁高炉渣等，吸收设备采用 DS-多相反应器。烟气中的 SO_2 与钢渣浆液中的碱性水化产物反应，脱

硫产物经氧化生成硫酸盐，其中石膏含量约 70%，并含硅、铝、铁等矿物，可作为盐碱地改良剂，也可用作建材或水泥添加剂。

该工艺具有脱硫剂价廉易得，特别适用于烧结机脱硫。吸收剂用量和产渣量比石灰石-石膏法略高，对钢渣来源不方便的地域或行业应用有一定局限。DS-钢渣法脱硫的投资、系统复杂程度、运行费用及占地面较石灰石-石膏法低，系统稳定可靠。副产物可用于盐碱地改良和水泥添加剂。

2.8.2 技术适用条件

湿法脱硫技术适用于：①原烟气 SO_2 浓度大于 4500mg/m^3 ，且要求脱硫效率在 95%以上；②有预留场地或总图布置无困难的企业；③脱硫剂就地取材，尤其是有碱性废物可用；④副产物有出路，能合理处置；⑤针对大规格的烧结机，湿法脱硫工艺更显其性价比；⑥湿法脱硫系统的烟囱防腐，湿法全烟气脱硫，脱硫后净烟气温度大致在 45°C 左右，处于酸露点温度以下，因此，烟囱必须防腐或脱硫后的净烟气加热至酸露点温度以上；湿法烟气脱硫，烟囱是否需要防腐需经计算后才能确定。

石灰石/石灰-石膏法对烟气和煤种的适应性能好、适于大容量机组的烟气净化，应充分考虑国情和脱硫副产物石膏的资源化利用技术。

DS-钢渣法脱硫法对烟气流量和 SO_2 浓度的适应性能好，既适于大容量机组的烟气净化，也适于高 SO_2 浓度的烟气治理。

目前，我国湿法脱硫技术使用较多占 50%以上，随着排放标准的进一步严格，综合处理技术是发展趋势，湿法向干法技术的发展也是选择脱硫技术的方向。

2.8.3 节能减排效果

湿法脱硫技术的脱硫效率很高，基本可稳定在 95%的脱硫效率。

（1）石灰石/石灰-石膏法脱硫法

石灰石/石灰-石膏法脱硫效率高（90%~98%）， SO_2 排放浓度可控制在 $\leq 200\text{mg/Nm}^3$ 以下，技术成熟可靠。在生成脱硫剂的前道工序和脱硫过程中都伴随有 CO_2 的排放，石灰-石膏法，每处理 1 吨 SO_2 要排放 0.7tCO_2 。因此，烧结烟气脱硫要与控制 CO_2 排放同步考虑。

石灰石-石膏法副产物脱硫石膏在我国没有销路，采取废弃方式，造成二次污染，每脱除 1tSO_2 约产生 3t 的石膏，有的处理后可用作建材。该技术用水量较大，并有污水排放，且不能去除重金属、二噁英等多种污染物。

（2）DS-钢渣脱硫法

DS-钢渣脱硫法脱硫效率高（90%~98%），SO₂ 排放浓度可控制在≤100mg/Nm³ 以下，技术成熟可靠。钢渣脱硫没有 CO₂ 气体产生，同时还能脱除 30%~40%的氮氧化物。

另外，脱硫产物作为盐碱地改良剂时，需控制脱硫产物中的重金属含量，主要从两方面着手，一是控制源头钢渣的重金属含量，另一方面是在脱硫工艺上控制，将钢渣中重金属浸出后进行中和、过滤去除。一般钢铁公司产生的钢渣所含重金属低于国家标准。

2.8.4 成本效益分析

石灰石/石灰-石膏法由于工艺较复杂，一次投资大、运行成本高；一次投资约 20~30 元/t 烧结矿，脱硫系统运行成本约为 5~15 元/t 烧结矿。占地面积大；有废水产生，需处理；不易彻底解决磨损、堵塞、腐蚀、漏泄，特别是腐蚀和垢堵问题。

（1）投资估算

项目案例：1 台 360m² 烧结机，采用烧结烟气石灰石/石灰-石膏脱硫法。项目总投资 5287 万元，其中建设投资 4958 万元，建设期利息 203 万元，铺底流动资金 126 万元。项目投资估算详见下表。

表 2.8.1 烧结烟气石灰石-石膏脱硫法投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	4958.00	93.8%
1.1	建筑费用	672.51	12.7%
1.2	设备费用	3004.85	56.8%
1.3	安装费用	615.28	11.6%
1.4	其它费用	665.36	12.6%
2	建设期利息	203.08	3.8%
3	铺底流动资金	125.92	2.4%
	总投资	5287.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：可减排 SO₂11000 吨，副产石膏 36480 吨，年增加收入 1420 万元。采用烧结烟气石灰石/石灰-石膏脱硫法，将增加辅助材料费、燃料及动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 2265 万元，项目利润总额-824 万元。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 2.8.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单位	指标
1	项目总投资	万元	5287
1.1	建设投资	万元	4958
1.2	建设期利息	万元	203
1.3	铺底流动资金	万元	126
2.	生产流动资金	万元	294
3.	项目总资金	万元	5581
4.	资金筹措	万元	5581
4.1	自有资金	万元	2115
4.2	建设贷款	万元	3172
4.3	流动资金贷款	万元	294
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万元	1420
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万元	2265
5.3	达产年销售税金及附加	万元	-206
5.4	达产年利润总额	万元	-824
5.5	达产年所得税	万元	
5.6	达产年净利润	万元	
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	
6.2	财务内部收益率	%	
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	

DS-钢渣法一次投资约 15~20 元/t 烧结矿，脱硫系统运行成本约为 3~5 元/t 烧结矿。有少量废水产生，需处理。由于脱硫设备采用的是全高分子材料的 DS-多相反应器，解决了腐蚀和垢堵问题。

2.8.5 技术应用情况

湿法烟气脱硫技术比较成熟，在众多的脱硫技术中占主导地位。

（1）石灰石/石灰-石膏法

日本 JFE 公司、住友金属公司和神户制钢公司等都有石灰石—石膏法废气脱硫装置。日本、德国采用石灰石—石膏法脱硫成功的重要原因是两国都缺乏天然

石膏资源，这样既解决了本国石膏缺乏的问题，又解决了烟气脱硫副产品的出路问题，并相应降低了脱硫成本。美国的天然石膏较为丰富，烟气脱硫副产石膏无出路，由于美国地域较为宽广，故一般采取抛弃的方法处理石膏。而我国人均土地资源有限，硫磺等资源缺乏，但天然石膏资源丰富。

表 2.8.3 石灰石/石灰-石膏法烧结烟气脱硫日本部分应用情况

公司名称	工厂	烧结机	投产时间	处理能力 (万 m ³ h ⁻¹)	脱硫率%	副产品
JFE	千叶厂	4 号	1976.10	76.2	95	石膏
		2 号	1976.05	75.0	95	石膏
	仓敷厂	3 号	1975.07	90.0	95	石膏
		4 号	1974.11	75.0	95	石膏
住友金属	和歌山厂	5 号	1975.04	37.0	95	石膏
神户制钢	神户厂	1 号	1983.12	22.0	>97	石膏
		2 号	1976.03	35.0	>97	石膏
	加古川厂	1 号	1978.05	80.0	95	石膏

我国宝钢自主开发的气喷旋冲（XPB）石灰石-石膏脱硫湿法应用实例：

①梅钢 3 号 180m² 烧结脱硫，2008 年 3 月投运，脱硫率和同步作业率 90% 以上，SO₂ 排放≤100mg/m³，烟尘排放≤34mg/m³。

②不锈 1 号 225m² 烧结脱硫，2008 年 10 月投运，脱硫率 90%，SO₂ 排放≤100mg/m³；烟尘排放 30mg/m³。

③直属 3 号 495m² 烧结脱硫，2008 年 11 月投运，脱硫率 90%，SO₂ 排放 40mg/m³；烟尘排放≤42mg/m³。

湘钢采用石灰石-石膏烟气脱硫法实例：

湘钢 1 号 360m² 烧结机采用石灰石-石膏烟气脱硫装置，2010 年 1 月投产。项目总投资 5000 余万元，运行成本每年约需 1600 万元。湘钢采用石灰石-石膏空塔喷淋技术进行烧结机烟气脱硫的装置。这套装置运用了风量自动跟踪同步调节控制、烟温双向调节控制、浆池结晶生成物控制等多项专利技术，脱硫效率 95%，每年可减排二氧化硫 8000 吨左右，脱硫副产物为纯度 90% 以上石膏。

（2）DS-钢渣脱硫法

2001 年 6 月，在宁波东方冶炼厂建成第一套 DS-二氧化硫烟气治理装置。装置工况烟气量 17×10⁴m³/h，进吸收塔 SO₂ 浓度平均达 2.15×10⁴mg/m³。采用炼

铜炉渣作为吸收剂，三级 DS-多相反应器串联吸收，脱硫后烟气 SO_2 浓度 $232.2\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，吸收效率高达 98.9%。

2003 年 7 月，东方冶炼厂建成第二套二氧化硫烟气治理装置，工况烟气量 $24\times 10^4\text{m}^3/\text{h}$ ，出口 SO_2 浓度平均 $2000\text{mg}/\text{m}^3$ 。采用炼铜炉渣作吸收剂，一级 DS-多相反应器吸收，出口 SO_2 浓度稳定控制在 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 装置以下。

2010 年 1 月，唐山德龙钢铁有限公司建成 230m^2 烧结机烟气脱硫装置，采用 DS-钢渣法脱硫技术。项目总投资约 3600 万元，项目占地面积约 3500m^2 ，吸收设备采用 DS-多相反应器。脱硫技术指标如下：

烟气流量 $1440000\text{m}^3/\text{h}$ ，烟气含 SO_2 浓度为 $1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。脱硫效率 $\geq 96\%$ ，保证脱硫机组年稳定运行时间 8400 小时，脱硫渣水分 $\leq 20\%$ 。

脱硫渣用于盐碱地改造部分案例：

- ◆ 2002 年浙江省慈溪市庵东镇江南村盐碱地改造工程。
- ◆ 2004 年浙江省慈溪市十塘江南岸盐碱地改造工程。
- ◆ 2005 年河北省沧州盐碱地改造工程。
- ◆ 2008 年曹妃甸工业区首钢京唐钢铁联合有限责任公司指挥中心绿化盐碱土壤改造项目。
- ◆ 2009 年唐山市德龙钢铁有限公司盐碱地改良工程。

◆ 以 2002 年浙江省慈溪市庵东镇江南村盐碱地工程为例：施用盐碱地“改良剂”结合种植不同植物，进行滨海盐碱荒地综合修复应用研究，结果表明：8 年后试验基地 I 土壤 pH 由 9.25 下降到 7.55，含盐量降低了 77%；4 年后试验基地 II 土壤 pH 值降低了 1.57 个单位，土壤含盐量下降了 78%，说明施用“改良剂”对降低土壤 pH 值和含盐量具有较长时间的效果。土壤有机质呈下降趋势，但有机质下降逐渐减缓，能否维持或提升土壤有机质需要进行长期检测分析。土壤速效磷、钾在施用“改良剂”4 年（试验基地 II）和 8 年（试验基地 I）都有明显增加趋势，说明通过施用“改良剂”（备注：改良剂由脱硫渣加工而成）能够有效改善盐碱地土壤 P、K 养分状况。试验基地 I 和 II 表层（0~20cm）土壤粒度分析结果表明，分别施用“改良剂”4 年和 8 年后，土壤颗粒组成发生由较大粒径向小粒径的明显变化，主要增加了 1~100 μm 粒径的颗粒组成比例，提高了土壤对养分的固持能力，改善了土壤水、肥、气和热的条件。

2010 年，该技术普及率约为 20%；“十二五”期末,预计该技术推广比例将达到约 30%。

2.8.6 技术知识产权情况

通过检索专利，共检索到烧结烟气湿法净化技术相关专利很多，而且湿法脱

硫工艺中涉及的技术种类繁多，以下以两种脱硫工艺为代表介绍一下专利情况：

表 2.8.4 石灰石/石灰-石膏法发明专利

序号	专利名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	一种省去浆液制备系统的石灰石-石膏法烟气脱硫工艺	CN101185830	成都信息工程学院	2007.09.10
2	旋流双循环湿式石灰石-石膏法脱硫装置	CN2590645	长沙市澳德环保设备有限公司	2002.11.13
3	一种石灰石-石膏法燃煤烟气脱硫同时脱硝的方法	CN101708422A	南京师范大学	2009.12.14
4	提高石灰石脱硫剂在烟气脱硫中利用率的工艺技术	CN1701837	沈阳化工学院	2005.04.08
5	一种利用烧结烟气脱硫石膏生产矿渣水泥的方法	CN101172789	莱芜钢铁集团有限公司	2007.10.17
6	一种烧结烟气脱硫石膏的纯化方法	CN101397148	宝山钢铁股份有限公司	2007.09.24

表 2.8.5 DS-钢渣脱硫法国内专利

序号	专利名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	烟气的钢渣湿式脱硫方法	CN101428193	天津大学	2008-11-26
2	以炼铁炼钢炉渣为吸收剂吸收烟气中二氧化硫的方法	CN101053761	史汉祥	2007-02-28
3	一种处理含二氧化硫废气的化学吸附剂	CN1316289	史汉祥	2001-01-16
4	用吸收 SO ₂ 后产物渣制造无机复合肥的生产方法	CN1284488	史汉祥	2000-09-21
5	含二氧化硫烟气处理方法	CN1280031	史汉祥	2000-07-11

2.9 烧结烟气半干法或干法脱硫技术

2.9.1 技术介绍

干法脱硫技术脱硫副产物为干态。半干法烟气脱硫技术兼有干法与湿法的一些特点，可分为脱硫剂在干状态下脱硫，在湿状态下再生（如水洗活性炭再生流

程)和脱硫剂在湿状态下脱硫,在干状态下处理脱硫产物(如喷雾干燥法)两种半干法。特别是在湿状态下脱硫在干状态下处理脱硫产物的半干法,以其兼有湿法脱硫反应速度快、脱硫效率高和干法无废水废酸排出、脱硫后产物易于处理的好处而受到人们的广泛关注。

半干法脱硫工艺有烟气系统、SO₂吸收系统、脱硫除尘器系统、脱硫剂贮存及制备系统、脱硫灰贮存及循环系统、工艺水系统、仪控系统及其他公辅系统等组成。其脱硫副产物主要是以亚硫酸钙、硫酸钙、氯化钙、氟化钙、氧化钙等为主的干态粉状料(活性炭工艺其脱硫副产物为液态SO₂或硫酸)。脱硫副产物可用作水泥添加料(添加比例不超过5%)、做免烧砖、路基材料、矿井回填等。脱硫副产物的产生量为脱除1吨SO₂约产生2.5吨(活性炭吸附法除外)。

半干法脱硫工艺初期投资费用和运行费用比湿法低,脱硫效率(85%~95%)略低于湿法工艺,脱硫副产物呈干态,使用价值不高。另外,相对于湿法工艺,它的Ca/S比较高,脱硫剂的利用率较低,操作运行的稳定性(尤其是CFB)和适应性有待加强和改善。同时具有易于处理,设备腐蚀小,烟气无需再热,结构简单,设备易于维护,运行费用低等优点。本指南中烧结烟气(半)干法脱硫技术以循环流化床法(LJS-FGD)和活性炭法为代表进行介绍:

(1) 循环流化床法

循环流化床脱硫法以循环流化床原理为基础,通过吸收剂的多次再循环,延长吸收剂与烟气的接触时间,大大提高吸收剂的利用率。就是将石灰粉按一定比例加入烟气中,使石灰粉在烟气中处于流化状态反复反应生成亚硫酸钙。一般采用干态的消石灰粉作为吸收剂,其最大特点是综合造价低,占地小,系统简单,水耗低,运行及维护费用低,不需考虑防腐问题,同时可以预留添加剂活性焦去除二噁英的接口。还可通过选择性脱硫和“多机一塔”来降低投资。

循环流化床脱硫法具有耗水、耗电量小,占地面积小和运行费用低等优点,但是该工艺也存在着不足之处,烟气量的不稳定变化会影响到吸收剂的流化状态不稳定,导致脱硫效果易随烟气量的变化受影响,而且还会出现堵塞现象。

循环流化床系统主要包括四部分,物料循环系统、吸收塔系统、吸收剂制备系统及除尘系统。其流程是:先将脱硫剂引入循环流化床吸收器,在流化状态下与通入的烟气进行脱硫反应,烟气脱硫后进入布袋除尘器除尘,再由引风机经烟囱排出,布袋除尘器除下的物料大部分经循环输送槽返回流化床循环使用。

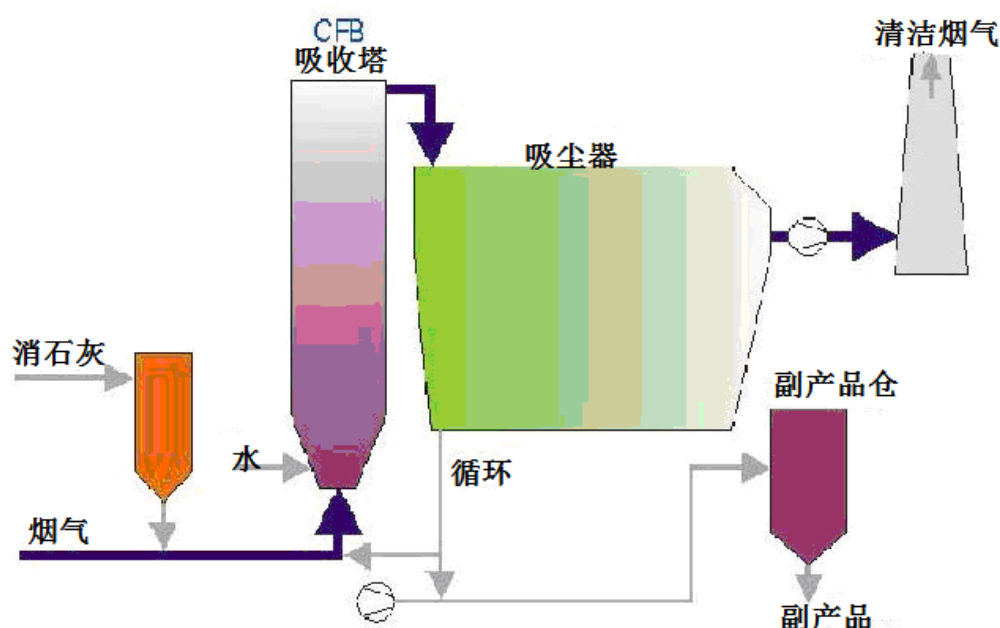


图 2.9.1 烟气循环流化床干法脱硫工艺流程

(2) 活性炭法

活性炭吸附法是目前唯一能脱出烟气中每一种杂质的方法,属于干法烟气脱硫技术。靠活性焦表面孔隙吸附,副产物是硫酸或硫磺等。

活性炭法的原理是烧结机排出的延期经旋风除尘器简单除尘后,粉尘浓度从 $1000\text{mg}/\text{m}^3$ 降为 $250\text{mg}/\text{m}^3$,由主风机排出。烟气经升压鼓风机后送往移动床吸收塔,并在吸收塔入口出添加脱销所需的氨气。烟气中的 SO_x 、 NO_x 在吸收塔内进行反应,所生成的硫酸和铵盐被活性炭吸附除去。吸附了硫酸和铵盐的活性炭送入脱离塔,经加热至 400°C 左右可解吸出高浓度 SO_2 。解吸出的高浓度 SO_2 可以用来生产高纯度硫磺(99.9%以上)或浓硫酸(98%以上);再生后的活性炭经冷却筛去除杂质后送回吸收塔进行循环使用。活性炭法在进行烟气处理过程中烟气温度并没有下降,故无需再对处理后的烟气加热来进行排放,这有别于其他脱硫技术。

其脱硫工艺一般分为3个过程:首先烟气进入吸收塔,烟气中的二氧化硫、氧气和水蒸气吸附在活性焦的表面。然后,在活性焦表面活性点的催化作用下二氧化硫被氧化成三氧化硫。最后,三氧化硫与水蒸气反应生成硫酸,吸附在活性焦的表面。吸附饱和的活性焦需排出再生,同时补充新活性焦。

2.9.2 技术适用条件

(半)干法脱硫工艺适用于中低浓度。原烟气 SO_2 浓度小于 $2500\text{mg}/\text{m}^3$,且只要求脱硫效率在85%~95%之间。对于改造空间受限的企业宜选择工艺简单、

占地面积小的半干法脱硫技术，如密相塔法（该技术占地面积较小，目前烟气处理能力一般为 50~120 万 m^3/h ）和循环流化床法。

（半）干法脱硫技术更适合于贫水地区。

（1）循环流化床法

循环流化床法适用条件广，由于流程简单、占地少，更适合于我国缺水地区等内陆型钢铁企业和缺少建设场地的老旧烧结改造。

（2）活性炭法

活性炭法烟气处理能力可以达到170万 m^3/h ，脱硫效率可达90%以上。活性炭法不仅烟气处理能力大，其占地面积较小，这是活性炭法相对于其他脱硫技术的一大优势。适用于含二氧化硫3000~11000 mg/m^3 及含尘量小于50 mg/m^3 的烟气，有一定的硫回收条件，不适合低浓度烟气。

2.9.3 节能减排效果

（1）循环流化床法

循环流化床法经济的脱硫效率为 85%~90%，在钙硫比为 1.1~1.2 的情况下脱硫率可达到 90%左右。脱硫塔入口 SO_2 平均浓度 1400 mg/Nm^3 的情况下脱硫率可达到 90%以上，外排废气中 SO_2 平均浓度 90 mg/Nm^3 。此外，循环流化床烟气脱硫工艺还可有效脱除 HF、HCL 等酸性气体，通过加入吸附剂（活性炭）可脱除重金属、二噁英等污染物，如果配合布袋除尘，粉尘排放浓度在 10 mg/m^3 以下，无废水排放。

（2）活性炭法

活性炭法脱硫率高（90%~99%），处理后排放的尾气中二氧化硫含量小于 350ppm。脱硫同时可实现脱硝、脱二噁英、重金属及粉尘等。脱硫过程不消耗水，活性焦可再生后重复利用，不消耗水、不产生废水；副产物为硫酸或硫磺等，无二次污染。

2.9.4 成本效益分析

（1）循环流化床法

针对循环流化床干法脱硫工艺进行分析。

①投资估算

项目案例：1 台 100 m^2 和 1 台 200 m^2 烧结机，采用烧结烟气循环流化床 LJS-FGD 干法脱硫技术。项目总投资 4978 万元，其中建设投资 4680 万元，建设期利息 191 万元，铺底流动资金 107 万元。

项目投资估算详见下表。

表 2.9.1 烧结烟气循环流化床法脱硫技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1	建设投资	4680.00	94.0%
1.1	建筑费用	634.80	12.8%
1.2	设备费用	2836.36	57.0%
1.3	安装费用	580.78	11.7%
1.4	其它费用	628.05	12.6%
2	建设期利息	191.06	3.8%
3	铺底流动资金	106.94	2.1%
	总投资	4978.00	100.0%

②经济效益分析

项目达产年指标：可减排 SO₂4277 吨，年增加收入 539 万元。采用烧结烟气循环流化床干法脱硫技术，将增加辅助材料费、燃料及动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 2138 万元，项目利润总额-1578 万元。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 2.9.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单位	指标
1	项目总投资	万元	4978
1.1	建设投资	万元	4680
1.2	建设期利息	万元	191
1.3	铺底流动资金	万元	107
2.	生产流动资金	万元	250
3.	项目总资金	万元	5228
4.	资金筹措	万元	5228
4.1	自有资金	万元	1991
4.2	建设贷款	万元	2987
4.3	流动资金贷款	万元	250
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万元	539
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万元	2138
5.3	达产年销售税金及附加	万元	-209

序号	项目名称	单位	指标
5.4	达产年利润总额	万元	-1578
5.5	达产年所得税	万元	
5.6	达产年净利润	万元	
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	
6.2	财务内部收益率	%	
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	

（2）活性炭法

活性炭脱硫法由于设备造价高，活性炭价高，尤其硫资源回收处理等外围系统复杂，投资巨大（投资为一般湿法4~5倍），因活性炭价格较贵，运行费用很高、系统复杂、加热解吸活性炭容易自燃爆炸、活性炭反复使用后吸附率降低消耗大。脱除SO₂反应受吸附速率控制，效率较低约80%左右，活性炭再生能耗较高。活性炭法运行成本约为15元/t烧结矿。

活性炭法使用的活性炭损耗较高，即使循环使用，每脱除1吨SO₂，活性炭损失在150kg左右。就目前钢铁企业实际情况看，运行费用太高，不是一般的企业能负担的。国内，山西太钢集团投资了8个亿的活性炭脱硫法，一年的运行费用要一个多亿。针对活性炭脱硫法，投资效益计算如下：

①投资估算

项目案例：1台450m²烧结机，采用烧结烟气活性炭脱硫法。项目总投资35738万元，其中建设投资34000万元，建设期利息1372万元，铺底流动资金366万元。项目投资估算详见下表。

表 2.9.3 烧结烟气活性炭脱硫法投资估算表

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1	建设投资	34000.00	95.1%
1.1	建筑费用	4611.83	12.9%
1.2	设备费用	20606.06	57.7%
1.3	安装费用	4219.34	11.8%
1.4	其它费用	4562.77	12.8%
2	建设期利息	1372.10	3.8%
3	铺底流动资金	365.90	1.0%
	总投资	35738.00	100.0%

②经济效益分析

项目达产年指标：可减排 SO₂8300 吨，年增加收入 1046 万元。采用烧结烟气活性炭脱硫法，将增加折旧费、维修费、管理费、财务费等，各项费用合计 6979 万元，项目利润总额-5933 万元。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 2.9.4 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单位	指标
1	项目总投资	万元	35738
1.1	建设投资	万元	34000
1.2	建设期利息	万元	1372
1.3	铺底流动资金	万元	366
2.	生产流动资金	万元	854
3.	项目总资金	万元	36592
4.	资金筹措	万元	36592
4.1	自有资金	万元	14295
4.2	建设贷款	万元	21443
4.3	流动资金贷款	万元	854
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万元	1046
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万元	6979
5.3	达产年销售税金及附加	万元	0
5.4	达产年利润总额	万元	-5933
5.5	达产年所得税	万元	
5.6	达产年净利润	万元	
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	
6.2	财务内部收益率	%	
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	

2.9.5 技术应用情况

（1）循环流化床法

我国福建三明钢厂2号180m²烧结机烟气脱硫设备，2007年10月投运，脱硫

效率达96%，平均排放浓度由原来的 $5000\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到小于 $400\text{mg}/\text{m}^3$ 。粉尘排放 $\leq 50\text{mg}/\text{m}^3$ ，系统作业率90%，最高处理烟气含硫 $9000\text{mg}/\text{m}^3$ 。调研表明，该工艺工程应用总体上是成功的，吨烧结矿运行成本约6元（含电耗、吸收剂、人工、折旧）。

梅钢4号 400m^2 烧结烟气脱硫处理设备，2009年7月投产；脱硫率 $\geq 95\%$ ，脱硫后烟气中 SO_2 浓度可控制在 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，同时脱硫后采用高效布袋除尘器，烟尘排放浓度下降到 $10\sim 20\text{mg}/\text{m}^3$ ；增配了二噁英脱除系统。

济钢、武钢和攀钢也选用了循环流化床法进行烟气脱硫。其中济钢 120m^2 烧结机脱硫装置处理烟气量为 44 万 m^3/h ；武钢 450m^2 烧结机设计处理烟气量为 100 万 m^3/h 。

（2）活性炭脱硫法

20世纪80年代末，日本从德国引进活性炭吸附工艺，改造已有的石灰石-石膏湿法工艺。1987年新日铁名古屋3号烧结机最先使用，2000年以后，烧结烟气多采用活性焦干法脱硫技术，至今在日本18套烧结脱硫石灰石-石膏湿法装置中，改造建成了共计9套活性炭吸附加热脱硫工艺，但多数均保留了原来的石膏工艺系统副产石膏。回收的富 SO_2 气体通入石膏反应器，与消石灰反应生产石膏。如住友金属鹿岛厂NO.2、NO.3烧结机，新日铁名古屋厂NO.1、NO.2、NO.3烧结机。2000年后韩国浦项制铁NO.3、NO.4烧结机也采用了该脱硫技术。

日本新日铁公司于1987年在名古屋厂3号烧结机最先使用，处理烟气量为90万 m^3/h ，投资55亿日元，年运行费用约10亿日元。该装置目前脱硫率高达95%，脱硝率40%，而且能有效脱除二噁英和具有良好的除尘效果。

1999年7月名古屋钢铁厂在1、2号烧结机上又投运了活性炭脱硫装置，烟气处理量130万 m^3/h 。随后投运的日本JFE福山厂的4、5号烧结机，烟气处理量分别为110万 m^3/h 和170万 m^3/h ，活性炭消耗量分别为100t/月和150t/月，脱硫率80%、脱硝率40%、除尘率60%，脱二噁英率98%，二噁英排放浓度可降到 $0.01\sim 0.05\text{ng}/\text{m}^3$ 。

我国太钢的 450m^2 和 600m^2 烧结机烟气脱硫制硫酸工程，于2008年8月份与新日铁签订了活性炭吸附工艺引进协议。由住友重机械工业提供干式活性炭法脱硫脱硝设备，合同金额约为50亿日元，2010年9月投产一台。脱硫脱硝装置，共需活性炭约9000吨（价值人民币0.5亿多元）。脱硫装置运转后，每年减少二氧化硫排放量4000吨、氮氧化物1200吨、粉尘620吨，年回收二氧化硫再生浓硫酸1万吨。

2010年，烧结烟气半干法或干法脱硫技术普及率约为15%；“十二五”期末预计该技术推广比例将达到约40%。

2.9.6 技术知识产权情况

表 2.9.5 循环流化床脱硫工艺专利

序号	专利名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	一种循环流化床烟气脱硫工艺及装置	CN101357298	黄盛珠	2007-07-31

活性炭脱硫法共检索到专利 7 项，其中大部分都是化工领域的专利，烧结厂烟气脱硫应用该技术主要来源于日本和德国，国内烧结厂应用该技术至今仅有太钢一家，国内主要专利如下：

表 2.9.6 活性炭脱硫法专利

序号	申请号	专利名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
2	200410042864.6	一种活性炭脱硫剂及其应用	CN1704143	长春东狮科贸实业有限公司	2004-05-28
3	200510045273.9	复合活性炭脱硫剂及其制备方法	CN1792414	张新长	2005-11-29
4	200610043599.2	低阻力、低成本、节能型活性炭脱硫塔	CN101058050	王惠生	2006-04-17
5	200910067534.5	活性炭脱硫剂及其制备方法	CN101664689	长春惠工净化工业有限公司	2009-09-16
6	200620083109.7	活性炭脱硫逆向同步工作塔	CN101058051	王惠生	2006-04-17

第三节 炼铁工序

我国主要采用的是高炉-转炉长流程钢铁生产工序。高炉炼铁工序是我国钢铁生产流程中能耗最高的工序，占整个工序能耗的 50% 以上。根据计算，高炉炼铁生产所需的能量主要来自炭素燃烧、以及热风和炉料反应热。炼铁工序节能的工作重点是要努力降低燃料比、其次要努力提高二次能源回收利用水平。

在降低燃料比方面，直接加废钢或直接还原铁、高炉喷煤、提高热风温度、脱湿鼓风等都是有效措施。在二次能源回收方面，主要体现在采用高炉煤气干法除尘、提高高炉炉顶煤气余压发电（TRT）效率、高炉渣的综合利用技术等方面。

提高炼铁喷煤比是炼铁系统结构优化的中心环节。喷煤工序能耗在 20-35kgce/t，焦化工序能耗为 112.28kgce/t。用 1t 煤粉代替 1t 焦炭，就可以实现炼铁节能 100kgce/t。

高炉炉顶煤气压力大于 120kPa 以上时，投入 TRT 装置会有经济效益。采用煤气干法除尘技术可以提高 TRT 发电能力约 30%，节能效果显著。

我国每年约可产生 1.3 亿 t 以上的高炉炉渣，其中有 90%以上得到合理利用，主要用于生产水泥、制造矿渣砖和铺路等。近年来，鞍钢、攀钢、宝钢等企业生产高炉矿渣微粉。使用专用设备生产矿渣超细粉可有效提高水泥质量，而且使水渣价值倍增。

钢铁企业所产生的含铁尘泥回收率在 99%以上，利用率在 98%以上。这些含铁尘泥主要作为烧结、球团生产的配料。部分转炉尘泥压块后用于转炉冷却剂。含铁尘泥的回收利用不但减少了污染，而且使钢铁企业含铁物料得到充分利用，降低了企业生产成本。在这方面，直接还原和熔融还原等非高炉炼铁技术有很大优势。

高炉炼铁工艺以技术完善、设备大型化、长寿化及高生产率而成为现代钢铁生产的主要流程。然而这种工艺流程也存在一些不足之处：如必须使用焦炭，而优质炼焦煤越来越少，焦炭价格高涨；环境污染严重，特别是炼焦和烧结工序，污染物排放严重；另外从整个工艺路线看，存在重复加热、降温、增碳、脱碳等，资源、能源的循环使用率低，热能利用不合理。

鉴于高炉炼铁工艺存在的这些不足，与高炉工艺相比具有低消耗，使用未经处理的原料，对环境污染小以及投资低等特点的非高炉炼铁工艺成为研发的热点，出现了 Corex、Finex、ITmk3 等。目前，这些新的炼铁工艺还不够完善，但随着技术的不断进步，将成为高炉炼铁有益的补充。

3.1 高炉炼铁精料技术

3.1.1 技术介绍

精料是指原燃料入高炉前，采取措施使其质量优化，成为满足高炉强化冶炼要求的炉料，并可获得优良的技术经济指标和较高的经济效益。高炉炼铁应贯彻精料方针。

高炉炼铁精料技术内容包括“高、熟、稳、均、小、净、少、好”八个方面。

“高”是指炼铁入炉品位要高，烧结、球团、焦炭的转鼓指数要高，烧结矿的碱度要高。

“熟”是指熟料，即把铁精矿粉加工为烧结矿或球团矿。

“稳”是指入炉原燃料的化学成分和物理性能要稳定，波动的范围尽量要小。

“均”是指高炉入炉料粒度要均匀。

“小”是指高炉使用的炉料粒度要偏小。

“净”是指炼铁入炉料的小于 5mm 的粉末要被筛除。

“少”是指炼铁入炉料中含有害杂质要少。

“好”是指铁矿石的冶金性能要好。

精料较全面的提法是：（1）渣量小于 300kg/t；（2）成分稳定、粒度均匀；（3）具有良好的冶金性能；（4）炉料结构合理。

3.1.2 技术适用条件

精料技术取决于矿石的价格和各企业的经济合理矿石品位。一般来说，精料水平越高，即铁矿石品位越高，价格越贵。一些企业购买低品位矿石而节约采购成本，但采用低品位矿石造成炼铁焦比升高、产量下降，而且会影响全公司炼钢、轧钢的生产平衡。因此，要用系统工程的方法，进行综合技术经济分析，才能得出正确的结论。

3.1.3 节能减排效果

炼铁入炉矿含铁品位要高是精料技术的核心，也是精料工作的主要方面。炼铁入炉矿品位高带来的效果是：入炉矿品位升高 1%，炼铁焦比下降 1%~1.5%，高炉产量提高 1.5%~2.5%，吨铁渣量减少约 20kg，允许高炉增喷约 15kg/t 煤粉。

3.1.4 成本效益分析

采用高炉炼铁精料技术需要提高铁矿石的品位，不需要软件及硬件投资。

高炉炼铁精料技术经济效益体现为：入炉矿品位提高 1%，则炼铁焦比下降约 1.5%，高炉产量提高约 2.5%，吨铁渣量减少 20kg，允许高炉增喷 15kg/t 煤粉。以上各项收入合计 35.04 元/t 铁水。高 炉炼铁精料技术的应用，提高了矿石品位，即增加了原料成本，同时增加了固定资产折旧、修理等费用，上述各项费用合计 32.26 元/t 铁水（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 2.69 元/t 铁水，投资内部收益率 60.12%（税后）。经济评价总表如下：

表 3.1.1 高炉炼铁精料技术经济评价指标

序号	项 目	单 位	项 目
一	流动资金	元/t 铁水	5.80
二	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/t 铁水	35.04
2	不含税总成本费用	元/t 铁水	32.26
3	销售税金及附加	元/t 铁水	0.10
4	利润总额	元/t 铁水	2.69
5	所得税	元/t 铁水	0.67
6	税后利润	元/t 铁水	2.02
三	财务评价指标		
1	投资内部收益率	%	60.12

3.1.5 技术应用情况

2010 年，该技术普及率约为 50%~60%，“十二五”期末预计该技术推广比例将达到 70%~80%。

3.1.6 技术知识产权情况

精料技术为国内外成熟、适用的通用技术。技术拥有方为各自采用的钢铁公司所有。无技术转让费用等。

3.2 高炉浓相高效喷煤技术

3.2.1 技术介绍

（1）技术概况

我国煤炭资源丰富，但优质炼焦煤资源短缺。随着炼焦煤供应日益紧张，焦炭和炼焦煤价格节节攀升，炼铁成本升高。高炉喷煤技术是将资源广泛的非结焦性煤（例如贫煤、瘦煤、长焰烟煤和无烟煤等）制成细粉，喷入高炉以置换紧缺且昂贵的焦炭，节约日益紧缺的炼焦煤资源，而且有巨大的经济效益和社会效益。

高炉喷煤系统可分为制粉系统和喷吹系统，在这两方面，采取必要的措施也能达到节能的目的。

在制粉方面，采取以提高制粉能力、降低制粉能耗为目的的节能措施，包括：配加可磨性指数高的烟煤，如贫煤、贫瘦煤，不仅可改善喷吹效果，而且可大幅度提高制粉能力；合理的煤粉粒度；使用高效粗粉分离器，提高分离效率；降低收粉系统的阻损。主要设备包括原煤仓、磨机、给煤机、烟气炉系统、布袋收粉器、主排风机和高温引风机、振动筛。

在煤粉输送和喷吹方面，采取以降低载气消耗，提高系统的稳定性、可靠性和安全性的节能措施，包括浓相输送及喷吹，可显著降低载气消耗，减少管道磨损，降低载气对热风温度的影响；使用先进的煤粉分配器，提高分配器精度，降低阻损；使用高效长寿的喷枪，减少喷枪的消耗，降低换枪次数；提高喷枪检测控制水平，确定系统安全、高效运行。主要设备包括煤粉仓、喷吹罐、分配器、喷枪、喷吹管路。近年来，某些高炉的喷吹罐布置还采取了三罐并联式。该配置的优点是进一步提高了喷吹的可靠性，并可回收部分充压氮气。

高炉喷吹煤粉的优越性已经成为炼铁工作者的共识，因此各钢铁企业都在努力提高喷煤量来置换更多的焦炭。2009 年重点钢铁企业高炉喷煤比为 145kg/t，比上年提高 10kg/t，可使炼铁节能约 90kgce/t。

提高喷煤量要具备一定的条件，理论研究和生产实践表明，限制喷煤量进一步提高的因素有四个：煤粉在风口前的燃烧率、喷煤后必要的炉缸热状态、煤气流运动阻力和提高置换比。

解决的办法包括提高煤粉燃烧率、提高焦炭质量、提高烧结矿和球团矿质量以及合理操作，这是提高喷煤比的主要措施。

在提高煤粉燃烧率方面，煤种选择、提高风温和富氧鼓风是重要措施。

煤种选择，应选择燃烧性能好的混合煤（保持合理的烟煤配比，使挥发份维持在 $20\pm 2\%$ ）、长焰烟煤、贫煤等，同时将煤粉磨到适宜的细度，还应特别注意灰分含量和发热值等；

提高风温，高炉喷吹煤粉以后，会造成炉缸理论燃烧温度下降，煤气量增多等影响高炉顺行的不利因素。高风温则可以提高高炉炉缸理论燃烧温度。一般认为，鼓风温度每升高 100°C ， $t_{\text{理}}$ 上升 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，同时由于风口前燃烧的碳量减少，也会降低煤气量，这些都有利于提高高炉煤粉喷吹量；

富氧鼓风，高炉富氧也可提高炉缸理论燃烧温度，减少炉缸煤气量的产生。富氧 1%， $t_{理}$ 提高 45-50℃，吨铁煤气量减少 4%。

除以上三个方面以外，应用煤粉助燃剂来加速煤粉在高炉风口区的燃烧率也是研究的领域。

但是，高炉喷煤量并不是越大越好，喷煤量大到一定程度，燃烧率下降，燃料比反而升高，不经济，所以应追求的是一个经济喷煤量。

钢铁企业应根据原燃料条件和设备条件，提高生产技术水平，进行经济喷煤量、低燃料比操作，这是高炉取得先进技术经济指标和降低生产成本的主要途径。通过高风温、富氧鼓风，改善焦炭质量，降低渣量，提高上下部调剂水平、改善透气性，以实现高煤比操作；在此基础上，通过精料、提高煤气利用率、低硅冶炼、提高煤焦置换比等措施，降低燃料比，实现经济喷煤、低燃料比生产。高炉应根据自身原燃料条件，追求炉况稳定顺行基础上的经济喷煤量和低燃料比操作。

(2) 技术原理

高炉喷吹煤粉是从高炉风口向炉内直接喷吹磨细了的无烟煤粉或烟煤粉或二者的混合煤粉，以替代焦炭起提供热量和还原剂的作用，从而降低焦比，降低生铁成本；同时，喷煤可调剂高炉工艺热制度及改善高炉炉缸的工作状态。

高炉喷吹煤粉置换焦炭是国内外炼铁节能降耗的重要技术措施，因为焦化工序能耗为 120kg/t 左右，而喷煤粉工序能耗仅为 20~35kg/t；喷吹 1 吨煤粉置换 0.8~0.9 吨焦炭，可降低炼铁系统能耗 80~100kg/t；煤粉置换焦炭，可减少焦炭用量，从而减轻炼焦过程对环境污染，还可缓解炼焦煤紧缺的状况。

(3) 工艺流程

经过长期的发展，当前典型的喷煤工艺流程是：中速磨制粉——热风炉废气+烟气炉——大布袋收粉——并联罐——直接喷吹——单管喷吹+分配器。系统改进的主要内容包括：扩大原煤仓和煤粉仓的容积、改进粉仓的结构、确定适宜的煤粉粒度、提高喷吹罐的初始流化效果、提高分配器的分配精度、改进喷枪材质和结构、完善安全监测控制系统、高温引风机和主排烟风机的变频调速等。需要正确处理系统节能、烟煤配比、固气比及均匀喷吹等问题。

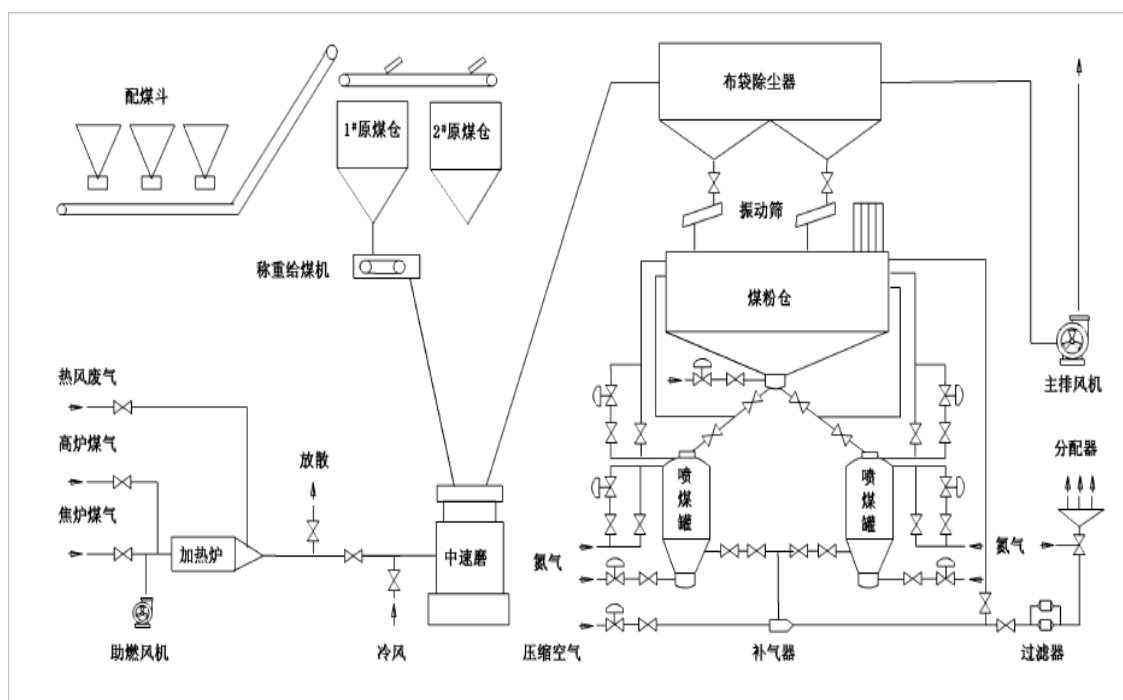


图 3.2.1 高炉喷煤工艺流程

(4) 关键技术

在高炉操作层面

高炉喷煤技术不是孤立的技术，其效果与高炉炉料条件、操作制度等有密切关系。获得一个经济的喷煤比，达到高的煤焦置换比，低燃料比是高炉喷煤技术的主要目的。要想达到这一目的，要在以下方面采取措施：

采用精料技术和降低渣比既有利于改善高炉下部透气性和透液性，增加喷煤量，又可降低焦比，是高煤比、低燃料比生产的基础；

控制炉况稳定和获得合理的煤气流分布对实现经济的喷煤比和低燃料比尤为重要，其中通过调整布料制度改善透气性和提高煤气利用率是非常有效的手段；

在高煤比下保持较高置换比，可最大限度降低焦比和总燃料消耗；采用混煤喷吹，适当增加无烟煤配比，控制煤粉水分，提高煤焦置换比。

在煤粉的制备与喷吹层面

制粉系统的节电节能

制粉系统的主要电力消耗是磨机、主排风机、高温引风机。选用可磨性好的煤和放宽煤粉粒度都是提高制粉产量的有效手段，从而可以显著降低吨煤电耗。采用变频调速的方式控制主排和高温引风机的风量也是有效的节电方法。

烟煤的配比与系统安全问题

烟煤的挥发份高，着火温度低，对系统安全提出更高要求。要按喷煤安全的设计要求，严格控制系统气氛等参数在规定的范围内，则不会产生安全事故。

浓相喷吹

浓相喷煤技术由于喷吹煤粉的浓度高，输送介质的消耗少，煤粉在管道内的流速较低，对管道的磨损减少，不仅喷煤量相对稳定，而且高炉各风口间煤粉的分配也比较均匀，这就为提高高炉喷煤比创造了有利的条件。一般认为，当煤粉喷吹固气比大于 40kg/kg 时，可视为浓相喷煤。提高固气比可直接减少载气消耗。在系统设备已经确定的情况下，提高固气比的手段是煤粉与载气的良好混合以及降低煤粉流股的初始速度。建议采用直接喷吹，浓相喷吹。

喷吹的均匀稳定

高炉喷煤不仅需要圆周方向均匀稳定，同时要求喷吹过程的均匀稳定。在喷吹操作上，要保持良好的流化和混合，减少喷吹的脉动现象。更重要的是，高炉操作要减少用煤量作为调节炉温的使用频率。

3.2.2 技术适用条件

大中型钢铁企业符合《钢铁产业发展政策》、《产业结构调整指导目录》和《高炉炼铁工艺设计规范》规定的高炉。高炉喷吹用煤应满足高炉冶炼工艺要求和对提高喷吹量和置换比有利，以便替代更多的焦炭。对喷吹煤的要求主要包括如下几点：

- 煤的灰分越低越好。灰分含量应与使用的焦炭灰分相同，一般要求 $A_d \leq 12\%$ ；
- 硫含量越低越好。煤含硫量应与使用的焦炭含硫量相同，一般要求 $S_{t, ad} \leq 0.7$ ；
- 焦质层厚度越薄越好。 $Y < 10\text{mm}$ ，以免在喷吹过程中结焦，堵塞喷枪和风口，影响喷吹和高炉正常生产；
- 煤的可磨性好。高炉喷煤需要将煤磨到一定细度，例如 $HGI: 50 \sim 90$ ，可磨性好，则制粉消耗的电能就少，可降低喷吹费用；
- 煤的燃烧性能好。这可使喷入高炉的煤粉能在有限的空间和时间内尽可能多地气化，少量未气化的煤粉也因反应性好与高炉煤气中的 CO_2 和 H_2O 反应而气化，不给高炉冶炼带来麻烦。另外，燃烧性能好的煤可以磨粗些，小于 0.074mm 的所占比例少一些，也为降低磨煤能耗和费用提供条件；
- 煤的发热值越高越好。喷入高炉的煤粉是以其放出的热量和形成的还原剂 CO 、 H_2 来替代焦炭，在高炉内提供热量和还原剂。因此，发热值越高，在高炉内放出热量越多，置换的焦炭越多；
- 由于我国焦煤资源匮乏，高炉喷吹煤种主要为无烟煤、烟煤中的贫煤、贫瘦煤、不粘煤、长焰煤以及褐煤。

混合喷吹时，要研究烟煤的配比，防止安全事故发生。

浓相喷吹时，要分析喷吹罐压力、煤粉喷吹量、煤粉流速、喷煤管径等因素

对浓相喷煤的影响，正确认识和掌握这些因素内在的合理关系及合理配置，是浓相喷煤系统得以实现优化的前提条件。

3.2.3 节能减排效果

高炉喷吹煤粉替代焦炭，根据所喷吹的煤粉与其置换的焦炭的载能量的变化以及产生物高炉煤气所含能量的变化可以计算出高炉喷煤的节能效果。

一般按喷吹 1 吨煤粉置换 0.8~0.9 吨焦炭，可降低炼铁系统能耗 80~100 kgce/t 铁计算。

高炉喷吹煤粉替代部分焦炭，既缓和了对焦炭的需求，也大大减少了炼焦过程中产生的污染物排放。高炉喷煤的环保效益主要体现在减少了炼焦工序所产生的环境污染。如果按煤焦置换比 0.8 计算，每年喷吹约 6000 万吨煤粉可替代 4200 多万吨焦炭，相当于少建 84 个中型年产 50 万吨的炼焦厂，相应减少了炼焦工序产生的环境污染。生产 1 吨焦炭约产生 1.3kg 废气、2.8kg 粉尘和 1.25 吨废水，以此计算，如果替代 4200 万吨焦炭，可减少废气排放 5 万多吨、粉尘 11 万吨、废水 5000 多万吨。

3.2.4 成本效益分析

（1）投资估算

项目案例：2 座 2500m³ 高炉，年产铁水 400 万吨，采用高效喷煤技术。项目总投资 4252 万元，其中建设投资 4093 万元，建设期利息 159 万元。

项目投资估算详见下表。

表 3.2.1 采用高炉高效喷煤技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	4093.00	96.3%
1.1	建筑费用	1328.90	31.3%
1.2	设备费用	1683.27	39.6%
1.3	安装费用	531.56	12.5%
1.4	其它费用	549.28	12.9%
2	建设期利息	159.00	3.7%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	4252.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：喷煤比按照 130kg/t 计算，年喷煤 52 万吨。按照焦炭和煤粉差价 400~600 元/t 计算，年可节约焦炭费用 4000 万元。增加高效喷煤设施，将增加动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 1819 万元，项目利润总额 2112 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）2.2 年，财务内部收益率 39.4%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 3.2.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	4252
1.1	建设投资	万 元	4093
1.2	建设期利息	万 元	159
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	4252
4.	资金筹措	万 元	4252
4.1	自有资金	万 元	1701
4.2	建设贷款	万 元	2551
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	4000
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	1819
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	697
5.4	达产年利润总额	万 元	2112
5.5	达产年所得税	万 元	528
5.6	达产年净利润	万 元	1584
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	2.2
6.2	财务内部收益率	%	39.4
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	1.7

3.2.5 技术推广应用情况

S.M. Banks 于 1840 年提出高炉喷吹无烟煤粉的设想，但直到 20 世纪 60 年代，一些国家才开始研发高炉风口喷吹煤粉的工艺。世界上首套现代化工业性煤粉喷吹装置使用在美国 AK 钢公司的 Bellafonte 高炉（ 1488m^3 ）上。

我国是开发高炉喷煤技术较早的国家。1964 年 3 月，首钢 1 号高炉（ 576m^3 ）喷煤系统建成投产，这是我国第 1 套投入生产的高炉喷煤装置；济钢于 1966 年建成一套简易喷煤装置并陆续实施喷煤；鞍钢也先后在高炉上进行了工业性试验。但随后我国高炉喷煤技术的发展出现了一段停滞期。

1992 年 5 月宝钢 2 号高炉引进日本川崎公司的主要技术和设备，其流程为双系列 3 罐串联多支管上料工艺，设计喷煤能力 $72\sim 120\text{kg/t}$ ，这是中国大陆第一个从国外引进喷煤技术。1988 年 3 月，台湾中钢 2 号高炉（有效容积 2850m^3 ）曾从美国阿姆科公司引进一套设计喷煤能力为 75kg/t 的高炉喷煤装置。经过技术改造，宝钢 2 号高炉目前的实际喷煤指标约为 180kg/t 。此后，沙钢、上钢、重钢等一批钢厂引进或部分引进 90 年代以后的喷煤技术，喷煤设计指标多为 200kg/t 左右。武钢 4 号和 5 号高炉设计喷煤指标高达 250kg/t ，但实际运行中不易达到设计值。

经过几十年的发展，我国的高炉喷煤工艺和技术已发展到较高的水平。我国的高炉喷煤在普及程度和平均煤比方面均取得很大进步。不仅所有高炉都上了喷煤系统，平均煤比也不断提高。

2009 年重点钢铁企业高炉喷煤比为 145kg/t ，比上年升高 10kg/t ，全国喷煤总量在 7400 多万吨，创历史最好水平，大大降低了炼铁焦炭的消耗，减少了炼焦过程对环境的污染。尽管如此，从喷煤工艺的优化和系统的完善角度来看，许多企业的高炉喷煤还存在着一些不足或缺陷，例如，有的企业高炉喷煤比提高了，但焦比增加，燃料比也增加，并没有达到喷煤的目的。因此钢铁企业应进行有针对性地改进，以实现喷煤稳定和更高节能效果。

目前，高炉高效喷煤技术普及率为 40%，“十二五”期末预计推广比例将达到 80%。

3.2.6 技术知识产权情况

我国是采用高炉喷煤较早的国家，目前在自动化控制等方面与日本新日铁，达涅利、奥钢联等还有一定差距，但完全可以满足要求。例如首钢京唐 5500m^3 高炉，鞍钢鲅鱼圈 4038m^3 高炉均实现国产化，可以说在高炉喷煤系统中，从设计、制造、安装、施工、操作以及维护等方面我国完全实现了国产化。

表 3.2.3 高炉喷煤技术发明专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日
1	高炉喷煤支管流量调节装置	CN86107459	冶金工业部北京钢铁设计研究总院	1986.11.08
2	高炉喷煤用可调煤粉给料器	CN1058645	冶金工业部北京钢铁设计研究总院	1991.09.17
3	高炉喷煤浓相输送方法	CN1064314	杭州钢铁厂	1992.04.08
4	高炉喷煤在线监测控制系统	CN1624158	首钢总公司	2003.12.04
5	高炉喷煤枪	CN101319787	武汉钢铁(集团)公司	2008.06.20
6	高炉喷煤支管喷吹状态监测系统	CN1237638	冶金工业部钢铁研究总院; 首钢总公司	1999.06.16
7	一种喷煤管道测堵传感器及其测堵装置和方法	CN101020934	钢铁研究总院; 首钢总公司	2007.03.20
8	高炉串罐自动喷煤控制系统及方法	CN101498554	北京首钢自动化信息技术有限公司; 首钢总公司	2009.03.

3.3 高炉脱湿鼓风技术

3.3.1 技术介绍

高炉脱湿鼓风是指去除高炉鼓风中的水分，使高炉鼓风中的湿度降低到最佳操作所要求的数值，并保持稳定。

以前，高炉鼓风大多采用自然湿度鼓风，冬季被看作是高炉生产的黄金季节。这主要是因为冬季气温较低，空气湿度较小，密度较大，因而使鼓风的水分减少，质量流量增加。而夏季温度高，鼓风湿度大，随鼓风带入高炉的水分在高炉风口回旋区发生分解反应而吸收热量，导致风口前的燃烧温度下降，增加焦比。一般认为鼓风湿分变化 1g/m^3 相当于降低风温 6°C 。湿度的变化对冶炼焦比影响十分明显，对高炉稳定性的干扰更为直接，因此，采用高炉鼓风脱湿技术，在低湿度前提下稳定鼓风湿分，进而稳定高炉炉况，降低焦比，增加产量。

鼓风湿度对炉缸燃料燃烧、高炉内还原、高炉炉况以及焦比和产量都有影响。

①对炉缸燃料燃烧的影响

鼓风带入高炉的湿分（水蒸汽），在风口前的燃烧带内按 $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{CO} + \text{H}_2$ 反应，与燃料中的碳作用形成还原性气体。与此同时 H_2O 的分解也吸收了热量（ $10800\text{kJ}/\text{m}^3\text{H}_2\text{O}$ 或 $13440\text{kJ}/\text{kgH}_2\text{O}$ ），这样造成风口燃烧带的变化为：

- ◆ 燃料中 1kg 碳消耗的风量略有减少，燃烧形成的煤气量也略有减少；
- ◆ 燃烧 1kg 碳形成的煤气中 CO 、 H_2 的浓度增加， N_2 浓度降低；
- ◆ 燃烧达到的理论燃烧温度降低。在湿分较低时每 1%湿分降低风口理论燃烧温度 45°C 左右、而在湿分很高时，每 1%湿分降低风口理论燃烧温度 35°C 左右；
- ◆ 风口前的燃烧带有所扩大，这是因为水蒸汽分解吸热降低了燃烧温度，使碳的燃烧过程变慢，同时 H_2 和 H_2O 的扩散能力较 CO 和 CO_2 大，按煤气中的 CO_2 和 H_2O 含量 1%~2%作为燃烧带边界，燃烧带会向炉缸中心延伸。

对高炉内还原的影响主要是因为风口前燃烧形成的煤气中还原性气体的数量和浓度增加，使矿石中氧化铁的还原过程加快，使高炉内直接还原度降低。但是对难还原的元素来说，并不能得到这样的效果。例如高炉炼锰铁时，由于锰的高价氧化物（ $\text{MnO}_2, \text{Mn}_2\text{O}_3, \text{Mn}_3\text{O}_4$ ）很容易还原到 MnO ，而 MnO 基本上不能被气体还原剂还原，而是用碳直接还原 MnO 到金属锰。这样煤气中 CO 、 H_2 的数量和浓度对 MnO 还原到 Mn 就没有什么影响，而 MnO 到 Mn 的直接还原要吸收大量的热，需要有足够的高温热量来保证。因此在冶炼锰铁时，炉缸内的高温较煤气中 CO 、 H_2 的数量和浓度对锰的还原，提高锰的回收效率以及降低单位锰铁燃料消耗要重要得多。

②对炉况顺行的影响

无论在脱湿或加湿鼓风时的生产实践中，都发现炉况变得顺行，塌料和悬料大幅度减少，甚至得到消除，这种改善炉况顺行的机理至今并没有研究得很清楚。但是有一点是可以肯定的，脱湿和加湿都可将大气鼓风湿度保持固定不变，消除大气湿度因气温变化对炉况不利的影响。

③对焦比的影响

如前所述，加湿鼓风时，水蒸汽分解要消耗热量。如果生产中不用提高风温来补偿，则焦比要升高（约 $4\sim5\text{ kg}/\%\text{H}_2\text{O}$ ）；如果用风温来补偿，则风温提高 $25^\circ\text{C}/\%\text{H}_2\text{O}$ ，焦比可基本保持不变，而风温提高 $50^\circ\text{C}/\%\text{H}_2\text{O}$ ，焦比将会有所下降（约 $4\sim5\text{kg}/\%\text{H}_2\text{O}$ ）。

脱湿鼓风以后，由于节省了水蒸汽分解消耗的热量和改善炉况，焦比将会下

降，这在国内外脱湿鼓风生产中得到证实。

④对产量的影响

脱湿和加湿鼓风生产都显示出产量有所提高，其原因有二：一是两者都消除了湿分波动对炉况的不利影响，使炉况顺行，从而可以相应地提高冶炼强度来增产；另一是焦比降低。这样加湿鼓风生产时，产量的提高就决定于能否用风温来补偿湿分分解消耗的热量。前苏联的实践表明，在湿分分解耗热完全为风温补偿的条件下，节焦量为 $0.9\% / \%\text{H}_2\text{O}$ ，增产量为 $3.2\% / \%\text{H}_2\text{O}$ ；而不用风温补偿时，产量基本不变，即因顺行改善而提高冶炼强度所得的产量被焦比的升高所抵消。脱湿鼓风因上述两个原因提高产量是很明显的，尤其是风温的提高不用去补偿水蒸汽分解消耗的热量，而完全用来代替焦炭在风口前燃烧放出热量，使焦比降低。焦比降低总是可以提高产量，其实早期脱湿鼓风增产的效果有一半是风温提高使焦比降低的结果。这样脱湿鼓风对焦比降低和产量的提高总是要比加湿鼓风的大一些。高炉脱湿鼓风方法主要有 3 种，即吸附法、冷却法和联合法。

①吸附法

吸附法是以 LiCl 作吸附剂，与湿空气充分接触，吸收空气中的水分，随后对吸附剂加热脱水再生，并以此循环连续使用。以固态 LiCl 作吸附剂时称干式吸附法，吸附剂为液态时称湿式吸附法。由于吸附法使鼓风机吸入空气温度升高，从而使鼓风机功率增加，导致能耗加大。干式吸附装置管理复杂，湿式吸附有腐蚀鼓风机叶片的可能。

②冷却法

冷却法是将湿空气通过冷却器冷却，使其温度降至空气压力及所含湿量相对应的饱和温度下，将空气中的水分凝结而析出，又称冷冻脱湿法。冷却法又分为鼓风机出口侧冷却法和鼓风机吸入侧冷却法。鼓风机出口侧冷却法不需要冷冻机，但会导致冷风的热量损失及鼓风机出口压力的损失。鼓风机吸入侧冷却法在鼓风机吸风管道上设置脱湿器，易安装，调节性能好，无需吸附剂，不消耗热量，技术成熟，尤以节能与增加鼓风机的风量为其主要特点。

③联合法

联合法是将冷却和吸附结合起来，可使空气湿度脱得较低，但是运行和维护复杂，耗能增加。

下面介绍一种鼓风机吸入侧冷却的高炉脱湿鼓风工艺，脱湿装置采用双效蒸汽型溴化锂吸收式制冷方式制造低温冷却水。

鼓风机吸入侧冷却脱湿装置采用双效蒸汽型溴化锂吸收式制冷方式制造低温冷却水，低温冷却水通过布置在鼓风机入口管道中的高效换热器冷却空气，使空气中的水蒸汽冷凝成水而析出，以达到空气脱湿的目的。其核心设备是蒸汽式

双效溴化锂吸收式制冷机组和高效节能型换热器。

其系统流程如图 3.3.1 所示：外界大气进入空气过滤器，除去灰尘，进入脱湿器，高温高湿空气，在脱湿器内（冷却器）进行热交换，降温脱湿后进入鼓风机，经鼓风机升压后送往高炉。

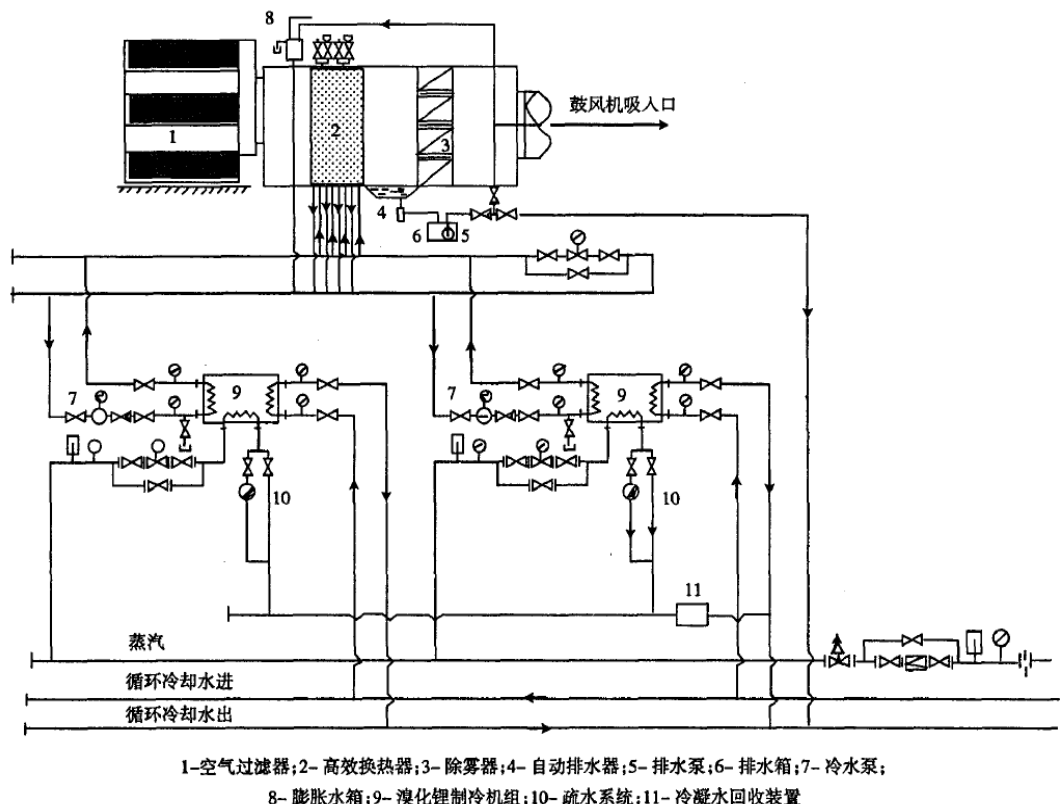


图 3.3.1 脱湿鼓风流程图

高炉脱湿鼓风的利弊分析

（1）高炉脱湿鼓风可以降低焦比。由于脱湿使热风中的水分减少，从而减少了这部分水的水解热，使高炉焦比得以降低。

（2）节省热风炉燃料。

（3）脱湿装置耗能源，增加运行费用。脱湿方式不同，所耗能多少及运行费用也不同。如宝钢采用机前冷凝脱湿系统，脱湿装置增加的动力消耗与由于机前脱湿降低了鼓风机入口风温，从而降低了风机的轴功率，两者的数值大体相当。

（4）脱湿鼓风使高炉喷吹量增加。特别是当喷吹燃料价格较贵时，其成本是十分可观的。尽管喷吹降低了焦比，但其综合经济效益很可能因喷吹燃料价格较贵而变得很小。

（5）由于脱湿降低了焦比，可能使得高炉煤气量及其发热值减少。

应该说明，上述一些数值分析仅仅是在各自特定条件下得出的。事实上，高炉脱湿鼓风的经济效果取决于诸多因素，诸如高炉的容积、高炉所用的原料、操

作水平、当地的气象条件、喷吹燃料及电能价格、调湿方式等等。应该根据具体的情况和条件，做出综合的技术经济分析才能决定，而首先要考虑的是以下两个方面：

①气象条件

在适当条件下采用脱湿鼓风确有明显的经济效果。气候干燥就有可能使采用脱湿鼓风技术成为不可能。国内有关单位曾对冀东钢铁厂高炉鼓风是否要上脱湿装置作过论证。把宝钢和冀东两地气象条件进行了比较，如果均把鼓风含湿量脱到 6g/m^3 ，由于冀东地区全年大气含湿量小，脱湿装置利用率大大低于宝钢，约为宝钢的 68%。以当时条件计算，冀东钢铁厂如上脱湿装置，其回收年限长达 31 年。由此可见，当地气象条件对是否采用脱湿鼓风技术是十分重要的先决条件。

②喷吹燃料价格、供电价格直接关系到脱湿鼓风的经济效益。日本曾对同一高炉在 10 年前后采用脱湿鼓风喷吹重油的经济效益进行过分析对比。由于焦炭、热风炉燃料、重油和供电价格的不同，10 年前生产一吨铁可节约 31.7 元，而 10 年后由于能源价格上涨只节约 0.1 元。可见，喷吹燃料及能源价格对脱湿鼓风的经济效益影响很大。

总体来说，高炉脱湿鼓风适用于高炉采用喷吹燃料特别是喷吹煤粉的时候。它有利于喷吹技术的实现，降低高炉焦比，有利于炉况稳定和生铁质量的提高。当高炉为全焦生产时，采用脱湿鼓风除了浪费能源外，还可能对高炉冶炼及生铁质量带来不利影响。为了维持高炉稳定的热制度，高炉往往采用加湿鼓风。对一些操作水平还不高，提高热风炉风温和节能潜力较大的高炉，首先应着眼于改进操作水平，通过技术改造提高热风温度和挖掘节能潜力，而不应轻易考虑上脱湿装置。高炉是否采用脱湿鼓风，应根据具体情况通过技术经济综合比较而定。首先应充分考虑当地气象条件、喷吹燃料价格、电力供应情况及供电价格和调湿方式等因素。我国东北、华北、西北地区常年大气湿度较小，采用脱湿鼓风更应慎重研究。

3.3.2 技术适用条件

鉴于脱湿鼓风对高炉冶炼的有利影响，现代高炉应广泛采用脱湿鼓风。但由于冶炼条件和认识上的不同，我国大多数高炉上还没有应用这一强化高炉冶炼，提高高炉生产技术经济指标的技术。但是我们认为下列两种情况应优先考虑采用脱湿鼓风：需要炉缸具有较高和充足热量与地区湿度变动大而风机能力又感不足的高炉。

另外，脱湿鼓风在适当条件下采用确有明显的经济效果。但如果高炉所处地

区大气比较干燥，一年中大部分时间空气含湿量较小，可能出现大部分时间脱湿很少，甚至无湿可脱，这样经济效益甚低。当地气象条件对是否采用脱湿鼓风技术是十分重要的先决条件。

脱湿鼓风一般的工艺参数为：进风温度 $\geq 22^{\circ}\text{C}$ ，进风相对湿度：80%，进风含湿量 $\geq 17\text{g/Nm}^3$ ；出风温度： 8°C ，出风含湿量： 7.5g/Nm^3 。

3.3.3 节能减排效果

高炉脱湿鼓风技术调整了鼓风中的水分，固定了含湿量，是使高炉节能增产的技术之一，主要节能减排效果如下：

（1）稳定炉况：由于脱湿鼓风使进入高炉的湿度相对稳定，能有效地降低高炉风口前火焰温度的波动，稳定高炉炉况。

（2）降低焦比：脱湿鼓风能够减少高炉风口水分分解热而节约焦炭，降低焦比。风中湿度每减少 1g/m^3 ，焦比降低约 $0.6\sim 0.8\text{kg/t}$ 。

（3）提高入炉风温。脱湿鼓风可提高入炉风温。风中湿度每减少 1g/m^3 ，入炉风温可提高 6°C ，进而能够多喷煤粉。

（4）风机吸入侧去除了大部分的水蒸汽，在高炉需要同等量的干空气的情况下，风机的功率消耗有所下降，可以部分弥补因设置脱湿装置而增加的功率消耗。

3.3.4 成本效益分析

（1）投资估算

项目案例：高炉年产 120 万吨铁，采用脱湿鼓风技术。项目总投资 2285 万元，其中建设投资 2200 万元，建设期利息 85 万元。项目投资估算详见下表。

表 3.3.1 高炉采用脱湿鼓风技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	2200.00	96.3%
1.1	建筑费用	70.87	3.1%
1.2	设备费用	1771.87	77.5%
1.3	安装费用	62.02	2.7%
1.4	其它费用	295.24	12.9%
2	建设期利息	85.00	3.7%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
	总投资	2285.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：按照降低焦比 9kg，增加铁产量 0.9%计算，年增加收入 1716 万元。高炉采用脱湿鼓风技术，将增加折旧费、维修费、管理费、财务费等，各项费用合计 572 万元，项目利润总额 1112 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）2.2 年，财务内部收益率 38.9%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 3.3.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	2285
1.1	建设投资	万 元	2200
1.2	建设期利息	万 元	85
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	2285
4.	资金筹措	万 元	2285
4.1	自有资金	万 元	914
4.2	建设贷款	万 元	1371
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	1716
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	572
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	321
5.4	达产年利润总额	万 元	1112
5.5	达产年所得税	万 元	278
5.6	达产年净利润	万 元	834
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	2.2
6.2	财务内部收益率	%	38.9

序号	项目名称	单 位	指标
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	1.7

3.3.5 技术推广应用情况

1904 年，美国在高炉上进行过脱湿鼓风试验，湿风含水率由 26g/m^3 降到 6g/m^3 ，风温由 382°C 提高到 465°C ，高炉产量增加 25%，焦比下降 20%。但因调湿设备庞大，成本高，一度未得到发展。

上世纪 70 年代以来，由于焦炭价格暴涨，脱湿设备日臻完善，各大钢铁公司又开始相继开发应用。日本四面临海，大气湿度高，脱湿鼓风作用明显，因而得到广泛采用。

80 年代，中国宝钢 4300m^3 高炉也采用了脱湿鼓风，并取得显著的节焦效果。国内其他各大钢铁企业的高炉脱湿鼓风设备也于近些年相继投产，取得了良好的经济效益。

目前，我国高炉脱湿鼓风技术普及率仅为 1%， “十二五”期末预计推广比例将达到约 20%。

3.3.6 技术知识产权情况

高炉脱湿早在上世纪初就有人提出，美国于 1904 年、日本于 1915 年、英国于 1927 年先后在高炉上采用过，但由于当时高炉工人操作水平低，没有发挥出作用。上世纪 70 年代，由于对节能的重视，全球相继有 17 套脱湿装置投产，鼓风脱湿技术得到长足的发展。1985 年我国宝钢从日本引进了鼓风脱湿技术。

3.4 高炉炉顶煤气干式余压发电技术（TRT）

3.4.1 技术介绍

现代钢铁厂 1000m^3 以上高炉都采用高压炉顶操作来提高冶炼强度和产量，从炉顶排出的煤气具有较高的压力和温度，以往在除尘后经过减压阀组将压力减至约 0.1bar G ，进入储气罐供热风炉等作为燃料用，多余的煤气放散掉，使煤气的压力能和热能白白地在减压阀和湿式除尘器上损失掉，造成大量能源浪费和噪音污染。而高炉炉顶煤气余压发电装置（Top Gas Pressure Recovery Turbine，简称 TRT）是在减压阀前将煤气引入一台透平膨胀机作功，将压力能和热能转化为机械能并驱动发电机发电的一种能量回收装置。

由于 TRT 在运转中不需要燃料，不改变原高炉煤气的品质和正常使用，却

回收了相当可观的能量（约占高炉鼓风机所需能量的 30%），同时又净化了煤气，减少了噪音，改善了炉顶压力控制品质，且不产生新的污染，发电成本极低，是典型的高效节能环保装置。

TRT 有很多类型，按流动方向分为径流式、轴流式、混流式；按反动度分为反动式、冲动式；按煤气干湿情况分为湿式、（半）干式、干湿两用型；湿式轴流反动式 TRT 采用水喷雾方式来防止积灰，效率较高，而且大多数高炉采用的是湿式除尘装置，不需要变动，所以应用较为普遍。

干式轴流反动式 TRT 需要设置干式除尘装置，或在原湿式除尘装置处并排设置，或直接替代原湿式除尘装置，由于回收功率显著提高，2000 年前后在我国获广泛应用。

随着高炉向大型化和高压炉顶方向发展以及干式除尘装置的应用，TRT 也是朝着干式和干湿两用型轴流反动式的方向发展，炉顶压力的控制也由调速阀、调速阀加静叶发展到仅用静叶来控制。

共用型 TRT 是两座高炉共用一套 TRT 装置，节省占地和人工，缩短投资回收期。考虑到减少设备投资、提高装置运行效率，特别是提高企业综合经济效益，建议推广共用型 TRT 装置。

TRT 装置的优点如下：

- ◆ 节能。投产前高炉煤气须经毕肖夫除尘系统或减压阀组降压，其能量白白浪费。安装 TRT 装置后，该能量被用来驱动透平机运转发电，回收了原来在毕肖夫除尘系统或减压阀组上损失的全部能量。经统计可回收高炉鼓风机所需能量的 30%左右。这对解决目前钢铁企业电力不足，提高能源综合利用，降低炼铁成本具有重要意义。
- ◆ 提高顶压控制水平。TRT 运转后，顶压调节采用计算机自动控制 TRT 可调静叶调节，使高炉炉顶压力更加稳定，为高炉稳定高产创造条件。
- ◆ 提高煤气质量。TRT 装置可进一步降低煤气的含尘量，降低煤气中的机械水含量，减少污染。该机组运行可靠、稳定，较好地调节了高炉顶压，成功回收高炉煤气余压，取得显著的经济效益。
- ◆ 减少了噪声污染。TRT 代替了减压阀组，消除了减压阀组产生的巨大噪声污染，改善了钢铁公司的工作环境。

技术原理：高炉炉顶煤气余压发电技术（TRT）是利用炉顶煤气压力和热能，使煤气在透平内膨胀做功，推动透平转动，带动发电机发电的技术，回收了压力能和部分热能，是一种既不消耗任何燃料，又不污染环境的高效能源回收技术。

TRT 装置按煤气干湿情况分干式、湿式、干湿两用型以及共用型。

湿法 TRT 装置的特点：进口煤气的温度 60-70℃，对高炉煤气的粉尘度要求

不是很高，煤气湿度较大。相对于干法 TRT 来讲投资成本要小，经济效率要低。但运行后的维修、保养相对于干法 TRT 要方便。它多了一套静叶喷淋装置和加药系统，对透平机的可调静叶和动叶叶片的冲刷磨损有很好的保护，不必时常开缸体清理粉尘等大量的工作。维修、保养成本较低。

干法 TRT 装置的特点：对进口煤气的质量要求较高，包括温度、湿度、粉尘度都有特殊的要求。特别是煤气的粉尘度要求每立方米只有 10mg。若达不到设计要求，就会冲刷磨损叶片，缸体内部集灰严重，影响运行经济效率，增加维修、保养成本。但干法 TRT 的经济效益高，特别是二和一共用型 TRT，投资成本相对较低，经济效益可观，正在进行大力推广。一般来讲，干法 TRT 发电率高于湿法 TRT30%左右。干式 TRT 发展趋势：一是透平机组进气方向已从径流发展到轴流；二是透平叶片型式从冲击式（冲动式）发展到反动式；三是由 TRT 代替调压阀组控制高炉炉顶压力。

共用型 TRT 技术：两座高炉共用一套高炉煤气余压透平发电装置。国内有关企业开发了两座高炉共用一套透平的能量回收装置，利用两座高炉各自的大型阀门系统，把煤气导入同一透平的不同流道，驱动一台发电机发电，使用两套可调静叶同时控制两座高炉的顶压，该机组还可满足一座高炉运行、另一座高炉休风或没有生产的工艺要求。该技术可用于同等规格炉型，也用于不同规格的炉型。

两座高炉的高炉煤气经除尘后，分别从两侧进入共用型 TRT，通过机壳导流使气体转成轴向进入叶栅，气体在静、动叶栅组成的各自独立的流道中不断膨胀做功，压力和温度逐级降低，转化为动能使之旋转，带动发电机发电。叶栅出口的气体经过扩压器扩压，以提高其背压达一定值，然后经排气蜗壳从中间排出，进入管道，即两侧进气，中间排气。

工艺流程：

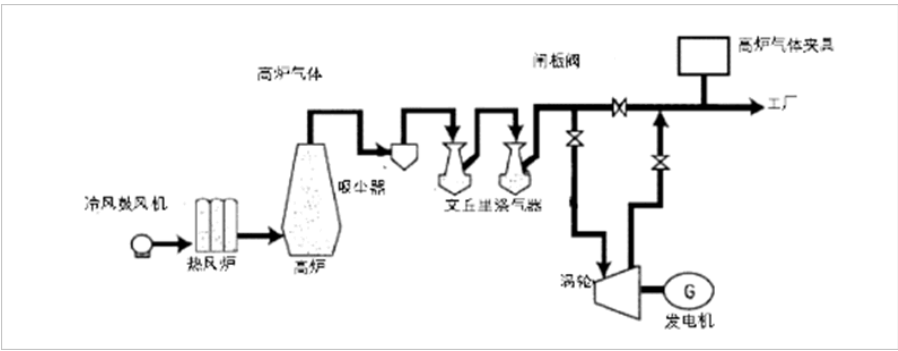


图 3.4.1 湿式 TRT 工艺流程

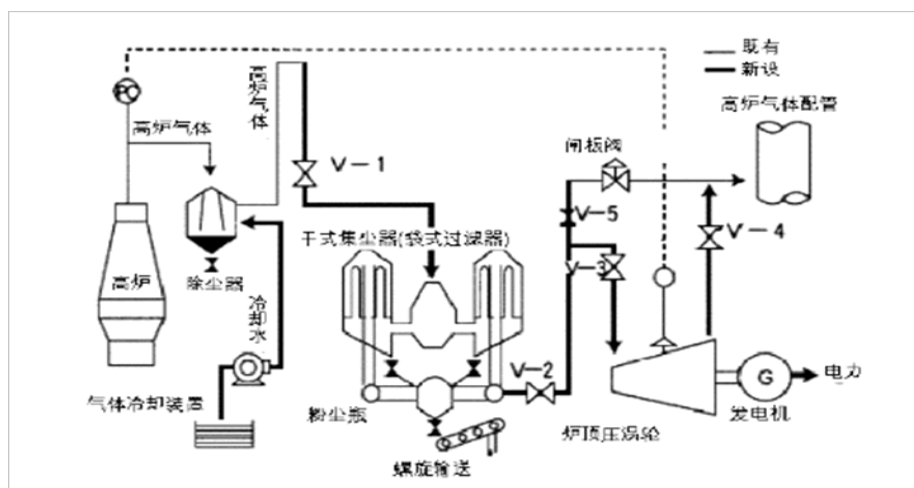


图 3.4.2 干式 TRT 工艺流程

关键技术

干式 TRT 装置包括：高炉煤气干法除尘装置、透平膨胀机、无刷励磁发电机、煤气管道与大型阀门系统、给排水系统、氮气密封系统、润滑油系统、液压伺服控制系统、高低压发配电系统、仪表自控系统等。改造项目还包括部分高炉供风系统和炉顶改造等。

TRT 作为高炉的附属设备，对高炉的正常生产起重要作用，必须以保证高炉正常运行作为前提，不允许对炉况产生不良影响。高炉煤气具有流量波动大、热焓低、膨胀比小、存在气、水、固多相及相变发生、含尘多易堵塞和磨损流道、产生腐蚀性物质及有毒易燃易爆等特点，给 TRT 的设计、制造和使用带来一系列困难，必须采取有效方法来解决。其主要技术特点有：采用 TRT 专用叶型和叶栅防止积灰和磨蚀；采用合适的圆周速度防止叶片磨损；采用三元流理论设计并充分考虑水蒸汽凝结对透平性能的影响；采用静叶可调满足变工况并提高效率；采用全闭型第一级静叶控制升速和顶压；装设喷水装置清洗叶片和流道，减少积灰；采用充氮式组合密封防止煤气泄漏。

3.4.2 技术适用条件

大中型钢铁企业符合《钢铁产业发展政策》、《产业结构调整指导目录》和《高炉炼铁工艺设计规范》规定的高炉。理论上高炉炉顶煤气压力在 80kPa，TRT 所发的电能与所用的电能平衡，煤气压力在 100kPa 时会有经济效益，而煤气压力大于 120kPa 时会有明显的经济效益。

3.4.3 节能减排效果

TRT 发电能力是随炉顶煤气压的变化而变化的，一般每吨生铁可发电

20~40kWh。采用干法除尘，可提高发电量 30%左右。因煤气温度每提高 10℃，发电透平机出力可提高 3%，最高发电量可达 54kWh。

高炉鼓风能耗约占炼铁工序能耗 10%~15%，采用 TRT 装置可回收高炉鼓风机能量的 30%左右，可降低炼铁工序能耗 11~18kgce/t。

3.4.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例： 1 座 2500m³ 高炉，年产 200 万吨铁，采用“湿式 TRT”改“干式 TRT”技术。项目总投资 3261 万元，其中建设投资 3200 万元，建设期利息 61 万元。项目投资估算详见下表。

表 3.4.1 高炉采用干式 TRT 技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	3200.00	98.1%
1.1	建筑费用	346.32	10.6%
1.2	设备费用	2164.50	66.4%
1.3	安装费用	259.74	8.0%
1.4	其它费用	429.44	13.2%
2	建设期利息	61.00	1.9%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	3261.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：“干式 TRT”与“湿式 TRT”对比，年增发电量 2200×10⁴kWh，增加收入 1122 万元。高炉采用干式 TRT 技术，将增加折旧费、维修费、财务费等，各项费用合计 832 万元，项目利润总额 269 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）5.3 年，财务内部收益率 17.4%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 3.4.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	3261
1.1	建设投资	万 元	3200
1.2	建设期利息	万 元	61

序号	项目名称	单 位	指标
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	3261
4.	资金筹措	万 元	3261
4.1	自有资金	万 元	1304
4.2	建设贷款	万 元	1957
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	1122
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	832
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	212
5.4	达产年利润总额	万 元	269
5.5	达产年所得税	万 元	67
5.6	达产年净利润	万 元	202
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	5.3
6.2	财务内部收益率	%	17.4
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	3.9

3.4.5 技术推广应用情况

上世纪 50 年代中期已有试验，60 年代末期前苏联首先投入工业使用。1967 年至 1969 年，法国、瑞士都进行了 TRT 的工业研究，并安装试验成功。70 年代中期日本川崎重工、三井造船和日立公司在引进法国索弗来尔公司专利的基础上，开发出更为先进的技术，并迅速在日本大中型高炉上投入使用。目前，日本高炉的 TRT 普及率已达 100%

我国 TRT 平均发电量在 25kWh/t，偏低（设计值在 35~45）。目前广泛采用的是湿式装置，但总的发展趋势是干式。近年来，高炉煤气干法除尘技术越来越多的成功应用于大型及特大型高炉，所以高炉 TRT 也已由传统的湿式改为干式，如首钢京唐、宝钢、鞍钢等钢厂 4000~5000m³ 级高炉以及近年国内建设的 1000~2500m³ 级高炉均普遍采用干式 TRT。目前，高炉干式 TRT 技术已实现了自主集成创新和设备国产化，如鞍钢鲅鱼圈 4000m³ 级高炉所配 25MW 机组、宝

钢 5000m³ 高炉所配 32MW 机组均已实现国产化。

目前采用全干法除尘的大型高炉有韶钢、莱钢、包钢、鞍钢等多家企业，首钢京唐 5500 m³ 大型高炉也采用干法除尘系统。

根据《钢铁产业发展政策》，新建高炉必须同步配套高炉 TRT 装置。

工业和信息化部在《钢铁企业干式 TRT 发电技术推广实施方案》中提出至 2011 年底，重点大中型钢铁企业 1000m³ 以上高炉干式 TRT 配置率提高到 70%，预期形成 20.3 万吨标准煤的节能能力。

至 2014 年底，重点大中型钢铁企业 1000m³ 以上高炉干式 TRT 配置率提高到 100%，预期最终形成 50 万吨标准煤的节能能力，从而促进节能减排工作的深入开展。目前，我国高炉炉顶煤气干式 TRT 技术普及率接近 50%，‘十二五’期末预计推广比例有望达到 75%。

3.4.6 技术知识产权情况

目前，TRT 设备国产化水平日益提高，我国陕鼓开发的 TRT 应用也很广泛。陕鼓研发的新一代高炉煤气余压透平发电装置（TRT）——3H-TRT 系统是目前世界上最先进的 TRT 装置，不仅环保降噪，高效回收电能，而且可确保高炉顶压稳定，使高炉增产，降低成本。

表 3.4.3 高炉 TRT 技术国内主要发明专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日
1	高炉煤气余压透平发电装置入口压力的控制方法	CN101008329	本溪钢铁(集团)有限责任公司	2006.12.29
2	高炉煤气余压发电系统停机控制方法及其软件	CN1539998	武汉钢铁设计研究总院	2003.10.31
3	高炉煤气余压发电装置的高炉顶压稳定性自动控制方法	CN1528917	陕西鼓风机（集团）有限公司	2003.10.10
4	采用煤气干法除尘装置的高炉炉顶压力控制方法	CN101871027A	中冶南方工程技术有限公司	2010.06.09
5	采用煤气干法除尘装置的高炉炉顶压力控制系统	CN101871028A	中冶南方工程技术有限公司	2010.06.09
6	高炉煤气余压回收透平发电装置的发电机故障录波电路	CN201122176	西安陕鼓动力股份有限公司	2007.03.20

3.5 高炉热风炉双预热技术

3.5.1 技术介绍

高炉热风炉双预热技术是指同时预热高炉煤气和助燃空气的技术,这不仅会明显提高热风炉的理论燃烧温度,而且有利于提高热风炉的寿命,降低能源消耗。

单独预热热风炉煤气或助燃空气,都可以提高热风炉理论燃烧温度,但实际上只预热一项,会因两者温差过大使热风炉燃烧器受到不均衡的温度应力的破坏,缩短使用寿命,同时预热高炉煤气和助燃空气,不仅会明显提高热风炉的理论燃烧温度,而且有利于提高热风炉的寿命,降低能源消耗。

当前,炼铁焦比不断降低,高炉煤气的发热值也不断降低。在高炉煤气不富化并且助燃空气不富氧的条件下,用热管技术提高高炉鼓风温度有其必然的局限性。单纯依靠热管换热器回收热风炉烟气余热,将烧炉高炉煤气及助燃空气进行低温双预热,只能使热风温度达到 1150~1200℃ 范围,热风炉风温要达到 1250℃,需要采取新的技术措施。

为实现高风温,目前国内外主要有掺烧高热值煤气技术、换热器预热煤气和助燃空气技术、热风炉自身预热技术、高温空气燃烧预热技术等。而钢铁企业存在的主要问题是焦炉煤气不够或缺乏,而高炉煤气却面临富余放散。因此如何使用单一的高炉煤气实现热风炉 1250℃ 以上的风温是众多钢铁企业关心的课题。高炉煤气发热值较低,要达到风温 1250℃,需预热空气、煤气,采用换热器预热煤气、助燃空气技术,预热后煤气温度可达到 180℃;为了达到 1250℃ 风温,需要将助燃空气预热到 400~600℃,采用常规的热管换热器无法达到此要求;采用热风炉自身预热法可以实现 1250℃ 风温,但投资成本较高。

3.5.2 技术适用条件

为实现全烧高炉煤气热风炉 1300℃ 以上风温,需要在结构、耐火材料、材质上进一步改进,继续研究、优化、完善热风炉操作技术。

3.5.3 节能减排效果

高风温可以改善高炉下部热制度,提高能源利用率,降低燃料比。

每提高 100℃ 空气温度,热风炉理论燃烧温度可提高 30℃;煤气的预热效果是每提高 100℃ 煤气温度,热风炉理论燃烧温度可提高 50℃。热风温度每提高 100℃ 可降低焦比约 20kg/t,同时可增产 3%~5%,还可增加喷吹煤粉 40kg/t,进一步降低焦比。

3.5.4 成本效益分析

采用高炉热风炉双预热技术的经济效益包括：生产 1 吨铁水降低焦比 10kg，即收入 14.53 元/t 铁水。高炉热风炉双预热项目建设，增加了高炉煤气等动力费用，同时增加了人工成本、固定资产折旧、修理等费用，增加管理费、财务费等费用，上述各项费用合计 11.67 元/t 铁（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 2.70 元/t 铁，贷款偿还结束后年利润总额 3.19 元/t 铁，投资内部收益率 31.88%（税后），投资回收期（不含建设期 1 年）3.1 年。经济评价总表见下表。

表 3.5.1 高炉热风炉双预热技术经济评价指标

序号	项 目	单位	项 目
一	总投资	元/t 铁水	10.55
1	建设投资	元/t 铁水	10.00
2	建设期利息	元/t 铁水	0.19
3	铺底流动资金	元/t 铁水	0.36
二	生产追加流动资金	元/t 铁水	0.56
三	总资金	元/t 铁水	11.39
四	资金筹措	元/t 铁水	11.39
1	自有建设资金	元/t 铁水	3.50
2	建设期利息	元/t 铁水	0.19
3	自有流动资金	元/t 铁水	0.36
4	建设资金贷款	元/t 铁水	6.50
5	流动资金贷款	元/t 铁水	0.56
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/t 铁水	14.53
2	不含税总成本费用	元/t 铁水	11.67
3	销售税金及附加	元/t 铁水	0.16
4	利润总额	元/t 铁水	2.70
5	所得税	元/t 铁水	0.68
6	税后利润	元/t 铁水	2.03
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	4.1
2	投资内部收益率	%	31.88

序号	项 目	单位	项 目
3	贷款偿还期（含建设期）	年	4.5

3.5.5 技术应用情况

首钢迁钢 2 号高炉（2650m³）配置 3 座霍戈文改造型高风温内燃式热风炉，配置 2 座高温预热炉，对霍戈文助燃空气进行高温预热，预热温度 520~600℃。采用干法除尘的高炉煤气经分离式热管换热器预热后温度基本达到 130~180℃；提供满足 1250℃风温要求的燃烧条件，其中高温预热炉采用自主研发的新型顶燃式热风炉，预热炉配备 1 座混风炉。霍戈文热风炉的助燃空气量中预计有约 54%进入预热炉，预热到 1050℃；然后在混风炉中与未预热的约 46%的冷助燃空气混合，将温度调整到 600℃左右，送到霍戈文热风炉使用。此外，高风温管道通过耐火材料、耐火衬结构、钢结构、管道设备等方面的改进，满足了送风管道温度 1250℃的使用要求。

目前，采用热管技术，高炉热风炉双预热技术应用比例在 80%以上，“十二五”期间预计推广比例为 100%。在 1000m³ 及以上高炉配置预热炉高炉热风炉双预热技术应用比例约 5%，“十二五”期末预计推广比例将达到 35%。

3.5.6 技术知识产权情况

连续送风式高风温热风炉，专利号 CN200810226020.5。

3.6 高炉煤气汽动鼓风技术

3.6.1 技术介绍

高炉冶炼要求鼓风机供应一定量的空气，以保证碳的充分燃烧，因此高炉鼓风机是高炉最重要的动力设备。高炉鼓风机驱动方式通常采用电动或汽动两种方式，两者原理大致相同，只是原动机不同，电动鼓风的原动机是电动机，汽动鼓风的原动机是汽轮机。

高炉煤气汽动鼓风技术主要是利用高炉本身产生的富余煤气，通过锅炉燃烧产生蒸汽，蒸汽驱动工业汽轮机带动风机运转对高炉鼓风，根据工业汽轮机的分类，可分为凝汽式、抽凝式、背压式三种。常规汽动鼓风技术通常是采用中温中压参数凝汽式汽轮机，由工业汽轮机直接带动鼓风机运行，实现高炉煤气→蒸汽→冷风的能源转换。

随着国家对节能减排工作的日益关注，钢铁行业对于提高能源利用效率，实

行能源的梯级利用尤为重视。因此，采用高温高压参数系列的前置背压（抽凝）式汽轮机的鼓风机形式得到了越来越广泛的应用。该种技术由高温高压参数汽轮机首先带动发电机进行发电，同时产生中温中压的背压汽（抽凝汽）带动中温中压参数汽动鼓风机运行，同时富余中压蒸汽并入厂区蒸汽管网，从而实现高炉煤气→蒸汽→热电联产→冷风的能源转换。该技术主要工艺流程图如下：

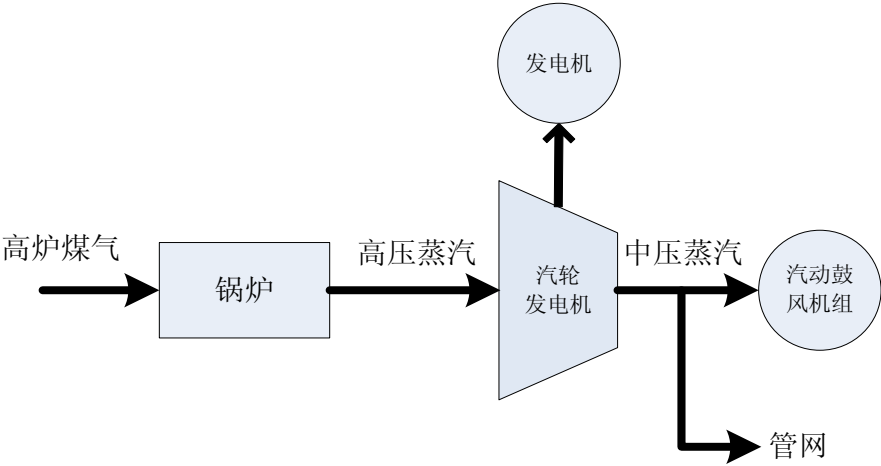


图 3.6.1 高炉煤气汽动鼓风技术工艺流程图

3.6.2 技术适用条件

从高炉煤气汽动鼓风技术本身来看，其适用于所有具有高炉炼铁并回收副产煤气的钢铁企业。

而相比较高炉汽动和电动两种驱动方式，具体哪种驱动方式更合理，应通过综合分析来确定。一般来说，汽轮机单机容量越高，内效率越高，热能利用效率越高，综合目前国内工程应用实例分析，该项技术适用于炉容在 1000m³ 以上的高炉。

3.6.3 节能减排效果

采用高温高压参数前置背压（抽凝）式汽轮发电机形式的汽动鼓风技术在利用钢铁企业富余煤气为高炉送风的同时实现热电联产，较常规汽动鼓风形式具有更好的经济和节能效益。

以 1 座 2500m³ 高炉为例，采用常规汽动鼓风形式与采用高温高压前置背压汽轮发电机组形式两种汽动鼓风技术的主要技术经济指标对比情况见下表。

表 3.6.1 主要技术经济指标对比情况

项目	高温高压前置背压式	中温中压凝汽式

项目	高温高压前置背压式	中温中压凝汽式
年利用煤气量 (10^8m^3)	16.28	15.13
年产蒸汽量 (10^6t)	1.85 (9.8MPa)	1.51 (3.82MPa)
年鼓风量 (10^8Nm^3)	30.7	30.7
年发电量 (10^6kWh)	96	/
年外供蒸汽量 (10^6t)	0.34 (3.82MPa)	/

由上表可见，相比常规中温中压形式汽动鼓风技术，高温高压前置背压汽轮发电机组形式汽动鼓风技术在满足 2500m^3 高炉汽动鼓风的同时可增加富余高炉煤气利用量 1.15 亿 m^3 ，同时实现了热电联产，新增企业自发电量 0.96 亿 kWh、中压蒸汽外供量 34 万吨，相当于新增节约标煤量 7.54 万吨。

3.6.4 成本效益分析

（一）投资估算

高炉煤气汽动鼓风技术根据高炉鼓风量的需求不同则建设规模、投资均不同，根据大量工程案例可知，高温高压前置背压式汽动鼓风技术比中温中压凝汽式汽动鼓风技术单位鼓风量（1 万 Nm^3 鼓风）建设投资约高 162.87 元/万 Nm^3 鼓风。本文以高温高压前置背压式汽动鼓风技术与中温中压凝汽式汽动鼓风技术相比增量投资及成本效益进行分析。

与中温中压凝汽式汽动鼓风技术相比增量总投资 170.33 元/ 万 Nm^3 鼓风，其中建设投资 162.87 元/万 Nm^3 鼓风，建设期利息 2.94 元/万 Nm^3 鼓风（建设期贷款比例 60%），铺底流动资金 4.52 元/万 Nm^3 鼓风。

投资估算详见下表。

表 3.6.2 高炉煤气汽动鼓风技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/万 Nm^3 鼓风）
一	建设投资	162.87
1	建筑费用	34.20
2	设备费用	104.23
3	安装费用	16.29
4	其他费用	8.14
二	建设期利息	2.94
三	铺底流动资金	4.52

序号	技术名称	总投资（元/万 Nm ³ 鼓风）
四	总投资	170.33

（二）经济效益分析

主要效益：高温高压前置背压式汽动鼓风技术除供给鼓风外，副产中压蒸汽及发电，中温中压凝汽式汽动鼓风技术无副产物。以上各项增量收入合计 182.67 元/万 Nm³ 鼓风。同时增加了高炉煤气、压缩空气、除盐水等动力费用，增加了人工成本、固定资产折旧、修理等费用以及财务费等费用，上述各项费用合计 87.74 元/万 Nm³ 鼓风（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 29.98 元/万 Nm³ 鼓风 年，贷款偿还结束后年利润总额 92.14 元/万 Nm³ 鼓风 年，投资内部收益率 48.87%（税后），投资回收期（含建设期 1 年）3.1 年。经济评价总表见下表。

表 3.6.3 高炉汽动鼓风技术经济评价指标表

序号	项 目	单位	指 标
一	总投资	元/万 Nm ³ 鼓风	170.33
1	建设投资	元/万 Nm ³ 鼓风	162.87
2	建设期利息	元/万 Nm ³ 鼓风	2.94
3	铺底流动资金	元/万 Nm ³ 鼓风	4.52
二	生产追加流动资金	元/万 Nm ³ 鼓风	10.54
三	总资金	元/万 Nm ³ 鼓风	180.87
四	资金筹措	元/万 Nm ³ 鼓风	180.87
1	自有建设资金	元/万 Nm ³ 鼓风	162.87
2	建设期利息	元/万 Nm ³ 鼓风	2.94
3	自有流动资金	元/万 Nm ³ 鼓风	4.52
4	建设资金贷款	元/万 Nm ³ 鼓风	102.20
5	流动资金贷款	元/万 Nm ³ 鼓风	10.54
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/万 Nm ³ 鼓风	182.67
2	不含税总成本费用	元/万 Nm ³ 鼓风	87.74
3	销售税金及附加	元/万 Nm ³ 鼓风	2.79
4	利润总额	元/万 Nm ³ 鼓风	92.14
5	所得税	元/万 Nm ³ 鼓风	23.03

序号	项 目	单位	指 标
6	税后利润	元/万 Nm ³ 鼓风	69.10
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	3.1
2	投资内部收益率	%	48.87
3	贷款偿还期（含建设期）	年	2.43

3.6.5 技术推广应用情况

由于高炉汽动鼓风技术具有在满足高炉供风同时可兼作全厂供热热源的特点，因此在热负荷需求较大的钢铁企业特别是北方企业应用较多，例如本钢、包钢、邯钢、承钢等国内大中型钢铁企业均应用了该技术。

“十二五”期间，该项技术的推广应主要集中于提高汽动鼓风技术的能源利用效率及机组热效率，通过采用高温高压参数前置背压（抽凝）式汽轮发电机组形式保证在高炉供风的同时实现能源的梯级利用及热电联产。预计“十二五”末该项技术的应用比例有望达到 40%左右。

3.6.6 技术知识产权情况

该技术的主要设备包括锅炉、汽轮发电机组、鼓风机，目前均已完全实现国产化。主要设备厂家包括：陕西鼓风机集团有限公司、杭州锅炉集团有限公司、江西江锅热能动力设备有限责任公司、哈尔滨汽轮机厂、杭州汽轮机厂等。

3.7 高炉煤气干法布袋除尘技术

3.7.1 技术介绍

（1）技术概况

煤气净化系统大致可分为湿法除尘和干法除尘两类，干式除尘则主要采用干式布袋除尘和干式电除尘两种系统。

干式电除尘由于自身存在一定问题且在武钢 3200m³ 高炉运行不尽完善，在国内也未能推广开；而湿法除尘技术虽然在国内使用较普遍，但随着各企业对节能环保的逐渐重视，被干法布袋除尘技术取代也是大势所趋。

我国的太钢、首钢、攀钢等企业在 80 年代首先从日本引进干法布袋除尘技术，随后 90 年代前后，我国自主开发了脉冲袋式除尘器，并在国内中小型高炉迅速推广，并在攀钢、承钢 1260m³ 高炉也得到应用。最具突破的是莱钢 2000m³

高炉作为全国节能示范项目使用了此项技术，为该项技术在大中型高炉的推广起到示范作用。2007 年唐钢 3200m³ 高炉的投产，使干法除尘应用的高炉容积提高到了 3000m³ 级。2009 年首钢京唐钢铁公司采用自主设计干法布袋除尘技术的 5500m³ 特大型高炉的投产，标志着我国实现了高炉煤气干法布袋除尘技术与设备的国产化、大型化和系列化。目前，我国已能够自主设计、制造和建设各种炉容的干法布袋除尘装置，高炉煤气干法除尘技术日臻成熟。

(2) 技术基本原理

干法除尘技术主要由煤气调温系统、过滤系统、清灰系统、输卸灰系统等组成。荒煤气经重力除尘器或旋风除尘器后，当煤气温度正常情况下走旁通管进入布袋正常工作；当温度过高或过低时切换到调温系统，将煤气温度控制在正常范围内进入布袋。煤气经布袋除尘后进入 TRT 或调压阀组。采用氮气脉冲反吹或反吹风系统清灰，进入输卸灰系统，采用机械输送或气力输送方式外运。

工艺流程图如下：

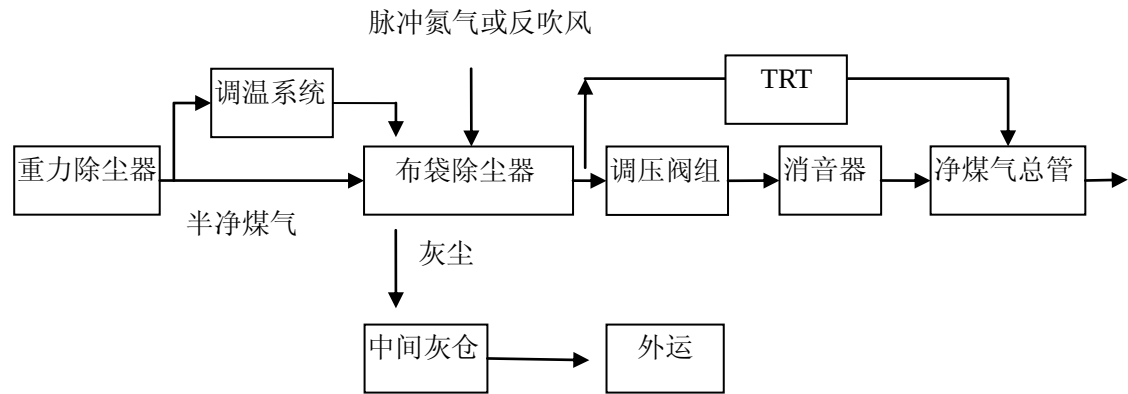


图 3.7.1 高炉煤气干法布袋除尘技术工艺流程图

3.7.2 技术适用条件

干法布袋除尘技术适用于所有类型高炉，尤其适用于水资源缺乏地区的钢铁企业。高炉煤气干法除尘技术要求冶炼工艺稳定，炉顶压力适当提高；相对而言，大高炉比小高炉更有推广意义。

3.7.3 节能减排效果

高炉煤气干法布袋除尘技术与湿法除尘技术相比，具有显著的节能减排效

益，下表为干法、湿法除尘技术的对比表（以 2500m³ 级高炉为例）：

表 3.7.1 高炉煤气干法布袋除尘技术与湿法除尘技术对比表

高炉基本参数	高炉炉容：2500m ³		
	年产铁水：200 万吨		
	炉顶压力： 高压 0.2Mpa,常压 0.03Mpa		
	煤气量： 平均 42000m ³ /h		
除尘技术比较	湿法除尘技术	干法布袋除尘技术	干、湿对比
一、基本指标			
净化后煤气含尘量	≤20mg/Nm ³	≤10mg/Nm ³	除尘效果更佳
系统阻力损失	≥3000mmH ₂ O	约 500mmH ₂ O	系统阻损小
煤气出净化系统温度	50~60℃	~160℃	煤气出口温度高
占地面积	2500m ² （包括水系统）	1500m ²	占地相对较少
人员	20 人	8 人	操作人员减少
二、直接节能效果			
耗电量	包括水系统及传动系统，耗电量较大，功率为 850kW	功率为 350kW，且间断性用电	每年节约用电约 504 万 kWh
耗水量	吨铁用水量约 6 吨，吨铁需补充新水量约 0.3 吨	不使用浊环水基本没有新水消耗	每年节约新水量 60 万吨
直接节能合计效果	每年节能约 671tce，折工序能耗降低约 0.34kgce/t。		
三、间接节能效果			
所配 TRT 额定功率	10000kW	13000kW	TRT 出力提高 30%
年发电量	7000 万 kWh/a	9000 万 kWh/a	年发电量提高约 2000 万 kWh
充分利用煤气显热	干法除尘后高炉煤气直供热风炉，能够提高风温 25℃，可降低焦比约 5kg/t。		
间接节能合计效果	每年节能约 12172tce，折工序能耗降低约 6.1kgce/t。		

据估算，我国重点大中型钢铁企业若全部改为干法除尘技术，直接节能量为 39100tce，间接节能量为 70.15 万 tce。

3.7.4 成本效益分析

(1) 投资估算

根据大量工程案例可知,高炉煤气干法布袋除尘与湿法除尘相比建设投资节省约 5.00 元/t 铁水。

(2) 经济效益分析

高炉煤气干法布袋除尘技术与湿法除尘相比,仅考虑直接节能效果,吨铁节约电量 2.52kWh/t 铁水 年,节约新水 0.3t/t 铁水 年。因此与湿法除尘相比高炉煤气干法布袋除尘技术吨铁年节能收益 1.94 元/t 铁水 年。

3.7.5 技术推广应用情况

预计“十二五”期间,新建的高炉将全部采用干法除尘技术,部分 1000m³ 以上高炉由湿法技术改造成干法布袋除尘技术,预计能够推广干法布袋除尘装置 100 套,相应铁产量 1.5 亿吨。目前,高炉煤气干法除尘技术普及率为 50%，“十二五”期末预计推广比例将达到 75%以上。

3.7.6 技术知识产权情况

目前,我国高炉煤气干法除尘技术已完全实现国产化,以下列举几家应用企业:江苏瑞帆环境工程设备有限公司、吴江宝带除尘有限公司、上海泰山除尘设备有限公司、河北宁泊环保有限公司、鞍山市天净环保有限公司。

表 3.7.2 高炉煤气干法布袋除尘技术知识产权情况

序号	技术名称	公开(公告)号	申请(专利权)人	申请日
1	高炉煤气余压气力输灰装置	ZL95207152.5	北京首钢国际 工程技术有限 公司	
2	低压脉冲带式除尘器	ZL95217489.8		
3	高炉煤气干法除尘降温装置	ZL200420118842.9		
4	高炉煤气干法除尘罐车输灰装置	ZL200420118843.3		
5	高炉煤气低压脉冲布袋除尘器	ZL200420118845.2		
6	高炉煤气干法除尘热管升温装置	ZL200520001690.9		
7	高炉煤气干法除尘蒸汽升温装置	ZL200520001691.3		
8	大型高炉煤气干法除尘含尘量在线监测装置	ZL200520112339.7		

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日
9	高炉煤气布袋除尘系统	ZL200520130149.8		
10	高炉煤气干法除尘系统（印度）	3110/DEL/2005		
11	高炉煤气干法除尘煤气管道防腐装置	200820079850.5		
12	采用煤气干法除尘装置的高炉炉顶压力控制方法		中冶南方工程技术有限公司	
13	采用煤气干法除尘装置的高炉炉顶压力控制系统		中冶南方工程技术有限公司	
14	大型高炉煤气干法一体化布袋除尘在线监测装置		青岛科联环保仪器有限公司; 北京首钢国际工程技术有限公司	
15	一种高炉煤气干法除尘灰气力输送系统		上海梅山钢铁股份有限公司	
16	高炉煤气干法除尘方法与装置		无锡红旗除尘设备有限公司; 尹华勤	
17	高炉煤气干法除尘装置		无锡红旗除尘设备有限公司; 尹华勤	
18	一种大高炉荒煤气全干法布袋除尘装置		上海梅山钢铁股份有限公司	
19	分离高炉干法除尘灰含锌物质的方法		首钢总公司	
20	高炉煤气干法布袋除尘器双向电磁脉冲喷吹清灰装置		北京瑞帆机械设备制造有限公司; 江苏瑞帆环境工程设备有限公司	
21	高炉煤气干法除尘装置与工艺		包头钢铁(集团)有限责任公司	
22	高炉煤气干法布袋除尘工艺		重庆钢铁(集团)有限责任公司	

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日
23	高炉煤气干法布袋除尘系统		重庆钢铁(集团)有限责任公司	
24	高炉煤气干法除尘含尘量在线监测装置		首钢总公司;青岛科联环保仪器有限公司	

3.8 转底炉处理含铁尘泥技术

3.8.1 技术介绍

（1）技术概述

转底炉（Rotary Hearth Furnace）处理含铁尘泥技术是指将钢铁厂产生的含氧化锌、氧化铁等粉尘制成小球，敷设在转底炉的环形旋转台车面上，用烧嘴对其进行高温辐射加热还原，还原后的成型物可直接送至高炉作为原料再利用。

转底炉最初的目的只是用于处理含铁废料，但很快就有美国、德国、日本等国将其转而开发用于铁矿石的直接还原，通过在 1200~1400℃ 高温下短时间内对含碳球团的快速加热还原，获得直接还原铁或用来分离钢铁厂固体废弃物中的铁与 Zn、Pb 等有价值金属元素的工艺。这对于合理利用自然资源、保护人类环境有积极的作用，因而受到了冶金界的普遍关注。

（2）技术原理

矿粉或其它含铁粉尘、煤粉和粘结剂经混料机混合均匀后，由压球机压制成 7~13 mm 的生球，再由烘干机烘干后，通过摆动皮带机由加料溜槽加入转底炉内。

转底炉由环行炉床、内外侧壁、炉顶、燃烧系统等组成，炉床、侧壁、炉顶均砌筑有耐火材料内衬。侧壁、炉顶固定不动，炉床由炉底传动机构带动循环旋转，将加入炉内的炉料经过炉内四个区后还原成海绵铁排出炉外。炉床与内外侧壁之间均有水封密封，通过烟气除尘系统控制炉内保持微负压状态。

炉内分为加料区、加热区、还原区和排料区，每个区内外侧和顶部均配有不同数量的烧嘴和喷嘴，通过管道送入的燃气和助燃空气从烧嘴送入炉内进行燃烧，用来助燃炉内还原过程中产生 CO 气体的二次风从喷嘴送入炉内助燃，两部分燃烧后产生的 1200~1400℃ 烟气逆转底炉旋转方向流动，并从球团进料口附近的烟道排至余热锅炉、换热器等余热回收系统，最终经烟气除尘系统净化后排至大气中。球团的还原过程如下图所示。

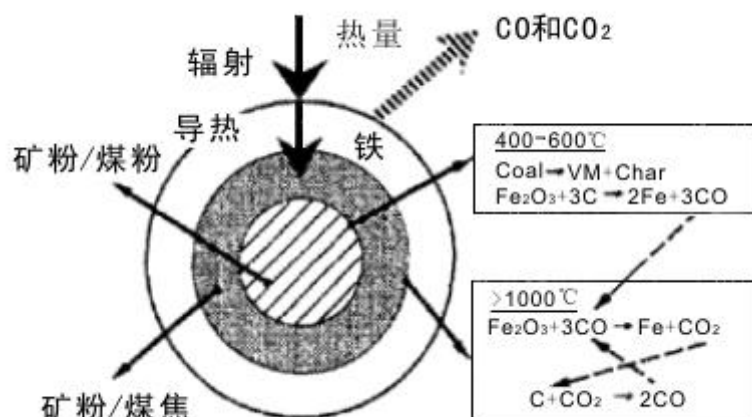


图 3.8.1 含碳球团还原过程示意图

还原后的金属化球团通过带水冷的螺旋卸料机排出炉外，并经球团冷却机回收球团显热后，进入下道工序。

(3) 流程图

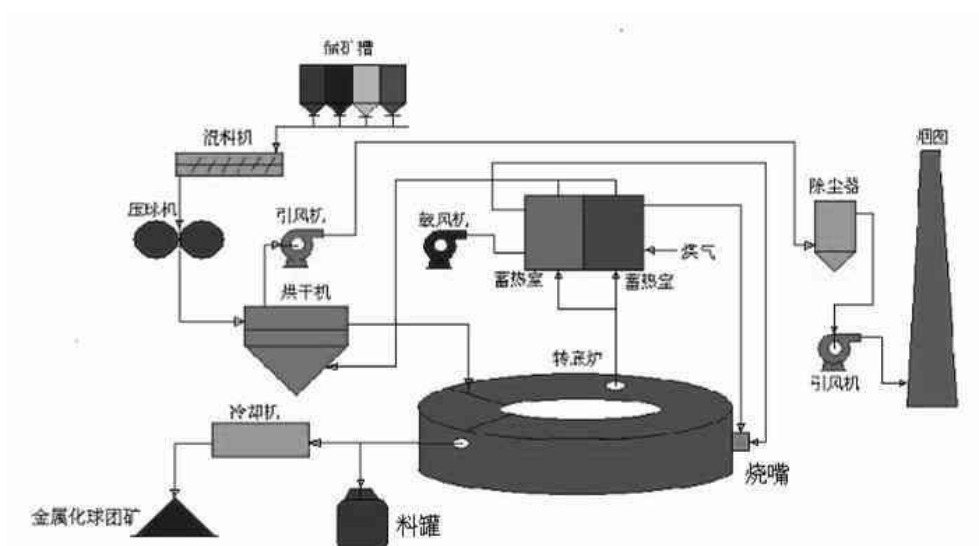


图 3.8.2 转底炉工艺流程图

(4) 关键技术

①含碳球团成球技术

冷固结合含碳球团是实现转底炉直接还原工艺的关键因素，具有与一般氧化球团和块矿不同的还原方式，是靠内部碳进行自身直接还原，无需外部提供还原剂。还原产生的 CO 在球团周围形成自封闭作用，一定程度上隔绝了球团内部与环境气氛，因而使球团可在氧化性气氛下进行还原反应。

含碳球团制造所采用的研磨、配料、混合设备必须保证球团的化学成分精确及矿煤的均匀混合，煤粉的粒度应在 0.25mm 以下，矿粉粒度小于 0.1mm。还原

剂用煤一般为无烟煤，要求固定碳 $>75\%$ ，挥发分 $<20\%$ ，低灰分，低硫。挥发分高，球团还原后强度差，不能满足熔炼的要求。

冷固结含碳球团应满足恰当的物理和力学性能，在输送、加热、还原的过程中粉化率最低。为达到这一要求，首先必须选用合适的特殊粘结剂配方，其次采用合理的造球技术。传统造球技术多采用圆盘滚球机，对原料粒度要求比较高，因此需要配备相应规格的磨料设备。目前所采用的对辊压球技术对原料粒度要求相对较低，生产率高，球团强度好。美国动力钢公司原来采用滚球技术，后来也改为压球技术。目前所生产的含碳球团的强度指标一般为：湿球 0.5m 落下次数 4~7 次，湿球抗压 6~7kg/个；干球 1m 落下次数 10~15 次，干球抗压 75~95kg/个，完全可以满足转底炉生产的要求。

②转底炉进料和出料设备

转底炉内含碳球团升温、反应所需热量主要来源于炉壁、炉气的辐射传热，因此要求炉内球团薄层均匀布料。根据这一特点，可采用振动布料机，实现在转底炉炉底横向、径向都均匀布料，避免机械强度有限的球团破碎，避免原料堆积和料层不均。振动给料机兼有筛除球团粉末的作用。该装置易于维护，且允许在各种生产率下操作。

螺旋出料机的功能是将还原后的金属化球团卸出炉外，因处理的金属化球团温度为 1000°C 左右，所以必须耐热耐磨，螺旋采用水冷，叶片上堆焊硬质合金，由北京科技大学冶金喷枪研究中心专门设计。该装置可使成品金属化球团从炉膛顺利排出且不产生大量粉末，螺旋本身也易于拆卸和维修。

③金属化球团冷却设备

不同于氧化球团，高温金属化球团在大气中易于氧化，因此，设计金属化球团冷却机时应考虑到防止再氧化。

④炉子热工

转底炉高温快速还原，关键炉温必须保持在 1350°C 左右，国外使用天然气为燃料，容易实现大于 1350°C 的炉温。我们采用发生炉煤气或者高炉煤气，实现办法主要采取高风温和煤气预热。另一方面，预热段、还原段应喷吹二次空气并形成强紊流，使得预热段产生的挥发分和还原产生的 CO 在炉内快速、充分地燃烧（后燃烧），以便弥补球团还原强烈吸热，节约外部燃料消耗。在炉子还原末段，为了避免球团层上表面再氧化，则应严格控制二次空气流的进入，且控制烧嘴燃烧在亚化学计量条件下进行，以保持该区域一定的还原性气氛。

烧嘴设计应最大程度确保：在炉料上提供均匀的温度分布，防止局部过热；降低扰动和炉料附近的搅拌，以消除被 CO_2 和 H_2O 再氧化。根据还原过程的要求控制炉内各段的温度和气氛，从而优化各段烧嘴的布置。

3.8.2 技术适用条件

转底炉工艺是一项被实践证明了的高效直接还原工艺,但该工艺也有一定的应用限制,并仍存在许多技术问题。因此,在我国发展转底炉工艺应当采取谨慎的态度,在完善相关基础试验研究的基础上,深入吸收消化关键技术,结合各企业具体现状引进和发展转底炉直接还原技术,使该工艺在技术成熟的基础上具备经济与环保的双重优势。

由于转底炉工艺设备的限制,目前世界上最大产能规模为每年 50 万吨。这一能力很大程度限制了大型钢铁企业在炼铁厂的应用,无法满足大型钢铁企业的生产规模需要,对小规模钢铁企业倒不失为一个不错的选择;相反,在含铁粉尘处理领域,1 座千万吨级的钢铁厂每年生产所产生的含铁粉尘约 50 万吨,转底炉技术用来处理含铁粉尘是较合适的途径。

另外,由于是含碳球团为原料,煤的灰分及固体粘结剂残留于转底炉产品金属化球团中,使金属化球团中的脉石含量增加;同时,由于原燃料中的硫无法在还原过程中脱除,导致金属化球团的硫含量较高。这些不利因素迫使目前的转底炉还原生产不得不选用高品位的铁矿和低硫、低灰分的煤来满足其后续的电炉生产工艺,否则需增加额外的熔炼工序。

转底炉工艺在我国还处在起步阶段,在能耗、技术、设备等方面都存在一些没有完全解决的问题。因此,我国钢铁企业在发展转底炉直接还原工艺时,需注意合理解决以下几点关键技术。

(1) 高效廉价黏结剂的开发

为了保证冷固结球团能在运输、布料、还原、出料等转底炉生产环节中保持良好的强度,必需选择合适的黏结剂。试验研究过的主要有机黏结剂有蜡、糖浆、各种胶、淀粉、糊精、纸浆废液、海生植物、泥煤(腐殖酸)、塑料、高黏重油、沥青等;无机黏结剂主要有石灰、水玻璃、NaOH、碳酸盐、氯化物、硼酸盐、膨润土、黏土、硅藻土、水泥等。不同的黏结剂不仅在成本、可获得性方面有所差异,在冷固结成型过程中,不同的黏结剂用量,对物料的水分含量,成球后烘干养护时间等条件要求也各不相同。在对黏结剂的选择中,不仅要考虑黏结性能、成本等因素,还要根据处理对象的不同,充分考虑其在转底炉生产工艺中的物理化学反应与生成物,结合处理对象的具体要求及预期产品质量等方面综合考虑。

(2) 能源来源与合理利用

转底炉工作的温度区间在 1200~1400℃。从能源来源上看,焦炉煤气和转炉煤气的热值能满足转底炉的加热要求,高炉煤气可在充分预热、富氧或与焦炉、转炉煤气混合的情况下使用,而我国许多钢铁企业普遍存在煤气放散、回收率低的问题。因此,在大型钢铁联合企业内发展转底炉工艺时,合理使用焦炉、转炉

和高炉煤气，既能满足转底炉的能源要求，又提高了钢铁联合企业二次能源的利用率。同时，我国煤炭资源丰富，煤制气技术也已成熟，“煤制气—转底炉”直接还原也是一种可行工艺配合。

为了能够快速还原，转底炉的布料层一般都只有一层到两层，在炉膛内有90%以上的容积并没有填充物料。因此，转底炉的能量利用率低、能耗高，为了提高能量的利用效率需要配备高效的加热装置和热交换系统。目前有企业开发的转底炉工艺采用的是蓄热式加热，这种加热方式预热温度高，能源的燃烧利用较充分。但由于转底炉内粉尘、烟尘产生量较大，成对设置的蓄热体在周期性地加热、放热过程中极易造成烧嘴阻塞，影响其使用寿命，这是采用蓄热式迫切需要解决的问题。在热量的回收利用方面，主要问题是产生的烟尘和粉尘在换热器上聚集，减小换热器的换热效率，降低燃烧气体预热温度，进而影响燃烧温度，因此各种粉尘和烟尘在换热器上聚集行为和对换热器热交换效率的影响也是需要合理解决的一项技术难点。

（3）炉底耐火材料的选用

在转底炉直接还原过程中，液相熔渣的渗透和个别元素的化学反应都会造成炉底耐火材料被侵蚀，从而对工艺的连续生产造成影响。

国外有转底炉采取在炉底铺一层耐火砂的方式，避免含碳球团和底层耐火材料直接接触。但选用耐火砂的材料、粒度、铺设厚度以及在生产过程中排料系统对耐火砂的处理方式尚待进一步研究。采用炉底铺设耐火砂的技术，炉底的耐火材料铺设以及膨胀缝的合理预留决定了转底炉生产的顺利与否，一方面工程上要根据耐火材料的膨胀系数预留合理的膨胀缝，既要保证在生产条件下内衬受热膨胀后，炉底耐火材料之间紧密、平整，又要使内衬之间，内衬与外侧侧墙之间的应力在合理的范围之内，另一方面还要考虑到停炉冷态条件下耐火砂不至于落入并填满膨胀缝，影响继续生产。

（4）转底炉与配套工艺的衔接

不同的企业对应用该工艺的目的不同。由于目前我国产业政策限制小型高炉发展，鼓励具有一定规模的直接还原铁工艺的发展，因此一些企业规划发展该工艺的目的是为了增加炼铁产能；也有企业采用该工艺是为了综合利用复杂难处理矿，如处理钒钛磁铁矿综合提取 Fe、V、Ti 等有价值元素；当然多数企业发展该工艺的目的是为了综合处理钢铁厂内的粉尘和尘泥，尤其是含 Zn、Pb 量较高的固体废弃物。该类固体废弃物由于所含的 Zn、Pb 易挥发，在高炉内形成“循环富集”危害高炉，因此不能返回烧结利用，转底炉的发展为该类固体废弃物的处理提供了一条很好的途径。

因此从原料来源上看，不同企业发展的转底炉处理的原料可能是精矿粉、复

杂难处理矿和钢铁厂固体废弃物，处理不同的原料对转底炉配套工艺和后续工艺的衔接要求也不尽相同。从国外的生产经验来看，转底炉直接还原后的原料一般有如下几种处理方式：①作为高炉的原料，直接送入高炉，如日本的君津厂；②配合电弧炉使用进行渣铁分离，获得铁水或半钢以及具有经济价值的渣，如四川龙蟒的钒钛磁铁矿转底炉处理工艺；③压制成直接还原铁块，作为产品出售，如 COF—R（C）工艺；也有研究者提出采用“破碎——磁选——分离”的方式分离渣铁。无论采取那种方式，都要求针对处理对象，掌握其转底炉直接还原后的金属化球团的物理化学性能，设计经济有效的工艺衔接操作方案，还要保证物料在中转过程中尽可能少的发生二次氧化。

（5）转底炉的除尘系统

国内外不少学者进行过含碳球团 Zn、Pb 脱除率的研究，结果表明 Zn、Pb 在转底炉直接还原条件下基本能全部还原挥发。对于处理钢铁厂固体废弃物的转底炉工艺而言，由于电炉尘泥和转炉尘泥中含 Zn、Pb 量较高，因而处理这类物料的转底炉其烟尘中 Zn、Pb 含量必然会很高。而目前对经转底炉直接还原后烟尘的成分组成、粒度、黏结性等基础性质的研究开展的还不多。烟尘的收集技术中，传统冶金工业中常用的重力除尘、静电除尘和布袋除尘等方式中哪种能够比较有效的收集处理这类烟尘，从这类烟尘中是否能有效获得具有市场价值的 Zn、Pb 初级产品等也是发展转底炉工艺需要解决的关键技术。

另外，转底炉工艺中对烟尘收集后烟气的处理方式和合理利用也是转底炉设计中很重要的一环。当前社会对环境保护的要求越来越高，新工艺中烟气经过热交换、除尘后气体中的含尘量，硫氧化物、氮氧化物的含量应当达到或高于国家相关标准要求，这就要求对转底炉工艺中烟气性质有全面的研究，以便采取合理的收集处理措施。

3.8.3 节能减排效果

转底炉以煤、焦炭或木炭为还原剂，以天然气、煤气、燃油和煤粉等作供热燃料，还能处理和回收钢铁企业的含铁废料。因此，与传统的高炉炼铁相比，转底炉可使用铁原料、还原剂和燃料的种类更广泛，灵活性更大。

以我国马钢 20 万吨/年处理量生产线为例，如果脱锌率、金属化率高于 85%、80%，成球合格率在 85%左右，实际强度达 15MPa，加入高炉替代烧结矿冶炼，预计年节约燃料 2.5 万吨。

从转底炉出来的烟气温度高达 1100℃，如用于余热锅炉，可提高系统能源利用水平。

3.8.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：采用转底炉处理含铁尘泥技术，年处理含铁尘泥 37 万吨。项目总投资 15156 万元，其中建设投资 13000 万元，建设期利息 582 万元，铺底流动资金 1574 万元。项目投资估算详见下表。

表 3.8.1 转底炉处理含铁尘泥技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	13000.00	85.8%
1.1	建筑费用	1763.35	11.6%
1.2	设备费用	7878.79	52.0%
1.3	安装费用	1613.28	10.6%
1.4	其它费用	1744.59	11.5%
2	建设期利息	582.09	3.8%
3	铺底流动资金	1573.91	10.4%
	总投资	15156.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：可生产高炉炉料 20 万吨（金属化率>80%），年增加收入 30000 万元。采用转底炉处理含铁尘泥技术，将增加原辅材料费、燃料及动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 28290 万元，项目利润总额 1577 万元。经测算，项目投资回收期(不含建设期)6.0 年，财务内部收益率 15.5%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 3.8.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	15156
1.1	建设投资	万 元	13000
1.2	建设期利息	万 元	582
1.3	铺底流动资金	万 元	1574
2.	生产流动资金	万 元	3672
3.	项目总资金	万 元	18828

序号	项目名称	单 位	指标
4.	资金筹措	万 元	18828
4.1	自有资金	万 元	6062
4.2	建设贷款	万 元	9094
4.3	流动资金贷款	万 元	3672
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	30000
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	28290
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	1337
5.4	达产年利润总额	万 元	1577
5.5	达产年所得税	万 元	394
5.6	达产年净利润	万 元	1183
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	6.0
6.2	财务内部收益率	%	15.5
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	3.9

3.8.5 技术推广应用情况

转底炉工艺经过三十多年的发展，目前已获得工业应用，工业化应用较多的国家为日本和美国。

（1）国外应用情况

国外开发的转底炉直接还原工艺包括 Fastmet 法、Itmk3 工艺、Inmetco 工艺、DryIron 工艺和 Comet 工艺等，其区别主要体现在原料制备、燃料使用、操作条件、产品形态和产品用途等环节上。从所用原料角度来讲，转底炉工艺有使用含碳球团的、使用铁矿粉干压块的和直接使用铁矿粉的。目前已商业化的转底炉工艺中，大都是使用含碳球团的，包括 Fastmet、Inmetco 和美国 IDI 转底炉工艺等。使用铁矿粉干压块的 DryIron 工艺也实现了商业化生产。在这些已商业化的转底炉中，只有美国 IDI 转底炉使用铁矿粉为原料，其它都是用于处理钢铁厂含铁废料的。一般情况下，Fastmet 和 Inmetco 工艺产品的金属化率较低，日本把这种产品用于高炉中。Fastmelt、Redsmelt 和美国的 IDI 工艺可以生产高品质的铁水，这些铁水可直接用于转炉炼钢。转底炉中直接使用铁矿粉的工艺有三种，目前都经过了中试，还没有工业生产厂。神户开发的 ITmk3 工艺所产粒铁质量优良，

可直接用于炼钢中。

(2) 国内应用情况

国内在转底炉直接还原工艺及装备方面也开展了大量研究工作,进行了多次的工业化和半工业化试验,技术推广应用情况如下:

1992 年,北京科技大学理化系和当时的舞阳钢铁公司合作,自行设计了我国第一座用于铁矿石直接还原的试验转底炉。

1996 年,北京科技大学和鞍山市科委合作,在鞍山汤岗子铁矿建成了一座平均直径 5.5m,炉底有效宽度 2m,炉底面积 30m²,设计油烧嘴 12 个的转底炉。

1998 年,北京科技大学冶金喷枪研究中心开始致力于转底炉生产金属化球团——熔分炉熔分双联工艺的研究开发,并从 2000 年着手设计工业规模的转底炉,现已在山西和河南的两家钢铁公司建成了中径为 13.5m、炉底面积为 100 m²的转底炉两台,设计年生产能力为金属化球团 7 万吨。

2007 年,四川龙蟒集团建成一条处理钒钛磁铁矿的转底炉工业化生产线。

2009 年,我国马钢投运国内首套 20 万 t/a 含锌尘泥转底炉脱锌装置,这是马钢引进的新日铁尘泥脱锌转底炉工艺技术,并自主集成、设计配套设施,无害化利用马钢慈湖新区所产生的全部瓦斯泥和 OG 泥,金属化率大于 80%的金属化球团 14 万吨/年,系统脱锌率达 85%以上。

另外,天津荣钢、上东莱钢、四川攀钢、云南昆钢、江苏沙钢、辽宁鞍钢和上海宝钢等多家企业也已立项或规划设计建设转底炉直接还原装置。

2010 年,该技术普及率在 5%左右,“十二五”期末预计推广比例将达到 35%左右。

3.8.6 技术知识产权情况

国外开发的转底炉直接还原工艺(如 Fastmet 法、Inmetco 工艺等)大多申请了专利,并开发和转让技术。如马钢用于尘泥脱锌的转底炉,其核心技术和设备由日本新日铁工程公司提供,马钢设计院负责国内配套。

我国冶金界的专家在多年基础试验研究的过程中,在转底炉工艺的加热方式、布料系统、出料系统等方面攻克了诸多技术难关,取得了若干发明专利,开发了熔融还原炼铁法等新方法,提出了转底炉直接还原的富氧燃烧技术等新技术。

3.9 高炉渣综合利用技术

3.9.1 技术介绍

(1) 技术概况

高炉渣主要成分是 CaO 、 MgO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 ，多数高炉渣中这四种化合物占高炉渣总重的 95% 以上。钢铁冶炼过程中，每炼 1 吨生铁大约产生 300~350 kg 的高炉渣，高炉渣出渣温度 1400℃ 左右，每吨渣含有相当于 60kg 标准煤的热量。因此，做好高炉渣的综合利用是钢铁行业节能降耗的有效途径。

目前，高炉渣的处理工艺主要包括湿法和干法两类，生产中 97% 采用的是湿法，即水淬粒化工艺。

高炉渣水淬方式很多，主要处理工艺有：底滤法（OCP）、因巴法（INBA）、拉萨法（RASA）、图拉法（TYNA）、明特克法（MTC）等。国内生产大部分采用底滤法（OCP）；国外生产大部分采用因巴法（INBA）。

干法即依靠高压空气实现熔融金属冷却、粒化的工艺。针对水渣处理工艺的缺点，20 世纪 70 年代国外就已开始研究干式粒化高炉渣的方法。前苏联、英国、瑞典、德国、日本、澳大利亚等国都有研究高温熔渣（包括高炉渣、钢渣等）干式粒化技术的研究。近年来，高炉熔渣干式粒化技术的研究在国外尤其是日本掀起了新的浪潮，而国内在这方面的研究也刚刚起步。目前，尽管世界上还没有任何一种干式处理工艺实现了工业应用，但已有的各类技术研究积累了很多相关的理论知识和实践经验。

高炉渣的主要用途有：生产矿渣水泥、矿渣砖、混凝土制品，替代普通砂和碎石用于工程建设，生产膨胀矿渣作轻质混凝土制品和防火隔热材料，生产具有保温和隔音等性能的矿渣棉，用高炉渣生产硅肥。目前日本正研究将细粒化高炉渣覆盖在海边海床上以隔绝海边富集的胶质泥沙。由于高炉渣含有硅酸盐，可促进海水中硅藻的繁殖，防止赤潮发生。这项应用技术为大量消化高炉渣开辟了一条新途径。

① 高炉水淬渣用于水泥混和料

熔渣经水淬急冷，来不及形成矿物结晶而把其中的化学能储存于形成的玻璃体中，因而具有较高的潜在活性。当磨细以后，在水泥熟料矿物的水化产物、石灰、石膏等激发剂作用下，它与水作用可生成水化硅酸盐等水化产物，具有硬性，而且显示出高强度，高密度，耐热性好。与其它水泥熟料相比它具有很大的优势，首先，高炉水淬渣与粉煤灰、火山灰相比，化学成分比较稳定，除此以外还具有很低的水合热、高抗硫和耐酸度，很好的易加工性、很高的强度极限等，这些特性对建造大桥、大坝、高速公路、海港等都很有益处。生产普通硅酸盐水泥需要

消耗大量的能量，而高炉水淬渣仅需要生产普通硅酸盐水泥的 10% 能量。高炉水淬渣用于水泥混合料以后不但提高了水泥的性能而且降低了生产水泥的成本，节省了能源。因此高炉渣水泥被称为 21 世纪的新材料。

②高炉渣微粉用于混凝土

一直以来，高炉渣就被作为水泥的混合材料，但进入 20 世纪 60 年代以后，高炉渣微粉作为混凝土的独立组分得到了广泛的应用。现在，美国、欧洲、日本都已普遍推广高炉渣微粉，国内部分钢厂也引进了这一技术。高炉渣微粉是将高炉水淬渣烘干、破碎、粉磨、筛分以后，其比表面积达到一定程度的细粉末。一般当高炉渣微粉比表面积超过 $400\text{m}^2/\text{kg}$ 时开始具有较好的活性和增强作用。比表面积在 $300\text{m}^2/\text{kg}$ 以上的超细粉末被称为超细高炉渣微粉。目前很多国家对高炉渣微粉比表面积在 $300\text{m}^2/\text{kg}$ 以上的微粉已经定了标准，美国 ASTM C989 把高炉渣超细粉划分为 80、100 和 120 这 3 个等级。

不同粒度的高炉渣微粉的活性指数不同。一般情况下，当高炉渣微粉的比表面积越小，水化性能越大，当其替代比它比表面积小的高炉渣微粉时，混凝土的性能发生了明显的变化。在混凝土中加入高炉渣微粉做掺合料，可以改善混凝土的特性：提高混凝土的强度，提高混凝土的抗渗性，提高混凝土的耐久性和抗腐蚀性，可用于建设大型建筑。由于高炉渣微粉有如此优越性能，建议我国应加大高炉渣微粉在混凝土中的应用。

③高炉渣用于硅肥

硅肥是一种含有氧化硅和氧化钙的矿物质肥料，是许多农作物的营养元素。硅肥有利于农作物的光合作用；改善农作物的质量，而且可提高农作物的产量等。而高炉渣里含有大量的氧化硅和氧化钙，因此就产生了把高炉渣深加工成硅肥的研究。高炉渣开发硅肥的主要工艺流程如下：高炉水淬渣经磨细到 80-100 目后，加入适量硅元素活化剂，再经搅拌混合加工后可得成品。

我国硅肥的生产能力很低，高炉渣应用于生产硅肥后，提高了硅肥的产量，生产成本不高，可使生产硅肥厂家得到较高的经济利益。

④高炉渣在玻璃中的应用

1925 年美国成功研制出用高炉渣作为一种含铝的原料引入到玻璃中，从而取代价格较贵和资源缺乏的铝原料。用高炉渣生产玻璃就必须排除不允许存在的杂质。高炉渣经过水淬粒化、过筛、干燥、磁选、粉碎、筛选和分离后得到精制高炉渣。

精制高炉渣玻璃减少了原材料的消耗，降低了成本，改善了玻璃的质量，又有利于环境的保护，减少了高炉渣的污染。

⑤高炉渣在烟气脱硫中的应用

Brodnax and Rochelle 于 2000 年首先提出了在半干法烟气脱硫中，以高炉渣制成的脱硫剂吸附 SO_2 。Liu, C. F. 等于 2001 年证明了高炉渣与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的混合物制成的吸附剂比纯 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的比表面积更大，反应能力更高，脱硫效率更高。Jozewicz, W. 等证明了高炉渣与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 制成的吸附剂比用粉煤灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 制成的吸附剂吸附效果好。因为高炉渣中含有 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO 与粉煤灰相似，但 CaO 含量比粉煤灰高，高炉渣所含的这些成分（无定形硅铝酸盐）与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行水合反应（火山灰反应）后生产的无定形硅铝酸钙可大大提高脱硫剂的脱硫反应活性，从而提高半干法烟气脱硫效率。

⑥高炉渣覆盖在海床，促进硅藻繁殖

JFE 将细粒化的高炉渣覆盖在海边海床上以隔绝海边富集的胶质泥沙，已有 54000 吨高炉渣被逐渐运往海边，覆盖在日本沿海的海岸上。目前已有 40000 m^2 的海岸被充填，厚度达 15 mm 以上。该项技术可以减少近海中正磷酸盐和氮氧化化合物的生成，保护海岸附近的居住环境。细粒化的高炉渣铺设在海床上，可以覆盖胶质泥沙或淤泥，使海床保持弱碱性，防止硫化氢的产生。更为重要的是，由于高炉渣含有硅酸盐，是水中植物生长必不可少的养分，可促进海水中硅藻的繁殖，防止赤潮的发生。

⑦高炉渣的其他用途

高炉渣还可以用来生产很多高附加值的产品。如高炉渣可以制作成膨珠（膨珠质地坚硬，可用作轻骨料，也可作为水泥混合材）、矿渣棉产品（矿渣为主要材料，熔化后经过深加工而得到的一种白色棉状矿物纤维）、热铸矿渣、矿渣碎石（主要用来铺路）和微晶玻璃等。当前绝大部分高炉渣都为水淬渣，炉渣的显热还可用来取暖、发电等。

⑧高炉炉渣显热回收技术

世界上高炉渣显热的回收问题一直没有得到解决。目前，炉渣的显热回收方法大致分为两类：一类是利用循环空气回收炉渣显热，然后通过余热锅炉以蒸汽的形式回收显热，如风淬法；另一类是将高温炉渣注入容器内，在容器周围用水循环冷却，以蒸汽形式回收炉渣显热，如环形床法。不论上述哪种方法，目前国外仍处于工业性试验阶段，接近工业应用水平的不多。我国的大多数钢铁厂采用水淬法，冬季利用冲渣水取暖，其热利用率仅为 10% 左右。

(2) 高炉水渣直接微粉细磨技术原理与流程图

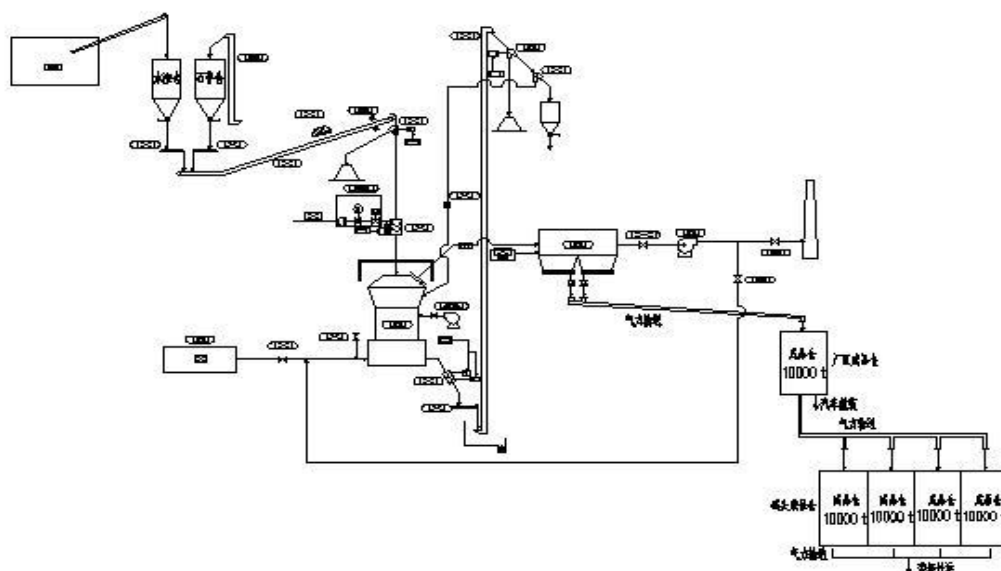


图 3.9.1 高炉水渣直接微粉细磨技术流程图

(3) 关键技术

在高炉渣处理工艺方面，国内外普遍推广高炉水渣微粉技术。我国也已建成多条微粉生产线。生产矿渣水泥其关键的处理技术是粉磨设备的选择，从生产效率和能耗指标考虑，以立式磨机为佳。

3.9.2 技术适用条件

高炉水渣通过胶带机就近直接运输到水渣细磨，减少倒运，直接生产高炉水渣微粉，采用集烘干、粉磨、选粉于一体的立磨生产工艺，选用成熟、先进、可靠的生产工艺和国产化技术装备，采用完善的自动化检测和控制系統，生产过程采用计算机进行集中控制和调节，实现生产的高度自动化。通过该项技术将水渣细磨与炼铁流程进行整合，形成一体化作业，实现节能、环保、废渣再利用。属于国家《产业结构调整指导目录（2005 年本）》第一类鼓励类第 26 条环境保护与资源节约综合利用类第 41 款尾矿、废渣等资源综合利用项目。

3.9.3 节能减排效果

高炉渣作为一种性能良好的硅酸盐材料，通过处理后作为生产水泥的原料，生产水泥时可节约石灰石原料 45%，节约能源 50%，并减少 CO₂ 排放量 44%。

3.9.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：采用高炉渣综合利用技术，建设矿渣微粉生产线。项目总投资 19508 万元，其中建设投资 18000 万元，建设期利息 728 万元，铺底流动资金 780

万元。项目投资估算详见下表。

表 3.9.1 高炉渣综合利用技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	18000.00	92.3%
1.1	建筑费用	2441.56	12.5%
1.2	设备费用	10909.09	55.9%
1.3	安装费用	2233.77	11.5%
1.4	其它费用	2415.58	12.4%
2	建设期利息	727.91	3.7%
3	铺底流动资金	780.09	4.0%
	总投资	19508.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：可生产矿渣微粉 120 万吨，年增加收入 18000 万元。采用高炉渣综合利用技术，将增加原辅材料费、燃料及动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 12531 万元，项目利润总额 5347 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）3.4 年，财务内部收益率 26.8%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 3.9.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	19508
1.1	建设投资	万 元	18000
1.2	建设期利息	万 元	728
1.3	铺底流动资金	万 元	780
2.	生产流动资金	万 元	1820
3.	项目总资金	万 元	21328
4.	资金筹措	万 元	21328
4.1	自有资金	万 元	7803
4.2	建设贷款	万 元	11705
4.3	流动资金贷款	万 元	1820
5.	经济效益指标		

序号	项目名称	单 位	指标
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	18000
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	12531
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	1234
5.4	达产年利润总额	万 元	5347
5.5	达产年所得税	万 元	1337
5.6	达产年净利润	万 元	4010
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	3.4
6.2	财务内部收益率	%	26.8
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	2.4

3.9.5 技术推广应用情况

20 世纪 70 年代，世界主要产钢国家如日本、美国、英国、德国和瑞典，从节能和环保的目标出发，积极开发炉渣资源的利用。日本 JFE 将高炉渣粉碎到比表面积为 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 后，混合到硅酸盐水泥中，制成高炉渣水泥而被广泛应用。高炉渣水泥在其生产过程中可有效地抑制 CO_2 的产生，而且初期凝结速度慢，因此通过控制裂纹，可有效地提高混凝土的强度，被称为 21 世纪的新材料。

此外，水岛钢铁公司和建材企业共同组建了川铁石棉公司，从 1989 年开始，采用将高炉熔渣改性后急冷的工艺制造石棉。该公司生产两种产品，一种是板状的保温绝热吸音材料，一种是粒状绵的用于耐火涂料和建筑原料用材。

住友公司和住友重机公司共同认识到，城市垃圾焚烧炉排出的集尘灰和焚烧残渣进行熔融处理过程中，产生的融熔灰中含有重金属等有害物质，为此开发出一种可以稳定处理集尘灰和熔融灰（即固定重金属）的、以超微粉末为主要原料的固化剂。

我国宝钢于 1995 年起，分别与冶金建筑研究设计总院、上海市建筑科学研究院共同研究在混凝土中应用高炉渣微粉的课题。宝钢现已建成一座年产 60 万吨微粉的生产厂，其产品可以替代混凝土中的水泥。

宝钢利用高炉水渣烧制的新型陶瓷粒也获得成功，在国内外赢得市场。

2002 年 8 月 28 日，鞍钢矿渣微粉工程竣工投产。从德国引进的该生产线可对高炉渣进行深加工，年可生产 60 万吨矿渣微粉和 45 万吨矿渣硅酸盐水泥。矿渣微粉掺到高标号混凝土中，可改善混凝土各项性能；将矿渣微粉和熟料按一定比例混合，可生产出各种标号矿渣硅酸盐水泥，能够有效降低水泥的生产成本。

此外，太钢，沙钢、莱钢、日照、长钢、济钢、马钢等钢厂都建立了超细粉生产线。

首钢年产高炉水渣全部销往北京及周边地区（厂内无水渣储存场）。近年来，首钢也较系统地对高炉水渣进行了开发与应用。自 1996 年以来，首钢高炉水渣微粉作为混凝土掺加料，先后在首都国际机场停车楼及 1 号桥、北京通产大厦、沙滩后街综合楼等首都重大工程中应用，各项技术指标都达到了设计要求。北京市预拌混凝土的年需求量在 450 万 m^3 以上，且高强度混凝土的用量越来越多。将高炉水渣磨细到 $4000\sim 8000\text{cm}^2/\text{g}$ ，掺量可到达 20%~45%。

首钢京唐水渣直接微粉细磨技术，在上述技术基础上，其特点将水渣细磨与炼铁流程进行整合，形成一体化作业，高炉水渣通过胶带机就近直接运输到水渣细磨，减少倒运，直接生产高炉水渣微粉，实现节能、环保、废渣再利用。采用集烘干、粉磨、选粉于一体的立磨生产工艺，选用成熟、先进、可靠的生产工艺和国产化技术装备，

我国高炉渣余热资源一直没有得到很好的利用。因此，如何把高炉渣的处理与余热利用有机结合起来，将是高炉渣处理技术今后的发展方向。首钢国际工程技术有限公司已启动高炉渣冲渣水余热回收研究，下一步如何结合京唐工程的工艺更有效地回收高炉渣潜热是需要探讨的课题。

目前，高炉渣综合利用技术普及率 60%，“十二五”期末预计推广比例将达到 90%。

3.9.6 技术知识产权情况

表 3.9.3 高炉渣综合利用技术部分发明专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日
1	高炉水淬炉渣、由其得到的细骨料以及它们的生产方法	CN1366513	川崎制铁株式会社	2001.02.21
2	一种含钛高炉渣的生态处理方法	CN1775957	东北大学	2005.11.25
3	液态高炉渣热量回收过程中渣的粒化方法及其装置	CN1888081	重庆大学	2006.07.20
4	液态高炉渣热量回收装置及方法	CN1888082	重庆大学	2006.07.20
5	一种高炉渣显热回收系统及生产工艺	CN1920380	东北大学;鞍钢集团新钢铁有限责	2005.08.23

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日
			任公司	
6	高钛型高炉渣矿渣棉	CN1931763	攀枝花环业冶金渣开发有限责任公司	2006.09.30
7	利用高炉渣制备微晶玻璃的方法	CN101259987	郑州大学;安阳钢铁集团有限责任公司	2007.03.05
8	用含钛高炉渣制备固态钛钙硫镁铁氮硅复合肥料的方法	CN101125772	东北大学	2007.07.19
9	高炉渣显热回收系统	CN101418950	东北大学	2008.12.10
10	一种高炉渣急冷和余热回收的方法和装置	CN101550460	清华大学	2009.05.08
11	一种用于烟气脱硫的脱硫剂及其制法	CN101607172	中国科学院过程工程研究所	2008.06.16
12	一种利用高炉炉渣制造 E 玻璃纤维的方法	CN101696088A	泰山玻璃纤维有限公司	2008.12.30
13	炼铁高炉冲渣蒸汽及热水余热收集方法及其装置	CN101792830A	首钢国际工程技术有限公司	2010.01.26

第四节 炼钢工序

转炉炼钢和电炉炼钢是两种主要的炼钢方法。转炉炼钢（Converter Steelmaking）是以铁水、废钢、铁矿石、返回含铁原料和铁合金为主要原料，不借助外来热源，靠铁液自身的物理热与铁液组分和氧进行化学反应产生热量的炼钢方法。

转炉炼钢在当代炼钢生产中依然占据主导地位。我国转炉钢产量从 2000 年的 1.068 亿 t 增长到 2009 年的 5 亿 t 以上，增长了约 4.7 倍，年均增幅接近 19%，超过了粗钢的增长速度。新世纪以来，我国转炉钢比例一直大于 84%，最高年份超过 90%，远远高于电炉钢比例。

回收转炉煤气和蒸汽是实现转炉冶炼能耗“负值”的主要手段。2010 年上半年，重点企业转炉工序能耗为 0.52kgce/t。而转炉煤气和蒸汽回收率高的企业转炉工序能耗要低一些。2010 年上半年，重点企业转炉煤气回收量提高到 79m³/t，这将导致转炉工序能耗下降。

虽然转炉炼钢是当代钢铁生产中耗能最少，且是唯一可以实现总能耗为“负值”的工序，但进一步降低工序能耗和物耗，更加高效地实现能源转换和回收，更加有效地利用二次能源，开发低温余热回收利用新途径等许多问题还要进行深入研究和优化。主要思路有：

（1）流程优化应成为炼钢厂进一步节能首先关注的重点。

流程优化主要体现在紧凑、高效、自控三个方面。流程功能的解析、优化重组，实现转炉炼钢生产的紧凑化，即工序时间的最小化、衔接最优化，这是最大的节能措施；高效化是转炉炼钢节能的重要措施；自动化是转炉炼钢节能的重要保证。

（2）以进一步提高炼钢能源转换效率，更高效地回收和利用二次能源为当前的重要创新方向，突出优化现有重点节能技术。

烟气能量的高效转换及回收利用；连铸坯热送热装是衔接炼钢、轧钢两大工序的重要节能措施；炉渣余热回收和利用；冷却水余热回收利用技术是转炉炼钢厂进一步提高能源转换与利用效率的新课题和难题。

（3）炼钢节能其他思路。

加大全过程的保温措施是转炉钢厂节能的重要基础；以稳定的工艺操作，实现全厂低温制度的运行，有效地节能降耗；在全钢铁企业能源高效转换利用和构建能量流网络以及优化的总体框架思路下，研究转炉炼钢厂更节能降耗的新措施。

与转炉炼钢相比，电炉炼钢在投资、资源、能源和节能环保、可持续发展等方面都具有优势。更重要的是，制造每吨粗钢的能耗和二氧化碳排放分别为250kgce和600kg左右，而长流程（矿石/高炉炼铁/氧气转炉炼钢）的能耗和二氧化碳排放分别是750kgce和2000kg。

电炉炼钢是另一种重要的炼钢方法。新世纪以来，在全球范围内电炉钢占总产钢量比例一直保持在30%~34%。由于我国粗钢产量的连续增长，加之废钢原料短缺、电力能源价格上升等因素影响，近年来我国电炉钢所占比例逐年下降，但总量还是在不断增加。

我国《钢铁产业发展政策》明确指出，要“逐步减少铁矿石比例和增加废钢比例”。因此，从电炉炼钢发展趋势上来看，我国电炉炼钢面临着一系列挑战：1）废钢资源的短缺；2）电能短缺与电价成本；3）废钢循环过程中有害元素的富集；4）大部分电炉炼钢没有实现全线优化，生产效率不理想；5）在节能环保方面，与国外相比还存在较大差距。因此，解决电炉原料问题和进一步节能降耗技术的开发是电炉钢发展的关键，实现高效化生产和电炉技术进步的核心。

在电炉炼钢中，如何降低电炉能耗是其节能的主要思考方向。电弧炉优化供电，建立合理的废钢回收、分类管理机制，电炉烟气除尘/余热回收利用等技术的广泛应用无疑将对推动电炉炼钢的节能减排产生深远影响。随着我国工业化进程加快，废钢积蓄量会不断增加，废钢资源紧张状况将得以逐步缓解，电炉炼钢技术的发展和二次能源的高效利用将进一步降低电炉能耗，我国电炉炼钢还将有较大发展。

21世纪炼钢技术的发展必须统筹考虑资源、能源和环境之间的相互关系，即炼钢技术的发展必须从合理、高效利用资源、能源以及重视环境保护的立足点出发，发展绿色冶金。随着我国工业化进程的加快，废钢积蓄量的不断增加，电弧炉炼钢技术的发展及二次能源的高效利用将进一步降低电弧炉能耗，大力发展电炉钢生产将是未来世界钢铁工业的主流。

4.1 转炉“负能炼钢”工艺技术

4.1.1 技术介绍

（1）技术概况

“负能炼钢”是转炉炼钢节能的主要技术，推广转炉“负能炼钢”技术对炼钢实现节能减排目标，对保证钢铁工业健康发展具有重要意义。它是一个工程概念，20世纪70年代由日本提出。体现了生产过程转炉烟气节能、环保综合利用的集成技术，是衡量一个现代化炼钢厂生产技术水平的重要标志。其含义是指炼钢过程中回收的煤气和蒸汽能量大于实际炼钢过程中消耗的水、电、风和气等能量总和。

（2）基本原理

转炉炼钢厂分为炼钢和连铸两大工序，“负能炼钢”在转炉生产流程中是指炼钢工序。具体为：从高炉热铁水到生产出合格钢水所涉及的生产工序支出的能源与回收能源之差为负值。要实现转炉工序“负能炼钢”，一方面要努力降低炼钢耗能；另一方面要加强能量回收，提高回收效率。提高转炉煤气和转炉烟气余热回收率和利用率是实现转炉“负能炼钢”的重要保障。

（3）工艺流程

转炉“负能炼钢”工艺技术在转炉生产流程中体现，该技术工艺流程包括生产流程和能源支出/回收利用技术工艺流程。

（4）关键技术

① 提高生产效率是转炉实现“负能炼钢”的基础。

从各钢厂的经验可知，提高生产效率对于转炉实现“负能炼钢”具有重要意义。以转炉每年的产钢量作为转炉生产效率指标，研究与转炉工序能耗和吨钢电耗关系发现，提高转炉生产效率后有以下优点：转炉工序能耗降低；转炉吨钢电耗和氧耗进一步降低。而提高炼钢-连铸的生产效率，可采取以下措施：

- ◆ 加快生产节奏，缩短生产周期；
- ◆ 降低钢水周转温降，稳定钢水温度；
- ◆ 减少热停时间，实现连续稳定生产；
- ◆ 加强能源管理，统一计量标准。

② 强化转炉煤气回收。

强化煤气回收是转炉实现“负能炼钢”的基本保障。煤气回收最高值为 $107.9\text{m}^3/\text{t}$ ，最低值为 $43.93\text{m}^3/\text{t}$ ，差距较大。说明一些钢厂需加强煤气回收、管理与调度，减少放散量。在解决煤气回收、存储和调度管理的基础上，通过以下工艺可提高煤气回收量：

- ◆ 稳定冶炼操作，提高转炉作业率，随产钢量增加，转炉煤气回收量进一步提高；
- ◆ 缩短冶炼前期和后期非回收时间、增加煤气回收时间是提高煤气回收量的关键，因此需要优化复合吹炼工艺；
- ◆ 采用副枪或精确的炉气分析仪，实现自动炼钢，计算机动态控制过程和终点，实现不倒炉出钢。

③ 加强蒸汽回收。

加强蒸汽回收对稳定实现转炉“负能炼钢”具有重要意义。目前，国内转炉蒸汽回收水平存在较大差距。主要原因是蒸汽未能充分利用，放散量大。今后需要

重点解决低压蒸汽的利用问题，可采用蒸汽并网、蒸汽发电和蒸汽作为真空精炼气源，保证转炉蒸汽拥有稳定的用户。强化蒸汽回收的工艺措施有：

- ◆ 加强蒸汽回收、应用设施建设，减少蒸汽放散量；
- ◆ 缩短转炉辅助时间，保证余热锅炉稳定运行；
- ◆ 减少转炉热停时间，适当增设蓄热装置，提高蒸汽品质。

④ 优化转炉冶炼工艺。

为实现“负能炼钢”应围绕提高转炉生产效率，进一步优化转炉冶炼工艺，达到提高产量、降低能耗和稳定铁水质量的目的。强化冶炼的工艺措施是：

◆ 提高供氧强度，缩短吹炼时间。通常吹炼时间决定于供氧强度，而供氧强度受限于炉容比和吹炼、造渣工艺。炉容比为 $0.95\sim 1.1\text{m}^3/\text{t}$ ，供氧强度可提高到 $3.5\sim 4.0\text{Nm}^3/\text{t}\cdot\text{min}$ ，吹炼时间可缩短到 15min 以内。

◆ 提高成渣速度。提高供氧强度必须解决喷溅问题，关键是提高初渣成渣速度。除优化氧枪和供氧工艺外，更重要的是提高石灰质量，加快石灰熔化。

◆ 优化复吹工艺。转炉冶炼的特点是存在碳氧反应限速环节的转变。临界碳含量 $[\text{C}]_E$ 以上为氧扩散控制，供氧不会造成渣钢氧化，并保证煤气回收安全。当 $[\text{C}]<[\text{C}]_E$ 时，碳扩散控制脱碳反应，随供氧量的增加钢渣过氧化，煤气氧含量也增加，不宜回收。优化复吹工艺可使 $[\text{C}]_E$ 向低碳区转移，既可避免钢渣氧化，又能延长煤气回收时间，提高煤气回收量。

◆ 采用计算机动态控制，不仅可提高吹炼终点碳和温度的控制精度和命中率，还可以提高脱碳效率，降低吨钢氧耗。同时可实现快速出钢，缩短吹炼时间 4~6min，对实现“负能炼钢”发挥重要作用。

4.1.2 技术适用条件

适用于所有新、改、扩建大中型转炉炼钢企业。为了实现炼钢工序“负能”，钢铁企业可以主要从以下方面采取措施：降低能源消耗、提高转炉煤气和蒸汽回收利用水平、降低综合电耗、实施节水技术和强化能源管理等。

4.1.3 节能减排效果

煤气平均回收量达到 $90\text{m}^3/\text{t}$ 钢；回收煤气的热值应大于 $7\text{MJ}/\text{m}^3$ （CO 含量应大于 55%）；蒸汽平均回收量 $80\text{kg}/\text{t}$ 钢；排放烟气含尘量 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。若按全面推广应用转炉“负能炼钢”技术，单位产品可节能约 $25\text{kgce}/\text{t}$ 钢。转炉煤气回收率大幅提高，不仅可减少 CO 排放使之有效地转化为能源，还可减少烟尘等排放，有效改善环境质量。

4.1.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：年产 100 万 t 钢，采用转炉“负能炼钢”工艺技术。项目总投资 1554 万元，其中建设投资 1500 万元，建设期利息 54 万元。项目投资估算详见下表。

表 4.1.1 采用转炉“负能炼钢”工艺技术投资估算

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	1500.00	96.5%
1.1	建筑费用	552.14	35.5%
1.2	设备费用	622.13	40.0%
1.3	安装费用	124.43	8.0%
1.4	其它费用	201.30	13.0%
2	建设期利息	54.00	3.5%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	1554.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：按照吨钢节能 20kgce，年增加收入 3419 万元。采用转炉“负能炼钢”工艺技术，将增加折旧费、维修费、管理费、财务费等，各项费用合计 351 万元，项目利润总额 3019 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）0.8 年，财务内部收益率 95.2%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 4.1.2 经济效益分析指标汇总

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	1554
1.1	建设投资	万 元	1500
1.2	建设期利息	万 元	54
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0
3	项目总资金	万 元	1554
4	资金筹措	万 元	1554
4.1	自有资金	万 元	622

序号	项目名称	单 位	指标
4.2	建设贷款	万 元	932
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	3419
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	351
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	493
5.4	达产年利润总额	万 元	3019
5.5	达产年所得税	万 元	755
5.6	达产年净利润	万 元	2264
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	0.8
6.2	财务内部收益率	%	95.2
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	0.6

4.1.5 技术应用情况

（1）技术应用现状

近几年，“负能炼钢”技术在国内迅速发展得益于以下方面：一是炼钢工艺结构的优化，国内许多新建 100t 以上大中型转炉配备了煤气、蒸汽回收与余热发电等设施，为实现“负能炼钢”打下设备基础；二是“负能炼钢”工艺不断完善，多数钢厂已初步掌握“负能炼钢”的基本工艺。

我国大型转炉“负能炼钢”技术已日益成熟。宝钢等企业已达到国际领先水平；中型转炉已逐步实现；小型转炉也初步具备相应生产装备条件，通过加强煤气回收也可实现“负能炼钢”。1989 年宝钢 300t 转炉工序能耗达到-11kgce/t 钢，是国内最早实现的企业；1996 年宝钢实现全工序（包括连铸）负能炼钢，能耗为-1.12kgce/t 钢。

我国多数大、中型转炉已实现“负能炼钢”。2008 年举行的“国家重点大型耗能钢铁生产设备节能降耗对标竞赛”，有 16 家转炉钢厂参加比赛，共计 62 座 100t 以上大、中型转炉进行了对标。结果表明，国内多数大、中型转炉已实现“负能炼钢”。

（2）“十二五”预计推广情况

“负能炼钢”并未全部涵盖炼钢全工艺过程能量转换与能量平衡，不能作为整体评价炼钢工序能耗水平的唯一标准，但国际先进钢铁企业都把实现转炉“负能

炼钢”作为重要指标。中国转炉钢比例已超过 90%，推广“负能炼钢”对实现节能减排目标，保证钢铁工业健康发展具有重要意义。

综上，2010 年该技术的普及率已达到 30%，预计“十二五”期末推广比例将达到 65%。

（3）推广措施建议

① 降低铁钢比是转炉“负能炼钢”技术的主要指标。

据测算，铁钢比每提高 0.1，吨钢综合能耗上升约 20kgce/t（和电炉流程相比）。与世界其他先进产钢国相比，我国铁钢比高出 0.23~0.576；影响吨钢综合能耗约 80kgce/t。因此，从降低国内钢铁工业总能耗的观点出发，应把降低铁钢比作为衡量转炉“负能炼钢”的一个重要考核指标。

今后，在国内大力推广该技术的过程中，必须同时注重提倡降低铁水比，提高废钢比的工艺操作方针。在市场允许的条件下，转炉钢厂应抓紧建设废钢分类加工设施，改进装入制度，优化冶炼工艺，进一步提高炉料废钢比。由于转炉熔化废钢不需要增加外部热源，按国内铁前工序能耗 500kgce/t 计算，转炉炉料废钢比每增加 1%，可降低全流程吨钢综合能耗 5kgce/t，具有重要节能意义。

② 进一步降低钢铁料消耗。

钢铁料消耗是衡量转炉炼钢节能的一项重要指标。降低钢铁料消耗可以明显降低转炉生产能耗，节铁 10kg/t 相当于降低综合能耗 5kgce/t。通常，转炉炼钢过程中铁损约为 10%，主要是铁水中 C、Si、Mn 的氧化损失和炉渣、烟尘中铁的氧化损失。近几年，我国转炉钢厂的钢铁料消耗持续在 1085~1090kg/t，如何进一步降低钢铁料消耗，达到国际先进水平是国内转炉节能技术发展的重点方向。

4.1.6 技术知识产权情况

“负能炼钢”是一项综合性节能技术，实现的关键环节在于转炉煤气和蒸汽回收水平。具体知识产权情况分别参考 4.6 和 4.7。

4.2 炼钢连铸优化调度技术

4.2.1 技术介绍

（1）技术概况

炼钢生产过程是一个多段生产、多段运输、多段存储的离散和连续相混杂的大型高温生产过程。作为被加工对象的高温（铁水）钢水因钢种不同而工艺路径也不同；实施加工作业的各设备具有大型化、运行成本高、操作复杂（有周期作

业和相对连续作业方式)等特点;为保证生产连续性要求各工序衔接紧密,对生产到达时间、温度及成分均有较严格的要求;生产过程中穿插着天车运输、小车运输等复杂的运输条件。炼钢-连铸生产过程是现代钢铁企业的核心工序,其生产调度需要协调冶炼、精炼、连铸工序的生产节奏,考虑生产平衡,资源平衡及时间平衡问题。

炼钢生产调度和一般机械加工生产调度的最大区别在于钢铁生产工艺的特殊要求,即被加工的生产对象在高温下由液态(钢水)向固态(铸坯)的转化过程中,对其流动的连续性与流动时间(在各设备上的处理时间及工序设备之间的运输等待时间)都有极高的要求,总体上为无等待时间的工艺流程。炼钢生产调度的特点有:

- ◆ 间歇与连续方式相混杂的多阶段混合流程式生产过程。转炉、精炼设备为间歇作业方式,为提高作业效率、降低生产成本,连铸机要尽量连续作业。生产的总流程为炼钢-精炼-连铸,包括多个生产工序,各工序又存在着多个生产设备,生产过程为多阶段混合流程。

- ◆ 生产物流衔接紧密,具有准时制要求。连铸生产工艺要求在一个连续生产周期内浇铸的钢水成分和温度满足一定的工艺限制条件,必须协调间歇式和连续式作业工序的生产节奏,使工序间生产传递满足正确成分、温度和时间的要求,保证生产的持续性,即最大限度的连铸。

- ◆ 产品种类、规格繁多,结构复杂。铸坯产品的钢种、规格繁多,决定了其产品结构的复杂性。

- ◆ 炼钢-连铸生产调度受多个约束限制。

- ◆ 生产管理与控制多种信息、多种功能集成。

- ◆ 生产调度计划编制快速性与在线调度能力。

炼钢生产调度属混合流程车间有限等待时间调度问题,即为保证连铸生产的最大连续性和产品生产周期最短。按目标及过程中对主要生产对象的时间、温度、成分、质量的要求,根据钢厂的设备状况等资源条件,安排生产任务在各工序的设备分配和作业时段,确保生产的高效运行。

(2) 基本原理

生产调度是以满足一定约束条件(如作业间先后关系、完成时间以及资源能力等)为前提,对生产作业进行排序,依次序给生产作业分派资源和时间,并使某个执行目标达到最优,如完成时间最短、成本最低等。炼钢连铸生产调度计划是在批量计划的基础上,以炉次为最小计划单位,在满足生产工艺约束的前提下,追求综合评价函数(如等待时间、提前/拖期费用和总流程时间),最优情况下的一类排序问题。

(3) 关键技术

钢厂生产的复杂性、不确定性使许多方法仅能在一定程度上解决其生产和调度问题，因此，寻求有效研究钢厂生产和多目标、多约束的动态计划与调度问题的方法，是复杂流程工业生产中亟待解决的难点和关键。炼钢连铸优化调度存在以下几个难点：

① 建模复杂性。

首先，炼钢连铸生产包括炼钢、精炼、连铸机等主要环节，同时还有许多辅助环节，要进行有效建模，还必须考虑到各环节之间的协调。其次，在实际的生产调度系统中存在许多随机和不确定的因素，比如作业到达时间的不确定性、作业加工时间的随机性，这些也大大增加了建模的复杂性。

② 计算复杂性。

动态调度问题的求解受诸多因素的影响。首先，要处理的问题是多目标的。实际的炼钢连铸生产动态调度要考虑的目标有：钢水成分、温度和时间三个命中率的提高。其次，要处理的问题是约束的。炼钢连铸生产工艺过程必须在钢水熔化的状态下完成，每一炉次的等待时间少于工艺限定的时间。为了使炼钢连铸产量最大，连铸机尽量不断浇。这些构成调度问题的种种约束条件。当全面建模后，问题的规模也急剧增大。由于调度问题大都是 NP-hard 的组合优化问题，求解时间随着问题规模呈指数增长。为此，如何在模型全面化与有效求解之间权衡，是钢铁生产调度急需解决的问题。

③ 识别干扰困难。

在钢铁生产动态环境中，较难解决的一个问题便是干扰识别问题。面对各种随机干扰事件，如何将其快速有效地识别出来，是保证钢铁生产动态调度有效性的前提条件

4.2.2 技术适用条件

炼钢连铸优化调度技术主要适用于转炉、电炉、LF、RH、CAS-OB、连铸机等复杂生产工艺流程，技术的应用需要根据具体情况进行深入分析。

4.2.3 节能减排效果

炼钢连铸优化调度技术主要是通过降低钢包在炼钢-连铸区段中不同工位间传递时的无效等待作业所用时间和减少周转钢包数来实现。

以首钢第三炼钢厂为例，钢包实际周期时间为 126.3min（普碳钢）、154.4min（品种钢）。钢包按照 LD-Ar-CC 工艺路线运行时的平均“柔性时间”为 27.3min（普碳钢），钢包按照 LD-LF-CC 工艺路线运行时的平均“柔性时间”为 39min（品种钢），“柔性时间”所占比例分别为 21.6%和 23%，对钢包运行进行优化的潜力较

大。通过炼钢连铸优化调度技术，去除钢包在生产流程中转运的柔性时间，从而降低能耗。通过降低钢包/中间包的周期时间，普碳钢可以降低 21.6%的周转时间，品种钢可降低 23%的周转时间。

4.2.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：年产 100 万 t 钢，采用炼钢连铸优化调度技术。项目总投资 500 万元，其中建设投资 500 万元。项目投资估算详见下表。

表 4.2.1 炼钢连铸优化调度技术投资估算

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	500.00	100.0%
1.1	建筑费用	0.00	0.0%
1.2	设备费用	389.61	77.9%
1.3	安装费用	43.29	8.7%
1.4	其它费用	67.10	13.4%
2	建设期利息	0.00	0.0%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	500.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：按吨钢效益 2 元计算，年增加收入 200 万元。采用炼钢连铸优化调度技术，将增加折旧费、维修费、管理费等，各项费用合计 114 万元，项目利润总额 82 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）4.6 年，财务内部收益率 20.9%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 4.2.2 经济效益分析指标汇总

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	500
1.1	建设投资	万 元	500
1.2	建设期利息	万 元	0
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0

序号	项目名称	单 位	指标
3	项目总资金	万 元	500
4	资金筹措	万 元	500
4.1	自有资金	万 元	500
4.2	建设贷款	万 元	0
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	200
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	114
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	38
5.4	达产年利润总额	万 元	82
5.5	达产年所得税	万 元	20
5.6	达产年净利润	万 元	61
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	4.6
6.2	财务内部收益率	%	20.9
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	0

4.2.5 技术应用情况

（1）技术应用现状

从国内外研究发展状况看，20 世纪 60~70 年代，采用数学模型方法；80 年代，采用人工智能方法；90 年代，研发综合集成方法。数学模型存在“刚性有余，柔性不足”的问题，难以适应复杂多变的实际状况。人工智能方法柔性虽有改善，但受知识完备性、搜索效率等影响，有效性和灵活性仍受限。

为解决炼钢连铸计划调度优化问题中所遇到的困难，国外的大型钢铁企业已经认识到采用综合集成技术是一个有效的途径。因此 20 世纪 90 年代后，开始大力研发数学模型、人工智能和人机交互式的协调型生产计划与调度编制技术。国外的许多钢铁企业致力于建设集成化的计算机生产管理系统，其中包括核心模块即生产调度系统，使生产管理合理化、在线化、集成化，能够对生产过程中物质流、信息流和能源流进行综合管理。

（2）“十二五”预计推广情况

炼钢-连铸生产计划调度系统是钢铁企业制造执行系统的重要组成部分，在

企业的生产管理中起着承上启下的作用,通过它来决定炼钢连铸区域的加工顺序和作业开始时间。随着企业生产规模的不断扩展,炼钢连铸区域的设备越来越多,冶炼的钢种也越来越多,目前的计算机调度系统将很难适应将来调度的需求,因此在“十二五”期间,研究和开发炼钢-连铸优化调度系统就显得十分必要。2010年,该技术普及率已有 40%,预计“十二五”期末推广比例将达到 70%。

4.2.6 技术知识产权情况

有关炼钢连铸优化调度技术的发明专利与实用新型专利列举如下表。

表 4.2.3 有关炼钢连铸优化调度技术的发明专利

序号	技术名称	公开(公告)号	申请(专利权)人	申请日期
1	一种炼钢连铸生产在线动态调度方法	CN1614618	冶金自动化研究设计院	2004.10.25
2	一种通过计算机辅助指导炼钢、连铸供钢节奏的调度模型	CN101093522	鞍钢股份有限公司	2006.06.19
3	一种炼钢连铸生产在线多模式时间优化调度方法	CN101520656	东北大学	2008.11.21
4	基于时间窗的炼钢-精炼-连铸生产过程的调度方法及装置	CN101739006A	东北大学	2009.11.30
5	基于混合智能优化算法的炼钢-连铸生产作业计划与实时调度优化方法与系统	CN101770615A	重庆大学	2010.01.25

4.3 高效连铸技术

4.3.1 技术介绍

(1) 技术概况

高效连铸技术指连铸机实现高拉速、高作业率、高连浇率及低拉漏率生产高温无表面缺陷连铸坯的技术。高效连铸通常定义为五高:即整个连铸坯生产过程高拉速、高质量、高效率、高作业率、高温铸坯。随着该技术内涵的不断扩大,高经济效益(大幅度降成本)这一项最直接的指标和高自动控制也逐渐被纳入近来。目前,国内的方坯高效连铸(以 150mm×150mm 方坯为例),应在单流年产 15~20 万 t 合格普碳钢铸坯的水平,板坯应在 100~150 万 t 合格铸坯的水平。其

铸坯每吨的成本也在逐年降低。连铸机的全程自动控制水平在逐年提高。

(2) 基本原理

高效连铸技术是一项系统的整体技术，实现高效连铸需要工艺、设备、生产组织和管理、物流管理、生产操作以及与之配套的炼钢车间各个环节的协调与统一。

不同类型的连铸机，高效化技术的核心也不同。如果说提高拉速是小方坯连铸机高效化的核心，那么板坯连铸机高效化的核心就是提高连铸机作业率。这是因为板坯连铸机的拉速受转炉和连铸机匹配条件，以及冶金长度的限制不可能有较大变化。另外，高拉速所造成的漏钢危害对板坯连铸机的影响远远高于小方坯连铸机。

(3) 关键技术

① 保证适宜的钢水温度、最佳的钢水成分。保证其稳定性的连铸相关配套技术。

② 供应清洁的钢水和良好流动性钢水的连铸相关技术。

③ 连铸关键技术。高冷却强度、导热均匀的长寿结晶器（包括结晶器整体结构、精密水套、导热均匀的曲面铜管等）。

④ 高精度、长寿的结晶器振动装置。这是高效连铸关键技术之一，其中包括振动装置硬件的优化及结晶器振动形式、振动工艺参数的软件优化。

⑤ 保护渣技术。保护渣的性能需要与拉速相匹配，当拉速提高后，保护渣地黏度等指标要相应改进，保证用量不减或在允许范围内减少，以保证铸坯的高质量。因此，连铸高效化后必须有低黏度、低熔点、高熔化速度、大凝固系数的保护渣。保护渣技术是连铸高效化的一项关键技术。

⑥ 结晶器钢水液面控制技术。拉速越高，结晶器液面波动越大。液面波动大易产生卷渣，及卷入夹杂物造成铸坯缺陷。目前，国内液面自动控制技术趋于成熟，可使液面稳定在 $\pm 3\text{mm}$ 左右。该技术对高效连铸也是不可缺少的。

⑦ 二次冷却的硬件和软件技术。硬件要求尽量做到冷却均匀（无障碍喷淋）且可方便调节。目前由于市场对合金钢、品种钢及普碳钢质量的高标准要求，新建连铸机趋向于增大半径，板坯趋向于将全弧形改造为直弧形连铸机，其目的就是使从结晶器到二冷段形成全方位的对称凝固或接近对称凝固过程，以此获得高质量铸坯。近年来，板坯和方坯连铸机二冷动态自动控制喷水冷却的软件有了较快发展，更具实用性、适用性，针对各钢种、不同拉速和温度变化都可及时调整水量。

⑧ 连续矫直技术。根据铸坯带液芯矫直机理，选择三次抛物线作为连铸机弧形段和直线段的连续矫直曲线，在高效连铸中起到了良好效果。目前倾向于采

用轻压下技术，以减小偏析、缩孔，提高铸坯质量。

⑨ 其他技术。铸坯支撑及强化冷却技术、保护浇注技术、钢包技术、中间包技术、电磁搅拌技术、自动开浇技术、低温浇注技术、结晶器专家系统、扇形段动态软压下技术、质量判定技术等。

4.3.2 技术适用条件

高效连铸技术适用于所有类型的连铸机，无论是现有连铸机改造还是新建连铸机，均可采用该技术。目前我国绝大多数连铸机均不同程度地采用了高效连铸技术，只是装备水平和达到的效果有差异而已。

4.3.3 节能减排效果

（1）节能效果

连铸机实现高效化后，通过提高铸机作业率和生产效率，结合连铸坯的高温热装和热送，单位铸坯相应的直接能耗和各种物料消耗将会降低，从而实现直接节能和间接节能。比相同生产能力的常规连铸机提高效率 60%~100%，节能 20%。

（2）环保效果

高效连铸的环保效果体现在两方面。首先，通过提高连铸机的生产效率和实现热装热送降低单位铸坯的能耗，间接降低了相关废弃物的排放；其次，提高连浇率和铸机作业率，减少了耐火材料的消耗，也间接减少了固体废弃物的排放，提高了资源的利用效率。

4.3.4 成本效益分析

（1）投资估算

根据工程案例，高效连铸技术既可用于对现有连铸机的改造，也可以用于新建连铸机。以对现有单流常规板坯连铸机进行动态配水和动态轻压下改造——典型的高效连铸改造为例，进行增量投资及成本效益分析。

根据大量工程案例可知，该技术增量建设投资约 14.00 元/t 坯。

高效连铸技术增量总投资 14.13 元/t 坯，其中建设投资 14.00 元/t 坯，建设期利息 0 元/t 坯（建设资金全部自筹），铺底流动资金 0.13 元/t 坯。投资估算详见表 4.3.1。

表 4.3.1 增量总投资估算

序号	技术名称	总投资（元/t 坯）
1	建设投资	14.00
1.1	建筑费用	1.20

序号	技术名称	总投资（元/t 坯）
1.2	设备费用	10.67
1.3	安装费用	1.47
1.4	其他费用	0.67
2	建设期利息	0.00
3	铺底流动资金	0.13
4	技术总投资	14.13

（2）经济效益分析

高效连铸技术主要效益：提高品种质量和节能收益。以上各项增量收益合计：5 元/t 坯。同时增加了固定资产折旧、修理等制造费用，上述各项费用合计 1.55 元/t 坯（达产年）。

经测算，达产年增量利润总额为 3.77 元/t 坯，投资内部收益率 31.08%（税后），投资回收期（含建设期 2 个月）4.2 年。经济评价总表见表 4.3.2。

表 4.3.2 高效连铸技术经济效益评价指标

序号	项 目	单位	指 标
1	总投资	元/t 坯	14.13
1.1	建设投资	元/t 坯	14.00
1.2	建设期利息	元/t 坯	0.00
1.3	铺底流动资金	元/t 坯	0.13
2	生产追加流动资金	元/t 坯	0.31
3	总资金	元/t 坯	14.44
4	资金筹措	元/t 坯	14.44
4.1	自有建设资金	元/t 坯	14.00
4.2	建设期利息	元/t 坯	0.00
4.3	自有流动资金	元/t 坯	0.44
4.4	建设资金贷款	元/t 坯	0.00
4.5	流动资金贷款	元/t 坯	0.00
5	达产年经济效益指标		
5.1	收益（不含税）	元/t 坯	5.00
5.2	不含税总成本费用	元/t 坯	1.55

序号	项 目	单位	指 标
5.3	销售税金及附加	元/t 坯	0.08
5.4	利润总额	元/t 坯	3.37
5.5	所得税	元/t 坯	0.84
5.6	税后利润	元/t 坯	2.53
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（含建设期）	年	4.2
6.2	投资内部收益率	%	31.08

4.3.5 技术应用情况

（1）技术应用现状

到 2010 年底，我国建成投产的连铸机绝大多数已采用不同水平的高效连铸技术，新建连铸机则 100%采用高效连铸技术。目前，该技术普及率达到 75%。

（2）“十二五”预计推广情况

预计“十二五”期末推广比例将达到 85%。

4.3.6 技术知识产权情况

由于高效连铸技术涉及范围较广，现列举典型的企业。目前我国拥有高效连铸技术的典型企业有：中国冶金科工集团有限公司、中国中钢集团公司、武汉大 西洋连铸设备工程有限公司、上海重矿连铸技术工程有限公司。国外拥有知识产权的公司如下：SMS 集团公司、达涅利公司、西门子-奥钢联公司。

4.4 薄板坯连铸技术

4.4.1 技术介绍

（1）技术概况

薄板坯连铸技术是近终形连铸技术之一，与工艺成熟、控制手段完善的热带连轧技术结合，形成了生产热轧板卷的薄板坯连铸工艺。与传统工艺流程相比，该工艺将过去的炼钢厂和热轧厂有机压缩、组合，在节约投资、缩短生产周期、提高成材率、节约能源和降低生产成本等方面有明显优势。

薄板坯连铸工艺和传统工艺相比，关键在于突破了传统的工艺概念，采用了许多新技术、新装备。因众多的单位参与研究开发，形成了各具特色的薄板坯连铸工艺。尽管各自的工艺设计路线和设备不同，但最终目标都是通过结构紧凑、

热送热装、连铸连轧的技术来提高经济效益。典型的薄板坯连铸工艺流程由炼钢（电炉或转炉）—炉外精炼—薄板坯连铸—连铸坯加热—热连轧等五个单元工序组成。

（2）基本原理

应用先进的近终形连铸技术，将铸出的板坯厚度减薄到某一个临界区间，省去传统的热轧板带机组中的粗轧机架，在连铸机和连轧机之间给予较小的热量补充，直接通过精轧机组轧成热轧带卷。使从钢液进入结晶器到热轧卷取完毕的时间缩短到 15~30min。典型薄板坯连铸工艺流程见图 4.4.1（以 CSP 工艺为例）。

（3）流程图

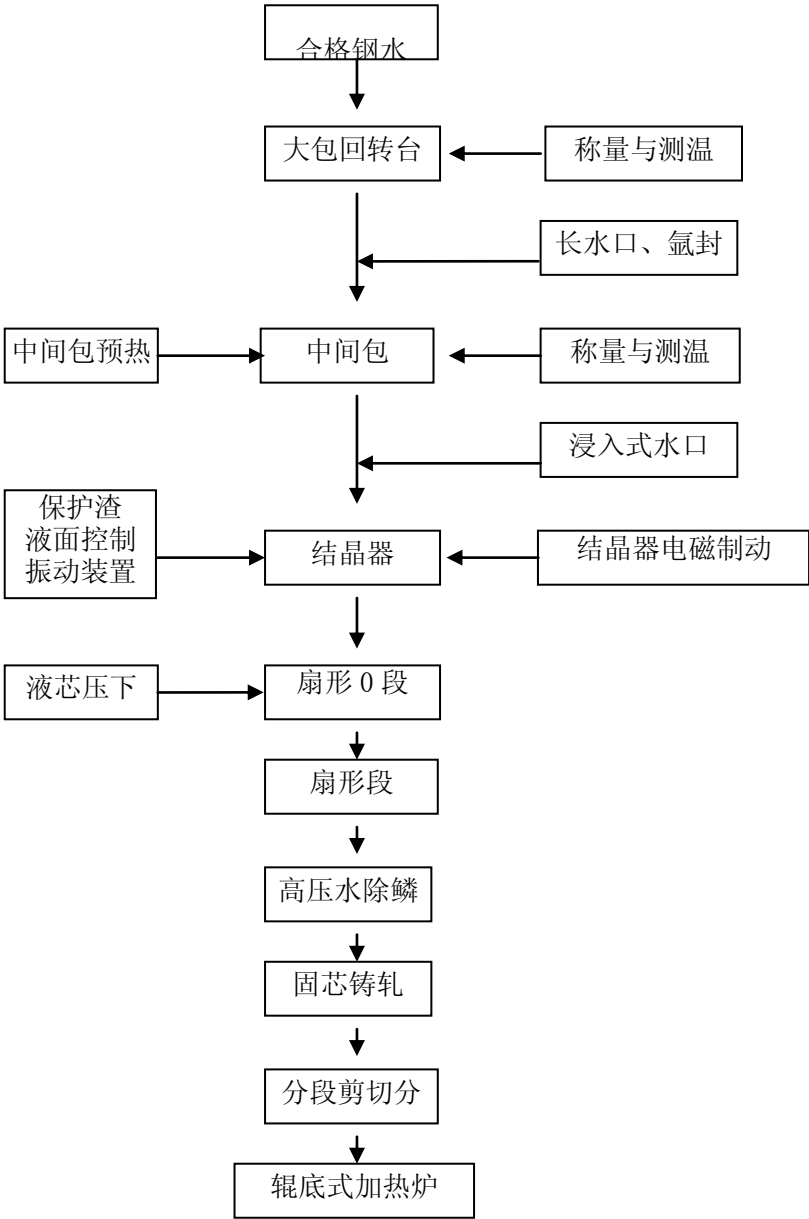


图 4.4.1 典型薄板坯连铸工艺流程

4.4.2 技术适用条件

薄板坯连铸技术最初是为电炉短流程钢厂生产板带而开发的。鉴于它在技术和经济效益方面显示出的巨大优势，逐渐受到了许多大型钢铁联合企业的重视，目前已成功嫁接到传统的高炉——转炉长流程钢铁生产工艺中。

4.4.3 节能减排效果

（1）节能效果

薄板坯连铸技术的节能效果主要体现在后步轧制工序，连铸机和热连轧机之间，仅配置均热炉补充较小的热量，直接由辊道送入精连轧机组，省去了传统热连轧机板带机组中的粗轧机组，最大限度的实现了节能。

根据相关研究，从钢水到精轧机组出卷，薄板坯连铸生产（以 CSP 为例），能耗仅为 105kWh/t（将所有能耗折算为电量），常规板带生产流程（600℃热装）为 308kWh/t，常规板带生产流程（20℃冷装）为 463kWh/t，并且成材率提高 11%~13%，可见薄板坯连铸流程节能效果显著。

（2）环保效果

薄板坯连铸技术和连轧技术结合，减少能源消耗约 70%，直接和间接改善了生态条件（减少 SO₂、CO₂、NO_x 排放量），工序紧凑用水少，布置紧凑占地少。

4.4.4 成本效益分析

（1）投资估算

与常规板坯连铸连轧技术相比，薄板坯连铸技术的吨坯建设投资比常规板坯连铸连轧技术高 30 元/t 坯。将薄板坯连铸技术与常规板坯连铸连轧技术相比较，对增量部分进行投资及成本效益分析。

与常规板坯连铸连轧技术相比增量总投资 33.41 元/t 坯，其中建设投资 30.00 元/t 坯，建设期利息 1.35 元/t 坯（建设期贷款比例 60%），铺底流动资金 2.06 元/t 坯。投资估算详见下表。

表 4.4.1 增量总投资估算

序号	技术名称	总投资（元/t 坯）
1	建设投资	30.00
1.1	建筑费用	0.00
1.2	设备费用	23.40
1.3	安装费用	5.40
1.4	其他费用	1.20

序号	技术名称	总投资（元/t 坯）
2	建设期利息	1.35
3	铺底流动资金	2.06
4	技术总投资	33.41

（2）经济效益分析

薄板坯连铸技术与常规板坯连铸技术相比，主要效益体现在轧钢工序。例如，减少钢坯损耗、轧辊消耗以及降低能耗、电耗等能源消耗，以上各项收益合计：58.48 元/t 坯。薄板坯连铸技术与常规板坯连铸技术相比，增加了固定资产折旧、修理等费用以及管理费、财务费等费用，上述各项费用合计 47.45 元/t 坯（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 10.67 元/t 坯，贷款偿还结束后年利润总额 11.37 元/t 坯，投资内部收益率 28.34%（税后），投资回收期（不含建设期 1.5 年）1.6 年。经济评价总表见下表。

表 4.4.2 技术经济评价指标

序号	项 目	单位	指 标
1	总投资	元/t 坯	33.41
1.1	建设投资	元/t 坯	30.00
1.2	建设期利息	元/t 坯	1.35
1.3	铺底流动资金	元/t 坯	2.06
2	生产追加流动资金	元/t 坯	6.49
3	总资金	元/t 坯	4.80
4	资金筹措	元/t 坯	38.20
4.1	自有建设资金	元/t 坯	13.36
4.2	建设期利息	元/t 坯	9.96
4.3	自有流动资金	元/t 坯	1.35
4.4	建设资金贷款	元/t 坯	20.04
4.5	流动资金贷款	元/t 坯	4.80
5	达产年经济效益指标		
5.1	收益（不含税）	元/t 坯	76.28
5.2	不含税总成本费用	元/t 坯	45.26

序号	项 目	单位	指 标
5.3	销售税金及附加	元/t 坯	1.24
5.4	利润总额	元/t 坯	29.78
5.5	所得税	元/t 坯	7.44
5.6	税后利润	元/t 坯	22.33
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（含建设期）	年	3.1
6.2	投资内部收益率	%	28.34
6.3	贷款偿还期（含建设期）	年	3.83

4.4.5 技术应用情况

（1）技术应用现状

自美国纽柯公司 1989 年开发成功并投入工业化生产以来，世界各地尤其是中国建设了大量薄板坯连铸厂，全球总生产能力约可达到 1.9 亿 t。目前，薄板坯连铸生产工艺（CSP、ISP、FTSR、CONROLL、TSP、CPRD）中，推广应用最多的是 CSP 工艺，由西马克公司开发。目前已经投产或在建的生产线达 29 条，形成约 5000 万 t 的年生产能力。

第一条薄板坯连铸生产线（TSCR）于 1999 年在珠江钢厂建成投产。此后国内多家钢铁企业相继建设了各种类型的薄板坯连铸生产线。到 2010 年底，我国建成投产的薄板坯连铸线已有珠钢、唐钢、邯钢、涟钢、包钢、本钢、济钢、鞍钢、武钢等 14 条生产线，产能接近 4000 万 t，占世界能力的 1/3 多。

（2）“十二五”预计推广情况

2010 年，该技术普及率约为 15%；预计“十二五”期末推广比例将达到 20%。

4.4.6 技术知识产权情况

目前，我国共有 2 家企业拥有薄板坯连铸知识产权：中国冶金科工集团有限公司、鞍山钢铁集团公司。国外拥有知识产权的公司如下：美国纽柯钢铁公司、SMS 集团公司、达涅利公司、西门子-奥钢联公司。

4.5 转炉烟气高效利用技术

4.5.1 技术介绍

（1）技术概况

烟气能量的高效转换与回收利用是转炉工序能耗实现“负值炼钢”的主要途径。烟气能量回收主要以烟气显热和化学能转换为中、低热值的转炉煤气，中、低压蒸汽两种方式并加以回收利用。

转炉炼钢过程中由于 C-O 反应产生大量富含可燃气体（CO）的烟气，吨钢可达 200Nm^3 ，烟气主要含有 CO、CO₂、O₂ 和基本成分为氧化铁的尘粒，烟气温度为 $1550\sim 1700^\circ\text{C}$ ，CO 含量为 $40\%\sim 80\%$ ，含尘量为 $150\text{g}/\text{m}^3$ 。这部分烟气带出大量潜热和显热，这些有害气体若直接外排，会严重污染大气环境。在治理的同时，尽可能回收烟气中的热能和化学能，以降低炼钢工序能耗。

（2）基本原理

转炉一次烟气为高温烟气，在与二次烟气混合降温进入除尘系统前，采用汽化冷却烟道或余热锅炉对烟气进行降温，同时回收大量蒸汽。利用余热锅炉回收这部分蒸汽的物理热，蒸汽回收量 $\geq 80\text{kg}/\text{t}$ 钢。转炉余热锅炉生产蒸汽既可以供饱和蒸汽发电设施，也可用于精炼。

（3）工艺流程

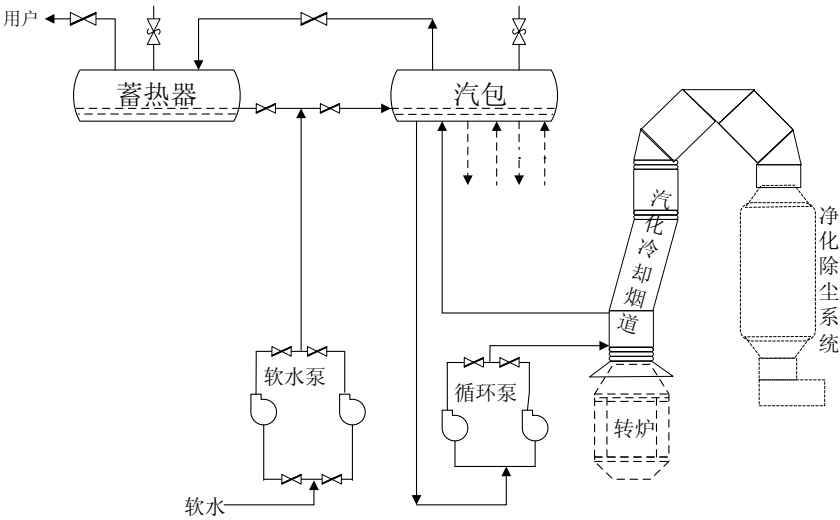


图 4.5.1 转炉烟气余热回收工艺流程

（4）关键技术

转炉余热锅炉（汽化冷却系统）是冷却烟气，回收余热的重要设备。影响转炉蒸汽回收的因素很多，常见的有除氧器系统、泵组系统、余热锅炉系统和蓄能器系统等因素，任何一个子系统发生问题都会迅速导致蒸汽回收量减少乃至恶性事故发生。因此，必须系统分析问题、提前预防、及时消除隐患，这样才能提高蒸汽余热回收水平。

4.5.2 技术适用条件

该技术适用于钢铁行业新建和现有企业改造中的转炉一次烟气余热回收。

4.5.3 节能减排效果

蒸汽回收量 80~100kg/t 钢。回收的蒸汽压力波动在 0.8~1.2MPa，可以节约电能和标煤，减少 CO、SO₂ 等有害气体的排放量。

4.5.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：1 座 120t 转炉，采用转炉烟气高效利用技术。项目总投资 2600 万元，其中建设投资 2500 万元，建设期利息 100 万元。项目投资估算详见下表。

表 4.5.1 转炉烟气高效利用技术投资估算

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	2500.00	96.2%
1.1	建筑费用	515.31	19.8%
1.2	设备费用	1240.27	47.7%
1.3	安装费用	408.93	15.7%
1.4	其它费用	335.50	12.9%
2	建设期利息	100.00	3.8%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	2600.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：可回收蒸汽 12.6 万 t，年增加收入 753 万元。采用转炉烟气高效利用技术，将增加动力费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 664 万元，项目利润总额 81 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）6.5 年，财务内部收益率 12.3%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 4.5.2 经济效益分析指标汇总

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	2600
1.1	建设投资	万 元	2500
1.2	建设期利息	万 元	100

序号	项目名称	单 位	指标
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0
3	项目总资金	万 元	2600
4	资金筹措	万 元	2600
4.1	自有资金	万 元	1040
4.2	建设贷款	万 元	1560
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	753
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	664
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	83
5.4	达产年利润总额	万 元	81
5.5	达产年所得税	万 元	20
5.6	达产年净利润	万 元	61
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	6.5
6.2	财务内部收益率	%	12.3
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	4.9

4.5.5 技术推广应用情况

（1）技术应用现状

我国转炉钢厂转炉烟气余热从 20 世纪 70 年代开始由水冷烟罩、烟道改为汽化冷却方式回收利用蒸汽，但大多数以 $\leq 12\text{kg/cm}^2$ 的低压饱和蒸汽方式回收，并入企业的动力管网利用。少数钢厂采用 $25\sim 45\text{kg/cm}^2$ 的中压回收蒸汽，却要通过减压才能并入公司蒸汽管网回收利用，浪费了大量能源。由于大部分属于低品质蒸汽的低用途回收利用，用户源较少。一些企业还经常将回收的蒸汽再放散，造成更大的浪费。20 世纪 90 年代开始，一些钢厂将回收的饱和蒸汽经加热成过热蒸汽，用作本厂 VD、RH 蒸汽喷射泵的汽源，富余部分并入公司管网，取得了可观的经济效益。我国转炉冶炼蒸汽回收量还较低，一般 $< 80\text{kg/t}$ 钢，与日本普遍 $> 100\text{kg/t}$ 钢的水平，还有较大差距。

目前，国内钢铁企业为了有效利用转炉炼钢回收的余热，普遍采用将供热蒸

汽与余热回收蒸汽并网，实现转炉回收蒸汽并全部利用，不再由外部锅炉向炼钢厂供蒸汽。转炉蒸汽用于向真空精炼的蒸汽喷射泵供汽已较普遍，此外还可用于发电。济南钢铁集团总公司一炼钢转炉 4.5MW 余热发电站，是中国第一座利用转炉烟道饱和蒸汽发电的电站，该电站于 2007 年投运，目前运行良好。该技术目前在河北省燕山钢铁公司、河北天柱钢铁公司、河北瑞丰钢铁公司等应用。2010 年该技术在国内外普及率达到 15%。

（2）“十二五”预计推广情况

目前主要问题是回收水平差距巨大，利用方式的价值评估存在着很大的分歧，有许多值得研究的地方。例如，烟气动能和转炉煤气携带的余热还没有相应的转换与回收利用的方法；低品质转炉蒸汽用于发电如何提高效率；一些技术与装备的优化等问题还处于研发阶段等。建议在“十二五”期间，对以上方面开展全面研究。预计转炉烟气高效利用技术在“十二五”期末推广比例将达到 55%。

（3）推广措施和建议

烟气物理热及转炉煤气在回收过程被燃烧部分所放出的化学热是产生蒸汽的热源，因此煤气和蒸汽回收量之间应当有一个合理的组合数值，这是各转炉钢厂在制订转换与回收目标时应考虑的问题。

4.5.6 技术知识产权情况

有关转炉烟气高效利用技术的发明专利有 16 条，实用新型专利 11 条。以下列出 5 条发明专利和 2 条实用新型专利。

表 4.5.3 有关转炉烟气高效利用技术知识产权情况

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	转炉烟气处理方法	CN1966730	山东省冶金设计院	2005.11.15
2	AOD 转炉烟气余热回收装置	CN101476015	中冶京诚工程技术有限公司	2008.01.02
3	精炼转炉烟气处理回收工艺	CN101413045	中国重型机械研究院	2008.12.04
4	转炉烟气干法除尘及余热回收装置及其方法	CN101875992A	钢铁研究总院	2009.12.23
5	转炉烟气高温袋式除尘和回收及蒸汽二次回收系统	CN101736117A	上海宝钢工程技术有限公司	2009.12.17
6	一种转炉烟道余热回收装置	CN2700726	济钢股份	2004.02.18

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
7	转炉烟道余热饱和蒸汽发电方法及其系统设备	CN101059085	济钢股份	2007.08.24

4.6 转炉烟气干法除尘技术

4.6.1 技术介绍

（1）技术概况

转炉烟气干法除尘技术是中国钢铁工业协会提出的“三干”与“三利用”技术之一，“三干”技术，即干熄焦、高炉煤气干法除尘、转炉烟气干法除尘；“三利用”技术，即水的综合利用、以副产煤气（煤炉、高炉、转炉）为代表的二次能源利用、以高炉渣、转炉渣为代表的固体废弃物综合利用），被认为是我国钢铁工业节能环保的发展方向。

采用转炉烟气干法除尘技术，不消耗水资源，同时降低除尘风机的电力消耗，除尘灰经热压块后返回转炉用于炼钢，流程短且污染物排放少。结合干法烟气除尘处理将转炉除尘灰回收压块或制成化渣剂再用于转炉生产，可提高转炉产量1%~2%，煤气及外排烟气粉尘小于 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。对降低转炉工序能耗，以及实现炼钢工序“负能炼钢”有重要促进作用。

（2）技术原理

高温烟气经汽化冷却烟道间接冷却后，再用蒸发冷却器进行直接冷却，冷却过程是向通过蒸发冷却器内的烟气喷入雾化水。喷入的水量要准确地随炼钢生产过程中产生的热气流的焓而定，将烟气冷却到 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。经由煤气管道引入静电除尘器进入煤气切换站，合格煤气经进一步冷却后进入煤气回收系统，不合格煤气经放散塔点火放散，外排废气含尘浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

（3）流程

约 1550°C 的转炉烟气在 ID 风机的抽引作用下，经过烟气冷却系统（活动烟罩、热回收装置及汽化冷却烟道），使温度降至 $800\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 后进入蒸发冷却器。蒸发冷却器内有若干个双介质雾化冷却喷嘴，对烟气进行降温、调质、粗除尘，烟气温度降低到 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。同时约有 40% 的粉尘在蒸发冷却器的作用下被捕获，形成的粗颗粒粉尘通过链式输送机输入粗灰料仓。经冷却、粗除尘和调质后的烟气进入圆筒形静电除尘器，烟气经静电除尘器除尘后含尘量 $\leq 10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。静电除尘器收集的细灰，经过扇形刮板器、底部链式输送机和细灰输送装置排到细烟尘仓。经过静电除尘器精除尘的合格烟气经过煤气冷却器降温到 $70\sim 80^{\circ}\text{C}$ 后进入煤气柜，氧含量 $> 2\%$ 的煤气通过火炬装置放散。整套系统采用自动控制，与

转炉的控制相结合。该技术流程见图 4.6.1。

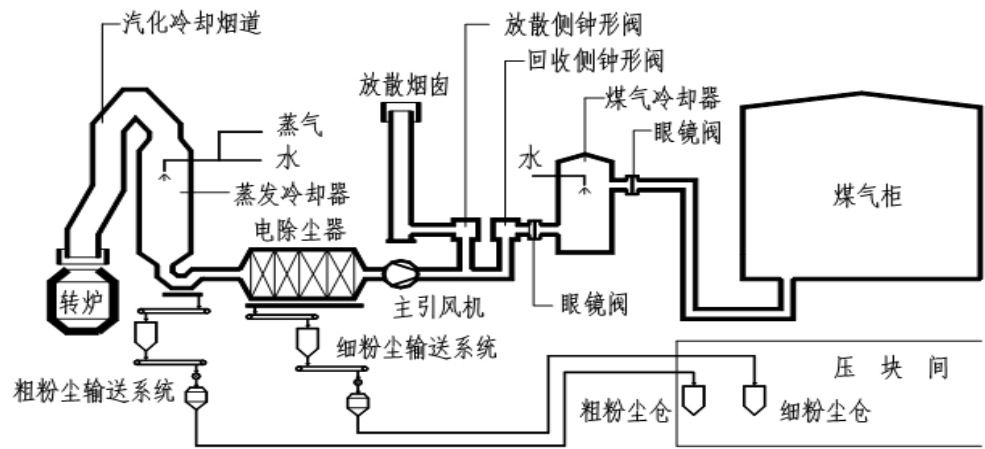


图 4.6.1 转炉烟气干法除尘技术流程

（4）关键技术

① 蒸发冷却器。

蒸发冷却器是主要技术之一，要求通过雾状喷水直接冷却烟气，并根据烟气含热量精确调节喷水量，所喷的水完全变成蒸汽。转炉冶炼时，含有大量 CO 的高温烟气冷却后才能满足干法除尘系统的运行条件。蒸发冷却器入口的烟气温度为 850~1200℃，出口温度约为 200℃才能达到静电除尘器的条件。为此，采用若干个双流喷嘴调节最佳水量降温。双流喷嘴的水量可根据进入蒸发冷却器内的干燥气体的热量随时调整。通入的蒸汽使水雾化成细小的水滴，水滴受烟气加热被蒸发，在汽化过程中吸收烟气的热量，从而降低烟气温度。

蒸发冷却器除了冷却烟气外，还可依靠气流的减速以及进口处水滴对烟尘的润湿将粗颗粒的烟尘分离出去，达到除尘的目的。灰尘聚积在蒸发冷却器底部由链式输送机输出。

此外，还有对烟气进行调节改善的功能，即在降低气体温度的同时提高其露点，改变粉尘比电阻，有利于在静电除尘器中将粉尘分离出来。除了烟气冷却和调节以外，占烟气中总灰尘含量约 40%的粗尘灰也能在蒸发冷却器中进行收集。

② 静电除尘器系统。

静电除尘器为圆筒形静电除尘器，也是转炉煤气干法除尘系统中的关键除尘设备之一。部件包括：电除尘器、细灰输送系统、防爆安全阀和电源等。

③ ID 风机。

根据转炉的工况变化调节风机转速。主要部件为：风机本体、变频电机和冷却风机。

④ 切换站和煤气冷却器。

切换站用于煤气回收和放散的快速切换，通过同风机配合工作，使系统压力变化平稳。气体成分控制是在规定的时间内根据烟气成分分析，确定切换站的动作。当烟气中 CO 含量大于规定值 30%、氧气含量小于规定值 2%时，回收烟气阀打开。烟道转换所用阀门配有调节元件，流线型通道形状调整膜，便于在烟气切换时平衡系统的压力，防止在转炉口烟气捕集点发生喘振现象。

煤气冷却器在静电除尘器后主要起洗涤降温作用，把经过静电除尘器除尘的合格烟气降到合格温度后进入煤气柜。煤气冷却器内上部装有两层喷水系统，合格烟气从煤气冷却器下部进入顶部排出，从而达到降温作用。

⑤ 放散烟囱。

将不合格煤气在高空燃烧排放。

⑥ 控制系统。

控制系统共分三个控制回路：蒸发冷却器的温度控制、风机流量控制、切换站气体成分控制。整个控制系统的关键是静电除尘器的控制，其性能特点是根据吹炼、停吹和振打等三种工作状态，进行火花跟踪控制、间歇供电、反电晕检测、峰值跟踪控制并提供各种保护功能。按设定好的程序对电压和电流进行调节，以发挥最大的电流效率，确保安全生产。

4.6.2 技术适用范围

该技术适用于大中小型转炉炼钢企业的所有新、改和扩建转炉炼钢厂。

4.6.3 节能减排效果

烟尘排放浓度 $\leq 10\text{mg/m}^3$ ，净化后的煤气含尘量平均 $\leq 3\sim 5\text{mg/Nm}^3$ 。且相比于湿法：干法系统循环水量是湿法的 28%；耗水量约 0.05t/t 钢，是湿式除尘系统的 1/5 左右；整个系统实现了污水零排放；总电负荷是湿法的 52%；可多回收转炉煤气 15~30 m^3/t 钢。

4.6.4 成本效益分析

（1）投资估算

以 1 座 250t 转炉，年产 300 万 t 钢为例，采用“湿式除尘”改“干式除尘”技术。项目总投资 7271 万元，其中建设投资 7000 万元，建设期利息 271 万元。

项目投资估算详见下表。

表 4.6.1 采用转炉干法除尘技术投资估算

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	7000.00	96.3%
1.1	建筑费用	1442.86	19.8%
1.2	设备费用	3472.75	47.8%
1.3	安装费用	1144.99	15.7%
1.4	其它费用	939.39	12.9%
2	建设期利息	271.00	3.7%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	7271.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：“干式除尘”与“湿式除尘”对比，年节约电量 $1500 \times 10^4 \text{kWh}$ ，节约水量 900 万 t，回收含铁粉尘 3.2 万 t，增加收入 4489 万元。采用转炉干法除尘技术，将增加蒸汽费、制造费、财务费等，各项费用合计 2603 万元，项目利润总额 1823 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）3.3 年，财务内部收益率 26.5%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 4.6.2 经济效益分析指标汇总

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	7271
1.1	建设投资	万 元	7000
1.2	建设期利息	万 元	271
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0
3	项目总资金	万 元	7271
4	资金筹措	万 元	7271
4.1	自有资金	万 元	2908
4.2	建设贷款	万 元	4363
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	4489
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	2603

序号	项目名称	单 位	指标
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	632
5.4	达产年利润总额	万 元	1823
5.5	达产年所得税	万 元	456
5.6	达产年净利润	万 元	1368
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	3.3
6.2	财务内部收益率	%	26.5
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	2.5

4.6.5 技术推广应用情况

（1）技术应用现状

20 世纪 80 年代，转炉干法除尘技术开始在德国、奥地利、韩国、澳大利亚、法国、卢森堡等国得到应用，此后美、英、日也开始采用，应用总数已达 40 套以上。

1994 年，上海宝钢 4、5 号 250t 转炉第一次全套引进国外干法除尘系统，并于 1998 年 4 月 4 日顺利投入运行。此后，国内钢厂采用转炉干法除尘工艺的步伐有所加快。经过几十年的发展，我国现有 20 多座转炉采用转炉煤气干法净化回收技术。2003 年，莱芜钢铁公司引进 3 套 120t 转炉煤气干法净化回收系统。分别于 2004 年 7 月、2004 年 8 月和 2005 年 1 月投入运行。目前，3 套系统净化后的烟气含尘量平均在 $6\sim 9\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，远低于国家规定的排放指标（ $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ），且煤气可直接供用户使用。2004-2005 年，包头钢铁公司建成了两套 100t 转炉煤气干法除尘系统，运行良好。此外，新建 4 号和 5 号两台 150t 转炉干法除尘与煤气回收系统已于 2010 年 10 月 20 日顺利投产，并均已实现煤气回收。这是国内首台 150t 大转炉干法除尘与煤气回收技术与设备完全实现国产化的系统，包括工艺设备和自动控制技术。

干法除尘技术一直是我国清洁生产推广技术，因为存在多方面的问题一直进展不快。近几年，随着国家节能减排、节水力度加大，有加速的趋势。但因为存在较多的问题仍然还限制其快速推广，甚至未达到排放/回收指标。例如，关键设备未实现国产化、总投资偏高、运行不够稳定、对操作和维修人员的要求较高等问题。2010 年该技术普及率已达到 20%。

另外，阻碍转炉干法煤气净化回收系统应用的因素还有：国内系统几乎均由国外公司技术集成，提供关键设备；国内设计单位只承担工厂设计和部分设备转

化设计；每个系统的投资都比较大，外商联手技术封锁，不提供关键设备，以及服务不及时、不到位，服务费用昂贵，备件采购周期长等。

（2）“十二五”预计推广比例

我国现有 600 多座转炉，目前广泛采用的转炉湿式除尘系统。为了实现 2020 年转炉工序“负能炼钢”的长远规划，以及满足“十二五”更苛刻的排放总量，炼钢烟气干法除尘符合国家的产业政策，从湿法向干法发展是大势所趋。因此，预计转炉烟气干法除尘技术在“十二五”期末推广比例将达到 40%。

（3）推广措施建议

转炉烟气干法回收技术被认为是今后的发展趋势，但湿法向干法的转变不会在短时期内实现，将会有有一个较长的过渡阶段。目前待解决的主要问题有：降低泄爆次数、供电配电系统以及各种备件（阀门等）国产化、提高管理和研发水平等。主要建议如下。

① 控制干法除尘泄爆。

由于转炉炼钢的间歇性，造成干法除尘系统静电除尘器泄爆频繁，电场内部设备损坏严重，影响除尘效果和炼钢生产。因此，要从设备改造及管理方面出发，控制干法除尘系统泄爆次数。

② 加快备件的国产化进程。

主要进行蒸发冷却器喷嘴、ID 风机、泄爆阀、切换站钟形阀及液压系统、眼镜阀、双板阀、测温热电偶、煤气分析仪、控制程序研究改造等国产化研究工作。这样既解决了备件供应难的问题，又降低使用成本。

③ 提高设计和管理水平。

提高操作、设计和管理人员的水平。逐步形成从系统设计到设备制造、施工安装及编程调试等整套专业管理模式。在设计、采购、制造、安装全过程中实行科学项目管理，对确保系统完整、高效、稳定性运行具有重要意义。

4.6.6 技术知识产权情况

有关转炉烟气干法除尘技术的发明专利与实用新型专利列举如下表。

表 4.6.3 转炉烟气干法除尘技术的国内专利情况

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	炼钢转炉烟气干法除尘及余能回收装置	CN1962884	昆明阳光数字技术股份有限公司	2006.12.07
2	一种炼钢转炉烟气干法除尘和余热利用的工艺和组合系	CN101144111	昆明阳光基业股份有限公司	2007.07.02

序号	技术名称	公开(公告)号	申请(专利权)人	申请日期
	统			
3	炼钢转炉煤气干法回收及其显热发电系统	CN101245400	中国科学院力学研究所	2008.03.19
4	阻氧式转炉煤气干法布袋净化回收工艺	CN101851695A	尹华勤	2010.05.17
5	转炉煤气干法除尘系统及其使用方法	CN101892345A	中冶南方工程技术有限公司	2010.07.30

4.7 电炉优化供电技术

4.7.1 技术介绍

(1) 技术概况

电炉炼钢过程中,消耗的主要能源为电能,约占总能耗的 60%以上。制定合理的供电优化方案有助于提高电炉炼钢的电能利用效率,降低冶炼能耗。电炉优化供电技术在于充分发挥电炉变压器的供电能力,在建立基于电炉炼钢过程的电气运行动态模型基础上,通过最优化的各项研究成果,分析得出动态最优工作点,使电炉炼钢过程的电气运行指标达到最佳状态,从而实现提高冶炼效率、缩短冶炼时间、节约电能的目标。

本技术的特点在于将大功率电力供电技术与炼钢技术有机地结合起来,使供电技术参数符合炼钢过程的电力需求,科技含量高,电炉主供电回路和装备无需重大改动,投入少,实施方便,对生产影响小,投资回报率高。

(2) 基本原理

本技术属于炼钢工艺技术和电气运行技术的交叉领域,通过对电炉电气运行特性的研究,揭示了大型交流超高功率电炉炼钢过程中电气运行的基本规律。具体做法是,在实际生产中,精确测量从电炉通电到出钢全过程中的电炉供电主回路系统的基本电气运行参数,经分析处理后,得到电炉供电主回路的短路电抗和操作电抗,并以此作为研究电炉合理供电曲线的基础数据,建立非线性电抗模型,在分析掌握各级电压等级下的电炉电气运行特性的情况下,根据实际生产经验确定电炉运行约束条件,进而研制电气运行图、建立许用工作点总表,最终制定科学合理的供电曲线和供电操作制度。同时,也要综合考虑变压器的容量和利用系数、以及对电网的干扰(闪变、谐波)、功率因数等电气问题,这关系到冶炼时间、冶炼反应和出钢温度等工艺基本问题。

每台电炉都有独特的电气运行特性,优化供电技术的核心是对电炉生产中大量实测数据进行分析研究,建立符合实际工况的模型、曲线,更贴近电炉炼钢实际过程,从而充分发挥变压器的供电能力,保证电弧稳定燃烧、减少电极折断,促使炼钢过程长期安全平稳运行,最终效果是降低电能和耐材消耗,缩短冶炼时间,减少对电网干扰,提高生产效率。电炉优化供电流程见图 4.7.1。

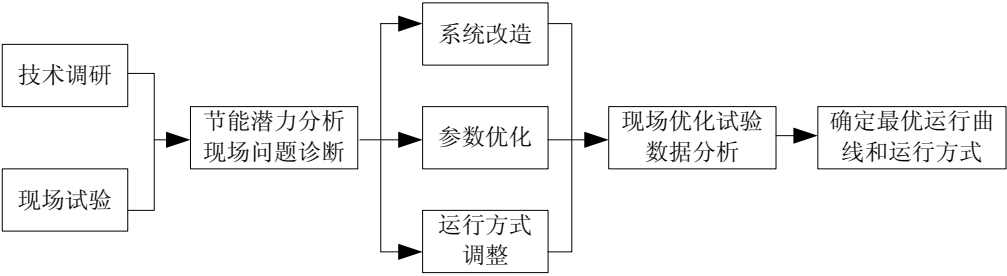


图 4.7.1 电炉优化供电流程

（3）关键技术

以软技术为核心,合理优化炼钢过程的电气运行参数,应用智能化控制技术,在对电炉供电主回路和装备不作重大改动的情况下达到节能增效的目的。

对于电测仪表和计算机系统不完善的电炉,采用此技术也会取得一定的效果,并促进电炉硬件系统和装备水平逐步完善。

在电炉炼钢系统采用高精度的电气仪表,测定炼钢过程中的各项电气运行参数,建立实际的操作阻抗模型。

建立工作点总表,根据稳定运行、安全操作的原则,制定合理的电气运行表。

结合炉料条件、冶炼工艺运行条件,制定合理的供电制度。

采用智能控制技术,减小三相电流不平衡程度;根据炉料状况变化,调整供电回路的总阻抗。

4.7.2 技术适用条件

本技术适用于 30t 以上的交流电炉炼钢生产,电炉的吨位和变压器容量越大,节电效果越明显,特别适用于变压器容量大于 30MVA 的大型超高功率电炉。

4.7.3 节能减排效果

同容量的交流电炉炼钢采用本技术后,平均可节电 10~30kWh/t 钢,冶炼通电时间可缩短 3min 左右,炼钢生产效率可提高 5%左右。

4.7.4 成本效益分析

电炉优化供电技术无需设备投资，技术应用费约 50 万元。

4.7.5 技术推广应用情况

近年来，国内陆续建设了一批电炉，包括从国外引进的各种形式的超高功率电炉，不少电炉厂开展了程度、深浅不一的优化供电曲线研究，但针对炼钢过程电气运行特性和供电制度的全面系统的优化研究还不多。虽然部分电炉的技术、设备达到国际先进水平，但操作和生产运行还远未达到相应水准，应加强优化供电技术研究、促进先进电炉技术装备的合理使用。目前，国内真正全面掌握该技术、应用良好的电炉为数不多，2010 年该技术的普及率在 15%左右。由于大中型电炉采用此技术的节电效果相对明显，预计“十二五”期末推广比例将达到 60%左右。

4.7.6 技术知识产权情况

北京科技大学冶金与生态工程学院有关人员对电炉优化供电技术进行了长期研究，掌握了核心技术并拥有自主知识产权。其他关于电炉优化供电技术的国内专利见下表。

表 4.7.3 关于电炉优化供电技术的国内专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	一种基于物料熔化模型的电弧炉的供电控制方法	CN101833288A	宝山钢铁股份有限公司	2009.03.12
2	电弧炉智能电气控制系统	CN101071306	广东省韶铸集团有限公司	2007.04.30
3	高阻抗电弧炉	CN2510810	西安华兴电炉有限公司	2001.12.14
4	用于炼钢电弧炉的静止无功补偿装置	CN201466732U	宝山钢铁股份有限公司	2009.04.20

4.8 电炉烟气余热回收利用除尘技术

4.8.1 技术介绍

（1）技术概况

目前在工程上使用的电炉烟气余热回收形式基本都是蒸汽，回收装置主要有

两种：热管余热回收装置和余热锅炉回收装置。两种回收装置的工艺流程相似，回收的蒸汽参数也相近。与热管比较，烟道式余热锅炉占用位置庞大，设备钢材耗量多，设备制造成本较高。由于其采用单层间壁换热，因炼钢废气粉尘的磨损，造成某根换热管泄露将影响整个系统的运行。而热管技术具有热管换热系数高，设备钢材耗量小，投资低等特点，采用该技术后，设备即使出现单根或几根损坏，也不影响整个系统的运行，没必要紧急停工处理，其管理费用和难度都较低。从目前的应用和技术条件看，热管余热回收装置有较大优势，并已经得到成功应用。

(2) 热管余热回收装置的工作原理

热流体的热量由热管传给水套内的饱和水（饱和水由下降管输入），并使其汽化，所产蒸汽（汽、水混合物）经蒸汽上升管达到汽包，经集中分离后再经蒸汽主控阀输出（汽包内的水由 104℃除氧水经水预热器加热至 155℃后供给）。这样由于热管不断将热量输入水套，通过外部汽-水管道的上升及下降完成基本的汽-水循环，达到将热流体降温，并转化为蒸汽的目的。热管余热回收装置工艺流程如图 4.8.1 所示。

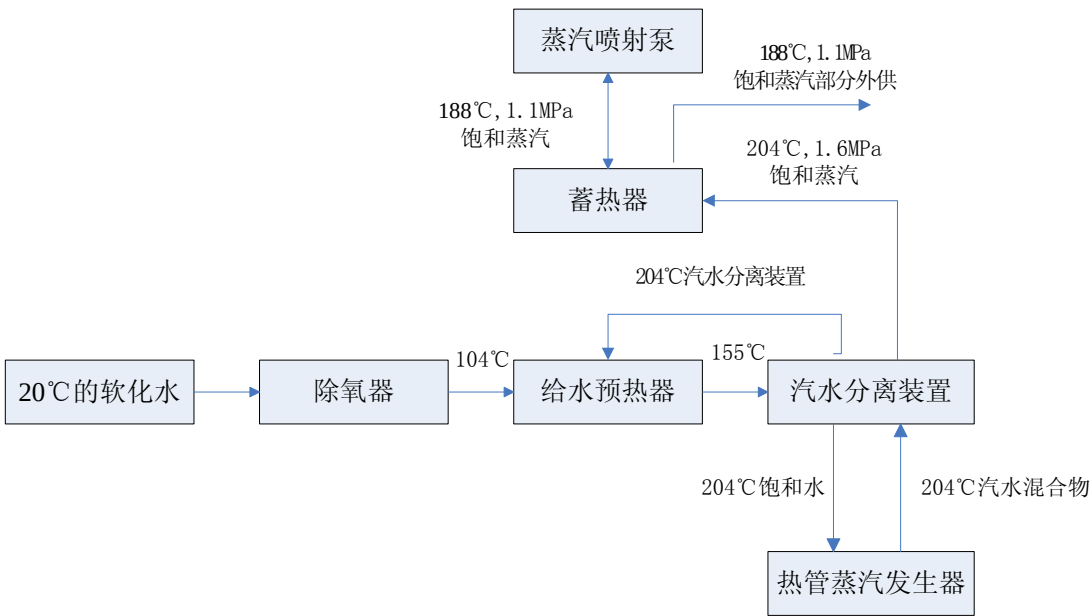


图 4.8.1 热管余热回收装置工艺流程

4.8.2 技术适用条件

本技术适用于 30t 以上的各类电弧炉炼钢生产。

4.8.3 节能减排效果

2006 年 12 月莱钢 50t 交流电弧炉集余热利用、环境净化和烟尘回炉等功能

于一身的电炉循环经济系统顺利投入运行后，电炉冶炼烟尘收集率达 95%以上，满足了国家环保标准要求；余热装置实际每小时可产出 20t 蒸汽（1.6MPa，200℃）。该系统替代了原有的燃油蒸汽锅炉和燃煤生活锅炉，并能回收大量铁素材料，每年可创造直接经济效益 600 多万元，产生了良好的经济和社会效益。

中冶京诚自主研发的电炉烟气汽化冷却余热回收技术已投入中冶京诚营口铸锻工程中使用。该电炉烟气余热回收装置，年节约标煤约 0.72 万 t，减排 CO₂ 1.63 万 t，减排 SO₂ 144 t，减排灰尘 0.2 万 t，环保效益显著。该装置运行 2 年即可收回比传统水冷系统多投资的基建投资差额，经济效益明显。

电炉高温废气如果全部通过余热回收装置将烟气温度降下来，则不但可提高除尘风机的有效风量、降低电炉除尘风机的负荷、保护布袋除尘器，还可以回收其中的热量，产生蒸汽供生产和生活使用。因此，最大限度地回收电炉废气中的余热，是电炉炼钢企业节约能源、降低除尘系统运行成本的重要途径。

4.8.4 成本效益分析

（1）投资估算

项目案例：1 座 100t 电炉，年产 100 万 t 钢，采用电炉烟气余热回收利用除尘技术。项目总投资 1872 万元，其中建设投资 1800 万元，建设期利息 72 万元。项目投资估算详见下表。

表 4.8.1 电炉烟气余热回收利用除尘技术投资估算

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1	建设投资	1800.00	96.2%
1.1	建筑费用	371.02	19.8%
1.2	设备费用	892.99	47.7%
1.3	安装费用	294.43	15.7%
1.4	其它费用	241.56	12.9%
2	建设期利息	72.00	3.8%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	1872.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：按照吨钢回收蒸汽 120kg 计算，年增加收入 718 万元。采用电炉烟气余热回收利用除尘技术，将增加动力费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 638 万元，项目利润总额 73 万元。经测算，项目投资回收期（不

含建设期) 6.2 年, 财务内部收益率 12.9%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 4.8.2 经济效益分析指标汇总

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	1872
1.1	建设投资	万 元	1800
1.2	建设期利息	万 元	72
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0
3	项目总资金	万 元	1872
4	资金筹措	万 元	1872
4.1	自有资金	万 元	749
4.2	建设贷款	万 元	1123
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益 (不含税)	万 元	718
5.2	达产年总成本费用 (不含税)	万 元	639
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	60
5.4	达产年利润总额	万 元	73
5.5	达产年所得税	万 元	18
5.6	达产年净利润	万 元	54
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期 (不含建设期)	年	6.2
6.2	财务内部收益率	%	12.9
6.3	贷款偿还期 (不含建设期)	年	4.7

4.8.5 技术推广应用情况

我国早期建成投产的炼钢电炉烟气余热大多未回收利用, 后来建设的炼钢电炉多采用汽化冷却烟道和余热锅炉串联式的废气余热回收设施。还有很多单位对电炉烟气余热并未进行回收与利用, 或者回收效率不高。2010 年, 我国电炉烟

气余热回收利用除尘技术的普及率大约 10%。因此，应该大力支持电炉烟气余热回收利用除尘技术的推广应用，“十二五”期末预计推广比例将达到 90%左右。

4.8.6 技术知识产权情况

由莱芜钢铁集团有限公司与北京科技大学、山东省冶金设计院股份有限公司合作完成的“电弧炉炼钢流程能量优化利用技术的研究与应用”项目从降低原工位能耗和提高冶炼过程富余热量回收两方面入手，对 50t 电炉炼钢流程的能量优化利用进行了综合深入研究。自主开发电炉烟气余热回收利用系统装备及技术提高了二次能源利用率和余热余能回收利用水平，实现节能降耗和清洁生产，年创效益 2289 万元。中冶京诚自主研发的电炉烟气汽化冷却余热回收技术，是对电炉烟气余热回收、降低吨钢综合能耗指标的重大突破，为国内电炉排烟处理开辟了一条新途径。其他关于电炉烟气余热回收利用除尘技术的国内专利见下表。

表 4.8.3 关于电炉烟气余热回收利用除尘技术国内专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	电弧炉半密闭罩排烟除尘系统	CN201362729	无锡东雄重型电炉有限公司	2009.03.04
2	一种烟气余热回收方法及其装置	CN101140148	林光舜	2007.10.23
3	一种余热回收热管	CN101158559	刘武强，汪多智	2007.08.03
4	一种烟道烟气余热回收装置	CN101135498	长沙恒宇节能环保科技有限公司	2006.08.29

4.9 废钢加工分类预处理技术

4.9.1 技术介绍

随着社会废钢量的增加及废钢结构的变化，废钢质量对炼钢厂冶炼技术经济指标和消耗指标的影响越来越大。为了提高经济效益，降低成本，炼钢厂除了注重炼钢主业的技术装备发展外，还应该正视并提高对废钢加工业的认识，注重提高加工工序的技术和装备水平或与废钢加工配送企业的战略合作。

废钢加工处理的常规方式：分选，火焰切割，剪切、打包 用剪切机剪切废钢，废钢破碎生产线等。废钢加工设备主要种类有：Y81 系列液压金属打包机、Q43 系列废金属剪切机、Q15 系列龙门式剪板机、HBS 系列液压龙门式打包剪切机、Y82 系列立式液压打包机、Y83 系列金属屑压块机、PS×系列废钢粉碎流

水线、抓钢机、冶金渣破碎及研磨设备、高效重废钢切割处理生产线等。

在发达国家，废钢加工实现了专业化与废钢的品种化，废钢加工配送公司集中采购、集中加工、集中配送。先进的配送公司还采用计算机软件配料系统，按照钢厂炼钢工艺和成本控制要求做出最佳配置。如今国内很多废钢加工企业也已逐渐认识到，改变原有的废钢加工管理模式，建立专业化的废钢加工配送基地是今后发展的必由之路。

4.9.2 技术适用条件

该类技术普遍适用于国内大小钢铁企业、再生资源回收企业、有色金属领域、机械加工企业的重废钢加工。企业从国内或境外采购批量废钢铁原料，经过自购的或是专业化、规模化的废钢加工配送公司配备的各种专门废钢加工设备的分选、净化处理，按照国家标准加工生产出各种清洁品种废钢，自供或销售配送给钢铁企业炼钢。

4.9.3 节能减排效果

废钢既是钢铁生产和加工制造业的副产品或废弃物，又是炼钢和铸造的重要原料。与原生金属原料相比，废钢的再生利用可以降低钢铁生产过程的综合能耗，减少钢铁生产过程中排放的 CO₂，起到保护矿产资源、节省投资、节约能源、保护环境、维持生态平衡等重要作用。

4.9.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：年产 100 万 t 钢，采用废钢加工分类预处理技术。项目总投资 1248 万元，其中建设投资 1200 万元，建设期利息 48 万元。

项目投资估算详见下表。

表 4.9.1 废钢加工分类预处理技术投资估算

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	1200.00	96.2%
1.1	建筑费用	124.68	10.0%
1.2	设备费用	831.17	66.6%
1.3	安装费用	83.12	6.7%
1.4	其它费用	161.04	12.9%
2	建设期利息	48.00	3.8%

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	1248.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：按吨钢节能 2kgce 计算，年增加收入 400 万元。采用废钢加工分类预处理技术，将增加折旧费、维修费、管理费、财务费等，各项费用合计 241 万元，项目利润总额 153 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）4.6 年，财务内部收益率 18.8%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 4.9.2 经济效益分析指标汇总

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	1248
1.1	建设投资	万 元	1200
1.2	建设期利息	万 元	48
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2	生产流动资金	万 元	0
3	项目总资金	万 元	1248
4	资金筹措	万 元	1248
4.1	自有资金	万 元	499
4.2	建设贷款	万 元	749
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	400
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	241
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	58
5.4	达产年利润总额	万 元	153
5.5	达产年所得税	万 元	38
5.6	达产年净利润	万 元	115
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	4.6
6.2	财务内部收益率	%	18.8

序号	项目名称	单 位	指标
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	3.4

4.9.5 技术推广应用情况

废钢加工处理技术不断提升，废钢净化处理程度和优质废钢比例逐步增加，促进了“精料入炉方针”的落实。废钢加工处理过程中二次污染的防治在大型废钢加工中心得到了有效的控制。2010 年，废钢加工分类预处理技术的应用普及率约 15%左右。废钢是可以无限循环使用的再生物资，有着强劲的发展后劲和巨大的发展潜力。在政府的大力支持下，我国废钢铁产业将逐步形成现代化、科学化、规范化的产业体系。预计“十二五”期末推广比例将达到 50%左右。

4.9.6 技术知识产权情况

随着技术引进、研发，我国废钢加工设备制造业得到了快速的发展，拥有了一批自主知识产权的先进技术和设备。特别是代表着先进技术的打包机、剪切机、防辐射设备、钢渣研磨设备等，基本实现了国产化和系列定型产品。废钢加工设备的设计制造以湖北力帝、江苏华宏、南通鼎豪、常熟锻压等公司居多。湖北力帝机床股份有限公司于 2000 年成功研发了 1000 马力的 PSX-6080 废钢破碎生产线。该设备生产能力为每小时 20~25t，性价比高，全套设备的价格不到国外同等设备的 60%。从 1000 马力发展至 6000 马力等多个规格品种可供用户选择。

济钢国际工程技术有限公司开发的高效重废钢切割处理生产线具有处理物料的适应性广、车间环境良好、系统检测完善、生产线自动切割等特点，具有良好的发展前景。通过应用重废钢切割生产线，既可以提高废钢处理的生产效率，与铸造行业不断扩大的生产规模相适应，同时又达到了环保目的。

关于废钢加工分类预处理技术方面的其他国内专利列举见下表。

表 4.9.3 关于废钢加工分类预处理技术国内专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	鳄式液压剪断机	CN101549416	湖北力帝机床股份有限公司	2009.05.12
2	废钢破碎机	CN101530822	江苏华宏科技股份有限公司	2009.03.13
3	废钢切屑打包机	CN101259760	二重集团（德阳）重型装备股份有限公司	2008.04.14

4.10 钢渣处理及综合利用技术

4.10.1 技术介绍

(1) 技术概况

钢渣处理及综合利用技术是指从热态红渣开始，经过预处理冷却、粉化、选铁回收、尾渣综合利用等系统工程的统称。钢渣预处理加工是钢渣实现资源化的前提与条件和处理工艺，对资源化利用关系很大。选择何种处理工艺，首先应了解钢渣性质包括成分和黏度，同时评价处理工艺的处理效率、安全性及可靠性。另外，根据钢渣主要利用途径，确定钢渣产品的技术指标，如钢渣粒度、钢渣安定性、钢渣铁含量等。正确选择处理工艺，获得的产品利用率能达到 100%，从而实现钢渣“零”排放。追求钢渣稳定性是钢渣处理与综合利用的关键技术。

热态渣预处理的任务是把热熔渣处理成粒径符合一定要求的常温块渣，为后续渣处理和综合利用创造有利条件。目前，美国、欧洲与日本等的钢渣处理工艺常用热泼工艺，并采用较先进的破碎与磁选设备。国内钢铁企业钢渣预处理工艺主要有：热泼或浅盘热泼法、水淬法、风淬法、粒化轮法、热闷法以及滚筒法。我国钢渣加工处理工艺和资源化技术与国外相比相差不大，且各具特点，并有一定优势。钢渣加工主要采用破碎、筛分、磁选工艺，一些企业在此基础上进一步开发球磨水洗工艺。我国 58 家钢铁企业目前采用的主要钢渣处理工艺见下表。

表 4.10.1 我国 58 家钢铁企业目前采用的主要钢渣处理工艺

合计	热泼法	热闷法	滚筒法	风淬法	破碎	筛分	磁选	球磨水洗
58 家汇总（家）	27	24	4	3	40	35	58	12
占比（%）	47	41	7	5	69	60	100	21

注：上表是 58 家中国钢铁工业协会会员单位目前钢渣处理方法的汇总。

表 4.10.2 典型钢渣预处理工艺比较

处理工艺	工艺特点及过程	优点	缺点	应用厂家
热闷法	高温液态渣显热产生蒸汽通过物理作用及游离氧化物水解膨胀作用将渣碎化	工艺简单，能够实现固态和液态钢渣的处理、钢渣活性较高、安定性较好、操作安全性高	粒度不均匀，处理周期长	济钢 曹妃甸 鲅鱼圈
热泼法	在炉渣高于可淬温度时，以有限的水向炉渣喷洒，使渣	排渣速度快，冷却时间短、便于机械化生产，处理能力大；钢	设备损耗大，占地面积大，破碎加工粉尘大，蒸汽量大；	鞍钢三钢 唐钢

处理工艺	工艺特点及过程	优 点	缺 点	应用厂家
	产生的温度应力大于渣本身的极限应力，产生碎裂，游离氧化钙的水化作用使渣进一步裂解	渣活性较高、生产率高	钢渣加工量大。对环境和节能两方面都不利。钢渣安定性差	武钢二钢
盘泼法	将热熔渣倒在渣罐中，运至渣盘边，用吊车将罐中的渣均匀倒在渣盘中，待表面凝固即喷淋大量水急冷，再倾翻到渣车中喷水冷却，最后翻入水池中冷却	快速冷却、占地少、处理量大、粉尘少、钢渣活性较高	渣盘易变形、工艺复杂、运行和投资费用大。钢渣安定性差	新日铁 宝钢一钢
滚筒粒化法	高温液态钢渣直接倾倒在高速旋转的滚筒内，以水作冷却介质，急冷固化、破碎	排渣快、占地面积较小，污染小，渣粒性能稳定	设备较复杂，且故障率高，设备投资大。只能处理液态渣	宝钢二钢
粒化轮法	将液态钢渣落到高速旋转的粒化轮上，使熔渣破碎渣化，喷水冷却	排渣快、适宜于流动性好的钢渣	设备磨损大，寿命短，处理量大而水量小时易发生爆炸。只能处理液态渣	沙钢 本钢
水淬法	高温液态渣在流出、下降过程中被压力水分割、击碎，再加上高温熔渣遇水急冷收缩产生应力集中而破裂，同时进行了热交换，使熔渣在水幕中粒化	排渣快、流程简单、污染小、占地少、投资少，处理后钢渣粒度小（5mm 左右）且均匀，性能稳定	只能处理液态渣	鞍钢二钢 美国伯利恒钢铁公司
风淬法	用压缩空气作冷却介质，使液态钢渣急冷、改质、粒化	安全高效，排渣快、工艺成熟，占地面积较小。污染小，渣粒性能稳定，粒度均匀且光滑（无>5mm 的颗粒），投资少	只能处理液态渣	日本钢管公司福山厂 台湾中钢 马钢 重钢

从表 4.10.2 可知，从液态钢渣流动性的角度考虑，滚筒粒化法、风淬法、水淬法和粒化轮法只能处理流动性好的钢渣，盘泼法和热泼法可以处理流动性差的

渣，而热闷法可以处理液态渣和固态渣；从工艺繁杂程度、设备投资角度看，热闷法工艺简单，投资少、设备磨损小；从环境友好角度考虑，热闷法、水淬法、风淬法、滚筒法可行；从处理后钢渣粒度的均匀程度考虑，水淬法、风淬法得到的钢渣粒度小而且均匀，热闷法次之；从处理后钢渣的安定性和活性考虑，热闷法最佳、水淬法次之；从能源介质消耗考虑，热闷法最低、水淬法次之。因此，综合上述因素，处理流动性差的液态钢渣和固态钢渣的最佳工艺是热闷法，处理流动性好的钢渣的最佳工艺是水淬法。

(2) 技术原理

高温液态熔渣在冷却介质（水、空气）的急冷收缩作用下，产生热应力，以及游离氧化钙、游离氧化镁的水解作用产生的化学应力使钢渣破碎粉化；钢渣预处理工艺中，通过水分割、撞击、旋转等机械作用，也将起到加速粉碎的效果，达到钢渣破碎的目的。钢渣经预处理后，通过机械破碎、筛分、磁选，回收含铁原料，尾渣主要矿物为硅酸三钙（ C_3S ）、硅酸二钙（ C_2S ），与硅酸盐水泥熟料相似，具有广泛的再利用价值。

(3) 工艺流程

① 钢渣热泼工艺。

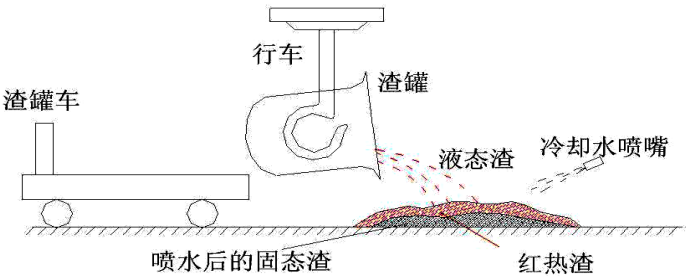


图 4.10.1 钢渣热泼工艺流程

② 钢渣水淬工艺。

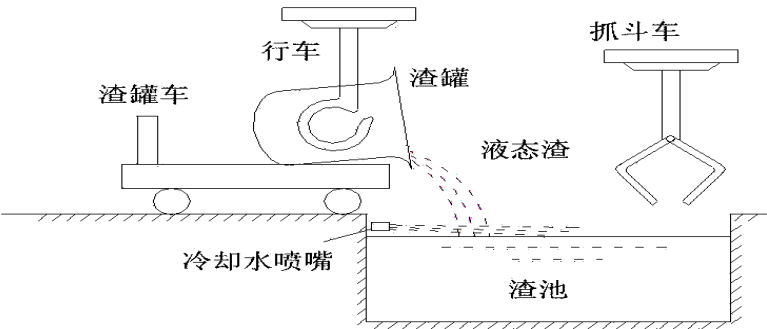


图 4.10.2 钢渣水淬工艺流程

③ 钢渣风淬处理工艺。

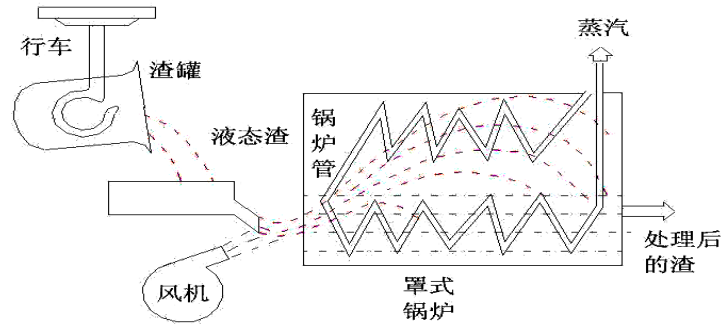


图 4.10.3 钢渣风淬处理工艺流程

④ 粒化轮法钢渣处理工艺。

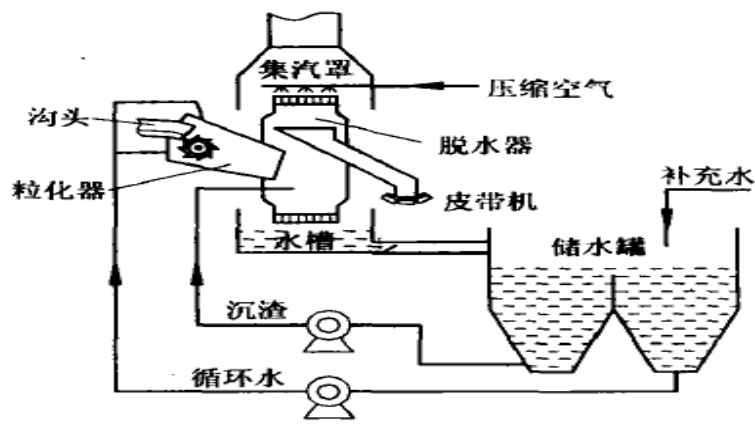


图 4.10.4 粒化轮法工艺流程

⑤ 钢渣热闷处理工艺。

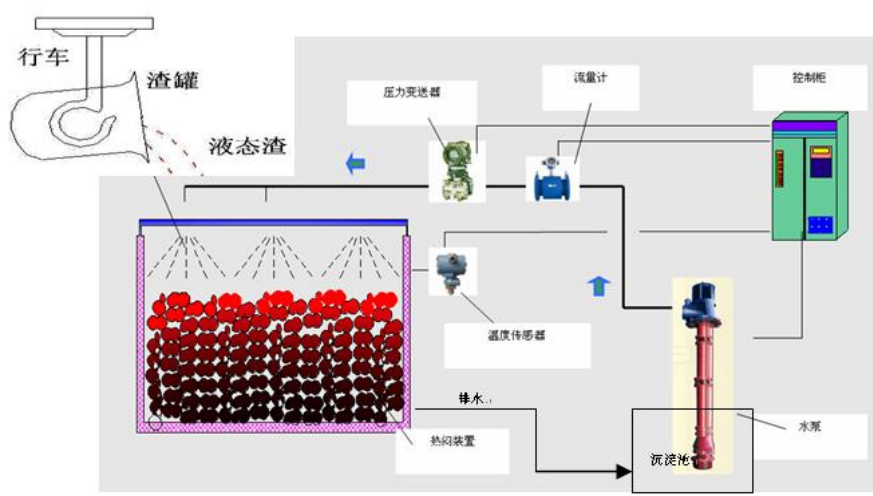


图 4.10.5 钢渣热闷处理工艺流程

⑥ 钢渣滚筒法处理工艺。

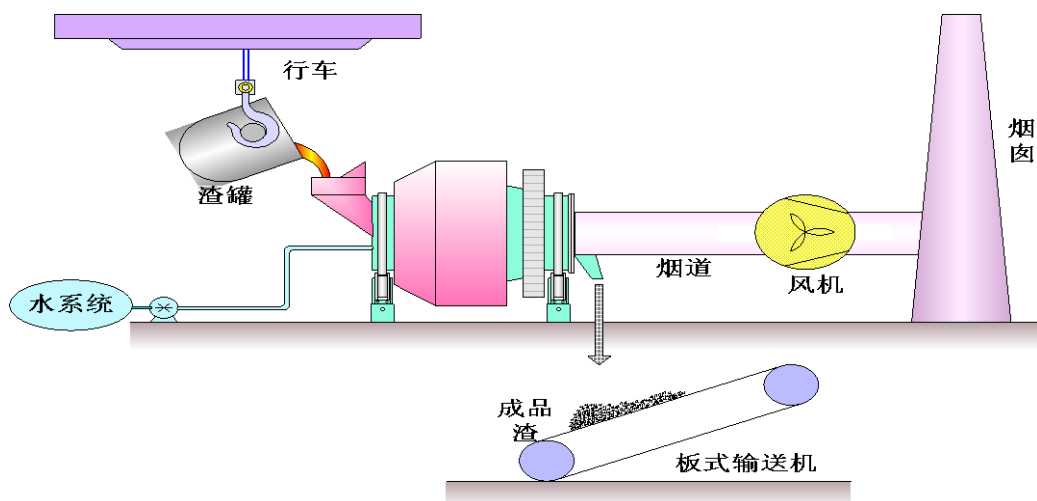


图 4.10.6 滚筒法渣处理工艺流程

4.10.2 技术适用范围

从表 4.10.2（钢渣预处理工艺比较）可以看出，当前的钢渣预处理工艺较多，并且各有其优缺点和适应范围。选择钢渣的处理工艺取决于钢渣的利用途径、钢渣黏度和流动性、钢渣稳定性与钢渣水硬胶凝性三个主要因素。

风淬法、水淬法和滚筒法处理工艺对钢渣的流动性要求较严，所以需要配备其他处理工艺，才能 100%处理热态钢渣。热泼法处理工艺简单、处理能力大，但是在环保和钢渣处理效果方面（钢渣安定性）还存在问题。热闷法处理兼顾了钢渣性能和环保要求，但是在投资和处理能力方面还有待改进。

综上，没有一种技术能够理想的处理所有的炼钢钢渣。从近年生产实际看，用热闷法对钢渣进行预处理，适用范围广、利于节能减排、尾渣活性高、安定性好，在新建和改造炼钢车间的应用正越来越普遍，逐渐成为发展趋势之一。

4.10.3 节能减排效果

如果将钢渣全部利用，代替水泥用于建筑工程中，是一项行之有效、用量大、附加值高的节能减排措施。2009 年，全国水泥产量 16 亿 t 以上，用钢渣加工生产水泥混合材、混凝土微粉，从而替代水泥熟料，可有效降低因生产水泥熟料时所消耗的燃料以及放出的 CO_2 量。每年生产 1 亿 t 钢铁渣粉代替水泥，则每年可减少 1 亿 t 的 CO_2 排放量（包括燃料排放和石灰石分解排放），同时还有节能降耗作用。

4.10.4 成本效益分析

(1) 投资估算

钢渣处理及综合利用技术处理能力不同则建设投资不同,按照建设一条国内先进的 100 万 t 钢渣处理加工生产线:钢渣预处理采用热闷生产工艺,建设破碎磁选生产工序,建设钢渣微粉生产工序,形成较为完整钢渣处理链。该技术处理单位钢渣建设投资约 160.00 元/t 钢渣。

钢渣处理及综合利用技术总投资 170.98 元/t 钢渣,其中建设投资 160.00 元/t 钢渣,建设期利息 3.05 元/t 钢渣(建设期贷款比例 60%),铺底流动资金 7.93 元/t 钢渣。投资估算详见下表。

表 4.10.3 钢渣处理及综合利用技术总投资估算

序号	技术名称	总投资(元/t 钢渣)
1	建设投资	160.00
1.1	建筑费用	11.20
1.2	设备费用	132.80
1.3	安装费用	9.60
1.4	其他费用	6.40
2	建设期利息	3.05
3	铺底流动资金	7.93
4	技术总投资	170.98

(2) 经济效益分析

钢渣处理及综合利用技术经济效益包括:再生产品(粒钢)0.04t/t 钢渣 年,磁选粉 0.05t/t 钢渣 年,钢渣微粉 0.60t/t 钢渣 年。以上各项收入合计 195.73 元/t 钢渣 年,钢渣处理及综合利用项目建设,增加了石膏等材料及高炉煤气、水、电等动力费用,同时增加了人工成本、固定资产折旧、修理等费用,增加管理费、财务费等费用,上述各项费用合计 135.90 元/t 钢渣 年(达产年)。

经测算,达产年年利润总额为 58.05 元/t 钢渣 年,贷款偿还结束后年利润总额 62.90 元/t 钢渣 年,投资内部收益率 31.13%(税后),投资回收期(不含建设期 1 年)3.3 年。经济评价总表见下表。

表 4.10.4 钢渣处理及综合利用技术经济评价指标

序号	项 目	单位	项 目
1	总投资	元/t 钢渣	170.98

序号	项 目	单位	项 目
1.1	建设投资	元/t 钢渣	160.00
1.2	建设期利息	元/t 钢渣	3.05
1.3	铺底流动资金	元/t 钢渣	7.93
2	生产追加流动资金	元/t 钢渣	18.51
3	总资金	元/t 钢渣	189.49
4	资金筹措	元/t 钢渣	189.49
4.1	自有建设资金	元/t 钢渣	57.41
4.2	建设期利息	元/t 钢渣	3.05
4.3	自有流动资金	元/t 钢渣	7.93
4.4	建设资金贷款	元/t 钢渣	102.59
4.5	流动资金贷款	元/t 钢渣	18.51
5	达产年经济效益指标		
5.1	收益（不含税）	元/t 钢渣	195.73
5.2	不含税总成本费用	元/t 钢渣	135.90
5.3	销售税金及附加	元/t 钢渣	1.78
5.4	利润总额	元/t 钢渣	58.05
5.5	所得税	元/t 钢渣	14.51
5.6	税后利润	元/t 钢渣	43.54
6	财务评价指标		
6.1	投资回收期（含建设期）	年	4.3
6.2	投资内部收益率	%	31.13
6.3	贷款偿还期（含建设期）	年	4.3

4.10.5 技术推广应用情况

（1）技术应用现状

目前，我国钢渣的主要利用途径有：用作烧结矿原料、道路材料、回填材料、钢渣水泥和用于混凝土中的钢渣粉、地面砖和建筑用墙体材料等。全国已有许多应用的工程实践，并有相应的标准和应用规程。然而，由于钢渣中含有游离氧化钙（f-CaO），如不经稳定化消解处理，会出现道路、建材制品及工业建筑物膨胀开裂现象，这是目前我国钢渣利用率低的关键问题。

20 世纪 90 年代以前，钢渣主要用于烧结配料使用，钢渣粒度要求小于 8mm，

因此研究并成功应用了钢渣水淬工艺、风淬工艺。处理后的钢渣为颗粒状，供烧结使用。90 年代后，由于冶炼过程采用先进的溅渣护炉新技术，在冶炼过程中投入白云石或石灰导致钢渣黏度增大，流动性变差，使水淬工艺、风淬工艺、滚筒法及粒化轮法工艺的处理率很低。

据统计，全国钢铁企业已累计堆存钢渣 2 亿多 t，占地 1 万多亩。目前，钢渣实际堆弃数量每年新增 3000 万 t 左右。钢渣作为钢铁生产重要的固体废弃物，目前的状况对环境造成严重污染，国家已开始征收排渣费，给钢铁企业带来巨大经济负担。2010 年，该技术的普及率为 50%。

（2）“十二五”预计推广比例

预计“十二五”期末该技术的推广比例将达到 95%。

（3）推广措施建议

- ① 召开全国钢渣处理及综合利用技术交流会。
- ② 深入剖析若干典型企业，总结经验，适时推广。
- ③ 钢渣微粉是钢渣综合利用的关键，应组织相关部门共同研究全面推广应用的问题。

4.10.6 技术知识产权情况

有关转炉渣（炼钢渣）处理和综合利用的专利列出以下 19 条。

表 4.10.5 有关转炉渣（炼钢渣）处理和综合利用发明专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	一种钢渣处理方法	CN1390795	北京高路通科技发展有限公司	2002.06.19
2	应用转炉钢渣制备加气混凝土	CN86107185	北京市建筑材料科学研究所	1986.10.20
3	利用高活性转炉钢渣生产高铁水泥的方法	CN87100826	本溪钢铁公司建筑材料厂	1987.02.13
4	块状钢渣的综合热闷处理方法	CN1073210	冶金工业部建筑研究总院	1992.10.31
5	钢渣耐火材料的制作方法	CN1088193	大连理工大学	1992.12.15
6	双腔式滚筒钢渣处理装置	CN1257932	上海宝钢集团公司	1999.12.29
7	炼钢浇余热态钢渣回收循环利用的方法	CN1804047	邯郸钢铁股份有限公司	2006.01.19
8	碳化转炉钢渣在促进海洋吸收二氧化碳上的应用	CN101269998	宝山钢铁股份有限公司	2007.03.23

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
9	将钢渣改质成为水渣的方法	CN101367625	武汉钢铁（集团）公司	2008.09.25
10	一种热态钢渣余热回收系统及回收方法	CN101476000	首钢总公司	2009.01.16
11	钢渣水淬柱体装置	CN2575105	济钢国际工程技术有限公司	2002.11.01
12	钢渣水淬渣罐	CN2575106	济钢国际工程技术有限公司	2002.11.01
13	钢渣水淬粒化器	CN2575104	济钢国际工程技术有限公司	2002.11.01
14	一种高压闷渣密封装置	CN201473553U	济钢国际工程技术有限公司	2009.07.30
15	炼钢高温炉渣闷渣罐	CN201648409U	济钢国际工程技术有限公司	2010.03.16
16	一种闷渣炉罐体	CN201605277U	济钢国际工程技术有限公司	2010.02.10
17	一种闷渣用锁紧装置	CN201610432U	济钢国际工程技术有限公司	2010.02.10
18	一种闷渣盖吊装装置	CN201610433U	济钢国际工程技术有限公司	2010.02.10
19	一种闷渣用密封阀	CN201605276U	济钢国际工程技术有限公司	2010.02.10

第五节 轧钢工序

为实现钢铁工业的可持续发展，在近年国家“节能减排、钢铁结构调整、淘汰落后产能”产业政策引导下，钢铁工业向低能耗、短流程和高附加值产品方向发展，轧钢工序能耗在钢铁全流程中所占比重不高，仅为 10%~15%，再加上受产品高利润等因素影响，近年轧钢生产能力增长迅速，同时随着钢铁产品质量、品种的升级，深加工能力不断增加，部分轧钢工序能耗水平呈上升趋势。

在轧钢工序能耗结构中，主要包括燃耗、电耗、蒸汽和其他介质能耗，其中燃耗占轧钢工序能耗比重的 65%~70%，而电耗占 25%~33%，由于燃耗为加热炉单耗，故加热炉是轧钢工序的主要耗能设备，其能耗水平直接影响轧钢生产成本，因此降低加热炉能耗是轧钢节能的主要方向和目标。

降低加热炉能耗主要应做好以下几个方面的工作：

- 一是使燃料燃烧尽可能多的在炉膛内发生，减少出炉膛的烟气热损失；
- 二是尽可能多的将烟气余热回收炉膛中来，提高炉子的燃料利用系数；
- 三是尽量减少炉膛各项固定热损失，提高炉子热效率。

此外，实现工序之间的连续化、一体化以及采用一些节能型的新工艺和新技术，如热装热送、低温轧制、在线热处理，无头轧制等，也能显著降低吨钢能耗。轧钢生产在消耗大量能源的同时，产生许多污染物。这些污染物一旦排放到大气或河流中，不仅会对人和动植物的健康产生直接影响，而且还会加剧全球温室效应，危害人和动植物的生态平衡和生态环境。轧钢废水产生量大、污染物种类多，因此，轧钢废水处理后循环再利用成为轧钢工序减排的重点。

另外，从节能减排发展要求看，减少二氧化碳排放总量已成为全球关注的热点问题，中国也应把研究如何降低二氧化碳排放总量纳入节能减排范畴。钢铁行业降低产品生命周期二氧化碳排放量的做法有：一是轻量化。先进高强钢(AHSS)的应用使汽车可以少用钢铁，在不危及安全的前提下，能使汽车的重量减少 9%，燃油消耗减少 5.1%，温室气体排放量减少 5.7%。二是延长生命周期。钢铁的强度和耐用性使产品的生命周期更长。例如，钢制建筑和桥梁能使用 40~100 年，一旦加以正确的维修，使用的时间将更长。三是回收利用。回收的钢铁很容易用磁铁回收，回收率能达 100%。它几乎可以无限次地再利用而并不影响其性能。钢铁回收利用减少了因为生产新的钢铁而必须消耗的原料和温室气体排放。

5.1 连铸坯热装热送技术

5.1.1 技术介绍

70 年代初，热装热送技术首先由日本钢铁企业开发并使用。随后，德国、法国、美国等国家的钢铁企业也采用了此项技术。该技术在日本发展最快。目前，日本钢铁企业连铸坯的热装率一般达 65%~80%，有的高达 90%以上；热装温度一般达 600~700℃，有的高达 800℃以上。我国一些钢铁企业如宝钢、鞍钢、武钢等，从 20 世纪 80 年代中期开始了热送热装工艺的研究和应用。到 90 年代，许多钢厂在不同程度上采用了这一工艺技术。目前，国内企业热装热送温度普遍为 400℃，热装率为 20%。

热装热送技术是指在冶金企业连铸车间与轧钢车间之间，利用连铸坯输送辊道或输送火车（汽车），通过增加保温装置，将原有的冷坯输送改为热连铸坯输送，进行热装加热或直接轧制的技术。它可实现连铸与轧钢工序的紧凑式生产，是提高生产率、降低轧钢工序能耗的有效措施，也是回收钢坯显热的最佳方式。这项热衔接工艺和钢坯的热装热送程度已经成为衡量钢铁厂轧钢工序生产技术管理水平高低的重要指标之一。目前该技术主要有三种形式，即连铸坯热装（HCR- Hot Charge Rolling）、连铸坯直接热装（DHCR-Direct Hot Charge Rolling）和连铸坯直接轧制（DR- Direct Rolling）。三种形式热送热装技术与普通冷装工艺的流程比较见下图。

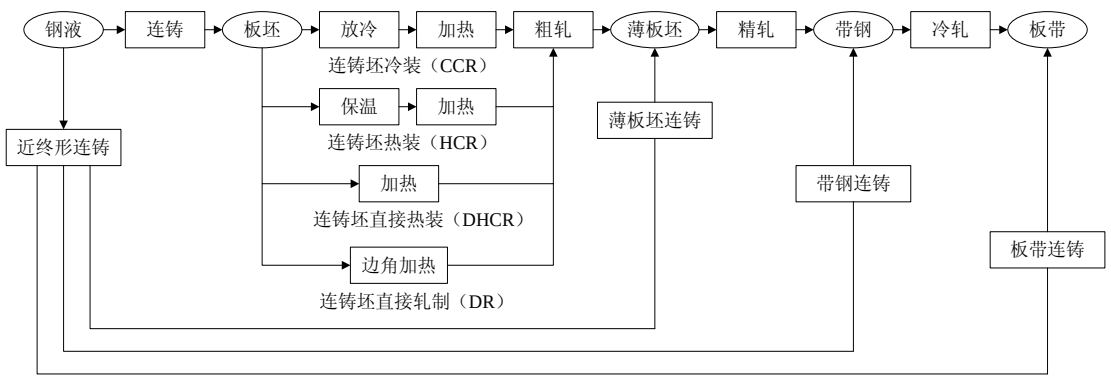


图 5.1.1 三种热装技术与普通冷装工艺流程比较

与传统冷装工艺相比，连铸坯热装热送技术有以下几方面优点：

- ◆ 降低能耗：热装热送技术可充分利用连铸坯显热，连铸坯每提高 100℃ 装炉温度，加热炉就可节约 5%~6% 燃料，燃料消耗随热装温度和热装率的提高而大幅度降低；
- ◆ 提高加热炉产量：连铸坯装炉温度每提高 100℃，加热炉产量可增加 10%-15%；

- ◆ 减少钢坯氧化烧损，提高成材率。连铸坯装炉温度提高，在炉时间大幅缩短，钢坯氧化烧损相应减少，一般冷装炉钢坯的烧损为 1.5%~2%，有的甚至高达 2.5%以上。热装条件下氧化烧损可降至 0.5%~0.7%，这对提高成材率非常有利；
- ◆ 其他方面：连铸坯热送热装工艺还具有缩短生产周期、减少板坯库房面积、降低运费等优点。

5.1.2 技术适用条件

连铸坯热装热送技术实现的前提是炼钢厂必须能够持续不断地提供质量好、稳定的连铸坯，否则就不得不将连铸坯冷却下来进行检查、处理，然后再送往轧钢厂，这样就谈不上热装热送。另外，要得到尽可能高的铸坯装炉温度，甚至达到直接轧制的目的，必须严格控制好铸坯在连铸机内的冷却过程。也就是说，要实现连铸坯热装热送，必须解决两个先决条件：生产无缺陷铸坯；生产高温连铸坯。

此外，连铸坯热装热送技术使得炼钢与轧钢更加紧密地联系起来，使之成为一体化的生产系统。这个紧密的生产系统是一个在物流、时间上缓冲余地小、抗干扰能力差的系统。这个生产系统能否有效运行，不仅取决于各工序间在计划、操作方面的时序保持高度一致，还取决于各工序产品在温度和质量方面的严格控制，因此，必须采取如下技术和管理措施，实现该系统的运行达到预期效果。

- ◆ 做到设计上的合理考虑：要使炼钢、轧钢做到合理匹配，不仅要考虑到连铸机与轧机在宽度、厚度、生产能力等方面的匹配，还要考虑到炼钢厂的炼成率、浇注成功率及其他操作、质量、设备方面的故障。要确定合理的厂房布置和送坯方式。
- ◆ 开发炼钢、轧钢同步生产的支撑技术：提高炼钢成分命中率和钢水洁净度，提高连铸机作业率，轧钢车间应配备一座冷、热连铸坯均可加热的加热炉，其燃烧系统调节灵活，能适应轧机小时产量的波动和经常性的冷、热坯交替装炉的情况。采用结晶器在线调宽技术、自由规程轧制技术和轧机调宽轧制技术等，以增强炼钢、轧钢之间的相互适应能力，提高两大工序间的物流一致性和生产的稳定性、可靠性。
- ◆ 建立炼钢——轧钢一体化的生产管理系统：高效的热装热送工艺需要一个可使炼钢、轧钢工序间实现物流直接连接和高速化的生产管理系统做支撑。这一管理系统必须具备炼钢、轧钢计划的同步化，物流管理顺畅，实时操作监控，操作、质量异常时的动态调整以及信息传递高效快速等功能。

采用连铸坯热装热送工艺技术有一定的难度。首先，各工序生产能力不匹配以及生产时物流控制为技术实施带来难题。从炼钢到连铸再到连轧过程中，生产线相对较长，生产受设备故障、操作技能以及特炼和特轧定修等问题的影响，连铸坯热装热送组织起来较为困难。其次，温降控制也有一定的难度。连铸坯从炼钢冷床到轧钢加热炉入炉辊道距离长，无保温措施，温降大，连铸坯送到轧钢加热炉往往达不到 500℃，节能效果小，且表面不再氧化，同时在轧钢生产过程中可能会发生轧制事故，部分连铸坯必须下线变成冷坯后再组织生产，无法利用现有的热能，达不到连铸坯热装热送的目的。再次，表面质量和内在质量控制困难。合金钢种对入炉温度的敏感性比较强，入炉温度的高低往往容易形成轧材的表面裂纹，如果能够有效进行连铸坯热装热送，坯料在加热炉内的加热时间大大缩短，其表面的氧化铁皮薄，势必造成因坯料表面的缺陷而导致成品易产生“红送裂”。由于轧制大规格圆钢时压缩比较小，轧材中心容易产生缩孔、疏松等内在质量缺陷，使组织不致密，影响其力学性能。

针对以上问题，钢铁企业在采用连铸坯热装热送技术时应该注意以下环节：对钢种进行最佳成分控制，实施内部按目标值进行控制，合金料加入前进行烘烤，对钢水进行真空脱气处理，采用无氧化保护浇铸等；加强连铸坯在运送过程中的保温控制，防止连铸坯在运送过程中的温降，充分利用连铸坯的热能，节约能耗；制定合理的温送工艺和加热工艺制造，不同的钢种由于其含碳量和合金成分的不同，热送的温度也就不同，如低碳钢和白点敏感性钢种应采用冷装和低温温送，中碳钢应采用中低温温送，高碳铬轴承钢应采用高温红送等；加大技改投入、优化轧制工艺，通过技术改造提高轧材的内部质量，使其内部组织更加致密，质量更趋稳定，有效防止由于二次氧化铁皮引起的钢材的表面质量问题；合理制定生产计划和进行科学管理，加强各生产环节的协调，运用科学的管理，统一组织安排定修和检修。

5.1.3 节能减排效果

连铸坯热装热送技术可大大降低轧钢加热炉加热连铸坯的能源消耗，减少钢坯的氧化烧损，提高轧机产量。根据有关的统计数据，采用热送热装技术后，在入炉温度为 500℃时，可节能 $0.25 \times 10^6 \text{kJ/t}$ ；入炉温度为 600℃时，可节能 $0.34 \times 10^6 \text{kJ/t}$ ；入炉温度为 800℃时，可节能 $0.514 \times 10^6 \text{kJ/t}$ 。另外由于缩短了连铸坯的加热时间，减少烧损，使成材率可提高 0.5%~1.5%。

5.1.4 成本效益分析

连铸坯热装热送技术建设投资约 100 万元。以年产 50 万吨棒线材生产线为例进行成本效益分析，总投资 2.12 元/t 钢坯，其中建设投资 2.00 元/t 钢坯，建

设期利息 0 元/t 钢坯（建设投资），铺底流动资金 0.12 元/t 钢坯。

投资估算详见下表。

表 5.1.1 连铸坯热装热送技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/t 钢坯）
一	建设投资	2.00
二	建设期利息	0.00
三	铺底流动资金	0.12
四	技术总投资	2.12

连铸坯热装热送技术经济效益包括：在入炉温度为 500℃时，可节能 $0.25 \times 10^6 \text{kJ/t}$ ，即收入 3.74 元/t 钢坯。连铸坯热装热送技术的应用，增加了固定资产折旧、修理等费用，上述各项费用合计 1.95 元/t 钢坯（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 1.74 元/t 钢坯，投资内部收益率 88.98%（税后），投资回收期（含建设期 0.5 年）2.2 年。经济评价总表见表 5.1.2。

表 5.1.2 连铸坯热装热送技术经济评价指标

序号	项 目	单位	项 目
一	总投资	元/t 钢坯	2.12
1	建设投资	元/t 钢坯	2.00
2	建设期利息	元/t 钢坯	0.00
3	铺底流动资金	元/t 钢坯	0.12
二	生产追加流动资金	元/t 钢坯	0.27
三	总资金	元/t 钢坯	2.39
四	资金筹措	元/t 钢坯	2.39
1	自有建设资金	元/t 钢坯	2.00
2	建设期利息	元/t 钢坯	0.00
3	自有流动资金	元/t 钢坯	0.39
4	建设资金贷款	元/t 钢坯	0.00
5	流动资金贷款	元/t 钢坯	0.00
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/t 钢坯	3.74
2	不含税总成本费用	元/t 钢坯	1.95
3	销售税金及附加	元/t 钢坯	0.04

序号	项 目	单位	项 目
4	利润总额	元/t 钢坯	1.74
5	所得税	元/t 钢坯	0.44
6	税后利润	元/t 钢坯	1.31
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	2.2
2	投资内部收益率	%	88.98

5.1.5 技术应用情况

由于热装热送技术可以在不投入或少投入的情况，取得良好的节能效益，并且提高成材率，连铸机与热轧在一个厂区，具备条件的钢铁企业均已采用该技术，只是上下工序衔接顺畅的差异，热装热送率及温度有所差别。特钢生产线产品主要为小批量、多品种，与炼钢匹配性较差，热送热装温度和比例较低。目前，各钢铁企业均十分重视节能减排，普钢生产线均尽量提高热装温度和比例。

2010 年，该技术普及率约 70%；“十二五”期末，预计推广比例将达到约 85%。重点提高热装温度和热装率。

表 5.1.3 2009 年部分钢铁企业热送热装情况

序号	企业	车间	热装温度（℃）	热送热装率（%）
1	沙钢	润忠一轧	550	60
2	沙钢	润忠三轧	700	70
3	沙钢	永新棒线厂	500	80
4	沙钢	沙景一轧	650	85
5	沙钢	沙景二轧	650	90
6	荣钢	热轧带钢厂	600	80
7	天钢集团	中厚板厂	600-800	70
8	邯钢	棒材一车间	600	70
9	邯钢	棒材一车间	400	70
10	邯钢	中厚板一车间	500	50
11	邯钢	中厚板二车间	500	85
12	唐钢	1700mm 热连轧	850	96
13	唐钢	棒材一车间	600	60

序号	企业	车间	热装温度（℃）	热送热装率（%）
14	唐钢	棒材二车间	800	100
15	唐钢	高线一车间	300	50
16	唐钢	高线二车间	400	60

5.1.6 技术知识产权情况

连铸坯热装热送技术最初由日本钢铁企业开发。随后，德国、法国、美国等国家的钢铁企业也采用了此项技术。国内多家企业也申请了相关专利，具体情况见下表：

表 5.1.4 连铸坯热装热送技术国内专利情况

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	金属锭、坯热送车载保温箱	CN2228813	上海第五钢铁厂	1994.12.27
2	钢坯热送车	CN2484134	济南钢铁集团总公司机械设备制造厂	2001.07.16
3	一种钢坯热装热送用的保温罩	CN201249765	宝山钢铁股份有限公司;上海宝冶工程技术公司	2008.06.23
4	一种采用直接热送、热装工艺生产合金塑料模具钢的方法	CN101474743A	首钢总公司	2008.12.26
5	一种热装热送下钢坯装置	CN101716609A	芜湖新兴铸管有限责任公司	2009.12.16
6	一种热装热送下钢坯装置	CN201558873U	芜湖新兴铸管有限责任公司	2009.12.16

5.2 低温轧制技术

5.2.1 技术介绍

低温轧制是指在低于常规热轧温度下的轧制，国外也称中温轧制或温轧。其目的是为了大幅度降低坯料加热所消耗的燃料，减少金属烧损，而把开轧温度从 1000℃-1150℃降低至 850℃-950℃。虽然如此会增大粗、中轧部分的轧制压力，

从而需要提高粗、中轧机的强度，增大轧钢能耗；但综合考虑加热炉加热温度的降低而节约的燃料，综合平衡后仍可节能 20%左右。低温轧制技术是降低轧钢工序能耗的重要节能措施。降低加热炉出钢温度，可减少加热过程的燃料消耗，减少坯料的烧损。随着出钢温度的降低，氧化铁皮量也显著减少。采用低温轧制可以缓解轧制过程轧辊温度变化，减少因热应力引起的轧辊消耗。降低轧制温度，可以减少轧制过程中二次氧化铁皮生成量，降低轧辊磨损量，从而降低辊耗。同时在降低轧制温度后，轧件的塑性也随之降低，这将会导致轧制力矩、轧制力增大，咬入条件恶化，从而使轧制功率增加。统计数据显示，低温轧制在燃料消耗和氧化铁皮量上降低所得的效益，完全能抵消并超过提高轧制功率增加的成本。因此，如果轧机的刚度、轧制力、辊身强度、主电机功率等能满足低温轧制的要求，轧后产品性能也能满足要求，则降低钢坯的加热温度可在节能降耗、减少金属烧损等方面获得明显的经济效益。

具体看，低温轧制的优点是：减少加热能耗；减少氧化烧损、提高成材率；提高轧钢加热炉的加热产量、延长加热炉的寿命；减少轧辊的热应力疲劳裂纹和断辊以及氧化皮引起的磨损；降低脱碳层深度；提高产品的表面质量；细化晶粒、改善产品性能。低温轧制的缺点是：加大了轧材的变形抗力，从而加大了轧制力和轧制功率；降低了轧制时轧材的塑性，从而影响轧材的咬入；有时需降低道次压下量，增加道次。

5.2.2 技术适用条件

适用于低温轧制的钢种很多，从低碳钢、中碳钢、高碳钢到调质钢、轴承钢和弹簧钢，都可用低温轧制工艺；对于合金含量较高的钢种，轧制变形抗力大，不适用低温轧制；轧机的刚度和电力设备都能满足要求；轧机为连续紧凑式布置，轧件本身的变形热与轧制过程中的散热基本上平衡，温降小。

采用低温轧制技术，要严格控制轧制温度。在不同温度条件下形成的二次氧化铁皮的组成不同，工作辊的磨损也不同。当温度低于 900℃时，钢板表面的氧化层主要是 FeO，并带有少量的 Fe₃O₄，没有 Fe₂O₃；但当温度在 900℃以上时，FeO 量减少，随之 Fe₃O₄ 增多，会有 Fe₂O₃ 生成。Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃ 比 FeO 硬度高，更耐磨。因此，当钢材温度超过 900℃时，轧辊的磨损比温度较低时更为严重。从减缓轧辊磨损、提高钢材表面质量的角度出发，希望精轧阶段钢板温度尽可能低，但是还应考虑到轧机的轧制能力。

低温轧制的温度应考虑到以下几个方面：（1）为保证被轧产品的性能均匀，精轧最后道次的变形必须在奥氏体区完成；（2）为了既保证由于外加各种合金元素引起的碳化物的固溶，又防止由于加热温度过高引起的晶粒过度粗大对最终成

品质量带来不利影响，板坯出炉温度应当控制在一合适的范围内；（3）轧机的轧制能力。不同钢种适宜低温轧制的温度见下表。

表 5.2.1 不同钢种适宜低温轧制的温度

序号	钢种	低温轧制（℃）	常化轧制（℃）
1	低碳钢	800~850	880~920
2	中碳钢	800~850	860~900
3	高碳钢	750~800	850~900
4	齿轮钢	750~850	850~900
5	淬火回火低合金钢	750~800	850~900
6	弹簧钢	750~800	850~900
7	冷墩钢	780~800	850~900
8	轴承钢		850~900
9	微合金钢	750~800	850~900

此外，实现低温轧制的关键是粗轧机的能力问题，只要粗轧机有足够的力量，在轧件塑性允许的范围内，适当降低钢坯的加热温度，实现轧钢节能是完全可行的，今后无论是老轧机改造或新轧机的建设，粗轧机的能力要给予足够的重视。

5.2.3 节能减排效果

现代钢铁生产由连铸坯到精轧成品过程中，大部分能量消耗在钢坯再加热过程中，即总能耗的 60%左右用于加热炉的燃耗（即冷坯加热）。用于轧制的能耗仅占 40%左右。轧钢节能的潜力主要来源于加热炉，可有效降低钢坯加热温度，减少吨钢燃耗，从而达到节能减排的目的。据统计，棒材开轧温度从 1000~1100℃降低到 950~1050℃ 时，虽然轧钢能耗有所提高，但由于加热炉燃料消耗大大减少，因而可综合节能 10%~20%左右，氧化铁皮厚度可减少 0.15~0.2mm。

2008 年，首钢水城钢铁（集团）有限公司轧钢厂通过实施《低温轧制降低煤气消耗》节能攻关项目，积极开展节能降耗攻关活动。他们结合焦炉煤气和转炉煤气在使用过程中热值较高，温度均匀的性能，进一步优化工艺流程，大力倡导低温轧制，6 月份，轧钢厂在二轧钢车间生产班组开始推行低温轧制技术，结果全年高线煤气单耗为 66.2m³/t，比公司考核指标 72m³/t 低 5.8m³/t，而电耗量没有增加，轧制电流也没有变化，氧化铁皮平均减少 0.2mm。7 月份，二棒生产班组开始执行新的炉温控制制度后，在电耗量没有增加的情况下，二棒煤气消耗平均每吨材降低到 122.82m³/t，比考核指标 136m³/t 低 13.18m³/t；氧化铁皮厚度由

原来 0.9mm 减小到 0.75mm，平均减少 0.15mm。高线、二棒不仅降低了煤气消耗，而且减少了烧损，创经济效益 200 余万元。

瑞典 Fagersta 公司用直径 70 mm S1650 中碳钢坯经 14 道轧成 10.5mm 方钢时，750℃加热轧制比 1150℃加热轧制节约能量约 182kWh/t。瑞典年产 22 万吨普通低碳钢线棒材轧机采用低温轧制的节能创效情况见下表。

表 5.2.2 常规轧制与低温轧制的能耗

项目	钢坯加热温度（℃）		节能（kWh/t）
	1150	750	
加热能耗	507	302	205
轧制能耗	49	72	-23
合计	556	374	182

5.2.4 成本效益分析

据统计，从 1100℃到 900℃，25MnSi 的变形抗力大约增加 1.5 倍。如果实行低温轧制，开轧温度从 1150℃降到 900℃，轧制力大约增加到原来的 1.4 倍，这样要求粗轧机电机功率和轧制力都要大。近年新建轧机在刚度、电机等方面均能满足低温轧制技术要求，采用低温轧制技术需要降低轧制温度，不需要软件及硬件投资。但老旧轧机采用低温轧制，或现有轧机以生产普碳钢为主，改为生产优质钢采用低温轧制，需对粗轧机进行改造。如南钢高速线材轧机是按生产普碳钢设计的，轧机均为轻载型，不能适应品种钢低温轧制的要求，造成了许多需要低温出钢的钢种，如钢帘线、弹簧钢等无法按工艺要求进行生产，产品性能不佳、表面脱碳严重。另外也使得氧化烧损增加，改造前出钢温度最低在 1080℃左右，氧化烧损在 1.2%左右，高于加热炉烧损率 0.7% 的理论设计值。为此，南钢对高速线材粗轧机改造成高刚度短应力线轧机，从而保证采用低温轧制技术。

近年新建轧机在刚度等方面均能满足低温轧制技术要求。如对现有轧机进行改造，则需投入部分改造费用，因不同生产线改造投资差别较大，此处以 80 万吨连续棒材生产线为例进行分析估算。总投资 2.60 元/t 钢坯，其中建设投资 2.50 元/t 钢坯，建设期利息 0 元/t 钢坯（建设投资），铺底流动资金 0.10 元/t 钢坯。投资估算详见下表。

表 5.2.3 低温轧制技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/t 钢坯）
一	建设投资	2.50

二	建设期利息	0.00
三	铺底流动资金	0.10
四	技术总投资	2.60

低温轧制技术经济效益包括：节省 8kg 标煤/t 钢坯，即收入 4.65 元/吨 t 钢坯。低温轧制技术的应用，增加了电力等能源费用，合计 3.12 元/t 钢坯。

经测算，达产年年利润总额为 1.44 元/ t 钢坯，即采用低温轧制技术可节约成本 1.44 元/t 钢坯。经济评价见下表。

表 5.2.4 低温轧制技术经济评价指标

序号	项 目	单位	项 目
一	总投资	元/t 钢坯	2.60
1	建设投资	元/t 钢坯	2.50
2	建设期利息	元/t 钢坯	0.00
3	铺底流动资金	元/t 钢坯	0.10
二	生产追加流动资金	元/t 钢坯	0.23
三	总资金	元/t 钢坯	2.83
四	资金筹措	元/t 钢坯	
1	自有建设资金	元/t 钢坯	2.83
2	建设期利息	元/t 钢坯	2.50
3	自有流动资金	元/t 钢坯	0.33
4	建设资金贷款	元/t 钢坯	0.00
5	流动资金贷款	元/t 钢坯	0.00
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/t 钢坯	4.65
2	不含税总成本费用	元/t 钢坯	3.28
3	销售税金及附加	元/t 钢坯	0.09
4	利润总额	元/t 钢坯	1.29
5	所得税	元/t 钢坯	0.32
6	税后利润	元/t 钢坯	0.96
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	2.7
2	投资内部收益率	%	17.1

5.2.5 技术应用情况

低温轧制技术较多运用于棒线材，在热连轧、中厚板生产线应用也较多。

早在上世纪 90 年代，宝钢就已成功应用低温轧制技术。宝钢 2050mm 热连轧板坯常规出炉温度为 1250℃，个别低合金高强度钢种按 1180℃控制。由于出炉温度高，氧化烧损高达 0.8% 以上，而新日铁名古屋热轧厂 1994 年 4 月至 1995 年 3 月烧损最高 0.84%，最低 0.31%。要提高成材率就必须降低板坯出炉温度，减少氧化烧损。降低板坯出炉温度，则必须减少轧线温降，并降低粗轧出口温度及终轧温度。目前，宝钢 2050mm 热连轧采用低温轧制后，出炉温度降低到 1090℃，烧损降低到 0.8%以下，产品质量得到明显改善。如宝钢 2050mm 热连轧在 O5 板和轿车用轮辐板的生产过程中，通过降低粗轧出口温度从 1000℃以上降至 960~980℃，带钢表面氧化铁皮压入细孔问题得到显著改善。

在取向硅钢方面，低温生产工艺是取向硅钢工艺的发展方向，难度更大，仅新日铁、浦项等国外少数钢铁企业掌握。经过近几年的研发，我国宝钢、武钢生产取向硅钢均已掌握低温取向硅钢生产技术。宝钢生产低温取向硅钢加热温度 1150℃，而高温工艺加热温度要达到 1400℃，加热温度下降了 250℃，热轧吨钢能耗下降约 40%。按 30 万吨产能计算，每年节约 1 万吨标准煤。热轧成材率从 85%提高到 95%，省去加热炉清渣等降低生产效率的特殊维护环节。

目前，该技术在国内外钢铁企业的普及率较低，为 20%。“十二五”期末，预计推广比例将达到 40%。

5.2.6 技术知识产权情况

低温轧制技术最初由日本、美国、韩国开发使用，为降低能耗，提高成材率，得到更高水平的质量，我国有条件的钢铁企业也逐步开始研发、采用。国内多家企业申请了相关专利情况见下表：

表 5.2.5 低温轧制技术国内专利情况

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	一种轧制线材的装置	CN2595471	马鞍山钢铁股份有限公司	2002.09.30
2	一种低碳钢螺纹钢筋的轧制方法	CN1586750	钢铁研究总院	2004.08.20
3	一种取向硅钢及其生产方法和装置	CN101716609A	宝山钢铁股份有限公司	2004.12.27
4	一种高强度中厚钢板生产	CN101209456	鞍钢股份有限公	2006.12.27

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
	方法		司	
5	一种低温板坯加热生产取向硅钢的方法	CN101463447	鞍钢股份有限公司	2007.12.18
6	一种低温加热生产高磁取向硅钢的方法	CN101748259A	鞍钢股份有限公司	2008.12.12
7	生产超细晶棒材的轧机机列及其轧制方法	CN101518781	钢研新冶高科技集团有限公司	2009.03.31

5.3 热带无头轧制、半无头轧制技术

5.3.1 技术介绍

为缩短工艺流程、节约能源和降低生产成本，热轧生产逐渐向紧凑、连续、高效、节能、高技术集成的无头\半无头轧制方向发展。无头/半无头轧制就是实现钢坯在轧机中的连续轧制，或者实现连铸坯的直接轧制。

热带无头轧制技术目前有两种：一是在常规热连轧线上，在粗轧与精轧之间将粗轧后的中间板坯快速连接起来，在精轧过程中实现无头轧制；二是 ESP 技术，即无头连铸连轧技术。

半无头轧制是在薄板坯连铸连轧线上，采用比通常单坯轧制的连铸坯长数倍的超长尺寸薄板坯进行连续轧制的技术。

（1）中间坯连接无头轧制技术

传统的板带热连轧精轧机组生产均以单块中间坯进行轧制，进精轧机组时的穿带、加速轧制、减速轧制、抛钢、甩尾等过程不可避免。因此，难以保证带钢头尾厚差和穿带质量均匀性，轧制作业率、成材率也受到一定限制。

中间坯连接无头轧制技术就是在常规热连轧线上，在粗轧与精轧之间将粗轧后的中间板坯快速连接起来，在精轧过程中实现无头轧制。无头轧制的目的在于解决间断轧制问题的同时超越间断轧制的限制。其中主要有：通过无头尾轧制解决穿带问题；通过无非稳定轧制提高质量稳定性和成材率；通过提高连接部位穿带速度并使间隙时间为零提高生产效率；可生产超越过去极限轧制尺寸的超薄带钢或宽幅薄板，以及通过润滑轧制和强制冷却轧制新品种。

①提高穿带效率：JFE 制铁千叶厂 3 号热带轧机采用由最多 15 块中间坯组成的无头轧制，在该组轧制中除了头块坯的头部和最后一块坯的尾部外，从精轧机组到卷取机如同轧制一块板一样。弯曲和蛇形多是由于无张力产生的头尾特有

现象，当施加张力后，几乎不发生蛇形现象并可实现稳定轧制。

②提高质量稳定性和成材率：无头轧制使整个带卷保持恒定张力，实现稳定轧制并且不发生由轧辊热膨胀和磨损模型引起的预测误差及调整误差产生的板厚变化和板凸度变化，可显著提高板厚精度。超薄热带的厚度精度可达 $\pm 30\mu\text{m}$ ，合格率超过 99%，1.0mm 带钢合格率甚至比 1.2mm 还要高。超薄热带还显示出优良的延伸率和正常的微观组织结构。另外，通过稳定轧制也提高了温度精度。在无头轧制中几乎不发生板带头部到达卷取机前这段约 150m 长的尺寸板形不良或非稳定轧制引起的质量不良。

③提高生产率：通常在热轧厂生产 1.2-1.8mm 的薄规格板带时，由于板带头部在辊道上发飘，穿带速度限制在 800m/min 左右，而无头轧制已不受此限制，各板坯连接处的穿带速度可达 1000m/min 以上。另外，单块坯轧制中的间歇时间无头轧制中减为零，可显著提高薄规格轧制效率。

④可生产薄而宽的钢板和超薄规格板：无头轧制的主要目的之一在于稳定生产过去热轧工艺几乎不可能生产的薄宽板和超薄规格钢板。例如，过去热轧最薄轧制到 1.2mm，最宽到 1250mm。采用无头轧制时，可将非常难轧的材料夹在较容易轧制的较厚材料之间，使其头尾加上张力进行稳定轧制。因此，板厚 1.2mm 的可轧到 1600mm 宽，板宽 1250mm 以下的可轧到 0.8mm 厚。

⑤通过润滑轧制和强制冷却轧制生产新品种：热轧时采用强制润滑轧制可生产具有优良性能的钢板，但实际上，为了防止因喷润滑油产生的头部咬入打滑，稳定的润滑区仅限于每卷的中部区域。因此产品质量难以稳定，成材率也低。在无头轧制中，当第一块板坯的头部通过精轧机组后，直到最后部分板带通过机组的较长时间内都可实现稳定润滑，因此，在能进行稳定润滑的同时又可减少材料损耗 1/6~1/10。

(2) ESP 无头轧制技术

2009 年 6 月，世界第一条薄板坯无头连铸连轧生产线（ESP）在意大利阿尔维迪公司克莱蒙纳厂正式投入工业化运行。这是历史上首次以连续不间断的生产工艺通过薄板坯连铸连轧设备从钢水直接生产出热轧带卷。该设备基于阿尔维迪 ISP 技术，由西门子奥钢联冶金技术制造安装，能够实现钢水热能最大程度的开发利用。这套新的铸轧生产设备是世界上生产热轧带钢最紧凑的生产线，总长仅有 190m，连铸和轧制工艺直接串联，显著降低成本。而且，ESP 生产线是第一条能够在 7min 内完成从钢水到地下卷曲机上的全连续生产线。这套设备额定产能为 200 万吨/年，生产带卷最宽可达 1600mm，最薄可达 0.8mm。所生产的薄规格和超薄规格热轧带卷可以直接下游生产加工。ESP 无头带钢生产线能够生产从低碳钢到高碳钢以及合金钢的完整产品系列，包括高等级优质钢种，比如高硅

钢和用于制造汽车车身面板的 IF 钢。

ESP 无头带钢生产线拥有众多先进的技术和系统，主要包括：其中包括液芯压下以及动态辊缝调宽和轻压下等工艺包，从而确保最佳内部铸流质量。铸机直接与配有 AGC 和辊形控制的 3 机架四辊大压下轧机相连；在单独控制设置点的基础上，感应加热炉可在 1100℃ 到 1200℃ 的温度范围内灵活地将传送钢带均匀加热。5 机架精轧机配有 SmartCrown 辊以确保带钢具有非常好的平直度。钢带在走出最后一个机架后，由层流冷却系统进行冷却，从而根据需要调整带钢的力学特点。钢带经高速剪切机切割之后，由三个地下卷曲机中的一个进行卷取，单卷重量可达 32t。整条生产线完全由集成的 1 级和 2 级自动化系统控制，该系统可以全面调节所有铸轧操作。另外还有一个全面质量控制系统进行辅助，可确保产品达到所需的质量标准。

与传统薄板坯连铸连轧工艺相比，ESP 无头带钢生产线所需的能源和水消耗大幅降低。根据最终产品的不同，能量消耗可降低 50%-70%，水消耗可减少 60%-80%。

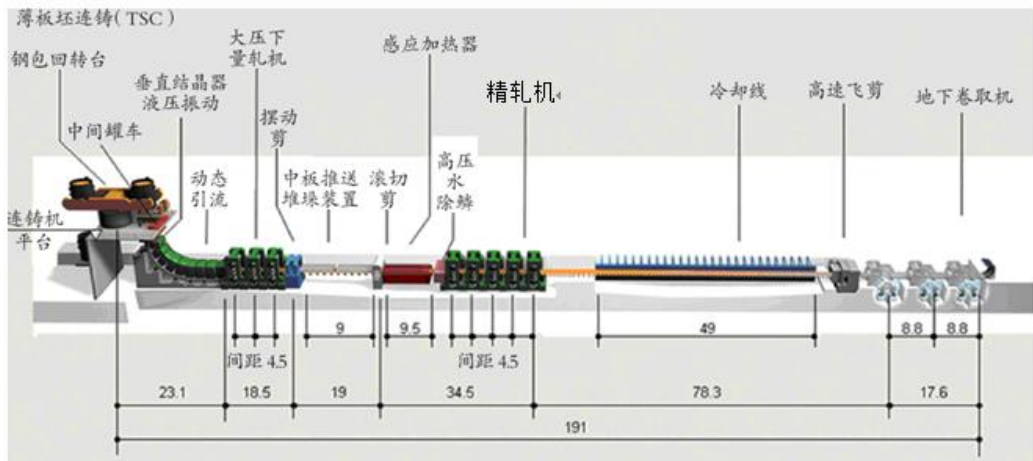


图 5.3.1 意大利阿尔维迪公司克莱蒙纳厂 ESP 生产线

(3) 半无头轧制技术

半无头轧制技术就是在薄板坯连铸连轧线上，采用比普通单坯轧制的连铸坯长数倍的超长尺寸薄板坯进行连续轧制的技术。

该技术适合于在已有的薄板坯连铸连轧线上实施。在薄板坯连铸连轧线层冷线后端、卷取机前设置高速飞剪，采用超长尺寸薄板坯进行连续轧制，采用高速飞剪切割分卷。

该技术仅需在已有的薄板坯连铸连轧线上设置高速飞剪(有的生产线已有飞剪)，投资估算约 2000 万元，生产高精度薄规格热轧板带及降低消耗等可实现吨钢效益增加 20%~30%。

5.3.2 技术适用条件

(1) 中间坯连接无头轧制技术

中间坯焊接热带无头轧制技术适合于对现有常规热连轧线进行局部改造后实施。其关键技术是在粗轧与精轧之间将粗轧后的中间板坯在几秒钟之内快速连接起来，在精轧过程中实现无头轧制，并在卷取机前采用高速飞剪切割分卷。

作为无头轧制的关键技术，目前的中间坯连接技术仍有其局限性，有必要研究开发新的连接技术以提高连接强度，进一步缩短连接时间、扩大连接范围（尤其是异钢种坯），从而推动热带无头轧制技术的进一步应用。

(2) ESP 无头轧制技术

ESP 无头带钢生产线拥有众多先进的技术和系统，主要包括：其中包括液芯压下以及动态辊缝调宽和轻压下等工艺包，从而确保最佳内部铸流质量。铸机直接与配有 AGC 和辊形控制的 3 机架四辊大压下轧机相连；在单独控制设置点的基础上，感应加热炉可在 1100℃ 到 1200℃ 的温度范围内灵活地将传送钢带均匀加热。5 机架精轧机配有 SmartCrown 辊以确保带钢具有非常好的平直度。钢带在走出最后一个机架后，由层流冷却系统进行冷却，从而根据需要调整带钢的力学特点。钢带经高速剪切机切割之后，由三个地下卷曲机中的一个进行卷取，单卷重量可达 32t。整条生产线完全由集成的 1 级和 2 级自动化系统控制，该系统可以全面调节所有铸轧操作。另外还有一个全面质量控制系统进行辅助，可确保产品达到所需的质量标准。

(3) 半无头轧制技术

半无头轧制技术适合于在已有的薄板坯连铸连轧线上实施。在薄板坯连铸连轧线层冷线后端、卷取机前设置高速飞剪，采用超长尺寸薄板坯进行连续轧制，采用高速飞剪切割分卷。

5.3.3 节能减排效果

(1) 中间坯连接热带无头轧制和半无头轧制技术

中间坯连接热带无头轧制和半无头轧制技术在低成本大批量生产薄规格和超薄规格板带（厚度=2~0.8mm）实现以热代冷、提高成材率 1%~2%、提高板厚板形精度、降低生产成本（能耗、辊耗、材料消耗）间接综合节能超过 20%，减少排放 20%~30%。

(2) ESP 无头轧制技术

ESP 无头轧制技术能耗低主要源于：大压下轧机轧制操作利用了连铸的热量，加上压下时材料中心依然很软，需要的变形能量降到最低；在高拉速下，ESP 生产线在极限条件时的感应加热器能量输入将降至零。所生产的薄规格热轧

带钢替代冷轧带钢，可以节省冷轧、退火和光整所需要的能量，前景更加诱人。比 ISP 技术相比，ESP 无头轧制技术能耗减少约 25%-30%；比传统热带钢轧机相比，ESP 技术减少约 40%。ESP 生产线不仅能耗低，而且温室气体和有害气体（NO_x 和 CO_x）的直接和间接排放量也有所减少，生产普通规格时仅为传统生产工艺的 40%~50%，生产薄规格时仅为传统生产工艺的 65%~70%。

5.3.4 成本效益分析

热带无头轧制：对现有常规热连轧线进行局部改造，在粗轧与精轧之间设置将粗轧后的中间板坯快速连接装置、并在卷取机前增设高速飞剪，投资约 1.5 亿元，生产高精度薄规格热轧板带及降低消耗等可实现吨钢效益增加 20%~30%；

半无头轧制：仅在已有的薄板坯连铸连轧线上设置高速飞剪（有的生产线已有飞剪），投资约 2000 万元，生产高精度薄规格热轧板带及降低消耗等可实现吨钢效益增加 20%~30%。

ESP 无头轧制技术：阿维迪 ESP 生产线采用总长为 190m 的高度紧凑式设计，与传统的薄板坯连铸连轧设备相比，投资成本更低（比传统的薄板坯设备，甚至比已经运行在克莱蒙纳的 ISP 生产线还要低）。ESP 技术的生产成本的特点是能耗更低（比 ISP 减少约 25%~0%，比传统热带钢轧机减少约 40%）、易损件（结晶器、轧制油缸等）的支出成本更低和更高的钢水收得率（达到 98%）。感应加热器的效率非常高，能够将大约 2/3 的电能转化成加热中间坯的热能。ESP 的加工成本将明显低于 ISP（约低 20%~30%），相比于传统工艺也将降低 50%左右。对于年产能力为 200 万吨的阿维迪 ESP 生产线来说，从连铸钢包回转台到地下卷取机的加工成本，估计可以达到 24 欧元/t（这一成本估算考虑了欧洲的成本因素，而没有包括维修和一般费用）。

表 5.3.1 从钢水到带卷的转换成本比较

生产工艺类型	转换成本，欧元/t
传统热带钢轧机	44
其它薄板坯生产技术	34.5
ISP 生产线	31
ESP 生产线（200 万吨/a）	22-24

5.3.5 技术应用情况

（1）中间坯连接无头轧制技术

1996 年，JFE 钢铁公司千叶厂投产了世界上首套连续热带轧机即 3 号热带轧

机，在这套轧机的精轧机人口侧，先将中间坯连接在一起，然后再经过精轧进行连续轧制。传统工艺中，热轧机组的轧制周期为 2min 左右，而新工艺中的连续精轧时间可长达 20~30min，且该工艺实现了无头轧制。

无头轧制工艺由薄带坯供给工序、焊接后处理工序、精轧工序和卷取工序组成。无头轧制工艺流程见下图。

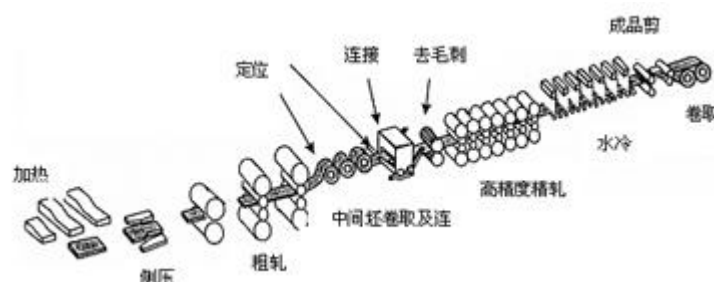


图 5.3.2 无头轧制工艺简图

到目前为止，无头轧制工艺仍在不断调整，使之有序地过渡到标准化生产模式。目前，由间歇式轧制很难生产的厚度在 1.2mm 以下的超薄热轧带钢，在采用无头轧制工艺后，已经能够进行标准化生产。

采用无头轧制技术，不仅能避免精轧时首尾部的非稳定现象，大幅度提高轧制稳定性，而且能降低板厚及终轧出口温度和卷取温度等波动，大幅度提高热轧钢板品质。同时，在极薄热轧带钢、应用热轧润滑轧制实现超深冲钢板的生产以及高品质高强度钢板和不锈钢板新产品生产方面有着巨大的应用前景，是热带无头轧制技术今后的发展方向。

中间坯连接热带无头轧制在国外已有成功先例（日本、韩国），效果很好，国内最近也已形成自己的专利技术。为适应当今世界热轧技术发展趋势，提高产品竞争力，我国现有热轧厂应考虑采用无头轧制技术进行技术改造，开发更适合消费者需求的新产品。我国现有各类宽带钢热轧生产线 50 多条，热带钢生产能力约 2 亿吨。这意味着该技术在国内的应用前景广阔。

（2）ESP 无头轧制技术

2009 年 6 月，世界第一条薄板坯无头连铸连轧生产线（ESP）在意大利阿尔维迪公司克莱蒙纳厂正式投入工业化运行。ESP 无头轧制生产工艺由 4 个主要工段构成。第 1 段包括薄板坯连铸机和位于连铸机出口的 3 机架四辊大压下轧机。该大压下轧机对板坯（厚度 55mm-65mm）进行轧制。铸坯中心具有较低的变形阻力，因而有利于材料结构的改善，材料性能的均匀化，能耗的降低以及凸度指标的明显改善。经过大压下量轧机后，中间坯的厚度在 10mm-20mm。第 2 段是在感应加热器内将中间坯的温度调节到满足精轧要求的水平。带钢的温度是工艺

性能的关键。感应加热能够在近距离内精确地控制温度，并且提供大能量输入。第3段包括了在精确去除氧化铁皮的同时减少温度损失的高压除鳞机以及5机架精轧机。轧机的设计能够轧制最大宽度 1570mm，厚度 0.8mm-12.0mm（甚至更薄）的带钢。精轧机出口处安装的先进冷却系统为各种钢种（包括高强度低合金钢和多相钢）的生产奠定了基础。第4段包括高速飞剪，其在地下卷取机前进行切割。卷取带钢的最大卷重可以达到 32t。

ESP 生产线能够生产从低碳钢到高碳钢，以及合金钢的完整产品系列，包括高等级优质钢种（如取向和非取向硅钢，用于制造汽车车身面板的 IF 钢）。而且，该 ESP 设备可以生产出达到冷轧表面质量（A 级）的热轧产品（可以直接用于汽车裸露部件的制造）；还可以使用转炉钢水生产出具有 IF 钢特点的热轧产品。ESP 连续无头轧制避免了带钢向最后机架穿带的问题，因而可以大量生产能够在许多用途中替代冷轧产品的薄规格（厚度 0.8mm-1mm）热轧产品，包括：①屈服极限高达 315MPa 的厚 1mm 钢种；②屈服极限高达 420MPa 的厚 1.25mm 钢种；③厚度≤2mm 的高强度钢种（强度 700MPa-800MPa）；④1.2mm-1.5mm 的 DP600-DP1000 钢种。

2009 年产量达 45 万吨，预计 2010 年可达 150 万吨。已经证实，ESP 无头轧制技术非常适合薄规格板带的生产。在 2010 年 3 月份的生产数据中，大约 50% 的带钢厚度小于等于 2mm，超过 30% 的产品厚度小于等于 1.5mm，其中 21% 为超薄规格。

此外，在 ESP 无头轧制生产线上生产出的热轧超薄带钢，还可以在后序的连续酸洗线和冷轧线上进行处理（3 机架六辊串列式冷轧机），这些设备预计 2010 年底投入运行。应用这两条总长不超过 500m 的生产线，不经过中间退火就可以得到厚度小于 0.2mm 的薄板。

（3）半无头轧制技术

半无头轧制技术是轧钢领域的前沿技术，尤其是在薄板坯连铸连轧生产线上的应用，尚处于开发阶段，其技术、设备及生产组织协调等方面都不是十分成熟。唐钢薄板坯连铸连轧生产线上，为生产超薄带钢而采用了此项技术。

半无头轧制技术主要应用于超薄带钢生产，它的主要优点如下：

- ①因为保持高速轧制，轧机生产效率大大提高。
- ②机架间带钢张力可以保持稳定，使带钢厚度及平直度偏差减至最小。
- ③因为解决了超薄带钢直接穿带及甩尾困难的问题，从而使薄带钢的生产趋于稳定可靠。
- ④减少了单块轧制时因带钢头尾形状不良所带来的废品量，提高了产品质量及成材率。

⑤由于采用两台地下卷取机经高速飞剪分卷后分别卷取的方法，故在生产节奏允许的情况下，可实现小吨位钢卷的分卷轧制，既满足市场需求，又不影响轧机生产能力。

半无头轧制工艺可以归纳为以下三种方案：

①减薄提速方案：主要用于生产 0.8~1.2mm 厚度的产品；即长铸坯头部低速穿带，轧制成较厚的产品，带头进入卷取机后整个轧线开始升速，并进行动态压下，使厚度减薄（也可以轧制要求的长度后再进行升速及动态压下）；经几次升速、减薄后，达到要求的产品厚度及终轧温度。当长坯尾部达轧机前，辊缝必须动态打开并降速，以较厚的产品低速甩尾（也可以按要求的尾部长度进行降速及打开辊缝），完成半无头轧制的全过程。

②恒厚度提速方案：主要用于生产 1.2~1.5mm 厚度的产品；即长铸坯低速咬入，卷取后即可提速，以保证达到要求的终轧速度及终轧温度。但轧制过程中不需要进行辊缝的动态压下。

③恒厚度恒速度方案：主要用于生产 1.5~4.0mm 厚度的产品。

半无头轧制必须采用的关键技术及设备

①轧制过程中动态变厚度（FGC）的技术。②工艺润滑技术。③动态凸度控制技术。④高速飞剪分卷功能。⑤卷取机前的高速通板装置。⑥高速双地下卷取机。⑦大功率的主驱动马达。

当进行半无头轧制时，带钢最高速度可达 16~18m/s，为实现高速分卷功能，该生产线装备了高速飞剪和剪前后夹送辊；两台高速地下卷取机及夹送辊。在高速飞剪剪切分卷后，为了保证薄规格带钢头部稳定通过输送辊道，在两台卷取机前装备了特殊的高速通板装置。当分段剪切点出精轧机后，飞剪前夹送辊闭合，以保证剪切点到轧机间的张力恒定，飞剪剪切后，剪后夹送辊闭合，防止尾端甩尾；1#卷取机前夹送辊通过上下辊组合运动实现辊缝方向的改变，可将带头导入所要求的卷取机，并在带头稳定卷取前夹持带钢，保持带钢张力稳定。

（4）无头/半无头轧制技术推广应用前景

热带无头轧制在国外已有成功先例，效果很好，国内最近也已形成自己的专利技术。半无头轧制技术已有一家成功批量生产应用，另两家在积极开发和应用。

热带无头轧制技术当前国内没有应用，“十二五”末，预计该技术的推广比例将达到 10%。热带半无头轧制技术当前国内应用普及率不及 1%，“十二五”末，预计该技术的推广比例将达到 10%。

5.3.6 技术知识产权情况

目前，热带无头轧制技术归日本和韩国拥有，国内最近也已形成自己的专利

技术。在薄板坯连铸连轧生产线上，国内已成功开发半无头轧制技术。

意大利钢铁制造商—阿维迪公司拥有 ESP 无头轧制技术。该技术已在全球申请 200 多项专利。目前，该技术不转让。

5.4 在线热处理技术

5.4.1 技术介绍

钢材热处理是通过一定的加热、保温和冷却等工艺改变固态钢铁材料组织和性能的一种工艺。与其他加工工艺相比，热处理一般不改变工件的形状和整体的化学成分，而是通过改变工件内部的显微组织，或改变工件表面的化学成分，赋予或改善工件的使用性能。其特点是改善工件的内在质量。热处理对于钢铁材料特别重要。这是因为钢铁材料在加热和冷却过程中会发生非常复杂的相变，如果能够控制热处理过程中加热、保温、冷却过程的参数，就可以在很大的程度上控制钢材的相变，从而在很大的范围内改变钢材的组织，赋予其不同的性能。热处理是人们驾驭钢铁材料、调控钢铁材料组织、挖掘钢铁材料潜力的极为重要的手段。

传统热处理工艺都是轧制成形完成之后进行的，也可以说是“离线”（离开钢材加工线）进行的。由于钢材的成形过程通常要加热到奥氏体区，如果在适宜的温度终止热加工过程，并进行随后的保温、冷却、回火等过程，则这种将变形与热处理结合在一起的过程通常称为形变热处理，英语简称为 TMCP（ThermoMechanical Controlled Processing）。由于这种热处理是在钢材加工线上进行的，所以也可称为“在线”热处理。形变热处理是形变强化和相变强化相结合的一种综合强化工艺。它包括金属材料的塑性变形和固态相变两种过程，并将两者有机地结合起来，利用金属材料在形变过程中组织结构的变化，影响相变过程和相变产物，以得到所期望的组织与性能。形变（在线）热处理将金属材料的成形与获得材料的最终性能结合在一起，简化了生产过程，减少能源消耗及设备投资。

热处理工艺伴随钢铁材料的发展而发展。普通的离线热处理已经有上千年的历史了。而形变热处理则是在上一世纪得到了迅速的发展。控制轧制和控制冷却技术就是一个有代表性的例子。直至上一世纪 70 年代，人们逐渐认识到控制冷却技术对提高材料性能的重要意义，各个大公司分别开发了各种类型的加速冷却系统。控制轧制和控制冷却从理论到实践取得了长足的进步。在此阶段，采用一定的合金设计和相应的控制冷却，可以实现相变强化，借此开发了低碳贝氏体钢、针状铁素体钢、超低碳贝氏体钢等。以后，随着汽车轻量化的需求日益迫切，热

轧汽车用双相钢、TRIP 钢等相变强化钢受到人们的重视，人们采用合理的热轧后冷却路径控制实现钢材的性能控制，控制冷却又取得新的进展。到上一世纪 80 年代，日本等钢厂开发了在线淬火设备，直接淬火技术逐渐应用于实际。随着冷却技术的应用，国际上开发了一批控制冷却实用装置，例如日本的 OLAC（日本钢管）、CLC（新日铁）、DAC（住友）等和欧洲的水枕式冷却等。至世纪之交，以 UFC、Super-OLAC、CLC- μ 等为代表的超快速冷却装置的出现，为在线热处理的冷却过程提供了新的手段。采用超快冷的新的控制轧制和控制冷却技术与传统的控制轧制控制冷却在细晶、析出、相变等过程的控制上，采用不同的思路，因而可赋予材料更为优良的性能。此外，在线回火的出现使得“离线”的热处理过程进一步“在线化”，这意味着 TMCP 技术又有了新的发展。

简而言之，在线热处理就是利用轧制余热对钢材进行热处理，可以省去离线热处理的二次加热工序，因而达到节省能源、简化操作、缩短产品交货期的目的。同时，在线热处理可以利用材料热轧过程中积累的应变硬化，因此有些情况下可以得到比离线热处理更优的产品性能和质量。由于在线热处理能生产出强度高、韧性好且焊接性优良的钢材，而且能降低产品生产成本。因此，在线热处理技术在中厚板、钢轨以及棒线材生产中得到了广泛的应用。

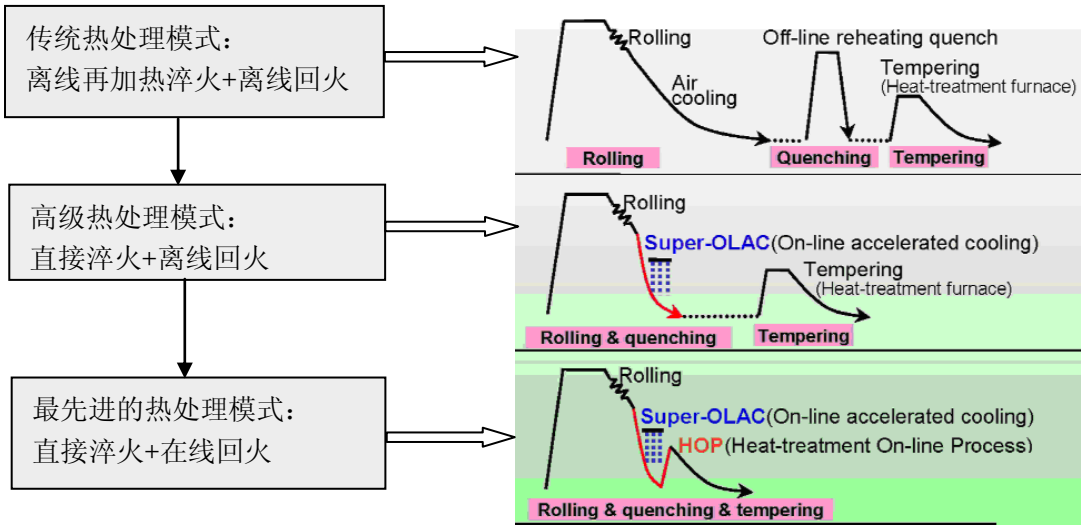


图 5.4.1 热处理工艺革新

(1) 中厚板

20 世纪 80 年代后，板材在线加速冷却系统在日本问世，部分系统已达到直接淬火时的冷却速率，使得直接淬火技术进入了真正意义的工业化。工业实践表明，通过优化化学成分和合理地控制淬火前的热轧条件，直接淬火工艺比再加热

淬火工艺具有更加优良的强韧匹配。至此，直接淬火-回火技术陆续在工业发达国家的中厚板企业得到推广应用。

近年，随着构件大型化、大跨度化和减量化制造的需求增强，对低合金高强度钢板的规格和使用性能提出了更加苛刻的要求。尤其是下游企业为提高施工效率和降低成本采用大线能量焊接方法，使焊接接头的强度和韧性变差，且产生焊接冷裂纹等缺陷。因此，如何应对大线能量焊接的需求，更有效地降低碳当量和钢中的合金含量，并通过生产工艺控制改善钢材组织以提高焊接热影响区(HAZ)韧性成为新型高强度钢研究开发的难点和热点。因此以相变强化为主的直接淬火技术再度受到关注，许多企业相继研发出一批新的装备及其对应的工艺控制技术。

直接淬火工艺：是指钢板热轧终了后在轧制作业线上实现直接淬火、回火的新工艺，这种工艺有效地利用了轧后余热，有机地将形变与热处理工艺相结合，从而有效地改善钢材的综合性能，即在提高强度的同时，保持较好的韧性。直接淬火工艺根据控制轧制温度的不同可以分为再结晶控轧直接淬火(DQ-T)、未再结晶控轧直接淬火(CR-DR-T)和再结晶控轧直接淬火+两相区淬火(DQ-L-T)三种不同的工艺类型。

直接淬火+在线回火工艺(Super-OLAC+HOP)：经过在线超快速冷却装置(Super-OLAC)淬火的钢板，当其通过高效的感应加热装置 HOP 时进行快速回火，这样可以对碳化物的分布和尺寸进行控制，使其非常均匀、细小地分布于基体之上，从而实现调质钢的高强度和高韧性。将 Super-OLAC 与 HOP 组合起来，在轧制线上完成调质过程，可以灵活地改变轧制线上冷却、加热的模式，因此与传统的离线热处理相比，过去不可能进行的在线淬火一回火热处理，可以依照需要自由地设计和实现，组织控制的自由度大幅度增加。

(2) 钢轨

随着炼钢技术的进步，炉外精炼、真空脱气、连铸等技术相继在钢轨生产中采用，使钢质更加纯净均匀，并可以取消钢轨缓冷，为在线热处理工艺的开发应用创造了条件。在线检测和计算机过程控制技术的发展，也促进了在线热处理技术在工业上的应用。再加上铁路运输向高速、重载及大运量方向的发展，对钢轨的强韧性、耐磨损性和抗疲劳损伤性提出了更高要求。国外从八十年代中期开始开发利用轧制余热生产高强度钢轨的热处理技术，亦称钢轨在线热处理工艺，国内在 20 世纪九十年代晚期才开始研究与开发。攀钢从 1996 年开始了在线热处理钢轨的技术研究和生产。之后，攀钢在线热处理钢轨的技术发展经历了四个阶段：以 PD3 为标志的第一代在线热处理钢轨；以 U71Mn 为标志的第二代在线热处理钢轨；以连铸坯为原料生产 U75V 的第三代在线热处理钢轨；随后又开发出

1300MPa 的 PG4 第四代在线热处理钢轨。2008 年,攀钢成功批量生产出 1300MPa 75kg/m PG4 在线热处理钢轨,其使用寿命达到 PD3 热轧钢轨的 2.7 倍以上、U75V 在线热处理钢轨的 1 倍以上,产品性能明显优于国内其他钢轨。

钢轨在线热处理工艺:指的是利用轧制余热在生产线上直接冷却钢轨,使其轨头硬化层得到细珠光体组织的一种高强度钢轨热处理方法。其步骤是将一支经热轧后保持在奥氏体区域的高温状态的钢轨(确切地说,钢轨头部的表面温度范围为 680℃~850℃)连续输入设有自动控制系统和冷却装置的热处理机组中,钢轨以 0.2~1.2m/s 的运行速度通过热处理机组。钢轨加速冷却后,钢轨头部横断面在离表面 30mm 范围内都转变为微细珠光体组织,得到的硬度范围为 HV320~400。钢轨在线热处理所需的装置包括输送装置、冷却系统和自动控制系统。

由于在线热处理技术具有明显的优势,很快在一些先进工业国家推广采用,其发展呈取代离线淬火工艺的趋势,如日本目前已全部采用钢轨在线热处理。

在线热处理钢轨较离线热处理钢轨具有生产效率高、节约能源、简化工艺和轨头硬化层深等显著优点。因此,在线热处理钢轨是热处理钢轨发展的必然趋势。但这种技术使用的设备一次性投资较高,工艺控制较为复杂。

5.4.2 技术适用条件

(1) 中厚板直接淬火

近年来,直接淬火、回火工艺在中厚板生产中的应用逐渐增多,促进了中厚板生产方法由单纯依赖合金化和离线调质的传统模式转向了采用微合金化和形变热处理技术相结合的新模式。这不仅可使钢材的强度成倍提高,而且在低温韧性、焊接性能、抑制裂纹扩散、钢板均匀冷却以及板形控制等方面都比传统工艺优越。

一般情况下,中厚钢板厂生产的产品除一部分需要热处理外,大部分产品仍需经精轧后直接进入冷却系统进行常规的快速冷却并精整出库,因此直接淬火设备应满足四点要求:1) 由于直接淬火设备为在线设置,这就要求设备必须具有双重功能,既要能胜任热处理要求,又要能胜任快速冷却要求。因此,淬火设备必须具有较大的工作范围,能适应各类钢种热处理及快速冷却的需要;2) 直接淬火需要的冷却速率大,这就要求该设备的冷却能力要比常规的快速冷却设备能力大,一般比正常值大 15%左右;3) 为了防止钢板挠曲,在冷却过程中钢板上下表面的冷却条件要尽量趋于一致,一般的热处理设备多采用钢板上表面限制辊方式来减轻钢板挠曲及浪形程度,但限制辊的使用往往又影响冷却控制精度,因此要尽量减少限制辊的数量,要做到这一点,必须采用合理的冷却装置;4) 为

了使钢板的力学性能具有较高的均匀性和保证获得良好的板形,还要求该设备具有较高冷却均匀性。

在线淬火技术目前仅适用于低合金钢生产工艺领域。而且,并不是所有厚度的中厚板都适用于轧后直接淬火。对于 20mm 以下的中厚板,钢板规格薄散热快,由于精轧开轧温度要求不大于 950℃,所以其终轧温度比较低,这样控冷过程中易发生中温转变,故控冷后再回火,钢板强度较难降下来;对于 50mm 以上厚度的钢板,由于板厚效应,控冷过程中钢板冷却不均匀,板形无法控制,不适于轧后在线淬火+回火工艺的生产。因此,20mm~50mm 厚度规格可采用直接淬火+回火工艺生产,但厚度小于 20mm 或大于 50mm 的钢板还要按照原控轧+离线热处理工艺生产。

近年来,超级钢、超低碳贝氏体钢等生产技术蓬勃发展,许多传统调质处理生产的屈服强度 450MPa 以上的钢板利用超细晶等技术已经可以生产,但对于压力容器、石油储罐、桥梁、军工等重要结构钢板,很多标准和用户还是要求钢板以调质状态交货。因此,一条现代化的调质钢板生产线对于提高中厚钢板厂的产品档次是不可或缺的。

(2) 钢轨在线热处理

在线热处理技术用于载重钢轨生产,该技术应配备真空脱气设备,取消钢轨缓冷坑工艺;钢轨热处理要求钢轨的化学成分最好为 0.65%~0.85% C, 0.21%~1.2%Si, 0.50%~1.5%Mn, 以及 V、Cr、Ti、Mo、Cu、Ni 和稀土元素中的至少一种。进入热处理机组时钢轨头部的表面温度范围 680℃~850℃,通过热处理机组的运行速度为 0.2~1.2m/s。

冷却系统要求能分别对钢轨头部和底部进行冷却。冷却方式可以是先雾或水冷却+后压缩空气冷却的组合冷却方式,也可以是压缩空气单一介质冷却方式。对钢轨头部的冷却要求由雾或水冷却段和压缩空气冷却段组成,每个冷却段都设置有单独电路和冷却介质流路。对钢轨底部的冷却是由与钢轨头部的冷却段相对应的冷却段,有单独的电、水、气路控制。

对自动控制系统的要求为:(1) 热处理机组辊道速度可分段自动调节,以满足不同入口温度的钢轨对热处理时间的要求,并实现连续进钢,以提高生产效率;

(2) 雾冷喷头数量分段自动控制,即雾冷时间可实现自动控制;(3) 风机风量可自动调节,结合风嘴距轨头表面的位移量以实现硬度等级控制;(4) 钢轨变形采用机械约束和轨底冷却的复合控制法,轨底冷却不受头部冷却影响,可独立控制。

5.4.3 节能减排效果

直接淬火（DQ）利用轧制余热直接实现钢材的在线淬火，省去了传统的再加热淬火，因此能耗大幅降低。以济钢为例，采用直接淬火工艺生产中厚板的吨钢综合能耗水平从离线淬火的 90kgce/t 钢材降低到 68kgce/t 钢材，能耗降低 24.4%。

直接淬火+在线回火工艺（Super-OLAC+HOP）真正实现了轧制与热处理工艺的一体化，省去了传统的离线再加热淬火和离线再加热回火工艺，因此可节约大量能源。而且，该工艺在线回火从传统的煤气加热改为感应加热，从而可大幅降低 CO₂ 的排放量。

钢轨在线热处理技术同样也是省去了传统的离线再加热淬火和离线再回火工艺，因此能耗大幅降低，这也就意味着温室气体的排放量大幅减少。以攀钢为例，在线热处理钢轨的综合能耗为 82kgce/t 钢，其中燃料消耗为 69kgce/t 钢，电力消耗为 120kWh/t 钢。

5.4.4 成本效益分析

（1）投资估算

项目案例：中板生产线采用在线热处理（直接淬火）工艺，热处理能力 10 万吨。项目总投资 8319 万元，其中建设投资 8000 万元，建设期利息 319 万元。项目投资估算详见下表。

表 5.4.1 中板在线热处理技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	8000.00	96.2%
1.1	建筑费用	0.00	0.0%
1.2	设备费用	5194.81	62.4%
1.3	安装费用	1731.60	20.8%
1.4	其它费用	1073.59	12.9%
2	建设期利息	319.00	3.8%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	8319.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：在线热处理与离线保护气体淬火热处理对比，不需消耗燃

料和保护气体，可减少离线热处理制造费用，年增加收入 2673 万元。中板生产线采用在线热处理技术，将增加在线热处理设施的折旧费、维修费、财务费等，各项费用合计 1597 万元，项目利润总额 1063 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）4.5 年，财务内部收益率 19.1%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 5.4.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	8319
1.1	建设投资	万 元	8000
1.2	建设期利息	万 元	319
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	8319
4.	资金筹措	万 元	8319
4.1	自有资金	万 元	3328
4.2	建设贷款	万 元	4991
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	2673
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	1597
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	139
5.4	达产年利润总额	万 元	1063
5.5	达产年所得税	万 元	266
5.6	达产年净利润	万 元	797
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	4.5
6.2	财务内部收益率	%	19.1
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	3.4

5.4.5 技术应用情况

（1）直接淬火

目前，国内中厚板在线淬火技术仍处于起步阶段。近年新建的中厚板生产线大部分配备了在线淬火设备（包括宝钢、沙钢、鞍钢）。但应用情况并不太理想。

济南钢铁股份有限公司采用在线淬火工艺生产低合金高强韧厚钢板，该公司将钢坯加热至 1100~1250℃；分奥氏体再结晶区和未再结晶区两阶段轧制成钢板，终轧温度为 860~950℃；采用气雾及水幕两阶段冷却方式实现钢板在线淬火，冷却区平均冷却速度为 25~45℃/s，温度降至 150~300℃淬火终止；对淬火后的钢板高温下回火。此工艺克服了常规调质处理方式生产周期长、成本高及传统 TMCP 工艺生产高强韧钢板性能稳定性差的缺点，可以生产性能稳定的 20~50mm 高强高韧钢板。生产流程短、能耗低，可广泛用于制造冶金、石化、水电及船舶等行业所需钢板。

此外，国内河北钢铁集团舞阳钢铁公司历时 5 个多月的“在线直接淬火”工艺攻关告捷，产品涵盖欧洲牌号、国标牌号、舞钢牌号等 10 余个牌号的 D、E 高质量级钢种。舞钢采用该工艺生产的钢板强度级别、质量等级均为国内之最，且吨钢成本可降 200 元左右。截至今年 7 月份，舞钢采用该工艺生产入库高端品种钢近 300t。

（2）直接淬火+在线回火工艺

目前，全球仅有日本 JFE 钢铁公司一家采用了直接淬火+在线回火工艺。该公司从 1998 年开始先后将其属下 3 家中厚板企业的在线快速冷却系统（曾被称为世界第一的 OLAC）改造成在线超快速冷却装置（Super-OLAC），使中厚板的轧后冷却能力和冷却均匀性达到近乎极致的水平，2004 年在其福山厚板厂超快速冷却装置的后部安装了世界首条感应加热在线热处理线（Heat Treatment Online Process，简称为 HOP）。许多过去需要离线调质处理的 600MPa 以上级别高强度钢板均可采用新型的直接淬火-在线热处理工艺实现连续化制造。超快速冷却与在线快速感应加热的组合，给钢材的组织细化和碳化物分布状态等带来积极的影响，获得在常规再加热淬火-回火和直接淬火-回火条件下很难获得的微细组织和强韧性能。在提高高强厚板质量的同时，由于淬火一回火处理的连续化，制造工期可以缩短到 20 天左右，高强厚板的供货能力每月也可以超过 1 万吨，在交货期和数量等方面满足客户需求。

日本 JFE 公司采用直接淬火-在线热处理工艺生产的 780MPa 级钢板，抗拉强度达到 900MPa 以上，0℃冲击功仍能达到 216J 的较高水平，而且屈强比 ≤ 0.80 ，焊接施工性能和焊接接头试验的各项力学性能良好。目前，直接淬火-在线热处理工艺已经在低屈强比 780MPa 级建筑用钢和 X80 级管线钢等高强度钢板的生产中得到应用。

另外，通过对化学成分的调整和直接淬火前轧制条件的控制，还可以获得再

加热淬火所得不到的强度和韧性组合；同时采用直接淬火工艺还有助于提高钢材的淬透性，在生产相同力学性能的产品时可大幅度减少合金元素含量而降低碳当量，改善焊接等工艺性能，收到高效、节材、节能和降耗的多重效果。由此可见，直接淬火工艺在中厚板生产中具有非常广阔的发展前景。

目前，HOP 工艺最大的问题是投资太大，希望此问题在不久的将来能得到解决，届时该工艺将得到广泛应用。

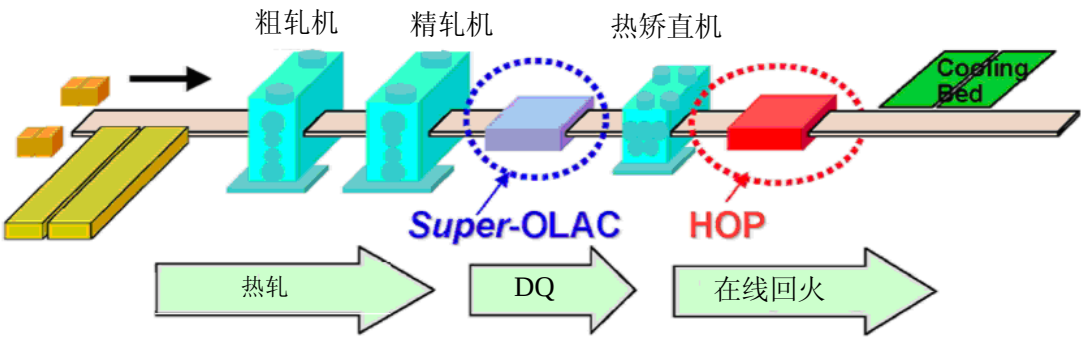


图 5.4.2 日本 JFE 公司直接淬火-在线热处理工艺

（3）钢轨在线热处理

“在线热处理”是提高钢轨强度的先进技术，国内仅攀钢独家拥有。2007 年，攀钢又建成中国首条 100m 长定尺热处理钢轨生产线，改变了国内只能生产长度 25m 以内的热处理钢轨的历史。目前，攀钢生产的 PD3 在线热处理钢轨已成为我国主流钢轨品种，对降低线路维护费用，提高铁路运输能力和安全性发挥了重要作用。目前，攀钢利用在 U75V 中加入 Cr 的合金化+在线热处理工艺的技术路线已经批量生产出 75kg/m PG4 钢轨，钢轨 $R_m \geq 1300\text{MPa}$ ， $R_{p0.2} \geq 880\text{MPa}$ ， $A \geq 10\%$ ，疲劳极限为 554.6MPa，每米长度的钢轨重量达 75kg，是目前世界上断面最大即重量最大、强度级别最高的钢轨。而且 PG4 钢轨焊接性能优良，在线热处理钢轨中该钢轨强度级别为世界最高，钢轨综合性能世界领先。

2009 年，攀钢生产各类钢轨 110 万吨，其中热处理钢轨达 50 万吨。我国第一条 350km/h 高速铁路—京津线已全部采用攀钢的钢轨；1300MPa 重载铁路钢轨已在大秦线上使用；钢轨出口量激增，攀钢代表中国钢轨首次进入到了世界发达国家的高端市场，如美国、澳大利亚、加拿大等，取得了历史性突破。

国内中厚板在线淬火技术仍处于起步阶段。近年新建的中厚板生产线大部分配备了在线淬火设备。但应用情况并不太理想。目前，国内中厚板在线热处理技术 2010 年的普及率约为 5%，“十二五”期末，预计该技术的推广比例将达到 25%~30%。钢轨在线热处理技术 2010 年技术普及率 25%，“十二五”期末，预计

该技术的推广比例将达到 50%。

5.4.6 技术知识产权情况

1) 直接淬火工艺

对于直接淬火工艺，国内外多家机构申请了专利，国内济南钢铁股份有限公司发明了一种高强韧厚钢板的在线淬火生产工艺方法，属于低合金钢生产工艺领域，此外，北京科技大学和南京钢铁股份有限公司也申请了相关专利，详细专利情况见下表：

表 5.4.3 直接淬火工艺国内相关专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	一种高强韧厚钢板的在线淬火生产工艺方法	CN101215624	济南钢铁股份有限公司	2008.01.08
2	炉卷轧机在线淬火生产高强度调质钢的工艺	CN101353717	南京钢铁股份有限公司	2008.09.11
3	一种适合不同厚度高强韧钢板的直接淬火工艺	CN101633976	北京科技大学	2009.08.27

2) 钢轨在线热处理

国内只有攀钢拥有钢轨在线热处理技术，该技术装备获得了中国 13 项授权专利，其中一项是利用轧制余热生产高强度钢轨的热处理方法及其装置（专利号：CN1178250A）。最近，由攀钢向美国、欧盟和日本申请专利保护的铁路用钢轨在线热处理方法及机组，被欧盟率先授予专利权。国外日本新日铁、日本钢管公司、奥地利奥钢联、加拿大 Algoma 公司也拥有钢轨在线热处理技术。目前，攀钢对其在线热处理钢轨技术不转让。钢轨在线热处理技术具体专利情况见下表：

表 5.4.4 钢轨在线热处理相关专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	利用轧制余热生产高强度钢轨的热处理方法及其装置	CN1178250	攀枝花钢铁（集团）公司	1996.09.29
2	约束钢轨热处理时变形的方法和装置	CN1239145	攀枝花钢铁（集团）公司钢铁研究院	1998.06.13

3	钢轨热处理方法及钢轨热处理机组	CN1920062	攀枝花钢铁（集团）公司;攀钢集团攀枝花钢铁研究院	2006.09.12
4	钢轨热处理机	CN200988851	攀枝花钢铁（集团）公司	2006.09.13

3) 直接淬火+在线回火

直接淬火+在线回火（Super-OLAC+HOP）技术仅日本 JFE 钢公司拥有，该技术在全球拥有多项专利。目前，该技术不转让。

5.5 轧钢加热炉蓄热式燃烧技术

5.5.1 技术介绍

蓄热式燃烧技术的应用首先始于 20 世纪 80 年代的英国，随后在加拿大、德国和日本加以应用，直到 90 年代末，中国冶金热工领域的科技工作者通过消化吸收和再创新，率先将高温蓄热燃烧技术应用于钢铁工业的轧钢加热炉，并获得了成功，其良好的节能效果引起热工界的高度关注。从 2000 年起，蓄热式燃烧技术在我国推广范围之广、速度之快、成效之大却是其他任何一个国家都无法比拟的。高温蓄热燃烧技术在我国蓬勃兴起，得益于进入 21 世纪以来我国钢铁工业的高速发展，得益于通过消化吸收形成的我国高温蓄热燃烧技术自主创新能力的提升，以及火焰炉热工理论的完善与发展。

蓄热式燃烧技术是一种烟气余热回收技术，其核心是高温空气燃烧技术，即利用高温烟气对助燃空气或/和煤气进行预热，当空气预热温度达 1000℃时，含氧 2%就可燃烧，也就是说空气预热温度越高，能维持稳定燃烧的最低氧浓度也越小。燃料在贫氧环境下燃烧时，其燃烧过程属于一种扩散控制式反应，与传统燃烧现象相比较，火焰根部离烧嘴喷口的距离缩小，常见的火焰白炽区消失，火焰区的体积成倍增大，甚至可以扩大到所给定的整个炉膛，这时整个炉膛构成一个温度相对均匀（温差最小可降到 10℃）的高温强辐射黑体，炉膛传热效率显著提高，NO_x 排放量能数十倍地减少，从而达到节能与环保的双重效果。

蓄热式燃烧技术的工作原理是，一组蓄热式烧嘴在正常工作时，两只燃烧器不会处于同一种工作状态。当一只烧嘴处于燃烧工作状态时，此燃料通路开通、常温空气（常温煤气）通过炽热的蓄热体，被加热为热空气（热煤气）去助燃（燃烧）；另一只烧嘴一定处于蓄热状态作为烟道，此燃料通路关闭，燃烧产物在引风机的作用下经燃烧通道到蓄热体，使蓄热体蓄下热量后，经烟道由烟囱低温排出。经过一段时间后，换向阀换向，两只烧嘴的工作状态互换，两种工作状态交替进行，周而复始。通过蓄热体，出炉烟气的余热得到回收利用。具有足够传热

能力和含热能力的蓄热体，能使烟气余热得到充分的回收，将空气预热到很高的温度。通过蓄热式烧嘴，烟气排出温度可降到 $150^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 或更低，空气可预热到 1000°C 以上，热回收率达到 85% 以上，温度效率达到 90% 以上。

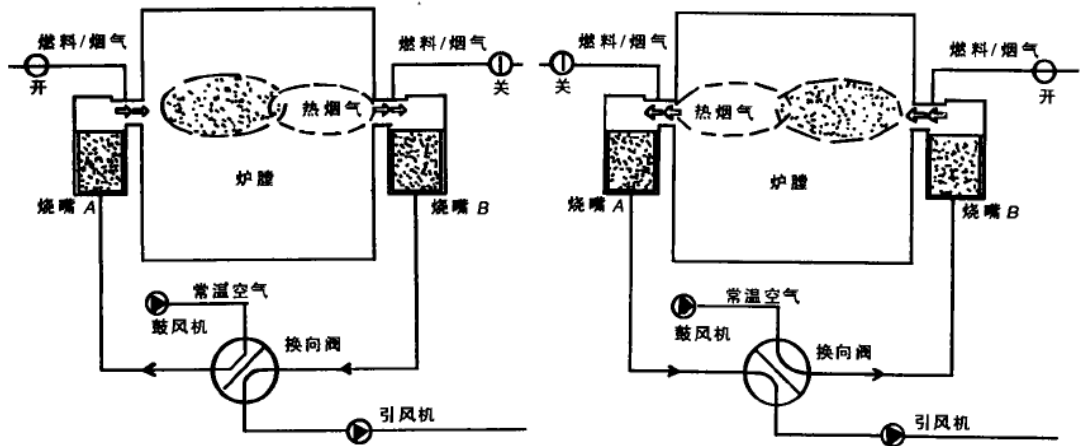


图 5.5.1 蓄热式燃烧一个周期示意图

随着蓄热装置和控制技术的发展，目前蓄热式加热炉在国内发展很快，国内高效蓄热式加热炉从技术风格上主要有烧嘴式、内置式和外置式三种。总的来说，各种蓄热式加热炉各有优缺点，但总的发展趋势是朝着烧嘴式蓄热加热炉方向发展。蓄热式燃烧技术已运用在大型环形加热炉、板坯加热炉、方坯加热炉以及各种热处理炉。蓄热式工业炉通常使用的燃料有高炉煤气、转炉煤气、发生炉煤气、高炉焦炉混合煤气、焦炉煤气，天然气以及重油等。采用重油做燃料时，只蓄热空气；用高热值煤气（天然气或焦炉煤气）作为燃料时，可以只蓄热空气；用低热值煤气（如高炉煤气）作为燃料时，必须同时蓄热空气和煤气；用中热值煤气（如混合煤气或转炉煤气）作为燃料时，可以单蓄热，也可双蓄热。

5.5.2 技术适用条件

蓄热式燃烧技术的适用条件根据其燃料、炉型等生产条件不同应作不同设计。

蓄热式燃烧技术可以适用于钢铁行业加热炉、热处理炉、烘烤装置等工业炉窑的各种炉型。该技术可以适用于不同燃料的工业炉窑。有烧高炉煤气双预热、烧混合煤气双预热或单预热、烧转炉煤气双预热、烧发生煤气单预热以及烧煤单预热等多种燃料适应形式。其中以高炉煤气双预热效果最好；燃油炉可采用陶瓷瓦片做蓄热体，顺流式安装，需定时清洗更换，采用重油不换向，助燃空气单预热方式；使用高炉煤气的工业炉窑采用高炉煤气和助燃空气双预热，燃烧温度高，

全炉热效率高，排烟损失小，节能效果明显；使用混合煤气的工业炉窑主要有双预热和单预热，主要根据其混合比或发热值来定。低热值用双预热，高热值用单预热。双预热时空气和煤气都换向。单预热时分煤气换向和煤气不换向，其中煤气换向用得较多，煤气不换向主要用于小型工业炉窑；对于含尘大的燃料，如煤、发生炉煤气等，应在烟气入口设计集尘装置；对于燃料与燃烧产物水当量不平衡的工业炉窑在采用蓄热式燃烧技术时，可以考虑用换热器的副烟道。

然而，该技术对其关键部件的要求很高。蓄热体作为其关键部件，要求单位体积蓄热体的蓄热量要大，这样可减小蓄热室的体积；而且，要求其导热系数 λ 要大，导热系数大可以迅速地将热量由表面传至中心，充分发挥蓄热室的能力；高温时，要求材料的辐射率要高；此外，要求蓄热体的热震稳定性要好，蓄热体需要在反复加热和冷却的工况下运行，在巨大温差和高频变换的作用下，很容易脆裂、破碎和变形等，导致气流通道堵塞，压力损失加大，甚至无法继续工作；还要求蓄热体具备抗氧化和耐腐蚀性，其需要在一定的温度和气氛下使用，易发生氧化和腐蚀，这样会堵塞气体通道，增加流通阻力。另外，经济性是蓄热体的一个重要指标，一种蓄热体如果上述各种性能都好，那成本就高，其推广和应用必然受到限制。

换向阀必须在一定的时间间隔内实现空气、煤气与烟气的频繁切换，因此换向阀也成为与余热回收率密切相关的关键部件之一。尽管经换热后的烟气温度很低，对换向阀材料无特殊要求，但必须考虑换向阀的工作寿命和可靠性。因为烟气中含有较多的微小粉尘以及频繁动作，势必对部件造成磨损，这些因素应当在选用换向阀时加以考虑。如果出现阀门密封不严、压力损失过大、体积过大、密封材料不易更换、动作速度慢等问题，会影响系统的使用性能和节能效果。

蓄热式燃烧系统的关键是蓄热体和换向阀的设计、选型和性能，这是加热炉能否可靠、安全运行的关键，也是减少加热炉的故障和维护的关键。与常规燃烧技术相比，蓄热式燃烧技术最大的成功是将高炉煤气直接用到轧钢加热炉，最大限度回收了高炉煤气，这是最大的节能和减少环境污染，而其他一些煤气在加热炉上采用蓄热燃烧技术，对产品质量、综合节能效果和环境改善，效果并不显著，反而增加了加热炉的投资、运行维护成本和故障率。

蓄热式燃烧技术具有高效、节能和环保的优势，但因该技术在加热炉上使用，还需在工艺上进一步完善，装置和材料性能、寿命还需提高，这在一定程度上制约了蓄热式燃烧技术在轧钢加热炉上的优势发挥。从目前蓄热式燃烧技术在加热炉上的实际使用情况看，还应视工厂的具体条件和工艺要求，有选择的使用该技术，即：以高炉煤气和天然气为燃料的加热炉，建议采用蓄热式燃烧技术，其综合经济效益明显；以混合煤气和焦炉煤气为燃料的加热炉，因其综合经济效益并

不明显，选择时一定要慎重。

当然，随着蓄热式燃烧技术的进一步发展，工艺技术的不断完善，蓄热装置、换向装置寿命的提高和成本的降低，蓄热式燃烧技术在加热炉上的运用更加可靠、能达到轧钢加热炉节能、降耗、环保的目的。

2010 年，该技术普及率约为 40%，‘十二五’期末，预计该技术的推广比例将达到 70%。

5.5.3 节能减排效果

轧钢加热炉采用蓄热式燃烧技术后，可将加热炉排放的高温烟气降至 150℃ 以下，热回收率达 85% 以上，节能 30% 以上；可将空气和煤气预热到 700~1000℃ 以上；减少氧化烧损，使氧化烧损小于 0.7%；通过组织贫氧燃烧，大大降低了烟气中 NO_x 的排放（NO_x 排放减少 40% 以上），同时，由于其显著的节能效果，也减少了温室气体的排放（CO₂ 减少 10%-70%）；采用蓄热方式实现加热炉废气余热的极限回收，同时将助燃空气、煤气预热至高温，从而大幅度提高加热炉的热效率，生产效率可提高 10%~15%；另外，低热值的燃料（如高炉煤气、发生炉煤气、低热值固体燃料、低热值的液体燃料等）借助高温预热的空气可获得更高的燃烧温度，从而扩展了低热值燃料的应用范围。

5.5.4 成本效益分析

（1）投资估算

项目案例：轧钢加热炉生产能力年产 100 万吨，采用蓄热式燃烧技术。项目总投资 1018 万元，其中建设投资 1000 万元，建设期利息 18 万元。

项目投资估算详见下表。

表 5.5.1 采用蓄热式燃烧技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	1000.00	98.2%
1.1	建筑费用	206.12	20.2%
1.2	设备费用	496.11	48.7%
1.3	安装费用	163.57	16.1%
1.4	其它费用	134.20	13.2%
2	建设期利息	18.00	1.8%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	1018.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：按照吨钢节能 10kgce，年增加收入 1709 万元。轧钢加热炉采用蓄热式燃烧技术，将增加折旧费、维修费、管理费、财务费等，各项费用合计 230 万元，项目利润总额 1447 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）1.0 年，财务内部收益率 107.8%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 5.5.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	1018
1.1	建设投资	万 元	1000
1.2	建设期利息	万 元	18
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	1018
4.	资金筹措	万 元	1018
4.1	自有资金	万 元	407
4.2	建设贷款	万 元	611
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	1709
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	230
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	323
5.4	达产年利润总额	万 元	1447
5.5	达产年所得税	万 元	362
5.6	达产年净利润	万 元	1085
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	1.0
6.2	财务内部收益率	%	107.8
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	0.7

5.5.5 技术应用情况

目前，蓄热式燃烧技术已应用于冶金、机械、建材、化工等行业中的各种工业燃料炉，特别是在冶金及机械行业，蓄热燃烧技术的应用尤为普遍，如推钢式连续轧钢加热炉、步进式连续加热炉、室式加热炉、台车炉、钢管连续退火炉、钢包烘烤器、罩式炉等中多有应用。

2000 年以后，该项技术在国内钢铁企业迅速推广，目前已有太钢、武钢、南钢、天钢、首秦、济钢、唐钢、宝钢、沙钢、攀钢等 500 多座蓄热式加热炉投入运行，部分取得十分显著的节能效果。首秦宽厚板工程加热炉自 2006 年 8 月投入至今，运行稳定，通过以上新工艺、新技术的应用，按照年产量按 120 万吨计算，每年至少为企业取得 14384.60 万元的经济效益。伴随着燃用纯高炉煤气的双蓄热燃烧技术在首秦二期工程的推广，将为企业取得更加巨大的经济效益。

蓄热式燃烧技术具有高效、节能和环保的优势，但因该技术在加热炉上使用，还需在工艺上进一步完善，装置和材料性能、寿命还需提高，这在一定程度上制约了蓄热式燃烧技术在轧钢加热炉上的优势发挥。从目前蓄热式燃烧技术在加热炉上的实际使用情况看，还应视工厂的具体条件和工艺要求，有选择的使用该技术，即：以高炉煤气和天然气为燃料的加热炉，建议采用蓄热式燃烧技术，其综合经济效益明显；以混合煤气和焦炉煤气为燃料的加热炉，因其综合经济效益并不明显，选择时一定要慎重。

目前，国内钢铁企业蓄热式燃烧技术的普及率约为 40%。预计“十二五”期间，随着蓄热装置、换向装置寿命的提高和成本的降低，该技术的推广应用比例有望达到 70%。

5.5.6 技术知识产权情况

早在 1958 年，就出现了蓄热式回收预热装置，但由于当时的蓄热体体积庞大，换向时间长，预热温度波动大，热回收率低，无法推广应用。直到 20 世纪 80 年代，英国燃气公司开发了蓄热式烧嘴，再加上同时期开发出一种以陶瓷球为载体介质的蓄热体，使得蓄热式燃烧技术在英国得到成功应用，随后在加拿大、德国和日本加以应用，直到 90 年代末，国内也开发出蓄热式燃烧技术，目前可检索到与蓄热式燃烧技术相关的专利有 45 项，其中发明专利 11 项，新型实用专利 34 项。国内济南钢铁股份有限公司是国内应用蓄热燃烧技术较早的少数厂家之一，2004 年在轧钢加热炉上基本实现了全蓄热化，在关键部件蓄热式烧嘴、换向阀等方面申请了多项专利，并不断改进提高；北京神雾热能技术有限公司申请了多项与蓄热式燃烧技术相关的专利。另外，国内的首钢总公司、武汉钢铁（集团）公司、鞍钢股份有限公司和济南钢铁股份有限公司也都申请了相关专利。具

体专利情况见下表：

表 5.5.3 蓄热式燃烧技术国内相关专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	高效蓄热式工业炉	CN1307219	侯长连	2000.01.25
2	蓄热式高温空气燃烧装置及其方法	CN1447064	北京朗天润宇环保科技有限公司	2002.03.27
3	蜂窝体蓄热式烧嘴	CN2539062	邯郸钢铁股份有限公司	2002.05.22
4	单预热空气蓄热式燃烧器	CN2697466	吴道洪	2003.08.04
5	组合式双预热蓄热式燃烧器	CN2697469	吴道洪	2003.08.04
6	工业炉燃煤气化蓄热式燃烧系统	CN1529087	张卫军	2003.10.08
7	一种蓄热加热炉用蓄热烧嘴	CN2844680	济南钢铁股份有限公司	2005.08.26
8	用于双蓄热式轧钢加热炉的切换阀	CN2404892	济钢集团	1999.12.30
9	一种双蓄热燃烧系统用切换阀	CN2603260	济南钢铁股份有限公司	2002.08.30
10	一种用于双蓄热式燃烧系统的切换阀	CN2570646	济南钢铁股份有限公司	2002.08.30
11	一种整体式蓄热烧嘴	CN2844685	济南钢铁股份有限公司	2005.08.26
12	一种蓄热式烧嘴	CN2929619	济南钢铁股份有限公司	2006.07.10
13	一种延长换向时间的蓄热式燃烧方法	CN101165406	鞍钢股份有限公司	2006.10.19
14	单蓄热式燃烧装置	CN201137928	首钢总公司	2007.09.14
15	空气和煤气双蓄热的蓄热式燃烧器	CN101608793	武汉科虹工业炉有限公司	2008.06.16
16	一种双预热蓄热式燃烧器	CN201355040	武汉钢铁公司	2009.02.27

5.6 轧钢氧化铁皮资源化技术

5.6.1 技术介绍

钢材锻造和热轧时，由于钢铁和空气中氧的反应，常会形成大量氧化铁皮，造成堆积，浪费资源。氧化铁皮的主要成分是 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeO 。其中，氧化铁皮最外层为 Fe_2O_3 ，约占氧化铁皮厚度 10%，阻止氧化作用；中间为 Fe_3O_4 ，约 50%，最里面与铁相接触为 FeO ，约 40%。如果对这些资源合理利用，可以降低生产成本，同时可以起到环保节能作用。因此对这些氧化铁皮的综合利用是非常必要的。大多数企业将氧化铁皮与矿料混合经烧结制成烧结球团到高炉炼铁回收，氧化铁皮还可以作为还原铁粉、化工产品、硅铁合金以及海绵铁的原料进行回收利用。

(1) 烧结辅助含铁原料

氧化铁皮是烧结生产较好的辅助含铁原料，一方面，氧化铁皮相对粒度较为粗大，可改善烧结料层的透气性，另一方面，氧化铁皮中 FeO 在燃烧氧化成 Fe_2O_3 的过程中会大量放热，可以降低固体燃料消耗，同时提高烧结生产率，经验表明，8%的氧化铁皮可增产约 2%左右。

秦皇岛首秦金属材料有限公司以不影响烧结矿产量、质量及生产稳定为前提，在烧结工序中配加 3%氧化铁皮，降低了烧结成本和能耗成本。2008 年 8-11 月，该公司烧结共消耗氧化铁皮 3.05 万吨，可替代精矿粉 2.37 万吨，降低烧结成本 460 多万元。另外，配加 3%氧化铁皮使烧结矿平均能耗从之前的 61.22kg/t 降为 59.12kg/t，每吨烧结矿可节省燃料 2.08kg，氧化铁皮在能耗方面可降低成本 20 多万元。综上所述，烧结工序中配加 3%氧化铁皮，可使生产成本降低 490 万元左右。同时，还减少了工业垃圾的排放，减小了厂区及周边地区的环境污染，在取得经济效益的同时，也取得了较好的社会效益。此外，国内宝钢、包钢、鞍钢、酒钢和太钢所产生的氧化铁皮处理后均回用于烧结。

(2) 粉末冶金原料

在粉末冶金工业中，氧化铁皮是生产还原铁粉的主要原料。生产还原铁粉的工艺流程是：将氧化铁皮经干燥炉干燥去油去水后，经磁选、破碎、筛分入料仓，作为还原剂的焦粉配入 10%-20%的脱硫剂（石灰石）后经干燥处理入料仓。将氧化铁皮按环装法装入碳化硅还原罐内，中心和最外边装焦炭粉，将装好料的还原罐放在窑车上送入隧道窑进行一次还原，停留超过 90h 后冷却出窑。此时氧化铁皮被还原成海绵铁，Fe 含量为 98%以上，卸锭机将还原铁卸出，经清渣、破碎、筛分磁选后，进行二次精还原，生产出合格的还原铁粉。进入球磨机细磨，然后进入分级筛，从而得到不同粒度的高纯度铁粉。将这种铁粉用于制作设备的

关键部件，只需压模，即可一次成型，获得强度高、耐磨、耐腐的部件。这种性能好的部件主要用于高科技领域，如国防工业、航空制造、交通运输、石油勘探等行业。粒度较粗的铁粉主要用于生产电焊条。

(3) 应用化工行业

在化工行业，氧化铁皮可用作生产氧化铁红、氧化铁黄、氧化铁黑、氧化铁棕、三氯化铁、硫酸亚铁、硫酸亚铁铵、聚合硫酸铁等产品的原料，这些化工产品用途广泛。

利用液相沉淀法制取氧化铁红。我国的氧化铁红绝大多数是采用液相沉淀法生产的，主要原料是氧化铁皮。用此工艺可生产从黄相红到紫相红各个色相的铁红。生产过程是从制备晶种开始，后将晶种置于二步氧化桶中，加氧化铁皮和水，再加亚铁盐为反应介质，以直接蒸汽升温至 80-85℃。并在此温度下鼓入空气，待反应持续至铁红颜色与标样相似停止氧化，后放出料浆，经水洗、过滤、干燥、粉碎即为产品。根据晶种制备和所用亚铁盐的不同，此工艺又可分为硫酸法、硝酸法和混酸法。

(4) 氧化铁皮替代钢屑冶炼硅铁合金

硅铁是钢铁工业的重要原材料，是随着钢铁工业的发展而发展。一般硅铁生产原料为硅石、冶金焦或兰炭和钢屑，并对原料粒度有一定的要求，其中硅石的粒度要求一般为 30-100mm；冶金焦或兰炭的粒度要求一般为 10-18mm。在正常生产中，硅石破碎时会产生约 10%-15%的粒度小于 30mm 不符合冶炼要求的硅石粉，目前硅石粉没有很好的利用方法，只能废弃堆积；而冶金企业在炼焦过程中会产生粒度小于 8mm，约占焦炭量 10%左右的焦粉。焦粉也没有找到有效的成型办法，只能当作低级燃料廉价处理。我国钢铁行业轧钢过程中氧化铁皮的产生量占钢材产量的 3%~5%，其铁含量高达 80%~90%，而且数量可观。为实现对废弃物的再利用，开发出以废弃的硅石粉代替硅石、废弃的焦粉代替冶金焦/兰炭、用氧化铁皮代替钢屑，通过压块来生产硅铁合金的新工艺（见下图）。新工艺生产硅铁合金所需主要原料按照以下重量百分比组成：含 SiO_2 为 97%~99%的废弃硅石粉占 55%~60%；碳含量为 84%~90%的废弃焦粉占 25%~32%；氧化铁皮占 7%~10%。其中：硅石粉粒度为 3~30mm，焦粉粒度为 3~10mm，氧化铁皮粒度为 5~15mm。另外，还添加一些膨润土、石灰、工业糖浆、水玻璃以及水作为粘结剂，与上述主要原料进行混合，均匀搅拌，然后压成块度为符合入炉标准的压块，在 100~120℃下烘干（6~8h），最后入炉冶炼，得到符合标准要求的硅铁合金。

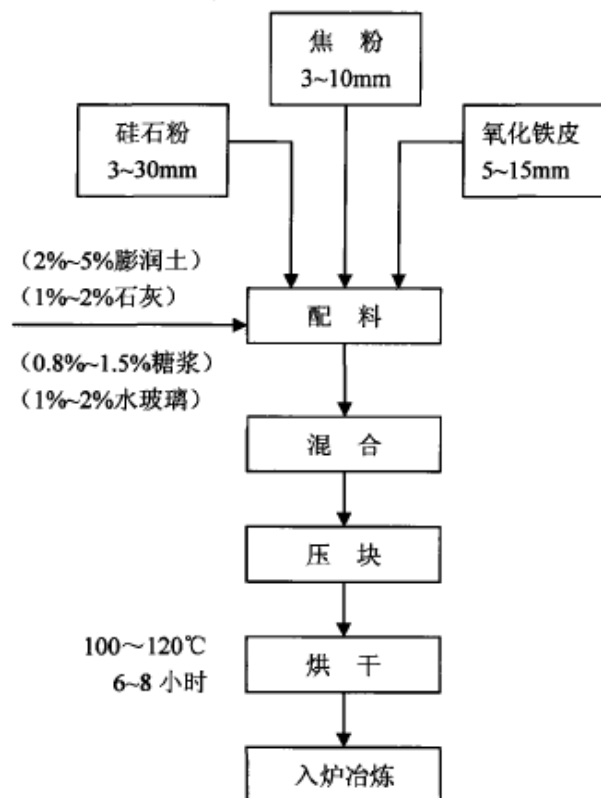


图 5.6.1 氧化铁皮替代钢屑冶炼硅钢铁合金

与传统硅铁合金冶炼工艺相比，新工艺能较好地实现电极平稳深插，提高炉内的热效率，从而加快了硅铁合金的冶炼速度，缩短了硅铁合金的冶炼时间，还节约了电能，节省了约 15% 的冶炼成本。而且使冶炼具有良好的炉况和操作条件，改善了工人工作环境，减轻了工人劳动强度。

5.6.2 技术适用条件

氧化铁皮可以用多种方式进行回收利用。企业需要按照自己的需求和技术条件来进行氧化铁皮的回收利用，从而提高整体经济效益。

5.6.3 节能减排效果

钢铁企业轧钢工序生产过程产生大量的氧化铁皮。据估测我国钢铁行业每年产生的氧化铁皮有 500 万吨以上，通过对其进行处理回收，不仅可以创造极大地经济效益，而且可以大大减少废弃物排放，否则将出现占用土地、污染环境、浪费资源等问题。

以秦皇岛首秦金属材料有限公司为例：其在烧结工序中配加 3% 氧化铁皮，这使得烧结矿平均燃耗降低 3.4%，同时，还减少了工业垃圾的排放，减小了厂区及周边地区的环境污染，在取得经济效益的同时，也取得了较好的社会效益。

5.6.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：采用氧化铁皮综合利用技术，年处理氧化铁皮 15 万吨。项目总投资 4589 万元，其中建设投资 3400 万元，建设期利息 171 万元，铺底流动资金 1018 万元。项目投资估算详见下表。

表 5.6.1 氧化铁皮综合利用技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	3400.00	74.1%
1.1	建筑费用	735.93	16.0%
1.2	设备费用	1818.18	39.6%
1.3	安装费用	389.61	8.5%
1.4	其它费用	456.28	9.9%
2	建设期利息	171.47	3.7%
3	铺底流动资金	1017.53	22.2%
	总投资	4589.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：可生产直接还原铁 10 万吨，年增加收入 21368 万元。采用氧化铁皮资源化技术，将增加原料费、燃料及动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 19191 万元，项目利润总额 2077 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）3.4 年，财务内部收益率 31.5%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 5.6.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	4589
1.1	建设投资	万 元	3400
1.2	建设期利息	万 元	171
1.3	铺底流动资金	万 元	1018
2.	生产流动资金	万 元	2374
3.	项目总资金	万 元	6963

序号	项目名称	单 位	指标
4.	资金筹措	万 元	6963
4.1	自有资金	万 元	1836
4.2	建设贷款	万 元	2753
4.3	流动资金贷款	万 元	2374
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	21368
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	19191
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	1010
5.4	达产年利润总额	万 元	2077
5.5	达产年所得税	万 元	519
5.6	达产年净利润	万 元	1558
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	3.4
6.2	财务内部收益率	%	31.5
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	1.8

5.6.5 技术推广应用情况

大多数企业将氧化铁皮与矿料混合经烧结或制成烧结球团到高炉炼铁回收，如将其作为还原铁粉和直接还原铁的原料，其增值效益大大高于回炉冶炼的效果。当前企业需要将这些氧化铁的品质进行分类加工处理，生产不同的产品，可达到物尽其用提高整体经济效益。

目前在国内，氧化铁皮作为烧结原料，已形成大规模工业生产。用氧化铁皮生产硅铁合金，工艺简单也有规模化生产的趋势。

目前，国内约 5%钢铁企业所产氧化铁皮得到综合利用。预计“十二五”期间，轧钢氧化铁皮的资源化技术在国内的推广应用比例将达到 35%。

5.6.6 技术知识产权情况

国内湖南华菱湘潭钢铁有限公司、邯郸钢铁股份有限公司和西安建筑科技大学均申请了与氧化铁皮回收利用相关的专利，具体专利情况见下表。

表 5.6.3 氧化铁皮回收利用技术相关专利

序号	技术名称	公开(公告)号	申请(专利权)人	申请日期
1	一种氧化铁皮助熔化渣剂及其制造方法	CN1176311	张勇	1996.09.12
2	氧化铁皮冶炼硅铁合金的方法	CN1814833	甘肃省电力工业局白银供电局	2005.02.04
3	用氧化铁皮与无烟煤粉的混合料利用电炉直接炼钢方法	CN1908194	徐建明	2006.07.28
4	一种氧化铁皮生产粒铁的方法	CN101109027	邯郸钢铁股份有限公司	2007.08.24
5	配加氧化铁皮生产球团矿的方法	CN101463421	湖南华菱湘潭钢铁有限公司	2009.01.16
6	一种用硅石粉、焦粉和氧化铁皮压块生产硅铁合金的方法	CN101560614	西安建筑科技大学	2009.06.03

5.7 塑烧板除尘技术

5.7.1 技术介绍

(一) 技术概况

在精轧机组的后段,由于轧制速度高,氧化铁皮颗粒微小,在轧制过程中产生大量的脱落氧化铁粉,冷却水蒸汽及润滑油的燃烧灰份,在轧机机架间产生大量的有害烟尘。烟气的主要成分有 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 H_2O 、油烟等。为了减轻和消除这些有害物质对环境的污染,改善操作条件,在精轧机机架必须设置排烟除尘系统。目前国内普遍使用的除尘装置型式有塑烧板式除尘、湿式电除尘及其他。

由于塑烧板除尘器具有投资低、国产化程度高、体积小、效率高、维修保养方便、能过滤吸潮和含水量高的粉尘、过滤含油及纤维粉尘的独特优点,在宝钢 2050mm 热轧、鞍钢 1780mm、武钢 1580mm 热轧等生产线广泛应用,是本指南主要推荐的除尘技术。

(二) 技术基本原理

除尘系统由吸尘罩、手动调节阀、风管、塑烧板除尘器、风机、消声器和排气烟囱组成。精轧机排烟除尘系统共有多个除尘点,除尘系统流程:由吸尘罩捕集到的各尘源点的含尘气体,经管道进入除尘器内,通过塑烧滤板进行尘气分离。

净化后的气体通过风机、消声器后，经排气烟囱排入大气。附着于塑烧板表面的粉尘通过电磁阀引导压缩空气反吹后掉落除尘器灰斗内，然后通过螺旋输送机，回转卸灰阀排出，统一回收处理。

塑烧板除尘性能特点：

（1） 粉尘捕集效率高

塑烧过滤元件的捕集效率是由于其本身特有的结构和涂层来实现的，它不同于袋式除尘器的高效率是建立在黏附粉尘的二次过滤上。从实际测试的数据看，一般情况下除尘器排气含尘浓度最低可保持在 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。虽然排放浓度与含尘气体入口浓度及粉尘粒径有关，但通常对 $5\mu\text{m}$ 以下超细粉尘的捕集效率仍可保持 99.9% 的超高效率。

（2） 压力损失稳定

由于塑烧板是通过表面的树脂涂层对粉尘进行捕捉的，其光滑的表面使粉尘极难透过与停留，即使有一些极细的粉尘可能会进入空隙，但随即会被设定的脉冲压缩空气流吹走，所以在过滤板母体层中不会发生堵塞现象，只要经过很短的时间，过滤元件的压力损失就趋于稳定并保持不变。这就表明，特定的粉体在特定的温度条件下，损失仅与过滤风速有关而不会随时间上升。因此，除尘器运行后的处理风量将不会随时间而发生变化，这就保证了吸风口的除尘效果。

（3） 清灰效果

树脂本身固有的惰性与其光滑的表面，使粉体几乎无法与其他物质发生物理化学反应和附着现象。滤板的刚性结构，也使得脉冲反吹气流从空隙喷出时，滤片无变形。脉冲气流是直接由内向外穿过滤片作用在粉体层上，所以滤板表层被气流托附的粉尘，在瞬间即可被消去。脉冲反吹气流的作用力不会如滤布袋变形后被缓冲吸收而减弱。

（4） 强耐湿性

由于制成滤板的材料及涂层具有完全的疏水性，水喷洒其上将会看到凝聚水珠集成水流淌下。故纤维织物滤袋因吸湿而形成水膜，从而引起阻力急剧上升的情况在塑烧板除尘器上不复存在。这对于处理冷凝结露的高温油烟尘和吸湿性很强的粉尘将会得到很好的使用效果。

（5） 使用寿命长

塑烧板的刚性结构，消除了纤维织物滤袋因骨架磨损引起的寿命问题。寿命长的另一个重要表现还在于，滤板的无故障运行时间成，它不需要经常的维护与保养。良好的清灰特性将保持其稳定的阻力，使塑烧板除尘器可长期有效的工作。事实上，如果不是温度未被控制好，塑烧板除尘器的工作寿命将会相当长。

（6） 除尘器结构小型化

由于过滤板表面形状，故装配成除尘器所占的空间仅为相同过滤面积袋式除尘器的一半以下，并且可以叠加设计缩小占地面积。

(7) 安装维护方便

安装更换滤片极为方便，只需打开除尘器检修门，拧紧固定塑烧板的两个螺栓即可完成一片滤片的装配。在日常生产中，几乎无须维修保养。

5.7.2 技术适用范围

塑烧板除尘技术广泛应用于钢板精轧过程中及其他除尘器不能使用的场合，能够治理长期以来不能解决的除尘问题，如含酸、含油、含强碱、含水等烟气粉尘。过滤面积从小至不足 1 平方米到大至数千平方米，处理风量从几个立方米/小时至数十万立方米/小时。

5.7.3 节能减排效果

塑烧板除尘技术不仅能够减轻和消除粉尘有害物质对环境的污染，而且收集的粉尘可进一步循环利用。以武钢 1580mm 热轧为例，年产材 280 万吨，每年可回收粉尘 1000t，其中粉尘成份主要为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 。

5.7.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：1580mm 热连轧生产线，采用热轧除尘技术。项目总投资 2243 万元，其中建设投资 2200 万元，建设期利息 43 万元。项目投资估算详见下表。

表 5.7.1 板带钢热轧除尘技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	2200.00	98.1%
1.1	建筑费用	173.16	7.7%
1.2	设备费用	1558.44	69.5%
1.3	安装费用	173.16	7.7%
1.4	其它费用	295.24	13.2%
2	建设期利息	43.00	1.9%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	2243.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：可回收粉尘（主要含 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 ）1000 吨，年增加收入 90 万元。采用板带钢热轧除尘技术，将增加动力费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 720 万元，项目利润总额-627 万元。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 5.7.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	2243
1.1	建设投资	万 元	2200
1.2	建设期利息	万 元	43
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	2243
4.	资金筹措	万 元	2243
4.1	自有资金	万 元	897
4.2	建设贷款	万 元	1346
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	90
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	720
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	-35
5.4	达产年利润总额	万 元	-627
5.5	达产年所得税	万 元	
5.6	达产年净利润	万 元	
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	
6.2	财务内部收益率	%	
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	

5.7.5 技术推广应用情况

2009 年我国重点大中型钢铁企业热轧宽带钢轧机产量约 1.2 亿吨，据初步估

计其中 35%采用塑烧板除尘技术、10%采用湿式电除尘、55%采用其他除尘技术。其中，宝钢 2050mm 热轧、鞍钢 1780mm、武钢 1580mm 热轧机组均采用该技术。2010 年，该技术普及率约为 35%，“十二五”期末，预计该技术的推广比例将达到 65%。

5.7.6 技术知识产权情况

目前，我国塑烧板除尘技术已完全实现国产化，以下列举几家生产企业：盐城天澄环保设备有限公司、北京柯林柯尔科技发展有限公司、石家庄市渤远流体净化设备有限公司等。

第六节 综合性节能减排技术

6.1 能源管理中心及优化调控技术

6.1.1 技术介绍

企业能源管理中心是一项整合自动化和信息化技术的管控一体化节能新技术，该技术通过对企业能源生产、输配和消耗实施动态监控和管理，改进和优化能源平衡，进而实现系统性节能降耗。

企业能源管理中心是基于完善的数据采集网络获取生产过程包括能源数据在内的各项关键参数并经过相关分析、处理后，实时提供在线能源系统平衡信息和调整决策方案，确保能源系统平衡的及时性、有效性和合理性，从而改善生产工序用能的优化分配及供应能力，保证生产及动力工艺系统的运行连续性、稳定性，并最终实现提高整体能源利用效率和能源成本经济性的目的。

企业能源管理中心的能源平衡调度过程，是将采集的能源工艺系统数据（发生和消耗量等）送能源管理系统，经系统分析和处理，获得能源平衡及其预测模型需要的信息，并将平衡预测结果以数据和图示方式展示。调度可根据能源平衡预测结果发出调度指令。企业能源管理中心系统采用的基础技术包括系统集成和应用集成技术、现代计算机和网络技术、数据库和实时数据库技术、数据分析和预测技术等。

6.1.2 技术适用条件

钢铁企业能源管理中心在对钢铁生产过程使用及作为过程副产品的各类能源介质统计分析、预测和实时监测的基础上，优化调度能源的使用、提高能源使用效率。

实施能源管理中心的钢铁联合企业，需要比较完备地设立高炉煤气柜、转炉煤气柜、焦炉煤气柜（含炼焦过程时）、高炉炉顶压力回收装置及其他各类余能余热回收装置，并在各类能源介质的关口配备计量器具。在上述条件具备的前提下，采用自动化、信息化技术设立能源管理中心。

6.1.3 节能减排效果

经测算，按不同的系统设计，能源管理水平能得到很大提高，建设能源管理中心，可有效提升能源利用效率约 2%~5%不等。因此，能源管理中心是降本增效、减轻环境压力、提高企业竞争力的有效措施。

6.1.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：年产 1000 万吨钢的钢铁企业，建设能源管理中心。项目总投资 10339 万元，其中建设投资 10000 万元，建设期利息 339 万元。项目投资估算详见下表。

表 6.1.1 能源管理中心投资估算表

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1	建设投资	10000.00	96.2%
1.1	建筑费用	2061.23	19.8%
1.2	设备费用	4961.08	47.7%
1.3	安装费用	1635.70	15.7%
1.4	其它费用	1341.99	12.9%
2	建设期利息	399.00	3.8%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	10399.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：按照节能 0.3% 计算，年增加收入 3590 万元。建设能源管理中心，将增加动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 2849 万元，项目利润总额 675 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）5.6 年，财务内部收益率 14.8%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 6.1.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	10399
1.1	建设投资	万 元	10000
1.2	建设期利息	万 元	399
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	10399
4.	资金筹措	万 元	10399

序号	项目名称	单 位	指标
4.1	自有资金	万 元	4160
4.2	建设贷款	万 元	6239
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	3590
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	2849
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	668
5.4	达产年利润总额	万 元	675
5.5	达产年所得税	万 元	169
5.6	达产年净利润	万 元	506
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	5.6
6.2	财务内部收益率	%	14.8
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	4.2

6.1.5 技术推广应用情况

企业能源管理中心技术发源于西方发达国家，随着信息化技术的快速发展，目前国外已广泛应用于工业生产过程及大型民用建筑能源系统的实时监控和优化管理。我国钢铁企业建设能源管理中心起步较晚，经历了从无到有并逐步提高的发展过程，目前企业能源管理中心的支撑技术已较为成熟。已建钢铁企业能源管理中心可分为以下三种类型：

第一类是按照扁平化和集中一贯的理念，将数据采集、处理和分析、控制和调度、平衡预测和能源管理等功能进行了有机、一体化集成，实现了企业能源管理中心系统的管控一体化设计，系统和应用功能比较完善，取得了良好的节能效果。此类以宝钢、马钢等为代表。

第二类是将主要能源消耗信息和部分设备信息采集到企业能源管理中心，并对部分有条件的工序进行了监控，基本实现基于计量数据分析的能源管理功能和与信息化系统结合的离线优化。但限于现场条件，高效扁平化的调度和在线平衡管理等对节能有重要作用的功能还受到一定的限制，需要进一步改造、完善和提高。此类以济钢等为代表。

第三类主要功能是采集动力计量信息，通过软件实现编制能源管理报表、能耗分析、大屏幕显示等功能，本质上是以动力计量采集、管理为主的基础应用，

与真正意义上的企业能源管理中心还有较大差距。

目前,企业能源管理中心技术的发展已从单纯设备监控转向过程和系统综合监控,并继续向管控一体化方向发展;部分钢铁企业着手开展优化节能调度和综合平衡方法的研究,在应用功能上,成功引入预测模型和平衡模型等技术。未来钢铁企业能源管理中心系统的发展方向还将逐步与环境监测系统融合,以实现相互促进、协同管理的效果。

2010 年,该技术普及率为 50%左右,“十二五”期末预计推广比例将达到 80%左右。

6.1.6 技术知识产权情况

国内多家企业具有相关知识产权,如上海宝信软件股份有限公司、金自天正、中科院自动化所中自三博公司、红河谷自动化技术公司、济钢自动化公司、攀钢托日信息技术公司、酒钢自动化公司等均具有能源中心研究开发的知识产权。各家均有自己的特色。

6.2 燃气-蒸汽联合循环发电技术 (CCPP)

6.2.1 技术介绍

燃气-蒸汽联合循环发电 (CCPP) 技术充分利用钢铁企业低热值高炉煤气,由燃气轮机循环以及汽轮机循环所组成,煤气的热能既利用了烟气的作功能力发电,又利用了蒸汽的作功能力发电,从而更大限度的提高了能源利用效率。

该技术将钢铁企业高炉等副产煤气经除尘器净化加压后与经空气过滤器净化加压后的空气混合进入燃气轮机燃烧室内混合燃烧,高温高压烟气直接在燃气透平内膨胀做功并带动发电机完成燃机的单循环发电。燃气轮机做功后的高温排气送入余热锅炉,产生高、中压蒸汽后进入蒸汽轮机做功,带动发电机组发电,形成煤气-蒸汽联合循环发电系统,系统中锅炉和汽机均可外供蒸汽,灵活组成热电联产系统。该技术主要工艺流程图如下:

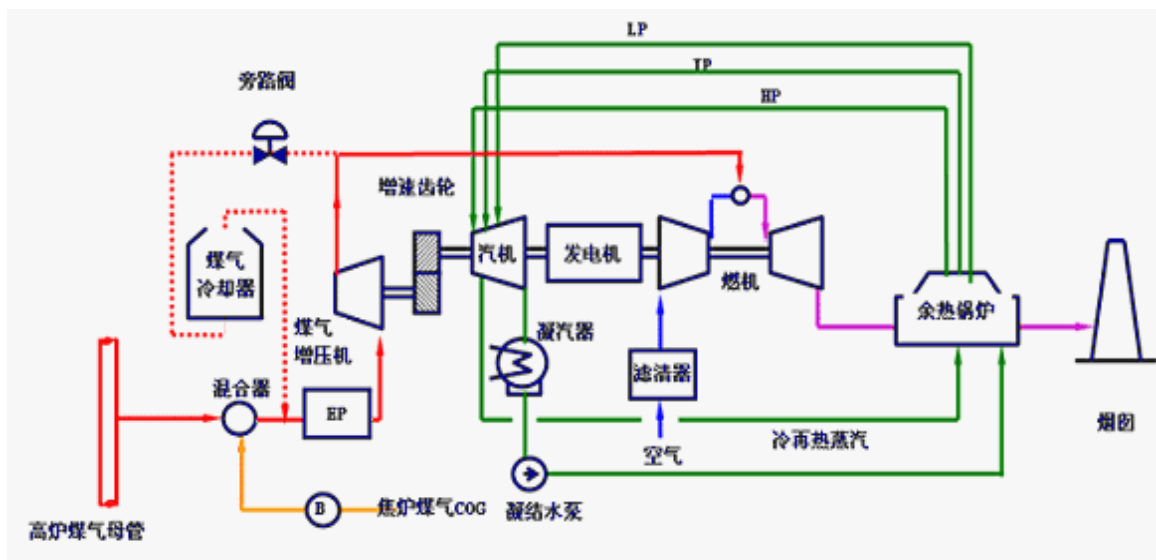


图 6.2.1 燃气-蒸汽联合循环发电流程图

6.2.2 技术适用条件

CCPP 装机容量主要是依据富余煤气资源为基准，综合考虑企业富余煤气资源与机组容量的匹配及运行的经济可靠性，认为低热值 CCPP 技术的应用应满足以下几个条件：

1. 年产 500 万吨钢以上规模的钢铁联合企业；
2. CCPP 机组单机装机容量不低于 50MW；
3. 已建有燃煤气热电系统作为企业富余煤气的缓冲用户。

6.2.3 节能减排效果

低热值 CCPP 技术由于采用了能源的梯级利用，在不外供热时机组的热效率即可达到 40~45%，比常规热电机组转换效率高近一倍。从煤气利用效率分析，CCPP 机组与锅炉—蒸汽轮机发电机组单位立方米煤气发电量分别为 0.43kW 及 0.23kW，即在相同煤气量情况下，可多发电 70%~90%。同时，由于 CCPP 机组中燃气轮机不需要大量冷却水，因此与常规热电机组相比，可节水 40%~50%。下表为某钢铁企业 50MW CCPP 机组的主要技术经济指标：

表 6.2.1 主要技术经济指标

序号	项 目	单位	数值	备注
1	燃气轮机输出功率	MW	28.1	已扣煤气压缩耗功
2	汽轮机功率	MW	18.9	
3	联合循环电站总出力	MW	47	已扣煤气压缩耗功

序号	项 目	单位	数值	备注
4	联合发电量	万 kWh	37086	
5	运行小时数	h	8040	
6	年高炉煤气 BFG 用量	万 m ³	97640.78	
7	年焦炉煤气 COG 用量	万 m ³	918.34	
8	循环冷却水量	万 m ³	5226	
9	机组发电热效率	%	40.02	
10	机组供电热效率	%	38.5	

截至 2009 年底，国内钢铁企业已建成低热值 CCPP 发电机组 28 套，总发电装机规模 2622MW，年可利用富余煤气量约 428 亿 m³，年发电量 184 亿 kWh，总计实现节能 644 万吨标准煤。

6.2.4 成本效益分析

（一）投资估算

CCPP 技术处理能力不同则建设投资不同，根据大量工程案例可知，该技术建设投资约 7200 元/kW。

CCPP 技术总投资 7494.98 元/ kW，其中建设投资 7200.00 元/ kW，建设期利息 135.49 元/ kW（建设期贷款比例 60%），铺底流动资金 159.49 元/ kW。投资估算详见下表。

表 6.2.2 CCPP 技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/ kW）
一	建设投资	7200.00
1	建筑费用	288.00
2	设备费用	6192.00
3	安装费用	360.00
4	其他费用	360.00
二	建设期利息	135.49
三	铺底流动资金	159.45
四	技术总投资	7494.98

（二）经济效益分析

CCPP 技术经济效益包括：发电收入 0.51 元/ kWh。CCPP 项目建设，增加

了高炉煤气、焦炉煤气以及除盐水等动力费用，同时增加了人工成本、固定资产折旧、修理等费用，增加管理费、财务费等费用，上述各项费用合计 0.43 元/kWh（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 0.08 元/kWh，贷款偿还结束后年利润总额 0.12 元/kWh，投资内部收益率 12.41%（税后），投资回收期（含建设期 1 年）8.3 年。

表 6.2.3 CCPP 技术经济评价指标表

序号	项 目	单位	指 标
一	总投资	元/ kW	7494.98
1	建设投资	元/ kW	7200.00
2	建设期利息	元/ kW	135.49
3	铺底流动资金	元/ kW	159.45
二	生产追加流动资金	元/ kW	372.14
三	总资金	元/ kW	7867.12
四	资金筹措	元/ kW	7867.12
1	自有建设资金	元/ kW	2851.91
2	建设期利息	元/ kW	135.49
3	自有流动资金	元/ kW	159.45
4	建设资金贷款	元/ kW	4348.13
5	流动资金贷款	元/ kW	372.14
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/ kWh	0.51
2	不含税总成本费用	元/ kWh	0.43
3	销售税金及附加	元/ kWh	0.01
4	利润总额	元/ kWh	0.08
5	所得税	元/ kWh	0.02
6	税后利润	元/ kWh	0.06
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	8.3
2	投资内部收益率	%	12.41
3	贷款偿还期（含建设期）	年	6.11

6.2.5 技术推广应用情况

1995 年,宝钢和日本川崎重工开始在宝钢电厂建造国内第 1 台燃烧低 CCPP 发电机组,装机容量 145MW, 100%纯烧高炉煤气,于 1997 年 11 月正式投入运行。随着钢铁行业节能减排力度的不断加强,CCPP 技术的节能环保优势日益彰显,截至 2009 年,共有宝钢、鞍钢、武钢、包钢等十几家大中型钢铁企业建设了低热值 CCPP 机组。

根据对国内现有重点大中型钢铁企业产能及煤气利用现状进行分析,预计“十二五”期间可新增 CCPP 机组装机容量 950MW,年可利用富余煤气量 153 亿 m^3 ,年发电量 66.5 亿 kWh,总计可实现节能 233 万吨标准煤,在重点大中型钢铁企业的推广比例达到 30%。

2010 年,该技术在重点大中型钢铁企业中普及率在 15%左右,预计“十二五”期末推广比例将达到 20%~30%。

6.2.6 技术知识产权情况

目前,该项技术仅仅被国外少数几家公司掌握,主要有两种技术流派,一种是采用单筒燃烧器的燃气轮机,技术拥有方包括 ABB、新比隆公司;另一种是采用多筒燃烧器的燃气轮机,技术拥有方包括三菱、GE。而随着燃气轮机技术的发展,目前占据国际先进水平的为多筒燃烧器技术,典型机型包括三菱的 M251、M701 系列及 GE 的 6B、9E 系列。

进入二十一世纪,随着该项技术在中国市场前景的广阔,国内杭汽、南汽两家大型工业汽轮机制造公司分别与三菱重工与 GE 公司开展了技术转让合作,目前已完成了 50MW 系列装机容量的 CCPP 技术转让,但燃气轮机的部分核心部件仍需进口。

6.3 全燃高炉煤气锅炉发电技术

6.3.1 技术介绍

全燃高炉煤气锅炉发电技术是以钢铁企业富余煤气为锅炉燃料,从而用于驱动蒸汽轮机发电机组进行发电的技术,主要包括锅炉、汽轮机、发电机三大核心设备。它充分高效回收利用了钢铁企业各类富余煤气,且可作为企业重要的煤气缓冲用户,同时省去了一般火力发电厂输煤和制粉系统、排渣及除尘系统等。具体原理是企业富余煤气经净化处理后,由管道输送至锅炉炉膛内,锅炉内由于煤气的不断燃烧,由化学能转变为热能,将产生的具有一定压力和温度的蒸汽引入汽轮机,经过膨胀做功将热能转换成机械能,最终汽轮机通过联轴器带动发电机

上具有磁场的转子，将机械能转换成了电能。

按锅炉运行参数分类，该技术在钢铁行业的应用主要包括两种，其中：中温中压参数通常指锅炉所产蒸汽参数为 3.82MPa、450℃，高温高压参数通常指锅炉所产蒸汽参数为 9.82MPa、540℃。该技术主要工艺流程图如下：

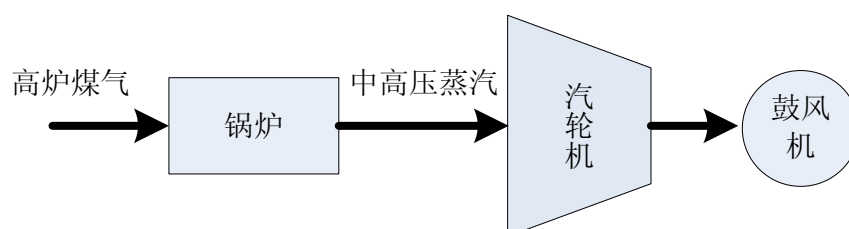


图 3.7.1 全燃高炉煤气锅炉发电技术工艺流程

6.3.2 技术适用条件

从机组投资运行的经济效益考虑，发电机组单台装机容量宜不小于 3MW，折合年利用富余高炉煤气量约 1.2 亿 m^3 ，相当于年节约标煤约 8000t。鉴于中国钢铁工业的高速发展状况及相关产业政策要求，可以认为该技术适用于所有具有高炉冶炼并回收副产煤气的钢铁企业。

6.3.3 节能减排效果

目前，中温中压参数全燃煤气锅炉汽轮发电机组的平均热效率为 25%左右，如采用高温高压参数，则机组热效率还可提高约 5%~10%。

以年产 500 万吨钢的钢铁联合企业计算，按吨铁产生高炉煤气 1400 m^3 计算，年副产高炉煤气量 65.8 亿 m^3 ，扣除高炉热风炉、焦炉及部分轧钢系统消耗后，可富余高炉煤气量约 19.74 亿 m^3 。

如采用中温中压全燃高炉煤气锅炉发电技术，除可利用上述富余煤气外，同时年可增加企业自发电量 4.4 亿 kWh（约占全厂用电量的约 15%~20%），相当于节约标煤 15.4 万吨标煤，年减少 CO_2 排放 38 万吨。如提高锅炉发电机组运行参数，即采用高温高压参数，则还可另新增发电量 0.58 亿 kWh，新增节约标煤量 2 万吨标煤。同时该项技术还具有广阔的应用潜力，以 2009 年为例，如将国内重点大中型钢铁企业排空或放散燃烧的高炉煤气全部用于发电，则每年可新增发电量 60~70 亿 kWh。

6.3.4 成本效益分析

（1）投资估算

全烧高炉煤气锅炉发电技术根据高炉煤气量的供给能力不同则建设规模、投

资均不同，根据大量工程案例可知，该技术建设投资约 5000.00 元/kW。

全烧高炉煤气锅炉发电技术总投资 5355.03 元/kW，其中建设投资 5000.00 元/kW，建设期利息 197.21 元/kW（建设期贷款比例 60%），铺底流动资金 157.82 元/kW。投资估算详见下表。

表 6.3.1 全烧高炉煤气锅炉发电技术总投资估算表

序号	技术名称	总投资（元/kW）
一	建设投资	5000.00
1	建筑费用	1400.00
2	设备费用	2850.00
3	安装费用	500.00
4	其他费用	250.00
二	建设期利息	197.21
三	铺底流动资金	157.82
四	技术总投资	5355.03

（2）经济效益分析

以高温高压参数全烧高炉煤气锅炉发电技术为例，主要经济效益包括：发电 2652.63kWh/万 Nm³ 高炉煤气 年，高压蒸汽 0.49 吨/万 Nm³ 高炉煤气 年。以上各项收入合计 1377.91 元/万 Nm³ 高炉煤气 年。全烧高炉煤气锅炉发电项目建设，增加了高炉煤气、电等动力费用，同时增加了人工成本、固定资产折旧、修理等费用，增加管理费、财务费等费用，上述各项费用合计 1004.08 元/万 Nm³ 高炉煤气 年（达产年）。

经测算，达产年年利润总额为 360.26 元/万 Nm³ 高炉煤气 年，贷款偿还结束后年利润总额 397.51 元/万 Nm³ 高炉煤气 年，投资内部收益率 22.24%（税后），投资回收期（含建设期 1 年）6.0 年。

表 6.3.2 全烧高炉煤气锅炉发电技术经济评价指标表

序号	项 目	单位	指 标
一	总投资	元/kW	5355.03
1	建设投资	元/kW	5000.00
2	建设期利息	元/kW	197.21
3	铺底流动资金	元/kW	157.82

序号	项 目	单位	指 标
二	生产追加流动资金	元/kW	368.24
三	总资金	元/kW	5723.27
四	资金筹措	元/kW	5723.27
1	自有建设资金	元/kW	1934.28
2	建设期利息	元/kW	197.21
3	自有流动资金	元/kW	157.82
4	建设资金贷款	元/kW	3065.72
5	流动资金贷款	元/kW	368.24
五	达产年经济效益指标		
1	收益（不含税）	元/万 Nm ³ 高炉煤气	1377.91
2	不含税总成本费用	元/万 Nm ³ 高炉煤气	1004.08
3	销售税金及附加	元/万 Nm ³ 高炉煤气	13.56
4	利润总额	元/万 Nm ³ 高炉煤气	360.26
5	所得税	元/万 Nm ³ 高炉煤气	90.07
6	税后利润	元/万 Nm ³ 高炉煤气	270.20
六	财务评价指标		
1	投资回收期（含建设期）	年	6.0
2	投资内部收益率	%	22.24
3	贷款偿还期（含建设期）	年	4.79

6.3.5 技术推广应用情况

全燃高炉煤气锅炉发电技术在国内各类型钢铁企业均已得到成功应用，并且取得了显著的经济和节能效益，作为国家“十大重点节能工程”之一，该项技术“十一五”期间在国内钢铁行业得到广泛的推广应用，目前在重点大中型钢铁行业的普及率已达 90%以上。

“十二五”期间，该项技术的推广应集中于提高发电机组热效率，主要技术措施包括提高机组的运行参数，如采用高温高压参数机组。目前，高温高压参数的全燃煤气锅炉发电技术应用比例为 15%，预计“十二五”末高温高压参数的全燃煤气锅炉发电技术应用比例将可达 65%。

6.3.6 技术知识产权情况

该技术的主要设备包括锅炉、汽轮机、发电机均已完全实现国产化。主要设备厂家包括：杭州锅炉集团有限公司、江西江锅热能动力设备有限责任公司、哈尔滨汽轮机厂、杭州汽轮机厂等。

6.4 原料场粉尘抑制技术

6.4.1 技术介绍

（1）概述

原料场作为钢铁生产的重要组成部分，承担着烧结、球团、炼铁、焦化、石灰等用户生产所需的含铁原料、熔剂、煤粉、焦炭等散状原、燃料的装卸、贮存、加工和输送任务，具有尘源点多、粉尘浓度高、各类粉尘混杂等特点。由于原料场占地面积大，原、燃料多采用露天堆放方式，这些散状原、燃料在二级风以上风力作用下极易干燥，在装卸和堆存作业过程中产生扬尘，造成周围环境空气的严重污染，同时也导致原料的大量风蚀，给企业带来一定程度的经济损失。

目前，控制钢铁企业原料场扬尘技术措施主要有水喷淋降尘、喷洒抑尘剂以及挡风抑尘墙。水喷淋降尘、喷洒抑尘剂降尘方式的主要缺点是工艺流程相对复杂，同时消耗一定资源，难以解决装卸料时的作业扬尘，运行维护费用较高，抑尘效果一般。相比之下，采用在原料场周围设置挡风抑尘墙的方式可以有效降低原料场内的风速，取得较为理想的抑尘效果，减少物料损失，无需运行维护费用。

（2）技术原理

挡风抑尘墙用来降低露天料场内的风速，对达到减少堆存、运输散落、机械作业产生的二次扬尘量非常有效。它是利用空气动力学原理，根据空气动力学理论分析、数值计算、风洞实验和现场效果测试等综合研究结果而设计、加工成一定形状的抑风板（网），然后与金属支架连接屏蔽，再根据现场条件组合成挡风抑尘墙。当风通过具有一定形状和开孔率的抑尘墙时，在抑尘墙内侧形成不同尺度的分离旋涡和强烈的湍流干扰气流，从而在较短的距离内消耗了来流风速的动能，衰减了来流的平均风速，减少起尘率，从而达到抑尘目的。

6.4.2 技术适用条件

该技术适用于港口、煤矿、电厂、焦化厂、钢铁厂等露天原料堆场。对于钢铁企业来说，挡风抑尘墙技术适用于所有露天原料场，尤其适用于沿海、多风地区钢铁厂的露天原料场。

6.4.3 节能减排效果

原料场设置挡风抑尘墙后，区域粉尘得到有效抑制，减少粉尘无组织排放量，减少对周围大气环境的污染，并减少原料的风吹流失，具有很好的社会效益和经济效益。下面以某钢铁企业原料场挡风抑尘墙为例进行分析：

该企业原料场设有火车翻车机卸车系统和汽车受料槽卸车系统，翻车机有 2 台，汽车受料槽有 20 个。原料场贮料面积 21.3 万 m²，一次料场布置 4 个料条，贮存各种含铁原料和熔剂，原料堆高 13m，原料贮存量 84 万吨。混匀料场布置 2 个料条，对各种含铁原料进行混匀作业，原料堆高 11m，原料贮存量 21 万吨。为抑制原料场扬尘，在露天料场和翻车机区域设置长 2410m，高 17m 的柔性挡风抑尘墙，在汽车受卸区域设置长 700m，高 14m 的柔性挡风抑尘墙。

原料场设置挡风抑尘墙后，使场地平均风速降低 60%以上，根据国内外近年来对钢铁企业原料场原料卸车产尘和风蚀损失研究的经验数据，按综合抑尘效果 80%计算，该项目每年可减少原料损失量约 1700 吨。

通过对上述案例的分析，根据经验数据估算，采取挡风抑尘墙措施后，原料场达到的减排效果为 1.3~2.2kg/t 贮存量。

6.4.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：原料场受卸区域及贮料场四周设置挡风抑尘墙，抑制原料在卸车、贮存过程中产生粉尘造成的环境污染以及原料流失。项目总投资 2590 万元，其中建设投资 2540 万元，建设期利息 50 万元。项目投资估算详见下表。

表 6.4.1 粉尘抑制技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1	建设投资	2540.00	98.1%
1.1	建筑费用	2199.13	84.9%
1.2	设备费用	0.00	0.0%
1.3	安装费用	0.00	0.0%
1.4	其它费用	340.87	13.2%
2	建设期利息	50.00	1.9%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	2590.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：可减少原料损失 1700 吨，年增加收入 170 万元。采用粉尘抑制技术，将增加折旧费、维修费、管理费、财务费等，各项费用合计 507 万元，项目利润总额-340 万元。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 6.4.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	2590
1.1	建设投资	万 元	2540
1.2	建设期利息	万 元	50
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	2590
4.	资金筹措	万 元	2590
4.1	自有资金	万 元	1036
4.2	建设贷款	万 元	1554
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	170
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	507
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	32
5.4	达产年利润总额	万 元	-340
5.5	达产年所得税	万 元	
5.6	达产年净利润	万 元	
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	
6.2	财务内部收益率	%	
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	

6.4.5 技术推广应用情况

挡风抑尘墙在日本、韩国、美国、英国、澳大利亚等国家已经广泛使用于露

天堆场的防尘工程，取得了良好的抑尘效果。在我国，通过引进和消化国外挡风抑尘墙技术，对挡风抑尘墙的防尘机理、主要结构参数和挡风抑尘墙对堆场减尘效果等做了一系列的研究工作，挡风抑尘墙已经成为一种成熟的技术。

目前，挡风抑尘墙技术多用于港口、煤矿、电厂、焦化厂等露天煤场，在钢铁企业露天原料场应用的较少，目前仅有宝钢股份、宝钢不锈、邯钢新区、太钢、宁钢、梅钢、鞍钢矿业公司等大、中企业以及河北地区一些中、小企业如唐钢中厚板、唐钢不锈、迁安轧一、邢台德龙等建有挡风抑尘墙。

随着环保要求的日益严格，钢铁企业广泛采用节能减排、清洁生产技术，露天原料场采用挡风抑尘墙技术，可以最大限度地减少粉尘排放，是实现源头削减污染、创造一流社会效益、环境效益和经济效益的重要环节。预计“十二五”末，挡风抑尘墙技术在钢铁企业的应用比例可达 55%左右。

6.4.6 技术知识产权情况

在我国，挡风抑尘墙技术日趋成熟，目前已完全实现国产化，主要设备厂家有：大连浦项东方科技有限公司、北京京诚嘉宇环境科技有限公司、河北抑尘时代环保工程有限公司、沁阳市兰翔实业有限公司、北京精诚博桑科技有限公司等。

6.5 双膜法污水处理回用技术

6.5.1 技术介绍

目前钢铁行业综合污水处理工艺主要为絮凝、沉淀、过滤，主要去除 SS、COD 等，对盐份没有去除作用，所以回用水含盐量很高，当回用水与原工业新水混合后做净环水系统补充水时，整个给水系统的含盐量升高，一方面设备的结垢、腐蚀现象严重，这将大大减少设备的使用寿命，也给生产工艺的用水带来一定影响。为了提高钢铁企业综合污水回用率，保障回用水质安全，必须将部分综合污水脱盐后再进行回用，或供锅炉等用户使用。针对综合污水处理后的水质，最经济、高效的脱盐方法有膜分离技术和电吸附技术。采用膜法水处理技术与其它技术的嫁接，除去综合污水中的盐份，实现钢铁工业综合污水的回用。膜法以反渗透技术为主。另有电吸附技术与其它技术的嫁接。目前，钢铁企业综合污水回用脱盐处理采用双膜法处理污水的流程主要有以下几种：

流程一：

污水处理厂出水→溴氧反应池→多介质过滤→微滤→保安过滤器→一级反渗透→二级反渗透→混床→供用户

一级反渗透水做为净循环水补充水，二级反渗透和混床处理后供锅炉等高端

用户。

流程二：

污水处理厂出水→反应池→超滤→一级反渗透→二级反渗透→EDI→供用户

一级反渗透水供循环冷却系统补充水，二级反渗透部分供冷轧系统，EDI供锅炉等高端用户用水。

流程三：

污水处理厂出水→石英砂及活性炭滤器→保安过滤器→一级反渗透→供用户

供净循环水系统补充水。

电渗析技术处理流程主要是经混凝沉淀过滤后的污水，再进入电渗析装置。

双膜法污水处理回用技术基本原理

该技术是指通过超滤(UF)-反渗透(RO)膜降低水中的各种盐份，超滤装置作为反渗透系统的预处理工艺装置，主要用于去除水中的胶体物质、高分子有机物、悬浮物等。反渗透是利用半透膜透水不透盐的特性，去除水中的各种盐份，即在RO的原水侧加压，使原水中的一部分纯水沿与膜垂直的方向透过膜，水中的盐类和胶体物质在膜表面浓缩，剩余部分原水沿与膜平行的方向将浓缩的物质带走。透过水中仅残余少量盐份，收集利用透过水，即达到了脱盐的目的。

膜元件有多种形式。DOW FILMTECTM 膜元件为螺旋卷式结构，简称卷式结构。与其它元件结构，如管式、板式和中空纤维式相比，具有水流分布均匀、耐污染程度高、更换费用低、外部管路简单、易于清洗维护保养和设计自由度大等许多优点，成为目前主要的膜元件结构形式。

6.5.2 技术适用条件

卷式结构（DOW FILMTECTM）膜进水要求：

最高操作温度	45℃
pH	2-11（清洗时1-13）
SDI（15分钟）	<5
自由氯浓度	<0.1ppm

反渗透出水水质：脱盐率≥98%（一年内）≥95%（三年内）

6.5.3 节能减排效果

反渗透的回收率与进水水质有着非常密切的关系，对于冶金行业的污水回用，一般经验，一级反渗透回收率一般设在 65%~75%，二级反渗透回收率设在

85%~90%。

6.5.4 成本效益分析

由于需要处理的水质有所不同，采用的药剂及能源消耗差别较大，因此，成本效益分析会产生较大误差别，故按照一般经验范围值进行估算和表达。根据实际案例估算反渗透每吨水的药液及电耗等运行费用，大概为 0.4~0.55 元/t。反渗透每吨水投资费用大约为 1.1~1.4 万元/t（一级 RO）。

6.5.5 技术应用推广情况

目前，双膜法污水处理回用技术在国内钢铁企业普及率约 15%左右。预计“十二五”期间，该技术的推广应用比例有望达到 50%。

6.5.6 技术知识产权情况

DOW FILMTECTM 膜元件为陶氏欧美公司拥有。

6.6 絮凝沉淀+V 型滤池污水处理技术

6.6.1 技术介绍

钢铁企业外排综合污水主要的污染物为 SS，COD，硬度碱度高，经过多年的研究和实践，我国基本形成以物化法的工艺路线，大型钢企业多采用预软化、混合絮凝、高效斜板沉淀池、V 型滤池工艺，效果明显，水质稳定，维护费用低。

综合污水进入调节池，对水量和水质均化处理，出水送至混合配水池，在前混凝池自动投加混凝剂、石灰乳和碳酸钠等药剂，由混合搅拌器快速搅拌混合，药剂快速混合后，污水籍重力自流至高效反应和斜板沉淀池。在反应澄清单元混合区投加高分子助凝剂和回流污泥，经有序的能量扩散后进入絮凝反应区形成易于沉淀的均匀絮凝体。出水自流进入沉淀浓缩单元，在沉淀区经斜板分离器使絮凝体与水分离，絮凝体沉积于底部浓缩区，经过浓缩机搅拌浓缩，浓缩污泥由泥浆泵定期抽取送至泥浆缓冲池。澄清水自流进入后混凝反应池，自动投加硫酸调 PH 值，投加混凝剂使出水微絮凝。出水自流到 V 型滤池，滤后水自流至贮存池。在流入贮水池前投加液氯灭杀菌藻消毒剂。经贮水池调节后，处理水加压回用。

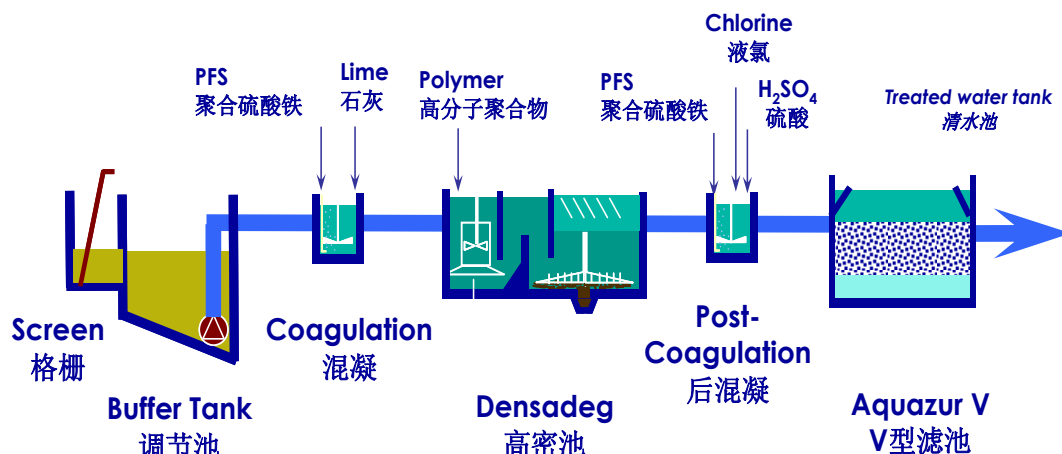


图 6.6.1 絮凝沉淀+V 型滤池污水处理工艺流程图

6.6.2 技术适用条件

适用于钢铁企业全厂综合外排废水的再生处理，焦化和冷轧达标处理废水不宜排入该系统，要求废水浊度低于 1500 NTU 盐高度聚集的综合废水排放系统，宜与脱盐深度处理技术配合使用。

6.6.3 节能减排效果

钢铁企业综合外排废水不仅影响水体环境，而且浪费水资源，该技术的应用可使综合外排废水的到资源化利用，节约淡水资源，减少外排废水量。

钢铁行业重点统计企业 2009 年吨钢外排废水量 2.1m^3 ，实施该技术和预脱盐深度处理技术，可实现废水回用达 80%以上，吨钢可节约新水和减少外排废水 1.68m^3 ，相应减排 COD 约 0.034kg。预计该技术推广空间约 55%，可节约新水和减排废水约 7.3 亿 m^3 ，减排 COD 约 1.5 亿 t。

6.6.4 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：采用絮凝沉淀+V 型滤池污水处理技术，处理废水 $48000\text{m}^3/\text{d}$ 。项目总投资 4140 万元，其中建设投资 3850 万元，建设期利息 154 万元，铺底流动资金 136 万元。项目投资估算详见下表。

表 6.6.1 综合污水处理技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1	建设投资	3850.00	93.0%

序号	费用名称	投资估算（万元）	占百分比
1.1	建筑费用	1341.99	32.4%
1.2	设备费用	1515.15	36.6%
1.3	安装费用	476.19	11.5%
1.4	其它费用	516.67	12.5%
2	建设期利息	154.46	3.7%
3	铺底流动资金	135.55	3.3%
	总投资	4140.00	100.0%

（2）经济效益分析

项目达产年指标：可节约新水 1224 万吨，年增加收入 2889 万元。采用综合污水处理技术，将增加辅助材料费、动力费、人工费、制造费、管理费、财务费等，各项费用合计 1783 万元，项目利润总额 1077 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）3.5 年，财务内部收益率 26.2%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 6.6.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	4140
1.1	建设投资	万 元	3850
1.2	建设期利息	万 元	154
1.3	铺底流动资金	万 元	136
2.	生产流动资金	万 元	316
3.	项目总资金	万 元	4456
4.	资金筹措	万 元	4456
4.1	自有资金	万 元	1656
4.2	建设贷款	万 元	2484
4.3	流动资金贷款	万 元	316
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	2889
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	1783
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	294

序号	项目名称	单 位	指标
5.4	达产年利润总额	万 元	1077
5.5	达产年所得税	万 元	269
5.6	达产年净利润	万 元	808
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	3.5
6.2	财务内部收益率	%	26.2
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	2.4

6.6.5 技术推广应用情况

该技术在国内外钢铁企业已有广泛的采用，典型的实例有：首钢、本钢、邯钢、安钢等企业污水处理厂。目前已在近 20 多家钢铁企业得到应用。

预计“十二五”期间，该技术在国内外钢铁企业的推广应用比例将达到 60%以上。

6.6.6 技术知识产权情况

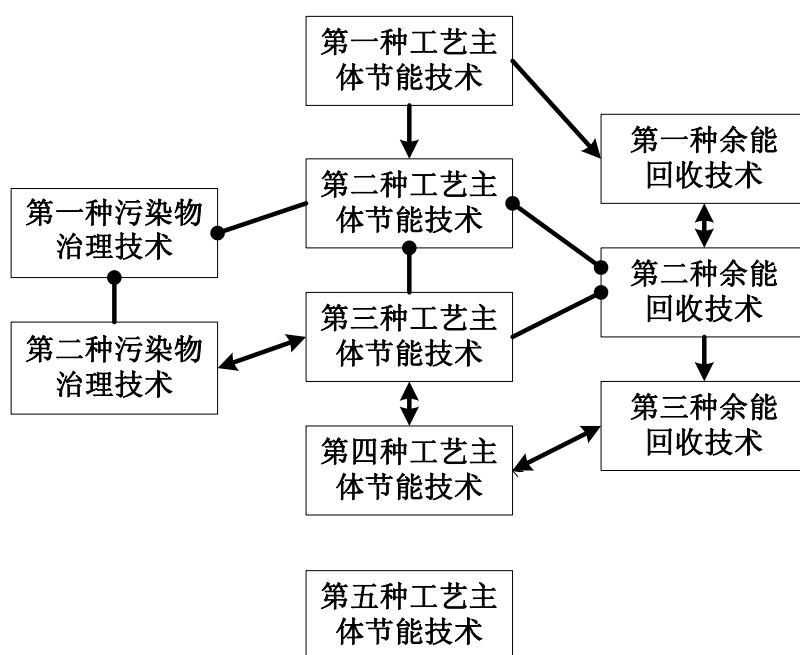
目前国内外提供该技术的工程公司，如法国得利满公司，中国京冶工程技术有限公司都拥有自主知识产权。

第五章 工艺技术的优化组合分析

所谓节能减排技术组合就是由多种节能减排技术所形成的,具有一定组成规律的节能减排技术群体,是单项节能减排技术的综合体。当代科学技术发展的一个重要特点就是各种门类的学科、各种门类的技术呈现既高度分化,又高度整体化综合化的趋势,单一的学科和单一的技术难以适应日益复杂化的研究领域。学科之间、技术之间、科学与技术之间呈现高度的相关性。现代钢铁节能减排技术的发展也是这样,单项节能减排技术的发展受到很大的局限性,各种节能减排技术相互渗透,相互影响,相互促进,相互配合,形成了节能减排技术组合的潮流。节能减排技术的发展是以群体的形式不断向前发展的,从群体结构研究节能减排技术的发展规律,无疑是有重要意义的。

从不同角度看,节能减排技术有不同的结构,因此节能减排技术组合也可以有不同的分类。我们所讨论的钢铁行业节能减排技术组合可以按照能源系统或过程分为:生产过程节能减排技术、资源能源回收利用技术和污染物末端控制技术。

我们将在以下各节中具体的介绍在各个钢铁工序中三种技术类型之间的关系以及他们组合后的互相作用。根据技术原理和调研数据分析,把各种技术之间的关系分成两大类,一是技术间依赖,二是技术间排斥。这两类根据其方向性也都分成单向和双向两个小类,如技术关系图所示。单向依赖表示在已有 A 技术的基础上,增加 B 技术能够提高节能效果,一般建议配套使用;相互依赖表示两个技术相互以对方为前提缺一不可,必须配套使用;单向排斥表示在已有 A 技术的基础上,增加 B 技术很有可能或者必定降低节能效果,一般不建议配套使用;相互排斥表示两个技术冲突,只能选择其一。根据以上分析,给出比较合理的节能减排技术配套方案,并列举现有企业运用案例。



箭头说明：

↔ 技术双向依赖 ●——● 技术双向排斥
 → 技术单向依赖 ———● 技术单向排斥

技术关系图

从根本上来说,节能效益的获得依靠了节能减排技术组合的发展,它取决于节能减排技术组合的优势度。因此要十分重视对节能减排技术组合的研究,并在研究中注意以下一些问题。

一是重视发展相互配套的一系列相关节能减排技术,使其形成群体,以拓宽其应用领域和范围,获得更大幅度的节能效果。

二是注意多途径、多层次、多方面、多方法地发展主导节能减排技术组合。

三是要有必要的节能新技术储备,选择一些有前途的、技术知识密集的节能新技术作为新主导节能减排技术的储备,使主导节能减排技术的发展有连续性。

第一节 焦化工序

1.1 技术分类

焦化工序中的节能减排技术主要有：（1）煤调湿技术；（2）捣固炼焦技术；（3）高温高压干熄焦技术；（4）焦炉煤气高效脱硫净化技术；（5）焦化酚氰污水处理技术。

根据节能减排技术组合结构的定义，我们把第 1 项技术归类为生产过程节能减排技术；把第 2、3 项技术归类为资源能源回收技术；最后两项归类为污染物治理技术。

1.2 技术组合优化分析

根据各项节能减排技术基本原理和节能减排潜力分析，以及各技术相关调研数据，我们整理焦化工序中互相之间存在关系的技术。列举如下：

当使用煤调湿技术时，可以降低煤的水含量亦可降低污水量，减轻污水处理负担。当使用干熄焦（CDQ）技术时，同样就放弃了低水分熄焦技术，节约熄焦用水 3497~4372 万 m^3 ；减少污水，且配合良好的除尘设施，可将熄焦过程对环境的污染降到最低水平，减少了常规湿法熄焦过程中排放的含酚、HCN、 H_2S 、 NH_3 的废气。综上所述绘制炼铁技术组合图如图 1.1 所示。

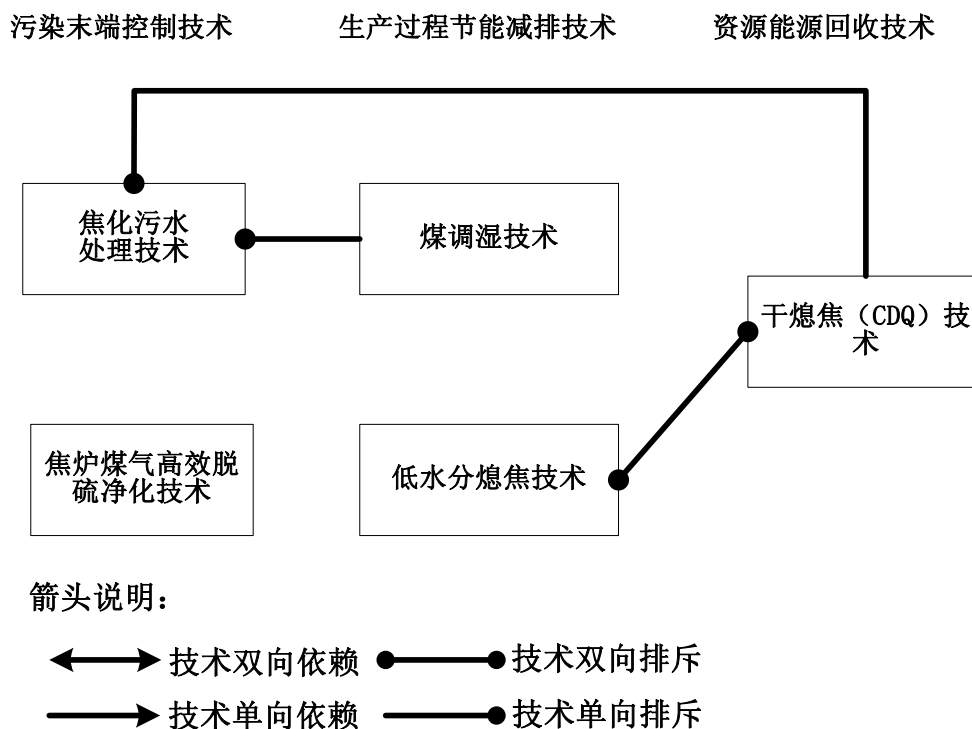


图 1.1 焦化工序技术组合关系

1.3 技术组合案例

在调研信息反馈表中，选取济钢在焦化工序中的技术组合，以供参考。济钢使用了全部 5 项节能减排技术，但是低水分熄焦技术只在干熄焦设备检修停机时使用，平时备用。所以济钢在正常生产时的技术组合如图 1.2 所示。

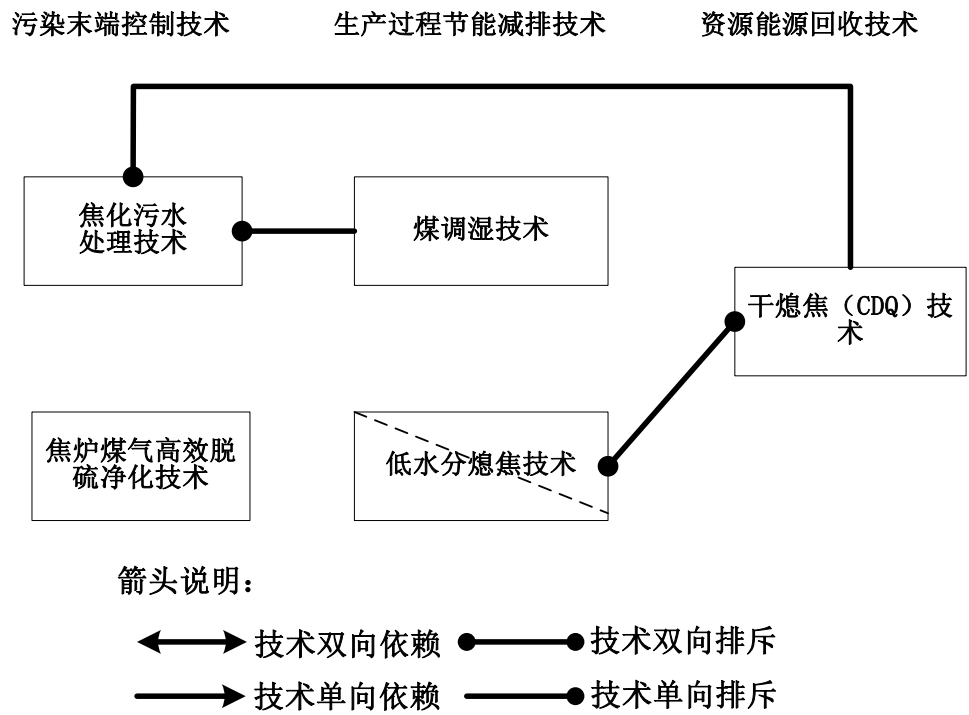


图 1.2 济钢炼铁工序技术组合关系

第二节 烧结球团工序

2.1 技术分类

烧结、球团工序中的节能减排技术主要有：（1）小球烧结工艺技术，（2）降低烧结漏风率技术，（3）低温烧结工艺技术，（4）厚料层烧结技术，（5）链篦机-回转窑技术，（6）烧结余热回收利用技术，（7）球团废热循环利用技术，（8）烧结烟气湿法脱硫技术，（9）烧结烟气半干法或干法脱硫技术。

根据节能减排技术组合结构的定义，我们把前 5 项技术归类为生产过程节能减排技术；把第 6,7 项归类为资源能源回收技术；最后 2 项归类为污染物治理技术。

2.2 技术组合优化分析

根据各项节能减排技术基本原理和节能减排潜力分析，以及各技术相关调研数据，我们整理烧结工序中互相之间存在关系的技术。列举如下：

当使用小球烧结工艺技术时，有利于增加料层厚度，对厚料层烧结技术有一定的促进作用。此外，该技术的使用可以降低固体燃料消耗量以实现低温烧结，非常有利于低温烧结技术的使用。另一方面，小球烧结工艺技术的使用减少了燃料带入的硫量，增强了烧结过程的氧化气氛。有利于透气性提高和烧结过程的均匀进行，实施小球烧结工艺以后，烧结矿含硫量降低了 0.007 个百分点，减轻了烧结脱硫负担。

当使用降低烧结漏风率技术时，在烧结生产过程中，减少了烧结机的漏风率，增强了料层中空气量，也就意味着通过烧结料层的有效风量增加，使固体燃料燃烧的更加充分，有利于厚料层烧结技术的使用。

当使用链篦机-回转窑技术时，球团矿生产的铁精矿一般都经过细磨和精选，含硫量相对较低，一般在使用高热值煤气的前提下，SO₂ 排放浓度能够小于排放要求，不需设置脱硫设施。即使浓度超过排放标准，球团脱硫处理烟气量要比烧结少，球团脱硫设施能比一般的烧结脱硫设施投资节省。此外球团生产过程中不含氯离子，缺少二噁英的生产条件，不会产生二噁英。也减轻了空气污染治理的负担。

当使用烧结余热回收利用技术时，余热利用发电后，每年可节约近 3 万吨标准煤，这意味着减少 CO₂ 排放约 8 万吨，减少 SO₂ 排放约 0.7 万吨，减排 NO_x 0.04 万吨，减排粉尘 0.3 万吨。大大减轻了烧结脱硫负担。

当使用球团废热循环利用技术，该技术是针对所有链篦机-回转窑球团生产

线的。单机（窑）生产能力大的链篦机-回转窑球团生产线适用效果更佳，节能效果更加明显。球团废热循环利用技术随着链篦机-回转窑球团建设时一起建设，属于“三同时”项目，是链篦机-回转窑球团建设不可分割的一部分。

当使用烧结烟气石灰石/石灰-石膏脱硫法技术时，就排除了其他脱硫技术，成本相对较低，但本技术用水量较大，并有污水排放，且不能去除及重金属、二噁英等多种污染物。

当使用烧结烟气干法脱硫技术时，初期投资费用和运行费用比湿法高，但本技术脱硫同时可实现脱硝、脱二噁英、重金属及粉尘等。脱硫过程不消耗水，干法脱硫技术更适合于贫水地区。

当使用第九项中烧结烟气活性炭脱硫法技术时，同样排除了其他脱硫方法。活性炭吸附法是目前唯一能脱出烟气中每一种杂质的方法，属于干法烟气脱硫技术。活性焦可再生后重复利用，不消耗水、不产生废水；副产物为硫酸或硫磺等，无二次污染。

综上所述绘制炼铁技术组合图如图 2.1 所示。

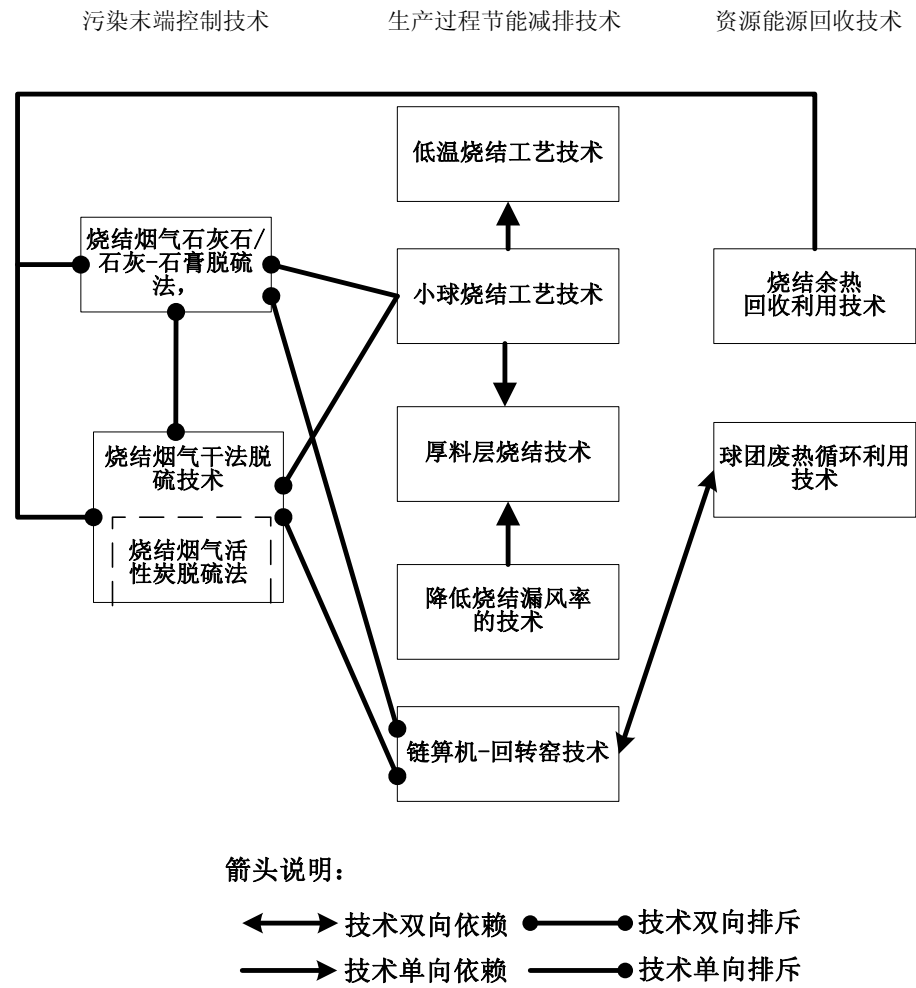


图 2.1 烧结工序技术组合关系

2.3 技术组合案例

在调研信息反馈表中，选取济钢在烧结工序中的技术组合，以供参考。济钢的技术组合如图 2.2 所示，共使用了 6 项节能减排技术，取得了良好的经济和社会效益。

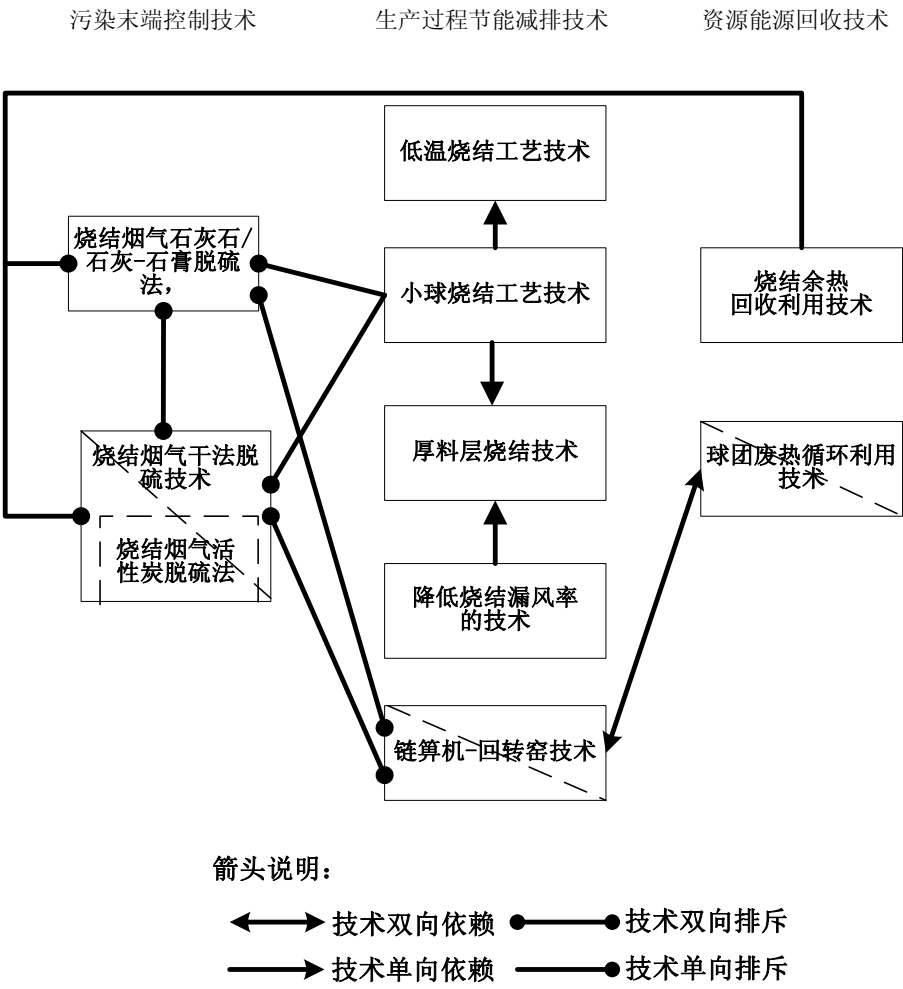


图 2.2 济钢烧结工序技术组合关系

第三节 炼铁工序

3.1 技术分类

炼铁工序中的节能减排技术主要有：(1) 高炉炼铁精料技术，(2) 高炉高效喷煤技术，(3) 高炉脱湿鼓风技术，(4) 高炉煤气干式余压发电技术 (TRT)，(5) 高炉热风炉双预热技术，(6) 高炉煤气汽动鼓风技术，(7) 高炉煤气干法布袋除尘技术，(8) 转底炉处理含铁尘泥技术，(9) 高炉渣综合利用技术。

根据节能减排技术组合结构的定义，我们把前 6 项技术归类为生产过程节能减排技术；把第 7 项归类为污染物治理技术；把第 8、9 项归类为资源能源回收利用技术。

3.2 技术组合优化分析

根据各项节能减排技术基本原理和节能减排潜力分析，以及各技术相关调研数据，我们整理炼铁工序中互相之间存在关系的技术。列举如下

当采用高炉炼铁精料技术时，入炉矿品位升高 1%，炼铁焦比下降 1.5%，高炉产量提高 2.5%，吨铁渣量减少 30kg，允许高炉增喷 15kg/t 煤粉。所以此技术促进高炉高效喷吹技术，而渣量减少，对高炉渣处理技术有一些阻碍。

当采用高炉脱湿鼓风技术时，可以提高入炉干风温度。风中湿度每减少 1g/m^3 ，进入高炉的干风有效温度可提高 6°C ，进而能够多喷煤粉。所以此技术的使用促进了高炉高效喷煤技术，而对加热风温的高炉热风炉双余热技术有一些阻碍。

当使用高炉炉顶余压发电技术 (TRT) 时，其发电能力是随炉顶煤气压的变化而变化的，一般每吨生铁可发电 20~40kWh。采用干法除尘，可提高发电量 30% 左右。所以当使用 TRT 技术时必须配备干法除尘技术。另外有必要配备燃气-蒸汽联合循环发电技术 (CCPP) 对其进行余热回收。

综上所述绘制炼铁技术组合图如图 3.1 所示：

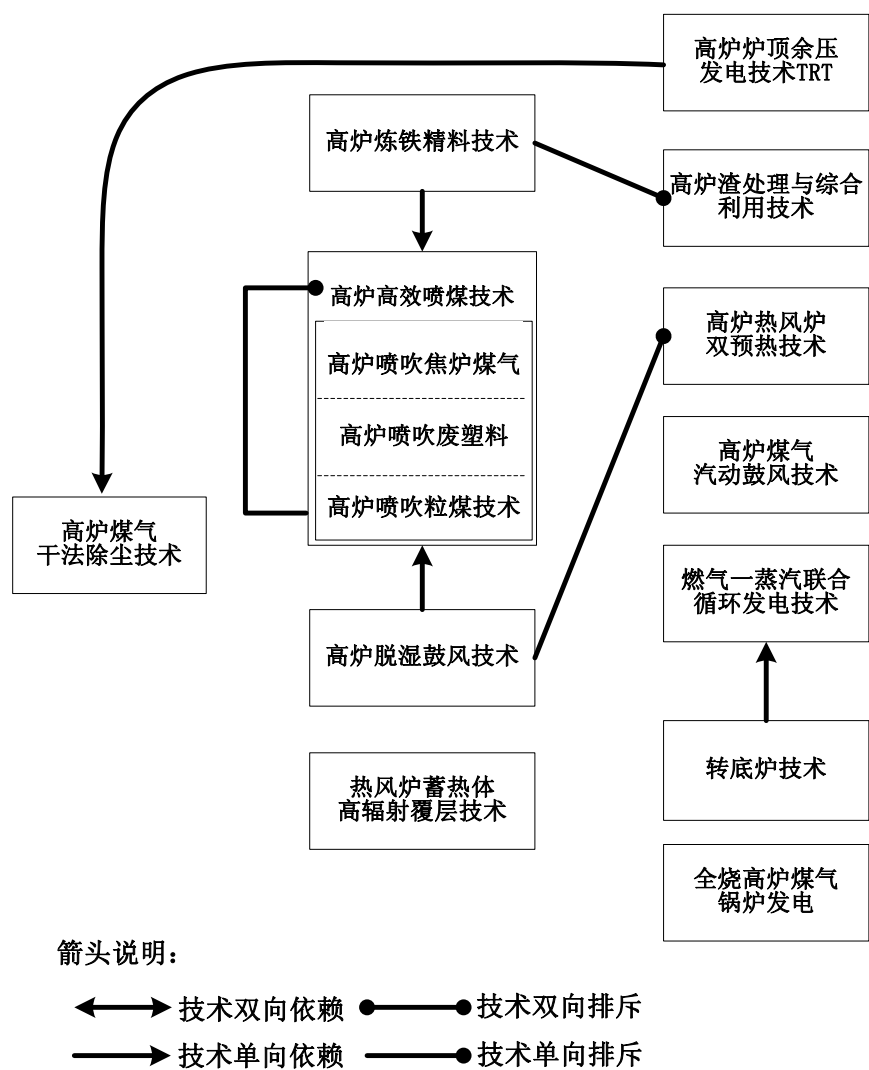


图 3.1 炼铁工序技术组合关系

3.3 技术组合案例

在调研信息反馈表中，选取济钢和沙钢在炼铁工序中的技术组合，以供参考。

济钢的技术组合如图3.2所示，共使用了8项节能减排技术，取得了良好的经济和社会效益。

图 3.2 济钢炼铁工序技术组合关系

沙钢的技术组合如图3.3所示，共使用了9项节能减排技术，取得了良好的经济和社会效益。

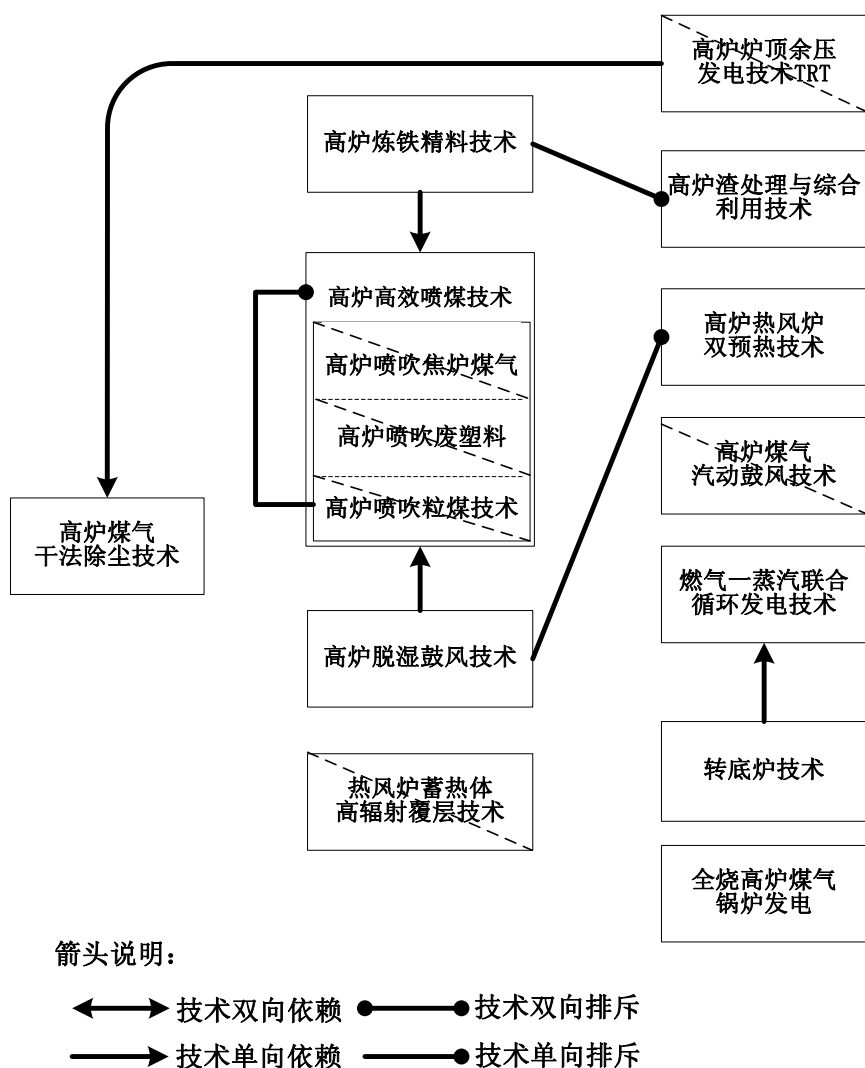


图 3.3 沙钢炼铁工序技术组合关系

第四节 炼钢工序

4.1 技术分类

本小节，我们只讨论传统的转炉炼钢中的节能减排技术。转炉炼钢工序中的节能减排技术主要有：（1）转炉“负能炼钢”工艺技术，（2）炼钢连铸优化调度技术，（3）高效连铸技术，（4）薄板坯连铸技术，（5）转炉烟气高效利用技术，（6）转炉烟气干法除尘技术，（7）电炉优化供电技术，（8）电炉烟气余热回收利用除尘技术，（9）废钢加工分类预处理技术，（10）钢渣处理及综合利用技术。.

根据节能减排技术组合结构的定义，我们把前 7 项技术归类为生产过程节能减排技术；把第 8、9 项归类为资源能源回收技术；最后 1 项归类为污染物治理技术。

4.2 技术组合优化分析

根据各项节能减排技术基本原理和节能减排潜力分析，以及各技术相关调研数据，我们整理炼钢工序中互相之间存在关系的技术。列举如下：

当使用高效连铸技术后，连铸机实现高效化后，通过提高铸机作业率，提高连铸机生产效率，配套连铸坯的高温热装和热送，单位铸坯相应的直接能耗和各种物料消耗将会降低，从而实现直接节能和间接节能。本技术的环保效果体现在两方面：首先通过提高连铸机的生产效率和实现热装热送降低单位铸坯的能耗，间接降低了相关废弃物的排放；其次，提高连浇率和铸机作业率，减少了相应耐火材料的消耗，也间接减少了固体废弃物的排放，提高了资源的利用效率。减轻了钢渣处理的负担。

当使用转炉烟气高效利用技术时，烟气能量的高效转换与回收利用是转炉工序能耗为“负值”的主要途径。烟气能量回收主要以烟气显热和化学能转换为中、低热值的转炉煤气，中、低压力的蒸汽两种方式并加以回收利用。

当使用转炉烟气干法除尘技术，对转炉烟气进行净化与回收时，不仅可以节省大量能源，做到“负能炼钢”，而且能够净化大气环境。

综上所述绘制炼钢技术组合图如图 4.1 所示。

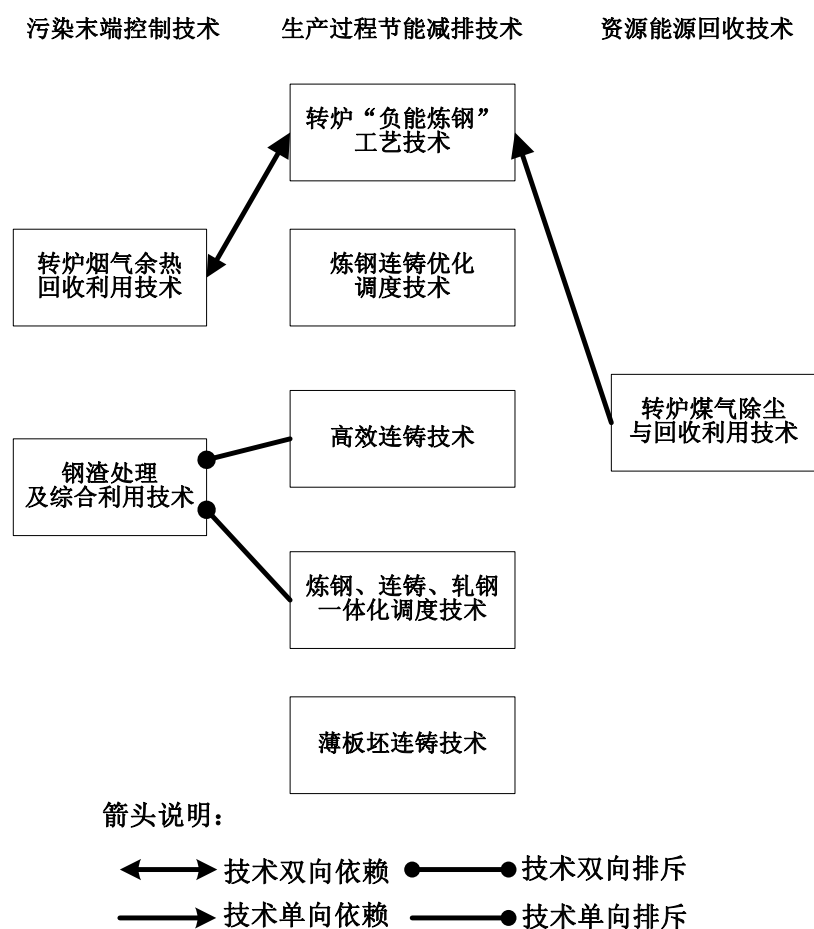


图 4.1 炼钢工序技术组合关系

4.3 技术组合案例

在调研信息反馈表中，选取济钢在炼钢工序中的技术组合，以供参考。济钢的技术组合如图 4.2 所示，共使用了 5 项节能减排技术，取得了良好的经济和社会效益。

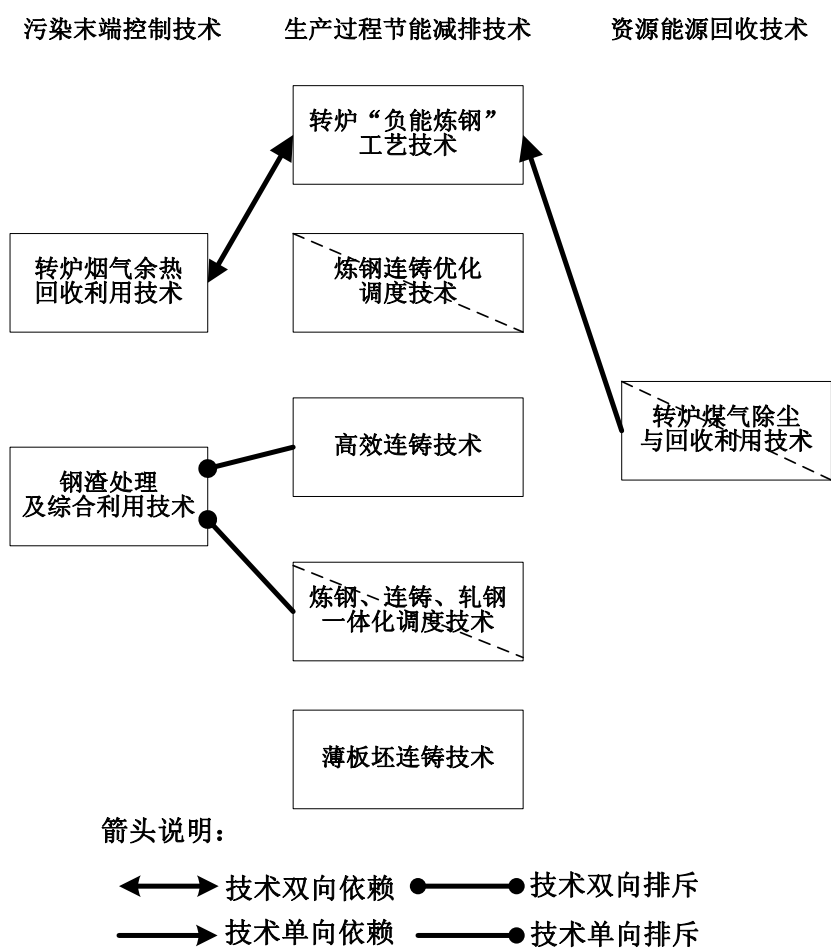


图 4.2 济钢炼钢工序技术组合关系

第五节 轧钢工序

5.1 技术分类

轧钢工序中的节能减排技术主要有：(1) 连铸坯热装热送技术，(2) 低温轧制技术，(3) 热带无头轧制、半无头轧制技术，(4) 在线热处理技术，(5) 轧钢加热炉蓄热式燃烧技术，(6) 轧钢氧化铁皮综合利用技术，(7) 塑料板除尘技术。

根据节能减排技术组合结构的定义，我们把前 4 项技术归类为生产过程节能减排技术；把第 5，6 项归类为资源能源回收技术；最后 1 项归类为污染物治理技术。

5.2 技术组合优化分析

根据各项节能减排技术基本原理和节能减排潜力分析，以及各技术相关调研数据，我们整理轧钢工序中互相之间存在关系的技术。列举如下：

在调研信息反馈表中，选取济钢在轧钢工序中的技术组合，以供参考。济钢的技术组合如图 5.7 所示，共使用了 5 项节能减排技术，取得了良好的经济和社会效益。

当使用连铸坯热装热送技术时，可大大降低轧钢加热炉加热连铸坯的能源消耗，减少钢坯的氧化烧损，提高轧机产量。减轻轧钢固体废物处理与回收利用技术的负担。

当使用低温轧制技术时，连铸坯加热时的氧化铁皮明显减少，烧损下降了 0.1% 左右。减轻轧钢固体废物处理与回收利用技术的负担。

当使用蓄热式燃烧技术时，可将空气和煤气预热到 $700^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 以上；减少氧化烧损，使氧化烧损小于 0.7%，减轻轧钢固体废物处理与回收利用技术的负担。

另外还需要增加的是，在炼钢工序中如果使用高效连铸技术后，必须配套轧钢工序中的连铸坯热装热送技术。

综上所述绘制轧钢技术组合图如图 5.1 所示：

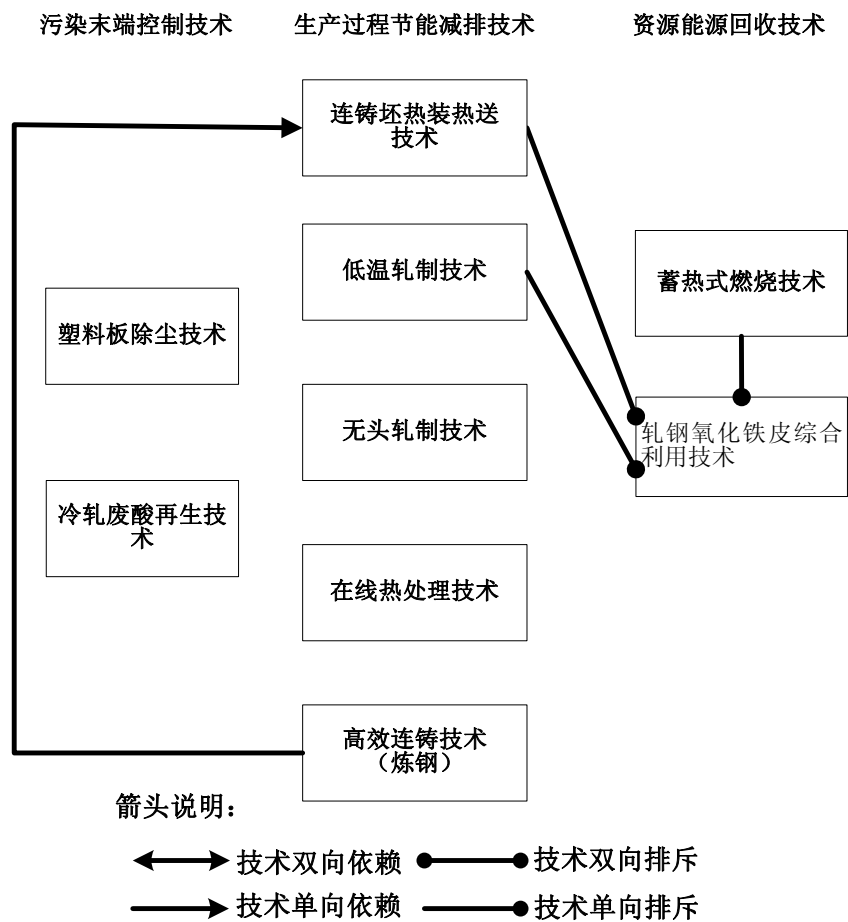


图 5.1 轧钢工序技术组合关系

5.3 技术组合案例

在调研信息反馈表中，选取济钢在轧钢工序中的技术组合，以供参考。济钢的技术组合如图 5.2 所示，共使用了 6 项节能减排技术，取得了良好的经济和社会效益。

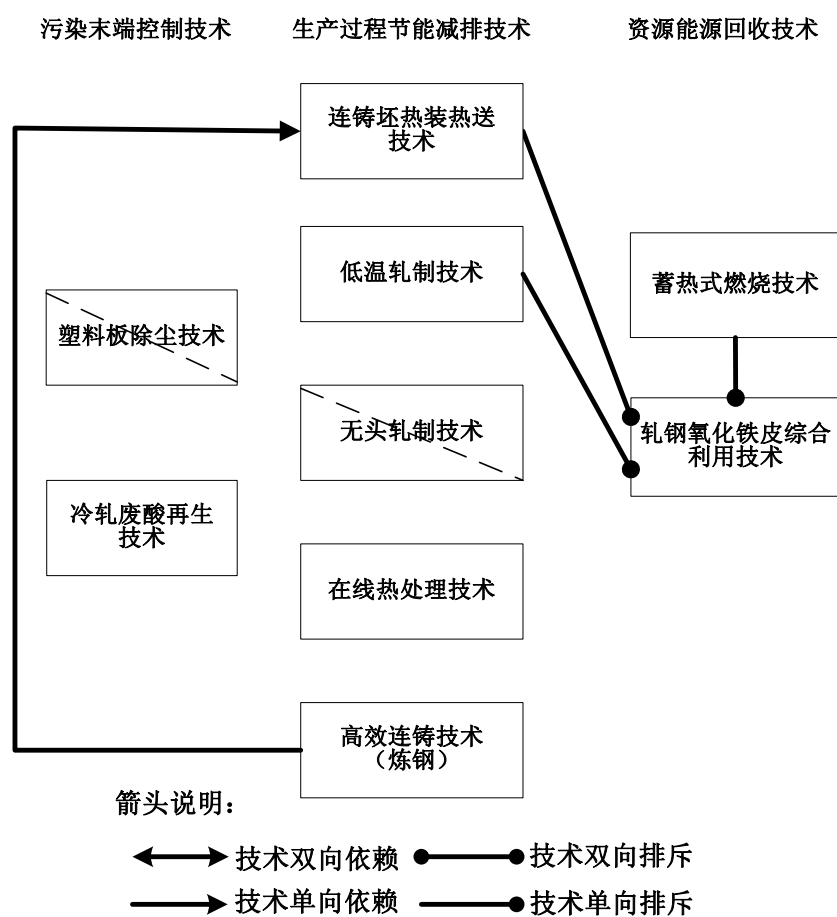


图 5.2 济钢轧钢工序技术组合关系

第六节 流程优化分析

从制造工艺上看，钢铁工业属于流程制造业。对于钢铁工业而言，生产流程对生产效率、产品成本、产品质量、产品品种、资源消耗、投资效益等技术经济目标群具有综合影响力，而且也直接影响过程排放、环境生态和资源/能源可供性等可持续发展因素。

6.1 钢铁制造流程中物质流的运行行为和特征

钢铁制造流程中的物质流，主要包括输入的物料流、输出的产品流和副产品流、循环使用的废弃物流和排放的污染物流。钢铁生产流程物质流的结构、流量、运行模式、时间、程序等不仅决定着企业的资源消耗，而且对企业的能源消耗影响极大，铁元素是钢铁生产过程的主要物质，也是主要的被加工对象和产品，它贯穿于整个钢铁生产流程（图 6.1）。

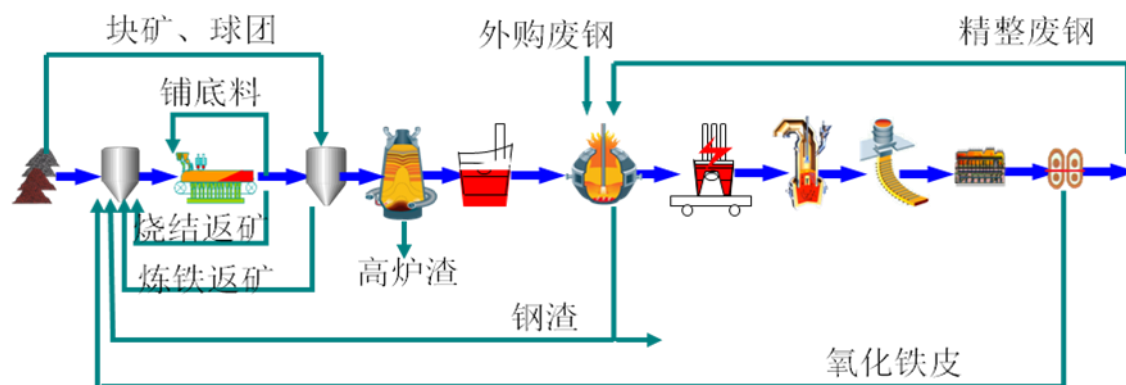


图 6.1 钢铁制造流程过程中的铁素物质流

钢铁生产流程的物质流追求耗散最小化。从源头上来说，希望投入单位资源（铁矿石或废钢）能生产出的产品越多越好；从过程上来说，追求生产单位最终产品各生产工序输出物质流的最小化。假设钢铁生产流程由 n 道钢铁生产工序组成，则钢铁生产流程的物质流如图 6.2 所示。

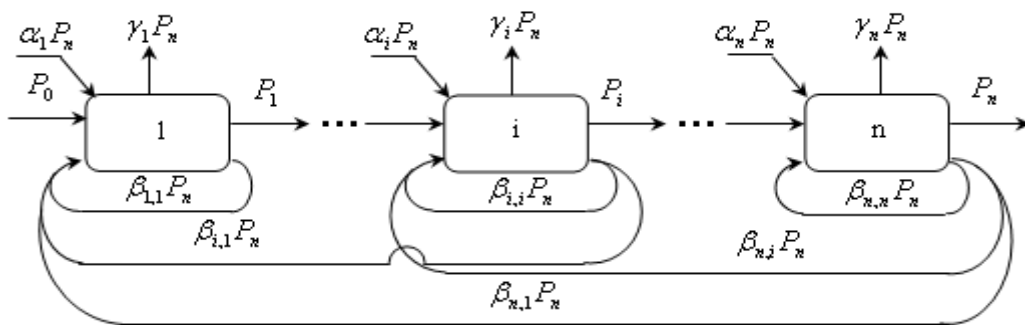


图 6.2 钢铁生产流程的物质流图

图中， P_i ($P_i = \left(1 + \sum_{l=i+1}^n \gamma_l + \sum_{l=i+1}^n \sum_{m=1}^i \beta_{l,m} - \sum_{l=i+1}^n \alpha_l\right) P_n$) 为各生产工序统计期内的工序产品产量（以铁素计，单位t）。

将图中的各股物质流量均除以最终产品量 P_n ，即得单位产品物质流图，根据物质流运行规律及流程物质流输入/输出原理，建立铁源效率模型，从中可以得到生产流程物质流的主要参数：

- 1) 吨材外加物质流：生产1t钢材所需外加的物质流总和，t/t材，即： $\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i$ ；
- 2) 吨材排放损失物质流：生产1t钢材外排或损失的物质流总和，t/t材，即： $\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i$ ；
- 3) （铁）资源效率：资源效率是指使用单位天然资源所能生产出来的最终产品量，即： $R = \frac{1}{1 + \gamma - \alpha}$ 。

由物质流图及铁资源效率等模型可见：①从外界向流程中某工序输入废钢铁时，可提高流程铁资源效率，并且随着废钢输入量的增加，流程铁资源效率逐渐增加；②当副产品或废品从某道工序向外界输出，降低流程铁资源效率，并随着输出量的增加，流程铁资源效率逐渐降低。因此，为了提高流程铁资源效率，必须努力降低各工序向外界输出的副产品或废品量；③工序内部副产品或废品的返回量多少，对流程铁资源效率没有影响；④下游工序的副产品或废品返回上游工序时，对流程的铁资源效率没有影响。⑤下游工序的副产品或废品返回上游工序时，对流程的铁资源效率没有影响；⑥工序之间多股铁流返回，重新处理时，对流程铁资源效率没有影响。

通过对钢铁制造流程中物质流（铁素流）的分析可见，当工序之间有多股铁

素流返回前面工序，进行重新处理利用时，只对相关工序铁资源效率有影响，对流程铁资源效率没有影响，但此时，工序内部或工序之间铁素流的循环流动仍需消耗一定量的能源和成本，从而使整个流程的能耗和成本提高。因此，在生产过程中，工序内部或工序之间副产品或废品的循环量应尽量减少。

铁（素）流是研究钢铁生产过程的核心。在生产过程中铁素流是被加工流，追求不可逆过程中的耗散最小化。即不希望有过多的轧钢切头、铁皮，炼钢过程废钢、烟尘、炉渣等含铁物料返回到前工序中去再加工，以实现铁素流耗散最小化，能量消耗最小化，过程所占空间最小化，过程所占时间最小化。

因此，钢铁制造流程中的铁素物质流往往要求物质流网络是一种最小有向树的结构。以曹妃甸京唐钢厂流程为模板的新一代钢厂物质流（铁素流）运行网络与轨迹见图 6.3。

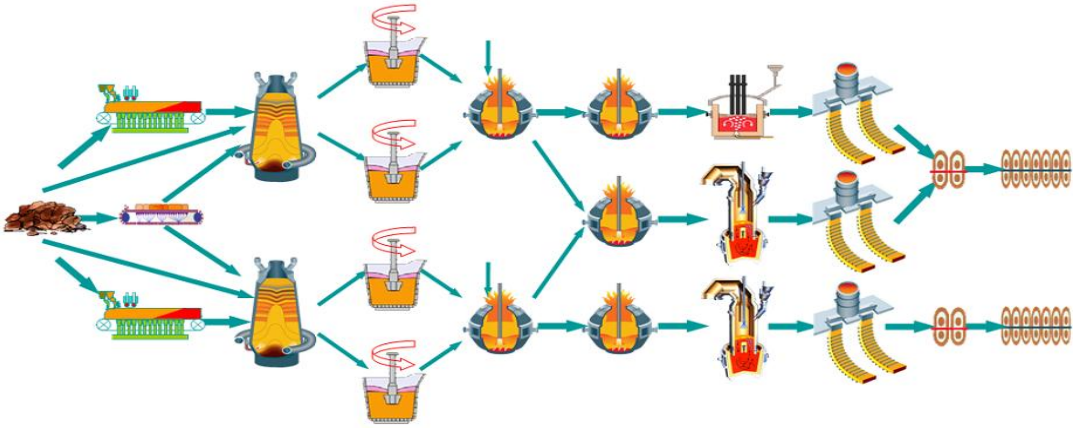


图 6.3 新一代钢厂物质流（铁素流）运行网络与轨迹

基于铁素物质流图及铁资源效率模型，依据曹妃甸京唐钢厂流程的基本设计参数，对新一代钢厂物质流进行分析与计算，结果表明，其铁资源效率为 98.89%，见图 6.4。

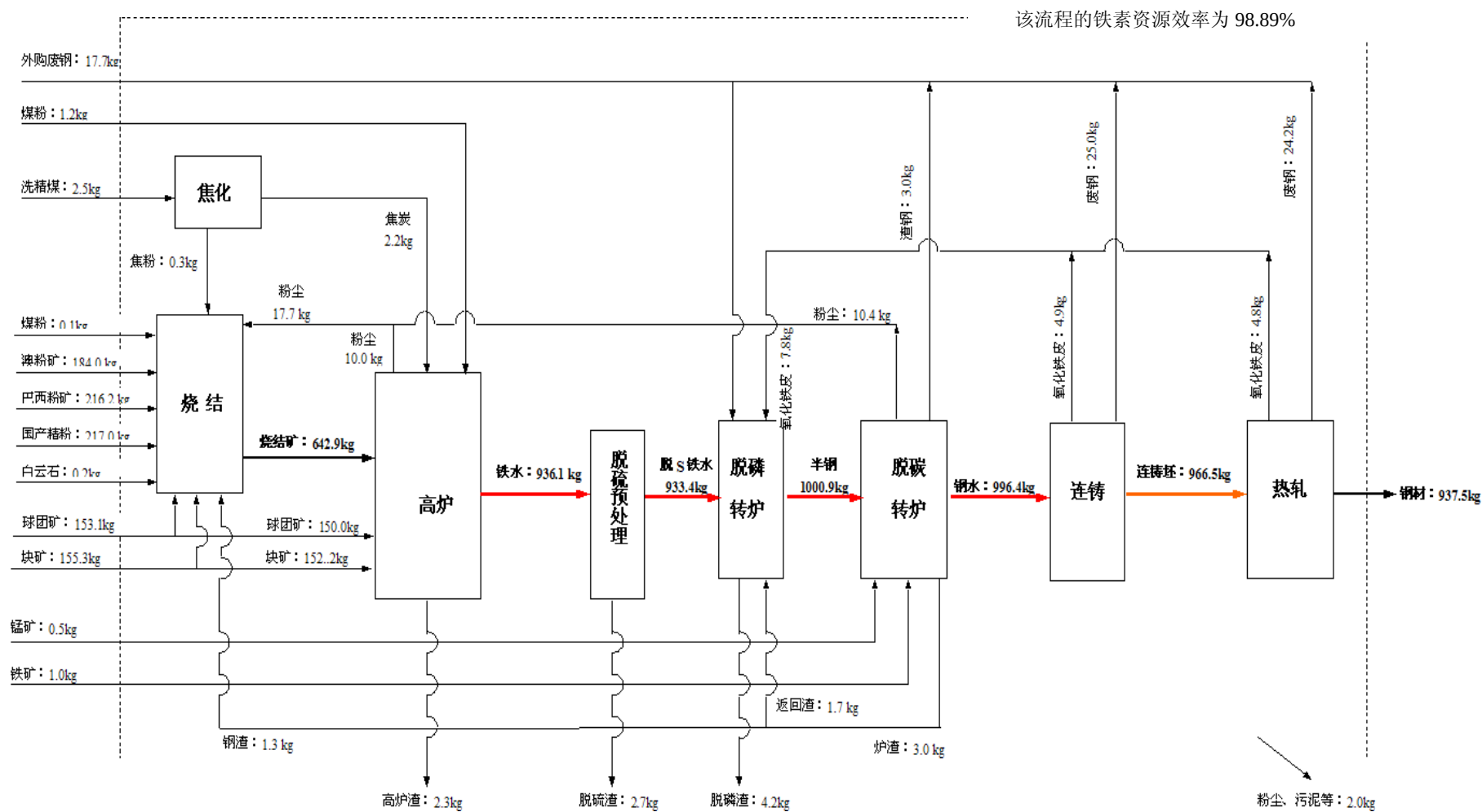


图6.4 新一代钢铁制造流程物质流（铁素流）分析

6.2 钢铁制造流程中能量流的运行行为和特征

钢铁制造流程中能量流沿着转换、使用、回收及排放的路径运行着，钢铁企业的能量流包括：企业外购的各种能源，如煤炭、电力、天然气等；包括生产过程中产生的各种余热余能，如各种煤气的化学能和显热、高炉炉顶余压、高温废气、余热水、冶金渣的显热等；还包括钢铁产品、中间产品所载能量，如烧结矿显热、球团矿显热、铁水显热及化学潜热、钢水显热及钢坯显热等。钢铁企业的外购能源以煤为主，因此，碳素流是能量流的主要形式。它沿着转换、使用、回收利用、再回收直至排放的进程不断运行，从一种形式变为另一种形式的碳素流（如焦炭、煤气等）或转变为其他种能量形式（如电力、蒸汽等）。

钢铁制造流程中能量流的大部分伴随着物质流运行，耦合在各个钢铁生产工序上或钢铁产品物质流上（如高温铁水、连铸坯）；还有一部分能量流脱离物质流独立运行（如各种煤气、余热蒸汽），并按一定的“程序”构成钢铁企业内的“能源转换网络”。钢铁制造流程中“能量流网络”是由“节点”和“连结器”等单元构建而成的；是“能量-空间-时间-信息”构成的动态运行系统（图6.5）。

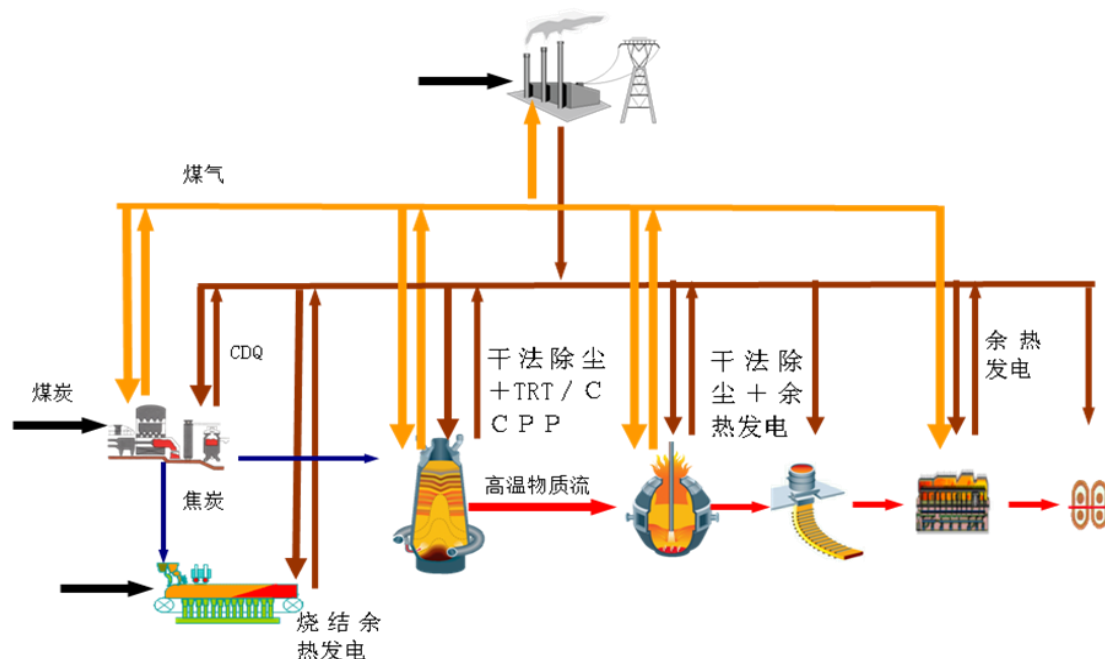


图6.5 钢铁制造流程主体能量流（碳素流及电）运行的示意图

钢铁企业的生产过程中物质流是被加工转变的主体，能量流根据物质流转变过程的工艺要求发生转换，为物质流的转变过程提供推动力；在物质流转变的过程中，能量流也会随着发生转变，产生新的能量流。为了推动物质流的快速转变，能量流的推动力往往是过剩的，表现为生产过程中会产生大量的余热余能。但同

时，能量流对物质流的推动力不能太大，否则能量流的过剩程度就会超出企业的余热余能回收能力而发生能量放散。因此，钢铁企业物质流动和能量流动过程是钢铁产品的高效生产和能源产品的高效转换相互协同作用的过程。物质流与能量流在一个生产工序上的协同作用表现为工序余热余能的充分回收利用。同时，还有部分能量流依附于钢铁产品而与物质流耦合在一起。当能量流可以依附于物质流而进入下道工序时，物质流与能量流的协同作用表现为物质流所载有效能被下道工序充分利用。因此，除了重视提高能源转换效率以外，应特别注意及时、充分回收过程中的余热、余能，钢铁制造流程的能量流网络最好有“初级回路”的结构，以实现物质流、能量流消耗最小化和效率最大化的目标。实际上构成了碳素流的短期循环和通过发电等形式来集成各环节的短期碳素流循环，实现碳素流耗散最小化，相应实现减排CO₂等目标。

生产工序层面物质流与能量流的相互作用主要表现为能量流对物质流转变的推动作用。能量流根据物质流转变需求而发生转变，为物质流转变提供足够的能量，所提供的能量必须大于物质流转变过程需求的能量，以推动物质流的快速转变。在钢铁企业具体表现为：供给各生产工序的能源都是过量的，以获得较高的生产率。同时，二者的相互作用还表现为：物质流的转变过程也是能量流的转变过程，各种过剩的能量，随着物质流的转变而转变，产生新的能量流，或依附于物质流，或与物质流分离，独立运行。例如，供给烧结工序的焦粉、煤粉转变成了废气显热和烧结矿显热；供给炼铁工序的焦炭和煤粉转变为高炉煤气和铁水的化学潜热；鼓入高炉的风能转变为炉顶余压；铁水带入转炉的显热和潜热经炼钢工序转变成了钢坯显热和转炉煤气显热和潜热。

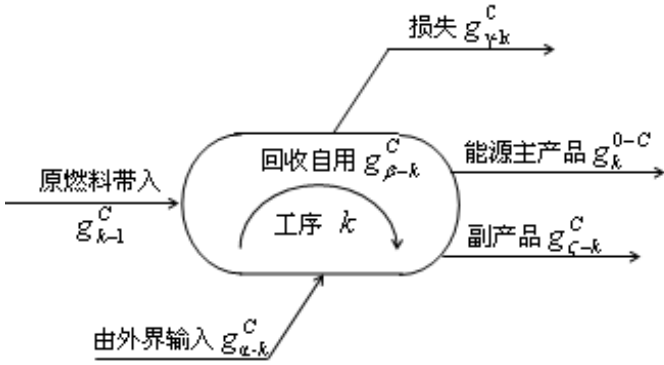


图 6.6 能源转换工序的能量流模型

钢铁制造流程中能源转换工序追求能源转换的高效率，即希望生产单位能源主产品投入的能量越少越好。通过一个能源转换工序的各股能量流如下图所示。假设第 k 道钢铁生产工序由 m_k 个转换单元构成，以生产单位能源主产品为基准，则能源转换工序的各股能量流为各转换单元能量流的加权平均值，表示图6.6所

示。

1) 主要原燃料带入工序的能量, g_{k-1}^C , 包括化学能、热能和动能等, 即:

$$g_{k-1}^C = \sum_{j=1}^{m_k} (\omega_{k,j} \cdot g_{k-1}^{C-j})$$

2) 转换后的能源产品, 工序能源主产品离开本工序时带走的热能和化学能等, g_k^{0-C} , 即: $g_k^{0-C} = \sum_{j=1}^{m_k} (\omega_{k,j} \cdot g_k^{0-C-j})$

3) 消耗的能量, 从工序外部供给工序的燃料、电力等能量, $g_{\alpha-k}^C$, 即:

$$g_{\alpha-k}^C = \sum_{j=1}^{m_k} (\omega_{k,j} \cdot g_{\alpha-k}^{C-j})$$

4) 损失的能量, 工序损失的能量, $g_{\gamma-k}^C$, 即: $g_{\gamma-k}^C = \sum_{j=1}^{m_k} (\omega_{k,j} \cdot g_{\gamma-k}^{C-j})$

5) 回收自用的能量, 工序回收自用的燃料、热能等能量, $g_{\beta-k}^C$, 即:

$$g_{\beta-k}^C = \sum_{j=1}^{m_k} (\omega_{k,j} \cdot g_{\beta-k}^{C-j})$$

6) 副产的能源产品, 工序回收并用于其他工序的燃料、热能等能量, $g_{\zeta-k}^C$,

$$\text{即: } g_{\zeta-k}^C = \sum_{j=1}^{m_k} (\omega_{k,j} \cdot g_{\zeta-k}^{C-j})$$

若考虑转换单元能源主产品能值 (b_k^j) 与工序能源主产品能值 (b_k) 的关

$$\text{系, 则有: } b_k = \sum_{j=1}^{m_k} (\omega_{k,j} \cdot b_k^j)$$

可见工序能源主产品的能值与各单元的主产品能值及权重有关: 提高主产品能值低的单元的产量权重或降低主产品能值高的单元的产量权重, 均可降低工序能源主产品的能值。

能源转换工序的能源消耗量与转换方式有关。能源转换工序的能源消耗量还与设备的大型化程度有关。钢铁企业能源转换工序转换方式及转换工序设备的大型化程度的选择是动态有序为准则的, 如虽然能力低的制氧机的电耗比能力高的制氧机的电耗高, 但是不同钢铁生产流程对氧气的需要量是不同的, 因此减少氧气放散与制氧机能力的选择需综合动态精准的考虑。

曹妃甸京唐钢新一代钢厂能量流 (碳素流) 运行网络与轨迹见图6.7。

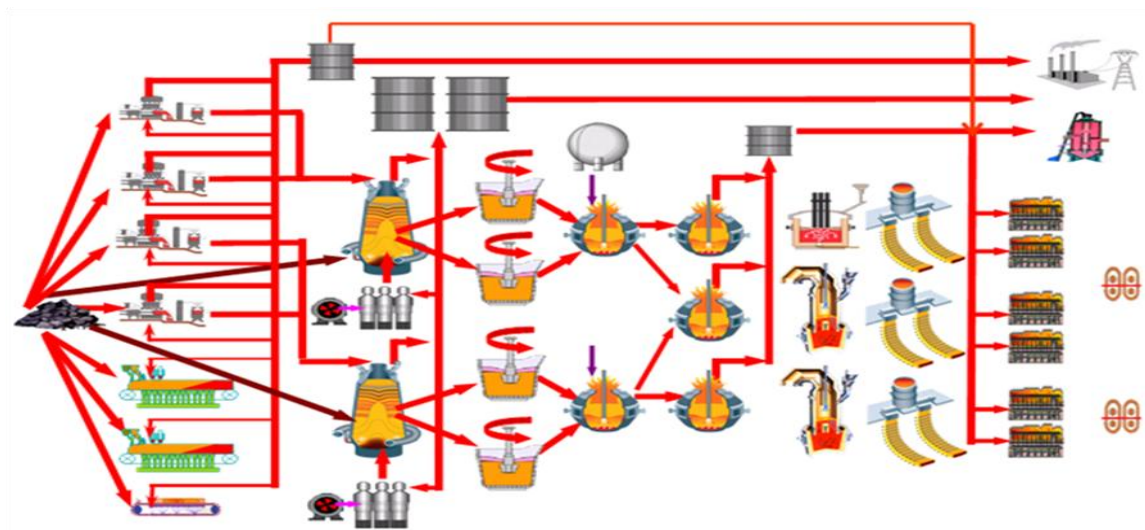


图 6.7 新一代钢厂能量流（碳素流）运行网络与轨迹

应用所建立的模型，依据曹妃甸京唐钢厂流程的基本设计参数，对新一代钢厂能量流（碳素流）进行分析与计算，结果见图6.8。

碳素消耗直接排放的 CO_2 为 1832 kg/t-钢



6.3 钢铁制造流程动态-有序运行的物理框架及钢铁制造流程网络

钢铁制造流程实际上是一种动态运行的过程，其运行的物理本质是：铁素物质“流”在能量流的驱动和作用下，按照设定的“程序”在“流程网络”中动态-有序地运行，以实现多目标优化。优化的目标包括了产品优质、低成本，生产高效-顺行，能源使用效率高、能耗低，排放少、环境友好等。

所谓有序，指事物内部的诸要素和事物之间有规则的联系或转化。序是指多个事物的一个比较，两个事物总是根据一定规则来相比较有序与无序的。有序可分为静态有序和动态有序两大类，静态有序形成的结构称为平衡结构，动态有序形成的结构称为非平衡或耗散结构。

耗散指的是物质和能量的耗散。物质和能量都是守恒的，故物质和能量的耗散不是指物质和能量的消失，而是指物质和能量状态的改变，即从低熵状态转变为高熵状态。耗散结构也可说是不断消耗低熵状态的物质和能量来维持的结构。钢铁制造流程可以理解作为一种动态有序运行的结构，即耗散结构，因此钢铁制造流程必需不断消耗低熵状态的物质和能量来维持的这种结构，而理想的动态有序运行的钢铁制造流程追求的就是低熵状态的物质和能量的消耗最少。若使钢铁制造流程中物质和能量的消耗最少，必须研究钢铁制造流程中物质流、能量流的运行行为和特征。

物质流是钢铁制造流程中被加工的主体，是主要物质产品的加工实现过程；能量流是钢铁制造加工过程中驱动力、化学反应介质、热介质等角色的扮演者；在钢铁制造流程的动态运行过程中，物质流、能量流及信息流相伴而行、相互影响。

从钢铁制造流程其运行的物理本质可以看出钢铁制造流程中存在大量物质、能量的流动，在钢铁制造流程中，“流”有三种载体来体现：即以物质形式为载体的物质流，以能源形式为载体的能量流和信息形式为载体的信息流。这些物质流、能量流的流动需要推动力，和推动力有关的因子统称为广义力。钢铁制造流程这种集成的、动态-有序运行方式，蕴含着流程层面上宏观运行动力学，这种运行动力学的要素是“流”、“流程网络”和“程序”。所谓“网络”是由节点和线（弧）构成的图形，通过图形形成了特定的结构。所以，也可以说：“网络”是节点和线（弧）以及它们之间关系的总和。对钢厂生产流程而言，这是一个具有物质-能量-时间-空间-信息构成的动态系统。再细分则可以进一步解析为“物质流网络”和“能量流网络”。

钢铁企业的各个生产工序及单元按照一定的“程序”连结在一起构成企业的总平面图，并体现为一定的流程网络。不同的流程网络，其工序及生产单元（或装置）之间的连结方式不同，流程的网络结构不同。各生产工序或生产单元（或

装置)之间的连结方式主要有两种:串联方式和串一并联方式。

1) 串联方式

串联方式是指一个生产工序(或生产单元)的输出流是下一个生产工序(或生产单元)的输入流,而且对每一个生产工序(或生产单元)而言,物质流只是顺流向通过一次,钢铁企业中的“四个一”短流程钢厂即是典型的实例,如图6.9所示。

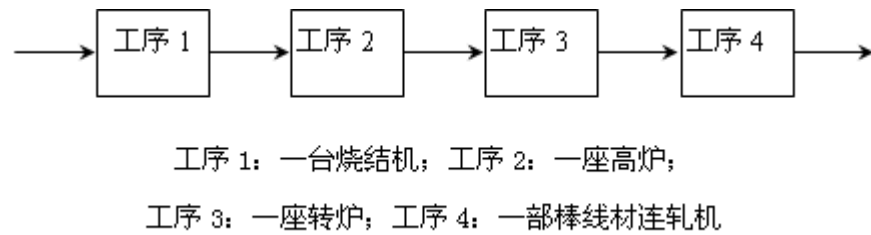


图 6.9 串联连结示意图

2) 串一并联方式

在钢铁企业的流程网络中,并联方式经常与串联方式一起使用,其中串联方式常常是工序级别的主干,并联方式往往是单元装置级别上的连结方式。如钢铁企业采用两台烧结机并联运行、三座高炉并联运行等,如图6.10所示。

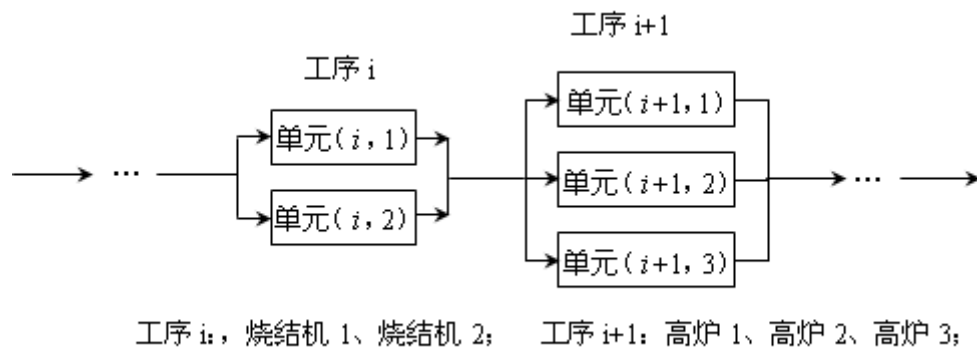


图 6.10 串一并联连结示意图

一般情况下,钢铁企业生产流程的网络结构在生产流程内部各工序之间表现为串联连结,而在工序内部的各单元装置之间往往表现为并联连结。钢铁企业生产流程的网络结构是构建钢铁制造流程匹配-协同的“流”的物理基础,匹配-协同的“流”应体现上、下游工序之间的运行以及多工序之间运行的稳定性。若充分考虑各相邻工序各生产单元之间可能出现的物质流匹配关系,则整个钢铁生产流程的物质流运行网络可类比为“层流”模式、“紊流”模式、“层流-紊流混合”模式等多种不同的运行模式,不同运行网络可抽象为如图6.10~6.13所示。

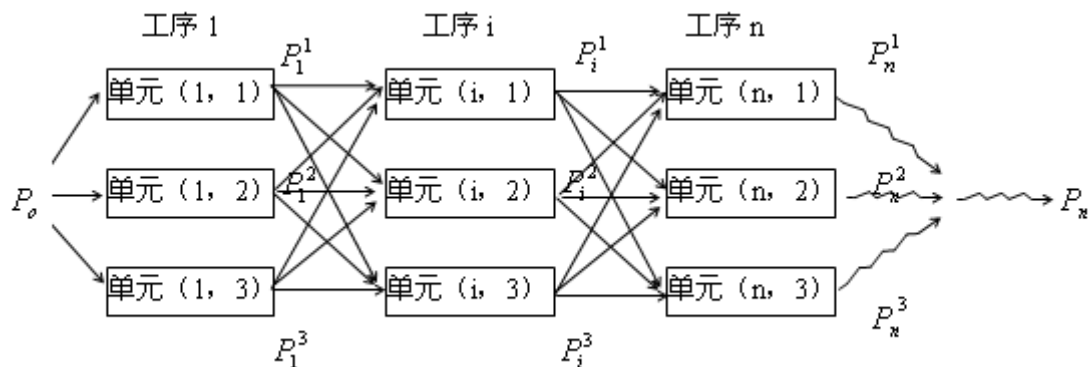


图 6.11 钢铁制造流程随机不稳定匹配一对应的“紊流”运行网络模式

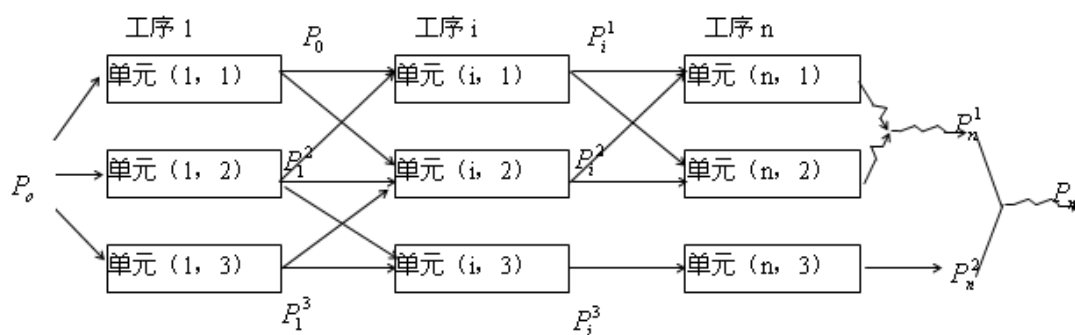


图 6.12 钢铁制造流程“层流”——“紊流”混合运行网络模式

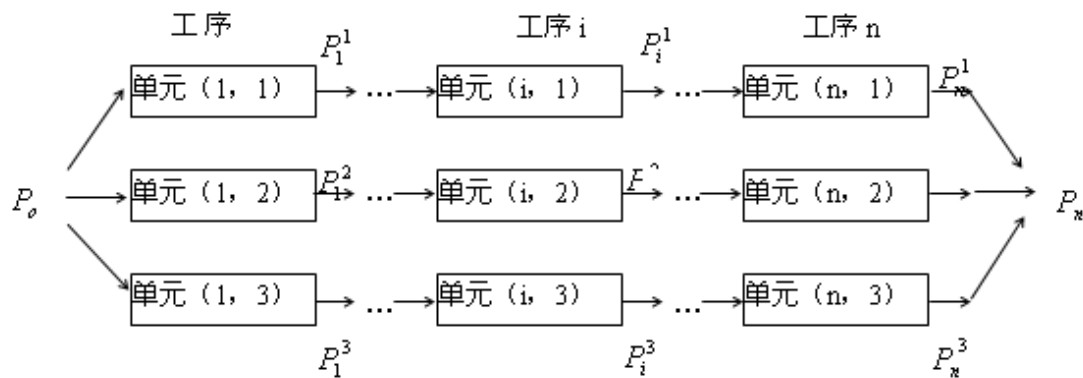


图 6.13 钢铁制造流程动态—有序、匹配一对应的完全层流运行网络模式

“紊流”模式相邻工序及各生产单元之间物质流向是随机的，输入、输出的物质流都是波动的，物质流运行的可控性极差；“层流—紊流”模式相邻工序及生产单元之间的部分物质流流向是随机的，部分生产单元输入、输出的物质流是不稳定的，部分物质流的运行是不可控的；“层流”模式相邻工序及各生产单元之间具有完全对应的物质流匹配关系，各生产单元输入、输出物质流的流向和流量都是稳定的和可控的，是“理想”的物质流运行模式，实现了物质流动态和有序的运行。在大多数情况下，钢铁制造流程应尽可能建立起“层流”运行的概念，避免紊流运

行。这是实现高效率、低成本、高质量运行的现代技术观念，也是有效地解决钢铁制造流程中非稳定性现象的重要措施之一。

当工序间的平面布置和运输方式一定时，钢铁产品的运输能耗主要取决于物质流在工序间运行的时间节奏，而这与流程网络中工序间的连结方式密切相关。串联连结方式下，工序之间匹配关系明确，物质流运行的运输时间、等待时间都较短。串—并联连结方式下，如果工序之间形成一一对应的匹配关系，则和串联连结方式相比，物质流运行的运输时间、等待时间相差不大，运输能耗基本不变；如果工序之间是多对多的紊流匹配关系，则和串联连结方式相比，物质流运行的运输时间、等待时间将大幅增加，运输能耗也随之增加。

钢铁制造流程中“能量流网络”是由“节点”和“连结器”等单元构建而成的；是“能量-空间-时间-信息”构成的动态运行系统。在钢厂内部有一次能源（主要是外购的煤炭）和二次能源（如焦炭、氧气、各类煤气、余热、余动能等）。这就分别形成了能量流网络的始端节点（如原料场、高炉、焦炉、转炉等），这些能源介质沿着输送路线、管道等连结途径——连结器，到达能源转换的终端节点（如各终端用户及热电站、蒸汽站、发电站等）。当然，在能量的输送、转换过程中，必然需要有必要的、有效的中间缓冲器（缓冲系统）——例如煤气柜、锅炉、管道等，以满足始端节点与终端节点之间在能量、时间等方面的稳定与协调要求。由此，不难看出钢厂内部可以构建起能源始端节点——连结器——中间缓冲系统——连结器——能源终端节点所构成的“能量流网络”（“能源转换网络”），并且实现某种程度的“闭环”。例如钢厂只买煤、不买电、不用燃料油。再深入看，由于能量回收、转换技术在不断进步，对余能、余热的可回收、可转换利用的范围不断扩大，则相应的始端“节点”/终端“节点”也不断扩大，相应的“连结器”也随之增加。这样就会构成不同层次的“能量流网络”。例如：钢厂回收的余热介质是500~600℃，可以构成该水平的“能量流网络”；如果回收余热介质是300℃，则扩展成另一层次的“能量流网络”。可见，钢厂的“能量流网络”是分层次的，在实施过程中应分层次推进。

在钢铁企业内的物质流往往要求物质流网络是一种最小有向树的结构，而其能量流网络则要求最好有“初级回路”的结构，所以出现这些要求，都是源于物质流、能量流消耗最小化的要求和效率最大化的要求。

第六章 重点关注的新技术

6.1 SCOPE21 炼焦技术

6.1.1 技术介绍

传统的水平室式机焦炉炼焦技术历经了一个多世纪,焦炉结构作了多次重大变革,其热工性能和环保等方面都达到了一定水平。但由于其采用的是正压生产工艺,在煤种、污染物等方面有着不可避免的致命弱点,即使配备高效的污染控制装置,也难以适应愈来愈严格的环保条例。为此,日本开发了 SCOPE21 新一代炼焦技术。

SCOPE21 是 Super Coke Oven for Productivity and Environment Enhancement toward the 21st Century 的缩写,即面向 21 世纪高效与环保型超级焦炉。该技术以有效利用煤炭资源、提高生产率、实现环保-节能为目的,是具有革新意义的新型工艺。实际上,SCOPE21 炼焦技术就是将当今世界炼焦行业的各种先进技术措施如流化床煤干燥、快速加热煤预热、DAPS(煤水分降至 2%,预先压块技术)、型煤、高密度硅砖、低 NO_x 排放、干熄焦、密闭推焦、管道密闭装煤、焦炭焖炉改性等集成优化在一个炼焦系统上,以取得最佳节能减排效果。SCOPE21 经历了三个研发阶段。第一阶段实验室阶段,第二阶段是中试阶段,第三阶段是生产阶段。

SCOPE21 工艺研究的主要课题包括:

① *提高生产率的技术*。为大幅度提高生产率,利用装入煤炭的高温预热、炭化室壁的高热传导、薄壁化及均匀加热,使之在比通常干馏煤温度(1000℃)低的温度下出炉(如果干馏温度不足可以采用干熄焦设备进行再加热,以确保焦炭质量),从而大幅度缩短干馏时间。煤炭预热工作温度为 350~400℃,焦炉炭化室温度为 800℃,干熄焦二次加热温度为 1000℃。通过这种加热方法,与传统工艺相比,SCOPE21 工艺能将生产率提高到 3 倍。

② *煤炭资源有效利用技术*。将现行焦炭原料中的弱黏煤比例从 20%提高到 50%时,利用煤的快速加热技术提高其黏结性,并利用微粉煤的成形技术来提高装入煤的体积密度。

③ *节能技术*。装入煤经高温预热,提高了干馏的开始温度,经中低温干馏,降低了出窑焦炭的温度,减少了间接加热的干馏炉的热量消耗。另外,用回收发生气体和燃烧排气的显热来节约能源,与传统的相比节能 20%。

④ *改善环境的技术*。采用管道装煤方式,通过气流输送热煤,用调整焦炉的

炉内压力和出窑时的密闭集尘等措施来防止焦炉的气体泄漏，并彻底防止了伴随焦炭生产的烟尘、臭气等。另外，用改善焦炉的燃烧形式来实现低 NO_x、SO_x 燃烧。

SCOPE21 由煤预处理、干馏、出炉和焦炭改性等三个基本工序组成。首先将煤炭进行干燥、分级后，分别将粗粒煤和煤粉快速加热至 330~380℃，将煤粉用热成形机成形，并与粗粒煤混合。接着将经高温加热的煤炭装入具有高热传导率的薄壁焦炉的炭化室内以中低温均匀干馏，最后将出炉的焦炭在 CDQ（干熄焦）中再加热至通常干馏温度水平（约 1000℃）来确保焦炭的质量。

6.1.2 技术试验示范效果

2006 年 4 月，新日铁公司大分厂采用 SCOPE21 技术开工建设 5 号焦炉，焦炭产量约 100 万 t/a。经过 35 个月的施工，5 号焦炉于 2008 年 5 月建成投产，工程总投资约 370 亿日圆。新日铁公司大分厂 5 号焦炉是世界首台应用 SCOPE21 炼焦技术的设备。

新日铁大分厂 5 号焦炉主要设备及处理能力见表 6.1.1，流程示意图见图 6.1.1。

表 6.1.1 新日铁大分厂 5 号焦炉主要设备参数

主要设备		参 数
煤炭预处理设备	基本工艺	SCOPE21 工艺
	流化床干燥分级机	煤炭处理量：155t（干）/h
	气流塔加热机	煤炭处理量：106t（干）/h
	块成形机	煤炭处理量：34t/h
焦炉	型式	SCOPE21 型低 NO _x 排放炉
	炭化室	64 孔、炉高 6.7m、宽 0.45m、长 16.6m
CDQ	焦炭处理设备	120t/h

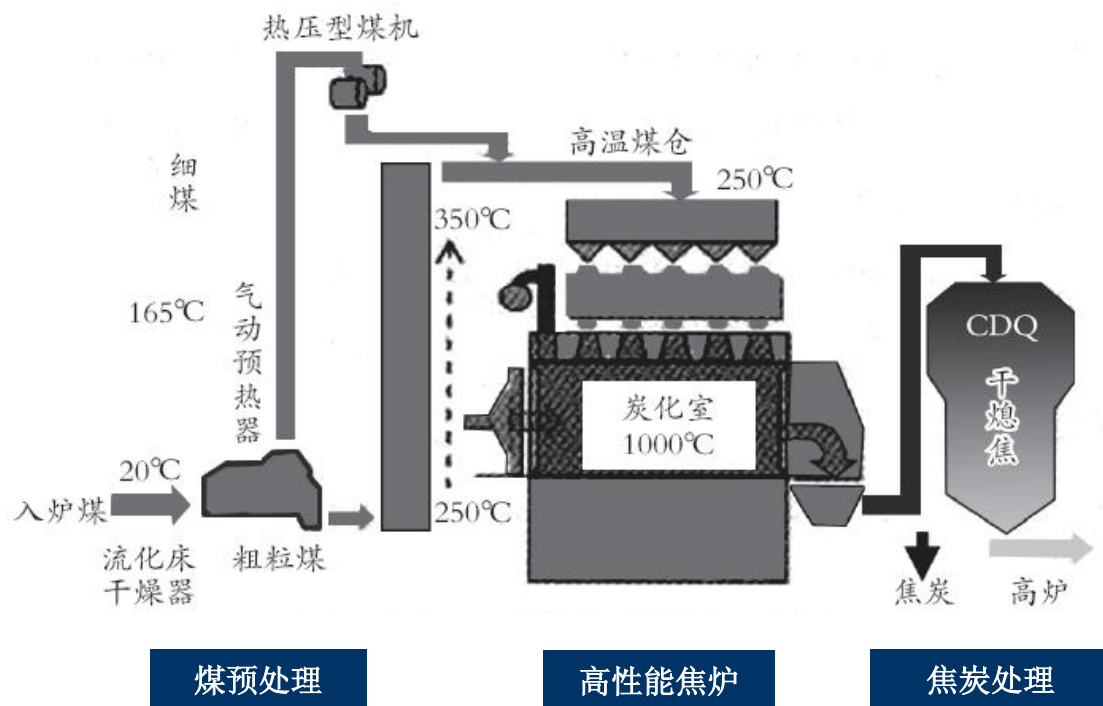


图 6.1.1 新日铁大分厂 5 号炼焦系统流程示意图

新日铁公司大分厂采用 SCOPE21 技术的 5 号焦炉 2009 年 1 月操作率达到 184.5%。通过对煤快速预热和对粉煤进行压块提高堆密度，不黏煤或弱黏煤的配比达到 50%以上，生产的焦炭质量较高，焦炭强度与传统焦炉相比可提高 2.5%。

通过归纳整理，对现行传统焦炉、SCOPE21 可行性研究工业装置及大分厂 5 号 SCOPE21 焦炉进行了对比，见表 6.1.2。

表 6.1.2 传统焦炉、SCOPE21 可研装置及大分厂 5 号 SCOPE21 焦炉的对比

项目		传统焦炉	SCOPE21 可研装置	大分厂 SCOPE21 焦炉	
装煤	水分，%	9	0	0	
	温度，℃	25	330	250	
焦炉操作	火道温度，℃	1250	1250	1250	
	结焦时间，h	17.5	7.4	13.0	
	焦饼温度，℃	1000	750~850	1000	
	效率比，倍	1	2.36	1.35	
焦炉参数	尺寸，m	7.5×16×0.45	7.5×16×0.45	6.7×15.8/16.6×0.45	
	墙厚，mm	100	70	—	
	炉孔数，孔	126	53	64	94
	焦炭产能，万 t/a	146	146	100	146

根据表 6.1.2 数据可知, SCOPE21 炼焦技术工业化(大分厂 5 号焦炉)的实际操作数据与 SCOPE21 可行性研究对工业装置预测效果的不同点是:

- ◆ 热压型煤温度由 350~400℃降低至 165℃;
- ◆ 原料煤入炉温度由 350~400℃降低至 250℃;
- ◆ 焦饼温度由 750~850℃提高至 1000℃, 与现行传统焦炉相同;
- ◆ 结焦时间由 7.4h 延长至 13h;
- ◆ 当焦炭产能为 146 万 t/a 时, 所需炭化室孔数由 53 孔增加至 94 孔;
- ◆ 与现行传统焦炉相比, 劳动效率由 2.36 倍降低至 1.35 倍。
- ◆ 弱黏煤配比平均为 54%, 达到了当初的计划目标。

目前, 大分厂 SCOPE21 焦炉运转平稳, 新日铁公司在对大分厂 SCOPE21 焦炉实际运转评价的基础上, 决定在名古屋厂建造 SCOPE21 焦炉 2 号机, 计划于 2013 年投入使用。

6.1.3 成本效益分析

SCOPE21 是日本经济产业省管理的国家项目, 研发该技术的目的是缩短炼焦时间、提高焦炭质量、扩大弱黏煤的应用、节约能源等。

日前, 世界上仅有新日铁公司大分厂 5 号焦炉采用 SCOPE21 技术。该焦炉的焦炭产量约 100 万 t/a。工程总投资约 370 亿日圆, 按 2011 年 1 月初的汇率 100 日圆换 7.9 元人民币, 折合人民币 29 亿元, 相当于吨焦投资 2900 元人民币。我国 7m 焦炉+干熄焦+煤调湿的焦化厂吨焦投资约 900~1000 元人民币。

与现行工艺相比, SCOPE21 技术的煤预热设备费用和环保费用等有所增加。煤预热消耗的电力和燃气等公共费用增加, 但是由于可以多配入弱黏煤, 从而降低了原料成本。

6.1.4 技术应用前景分析

SCOPE21 生产工艺的特点是在焦炉装料前对炼焦原料煤进行快速加热预处理来提高焦炭质量, 同时可大幅度缩短炼焦时间(干馏时间), 还可以提高弱黏煤的配加比例, 实现节能减排, 由此作为目前焦炉的替代工艺而引人注目。

从大分厂 5 号焦炉实际操作的情况看, 与依据 SCOPE21 单孔试验装置编制的可行性研究工业装置的预期效果有一定差距。因此, 该技术还有许多需要改进和完善的地方。

与此同时, 世界钢铁需求增加, 炼焦煤供应趋于紧张, 急需扩大利用储量丰富的弱黏煤, 而且全球节能环保要求日益严格。所以, 日本将 SCOPE21 技术定位于应对焦炉更新、有效利用煤炭资源、提高生产率、实现节能减排、开发各工艺功效最大化的革新技术。

SCOPE21 技术属于高度集成创新的前沿性技术，技术难度大，设备要求高，难以迅速普及，适用于新建焦炉系统，不适宜对现有焦炉的改造优化。

6.1.5 技术知识产权情况

SCOPE21 炼焦技术是日本煤利用综合中心与日本铁钢联盟合作投入 110 亿日圆，从 1994 年到 2008 年，历时 14 年共同开发的，以应对焦煤供应不足和环境污染问题。为此，在日本铁钢联盟设置由专家和学者组成的炼焦开发委员会，由 5 家钢铁公司（神户制钢公司、新日铁公司、JFE 钢铁公司、住友金属工业公司和日新制铁公司）和 5 家独立焦化厂（关西热化学、新日铁化学、住友金属小仓、北海制铁和三菱化学）参与研发。

6.2 焦炉处理废塑料技术

6.2.1 技术介绍

废塑料作为城市垃圾逐年增加，传统处理技术主要是填埋和焚烧。塑料具有耐腐蚀性、耐老化性，可长时间存在于自然界中很难降解，填埋处理时长期难以腐烂，占用大量土地资源；并影响通透性和渗水性，破坏土质，影响植物生长。废塑料焚烧易产生二噁英、氯化氢和重金属等剧毒物质，引起二次污染。因此，废塑料的终端去向应是资源化回收利用。

废塑料是高分子有机化合物，其主要由 C、H 两种元素构成。在高温状态下会发生热裂解反应，其产物由焦炭、焦油和煤气三部分组成。

焦炉处理废塑料的基本原理是将分选和加工过的废塑料以一定比例与煤混合后，置于传统炼焦炉中进行高温干馏，使废塑料转化为焦炭、焦油及煤气。

焦炉处理废塑料是在利用钢铁厂的焦炉高效率热分解废塑料的同时，以现成的焦油回收装置和煤气净化与回收装置对所产生的油份和气体进行精制处理，从而使废塑料作为化学原料获得再循环使用，故被认为是有效的再资源化技术。

焦炉处理废塑料主要步骤包括：①从垃圾中分选出废塑料，压成形后运往废塑料加工厂；②在加工厂内，去除废塑料中的金属、PVC 等，并进行破碎及造粒处理，运往焦化厂；③加工后的粒状废塑料在焦化厂按一定比例与煤混合，然后进入焦炉炼焦，废塑料在焦炉内进行高温干馏。其流程见图 6.2.1。

废塑料收集 → 废塑料加工 → 废塑料与煤共焦化 → 共焦化产物回收

图 6.2.1 焦炉处理废塑料流程

城市废塑料具有各种各样的形状，如袋状、膜状、块状及粉状等，所以需要

对收集来的废塑料进行预处理，改变其形状和尺寸，使之符合炼焦炉的要求。废塑料预处理是焦炉处理废塑料的一道重要工序。新日铁废塑料预处理流程如图6.2.2。废塑料预处理的主要过程是先用磁选机除去金属，然后进行第一次粗破碎，再用选别机除去PVC，然后进行第二次细破碎，使其尺寸达到10mm以下，为了提高其与煤一起加入焦炉时的操作性，在120℃下对塑料进行减容球化处理，使其变成直径约25mm的球团。下图为新日铁废塑料预处理流程。

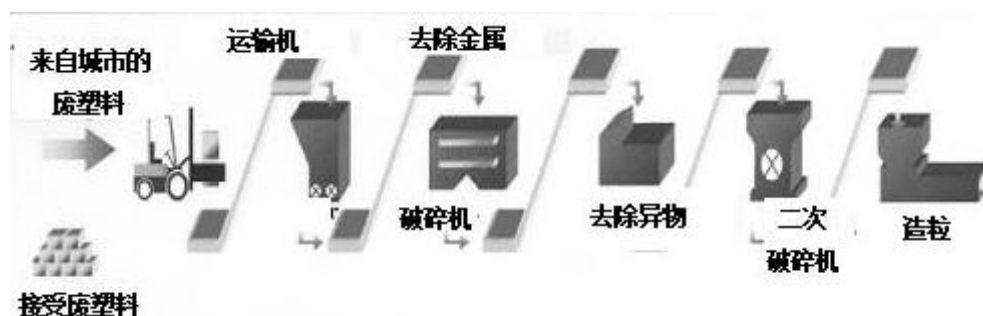


图 6.2.2 新日铁废塑料预处理流程

6.2.2 技术试验示范效果

日本新日铁公司在废塑料油化的基础上，于2000年成功开发了在炼焦煤中掺入1%废塑料的炼焦技术，率先在世界上实现了工业化。通过焦炉中的干馏，废塑料变为焦炭的占20%，变为焦炉煤气和化工副产品的各占40%，总的能量利用率达94%。同时含氯废塑料的比例可放宽到5%，焦炉处理废塑料技术很快在新日铁公司君津厂、名古屋厂、八幡厂、室兰厂、大分厂得到推广应用。

目前，新日铁公司废塑料年处理设计能力总计25万t，分别为：君津厂7.5万t、名古屋厂、八幡厂和大分厂各5万t及室兰厂2.5万t，2009年度新日铁公司共处理废塑料16万t。新日铁焦炉处理废塑料的水平没有达到设计能力。

6.2.3 成本效益分析

目前，世界各国都面临废塑料“白色污染”问题。现有废塑料处理技术，包括填埋、焚烧、炼油、高炉喷吹等，大多因为技术、经济、环境等原因，难以满足实际需要。焦炉处理废塑料从工艺上不需要改动传统炼焦工艺，只需将废塑料收集、粉碎等加工处理后与炼焦配煤混合即可入炉炼焦。因此，该技术具有工艺简单，投资较小，建设期短，无需对传统焦化工艺进行改造即可投入生产应用的特点。

焦炉处理废塑料最突出的效益就是社会效益和环保效益。目前新日铁公司炼焦炉在工业化处理废塑料时，在炼焦煤中掺入1%的废塑料。2010年，我国焦炭产量3.8757亿t，约消耗煤5.19亿t，如果按1%的比例将废塑料添加到炼焦煤中，

那么可以处理废塑料约519万t。

6.2.4 技术应用前景分析

该技术从工艺上不需要改动传统炼焦工艺，只需将废塑料收集、粉碎等加工处理后与炼焦配煤混合即可入炉炼焦，因此具有以下优点：

（1）废塑料处理规模较大，初步估算结果表明：我国现有炼焦炉每年可以处理519万t废塑料。

（2）工艺简单，投资较小，建设期短。无需对传统焦化工艺进行改造即可投入生产应用。

（3）无需增加化产回收、气体净化与回收和废塑料入炉与焦炭出炉等设备，大大降低了传统废塑料油化工艺的初期投资和运行费用。

（4）利用废旧塑料代替部分炼焦用煤，既有效解决“白色污染”问题，又节约了炼焦煤资源，具有明显的社会效益和环保效益。

（5）不影响焦炭质量的前提下，增加炼焦工艺的焦油产率和高热值煤气，有利于废塑料的100%资源化利用，并产生较好的经济效益。

（6）废塑料处理过程实行全密封操作，而且废塑料不直接焚烧，从原理上防止了二噁英类剧毒物质的产生，实现废塑料处理的彻底无害化。

焦炉处理废塑料技术是新近发展起来的可以大规模处理废塑料的工业实用型技术。该技术基于现有炼焦炉的高温干馏技术，将废塑料转化为焦炭、焦油和煤气，实现废塑料的100%资源化利用和无害化处理。该工艺对废塑料原料要求相对较低，废塑料的颗粒范围可以在5~80mm之间；废塑料加工要求相对较低，只需对废塑料进行破碎、热缩体和成型处理即可与煤混合入炉炼焦；加工后的废塑料与煤混合技术相对简单，可以依靠输煤皮带进行定量和连续均匀混合；对炼焦炉和炼焦化产回收及煤气净化回收系统无需作任何改动即可完成废塑料干馏及产物回收净化全过程。

此外，该技术可以做到允许含氯的废塑料进入焦炉，含氯废塑料在干馏过程中产生的氯化氢可以在上升管喷氨冷却过程中被氨水中和，形成氯化铵进入氨水，从而有效避免氯化物造成的二次污染和对设备及管道的腐蚀。由于该技术具有投资少、无新增环境问题、社会效益显著等优点，因此易于推广应用。

废塑料预处理技术的不完善是限制该技术推广的主要瓶颈。因此，需要寻找适合不同废塑料的添加模式，以保证在不影响焦炭质量及不造成焦炉破坏的情况下，尽可能增加废塑料的添加比例，实现废塑料的资源化利用和无害化处理。

6.2.5 技术知识产权情况

日本新日铁公司是第一家实现焦炉处理废塑料技术工业化的企业。在焦炉处

理废塑料领域处于世界领先水平，公司申请了大量专利，至少在30项以上。该公司不仅在日本本土申请了相关专利，还在中国、美国及欧洲等地申请了专利。

我国首钢总公司在焦炉处理废塑料技术领域申请了6项专利，莱芜钢铁股份有限公司及武汉钢铁公司各申请了一项相关专利。表6.2.1列出部分相关专利。

表 6.2.1 焦炉处理废塑料技术专利

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	废塑料与煤共焦化处理设备	CN2568662	首钢总公司	2002.07.04
2	利用废塑料提高冶金焦炭强度的系统	CN2587866	首钢总公司	2002.11.20
3	一种提高焦炭强度的废塑料加工方法及设备系统	CN1580189	首钢总公司	2003.08.01
4	一种利用废塑料进行配煤炼焦的方法	CN101255342	莱芜钢铁股份有限公司	2008.03.24
5	利用废塑料提高冶金焦炭强度的方法及系统	CN1502675	首钢总公司	2002.11.20
6	废塑料与煤共焦化处理方法	CN1465656	首钢总公司	2002.07.04
7	废塑料的再利用方法和成型方法	CN1871327	日本新日铁公司	2004.10.20
8	基于焦炉炼焦的废塑料预处理工艺	CN101831313A	武汉钢铁公司	2010.04.30
9	废塑料成型方法和废塑料热分解方法	CN101426628	日本新日铁公司	2009.05.06
10	废塑料的再利用方法和成型方法	CN101805627 A	日本新日铁公司	2004.10.20

6.3 烧结烟气选择性脱硫技术

6.3.1 技术介绍

由于在烧结机各风箱内，烟气中 SO_2 浓度各不相同，差异很大。烧结烟气选择性脱硫技术是根据烧结机头与机尾处 SO_2 浓度低、中间部分 SO_2 浓度高的特点，将由风箱抽出的烟气分成 2 条烟道，分别进入 2 台电除尘器和 2 台主抽风机，其中一条烟道为 SO_2 浓度低的非脱硫系统烟道，经过主抽风机后直接排入烟囱；另一条烟道为 SO_2 浓度高的脱硫系统烟道，并在该烟道主抽风机后安装脱硫装置，烟气经脱硫后再由烟囱排放。

6.3.2 技术试验示范效果

选择性脱硫技术的关键之处在于脱硫系统烟道与非脱硫系统烟道之间的烟气分配。国内大型烧结机大都采用双烟道，但是设计初衷是为了同时使用两个中型风机进行抽风，若采用单烟道则需要大型风机。

根据许多企业的实测和脱硫装置实际运行经验，可以对双烟道的局部进行改造，将每个风箱与两条烟道都通过支管连通，并在每个风箱底部总管段安装阀门来控制烟气流向，并对每个风箱安装烟气成分实时监测设备，随时根据每个风箱的 SO_2 浓度，动态调整风箱烟气流向，真正实现脱硫系统烟道 SO_2 浓度高而被脱除，非脱硫系统烟道 SO_2 浓度低直接排放，达到选择性脱硫的目的。

为实现选择性脱硫的目的，可以把常规设计的一条烟道分成直径不同的 3 段，头、尾不需脱硫的烟道汇集成 1 条，中间脱硫段独立 1 条烟道。2 条烟道各自对应配置了大小不同的 2 台（套）电除尘器和主抽风机（2 套除尘器的总除尘面积、主抽风机电机总功率和常规 1 条烟道的烧结机是一样的）。为适应脱硫需要，在脱硫烟道尾部增设温度自动补偿装置，稳定脱硫烟气的温度。

对于烧结烟气流量大、 SO_2 浓度低及机头与机尾烟气 SO_2 浓度低、中间高特点，中南大学提出了综合方案如下图所示。烧结机点火器之后的约三分之一风箱烟气含 SO_2 较低，温度高，可以不进行烟气脱硫，将这部分烟气回用于烧结，实现热风烧结，可提高烧结矿质量，降低固体能耗，降低投资和运行费约三分之一，提高经济效益。

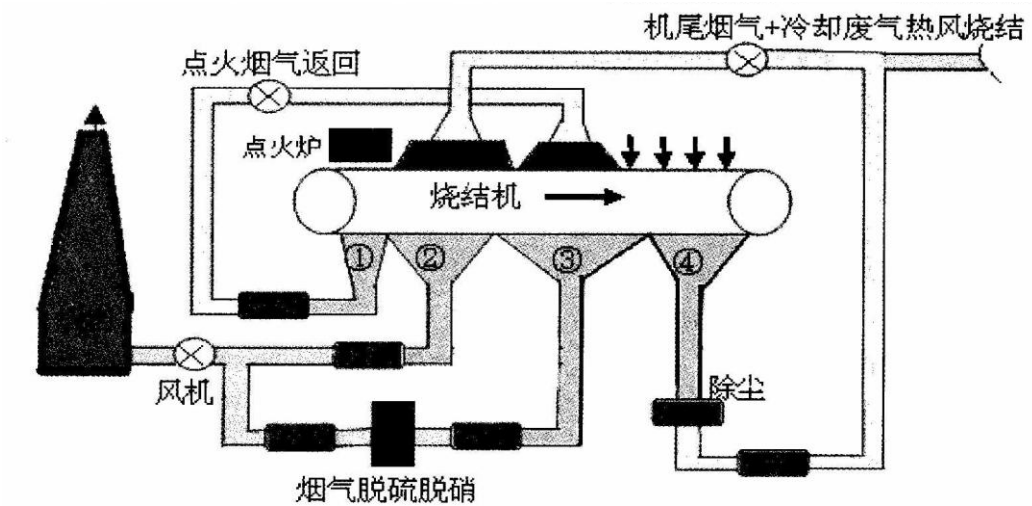


图 6.3.1 选择性脱硫技术工艺流程

选择性脱硫技术可以大幅减少脱硫装置需要处理的烟气量，仅需要处理 60% 左右的烟气就可以达到脱硫目的，可有效节省投资和运行费用。

6.3.3 成本效益分析

本技术一般和其他脱硫技术配合使用，投资较低，运行成本低。如福建三明钢铁公司采用选择性脱硫技术配合流化床脱硫方法，取得了很好的效果。

三钢根据各风箱 SO_2 排放浓度的特点，考虑仅将排放浓度较高的 5 号~13 号风箱中烟气引出脱硫，脱硫效率设定为 90%，脱硫后 SO_2 排放浓度为 450mg/m^3 。而排放浓度较低的 1 号~4 号、14 号及 15 号风箱烟气不经脱硫，只经单独电除尘净化后排入大气， SO_2 浓度为 346mg/m^3 。在投资和运行费用方面，全烟气脱硫比选择性脱硫投资要高出 185 万元，运行费用（包括前端主抽引风机及电除尘系统）则高出 679 万元。

表 6.3.1 两种烟气脱硫工艺方案比较

比较项目		全烟气脱硫	选择性烟气脱硫
投资费用合计（万元）		3230	3045
土建费	料仓、水泵等公用设备基础	40	40
	主抽风机、加压风机基础	40	15×2+20
	脱硫塔、旋风分离等设备基础	100	80
	电除尘、布袋除尘等设备基础	50+70	40×2+50
设备费	料仓、水泵等公用设备	70	70
	脱硫塔、旋风分离等设备	900	700
	烟道系统	200	250
	电除尘、布袋除尘	300+600	200×2+400
	主抽风机、加压风机	110+300	200×2+75
其他费用	烟气监测、电气及自动化控制	450	450
运行费用合计（万元/年）		2680	2001
电费	主抽风机电耗（kW h）	4200	3000
	加压风机电耗（kW h）	800	450
	机头电除尘电耗（kW h）	250	300
石灰费用	石灰用量（t/年）	15120	14800
	费用（万元）	302	296
人工费	5 人（万元/年）	18	18

6.3.4 技术应用前景分析

目前我国使用选择性脱硫技术有首钢、鞍钢、攀钢、石钢和昆明三明钢铁等多家企业，预计“十二五”推广率将达到 40%。

6.3.5 技术知识产权情况

烧结烟气选择性脱硫技术共检索到一个专利：

序号	申请号	专利名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	CN200820146133.X	烧结机头烟气选择性脱硫装置	CN201302374	福建三钢闽光股份有限公司	2008-11-04

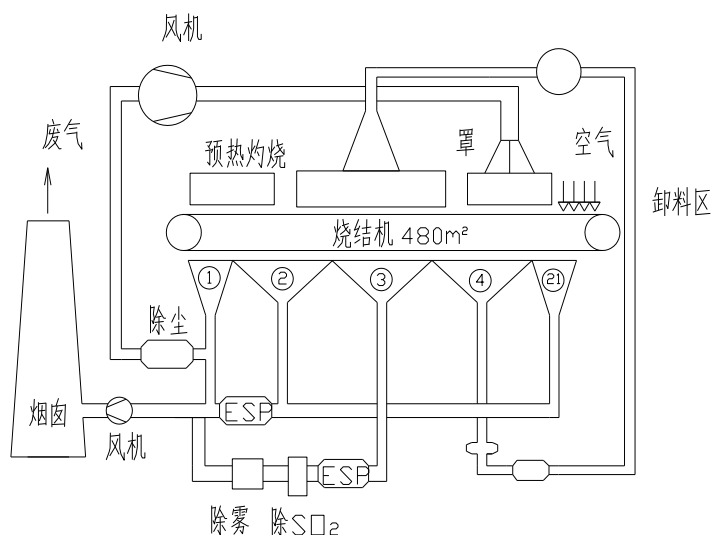
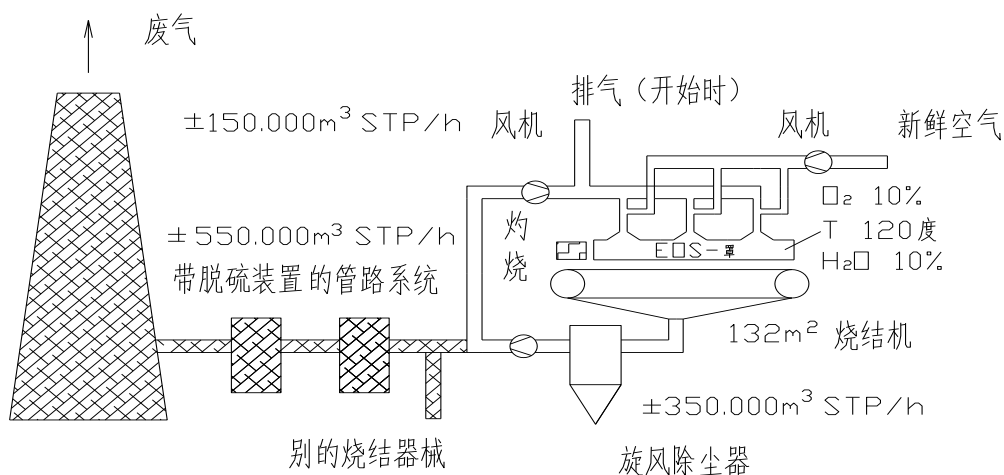
6.4 烧结烟气循环富集脱硫技术

6.4.1 技术介绍

循环富集脱硫的技术思想是从烧结机烟道中取一部分烟气返回到烧结机上部的密封罩内进行循环，同时补充烧结机燃烧所需要的氧气，剩余部分烟气经脱硫处理后排放。由于将烧结过程中的烧结烟气部分返回烧结机的密封台车上，以减少烧结过程中产生的烟气外排量，从而减少外排的烟气总量，同时对烧结过程中产生的 SO_2 起到富集作用，可提高脱硫效率，减少脱硫装置的烟气处理量。

1、烧结机头废气循环使用

机头废气循环使用技术有两种方法，一种方法是将机头废气量的 40~45% 循环利用至整个烧结机，可达到降低燃料消耗及减少废气排放量；另一种方法是废气分段再循环（见下图）。



图中①，烧结料预热区废气回用至烧结机中部；②，点火区和烧结机末端区的废气经除尘处理后排放；③，焙烧区废气经除尘脱硫后排放；④，烧结机后部废气回用至点火区后。

适用范围：现有和新建烧结机。

2、Eposint 技术

Eposint 技术是由西门子奥钢联与奥钢联钢铁公司联合开发。此工艺可以使烧结废气返回烧结机进行循环，即典型的烧结废气中含有约 12~13% 剩余氧，在加入少量空气补充后重新返回到烧结工艺中。Eposint 工艺可以减少 SO_x 、 NO_x 绝对排放量并可以降低废气中的二噁英和汞浓度，同时也可减少焦炭的单位消耗量。其关键难点是如何有效控制氧气的加入量，保证系统的安全性与可靠性，达到最好的烧结效果。

Eposint 不同于其他从总废气流中分出一部分返回烧结工艺的烧结废气循环工艺，其特点是根据各个风箱的流量和污染物排放浓度，用于循环目的的气流仅来自位于废气温度升高区域的风箱。在奥钢联钢铁公司，这一区域大致位于新加长烧结机的 3/4 长度处，即 11~16 号风箱处。第二台鼓风机（废气循环风机）与原有的工艺风机并列安装，以保证烧结工艺获得必要的吸气压力。循环风机的作用是从废气升温的风箱中排出废气并将其送回到烧结机中。下图为奥钢联钢铁公司的 Eposint 工艺示意图。

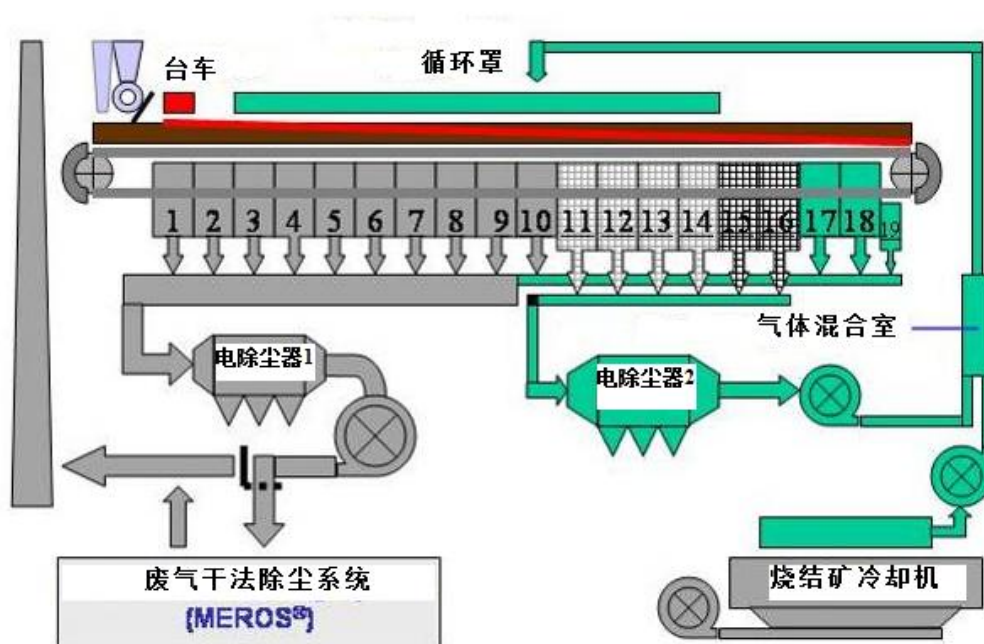


图 6.4.3 奥钢联钢铁公司 Eposint 选择性废气循环工艺示意图

奥钢联向循环废气中加入了来自冷却机的热空气，保证了富氧水平。另外，冷却机被部分覆盖，以减少向环境的颗粒物排放。这种方案能有效利用冷却机的热空气来达到富氧目的，而且也有利于降低烧结用焦炭以及点火气体的消耗。

经过气体混合室后，废气流向烧结机上方的循环罩。Eposint 工艺有一个独特之处，即烟罩并不完全覆盖烧结机，而是只到台车旁边，利用非接触型窄缝迷宫式密封来防止循环废气和灰尘从罩内逸出。负压避免了 CO 气体的逸散，具有高度的安全性。采用这一方案，仅有很少量的二次空气被吸入系统。此外，台车轮也不会像在其他循环系统中那样暴露于灰尘中，避免了活动部件的严重磨损。除了控制系统压力以防止废气和灰尘逸出，还将烟罩和工艺风机之间安装的支管连接到 CO 报警系统。这样，如果由于压力控制系统失灵或者其他任何原因而造成烟罩内的压差接近于零，支管就会被打开，直接将气体吸入主烟道，从而避免含有 CO 的气体散入周围环境。另外，由于循环气体烟罩并不延伸到烧结机末端，

可以在最后几个风箱的部位让新鲜空气流过烧结床，从而更有效地冷却上层的烧结矿。敞开台车为维修工作带来了便利。

Eposint 工艺不同于非选择性抽气的传统废气循环工艺，Eposint 工艺从烟囱排放的 SO₂ 很少，大部分硫都集中在烧结矿中，随后从烧结机中排出。硫（在废气和烧结矿中）的分配主要取决于烧结矿的碱度以及燃料的数量和质量。

烧结机废气温度升高的区域随烧结原料配比和其他工艺条件的变化而改变。因此，为了保证废气循环效果，优化烧透曲线以及废气流中灰尘和污染物的浓度指标，各个风箱的废气流均可以单独排出，根据需要导入烟囱或返回烧结机进行循环。这个特点确保理想地应对工艺条件波动，是 Eposint 工艺具有高度灵活性的决定性因素。

6.4.2 技术试验示范效果

烧结机头废气循环使用技术适用于新旧烧结机。机头废气循环使用技术可使废气量减排约 28%，SO₂ 减排约 63%，还可能削减部分 NO_x。同时烧结烟气脱硫系统的规模可以缩减，从而减少一次投资及运行成本，但运行管理水平相应提高。

循环富集脱硫 Eposint 技术更适用于新建烧结机。这种技术对于老厂可能会受到厂房、场地等条件的限制。烧结机废气温度升高的区域随烧结原料配比和其他工艺条件的变化而改变。因此，为了保证废气循环效果，优化烧透曲线以及废气流中灰尘和污染物的浓度指标，各个风箱的废气流均可以单独排出，根据需要导入烟囱或返回烧结机进行循环。

Eposint 技术可以大幅度减少废气产生量，节约废气净化投资和运行成本，充分利用废热，增加 CO 二次燃烧和降低燃料消耗。

Eposint 系统在奥钢联林茨厂投产前后的主要生产指标见表 6.4.1，烧结矿燃料消耗降低了 2~5kg/t。

表 6.4.1 Eposint 系统投产前后烧结产量和排放指标的对比

	投产前	投产后
焦粉消耗量 (kg/t 烧结矿)	45	40~43
点火气体消耗量 (MJ/t 烧结矿)	50	40
灰尘浓度 (mg/Nm ³ /g/t 烧结矿)	46//104	38//66
SO ₂ 浓度 (mg/Nm ³ /g/t 烧结矿)	420//952	390//677
NO _x 浓度 (mg/Nm ³ /g/t 烧结矿)	240//544	240 // 416
HF 浓度 (mg/Nm ³ /g/t 烧结矿)	1.0//2.3	0.6 // 1.0

Eposint 工艺于 2005 年 3 月在奥钢联钢铁公司林茨第 5 烧结厂投入应用，同

时该厂还加大了烧结机长度以提高烧结产量。Eposint 投产后的排放结果如下：

Eposint 工艺从烟囱排放的 SO₂ 浓度与没有 Eposint 工艺时相同，但每吨烧结矿的 SO₂ 排放量却减少了近 30%。烟囱排放中二噁英/呋喃浓度明显下降，每吨烧结矿的 NO_x 单位排放量明显减少。

6.4.3 技术应用前景分析

欧洲克鲁斯 3 号烧结机采用了 Eposint 这一技术，总的废气循环量为 50%，颗粒物和 NO_x 减排 45%，PCDD/Fs 减排 60%~70%，估计固体燃料消耗降低 10%~15%。采用这类技术不仅仅只是污染物的减排，而且还能节能、降低烧结生产成本；由于总废气量的减少，也降低了后序烟气脱硫装置的投资和运行成本，同时又提高了脱硫效率，有着广阔的发展前景。

6.4.4 技术知识产权情况

烧结烟气循环富集脱硫国内共检索到一个专利：

序号	申请号	专利名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	CN200710034252.6	一种烧结烟气循环富集脱硫的方法及装置	CN101024143	中冶长天国际工程有限责任公司	2007-01-12

6.5 烧结、电炉炼钢中二噁英类物质的减排技术

6.5.1 技术介绍

二噁英（Dioxin）是一类多氯代含氧三环芳烃类化合物的统称，属于持续有机污染物（POPs）。一般指多氯二苯并-对-二噁英（Polychlorinated dibenzo-P-dioxins，简称 PCDDs）和多氯代二苯并呋喃（Polychlorinated dibenzofurans，简称 PCDFs），常用“PCDD/Fs”表示，包括 210 种异构体。

我国的环境标准把它们统称为二噁英类。它们是非常稳定的化合物，常温下为固体，极难溶于水，微溶于大部分的有机溶剂，具有高亲脂性，高熔点、高沸点，分解温度大于 700℃，难生物降解。是目前已经认识到的环境荷尔蒙中毒性最大的一种，最大危害是具有不可逆的“三致”毒性，即致畸、致癌、致突变。

钢铁冶炼过程中，烧结工序和电炉炼钢工序中二噁英类的产生比较显著。目前中国对钢铁行业二噁英类未进行环境监测，尚不掌握确切污染状况，故研究钢铁行业中的二噁英类排放有重要意义。

1) 二噁英生成机理

有关二噁英的生成机理相当复杂,迄今为止国际研究成果还不足以完全说明问题,而且大量的机理研究工作现仍在进行中。初步研究表明,烧结过程、电炉炼钢中的PCDD/Fs主要通过以下途径生成。

a. 烧结过程中PCDD/Fs的生成途径主要为烧结床干燥煅烧带的“从头合成”。其碳源来自上部烟气中的有机蒸汽和碳烟粒,氯源来自一些氯化物(被加热后可生成气态HCl、Cl₂,和少量的气态金属氯化物);矿石中含有微量的铜(一般铁矿石小于 $10 \times 10^{-4}\%$ 、但也有某些矿大于 $50 \times 10^{-4}\%$),为PCDD/Fs的生成提供了催化条件。钢厂返回利用的除尘灰和氧化铁皮中同时存在催化物质和相对较高的氯化物,烧结烟尘及电炉烟尘中含有PCDD/Fs,返回用作烧结混合料对PCDD/Fs的生成都会有一定的影响(生成量可增加25%左右)。

b. 电炉炼钢中PCDD/Fs的生成途径比烧结更加复杂,从PCDD/Fs的生成机理分析,“前驱体合成”、“从头合成”、“热分解合成”三种方式都有:

“前驱体合成”与“热分解合成”:废钢在预热过程中,其油脂、油漆涂料、塑料等有机物因受热而先生成“前驱体”类物质(如各类含氯苯系物),然后通过一系列氯化反应、缩合反应、氧化反应等可以生成PCDD/Fs。

“从头合成”:废钢预热的热源为电炉一次烟气,温度在1000℃以上且含有大量CO可燃气体,引入空气即可燃烧(在汽化冷却烟道内);此时PCDD/Fs及其它有机物可以认为已经全部分解,在其后的烟气降温过程中又可以从头合成PCDD/Fs。电炉二次烟气中也含有PCDD/Fs,其浓度虽然远低于一次烟气(只有一次烟气的10%左右或更低),但由于二次烟气体积远大于一次烟气体积,故其总生成量也比较大,不容忽视。

2) 检测方法

与其他污染物相比,二噁英的检测要低几个数量级,为超痕量水平,需要特殊检测,其检测是现代有机分析的难点。目前二噁英类化学物质的检测方法比较多,但应用得比较广泛的主要是色谱法、免疫法、生物法,其他方法由于检测限或特异性等原因在实际中没有得到广泛应用。这三种方法相互补充,各有优缺点。其中免疫法和生物法适合对大量样本进行筛选和快速半定量测定,而色谱法则适用于需准确定量以及检测二噁英类化学物质的各个同系异构体的场合。选用何种检测方法,视检测目的及场合而定。

除了以上三种方法外,我国中科院武汉水生所发明了一种名为“快速生物筛选法”的检测方法,找到了一条检测二噁英的捷径。日本日立公司研制出一种新型分析装置,可在1min内测定出气体中二噁英的浓度。

我国二噁英检测实验室的建设同欧美、日本等工业发达国家相比,也存在一

定的差距。目前，只有中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所、中科院水生生物研究所、中科院环境生态所、北大二噁英研究实验中心以及深圳市疾病预防控制中心等几个检测研究实验室具有检测研究能力。

3) 控制措施与减排技术

对二噁英类污染的控制，一方面，是减少其产生量、排放量；另一核心问题是对产生的二噁英类物质进行降解或分解处理使其变为无害物质。

a. 烧结工序 PCDD/Fs 的减排

第一，减少 PCDD/Fs 的生成量

(1) 采用生石灰、轧钢氧化铁皮含油量控制在1%以下，避免使用无烟煤用作燃料，对烧结工艺进行优化（更好地控制烧结终点、改进烧结料层条件和渗透性等可使PCDD/Fs产生量降低85%左右），减少烧结原料带入氯及其前体化合物。

(2) 为了减少带入烧结的氯源，经处理后的碳钢冷轧酸性废水不宜作为浊循环的补充水回用于轧钢冲氧化铁皮，同时也不宜用作矿石料场洒水。这种为PCDD/Fs生成提供大量氯源的“废水零排放”技术应当摒弃。

(3) 铜对PCDD/Fs的生成有强催化作用，应优先使用含铜量更低的铁矿石。

(4) 韩国浦项向烧结料层喷入 NaHCO_3 明显降低PCDD/Fs产生量，可能是 NaHCO_3 与烧结产生的气态氯化物（如 HCl 、 Cl_2 ）反应生成 NaCl ，减少了有效氯源。

(5) 烧结料中加入合适的抑制剂（如氨水、尿素），可使PCDD/Fs生成量明显降低，其机理仍有待于进一步研究。

(6) 采用较高含硫量的燃料和铁矿石也可以使PCDD/Fs生成量明显减少。这种减排在垃圾焚烧行业已有报导，在烧结工序PCDD/Fs减排方面尚无报导。

第二，已生成 PCDD/Fs 的减排

(1) 高效过滤技术。200℃以下，PCDD/Fs 绝大部分都以固态形式吸附在微细的颗粒上。湿法除尘对 PCDD/Fs 的净化效率为 65%~85%，静电除尘器则要低一些，而袋式除尘器可达到 85%~90%或更高。因此，烧结机的 PCDD/Fs 减排应尽可能选用袋式除尘。国外已有不少成功业绩（美国有 9 家如美国钢铁公司、内陆钢铁公司、杰尼瓦公司、WCI 公司等均为袋式除尘），采用合适的滤料、布袋除尘器后 PCDD/Fs 排放浓度不到电除尘器的 10%。

(2) 物理吸附技术。利用PCDD/Fs可被多孔物质（如活性炭、焦炭、褐煤等）吸附的特性对其进行物理吸附（国外已广泛采用），一般有携流式、移动床和固定床3种形式。用褐煤作吸附剂，欧洲多家钢厂实测减排效果为70%；使用焦炭粉末作吸附剂和袋式除尘，PCDD/Fs排放量可减少98%、排放浓度可低至0.1 ng-TEQ/Nm³。喷入活性炭可能会比喷褐煤具有更好的减排效果。

(3) 催化分解技术。我国西北化工研究院开发的 $\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$ 催化剂氧化分解技术，在 $240\sim 320^\circ\text{C}$ 试验条件下PCDD/Fs去除率达95%~99%。日本明古屋国家工业研究所开发的 TiO_2 加紫外光催化分解技术，PCDD/Fs去除率可达98.6%，同时还能分解烟气中55%的 NO_x 。近几年国内外对 TiO_2 光催化剂进行了广泛的研究，该项技术正在不断完善。

(4) 戈尔Remedia催化过滤技术。由美国戈尔公司1998年发明，是一种“表面过滤”与“催化分解”相结合的“覆膜催化滤袋”技术，在垃圾焚烧、危险废物（包括医疗废物）焚烧及再生铝等行业已有大量应用，技术成熟。该方法移植到烧结烟气PCDD/Fs减排，技术上应是可行的，而且运行成本也会比较低。

(5) 烧结烟气脱硫脱硝技术。烧结烟气脱硫对PCDD/Fs具有明显的减排效果，主要是脱硫以后细颗粒烟尘排放浓度可以大幅度降低。烧结烟气脱硝对PCDD/Fs也具有明显的减排效果，可能是催化氧化对PCDD/Fs的降解作用。

(6) WETFINE技术。该技术由奥钢联开发，适用于铁矿石烧结、球团烧结、废物焚烧等污染源的PCDD/Fs减排。该系统对于烧结烟气PCDD/Fs的平均净化效率为93.1%、烟尘平均净化效率91.3%；若同时脱硫，平均脱硫效率在80%以上，同时还可以脱除67%的HF、95%的HCl和44%的有机物质。但该技术有酸性废水产生，需要进行中和沉淀处理，废水中的重金属离子也需要妥善净化处理。

(7) 其它技术。还有电子束分解技术、 H_2O_2 氧化技术、 α -辐射降解技术等。

烧结烟气中污染物种类繁多，单一的减排技术本身就是不合适的，如果能将各种污染物的减排技术与节能措施综合考虑的话，就会事半功倍，就能够以较少的投资换取更大的综合效益。繁多的污染物就应该采取综合性的减排技术。

(1) 烟气循环技术。将烧结烟气回用作助燃空气，经过烧结高温区焚烧以后，PCDD/Fs排放总量可以明显降低60%~70%，同时还可以减少 NO_x 及烟尘的排放量近45%。如EOS技术，又称优化排放烧结法，具有十分明显的综合减排节能效果。从烧结机头除尘器后抽取40%~45%的废气循环用作烧结助燃空气，不仅减少了脱硫废气的烟量、提高了脱硫效率， NO_x 、PCDD/Fs、PAH、PCB、CO、MP等都可以减少40%~45%，对 CO_2 也具有一定的减排效果。该技术于上世纪90年代初期在日本研发成功，美国、欧洲、荷兰等企业都有应用。还有Eposint技术又称分段废气循环或选择式废气循环，是对EOS法的进一步优化。从选定的风箱中抽取烟气用于再循环，可以灵活应对各种不同运行工况。这项技术也是上世纪90年代初期开发成功的，在日本、欧洲都有较多的成功实例。

(2) MEROS技术。西门子集团新开发的MEROS烧结烟气高效干法净化技术（不需要对烟气加热），集脱硫、脱HCl和HF于一身，并可以使VOC可冷凝部分几乎全部去除。排放废气中的烟尘浓度小于 $5\text{mg}/\text{m}^3$ ，重金属去除率95%以上，

PCDD/Fs去除率达98%（喷焦炭或活性炭），HC1和HF去除率在90%以上；喷消石灰脱硫效率为80%，喷NaHCO₃脱硫效率大于90%。马钢是欧洲以外第一家引进该技术的钢铁企业，也是国内第一家真正实施烧结PCDD/Fs综合减排技术的钢铁企业，于2010年投入运行。

（3）活性炭吸附技术，不仅可以去除PCDD/Fs，还可以同时去除烧结烟气中的SO₂、HC1、HF等多种污染物，喷入氨又可以去除NO_x，属末端综合性减排技术。该技术在日本已有大量应用，但投资大、运行成本也高。

在节约能源资源和保护生态环境形势十分严峻、完成节能降耗和污染减排任务非常艰巨的今天，PCDD/Fs的减排应与SO₂、NO_x、颗粒物等污染物的减排以及节能降耗一起统筹考虑。如果能将EOS或Eposint与烧结脱硫结合起来，将会取得十分明显的综合减排效果，与MEROS结合起来也将会取得明显的综合效益。

b. 电炉炼钢 PCDD/Fs 的减排

第一，减少 PCDD/Fs 的生成量

（1）对废钢进行预处理。对废钢进行分选，最大限度减少含有油脂、油漆、涂料、塑料等有机物废钢的入炉量，并对这类含有有机物的废钢另行加工处理，同时要严格限制进入电炉的氯源总量。

（2）分选出的含有机物废钢则不宜采取预热处理。这类废钢在电炉加料时应缓慢连续加入。

（3）对燃烧后的烟气应进行急冷、使其快速冷却至200℃以下，最大限度减少烟气在PCDD/Fs最适宜生成温度区间的停留时间可以减少“从头合成”。

（4）对于未采取急冷降温的电炉烟气，在600~800℃向烟道（或设置专用装置）喷入碱性物质粉料（如石灰石或生石灰），通过生成CaCl₂减少有效氯源可使PCDD/Fs生成量明显降低，在250~400℃喷入氨也可抑制PCDD/Fs的生成。

第二，已生成 PCDD/Fs 的减排

（1）高温氧化技术，即“3T+E”技术。即良好的炉膛温度，烟气在高温区充足的滞留时间，在高温区适当的空气量，炉内充分的紊流强度。该技术适用于废钢预热后烟气PCDD/Fs的减排。99%以上的PCDD/Fs及其它有机物都会被高温分解。为了避免“从头合成”，可向焚烧炉内或烟道中喷入碱性物质（如石灰石或生石灰），可使生成PCDD/Fs的氯源减少60%~80%，向炉内喷氨也可。同时，对烟气进行急冷、使烟气温度快速降至200℃以下，以最大限度减少PCDD/Fs在易生成温度区间的停留时间。

（2）其他减排技术同烧结工序。如高效过滤、物理吸附、戈尔Remedia催化过滤、催化分解技术等。

因此，在对电炉炼钢和烧结工序二噁英类实施减排策略的同时，对新、改、

扩建烧结、电弧炉项目，必须在有效治理烟粉尘的同时采取最有效的二噁英类物质的减排措施与技术。

5) 排放标准

因为PCDD/Fs毒性太大，发达国家均制订了十分严格的排放标准，如日本烧结和电炉新污染源分别0.1 ng-TEQ/Nm³和0.5 ng-TEQ/Nm³，欧盟烧结和电炉均为0.1 ng-TEQ/Nm³，德国烧结为0.4 ng-TEQ/Nm³（努力达到0.1 ng-TEQ/Nm³），韩国烧结为0.2 ng-TEQ/Nm³，其他国家多规定为0.2~0.4 ng-TEQ/Nm³，BAT/BEP推荐的烧结和电炉排放限值分别为0.5 ng-TEQ/Nm³和0.2 ng-TEQ/Nm³。

我国曾颁布《危险废物焚烧污染控制标准》（GB18484-2001）、《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB18485-2001），其中还明确规定了二噁英类的排放标准分别为0.5 ng-TEQ/Nm³和1.0 ng-TEQ/Nm³。但一直以来都还没有详细的控制技术标准出台。2004年，国务院批准了《中华人民共和国履行〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家实施计划》，按照公约规定，各缔约方应采取必要的法律和行政技术措施，对二噁英类副产物排放源要求应用最佳可行技术/最佳环境实践（BAT/BEP），以实现二噁英类POPs控制和减排的目标。我国对PCDD/Fs实行了严格控制，如《危险废物集中焚烧处置工程建设技术规范》（HJ/T176-2005）、《医疗废物集中焚烧处置工程技术规范》（HJ/T177-2005）中均规定：严格控制燃烧室烟气温度、停留时间与湍流工况，对高温烟气快速冷却、控制烟气在200~600℃的停留时间小于1s，在除尘器前烟道喷入多孔吸附剂或在除尘器后设置吸附塔（床）等。由于受到分析水平和成本的限制，仅对城市生活垃圾焚烧做过相对较多的监测和调查。

钢铁工业作为二噁英类物质排放的一个重要来源须得到关注和重视。目前我国在钢铁工业中尚无针对性、权威性的规范或具体立法，缺乏可操作性，需加强对钢铁行业的二噁英状况的环境监测，大力开展相关基础、应用、环境管理研究，并在此基础上制定出符合我国钢铁工业行情的控制策略、管理规范及减排措施。

6.5.2 技术试验示范效果

案例一：选择式废气循环 Eposint 技术在烧结上的应用

Eposint 技术又称分段废气循环或选择式废气循环，是对 EOS 法的进一步优化。从选定的风箱中抽取烟气用于再循环，可以灵活应对各种不同运行工况。这项技术在日本、欧洲都有较多的成功实例，新日铁的一台 480 m² 烧结机烟气循环量为 28%，颗粒物和 SO₂ 减排 63%，固体燃料消耗降低 6%~8%。欧洲 CORUS 3 号烧结机也采用了这一技术，总的废气循环量为 50%，颗粒物和 NO_x 减排 45%，PCDD/Fs 减排 60%~70%，估计固体燃料消耗降低 10%~15%。采用这类技术不仅

只是污染物的减排，而且还能节能、降低烧结生产成本；也降低了后续烟气脱硫装置的投资和运行成本，同时又提高了脱硫效率，发展前景广阔。

案例二：戈尔 Remedia 催化过滤技术的应用

“覆膜催化滤袋”技术，在垃圾焚烧、危险废物（包括医疗废物）焚烧及再生铝等行业已有大量应用（如日本、美国、德国、英国、捷克、比利时、奥地利、新加坡、泰国、巴西、中国台湾等），技术成熟。滤袋由 ePTFE 薄膜（Gore-Tex 薄膜）与催化底布组成，底布为针刺结构、纤维由膨体聚四氟乙烯复合催化剂组成，集高效除尘与催化氧化于一身，与传统技术相比具有如下特点：①颗粒物去除效率高，排放浓度可达 1 mg/Nm^3 ；② 固气态 PCDD/Fs 去除率高（固态 99.9%、气态 97.8%，总去除率达 98.4%），排放浓度可低于 0.1 ng-TEQ/Nm^3 ，气态 PCDD/Fs 在低温状态（ $180\sim 260^\circ\text{C}$ ）被彻底分解而不是吸附转移，不存在 PCDD/Fs 的再次合成和二次污染；③ 不需要喷吸附剂或碱性物质，不需要改造现有设备，只需要更换除尘器滤袋，施工简单方便；④ 阻力小，28 次/d 清灰时为 1500 Pa ；⑤ ePTFE 薄膜滤袋抗腐蚀性强，适用于酸性烟气；⑥ 滤袋寿命长，一般可达 6 年以上。该方法移植到烧结烟气 PCDD/Fs 减排，技术上应是可行的，而且运行成本也会比较低。

案例三：物理吸附技术在电炉炼钢中的应用

HOK 褐煤吸附技术在欧洲 Schiffingen（1997 年）、Esch-Belval（2001 年）、Differdingen（2001 年）、Stalhl Gerlafingen（瑞士，1998 年）、ALZ Genk（比利时，2003 年）等五家钢厂电炉上得到了应用，可以长期稳定确保 PCDD/Fs 小于 0.1 ng-TEQ/m^3 。HOK 褐煤是经过“转底炉工艺”活化的褐煤（HOK 是德语转底炉的简称），具有良好的孔隙结构（ $1\sim 50 \text{ nm}$ ）、孔隙率高达 50%，超研磨级 HOK（ $24 \mu\text{m}$ ）喷入量 $25\sim 35 \text{ mg/m}^3$ 即可使 PCDD/Fs 远小于 0.1 ng-TEQ/m^3 。为了确保运行安全，应在除尘器入口安装火花捕集器。该技术的特点是：褐煤价廉、惰性好，喷入量小、不会影响除尘系统的运行和除尘灰的综合利用，PCDD/F 去除率高、适用于废钢预热烟气，运行成本比较低。但尚未看到 HOK 褐煤吸附技术应用于烧结 PCDD/Fs 减排的报导。

案例四：电炉烟气快速冷却的工程实例

欧洲柯勒斯钢铁公司在荷兰的艾莫依登钢厂采用喷雾冷却手段可以大大减少二噁英的生成，该公司采用 Airfine 烟气净化工艺，电炉烟气可在不到 1s 的停留时间从 650°C 下降到 200°C ，降温后烟气中残存的或新生成的有机物通过在烟气中喷入活性炭或者褐煤焦等吸附剂来脱除。喷洒的吸附剂必须快速且均匀地分布到烟气流中，实践证明电炉烟气快速冷却和喷洒吸附剂的技术是减少有机氯，特别是 PCDD/Fs 排放的有效手段。

6.5.3 成本效益分析

国内对钢铁生产过程中产生的二噁英类物质的有关减排技术的投资、成本效益等经济运行情况鲜有报道。

韩国浦项钢铁公司现投资 1087 亿韩元（约合 7.5 亿元人民币）在 3 号和 4 号烧结机增设脱除烟气中二噁英及 SO₂ 的活性炭吸附塔工业装置，计划于 2004 年 5 月投入使用。该装置每年的运行费为 60 亿韩元（约合人民币 4000 万元/a），每天需补充 3.5t 活性炭。浦项钢铁公司之所以投入巨资进行二噁英的治理是因为韩国控制二噁英排放的法规将于 2006 年正式生效，要求烧结排放废气中二噁英含量低于 0.2 ng-TEQ/m³。

研究表明，向烧结床中添加固态抑制剂——含氮的反应物尿素，可以明显降低烧结烟气中二噁英的排放浓度，对抑制二噁英的生成具有显著效果。英国康力斯公司（Corus UK）通过实验确定了最佳的尿素添加量，可以使二噁英排放量减少 50%，同时没有显著增加排放烟气的颗粒物和氨浓度，增加的成本约合每吨烧结矿 0.03 英镑，这一技术被认为是抑制二噁英最为经济的技术。

6.5.4 技术应用前景分析

迄今为止，我国对二噁英这类持续有机污染物的研究还处于初级阶段，在二噁英的污染调查、监测、排放控制、生成机理及生态效应研究等方面远远落后于欧美日等发达国家。我国的二噁英分析实验室仅有中科院水生生物研究所、中科院环境生态研究所、北京大学和中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所等少数几家机构建立。对二噁英的排放控制方面的立法尚未建立。

减少烧结和电炉等钢铁生产过程中二噁英类有机污染物排放总量是一个世界性的难题，德、英、美、日、韩等发达国家的钢铁企业都在积极探索削减对策和解决办法，并取得一些成果。日本新日铁、住友金属、JFE 等钢铁企业对二噁英污染的研究相当深入，投入巨大，在二噁英污染控制方面取得了一定效果，各自的二噁英排放量都在逐年降低。而我国钢铁企业对这方面的研究和投入相当薄弱。上海宝钢集团公司实施的重点科研项目《宝钢二噁英污染现状及防治技术的基础研究》对于我国钢铁工业控制和减少二噁英类污染物的排放具有重要意义。马钢是欧洲以外第一家引进 MEROS 烧结烟气高效干法净化技术的钢铁企业，也是国内第一家真正实施烧结 PCDD/Fs 综合减排技术的钢铁企业，于 2010 年投入运行。

2010年11月，九部委发布《关于加强二噁英污染防治的指导意见》，提出二噁英污染防治的路线图和时间表，到2015年，建立比较完善的二噁英污染防治体系和长效监管机制，重点行业二噁英排放强度降低10%，基本控制二噁英排放增

长趋势。意见要求，在铁矿石烧结、电弧炉炼钢等重点行业全面推行削减和控制措施，深入开展清洁生产审核，全面推广清洁生产先进技术、最佳可行工艺和技术等，降低单位产量（处理量）二噁英排放强度。我国要在京津冀、长三角、珠三角等重点区域开展二噁英排放总量控制试点工作。今后在审批建设项目环境影响评价文件时要充分考虑二噁英削减和控制要求，将二噁英作为主要特征污染物逐步纳入有关行业的环境影响评价中。加强新建、改建、扩建项目竣工环境保护验收中二噁英排放监测，确保按要求达标排放，从源头控制二噁英产生。

国家已对“十二五”期间二噁英的污染防治做出重要部署。钢铁行业作为重点行业，应展开对钢铁工业二噁英排放现状的调查，在消化吸收国外已有研究成果的基础上，大力开展有关钢铁工业二噁英类的基础研究、应用研究、环境管理研究，探索经济可行的削减途径，制订相关排放标准，减少我国钢铁工业二噁英类持久性有机污染物的排放量，为我国履行斯德哥尔摩公约作出积极贡献。

6.5.5 技术知识产权情况

国内外有关烧结、电炉炼钢中二噁英类物质的减排技术专利所属情况如下：

减排技术	开发商	减排效果	应用情况
TiO ₂ -V ₂ O ₅ -WO ₃ 催化剂氧化分解技术	我国西北化工研究院开发	在 240~320℃ 试验条件下 PCDD/Fs 去除率达 95%~99%。	
TiO ₂ 加紫外光催化分解技术	日本明古屋国家工业研究所开发	PCDD/Fs 去除率可达 98.6%，同时还能分解烟气中 55% 的 NO _x 。	
戈尔 Remedia 催化过滤技术	美国戈尔公司 1998 年发明	PCDD/Fs 去除率高（固态 99.9%、气态 97.8%，总去除率达 98.4%），排放浓度可低于 0.1 ng-TEQ/Nm ³ ，不存在 PCDD/Fs 的再次合成和二次污染。	在垃圾焚烧等行业已有大量应用（如日本、美国、德国、巴西、中国台湾等），技术成熟。该法移植到烧结工序，技术上应是可行的。
MEROS 烧结烟气高效干法净化技术	西门子集团开发	排放烟尘浓度小于 5mg/m ³ ，PCDD/Fs 去除率达 98%（喷焦炭或活性炭），HC1 和 HF 去除率在 90% 以上；喷消石灰脱硫效率为 80%，喷 NaHCO ₃ 脱硫效率大于 90%。	马钢是欧洲以外第一家引进该技术的钢铁企业，于 2010 年投入运行。
HOK 褐煤吸附技术		可以长期稳定确保 PCDD/Fs 小于 0.1 ng-TEQ/m ³ 。	欧洲 Schifflingen（1997 年）、Esch-Belval（2001 年）、Differdingen（2001 年）、Stahl Gerlafingen

			(瑞士, 1998 年)、ALZ Genk (比利时, 2003 年) 五家钢厂在电炉上应用了该技术。但尚未看到应用于烧结工序的报导。
Eposint 选择式废气循环技术	由西门子奥钢联开发	可以减少 SO_x 、 NO_x 排放量并降低废气中的二噁英和汞浓度, 同时也减少了焦炭的单位消耗量, 对 CO_2 也有一定减排效果。	奥钢联钢铁公司林茨第 5 烧结厂、新日铁一台 480m^2 烧结机、欧洲 CORUS 3 号烧结机采用了这一技术。

6.6 高炉喷吹焦炉煤气技术

6.6.1 技术介绍

高炉喷吹焦炉煤气是指将焦炉煤气经过净化处理, 通过设备加压至高于高炉风口的压力, 然后利用喷吹设施, 通过各个风口直吹管喷入高炉。高炉喷吹焦炉煤气的最大问题是焦炉煤气的来源。作为优质燃料的焦炉煤气在钢铁厂普遍存在着供应紧缺的现象。鉴于我国目前存在着大量独立的焦化厂, 其产生的大量焦炉煤气每年都存在直排放散的现象, 每年白白烧掉的焦炉煤气量造成的经济损失达数百亿元。如果把这部分焦炉煤气量就近引至现有的钢铁企业, 用于高炉喷吹焦炉煤气, 其产生的累计经济效益是不言而喻的。

按某公司两座高炉喷吹 $12000\text{Nm}^3/\text{h}$ 的焦炉煤气量进行设计, 其工艺流程如下图所示。

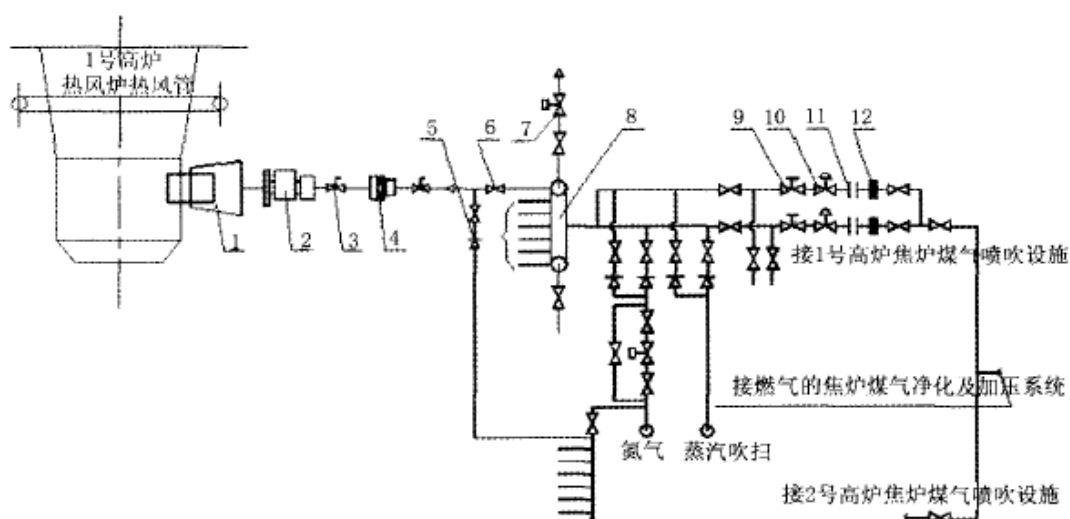


图 6.6.1 某公司两座高炉喷吹焦炉煤气工艺流程

1-风口; 2-弹子阀; 3-球阀; 4-快速接头; 5-逆止阀; 6-截止阀; 7-气动阀; 8-炉体环管;

9-快速切断阀；10-调节阀；11-流量孔板；12-盲板阀

高炉喷吹焦炉煤气的工艺简单。煤气经净化及加压后，通过储气罐、管路分别送到1号高炉和2号高炉的炉体焦炉煤气环管。考虑到焦炉煤气的喷吹量有限，同时为了保证炉缸圆周的工作均匀，每座高炉设计7个风口进行喷吹焦炉煤气，其余7个风口仍喷吹煤粉，喷吹焦炉煤气风口与喷吹煤粉风口采用交叉均匀布置（即选奇数风口或偶数风口）。2座高炉各自的炉体焦炉煤气环管分别引出7根支管，经金属软管分别与各高炉的奇数或偶数风口的直吹管上的喷枪相连，将焦炉煤气喷入高炉。喷枪材质采用耐高温、耐腐蚀材质，专用于焦炉煤气喷枪。炉体焦炉煤气环管设有若干排污点，用于定期清扫管道内的焦油等杂质。

为了防止焦油和萘等物质的析出影响喷吹，储气罐后管路设有2路互为备用、接往高炉炉体焦炉煤气环管的管路设有2路互为备用，另外管路上还设有氮气和蒸汽管路用作保安和吹扫。系统所有调节阀和快切阀均采用气动控制。高炉炉体焦炉煤气环管上设有氧含量及压力和温度检测，当浓度大于1%时系统报警，快切阀关闭并将放散阀打开，将管道内焦炉煤气放散；压力低于0.45MPa，温度低于60℃时报警；压力低于0.35MPa时，工艺上为保证喷吹焦炉煤气安全，自动关闭快速切断阀，并打开氮气吹扫阀进行吹扫。在煤气压缩系统，根据焦炉煤气的供应总量，确定压缩机开起的数量。利用压缩机自带的控制系统，保持出口压力在0.5MPa。

系统设置完备的安全监测手段和保护设施。主要包括：焦炉煤气储气罐和分气包设置压力监测和安全阀。喷枪末端设置逆止阀和手动球阀，防止高炉煤气倒流。喷吹主管设置紧急吹扫用氮气和安全吹扫蒸汽，并在每个支管设置手动氮气吹扫，煤气压缩系统吹扫采用氮气，储气罐、分气包的吹扫采用蒸汽。在储气罐和分气包设吹扫放散管，放散管的高度要高于周边建筑。炉体焦炉煤气环管设排污阀及放散管，放散管一直引到炉顶放散阀平台。压缩机室内及炉体焦炉煤气环管设煤气含量监测及报警系统，并设置必要的消防设施。控制系统设置必要的安全连锁，出现异常情况时，自动停机或自动关闭快速切断阀并进行吹扫。

6.6.2 技术试验示范效果

（1）技术适用条件

高炉喷吹焦炉煤气的最大问题是焦炉煤气的来源。作为优质燃料的焦炉煤气在钢铁厂普遍存在着供应紧缺的现象。在实际操作中，使用此系统需要对焦炉煤气进行必要的净化处理，以保证压缩机系统稳定运行。

采用专门的喷枪进行喷吹焦炉煤气，对高炉的直吹管进行必要的改造，并使

焦炉煤气的喷枪延升至风口小套前端，以减少焦炉煤气快速燃烧对风口小套的影响。

高炉喷吹焦炉煤气后，风口的燃烧和炉内的还原气氛发生相应的变化，高炉操作要做相应的调整。由于焦炉煤气燃烧快，火焰短，所以高炉边缘气流发展，风口氧化带缩短，在生产中要加重边缘负载，抑制边缘气流发展，保护炉墙。

高炉喷吹焦炉煤气后，高炉煤气的水分含量增加，煤气热值降低，影响热风温度。严格控制炉顶煤气温度在 180~250℃ 以内，精心操作布袋除尘系统。

需要明确的是，鉴于焦炉煤气供应的不充分和不确定性，要求钢铁厂需在独立焦化厂附近，以便得到足够的焦炉煤气用于高炉喷吹，对于我国来说，高炉喷吹焦炉煤气不是喷煤的替代品，而是喷煤的补充和完善，以期取得最大的节焦效益。当考虑到每公斤焦炭都有节约的必要时，任何含焦化流程的钢铁联合企业都应应将剩余或平衡下来的焦炉煤气用于高炉喷吹。

在国外高炉煤气产量较多，但是其利用不够充分，没有体现出应有的价值，高炉喷吹焦炉煤气是为了代替天然气，提高利用率，降低成本。

(2) 节能减排效果

生产 1t 焦炭可产生约 420m³ 的焦炉煤气。焦炉煤气成分：50%~60% H_2 ，约 25% CH_4 ，约 10% CO 。 H_2 的还原动力学性能远好于由焦炭产生的 CO ，能促进高炉间接还原充分发展，降低直接还原度，从而降低燃料比。经验数据表明，高炉喷吹焦炉煤气可节焦 0.4~0.8kg/m³，减少 CO_2 排放 1.2kg/m³。而且高炉的热效率达 96.99%，焦炉煤气作为还原剂喷入高炉，部分代替碳还原，效率最高。

美国钢铁公司 MON VALLEY 厂的两座高炉 2005 年的喷吹总量为 14.16 万 t，喷吹量约 65m³/t。该厂曾报道喷吹焦炉煤气后，降低了天然气喷吹量，消除了焦炉煤气的放空燃烧，减少了能源成本，年节省开支超过 610 万美元。

6.6.3 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：1 座 4350m³ 高炉，采用高炉喷吹焦炉煤气技术。项目总投资 5194 万元，其中建设投资 5000 万元，建设期利息 194 万元。

项目投资估算详见下表。

表 6.6.1 高炉喷吹焦炉煤气技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1	建设投资	5000.00	96.3%

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1.1	建筑费用	865.80	16.7%
1.2	设备费用	2405.00	46.3%
1.3	安装费用	1058.20	20.4%
1.4	其它费用	671.00	12.9%
2	建设期利息	194.01	3.7%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	5194.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：按照吨铁喷吹焦炉煤气 20~40m³，可降低焦比 20kg 计算，年增加收入 5169 万元。采用高炉喷吹焦炉煤气技术，将增加折旧费、维修费、摊销费、财务费等，各项费用合计 1231 万元，项目利润总额 3842 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）1.7 年，财务内部收益率 50.4%。

项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 6.6.2 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	5194
1.1	建设投资	万 元	5000
1.2	建设期利息	万 元	194
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	5194
4.	资金筹措	万 元	5194
4.1	自有资金	万 元	2078
4.2	建设贷款	万 元	3116
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	5169
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	1231
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	975
5.4	达产年利润总额	万 元	3842

序号	项目名称	单 位	指标
5.5	达产年所得税	万 元	961
5.6	达产年净利润	万 元	2882
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	1.7
6.2	财务内部收益率	%	50.4
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	1.3

6.6.4 技术应用前景分析

高炉喷吹焦炉煤气在国内外已有生产实践,技术上可行,工艺路线成熟可靠。在有焦化厂的钢铁联合企业,自产焦炉煤气基本得到利用,主要是烧焦炉、轧钢加热炉、高炉热风炉、烧结点火以及燃烧发电等。对于这些企业,随着企业内能量利用率的提高和替代燃料的使用,加热所需要的焦炉煤气将不断减少,焦炉煤气会有一定的富裕量供高炉喷吹使用。

国外高炉喷吹焦炉煤气已有很长的历史,并取得良好结果。20 世纪 80 年代初,苏联已在多座高炉上完成了喷吹焦炉煤气的试验研究,掌握了 $1.8\sim 2.2\text{m}^3$ 焦炉煤气替代 1m^3 天然气的冶炼技术。

20 世纪 80 年代中期,法国索尔梅厂 2 号高炉开始进行喷吹焦炉煤气作业,喷吹量达 $21000\text{m}^3/\text{h}$ 。喷吹的焦炉煤气与焦炭的置换比为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 。该厂首先对自产的焦炉煤气进行净化处理,然后利用压缩机将焦炉煤气加压到 0.58MPa ,通过喷吹装置将焦炉煤气喷入高炉。处理后的焦炉煤气发热值为 $19.26\sim 20.11\text{MJ}/\text{Nm}^3$,密度为 $0.42\sim 0.44\text{kg}/\text{Nm}^3$ 。

美国钢铁公司 MON VALLEY 厂的 2 座高炉自 1994 年起一直喷吹焦炉煤气。2005 年的喷吹总量为 14.16 万 t,喷吹量约 $65\text{m}^3/\text{t}$ 。该厂曾报道喷吹焦炉煤气后,降低了天然气喷吹量,消除了焦炉煤气的放空燃烧,减少了能源成本,年节省开支超过 610 万美元。为能够喷吹焦炉煤气,该公司对焦炉煤气进行了必要的净化处理,并对高炉风口进行了必要的改造。

早在 20 世纪 60 年代,本钢、徐钢等厂曾在小高炉上进行了喷吹焦炉煤气试验研究,并取得一定的成果。其中本钢的喷吹焦炉煤气量为 $81.6\text{m}^3/\text{t}$,降低焦比 $60\text{kg}/\text{t}$,产量提高 $10\%\sim 11\%$ 。

我国一些钢铁企业也一直在进行高炉喷吹焦炉煤气的试验,有些已经取得了成功。例如 2010 年 8 月承钢在 380m^3 高炉上连续喷吹了 15 天,运行良好。目前,高炉喷吹焦炉煤气技术普及率为零,“十二五”期间预计推广比例到 20%。

6.6.5 技术知识产权情况

中冶东方工程技术有限公司开发了一种新型实用高炉喷吹焦炉煤气系统,包括储气装置、喷吹装置、计量调节装置以及安全保护装置;此系统的开发说明我国已完全掌握高炉喷吹焦炉煤气技术,并且充分利用。其中如本钢、徐钢都已实现改造利用此技术,尤其是河北省承德钢铁集团充分利用此技术,效果非常明显。

6.7 高炉喷吹废塑料技术

6.7.1 技术介绍

高炉喷吹废塑料,先把收集的废塑料进行破碎分解,分成薄膜类塑料和固形类塑料。后者用破碎机破碎到适合高炉喷吹的粒度。薄膜类废塑料破碎处理后,利用比重差法的离心分离装置分离出聚氯乙烯,通过制粒工序进行制粒。将两个系统加工的废塑料颗粒装入贮料仓,然后再送入喷吹罐。喷吹时再从喷吹罐与喷吹气体一起喷入高炉风口回旋区。废塑料在高炉风口回旋区内会急剧燃烧气化,并在炉内作为还原气体被有效利用。

废塑料主要由碳、氢两种元素构成,化学成分和重油接近。废塑料和其他石化燃料的燃烧特性对比结果见下表。从表中看出,废塑料具有很好的燃烧性能,废旧塑料可作为高炉炼铁的良好还原剂和发热剂。

表 6.7.1 废旧塑料的燃烧特性

项目	废塑料 (PE, PP, PS)	煤粉(无烟煤)	微碳粉 (沥青碳)	石油 (重油)
发 热 值 , (MJ/kg)	~40	25~31	3~35	~43
w (S), %	0	0.8~1.15	0.5~0.8	0.1~0.2
空气比	1.3	1.3	1.2	1.2
燃烧状态	良好	良好	良好	良好
NO _x 排放量, 10 ⁻⁶	63~79	55~70	125	220
未燃碳 (g/m ³)	≤0.0001	52.3	36.2	0.05

废塑料在高炉内的基本反应过程为: ① 在风管和风口内的热分解和燃烧行为。在鼓风温度为 1250℃ 条件下, 风管和风口内粒度为 2.06mm 的塑料颗粒表面部分熔化, 但没有燃烧。②回旋区内的燃烧和气化反应行为。粒度为 2.06mm 的塑料喷入回旋区内的高温气氛中, 经燃烧、气化反应以及加热引起的爆裂, 粒度

变为 0.20mm 左右，这时的火焰温度为 2000℃左右。可以看出由于煤气温度达到该程度，将引起塑料的分解、气化和燃烧。在上升过程中，作为还原剂与铁矿石发生还原反应。③ 高炉下部塑料的消耗和沉积行为。炉子下部未反应的塑料在上升时，一部分用于铁矿石还原而生成 CO_2 和 H_2O ，一部分沉积在填充层而基本上不从炉顶排出。喷吹塑料后， H_2 和 C1-C4 碳氢化合物的浓度增加。塑料粉末在风口前燃烧产生还原气体，而大粒（2-10 mm）塑料在回旋区深处燃烧和气化。塑料的燃烧率随颗粒的增大（<10mm）而提高，大颗粒（2-10 mm）塑料在回旋区的燃烧和气化率可达 100%。

国外对高炉喷吹废塑料的研究起步比较早，德国和日本已经实现工业化。德国的不莱梅钢铁公司是第一家把高炉喷吹废塑料的设想付诸实施的厂家。高炉喷吹结果表明：所喷入的废塑料对高炉冶炼过程的影响介于煤与重油之间，但是喷吹废塑料比较便宜。除此之外，德国的克虏伯—赫施钢铁公司、蒂森钢铁公司以及克虏伯—曼内斯曼冶金公司的胡金根厂也在高炉上正式喷吹或进行半工业试验。日本 NKK 公司在京滨厂 1 号高炉（4907m³）上开发利用废塑料代替部分焦炭用于炼铁技术获得成功。

与国外相比，我国在高炉喷吹废塑料目前还处于理论研究及可行性论证阶段。龙世刚等人研究了废塑料在不同造粒条件下所得试样在空气、氧气和二氧化碳等不同气氛下的燃烧特性。曹枫等用不同的废塑料在空气中燃烧，通过尾气的成分分析比较废塑料和煤粉的燃烧特性。部分研究人员对废塑料的脱氯也进行理论研究。

研究表明，与直接焚烧相比，高炉喷吹废塑料技术有如下优点：①燃烧产物温度高于 800℃，且在高温区停留时间大于 2s 时，99.9%的二噁英会分解，由于高炉喷口温度达到 2000℃，所以理论上不会产生二噁英。②焚烧中如果单纯把废塑料放入焚烧炉中焚烧其热量难于完全回收利用，炉子热效率低，废塑料在高炉中的热利用率高达 80%。

此外，国内外研究结果均表明：对喷吹的废塑料有一定的粒度要求，粒度过大，塑料的表面积变小，与热空气的接触表面即燃烧表面相对较小，在风口前的有限时间里可能会出现反应不充分的现象，所以燃烧效果不好，从而影响塑料的燃烧率和还原效果；粒度过小，容易阻塞喷枪。由于喷枪枪口与风口高温区接触，其温度相当高，如果废塑料的粒度很小，它们可能会在还没有来得及被喷入风口的时候就在喷枪内软化，黏结在喷枪内壁，严重时堵死喷枪。

现在，也有高炉喷吹废塑料的新思路，即煤与废塑料混熔喷吹技术，以期能为解决这一问题提供一些理论依据。煤与塑料混熔喷吹技术是将收集和分类好的废塑料破碎到一定的粒度与预热的粗煤粉均匀混合并熔融，然后自然冷却到一定

的温度,再将煤与废塑料混熔体粉碎,达到高炉喷吹的粒度要求后共同喷入高炉。煤与废塑料混熔喷吹技术与传统高炉喷吹废塑料技术相比,具有以下优点:煤与废塑料混熔喷吹只需要简单对废塑料分选洗涤后,直接混入预热的煤粉中,然后自然冷却后进入传统的煤粉粉碎系统,避免了在传统喷煤高炉的基础上需要添加塑料分选、洗涤和破碎整套设备。煤与废塑料混熔喷吹技术不是破碎后混合,而是混合后破碎,在破碎机里既达到了破碎的目的,同时也取得了均匀成分的效果;该技术要比分别破碎后从不同的喷口喷入高炉的传统方式的均匀性高得多。因为它的原料均匀,不至于由于成分的偏析而影响高炉炉况正常运行,大大提高了炉况的稳定性和生产的连续性。煤与废塑料混熔喷吹技术的塑料和煤是一起进行破碎的,粒度均匀性很高,运用传统的喷枪就行,而传统高炉喷吹废塑料的废塑料和煤粉的粒度有很大的差别,需要用两种喷枪分别喷吹。然而单独喷吹废塑料时,如果粒度不恰当会出现塑料黏结枪口,严重时产生喷枪阻塞现象而对生产造成威胁。总之,煤与废塑料混熔喷吹技术比传统高炉喷吹废塑料技术的基建投资少,流程简单,煤与废塑料的混合均匀,对炉况影响较小,在传统高炉喷吹煤粉的基础上不需作较大的改动,这对于钢铁企业来说是很受青睐的。

6.7.2 技术试验示范效果

废塑料先经过预处理分选,去除有害杂质,再经烧结,制成粒度<10mm 的散粒,并由喷吹系统送入高炉。

废旧塑料必须充分收集和供应量充足,明确分类措施,以保证高炉喷吹的要求;国内废旧塑料中聚氯乙烯(PVC)含量较高,分解后产生的氯元素严重地腐蚀炉衬,因此必须解决脱氯技术,在此条件下可以达到高炉喷吹废塑料的要求。

开发投资大,德、日两国企业开发这一技术的费用折合人民币均超过 1 亿元。但相对于环保效益来说,还是有可利用的空间。

据估算,通过向高炉喷吹废塑料,可以降低高炉能耗 1%~1.5%。

从废塑料的化学成分和反应过程看,适合高炉喷吹。另外,与煤相比,在气化产物中 H_2/CO 的比值要远大于喷吹煤粉时的比值,这有利于铁氧化物的高温还原。此外,由于废塑料的灰分和硫较低,与喷吹等量的煤粉相比,可少加石灰石,减少渣量,有利于降低焦比和提高生产率。开发废旧塑料燃料化技术和高炉喷吹技术不仅能使钢铁生产实现降耗节能,而且也是改善社会环境的有效手段。

废塑料的喷吹成本比喷煤粉低,与废塑料的其它处理方法相比,在能量利用方面和特殊废料利用方面都是最经济的工艺方法,如果得到环保政策的支持,成本还会降低。国外钢铁企业喷吹废塑料实践表明,其处理费用仅为焚烧废塑料处理方法的 60%,为废塑料再生利用的 25%。

6.7.3 成本效益分析

(1) 投资估算

项目案例：1 座 2000m³ 高炉，年产 150 万吨铁，采用喷吹塑料技术。项目总投资 1244 万元，其中建设投资 1200 万元，建设期利息 44 万元。

项目投资估算详见下表。

表 6.7.2 高炉采用喷吹塑料技术投资估算表

序号	费用名称	投资估算(万元)	占百分比
1	建设投资	1200.00	96.5%
1.1	建筑费用	207.79	16.7%
1.2	设备费用	577.20	46.4%
1.3	安装费用	253.97	20.4%
1.4	其它费用	161.04	12.9%
2	建设期利息	44.00	3.5%
3	铺底流动资金	0.00	0.0%
	总投资	1244.00	100.0%

(2) 经济效益分析

项目达产年指标：按照降低煤比 15kg 计算，年增加收入 1244 万元。高炉采用喷吹塑料技术，将增加折旧费、维修费、财务费等，各项费用合计 281 万元，项目利润总额 1794 万元。经测算，项目投资回收期（不含建设期）1.1 年，财务内部收益率 77.8%。项目经济效益分析指标汇总详见下表。

表 6.7.3 经济效益分析指标汇总表

序号	项目名称	单 位	指标
1	项目总投资	万 元	1244
1.1	建设投资	万 元	1200
1.2	建设期利息	万 元	44
1.3	铺底流动资金	万 元	0
2.	生产流动资金	万 元	0
3.	项目总资金	万 元	1244

序号	项目名称	单 位	指标
4.	资金筹措	万 元	1244
4.1	自有资金	万 元	498
4.2	建设贷款	万 元	746
4.3	流动资金贷款	万 元	0
5.	经济效益指标		
5.1	达产年收益（不含税）	万 元	2115
5.2	达产年总成本费用（不含税）	万 元	281
5.3	达产年销售税金及附加	万 元	399
5.4	达产年利润总额	万 元	1794
5.5	达产年所得税	万 元	449
5.6	达产年净利润	万 元	1346
6.	财务评价指标		
6.1	投资回收期（不含建设期）	年	1.1
6.2	财务内部收益率	%	77.8
6.3	贷款偿还期（不含建设期）	年	0.8

6.7.4 技术应用前景分析

德国的不莱梅钢铁公司是世界上第一家把高炉喷吹废塑料的设想付诸实施的厂家，1995 年 6 月不莱梅钢铁公司投资约人民币 3000 万元建造了世界上第一套喷吹废塑料的设备，成功地开发出了高炉喷吹混合塑料的技术，喷吹能力为 7 万 t/a。其中装备这项技术设备的高炉有 8 个风口用于喷吹废塑料，每个风口的喷吹量为 1.25t/h。在不莱梅钢铁公司的这项喷吹技术中，废塑料是先经过分选、去除有害杂质再造成粒度< 10 mm 的塑料颗粒才喷入高炉的。该公司的喷吹结果表明，高炉喷吹废塑料对高炉冶炼过程的影响介于煤粉与重油之间，但喷吹废塑料更为便宜。因此不莱梅钢铁公司又投资 1500 万马克对两座高炉的喷吹系统进行了改造，每月喷吹废塑料取代 3000t 重油，并且实行了全年喷吹废塑料。除了不莱梅钢铁公司之外，德国的克虏伯—赫施钢铁公司、蒂森钢铁公司以及克虏伯—曼内斯曼冶金公司的胡金根厂也都在高炉上正式喷吹废塑料或进行工业性试验。

日本钢管公司（NKK）1996 年 10 月在京浜厂的 4093m³ 高炉上成功地喷吹了不含氯的废塑料，试验喷吹量高达 200 kg/t 铁。在 NKK 公司喷吹废塑料的工

艺中，首先对回收来的废塑料进行处理，去除聚氯乙烯，再经过破碎（一次破碎、二次破碎、粉碎）、造粒（最大粒度约 6 mm），然后随热风一起喷入高炉。NKK 公司喷吹废塑料的试验结果表明：1）废塑料的热量利用率达 80% 以上；2）废塑料对焦炭的置换比为 1: 1；3）喷吹量为 200kg/t 铁时，CO₂ 的发生量减少 12%；4）无有害气体产生，副产品煤气还可用于发电。

6.7.5 技术知识产权情况

JFE 钢铁于 19 世纪 70 年代即取得合成塑料作高炉还原剂的专利。

日本 NKK 公司目前已在京滨厂建立 1 套完整的工业规模喷吹废塑料系统，计划每年处理 3 万 t 工业废塑料。此外，该公司正考虑把这项技术出售给其他厂家。

宝钢研究院、宝钢分公司炼铁厂、安徽工业大学、宝钢工程技术公司等多方合作，完成了喷吹废塑料工业性实验。这项技术为国内首创，并形成了具有自主知识产权的专利技术，从而探索出废弃物资源化利用的有效途径。

6.8 高炉炉顶煤气循环技术

6.8.1 技术介绍

高炉炉顶煤气循环（TGRBF）利用 CO₂ 捕集技术，把高炉煤气分成 CO₂ 富集煤气和 CO 富集煤气。CO 富集煤气循环回到高炉内作还原剂使用，可降低高炉炼铁焦比。CO₂ 富集煤气则经过一次、二次除尘净化和压缩后，送入 CO₂ 管网或存储器。另外，往高炉内吹氧替代预热空气，这就不需要从煤气中分离 N₂，可避免 N₂ 在循环过程中的富集，同时有利于煤气中 CO₂ 的捕集。

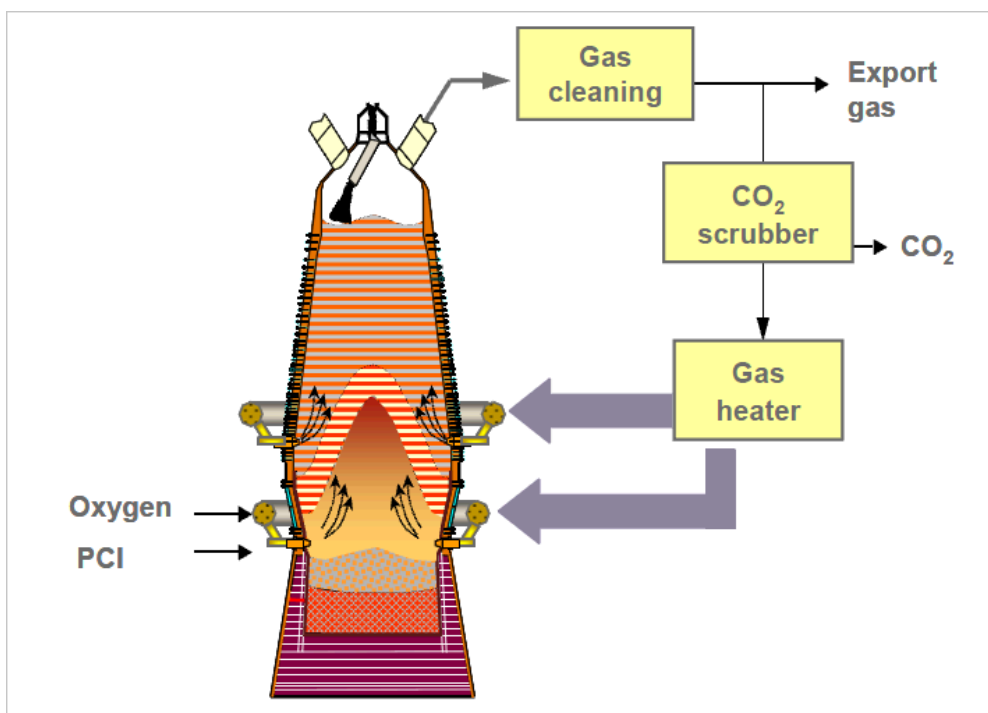


图 6.8.1 高炉炉顶煤气循环技术流程图

该技术研究项目属于欧盟超低二氧化碳炼钢项目 ULCOS 研发的内容之一，在经过模型与小高炉试验后，现正准备扩大规模试验，预计 2020 年前后能实现工业化应用。

6.8.2 技术试验示范效果

2007 年秋季，在瑞典 Lulea 的 LKAB 试验高炉上进行试验，该高炉工作容积为 9m^3 ，炉缸直径为 1.4m 。高炉设 3 个主风口，用于喷吹循环煤气、煤粉和氧气；设 3 个炉身风口，用于喷吹循环煤气。日产量为 36t/d 。为了脱除 CO_2 ，建了一套 VPSA（真空变压吸附）装置。之所以选择这种方式，是因为通过与变压吸附、有机膜和胺法比较后，认为真空吸附方法在效率和成本上都占优势。选择真空也可防止尾气中一氧化碳稀释，而且低温也有利于后续存储二氧化碳。炉顶煤气中二氧化碳浓度高以及有部分压力使得这一解决方案与电厂的解决方案相比，非常有成本效益。

试验进行约 6 个星期（40 天），结果显示采用炉顶煤气循环技术能达到：

- 1) 碳的需求量下降 25%~28%
- 2) 应用二氧化碳存储技术，能减少 50%二氧化碳排放
- 3) 降低焦比 35%
- 4) 提高生产率（有待验证）

目前项目组已经启动了中试和示范工程的设计以及建设,将在德国安赛乐米塔尔 Eisenhüttenstadt 厂的 3 号高炉进行中试,该高炉直径 6.0m,产能 70 万 t/年。此次中试将不进行二氧化碳存储。示范将在法国安赛乐米塔尔 Florange 厂 P6 高炉进行,规模更大,该高炉直径 8.6m,产能 138 万 t/年,进行二氧化碳的存储。

6.8.3 成本效益分析

要实现商业化运行,欧盟预计投资达 3 亿欧元以上。高炉煤气的循环再利用,既解决了高炉煤气的高效利用问题,又实现了 CO₂ 的减排,如加上捕集与封存的 CO₂,可减少 50%以上的 CO₂ 排放量。

6.8.4 技术应用前景分析

高炉炉顶煤气循环具有很好的发展前景,目前面临的主要问题是高炉内煤气流的分布,风口耐火材料损坏严重等。

6.8.5 技术知识产权情况

属于欧盟超低二氧化碳炼钢项目中,正在进行的突破性技术之一,项目完成后将在欧盟参与成员间分享。

6.9 非高炉冶炼技术

6.9.1 Corex 熔融还原炼铁工艺

6.9.1.1 技术介绍

Corex 工艺是针对缺少炼焦煤资源,但有丰富铁矿和非炼焦煤资源的国家和地区而开发的非高炉炼铁工艺。Corex 工艺最初设计使用的主要原燃料是含铁块矿和非炼焦煤,认为这有利于在生产成本和环境保护两个方面超越高炉炼铁工艺。

Corex 演化了高炉炼铁技术,取得了商业成功,但同时也存在一些缺点:例如与高炉相比,Corex 更多地依靠间接还原,存在料柱透气性问题;为保证竖式预还原炉料柱的透气性,必须使用块矿、烧结矿、球团矿或这些原料的块状混合物,因此必须配有造块设备。对入炉块状原料的理化性能要求很高,从而提高了原料成本;生产实践证明,要依靠焦炭床来保护炉缸,稳定生产,就无法摆脱对

焦炭的依赖（焦比 $>10\%\sim20\%$ ），尤其是大型化后，每吨铁水的焦比会超过 200kg/t ；从熔融气化炉抽出的高温煤气经净化后，从大于 1100°C 降至 $800\sim850^{\circ}\text{C}$ ，温度损失了 250°C 左右，热效率比不上高炉；虽然使用了全氧冶炼，但按炉缸面积计算的生产率仅为高炉的 $0.7\sim0.9$ ；竖炉预还原炉料的金属化率波动大；操作影响因素多，在炉体中部的高温区使用了排料布料活动部件，使设备维修成本及热损失增加，个别设备还不够成熟，利用率不高；Corex 工艺虽然采用全氧冶炼，但其生产率并不高，根本原因在于，虽然全氧熔炼速率很快，但受到上部竖炉铁矿还原速率的限制。对于一定产能的 Corex 熔融还原工艺，要求下部熔融气化炉的操作必须与上部的竖炉铁矿还原情况相匹配，才能达到较好的技术经济指标。

COREX 工艺采用块矿、球团或烧结矿为含铁原料，用块煤和少量焦炭作为还原剂并提供热量。铁氧化物的预还原及终还原分别在两个反应装置（即预还原竖炉和熔融气化炉）中进行。预还原竖炉将含铁原料还原为海绵铁加入到熔融气化炉中，熔融气化炉对海绵铁进一步还原，并对铁水成分进行控制，生产出类似于高炉的铁水，并产生大量的高热值煤气，一部分作为预还原竖炉的还原气，另一部分输出利用。

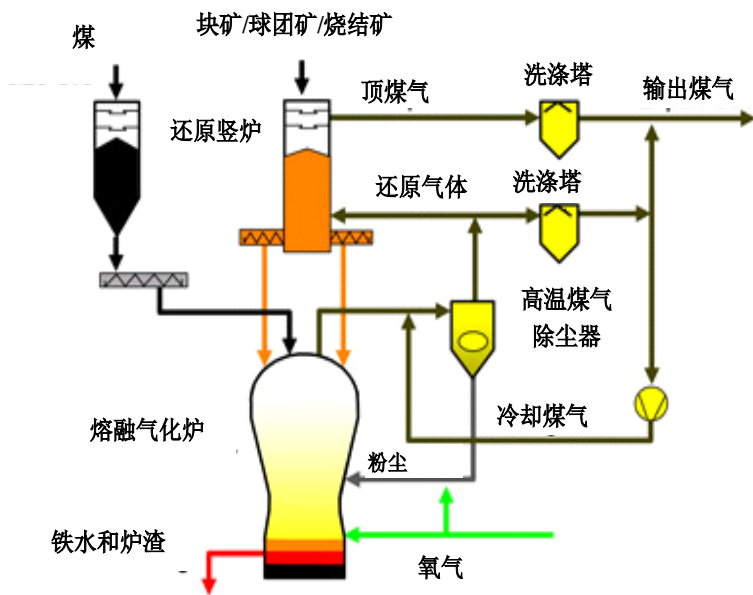


图 6.9.1 Corex 工艺流程图

6.9.1.2 技术试验示范效果

由于设计上突出了原燃料的优点，在 20 世纪 80 年代末，南非伊斯科钢铁公司引进了世界第一个年产 30 万 t 铁水的 Corex C-1000 装置。但是，该生产装置运行不理想，生产出现亏损，已经停产。

在总结这次失败的经验教训时，突出了两点原因：一是 Corex C-1000 的生

产能力小，达不到经济规模要求；二是缺乏设计经验，设备事故多。

到 20 世纪 90 年代末，为了推广应用 Corex 工艺，研发了年产 60-70 万 t 铁水的 Corex C-2000 装置，韩国、南非和印度 3 个国家分别引进了该装置。

南非和印度引进 Corex C-2000 的主要动因是这两个国家都属于炼焦煤资源短缺，铁矿石和非炼焦煤资源丰富的国家，希望引进大型化的 Corex 装置，利用本国资源优势，发展非高炉炼铁技术，解决炼焦煤资源短缺的问题。

韩国与南非和印度不同，韩国缺少铁矿石和各种煤炭资源，无论发展何种炼铁工艺，都需要进口原燃料。韩国浦项引进 Corex C-2000 装置的背景是恰逢浦项有一座高炉要停产大修，为减轻高炉停产引起的生产波动，浦项对技术新、生产相对灵活、又大型化的 Corex 装置产生了兴趣。浦项原决定引进 2 套 Corex C-2000 型装置，但在建设第一套 Corex C-2000 型装置的过程中，因经济分析的结果与原设想的目标存在较大差距，后来改造成 Finex 装置，也没有引进和建设第二套 Corex C-2000 型装置。

南非萨尔达纳运行的 Corex C-2000，下游配备一套直接还原设备以生产直接还原铁，铁水的年产能力为 65 万 t，直接还原铁为 80 万 t。该设备在 2008 年进行大修后，公司受到金融危机的影响，采取了非常措施：从 2008 年 11 月起进行间断性生产，以尽可能压缩产量。直接还原铁生产则完全停产。在 2009 年 2 月份安排了一些全面停产检修之后，工厂恢复了正常生产，因为经济形势有所好转，也恢复了直接还原铁生产。

京达尔的两座 Corex C-2000 设备消化了该公司 70% 的钢厂废料（比如 Corex 和高炉污泥、石灰石/白云石粉、转炉渣等），这些废料或直接加入，或通过球团/烧结设备加入。由于印度对钢材需求不断增加，设备产量维持在较高水平。

目前世界范围内有 4 套 Corex 装置在运行中，2 套在印度、1 套在南非，这 3 套均是 Corex C-2000，我国宝钢 2007 年投产了一套 Corex C-3000 装置，目前还有一套同类型的装置在建设中。Corex C-3000 已经运行了 3 年多的时间，宝钢的工程技术人员和西门子奥钢联人员结合 Corex C-2000 的操作技术，并充分利用一些高炉有效成熟的经验，在造渣制度、炉体维护、长寿技术、布料制度等方面进行了有益的探索。但是 Corex C-3000 还是存在这样那样的问题，还有许多的技术难题需要攻关，特别是焦炭用量高，竖炉的黏结机理需要进行进一步的研究，提高 Corex 作业率、延长 Corex 竖炉的清空周期等。

6.9.1.3 成本效益分析

COREX 需要引进生产工艺技术，部分工艺设备和配套建设的大型制氧机需要进口，投资成本非常高，而且投资回收期相当长，与高炉或 Finex 技术相比不

具优势。Corex 采用球团矿和块矿作原料，降低了生产成本和经济性的竞争力。

目前宝钢 Corex C-3000 运行成本非常高，2010 年上半年运行成本平均在 2700-2800 元/吨铁，建议全面解决 Corex 工艺目前存在的问题，并证明在经济上可行之后，再推广。

6.9.1.4 技术应用前景分析

目前 Corex 工艺在我国的应用还存在很多问题，对焦炭质量，矿石质量要求非常高，运行成本也非常高，建议全面解决 Corex 工艺目前存在的问题，并证明在经济上可行之后，再推广。

宝钢炼铁专家指出，在一个钢铁联合企业中，由 Corex 炉单独承担铁水供应的任务，不是最佳选择。Corex 稳定性较差，将导致钢铁联合企业生产的整体波动，所以 Corex 比较适合于作为钢铁联合企业铁水的补充，作高炉的配角。而且高炉和 Corex 之间在资源和能源利用方面可以互补。

6.9.1.5 技术知识产权情况

Corex 技术由西门子奥钢联和德国科夫公司开发。国内有关 Corex 一些专利如下：

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日
1	一种 Corex 熔融还原炉炉顶煤气的净化工艺	CN101200656	中冶赛迪工程技术股份有限公司	2007.11.07
2	熔融还原炉喷吹煤粉工艺	CN1840712	中冶赛迪工程技术股份有限公司	2006.01.25
3	一种 Corex 竖炉布料和气流分布的冷态模拟试验装置	CN201284349	宝山钢铁股份有限公司	2008.10.27

6.9.2 Finex 炼铁工艺

6.9.2.1 技术介绍

（1）技术原理

Finex 是在 Corex 基础进行的创新，直接使用粉矿和煤粉炼出铁水的工艺。在 Finex 工艺中，铁矿粉在三级或者四级流化床反应装置中预热和还原。流化床

上部反应器主要用作预热段，后几级反应器是铁矿粉的逐级还原装置，可以把铁矿粉逐级还原为 DRI 粉。之后，DRI 粉或者直接装入熔融气化炉，或者经热态压实后以热压铁（HCI）的形式装入熔融气化炉中。在熔融气化炉中，装入的 DRI 和 HCI 被还原成金属铁并熔融。Finex 过程产生的煤气是高热值煤气，可以进一步用作 DRI 或者 HBI 的生产或者发电等。

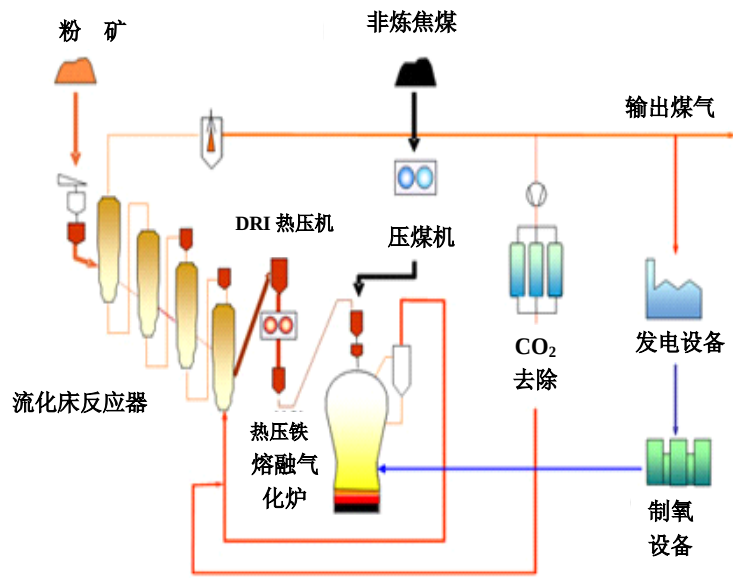


图 6.9.2 Finex 工艺流程图

（2）发展阶段

奥钢联公司（VAI）开发的非高炉炼铁工艺中的 Corex C-2000 在韩国浦项投产后，发现 Corex 工艺存在一些缺点和问题。因此，浦项公司组织力量，对熔融还原过程的应用基础进行研究。

1992 年，浦项与奥钢联公司开始联合开发 Finex 工艺。1996 年通过流态化床铁矿粉煤基气体还原试验小型试验装置（15t/d）确认了流态化还原工艺。1999 年进行了 150t/d 的半工业试验。在流态化床还原试验取得成功的基础上，浦项将已投产的 Corex C-2000 改造为 60 万 t/a 的 Finex 示范装置，并于 2003 年 6 月投产。Corex 的熔融气化炉用作 Finex 的熔融和煤气产生装置；Corex 的还原竖炉用作 Finex 的存储和料仓装置。

在 Finex 示范装置取得成功的基础上，浦项设计了一套年产铁水 150 万 t 的工业化的生产设施，并于 2007 年建成投产，2007 年 4 月 11 日出第一炉铁水。其开发过程见下表。

表 6.9.1 Finex 的工艺开发过程

时间	1992-1997	1998-2003	2003.5.31	2007.4.10

开发目标	基础研究	商业化	示范工厂	年产 150 万 t 的生产装置
工 作 内容	煤基还原气为还原剂的铁矿粉流态化床，反应过程的研究。 使用块煤的熔融气化炉的反应过程的研究。	Finex 商业化理念的 形成。 • 热 压 铁 工 艺 (HCI) • 煤粉造球工艺 • 流态化床与熔融 气 化 炉 的 连 结 (150t/d 示范厂)	建成年产 60 万 t 的 Finex 示范厂 • 流态化床反应器连续运转 • HCI 机械规模扩大 • 喷吹煤粉 • 煤气 CO 脱除 • 布料技术 • 联合发电设施	建成年产 150 万 t 铁水的生产厂

6.9.2.2 技术试验示范效果

如前所述,Finex 工艺是在 Corex 工艺装置上改进形成的。开始 Corex 与 Finex 的示范工厂的装置是结合在一起的,由于并未拆除 Corex 的还原竖炉,故仍可按 Corex 工艺照常运行,或按 Finex 工艺运行,以减少在改造和试运行过程中的产量损失。在 Finex 的流态化反应器系统, HCI 系统,煤造球系统,喷煤系统分步陆续投入以后,2003 年 5 月,示范装置全部转入按 Finex 工艺运行。

Finex 示范工厂取得成功后,2004 年 8 月浦项开工建设一套年产 150 万 t 的 Finex 工艺炼铁装置,设计目标年产铁水 150 万 t,年均日产 4200t 铁水。这套 150 万 t 装置于 2007 年 4 月投产,到 2007 年 4 季度,产量达到设计目标。150 万 t 装置投产后,到 2008 年 9 月的运行状况如下:

表 6.9.2 Finex 150 万 t 装置运行指标

指 标		目 标	实际 2008 年 4 月至 9 月
产量	t/a	≥150 万	~150 万
	t/d	≥4200	4240
作业率	%	≥97	97.8
煤比	kg/t 铁	≤730	720
铁水, %	[S]	≤0.030	0.027
成分, %	[Si]	≤0.80	0.75

2008 年 5 月-2008 年 9 月,150 万 t Finex 装置与浦项正在运行中的 4 号高炉(3795m³)操作指标的比较如下:

表 6.9.3 150 万 t Finex 与浦项 4 号高炉操作指标比较

项 目	单 位	Finex 1.5MT	浦项 4 号高炉
产 量	t/d	4320	8920
生 铁	温度, °C	1527	1508
	[C]wt%	4.5	4.5
	[Si]wt%	0.77	0.48
	[S]wt%	0.027	0.027
炉 渣	碱度	1.22	1.26
	(Al ₂ O ₃) %	18	15
	渣量 kg/t 铁	300	299

Finex 使用的铁矿石

到目前为止, Finex 1.5MT 所使用的原料均属于氧化矿。所用的矿均是矿山直接输出的。主要来源及其矿物化学组成。

表 6.9.4 Finex 使用的铁矿石

国别	矿 山	化学组成	结晶水含量, %
澳大利亚	Hamersly	Fe ₂ O ₃	1~3
	MT-Newman		
	Pilbara		
印 度	Donimalai, Goa		
	Salgaocar		
巴 西	Carajas		
澳大利亚	Yandi, BBR	Fe ₂ O ₃ 、H ₂ O	-10
	MAC	Fe ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ H ₂ O	4.5~7

Finex 的作业率

Finex 示范厂投产后, 遇到的最主要的问题是流态化床反应器的粘结和阻塞, 2007 年以后情况大为好转。150 万 t Finex 装备投产后不久就超过了示范厂。现在已接近高炉水平。

Finex 工艺的环境状况

Finex 工艺由于不需要炼焦及烧结工序, 故 Finex 对环境的污染小于高炉工

艺，具体见下图。

由下图可以看出，Finex 工艺 SO_x、NO_x 及粉尘的排放量远远低于高炉工艺。

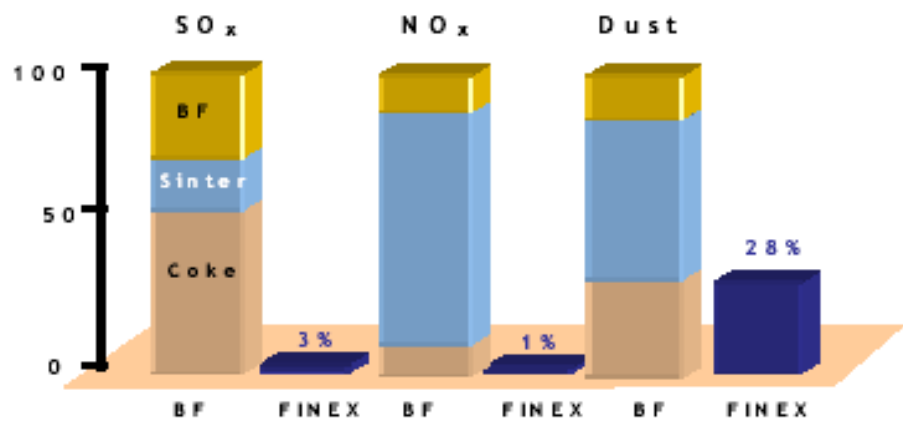


图 6.9.3 高炉与 Finex 污染物排放量的比较

6.9.2.3 成本效益分析

关于 Finex 的建设投资，浦项公司以韩国浦项的价格为基础，以建设年产生铁 300 万 t 炼铁系统为目标，将高炉流程与 Finex 流程（Finex 1.5MT 两套，包括各流程本身的全系统以及制氧机，发电站等）进行投资对比，认为 Finex 的建设投资比高炉流程节省 20%。同时，对两种流程的生产成本也根据浦项的实际情况进行了对比计算，认为 Finex 生产成本低 15%，因为各地域和企业的价格基础不同，需要根据具体情况进行分析比较。

6.9.2.4 技术应用前景分析

目前，浦项正积极向中国推广其自主开发的炼铁工艺 Finex。浦项现已与江苏沙钢就合作建设 Finex 综合钢厂项目签订谅解备忘录，与重钢集团也就 Finex 综合钢厂合作项目初步达成合作意向，可能还有几家钢厂亦在商谈中。

6.9.2.5 技术知识产权情况

韩国浦项

6.9.3 ITmk3 直接还原炼铁工艺

6.9.3.1 技术介绍

神户制钢以转底炉工艺为基础，开发出称之为“ITmk3”的直接还原铁工艺，

ITmk3的设计概念与以往的碳复合材生产法不同,可以定位为第3代炼铁法。



当在 RHF 内把碳复合球团矿加热到 $1350^{\circ}\text{C}\sim 1450^{\circ}\text{C}$ 时, 由于 CO 气体的生成和 CO 气体对氧化铁的还原反应, 会生成金属铁, 同时金属铁会加快渗透。结果渣会在比高炉低的温度和更快的速度从铁中分离出, 熔融铁凝固成粒状。然后, 凝固的熔融铁和渣冷却后被排出 RHF 外。这一系列的反应用时约 8min, 铁与渣的分离清晰。

1995 年在 Fastmet 法技术开发过程中，将实验炉（回转炉底炉）在高温下运转时发现了金属铁和渣分离生成的 DRI。以此为契机，加紧研究了用碳复合球团矿生产粒铁的 ITmk3 法。

368

自 1996 年以来，神户制钢公司与国内外研究机构合作进行了 ITmk3 的基础研究，1999 年在神户制钢公司加古川炼铁厂内建设了实验工厂，对工艺的可行性进行了实验论证。

接着，2002 年在美国明尼苏达州建设了示范性实验工厂，获得了实现连续生产和商业化设备建设用的工艺技术数据，2004 年完成了实际试验。2009 年在美国明尼苏达州完成了年产 50 万 t 规模的商业 1 号的建设，2010 年 1 月开始商业化生产。

6.9.3.2 技术试验示范效果

中间试验厂、示范性实验厂和商业化厂的技术数据示于下表。

表 6.9.5 ITmk3 设备的技术条件

	加古川实验工厂	Mesabi 示范工厂	商业工厂
建设地点	KSL 加古川厂	Northshore 美国明尼苏达州	Hoyt Lake, 美国明尼苏达州
操作时间	1999.8-2000.12	2001.5-2004.7	2004.8-至今
生产能力, t/a	3000	25000	500000
RHF 直径, m	5	14	60
投资		2600 万美元,	2.35 亿美元

表 6.9.6 粒铁的技术参数

金属铁	96%~97%
碳	2.5%~3.0%
硫	0.05%~0.07%
粒度	5~25mm

6.9.3.3 成本效益分析

美国动力钢公司和神户制钢投资 2.35 亿美元，建成年产 50 万 t 工厂，生产粒铁。

6.9.3.4 技术应用前景分析

ITmk3 工艺可以使用较便宜的低品位铁矿石和煤，适合煤和矿石资源丰富的地区，应用前景良好，但是由于转底炉工艺的特点，目前，其最大生产规模只在

50 万吨。

6.9.3.5 技术知识产权情况

技术属于日本神户制钢等。

6.9.4 HIsarna 熔融还原工艺

6.9.4.1 技术概述

Isarna 是一种新型熔融还原工艺,应用反应炉中煤预热和部分高温分解技术、矿粉旋涡熔融技术、以及矿粉还原生成铁水的熔融炉技术,即煤在一个密闭的双螺旋反应器中预热(不向大气中排放有害气体),转化成热炭后,热装入炼铁熔炼炉。铁矿粉加入到炼铁熔炼炉中,同时用氧枪吹氧使炉内形成旋涡气流。铁矿粉在炼铁熔炼炉中发生还原反应生成铁水。由于直接用精矿粉和煤冶炼,免去了烧结和焦化工序,且整个工艺过程的热量流都是直接关联,从而避免了原料与工业废气的中间处理过程导致能量损失。该工艺具有很大的灵活性,可以使用生物能源、天然气或是氢替代部分煤。

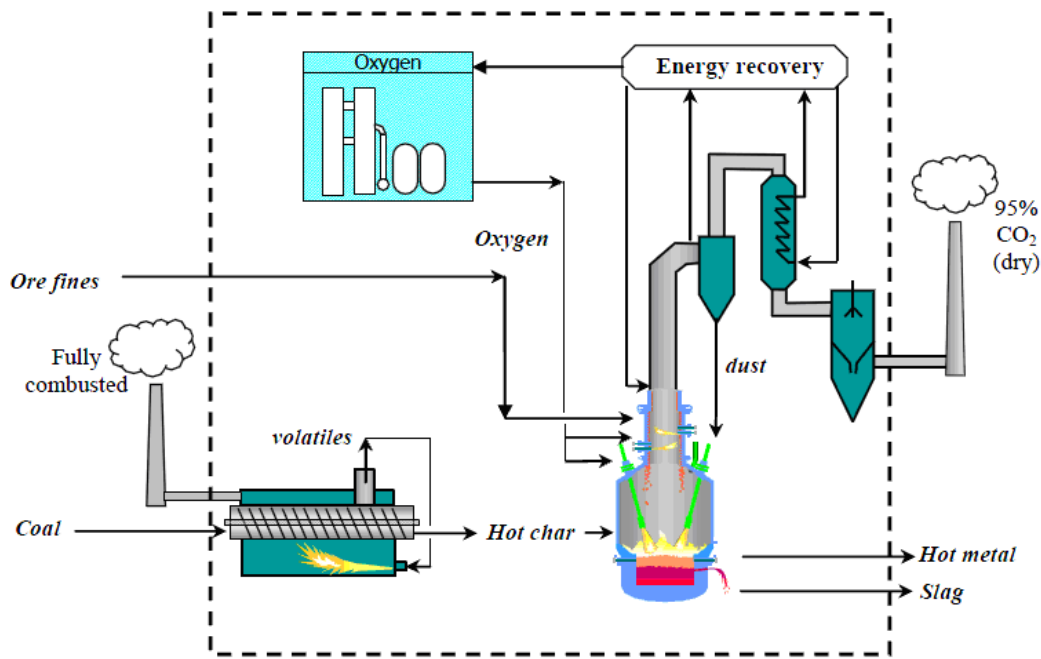


图 6.9.5 Isarna 概念示意图

与传统高炉工艺相比, Isarna 工艺可大大减少煤的消耗,相应地减少 CO₂ 的产生量。Isarna 工艺实现了几乎所有煤气的利用,因为该工艺是全氧的,炉顶煤气中没有氮气,因此,该工艺炉顶煤气在 CO₂ 储存前只需经过简单处理。

6.9.4.2 技术试验示范效果

目前将 Isarna 工艺与 HIsmelt 技术一体化，将 Isarna 的熔融旋涡熔炼炉和 HIsmelt 熔融炉相结合，并伴随喷吹纯氧。该项目被重新命名为“HIsarna”，以反映两种概念的合并。采用该工艺有望减少二氧化碳排放 20%。如果配合 CCS，二氧化碳排放量将降低 80%。

目前康力斯正在其位于荷兰艾默伊登的钢厂建设产能为 6 万 t/a 的 HIsarna 中试设备，预计 2011 年 1 月生产出第一炉铁水。该项目总投资 2000 万欧元，其中 500 万欧元来自德国政府，其他资金来自于欧元研究基金和参与 ULCOS 项目的其他合作者。如果项目取得成功，将扩大到半工业化规模，即产能为 70 万 t/a，但在彻底理解这一工艺前，将不会扩大试验规模。

6.9.4.3 成本效益分析

该项目属于欧盟 ULCOS 项目筛选出来的突破性技术之一，投资巨大，目前处于研发阶段，未进行中试。

根据模型计算，采用该工艺，每吨热轧卷的二氧化碳排放有望减少 20%。

—如果配合二氧化碳捕集与封存，而二氧化碳排放能降低 80%

—可以使用生物质

6.9.4.4 技术应用前景分析

项目正处于研发阶段，中试设备也正在建设中，项目最早实行商业化也要到 2030 年。

6.9.4.5 技术知识产权情况

属于欧盟 ULCOS 项目，该技术与力拓的 HIsmelt 直接冶炼技术结合，股权情况不明。

6.9.5 ULCORED 直接还原工艺

6.9.5.1 技术介绍

ULCORED 工艺就是以天然气、煤/生物质气化产生的合成气或氢气为还原剂，进行直接还原铁矿石。该工艺根据还原气的不同，又可分为天然气基 ULCORED 与合成气基 ULCORED。

技术的研发目标是优化还原气体以使 CO₂ 的排放量达到最小化。还原气体是天然气或来自煤或生物质气化产生的合成气体。新的 ULCORED 概念是通过

天然气的部分氧化替代传统热交换器与在煤气净化处理过程中回收利用炉顶煤气和热 DRI 的余热，意图使天然气耗量减到最小。部分氧化产物被送入一个反应器以转换煤气成分，如下列反应式：

$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ 之后进入 CO_2 洗涤净化阶段。用这种方式，可单独收集所有的 CO_2 。在地质封存前，需将 CO_2 充分净化。

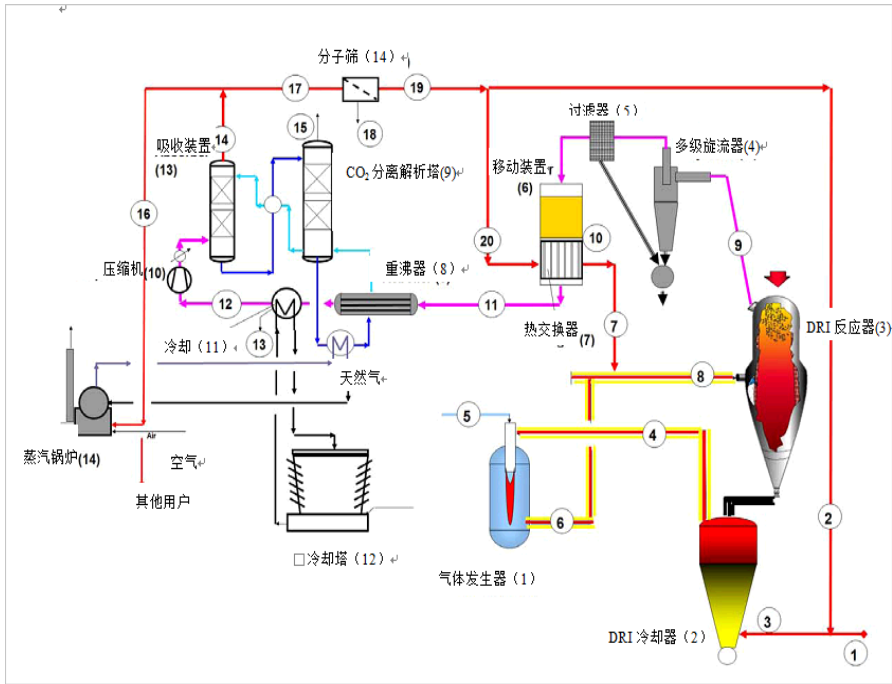


图 6.9.6 ULCORED 直接还原工艺流程图

6.9.5.2 技术试验示范效果

ULCORED 工艺也属于欧盟 ULCOS 项目研发的突破性技术之一，目前处于研发阶段，项目组计划几年后在瑞典 LKAB 进行 1t/h 的中试，来验证这一概念。

6.9.5.3 成本效益分析

根据模型计算，采用该工艺可以获得以下效果：

在“直接还原炉+高炉冶炼工艺”中使用焦炉煤气，吨钢可减少焦炭消耗与 CO_2 排放量约 30%；

在“直接还原炉+ Comelt 电弧炉或 Crisp 连续电弧炉工艺”中使用焦炉煤气，可以减排 CO_2 、增加产量；

预计煤气化合成气基 ULCORED 流程将成为主要方式，分离出 CO_2 的 H_2 可用于钢厂；

采用“使用焦炉煤气、直接还原出的 LRI（低还原率铁）+传统高炉或无氮高

炉工艺”生产铁水，可减排 CO₂。

另外，ULCORED 技术中的 POX 反应器还可用于焦炉煤气进入高炉前的重整改质。这意味着将热 CO 和 H₂ 喷入风口可减少整个高炉燃料比和 CO₂ 排放量。

6.9.5.4 技术应用前景分析

该技术应用前景良好，我国煤炭资源丰富，煤制气技术也已成熟，发展起来会很快。欧盟的这一项目，预计在 2020 年实现商业化。

6.9.5.5 技术知识产权情况

属于欧盟 ULCOS 项目的一部分。

6.10 薄带连铸技术

6.10.1 技术介绍

① 技术概况

薄带连铸技术被誉为 20 世纪冶金工业最伟大的技术进步。薄带连铸技术将连续铸造、轧制、甚至热处理等整合为一体，简化了从钢水到热钢卷的生产工序，使生产的薄带坯稍经冷轧就一次性形成工业成品，简化了生产工序，缩短了生产周期，实现铸轧一体化。与传统连铸热轧工艺相比，薄带连铸技术更加节能、环保。

② 基本原理

薄带连铸技术因结晶器的不同分为带式、辊式、辊带式等，其中研究的最多、进展最快、最有发展前途为——双辊薄带连铸技术（见图 6.9.7）。该技术在生产 0.7~2mm 厚的薄钢带方面具有独特的优越性，其工艺原理是将金属液注入一对反向旋转且内部通水冷却的铸辊之间，使金属液在两辊间凝固形成薄带。双辊铸机依两辊辊径的不同，分为同径双辊铸机和异径双辊铸机。两辊布置方式有水平式、垂直式和倾斜式三种，其中尤以同径双辊铸机发展最快、已接近工业规模生产的水平。

③ 流程图

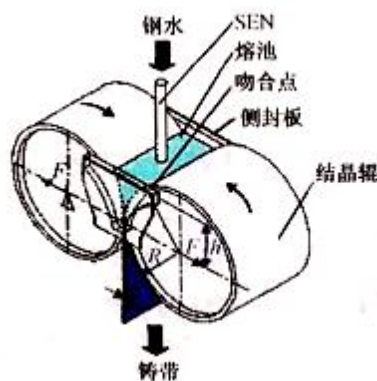


图 6.10.1 双辊薄带技术

④ 发展历程

1857 年，英国的 Bessemer 首次尝试采用双辊技术直接铸造钢带，并获得了该项技术的第一项专利。在最初的 100 多年里，由于制造技术和控制技术等相关技术的落后、过程控制较为困难，产品质量无法保证，使得这项技术基本上处于停滞状态。

新日铁是世界上率先进行薄带连铸工业化的厂家，自 1986 年开始进行薄带连铸技术开发，1989 年建成 1 台薄带连铸试验机，1998 年建成一条工业化规模的双辊薄带连铸连轧线。

澳大利亚 BHP 公司与日本石川岛播磨（IHI）从 1985 年开始合作开发薄带连铸技术，1989 年开始实施“M-PROJECT”，1997 年底建成工业规模的薄带连铸连轧试验线，并进行了近 3 万 t 的试验。2000 年美国纽柯公司参与研发，2002 年在 Crawfordsville 建设的薄带连铸工业化生产线投入试生产，2007 年第二条线也开始建设，到目前已累计试生产了 80 万 t 低碳钢产品。

1986 年法国 Usinor 建设了 1 台薄带连铸试验机，1988 年蒂森参与并开始实施“Myosotis”项目。意大利的 AST 从 20 世纪 90 年代初也着手开发薄带连铸技术。1995 年奥钢联在意大利 AST 的 Terni 厂建设试验线。1999 年 Usinor、KTS、AST 及 VAI 联合，在蒂森克虏伯的 Krefeld 厂建成 1 条工业化试验线。2001 年增加了 1 架在线四辊热轧机和 1 台在线感应加热器。2003 年安装了 1 套双卷取机系统以实现“无头浇铸和轧制”。与此同时，意大利 AST 基地 Terni 厂在 2003 年进行了升级改造，安装在线热处理炉，从而不仅能够以工业规模生产碳钢，而且还能生产特殊钢种。

韩国浦项从 1986 年开始研究薄带连铸技术，先期与 DAVY 公司合作，先后建成 2 条试验线，2004 年开始建设 1 条工业化示范线，2006 年建成并投入试生产。

6.10.2 技术试验示范效果

目前双辊式薄带已有多条试验线和接近工业化水平的半工业生产线，具有代表性的工艺有：美国纽柯公司的 Castrip、欧洲 Eurostrip、韩国浦项 Postrrip、日本新日铁的 Hikari 和宝钢 Baostrip 等，其中工业化水平最高的是 Castrip 生产线。

① Castrip

2000 年在美国纽柯钢公司建设该项目，并于 2002 年 5 月投产后已生产厚 0.85~1.85mm 超薄带钢 45 万 t，产品性能可与传统热轧低碳钢媲美。连浇炉数最高达 9 炉，连浇 12h（约 1000t），作业率达 84%，金属收得率达 91%，Castrip 生产线基本达到了工业化水平。Castrip 设备投产以来，尽管已对不锈钢（409 铁素体）、硅钢和高碳钢等进行了大量中间试验，但主要品种是建筑业、农业、制造业和包装材料等。

Castrip 流程可以高残余元素废钢为原料。带钢冷却速度快，残余元素（如：铜）在未形成偏析之前已经凝固，目前该生产线已浇注成功含铜 0.6% 的钢水。将来产品范围将扩大到易切削钢种。Castrip 流程生产的带钢越来越薄，目前发货的最薄带钢厚 0.84mm，主要替代农业用冷轧薄板。与此同时，第二条 Castrip 生产线已开始试生产。Castrip 利用自身优势生产传统工艺无法生产的高附加值产品和新的连铸超薄带钢产品。

② Eurostrip

蒂森克虏伯、原于齐诺尔和奥钢联于 1999 年开始共同开发 Eurostrip 工艺，三家合作方全都具备主要试验设施。蒂森克虏伯钢公司和安赛乐公司成立了克雷菲尔德铸机，奥钢联、蒂森克虏伯钢公司和 CSM 在意大利特尔尼的 AST 厂进行硅钢和碳钢的浇铸试验，目的是为了获得除生产不锈钢外的其它钢种的知识，这对于今后这种工艺的推广是至关重要的。

Eurostrip 工艺的两个厂均配有在线轧机。克莱菲尔德厂在其酸洗线上安装了自动表面检测系统。铸态薄带的延伸率稍低，但经过在线轧制以后，其性能特别是延伸率明显改善。经过冷轧后，力学性能满足要求。内部夹杂物以小颗粒的形式存在，且分布均匀。因此，产品的抗腐蚀能力大大提高。经冷轧后，产品表面光泽度可以与传统产品相媲美。

③ Hikari

1985 年新日铁和三菱开始联合开发双辊式薄带钢连铸技术，1993 年成功地浇铸出了不锈钢带卷。1996 年 1 月，新日铁和三菱重工投资 1.04 亿美元在新日铁光厂建了 1 套薄带钢铸轧机。这台薄带连铸机可连浇 4 炉 60t 钢水。因生产成本要比传统的工艺高，没有连续生产。生产成本是目前的研究重点，研究的下一代产品是 TWIP 和硅钢。1994~2007 年日本新日铁公开薄带连铸技术专利 198 篇。

④ Postrip

浦项最初的薄带连铸技术是 1988 年开始与英国的戴维公司合作开发的，总投资 1760 万美元的双辊式带钢中试设备 1995 年 4 月建成。韩国 POSCO 为增强其在全球的技术竞争力，积极申报国外专利，截止 2005 年底，在中国、美国、日本、加拿大、欧洲专利局和澳大利亚共申请双辊铸轧技术专利 16 项。

2006 年 7 月，浦项最新研制的年产 60 万 t 的 Postrip 设备投产，是目前世界上最新投产、规模最大的双辊式薄带连铸机。Postrip 技术的热试正在按计划进行，与连铸和在线轧制相关的问题也得到了解决。产能的不断提高对于该技术商业化具有很大的促进作用。此外，浦项公司用 Postrip 工艺还试制了铁素体不锈钢和高锰钢等特殊钢。新开发出的创新型 Postrip 薄带连铸生产线具有环境友好的特点，能够由钢水直接浇铸成厚度为 2~4mm 的薄钢带，可大幅度降低设备投资、能源消耗和生产成本。

目前，浦项公司已采用 Postrip 生产线生产 1.5~2.5mm 厚的不锈钢热轧板。然而，该工艺的主要问题是改善薄带质量和保证设备顺利连续地运行。浦项公司计划待设备稳定运行后，Postrip 工艺以生产镍基不锈钢板为主，而 Pohang 厂原有的热带设备专门用于生产普碳钢，以此可提高生产效率和降低成本。

Postrip 产业化生产的优点是：生产规模较小，机组投资少；铸带可不卷取，直接切割成钢板，省略了卷取机和夹送辊，容易实现无引带操作，生产机组大大简化；采用 Postrip 工艺生产特种合金薄带比传统工艺生产的成材率高，经济效益大。

⑤ Baostrip

宝钢薄带连铸机（Baostrip）的典型工厂在 2003 年 4 月正式投入热试。截至 2007 年 10 月 11 日，进行了 115 炉试验，实现了碳钢、不锈钢和硅钢等钢种整炉成卷。已申请专利 20 多项、技术秘密 8 项，薄带铸坯边部质量、表面质量明显提高，表面横、纵裂纹明显减少。目前，除生产不锈钢外，还关注硅钢。

6.10.3 成本效益分析

① 投资成本

目前，各国薄带连铸技术的开发应用状况可知，一台带钢连铸机的生产规模为 20~50 万 t/a，包括带钢连铸在内的炼钢厂总投资不超过 1.1~1.5 亿美元，单位投资成本为传统流程的 50%，约 220~300 美元/t。采用双辊薄带连铸工艺可大大缩短工艺流程，从浇铸到卷取的时间不超过 15min，其生产线长度约 60~150m，具有节约能源、减少环境污染的优势。

② 效益分析

由于薄带连铸技术实现了“一火成材”，钢材生产的节能效率和生产效率大大提高。与连铸连轧过程相比，每吨钢可节省能源约 800kJ/t 钢，CO₂ 排放量降低约 85%，NO_x 降低约 90%，SO₂ 降低 70%。由于双辊薄带传热快，需要加热时很快能够升温到预定的温度，从而节约能量消耗。以 Eurostrip 公司的 Krefeld 厂为例，吨钢能耗仅比传统连铸热轧工艺低 7.5 倍。因减少了中间环节的二次加热操作，缩短了加热时间，从而减小了吨钢有害气体的排放量。CO₂ 约减少 7 倍（由 185kg/t 降为 25kg/t），NO_x 减少 15 倍（从 290g 降为 10g），SO₂ 减少 3 倍（从 50 减至 15g）。总体上，有害气体排放减少了 70%~90%。

通常，带钢生产成本随着终端产品厚度减小、铸坯厚度增加而增加。以薄板坯连铸为例，当带钢轧至 1.2mm 以下，生产成本会迅速增长。而双辊薄带生产成本与传统工艺相比也有显著降低。一是，由于轧制道次的减少；二是，因为铸坯的运输成本的降低；三是，由于铸辊的快速冷却能力使得钢材中的有害元素（Cu、Sn）有更高的固溶度，从而允许有更多的废钢加入量。

采用冷轧、热轧和薄带连铸工艺生产的薄带成本比较表明，加工的带材越薄，生产成本越高，热轧成本增加显著，冷轧次之，薄带连铸成本最低。如果用薄带连铸产品替代冷轧产品，每吨钢可降低成本 60~70 美元/t 钢。

6.10.4 技术应用前景分析

薄带连铸除了设备投资成本低，改造费用少，生产周期短等优点，还可以与现有的联合钢铁厂嫁接。对于炼钢能力过剩的厂家，可以增设薄带钢连铸设备来扩大其产量和产品范围。双辊薄带连铸工艺是现代钢铁生产的前沿技术。该技术将广泛应用于不锈钢薄带的生产，其它高合金特种钢双辊连铸技术的研究与应用也指日可待。据相关专家预测，双辊薄带连铸一些关键技术正在得到解决。2010 年全世界用该项技术生产的带钢将占带钢总产量的 3%~5%，到 2020 年可能提高到 10%~15%。

薄带连铸技术尤其适合我国钢铁工业的发展情况，由于能够有效抑制 Cu、S、P 等夹杂元素在钢材基体中的偏析，从而可实现劣质矿资源（如高磷、高硫、高铜矿或废钢等）有效综合利用，节省宝贵资源，达到可持续发展目标。

尽管近十几年双辊薄带连铸技术取得了很大进展，然而，要工业规模正常生产，工艺还有待进一步完善。需采用先进的控制技术解决钢水的注入系统及浇铸过程存在的控制问题，保证连铸过程的稳定性和连续性；侧封板是带钢连铸机的关键组件，其结构的设计、材料的选择对带钢边部质量和漏钢影响很大，至今仍是研究的重点课题之一。目前使用的铸辊大多是内部水冷的钢辊、铜辊或镀镍的铜辊，造价高，并且寿命低。

此外，要尽可能保持钢水清洁，进入带钢连铸机时需采用惰性气体保护，如果处于真空环境，生产的薄带将不再需要酸洗；薄带厚度不均匀，不利于冷轧，成品率低；主要缺陷有裂纹、边部缺陷、夹渣和偏析等；薄带宽度较窄，如果要替代热轧带钢，宽度应达到 2m 以上。

6.10.5 技术知识产权情况

有关薄带连铸技术的发明专利有 48 条，实用新型专利 33 条。以宝山钢铁股份有限公司为申请人的专利数量最多。

序号	技术名称	公开（公告）号	申请（专利权）人	申请日期
1	双辊薄带连铸开浇方法	CN1887479	宝山钢铁股份有限公司	2005.06.30
2	一种薄带连铸铸带带形控制方法	CN101003079	宝山钢铁股份有限公司	2006.01.18
3	双辊薄带连铸方法	CN101091958	宝山钢铁股份有限公司	2006.06.23
4	薄带连铸结晶辊或铸坯连铸结晶器表面修复方法	CN201261063	东北大学	2008.09.27

6.11 精炼干式真空泵脱气技术

6.11.1 技术介绍

① 技术概况

近年来工业发展和提高工业产品质量的重点在于开发更高性能的材料，其中开发高品质钢材是主要目标之一。一般来说，提高钢品质的关键环节在于炉外精炼，特别是钢水的真空脱气。

湿泵在钢水真空脱气工艺中已经应用超过 45 年。多年来一直将蒸汽喷射真空泵作为钢水脱气工艺的唯一解决方案，其原因是钢水脱气需要大功率泵且操作条件恶劣（高温、粉尘等），这些就需要一种非常可靠的解决方案。蒸汽喷射泵需要使用大量的蒸汽（5~40t/h）才能达到必需的真空度（0.5mbar）。近些年，很少尝试使用机械泵，迄今为止只在小容积的真空脱气装置（5~40t 钢包）中使用液体环式泵，但也属于湿式泵。

在 90 年代初期，高功率干式压缩机的开发打开了在大型钢水脱气装置中应

用干式真空技术的道路。用于钢水脱气大型设备的干式真空泵的发展经历了三个阶段，逐渐将大流量罗茨式真空升压机与螺旋式真空压缩机卓越的压缩能力结合在一起。

RH 干式真空精炼装置与传统真空系统最大区别在于：抽真空装置不同。传统采用的是多级蒸汽喷射泵，而新装置采用的是干式机械真空泵。该套系统的主要设备包括：螺杆泵（抽气能力 $400\sim 2000\text{m}^3/\text{h}$ ）、中度真空用罗茨泵（抽气能力 $3000\sim 10000\text{m}^3/\text{h}$ 、深真空用罗茨泵（抽气能力 $14000\sim 50000\text{m}^3/\text{h}$ ）等。根据处理能力不同，抽气能力可调整。

每组泵布置在一个独立的台架上，泵之间由互相连通的管道系统连接。这些泵均配备可变速电机驱动（VSD），以确保泵在台架上的正确运转。气体吹洗和水冷却连接设在台架边缘处，采用单点连接方式。所有电气线路连接到一个安装在台架上的单独控制面板上。

为达到 VD 炉所需要的更低压力，多级增压机组是必需的。其布置已通过计算机模型进行了优化，以确保泵的数量和布置符合工艺要求。对于 VD 工艺，一套完整的增压泵是必要的，且增压泵采用干式真空泵。频率转换器控制增压泵的转速，从而控制输出功率并优化操作。所需台架（泵组）的数量取决于钢包容积，即取决于从钢水中排出的气体负荷、泄漏率和工艺气体负荷（氩气流量）。

② 主要优点

与原有的蒸汽喷射技术相比，干式真空技术的主要优点是：

（1）能耗和运行成本减少了 10 倍多（见 6.2.5.3 中成本效益分析）；

（2）更好的技术性能（较高的脱氢率）。脱氢率取决于钢水上方气体中氢的分压（由西韦茨定律决定）。采用湿式泵时，钢水上方的真空气氛充满水蒸汽，从而使钢水上表面具有较高的氢分压。为获得良好的脱气效果，必须在低压（高真空）下工作。而使用干式泵，压力对脱气效果的影响不大，可灵活控制所需的真空度。在较高压力（10mbar）和较低压力（0.5mbar）下，脱气效率相同；

（3）更容易维护。由于该技术不使用水而采用过滤器，因而使管道/阀门系统维护更容易。该泵的机械装置操作简单，从维护的角度考虑，高可靠性使系统更方便；

（4）减少对环境的影响。实际上几乎对环境没有影响。由于所有的水只用于冷却，且工艺过程中不涉及水。采用了滤尘系统，使粉尘浓度降至 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。以一套每年工作 8000 小时 $100\text{t}\sim 150\text{t}$ 的 VD/VOD 系统的干式真空泵系统为例：可节约化石燃料（以天然气为例）680 万 Nm^3/a ，减少 CO_2 排放 1.3 万 t/a 。

（5）减少碳足迹，并降低温室气体排放。减少能耗，不直接使用天然气燃烧（但蒸汽喷射泵需采用），有助于减少碳足迹（CFP）和温室气体（GHG）排

放。这对当前所有技术特别是像钢铁这样高耗能行业是必须要考虑的问题；

(6) 快速开/关服务：基本采用按钮操作，方便的一键式自动化操控。

6.11.2 技术试验示范效果

重钢 210t RH 干式真空精炼装置项目从 2008 年初开始策划，2009 年 9 月正式开工建设，2010 年 6 月 25 日成功处理了第一炉钢水。经过 70 天在重钢长寿新区的试生产，统计数据显示，干式真空泵可以完全实现传统多级蒸汽喷射泵所能达到的全部功能。该设备采用改进设计的过滤系统，15min 内达到低氢含量，在 19 组台架上共布置 76 个泵。RH 干式真空精炼工艺具有脱氢、脱碳、脱氧功能，对品种钢开发和提升钢水质量具有重要作用。

这套装置与传统真空系统相比，启动和运行更灵活、可靠，依靠处理模型可做到“一键式”操作，尤其节能、环保方面效果十分明显。较传统蒸汽喷射泵，这套新装置预抽真空时间更短、脱氢能力更强。经过它处理后的钢水中[H]可稳定控制在 1.5ppm 以下，且每吨钢的能源成本降低 10 元以上。干式真空装置每吨钢耗电约 4kW，循环冷却水 0.3m³。

6.11.3 成本效益分析

以 100t VD 炉运行成本及节能情况为例，进行经济效益分析（见下表）。成本评价基于每天至少 20 炉、蒸汽发生器工作 24 小时；能耗计算基于蒸汽喷射泵有 10%停机状态，并能维持蒸汽量的情况下。

喷射泵	
蒸汽消耗	8.00 kg/h
蒸汽喷射泵功率	6.32MW
蒸汽喷射泵停机率	10%
泵水功率消耗	0.60 MW
VD 炉每炉功率消耗	2.29 MWh
VD 每炉价格	146.00 欧元
VPS	
干式系统功率	600 kW
大流量罗茨泵的功率	500 kW
安装的干式系统泵的百分比	55%
安装的大流量罗茨泵功率所占的百分比	75%
VD 炉每炉电耗	0.138 MWh

VD 每炉价格	5.50 欧元
功率比	16.63
成本比率	26.55
每天节约成本	2,810.02 欧元
每年节约成本	899,205.32 欧元

以钢水处理量为 100~150t 的干式真空泵系统为例,投资成本约为 1400~1800 万元人民币。运行时大约耗电 180 元/h, 维护费用 10 万元人民币/a。

6.11.4 技术应用前景分析

目前推广情况: 罗马尼亚、意大利、南非、韩国、摩尔多瓦等国家共 12 套。在中国, 重钢成为该技术的试点基地。实际应用效果明显。

基于该技术可应用所有需要真空脱气的二次冶金流程, 例如 VD、VOD、VT、RH 和 VIM 等, 设计先进的生产流程模拟以及创新灵活的真空脱气模块等优势, 将有良好的市场前景。

6.11.5 技术知识产权情况

Adrem Invest 公司在 1997-1998 年发明干式机械泵的真空脱气技术, 已申请专利。专利号为 RO 118309。

6.12 炼钢熔渣粒化新技术

6.12.1 技术介绍

①技术概况

宝钢经过 12 年独立自主研发和产业化, 形成了一种安全环保资源化的炼钢熔渣粒化新技术——BSSF 渣处理技术。该技术是将高温熔态冶金渣在一个转动的密闭容器中进行处理, 在工艺介质和冷却水的共同作用下, 高温渣被急速冷却和碎化, 并被排出。所形成的滚筒渣粒度小而均匀; 成品渣性能较稳定, 渣钢分离效果好, 可以直接进行磁选。熔渣的处理过程是在封闭的筒体内进行, 消除了传统渣处理污染现象; 处理过程污水循环使用, 集中排放的蒸汽符合国家环保标准。BSSF 渣处理系统包括: 滚筒本体、控制系统、冷却水系统、蒸汽排放装置、渣罐倾翻装置、成品渣输送装置等, 工艺装置占地面积仅 200m³。该技术在国际上率先实现了炼钢熔渣不落地、短流程、快速清洁化的渣处理, 符合现代钢铁企业实现循环经济、可持续发展的需求, 达到世界领先水平。

在这个工艺过程中, 由于熔渣与钢水冷却的收缩率不同, 因而互不包容; 同

时熔渣的处理是在滚动的介质中进行的，熔渣无法包裹水形成密闭空间，所以不会发生爆炸，安全性好；在处理过程中，滚动的工艺介质将熔渣充分地颗粒化、同时冷却水又将游离氧化钙消解，因此渣的稳定性好。图 6.12.1 为 BSSF 技术工艺流程图。

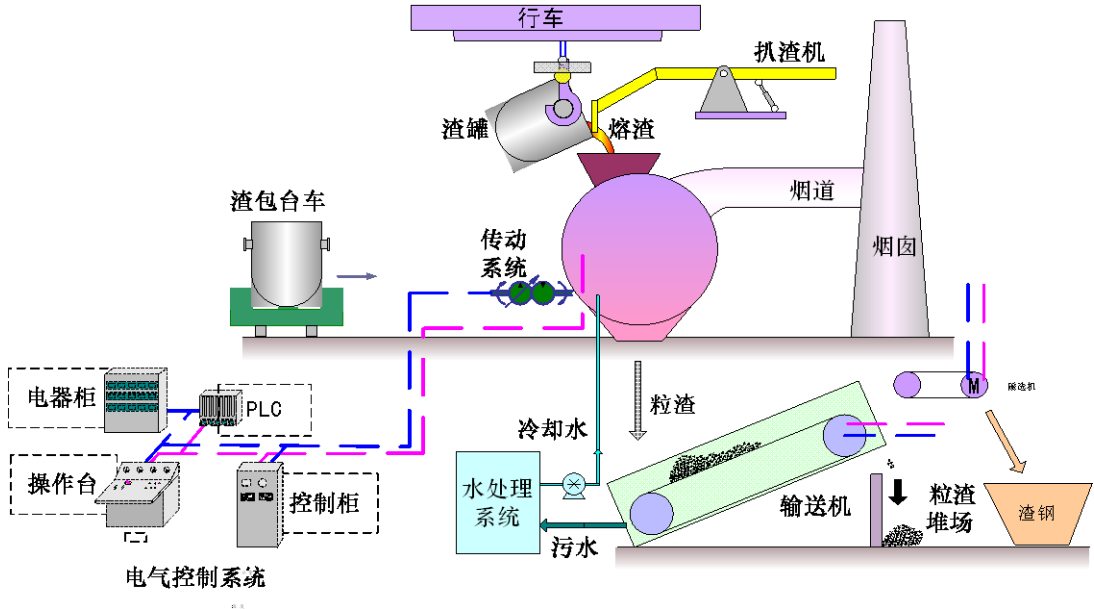


图 6.12.1 BSSF 技术工艺流程图

②技术创新点

- (1) 工艺创新：变“先冷却后破碎再分离的分段处理”传统工艺为“多介质分区分级冷却、破碎和渣钢分离同步完成”的新工艺。
- (2) 流程再造：变“并、串联间歇式”作业为“连续、紧凑、匹配”作业，实现前后工序协调生产，劳动生产率提高 90%。
- (3) 环保化：变“开放式、无组织排放”传统方式为“封闭式、受控达标排放”的清洁化生产。
- (4) 资源化：变钢渣“长期陈化、自由 CaO 缓慢消解”方法为“快速即时消解”的工艺技术，攻克了钢渣性能不稳定的国际难题，使尾渣深度资源化，提升了尾渣附加值；金属回收率提高 30%以上。
- (5) 专利化：构建了以专利族为主的知识产权保护体系，专利 34 项（授权 29 项），发明专利 6 项（授权 3 项）；国外专利 1 项，技术秘密 15 项。
- (6) 系列化：针对不同性质炉渣和工况，开发了 A、B 两大类系列化成套装备。
- (7) 市场化：完成了研发和产业化全过程创新，实现了国内外市场的商业化（16 套）。

③主要性能指标

(1) 最大处理能力 3t/min; (2) 处理对象高温熔渣; (3) 排渣温度: 约 150℃; (4) 经过 BSSF 工艺处理后的钢渣呈颗粒状, 细小且均匀, 大都处于 0.3~10mm 范围内; 排渣粒度小于 70mm 的粒渣所占比例大于 80%; (4) 蒸汽含尘量 $\leq 50\text{mg/m}^3$; (5) 占地面积约 200m²。

6.12.2 技术试验示范效果

宝山钢铁股份有限公司渣处理场的粉尘由大量的无序排放降到 50mg/Nm³, 渣处理每年减排粉尘约 1000t, 作业环境得到极大改善。宝钢钢渣经 BSSF 处理后, 100%直接循环利用, 可广泛应用于冶金及建材领域, 如返回高炉或转炉、水泥原料、微粉、商品砂浆、耐磨地坪、透水路砖等。

6.12.3 成本效益分析

宝山钢铁股份有限公司直属厂部共采用了 8 台 BSSF, 与之前采用的 ISC 浅盘法渣处理工艺相比, 仅 2004~2006 年三个年度就节省 3631.25 万元, 因钢渣和渣钢品质提高而新增利润 1.55 亿元。

6.12.4 技术应用前景分析

目前推广情况: 宝钢 14 套、马钢 3 套、宣钢 1 套、南昌钢铁 1 套、印度 JSW 钢铁 2 套、韩国浦项 2 套, 共计 23 套。

除了在宝钢、马钢等国内大中型钢厂得到推广和应用外, 还出口到印度 JSW 和韩国浦项制铁等国际大型钢铁企业, 有力地推动和促进了我国钢铁行业在该领域的技术进步。

6.12.5 技术知识产权情况

专利 34 项 (授权 29 项), 发明专利 6 项 (授权 3 项); 国外专利 1 项, 技术秘密 15 项。

6.13 不锈钢渣干法处理技术

6.13.1 技术介绍

① 技术概况

不锈钢渣在倾倒、冷却和存放过程中扬尘严重、污染环境; 钢渣外排不仅占用土地, 更不符合废渣资源综合利用的循环经济要求。

太钢新建 150 万 t 不锈钢工程，原有的钢渣处理能力、处理工艺、环境保护、节能减排、综合利用方面，已远远不能满足不锈钢项目投产后所产生的不锈钢渣的处理要求。为此，太钢组织专人对国内、外不锈钢渣处理工艺进行研究，提出了不锈钢渣处理选用干法处理工艺，走一条自主创新之路，利用日元贷款与企业自筹资金建设不锈钢渣处理线。

目前，不锈钢渣处理工艺主要有：湿法及热泼法，由于湿法水耗大，热泼法需场地大且扬尘污染严重；而太钢位处市区、场地受限、水资源贫乏，且不锈钢渣种类繁多，成分性能各异，不能采用单一热泼法或湿法处理。为此，本项目借鉴吸收了湿法及热泼法工艺优点，开发了不锈钢渣渣罐喷淋冷却、干法处理技术工艺。该工艺有效解决了水资源紧缺、场地限制等问题，满足了生产环保要求，回收了不锈渣钢，降低了尾渣中重金属含量，不锈尾渣也变废为宝。

② 技术创新点

- (1) 采用国际最先进的磁感应技术；
- (2) 开发了块状钢渣反复破碎处理技术，实现了最大限度的金属回收；
- (3) 配备了国际上先进的可以高精度完成含水很高、粘性大的难筛物料的星筛和物料抛起向前弹跳的振网筛分技术；
- (4) 在保证扬尘较小的前提下，采用 PLC 集中控制对不同品种的不锈钢渣带罐冷却工艺；
- (5) 加入固态硫酸亚铁进行六价铬治理技术。

③ 主要先进技术

- (1) 先进的冷却工艺技术：在保证扬尘较小的前提下，采用 PLC 集中控制对不同品种的不锈钢渣带罐冷却工艺。
- (2) 先进的渣钢分选技术：采用国际最先进的磁感应技术，吹出程序定位的原料实现分选。
- (3) 先进的钢渣破碎技术：开发了块状钢渣反复破碎处理技术，实现了最大限度的金属回收。
- (4) 先进的钢渣筛分技术：配备了国际上先进的可以高精度完成含水很高、粘性大的难筛物料的星筛和物料抛起向前弹跳的振网筛分技术。
- (5) 加入固态硫酸亚铁进行六价铬治理技术。

6.13.2 技术试验示范效果

本项目的实施达到了节水、节能、保护环境、占地少、金属高效回收和尾渣综合利用的总目标，生产控制采用实用、可靠的 PLC 控制系统，自动化程度高，生产工艺稳定。并获得了以下效果：

(1) 减少扬尘污染；减少六价铬（ Cr^{6+} ）污染；(2) 节约用地。本项目的实施，解决了不锈钢渣的出路问题，避免由于堆存占用大量土地，符合当地的城市总体规划，为地方经济建设添砖加瓦；本项目采用了先进的钢渣冷却技术，冷却效率高，减少冷却用渣罐，减少占地；项目处理工艺布置紧凑，占地少；(3) 节电、节水。采用钢渣预处理技术，减少了钢渣处理量，减少了设备的处理能力；本项目采用高效、实用、合理和可靠的破碎、筛分和分选设备，节能；采用先进的钢渣冷却工艺，采用自动化控制喷水量。冷却用水采用废弃的浓盐水，不用新水；(4) 资源再利用，循环经济。由于干法处理技术的实施，使得尾渣的进一步利用，如用作水泥添加剂、土壤改良剂成为可能，这将是下一步的研究课题。

6.13.3 成本效益分析

经济效益见下表所示：

项 目	投产前	投产后
金属回收率	2%	5%
6~11 月份金属回收量	4200t	10003t
全年回收金属量	8400t	20006t
全年产值	5849 万元	13930 万元
全年新增产值	—	8078 万元
全年新增利润	—	5214 万元

6.13.4 技术应用前景分析

通过回收高品位金属，可直接用于炼钢生产。干法处理工艺可以保持尾渣的矿物活性，提高尾渣的综合利用率，符合资源综合利用、循环经济的企业理念，是企业今后发展的方向。由于干法处理技术的实施，使得尾渣的进一步利用，如用作水泥添加剂、土壤改良剂成为可能，扩大了钢渣的使用范围。

6.13.5 技术知识产权情况

未查到相关专利。

6.14 炉窑氮氧化物控制技术

6.14.1 技术介绍

氮氧化物包括 N_2O 、 NO 、 N_2O_3 、 N_2O_4 和 N_2O_5 ，总称氮氧化物，用 NO_x 表示。人类活动产生的 NO_x 中燃烧产生的量约占 90%。

燃烧产生的 NO_x 主要来自两条途径：一是空气中氮与氧在高温下反应产生 NO ，通过这种途径产生的 NO_x ，称为高温型 NO_x ；二是燃料中的氮经燃烧分解产生的 NO_x ，称为燃料型 NO_x 。

高温型 NO_x 的生成与氧和火焰温度有关。但无论是高温型 NO_x 还是燃料型 NO_x 均与空气的混合量有关。

钢铁行业 NO_x 主要来源于各种炉窑燃烧废气。包括球团回转窑、烧结机、石灰窑、电炉、焦炉、热风炉、轧钢加热炉、退火炉、锅炉等。但都属于燃烧产生。钢铁企业炉窑采用的燃料以往均以煤、重油为主。但由于钢铁行业在“十五”、“十一五”期间采取各种节能措施，如大力推广余能余压利用技术，高炉煤气、转炉煤气回收技术等，使钢铁行业的能源结构发生了较大的变化。钢铁联合企业除工艺冶炼炉窑外，目前已基本没有钢铁企业采用重油作为炉窑的燃料。全烧煤锅炉也基本取消，只存在极少数掺烧煤锅炉，轧钢加热炉、退火炉等主要燃料为焦炉煤气、混合煤气、有的是天然气。具体情况见下表。

表 6.14.1 各种炉窑采用的燃料情况

序号	炉窑类型	采用的燃料			备注
		钢铁联合企业	单一轧钢	未配高炉的电炉企业	
1	球团回转窑	煤、煤气	-	-	
2	烧结	焦炭、煤、煤气	-	-	
3	石灰窑	少量煤、煤气	-	-	
4	电炉	少量油氧、气氧	-	-	
5	焦炉	高炉煤气、焦炉煤气	-	-	
6	热风炉	转炉煤气、高炉煤气	-	-	
7	加热炉	混合煤气、高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气	少量煤、发生炉煤气、天然气	少量煤、天然气、发生炉煤气	
8	退火炉	混合煤气、高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气	少量煤、发生炉煤气、天然气	少量煤、天然气、发生炉煤气	
9	锅炉	少量煤、煤气	煤、发生炉煤气	煤、发生炉煤气	

从燃烧产生氮氧化物的途径及钢铁行业氮氧化物来源及其炉窑使用燃料特点分析，钢铁行业氮氧化物产生的特点是绝大多数属于高温型产生的氮氧化物。

只有球团、烧结、锅炉等炉窑的氮氧化物属于高温型、燃料型两种途径产生的。

氮氧化物同硫氧化物、烟尘等大气污染物一样，都会对环境造成严重危害，因此是钢铁企业环保工程重点治理的对象。氮氧化物的控制措施主要可从两个方面着手：一个方面是抑制燃烧过程中所产生的氮氧化物；另一个方面是对排烟中氮氧化物进行净化处理。

抑制燃烧过程中氮氧化物的产生，可以通过改变燃烧条件来实现，即从氮氧化物的形成机理上改变煤的燃烧条件以减少氮氧化物的排放。目前正在研发或应用的技术有以下几种：

（1）分段燃烧技术

其基本原理是：在燃烧的初始阶段，供入的助燃空气量小于理论空气量，使燃烧处于低氧浓度燃烧状态，降低火焰温度，以抑制氮氧化物的生成；然后通过二次或多次送风，使不完全燃烧区域外缘形成一个完全燃烧区域。试验证明，这种分段燃烧技术可使氮氧化物减少25%~50%。20世纪80年代，世界各国纷纷进行降低燃煤电厂烟气中氮氧化物含量的控制处理，空气分级低氮燃烧技术就是其中有效的一种，现已大量应用在燃煤电厂锅炉，特别是液态排渣的锅炉上。华能北京热电厂就是采用低氮燃烧方式来控制烟气中的氮氧化物浓度。

（2）烟气再循环技术

就是使一部分烟气返回燃烧区，使燃烧区的温度降低，从而减少氮氧化物的产生。一般控制20%左右的烟气循环量。此技术可使烟气中氮氧化物的排放量减少20%。

对烟气进行氮氧化物净化处理，目前正在研发或应用的技术有以下几种：

（1）吸附剂吸收工艺。此技术对烟气中二氧化硫的净化率达90%，氮氧化物的净化率达70~90%，但此技术需要大量的吸附剂，设备庞大，投资大，运行动力消耗也大。

（2）氨选择性催化还原工艺。这种技术净化率相当高，可大于85%；工艺设备紧凑，运行可靠，氮气放空，无二次污染。但此法存在投资与运行费用较高、消耗氨液、氮氧化物不能回收等不足之处。这种技术已经得到广泛应用，常用的催化剂有金属氧化物、沸石和活性炭等。在众多的催化剂中 TiO_2 、 Al_2O_3 或 V_2O_5 催化剂对于去除氮氧化物效率最高。如果不采用催化剂，则所需的反应温度较高，为900~1200℃。

6.14.2 技术试验示范效果

由于钢铁行业各种炉窑的燃烧温度均在 1400℃ 以下，而且绝大多数炉窑使用气体燃料，空气过剩系数在 1.05~1.1 之间，低于煤等其它燃料的空气过剩系数，

整体来说，单一炉窑氮氧化物产生量较小，浓度较低，目前对氮氧化物的监测资料有限，具体数据不清。但根据国外钢铁企业的经验，只有烧结是氮氧化物产生的重要来源，浓度一般也在 $400\sim 600\text{mg}/\text{Nm}^3$ 左右。这一点可以从日本烧结脱硫装置监测数据得到证实，日本烧结脱硫采用活性炭吸附工艺，据监测有 40% 的脱氮效果，经活性炭吸附后，排放烟气中 NO_x 浓度一般在 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，这样可计算出未脱除时的浓度在 $600\text{mg}/\text{Nm}^3$ 左右。但 NO_x 的产生可以是“无中生有”，也可以是“有而不显”，因此，我国钢铁行业炉窑 NO_x 排放情况是否可借鉴国外钢铁企业的排放情况，还有待研究。

6.14.3 成本效益分析

控制 NO_x 可以从抑制 NO_x 产生和后期处理两方面着手。 NO_x 后期处理方面有很多方法，如氨催化还原法、活性炭吸附法等。应用这些方法处理废气中的 NO_x 在理论上是可行的。但其使用条件的严格和运行费用的昂贵，使大多数企业难以接受。抑制 NO_x 产生应该放在首要的位置，后期处理可以作为一种补充手段来进一步降低 NO_x 的排放量。

6.14.4 技术应用前景分析

根据钢铁行业氮氧化物产生的途径，钢铁行业氮氧化物控制措施主要以抑制措施为主。首先进一步加大节能措施，加大余能余压的利用力度，提高二次能源的利用效率，尽量不使用烧煤锅炉。其次，采用低氮燃烧技术，采取控制供风量和火焰温度的措施，抑制其氮氧化物的产生量。目前，在轧钢加热炉采用低氮燃烧技术（富氧技术），其技术已成熟，但由于增大了企业运行成本，所以，技术采用的普及率不高，应加大这一技术的应用力度。该技术的特点：利用企业富余氧气，混入燃料气中，以减少燃烧混配的空气量；通过对加热炉/热处理炉烧嘴的合理设计，如华白指数、火焰燃烧长度、强度、中心点温度等，使燃料气得以充分燃烧，减少空气量，从而达到减少 NO_x 的产生量。第三，对重点产生源烧结机，配合烧结烟气脱硫进行后期处理，在选择烧结脱硫工艺技术时兼顾脱氮技术进行示范，如研究低成本、低投入的活性炭吸附技术，（SCR）氨催化还原技术。

6.14.5 技术知识产权情况

未查到相关专利。