

有色金属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	1
1.4 术语及定义	1
第二章 有色金属行业资源能源消耗及产排污情况.....	7
2.1 氧化铝、电解铝行业资源能源消耗及产排污情况.....	7
2.1.1 行业类型划分	7
2.1.2 能源消耗情况	8
2.1.3 资源消耗情况	10
2.1.4 污染物排放情况	11
2.2 铜冶炼行业资源能源消耗及产排污情况	13
2.2.1 行业类型划分	13
2.2.2 能源消耗情况	13
2.2.3 资源消耗情况	14
2.2.4 污染物排放情况	14
2.3 铅冶炼行业资源能源消耗及产排污情况	15
2.3.1 行业类型划分	15
2.3.2 能源消耗情况	15
2.3.3 资源消耗情况	15
2.3.4 污染物排放情况	15
2.4 锌冶炼行业资源能源消耗及产排污情况	16
2.4.1 行业类型划分	16
2.4.2 能源消耗情况	16
2.4.3 资源消耗情况	17
2.4.4 污染物排放情况	17
2.5 镁冶炼行业资源能源消耗及产排污情况	17
2.5.1 行业类型划分	17
2.5.2 能源消耗情况	18
2.5.3 资源消耗情况	18
2.5.4 污染物排放情况	19
2.6 铜铝加工行业资源能源消耗及产排污情况.....	19

2.6.1 行业类型划分	20
2.6.2 能源消耗情况	20
2.6.3 资源消耗情况	26
2.6.4 污染物排放情况	26
2.7 有色金属采矿行业资源能源消耗及产排污情况	26
2.7.1 行业类型划分	27
2.7.2 能源消耗情况	27
2.7.3 资源消耗情况	28
2.7.4 污染物排放情况	28
2.8 有色金属选矿行业资源能源消耗及产排污情况	29
2.8.1 行业类型划分	29
2.8.2 能源消耗情况	29
2.8.3 资源消耗情况	29
2.8.4 污染物排放情况	29
第三章 有色金属行业技术现状	31
3.1 氧化铝、电解铝行业技术现状	31
3.1.1 氧化铝行业技术结构	31
3.1.2 氧化铝行业技术水平	31
3.1.3 电解铝行业技术结构	32
3.1.4 电解铝行业技术水平	32
3.2 铜冶炼行业技术现状	33
3.2.1 铜冶炼行业技术结构	33
3.2.2 铜冶炼行业技术水平	33
3.3 铅冶炼行业技术现状	34
3.3.1 铅冶炼行业技术结构	34
3.3.2 铅冶炼行业技术水平	35
3.4 锌冶炼行业技术现状	36
3.4.1 锌冶炼行业技术结构	36
3.4.2 锌冶炼行业技术水平	38
3.5 镁冶炼行业技术现状	38
3.5.1 镁冶炼行业技术结构	38
3.5.2 镁冶炼行业技术水平	39
3.6 铜铝加工行业技术现状	40
3.6.1 铜加工行业技术结构	40

3.6.2 铜加工行业技术水平	42
3.6.3 铝加工行业技术结构	42
3.6.4 铝加工行业技术水平	48
3.7 有色金属采矿行业技术现状.....	48
3.7.1 有色金属采矿行业技术结构	48
3.7.2 有色金属采矿行业技术水平	49
3.8 有色金属选矿行业技术现状.....	50
3.8.1 有色金属选矿行业技术结构	50
3.8.2 有色金属选矿行业技术水平	52
第四章 有色金属行业节能减排先进适用技术.....	53
4.1 生产过程节能减排先进适用技术.....	53
4.1.1 铝冶炼节能减排先进适用技术	53
4.1.2 铜冶炼节能减排先进适用技术	67
4.1.3 铅冶炼节能减排先进适用技术	71
4.1.4 锌冶炼节能减排先进适用技术	74
4.1.5 镁冶炼节能减排先进适用技术	78
4.1.6 铜铝加工节能减排先进适用技术.....	82
4.1.7 有色金属采矿节能减排先进适用技术	86
4.1.8 有色金属选矿节能减排先进适用技术	91
4.2 资源能源回收利用技术	99
4.3 污染物治理技术	105
第五章 工艺技术优化组合方案	117
5.1 铝冶炼工艺技术优化组合	117
5.2 铜冶炼工艺技术优化组合	118
5.3 铅冶炼工艺技术优化组合	119
5.4 铜加工工艺技术优化组合	119
5.5 铝加工工艺技术优化组合	125
第六章 有色金属行业节能减排技术发展趋势	128
6.1 铝冶炼技术发展趋势.....	128
6.2 铜冶炼技术发展趋势.....	134
6.3 铅冶炼技术发展趋势.....	134
6.4 锌冶炼技术发展趋势.....	135
6.5 镁冶炼技术发展趋势.....	135
6.6 铜铝加工技术发展趋势	136

6.7 有色金属采矿技术发展趋势.....	138
6.8 有色金属选矿技术发展趋势.....	138

第一章 导言

1.1 编制目的

我国是世界上最大的有色金属生产国，铜、铝、铅、锌等 10 种有色金属产量占全球产量的三分之一。有色金属生产过程中消耗大量的能源，并产生废气、废水和固体废弃物。在全球能源约束增强，发展低碳经济的大背景下，依靠技术进步，推进我国有色金属工业节能减排是必然趋势。因此，在有色金属行业进行全面调查的基础上，通过专家咨询评估以及数学模型技术筛选，选择了一批对推动行业节能减排具有带动作用的先进适用技术，编制了《有色金属行业节能减排先进适用技术指南》（简称指南）。

该指南根据我国有色金属产业发展的实际情况，优选了 83 项节能减排先进适用技术。这些技术不但可以为企业开展节能减排提供信息参考，同时可以为企业的技术选择、改造以及技术转让提供信息参考，还可以为行业节能减排技术推广应用政策提供配套和索引。

1.2 适用范围

该指南适用于国内有色金属采矿、选矿、冶炼、加工企业技术领域的节能减排工作，包括新建项目的技术选择、已建项目的技术改造。

指南中推荐的技术均为成熟、适用技术，并在实践中得到证实，基本上涵盖了国内有色金属采矿，选矿，铜、铝、铅、锌、镁冶炼，铜、铝加工等主要工艺环节和节能减排的关键技术领域。由于建设条件不同、所用原料不同，投资及运行成本差异较大，一些技术运行时间较短，目前提供的技术经济指标仅是一个参考。

1.3 编制依据

依据近年来国家发布的相关产业发展政策、产业准入条件，国家有关污染物排放标准，国家有关产品能耗定额标准等编制。

1.4 术语及定义

指南中涉及的主要专业术语和定义如下：

（1）原矿综合能耗

原矿综合能耗是指平均每采出 1t 矿石（以原矿量计算）所消耗的各种能源

总量（折标准煤），它是反映矿山采矿过程中能源消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{原矿综合能源消耗 (kgce/t 矿石)} = \text{各种能源消耗总量 (kgce)} / \text{原矿量 (t)}$$

（2）原矿电耗

原矿电耗是指平均每采出 1t 矿石（以原矿量计算）所消耗的电量，它是反映矿山采矿过程中电力消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{原矿电耗 (kWh/t 矿石)} = \text{电力消耗量 (kWh)} / \text{原矿量 (t)}$$

（3）原矿炸药消耗

原矿炸药消耗是指平均每采出 1t 矿石（以原矿量计算）所消耗的炸药量，它是反映矿山采矿过程中炸药消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{原矿炸药消耗 (kg/t 矿石)} = \text{炸药消耗量 (kg)} / \text{原矿量 (t)}$$

（4）选矿综合能耗

选矿综合能耗是指选矿过程中平均每处理 1t 原矿所消耗的各种能源总量（折标准煤），它是反映选矿过程中能源消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{选矿综合能耗 (kgce/t 矿石)} = \text{各种能源消耗总量 (kgce)} / \text{处理原矿量 (t)}$$

（5）选矿电耗

选矿电耗是指选矿过程中平均每处理 1t 原矿所消耗的电量，它是反映选矿过程中电力消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{选矿电耗 (kWh/t 矿石)} = \text{选矿过程中电力消耗量 (kWh)} / \text{处理原矿量 (t)}$$

（6）选矿钢球消耗

选矿钢球消耗是指选矿过程中平均每处理 1t 原矿所消耗的钢球量，它是反映选矿过程中钢球消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{选矿钢球消耗 (kg/t 矿石)} = \text{钢球消耗量 (kg)} / \text{磨矿机处理原矿量 (t)}$$

（7）选矿药剂消耗

选矿药剂消耗是指选矿过程中平均每处理 1t 原矿所用药剂的消耗量，它是反映选矿过程中药剂消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{选矿药剂消耗 (kg/t 矿石)} = \text{选矿药剂消耗量 (kg)} / \text{处理原矿量 (t)}$$

（8）选矿水消耗

选矿水消耗是指选矿过程中平均每处理 1t 原矿的水消耗量，它是反映选矿过程中水消耗情况的指标。其计算公式为：

$$\text{选矿水消耗 (t/t 矿石)} = \text{选矿过程中水消耗量 (t)} / \text{处理原矿量 (t)}$$

（9）粗铜综合能耗

粗铜综合能耗是指每生产 1t 粗铜从处理铜精矿到产出粗铜所消耗的能源总量（折标准煤），其计算公式为：

粗铜综合能耗 (kgce/t 粗铜) = 能源总消耗量 (kgce) / 粗铜产量 (t)

(10) 粗铜电耗

粗铜电耗是指每生产 1t 粗铜从处理铜精矿到产出粗铜所消耗的电量。其计算公式为:

粗铜电耗 (kWh/t 粗铜) = 铜粗炼耗电量 (kWh) / 粗铜产量 (t)

(11) 粗铜新水消耗

粗铜新水消耗是指每生产 1t 粗铜从处理铜精矿到产出粗铜所消耗的新水量。其计算公式为:

粗铜新水消耗 (t/t 粗铜) = 铜粗炼消耗新水量 (t) / 粗铜产量 (t)

(12) 阴极铜电耗

阴极铜电耗是指在铜电解过程中, 每生产 1t 合格阴极铜所消耗的电量。其计算公式为:

阴极铜电耗 (kWh/t 阴极铜) = 铜电解消耗的电量 (kWh) / 合格阴极铜产量 (t)

(13) 阴极铜蒸汽消耗

阴极铜蒸汽消耗是指在铜电解过程中, 每生产 1t 合格阴极铜所消耗的蒸汽量。其计算公式为:

阴极铜蒸汽消耗 (kg/t 阴极铜) = 消耗的蒸汽量 (kg) / 合格阴极铜产量 (t)

(14) 氧化铝综合能耗

氧化铝综合能耗是指每生产 1t 氧化铝所消耗的各种能源总量 (折标准煤), 包括氧化铝生产过程中的直接能源消耗和分摊的辅助、附属部门的间接能源消耗。其计算公式为:

氧化铝综合能耗 (kgce/t 氧化铝) = 能源消耗总量 (kgce) / 氧化铝产量 (t)

(15) 氧化铝电耗

氧化铝电耗是指每生产 1t 氧化铝所消耗的总电量。其计算公式为:

氧化铝电耗 (kWh/t 氧化铝) = 氧化铝所消耗的总电量 (kWh) / 氧化铝产量 (t)

(16) 氧化铝矿石消耗

氧化铝矿石消耗是指每生产 1t 氧化铝所消耗的铝矿石量, 其计算公式为:

氧化铝矿石消耗 (t/t 氧化铝) = 铝矿石消耗量 (t) / 氧化铝产量 (t)

(17) 氧化铝碱耗

氧化铝碱耗是指每生产 1t 氧化铝所消耗的纯碱量。其计算公式为:

氧化铝碱耗 (t/t 氧化铝) = 纯碱消耗量 (t) / 氧化铝产量 (t)

(18) 氧化铝新水消耗

氧化铝新水消耗是指每生产 1t 氧化铝所消耗的新水量。其计算公式为：

氧化铝新水消耗 (t/t 氧化铝) = 新水消耗量 (t) / 氧化铝产量 (t)

(19) 铝液直流电耗

铝液直流电耗是指每生产 1t 铝液所消耗的直流电总量。其计算公式为：

铝液直流电耗 (kWh/t 铝液) = 直流电消耗量 (kWh) / 铝液产量 (t)

(20) 铝液交流电耗

铝液交流电耗是指每生产 1t 铝液所消耗的交流电总量。它是既反映电解槽的技术状况和工艺操作水平，又反映整流效率的指标。其计算公式为：

铝液交流电耗 (kWh/t 铝液) = 交流电消耗量 (kWh) / 铝液产量 (t)

(21) 电解铝综合交流电耗

电解铝综合交流电耗是指每生产 1t 电解铝所消耗的交流电总量，包括用于电解铝生产的综合交流电消耗量和分摊的辅助、附属部门使用的交流电消耗量。其计算公式为：

电解铝综合交流电耗 (kWh/t) = 电解铝消耗的交流电总量 (kWh) / 电解铝产量 (t)

(22) 电解铝综合能耗

电解铝综合能耗是指每生产 1t 电解铝所消耗的各种能源总量 (折标准煤)，包括电解铝生产过程中的直接能源消耗和分摊的辅助、附属部门的间接能源消耗。其计算公式为：

电解铝综合能耗 (kgce/t 电解铝) = 能源消耗总量 (kgce) / 电解铝产量 (t)

(23) 铅冶炼综合能耗

铅冶炼综合能耗是指每生产 1t 铅产品所消耗的能源总量 (折标准煤)。其计算公式为：

铅冶炼综合能耗 (kgce/t) = 能源消耗总量 (t) / 铅产品产量 (t)

(24) 铅冶炼电耗

铅冶炼电耗是指每生产 1t 铅产品所消耗的电量。其计算公式为：

铅冶炼综合电耗 (kWh/t) = 电力消耗总量 (kWh) / 铅产品产量 (t)

(25) 锌冶炼综合能耗

锌冶炼综合能耗是指每生产 1t 锌产品所消耗的能源总量 (折标准煤)。其计算公式为：

锌冶炼综合能耗 (kgce/t) = 能源消耗总量 (kgce) / 锌产品产量 (t)

(26) 锌冶炼电耗

锌冶炼电耗是指每生产 1t 锌产品所消耗的电量。其计算公式为：

锌冶炼电耗 (kWh/t) = 电力消耗总量 (kWh) / 锌产品产量 (t)

(27) 原镁综合能耗

原镁综合能耗是指每生产 1t 原镁所消耗的能源总量（折标准煤）。其计算公式为：

$$\text{原镁综合能耗 (kgce/t)} = \text{能源消耗总量 (kgce)} / \text{原镁产量 (t)}$$

(28) 原镁电耗

原镁电耗是指每生产 1t 原镁所消耗的电量，其计算公式为：

$$\text{原镁电耗 (kWh/t)} = \text{电消耗总量 (kWh)} / \text{原镁产量 (t)}$$

(29) 原镁硅铁消耗

原镁硅铁消耗是指每生产 1t 原镁所消耗的硅铁量。其计算公式为：

$$\text{原镁硅铁消耗 (t/t)} = \text{硅铁消耗量 (t)} / \text{原镁产量 (t)}$$

(30) 铜加工材综合能耗

铜加工材综合能耗是指每吨铜加工材从熔铸到加工生产的全部过程中消耗的能源量（折标准煤）。其计算公式为：

$$\text{铜加工材综合能耗 (kgce/t)} = \frac{\text{铜加工材消耗能源总量 (kgce)}}{\text{铜加工材产量 (t)}}$$

(31) 铜加工材综合电耗

铜加工材综合电耗是指每吨铜加工材，从原料投入到加工成品的全部工艺过程中所消耗的电量。其计算公式为：

$$\text{铜加工材综合电耗 (kWh/t)} = \frac{\text{铜加工材消耗电量总和 (kWh)}}{\text{铜加工材产量 (t)}}$$

(32) 铜加工材金属消耗

铜加工材金属消耗是指每生产 1t 铜加工材所消耗金属原料的数量。反映加工、熔铸、中间合金配制及废料重熔的全部生产过程中金属的消耗程度，也是反映企业生产活动成果和技术水平的综合性指标。其计算公式为：

$$\text{铜加工材金属消耗 (kg/t)} = \frac{\frac{\text{加工材成品量 (t)} + \text{加工净投料量 (t)} \times \frac{\text{熔铸损耗量 (t)}}{\text{熔铸成品量 (t)}}}{\text{加工材成品量 (t)} \times 1000} + \text{加工损耗量 (t)}$$

(33) 铝加工材综合能耗

铝加工材综合能耗是指每吨铝加工材从熔铸到加工生产的全部过程中消耗的能源量（折标准煤）。其计算公式为：

$$\text{铝加工材综合能耗 (kgce/t)} = \frac{\text{铝加工材消耗能源总量 (kgce)}}{\text{铝加工材产量 (t)}}$$

(34) 铝加工材综合电耗

铝加工材综合电耗是指每吨铝加工材，从原料投入到加工成品的全部工艺过程中所消耗的电量。其计算公式为：

$$\text{铝加工材综合电耗 (kWh/t)} = \frac{\text{铝加工材消耗电量总和 (kWh)}}{\text{铝加工材产量 (t)}}$$

(35) 铝加工材金属消耗

铝加工材金属消耗是指每生产 1t 铝加工材所消耗金属原料的数量。反映加工、熔铸、中间合金配制及废料重熔的全部生产过程中金属的消耗程度，也是反映企业生产活动成果和技术水平的综合性指标。其计算公式为：

$$\text{铝加工材金属消耗 (kg/t)} = \frac{\frac{\text{加工材成品量 (t)} + \text{加工净投入量 (t)} \times \frac{\text{熔铸损耗量 (t)}}{\text{熔铸成品量 (t)}} + \text{加工损耗量 (t)}}{\text{加工材成品量 (t)} \times 1000}$$

第二章 有色金属行业资源能源消耗及产排污情况

2.1 氧化铝、电解铝行业资源能源消耗及产排污情况

氧化铝是将铝土矿通过矿石溶出、沉降、分解、蒸发和焙烧等工序制成。电解铝是将氧化铝、阳极和氟化盐为主的原材料通过熔盐电解法生产出液态铝，再在本厂继续加工成普通铝锭，也可以将液态铝直接供给临近的铝材或铸造产品生产厂生产下游产品，或在本厂生产下游铝加工厂需要的各种合金锭、板锭和挤压圆锭等产品。铝锭生产属于有色金属工业产业链的上游环节，属于原材料生产领域。

2.1.1 行业类型划分

我国氧化铝生产方法主要是根据铝矿石的品位与类别来选择，因此本类型的划分只能从生产基本方法上予以阐述，而后再归类于行业类型。

铝土矿的三种结构形态：铝土矿含有氧化铝的水合物，按照结合的水分子数和晶型的不同分为三水铝石型、一水软铝石型和一水硬铝石型铝土矿。以上三种铝矿物是铝土矿中的主要含铝矿物，以三水铝石矿物为主的叫三水铝石矿，在三水铝石矿中常常含有一水软铝石；以一水硬铝石矿物为主的称一水硬铝石矿。我国铝土矿主要为一水硬铝石矿，国外多为三水铝石矿。目前国外氧化铝的生产绝大多数都是从三水铝石矿中（或兼有一水软铝石）提取的。三种矿物在苛性碱中的溶解速度差异较大，三水铝石在苛性碱溶液中溶解度和溶解速度都较快。三种矿物的溶解温度也不同，理论上的溶解温度如下：

三水铝石为 105℃： $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} = 2\text{NaAlO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$

一水软铝石为 190℃： $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} = 2\text{NaAlO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

一水硬铝石为 220℃： $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} = 2\text{NaAlO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

由此可见，我国的铝矿石需要高温高压才能溶出，所以能耗高于国外。由于资源的特点对我国氧化铝工业的生产技术具有重大的影响。我国氧化铝的生产方法主要分为三种，即烧结法、拜耳法和联合法（混联法和串联法）。

烧结法：目前工业上采用碱石灰烧结法可以处理二氧化硅含量较高的低品位铝矿石，虽然这种方法具有能耗高、投资大、成本高、物料流量大和产品质量不如拜耳法好的缺点，但是它能处理铝硅比为 3 左右的高硅铝土矿，如低品位的铝土矿、霞石、明矾石和煤灰等。国内单独使用烧结法生产氧化铝的工厂规模也越来越小，有趋势用于处理煤灰生产氧化铝。

拜耳法：拜耳法具有流程短、投资少、能耗和成本低及产品质量好的特点，

因此得到广泛的应用，目前山东省四个氧化铝厂均从国外进口三水铝石型铝土矿生产氧化铝。拜耳法原则上处理高品位的铝土矿，例如广西的铝土矿品位较高，氧化铝厂也采用拜耳法。近年来，国外有的氧化铝厂采用拜耳法处理铝硅比为 7 的铝土矿，并取得较好的经济效益。国内采用选矿拜耳法也得到很好的经济效益。

联合法：将烧结法和拜耳法流程联合起来的生产方法称之为联合法，联合法又分为混联法、串联法和并联法。从技术和经济观点出发，铝硅比在 3 左右的矿石采用烧结法，铝硅比在 8 以上的可以采用拜耳法，铝硅比介于两者之间的采用联合法，我国上世纪在河南、山西和贵州等地广泛采用了混联法，目前有的企业逐步转为串联法或减少烧结法部分的比例。本世纪新建氧化铝厂有的采用了串联法。一般中等品位（铝硅比 5~6）的铝土矿多采用混联法或串联法，矿石品位越高越好。当工厂既有高品位矿供应，又有低品位矿来源时，并联法或混联法中的拜耳法系统和烧结法系统，宜分别处理高品位矿石和低品位矿石。

我国电解铝行业按电解槽容量划分有：200kA、240kA、300kA、350kA、400kA 和 500kA 电解槽；按工厂产能划分有：20 万 t/a、30 万 t/a、40 万 t/a 和 50 万 t/a。

尽管目前电解法生产仍为使用碳阳极的耗电大户，但目前还没有新的替代工艺来取代电解炼铝方法，但传统的电解工艺正在不断地围绕高效、节能、节省资源方面进行改进，并充满了发展活力。

2.1.2 能源消耗情况

2.1.2.1 能源消耗特点

根据国际铝业协会（IAI）的报告：南美氧化铝厂的平均能耗为 11.2GJ（折合 382.25kgce/t-氧化铝）；非洲氧化铝厂的平均能耗为 12.8GJ（折合 436.86kgce/t-氧化铝）；欧洲氧化铝厂的平均能耗为 12.5GJ（折合 426.62kgce/t-氧化铝）；北美氧化铝厂的平均能耗为 11.4GJ（折合 382.25kgce/t-氧化铝）；西方国家氧化铝厂加权平均能耗为 11.6GJ（折合 402.7kgce/t-氧化铝）。

根据澳大利亚雅文氧化铝厂 2008 年的报道，该厂 2006 年的平均能耗为 8.9GJ（折合 303kgce/t-氧化铝），在世界氧化铝厂中排在前 5 名。但是据德国斯塔德氧化铝厂报道，它在 1997 就已经达到 7.8GJ（折合 266 kgce/t-氧化铝），2007 年降到 7 GJ（折合 239 kgce/t-氧化铝）。在电解铝工艺流程中，能源消耗主要集中在铝电解的生产工序。在能源消耗的总量中，铝电解的能源消耗约占普通铝锭总能耗的 90%以上。而变电整流、电解槽烟气治理和空气压缩机等工序能源消耗虽然比电解铝要少，但是能量消耗仍然偏高，仍有一定的节能潜力。

目前的电解铝生产方法，能源利用率只有不到 50%，从而造成能源消耗过大。为了克服传统工艺的缺陷，近年来在节能工艺方面发展较快。改进铝电解槽阴极表面的结构，可以降低铝液表面的流动速度和波动高度，从而使电解槽的极距空

间缩小，大大节约了能源。早在 90 年代初西方国家曾申请专利将阴极表面形状改变成凹或凸状（US 08302178-1994 年），但是由于未得到铝业界的重视，没有在工业上使用。我国东北大学冯乃祥教授于 2006-2007 年申请异型阴极的专利并在重庆天泰铝业首先实现工业化实践，在此期间，国内出现了各种不同阴极结构的专利，如高低块阴极结构、阻流块结构和导流槽等等，目前正在大量推广中，尚未形成规范的结构，目前铝业界通称“新型阴极”。与传统阴极的最佳吨铝直流电耗 13000~13300kWh/t-铝相比，目前预计达到 12300~12500kWh/t-铝的水平是可信的，工业化长期运行节电 500~600kWh/t-铝 是可以达到的。因此，与传统的普通阴极相比，新型阴极技术节能减排效果显著并成为世界上首个降低电解铝能耗的技术。

在电解铝厂，直接使用电解铝液生产锭坯可以缩短下游产品生产的工艺流程，不仅可减少金属烧损、节省重熔能耗和减少废气排放，而且也提高了生产效率。采用电解铝液生产锭坯、扁锭的能耗仅为采用固体料生产的 1/3，圆锭生产的能耗为其 3/5，铸轧带坯生产的能耗为其 1/2，未来应在政策上予以鼓励。

2.1.2.2 能源消耗水平

根据目前国内氧化铝、电解铝行业发展现状，从推动节能技术进步、提高能源利用效率、促进节约能源和优化用能结构、提高经济效益和社会效益出发，国家有关部门已经制定颁布了氧化铝、电解铝产品能耗限额准入标准，以提高行业准入标准，促进企业采用节约能源的生产工艺、技术和装备，积极开发、采用节能措施。氧化铝、电解铝单位产品能耗限额按现有生产企业能耗限额限定值、新建生产企业能耗限额准入值、能耗限额先进值划定（见表 2-1、表 2-2、表 2-3、表 2-4）。

表 2-1 氧化铝企业单位产品能耗限额

工艺分类		能耗限额限定值 (kgce/t)	能耗限额准入值 (kgce/t)	能耗限额先进值 (kgce/t)
拜耳法	工艺能耗	490	470	450
	综合能耗	520	500	480
其他工艺	工艺能耗	850	750	700
	综合能耗	900	800	750

表 2-2 现有电解铝企业单位产品能耗限额限定值

指标	能耗限额限定值
铝企业交流电耗	≤14400kWh/t
铝锭综合交流电耗	-

重熔用铝锭综合能源单耗	≤1.900tce/t
-------------	-------------

表 2-3 新建电解铝企业单位产品能耗限额准入值

指标	能耗限额准入值
铝企业交流电耗	≤13800kWh/t
铝锭综合交流电耗	≤14300kWh/t
重熔用铝锭综合能源单耗	≤1.850tce/t

表 2-4 电解铝企业单位产品能耗限额先进值

指标	能耗限额准入值
铝业交流电耗	≤13500kWh/t
铝锭综合交流电耗	≤14000kWh/t
重熔用铝锭综合能源单耗	≤1.800tce/t

2.1.3 资源消耗情况

我国氧化铝生产使用的铝土矿比较复杂，全国 30 多家氧化铝生产企业，使用矿石与产地有关，且各产地的矿石类别和品位也比较复杂。例如目前山东省的氧化铝产量约占全国的 1/3，基本使用的是国外进口的三水铝石型铝土矿，矿石来源多，品位多变。国内几个拥有储量较大的铝土矿省份有山西、河南、广西和贵州，品位和类别均有较大差别。因此，资源和能源的消耗水平只能采用下列数据予以说明(表 2-5)，但其基本上可以代表当前国内氧化铝生产的能耗和资源(包括新水)消耗水平。

表 2-5 我国氧化铝的主要资源和能源消耗水平

项目名称	进口矿石 拜耳法	国内矿石 拜耳法	国内矿石 联合法
矿石消耗 (t/t-氧化铝)	2.5~2.7	2.0~2.3	2.0~2.2
能耗 (kgce/t-氧化铝)	300~320 (kgce/t)	350~400 (kgce/t)	750~850(kgce/t)
碱耗 (kg/t-氧化铝)	60~70 (烧碱)	80~100 (纯碱)	120~140 (纯碱)
新水 (t/t-氧化铝)	2.0~2.5	2.5~3.5	2.5~3.5
赤泥 (t/t-氧化铝)	1.3~1.5	1.0~1.3	1.0~1.2

目前我国两大主要氧化铝生产方法能源消耗比例大致如下：

(1) 混联法：在 900kgce/t-氧化铝中，①原料制备：包括原料储运、生料浆制备、石灰石、压缩空气和二氧化碳输送约占 9.8%；②孰料烧成、溶出、赤泥分离和外排、脱硅和精制约占 35.12%；③拜耳法高压溶出、赤泥分离、洗涤过滤、拜耳法溶液精制和蒸发约占 38.98%；④种分、碳分和焙烧约占 16.1%。

(2) 拜耳法：在 350kgce/t-氧化铝中，①高压溶出：38%~40%；②蒸发：23%~25%；③焙烧：23%~25%；④其他 10%~12%。

从上述能源消耗比例中可以看到节能的重点是生产流程中烧结的孰料烧成和拜耳法高压溶出，其次是蒸发和焙烧。

电解铝生产的原料主要是氧化铝、阳极和氟化盐。降低氧化铝的消耗虽然潜力较小，但是降低运输过程中的损失仍有潜力；阳极消耗的降低主要依靠提高阳极质量，减少净耗与毛耗；氟化盐的消耗目前国内尚高于国际先进水平，将 30kg/t-铝的消耗降低到 20kg/t-铝或以下是有潜力的，这不仅是降低了原料消耗，而且为节约贵重资源萤石和减少氟的排放有着重要的作用。生产过程中冷却铝锭用水量还比较多。因此减少冷却水的用量和冷却水的重复利用，是电解铝厂降低资源消耗的主要环节。上述内容均是提高资源利用水平的重要途径。

2.1.4 污染物排放情况

氧化铝生产过程产生废气（颗粒物、二氧化硫等）、废水、赤泥等污染物，电解铝生产过程产生废气（氟化物、颗粒物、二氧化硫等）、废水、固体废弃物等污染物。电解铝厂废弃物中含氟废弃物主要是电解槽大修时废内衬和干法净化站废弃的滤袋。

铝土矿经提炼出氧化铝后的残渣叫赤泥。国外的铝土矿中含 Fe_2O_3 较多，所产残渣呈红色故称赤泥，中国是浅黄色的，但也沿用此名称。赤泥排弃前要经过充分洗涤，减少赤泥堆存后对环境的污染；在设计赤泥堆场时，要有防渗和回收废水的措施，有些铝土矿由于含有极微量的放射元素，并在赤泥中富集，应注意解决。综合利用视赤泥中的主要成分而定。目前，多用于生产水泥和建筑材料，或用作土壤改良剂等，但是有效利用的数量有限，赤泥不能大量利用的阻力来自于赤泥中的含碱量，要降低赤泥中的含碱量则是一件难度极大的问题，目前尚无更好的经济处理方法。

国内氧化铝和铝冶炼行业的污染物排放标准是按照国家标准《铝工业污染物排放标准》（GB25465—2010）执行。氧化铝厂和电解铝厂主要污染物排放限值见表 2-6 和表 2-7。

表 2-6 氧化铝厂主要污染物排放限值

污染源	项目	单位	生产系统及设备	现有企业	新建企业
大气污染物	颗粒物	mg/m^3	熟料烧成窑	200	100
			氢氧化铝焙烧炉、石灰炉（窑）	100	50

			原料加工、运输	120		50	
			氧化铝储运	100		30	
			其他	120		50	
	二氧化硫	mg/m ³	熟料烧成	850		400	
			氢氧化铝焙烧炉、石灰炉（窑）	850		400	
			其他	850		400	
水污染物				直接排放	间接排放	直接排放	间接排放
	COD	mg/L		100	200	60	200
	氟化物（以 F 计）	mg/L		8	8	5	5
	氨氮	mg/L		15	25	8	25
	总氮	mg/L		20	30	15	30
	单位产品基准排水量	m ³ /t.氧化铝		1.0		0.5	

表 2-7 电解铝厂主要污染物排放限值

污染源	项目	单位	生产系统及设备	现有企业		新建企业	
大气污染物	颗粒物	mg/m ³	电解槽烟气净化	30		20	
			氧化铝、氟化盐储运	50		30	
			电解质破	100		30	
			其他	100		50	
	二氧化硫	mg/m ³	电解槽烟气净化	200		200	
			其他	850		400	
	氟化物（以 F 计）	mg/L	电解槽烟气净化	4.0		3.0	
水污染物				直接排放	间接排放	直接排放	间接排放
	COD	mg/L		100	200	60	200
	氟化物（以 F 计）	mg/L		8.0	8.0	5.0	5.0
	氨氮	mg/L		15	25	8.0	25
	总氮	mg/L		20	30	15	30

	单位产品 基准排水 量	m ³ /t.铝		2.5	1.5
--	-------------------	---------------------	--	-----	-----

2.2 铜冶炼行业资源能源消耗及产排污情况

2.2.1 行业类型划分

铜冶炼方法分为火法和湿法两大类。火法冶金是生产铜的主要方法，目前世界上 80%的铜是用火法冶金生产的，湿法冶金生产的铜占 20%左右。传统的铜冶炼工艺包括反射炉、鼓风炉和电炉熔炼工艺。现代铜冶炼工艺主要包括闪速熔炼、诺兰达熔炼、奥斯麦特熔炼、艾萨炉熔炼、白银法熔炼、富氧侧吹熔池熔炼、氧气底吹熔炼等工艺。传统的铜冶炼工艺在能耗、环境保护等方面存在着严重缺陷，现已逐渐被淘汰。

2.2.2 能源消耗情况

目前，国内铜冶炼行业的能源消耗限额执行的是国家能耗标准。现有铜冶炼企业单位产品能耗限额限定值、新建铜冶炼企业单位产品能耗限额准入值、铜冶炼企业单位产品能耗限额先进值见表 2-8。

表 2-8 铜冶炼企业单位产品能耗限额

工序、工艺		能耗限额限定值 (kgce/t)		能耗限额准入值 (kgce/t)		能耗限额先进值 (kgce/t)	
		工艺能耗	综合能耗	工艺能耗	综合能耗	工艺能耗	综合能耗
粗铜工艺（铜精矿-粗铜）		≤750	≤800	≤500	≤530	≤330	≤340
阳极铜工艺（铜精矿-阳极铜）		≤800	≤850	≤550	≤580	≤380	≤390
电解工序（阳极铜-阴极铜）		≤210	≤220	≤160	≤170	≤120	≤130
铜冶炼工艺（铜精矿-阴极铜）		≤900	≤950	≤660	≤700	≤530	≤550
粗铜工艺（杂铜-粗铜）		—	≤340	—	≤300	—	≤230
阳极铜 工艺	（杂铜-阳极铜）	—	≤390	—	≤350	—	≤290
	（粗铜-阳极铜）	—	≤300	—	≤280	—	≤230
铜精炼 工艺	（杂铜-阴极铜）	—	≤510	—	≤470	—	≤400
	（粗铜-阴极铜）	—	≤420	—	≤400	—	≤350
注：各工艺中回收的余热量和余热发电量输出时应予以扣除							

2.2.3 资源消耗情况

铜冶炼的原料主要是铜精矿和废杂铜，我国矿产铜产量占铜总产量的比例约为 65%，再生铜产量的比例约为 35%。由于国内铜冶炼企业采用的工艺技术和所处理的原料（铜精矿）不同，资源消耗情况有差异。我国铜冶炼的铜精矿（Cu23%）消耗量为 4.4t/t-铜左右，铜冶炼新水单耗为 18m³/t-铜左右。

2.2.4 污染物排放情况

铜冶炼过程会产生废气（颗粒物、二氧化硫等）、废水、废渣等污染物，其中以废水和废气对环境造成的污染较为严重。我国铜冶炼行业的污染物排放是按照国家标准《铜、镍、钴工业污染物排放标准》（GB25467—2010）执行。铜冶炼主要污染物排放限值见表 2-9。

表 2-9 铜冶炼主要污染物排放浓度限值

污染	项目	单位	工艺或工序	现有企业		新建企业	
大气 污染 物	SO ₂	mg/m ³	物料干燥	800		400 (全部工艺或工序)	
			环境集烟	960			
			其他	900			
	颗粒物	mg/m ³	全部工艺或工序	100		80	
水污 染物				直接排 放	间接排放	直接排放	间接排放
	COD	mg/L		120 (湿法冶 炼)	300 (湿法冶 炼)	100 (湿法冶 炼)	300 (湿法冶 炼)
				100（其 他）	100（其 他）	100（其 他）	100（其 他）
	氟化物 （以 F	mg/L		8	15	5	15
	氨氮	mg/L		15	20	8	20
	总氮	mg/L		20	40	15	40
	总铅	mg/L		1.0		0.5	
	总砷	mg/L		0.5		0.5	
	单位产 品基准 排水量	m ³ /t.铜		25		10	

2.3 铅冶炼行业资源能源消耗及产排污情况

2.3.1 行业类型划分

铅冶炼工艺总体上分为粗铅工艺和电解工艺两大部分，冶炼工艺的主要区别在于粗铅工艺的不同，粗铅冶炼的工艺目前主要有：富氧底吹鼓风炉炼铅法、基夫塞特法、奥斯麦特炼铅法、QSL 炼铅法、氧气底吹熔炼高铅渣侧吹还原法、氧气底吹熔炼液态高铅渣底吹还原法、卡尔多法、艾萨法等工艺。

2.3.2 能源消耗情况

目前，国内铅冶炼行业的能源消耗限额执行的是国家能耗标准，现有铅冶炼企业单位产品综合能耗限额限定值、新建铅冶炼企业单位产品综合能耗限额准入值、铅冶炼企业单位产品综合能耗限额先进值见表 2-10。

表 2-10 铅冶炼单位产品能耗限额

工序、工艺	综合能耗限额限定值 (kgce/t)	综合能耗限额准入值 (kgce/t)	综合能耗限额先进值 (kgce/t)
粗铅工艺	≤460	≤400	≤330
铅电解精炼工序	≤170	≤140	≤120
铅冶炼工艺	≤650	≤540	≤470

2.3.3 资源消耗情况

铅冶炼的原料主要是铅精矿，国内铅冶炼企业由于所采用的工艺技术和所处理的原料不同，资源消耗情况有差异。2010 年我国铅冶炼总回收率为 95%左右，铅冶炼新水单耗为 5.2m³/t-铅左右。

2.3.4 污染物排放情况

铅冶炼过程会产生废气（颗粒物、二氧化硫等）、废水、废渣等污染物，其中以废气和废水对环境造成的污染较为严重。我国铅冶炼行业的污染物排放标准是按照国家标准《铅锌工业污染物排放标准》（GB25466—2010）执行。铅冶炼主要污染物排放限值见表 2-11。

表 2-11 铅冶炼主要污染物排放浓度限值

污染源	项目	单位	适用范围	现有企业		新建企业	
大气 污染物	颗粒物	mg/m ³	干燥	200		所有	80
			其他	100			
	二氧化硫	mg/m ³	所有	960		400	
	硫酸雾	mg/m ³	制酸	35		20	
	铅及其化合物	mg/m ³	熔炼	10		8	
水污 染物				直接排	间接排	直接排放	间接排放
	COD	mg/L		100	200	60	200
	氨氮	mg/L		15	25	8	25
	总氮	mg/L		20	30	15	30
	氟化物	mg/L		10	10	8	8
	总铅	mg/L		1.0		0.5	
	总砷	mg/L		0.5		0.3	
	单位产品 基准排水量	m ³ /t 铅		15		8	

2.4 锌冶炼行业资源能源消耗及产排污情况

2.4.1 行业类型划分

锌冶炼工艺总体上分为湿法炼锌和火法炼锌两大方法，湿法炼锌工艺的主要区别在于浸出、净化工艺的不同。锌冶炼工艺目前主要有：硫化锌精矿常压富氧浸出、硫化锌精矿加压氧气直接浸出、复杂难选铅锌混合矿密闭鼓风炉炼锌（ISP）、锌氧化矿及二次物料溶剂萃取提取锌工艺、硫酸锌溶液中钴的锌粉-砷盐净化工艺、湿法炼锌生产中铁的分离-针铁矿法沉铁工艺、锌精矿湿法炼锌长周期电积技术等。

2.4.2 能源消耗情况

目前，国内锌冶炼行业的能源消耗限额执行的是国家能耗标准，现有锌冶炼企业单位产品综合能耗限额限定值、新建锌冶炼企业单位产品综合能耗限额准入值、锌冶炼企业单位产品综合能耗限额先进值见表 2-12。

表 2-12 锌冶炼单位产品能耗限额

工艺名称	综合能耗限额限定值（kgce/t）	综合能耗限额准入值（kgce/t）	综合能耗限额先进值（kgce/t）
火法炼锌工艺	≤2200	≤2100	≤1900

湿法炼锌有浸出渣处理炼锌工艺	≤1850	≤1700	≤1200
湿法炼锌无浸出渣处理炼锌工艺 氧化矿炼锌工艺	≤1250	≤1050	≤1000

2.4.3 资源消耗情况

锌冶炼的原料主要是锌精矿，国内锌冶炼企业由于所采用的工艺技术和所处理的原料不同，资源消耗情况有差异。2010 年我国精锌冶炼总回收率为 95%左右，电锌冶炼总回收率为 94%左右，锌冶炼新水单耗为 11.6m³/t 左右。

2.4.4 污染物排放情况

目前，我国锌冶炼行业的污染物排放标准是按照国家标准《铅锌工业污染物排放标准》（GB25466—2010）执行。锌冶炼主要污染物排放浓度限值及单位产品基准排水量见表 2-13。

表 2-13 锌冶炼主要污染物排放浓度限值

污染源	项目	单位	适用范围	现有企业		新建企业	
大气 污染 物	颗粒物	mg/m ³	干燥	200		80	
			其他	100			
	二氧化硫	mg/m ³	所有	960		400	
	硫酸雾	mg/m ³	制酸	35		20	
	铅及其化合物	mg/m ³	熔炼	10		8	
水污 染物				直接排	间接排放	直接排放	间接排放
	COD	mg/L		100	200	60	200
	氨氮	mg/L		15	25	8	25
	总氮	mg/L		20	30	15	30
	氟化物	mg/L		10	10	8	8
	总铅	mg/L		1.0		0.5	
	总砷	mg/L		0.5		0.3	
	单位产品 基准排水量	m ³ /t.锌		15		8	

2.5 镁冶炼行业资源能源消耗及产排污情况

2.5.1 行业类型划分

镁冶炼方法分为两大类，氯化镁熔盐电解法和热还原法。我国镁冶炼企业中

采用电解法炼镁的几家电解镁厂（如光华化学公司、抚顺镁厂、青海民和镁厂等）由于高昂的生产成本和市场竞争压力，相继在 1996 年、1998 年和 2003 年停产。目前我国的镁冶炼企业几乎都是采用硅热还原法（皮江法）炼镁工艺。

2.5.2 能源消耗情况

在八十年代末、九十年代初，硅热法炼镁凭借其投资少、成本低、装备和工艺简单等特点，在全国各地迅猛发展。一些民营企业利用当地资源、能源和廉价劳动力的优势，纷纷兴建小规模皮江法镁厂，由于单方面追求企业利润，全部直接燃煤，能源消耗高，污染环境严重，九十年代初镁冶炼的能源消耗曾高达 16000~18000kgce/t-镁。但是随着镁冶炼行业不断的技术改造和升级，特别是清洁能源的广泛采用后，镁冶炼的节能效果非常显著，2009 年镁冶炼的能源消耗量下降到 5000~6000kgce/t-镁。我国《镁行业准入条件》规定的镁冶炼企业的能源消耗指标见表 2-14。

表 2-14 镁冶炼企业能源消耗指标

	现有企业	改、扩建企业	新建企业
镁冶炼单位产品能源消耗	<6000 kgce/t	<5500 kgce/t	<5000 kgce/t

硅热法炼镁工艺的煅烧、配料制球、真空还原、精炼四大工序中，能源消耗最大的工序是还原工序，能源消耗约占总能耗的 65%，其次是煅烧工序，能源消耗约占总能耗的 30%，精炼工序能源消耗较少，约占总能耗的 5%。煅烧工序和还原工序有很大的节能潜力。

2.5.3 资源消耗情况

我国镁冶炼行业通过不断的技术改造和产业升级，镁冶炼的单位产品资源消耗量大幅下降。2009 年镁冶炼单位产品的白云石消耗量为 10~12t/t-镁，比 2000 年的 15~17t/t-镁下降 31.25%；硅铁消耗量为 1t/t-镁，比 2000 年的 1.5t/t-镁下降 33.33%。我国《镁行业准入条件》规定的镁冶炼企业的资源消耗指标见表 2-15。

表 2-15 镁冶炼企业资源消耗指标

企业 准入值 资源	现有企业	改、扩建企业	新建企业
白云石 (t/t-镁)	11.0	10.5	10.0
硅铁 (Si>75%)	1.1	1.05	1.02
耗水量 (t/t-镁)	25	22	20

2.5.4 污染物排放情况

硅热法炼镁工艺主要由煅烧、配料制球、还原、精炼四大工序组成，在生产过程中排放的污染物有烟气、粉尘、废水（见图 2-1）。国内镁冶炼行业的污染物排放标准是按照国家标准《镁、钛工业污染物排放标准》（GB25468—2010）执行。镁冶炼主要污染物排放限值见表 2-16。

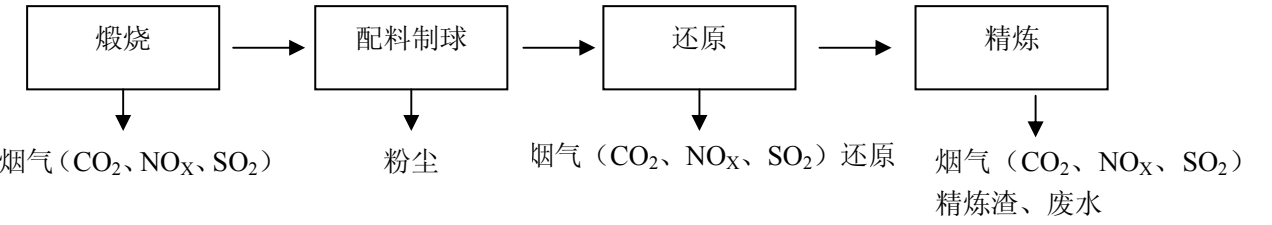


图 2-1 硅热法炼镁工艺污染物排放情况

表 2-16 镁冶炼主要污染物排放浓度限值

污染源	项目	单位	生产系统及设备	现有企业		新建企业	
大气污染物	颗粒物	mg/m ³	原料制备	100		50	
			煅烧炉	200		150	
			还原炉	100		50	
			精炼	100		50	
			其他	100		50	
	二氧化硫	mg/m ³	煅烧炉	800		400	
			还原炉	800		400	
			精炼	800		400	
			其他	800		400	
水污染物				直接排放	间接排	直接排放	间接排放
	COD	mg/L		100	180	60	180
	氨氮	mg/L		15	25	8	25
	总氮	mg/L		20	40	15	40
	单位产品基准排水量	m ³ /t 镁		1.5		1.0	

2.6 铜铝加工行业资源能源消耗及产排污情况

铜铝加工是将铜、铝金属通过变形加工成为板带、棒、型、管、线、箔、环等材料形态，供装备制造、消费品制造、建筑等领域使用。少数产品（如铝箔）也可以直接进入终端消费领域。铜、铝加工属于有色金属工业产业链的下游环节，但仍属于原材料生产领域。

2.6.1 行业类型划分

我国铜、铝加工行业主要有：利用熔铸扁锭，通过热轧、冷轧、箔轧，生产板带、箔产品的传统轧制加工类型；利用连铸连轧（或金属液直接铸轧）等加工技术，生产板带、管、线产品等短流程工艺类型。

尽管短流程铜、铝加工工艺具有明显的高效、节能、资源利用率高的优势，但在目前技术条件下仍不能完全替代传统加工工艺。特别是电子引线框架材料、航空用铝合金板等铜、铝加工高端产品，目前仍只能依靠传统工艺生产。同时，传统铜、铝加工工艺也在不断围绕高效、节能、提高资源利用水平进行完善。

2.6.2 能源消耗情况

2.6.2.1 能源消耗特点

在铜、铝加工工艺流程中，能源消耗主要集中在熔铸工序。特别是在传统铜、铝加工工艺中，熔铸工序的能源消耗占铜、铝加工能源消耗的 60%以上。而轧制、挤压等工序能源消耗相对较少，节能潜力有限。

由于传统铜、铝加工工艺是间断性生产，坯料熔铸后需要再加热进入轧制、挤压等工序，必然会造成能源消耗和金属损失。为了克服传统工艺的缺陷，近年来铜、铝加工短流程工艺发展较快。

在铜加工生产中，传统工艺是铸锭-热加工-冷加工三段式，其核心技术是利用热加工改变铸造组织。但热加工是主要的耗能工序。创新的短流程铜加工工艺，取消了热加工，其核心是以冷加工的新型连续挤压技术、行星轧制技术和装备，改变铸造组织，从而取消了热加工（如热挤压、热轧等），实现了合金熔炼-冷加工连续化生产。相比之下，短流程工艺节能减排效果显著。

在铝加工生产中，直接使用电解铝液生产锭坯可以缩短工艺流程，不仅可减少金属烧损、节省重熔能耗和减少废气排放，而且也提高了生产效率。采用电解铝液生产锭坯、扁锭的能耗仅为用固体料生产的 1/3、圆锭生产的能耗为用固体料生产的 3/5、铸轧带坯生产的能耗为用固体料生产的 1/2。

2.6.2.2 能源消耗水平

根据目前国内铜、铝加工行业发展现状，从推动节能技术进步、提高能源利用效率、促进节约能源和优化用能结构、提高经济效益和社会效益出发，国家有关部门已经制定颁布了部分铜、铝加工产品能耗定额标准，并正在对有色金属加工厂节能设计规范进行修订，以提高行业准入标准，促进企业采用节约能源的生产工艺、技术和装备，积极开发、采用节能措施。

目前铜管、铝铸锭、铝板带、建筑铝合金型材、铝箔等铜、铝加工产品能源

消耗限额执行的是国家能耗标准，单位产品能耗限额按现有生产企业能耗限额限定值、新建生产企业能耗限额准入值、能耗限额先进值划定（见表 2-17、表 2-18、表 2-19、表 2-20、表 2-21、表 2-22、表 2-23、表 2-24）。

表 2-17 现有铜及铜合金管材加工企业单位产品能耗限额限定值

工序	能耗限额限定值（kgce/t）				
	紫铜管	简单黄铜管	复杂黄铜管	青铜管	白铜管
熔铸工序能耗	≤95	≤100	≤100	≤150	≤150
加工工序能耗	≤280	≤500	≤500	≤400	≤450
各种类管材综合能耗	≤375	≤600	≤600	≤550	≤600
全部管材综合能耗	≤530				

表 2-18 新建铜及铜合金管材加工企业单位产品能耗限额准入值

工序	能耗限额准入值（kgce/t）				
	紫铜管	简单黄铜管	复杂黄铜管	青铜管	白铜管
熔铸工序能耗	≤90	≤85	≤95	≤140	≤140
加工工序能耗	≤265	≤285	≤475	≤350	≤380
各种类管材综合能耗	≤355	≤370	≤570	≤490	≤520
全部管材综合能耗	≤485				

表 2-19 铜及铜合金管材加工企业单位产品能耗限额先进值

工序	能耗限额先进值/（kgce/t）				
	紫铜管	简单黄铜管	复杂黄铜管	青铜管	白铜管
熔铸工序能耗	≤85	≤80	≤90	≤140	≤140
加工工序能耗	≤225	≤275	≤460	≤340	≤370
各种类管材综合能耗	≤340	≤355	≤550	≤480	≤510
全部管材综合能耗	≤465				

表 2-20 现有铝合金建筑型材生产企业单位产品能耗限额限定值

产品分类	原料	能耗限额限定值 (kgce/t)	
		工艺能耗	综合能耗
基材	圆铸锭	≤145	≤160
	电解铝液、重熔用铝锭等熔炼炉喂料	≤370a、b	≤410a、b
成品	基材	≤165	≤180
	圆铸锭	≤310	≤340
	电解铝液、重熔用铝锭等熔炼炉喂料	≤540a、b	≤590a、b
a 若圆铸锭生产时, 未 100%进行熔体静置处理, 能耗限额准入值为表中数值减去静置能耗基数 J ($J=40 \times \text{未经过熔体静置处理的合格圆铸锭产量} \div \text{全部合格圆铸锭产量}$) b 若圆铸锭生产时, 未 100%进行均匀化处理, 能耗限额准入值为表中数值减去均匀化能耗基数 U ($U=50 \times \text{未经过均匀化处理的合格圆铸锭产量} \div \text{全部合格圆铸锭产量}$)			

表 2-21 新建铝合金建筑型材生产企业单位产品能耗限额准入值

产品分类	原料	能耗限额限定值 (kgce/t)	
		工艺能耗	综合能耗
基材	圆铸锭	≤140	≤150
	电解铝液、重熔用铝锭等熔炼炉喂料	≤340a、b	≤370a、b
成品	基材	≤150	≤170
	圆铸锭	≤290	≤320
	电解铝液、重熔用铝锭等熔炼炉喂料	≤450a、b	≤540a、b
a 若圆铸锭生产时, 未 100%进行熔体静置处理, 能耗限额准入值为表中数值减去静置能耗基数 J ($J=40 \times \text{未经过熔体静置处理的合格圆铸锭产量} \div \text{全部合格圆铸锭产量}$) b 若圆铸锭生产时, 未 100%进行均匀化处理, 能耗限额准入值为表中数值减去均匀化能耗基数 U ($U=50 \times \text{未经过均匀化处理的合格圆铸锭产量} \div \text{全部合格圆铸锭产量}$)			

表 2-22 铝板带单位产品能耗限额

产品分类	原料	单位产品能耗限额 (kgce/t)											
		现有生产企业能耗限额限定值 2				新建生产企业能耗限额准入值 3				能耗限额先进值 4			
		工艺能耗		综合能耗		工艺能耗		综合能耗		工艺能耗		综合能耗	
		软 合 金 5	硬 合 金 5	软 合 金 5	硬 合 金 5	软 合 金 5	硬 合 金 5	软 合 金 5	硬 合 金 5	软 合 金 5	硬 合 金 5	软 合 金 5	硬 合 金 5
铸轧带	铝锭（或铝液）1	≤240	-	≤260	-	≤175	-	≤195	-	≤155	-	≤175	-
热轧带（板）	铸锭	≤195	≤415	≤215	≤450	≤160	≤365	≤180	≤400	≤145	≤345	≤165	≤380
冷轧带（板）	铸轧带（或热轧带）	≤150	≤390	≤170	≤430	≤140	≤350	≤160	≤390	≤130	≤335	≤150	≤375
1、原料中含有铝液时，能耗限额值减去 30。 2、冷轧带（板）的生产工艺中若没有退火工序，则软合金能耗为表中数值减去 97，硬质合金减去 156；若硬合金没有淬火工序，则能耗为表中数值减去 178。 3、冷轧带（板）的生产工艺中若没有退火工序，则软合金能耗为表中数值减去 89，硬质合金减去 146；若硬合金没有淬火工序，则能耗为表中数值减去 168。 4、冷轧带（板）的生产工艺中若没有退火工序，则软合金能耗为表中数值减去 86，硬质合金减去 138；若硬合金没有淬火工序，则能耗为表中数值减去 159。 5、软合金应对 GB/T3880.1 中的 A，硬合金对应 GB/T3880.1 中的 B 类合金。													

表 2-23 铝箔单位产品能耗限额

产品分类		原料	单位产品能耗限额（kgce/t）					
产品名称	箔厚（t）/mm		现有生产企业能耗限额限定值 1		新建生产企业能耗限额准入值 2		能耗限额先进值 3	
			工艺能耗	综合能耗	工艺能耗	综合能耗	工艺能耗	综合能耗
无零箔	0.1000-0.2000	冷轧带	≤300	≤335	≤205	≤225	≤175	≤195
单零箔	0.0100-0.0999	冷轧带	≤335	≤370	≤225	≤255	≤190	≤215
双零箔	0.0040-0.0099	冷轧带	≤360	≤410	≤245	≤280	≤205	≤230
表面处理箔	0.004-0.2000	铝箔	≤150	≤170	≤120	≤140	≤100	≤115
1、铝箔的生产工艺中若没有退火工序，则能耗为表中数值减去 97。 2、铝箔的生产工艺中若没有退火工序，则能耗为表中数值减去 89。 3、铝箔的生产工艺中若没有退火工序，则能耗为表中数值减去 86。								

表 2-24 铝铸锭单位产品能耗限额

产品分类		原料	单位产品能耗限额/（kgce/t）1、2、3、4											
			现有生产企业能耗限额限定值				新建生产企业能耗限额准入值				能耗限额先进值			
			工艺能耗		综合能耗		工艺能耗		综合能耗		工艺能耗		综合能耗	
			软合金 5	硬合金 5	软合金 5	硬合金 5	软合金 5	硬合金 5	软合金 5	硬合金 5	软合金 5	硬合金 5	软合金 5	硬合金 5
扁铸锭			≤325	≤455	≤350	≤490	≤245	≤345	≤265	≤370	≤205	≤290	≤230	≤325
圆铸锭	直径不大于 200mm 的 6063 合金铸 造锭	铝液、 重熔铝等 熔炼炉喂 料	≤225	-	≤250	-	≤205	-	≤220	-	≤180	-	≤200	-
	其他铸造锭		≤330	≤475	≤355	≤515	≤250	≤360	≤280	≤405	≤210	≤305	≤235	≤340
1、变形铝及铝合金铸造锭生产时，未 100%通过静置炉进行熔体静置处理，能耗限额值为表中数值减去静置能耗基数 J（J=40×未经过熔体静置的合格铸锭产量÷全部合格的铸锭产量）。 2、变形铝及铝合金铸造锭生产时，未 100%进行均匀化热处理，能耗限额值为表中数值减去均匀化热处理能耗基数 R（R=50×未经过均匀化热处理的合格铸锭产量÷全部合格的铸锭产量）。 3、熔炼工序使用发生炉煤气时，则能耗限额值为表规定数值乘系数 1.2。 4、原料中含有铝液时，能耗限额值应减去 30。 5、本部分铝及铝合金扁铸锭的软合金对应 GB/T3880.1 中的 A 类合金，硬合金对应 GB/T3880.1 中的 B 类合金；铝及铝合金圆铸锭的软合金和硬合金与 GB/T14864 对应。														

2.6.3 资源消耗情况

铜、铝加工生产的原料主要是铜、铝金属及其金属中间合金。生产过程中冷却、洗涤等用水量也比较多。减少重熔、加热次数，提高产品成品率，实现冷却、洗涤水重复利用，是铜、铝加工降低资源消耗的关键环节。因此，在保证产品质量、提高成材率的基础上，推广铜、铝加工短流程工艺是提高资源利用水平的重要途径。

2010 年，我国铜加工平均每吨铜加工材的金属消耗为 1037kg/t-铜材，铜材新水单耗为 8.5m³/t-铜材；我国铝加工平均每吨铝加工材的金属消耗为 1043 kg/t-铝材，铝材新水单耗为 12.2m³/t-铝材。

2.6.4 污染物排放情况

铜、铝加工过程产生的污染物主要有熔炼时产生的烟尘、轧制过程采用全油润滑剂时散发的油雾、加工材酸洗时产生的酸雾和废水。铜、铝加工的污染物排放处于较低水平，只要配置高效除尘装置、油雾净化回收装置和废水处理系统，铜、铝加工产生的烟尘、油雾和废水比较容易处置，并实现达标排放。

2.7 有色金属采矿行业资源能源消耗及产排污情况

我国正处在工业化、城市化加速发展阶段，有色金属矿产资源消耗量大，对外依存度较高。有色金属矿山多为硬岩矿山，炸药爆破为其主要矿石剥离模式，矿山生产中炸药消耗及相关的凿岩耗气、耗电、耗油较高，节能形势严峻；近年来有色金属矿固体废弃物在废弃物中的比重逐年增加，这些固体废弃物的存在不仅占用了大量土地、浪费宝贵的矿产资源，而且严重污染着空气和环境，排污量大。

金属矿山固体废物是指矿山开采和矿石选矿过程中产生的废石和尾矿。废石是矿山开采过程中排出的无工业价值的矿体围岩和夹石，对于露天开采就是剥离下来的矿体表面围岩，对于井下开采就是掘进时采出的不能作为矿石使用的夹石。目前，有色金属矿山每采出 1t 矿石平均约产生 1.25t 废石，废石年产生量高达 1.06 亿 t，建国以来累计量高达 21.5 亿 t。尾矿是从矿石中分选出目的矿物后，剩余的含目的矿物很少的废渣，习惯上称为尾砂。目前，有色金属矿山每采出 1t 矿石平均约产出 0.92t 尾砂，尾砂年产生量达 7780 万 t，累计量约 11 亿 t，利用率仅为 6%，占地约 8000 hm²。

有色金属矿山是排出固体废物最多的行业之一。在我国，由于受传统工艺和经营方式所限，把大量固体废物弃于地表，造成资源浪费，占用土地，污染环境，

危害人类。随着我国人口的增加和经济的发展，对有色金属矿物原料的需求量增加，矿产资源消耗加剧，环保压力越来越大，人们不得不转向依靠科技进步来开展矿山固体废物的综合回收和利用，化害为利，变废为宝。因此，有色金属矿山节约能源资源与减排是亟待解决的问题。

2.7.1 行业类型划分

有色金属采矿按开采方式主要分为地下开采和露天开采，这两种不同的开采方式在生产工序及资源能源消耗、污染物排放均有较大差别。

2.7.2 能源消耗情况

有色金属采矿中主要的能源消耗为凿岩、铲装、运输等工艺，主要能源类型为电力、柴油等。根据矿山的矿石类型、赋存条件、开采方式等的不同，能源消耗情况有较大差异。

2.7.2.1 能源消耗特点

（1）露天开采

露天开采的主要工序环节包括穿孔、装载、运输、辅助作业等，其中穿孔、装载及辅助作业以耗电为主，运输以消耗柴油为主。各工序能源消耗比例见图 2-2。

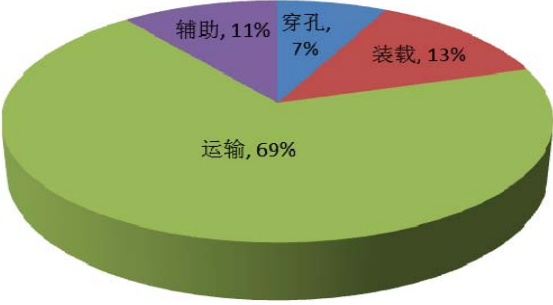


图 2-2 露天开采各工序能耗对比

（2）地下开采

地下开采工序较多，且不同矿山差别较大，从能源消耗角度考虑，分为如下工序：凿岩、坑内出矿、提升、坑内运输、压气、通风、排水、充填及破碎等。各工序能耗比例见图 2-3（图中数据为平均情况，部分矿山基于其自身特殊条件可能差距较大）。

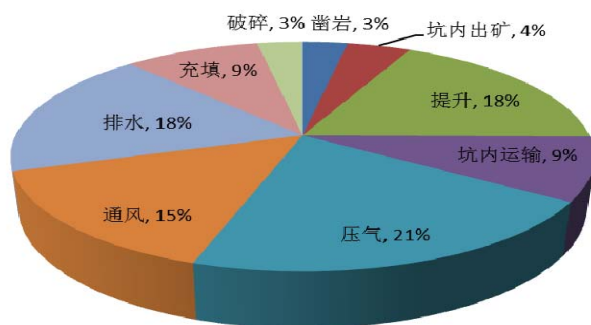


图 2-3 地下开采各工序能耗对比

2.7.2.2 能源消耗水平

(1) 露天开采

露天开采综合能耗见表 2-25，地下开采综合能耗见表 2-26。

表 2-25 露天开采综合能耗

指标	综合能耗 kgce/t-矿石		
	先进	一般	准入
规模			
大型	0.82	0.98	1.18
中型	0.94	1.13	1.36
小型	1.08	1.30	1.56

表 2-26 地下开采综合能耗

指标	综合能耗 kgce/t-矿石		
	先进	一般	准入
规模			
大型	1.84	2.21	2.70
中型	2.21	2.70	3.20
小型	2.70	3.20	3.81

2.7.3 资源消耗情况

采矿资源消耗最主要的是炸药，炸药爆破是目前有色金属矿山矿岩剥离的主要方式，如何降低炸药单耗是采矿技术研究的一个重点方向。

2.7.4 污染物排放情况

除少量废水、废气外，有色金属矿山最主要的污染物为固体废弃物，包括废石、尾矿等，这些固体废弃物不但占用大量土地，还有可能造成二次污染，并是重要的危险源，合理的处置这些废弃物或是有效的利用这些废弃物，是矿山减排

工作的重点。

2.8 有色金属选矿行业资源能源消耗及产排污情况

2.8.1 行业类型划分

有色金属矿选矿技术可按照原矿性质进行类型划分，铜铅锌铝等金属矿的选矿工艺流程各有不同。大致可分为铜矿选矿技术，铅锌矿选矿技术、铝土矿选矿技术等。

2.8.2 能源消耗情况

有色金属矿选矿工艺流程主要包括：原矿破碎、磨矿、浮选、浓缩、过滤等几个关键工序。其中能源消耗最大的工序为磨矿工序和浮选工序，其中磨矿工序能源消耗约占总能耗的 35%~45%；浮选工序的能耗占总能耗的 30%~50%。破碎、浓缩、过滤工序能源消耗较少，约占 20%。铜选矿综合能源消耗 3.6kgce/t-矿石，铅锌选矿综合能源消耗 6.94 kgce/t-矿石。

2.8.3 资源消耗情况

2010 年，我国铜选矿原矿铜品位为 0.59%，精矿铜品位 21.66%，尾矿铜品位 0.08%，铜选矿实际回收率 85.52%，铜选矿用新水单耗 1.07m³/t-矿石。

铅锌选矿原矿铅品位 2.81%，原矿锌品位 5.15%，精矿铅品位 62.81%，精矿锌品位 50.51%，尾矿铅品位 0.19%，尾矿锌品位 0.5%，铅选矿实际回收率 83.97%，锌选矿实际回收率 89.5%，铅锌选矿用新水单耗 3.35 m³/t-矿石。

2.8.4 污染物排放情况

有色金属矿选矿流程包括：原矿破碎、磨矿、分选、浓缩、过滤、回水处理等工序。原则流程如图 2-4 所示。

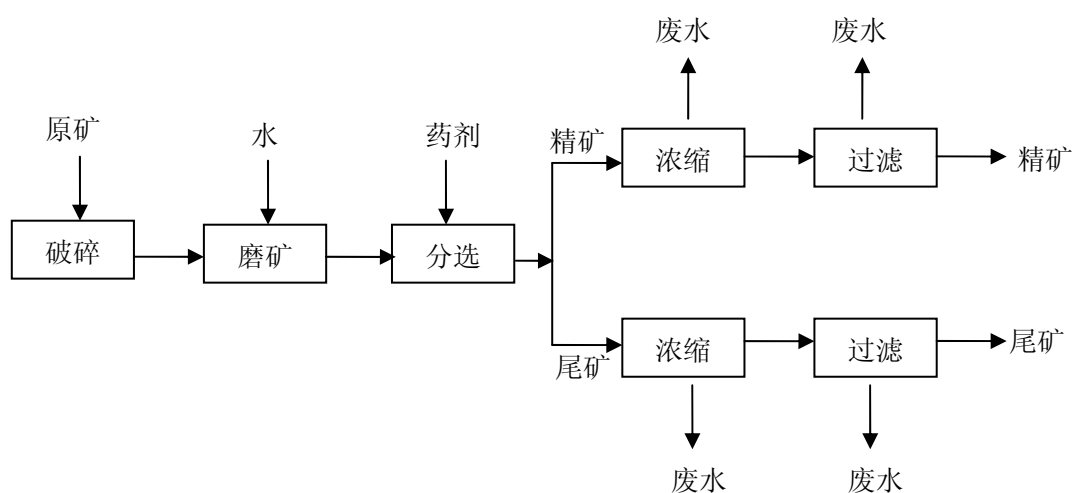


图 2-4 有色金属矿选矿工艺流程及排污节点示意图

有色金属矿选矿流程中产生的污染物主要有三种，粉尘、废水和尾矿。粉尘为大气污染物，排放节点在破碎工序；废水属于水污染物，排放节点在浓缩和过滤；尾矿属于固体废弃物，为流程最终产物。有色金属矿选矿全过程不直接产生温室气体。废水处理并回用后可降低污水的排放量。尾矿综合利用可降低尾矿的排放量。

第三章 有色金属行业技术现状

3.1 氧化铝、电解铝行业技术现状

3.1.1 氧化铝行业技术结构

目前，工业上从铝土矿中提取氧化铝的方法主要用减法。减法生产氧化铝是利用碱（工业烧碱 NaOH 或纯碱 Na_2CO_3 ）处理铝土矿，使铝土矿中的氧化铝与碱溶液发生化学反应，生成可溶于水的铝酸钠，矿石中的铁、钛等杂质和绝大部分的硅成为不溶性化合物进入残渣（赤泥）。铝酸钠溶液（称为精液）在适当工艺条件下解析出氢氧化铝，经过分离、洗涤、焙烧成氧化铝。

减法生产氧化铝分拜耳法、烧结法和联合法三种工艺流程，这主要是由铝土矿类型和性质决定的。联合法也称拜耳-烧结联合法，联合法有并联法、串联法和混联法。氧化铝生产技术结构图如图 3-1 所示。

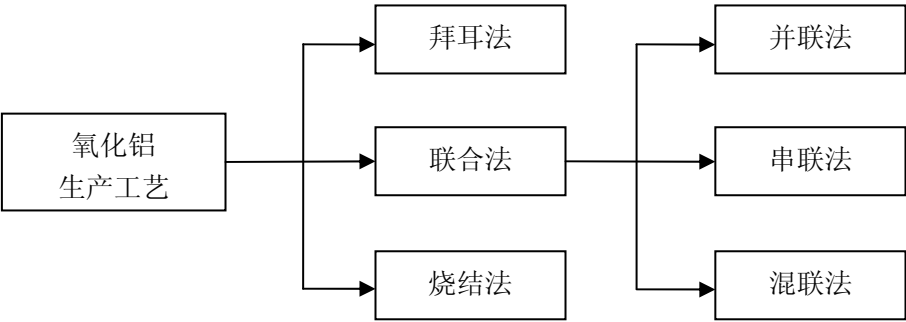


图 3-1 氧化铝生产技术结构

3.1.2 氧化铝行业技术水平

我国氧化铝的生产是从上世纪 50 年代初在山东铝厂开始采用烧结法生产氧化铝起步的，经过 50 余年的努力和发展，逐步形成了烧结法、联合法（混联法和串联法）和拜耳法三种生产方法，烧结法在氧化铝总回收率和碱耗等方面创造了世界同类生产方法的先进水平，虽然目前这种方法在使用低品位铝土矿生产氧化铝的项目没有得到继续发展，但是它为今后利用这种方法处理非铝土矿资源奠定了技术基础。混联法是我国 60 年代独创的一种生产技术，大大推动我国氧化铝工业的发展，是我国上世纪氧化铝生产的主要方法。采用拜耳法处理一水硬铝石在我国得到成功的开发，在能耗和经营成本方面达到国际同类方法处理一水硬铝石铝土矿的先进水平，从而大大的促进了本世纪氧化铝工业的快速发展，新建或扩建氧化铝产能多采用国内自主研发的拜耳法工艺和装备。在国内拜耳法工艺和大型设备不断取得新进展的情况下，近年来利用国外三水铝石型铝土矿生产氧

化铝的技术也得到了巨大的发展。我国是世界氧化铝第一生产大国，2010 年我国氧化铝产量达到 3100 万吨，其中利用进口铝土矿生产氧化铝的产量约占我国氧化铝总产量的 30%。

我国氧化铝生产技术近 20 余年来步入快速发展的阶段，技术和装备水平不断提高。拜耳法间接加热强化溶出、选矿拜耳法、石灰拜耳法、串联法、间接加热连续脱硅和常压脱硅、大型高效沉降技术和装备、降膜蒸发器技术和设备及流态化焙烧等一大批适合我国铝土矿资源特点和氧化铝生产流程的新工艺以及新技术和新装备研发成功和推广应用，推动了我国氧化铝生产技术和装备的优化升级，大大提高了我国氧化铝工业的竞争力。

3.1.3 电解铝行业技术结构

目前，工业生产铝的方法为冰晶石-氧化铝熔盐电解法，即霍尔-埃鲁法。该熔盐电解法是在电解槽内以氧化铝为原料，以氟化盐为溶剂，以碳素材料作阳极，在电解温度 950℃左右使溶解于电解质中的氧化铝被还原成金属铝。电解铝生产的主要设备是电解槽，有自焙阳极电解槽和预焙阳极电解槽两种。自焙阳极电解槽因能耗高、环境污染严重，基本上被淘汰。预焙阳极电解槽成为铝工业发展的主流槽型，目前我国广泛采用 200 kA、240 kA、300 kA、350 kA、400 kA 以及 500 kA 系列电解槽。电解铝生产技术结构如图 3-2 所示。

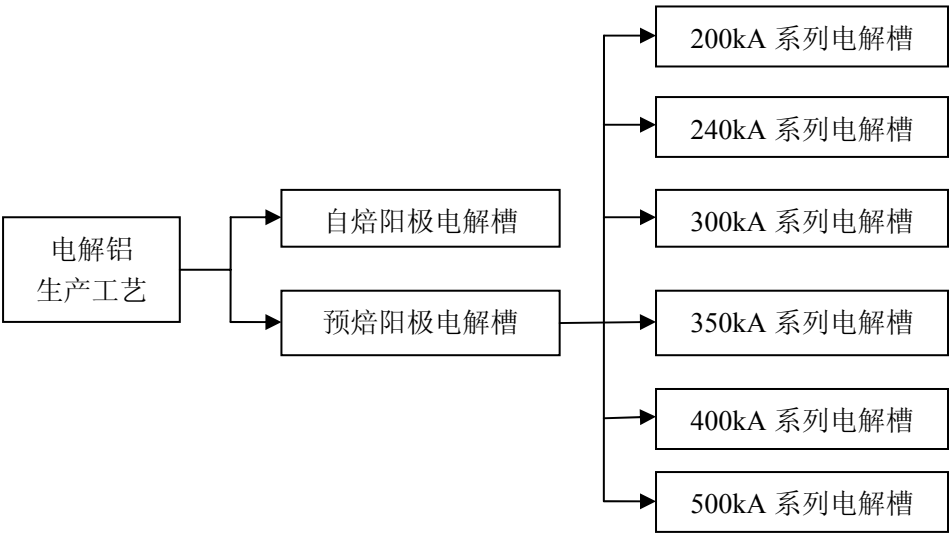


图 3-2 电解铝生产技术结构图

3.1.4 电解铝行业技术水平

我国电解铝工业在铝电解设计技术和铝电解生产技术方面都取得了重大成就，我国自主设计研发成功 350kA、400kA、500kA 系列大型电解槽，在铝电解生产技术方面，我国研究成功了铝电解系列不停电停开槽技术、新型阴极结构铝

电解技术、铝电解槽焙烧自动控制技术、铝电解槽“全息”操作及控制技术、低温低电压铝电解新技术等一系列铝电解先进技术并推广应用。我国电解铝技术经济指标已经达到国际先进水平。

3.2 铜冶炼行业技术现状

3.2.1 铜冶炼行业技术结构

铜冶炼工艺包括粗铜冶炼、阳极铜精炼和电解精炼三个工序，各生产工序节点技术与专项技术见表 3-1。

表 3-1 铜冶炼工艺各生产工序节点技术与专项技术

工艺节点		节点技术
粗铜冶炼	熔炼工序	闪速熔炼
		艾萨熔炼/奥斯迈特熔炼
		富氧侧吹熔池熔炼
		氧气底吹熔炼技术
		白银炼铜技术
		诺兰达炼铜技术
		密闭鼓风炉熔炼技术
	吹炼工序	P.S 转炉吹炼
		闪速吹炼
		顶吹浸没吹炼
		侧吹连续吹炼
阳极铜精炼	热态粗铜精炼	反射炉精炼
		回转炉精炼
	冷态粗铜（包括废杂铜）精炼	反射炉精炼
		倾动炉精炼
电解精炼		不锈钢阴极电解
		常规电解

3.2.2 铜冶炼行业技术水平

近 30 多年来，我国铜工业规模和技术装备水平发展迅速，在铜冶炼方面，自江西铜业公司贵溪冶炼厂 1985 年引进奥托昆普闪速熔炼技术开始，国内其他主要铜冶炼企业也先后引进了先进的铜冶炼技术和装备，多家大型铜冶炼厂技术

和装备已经达到了世界先进水平，污染严重的鼓风炉、电炉、反射炉已逐步被淘汰，取而代之的是引进、消化并自主创新的闪速熔炼技术和诺兰达、艾萨法、奥斯麦特等富氧熔池熔炼新技术。云南铜业股份公司（原云南冶炼厂）引进的艾萨熔炼技术，经过消化创新，低能耗和炉龄为世界同类冶炼法的第一；江铜贵溪冶炼厂采用闪速熔炼工艺，其冶炼能力从引进时的 8 万吨达到目前的 30 万吨以上，其生产技术达到了世界先进水平。山西中条山侯马冶炼厂引进的奥斯麦特双炉系统，其吹炼炉为世界第一座工业化生产炉；金川公司自主创新的年产能 25 万吨的合成炉的投产、铜陵有色金属公司的闪速熔炼和奥斯麦特熔炼工艺其主要指标都超过或达到设计水平，山东阳谷祥光铜业有限公司 2007 年建成投产的闪速熔炼及闪速吹炼工艺更是将铜冶炼技术推上一个新的台阶。

随着国家对环保和节能减排的调控力度加大，我国铜工业骨干冶炼企业通过科技攻关和技术改造，大力引进和自主创新先进生产技术和装备。从产业结构上优化能源消耗、促进节能降耗。逐步淘汰了污染严重的鼓风炉、电炉和反射炉炼铜工艺。自铜陵有色集团控股公司 2007 年 12 月关闭了第一冶炼厂鼓风炉后，烟台鹏晖铜业公司、赤峰金剑铜业公司等国内冶炼企业也相继于 2007-2008 年期间采用先进的铜冶炼工艺代替了密闭鼓风炉熔炼工艺。同时国内其它采用鼓风炉炼铜技术的企业也正在筹划对落后产能进行改造。2008 年，中国有色工程设计研究总院与山东东营方圆有色金属公司共同开发的方圆氧气底吹熔炼多金属捕集技术，是中国自主研发具有自主知识产权，并首先运用于大规模生产实践的多金属综合提取重点先进技术，填补了国内空白，也是世界炼铜工艺的重大突破。

3.3 铅冶炼行业技术现状

3.3.1 铅冶炼行业技术结构

随着社会对环境要求的不断提高和原生资源的日益紧张，落后的烧结锅炼铅工艺已经明确列为淘汰技术，烧结机炼铅工艺也明确要求必须实现尾气达标排放，新建项目已明确不再使用烧结机，而是采用更先进的节能减排技术。同时也要求企业在生产中要加强节能降耗工作，一方面是实现可持续发展的需要，另一方面也是提高企业经济效益的有效途径。

铅冶炼技术主要包括粗铅冶炼、铅电解精炼技术，另外还有资源回收利用、污染物治理等技术，根据铅冶炼生产流程以及各项技术在生产过程中的功能，分为生产过程技术、资源回收利用技术和污染物治理技术三大类。铅冶炼技术结构如图 3-3 所示。

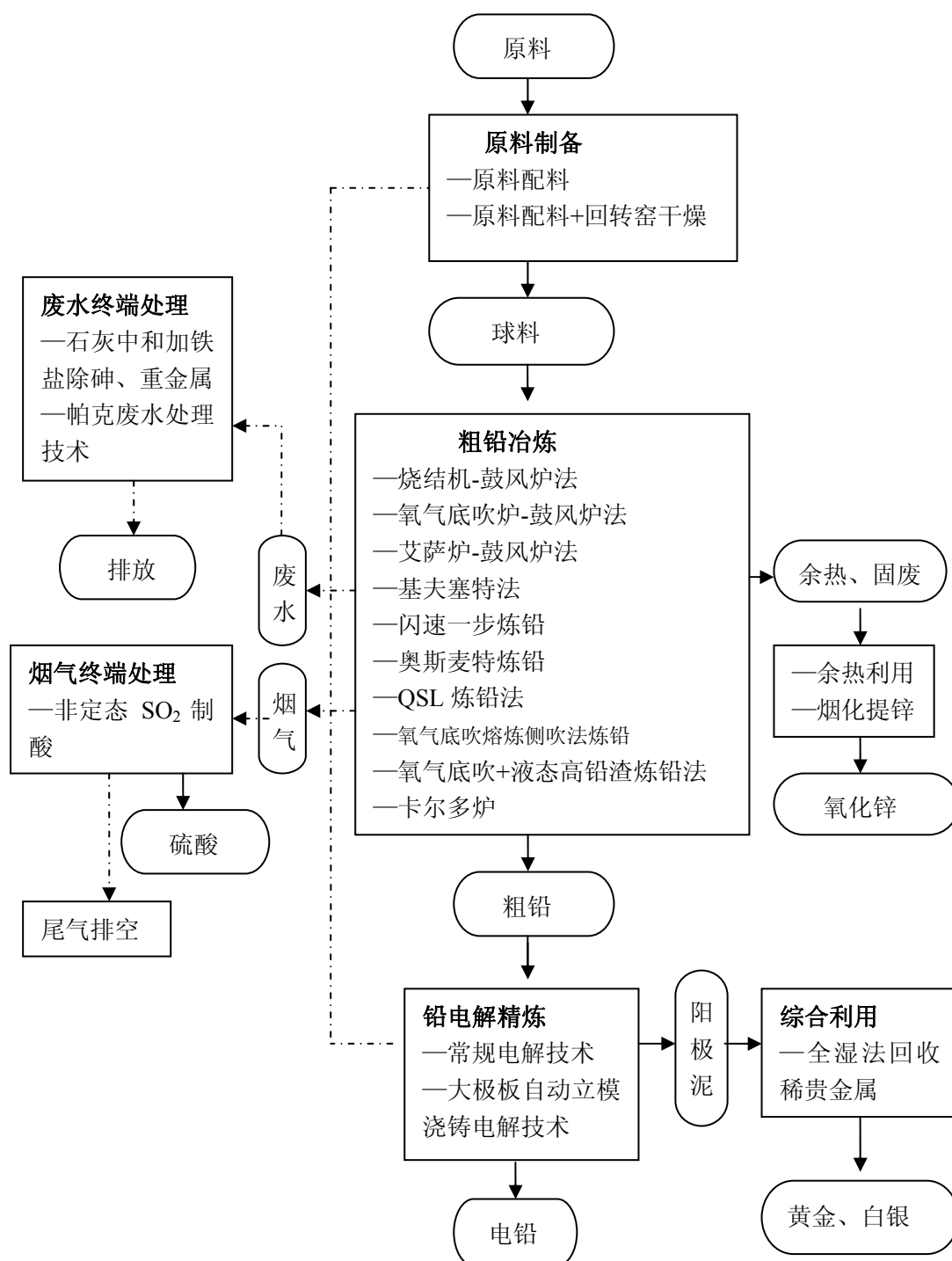


图 3-3 铅冶炼行业技术结构图

3.3.2 铅冶炼行业技术水平

长期以来我国铅冶炼技术大部分沿用传统的烧结-鼓风机还原工艺。铅精矿焙烧得到残硫 2%~3% 的烧结块，然后进入鼓风机还原。这样一方面不能有效利用硫的自热优势，烧结产生的烟气 SO₂ 浓度不高，即使一些企业对这部分烟气进

行了制酸,但制酸后的尾气仍很难做到达标排放;另一方面利用鼓风炉还原熔炼,这种工艺装备本身就存在能耗高、热利用率低、余热不便回收、环保效果差、烟气不达标、自动化水平低等先天性不足。

上世纪 80 年代,国外开发出先进的闪速熔炼和熔池熔炼技术,使铅冶炼技术有了巨大进步。主要代表技术有基夫赛特直接炼铅法、QSL 炼铅法、富氧顶吹浸没熔炼法、卡尔多炉炼铅法,我国一些企业直接引进或者消化创新炼铅工艺装备。我国还自主创新研究成功了氧气底吹熔炼鼓风炉还原炼铅技术、氧气底吹熔炼液态高铅渣直接还原技术等先进技术,并获得推广应用。我国铅冶炼技术达到了世界先进水平。

3.4 锌冶炼行业技术现状

3.4.1 锌冶炼行业技术结构

随着社会发展对环境要求的不断提高和硫化锌矿资源的日益枯竭,锌清洁生产已成为锌冶炼企业可持续发展的必然趋势,同时提高资源利用率即从低中品位氧化矿和二次物料中提锌是锌冶炼企业保障原料供应,实现二次发展的治本之道。挖潜增效、强化有价金属的回收更是提高企业经济效益的有效途径。随着锌冶炼技术的不断进步,常规炼锌工艺焙烧工序中焙烧炉面积由 42m^2 增大到 109m^2 ,再到 145m^2 大型流态化焙烧技术,且加强了对烟气污染物的治理。目前,以常压富氧直接浸出和加压氧气浸出工艺为典型代表的新兴炼锌工艺更有取代传统炼锌工艺的趋势。锌冶炼技术结构如图 3-4 所示。

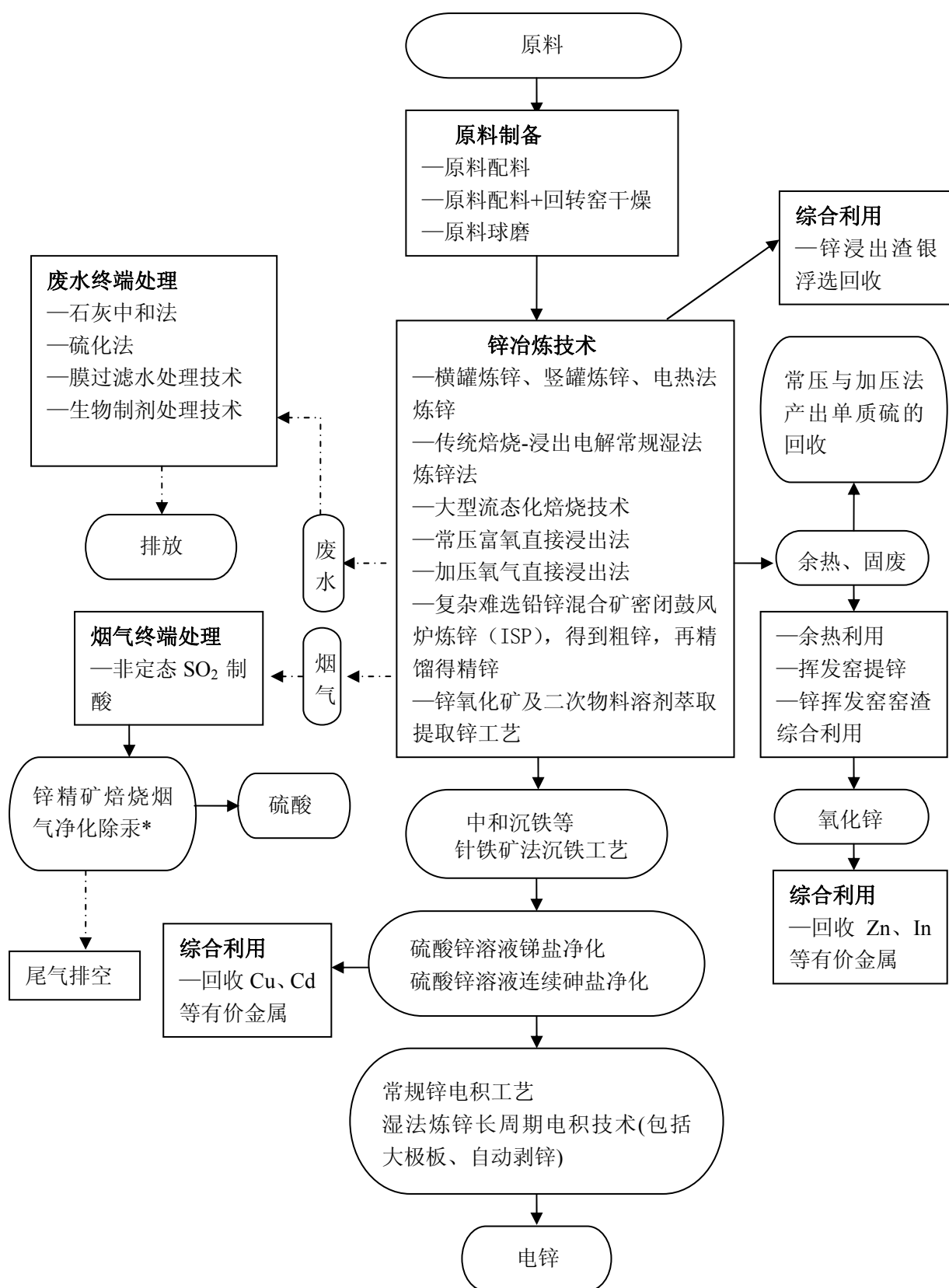


图 3-4 锌冶炼行业技术结构图

3.4.2 锌冶炼行业技术水平

锌冶炼主要有火法和湿法两种工艺，传统的火法炼锌工艺为横罐炼锌、竖罐炼锌、电热法炼锌、敞开鼓风炉炼锌。竖罐和平罐炼锌由于能耗高和污染环境等问题，已处于淘汰的边缘。鼓风炉法(ISP)炼锌虽然 50 年代就投入使用，由于适合处理复杂难选铅锌混合矿，对原料适应性强，在现代资源利用被高度重视，原料价格也不断上涨的情况下，且其炉型结构由敞开式改进为全密闭式，利于实现清洁生产。因此该工艺的存在有一定的合理性。

湿法炼锌自 20 世纪初投入工业生产以来不断发展进步，20 世纪 60 年代以来，湿法炼锌已成为锌冶炼的主导发展方向，传统湿法炼锌由焙烧、浸出、净液、电积、熔铸等主要工序组成。主要优点是环境卫生、劳动条件好，能够综合回收有价金属，金属回收率高，产品质量好，易于实现大规模、连续化、自动化生产。且传统的小沸腾炉焙烧技术进步到现在的大型流态化焙烧技术，更改善了环境卫生和实现了锌清洁生产。

随着各国对环保要求的日趋严格，湿法炼锌成为锌冶炼的一种主导方法。针铁矿法除铁技术、连续砷盐净化除钴技术和湿法炼锌长周期电积技术的研究成功，不仅使硫酸锌溶液达到深度净化，更实现了机械化剥锌，提高了湿法炼锌的技术和装备水平，促进了湿法炼锌的高速发展。

20 世纪 80 年代后，湿法炼锌的产量已占世界总锌产量的 80%以上。进入 90 年代，研究成功了硫化锌精矿和高硅氧化锌矿石直接酸浸法。同时为了降低锌精矿氧压酸浸对温度、压力的要求，进行了催化试验，取得了可喜的成果。尤以硫化锌精矿常压富氧和加压直接浸出工艺最为先进，不仅自动化程度高，而且环境友好，真正实现了锌清洁生产。

自纳米比亚 Skorpion 年产 15 万吨锌的锌冶炼项目于 2004 年 5 月投产成功后，Zincor 公司加快了针对 Shaimerden(哈萨克斯坦)、Jabali(也门)、Remac(加拿大)等几个大型氧化锌矿的开发利用，并相继建立了采用溶剂萃取法提锌工艺的湿法炼锌厂。国内云南祥云飞龙有色金属股份有限公司开发的溶剂萃取法从低中品位氧化矿提锌工艺于 2005 年正式投产，该公司溶剂萃取提锌工艺与常规湿法炼锌相结合，年产电锌 17 万吨。

3.5 镁冶炼行业技术现状

3.5.1 镁冶炼行业技术结构

目前，我国镁冶炼行业基本上都是采用硅热还原法（皮江法）炼镁工艺。该工艺技术是加拿大皮江（L M Pidgeon）教授在 1941 年发明的，其生产过程为将

白云石煅烧后与还原剂硅铁和矿化剂萤石粉按比例配料磨制成粉料，经压球机压制成团块后装入还原炉的还原罐中，在高温和高真空条件下，反应生成镁蒸汽并冷凝在还原罐端头的结晶器中形成结晶镁，再将结晶镁取出重熔精炼铸锭得到金属镁锭。该工艺具有投资少、工艺简单等特点，在中国得到广泛的应用。皮江法炼镁工艺流程见图 3-5。

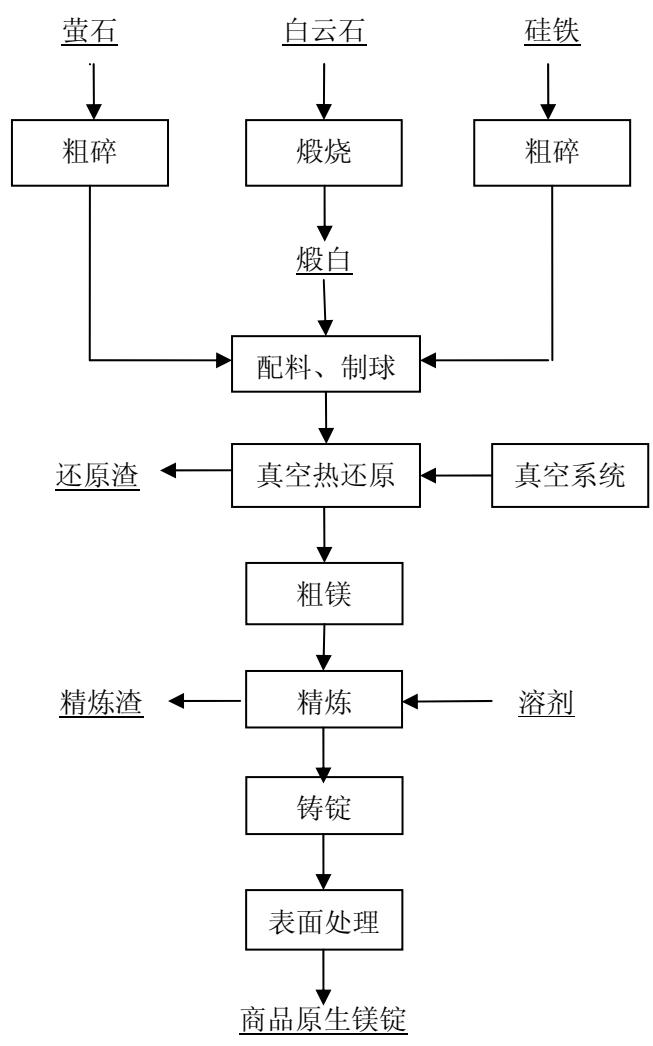


图 3-5 皮江法炼镁工艺流程

3.5.2 镁冶炼行业技术水平

我国镁冶炼行业经过不断的技术改造和产业升级，特别是近 10 年来，随着清洁能源（发生炉煤气、焦炉煤气、半焦气、天然气）的广泛采用、蓄热式高温空气燃烧技术和余热利用技术的大力推广和还原渣的再利用，使镁冶炼行业节能减排取得了显著的效果。

在镁生产工艺中采用带竖式预热器、竖式冷凝器的新型回转窑，窑头出料采用竖式冷却器冷却煅白，窑尾加装竖式预热器加热矿石，该系统不仅增产,还减

少表面散热占地面积，同时减少废气排放。采用燃气可控竖窑以发生炉煤气为燃料，用风量、炉温自动控制，操作方便，降低能耗，产品质量稳定，窑尾采用布袋除尘，有利于环保。蓄热燃烧技术在还原炉上也得到广泛应用，目前我国以清洁能源为燃料利用新型蓄热式燃烧技术的镁冶炼企业有 50 余家，节能效果很明显。

3.6 铜铝加工行业技术现状

我国铜、铝加工产业已经走过近百年的发展历程，取得了举世瞩目的成绩，成为世界铜、铝材生产大国。但与世界强国相比，我国铜、铝加工产业整体的技术水平仍存在较大差距，高精度、高附加值的铜、铝加工产品仍需大量进口。

我国铜、铝加工产业发展的历史悠久，新中国成立以前即形成良好发展基础。新中国成立以后，在前苏联的援助下，建设了东北轻合金加工厂、洛阳有色金属加工厂等产业发展的重要基础。即使在 20 世纪 60 年代中期至 70 年代后期，我国铜、铝加工产业仍获得一定发展，为产业腾飞创造了条件。

改革开放以后，我国铜、铝加工产业得到的迅速发展，原有国有大型铜、铝加工企业进行了现代化改造、扩建，技术装备水平进入世界先进行列；兴建了一批民营、外资企业采用世界先进技术的铜、铝加工项目。目前国内已形成了较为完整的铜、铝加工产品生产体系，市场需求广泛的精密铜管、建筑铝合金型材、铝箔等产品的生产已经形成规模，并具备较强的国际竞争能力。

近年来，我国铜、铝加工工艺技术开发取得积极进展。在铜加工技术开发方面，自主研发的连续铸造、行星轧制、连续挤压等短流程工艺已经得到推广使用，显示了铜加工技术未来发展的方向。在铝加工技术开发方面，自主研发了万吨级双动挤压机，使高速铁路车厢用大断面铝型材实现了立足国内供应。

但是，当前我国铜、铝加工行业总体处于国际产业链分工的中低端环节，特别是高技术产品开发和先进工艺开发依然依靠国外。电子引线框架材料、大型客机用铝板等部分高端产品仍主要依赖进口。因此，转变发展方式，进一步增强自主创新能力，促进产业结构优化升级，是我国铜、铝加工行业实现“由大变强”的必然选择。

3.6.1 铜加工行业技术结构

（1）铜板带生产技术结构

主导产品电缆带、变压器带生产工序：

传统工艺：熔炼铸锭-热轧-高精冷轧-退火-高精成品轧制

短流程工艺：①潜流式连铸带坯-高精冷轧-退火；②上引-连续挤压带坯-高

精冷轧-退火。

表 3-2 铜板带生产工艺技术清单

工序名称	技术名称	作用
熔炼	潜流式转流	取消流槽，减少金属液体降温及烟尘排放
铸造	水平连铸和立式连铸	提高成品率 5%
铸锭加热	采用微氧化和还原气氛加热	减少金属氧化物
热轧	大锭压延、厚度闭环控制	加大卷重、提高轧制速度，降低单位产品能耗，
冷轧	采用 AGC 闭环厚度控制、辊型	提高成材率从而降低单位产品能耗
退火	采用高氢气氛展开式退火	提高成材率从而降低单位产品能耗
辅助工序	机械化包装机列和带材纵剪中	提高成材率从而降低单位产品能耗

(2) 铜管生产技术结构

主导产品冷凝管、空调管、气管、水管生产工序：

传统工艺：熔炼铸锭-热挤压-冷轧管-高精拉伸-连续退火

短流程新工艺：水平连铸管坯-行星轧制-连续式拉或盘拉

表 3-3 铜管生产工艺技术清单

工序名称	技术名称	作用
熔炼	潜流式联体炉熔炼	取消流槽、简化炉体结构，降低电耗
铸造	采用水平连铸管坯机	取消铸锭加热、热挤压工序
冷加工	采用行星轧制-连拉	取消传统冷轧管和多次冷拉
退火	在线感应退火	缩短工艺流程
辅助工序	采用舒马格连续精整机列	提高成材率从而降低单位产品能耗

(3) 铜棒型材生产技术结构

主导产品园棒、型材、铜排生产工序：

传统工艺（铜排）：铸锭-热挤压-拉伸

短流程新工艺：铜线杆-连续挤压

表 3-4 铜棒型材生产工艺技术清单

工序名称	技术名称	作用
熔炼	潜流式三联体炉熔炼	取消流槽、简化炉体结构，降低电耗
铸造	上引铜杆	替代铸锭工序，比传统方法节能 1/2
棒型压力加工	连续挤压	替代了铸锭加热、热挤压、冷拉伸

(4) 铜线材生产技术结构

主导产品铜线杆 Φ6 毫米生产工序：

铜线杆生产工艺：熔炼-连铸连轧

表 3-5 铜线杆生产工艺技术清单

工序名称	技术名称	作用
熔炼	竖炉熔炼	提高熔化效率
线杆生产	连铸连轧	替代横列式轧机落后工艺，节省电能消耗。

3.6.2 铜加工行业技术水平

近几年来，我国铜加工企业通过结构调整和技术进步，向做精做专方向发展，推动了铜加工行业产业升级的步伐，新建工程项目相继投产，使我国铜加工技术水平和铜加工产能大幅提高。

我国铜加工关键技术取得重大突破：潜流式连铸技术取消了溜槽转运铜熔体工序，解决了无氧铜材生产中含氧超标的技术难题；采用上引连铸和水平连铸方法生产铜杆、带坯、管坯、棒形；采用多面多流潜流式连铸棒型管技术开拓了再生铜直接利用的历史新篇章；连续挤压技术的重大突破和 630 型连续挤压机问世，对取消铜加工中热加工工序起到了决定作用，从而开辟了一条以铜线杆为坯料的铜加工新时代；冷旋轧技术的突破和发展，为缩短工艺流程、生产特殊产品打下了基础，卧式水平连续卷坯-高精拉伸、上引连铸线坯-高精拉伸等方法已被普遍采用，传统的合金熔炼与铸造、热加工、冷加工三段式铜及合金生产方式正在被打破，生产工艺流程进一步缩短，为节能和提高生产效率提供了广阔的发展空间。我国铜加工行业技术装备水平和技术经济指标不断提高。

3.6.3 铝加工行业技术结构

（1）建筑铝合金型材生产技术结构

主导产品建筑铝合金型材生产工序：利用熔铸圆锭，通过挤压、轧制，生产棒、型、管产品的传统挤压加工类型。典型熔铸工艺流程见图 3-6，典型挤压工艺流程见图 3-7。

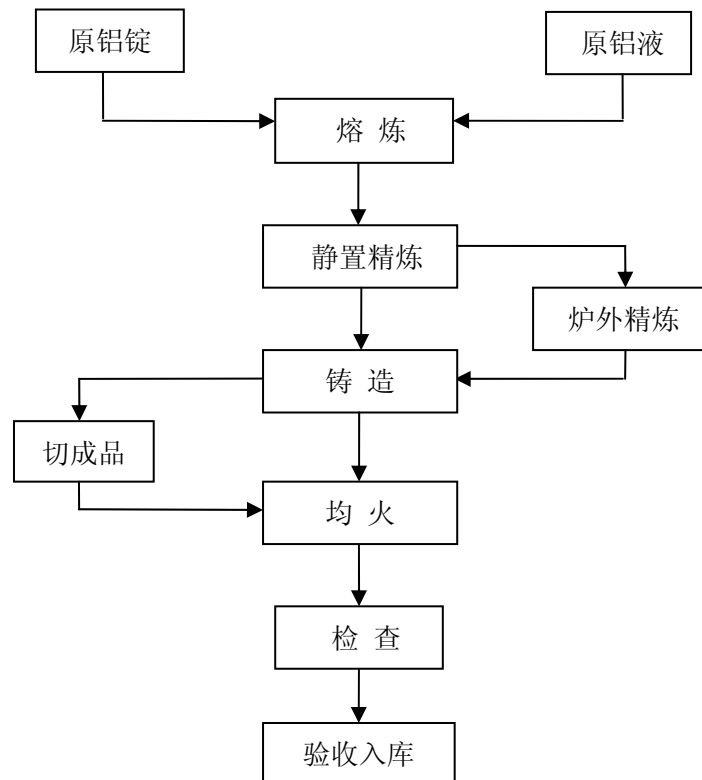


图 3-6 典型熔铸工艺流程

表 3-6 铸锭熔铸工艺技术清单

工序	技术名称	作用
原料	原铝液替代重熔铝锭熔铸	减少重熔能耗、烧损
	铝屑打包回熔	减少烧损
配料	高纯金属制剂代替中间合金	熔化快、温降小、省时节能
熔炼	快速熔炼技术	双高（热效率高、熔化速度高）,三低（NO _x 低污染、CO ₂ 低排放、低燃烧噪音）
	蓄热式熔炼炉	
	感应电炉熔炼技术	烧损少，效率高，又有电磁搅拌作用
	用天然气取代燃油	清洁能源、降低成本
	炉底透气砖技术	熔化快、减少偏析
精炼	熔体净化技术	除气、除渣
	电磁替代人工搅拌	熔化快、减少偏析，降低劳动强度
	永磁搅拌技术	比电磁搅拌更省能
	炉内精炼机技术	将加入熔剂、喷粉、搅拌集于一体
	炉外精炼、过滤技术	
	采用绿色熔剂替代传统熔剂	绿色环保，减少氟、氯的有毒气体排放
	惰性气体替代氯气精炼	绿色环保，减少氯气排放，延长设备寿命

铸造	DC 铸造	现行普遍应用
	同水平热顶铸造机	铸锭表面质量高、成品率高、效率高
	气滑铸造技术	铸锭表面质量高
	超声波铸造、电磁铸造	铸锭表面质量高
	液压导轨铸造机	减少铸锭弯曲、速度控制精度高

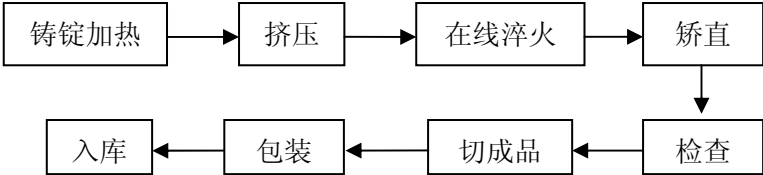


图 3-7 典型挤压工艺流程

表 3-7 挤压建筑铝型材工艺技术清单

工序	技术名称	作用
铸锭加热	感应加热技术替代电阻炉	随时加热，减少无效能耗
	用天然气取代燃油	清洁能源、效率高
	长铸棒加热剪切	减少金属损耗
挤压	固定垫挤压	效率高
	固定垫挤压烟碳喷涂	利于垫片分离，延长固定垫寿命
	宽展模挤压	以小设备挤压大型材
	等温等速挤压	成品率高
	双牵引技术	效率高、成品率高
	在线气、水淬火技术	短流程，免去重新加热能耗
模具	先进模具设计制造技术	提高成品率，减少试模次数
	新式模具蚀洗技术及装置	减少有毒气体排放，回收氢氧化钠

（2）铝板带生产技术结构

主导产品铝及铝合金板带生产工序：热轧铝板生产工艺流程见图 3-8。

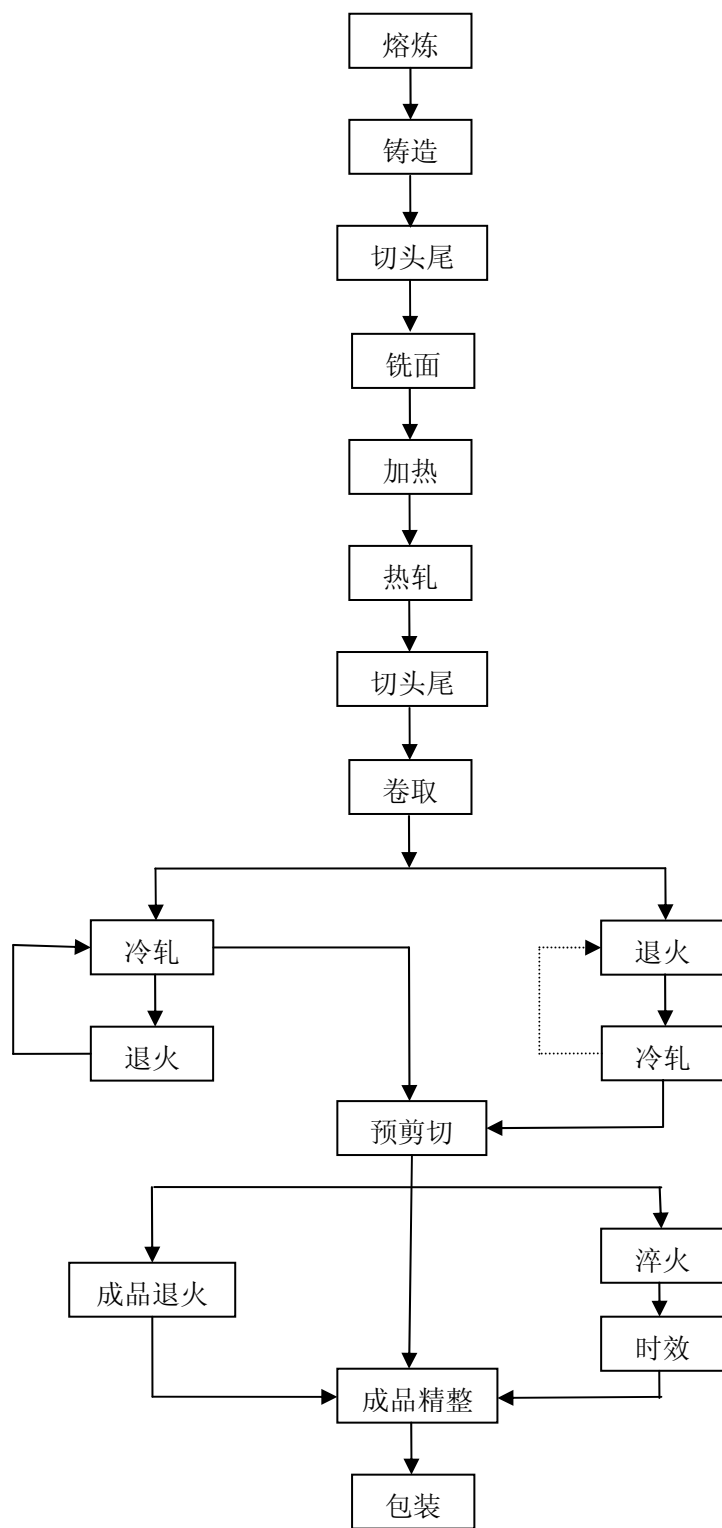


图 3-8 热轧铝板生产工艺流程

表 3-8 铝合金扁锭生产工艺技术清单

工序	技术名称	作用
原料	原铝液熔铸	减少重熔能耗、烧损

配料	高纯金属制剂代替中间合金	熔化快、温降小、省时节能
熔炼	蓄热式熔炼炉	节能，生产效率高
	用天然气取代燃油	清洁能源、降低成本
	炉底透气砖技术	熔化快、减少偏析
精炼	电磁（永磁）搅拌替代人工搅拌	熔化快、减少偏析，降低劳动强度
	炉内精炼机技术	将加入熔剂、喷粉、搅拌集于一体
	炉外精炼、过滤技术	
	采用绿色熔剂替代传统熔剂	绿色环保，减少氟、氯的有毒气体排放
	惰性气体替代氯气精炼	绿色环保，减少氯气排放，延长设备寿命
铸造	DC 铸造	现行普遍应用
	低液位自动铸造技术	铸锭表面质量高
	电磁铸造	表面光洁，几乎不用铣面
铣面	带侧铣立轴式数控铣面机	

表 3-9 热轧铝及铝合金板生产工艺技术清单

工序	技术名称	作用
加热	蓄热式立推加热炉	节能
	加热与均火相结合	短流程
	加热采用天然气	清洁、热效率高
轧制	大卷径、高速轧机	提高生产效率意味着单位重量消耗能源少

表 3-10 铝及铝合金板带冷轧生产工艺技术清单

工序	技术名称	作用
轧制	先退火后剪切替代先剪切后退火	
	冷轧机全油润滑	油气等可回收率高

铝铸轧板坯生产工艺流程：

配料计算→备料→装炉→熔炼→精炼静置→铸轧→剪切→矫直→卷取→卸卷

表 3-11 铝铸轧板坯生产工艺技术清单

工序	技术名称	作用
原料	原铝液熔铸	减少重熔能耗、烧损
配料	高纯金属制剂代替中间合金	熔化快、温降小、省时节能
熔炼	蓄热式熔炼炉	节能，生产效率高
	用天然气取代燃油	清洁能源、降低成本
	炉底透气砖技术	熔化快、减少偏析

精炼	电磁（永磁）搅拌替代人工搅拌	熔化快、减少偏析，降低劳动强度
	炉内精炼机技术	将加入熔剂、喷粉、搅拌集于一体
	炉外精炼、过滤技术	
	采用绿色熔剂替代传统熔剂	绿色环保，减少氟、氯的有毒气体排放
	惰性气体替代氯气精炼	绿色环保，减少氯气排放，延长设备寿命
	在线变质技术	控制晶粒度
铸轧	前箱温度及液面高度控制技术	铸轧卷
	铸嘴金属分配	
	铸轧辊表面温度及冷却强度	
	电磁铸轧	
	铸轧辊表面烟碳喷涂技术	减少粘辊
	抗热疲劳裂纹的辊套专用材料	提高辊套寿命

（3）铝箔生产技术结构

主导产品铝及铝合金箔生产工艺流程如下：

坯料→坯料退火→粗轧→中精轧→分切→成品退火→检验→包装

表 3-12 铝箔生产工艺技术清单

工序	技术名称	作用
坯料	变质剂技术	细化晶粒
	熔体超纯处理技术	减少针孔
	微合金控制技术	提高铝箔性能
	板形控制技术	提高成品率
轧制	大卷重、宽幅面轧制技术	成品率高、效率高
	板形控制、厚度控制技术	
	轧制道次与压下量控制技术	
	张力与速度控制技术	
	离线双合技术	减少断带、提高效率和成品率
	箔材分切技术	
	负压退火技术	减少油斑缺陷
	两段式保温退火技术	
	轧制油在线回收及处理技术	节油减排，降低成本
	轧辊粗糙度及凸度磨削技术	
	助滤剂配比技术	提高过滤效果，提高成品率

3.6.4 铝加工行业技术水平

我国铝板带箔加工的生产能力、总体装机水平和产品质量有了很大的提高。其中不少厂家先后引进了多条铝板带箔材生产线，特别是板带箔材的冷轧、箔轧及精整设备。其中，渤海铝、西南铝及瑞闽铝业有限公司等所引进的冷轧机及精整设备和渤海铝、厦顺铝业有限公司等引进的铝箔轧机，采用了世界上各种主流和先进的加工技术和自动化控制系统，其装机水平均堪称当时世界一流。

进入二十一世纪以来，随着国内电解铝行业的飞速发展，以及世界制造业向中国转移的加快，国内的铝加工业又迎来了新一轮的投资高峰期。其表现为新建项目的起点高，板带项目的规模一般在年产 10 万吨以上，铝箔项目的规模在 2 万吨以上，部分项目如西南铝热连轧生产线、冷连轧生产线，南山轻合金 20 万吨板带项目，厦顺铝箔项目等采用了当今世界最先进的生产工艺技术和装备，已开始步入世界大型铝板带箔生产厂行列。

目前，国内铝加工材综合能耗已下降到 700kgce/t 左右，比 2000 年的 1139kgce/t 下降了 38.5%。但需要指出的是，国内铝加工企业，特别是已投入生产多年的企业，在生产能力的发挥、成品率以及节能减排技术的推广应用上，同国外大型铝加工企业相比还存在着较大的差距。虽然能源消耗对于铝加工行业而言，在加工成本中所占的比例仅为 15%~20%，但随着市场竞争的加剧，节能对提高企业盈利指标的作用将越来越明显。

特别是近年来一些发达国家的有色金属工业企业通过加大科研投入，依靠技术创新，通过开发新技术、新工艺、新装备，在节能减排方面逐渐取得突破性进展时，必将促使产业面貌发生革命性变化。如果对这种前景缺乏足够认识，忽视技术创新，以为仅靠现有技术，扩大产能就可以增强竞争力，是难以在新一轮竞争中得以生存和发展的。因此，跟踪国际先进技术发展，围绕节能减排，加大技术创新投资力度，应是今后一个时期我国有色金属工业发展的重点。

3.7 有色金属采矿行业技术现状

3.7.1 有色金属采矿行业技术结构

有色金属矿山采矿常用工艺技术及专项技术见表 3-13 和表 3-14。

表 3-13 有色金属矿采矿（露天开采）节能减排技术

工艺节点	工艺技术	专项技术
穿孔	穿孔效率优化技术	露天开采烟尘、粉尘抑制技术
爆破	靠帮并段台阶的控制爆破技术	爆破危害控制技术
	逐孔爆破技术	

	现场混装炸药技术	
铲装		铲装设备计算机自动调度技术
		采运设备合理匹配技术
运输	连续或半连续运输工艺技术	矿车自动调度及管理系统
排岩	陡帮开采技术	排土场粉尘、毒气和酸性水控制技术
	内排土技术	
	组合台阶并段技术	
	多机械、连续排土工艺技术	

表 3-14 有色金属矿采矿（地下开采）节能减排技术

工艺节点	工艺技术	专项技术
凿岩	凿岩台车全自动控制技术	地下开采工作面粉尘抑制收集技术
爆破	高精度光面爆破技术	大规模采矿爆破危害控制技术
	束状孔爆破技术	
	高阶段大直径深孔采矿法	
	露天与地下联合开采综合技术	
	原地爆破浸出技术	
装载		重力运搬技术
		爆力运搬技术
运输	最小运输功优化技术	粉尘抑制收集技术
支护（充填）	高浓度全尾砂胶结/膏体充填技术	井下废水的综合处理及应用技术
	井下废石就地充填技术	
通风		混联节能风机及风量分配技术
		多机并联空气幕通风技术

3.7.2 有色金属采矿行业技术水平

采矿作为一门古老而又全新的行业，总是在发展中不但汲取各个专业的养分为己所用，但由于矿产资源赋存的不均匀性，以及受到开采过程中多方面因素的影响，技术水平十分不均衡，新装备新技术发展很快，而许多落后装备也在继续使用，有机械化程度较高的矿山（液压凿岩台车凿岩，铲运机出矿和辅助作业机械化），也有一般机械装备的矿山（气腿式凿岩机凿岩，电耙出矿，电机车运输），还有机械装备较差的矿山（气腿式凿岩机凿岩，人工运搬矿石）。

就节能减排工作而言，许多矿山也在紧跟国家政策及行业形势改变以往的高耗能高排放的生产方式，许多先进适用技术已在矿山中应用，特别是一些大型矿山装备及技术水平比较高，今后的工作重点应是先进适用技术在中小型矿山中的

推广。

3.8 有色金属选矿行业技术现状

3.8.1 有色金属选矿行业技术结构

有色金属矿选矿工艺流程包括原矿破碎、磨矿、分选、浓缩、过滤等工艺单元。破碎工艺单元的主要技术有：颚式破碎机破碎技术，圆锥破碎机破碎技术，冲击式破碎机破碎技术，辊压破碎机破碎技术等。

磨矿工艺单元的主要技术有：磁性衬板技术，自磨（半自磨）机磨矿技术，棒磨机磨矿技术，砾磨机磨矿技术，球磨机磨矿技术等。

分选工艺单元的主要技术有：电位调控浮选技术，大型浮选机技术，柱浮选技术，闪速浮选技术，硫化铜矿浮选技术，高硫铅锌矿整体利用技术，复杂铅锌铁硫化矿选矿技术，铜铅锌优先浮选技术，硫化氧化铅锌矿选矿技术，铝土矿浮选脱硅技术，铜矿伴生钼金属综合利用技术等。

浓缩工艺单元的主要技术有：浓密机技术，倾斜板浓密技术，高效浓密机技术，闪速固液分离技术，改性絮凝剂技术等。

过滤工艺单元的主要技术有：间断式板框压滤机技术，盘式真空过滤机技术，陶瓷过滤机技术，自动压滤机技术，膜滤技术等。

有色金属矿选矿过程中的技术主要为生产过程技术。技术的逻辑关系如图 3-9 所示。

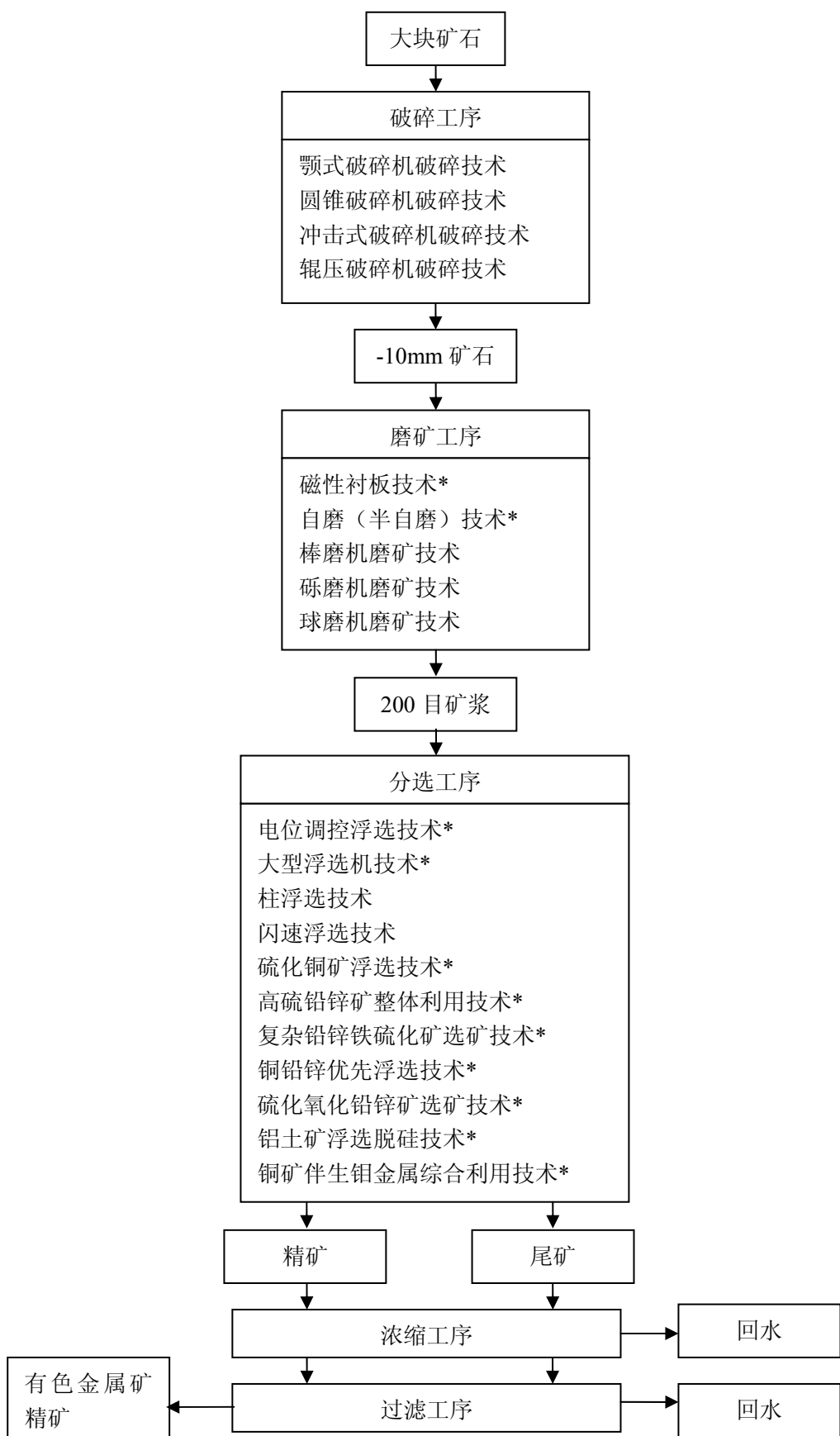


图 3-9 有色金属矿选矿行业技术结构图

3.8.2 有色金属选矿行业技术水平

磁性衬板技术为磨矿工艺单元技术，普及率为 20%，属于国际先进技术。

含易浮硅酸盐脉石铜矿的选矿技术的普及率约为 10%，属于国内领先技术。

100m³ 以上机械搅拌式充气浮选机技术的普及率约 30%，属于国内领先技术，适用于年处理规模 200 万 t 矿石以上的选矿厂。

高硫铅锌矿整体利用技术的普及率约 10%，属于国内先进技术。

复杂铅锌铁硫化矿的选矿技术（FKNSP）的普及率约 10%，属于国际领先技术。

复杂难处理富锗硫化氧化混合铅锌矿的选矿技术的普及率约为 20%，属于国内先进技术。

铝土矿选矿脱硅预富集技术的普及率约 50%，属于国际领先技术。

电位调控浮选技术的普及率约 10%，属于国际领先技术。

破碎、磨矿、浓缩、过滤的技术水平能够保证稳定有效的生产，分选工序的技术水平处于国内先进或国际领先地位。

第四章 有色金属行业节能减排先进适用技术

4.1 生产过程节能减排先进适用技术

4.1.1 铝冶炼节能减排先进适用技术

4.1.1.1 铝土矿一段棒磨二段球磨-旋流分级技术

(1) 技术概况

针对我国一水硬铝石难磨难溶的特点,国内氧化铝生产厂家所用磨矿设备采用一段棒磨二段球磨-旋流器组成的闭路磨矿流程。棒磨的长径比 $L/D=1.41$,球磨长径比 $L/D=2.36$;铝土矿入磨粒度 $\leq 25\text{mm}$,出磨料浆经泵池、用泵打入水力旋流器,水力旋流器溢流粒度 $100\%<500\mu\text{m}$ 、 $99\%<315\mu\text{m}$, $70\%\sim 75\%<63\mu\text{m}$,固体含量 350g/L ,底流进球磨机继续研磨,球磨机内液固比 (L/S) 控制在 0.5 左右。

一段棒磨二段球磨-旋流分级技术是由旋流器与棒磨机、球磨机组成的闭路磨矿系统。铝土矿与一定比例的循环碱液在球磨机内通过物料和钢球及物料与物料之间的相互冲击与研磨,达到一定细度后,棒磨机和球磨机出料由泵一起打入旋流器进行分级,水力旋流器溢流(即产品)铝土矿粒度 $100\%<500\mu\text{m}$ 、 $99\%<315\mu\text{m}$, $70\%\sim 75\%<63\mu\text{m}$,固体含量 350g/L 。合格的铝矿浆进入矿浆槽,底流粗颗粒返回球磨机继续研磨。正常情况下,成品中较粗的颗粒在棒磨机内完成,较细的颗粒在球磨机内完成。

(2) 技术适用条件:适用于一水硬铝石型铝土矿为原料生产氧化铝。

(3) 技术特点

该技术降低单位磨矿产品的能耗,得到的矿浆产品粒度均匀,与一段磨矿相比单位时间磨矿处理量提高 5% 以上,系统作业率提高 3%,占地面积小、作业率高、分级效率高。缺点是磨机衬板和旋流器排沙嘴易磨损,工艺流程复杂。

(4) 节能减排效果

与一段磨矿相比,节电 $15\%\sim 18\%$;厂房占地面积小,结构简单,碱蒸汽排放量少;容易控制产品细度,粒度分布更为合理,有利于高压溶出和赤泥沉降。

4.1.1.2 拜耳法生产砂状氧化铝技术

(1) 技术概况

采用一段分解法生产砂状氧化铝。铝酸钠溶液分解时加入大量晶种,氢氧化铝颗粒在分解过程中不断长大,再借助分级技术,分离出大颗粒氢氧化铝,氢氧

化铝焙烧后得到氧化铝。一段分解是铝酸钠精液经板式换热器降温至约 65℃，与晶种混合后进入分解首槽，料浆利用位差依次自流到下一个分解槽，分解时间约 45 小时。为了提高分解的产出率，分解过程中采用中间降温，通常用水与浆液通过宽流道板式换热器换热，使浆液温度降到约 50℃。分解后的料浆进入水力旋流器分级，粗颗粒进入底流（-45μm 颗粒含量小于 12%），送去成品过滤；其余细颗粒送去种子过滤，制备晶种。

分解过程是铝酸钠溶液中的铝离子以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的形式沉积出来。铝酸钠溶液分解时，氢氧化铝晶核是难于自发生成的，必须加入大量制备的晶种，才能使氢氧化铝结晶析出。铝酸钠溶液的分解过程包括附聚、晶体长大、二次成核和晶粒破损四个过程，精液分子比低、过饱和度大，有利于晶种的长大，对产出强度高、粒度大的氢氧化铝极为有利；本技术的根本点是加入大量的晶种，首槽固含达到 800g/L 左右，氢氧化铝颗粒在分解过程中不断长大，再借助分级技术，分离出大颗粒氢氧化铝用于生产砂状氧化铝。

（2）技术适用条件

该技术适用于我国以一水硬铝石为主的铝土矿作为原料生产氧化铝。

（3）技术特点

该技术一段分解可以生产出砂状氧化铝，且流程比二段法简单、设备较少、分解槽产出率高，相对能耗较低、投资相对较低。缺点是晶种循环量大，产品强度小。我国的铝土矿资源以一水硬铝石为主，溶出工艺为高温高浓度碱液，生产的精液氧化铝浓度较高，比较适合采用一段分解。

（4）技术节能减排效果

一段分解生产流程比二段分解简单，设备较少，能耗相对较低，电耗降低 20%~30%；产出率提高约 10kg 氧化铝/m³ 精液。

4.1.1.3 氧化铝管式降膜蒸发技术

（1）技术概况

蒸发是氧化铝生产的关键工序之一。主要用于浓缩铝酸钠溶液，平衡生产系统的水量，排出系统中碳酸钠、硫酸钠等。以前我国氧化铝生产工艺中蒸发工序的蒸汽消耗偏大，采用六效逆流管式降膜蒸发技术后蒸发的各项技术经济指标得以改善。

母液经六效蒸发后由一效出料至闪蒸器，经几级闪蒸降温后，送至其它工序。蒸汽在其中一效加热室中与母液冷凝换热，母液在分离室中沸腾汽化形成二次蒸汽，经过除沫器后送至下一效加热室，末效二次蒸汽在冷凝器中与循环水直接接触冷凝后送至蒸发循环水。自蒸发器与冷凝水罐是利用母液和冷凝水余热的装

置,可以利用系统负压,使高温液体沸腾,自蒸发产生二次蒸汽,补充到系统中,起到节能的作用。

(2) 技术适用条件

该技术适用于拜耳法处理一水硬铝石型铝土矿的铝酸钠溶液的蒸发过程。

(3) 技术特点

六效逆流管式降膜蒸发技术适用于拜耳法处理一水硬铝石矿的蒸发;循环母液苛碱浓度可由 170g/L 蒸浓至 245g/L,消耗蒸汽 0.62-0.72t/t-氧化铝,水中含碱量 0.003mg/L, 热电站回水量 2.3t/t-氧化铝;运转率高,可达 93%以上;自动化水平高,操作劳动强度小。缺点是不适用于高碳酸钠溶液的蒸发;运行过程中一效的碱浓度和温度较高,长时间运行后部分管路有碱脆现象,并且结疤比较明显。

(4) 技术节能减排效果

该技术能耗低,每蒸一吨水需消耗蒸汽<0.25t;传热系数高,传热系数大于 1500W/m²·℃·h;蒸发强度高,六效运转时每小时每平方米换热面积蒸水>15kg。

4.1.1.4 氧化铝深锥高效沉降槽技术

(1) 技术概况

在氧化铝生产过程中,沉降分离及洗涤是影响氧化铝产能、质量和效率的关键环节之一。溶出后的稀释浆液是铝酸钠溶液和赤泥的混合物,利用沉降槽将两者分离,得到的粗液用于分解氢氧化铝,而赤泥浆液用水洗涤后得到高固含低附碱的赤泥排出。

深锥高效沉降槽具有槽体直筒段高,底部锥角大,泥层高度大耙臂承受扭矩大的特点。大的锥角,使物料在槽底的流动性好,物料通过较高的泥层及大锥角的压缩,使其底流固含量高,物料在槽底具有较好的流动性。

从溶出后槽来的稀释料浆与絮凝剂充分混合后进入深锥高效沉降槽进行沉降分离,溢流用于制备精液,底流再在深锥高效沉降槽中进行多次反向洗涤后排出废弃赤泥。

(2) 技术适用条件: 适用于氧化铝生产。

(3) 技术特点

深锥高效沉降槽占地面积小,约为大型平底沉降槽的 10%~30%左右;铝酸钠溶液水解损失少,水解损失小于 1%;运营费用低,产品质量好;赤泥附碱小于 5kg/t-干赤泥,对环保及降低生产成本极为有利;投资减少 40%。缺点是絮凝剂使用量较大;承受物料流量波动能力小。

(4) 节能减排效果

①由于深锥沉降槽底流固含较高,可达到弃赤泥附碱≤5kg/t-干赤泥。②深

锥沉降槽的底流固含量高，分离沉降槽通常在 38%~42%，末次洗涤沉降槽底流固含约高达 46%~53%，相应减少外排赤泥附水量、赤泥回水量、赤泥堆场投资。与平底沉降槽相比，赤泥洗水量减少 0.5~1t/t-赤泥③由于深锥沉降槽体积小，物料在沉降槽内停留时间短，因而水解损失小。④散热损失小，散热面积约为大型平底沉降槽的 80%。

4.1.1.5 铝电解槽新型导流结构节能组合技术

(1) 技术概况

新型导流结构电解槽技术突破了传统大型铝电解槽的设计和运行模式，创新开发出了如下拥有我国自主知识产权的关键技术：①首创了炭块间有导流沟、中间有汇流沟、端部有蓄铝池的新型水平网络状结构的导流电解槽技术；②首次开发了导流结构阴极的生产技术；③创新开发了低铝液层稳定生产节能技术，包括均匀低温启动技术、启动后快速降低槽电压技术以及槽控技术的优化等；④首次开发了保温型电解槽内衬结构设计技术；⑤首创了非对应阴阳极的沟槽绝缘焦粒焙烧技术。中国有色金属工业协会组织的专家鉴定认为：新型导流结构电解槽整体技术达到国际领先水平。

新型导流结构电解槽技术通过新颖的电解槽阴极与内衬结构设计、先进的工艺操作与控制，大幅度降低了极距，成功实现了五低二高（低铝液层、低极距、低电压、低能耗、低效应系数、高阳极电流密度、高电能利用率）的铝电解高效率稳定运行，形成保温节能型铝电解槽。新型导流结构电解槽平均工作电压 3.70~3.75V，电能利用率提高 5%~7%，吨铝节电 1200kWh 以上，同时由于节能和降低效应系数而实现减排，因此具有显著的经济效益和社会效益。

(2) 技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

(3) 技术特点

新型导流结构铝电解槽技术是新一代大幅度节能的铝电解槽技术，首创了炭块间有导流沟、中间有汇流沟、端部有蓄铝池的新型水平网络状结构的导流电解槽技术；提出并实现了低铝液层稳定生产技术，开发了五低二高（低铝液层、低极距、低电压、低能耗、低效应系数、高阳极电流密度、高电能利用率）的铝电解节能新工艺；开发并设计了保温型电解槽内衬结构，保证了低极距下电解槽的热平衡；开发了非对应阴极沟槽绝缘焦粒焙烧技术，解决了非平面阴极焦粒焙烧的难题。该技术创新性强，适应于不同容量、不同设计参数的电解槽，生产操作简单，节能减排效果显著。

(4) 技术节能减排效果：节电 $\geq 1200\text{kWh/t-铝}$ 、减排二氧化碳 596kg/t-铝。

4.1.1.6 新型阴极结构铝电解槽节能技术

（1）技术概况

新型阴极结构铝电解槽系列生产工艺系统重大节电示范工程技术，是浙江华东铝业股份有限公司采用东北大学的新型阴极结构铝电解槽专利技术，并根据本公司系列电解槽的特点进行了深度研究和创新工作，结合对平均运行了 2300 多天的 200KA 电解槽进行的系列停槽大修，将其中 94 台电解槽采用“新型阴极结构铝电解槽技术”进行改造，在国内铝电解企业中率先产业化开发应用该节能技术。同时根据公司 200KA 系列电解槽的特点进行了优化改进和技术创新，并研究开发了火焰-铝液焙烧启动新技术，还在电解槽的生产工艺管理方面进行再创新，通过一系列精细化操作手段和创新管理办法，保证了电解槽的稳定运行，为全面推广该技术提供了实践经验和示范效果，表明该技术已成熟，可在全国铝行业中推广应用。

基于稳定铝液面、降低电耗和延长槽寿命考虑，采取改变现行铝电解槽槽底的碳阴极平底结构为阴极表面具有凸起的异型结构，起到减缓阴极铝液表面流速和波动作用，达到提高铝电解槽阴极液面稳定性的目的，从而可以通过降低电解极距来降低电解槽槽电压，使电解槽工作电压从 4.1V 降到 3.72V 而保持电流效率不变。同时根据 200KA 系列电解槽的特点进行了优化改进和技术创新，如电解槽底部四周增加了沟槽，有利于铝液局部循环，从而带动电解质循环使氧化铝的浓度更加均匀；电解槽侧部采用陶瓷纤维板加强保温，减少热量损失，将传统的散热型电解槽改造成保温型电解槽；底部梁高度和宽度都有所增加，以提高梁的寿命。研究开发了全电解质火焰-铝液焙烧启动新技术，全部采用电解质启动来替代传统的冰晶石启动工艺，保证了焙烧启动质量，提高了效率，降低了成本，改善了环境。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

①由于采用本技术的新型槽其降低电耗的主要手段是通过降低阴极铝液面波动来降低工作电压（即降低极距以降低电解质压降）来实现的，为保证在低工作电压下电解槽流体场稳定和能量平衡，根据节能保温型电解槽设计理念，通过增加了底部炭块凸台的高度及宽度、电解槽底部四周增加沟槽、侧部采用保温材料加强保温等结构改进措施的实施，有利于提高凸台寿命、铝液局部循环和减少热量损失。

②全电解质燃气-铝液两段焙烧技术创新应用，不仅有效利用和节约了资源，改善了环境，而且有效地避免了湿法启动造成的电流分布不均匀而对阴极和阳极产生的不利影响，同时还实现了新型槽启动后不用捞炭渣，大大降低了电解质消耗和劳动强度，提高了效率，综合焙烧成本也得到降低。

③通过对新型槽加大非正常管理期各技术参数的调整幅度,根据散热孔的温度分布梯度、炉帮厚度以及在工作电压、电解质成份、分子比、槽温、过热度、电解质水平、铝水平等方面的工艺调整与控制管理,力求参数的优化配置适应保温型电解槽自身的要求,同时经过一系列的精细化操作和创新管理方法来提高关键工艺的操作质量,减少电压波动和效应系数,最终达到稳定的物料平衡和热平衡状态,确保启动后一个月内就可投入正常生产。

新型阴极结构高效节能电解槽技术综合投资成本低,对于现行的铝生产厂推广应用该技术需要在电解槽进行大修时进行,新建的铝厂则可以在建设时按新型阴极结构高效节能电解槽的全新设计进行组织施工建设。

(4) 技术节能减排效果

该项技术实施完成后,94台系列电解槽实现了每吨铝节电 1024 kWh 的目标,年可节电 5407 万 kWh,创直接经济效益 2584 万元,相当于节约标煤 1.89 万 t。电厂可减排二氧化碳 5.628 万 t,经济和社会效益显著,节能减排效果巨大。

4.1.1.7 低温低电压铝电解槽结构优化技术

(1) 技术概况

综合应用计算机仿真和实测技术,通过改变补偿母线走向、回流母线走向、内衬保温结构配置、阳极上部保温结构,对电解槽母线配置及内衬保温结构等进行系统优化,得到在低温低电压下电解槽最优化母线和内衬结构配置,从而使得在超低极距下,铝电解槽的铝液与阴极电流分布均匀、水平电流与垂直磁场小、熔体具备超高稳定性,同时确保电解槽在低温低电压下具备较高热稳定性。

针对低温低电压电解新工艺特点,开发出低温低电压铝电解槽结构优化技术。其基本原理是,应用自主开发的“铝电解槽结构、工艺与控制器综合仿真优化”平台,获得铝电解槽在低温低电压工艺条件下高效、低耗与低排放运转所需的最佳物理场分布、槽膛内形和磁流体稳定性,并同时确定最佳槽结构参数、工艺参数以及相适宜的控制参数。应用该技术所获得的电解槽结构优化方案为电解槽实施低温(920~935℃)和低电压(3.7~3.8V)高效节能工艺奠定基础。

(2) 技术适用条件:适用于预焙阳极电解槽。

(3) 技术特点

该技术是针对低温低电压节能新工艺而开发的铝电解槽结构优化新技术,并可同时获得最佳槽结构参数、工艺参数以及相适宜的控制参数。适用于现行所有规格的铝电解槽,尤其是在大修槽或新建槽上实施效果更佳。

(4) 技术节能减排效果

在低电压控制技术的配合下,应用本技术优化设计的电解槽可取得高电流效

率(93%~94%)、低直流电耗(12000~12400kWh/t-铝)和低阳极效应系数(0.01~0.03)的先进技术经济指标。该技术至少可实现槽电压降低 50mV, 折合降耗约达 160 kWh/t-铝(电流效率取 93%)。

4.1.1.8 铝电解槽新型焦粒焙烧启动技术

(1) 技术概况

该技术由新西兰奥克兰大学和沈阳铝镁研究设计院共同研究开发, 于 2008 年率先在中国铝业公司兰州分公司电解厂应用, 取得了较好应用效果。此项技术通过改善电解槽通电焙烧期间的保温措施, 强化焙烧效果, 促使电解槽快速达到启动温度要求和阴极内衬焙烧要求, 由原来焙烧 96h 缩短为 48h。可以使电解槽提前 48h 投入运行创造效益, 同时还可以有效节约电能消耗以及减少污染物排放等。山西华泽铝电有限公司于 2008 年 8 月中铝兰州分公司引进此项技术, 应用于其 350KA 预焙槽系列, 迄今为止已经安全焙烧启动 200 多台次, 创造了较好的经济效益, 为推进节能减排工作做出了重要贡献。

300KA 预焙电解槽新型焙烧启动法的基本原理是: 通过在电解槽通电焙烧前的装炉过程中改善其保温措施, 改进装炉方法, 使包括所有阳极和阴极表面在内的空间内尽可能形成一个密闭中空空间, 利用热对流易于传播热量和均匀传播热量的原理, 使电解槽阴极内衬水分、挥发份等快速挥发排出, 进而使阴极烧结成一个整体, 同时使槽内阴极温度、炉帮温度、阳极温度等快速达到电解能够正常生产的温度要求。然后灌入足量的液体电解质开始启动阶段控制, 此方法可以促使炭渣有效分离, 缩短物料熔化时间, 一般比原焙烧启动法缩短启动时间 2h。

(2) 技术适用条件: 适用于预焙阳极电解槽。

(3) 技术特点

该技术通电焙烧时间短, 焙烧过程升温速度合理, 挥发份挥发彻底, 焙烧效果好; 节能降耗效果好; 提前两天生产, 投资收益快; 操作简便, 启动过程快, 启动过程安全系数高。缺点是启动正常生产后铝液硅含量高, 原铝质量压力大; 通电焙烧保温要求高, 需要形成密闭中空空腔, 同时须注意减少电解槽槽周对流散热; 如果控制不精心或装炉物料及方法不标准存在阳极过烧现象及由此引起的电解质渗漏现象。适用条件: 采用焦粒焙烧方法焙烧启动电解槽; 有大量液体电解质可供启动时灌入使用。

(4) 技术节能减排效果

采用该 300KA 预焙电解槽新型焙烧启动法焙烧启动电解槽较以前采用的 96h 焙烧启动法通电焙烧启动电解槽可节约用电量为: 电解槽通电焙烧第 49h 至第 96h 平均电压为 2.5V, 平均电流强度为 300kA, 按累积采用新方法启动电解

槽 200 台次计算，焙烧过程总节电量为 720 万 KWh；启动电压按 12V，正常生产电压 4.0V，启动节约时间按 2h，平均电流强度按 300kA，新方法启动电解槽累积按 200 台次计算，启动过程可节电 96 万 kWh，则采用新方法较原方法焙烧和启动总节电量为 816 万 kWh。可多产液体铝量为：新启动槽电流效率按 90%，累积启动电解槽 200 台次，平均电流强度 300kA 计算，采用新方法焙烧启动电解槽可多产铝量约 870t-铝。另外，采用新方法启动电解槽焙烧时间缩短后，还可大量减少 CO、CO₂、CF₄、多种炭阴极挥发等有害气体的排放。节能减排效果明显，经济效益和社会效益明显。

4.1.1.9 低温低电压铝电解工艺用导气式阳极技术

（1）技术概况

为克服现有技术之不足提供一种结构合理、加工简单在整个阳极消耗周期内阳极气泡易于排出的铝电解用导气型预焙阳极。其特征在于在所述阳极底部的长度方向至少设有 1 条底部导气沟，在所述阳极两侧各设有至少 2 条侧部导气沟至少 1 条侧部导气沟与所述底部导气沟连通，形成一个阳极气泡排放通道系统。通过对阳极结构的改进与优化，阳极制作简单，阳极生产的整体工艺无需大幅度更改，只要更改阳极炭块的震动成型模具，投资成本低廉。

传统铝电解槽的炭阳极在电解过程中产生的 CO₂ 和 CO 气体难以及时排出，由此产生一定的气膜电压而使得铝电解生产的槽电压逐渐升高，造成电能消耗的增加；此外，当阳极底掌气泡积累到一定程度的时候就会冲破熔融电解质层而集中排出，导致槽电压波动加剧，不利于电解槽生产运行的稳定性。

新型导气型阳极在底部的长度方向至少设有 1 条底部导气沟，在两侧各设有至少 2 条侧部导气沟，二者构成阳极气体排放通道系统，将产生的阳极气体及时排除，从而实现节能降耗的目的。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

①有利于阳极气泡的排出，从而降低阳极底掌气膜层厚度，降低气膜电压，有利于低温低电压工艺的实现；②阳极气泡的及时排出，有利于抑制阳极效应的发生，为实现“零效应”或“超低效应”电解创造条件；③导气式阳极可以在其整个服役周期内都发挥功效。该阳极可适用于所有预焙铝电解槽，所有的炭素厂皆可以通过改造实现生产该阳极的能力。缺点是阳极生产企业需要改造生产模具，会发生少量的模具改造费。

（4）技术节能减排效果

该技术可降低阳极气膜压降约 20~40 mV 的效果，折合直流电耗达 64~128

kWh/t-铝（电流效率取 93%）；此外，由于其具有提高电解槽稳定性的作用，因此电解极距可大幅度降低，对降低槽电压的间接贡献可达 200~300mV，折合直流电耗达 640~960 kWh/t-铝。

4.1.1.10 铝电解槽高润湿耐渗透 TiB₂/C 复合阴极技术

（1）技术概况

可润湿性阴极，因其表面与熔融金属铝能够很好地湿润，不需要在阴极上保存 20cm 左右的熔融铝层，仅仅挂上一层 3~5mm 厚的铝液膜即可形成平整稳定的阴极，因而不用担心降低极距导致铝的二次反应的加剧，致使电流效率降低；也不用担心磁场对电解生产的巨大干扰。因此，应用可润湿性阴极材料可降低极距，实现大幅度节能。

TiB₂/C 复合阴极材料被认为是最具潜力的一种可润湿性阴极材料。然而，对于现有的 TiB₂/C 复合阴极材料，一方面因 TiB₂ 原料粒度小，导致 TiB₂/C 复合阴极材料中粒度配方和化学组成配方难以协调统一，使得阴极材料的润湿性与抗热震性能无法同时满足。另一方面，因所采用的煤沥青粘接剂存在炭化后结焦炭孔隙率高且结构疏松，容易导致 TiB₂/C 复合阴极力学性能和抗渗透性能下降。因此，提高 TiB₂/C 复合阴极材料的润湿性和抗渗透性能，对铝电解节能和延长槽寿命具有重要意义。

该技术基于 Al₂O₃ 溶胶粒子的纳米尺寸效应，采用 Al₂O₃ 溶胶作为粘结剂实现 TiB₂ 粉末造粒，在功能层上进行粒度级配，在不改变粒度配方的同时，提高了功能层中 TiB₂ 含量，实现功能层与铝液的完全润湿；并通过粘接剂改性技术，提高复合阴极中粘结相的强度和抗 Na（K）渗透性能，有利于提高阴极材料的使用寿命。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

①TiB₂/C 复合阴极因与铝液良好润湿，提高了阴极表面上铝液的稳定性，有利于降低极距，实现铝电解节能。②TiB₂/C 复合阴极因粘接剂进行了改性处理，其抗 Na（K）渗透能力显著提高，为新型含 K 低温电解质体系的应用提供了基础。③与普通半石墨质阴极和石墨化阴极相比，高润湿耐渗透 TiB₂/C 复合阴极性价比最高，其价格介于两者之间。

（4）技术节能减排效果

与普通半石墨质阴极相比，TiB₂/C 复合阴极铝电解槽焙烧启动期间 Na₂CO₃ 添加量减少 500~600kg，冲击电压降低 0.25V，槽电压降低 0.10~0.15V，电流效率由 92.6%提高到 93.9%，炉底压降减小 40mV，吨铝节电 498~657kWh。

4.1.1.11 铝电解槽“全息”操作及控制技术

(1) 技术概况

通过编制铝电解槽车间各项工艺标准化操作手册、槽控系统升级改造和开发基于统计过程控制的监督管理系统等，从电解生产操作流程、自动控制及电解生产管理各方面对电解生产进行控制。应用“全息”操作及控制技术，大幅度降低了电解槽的效应系数，减少了氟化物等污染物的排放，减少了电解过程中直流电消耗。

槽控系统升级与改造，将氧化铝浓度控制在 1.5%~3.5% 的高电流效率区间，开发了正常噪声、低噪声与高噪声的三级波动控制策略。通过比对当前噪声曲线特征与基本噪声特征曲线查找噪声发生源，有针对性采取控制步骤，逐步消除噪声，使噪声水平控制在 80 nΩ 以下。开发了基于统计过程控制的监督管理系统，其划分为分厂、车间、工区和电解槽 4 个管理级别，同时监督管理系统中存储了大量测量、化验分析等数据，从而保证了各项报表数据的电子化、图表化，使得电解槽运行状态一目了然，极大提高了电解槽集中控制水平与铝厂整体管理水平。

(2) 技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

(3) 技术特点

该技术优势主要表现在：提高电解生产中电解电流效率，降低电解直流电单耗；该项技术适用于预焙阳极铝电解槽电解生产控制。

(4) 技术节能减排效果

“全息”控制系统在中铝兰州分公司 400kA 系列 2009 年的节能降耗过程中取得良好的效果，电流效率由原有的 93.9% 提高至 94.5%，直流电耗由 13350kWh/t-铝降低至 13097kWh/t-铝。

4.1.1.12 铝电解阳极电流分布在线监测技术

(1) 技术概况

作为铝电解“心脏”的阳极，其电流分布状况的检测目前只能靠人工离线用万用表测量来实现，由于测量信号不同步，而且测量效率很低，往往得不到很多有用的信息，没有引起行业内工艺管理人员的重视，其实作为铝电解槽“面”信息的阳极电流分布包含了丰富的槽状况信息，比如槽波动信息、阳极病变信息及效应趋势信息等，这些信息对工艺管理人员非常重要，是槽况专家诊断系统的可靠依据；而且条件成熟后可以将信息引入槽控机控制系统，为铝电解控制技术的进一步提升提供技术基础。随着槽型的不断扩大，阳极电流分布“面”信息的作用会越来越突出，因此阳极电流密度分布的在线监测显得越来越重要。

从阳极导杆上采用等距压降的原理将每个阳极导杆相同距离（10cm）的电压差同步采样，统一送到接收设备（移动终端或机房监控计算机），通过对采集到的数据进行分析提炼，输出电解槽的工艺指导信息；同时将原始数据以可视化图形显示方式提供给工艺技术人员，以便对电解槽运行状态准确决策。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

该技术对电解槽稳定性的诊断非常准确，提供的阳极波动信息为槽工艺分析提供了可靠详实的数据，并可提升铝电解过程控制系统的功能。系统需要一定的保养与维护费用。

（4）技术节能减排效果

该项新技术已开始在大中型铝电解企业推广，主要配合铝电解低温低电压新工艺，为电解槽槽况的精细管理提供技术依据，并逐步将有用信息引入槽控机系统，为电解槽的进一步节能挖潜提供技术支撑。根据现场统计，应用该技术后槽电压调整的精度和准确度大幅度提高，槽稳定性的处理时间大幅度缩短，槽平均电压降低 100mV，吨铝电耗降低 320kWh 左右。

4.1.1.13 铝电解“三度寻优”技术

（1）技术概况

铝电解“三度寻优”技术是贵阳铝镁设计研究院在国内完成初步研发，在印度 Baclo 铝厂推广应用，取得显著成效。2008 年在中铝广西分公司应用也取得很好效果。这是一项得到实践证明有效的节能技术，它在发挥原槽控系统氧化铝浓度控制的基础上，以氟化盐添加、工作电压等的寻优控制为手段增加了能量平衡控制，建立起以计算机为核心对电解槽的电解质温度、过热度 and 氧化铝浓度进行控制而形成的一套标准化生产管理模式，实现由计算机动态智能寻找铝电解“三度”的合理区间，减少电解生产过程中的人工干预、降低生产人员的劳动强度，使电解槽工作在高效率的“临界态”，进一步提高铝电解槽的电流效率，降低能耗、降低效应系数，提高能量利用率。

通过计算机控制系统实现了对氧化铝浓度、氟化铝过剩量和多级噪声的控制，使得电解槽的物料与能量达到有效平衡、合理匹配。氧化铝浓度的精准控制和过热度的合理控制保证了电解槽能长期处于高效“临界”工作状态，电压得到合理控制，电流效率显著提高。基于计算机系统的标准化生产管理模式更有利于电解生产管理走入良性循环，自动控制水平的提高减小了员工的劳动强度。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

该技术能有效降低电解的直流电耗，显著提高电流效率；电解各项主要指标得到整体提升；标准化生产管理模式的建立有效提升企业的生产管理水平；降低员工劳动强度，提高工作效率。缺点是如果原槽控系统不与软件相兼容，需要集中更换，一次性硬件投资大。

（4）技术节能减排效果

电流效率：与没有使用该技术相比提高了 2.34%；直流电耗：与没有使用该技术相比降低了 139kWh/t-铝；铝液产量：与没有使用该技术相比增产 2 万 t/年。

4.1.1.14 铝电解槽焙烧自动控制技术

（1）技术概况

焦粒焙烧是当前国内外最为广泛采用的大型预焙电解槽焙烧方法。在焦粒焙烧过程中，使用分流器来控制通过电解槽电流的大小，以避免系列电流全部通过电解槽带来的冲击和焙烧温度的快速升高。焙烧过程中电流大小的控制由分流器和焦粒电阻床本身电阻随温度的变化而自行调整。由于技术本身的限制，焙烧电流的大小无法检测；另外，分流器的使用是以组为单位进行，一旦拆除后就不能再重新安装使用，不能进行精细控制，严重影响焙烧效果。电解槽的焙烧质量直接影响到电解槽的使用寿命。良好的焙烧效果将延长电解槽使用寿命、减少启动过程中的效应发生，实现节能、减少温室气体和固体废弃物排放，增加金属产量，降低单位产品成本的目的，具有重大意义。

该技术以开关方式控制分流器中每个分流片上是否通过电流实现对焙烧电流的精细控制，并在线监测分流器上通过的电流，实现对焙烧电流的监控。以预先设定的焙烧（温度）曲线为标准，用无线方式实时测量电解槽中阴极炭块表面多点的温度变化，将其反馈到控制系统来控制通过电解槽电流大小以控制升温速度。以无线方式实时监测阳极电流分布的变化，及时分析和提示焙烧过程中可能发生的局部电流集中、温度大幅偏高或偏低的情况以进行必要的调整操作。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

该技术实现全程自动控制，人工干预少；焙烧过程可以自行定制，温度和电流分布全程在线监测，焙烧效果好；节能减排效果显著；操作简便，减少工人劳动强度；为企业进行定量性的焙烧过程研究提供了技术保证。缺点是分流片连接的要求高，运行前的连接操作时间略有增加；为避免分流片的高温影响，有时需要压缩空气进行连续冷却；操作人员需要培训，要求素质高。

（4）技术节能减排效果

采用“铝电解槽焙烧自动控制技术”来进行电解槽的焙烧，可以根据电解厂的

实际情况来设置焙烧曲线，确定焙烧时间和升温速度并在线精确监测焙烧电流的大小，精细控制焙烧过程，实现对焙烧过程的定量描述和分析，得到良好的焙烧效果。该系统的应用，可将电解槽平均寿命由 2000 天延长至 2500 天，每年一个 240kA 的电解槽系列（276 台）的大修数量由原来的 50 台减少到 40 台，按每台电解槽大修费用平均 50 万元估算，节约大修费用 500 万元；按 92% 的电流效率和大修 1 台电解槽需要 1 个月来估算增加的铝产量为 534t，按每吨 1.6 万元价格计算，每年可增加 854 万元的产值。同时，良好的焙烧效果可以减少启动效应的发生，从而减少温室气体全氟化碳（ CF_4 和 C_2F_6 ）的排放，降低电解槽的启动电压，提高电流效率，降低平均槽电压，减少废旧槽固体废弃物的排放，具有非常显著的效果。

4.1.1.15 铝电解槽全自动温控燃气焙烧技术

（1）技术概况

本技术针对铝电解槽大型化和新型节能阴极结构技术的发展，研制出适用于大型铝电解槽焙烧启动的燃气焙烧技术和装置。通过对电解槽焙烧过程“动态能量平衡”的计算，准确确定了焙烧过程中的能量需求，优化设计了燃烧控制器；研制的全自动温控燃气焙烧装置，根据炉膛结构空间特点，采用燃烧器与排气管道对列交错的布局方式，槽膛热气流分布合理，确保了槽膛温度的均匀性；系统采用多点检测、分散独立的控制方式，建立了燃气焙烧系统的燃烧控制模型，开发出分区温度自动均衡成套控制系统，具有适应性强的特点。

铝电解槽全自动温控燃气焙烧技术及成套装置由气源装置、燃烧装置、燃气和空气主管路系统、燃气支管系统、空气支管系统、PLC 控制系统六大部分构成。燃烧器在炉膛两侧交错布置确保燃烧过程中热源分布均匀，整个炉膛内的热流动平衡。炉膛欠氧焙烧方案确保碳块在整个焙烧过程中不被氧化。全自动温控系统按照优化的焙烧曲线对电解槽进行平衡焙烧，并在焙烧过程中能够记录所有数据。开发出适合大型铝电解槽的双臂式燃气焙烧设备及装置，同时该装置也可应用于常规电解槽。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

该技术升温速度可控性好，温度分布均匀，不需要清除焦粒，不存在电流分布问题，相对节能，节约焙烧成本。缺点是操作较为复杂，为了放入燃烧器，需要在阴、阳极间留出较大的空间，燃烧时所用的过量空气会使阴极和阳极表面氧化。适用条件：适用于所有的大修后的电解槽和二次启动槽的焙烧启动。

（4）技术节能减排效果

该技术总用煤气量为 5668m^3 ，费用约 1.7 万元。比采用焦粒焙烧费用约 3.5 万元，单槽可节省费用 1.8 万元，按 320kA 电解系列来进行统计（288 台槽），电解槽启动成本可节约 518 万元。另外燃气焙烧不需要焦粒，可以节省购买焦粒的费用，也没有启动后期电解槽清理焦粒的工序，大大减轻了工作的劳动强度，同时也减少了电解槽焙烧及启动时氯化物的排放。

4.1.1.16 预焙铝电解槽电流强化与高效节能综合技术

（1）技术概况

铝电解工艺技术条件直接影响着铝电解槽的技术经济指标。无论是我国早期的“一低四高”工艺，还是后来的“四低一高”工艺，随着工艺技术条件的变化，其吨铝直流电耗从 15000 kWh 降低到 13300kWh，至 2009 年，我国铝电解平均直流电耗仍高达 13118kWh/t-铝，离《有色金属产业调整振兴规划》中提出的直流电耗要达 12500 kWh/t-铝甚至 12000kWh/t-铝的指标相差较大，节能压力巨大。因此，进一步优化工艺，寻求高效节能型铝电解新工艺，对铝电解工业节能尤为重要。

针对我国低阳极电流密度以及氧化铝来源广的特点，开发出“五低三窄一高”铝电解新工艺，即：低温、低过热度、低氧化铝浓度、低槽电压、低阳极效应系数、窄物料平衡工作区、窄热平衡工作区、窄磁流体稳定性调节区和高阳极电流密度。该工艺在我国多家电解铝厂应用，实现了铝电解高效节能的目标。以铝电解槽工艺和控制技术创新为主要手段，并辅以电解槽保温结构与物理场调整优化，使电解槽能在低电压（3.70~3.88V）和相对较高的阳极电流密度（ $0.79\sim 0.85\text{A}/\text{cm}^2$ ）下高效稳定运行，达到大幅降低能耗，并同时增产增效的目的。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

该技术既可以用于新建铝电解系列，也可用于对已有铝电解系列的升级改造（无需停槽改造）；通过工艺与控制技术的升级改造，可实现高电效、低电耗、低排放、高稳定等多重目标；该工艺技术在增加投资的同时，提高了单位产能，实现生产效率和经济效益的大幅提升；控制系统提高了槽控制精度，可实现“三窄”（窄物料平衡工作区、窄热平衡工作区、窄磁流体稳定性调节区）控制目标。

（4）技术节能减排效果

槽电压可降低至 3.70~3.88V，电流效率 $\geq 93.0\%$ ，阳极效应系数 ≤ 0.02 次/槽·日，直流电耗 $\leq 12400\text{kWh}/\text{t-铝}$ ；槽寿命 ≥ 2500 天；吨铝当量 CO_2 减排 1t 以上（含 PFC 折合量和节能折合量）。

4.1.1.17 铝电解系列（全电流）不停电停开槽技术

（1）技术概况

该项目技术依托“国家重大产业技术装备研制及重大产业技术开发专项”之“300kA 级大型铝电解槽综合节能技术开发”项目之第二分项为课题，针对目前电解槽系列单槽停槽、开槽均必须全系列停电的问题，研究具有自主知识产权的具有超大电流通、断能力的短路分流装置及“多路磁力机构智能控制装置”铝电解槽专用不停电停、开槽技术及相关装置，实现电解槽的不停电短路操作。利用多台分置联动开关组成的开关组，在停槽操作时，在短路母线接点的两侧装上开关，将开关组接通后再接通短路母线达到停槽。开槽过程与此相反。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

该技术具有强大的通流能力，最大容量目前已达 600KA；有电弧减能熄灭功能，本身安全可靠；电阻小，分流量大，短路操作安全；结构合理，外形较小，安装方便；与电解槽连接方便，不需要对槽母线进行改造；控制先进，同步性高，多重保护功能，安全性高；规格及形式量身打造，能与电解槽实现最佳配合。该项技术是我国自主创新的先进技术，整体技术达到了国际领先水平，同时节能效果好，经济和社会效益显著，具有广泛的推广应用前景。

（4）技术节能减排效果

该技术控制系统先进，同步性高，并且具有多重保护功能，安全性较强，能与电解槽实现最佳配合。节电 50~100 kWh /t-铝。

4.1.2 铜冶炼节能减排先进适用技术

4.1.2.1 闪速熔炼技术

（1）技术概况

闪速熔炼的生产过程是用富氧空气或热风，将干精矿喷入专门设计的闪速炉的反应塔，精矿粒子在空间悬浮的 1~3 秒时间内，与高温氧化性气流迅速发生硫化矿物的氧化反应，并放出大量的热，完成熔炼反应即造钼的过程。反应的产物落入闪速炉的沉淀池中进行沉降，使铜钼和渣得到进一步的分离。

（2）技术适用条件

该工艺技术具有生产能力大、污染少等优点，单套系统最大产能可达 40 万 t/a 以上，适用于规模 10 万 t/a 以上的铜冶炼厂。但是要求对原料进行深度干燥到含水<0.3%，精矿粒度<1mm，原料中杂质铅加锌不宜高于 6%。该工艺的缺点是设备复杂、投资大，备料过程复杂，烟尘率较高，渣含铜比较高，需要进行贫化处理。

（3）节能减排效果

闪速熔炼技术在能效和环保方面的特点：闪速熔炼的铜精矿氧化反应迅速，单位时间内放出的热量多，加快了熔炼速度，使熔炼的生产率大幅度提高，为反射炉与电炉熔炼的两倍。采用了富氧工艺后，在铜精矿含硫正常情况下可实现自热熔炼，大大降低了燃料的消耗。由于精矿中硫化物的氧化反应程度高，且采用高浓度的富氧空气熔炼，烟气量少，烟气中的 SO_2 浓度可提高到 30% 以上，有利于烟气制硫酸过程中硫的回收和环境保护，硫的捕集率和回收率均可达到 98% 以上。

4.1.2.2 顶吹熔池熔炼技术（奥斯麦特/艾萨熔炼法）

（1）技术概况

顶吹熔池熔炼是通过喷枪把富氧空气强制鼓入熔池，使熔池产生强烈搅动状态加快了化学反应的速度，充分利用了精矿中的硫、铁氧化放出的热量进行熔炼，同时产出高品位冰铜。熔炼过程中不足的热量由燃煤和燃油提供。对比闪速炉反应塔的熔炼过程，熔池熔炼也是一个悬浮颗粒与周围介质的热与质的传递过程。所不同的是，悬浮粒子是处在一个强烈搅动的液-气两相介质中，受着液体流动、气体流动及两种流体间的相互作用以及动量交换的影响。由于熔池熔炼过程的传热与传质效果好，可大大强化冶金过程，达到提高设备生产率和降低冶炼过程能耗的目的，因此 20 世纪 70 年代后熔池熔炼得到了迅速发展。

顶吹熔池熔炼法按技术拥有方的不同分为奥斯麦特熔炼法与艾萨熔炼法。这两种方法都拥有“赛洛”喷枪浸没熔炼工艺技术，按各自的优势和方向延伸并提高了该项技术，从而形成各具特色的冶炼方法。其主要的区别在于喷枪结构、排料方式、喷枪压力等方面。

顶吹熔炼法的熔炼系统由三个炉子组成，即熔炼炉、贫化炉和吹炼炉。铜精矿、熔剂、返料、燃料煤经配料仓按预定要求计量配料后送制粒机加水制粒，以含水 9~10% 的黏团料方式，由加料皮带从炉子顶部加料口投入炉内。经过制粒混有燃料煤的混合铜精矿，一旦粒料加入熔融层，粒料中水份马上就挥发掉，粒料变成粉末与冰铜和渣激烈地搅动并进行反应，形成一个气、固、液三相快速的传质传热，熔炼炉就变成一个高速的反应器。熔炼需要的富氧空气通过喷枪鼓入熔池，为了便于生产期间的温度控制，还可从喷枪加入燃油对炉温进行微调，熔炼产生的冰铜和炉渣混熔体由炉子底部的放铜口（或虹吸钎口）及溜槽放出，进入贫化电炉澄清分离。熔炼炉含尘烟气经余热锅炉降温和收尘后，出口烟气进入硫酸厂制酸。冰铜分批送吹炼炉吹炼成粗铜。

（2）技术适用条件

该技术对处理的原料有较强的适应性，不仅能处理“纯净”精矿，也能处理“垃

圾”精矿，甚至能处理其他方法不能处理的精矿。与已有的设备配套灵活、方便，熔炼炉的占地面积较小，可与其他工艺设备配套使用。

（3）节能减排效果

顶吹熔池熔炼技术在能效和环保方面的特点：原料适应性强，可处理铜精矿、大块含铜原料，含铜电子废料等；原料制备简单，铜精矿原料不需要经过特别准备，将含水量小于 10% 的精矿制成颗粒或混捏后直接入炉；连续强化熔炼，熔池温度可控，熔炼速度快，熔炼生产率高，余热回收利用率高等特点。铜精矿熔炼时，在正常工况与铜精矿含硫正常情况下，可加少量或不加外补燃料，大大降低了燃料的消耗。熔池熔炼过程是负压进行，余热锅炉和电收尘密封好，冶炼烟气不会外溢，烟气中的 SO_2 浓度稳定且含量高，有利于烟气制硫酸过程中硫的回收和环境保护，硫的捕集率和回收率均可达到 98% 以上。

4.1.2.3 氧气底吹熔炼技术

（1）技术概况

混合矿料不需要干燥、磨细，配料后由皮带传输，连续从炉顶加料口加入炉内的高温熔池中，氧气和空气通过底部氧枪连续送入炉内的铜铈层，氧气以大量的小气泡动态地悬浮于熔体中，有很大的气-液相接触面积，有极好的反应动力学条件，连续加入的铜精矿不断地被迅速氧化、造渣。硫生成二氧化硫从炉子的排烟口连续地进入余热锅炉，经电收尘后进入酸厂处理。炉内形成的炉渣从端部定期放出，由渣包吊运至缓冷场，缓冷后进行渣选矿。形成的铜铈从侧面放铈口定期放出，由铜铈包吊运到 P-S 转炉吹炼。

（2）技术适用条件

该技术工艺过程简单、原料适应性强、能源消耗低、投资相对省、噪音低、操作环境好、劳动强度低、容易掌握和好操作，产能规模在 5~25 万 t/a 之间。

（3）节能减排效果

氧气底吹熔炼技术最显著的特点就是能耗低、环保好。由于氧浓度高，富氧空气氧浓度可达 75%，因而排出烟气量小，热损失少，炉体散热少，反应强度又高，因此很容易实现无碳自热熔炼，炉料中不需要另外配煤，这样不但节省了燃料以及煤燃烧所用的氧气，保证了氧气的充分有效利用，不直接排放二氧化碳烟气，间接排放二氧化碳也很少；能耗很低，可称为低碳经济。该技术整套系统采用较高负压操作且密封性好，无烟气外溢现象，无低空污染，尾气达标排放。

4.1.2.4 金峰双侧吹熔池熔炼炉及工艺技术

（1）技术概况

该技术通过双侧、多风道将 50%~90% 浓度的富氧空气吹入熔炼炉内的熔体

混合层，富氧空气直接接触和搅拌含有新加入物料的熔体，在强烈而均匀的搅拌和高温作用下，使富氧空气中的氧直接与炼铜物料中的铁和硫发生氧化反应；反应更迅速、更均匀，不但使熔炼效率更高，而且大大减轻了熔炼过程中铁的过氧化和铜的氧化现象，从而降低了熔渣中的磁性氧化铁含量和溶解铜含量，进而达到了降低渣含铜的目的；同时鼓风压力更低，更节能。含铜物料及熔剂熔化后，熔体在炉内完成渣铜分离，而后渣、铜又分别从炉内流出，从而实现了在熔体温度较高时渣与冰铜即进行分离，不但分离效果好，而且还实现了贫化炉只贫化熔炼渣，贫化效果好、贫化电耗低。采用特殊的炉体结构和不粘接烟道，炉墙关键部位采用水冷铜水套挂渣技术，风嘴采用不锈钢和紫铜复合材料组件，耐高温腐蚀，可送 85%以上浓度的富氧空气进行熔炼，效率高，更节能。SO₂ 浓度高，不但制酸能耗低，而且可实现三转三吸制酸，转化吸收率高，尾气达标排放效果好。

（2）技术适用条件

该技术适用于硫化金属矿冶炼，铜精矿含 Cu 需达到 10%以上。

（3）节能减排效果

该工艺技术熔炼效率高，节能减排效果好，粗铜综合能耗 266.3kgce/t-粗铜，与行业准入能耗限额标准相比节能 50%；当采用 85%以上氧浓作业时，粗铜综合能耗可降到 200 kgce/t-粗铜以下。熔炼炉出炉 SO₂ 浓度 20%~32%，冶炼烟气采用三转三吸制酸，制酸尾气达标排放。

4.1.2.5 不锈钢阴极电解精炼技术

（1）技术概况

最早的不锈钢阴极电解精炼工艺 ISA 法电解工艺是澳大利亚汤斯维尔铜精炼公司于 1979 年开发的，目前国外已有 ISA 法、KIDD 法、OT 法、EPCM 法，国内也相继开发出多种不锈钢阴极板。该技术使用不锈钢阴极板代替铜始极片作阴极，产出的阴极铜从不锈钢阴极板上剥下，不锈钢阴极板再返回电解槽中使用。由于不锈钢阴极板平直，所以可采用高电流密度进行生产，同常规电解相比，该工艺流程简单，生产效率高，产品质量好，因此具有常规电解及周期反向电解不可比拟的优点，是先进的电解精炼技术。

（2）技术适用条件：适用于大规模生产。

（3）技术特点

①极距小，电流密度高。因不锈钢阴极平直，不容易短路，所以不锈钢阴极可采用较小极距和较高的电流密度；②阴极周期短，通常为 6-8 天，短周期可以减少阴极铜长粒子的机会，有利于阴极铜质量的保证。③残极率低，由于不锈钢阴极平直，电力线分布均匀，不容易短路，所以阳极溶解更均匀，不会在电解

后形成大洞或断裂掉入槽内，残极率可以降低到 12%~16%，传统法大极板电解残极率一般在 18%~20%。

(4) 节能减排效果

该技术使用不锈钢阴极，省去了始极片工序和始极片的剥离、加工设备，从而缩短了阴极铜的工艺流程，降低了生产成本，减轻了工人劳动强度，并且阴极板可以反复使用，因此在物耗和能耗上均较先进。此外，废水可全部回用，实现废水零排放。

4.1.3 铅冶炼节能减排先进适用技术

4.1.3.1 基夫赛特法炼铅技术

(1) 技术概况

基夫赛特法炼铅技术实际上是包括闪速炉氧化熔炼硫化铅精矿和电炉还原贫化炉渣两部分，将传统炼铅法烧结焙烧、鼓风炉熔炼和炉渣烟化三个过程合并在一台炉子中进行。炉体由四部分组成：闪速熔炼反应塔（竖炉）、炉缸、电热区和包括余热锅炉在内的由膜式水冷壁构成的直升烟道。反应塔温度控制在 1380~1420℃，燃烧的碳量控制在只占炉料中加入的总碳量的 2.5%~3.5%。反应塔形成的熔体经焦滤层还原 PbO 后，金属铅液滴和含 ZnO、FeO 等氧化物组成的炉渣一起从铜水套隔墙下进入电炉，金属铅从炉渣中沉降分离。粗铅从电炉侧墙三个放出口排出，送脱铜和粗铅精炼。电炉排出的炉渣含 Zn 16%~18%，经烟化炉处理后渣含锌降至 1%~2.5%。

(2) 技术适用条件

炉料按工艺要求的渣型：25%~30%FeO，15%~18%CaO，24%~28%SiO₂ 和 12%~13%ZnO。配料干燥至含水小于 1%，粒径小于 2mm。

(3) 节能减排效果

综合能耗：290 kgce/t-粗铅，电耗：235 kWh /t-粗铅，焦炭单耗：46 kg/t-粗铅，氧气单耗：175 m³/t-粗铅。

4.1.3.2 艾萨炉熔炼鼓风炉还原炼铅技术

(1) 技术概况

艾萨炉是圆柱体结构，炉底呈反拱，上部逐渐扩大，最外层是 25mm 厚的锅炉钢板，内衬一层 76mm 的保温砖，里层是 450mm 的镁铬砖，炉体从上到下分为烟气区和熔池区两个部分。炉顶装置主要有炉顶盖、喷枪口、进料口、保温烧嘴口和水冷闸板五部分。通过炉子顶部中心位置的喷枪口，垂直地插入一支特制喷枪，喷枪端部浸没到炉内的熔池中，空气或富氧空气通过喷枪以漩涡状直接喷

射到高温熔融渣层中，使熔池剧烈搅动，保证气-固-液三相的充分接触和迅速反应，加速了冶炼过程的传热和传质速度，使炉料发生强烈的熔化、氧化、还原、造渣等物化过程。

（2）技术适用条件

艾萨炉对入炉物料的要求较低，可以处理粉状或块状物料，对粉状物料只需加水进行混合制粒，使炉料水分达到 8%~10%，就可直接入炉。生产实践中富铅渣的控制目标一般为：Pb 40%~50%； $\text{SiO}_2/\text{Fe}=0.7\sim0.9$ ； $\text{Zn}<10\%$ ；富铅渣块度 $>50\text{mm}$ 。

（3）节能减排效果

综合能耗：380 kgce/t-粗铅，电耗：400 kWh /t-粗铅，焦炭单耗：160~170 kg/t-粗铅，氧气单耗：64~78 m^3 /t-粗铅，烟煤单耗：65~80 kg/t-粗铅，重油单耗：18~21 kg/t-粗铅。

4.1.3.3 奥斯麦特法炼铅技术

（1）技术概况

奥斯麦特（Ausmelt）熔炼炉是奥斯麦特法熔炼的主体设备，主要由炉体、喷枪、喷枪夹持架及升降装置、燃烧器、排烟口、加料装置及产品放出口等组成。奥斯麦特法炼铅的主要原理是通过垂直插入渣层的喷枪向耐火材料砌筑的熔池中直接吹入空气或富氧空气、燃料、粉状物料和熔剂或还原性气体，强烈搅拌熔池，使炉料发生强烈的熔化、硫化、还原、造渣等物化过程。它是一种连续的熔炼过程，燃料和粉料通过喷枪喷入熔池，块料、湿料可通过螺旋给料机从炉顶另开的专用孔中投入。

该工艺采用一炉分步氧化、还原、烟化，具有投资省、环保好、劳动生产率高等优点。缺点是间断作业，烟气制酸难度加大，制酸能耗与成本高。另外，氧化、还原、烟化各段温差达到 200~400℃，炉衬热振大、炉寿短，氧枪寿命短，开工率相对较低。再者烟化产出高锌烟尘与氧化、还原的高铅烟尘难以分开处理。

（2）技术适用条件

该技术适应性较强，奥斯麦特法渣型： $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1$ ， $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3=0.5$ 。

（3）节能减排效果

综合能耗：285 kgce/t-粗铅；电耗：400 kWh /t-粗铅；焦炭单耗：30~35 kg/t-粗铅；氧气单耗：64~78 m^3 /t-粗铅；烟煤单耗：65~80 kg/t-粗铅；重油单耗：18~21 kg/t-粗铅

4.1.3.4 氧气底吹熔炼液态高铅渣侧吹还原炼铅技术

（1）技术概况

该技术所用主要设备是底吹炉和侧吹还原炉。铅精矿和辅料进行配料混合后,送入氧气底吹炉进行熔炼,产出粗铅、液态高铅渣和含尘烟气。还原炉采用卧式侧吹转炉,液态高铅渣直接进入炉内,底部喷枪送入天然气和氧气,上部设加料口,加入煤粒和石子。采用间断进放渣的作业方式。天然气和煤粒作为燃料和还原剂。天然气和煤粒部分氧化燃烧放热用来维持还原反应所需要的温度,同时生成一定量的还原性气体 CO 和氢气,在气体搅拌下,进行高铅渣的还原,生成粗铅和炉渣。

(2) 技术适用条件

炉料按工艺要求的渣型: 25%~30%FeO, 15%~18%CaO, 24%~28%SiO₂ 和 12%~13%ZnO。配料干燥至含水小于 1%, 粒径小于 2mm。

(3) 节能减排效果

该技术克服了鼓风炉还原的缺点,充分利用了高铅渣余热,根除了铸渣产生的铅尘污染,减少了占地面积和基建投资,能耗由 350 kgce/t-粗铅下降至 220 kgce/t-粗铅。氧气单耗: 240m³/t-粗铅; 烟煤单耗: 75 kg/t-粗铅; 焦炉煤气单耗: 100 m³/t-粗铅。

4.1.3.5 氧气底吹熔炼液态高铅渣底吹还原炼铅技术

(1) 技术概况

氧气底吹熔炼液态高铅渣底吹还原炼铅技术属于熔池熔炼法。主要设备是底吹炉和还原炉。铅精矿和辅料进行配料混合后,送入氧气底吹炉进行熔炼,产出粗铅、液态高铅渣和含尘烟气。还原炉采用卧式转炉,液态高铅渣直接进入炉内,底部喷枪送入天然气和氧气,上部设加料口,加入煤粒和石子。采用间断进放渣的作业方式。天然气和煤粒作为燃料和还原剂。天然气和煤粒部分氧化燃烧放热用来维持还原反应所需要的温度,同时生成一定量的还原性气体 CO 和氢气,在气体搅拌下,进行高铅渣的还原,生成粗铅和炉渣。

(2) 技术适用条件

底吹炉对炉料的要求: 含水 8%~10%, 含 S 小于 18%, 粒度 3~15mm, 富铅渣含铅 40%~55%。配料控制熔炼渣中 FeO/SiO₂=1.7。

(3) 节能减排效果

该工艺采用液态高铅渣的直接还原,充分利用了高铅渣熔体的潜热,减少了能源消耗(每吨粗铅节约标准煤 110kg)。引入天然气、氧气,结束了传统工艺使用大量冶金焦的现状,有效减少了 SO₂ 和 CO₂ 的排放量。密闭的还原炉结构和高效能的热还原工艺,减少了烟气热量损失,还可方便回收烟气余热,进行余热发电。省去铸渣机设备,解决了高铅渣铸块储运过程中碎沫飞扬现象,既减少了

有价金属损失，资源得到最大利用，环境又得以改善。整个系统所产生的烟灰通过密闭的输送系统返回配料，在各烟气溢出口加强了通风除尘，使整个系统生产环境良好。

4.1.3.6 立模浇铸铅大极板电解技术

（1）技术概况

电解精炼是利用不同元素在电解过程中的阳极溶解或阴极析出难易程度的差异而提纯金属，使粗铅中杂质因电解时不溶解而以元素（如 Au，Ag）或化合物（ Bi_2O_3 ， Bi_2S_3 ）形态进入阳极泥。

铅电解精炼经多年的生产实践和不断的改进完善，铅电解精炼工艺技术更加先进，采用大极板、大电解槽、长周期电解，极板制作、铅电解操作过程、铅锭浇铸等实现了大型化、机械化、自动化。而我国铅电解精炼基本都采用小极板、小电解槽生产，工艺技术落后、装备水平低、能耗高、环境污染严重、指标不好、劳动生产率低、劳动强度大，总体技术及装备水平仅相当于上世纪 70 年代国际水平。

从 2005 年至今，驰宏、豫光等几家铅冶炼公司通过对大极板、长周期铅电解精炼关键工艺技术的试验研究，从日本引进了铅电解阴阳极板浇铸、制作设备，并自主开发了大电解槽及出装槽、极板洗涤等相关设备。改写了中国铅电解精炼技术落后的历史，该系列设备的引进和开发，标志我国铅电解精炼已达到了国际先进水平。

（2）技术特点

该技术采用国际先进技术装备和国内配套部分设备的技术路线，适应机械化、自动化和设备大型化发展趋势。

（3）节能减排效果

铅回收率 $\geq 99\%$ ，单位产品硅氟酸耗 $\leq 2.5\text{kg/t-铅}$ ，综合能耗 $\leq 60\text{ kgce/t-铅}$ ；单位产品铅尘产生量 $\leq 8\text{kg/t-铅}$ 。

4.1.4 锌冶炼节能减排先进适用技术

4.1.4.1 硫化锌精矿常压富氧直接浸出技术

（1）技术概况

将球磨后的硫化锌精矿，通过加入电解废液浆化，送到一系列反应器中进行浸出，浸出过程在反应器底部鼓入 98% 的纯氧进行氧化。浸出过程主要利用高铁离子对硫化锌精矿的氧化浸出，硫化锌精矿被分解得到硫酸锌溶液和单质硫。氧气的作用主要氧化浸出后的亚铁离子成高铁离子实现对硫化锌精矿的连续循环

浸出。

（2）技术适用条件

该技术对物料适应能力较强，特别对高铜、高铁精矿的处理上具有绝对的技术优势。缺点是对精矿的粒度要求较高（ $D_{90}>45\mu\text{m}$ ），精矿杂质含量要少。

（3）节能减排效果

该工艺技术为传统湿法炼锌工艺的替代工艺，具有生产清洁、环保，有价金属回收率高等特点。

4.1.4.2 硫化锌精矿加压氧气直接浸出技术

（1）技术概况

硫化锌精矿加压氧气浸出是不需要焙烧、烟气制酸工序，把细磨（98%小于 $44\mu\text{m}$ ）的硫化锌精矿直接进行浸出，将硫化锌精矿、锌电解废液、氧气连续加入加压釜，在高温 150°C 、高压 $1.1\sim 1.3\text{MPa}$ 状态下，利用纯氧作为氧化剂，用废电解液做浸出剂，实现湿法炼锌过程酸溶液的循环，在加压条件下提高反应温度，对反应的热力学和动力学都有利，反应过程只需 $1\sim 1.5\text{h}$ ，锌的浸出率即可达到98%以上，同时硫化锌中的硫被氧化产出单质硫。

（2）技术适用条件

该技术对物料适应能力较强，可处理含铁高的低品位锌精矿、铅锌混合精矿及锌冶炼厂产出的含铁酸性和铁氧体的残渣，生产成本低。该法既可结合常规的焙烧-浸出工艺来提高生产能力，又可全部使用锌精矿浸出成为独立系统生产。但工艺反应条件要求高温高压，对设备要求高。对锌精矿的要求：原料需通过湿式球磨使锌精矿粒度98%小于 $44\mu\text{m}$ ，氧气纯度98%。

（3）节能减排效果

该工艺为世界先进的炼锌工艺，能耗低，环境友好，被国内外厂家陆续采用。

4.1.4.3 锌氧化矿及二次物料溶剂萃取提取锌工艺

（1）技术概况

溶剂萃取法从硫酸锌溶液中萃取提锌，目前还没有找到一种选择性好、负载量大的特效锌萃取剂，比较适合于从硫酸锌溶液中萃锌的萃取剂仍为P204。锌氧化矿及二次物料溶剂萃取提锌工艺流程为：原料→浸出中和→浓密过滤→硫酸锌溶液→溶剂萃取→电积→铸锭→锌锭。硫酸锌溶液溶剂萃取提锌是利用萃取剂P204的强选择性，达到从硫酸锌溶液中富集回收锌。即以P204为萃取剂，200#或260#煤油为稀释剂，在控制萃取平衡pH值、萃取相比和萃取平衡时间的条件下进行萃取，得到含锌有机相，然后以硫酸或高酸度废电解液为反萃剂，使有机相中的锌离子与硫酸或废电解液中的 H^+ 进行交换，得到高浓度、杂质含量达锌

电积标准的硫酸锌溶液，然后并入常规湿法炼锌的电积工序，再经铸型工序，得到锌锭产品。硫酸锌溶液溶剂萃取既起富集锌的目的，也能达到对硫酸锌溶液的净化，只要萃取条件控制的好，反萃液经脱油处理，即得到高质量的电积新液。

目前，国内使用溶剂萃取法从锌氧化矿及含锌物料中提锌工艺成规模化的仅云南祥云飞龙一家，该厂将溶剂萃取提锌工艺与常规湿法炼锌工艺结合在一起，年产锌锭 17 万 t。国外使用该工艺的厂家较多，自纳米比亚 Skorpion 年产 15 万 t 锌的锌冶炼项目于 2004 年 5 月投产成功后，Zincox 公司加快了针对 Shaimerden(哈萨克斯坦)、Jabali(也门)、Remac(加拿大)等几个大型氧化锌矿的开发利用，并相继建立了采用溶剂萃取法提锌工艺的湿法炼锌厂。

(2) 技术适用条件

该技术适用于从复杂难选的低品位氧化锌矿、高杂质氧化锌矿、高杂质(包括高氟氯)氧化锌物料、含锌的二次物料及含锌废水中回收锌。该技术为无法采用传统的选冶工艺从锌原料中回收锌开辟了途径，拓宽了锌回收原料，可以适当缓解因锌原料短缺而制约我国锌工业可持续发展。

(3) 节能减排效果

该工艺能耗低，除浸出工序需加热外，溶剂萃取工序在常温下进行，电积、铸型工序与常规湿法炼锌一样消耗电能。因萃取在常温下进行，环境污染极低，且萃取可将硫酸锌溶液中的 F、Cl 除掉，降低了电积时阴阳极板被腐蚀的可能性，改善了工人的操作环境。该提锌工艺值得推广。

4.1.4.4 硫酸锌溶液中钴的锌粉-砷盐净化工艺

(1) 技术概况

砷盐净化工艺主要包括三个工序：除铜、除钴镍、除镉工序。利用锌和铜、钴、镍、镉之间的电位差，实现锌粉对溶液中的杂质元素铜、钴、镍、镉的置换沉淀。

除铜后液保留 300mg/L 左右的铜离子，通过加入砷盐，锌粉置换后的钴镍渣转化为 CoAs 、 NiAs 和 Cu_3As 等稳定的化合物，使得钴镍的稳定区域范围大为扩张，从而增加了锌粉置换钴镍的电势 E_{ϕ} ，增大了置换过程推动力。

砷盐净化另外优势是实现了铜镉渣分步产出，除铜阶段铜渣含铜可以达到 60%以上，镉渣含镉达到 70%以上。在所有炼锌净化工艺中除杂效果最理想，可以实现溶液的深度净化。

(2) 技术适用条件

该技术的使用范围较广，特别是对系统杂质含量较高的溶液处理效果非常理想，铜离子含量处理范围为 300~2000mg/L，钴含量 35mg/L 以下都可以取得良

好的净化效果。

(3) 节能减排效果

砷盐净化工艺可以实现炼锌过程溶液的深度净化，具有溶液不需要升温，锌粉消耗低等特点。缺点是砷盐具有剧毒，在制作和使用过程中安全、环保要求较高。

4.1.4.5 湿法炼锌生产中铁的分离-针铁矿法沉铁工艺

(1) 技术概况

还原针铁矿法沉铁工艺是将浸出后液通过加入锌精矿进行还原，将溶液中的高铁离子还原成亚铁离子，亚铁离子浓度控制在 2g/L 以下，浓缩后的溢流送沉铁矿沉铁，沉铁过程通过加入中和剂控制溶液的 PH 值在 3.5~4.0 之间，同时通入氧气控制亚铁离子的氧化速度，最终达到溶液除铁和针铁矿产生的工艺过程。

沉铁后液总铁离子浓度可以降低到 1g/L 以下。沉铁渣含铁品位在 40%左右。

(2) 技术适用条件

该技术适用于高温高酸浸出后液或直接浸出后液的高铁溶液，铁离子浓度在 5~15g/L 之间，溶液铜离子浓度大于 300mg/L。

(3) 节能减排效果

采用还原针铁矿法沉铁工艺产出的铁渣含铁品位高，含锌低，渣过滤性能良好。针铁矿沉铁过程中，铜离子的保留率可以达到 80%以上。针铁矿渣经挥发窑处理后，易挥发的铅、锌、镉、及少量银，可以经浸出富集后，可回收氧化锌中的锌、镉等有色金属，浸出渣中铅、银得到富集，送到炼铅系统处理回收铅、银。

4.1.4.6 锌精矿湿法炼锌长周期电积工艺

(1) 技术概况

经净化除去各种有害杂质的硫酸锌水溶液，以 Pb-Ag 合金板作阳极，纯铝压延板作阴极，在直流电作用下，溶液中带正电荷的锌离子在阴极上放电沉积。为了保证长周期电积溶液的质量，对硫酸锌溶液采取了多次净化、澄清、除油等方式，可以有效的减少烧板返溶情况；为了保证机械剥离的稳定，电解槽内需要保证液面的稳定，在供液槽上采用稳定液面的装置，可以有效的减少液面的波动；在电积过程中采用混合液大循环量的操作方式，降低电积过程的锌离子浓度差，稳定了电积过程和电积温度；采取大的同极距、阴极板经过剥锌机及阳极板经过阳极平整机平整，有较高的平整度，同时采用了压延阳极及在阳极板底部安装绝缘子的方式，可以改善阳极在溶液流动过程中造成的变形情况，减少了阴、阳极板的短路机会，从而延长了阳极板和阴极板的使用寿命，并减少了漏电情况，提

高了电流效率；采用大而且稳定的溶液循环量、电解槽中足够的沉降时间，减少阳极泥在阴极板上附着的几率，也减少阳极泥在阴极板上的相对量，同时采用加入添加剂如碳酸锶，则降低阴极锌的含铅量；采用高压蒸汽冲洗导电铜排的方式，有效地减少了含铜溶液进入电积槽内，则降低了阴极锌的含铜量；采用上进下出的溶液流动方式，有效的改善了电积槽底部锌离子贫化情况及骨胶的吸附情况；采取骨胶分时及分量加入的方式，有效提高了阴极锌的表面物理规格，同时有效抑制了长周期电积后期出现的返溶情况。采取新阳极低电流密度镀膜或感应电流镀膜，可以有效的改善在新阳极使用后出现了返溶情况及阳极起壳情况，则提高了电流效率；采用合理的掏槽工具及掏槽方式，可以改善电积槽内的阳极泥堆积情况，减轻工人的劳动强度。

（2）技术适用条件

该工艺技术对硫酸锌溶液质量要求非常高，具体要求如下（单位 g/L）：Zn 130～180，Cu≤0.0002，Cd≤0.001，Co≤0.0005，Ni≤0.001，As≤0.00024，Sb≤0.0003，Ge≤0.00004，Fe≤0.03，F≤0.05，Cl≤0.3，Mn 2.0～5，TOC≤0.025。

（3）节能减排效果

该工艺为新型的锌电积工艺技术，该工艺能提高工序作业劳动生产率，降低生产劳动强度，降低工艺生产成本，提高产品质量。综合能耗 411.36kgce/t-锌，电耗 3300kWh/t-锌。

4.1.5 镁冶炼节能减排先进适用技术

4.1.5.1 新型回转窑煅烧技术

（1）技术概况

传统回转窑没有预热器，回转窑窑尾烟气排放温度高达 1000℃；有的采用余热锅炉，但余热利用效果不理想。新型回转窑加装预热器，换热效率高，自动化程度高，设备运转稳定，能将窑尾烟气温度由 1000℃冷却到 280℃以下，同时将物料预热到 700℃，再进入回转窑进行煅烧，这样烟气的余热得到充分利用，实现节能降耗。冷却设备能够实现高效换热和均匀冷却，可以将煅白温度冷却到 100℃以下。与传统的单筒冷却机相比，煅白的热量得到最大程度地利用。炽热的煅白通过与鼓入的二次风换热，煅白冷却，空气吸热、温度升高后进入回转窑助燃。新型回转窑对内衬耐火材料采用了新型复合节能砖，这样窑体表面温度可以降低 80 度左右，使用寿命可以延长 3 个月。所以采用新的竖式预热器和竖式冷却器的回转窑可以降低能耗、节约成本，达到节能减排的良好效果。

（2）技术适用条件：适用于硅热法镁冶炼白云石煅烧工艺。

（3）技术特点

① 窑尾装竖式预热器，窑尾烟气余热传给白云石，烟气温度降至 $\leq 280^{\circ}\text{C}$ ，回收了尾气排放所带走的热量，为后续除尘减少了负荷；

② 回转窑长径比由 20~25 改为 14~15，长度的缩短可以减少回转窑表面散热，同时减少设备占地面积；

③ 窑头出料冷却采用竖式冷却器替代原来的冷却筒，可以避免煅白的显热散失，从窑头落下的炽热煅白，通过与鼓入的二次风换热，煅白得以冷却，空气吸收热量温度升高后进入回转窑助燃；

④ 冷却器和窑头罩采用一体化竖式设计，占地面积少，密封好，避免了热废气无组织排放；

⑤ 助燃风分为一次风和二次风，一次风直接参与燃烧，二次风为冷却风，一次风和二次风分别由单独的风机供给，这样二次风温度可升至 600°C ，便于低热值燃气（如发生炉煤气和半焦煤气）作为燃料；

⑥ 环保措施完善，煅烧尾气和竖式冷却器落料点均采用脉冲袋式除尘器除尘，以满足国家排放标准；

⑦ 自动化水平高，煅烧系统设备生产操作的调节、控制和报警采用 PLC 集中控制，并设有各控制点的画面显示及必要的联锁监控，这样生产过程中的操作参数可自动记录，并可随时打印。

（4）节能减排效果

每吨煅白标煤消耗由 350~380kg 下降到 210~230kg，节约煤耗 40%左右，燃煤消耗减少，则相应减少污染物排放。据统计，一条年产 20 万 t 煅白生产线可节省约 2.8~3 万 t 标煤，相应减少烟气排放量约 1.1 亿 m^3 ，同时可减排二氧化硫、氮氧化物等大量有害物质。

4.1.5.2 新型套筒竖窑煅烧技术

（1）技术概况

环形套筒竖窑由砌有耐火材料的窑壳和分为上、下两段的内套筒组成，窑壳与内套筒同心布置，物料位于窑体和内套筒的环形空间以利于气流穿透，故称为环形套筒竖窑。下内套筒位于竖窑下部，结构为双层钢壳形成环隙，环隙内通空气冷却，其内外侧砌耐火内衬；上内套筒悬挂在窑顶部。上、下内套筒各有其不同的功能，上内套筒主要是将高温废气抽出用于预热喷射空气；下内套筒主要是用于产生循环气流，形成并流煅烧，同时起到保证气流均匀分布的作用。环形套筒窑使用的燃料一般为气体和流体燃料，如天然气、焦炉煤气、转炉煤气、高焦混合煤气（国内所用燃料发热值在 $1800\text{kcal}/\text{Nm}^3$ 左右）、重油等。

环形套筒竖窑从上到下可分为预热带、上部逆流煅烧带、中部逆流煅烧带、

下部并流煅烧带和冷却带，核心部位是下部并流煅烧带，煅白最终在此带内烧成，保证了煅白活性。环形套筒竖窑的窑内废气在预热矿石原料及喷射空气后自身温度下降到 180℃左右由废气引风机抽出，经袋式除尘器净化后排空，整个窑体为负压操作，对窑体密封程度要求不高，可以在线观察窑内的煅烧过程，在线取样并且可以在线维修等。

(2) 技术适用条件：适用于硅热法镁冶炼白云石煅烧工艺。

(3) 技术特点

① 整个窑体为负压操作，烟气或燃气不会外逸，环保条件好，可在线观察窑内煅烧过程，在线取样、在线检察、维护、维修方便；设置烟气除尘系统，经除尘后其排放的粉尘浓度小于 30mg/Nm³；

② 产量高，对原料粒度要求不高（原料粒度为 30~60mm、40~80mm）；

③ 适用燃料范围宽，可用发热值在 1200kcal/Nm³ 左右的低热值燃料，煤气压力为 15kPa 的常规压力；

④ 能耗较低，采用冷却气热回输、废气换热等多种形式回收热量、热耗较低，一般在 950Kcal/kg-煅白（热值为 1800Kcal/Nm³），窑本体电耗一般在 25~27kWh/t-煅白；

⑤ 采用先进计算机控制系统，以实现全自动控制，操作人员少，操作简单方便；

⑥ 窑体设备简单，大部分设备可在国内制造，只有燃烧系统等关键设备需要引进；主要的输送转运设备均为液压控制、电耗低、设备故障率小；设备占地面积是各类窑型中最小的；

⑦ 建成 1 座 300TPD 套筒窑，投资人民币需 2800 万元，投资费用低。

(4) 节能减排效果

综合能耗 130~160kgce/t-煅白，比传统回转窑节能 50%以上。

4.1.5.3 新型蓄热式还原炉燃烧技术

(1) 技术概况

蓄热式高温燃烧技术就是在炉子两侧炉墙上都布置有均匀分配的喷口，当一侧的喷口在作为烧嘴燃烧的时候，另一侧的喷口则作为烟道用来排烟。经过一个换向周期后，通过换向阀的切换，作为烧嘴燃烧的一侧喷口变为烟道用来排烟，而原来用来排烟的另一侧喷口则作为烧嘴燃烧。交替燃烧和排烟的过程中，喷口后部的蓄热室将高温烟气所携带的热量回收并释放给燃料和助燃空气，燃料燃烧的同时，这部分热量又重新回到炉内，将烟气余热利用到几乎接近极限的程度，最大限度地回收烟气潜热，使排烟温度降至 150℃以下。

(2) 技术适用条件：适用于以气体燃料为能源的硅热法冶炼粗镁还原工艺。

(3) 技术特点

① 弥散燃烧的蓄热燃烧形式可形成与传统火焰完全不同的火焰类型，在炉内形成特别均匀的温度场，提高还原罐的加热均匀性；

② 采用低氧燃烧技术，不但增强了高温烟气对还原罐的辐射和对流交换，同时减少火焰对还原罐的冲刷和氧化。延长还原罐的使用寿命；

③ 节约能源，降低能耗。采用蓄热式燃烧技术可以将烟气余热利用到几乎接近极限的程度，最大限度地回收烟气潜热，可使空、煤气同时预热至接近炉气温度，排烟温度可以低于 150℃，余热回收率大大提高，节能降耗非常明显；

④ 改善还原罐的加热环境，在还原罐周围形成还原性气氛，减少还原罐的氧化，提高还原罐的使用寿命；

⑤ 减小对环境的污染。蓄热式燃烧技术不仅节约了能源，降低了烟气排放量，而且大大降低了烟气中 NO_x 等有害气体的含量，减轻了环境污染。

⑥ 高温防腐（抗氧化）、耐磨材料应用于还原罐，有效提高还原罐的使用寿命。

⑦ 采用集中管理，分散控制，组成安全、先进、实用、可靠的远程自动调节控制系统。减少大量的设备操作人员。

(4) 节能减排效果

综合能耗 2.3~3.2tce/t-粗镁，比传统还原炉节能 40%~50%。

4.1.5.4 新型蓄热竖罐还原炉燃烧技术

(1) 技术概况

采用先进的高温空气燃烧技术（HTAC），可使空气预热温度接近烟气入口温度（1000℃以上），排烟温度降至 150℃以下，热回收率 80%以上，在竖罐还原炉上使用可节约燃料消耗 55%以上，从而大幅提高炉子的热效率。由于空气预热温度提高，所以火焰温度也相应提高，火焰的辐射能力加大，加热速度变快。采用钢材与耐火材料混合的高架结构、严格的炉体保温措施及竖罐还原炉的设计都考虑了各结合面的密封和隔热，以确保竖罐还原炉在使用中的密封性、安全性以及最小的散热损失，保证炉子的寿命和热效率。

(2) 技术适用条件：适用于以气体燃料为能源的硅热法冶炼粗镁还原工艺。

(3) 技术特点

① 还原罐垂直分布在还原炉内，从炉顶装料，从炉底排渣，装料操作方便快捷，降低了劳动强度；

② 物料分布更加均匀，还原罐四面加热，强化了传热效果；

- ③ 粗镁的纯度大幅度提高；
- ④ 燃烧系统采用 HTAC 技术，还原炉热效率显著提高，节能减排低碳排放。

（4）节能减排效果

综合能耗大幅降低，比蓄热横罐还原炉节能 30%~50%。

4.1.5.5 新型连续蓄热式精炼炉精炼技术

（1）基本原理

连续蓄热式燃烧技术是指在蓄热式燃烧技术的基础上，采用连续蓄热技术，实现高温空气燃烧。连续蓄热回收泵就是应用这一技术制作出来的。连续蓄热式热回收泵主要包括蓄热体、烟气通道和空气通道。热回收泵工作时，排烟和鼓风同时进行，高温烟气以对流及辐射的方式将热量传递给烟气通道内的蓄热体。由于蓄热体具有超大的比表面积和蓄热能力，传热效率很高，烟气温度很快降低。烟气通道中被加热的蓄热体以导热方式将热量传递到低温侧。低温侧的空气通道内也填充热导率高、比表面积大的蓄热体。因此，空气能够很迅速地被加热。

（2）技术适用条件：适用于以气体燃料为能源的粗镁精炼工艺。

（3）技术特点

新型蓄热式竖罐还原炉主要由模块化炉体、蓄热式燃烧器、立式还原系统、装出料系统、真空与管道系统和检测控制系统等组成。

① 多支分布于炉体的井式还原罐形成单元炉体，配置一定数量的蓄热式燃烧器，按要求与需求将单元炉体与装料排渣系统、管道系统和检测控制系统等配套连接，构成新型蓄热式竖罐还原炉

② 模块化的炉体形式，使还原炉的设计与施工变得灵活、方便，能更好的满足生产要求和扩产需求；

③ 装料排渣系统实现了炉料的机械化运装和粗镁的机械化转运以及自动化排渣；

④ 蓄热式燃烧器将炉膛内烟气显热回用，加热助燃空气和煤气，实现节能。

（4）节能减排效果

综合能耗 180kgce/t-镁锭左右，比传统直接燃煤精炼炉节能 50%；比传统燃气精炼炉节能 20%左右。

4.1.6 铜铝加工节能减排先进适用技术

4.1.6.1 无氧铜带水平连铸带坯-高精冷轧技术

（1）技术概况

该技术采用 A 级电解板，经过多腔体连体感应电炉熔炼、耦联结晶器水平连铸带坯、直接冷轧、退火、钝化、剪切后得到铜带产品。该技术省去了加热、热轧、铣面工序，而采用热水脱脂，无酸碱洗，具有工艺流程短、节能、降耗、环保无污染、加工成材率高、生产成本低的优势。项目投资少，建设周期短、见效快。该工艺技术适用无氧铜带、脱氧铜带专业化生产。

（2）技术适用条件

该技术适用于 3 万 t/a 以下生产规模的精炼铜及铜锌合金铜带生产。

（3）技术特点

运用潜流式联体炉生产带坯，在金属流体转炉时取消了流槽方式，防止了流槽转注时吸氧的关键技术难题，确保水平连铸带坯氧含量小于 10PPM。其次是取消了热开坯工序，采用高精冷轧方法直接生产无氧铜带材，彻底解决和防止了热加工的渗氧问题。

（4）节能减排效果

水平连铸-高精冷轧方法与传统方法相比节能 30%以上、成本降低 30%，成品率高达 90%。

4.1.6.2 上引连续铸造铜杆-连续挤压-冷轧生产铜带技术

（1）技术概况

该技术利用上引连续铸造-连续挤压-冷轧工艺生产铜带，将铜杆在连续挤压机上加工成带坯，然后经轧机完成铜带生产，取消了热轧工序。

（2）技术适用条件：适合 1 万 t/a 以上规模精炼铜带生产。

（3）技术特点

通过铜杆连续挤压可以生产宽度为 320mm 的铜带坯，生产效率大幅提高。减少了热轧开坯工序，节约生产设备的投入，降低了生产成本。可以生产市场上急需的紫铜类铜带产品。适合大规模生产，但主要生产设备需要引进，产品的品种较为单一。

（4）节能减排效果

金属消耗 1.05t/t-铜带；能耗 100kgce/t-铜带，比传统工艺节能 60%。

4.1.6.3 精炼铜管水平连铸管坯-四辊行星轧制-盘拉技术

（1）技术概况

该技术通过水平连铸得到大直径管坯，经四辊行星轧机对铜管实施热轧，充分发挥铜管的塑性性能，经盘拉机拉伸获得高精度的铜管，得到需要的铜管外径尺寸和超长的长度。

（2）技术适用条件：适合 1 万 t/a 以上规模精炼铜管生产。

（3）技术特点

该技术的优点是生产工艺流程短，产品质量稳定，设备易操作，能生产超长产品。缺点是该技术目前生产紫铜类产品以外的合金种类少，受设备影响，铜管的直径受到限制。

（4）节能减排效果

该技术通过水平连铸技术使得铜管一次成型，不需要常规的铸锭通过铸造然后挤压成铜管。其节能减排主要表现在该工艺省略了铸锭加热和挤压环节。金属消耗 1.05 t/t-铜管；能耗 200 kgce/t-铜管，比传统工艺节能 30%。

4.1.6.4 铜管上引连铸管坯-高速轧制-拉伸技术

（1）技术概况

该技术利用连续铸造-高速轧制-拉伸工艺生产铜管。采用电解铜或紫杂铜和金属锌锭或铜锌合金杂铜料经熔化炉熔化，熔融生成液态铜合金熔体，由牵引装置上引连续铸出铜管坯，轧制成半成品或直接用拉拔机拉制成成品。

（2）技术适用条件：适合 1 万 t/a 规模以上精炼铜及铜锌合金管生产。

（3）技术特点

该技术适合 1 万 t/a 规模以上精炼铜及铜锌合金管生产，用于建筑水道管、海水管路等，可直接铸造直径大于 $\phi 120\text{mm}$ 铜管，一次可同时铸造 6 线，铜管长度不受限制。产品符合技术标准，技术成熟。具有生产流程短、成品率高、产品成本低、生产线建设投资少等明显优点。

（4）节能减排效果

该工艺方法简单，金属损耗小；能耗低，比传统工艺节能 35%；无污染、工人劳动强度低、生产成本低，是目前生产铜合金管工艺方法中最为简单、高效的一种加工工艺。

4.1.6.5 上引连铸铜杆-连续挤压生产铜棒（型）技术

（1）技术概况

该技术利用上引连铸铜杆-连续挤压工艺生产铜棒型材，铜杆坯在摩擦轮的强迫送进之下，金属从模孔中塑性变形流出，变形热使金属本身加热，变形区温度高达 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，从而实现了金属动态再结晶。实现了铜及合金棒、型、线多品种连续挤压，特别是完成了扩展连续挤压的技术创新，形成了以铜杆为坯料的铜材生产新技术，是铜及合金棒型线生产方法的重大变革。

（2）技术适用条件：适合 1 万 t/a 规模以下精炼铜棒型材生产。

（3）技术特点

该技术是在一定的温度与压力下使坯料在连续不断的挤压下从模孔流出，形

成产品。连续挤压比常规正挤压的能耗降低 30%以上。大幅度地减少了传统挤压中的挤压压余、切头尾等几何废料；制品的长度方向组织、性能均匀；设备紧凑、占地面积小、改造设备费用低。该技术对坯料的预处理要求高，挤压制品的断面尺寸受限制；工模具消耗大。

（4）节能减排效果

该技术减少挤压加热工序，降低金属废料的产生，产品长度相对有较大的延长，生产劳动强度大大降低，无烟尘排放。金属消耗 1.02 t/t 产品；能耗 100 kgce/t 产品，与传统技术相比能耗降低 30%以上。

4.1.6.6 多面、多线潜流连铸技术

（1）技术概况

该技术具有多面、多流、多头的布置，能同时连续铸造多种不同规格的产品；设备大容量、高效、节能效果显著；实现了封闭熔炼和潜液转流铸造，取消了明流流槽转运方式，防止了有害气体和烟尘排放，减少了金属烧损；能采用再生铜为原料直接生产铜合金加工材。

（2）技术适用条件

该技术适用于年产 1 万 t/a 以上各种规模的废旧铜锌合金再生铜棒生产。

（3）技术特点

该技术实现短流程工艺，可同时生产不同规格的产品，综合成品率高，实现生产线流程作业，适合大吨位生产，技术指标先进。具有工艺流程短、环保、节能、产品质量优良、技术指标先进、成本低、成品率高、生产线建设投资少等优点。

（4）节能减排效果

该技术实现封闭熔炼和潜流转流铸造技术，减少有害气体和烟尘排放，减少金属烧损和氧化，与传统技术相比能耗降低了 40%，成本降低 50%。

4.1.6.7 电解铝液直接制备锭坯技术

（1）技术概况

电解铝液直接制备锭坯技术是将铝电解液直接放入熔炼炉，通过铸造设备生产板扁锭、圆锭、铸轧卷。减少传统工艺的电解铝锭重新熔化再铸造的生产工序。

（2）技术适用条件

该技术适用于各种规模的铝及部分合金坯料生产，产品符合技术标准，技术成熟。

（3）技术特点

与传统技术相比，该技术可减少生产工序，缩短生产周期，大幅度降低能耗，

减少设备投资，提高生产效率。缺点是杂质含量不易控制。

(4) 节能减排效果

金属消耗 1.01t/t-铝铸锭；能耗 80kgce/t-铝铸锭，比传统工艺节能 20%。

4.1.6.8 蓄热式熔炼炉熔炼铝合金技术

(1) 技术介绍

蓄热式高温空气燃烧技术是目前国内外普遍采用的一种全新燃烧技术，它通过高效蓄热材料将助燃空气从室温预热至 800℃ 高温，同时大幅度降低 CO₂ 排放，使排烟温度降低到 150℃ 以下。蓄热式熔炼炉熔炼铝合金技术就是利用废热回收来混合加热融化原铝锭。该技术可显著提高熔炼炉的余热回收率，减少碳排放。

(2) 技术适用条件

该技术适用于各种规模的铝及铝合金坯料生产，产品质量高，技术成熟。

(3) 节能减排效果

能耗 90kgce/t-铝铸锭，比传统工艺节能 20%。

4.1.7 有色金属采矿节能减排先进适用技术

4.1.7.1 现场混装炸药技术

(1) 技术概况

工业炸药现场混装系统通常是指乳化炸药、重铵油炸药、铵油炸药在爆破工地现场制备、现场装药，或在地面站(固定式或移动式)制备好基质，装药车载到工地现场混合、装药的一种集成系统。无论第一代现场混装技术还是第二代现场混装技术，都偏重于中、大直径炮孔的爆破作业。

乳化炸药工艺流程见图 4-1，水相和油相经各自泵和流量计，输入到乳化器连续乳化，乳化后的胶体进入混合器内与多孔硝酸铵或铝制发泡剂进行混合，混合后的药浆经漏斗流入螺杆泵内，由泵通过输送管泵入孔内，药浆经 5~10min 发泡成非雷管感度的乳化炸药。

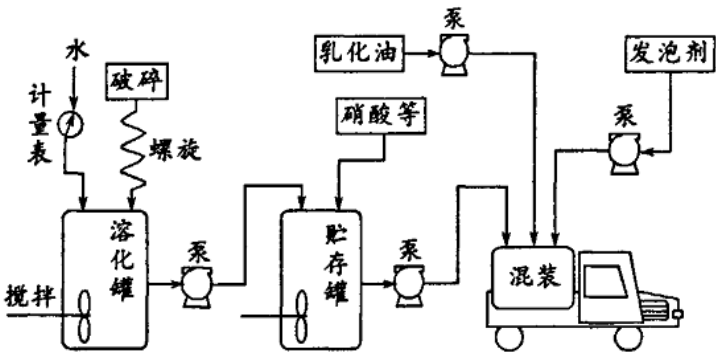


图 4-1 现场混装炸药制备工艺流程

(2) 技术适用条件：适用于大型露天矿山

(3) 节能减排效果：经调查分析炸药单耗平均降低 $0.1\text{kg}/\text{m}^3$ ，炸药制造成本约降低 4000 元/t。

(4) 成本效益分析

该技术的应用可减少炸药的包装、运输、储存环节，降低成本，提高安全性；机器装药效率大大提高并节省人工成本，且装药效果好；实现炮孔耦合装药，提高炮孔装药体积威力；较好的爆破效果，如减少大块率、减少根底等节省了二次爆破及破碎成本，有效的降低了矿山开采综合成本。该技术应用后主要投资为混装炸药车，投资在 150~250 万元，主要的运营费用为汽车及装药系统动力消耗。

4.1.7.2 矿山生产自动调度及管理系统

(1) 技术概况

矿山生产自动调度及管理系统由硬件和软件组成。硬件主要包括中央计算机系统、车载计算机系统、无线通讯系统和全球卫星定位系统。软件是调度员用于监控、管理的操作平台。中央计算机子系统位于调度室，主要包括中央计算机数据终端、无线通讯接口装置以及打印机等设备，是整个调度系统的神经中枢。车载计算机子系统安装于采区作业现场的卡车、电铲等主要设备上，由车载主机和图形操作控制盘以及天线组成。图形操作控制盘是触模式屏幕输入，操作简便直观，图形、方案输出速度快。调度室的中央计算机与作业现场的车载计算机之间通过无线数据通讯来互相联络并进行数据通讯。调度系统卫星定位子系统的设备主要包括 GPS 接收机和 GPS 基准站，其中 GPS 接收机安装于车载主机之内。该子系统为采区作业现场的卡车、电铲、钻机以及辅助工程机械提供精确定位。全球卫星定位系统的卫星群能够为全地球的任何地点提供定位，再通过地面的 GPS 接收机接收，传送至中央计算机。GPS 接收机安装在待定位的设备之上。

调度系统的主要工作原理是：定位/检测系统实时地跟踪设备，并采集相关的信息，通过无线数据传输送至中央计算机，计算机动态地根据其调度优化算法程序及时向有关人员/设备发送信息以及各种指令，以保证整个生产系统始终处于优化和高效的运行之中。

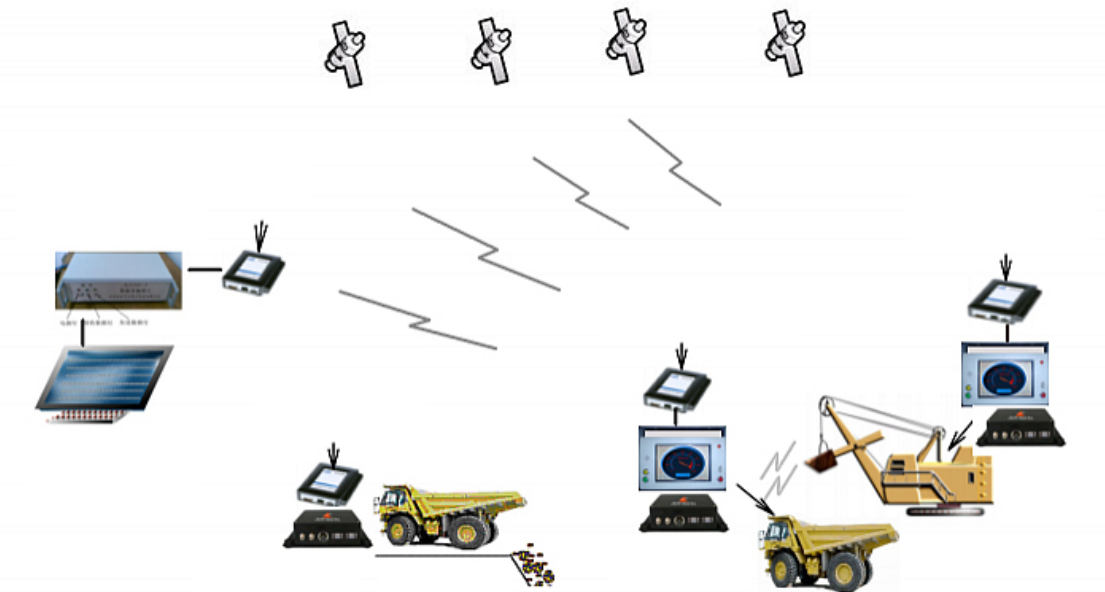


图 4-2 矿山生产车自动调度及管理系统示意图

(2) 技术适用条件：适用于大型露天矿山

(3) 节能减排效果：减少卡车投资，提高电铲及矿车综合台效 5%~10%，油耗降低 3%~5%。

(4) 成本效益分析

一般来讲，采用矿山生产车自动调度及管理系统，可使矿山提高生产能力。当以增加生产能力为目的时，调度系统可解算出为满足要增加的生产能力所需要增加的最少卡车台数，或推荐需要的最少卡车台数，其节省的设备投资费用是该系统费用的 3 至 4 倍。另一方面，为满足确定的生产能力，减少需要的车铲台数，意味着使生产费用大大降低。事实上，由于节省的费用如此之大，致使系统本身费用甚至可在很短时间内收回。

该技术应用后主要投资为调度系统，包括中央计算机系统、车载计算机系统、无线通讯系统和全球卫星定位系统等，根据系统规模的差异，投资在 300~1000 万元，主要的运营费用为系统维护费用。

根据调查企业分析，由于矿车配置数量的合理优化（一般为减少），综合台效的提高，每年产生经济效益可达系统投入的 3~4 倍。

4.1.7.3 半连续排土工艺技术

(1) 技术概况

半连续开采工艺是在连续开采工艺和间断开采工艺两种基本工艺方式的基础上发展起来的。它兼具连续工艺和间断工艺的优势，能解决中、硬矿岩的开采，实现矿岩的连续运输，扩大生产规模和降低生产成本。因此半连续开采工艺被国

际采矿界公认为“最有生命力”的露天开采工艺。由于它能充分发挥间断和连续 2 种运输方式的优点，扬长避短，所以在新建露天矿和老矿技术改造时一般被优先考虑。

破碎-胶带半连续排土工艺应用于大型露天矿山的运输，是 70 年代以后发展起来的。该工艺是由破碎站（移动式破碎站）、固定式胶带、移置式胶带、排土机和电控系统组成。根据矿山的具体条件，前置工艺可以选择电铲—矿车—固定式破碎站或电铲—工作面移动式破碎站，工艺流程图见图 4-3、图 4-4。

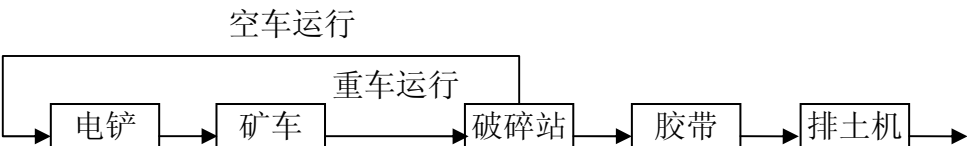


图 4-3 破碎-胶带半连续排岩工艺流程图（固定式破碎站）

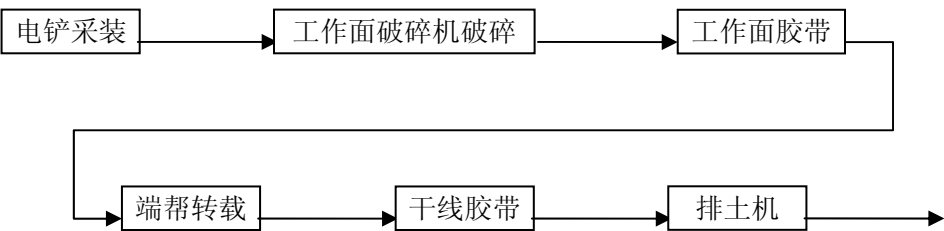


图 4-4 破碎-胶带半连续排岩工艺流程图（工作面移动式破碎站）

（2）技术适用条件：适用于大型露天矿山，剥离物运量大、提升高度大、运营时期长以及运距足够长时，采用半连续排土工艺效益明显。

（3）节能减排效果：缩短汽车运距，减少汽车养护费用，降低能耗，根据调查结果，排岩经营费降低 0.8~1.2 元/t。

（4）成本效益分析

该技术应用后大大缩短汽车运距，减少汽车养护费用，使汽车运输趋于合理，运输条件和车况大大改善，半连续胶带排土有效节省运排费用，节约能源消耗。该技术主要投资为破碎站、胶带系统、排土机、控制系统，主要运行费用为系统维护费用，根据调查，整个系统投资在 800~2000 万元，运营费用为 4.5~5.5 元/t-废石。

根据调查企业分析，由于矿车运距减少、能耗降低、养护费用降低等减少的排土运营费用约为 1 元/t，效益显著。

4.1.7.4 束状孔爆破技术

(1) 技术概况

束状孔爆破技术是以由数个密集平行深孔形成共同应力场的作用机理为基础的深孔爆破技术。束状深孔爆破的基本概念是：由数个间距为 3~8 倍孔径的密集平行深孔组成一束孔，束孔（直径 d ）装药同时起爆，对周围岩体的作用视同一个更大直径（等效直径 D ）炮孔的装药的爆破作用。与单孔爆破不同，束孔爆破形成的共同应力场应力波波阵面具有一定的厚度，应力波峰压力作用于岩石的时间更长、冲量更大、有效作用范围更广，因此，其爆破效果更好。由于可以以一束孔的共同作用设计爆破参数，在工程应用方面有很大的灵活性和实用性。该技术合理利用炸药能量，减少辅助工程量，提高每米崩矿量、降低炸药成本。

以 N 个孔组成的束状孔的等效直径是单个孔的 $\sqrt{N}$ 倍，以束状孔等效直径为计算依据的当量球形药包装药量、装填参数以及相应的最优埋深、布孔方案和参数，可以依据采场具体条件在较大范围内进行合理选择。其工程工艺和预期效果的适用性与合理性在于：

①该方案综合利用了有利于增强装药中远区爆破作用的束状孔效应和最优埋深条件下的球形药包漏斗爆破，合理利用炸药能量的最优条件。

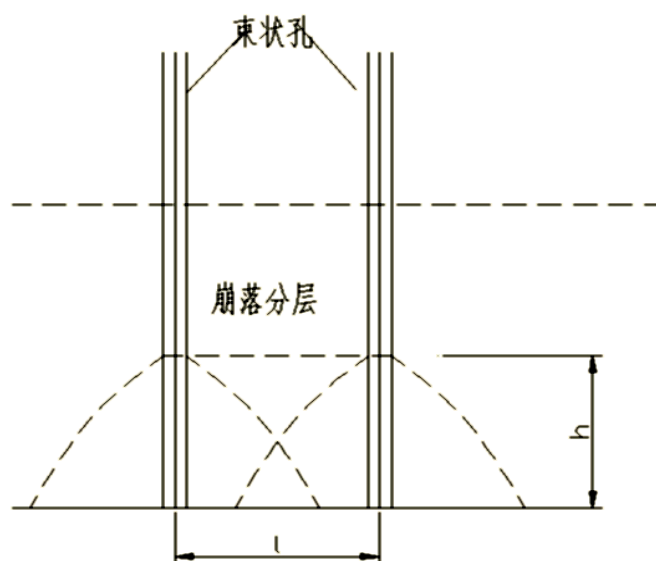


图 4-5 束状孔组合爆破漏斗

②在工程工艺方面，由于采用束状孔的大参数束间距，凿岩硐室可以布置成凿岩巷道的形式，凿岩水平可以留有大尺寸连续矿柱，简化了采场管理；采场采用高分层大量落矿条件下完全避免了切割井、拉槽等低效率作业辅助工程；高分层的分层落矿和厚大的揭顶爆破，使矿山的爆破周期更趋合理。

③由于束状孔采用大参数束间距布孔方式和最优埋深的成倍增加，从根本上改善装药爆破的约束条件。当量球形药包可以采用无特殊性能要求的普通低成本

炸药，在提高每米崩矿量、降低炸药成本方面有明显效果。

(2) 技术适用条件：适用于地下矿山中厚以上矿床开采。

(3) 节能减排效果：减少炸药单耗 0.1kg/t 左右，减少二次爆破炸药 0.09kg/t 左右。

(4) 成本效益分析：减少切割作业量，提高每米崩矿量、降低炸药成本。可节省凿岩爆破成本 0.7~1 元/t。该技术的应用可充分利用已有设备，无需新增投资（或增购中深孔潜孔钻机）；运营费不会增加。

4.1.8 有色金属选矿节能减排先进适用技术

4.1.8.1 含易浮硅酸盐脉石铜矿的选矿技术

(1) 技术概况

冬瓜山铜矿为铜陵狮子山铜矿区深部的大型铜矿床，部分为含铜磁黄铁矿滑石蛇纹石类型。矿石主要金属矿物有黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿及磁铁矿，主要脉石矿物有石榴石、石英、滑石、蛇纹石及硅镁石等。滑石和蛇纹石对铜矿浮选的影响较大，前者遇油上浮，后者则易泥化。选矿工艺流程为首先预先浮选滑石（弃掉），然后优先浮选得到部分铜精矿，其尾矿采用铜硫混合-分离浮选得到铜精矿和硫精矿，铜硫混合浮选尾矿采用磁选-脱硫浮选得到铁精矿和硫精矿。

(2) 技术适用条件

该技术适用于矿物组成复杂、嵌布粒度细且极不均匀，且含大量蛇纹石、滑石等易浮脉石矿物的铜矿选矿。

(3) 节能减排效果

主要能源消耗为电耗 26.05kWh/t-矿石；综合能耗 10.52kgce/t-矿石；尾矿排放量为 0.65t/t-矿石；废水排放总量为 3.5t/t 矿石，其中 COD<100mg/L，SS 含量 <100ppm。

4.1.8.2 100m³ 以上机械搅拌式充气浮选机技术

(1) 技术概况

矿物加工领域约 90%的有色金属矿石、50%的黑色金属矿石需采用浮选法处理，浮选机相应地成为了选别矿物原料最重要的设备之一。近 20 年尤其是最近几年，矿产资源日趋贫细杂，选厂规模日益扩大，浮选设备研究理论与技术趋于成熟，浮选设备大型化的研究与应用也取得了重大进展，国内规模以上矿山企业扩产或技术改造中均普遍采用了大型浮选设备，取得了较为理想的经济效益和社会效益。

以 KYF-160 型浮选机为例，槽体为圆柱形，槽底设计为平底形，并采用深槽设计，有效几何容积为 160m^3 ，重量达 41.7t ，矿浆处理量为 $2400\text{m}^3/\text{t}$ ，采用了高比转速后倾叶片叶轮、低阻尼直悬式定子，安装在叶轮周围斜上方，由支脚固定在槽底；泡沫槽采用周边溢流方式，利用矿浆的自然流动方向，加速泡沫的溢流，降低能耗，创新的双泡沫槽、双推泡锥槽体结构。针对槽体截面积大、气泡难以均匀弥散的问题，对空气分配器结构参数、配置方式及与叶轮的匹配参数进行了优化，确保了空气在浮选机截面内弥散均匀，气泡直径分布满足浮选工艺要求，增加了矿粒与气泡碰撞、接触和粘附的机会；建立了液面控制双执行机构的协同工作机制，研制了适用于给矿量大、矿浆波动量大且频繁条件下的超大型浮选机矿浆液面自动控制系统，确保了矿浆液面及泡沫层厚度可满足不同浮选工艺的要求；液位自动控制系统首次采用自整定模糊控制策略。

(2) 技术适用条件

该技术适用于采用浮选工艺分离矿物的选矿厂，生产规模在 200 万 t/a 以上。

(3) 技术特点

大型浮选设备优点在于：可减少选厂需要的空间，可在现有空间不变的前提下提高处理能力，简化浮选段的设计布置，简化控制装置的复杂性，改善浮选段的操作灵活性，降低维修费用，减少吨矿石生产成本。

(4) 节能减排效果

主要能源消耗为电耗 39.81kWh/t-矿石 ，综合能耗 16.08kgce/t-矿石 。

4.1.8.3 高硫铅锌矿整体利用技术

(1) 技术概况

南京银茂铅锌矿业有限公司选厂处理的矿石为高硫复杂铜铅锌金银矿，以矿石组分多、嵌布关系复杂、伴生元素多且含量低为特点，其主要矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、银黝铜矿、锌锑黝铜矿、黄铜矿、磁铁矿、菱锰矿等。

整体回收技术充分考虑了矿石中有价元素的嵌布特点、关键工艺参数和药剂制度、回水模式与工艺技术之间的关系，提出在提高主元素铅、锌回收率的基础上，“榨干吃尽”式综合回收有价元素银、铜、铁、锰、金、硫的技术。

(2) 技术适用条件：适用于复杂高硫铅锌矿石的整体综合回收利用。

(3) 技术特点

主要特点为：①应用低碱度-电化学在线检测-多项离子调控-选择性强化捕收高效浮选技术，提高铅精矿中铜银铅回收率；②应用铅尾矿浓缩自循环回水选铅、高浓度选锌工艺，进一步提高铅锌回收率，并降低了焙烧铁精矿中杂质铅锌含量；

③应用含铜铅精矿浓缩-缓冲脱药调浆-强化铅的抑制和铜的活化-选择性捕收高效分离浮选技术进行铜铅分离，实现了低品位伴生铜资源的高效综合回收；④应用新型浮选药剂 BK907 和锌尾浓缩工艺在高碱度条件下实现了硫铁矿的高效回收和提纯，并将锌尾中的金银尽可能富集其中；⑤应用混合自循环焙烧工艺，实现高品质硫精矿在焙烧制酸的过程中产出合格铁精矿；⑥通过焙砂氰化法综合回收金银；⑦应用预先脱渣-脉动高梯度磁选锰-永磁除铁的碳酸锰回收工艺，实现了选硫尾矿中锰的综合回收。通过以上技术的集成，各工艺环节环环相扣、紧密衔接，在实现清洁生产的同时全面综合回收了矿石中的有价元素。

（4）节能减排效果

该技术适用于复杂高硫铅锌矿石的整体综合回收利用。能源消耗主要为电耗 40kWh/t-矿石，综合能耗 16.16kgce/t-矿石；尾矿排放量为 0；废水排放总量为 0。

4.1.8.4 复杂铅锌铁硫化矿的选矿技术（FKNSP）

（1）技术概况

凡口铅锌矿选矿厂年处理原矿 150~165 万 t，主要产品为高铅精矿、高锌精矿、铅锌混合精矿和硫精矿。凡口铅锌矿石主要为复杂致密状硫化铅锌矿，黄铁矿含量高达 45%，方铅矿、闪锌矿、黄铁矿嵌布粒度粗细不均，结构复杂，粒度小于 0.074mm 分别占 35%、17%和 49%，小于 0.02mm 占 16%、4%和 8%，矿石难选。

FKNSP 新技术的主要原理为：根据凡口铅锌矿各种矿物嵌布粒度粗细不均匀的特点，顺应各矿物及其连生体的可浮性差异及其特性，高效快速产出大部分高品位铅精矿和锌精矿，合并铅、锌回路的难选慢浮中矿强化再磨集中处理产出铅锌混合精矿，实现复杂铅锌铁硫化矿的短流程高效处理，提高了金属回收率。工艺流程如图 4-6 所示。

（2）技术适用条件

该技术适用于铅锌矿物嵌布粒度不均匀，可选性难易不一的硫化铅锌铁矿。

（3）技术特点

FKNSP 采用的四产品工艺流程包含三项核心技术：铅快速精选获得高品位铅精矿，获国家发明专利（87105461.2）；锌快速精选获得高品位锌精矿；铅中矿和锌中矿合并细磨混选得到混合精矿。铅、锌精矿均为高质量精矿，使产品等级提升，铅锌混合精矿为选厂新产品可供应韶关冶炼厂。流程结构的最大特点为浮选作业少；目的矿物浮出速度快；将流失矿和原矿泥合并进入铅锌中矿再磨混选流程；为节能减排，清洁生产，提高产能提供了工艺技术支持和依据。

（4）节能减排效果

该技术适用于铅锌矿物嵌布粒度不均匀，可选性难易不一的硫化铅锌铁矿。选矿效率提高了 36.19%，磨浮作业电耗由原工艺的 34.65kwh 减少到 29.53kwh，减少电耗 5.12kwh/t-矿石，即综合能耗为 11.93kgce/t-矿石，节能量为 2.07kgce/t-矿石。选矿药剂剂量下降，取消了 1200g/t 的硫酸锌。废水排放总量 2.5t/t-矿石，其中 COD<100mg/L，SS<100ppm；尾矿排放量 0.74t/t-矿石。

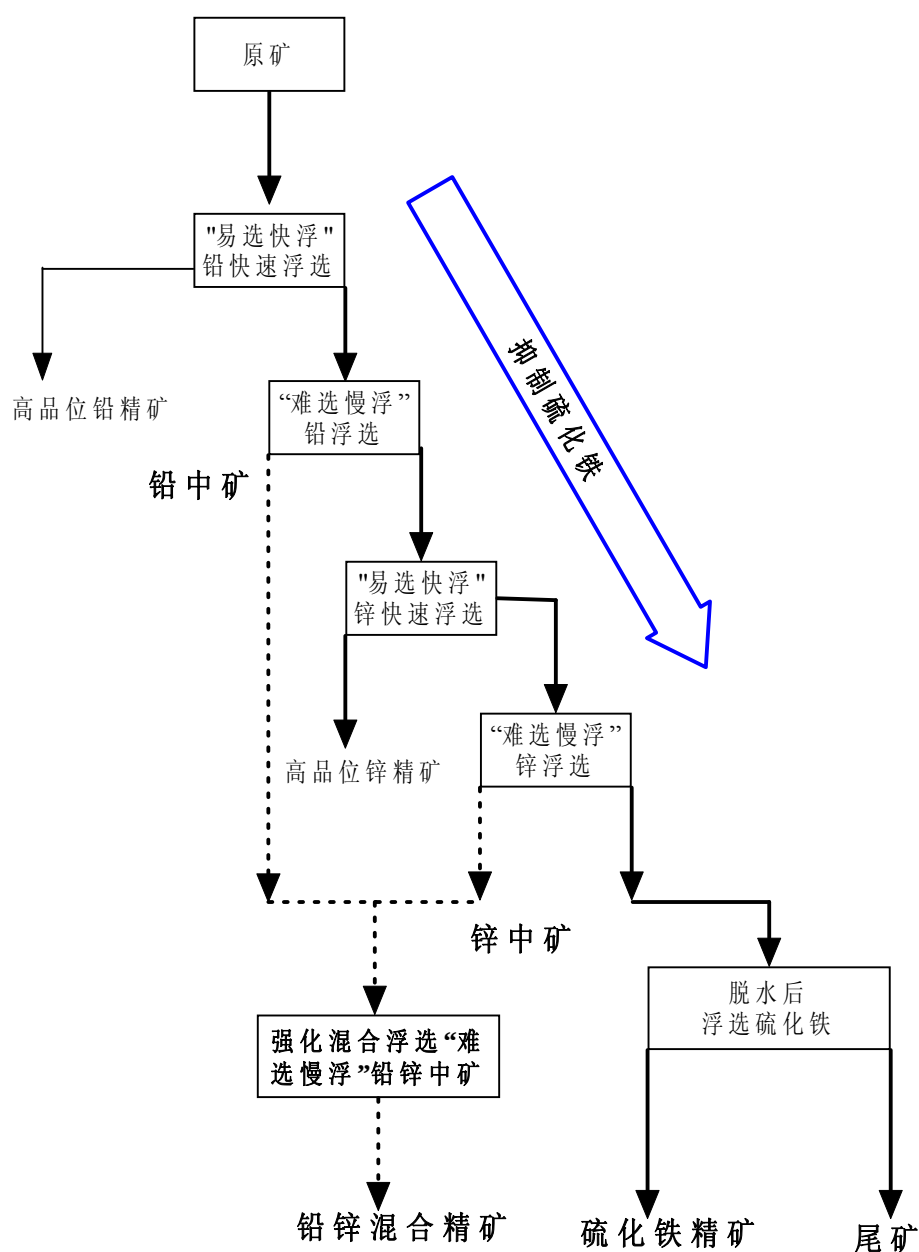


图 4-6 复杂铅锌铁硫化矿的选矿工艺流程

4.1.8.5 复杂难处理富锗硫化氧化混合铅锌矿的选矿技术

(1) 技术概况

针对云南会泽铅锌矿的矿石特点，结合当今国内外处理铅锌矿的最新发展趋势，采用了先硫化后氧化-先浮铅后浮锌的原则技术方案，开发出“等可浮-异步选铅-锌硫异步混选-铅锌硫分离-氧化铅锌矿不脱泥硫化电位控制浮选”新技术，并成功应用于复杂难选铅锌硫化氧化混合矿的选矿过程，使铅、锌、硫、银、锗等金属都得到了最大限度的回收，有效地利用了矿产资源。

该技术的基本原理：①依据铅硫关系密切、部分锌硫关系密切的特点，根据等可浮的原理把铅锌硫分成“铅硫”部分和“锌硫”部分，分别采用异步浮选、混选工艺，保证了铅、锌、硫精矿的高质量和高回收率。首次将异步和等可浮两个流程的核心技术有机结合起来，形成等可浮异步浮选和混选流程结构，成为硫化矿浮选的骨干流程。采用高选择性捕收剂在低碱度条件下进行铅-硫分离，为后续氧化矿有效浮选创造了必要条件，同时有效降低了精矿中不同名金属的含量。②利用铅硫矿物之间可浮性及浮选动力学差异，使可浮性好、浮游速度快的铅矿物优先浮出，再浮选锌硫矿物然后分离。③采用有效的矿泥分散剂分散矿泥，实现氧化铅锌矿不脱泥硫化浮选新技术，降低了铅锌金属损失。④利用矿石中同为碳酸盐矿物的铅锌氧化物和脉石矿物处理后可浮性、浮游速度差异，采用有效的针对性捕收剂进行分离。⑤采用具有特殊活性的捕收剂，成功地实现了氧化锌常温浮选。⑥氧化矿回收过程中，结合硫化电位控制浮选新技术检测矿浆浮选电位，指导部分关键浮选药剂的使用及添加。

“等可浮-异步选铅-锌硫异步混选-铅锌硫分离-氧化铅锌矿不脱泥硫化电位控制浮选”技术的选矿原则流程见图 4-7。

（2）技术适用条件：适用于复杂难选铅锌硫化氧化混合矿的选矿。

（3）技术特点

该技术适用于云南驰宏锌锗股份有限公司、兰坪铅锌矿、甘肃厂坝等铅锌矿及其他矿山处理混合铅锌矿。该技术的环境条件为常温、常压。

（4）节能减排效果

主要能源消耗为电耗 45kWh/t-矿石，综合能耗为 18.18kgce/t-矿石；废水排放总量为 3t/t-矿石，其中 COD<100mg/L，SS<100ppm；尾矿排放量 0.6t/t-矿石。

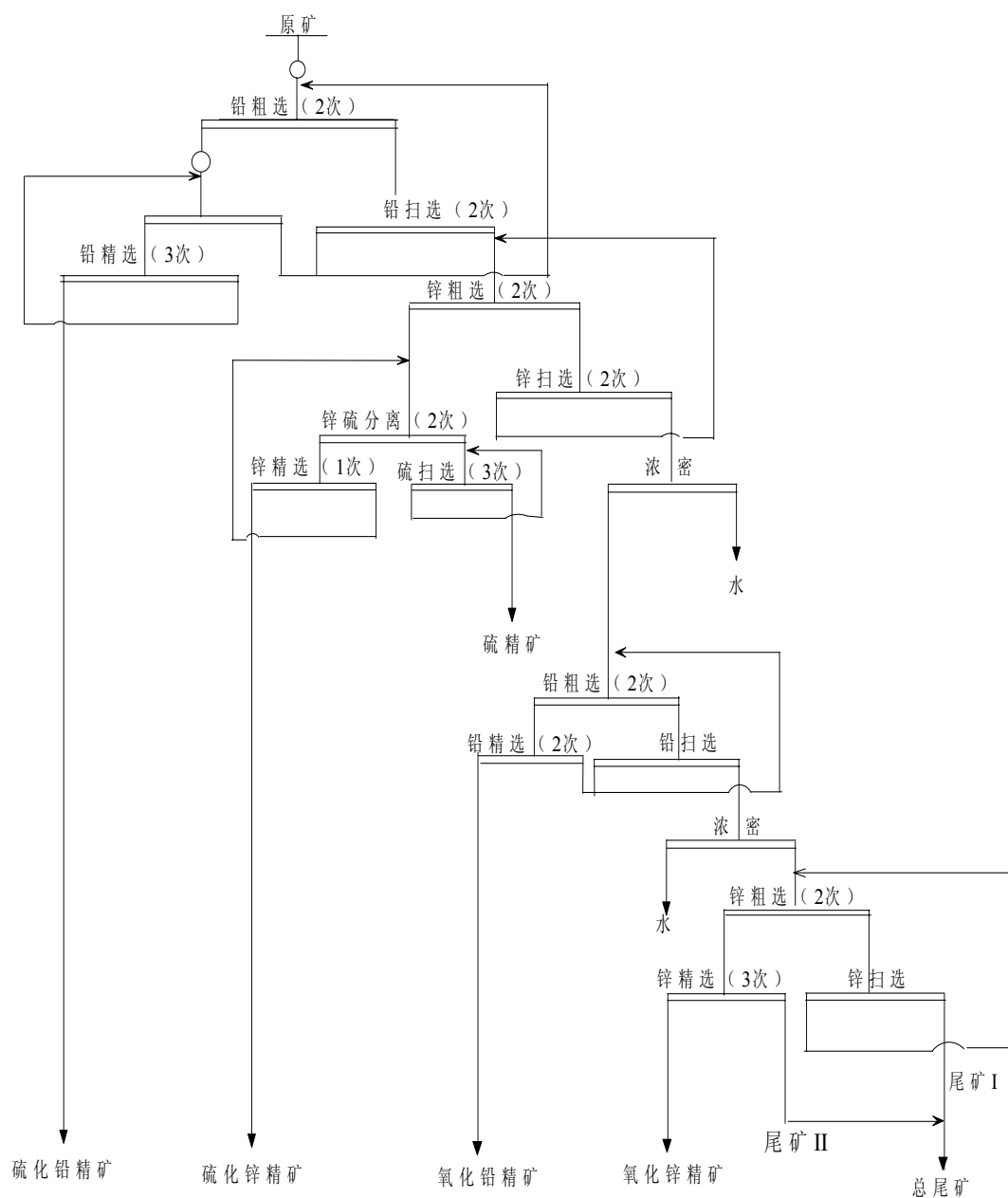


图 4-7 复杂难处理富锗硫化氧化混合铅锌矿的选矿工艺流程

4.1.8.6 铝土矿选矿脱硅预富集技术

(1) 技术概况

我国铝土矿资源探明储量达 23 亿 t，居世界第五位，主要为一水硬铝石型铝土矿，有高铝、高硅、低铁的突出特点，铝硅比偏低，矿物组成复杂，嵌布粒度细，嵌布关系复杂。针对我国中低铝硅比铝土矿采用选矿方法预先脱出矿石中的含硅矿物，以高铝硅比选矿精矿作为原料采用拜耳法生产氧化铝，即“选矿-拜耳法”，是缩短生产流程、减少能耗、降低生产成本的唯一途径。

该技术的基本原理是在原矿磨矿过程中，通过控制磨矿介质和磨矿时间，实现有用矿物的选择性解离，然后将磨矿产品分成粗细两个粒级，分别营造适宜的浮选矿浆环境、通过应用不同的药剂制度和工艺条件，快速脱出矿石中的含硅矿物，得到可供拜耳法生产氧化铝的一水硬铝石精矿。对分级成粗细两个粒级的原矿石，分别采用合理的选别方法，提高分选效率，降低选矿成本。

（2）技术适用条件

该技术适用于一水硬铝石型中低铝硅比（A/S 4~6）铝土矿的选矿。

（3）技术特点

应用于一水硬铝石型中低铝硅比铝土矿的选矿脱硅过程。该技术适用于所有新增一水硬铝石型铝土矿生产氧化铝项目，以及现有氧化铝生产工艺的改造升级。该技术的环境为常温、常压。

（4）节能减排效果

主要能源消耗为电耗 30kWh/t-矿石，综合能耗为 12.12kgce/t-矿石；废水排放总量为 2t/t-矿石，其中 COD<100mg/L，SS<100ppm；尾矿排放量 0.2t/t-矿石。采用选矿-拜耳法生产氧化铝整体技术可节能 50%，即 594kgce/t-氧化铝。

4.1.8.7 磁性衬板技术

（1）技术概况

磁性衬板可以广泛应用于金属矿山的球磨机中，寿命为目前通用的普通高锰钢衬板的 4~8 倍，一经推出就为矿山带来了显著的经济效益和社会效益。1980 年瑞典 Skega 公司最早提出了橡胶磁性衬板的专利，并逐渐在矿山得到应用。国内研究单位于八十年代末开始磁性衬板的研究，自成功推出 HM 型大型磨机全套磁性衬板后，对其使用情况进行不断的追踪和考察，对保护层形成的外界干预条件和磁系结构变化对保护层的影响、安装质量对衬板寿命的影响、介质种类和矿石性质对衬板寿命的影响等问题进行了针对性地的研究和考察，对衬板结构和磁系结构进行了进一步地优化设计，并对材料性能进行了深入研究和改进，研制成功了性能更优越的第二代 HM 型磁性衬板。并已广泛应用于数十家国内金属矿山，并得到实践的验证，寿命可以达到锰钢衬板的 5 倍以上，并具有不需维护、提高磨机作业率、提高磨机处理能力、对磨矿指标没有不良影响、重量轻、节电、降低介质消耗、安装方便、噪音低、减轻工人劳动强度、节省磨机操作成本等优点，为矿山节本增效、节约能源带来巨大的收益。

磁性衬板是靠磁力在衬板工作面吸附一层磁性物质，形成保护层，减少衬板工作面与运动的介质和物料直接接触，从而达到减轻磨损、延长衬板寿命的目的。

磁性衬板的技术关键就是磁系的设计，单一衬板采用大极面、小极距、低场

强、高梯度的开放磁系，安装到筒体后由于形成了封闭的磁系，使衬板表面的磁场强度得到增强。这就形成了磁性衬板的独特工作特点，靠磁力在其工作表面上吸附一层由磁性矿物和介质或介质碎块组成的保护层，保护层厚度一般为30~40mm，要求衬板表面必须有足够的场强，使保护层牢牢地吸附在衬板表面，来达到其减轻衬板磨损的目的。同时，在吸附层的表面要求其磁场强度急骤下降为零，避免使矿物磁化，影响磨矿效果。而且磁性衬板在具有足够场强的情况下厚度也做到了尽可能薄，以保证磁性衬板本身重量更轻，磨机容积尽可能大，来提高磨机处理能力。

（2）技术适用条件

磁性衬板用于铁矿、铜矿、金矿、多金属矿的二段及三段磨矿作业，取代传统的高锰钢衬板，对选矿厂固有工艺流程没有特别要求，对磨矿指标也没有任何不良影响。

（3）节能减排效果

磁性衬板节电量为 1.2kWh/t-矿石；节能量为 0.485kgce/t-矿石。以铜选矿厂为例，年处理规模 400 万 t，投资 10 亿元。不额外增加运行成本。

（4）技术应用情况

HM 型大型磨机磁性衬板在包钢等铁矿选矿厂应用成功后，又先后在冬瓜山铜矿、金口岭铜矿、大红山铜矿和大姚铜矿等多家铜矿选矿厂推广应用。

4.1.8.8 电位调控浮选技术

（1）技术概况

磨矿介质钢球在硫化矿湿磨时，会发生一系列的电化学相互作用，这些反应都会造成磨矿过程的还原性，因此，磨矿过程中的矿浆电位比浮选机的矿浆电位要低得多。黄铁矿具有最高的表面残余电位，残余电位越高，物质的电化学活性越小。在磨矿过程中加入捕收剂与选铅锌铁硫化矿时，原电池相互作用能增大矿物分选的选择性，对方铅矿的浮选影响不大，而能抑制黄铁矿、闪锌矿的分选。

（2）技术适用条件

该技术适用于高硫铅锌矿石分离。采用亚硫酸盐等清洁的选矿药剂来克服难免离子对浮选造成的不利影响，通过调节和控制矿浆 pH 值与矿浆电位 Eh 来实现难选铅锌矿石电位调控清洁浮选工艺，在生产实践中采用电位计实时监控（电位调控），是该工艺的一大特点。

电位调控浮选在优先浮选方铅矿时，为尽早克服难免离子带来的负面影响，将亚硫酸盐等抑制剂加入到磨矿机中。

由于在优先浮铅时采用了高效的（ $\text{Na}_2\text{SO}_3+\text{ZnSO}_4$ ）组合抑制剂，使得浮选

方铅矿的矿浆 pH 值（11.8~12.2）比高碱原生电位工艺所要求的矿浆 pH 值（12.5~12.8）要低，因此可大幅减少石灰的无谓消耗，并减少后续浮锌时捕收剂与活化剂的无谓消耗。

（3）节能减排效果

电位调控浮选节电量为 5kWh/t-矿石；节能量为 2kgce/t-矿石。

4.2 资源能源回收利用技术

4.2.1 氧化铝赤泥选铁技术

（1）技术概况

高梯度磁选机的基本原理：转环立式转动，环内装有含铬不锈钢聚磁感应介质，磁介质在背景磁场中感应出非常强的感应磁场，进而通过高磁场对物料进行分选。给入的矿浆沿上铁轭缝隙流经转环，磁介质表面形成梯度极高的磁场，矿浆中磁性颗粒在这种极高的磁场作用下吸着在磁介质表面，并随转环转动被带至顶部的无磁区，再通过顶部的冲洗水将磁性颗粒冲入精矿料斗中，非磁性颗粒则沿下铁轭缝隙流入尾矿料斗中，进而由尾矿口排出。

赤泥选铁采用一系列沉降槽三洗底流-圆筒隔渣筛-中磁机-粗选-精选-压滤生产工艺，尾矿返回三洗沉降槽，经过磁选后铁精矿 Fe_2O_3 含量达到 80%，Fe 含量 55%。

（2）技术适用条件：适用于含铁量较高的氧化铝赤泥处理。

（3）技术特点

该工艺流程简单，资源循环利用。缺点是铁回收率偏低，仅有约 20%左右。

（4）节能减排效果：回收铁精矿，减少了赤泥排放量。

4.2.2 氧化铝焙烧余热回收技术

（1）技术概况

对气态悬浮焙烧炉静电收尘器和排风机之间的排烟管道进行改造，通过改变烟气的走向来增加空间安装换热器，将上一工序提供的平盘过滤机洗涤用水加热到合适的温度，然后返回平盘过滤工序，从而实现利用焙烧炉排除的高温废气加热过滤机洗涤用水，减少甚至取消使用蒸汽加热洗涤用水，达到节能减排的目标。

进水首先进入给水预热器进行预热（同时换热器加热的热水进行降温），预热后的热水进入换热器进一步加热，加热后的热水进一步升温（同时排烟温度降低），换热器热水出口处的数显温度传感器控制热水泵后的主流程气动阀，通过阀门开度调节水量大小实现对加热后热水温度的控制，加热后的热水进入预热器与进水进行热交换，对进水预热的同时降低出水温度以达到平盘过滤机洗水的使

用要求，混水器后的数显温度传感器控制副流程气动阀调节阀门开度，让未加热的进水经过副流程进入混水器与预热器出来的高温水混合来实现出水温度的控制，热交换后的出水进入混水器进行进一步的降温，混水器内温度合适的水经过管道送到平盘过滤机作为洗水使用。

(2) 技术适用条件：适用于氧化铝生产。

(3) 技术特点

该技术研究开发出采用夹套式热管换热器的悬浮焙烧炉烟气余热回收工艺，实现了余热利用的目标；研究开发出夹套式热管换热器除灰工艺，提高了夹套式热管换热器的换热效率。该烟气余热回收工艺简单，易维护，运行成本低，是一项有效的节能技术，经济效益和社会效益显著。但在除灰效果方面还需进一步改进，以获得更为稳定的换热能力。

(4) 技术节能减排效果：余热回收后用于平盘过滤机洗涤水加热，每吨氧化铝回收余热生产蒸汽约 0.025t。

4.2.3 废内衬及炭渣循环利用技术

(1) 技术概况

随着铝工业的快速发展，铝电解固体废弃物的污染问题越来越突出。国外在这方面的研究较早，技术种类较多，各大铝业公司和研究机构均有涉足。以火法冶金技术为主导的成功案例较多，美国铝业、力拓铝业都拥有万吨级的处理工厂。

我国的研究开始较晚，主要有回转窑焙烧处理技术和湿法浮选技术。回转窑焙烧处理技术由中国铝业公司开发，该技术具有处理固体废弃物彻底、回收利用率高（95%以上）的特点，工业试验完成后在国家大型铝电解试验基地试点应用 4 年，目前处于推广应用阶段。湿法浮选技术由地方铝业公司联合开发，目前处于工业试验阶段，该技术回收利用率约 80%，制约其推广应用的关键在于：外排废水是否达标、磨粉和药剂的成本、如何提高回收利用率。

废内衬的循环利用：依据“废内衬=35%炭+30%氟化物+耐火材料+氰化物”的组成特点，基于火法冶金原理，在废内衬中加入一定量的添加剂，将废内衬的炭作为燃料提供反应热，将氟化物以气态 HF 形式析出进入烟气、通过氧化铝吸附生成氟化铝加以回收，将氰化物氧化分解，耐火材料作为水泥原料，实现废内衬各种成分的循环利用。

炭渣的循环利用：依据“炭渣=30%炭+70%电解质”的组成特点，基于火法冶金原理，在炭渣中加入一定量的添加剂，将炭燃烧转化为 CO₂ 析出，保留的固体料即为电解质。

(2) 技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

该技术主体设备为常用设备，操作简便，维护成本低；添加剂来源广、价格便宜；主要产品为氟化铝、电解质，纯度高，回收利用率高；处理固体废弃物彻底，无“三废”外排。该技术需要将废内衬和炭渣分别进行处理，以便分别回收氟化铝和电解质。

（4）技术节能减排效果

以回转窑焙烧处理技术为例：①每处理 1t 废内衬，可减少 2kg 剧毒氰化物和 150kg 有害氟化物对生态环境的破坏，可节约标煤 386kg，可回收氟化铝 168kg，氟化物回收率 95%，氰化物去除率 99.6%。②每处理 1t 炭渣，可节约标煤 331kg，可回收电解质 836kg，电解质回收率 98%。

4.2.4 锌浸出渣银浮选回收技术

（1）技术概况

在常规的湿法炼锌过程中，银富集在酸浸渣中。这种含银的浸出渣在一些铅锌联合冶炼企业是送铅生产系统回收，通过熔炼，银进入粗铅的回收率在 95% 以上。但受渣量、渣含锌及铅生产能力的制约，有些企业必须采用其它方法事先将酸浸渣中的银富集起来再进铅生产系统，浮选法回收银是一种较为成熟的工艺。

锌浸出渣的颗粒细，粒径小于 0.074mm 占 80%，而 90% 的银是分布在这种细颗粒中，银在浸出渣中的存在形态复杂，80% 以硫化银的形态存在，少部分以氧化银、氯化银、硫酸银及银铁矾形式存在，锌浸出渣的这些特点为浮选法回收银提供了依据。

采用丁胺黑药为捕收剂，在自然 PH 值 4~5 的范围内、矿浆比重 1.5~1.75g/cm³ 的条件下，采用一粗三精三扫工艺流程对浸出渣进行浮选，获得技术指标为：精矿含银 2000~4000g/t、银回收率 50%~70%、尾矿含银 80~150g/t。

组合用药制度研究表明，在浮选工艺中组合用药可以发挥药剂之间的协同效应，从而产生更强大的捕集能力，江西理工大学研究推荐的药剂用量为：捕收剂包括丁胺黑药与丁基黄药 800g/t、起泡剂 350g/t，银精矿品位可到 3000g/t 以上、银回收率可到 70%。

工艺流程：矿粉浸出工序的酸性浸出底流泵打至银浮选原矿槽，再送到稳压槽中，矿浆经管道流至浮选槽，加入浮选药剂，经一粗三扫三精选后，精选矿浆压滤得到银精矿送铅生产系统，浮选后的尾矿产压滤得到浸出渣送回转窑。

工艺控制要求：一是流量的稳定控制，矿浆进浮选机前配置稳压槽，流量过大时溢流部分直送尾矿槽、流量过小时尾矿返回稳压槽；二是浮选机的维护，由

于浮选机充气、搅拌与泡沫层刮出等多重作用，其耐腐耐磨性要求较高；三是浸出渣含不溶硫、水溶锌的控制直接影响银精矿含银与含锌等技术经济指标。

该工艺银精矿含锌取决于浸出渣含不溶硫，一般在 25%~30%之间，而锌的回收率在铅生产系统只有 70%左右，企业条件允许的情况下，可考虑对银精矿做进一步的降锌处理，高温高酸条件下加入氧化剂直接浸出，锌浸出率可达 75%。

（2）技术适用条件

浸出渣应符合以下要求：① 化学成分（%）： $S > 2\%$ ， $Ag \geq 200g/t$ ；② 矿浆比重： $1.5 \sim 1.75g/cm^3$ ；③ 矿浆 PH 值： $4.0 \sim 5.0$ ；④ 粒径：小于 $0.074mm \geq 80\%$ 。

该工艺启动时需要配套原矿槽、高位槽、稳压槽、尾矿槽、精矿槽、精矿压滤机、给药系统。

药剂的准备：丁胺黑药、二号油。给药系统的设置：粗选、扫一、扫二、扫三、精一。

（3）节能减排效果

银回收率可达 50%~70%；浸出渣硫回收率 15%~20%。

4.2.5 湿法炼锌工艺挥发窑渣综合利用技术

（1）技术概况

针对挥发窑窑渣粒度小、残碳高、硬度大、含有价金属多且含量低，综合回收难度大的特点，利用窑渣中铁质与碳质的磁性差别和密度差别，开发了水力冲洗法分离部分焦粉、破碎-磁选法分离铁渣与焦粉、球磨-磁选法生产铁粉和重选法富集生产银铁矿等技术，实现了对窑渣中银、铜等有价值金属的物理分选回收，并使湿法炼锌工艺中的挥发窑废渣资源得到了有效地综合循环利用。

生产工艺：水力冲洗分离部分焦粉→破碎→磁选分离铁渣与焦粉→球磨→磁选生产铁粉→重选生产银铁矿。

（2）技术适用条件

湿法炼锌工艺挥发窑废渣资源化综合循环利用技术是将挥发窑废渣进行资源化循环综合利用，基本实现零污染生产。适用条件是原料要求铁质和碳质混存。

（3）节能减排效果

该工艺技术能耗低，水循环利用，分选的产品综合再利用，无污染，是湿法炼锌工艺挥发窑废渣资源化综合循环利用的新工艺。

4.2.6 锌浸出渣无害化处理技术

（1）技术概况

该技术以粉煤作燃料，还原前与空气（或富氧）混合，经侧吹喷枪送入熔池

完成物料的熔化、还原、烟化过程，实现连续作业、间断放渣，铅、锌挥发物在炉膛上部经三次氧化形成氧化物回收，烟气经余热回收、收尘，尾气脱硫达标排放。

（2）技术适用条件

该技术适用于湿法炼锌产出的浸出渣及铅冶炼厂产出的铅渣处理，可推广到含铅锌杂料处理。

（3）技术特点

该技术铅、锌、锗、铟、银回收率高，能耗相应较低，环境好，成本较低，弃渣经毒性检测实现了无害化。

（4）节能减排效果

与常规的回转窑处理锌渣相比节能 20%，以煤代焦，密闭性好，SO₂ 排放量大幅减少。

4.2.7 铝带、铝箔轧制油在线回收技术

（1）技术概况

轧制油在铝板带箔轧制工艺过程中起到润滑冷却的作用，其耗量的大小不仅体现在成本上，也代表了轧制厂的环境保护、清洁生产与循环经济水平。铝带、铝箔轧制油在线回收技术针对铝带箔全油润滑轧制过程中产生的油雾，利用洗油和轧制油相溶，但沸点不同的特性，通过吸收、解吸等操作回收排烟中的轧制油。

（2）技术适用条件：该技术适用于各种规模的铝带、铝箔生产。

（3）技术特点

该技术可回收轧机油烟中的轧制油，且回收的轧制油和新轧制油品质相同，可返回净油箱中循环使用，从而节约了新油的添加量，降低了单位产品轧制油耗量，减少了污染，为环保作出了贡献。

（4）节能减排效果

该技术降低油雾排放浓度 90%以上，洗油使用寿命延长一倍。

4.2.8 高浓度全尾砂自流胶结充填技术

（1）技术概况

尾砂用于充填的优点是可降低充填材料消耗费和减少尾砂堆放场所。但是，在选矿厂尾矿产出率较低和尾矿中细粒级颗粒(-37 μ m)含量较高的情况下，分级处理后的尾矿数量将会大大减少，尾矿利用率一般只能达到 50%左右，一般情况下尚需补充一定量的其它充填骨料。另外，溢流的细粒级部分仍要占用大量的场所堆放，污染环境。为了解决这些问题，近年来，一些研究机构与矿山联合开展了高浓度全尾砂自流胶结充填工艺的研究，在工业试验和生产应用中都取得了较

大成功，显示了广阔的发展前景。

高浓度全尾砂自流胶结充填工艺用不脱泥全粒级尾砂作充填骨料，在充分利用尾砂的同时，以重力自流方式输送还可避免泵送的能源消耗。

其基本流程如下：选矿厂的全尾砂经尾矿浓密后，输送至充填搅拌站的立式砂仓(或卧式砂仓)内贮存(如采用砂仓内集中制备可不经浓密直接输送至砂仓)。砂仓总容量应能满足连续一次最大充填量的要求。为保证砂仓能够高效、稳定地放出浓度较高的全尾砂浆，在每个砂仓内设置一套螺旋搅拌装置，进行强力活化搅拌；向砂仓装入全尾砂浆的同时添加絮凝剂，以提高全尾砂浆的沉降速度。立式砂仓放砂浓度为 70%左右，贮存的饱和全尾砂的浓度为 80%左右。

充填作业时，从砂仓底部放出全尾砂，按配比要求加入水泥（或其它胶凝材料），经高浓度搅拌槽充分搅拌后，自流输送到井下充填采空区。制备的胶结充填砂浆浓度为 71%左右。充填料浆制备站配套设置水泥仓，每两套充填系统共用一座水泥仓，其容量应满足连续一次最大充填量的要求。水泥通过仓下的双管螺旋输送机给搅拌槽喂料。

充填料制备系统的全尾砂、水泥、水和胶结充填砂浆的质量、浓度和流量均设有计量检测仪表和微机自动调节控制系统，可实现连续充填。

其整个工艺流程包含全尾砂高浓度充填料制备技术、全尾砂充填料输送技术及胶结充填自动控制技术等几个关键技术。

(2) 技术适用条件：适用于采用空场法或充填法开采的地下矿山。

(3) 节能减排效果：极大减少尾砂排放，与分级尾砂充填或用水泥等充填材料充填相比还可节省充填材料消耗，与泵送相比可以降低能耗。

(4) 成本效益分析：整个充填系统建设投资在 800~3000 万元，充填成本约为 70~100 元/m³，充填成本较低；减少尾砂排放及占地费用。

4.2.9 井下废石就地充填技术

(1) 技术概况

废石和尾砂是金属矿山的两大主要固体废弃物，也是金属矿山中对环境影响最大的两大污染源。随着尾砂充填尤其是全尾砂充填技术的广泛应用，尾砂利用问题一般得到了较好解决，许多矿山的尾砂排放量大幅度减少，甚至实现了尾砂零排放。相对而言，目前金属矿山的废石利用率仍然很低，大量废石直接往地表排放。许多采用尾砂充填的矿山存在这么一种现象：一方面由于尾砂不足，大量购进河砂、棒磨砂等物料作为充填骨料，另一方面却将井下废石提升至地表排放。井下废石就地充填技术就是将井下废石全部用于井下充填，实现废石不出坑。此项技术不仅能减少或避免矿山废石排放，改善矿山环境，而且能直接产生较大的

经济效益。

相对于细砂胶结充填而言，废石胶结充填由于充填体的强度高、能大幅度减少胶结充填水泥用量从而节约充填成本、并有较高的充填效率等优点，受到采矿界的高度关注。早在 70 年代，澳大利亚的芒特·艾萨矿就开始试验废石砂浆胶结充填，之后，芒特·艾萨矿与昆士兰大学合作，对废石砂浆胶结充填技术开展了大量深入细致的研究，自 90 年代以来，研究工作主要围绕废石砂浆胶结充填的浇筑机制、充填料设计和充填体应力模型等方面展开，通过这些研究，使得芒特·艾萨矿废石砂浆胶结充填的充填质量更加稳定，水泥用量降低至 0.62%（重量计）。另外加拿大的基德克里克矿在上世纪 80、90 年代成功实现了直接用水泥浆喷淋碎石的碎石胶结充填技术。国内“八五”期间，在大厂铜坑锡矿试验了以地表采集的块石为粗骨料、以棒磨砂为细骨料的块石胶结充填。该项目对块石在搬运输送过程中的进一步破碎问题、块石和水泥砂浆胶结料的下料顺序、尾砂胶结料在块石堆内的渗透性等问题进行了研究，在地表进行了块石胶结充填的模拟试验。之后国内如新桥硫铁矿等多个矿山也成功试验了块石砂浆胶结充填技术。

利用此技术可以实现大多数井下金属矿山的掘进废石井下消纳不出坑，解决矿山废石排放所产生的环境破坏和安全隐患等问题，并可以提高采矿回采率，降低矿石贫化率。

该项技术主要包括井下废石高效胶结充填技术、井下废石高效非胶结充填技术和井下废石的缓存及高效倒运技术等。废石高效胶结充填主要用于一步骤采场空区及人工假底充填，以便形成人工矿柱或人工隔离层。废石高效胶结充填又包括废石尾砂胶结充填、废石混凝土充填和废石水泥浆胶结充填等技术。废石高效非胶结充填主要用于二步骤采场的空区充填，可降低充填成本。井下废石的缓存及高效倒运技术主要解决井下废石的产出地至井下充填空区之间的高效运输和缓存的问题。

（2）技术适用条件：适用于采用空场法或充填法开采的地下矿山。

（3）节能减排效果：极大减少废石排放，降低废石运排能耗。

（4）成本效益分析：整个废石就地充填系统建设投资在 100~200 万元，充填成本约为 15 元/m³ 左右，充填成本较低；减少废石排放及占地费用。

目前该技术在充填或空场法开采的地下矿山有部分应用，“十二五”期间预计推广普遍应用。

4.3 污染物治理技术

4.3.1 布袋收尘-动力波脱硫技术

（1）技术概况

动力波洗涤器由动力波洗涤筒、喷嘴和循环液贮槽三个基本部分组成。 SO_2 吸收液通过一段逆喷管逆着气流喷入动力波洗涤管中，气流和液体相撞，从而迫使液体呈辐射状自里向外射向筒壁，在气—液界面区域形成强烈湍动区，流体动量达到平衡，气液紧密接触而产生稳定的泡沫层，泡沫层随气、液相对动量大小而动态升降。由于泡沫层气液接触表面积大、物质和能量传递速度大， SO_2 得以更高的效率与吸收液完成传递反应，与石灰乳液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 化学反应而生成 CaSO_3 。被除去部分 SO_2 的气体经气液分阶段离后再进入第二级吸收器，在器内与二段逆喷管喷下的石灰乳液接触，除去气相中剩余的 SO_2 。吸收液落入循环槽后循环使用，含水雾的烟气在通过除沫器时，水滴得到去除。达标气体经风机排放至大气中。同时用罗茨鼓风机向循环槽中泵空气，空气中的氧与吸收液中的 CaSO_3 在循环槽中发生氧化反应，生成石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。该石膏通过中间槽输送到压滤机进行固液分离，其滤液返回石灰消化槽，滤饼则外运。

(2) 技术适用条件

该技术适用于含烟尘、低浓度 SO_2 烟气脱硫，可以有效的进行分级洗涤，以较低的能量获得较高的效率；有较宽范围的气量适应能力；循环液可以在较高的含固量下运行而不堵塞，也不发生雾化，这一特点尤其有利于钙法脱硫的推广；设备小巧，制作简单，造价低，占地面积小；设备内无活动部件，气体通道顺畅，操作可靠性高，维修简单，使用周期长。

(3) 节能减排效果

采用动力波洗涤技术，以石灰石乳为洗涤剂，二氧化硫去除率 90%。

4.3.2 有机溶液循环吸收脱硫技术

(1) 技术概况

有机溶液循环吸收脱硫技术采用的吸收剂是以离子液体或有机胺类为主，添加少量活化剂、抗氧化剂和缓蚀剂组成的水溶液；该吸收剂对 SO_2 气体具有良好的吸收和解吸能力，在低温下吸收 SO_2 ，高温下将吸收剂中 SO_2 再生出来，从而达到脱除和回收烟气中 SO_2 的目的。工艺过程包括 SO_2 的吸收、解析、冷凝、气液分离等过程，得到纯度为 99% 以上的 SO_2 气体送制酸工艺。

(2) 技术适用条件

该技术适用于厂内低压蒸汽易得，烟气 SO_2 浓度较低、波动较大，副产物二氧化硫可回收利用的冶炼企业。该技术不需要运输大量的吸收剂，流程简洁，自动化程度高，副产高浓度二氧化硫。但该技术一次性投资大，再生蒸汽能耗较高，同时存在较严重的设备腐蚀问题，运行维护成本高。

(3) 节能减排效果

溶液循环吸收法脱硫效率可达 99%，在烟气除尘降温单元有含氯离子及重金属离子酸性废水排放。

溶液循环吸收法需要消耗有机吸收剂、低压蒸汽、除盐水和电能。有机溶剂年消耗量约占系统溶剂总量的 5%~10%，溶液再生低压蒸汽压力为 0.4~0.6MPa。除盐水主要用于吸收剂的配制、系统补水和净化系统的再生。

4.3.3 DS-低浓度二氧化硫治理技术

(1) 技术概况

以“废渣”为吸收剂，在独特的吸收设备 DS-多相反应器中与烟气中的二氧化硫反应，将烟气中的 SO_2 吸收下来与烟气分离，达到烟气净化的目的，吸收 SO_2 后的炉渣经适当加工后可作为肥料或土壤调理剂使用。DS-多相反应器是 DS-脱硫装置的核心设备。它不同于通常用于二氧化硫烟气治理的喷淋塔、鼓泡塔、湍球塔、格栅塔、液柱塔、大孔径穿流塔、旋流塔等。它的内部不用喷头，而设有结构简单合理的内部构件，这种构件迫使液相和气相流体不断改变流向和流速，迫使液相流体在器内形成“水幕”、“水雾”、“水膜”，吸收液形成的液膜和雾滴在多相反应器中不断地改变流速和流向，液体内、液体与固体间发生强烈的相对运动，加速分子、离子的扩散，从而提高反应速度，强化了吸收反应；这种结构固体物不易沉积、结垢、堵塞；“DS-多相反应器”是用特种高分子材料制成，耐高温、抗腐蚀、防磨损、抗老化、使用寿命长。

一组内部构件组成一个单元，一台 DS-多相反应器可以是一个单元，也可以由多个单元组成，通过单元的串联或并联组合，来处理不同浓度不同气量的二氧化硫烟气。多相反应器是由若干操作单元组成，在设计选型时，根据烟气中 SO_2 初始浓度，空塔操作气速，液气比，吸收剂浓度确定多相反应器所需操作单元数。根据烟气流量和空塔操作气速计算反应器截面积，确定并联反应器组数。

(2) 技术适用条件

“DS-低浓度二氧化硫烟气治理技术”可选用对 SO_2 有吸收作用的废渣（包括有色金属冶炼炉渣、钢渣、铁渣、煤渣、电石渣等）作为吸附剂，还可以利用碱性泥土，吸收二氧化硫后的废渣，可以经过适当加工制成肥料——“硫硅配方肥”，进而结合城市生活垃圾、农业废弃物处理，制成富硫生物有机肥。

(3) 节能减排效果

DS-低浓度 SO_2 烟气治理技术需要消耗吸附剂、电能和水，该技术脱硫效率可达 95%以上。脱硫系统产生脱硫废渣经加工后可作为土壤改良剂。

该技术具有完全的自主知识产权，已派生出六项专利，其中发明专利 4 项，实用新型 2 项，国家知识产权局已授权。

“DS-低浓度二氧化硫烟气治理技术”分别通过了中国有色金属工业协会和中国电力企业联合会的科技鉴定和评审，结论：“为低浓度二氧化硫烟气污染治理找到了一条简单、经济、有效的方法，该项技术为国内首创，处于国际先进水平”。

4.3.4 活性焦脱硫技术

(1) 技术概况

活性焦烟气脱硫是一种可资源化的干法烟气净化技术。该技术利用具有独特吸附性能的活性焦对烟气中的 SO_2 进行选择性的吸附，吸附态的 SO_2 在烟气中氧气和水蒸汽存在的条件下被氧化为 H_2SO_4 并被储存在活性焦孔隙内；同时活性焦吸附层相当于高效颗粒层过滤器，在惯性碰撞和拦截效应作用下，烟气中的大部分粉尘颗粒在床层内部不同部位被捕集，完成烟气脱硫除尘净化。

活性焦烟气脱硫系统主要由活性焦吸附脱硫装置、活性焦解吸再生装置、活性焦循环输送系统和副产品加工系统等组成。

烟气通过活性焦吸附脱硫装置被净化，吸附饱和的活性焦靠重力流至解吸再生装置，通过加热使活性焦再生，释放出的高浓度 SO_2 混合气体送至烟气制酸装置用于生产硫酸，既可实现硫资源的有效回收利用，缓解我国大量进口硫磺的现状，又能产生良好的经济效益，降低乃至全部抵销脱硫装置的运行费用。再生后的活性焦经筛选后由活性焦输送系统送入活性焦吸附脱硫装置循环使用，筛下的少量小颗粒活性焦可作为阳极炉的燃料。

(2) 技术适用条件

该技术用于低浓度 SO_2 烟气脱硫，适用于厂内蒸汽供应充足，场地宽裕，副产物二氧化硫可回收利用的冶炼企业。工艺流程简单，活性焦廉价易得，再生过程中副反应少。吸附容量有限，需要在低风速（ $0.3\sim 1.2\text{m/s}$ ）下运行，因而吸附体积较大。化学再生和物理循环过程中活性焦会气化变脆、破碎及磨损而粉化，并因微孔堵塞丧失活性。

(3) 节能减排效果

脱硫效率可达 95.6%，同时具有脱尘、脱硝、除汞等重金属的功能。该技术在减排的同时可回收硫资源，用于农药和化肥等生产。

4.3.5 金属氧化物吸收脱硫技术

(1) 技术概况

一些金属氧化物，如 MgO 、 ZnO 、 Fe_2O_3 、 MnO_2 、 CuO 等，对 SO_2 都具有较好的吸收能力，因此可用金属氧化物对含 SO_2 废气进行处理。一般是将氧化物制成浆液洗涤气体，因其吸收效率较高，吸收液也容易再生，此工艺可以有效地同冶金工艺相结合，处理低浓度的 SO_2 废气。国内已有工业装置的有氧化锌法、

氧化镁法和氧化锰法。

氧化锌法利用铅锌厂火法冶金过程中普遍产出的含 ZnO 的副产物（如烟尘、焙砂）作为 SO₂ 吸收剂，以脱除冶炼烟气或制酸尾气中的低浓度 SO₂，其产物亚硫酸锌可通过过热分解或酸分解的处理过程重新释放出 SO₂ 送往制酸或生产液体 SO₂，副产的硫酸锌产品可出售。

（2）技术适用条件

金属氧化物法脱硫主要适用于金属氧化物易得或金属氧化物为副产物的冶炼厂烟气脱硫。

（3）节能减排效果：脱硫效率大于 95.0%

（4）成本效益分析

该技术采用冶炼厂副产品为 SO₂ 吸收剂，脱硫后副产品可回收，运行成本低，经济效益较好。

4.3.6 湿法冶金含酸雾烟气治理技术

（1）技术概况

湿法冶金含酸雾烟气一般产生于电解工段的上清液储槽、生产循环槽、阳极泥储槽等处，产生的硫酸雾经酸雾净化塔处理系统进行处理，酸雾净化系统采用二级吸收净化处理工艺，先经第一级玻璃钢酸雾净化塔冷凝回收酸雾成酸水返回电解系统，再经过第二级玻璃钢酸雾净化塔用 6% 的 NaOH 碱液喷淋洗涤中和，废气通过排气筒外排。

酸雾净化塔的净化过程：塔体上部喷淋碱性吸收液，下部进入塔体的酸性有害气体与喷淋液呈逆流流动，并经过设置在塔内的新型高效低阻填料和穿孔板，气液接触充分，净化效果好。

（2）技术适用条件

该技术处理的主要有害气体为酸雾(H₂SO₄)、氯化氢(HCl)气体及氟化氢(HF)气体、铬酸雾(CrO₃)、氰氢酸(HCN)气体、硫化氢(H₂S)、氨气(NH₃)、碱蒸汽等水溶性气体。

（3）节能减排效果

采用氢氧化钠为吸收中和液、溶液浓度为 2%~6%，净化效率可达 99%。

4.3.7 贵金属回收工序高浓度 NO_x 烟气干法治理技术

（1）技术概况

DBS 是一种固体的新型多组分复合吸附剂，由多种组分组成，通过化学处理后得到 DBS 产品。当含 NO_x 烟气通过 DBS 吸附剂后吸收，NO_x 中的 NO₂ 等为 DSB 吸附，难于被吸附的 NO 被氧化成 NO₂，NO₂ 与 DBS 吸附剂中的碱性

物质接触发生化学反应生成难分解的硝酸盐，因此烟气中的 NO_x 得到净化。

（2）技术适用条件

该技术适用于产生高浓度 NO_x 烟气的贵金属冶炼、人造金刚石及电子等行业。

（3）节能减排效果

进气 NO_x 浓度为 3833~9820mg/m³，处理后的排放废气 NO_x 浓度仅为 17~121mg/m³。NO_x 去除率：>99.5%，处理后排放的废气中 NO_x 浓度远远小于《大气污染物综合排放标准》GB16297~1996 规定的现有和新建的污染源 NO_x 240~420 mg/m³ 的排放限值。

4.3.8 铝电解槽上部多段式烟气捕集技术

（1）技术概况

铝电解过程产生大量的高温有害气体和粉尘。东大设计院在系统总结以往工程经验的基础上，借助先进的计算机辅助模拟技术，成功开发出适合大型铝电解槽的分区高位集气技术。相对于传统电解槽集气系统，其槽罩内负压充分、压力分布均匀，槽罩内气体难以通过电解槽各部分的安装缝隙溢出到罩外，从而降低了烟气进入电解车间，并最终进入大气的可能性，电解槽集气效率可以达到 ≥99%，为污染物排放总量达标奠定了坚实基础。

结合东北大学设计研究院大型铝电解槽空间管桁架梁上部结构技术，该铝电解槽上部结构集气系统充分利用了管桁架梁的上弦杆，以及各弦杆、氧化铝和氟化盐料箱间的剩余空间，采用分区集气罩、烟道上抬的分区汇集烟道等集气结构，充分利用了高温烟气的浮力，分区集气有利于实现整台电解槽负压集气系统的压力平衡，整项技术的综合应用有利于提高集气效率和降低净化系统的运行负荷。

采用流体力学模拟计算（CFD）的方法，模拟电解槽集气罩内烟气流动特征。根据大型铝电解槽的分区高位集气要求，通过改变烟道底面和侧面的开口大小，得到最佳的集气排烟效果，从而设计出合理的铝电解槽集气系统结构。整个过程使用 CFD 软件的优化功能进行优化设计。

（2）技术适用条件：适用于预焙阳极电解槽。

（3）技术特点

采用分区集气技术，使槽内负压分布的均匀性更高，结构密闭性更好，工艺操作更环保，电解槽集气效率可达到 99%，大大地减少了烟气的无组织排放，电解过程氟的回收率高达 98% 以上，污染物总量排放指标可以达到国内领先水平。但是，老厂上部结构需要改造。

（4）技术节能减排效果

采用高位分区集气技术，充分利用槽罩内高温烟气产生的负压，有效地降低了电解槽出口压力，进而降低系统的运行负荷；采用分区集气，使槽内负压分布的均匀性更高，工艺操作更环保，电解槽集气效率可达到 99%，大大地减少了烟气的无组织排放。

4.3.9 新型电解铝烟气干法净化技术

（1）技术概况

国内传统的铝电解烟气干法净化技术或两段干法净化技术有一个共同特点，新鲜氧化铝与载氟氧化铝完成吸附反应后同时进入除尘器进行气固分离，加大了除尘器的运行负荷，且载氟氧化铝循环次数不可控，增加了布袋清灰难度。

新型铝电解烟气干法净化技术吸收了传统两段净化的优点，但将新鲜氧化铝直接喷入布袋底部，而在除尘器入口增加动力分离装置，使大部分的载氟氧化铝在进入布袋除尘器之前从烟气中分离出来，脱离再循环，减少了除尘器的运行负荷，且提高了布袋清灰效果。该技术既提高了净化效率，又降低了净化系统的运行负荷。

新鲜氧化铝首先喷入布袋的底部，与预分离器来的低浓度烟气进行二次吸附反应，然后再通过袋滤系统进行气固分离；分离下来完成一次吸附反应的载氟氧化铝由循环系统加入除尘器前的上升烟道，与高氟化氢浓度的烟气进入预分离器进行一次吸附反应，完成再次吸附反应后的载氟氧化铝 70%以上被烟气流动产生的动力预分离出来，经载氟氧化铝输送系统送往电解车间，供电解生产使用，低氟化氢和粉尘浓度的烟气进入袋滤室进行二次吸附反应和气固分离。从反应动力学看，新型干法烟气净化系统是典型的逆流反应过程，因此净化效率高。由于新型净化系统采用了载氟氧化铝预分离技术，减少了载氟氧化铝的无功循环，附着在布袋上的氧化铝基本为“新鲜”氧化铝。这既降低了布袋的过滤负荷，也降低了过滤阻力，同时使得袋滤器反吹清灰更容易、压缩空气消耗量小。该技术的工艺流程如下：

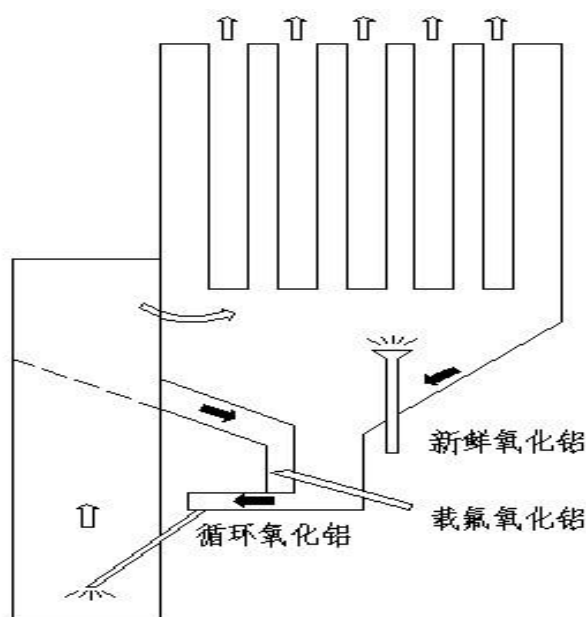


图 4-8 新型电解铝烟气干法净化技术工艺流程图

(2) 技术适用条件：适用于电解铝干法净化系统。

(3) 技术节能减排效果

净化系统的排放指标：总氟 $\leq 1\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，总尘 $\leq 3\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；配合高位分区集气系统，净化系统动力消耗 150~170kWh/t-铝。该系统运行负荷低、动力电耗低、净化效率高。

4.3.10 锌精矿焙烧烟气净化除汞技术

(1) 技术概况

许多金属的精矿或原料含有微量或少量的汞，在高温（ $>800^\circ\text{C}$ ）冶炼过程中，90%以上的矿石和精矿中的汞会转变成金属汞蒸汽进入烟气中。部分来自焙烧过程的汞会冷凝，或与烟气中的其他成分重新化合，形成不溶于水的化合物。在烟气进入硫酸车间之前，这种汞粒子或汞化合物会在常规气体净化和冷却装置中分离出来。但仍有相当数量的汞蒸汽会以金属蒸汽形态通过常规气体冷却及净化系统。如果不采取进一步措施，这部分汞蒸汽将被硫酸捕集或从尾气中排放，从而污染成品硫酸和从尾气中排放至大气中，为了保护环境和获得高品质硫酸，必须对焙烧烟气中的汞进行回收。对此，目前已有不少技术可以应用，有的技术已取得显著效果。玻立顿除汞（氯化法除汞）技术是目前国际上有色金属冶炼烟气除汞最常用的方法，基本原理如下：其除汞工艺是一个连续的气体洗涤过程，净化后的含汞和 SO_2 的烟气在脱汞反应塔内被酸性氯化汞络合物溶液洗涤时，溶液中的 Hg^{2+} 将与烟气中的金属汞蒸汽发生快速完全的反应，生成不溶于水的氯化

亚汞晶体。一部分氯化亚汞用氯气重新氯化制备成浓氯化汞溶液,加入洗涤液中补充(Hg^{2+})汞离子损失。多余部分经沉淀处理后成为甘汞产品。

本净化工艺的关键是使用络合氯化物。这些二价汞的络合物非常稳定,还具有足够的活性,能够与气体中的元素汞进行近乎彻底的反应。

(2) 技术适用条件

焙烧烟气如要脱汞,那么它在进入玻立顿除汞(氯化法除汞)工艺洗涤反应器之前,需先经过常规气体系统的处理,包括净化、洗涤和冷却处理。

玻立顿除汞(氯化法除汞)工艺要求入口烟气满足以下条件:

烟气温度: $35\sim 45^{\circ}\text{C}$

烟气含尘量: $\leq 5\text{ mg/Nm}^3$

烟气含汞量: $\leq 30\text{ mg/Nm}^3$

酸雾: $\leq 5\text{ mg/Nm}^3$

入口烟气负压: $2000\sim 7000\text{Pa}$

本工艺启动时:需要甘汞、 Hg_2Cl_2 ,工业纯(technical quality)即可;需要不产生凝结水的氯气,装在优质氯气罐中;需要锌粉作为沉淀剂,粒度最大不超过 $100\mu\text{m}$,金属含量至少在 95%以上。

(3) 节能减排效果

玻立顿除汞(氯化法除汞)工艺出口烟气含汞 $\leq 0.2\text{mg/Nm}^3$,满足系统产出优等品硫酸的要求。除汞效率高,可达 96%~99%,大幅减少烟气中汞的排放。只需要一次性投入,其产品甘汞可作为该工艺的主要原料。

4.3.11 HDS 石灰法废水治理技术

(1) 技术概况

高浓度泥浆法(HDS)是在常规石灰中和法(LDS)产生大量的含固率不足 1%底泥的基础上,通过将底泥不断循环回流,使稀疏底泥颗粒出现比较显著晶体化、粗颗粒化现象,由此改进沉淀物形态和沉淀污泥量,可大大提高底泥含固率。

(2) 技术适用条件

该技术适用于含重金属酸性废水处理,石灰得到充分利用,将常规石灰法改造为 HDS 法,可提高水处理能力 1~3 倍,且易于对现有的石灰法处理系统的改造,改造费用低;产生污泥含固率高,达 20%~30%,;提高设备使用率;可实现全自动化操作,药剂投加量降低,节省了运行费用。

(3) 节能减排效果

中和剂为石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$),与常规石灰法相比,处理同体积酸性废水可减少

石灰消耗 5%~10%，去除率 Pb：98%~99%、As：95%~98%、F：80%~99%、其他重金属离子 98%~99%。

(4) 成本效益分析

HDS 工艺使石灰得到充分的利用，同常规石灰法比较，处理同体积酸性废水可减少石灰消耗 5%~10%。

HDS 法产生污泥含固率高，通常其含固率可达 20%~30%，同常规石灰法产生含固率 1%左右的污泥比较，污泥体积是其 1/20~1/30，可以节省大量的污泥处置或输送费用。

4.3.12 冶炼废水深度处理技术

(1) 技术概况

膜分离法利用隔膜使溶剂同溶质或微粒进行分离。用隔膜分离溶液时，使溶质通过膜的方法称为渗析，使溶剂通过膜的方法称为渗透。

根据溶质或溶剂透过膜的推动力不同，膜分离法可分为三类：

- ① 以电动势为推动力的方法有：电渗析和电渗透。
- ② 以压力差为推动力的方法有：压渗析和反渗透、超滤、微孔过滤。
- ③ 以浓度差为推动力的方法有：扩散渗析和自然渗透。其中常用的是电渗析、反渗透和超滤，其次是扩散渗析和微孔过滤。

(2) 技术适用条件

该技术具有分离效率高、无相变、节能环保，具有设备简单、操作简便等特点，特别是可回收有价值金属和水资源，将资源回收和废水处理有效结合起来。

(3) 节能减排效果

处理后的出水水质 Ca^{2+} ：30~200mg/L，SS 不高于 20mg/L， Cl^- 不高于 1000 mg/L， Fe^{2+} 小于 0.5 mg/L，含盐量（以电导率计）不高于 3000mg/L。

(4) 成本效益分析

该技术投资较大，预处理：3 元/ m^3 ；深度处理：1 元/ m^3 ，适用于严格控制重金属废水外排地区的污水处理。

4.3.13 控制硫化法处理矿山酸性废水技术

(1) 技术概况

在含重金属的废水中加入硫化钠溶液，使重金属以硫化物形式沉淀的方法为硫化物沉淀法。由于重金属离子与 S^{2-} 有着很强的亲合力，能生成溶度积很小的硫化物，使重金属完全沉淀。但是硫化钠价格较高，硫化物沉淀在形成过程中容易产生胶体，给分离带来困难，不仅沉淀物分离需要合适的 pH 值，还要有良好的沉淀设备时，净化效果才显著，而且硫化钠、硫化氢钠等无机硫化物与 HCl、

H₂SO₄ 等酸接触，产生大量的有害硫化氢气体，在安全技术方面要求严格。

(2) 技术适用条件

该技术适用于去除水中的镉、砷、锑、铜、锌、汞、银、镍等重金属。此方法的优点是生成的金属硫化物的溶解度比金属氢氧化物的溶解度小，处理效果比中和法更彻底，而且沉淀物不易溶解，沉渣量少，含水率低，便于回收有价金属。缺点是硫化药剂价格贵，货源少。此外，在反应过程中，会产生硫化氢（H₂S）气体，有剧毒，对人体造成危害。目前，含砷、汞、铜离子较高的废水普遍采用硫化法处理。

(3) 节能减排效果

去除率 As: 96%~98% 、 Pb: 98%~99%。

(4) 技术应用情况

该技术主要应用于采矿业，处理含金属的矿山地表水、地下水和冶炼废水。该技术在江西德兴铜矿废水处理中得到了应用。

4.3.14 重金属废水生物制剂法深度处理与回用技术

(1) 技术概况

以特异功能复合菌群代谢产物与其它化合物进行组分设计，通过基团嫁接制备富含羟基、巯基、羧基、氨基等功能基因组的复合配位体重金属废水处理剂（生物制剂）。

冶炼重金属废水通过水处理剂多基团的协同作用，形成稳定的重金属配合物，用碱调节 PH 值，并协同脱钙；由于水处理剂同量兼有高效絮凝作用，当重金属配合物水解形成颗粒后很快絮凝形成胶团，实现重金属离子和钙离子的同时高效净化。

(2) 技术适用条件

该技术适用于冶炼重金属废水处理，能够深度去除废水中多种重金属离子，处理效果不仅能稳定达到国家《铅锌工业污染物排放标准》（GB25466-2010），而且可实现重金属废水深度处理与回用。处理设施简单，可在现有中和斜板设施上改造运行，运行成本低。

(3) 节能减排效果

该技术使用的生物制剂由于富含多种基因，实现废水中重金属离子和钙离子的同时深度净化，出水重金属离子稳定达到国家《铅锌工业污染物排放标准》（GB25466-2010）、钙离子浓度低于 50mg/L，废水回用率大于 95%。

4.3.15 有色金属行业高浓氨氮废水资源化处理技术

(1) 技术概况

该技术基于氨与水分子相对挥发度的差异,通过在精馏塔内进行数十次气液相平衡,将氨以分子氨的形式从水中分离,然后以氨水或液氨的形式进行回收。氨氮废水经调解 pH 值后,进入氨汽提塔,塔釜用蒸汽加热,在塔中,水中分子态氨以气体的形式从塔顶排出,并被冷凝器冷却到常温成为高纯氨水,可回用于生产或直接销售;脱氨后的废水氨氮浓度可降至 10ppm 以下,可直接排放或回用于生产。

(2) 技术适用条件

该技术适用于处理废水中的氨氮污染物,与其他技术集成设计,可同步处理废水中其他污染物(如重金属离子、盐类),并已完成钒、铬等有色行业的全过程废水的零排放处理。生产过程无废渣、废气等二次污染排放,处理后的废水氨氮污染物浓度达到国家一级排放标准。废水中的 99%以上氨氮污染物转化为高纯氨水产品,实现资源化处理。设备占地少,长期连续运行稳定、不堵塔,过程操作自动化控制。

(3) 节能减排效果

氨氮污染物削减率: 99 %~99.9%, 处理后废水中氨氮浓度小于 15ppm (国家一级排放标准)。

(4) 技术应用情况

该技术已应用于葫芦岛辉宏有色金属有限公司、吉恩镍业股份有限公司、福建天宝铝业、海赛(天津)特种材料有限公司、葫芦岛虹京铝业、江门市长优实业有限公司、湖南邦普循环科技有限公司、江西金世纪新材料股份有限公司,在实际生产中取得了很好的效果。

第五章 工艺技术优化组合方案

5.1 铝冶炼工艺技术优化组合

5.1.1 氧化铝工艺技术优化组合

氧化铝工艺技术优化组合的节能方案：使用热电与氧化铝生产联合节能技术。因为氧化铝生产的主要能源介质为煤、油、蒸汽与电，而热电厂的主要产品是电力与蒸汽。氧化铝厂如果实现与热电的联合和进行最佳化配置，既可以满足氧化铝生产用的电力与高压蒸汽的需求，又可以将发电后的蒸汽用于氧化铝生产的溶出或蒸发工序，以及用来加热洗水等，蒸汽冷凝水可以被热电厂回收循环使用，从而达到能量分级管理，最优化利用，同时大大提高热和水的利用率。

将现有的混联法生产氧化铝改造为串联联合法，减少烧结法部分的处理量，既符合充分利用我国低品位铝土矿，又减少了有关环节的能量消耗。这也是氧化铝工艺优化组合的较好方案。

在我国氧化铝生产成本的构成中，燃料费用和动力费用占整个生产成本的比例高达 40%左右，节能降耗仍然是氧化铝工业的一个关键问题。我国氧化铝生产中，烧结法部分是能耗大户，其高能耗的原因主要有：存在高温烧成工序，包括高温燃料和生煤添加，而且难以回收利用烧结窑炉的热能；烧结法湿法系统浓度偏低，造成循环效率和工序产出率低，蒸发负荷大。其他高耗工序，如脱硅、蒸发的热效率和热回收率也需要提高。

我国氧化铝生产中拜耳法部分中最大的蒸发能耗主要取决于循环流程浓度，为了提高溶出一水硬铝石的产出率和溶出率，必须采用高碱浓度溶出，因此带动蒸发强度相应提高。此外，拜耳法流程中某些高能耗的工序，如溶出、蒸发和焙烧所采用的工艺和设备的热效率和热回收利用率有待进一步提高。

上述拜耳法和烧结法的能耗问题也同样存在于联合法。影响联合法能耗的因素除其中拜耳法和烧结法各工序能耗有关外，还与烧结法在联合法中所占比例密切相关，烧结法所占的比例越少，联合法工艺能耗就越低。烧结法比例较小时，烧结法节能技术对降低联合法能耗的贡献就越大，反之亦然。同时，对于联合法还需要特别关注两种方法如何连接和联合，应该充分发挥两种方法各自的优势，形成符合我国资源特点的独特的工艺流程，从总体上降低能耗、提高效率和竞争能力。

影响我国氧化铝生产能耗的因素主要可以分为以下几个方面：

(1) 总体工艺流程（拜耳法、烧结法或联合法，其中混联法中的拜耳法和

烧结法所占的比例对总能耗影响很大)；

(2) 循环效率(与各道工序中氧化铝的浓度或百分含量有关)，和各工序产出率有关；

(3) 高耗能或高折合比(生产单位产量所需流经该工序的流量)关键工序的节能；

(4) 设备与材料的应用(包括设备先进程度、设备运转率、先进材料的应用等)；

(5) 提高热能利用率(不仅包括提高燃料利用率、提高传热效率，还包括废热利用、加强保温措施以减少热量损失等)。

5.1.2 电解铝工艺技术优化组合

目前，大部分铝电解槽均生产普通铝锭，从而造成在铝加工厂再次重熔的现象，不仅造成铝在重熔中的金属烧损、而且也增加能源消耗和废气排放，从资源配置的合理性来讲，电解铝厂应与铝加工厂实施密切合作，在签订供货合同时，应该签订供货铝锭的品种，如生产锭坯，扁锭、挤压锭和线杆等，以减少铝的损失和节约能耗。

在铝加工生产中，直接使用电解铝液生产锭坯可以缩短工艺流程，不仅可减少金属烧损、节省重熔能耗和减少废气排放，而且也提高了生产效率。采用电解铝液生产锭坯、扁锭的能耗仅为用固体料生产的 1/3，圆锭生产的能耗为其 3/5，铸轧带坯生产的能耗为其 1/2。

5.2 铜冶炼工艺技术优化组合

在我国先后引进“闪速熔炼”、“艾萨熔炼/奥斯麦特熔炼”技术，自主开发成功“富氧侧吹熔池熔炼”、“氧气底吹熔炼”、“白银炼铜技术”，以及掌握“P.S 转炉吹炼”、“闪速吹炼”、“顶吹浸没吹炼”、“侧吹连续吹炼”等技术之后，为了进一步缩短铜冶炼工艺流程，降低能源消耗，减少污染物排放，对现有工艺技术进行集成，探索开发短流程粗铜生产技术，成为铜冶炼技术创新的关键所在。借鉴国外先进技术，经过不断探索，我国在“闪速熔炼”和“闪速吹炼”的基础上，通过工艺技术优化组合集成，自主开发了“双闪”铜冶炼技术，使我国铜冶炼技术进入世界先进行列。

“双闪”铜冶炼技术集成了“闪速熔炼”和“闪速吹炼”技术成果，将其组合成为一个新的铜冶炼技术。该工艺技术的特点是：原料氧化反应迅速，加快了熔炼速度，使熔炼的生产率大幅度提高，为反射炉与电炉熔炼的两倍，大大降低了燃料的消耗。且采用高浓度的富氧空气熔炼，烟气量少，烟气中的 SO_2 浓度可提高到

30%以上,有利于烟气制硫酸过程中硫的回收和环境保护,硫的捕集率和回收率均可达到98%以上。

通过“闪速熔炼”和“闪速吹炼”技术集成,工艺技术组合,能源消耗为200~230kgce/t粗铜;SO₂排放量为2~3.5 kg/t-粗铜,烟尘排放量为0.45~0.55 kg/t-粗铜。通过技术优化组合,资源得到最大利用,环境又得以改善,使整个系统生产状态良好。

5.3 铅冶炼工艺技术优化组合

我国自主开发成功氧气底吹铅熔炼技术以后,为了进一步缩短铅冶炼工艺流程,降低能源消耗,减少污染物排放,对现有工艺技术进行集成,探索开发“一步工艺”直接进行粗铅生产,成为铅冶炼技术创新的关键所在。经过不断探索,我国在“氧气底吹熔炼技术”的基础上,通过铅冶炼工艺技术优化组合,自主开发了“氧气底吹熔炼液态高铅渣侧吹还原炼铅技术”和“氧气底吹熔炼液态高铅渣底吹还原炼铅技术”,把世界铅冶炼技术推向一个更高的阶段。

“氧气底吹熔炼液态高铅渣侧吹还原炼铅技术”集成了“氧气底吹铅熔炼技术”和“侧吹还原炉技术”开发的成果,将其组合成为一个新的铅冶炼技术。该工艺技术的特点是:利用氧气底吹炉进行熔炼,产出粗铅、液态高铅渣和含尘烟气;液态高铅渣直接进入卧式侧吹转炉内,加入煤粒和石子,以天然气和煤粒作为燃料和还原剂,在气体搅拌下,进行高铅渣的还原,生成粗铅和炉渣。

“氧气底吹熔炼液态高铅渣底吹还原炼铅技术”是集成了“氧气底吹铅熔炼技术”的优势,在氧气底吹炉进行熔炼,产出粗铅、液态高铅渣和含尘烟气后,还原采用卧式转炉,液态高铅渣直接进入炉内,底部喷枪送入天然气和氧气,加入煤粒和石子,在气体搅拌下,进行高铅渣的还原,生成粗铅和炉渣。

通过工艺技术组合,采用液态高铅渣直接还原,充分利用了高铅渣熔体的潜热,减少了能源消耗(吨粗铅节约标准煤110kg)。引入天然气、氧气,结束了传统工艺使用大量冶金焦的现状,有效减少了SO₂和CO₂的排放(分别仅相当于传统工艺的10%和25%)。通过技术优化组合,资源得到最大利用,环境又得以改善,使整个系统生产状态良好。

5.4 铜加工工艺技术优化组合

改革开放以来,中国铜加工技术创新活跃,其中最突出的成果是铜材短流程生产技术的开发,短流程工艺的核心是在确保产品质量的前提下取消了热加工工序,这是节能减排的根本措施,将在行业节能减排中将发挥重要作用。

目前国内铜加工行业产学研结合自主集成创新的主要短流程工艺技术项目

有：

- (1) 上引连铸铜盘条通过连续挤压生产棒、型、线技术；
- (2) 水平连铸纯铜管坯通过行星轧制和盘拉生产高精高效散热管；
- (3) 潜流多面铸造合金管棒型通过拉伸，生产环保合金管棒型技术；
- (4) 无氧铜带坯水平连铸经高精冷轧生产电子带技术。

5.4.1 上引连铸铜盘条通过连续挤压生产棒、型、线材技术

该项技术是传统铜排、特长异材生产的一次重大进步。连续挤压产品如下：

- (1) 连续挤压一次成型无氧铜扁线

扁线用途：电力变压器线圈、大电机绕组等；

规格：厚度×宽度 3.15~7.1×3.15~16mm；

性能：软态、电阻率 $0.017241\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ 、强度小于等于 275MPa，延伸率大于等于 30%；

成份：含铜大于 99.95%；

生产设备：上引直径 16~20mm 铜杆——TJL250-350 连续挤压机。

- (2) 连续挤压一次成型异型铜材

产品用途：梯形铜排用于电机换向器、触头等，异型铜排主要用于高、低压开关、电器零件；合金含银 0.1%~0.2%，铜余量或无氧铜；规格：梯形宽底边 3.0~24mm、梯形高度 10~150mm。

- (3) 连续挤压铜母线

产品用途：导电铜排、高低压电器、配电装置、电器控制柜等；规格：厚度×宽度 1~12.5×6~125mm。生产方法及生产线：卷式生产法，上引直径 20mm 铜杆——连挤 10×125mm——液压拉伸、锯切。

- (4) 连续挤压合金线、型线

直径 8mmH62、H65——连续挤压直径 2mm 圆线、型线、拉链线等——高精拉伸至成品，缩短工艺流程；直径 8mm 黄铜杆一般可采用上引和水平连铸方法生产，经一次连续挤压可生产 1×3~2×8 毫米扁线，可用于电器接插元件。

连续挤压技术对铜及合金生产是一项重大技术创新，是铜及合金加工技术的重大变革，传统经典的生产工艺是合金熔炼铸造-热加工-冷加工，而连续挤压技术的应用取消了热加工工序，缩短了生产工艺，以铜及合金棒、型、线生产为例，连续挤压工艺为：上引铜杆-连续挤压-拉伸，与传统生产工艺相比具有如下突出的优点：

- (1) 工艺流程大为缩短；
- (2) 产品长度与上引铜杆卷重等同，可生产大长度制品；

- (3) 产品形状变更只需更换连续挤压模, 特别适合异型断面铜型材的生产;
- (4) 产品生产成品率高, 传统方法为 50%~60%, 而连续挤压法为 90%~95%;
- (5) 金属消耗少, 传统方法为 1040kg/t, 连挤法几乎为零;
- (6) 能耗低, 传统方法为 1000kWh/t 左右, 而连挤法为 500kWh/t;
- (7) 环保, 没有热加工及去除氧化物所需的酸洗;
- (8) 设备紧凑, 占地面程小, 生产过程便于实现连续化生产;
- (9) 设备和生产线建设投资低。

5.4.1.1 连续挤压原理、生产工艺、装备

连续挤压在国外又称为康夫姆, 1791 年世界第一台铅连续挤压机在英国问世以来, 已经历了 200 多年发展, 这种方法已广泛用于有色金属加工, 国外虽然研究较早, 但装备设计、制造、产业化生产、连挤工艺、应用范围远落后于中国, 在发展这项技术中首推大连铁道学院宋宝韞教授作出了杰出的贡献。

连续挤压是铜杆(通常直径 20~25mm 上引杆)在挤压轮摩擦力作用下, 强迫送入挤压腔内, 金属被迫由模具塑性挤出, 在连续挤压过程中, 摩擦力做功, 使被挤压金属升温, 其温度可达再结晶温度之上, 所以此时金属变形与再结晶过程同时进行, 挤压制品为软态, 晶粒细小, 一般为 0.025mm, 这种制品具有很高的密度和延展性, 既可作为坯料又可直接作为成品使用。

连续挤压生产的核心设备是连续挤压机, 我国 1984 年由大连铁道学院开始研制, 并列入“七五”国家重点科技攻关计划, 曾获国家科技进步奖, 现已系列化生产了 TJL250、300、350、400, TJL450、500 大型连续挤机也在开发之中, TJL400 型连续挤压机已能生产 10×125mm 铜母线, 卷重达 4~6t。

连续挤压生产线由连续挤压机和辅助设备所组成, 主要辅助设备有放线盘、矫直辊、防氧化和冷却装置、计米器、除油装置、收线装置等, 整条生产线已高度自动化、连续化。

5.4.1.2 连续挤压技术的应用前景

连续挤压技术可以最有效的改变铸造组织, 获得变形再结晶组织, 其晶粒度比传统加工热处理方法更细小, 产品且有优良的塑性, 可直接进行冷加工, 因此在缩短工艺流程方面具有突出的作用, 为节能、环保奠定了基础; 连续挤压方法还特别适合特长异型产品的生产, 这是传统经典方法无法比拟的; 连续挤压方法所使用的坯料基本为上引和水平连铸卷杆, 铜杆直径多为直径 6~20mm, 这种坯料容易获得、生产机列投资少、占地面积小, 之所以如此完全依赖于中国连挤技术重大发展——扩展挤压技术, 又称为“小挤大”, 在铜材生产中应用前景如下:

- (1) 铜带生产

随着连挤纯铜带坯宽度的增加（目前 10×150~170mm 排卷已产业化），一种全新的纯铜带生产工艺正在出现：直径 20mm 上引杆—连挤—高精冷轧，这种方法在无氧铜带、纯铜带等热点品种方面具有很强的竞争力。

（2）铜排生产

铜排生产是连挤方法应用最为成功的范例，连挤技术实现了铜排生产的卷式生产法，替代了直条生产法，这是铜加工生产技术的重大进步。

（3）铜型材生产

特长异型铜型材是铜材中重要品种，有些产品是传统经典方法无法生产的，在这个领域中连挤技术具有广泛的应用前景，当前最为突出的重要应用方向是变压器扁线、黄铜接插件扁线、电机制造型材、电气开关触头、Y 型黄铜拉链型线、导电异型管等。

（4）线材生产

连挤技术在合金异型线生产中具有重要意义，如黄铜线生产中可以大为缩短工艺流程，是重大的工艺变革。

（5）复合材料生产

连续挤压技术是实现铝包铜的重要手段之一，在适于连挤的金属复合中应用广泛。

（6）管材生产

铜管连挤技术是世界级难题，众所周知的原因是分流模设计无法绕开铜的焊合问题，如果模具设计技术有所突破，那么连挤技术在特长异型管材生产中将具有特殊重要意义。

5.4.1.3 连续挤压技术攻关重要的课题

铜加工连续挤压技术正在发展之中，重要的攻关课题有：

（1）空芯型材的模具设计；

（2）进一步提高模具使用寿命；

（3）为扩大铜合金生产品种，特别是焊料合金的连续挤压，探讨挤压前加热技术和装置已提到日程。

5.4.2 无氧铜带坯水平连铸经高精冷轧生产电子带技术

电子和电力工业用高精铜带是铜材中重要品种，特别是采用水平连铸卷坯—高精冷轧短流程工艺生产电子带，具有低成本的突出优点，在国内外市场极具竞争力，是重要建设项目之一。

5.4.2.1 无氧铜带主要品种

中国铜板带的热点品种主要有接插元件带、变压器带、电缆带、引线框架带，近年来由于铜价不断推高，铜包铝线材发展迅速，铜包铝线主要用于视频电缆的内导体，因此出现了焊接用铜带热点产品，这种铜带是采用氩弧焊纵包在铝杆之上，然后进行拉线，对这种带材要求应具有良好的焊接性能、导电性、精确宽度公差、边部无毛刺，带材规格为 0.38×305mm，当前用量 6~8 万 t，2010 年有望达到 10 万 t。随着我国 3G 通讯的发展，高精度、高导电电缆铜带的需求量正在迅速增加，

5.4.2.2 高精铜板带生产技术

在生产技术方面以水平连续铸造卷坯——高精冷轧法发展迅速，这种方法已成为锡青铜带和锌白铜带生产的唯一方法，这种方法具有工艺流程短、节能、环保、建设投资少的明显优点。特别是在中国潜流式联体炉水平连铸技术和装备的出现，并在无氧铜生产技术方面取得了重大突破，进一步压缩了热轧板带开坯的空间，表现了强大的生命力。

5.4.3 潜流式水平连铸在合金再生原料直接生产铜加工材中的应用

铜资源短缺突显了铜及铜合金再生原料直接生产铜加工材的重要性，其中合金残料由于化学成份复杂一直成为回收、再生的难题，中国宁波金田铜业集团开发了大吨位、潜流式、水平连铸铅黄铜棒、型、线、管生产技术，建成了连续化、自动化环保化生产线，这种生产线可同时水平连铸 64 条不同规格、形状铜加工材，形成了具有中国自主知识产权的技术，被称为“金田法”。

“金田法”由下列主要工序所组成：合金感应熔炼、化学成分监控、合金成分调整、烟尘收集、布袋收尘、合金液体潜液放流式转注、多面多流、一流多头水平连铸、引拉系统、自动锯切、产品自动收集等，这些工序组成了一条自动生产流水线，合金熔炼和水平连铸均处于密封状态下运行，各工艺参数均自动调控，从而实现了从合金配料进入机列到成品产出的自动化、连续化、环保化生产。

《金田法》科技创新要点有：

（1）实现了封闭熔炼和潜液转流铸造，取消了现代技术通用的明流流槽转运方式，防止了有害气体和烟尘排放，减少了金属氧化和烧损。

（2）实现了一流多头同时水平连铸，解决了整体石墨结晶器设计，引拉工艺参数调整等技术难题。

（3）生产线投资少、工艺流程短、技术指标先进、综合成品率高达 92%，产品成本为常规生产方法的 1/2，能耗降低 40%。

（4）本生产线同时具有节能、节材、环保等突出优点，生产线适合于采用大吨位感应熔炼炉，目前一条生产线生产黄铜棒型可高达 2 万 t。

5.4.4 铜材短流程技术的关键技术基础

5.4.4.1 连续铸造技术

中国连续铸造技术主要有上引和水平连铸，可以生产铜及铜合金上引管、杆、棒型、线坯料；水平连铸带卷、棒、型、线坯料，这些坯料卷重大、长度长，可直接进行冷加工；连续铸造炉组均为联体炉，潜流式金属熔体转运，取消了金属流槽，防止了金属转运时吸气和氧化，上引和水平连铸纯铜坯料含氧量均小于10ppm，符合无氧铜标准，在铜及铜合金带坯连铸中开发成动电磁搅拌技术，改变了带坯结晶组织，提高了表面质量，延长石墨结晶器的寿命；中国不但连铸技术不断创新，而且以潜流联体炉为主的连铸机列的装机水平也进入国际先进行列，现已为国内铜加工行业普遍采用；连续铸造品种正在不断扩大，上引连铸已产业化生产纯铜线杆、异型材、黄铜杆、低合金（银铜、镁铜等），管材品种有加磷铜、无氧铜、白铜、黄铜等，带坯有无氧铜、H65 黄铜等，锡磷青铜和锌白铜带坯也在试制中。

5.4.4.2 行星轧制技术

行星轧制技术是互成 120 度角配置的三轧辊自转、同时又绕轧制线公转从而形成对管坯复合轧制，其特点是管材冷轧时，依靠变形热自身加热，变形区温度可达 700~850℃，此时相当于热加工状态，从而实现了动态再结晶，行星轧制后的管材质量与热挤压相同，而且轧制产品具有表面不氧化、大长度、成卷，可直接进行冷加工，为管材盘式生产奠定了基础，成为铸造管坯直接冷加工的关键技术，在改变铸造组织方面作出了突出的贡献，目前中国行星轧制技术已处国际先进；使铜及合金管材生产方法发生了重大变革。

5.4.4.3 连续挤压技术

这种技术实质是特长的金属线坯在摩擦轮的强迫送进之下，金属从模孔中塑性变形流出，变形热使金属本身加热，变形区温度高达 600~800 度，从而实现了金属动态再结晶，实现了铜及铜合金棒、型、线多品种连续挤压，特别是完成了扩展连续挤压的技术创新，形成了以铜线杆为坯料的铜材生产新技术，导致了铜及合金棒型线生产方法的重大变革，目前中国铜加工连续挤压技术和装备已居世界领先水平。

短流程铜加工技术已经在国内中小型企业开始推广应用。目前采用短流程工艺生产的铜材产量已占全国产量的 30%，显示了节能、环保、生产成本低、项目建设投资少等优点。

5.5 铝加工工艺技术优化组合

5.5.1 提高电解铝液直接铸造的比例

加工产业链中能耗高的工序在熔铸，因此，直接使用电解铝液生产锭坯缩短工艺流程，不仅可减少金属烧损、节省重熔能耗和减少废气排放，而且也提高了生产效率。

采用电解铝液配料生产锭坯、扁锭的能耗仅为用固体料生产的 $1/3$ ，圆锭生产的能耗为其 $3/5$ ，铸轧带坯生产的能耗为其 $1/2$ 。

因此，对于可采用电解铝液生产锭坯的铝加工材，应加强铝加工厂与电解铝厂的合作，提倡将熔铸工序放在电解铝厂，或距离较近时通过专用的铝水车运输铝液，实现节能和效益的双赢局面。加工厂自身配套的熔铸车间主要用于废料的消化，以及必须使用固体料重熔生产的高质量、高合金铸锭的生产。

5.5.2 合理调整热轧和铸轧的结构比例

在铝板带箔产品中，必须用热轧坯料生产的罐料、航空航天板带材、高档 PS 板基、高压阳极铝箔等产品仅占全球板带箔总产量的 20% 左右。其余都可用投资更少、能耗更少、制造成本更少的铸轧坯料生产。

近年来国内新建的铝板带箔企业大多数采用热轧工艺，热轧技术和装备水平正快速接近世界先进水平。连铸轧工艺目前虽然还不能完全取代热轧工艺，但由于其流程短、能耗低，仍是铝加工业的发展方向，应加大技术和装备的研发投入，特别是连铸连轧工艺的开发。

5.5.3 发展规模化、专业化生产

国外大型铝业公司其产能和装备水平根据地域消费能力和资源供给状况不尽相同，但基本上都拥有 1~2 家生产能力巨大、装备水平处于世界最先进水平的核心工厂，以达到靠产品质量、生产效率、生产规模和成本优势占领高端市场的目的。各大公司将铝加工行业的各种最新技术和装备均应用到这些工厂，使其形成核心优势，实现大宗产品或高附加值产品的规模化生产，通过做优做强、降低生产成本来扩大自己的市场份额。

目前铝板带材冷轧生产技术总的发展趋势是大卷重宽幅轧制、在轧制中实现高速化、精密化（厚度自动控制和板形自动控制）、智能化（轧制程序和轧制策略自动化、过程最优化控制）、操作自动化（卷材自动装卸、套筒自动运输和自动喂料等）、卷材存储管理和运输立体化、自动化。此外，在轧辊磨削、工艺润滑和过滤、退火与除油等方面的技术进步和装备水平的提高也是生产高质量铝板带材的必要条件。

规模化、专业化生产，大卷重轧制等带来的优势是充分发挥设备能力，成品率较一般企业提高 2~3%，相对能耗可节约 10~20kgce/t 产品。

5.5.4 铝加工节能减排的技术支撑

5.5.4.1 铝熔铸技术支撑

熔铸车间热能消耗主要在熔炼、均热工序，其设备主要有熔铝炉、保温炉、均热炉等。节能减排措施主要有：

（1）采用蓄热器烧嘴或旋转式换热器，高温烟气通过蓄热式烧嘴蓄热介质或旋转式换热器将助燃空气预热到高温，同时，烟气温度降到 250℃ 以下，烟气余热得到回收和利用。

（2）电磁搅拌和永磁搅拌。可省去炉门开启和人工的搅拌工序，可显著改善金属间热传导能力，金属熔化速率通常可提高 10%~15%，提高成品率和缩短熔炼周期时间，相应能源消耗指标也有很大的降低。

（3）淘汰氯气精炼。推广使用绿色熔铸技术，淘汰氯气精炼工艺，使用炉底透气砖技术，实现无氟/氯等有害气体和炉渣的排放，减少场内治理污染和公共环保的投资。

（4）推广熔铝炉烟气净化装置，减少烟气粉尘排放。

5.5.4.2 铝压延技术支撑

采用先进的生产工艺和装备，特别是大型高速轧制和精整设备，热效率高，处理能力大的加热炉和热处理炉，确保单机生产能力大，实现批量化生产，通过提高生产效率和成品率，来降低单位能耗。

（1）大卷重、高速轧制。能有效提高生产效率和降低生产成本，减少轧制过程中的几何废料量，最终体现在加强产品的竞争实力。

（2）热轧立辊轧机的应用。采用立辊轧机可减少带坯边部裂边，从而减少切边量，提高成品率。

（3）采用先进的板形和厚控技术，以及过程自动化控制。通过以上技术的采用，可充分发挥出设备的能力，提高轧制速度和产品质量，减少头尾几何废料。

（4）交流变频技术的广泛应用。交流电机同直流电机相比效率高 2%~3%，还具备过载能力大、动态控制性能优良等特点，特别是当输出功率大于 3000kW 时，其价格比同等容量的直流电机低，因此，近年来随着交流变频技术的不断成熟，已广泛应用于现代化轧机中，如不少的热轧机和冷轧机已全部采用交流电机传动。

（5）采用先进的热轧铸锭加热炉。具有当今国际先进的水平的加热炉，加

热过程由计算机程序控制，采用多层气密式炉体结构，高效喷流热风强制循环系统，高速低氮氧化物烧嘴加热，燃烧系统具有点火监测装置，带有换热器以预热加热空气，能进行分区炉温和料温自动检测和控制。可实现加热和均热的合而为一，减少铸锭的二次加热。

（6）轧制油再生和全油回收系统的应用。

板带冷轧和箔轧均采用煤油基的矿物油做为润滑冷却介质，在轧制中会散发出油雾。以往均采用机械式过滤装置，对于气态的油雾回收效率很低，大多排放到大气中。采用全油回收系统，将轧制油雾通过专用洗油的吸收，以及随后的解析提炼，回收率可达 95%以上，不仅降低了轧制油排放对环境造成的污染，轧制油的重复循环使用还可节约大量的生产成本，是一种正效应的投入。轧制油再生是对循环使用的轧制油进行重新提炼，去除运行中轧制油里混入的水以及液压油，可延长轧制油的使用期限，提高产品表面质量。

目前，轧制油再生以及全油回收系统在近年来新引进的冷轧机和铝箔轧机上已得到推广应用，另外国内已可自行设计制造。

（7）燃气退火炉开始投入使用。燃气退火炉使用一次能源，具有加热速度快，生产成本低的特点，适合大容量的退火炉使用，在国外已有成熟的使用经验。目前国内已开发成功，应得到推广。

5.5.4.3 铝管棒型材生产技术支持

（1）采用连续挤压生产工艺生产对焊缝无严格要求的软合金薄壁小管，不但可节约铸锭加热的能耗，还可大幅度提高成品率和减少拉伸工作量。

（2）采用在线淬火生产工艺，可节省重新加热的能耗，提高成品率和生产效率，减化生产流程。

（3）采用循环水来冷却淬火水，可循环使用，减少新水用量。

（4）采用反向挤压工艺，降低挤压能耗并改善产品质量。

（5）采用多根挤压和拉伸工艺。

（6）氧化生产线的清洗水经废水处理后可部分用于阳极氧化前的预处理工序后的清洗，可减少新水耗量。

（7）氧化生产线上设置酸回收、镍回收、电泳漆回收等设施，减轻废水处理的负担。

第六章 有色金属行业节能减排技术发展趋势

新世纪以来，特别“十一五”以来，我国有色金属产业技术水平大幅度提高。高效地下采矿、系列大型浮选机、选矿拜耳法、系列大型预焙铝电解槽、铝电解重大节能技术、富氧熔池熔炼、闪速熔炼、底吹炼铅等一大批重大技术取得突破性进展，采、选、冶主要工艺技术达到或接近国际先进水平，具有自主知识产权的技术装备陆续出口，极大地提高了我国有色金属工业科学技术水平，增强了其国际竞争力和影响力。

6.1 铝冶炼技术发展趋势

6.1.1 氧化铝节能减排新技术动态

从发展方向看，今后拜耳法过程节能的基本原则应该是：尽可能缩小蒸发母液和分解母液的碱浓度差，降低蒸发工序折合比，提高全流程碱液循环效率和各工序产出率。

今后阶段烧结法过程节能的基本原则是：提高高能耗烧结窑的产出率和热利用效率、高浓度湿法处理烧结熟料、提高烧结法碳分比例并减少或取消烧结法种分。

6.1.1.1 开发提高氧化铝生产系统循环效率和产出率的技术

提高氧化铝拜耳法工艺系统循环效率，以此提高拜耳法系统产能和降低拜耳生产能耗，是降低生产成本的有效手段。应重点开展新型高效添加剂的开发和应用；采用间接加热强化溶出技术提高拜耳法系统铝土矿溶出率；应用后加矿增浓技术和强化种分过程，提高种分分解率；开发高浓度铝酸钠溶液的溶出、常压与非常压条件下液固相分离与脱硅、高浓度铝酸钠溶液的晶种分解技术等。

烧结法循环效率低是造成氧化铝生产综合能耗高的主要原因之一。提高烧结法湿法系统浓度，是实现强化烧结法、降低系统能耗的必要措施。应重点开展降低熟料溶出过程二次反应损失研究、强化烧结法技术优化，生产砂状氧化铝技术和深高浓度连续碳酸化分解生产砂状氧化铝技术和深度碳分提高分解率技术等研究工作，实现烧结法过程的高循环效率。

(1) 缩小循环母液浓度差所涉及的技术

拜耳法循环和烧结法循环系统中，都存在溶出和分解的浓度差问题，即循环母液蒸发强度问题。这是制约全系统能耗和循环效率十分关键的问题。缩小浓度

差，意味着大幅度节能；提高系统操作浓度，意味着提高产出率。

十分重要的是必须开发应用在高浓度下实施拜耳法和烧结法一系列单元操作关键技术，如拜耳法的赤泥沉降、分解、过滤等以及烧结法高浓度的溶出、赤泥分离及洗涤、脱硅和连续碳分等，同时又要保持系统正常运转，达到各工序的操作目标。

（2）间接加热技术和提高热效率、热回收率的技术

对拜耳法溶出和烧结法脱硅等预热过程，采用间接加热技术，避免蒸汽对溶液的冲稀，是这些工序节能的最主要的技术。氧化铝厂的间接加热技术和设备必然遇到一些含硅矿物在加热面结疤、从而降低传热效率的问题。应利用溶液硅化学和结晶学的一些基本理论，在工艺技术上改进，使间接加热面不结疤或少结疤，从而提高传热效率，减少溶液浓差，达到既强化过程又节能的目的。因此，不断提出新技术，减少或避免结疤对间接加热传热的影响，是氧化铝生产节能降耗的重要课题。

氧化铝生产过程中，高温溶液、高温物料、高温气体中潜能的有效释放是通过热回收技术实现的。热回收率的大小在很大程度上决定了氧化铝生产的总能耗。因此炉气余热利用、废蒸汽热回收、溶液热交换等技术也是节能技术的重要部分。

（3）在线检测和控制技术

拜耳法溶出配料和烧结前多组分配料是达到拜耳法溶出和烧成这两个关键工序最优化运行的前提。这些配料通常是针对多组成和多相体系，其配料的准确和稳定的程度直接关系到体系反应的总效果。配料中一些关键的在线检测和控制技术，是决定该工序以及全系统的效率、稳定性、能耗等水平的重要因素。因此这些配料技术是氧化铝生产的关键技术之一。开发出各种可靠的在线检测一次元、检测方法以及符合不同被控体系的控制策略是该技术成功的关键。

（4）大型、高效、节能设备的开发与应用

开发与应用节能泵、节能搅拌器、节能风机以及其他一些节能装置和设备。开发提高煤粉、重油及煤气等燃料燃烧效率的装置和技术，在各个工序中尽可能采用大型高效节能的设备等，都降有利于实现高效低耗生产氧化铝。

6.1.1.2 氧化铝生产环境保护技术

（1）铝土矿矿山的复垦技术

我国氧化铝工业进行了许多铝土矿矿山的复垦的研究和技术开发工作。平果铝土矿、山西孝义铝土矿的复垦率都比较高。但是，随着氧化铝工业的迅速发展，矿石的开采量增多，特别是民采矿和联办矿的复垦问题日渐突出，急需小型矿山

的复垦技术。因此，应针对铝土矿山的具体情况，研究出适合于不同开采技术的复垦方案，以减少铝土矿开发对环境的影响。当前应重点开展铝土矿废矿复垦造田新技术，提高铝土矿废矿的复垦率和绿覆盖率。

（2）开发赤泥减排、无害化堆存、堆场防渗处理技术

赤泥减排是充分利用铝土矿资源、减少污染物排放量、实现增产减污的重要措施。开发高效处理中低品位铝土矿的新工艺，提高铝土矿的回收率，既可以提中低品位铝土矿资源的利用，又可尽可能减少赤泥产出量。通过采用强化溶出工艺，可降低赤泥铝硅比和拜耳法赤泥量。烧结法流程通过降低溶出沉降过程二次反应，提高铝和碱的溶出率，也可相应地降低赤泥量。高效深锥沉降槽和赤泥过滤机的应用提高了赤泥洗涤效率，降低了赤泥碱含量，等于间接减少了赤泥危害。

继续全面推广应用赤泥干法输送、堆放技术和堆场防渗处理是近期内大幅度减少赤泥堆放量、降低赤泥危害较为直接可行的措施，同时可相应延长赤泥堆场使用寿命。赤泥堆场的高效防渗、排水和绿化技术可有效地减轻赤泥附液向地下的渗透。

（3）开发氧化铝生产废弃物的综合利用技术

用赤泥废渣生产建筑材料、硅钙肥和土壤改良剂、烟气脱硫剂、废水处理剂，用于建筑、道路、工程、耐火材料、农业等方面，是氧化铝工业必须坚持的研究开发目标。特别是要重点研究大规模、大批量利用赤泥和选矿尾矿的技术。

应采用新工艺降低生产废水的产出量和对工业废水进行处理和回收循环利用，解决氧化铝生产含碱废水的排放治理问题，尽早全面实现废液的零排放。

氧化铝工业的烟尘和粉尘污染主要来自烧结法熟料烧成窑和氢氧化铝焙烧窑粉尘和 SO_2 等有害气体，通过改进生产工艺（如焙烧窑节能少排废气）、应用高效的废气净化和除尘新技术以及增加系统密闭性来解决氧化铝工业的烟尘和粉污染，实现生产过程的粉尘的达标排放。

6.1.2 电解铝节能减排新技术动态

西方国家铝电解厂随着劳动费用和能源价格的不断增加，最近十年积极提高电解槽单位面积的产铝量（或提高阴极和阳极的电流密度），与此同时还不断提高电流效率和降低吨铝的电耗。350~400KA 电解槽阳极电流密度接近 1.0 安培/ cm^2 ，电流效率 95%和直流电耗 12850~13000kwh/t-铝。我国与西方国家比较除电耗达到 12300~12500kwh/t-铝之外，电解槽单位面积产能（或阳极电流密度）比国外低了 25%~30%，电流效率低了 3%~5%。随着我国工业化水平的不断提高，劳动费用、维修费用、运输费用、管理费用以及各种费用均会逐年增加，因此，提高单位产能和提高电流效率应为今后积极研发的课题。

近年来我国出现各种新型阴极节能电解技术,到底哪一种节能效果最好和槽寿命最长,应在一定的时期由国家权威机构组织有关专家规范和统一结构槽型。现将目前国内具有代表性的几种技术陈述如下。

6.1.2.1 新型阴极结构电解槽

2007 年,冯乃祥教授提出了异型阴极结构高效节能铝电解槽的概念,并于当年在重庆天泰铝业公司 160 kA 系列电解槽上选取 3 台大修槽,用该种异型结构的阴极碳块砌筑电解槽,经过工业试验,3 台试验槽平均工作电压为 3.784 V,平均直流电耗与国内先进水平比较约降低 700~800 kWh/t-铝。2008 年,华东铝业公司在其 200 kA 系列大修槽上采用该专利技术砌筑了 94 台异型阴极结构电解槽,6 个月的运行,94 台异型阴极电解槽的平均工作电压为 3.754 V,平均直流能耗与先进水平比较约降低 600~800 kWh/t-铝。目前国内采用不同的新型阴极结构,均取得较大的突破,虽然新型阴极电解槽取得了节能效果,但电流效率普遍较低,并且缺乏理论研究,对于异型阴极电解槽的槽寿命也还有待于继续验证。

6.1.2.2 泄流式电解槽

2008 年,贵阳铝镁设计研究院、郑州轻金属研究院以及沈阳铝镁设计研究院合作研发出新型水平阴极结构的泄流式电解槽技术即高湿润性复合水平阴极—阴极间导流沟—中缝汇铝沟—端部蓄铝池结构的新型泄流式电解槽。经过工业试验,该类电解槽的平均工作电压为 3.74 V,电耗与国内先进水平比较约降低 700~800kwh/t-铝。目前,该槽型已在多家铝厂推广应用。

6.1.2.3 阻流槽

贵阳铝镁设计研究院与沈阳铝镁设计研究院相继提出了新型阻流节能电解槽,其方案主要是在铝电解槽内放置一定数量和规格的阻挡块,主要作用是将铝液层分隔成若干区域,降低铝液的流速和减缓界面的波动,提高电解槽的稳定性,有效的降低极距,降低电解槽的吨铝直流能耗。截至 2010 年 5 月,在中铝贵州分公司实施放置阻流块形式电解槽 228 台,在中铝广西分公司实施放置阻流块形式电解槽 1 台。槽电压在 3.75~3.8 V,电流效率与对比槽相比没有下降,吨铝节电 500 kWh 左右。但是,如何增强阻流块的稳定性是继续研究的问题。

6.1.2.4 铝电解烟气净化系统及装置

目前,国内外大多采用基于干法净化工艺的烟气净化设备。设计研究单位利用多相流原理,通过氧化铝在烟气中不同初速度的衰减,控制氧化铝和烟气的混合,达到有效控制氧化铝和烟气混合的目的,从而提升铝电解槽烟气净化的效率,

延长滤袋使用寿命。此技术和装备已在我国和印度的十多家企业推广应用。有的设计单位设计的水平集烟管采用分区集气结构，槽内烟管一分为二，形成左右平行的 V 形分烟道，一支前段（出铝端）开孔，一支后段（烟道端）开孔。此集烟管避开了中间打壳下料管的阻挡，负压分配均匀，有利于减少系统阻力和提高电解槽集气效率。

目前，国际上通过加大净化系统的风量来减少天窗的逸出的氟量（见表 6-1）。但治本的措施还是从降低 AlF_3 消耗量入手和加强管理提高密闭效率到 98.5%~99%。

表 6-1 净化系统增加风量后降低氟化物排放量的措施

单槽排风量 (Nm^3/s)	氟化物排放量(kg/t 铝)		
	电解天窗	净化系统烟囱	总量
2.0	0.50~0.60	0.03~0.06	约 0.6
2.1	0.40~0.50	0.03~0.06	约 0.5
2.4	0.25~0.35	0.04~0.06	约 0.35

6.1.2.5 铝电解槽自动控制系统及装置

目前，国内主要研制槽控机具有手动/自动，阳极升降保护，定时保护，槽电压高低限保护，上下限位保护，打壳、下料，槽电压、系列电流采集，槽电压、氧化铝浓度控制，效应、出铝、换极、抬母线、电压摆控制，故障报警及看门狗保护等功能。槽控机通过将自适应控制、模糊控制以及槽电阻斜率计算三种控制策略相结合，实现以氧化铝浓度为核心的各技术参数的控制。槽控机与监控计算机通讯采用 CANBUS 方式。

2007 年，贵阳铝镁设计研究院又提出了“三度寻优”的控制策略，并开发出了配套的控制装备。该控制策略是以计算机为核心，使电解槽工作在高效率的“临界态”，促进铝电解槽进一步提高电流效率和能量利用率，降低能耗和效应系数，对生态环境保护具有重要作用。并于当年在中铝公司广西分公司进行应用，实现电流效率提高 2%，平均电解温度下降 10 $^{\circ}\text{C}$ ，吨铝电耗、阳极消耗和氟化铝消耗及排入大气的有害气体都有明显下降。目前该项控制技术及装备已在多家铝厂推广应用。

6.1.2.6 铝电解系列整流装置

铝电解生产需要消耗巨大的直流电能，因而需要采用大功率整流装置。目前国内外电解铝厂的调压和自动稳流装置主要有两种类型：一种是采用二极管整

流，有载调压变压器作电压粗调，饱和电抗器作细调的自动稳流系统；另一种是采用晶闸管整流机组实现自动稳流。采用晶闸管的整流机组其动态响应速度仅为几毫秒，因而任何外部的电网波动、阳极效应等的扰动所引起的系列电流变化，均可通过迅速调节输出电压而保持系列电流的稳定，其稳定精度较高。采用二极管的整流装置成本较低，尤其是随着电解工艺水平的不断提高，阳极效应系数不断降低，采用二极管装置，有载调压变压器作电压粗调，饱和电抗器作细调的自动稳流系统也能达到较好的稳流效果。

6.1.2.7 铝电解专用设备

(1) 多功能机组

铝电解多功能机组是预焙阳极铝电解生产的专用、关键设备，可以完成打壳和覆盖氧化铝、更换阳极、出铝、辅助提升阳极母线、吊运电解槽上部结构和下部槽壳以及其它散件等工作。电解多功能机组按功能的配备，可以分为全功能电解多功能机组和简易电解天车两大类。电解多功能机组按操纵方式不同，可以分为驾驶室操纵机组和遥控机组两种形式。驾驶室操纵机组又分为高位机组（适用于多点进电电解槽）和低位机组（适用于两点进电电解槽）。随着电解槽工艺水平的不断发展，两点进电电解槽已被淘汰，因此低位机组已越来越少被应用。

(2) 不停电开停槽装置

目前国内有两家单位开发了不停电开停槽装置。该装置通过将现有铝电解槽一次电流转换的方式转换为电流二次转换的方式来完成铝电解槽的开槽和停槽，可以在不断电或大幅降低电流的情况下完成对电解槽的维修或替换，可避免全系列电解槽停电，延长电解槽的寿命，大大降低因开（停）槽所造成的损失，减小对电网的冲击和整流机组的损坏实测技术参数完全达到设计要求，工作性能可靠，实现了在系列不停电的情况下开、停电解槽的要求。目前进入第三代推广产品的预研制阶段，力求形成产业化和系列化，使其能在国内外各种容量和母线设计形式的电解系列上全面推广使用。

我国铝电解槽阳极效应的频率和持续时间与国外有较大的差距，为了有效的降低全氟化碳（PFDs），应积极开发新的计算机控制软件，与此同时，应改进氧化铝质量以减少发生阳极效应的频率和持续时间。

从发展来看，随着新型与节能阴极技术和低效应系数在今后两年内的全面推广，电解铝厂整流器的富裕电压降将可能达到 100~120V（以年产 20~30 万 t 电解系列而言），充分利用这一部分富裕电压增加 25~30 台电解槽是可能的（视企业场地情况）。其结果不仅为企业增加产量 8%~10%并降低成本，而且还提高了整流器的整流效率至少 0.5%和功率因数。从降低阳极效应系数和降低持续时间

以及提高整流效率计算，吨铝至少可以节约交流电 80~100kwh/t -铝。

6.2 铜冶炼技术发展趋势

铜冶炼过程是典型的多步骤、高耗能流程工业，铜火法冶炼工艺经过几十年的发展，技术上已取得了显著的进步，但总体工艺仍然沿用“熔炼—吹炼”的分段工艺，且两段工艺分别需在不同的炉体中进行，尤其是吹炼段绝大多数企业仍采用 PS 转炉，由此产生了不连续操作、烟气易泄漏、低空污染等一系列问题。

在火法炼铜方面，下一步重点研究：（1）氧气底吹连续炼铜工艺技术，包括：铜连续吹炼工艺配置、连续吹炼炉结构以及与连续吹炼相配套的氧气底吹成套装置、新型炉渣电热贫化工艺及装置、大流量低压氧枪开发；（2）闪速炉短流程一步炼铜工艺技术，重点是集成“闪速熔炼反应塔”与中国的“白银熔池熔炼法”或“冰铜反射炉连续吹炼”2 项技术；（3）顶吹熔炼-顶吹吹炼（因分特炉）短流程连续铜熔炼技术，包括①因分特炉型结构优化及顶吹音速喷枪设计；②提高冰铜品位，实现产出白冰铜的作业；③利用铜精矿中的硫来提高流程处理冷料（废杂铜）的能力；④铜熔炼过程质量流与热化学理论研究；⑤高磁性铁炉渣在还原炉中贫化机理研究；⑥短流程熔炼工艺自动控制系统研究。

最终形成一系列新的短流程连续炼铜工艺，提高铜回收率、硫捕集率，大大降低粗铜综合能耗。

6.3 铅冶炼技术发展趋势

我国粗铅生产技术已取得较大进步，与传统工艺相比，单位产品综合能耗显著下降，但炼铅过程中 SO₂ 烟气和铅尘严重污染环境的问题一直未能得到有效解决。因此，基于现有技术进行改造，开发铅的清洁生产工艺，对提升我国铅冶炼技术水平，解决铅冶炼过程造成的环境污染问题，具有非常重要的意义。

下一步重点研究：（1）底吹熔炼-底吹熔融电热还原炼铅技术；（2）富氧闪速铅熔炼工艺，包括 PbS 氧化度的控制、合理渣型、铅挥发抑制等控制技术、短流程闪速炉连续炼铅的节能新工艺及成套装置；（3）铅旋涡柱闪速熔炼工艺，包括旋涡柱喷嘴研究及工业化制造、铅(铜)渣直接贫化理论与技术、旋涡柱连续炼铅冶金过程数学模型和生产控制、旋涡柱连续炼铅炉体原型研究与优化设计等。

最终改善现有工艺的弊端和不足，形成具有自主知识产权、短流程、连续化为主要特征的节能、高效、强化炼铅关键技术和装备，大幅度降低生产成本、粗铅单位产品综合能耗、渣含铅率和烟尘率，提高铅回收率，增强炼铅行业核心竞争能力。

6.4 锌冶炼技术发展趋势

6.4.1 开发锌冶炼清洁生产新工艺

目前我国火法熔炼铅锌混合精矿一般采用 ISP 工艺,该工艺在铅锌精矿烧结过程主要存在以下不足:大量返粉作业,铅锌扬尘难以控制;烧结烟气量大,SO₂ 浓度低,烧结块残硫高,硫的回收率低;工艺流程较长,维修工作量较大,投资高。针对这些问题,有必要开展锌清洁生产新工艺的开发。

下一步重点研究:(1)氧气底吹炉熔炼、熔体侧吹还原以及铅雨冷凝技术;(2)延长底吹炉炉衬寿命的技术与方法;(3)还原炉及铅雨冷凝器等还原装置结构及配置,解决还原炉与铅雨冷凝器接口存在的膨胀等工程问题。

最终形成具有自主知识产权的锌清洁冶炼新工艺,实现锌的直收率提高 2%~3%,硫回收率由 85%提高到 96%,硫捕集率>99.7%,以煤代焦,单位能耗下降 30%~40%,投资下降 30%,劳动生产率提高 20%的目标,有效消除现有 ISP 鼓风炉熔炼烧结过程所造成的严重环保问题。

6.4.2 提高锌电解技术装备水平

锌冶炼行业存在的主要问题是电解的电耗高,自动化水平低。据不完全统计,我国锌冶炼企业大小超过 320 家,目前只有云南驰宏锌锗、内蒙紫金巴彦淖尔、丹霞冶炼厂和株冶 10 万 t 常压浸出采用国外进口大极板电解和自动剥锌外,其余全部采用小极板电解和人工剥锌。因此,电解过程技术装备的先进性、自动化控制水平是节能的关键,组织研发大极板电解和自动剥锌系统,建设示范工程,向全国推广应用,对实现锌冶炼行业绿色低碳和清洁生产具有重要意义。

下一步重点研究:(1)锌浸出液深度净化技术研究;(2)大极板电解技术与装备研究;(3)自动剥锌机研制;(4)全自动控制系统研制;(5)锌电解酸雾抑制技术研究;(6)降低锌电解直流电耗技术研究。

最终大面积推广应用大极板电解和自动剥板系统,打破国外技术装备垄断,实现锌冶炼清洁生产,提升锌电解自动化水平,显著降低锌电解电耗。

6.5 镁冶炼技术发展趋势

我国是金属镁的生产大国,其产量占世界总产量的 80%左右。我国金属镁的生产大都采用皮江法,即通过外部加热还原罐间断生产的硅热法炼镁方法,该法采用金属硅铁为还原剂,在高温真空条件下,将煅烧过的白云石进行还原而制取金属镁。由于皮江法使用固体、液体和气体为燃料,对热法炼镁来说,不仅热效率低,造成燃料资源和能源的极大浪费。而且排放过多的燃烧气体,造成更大的

环境污染；且还原过程不容易自动化控制，机械化程度不高，劳动强度大，生产率低。因此，研究和开发低能耗、低成本、无固体废渣排放的炼镁新技术势在必行。

主要研究内容有：（1）低碳、低成本无固体排放炼镁新技术，以菱镁石和白云石混合料或以高镁白云石为原料，以回收的废铝为还原剂生产金属镁，固体渣料可通过浸出提取特种氢氧化铝或氧化铝；（2）多热源内热式电热法炼镁新技术与装备，包括还原生产系统成套装备的设计、新型炉体结构设计与定型、原料与炉渣浸出方式、炉渣热能利用、粉尘在线处理、自动化装卸料系统。

最终形成集技术、工艺、装置和控制于一体的成套镁冶金新装备，实现镁冶炼的高效率、高质量、低能耗、低成本、低污染或无污染生产，提升我国镁冶金的科学技术水平。

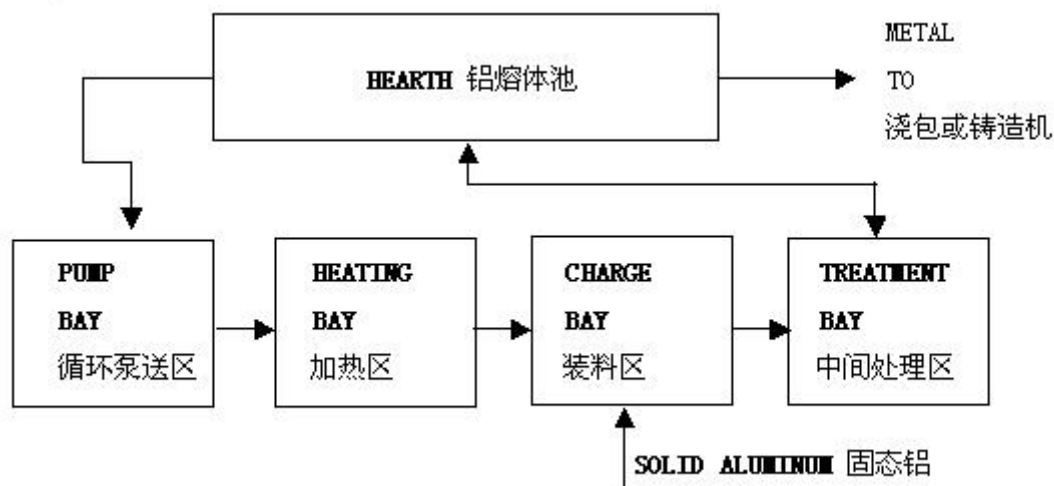
6.6 铜铝加工技术发展趋势

工业技术创新是经济发展的强大引擎，而搞创新的前提是必须有投入，要投入必需资金与人力。我国铜、铝行业在技术研究开发方面虽有一定的投入，但与工业发达国家相比，以及与国民经济高速发展的客观形势要求相比还是显得势单力薄。例如，美国铝业公司的科技研发经费据称达到销售收入的 5% 左右；力拓加铝公司在这些方面的投入也达到 3.8% 以上。据估算，中国铝加工行业在技术研发与创新方面的总投入还只有销售收入的 1.5%。因此，加大技术开发投入，研究开发铜、铝加工新技术，对推进节能减排具有重要意义。

由美国能源部拨款，阿波格技术公司、阿雷利斯公司、德雷克塞尔大学、阿贡国实验室联合研发的铝合金等温熔炼炉（ITM）在铝及铝合金熔炼技术发展史上有着划时代的意义，与当前的常规反射炉相比，可节能 70%，减排 80%，铝的烧损下降 4 个百分点，在节源（资源与能源）减排方面意义重大。等温熔炼炉在美国已初步商业化试生产成功，正在作扩大试生产工作与开发大的商业化生产炉，预计 2010 年美国可能有 20% 左右的下游铝产品是用此项技术熔炼的，首先得到应用的是铸造行业与压铸件生产行业。此技术不但适合于铝工业，其他冶金部门也全面适用，另外，还可用于熔化玻璃。

等温熔炼（isothermal smelting）是指恒定温度（Constant temperature）进行熔炼之意，而在等温熔炼系统（熔炼炉）中即在此是指炉膛内的铝熔体温度不但在很小的范围内变动，而且各处的温度几乎完全一致。此处所指的炉膛即铝熔体池（molten aluminum pool），池中熔体温度即为放流温度降与铸造温度之和，温度由计算机自动监控，通过熔池底部的发热板（baffle）来微量控制温度。熔体池相当于常规的静置炉。

等温熔炼的技术原理：等温熔炼是一个连续工艺过程，熔化后的铝熔体在一个完全封闭的系统内循环流动，它由 4 个区（循环泵区即泵送区、固体炉料区即装料区、浸没加热区、中间处理区即除气净化处理区）与熔池即保温炉膛组成。



等温熔炼的发明是铝及铝合金熔炼发展历程中的一次革命性的成就，是铝工业节源减排史上一次突破性的成就，具有划时代意义，标志着铝熔炼技术新时代的到来。

等温熔炼技术的优点可概括为：

- 投资大为下降；
- 炉结构简单，即简单的硬件；
- 熔炼炉的占地面积仅相当于常规反射熔炼炉占地面积的 1/5；
- 不散发污染物，熔炼车间无污染，空气清新；
- 对炉料进行三维加热（Volumetric heating），即不会形成温度梯度--无热成层现象（thermal stratification）；
- 熔体温度均匀一致，成分均匀；
- 形成的炉渣显著减少；
- 熔体品质大大提高，溶解的气体、固体夹杂物少；
- 电阻加热器的热效率高达 97%；
- 铝等金属的熔炼潜在损耗可由 6%降低到小于 2%；
- 此项技术虽然首先应于铝的熔炼，但同样适合于熔炼铜、玻璃、钢、铸铁、铂等，以及其他工业部门；
- 如果铝工业的熔炼炉由反射炉全部改用等温炉，那么由于热效率的提高可节约大量能源。由于熔化效率提高和熔炼烧损的下降，碳的排放量可大幅减少。

等温熔炼技术的应用与推广对节约两源（能源与资源）与减少温室气体排放

有着重要意义。铝及铝合金等温熔炼炉的研发成功是新世纪以来铝合金材料生产工艺最出色的两大发明之一，另一项发明是 2006 年诺威力铝业公司发明的复合锭铸造法，但等温熔炼技术的意义更为深远，经济效益与社会效益更大，节能减排效果更突出。

6.7 有色金属采矿技术发展趋势

目前国内尚缺少满足大型或特大型矿山生产要求的大规模强化开采关键工艺技术以及相匹配的关键装备，致使采场规模小和采场产能低，造成我国中小型矿山数量繁多，带来严重的安全管理与行业规范难以落实的问题，严重制约了行业整体技术水平的快速提升。因此迫切需要开展大型金属矿床地下强化开采关键技术与装备的研究，实现国产化，满足 1000 万 t/a 级以上大型露天矿山的开采需要；满足 500~1000 万 t/a 级特大型地下矿山开采的需要。

下一步重点发展方向：（1）大型矿床强化采矿、充填、地压、调度管理等工艺技术的开发与集成及大规模强化开采技术系统的开发；（2）大型露天采矿设备的研制，重点攻克露天全液压牙轮钻机、露天液压钻车、矿用钢丝绳推压交流电铲、矿用大吨位交流电动轮自卸车的关键技术，开发具有自主知识产权的大型露天矿山成套采矿装备，形成产业化；（3）关键地下采矿装备研制，重点攻克双臂全液压掘进台车、液压凿岩智能控制系统、全液压大直径天井钻机、高效安全矿用乳化炸药移动式生产与装填装备、大斗容地下无轨铲运机、大吨位地下汽车、大流量充填装备、低矮型多功能液压钻机、低矮型遥控铲运机、微型多功能辅助作业车、地下低污染可移动破碎车等装备的关键技术；（4）采矿装备关键配套件研制，重点研究开发系列高气压潜孔钻具、重型液压凿岩机以及地下无轨车辆传动件；（5）低品位矿石高效利用关键技术。

从而实现大型矿床大规模强化开采，有效降低采矿成本，提高矿山全员劳动生产效率，改进矿山生产作业环境，增强矿山企业市场竞争能力，并使大量低品位矿石成为可经济利用的资源，从而提高矿产资源利用率。

6.8 有色金属选矿技术发展趋势

由于我国矿产资源具有品位低、有用矿物嵌布粒度细，矿物共生复杂等特点，导致其高效分离技术难度大。另一方面，我国选矿技术装备总体水平与国外先进水平相比落后 10 年以上，选矿劳动生产率仅为发达国家同类矿山的 1/6~1/3；矿山企业总体能耗高，据统计，我国选矿厂的电耗约占生产成本的 60%，比国外同类矿山电耗高 15%~20%。随着我国资源短缺与环保问题日趋严重，开发高效、清洁、环保的选矿技术与高效节能选矿装备对复杂难处理等资源大规模综合开发

利用已迫在眉睫。

下一步重点发展方向：(1) 通过矿物的物性和可选性研究，研发与矿物可选性相适应的精细矿物加工技术；(2) 有色金属难处理矿石的高效综合利用技术；(3) 有色金属低品位共伴生战略金属的高效综合利用技术；(4) 资源开发利用过程中的各种高效、易降解、低毒选矿药剂的研发和应用；(5) 生产过程中废水、废渣等的循环和综合利用技术；(6) 金属矿山高效选矿装备及其辅助设备的研制。从而攻克有色金属低品位矿和复杂难选有色金属矿产资源的清洁选矿新技术，研制成套装备，形成主要有色金属和低品位共伴生有价金属综合利用的整体解决方案，使我国选矿技术达到国外同期水平，部分技术达到国际先进水平，碎磨系统能耗降低 15%，金属回收率提高 2%~3%，精矿品位提高 1%~2%以上，综合回收率提高 5%以上，矿山劳动条件和环境保护得到有效改善。