
面向“双二百排放”的CFB锅炉 节能环保一体化改造研究

中国华能集团清洁能源技术研究院

黄中

2014年6月12日 长沙

主要内容

一、研究背景

二、节能环保一体化改造核心技术

三、节能环保一体化改造工程应用

四、技术展望

五、结论

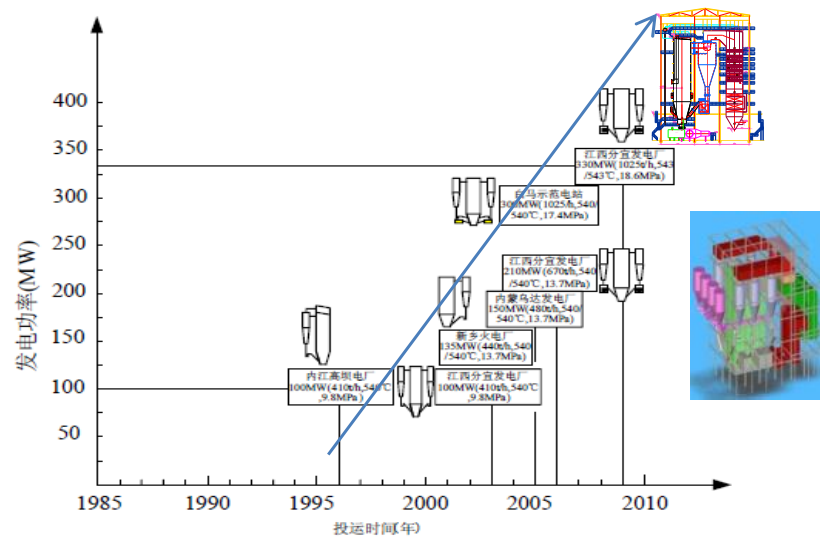
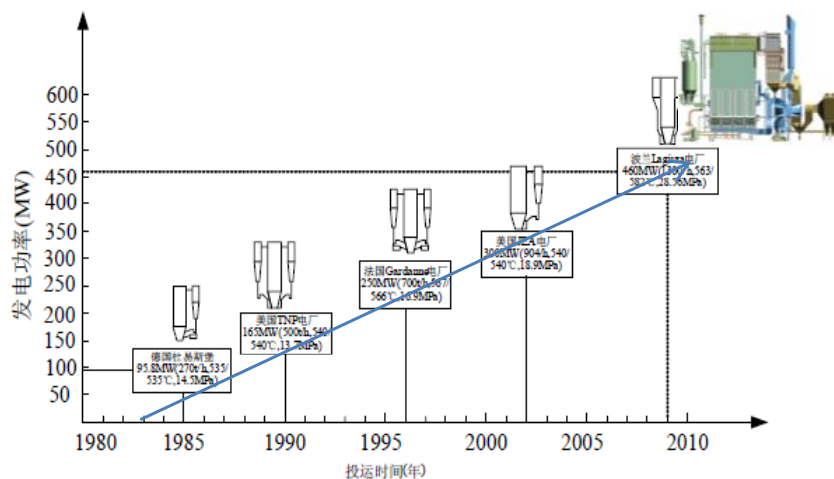
循环流化床锅炉技术的特点

- 燃料适应性广、负荷调节比宽
- 添加石灰石可以炉内脱硫
- 低温燃烧+分级燃烧低 NO_x 排放
- 灰渣综合易于利用
- 大型化、超临界参数方向发展迅速

✓ 在役数量8000台，80GW

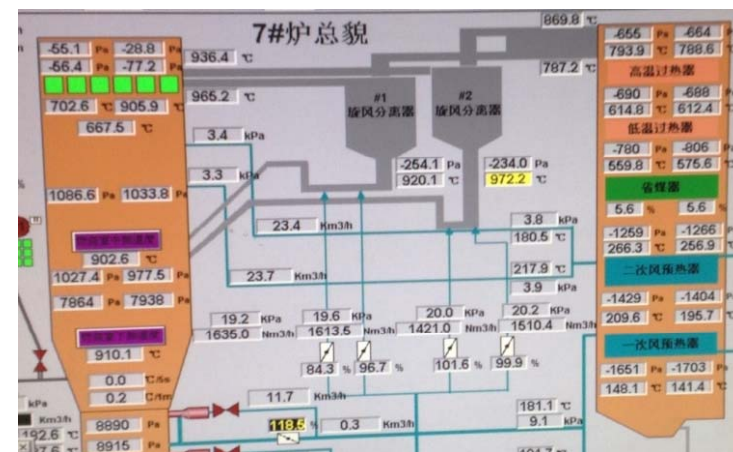
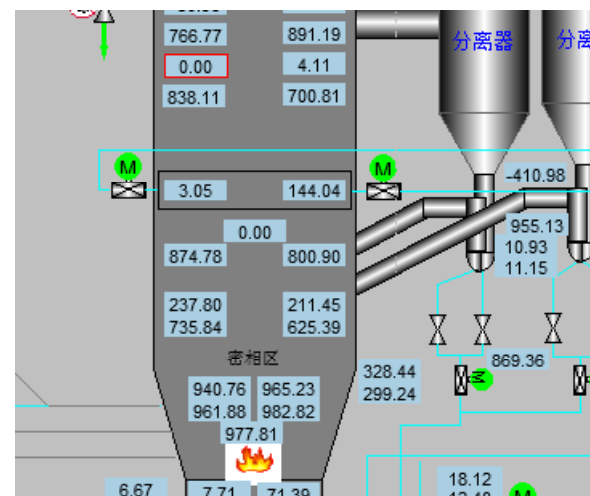
✓ 300MW等级投产机组近百台

✓ 四川白马循环流化床示范电站
有限责任公司60万千瓦超临界
循环流化床示范机组2013年已
投入商业运行！



循环流化床锅炉的运行现状

燃烧和运行偏离设计工况



氧量偏大（超过6%）

床温远高计值（有的接近1000℃）

排烟温度高（夏季可达160℃以上）

循环流化床锅炉的运行现状

■ 污染物排放严重超标

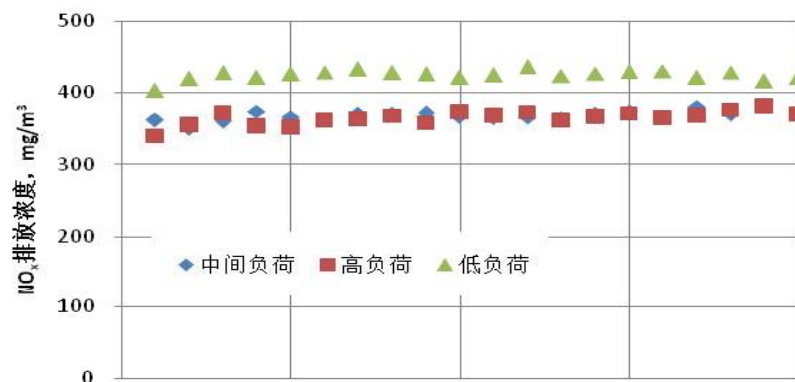
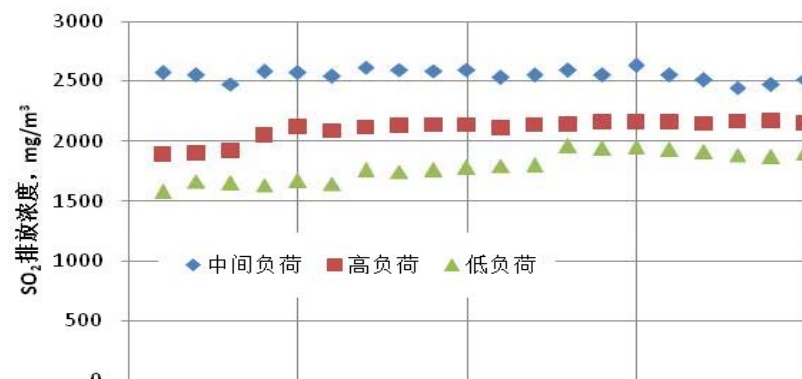
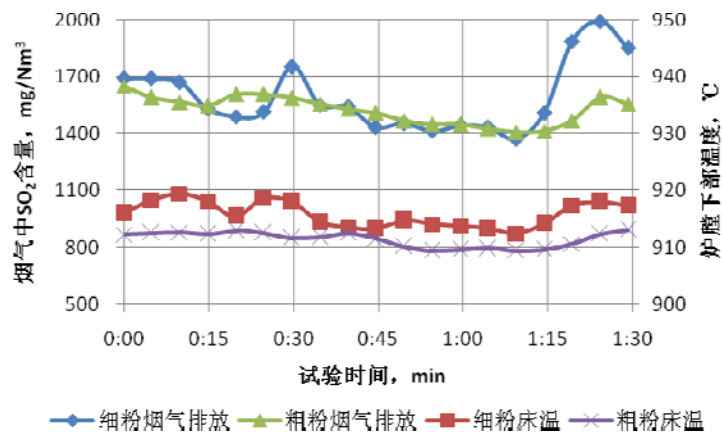
不能满足《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）

■ 石灰石消耗量大

钙硫摩尔比6~8

■ 氮氧化物排放浓度高

SNCR系统尿素消耗量大



循环流化床锅炉的运行现状

- 风帽磨损严重
- 损坏更换频繁（年更换20%甚至更多）
- 风室漏渣严重
- 布风不均，流化质量差



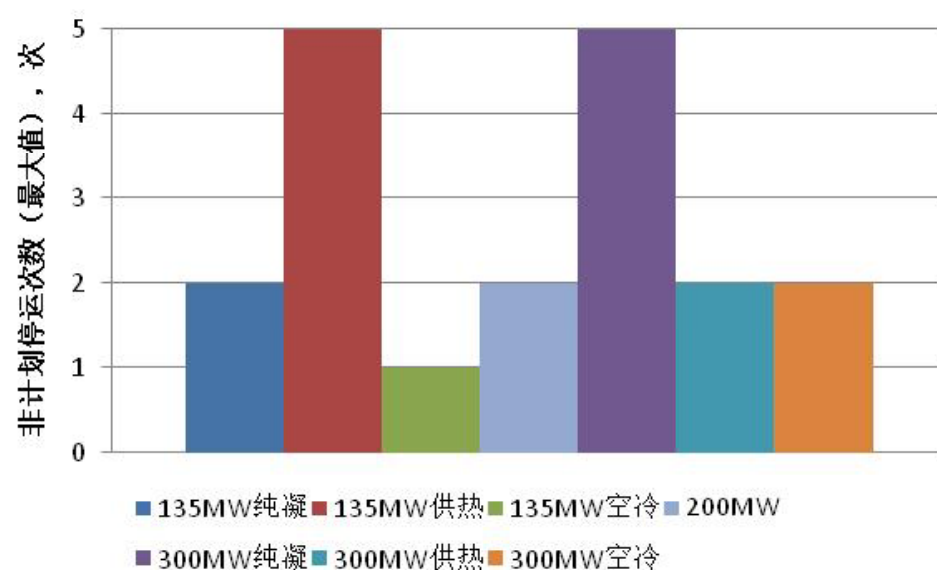
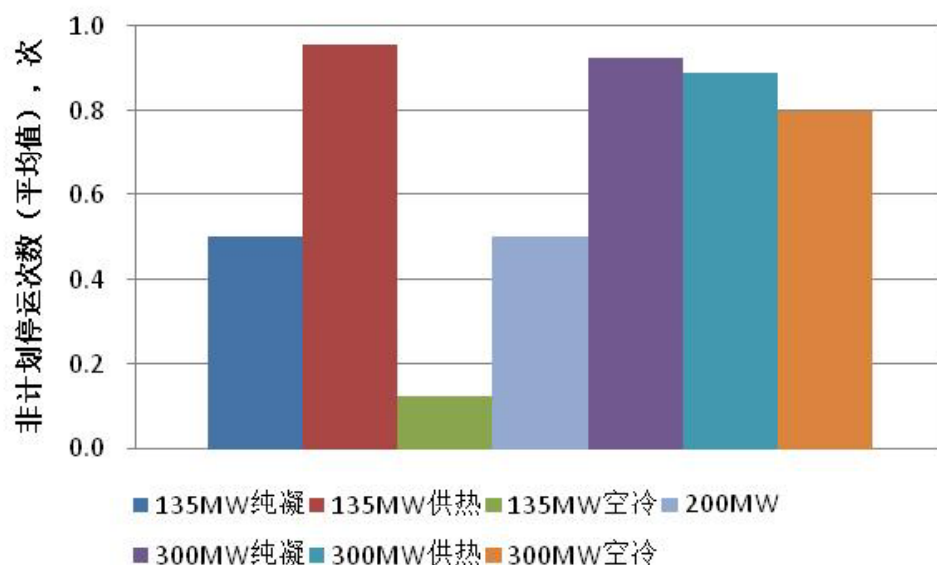
循环流化床锅炉的运行现状

■ 部分机组的非计划停运次数偏高

2012年度全国CFB机组的平均非计划停运次数为0.72次/年

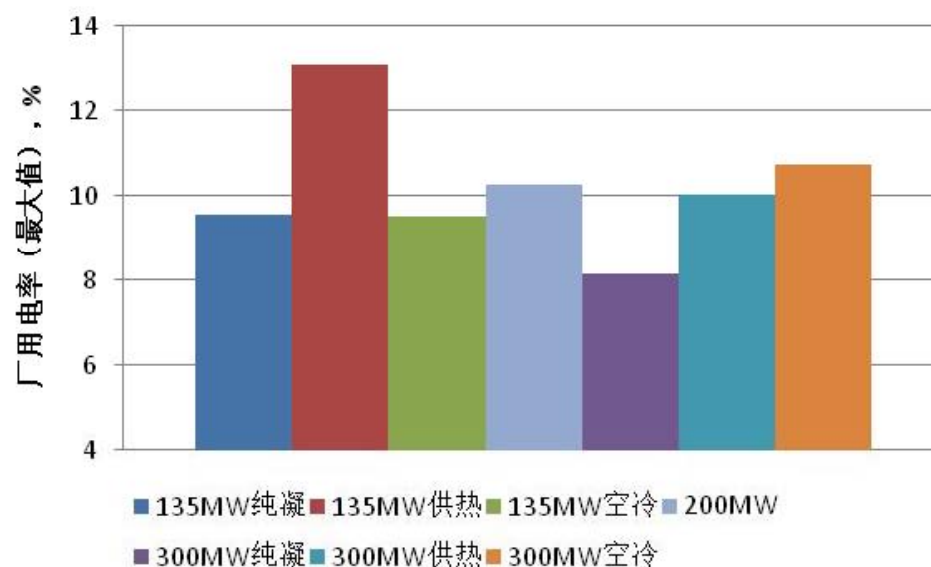
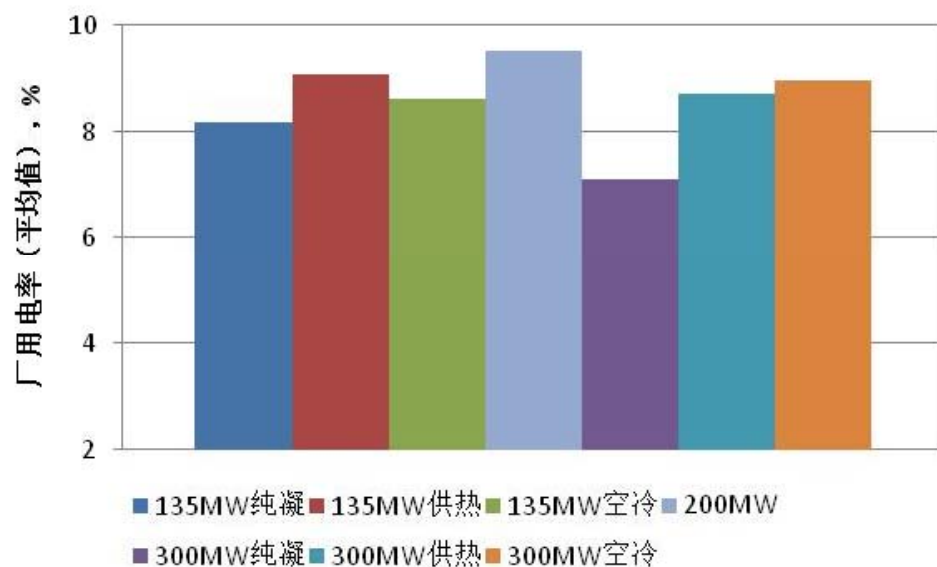
有部分机组的非计划停运次数达到了5次

不同机组之间的差异巨大，呈现两极分化



循环流化床锅炉的运行现状

- 厂用电率高，经济性有待提高
- 2012年度300MW等级的平均生产厂用电率为8.13%（煤粉锅炉机组的平均生产厂用电率为5.81%）



主要内容

一、研究背景

二、节能环保一体化改造核心技术

三、节能环保一体化改造工程应用

四、技术展望

五、结论

一体化改造的整体思路

- 全面分析研究在役CFB锅炉存在的突出问题（针对不同炉型，不同煤种，不同运行条件）
- 制定切实可行的改造解决方案
- 化解制约CFB锅炉技术特点发挥的不利因素
- 全面提高CFB锅炉经济性、环保性和可靠性

一体化改造的技术路线

- 以理论设计为基础，以节能减排为目的，以实践经验为保障，以工程改造为手段，“辩证施治，标本兼治”
- 第一步：诊断试验，全面掌握待改造CFB锅炉真实运行数据和实际问题
- 第二步：方案设计，编制改造可行性研究报告，结合设计软件完成设计优化
- 第三步：改造实施，EPC方式完成改造
- 第四步：深度优化，结合改造优化锅炉运行方式
- 第五步：后评价，总结改造经验，推动技术不断进步

一体化改造的实施方案

- CFB锅炉的问题成因非常复杂，要避免走入“头痛医头脚痛医脚”或是“顾此失彼”的误区，要充分利用已有经验，深入分析现象和问题背后的深层次技术原因，综合考虑设计制造、主机辅机配套、安装检修、运行维护等各种因素，研究上述各要素之间的联系和影响
- “CFB锅炉节能环保一体化改造技术”建立了一系列标准化工作流程，严控了各种影响因素，保障了改造效果，以确保改造成效最大化



一体化改造的技术核心

- CFB锅炉涉及复杂的气固两相流动，工作区域环境恶劣、运行工况多变，物料级配、风帽、分离器、回料阀、受热面布置、运行控制等要素既互相关联又彼此影响，实际运行与设计工况往往存在较大差异
- 工程实践表明：仅仅对某个影响因素进行调整，不可能达到全面提高CFB锅炉运行经济性、环保性和可靠性的最终目的
- 依据不同CFB锅炉运行状况，综合各种有效技术手段，利用各种有益因素和有利条件，设计切实可行的技术方案并予以工程实施，才能保证“CFB锅炉节能环保一体化改造”的成功

前期诊断与监测试验

- (1) 风量标定试验;
- (2) 布风板阻力试验;
- (3) 临界流化风量试验;
- (4) 料层阻力试验;
- (5) 布风均匀性试验;
- (6) 排烟温度场和氧量场试验;
- (7) 尾部烟道漏风率试验;
- (8) 燃烧调整试验、热力校核试验;
- (9) 污染物排放监测试验。

ICS 27.100
F23
备案号

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1322—2014

循环流化床锅炉冷态与燃烧调整试验技术
导则

Guide of cold and combustion adjustment tests for circulating fluidized bed boilers

2014-3-18 发布

2014-8-1 实施

国家能源局 发布

改造可行性研究

- (1) 建设背景、改造条件；
- (2) 改造技术路线论证；
- (3) 工程建设及施工组织设想；
- (4) 改造对锅炉本体的影响研究与应对措施；
- (5) 改造对锅炉附属设施的影响研究与应对措施；
- (6) 锅炉运行经济性、环保性和可靠性影响研究；
- (7) 改造方案技术经济性比较；
- (8) 投资与运行成本分析。

方案设计与工程实施

- (1) 煤种试烧试验及石灰石遴选；
- (2) 风帽及布风均匀性改造；
- (3) 分离器提效改造；
- (4) 返料回路改造；
- (5) 防磨综合治理；
- (6) 炉内脱硫系统改造；
- (7) 低氮燃烧改造；
- (8) 基于锅炉深度运行优化的燃烧自动控制。

主要内容

一、研究背景

二、节能环保一体化改造核心技术

三、节能环保一体化改造工程应用

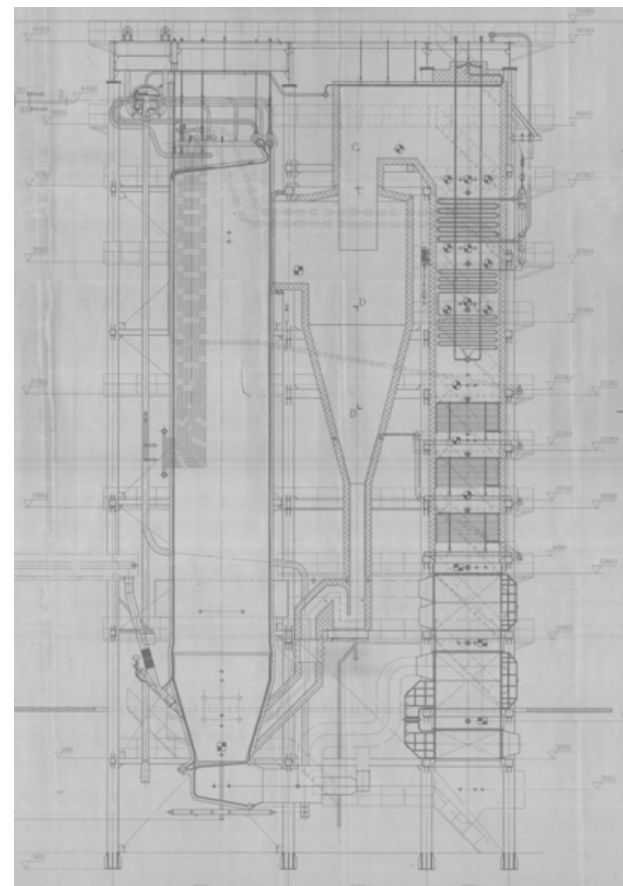
四、技术展望

五、结论

工程概述

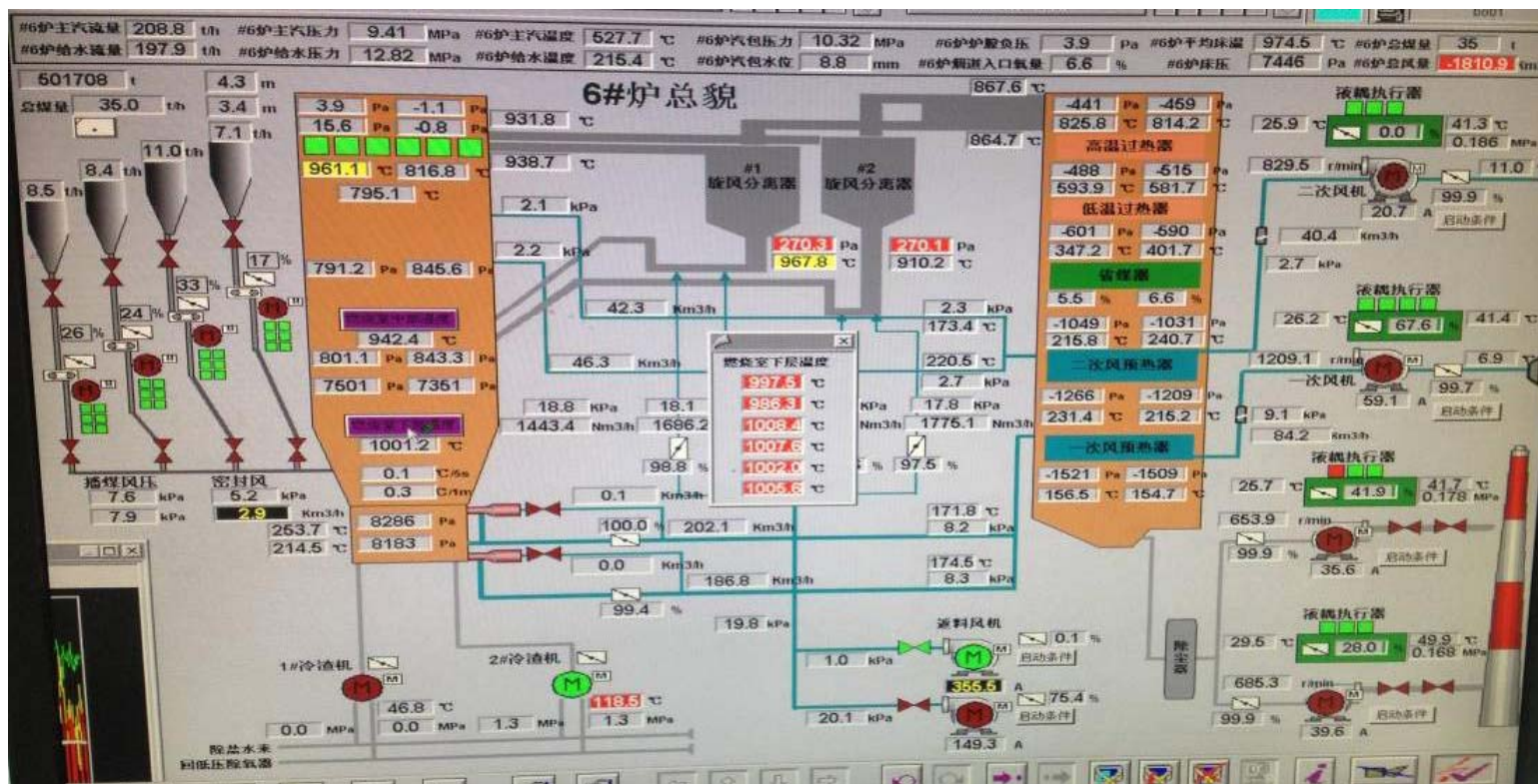
- 山西某厂8台CFB锅炉均为济南锅炉股份有限公司制造，锅炉采用单炉膛和膜式水冷壁，高温绝热旋风分离器，水冷布风板、钟罩式风帽

名称	符号	单位	一期设计参数 (#1~#4炉)	二期设计参数 (#5~#8炉)
过热蒸汽流量	D_{gr}	t/h	240	240
过热蒸汽出口压力	P_{gr}	MPa	9.8	9.8
过热蒸汽出口温度	t_{gr}	°C	540	540
给水温度	t_{gs}	°C	215	210
排烟温度	Θ_{py}	°C	140	140
一二次风比例	K	%	60: 40	60: 40
锅炉效率	η	%	90.11	90.11
燃料消耗量	D_{rlm}	t/h	33.67	34.13
石灰石消耗量	D_{shs}	t/h	1.5	1.57
钙硫摩尔比为	K_{glb}	-	2.3	2.54



设备现状

- 锅炉带负荷能力有限，炉内灰浓度偏低，不能有效调节床温，出力达到了200t/h以后，运行床温在1000℃左右，最高可达1080℃



设备现状

- 受热面磨损严重，连续运行周期仅为3~4个月，严重影响锅炉安全运行
- SO_2 和 NO_x 排放浓度偏高， NO_x 排放浓度 $320\sim 380\text{mg}/\text{m}^3$ （对应锅炉负荷 $160\sim 200\text{t}/\text{h}$ ），不能满足国家 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 的环保排放标准要求
- 石灰石消耗量大，钙硫摩尔比高达5~6
- 布风均匀性差，实际布风板阻力仅为 2.5kPa ，临界流化风量高达 $60000\text{Nm}^3/\text{h}$
- 风帽磨损严重，平均更换率超过20%/年

设备现状

- 分离器效率偏低，无法实现物料的有效循环，实测锅炉飞灰中位径为60~110 μm
- 尾部烟道氧浓度偏高，空预器前为6%~7%，空预器后为8%~9%，排烟热损失高
- 入炉煤粒度不合理，日常使用煤种小于0.5mm和大于13mm的质量份额分别占到10%~15%和20%~25%，筛分不足、过度破碎
- 风量测量结果偏差大，阀门内漏严重，执行机构灵敏度差，锅炉无法实现自动控制

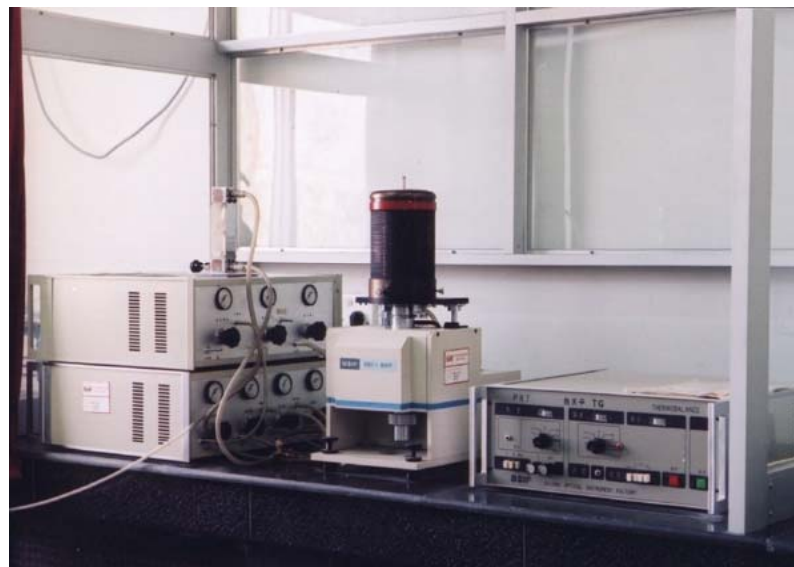
一体化改具体工作

- 煤种试烧试验及石灰石遴选
- 风帽及布风均匀性改造
- 分离器提效改造
- 返料回路改造
- 防磨综合治理
- 基于锅炉深度运行优化的燃烧自动控制改造
- 炉内脱硫系统改造
- 低氮燃烧改造
- 全尺度数值模拟优化

煤种试烧试验及石灰石遴选

- 脱硫石灰石的性能与石灰石反应活性关系很大，而石灰石反应活性又受到石灰石的成份和内部微观结构等影响
- 石灰石遴选工作依托华能清能院热重分析实验室进行，通过热重分析方法评价石灰石脱硫性能，采用分档原则建立判别石灰石的反应能力系数及CaO利用率

反应活性等级	反应能力系数 k_1	CaO利用率	反应活性评价
I	>53	>21	高
II	41~53	19~21	较高
III	23~41	16~19	中等
IV	14~23	13~16	较低
V	<14	<13	低



煤种试烧试验及石灰石遴选

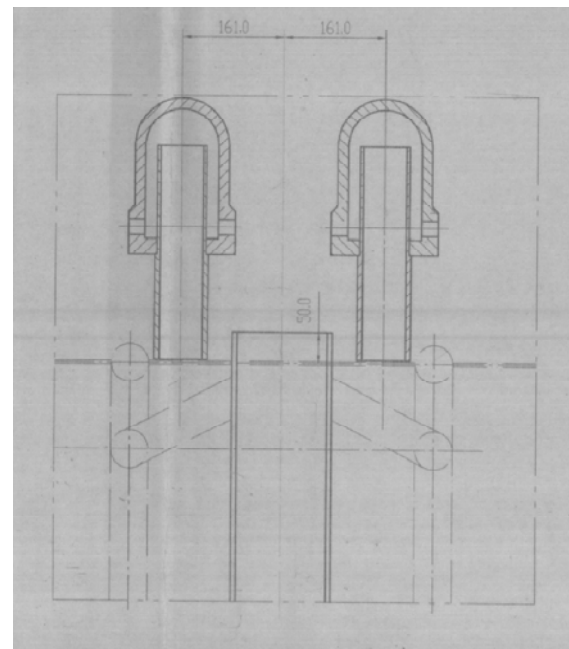
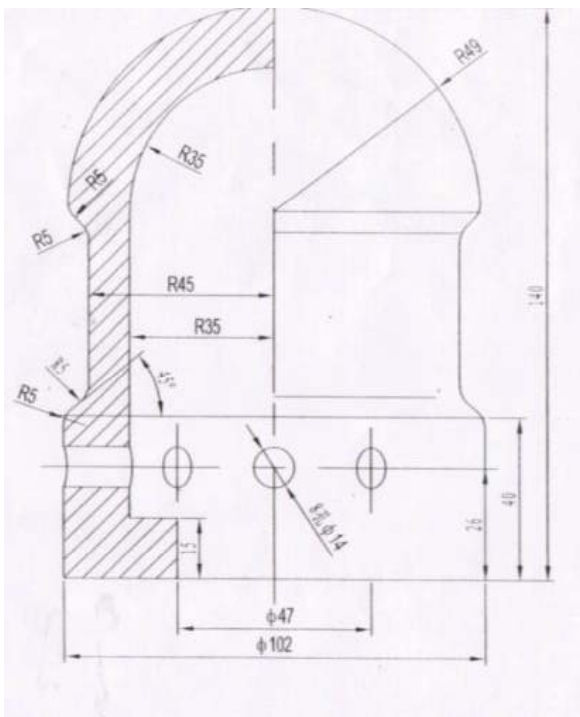
- 改造项目煤源较为稳定，不进行试烧仅开展石灰石遴选
- 对周边的7个矿源进行的取样分析，确定了可以使用的矿源，制订了外购石灰石粉的主要控制指标

样品名称	反应能力属性	CaO利用率	评价结论
矿源一	高	中等	可以使用
矿源二	高	中等	可以使用
矿源三	高	较低	限制使用
矿源四	较低	低	不可使用
矿源五	高	中等	可以使用
矿源六	高	中等	可以使用
矿源七	中等	较低	不可使用



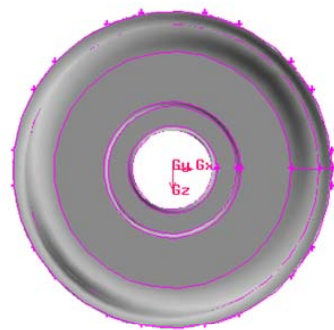
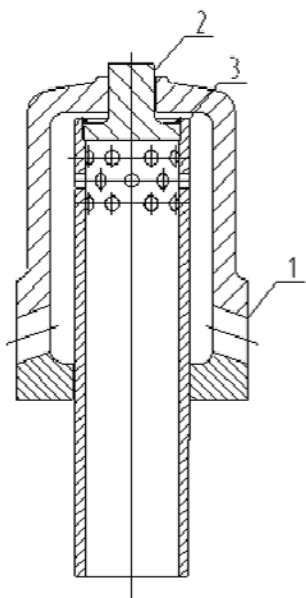
风帽及布风均匀性改造

- ◆ 钟罩式风帽外罩直径为102mm，外罩开孔8个，开孔直径14mm。
外罩与芯管采用焊接连接，芯管顶部开有通孔
- ◆ 外罩材质为ZGCr26Ni4Mn3NRe，芯管材质为1Cr18Ni9Ti
- ◆ 风帽结构不合理，材质使用寿命短



风帽及布风均匀性改造

- ◆ 改造方案对风帽外罩小孔区域进行加厚，提高其耐磨性和使用寿命。
将风帽外罩风孔向下倾斜 20° ，风帽芯管上部焊接便于安装施工，
外罩采用ZG40Cr25Ni20，芯管采用CPH20
- ◆ 改造后流化风量大幅度降低
- ◆ 布风均匀性明显改善

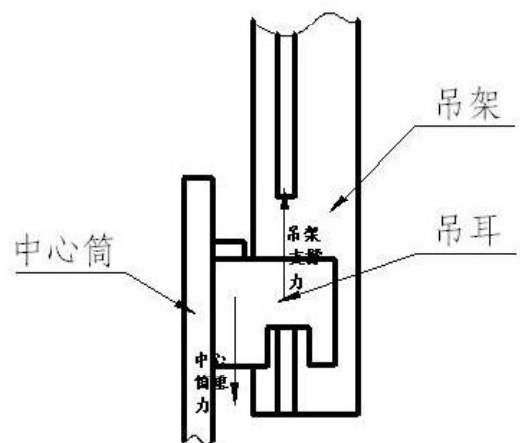


分离器提效改造

◆ 变形问题

中心筒筒体由于是耐热不锈钢板卷制，无膨胀间隙，中心筒受热不均
锅炉启动时迎风侧受热快，停炉时迎风侧冷却快，易变形

拉筋与中心筒以焊接固定方式连接，连接部位是死点，无膨胀间隙，启
炉时筒体受热膨胀被拉筋挤压，停炉时筒体收缩被拉筋拉住，多次反复
后，筒体也容易疲劳变形

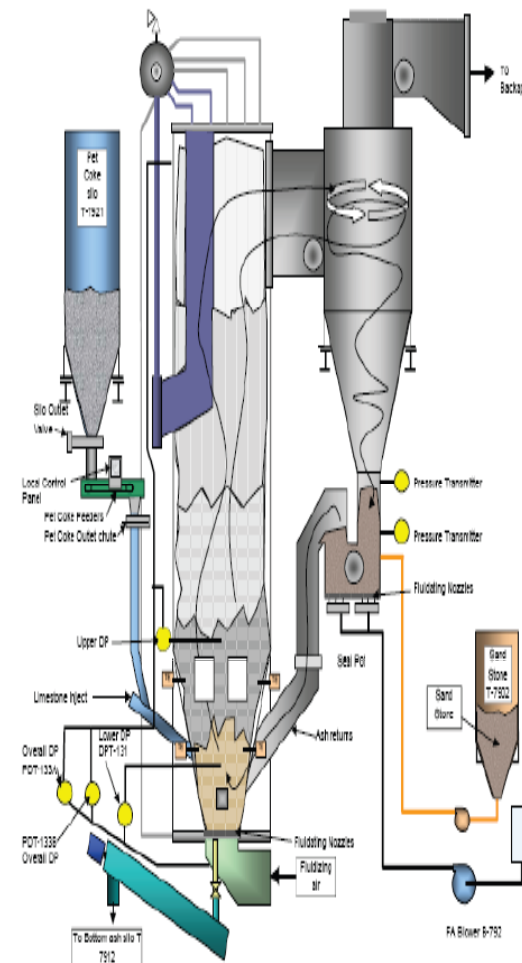
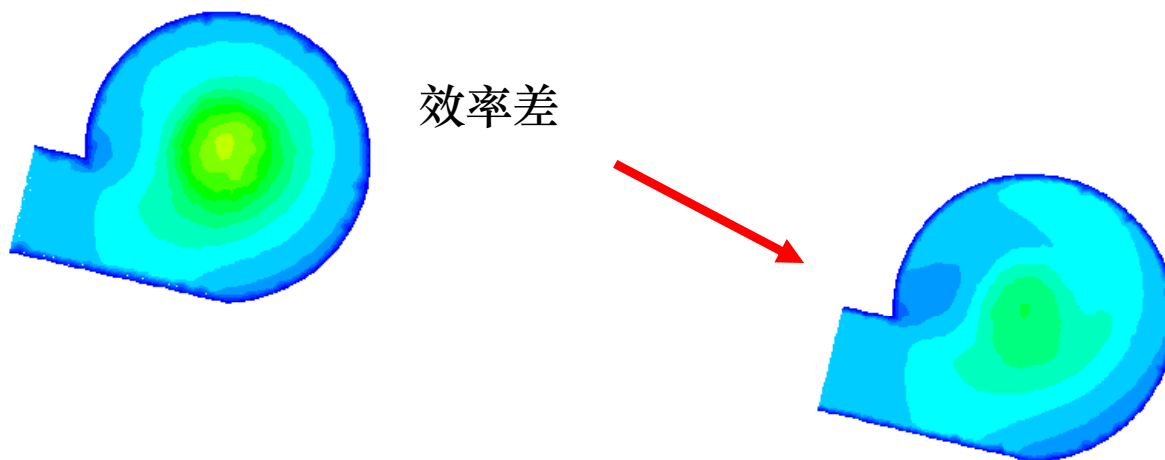


分离器提效改造

◆ 效率下降问题

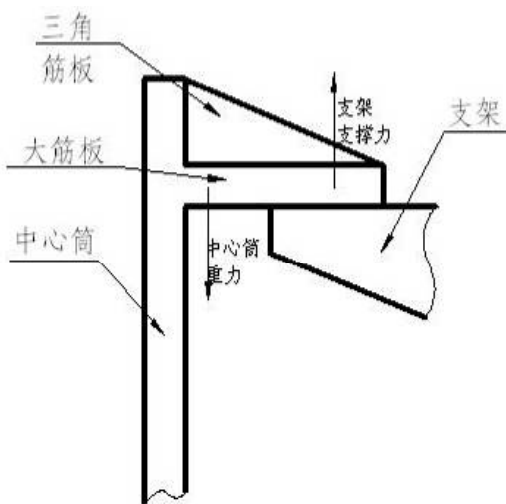
筒体膨胀、变形后，会使得筒体周边处浇注料裂纹、脱落，造成烟气短路

分离器对飞灰未经惯性分离捕捉后直接从中心筒缝隙中飞逸出去，造成分离器效率下降，锅炉带负荷能力下降，飞灰含碳量会上升，尾部受热面磨损会加剧等一系列问题



分离器提效改造

- ◆ 提效改造调整了分离器入口烟道尺寸结构（设置了导流装置）、优化了中心筒筒体结构和布置形式，改进了固定方式（自由吊挂）
- ◆ 采用Cr25Ni20MoMnSiNRe材料整体铸造中心筒（筒体厚度16mm），避免了变形的发生，有效防止了烟气短路问题



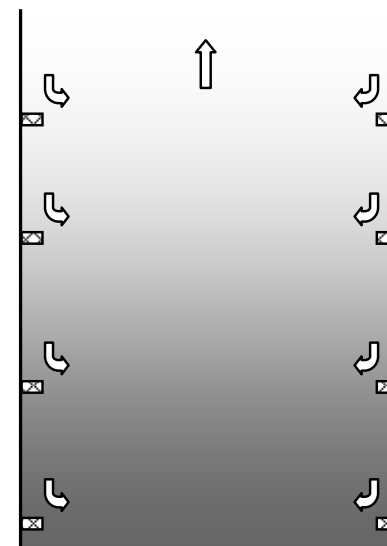
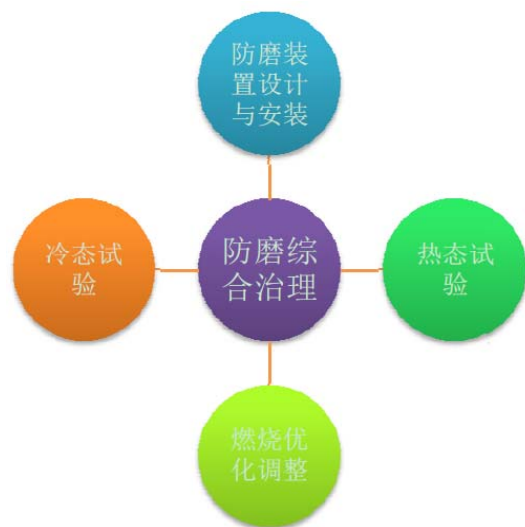
返料回路改造

- 返料回路主要作用包括：(1)物料回送；(2)运行密封；(3)保证分离效率
- 根据锅炉运行的实际情况，对返料回路进行了调整，改善了回料阀风帽结构形式、风室构造，增加了平衡风管，优化了返料回路，确保其运行稳定



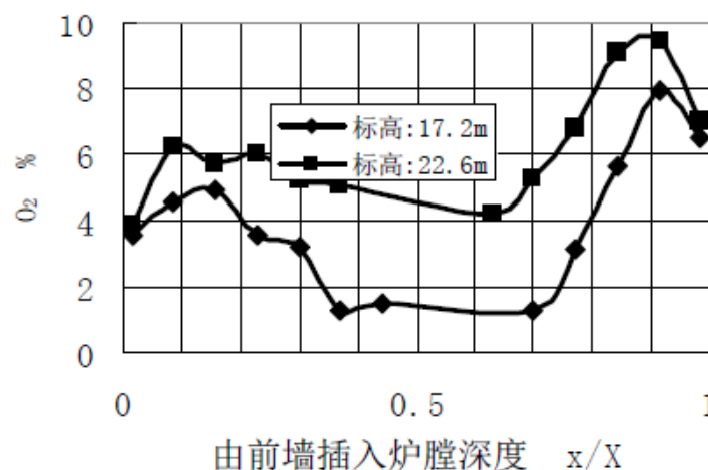
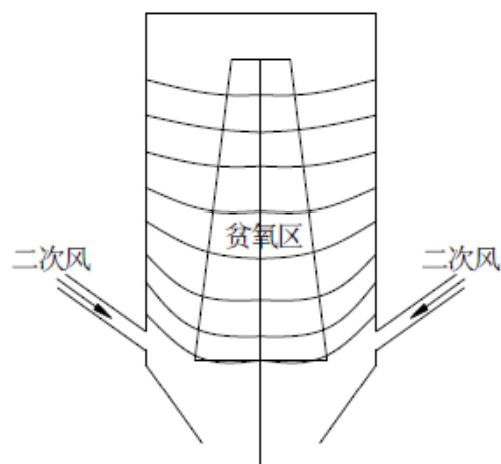
防磨综合治理

- 加装主动多阶防磨梁。改造项目防磨综合治理技术的难点在于，如何设计结构合理、效果突出的防磨装置，在不影响锅炉负荷、不增加运行床温基础上，保证防磨综合治理效果
- 从实际应用效果看，防磨综合治理未对锅炉运行产生任何不利影响



基于锅炉深度运行优化的燃烧自动控制改造

- 优化锅炉的燃烧状态，提高锅炉运行的安全性与经济性；
- 调整锅炉运行参数至最佳范围；
- 降低锅炉的飞灰及底渣含碳量；
- 降低SO₂和NO_x污染物排放水平；
- 巩固提高“CFB锅炉节能环保一体化改造”效果。

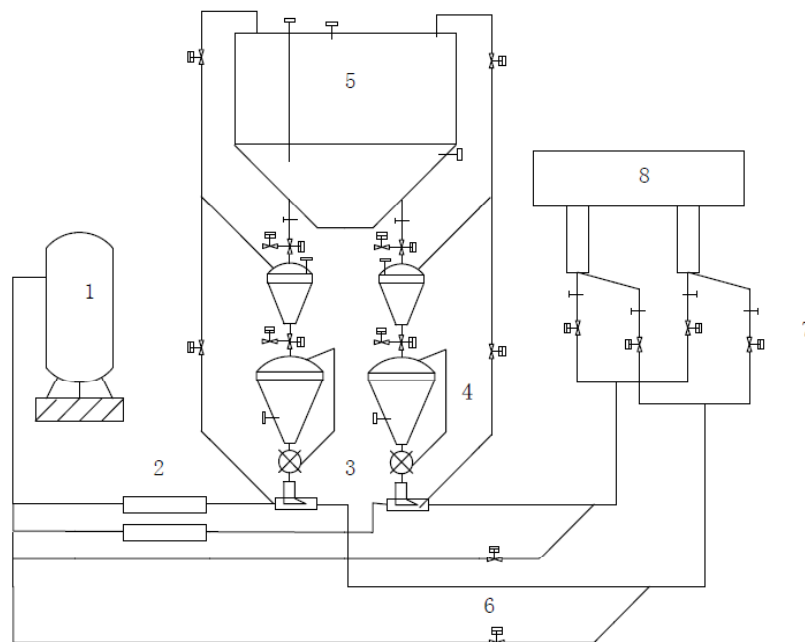


炉内脱硫系统改造

石灰石粉属于较难输送的物料，具有如下特点：

- ①气力输送的悬浮速度梯度较大，给输料管风速的选择带来困难，甚至造成管道的堵塞
- ②石灰石粉颗粒容易沉积，易吸潮板结，易造成下料堵塞或堵管
- ③对管道的磨损较大

在设计和布置石灰石输送系统时要充分考虑石灰石粒度的变化、输送的方式、给料系统的选择、输送管路的布置、入炉口及入炉位置的配置、关键参数的选取



低氮燃烧改造

- CFB锅炉产生的 NO_x 主要是燃料型 NO_x ，其生成机理非常复杂，控制燃料型 NO_x 生成最有效的措施是分级送风燃烧
- CFB锅炉送入密相区下部的一次风量如果只占燃烧所需的45%~55%，就能保证在还原气氛中氮燃烧的中间产物不被氧化成NO，进而抑制了 NO_x 的生成
- 锅炉设计结构和运行方式对 NO_x 排放的影响较为明显
- 国内投产的CFB锅炉为降低运行成本一般不设置外置床，调节手段有限，部分电厂为了降低飞灰底渣含碳量，更是人为选择了较高的密相区温度，这就使得CFB锅炉的低 NO_x 燃烧特性发挥受到了限制

低氮燃烧改造

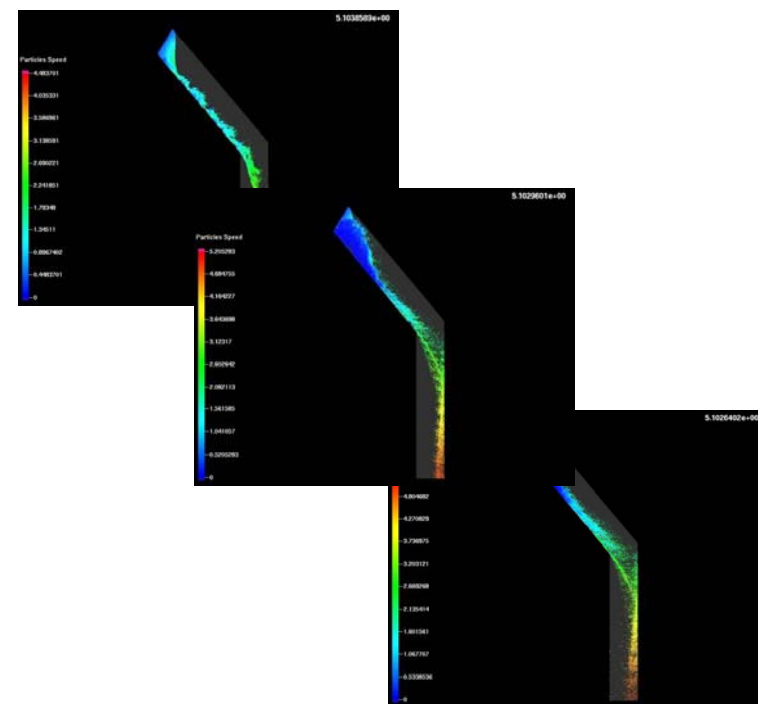
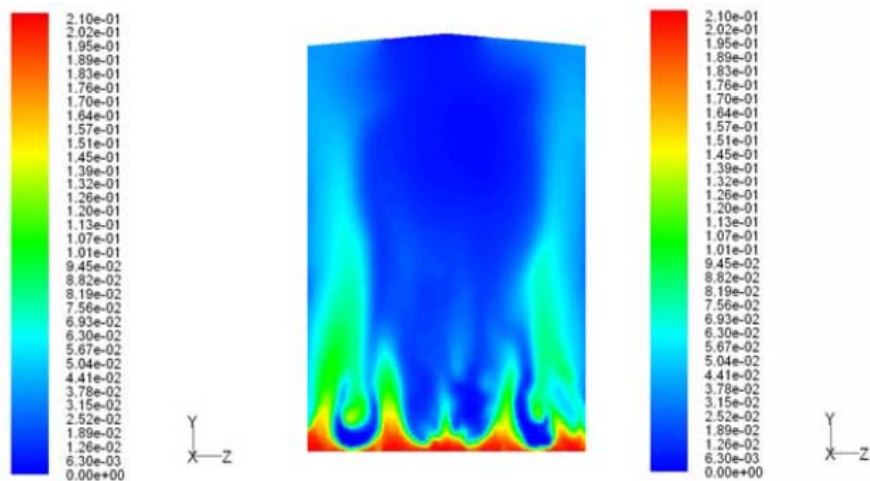
结合改造项目运行现状，华能清能院改造调整了一二次风分配，消除了上下二次风配比和各级二次风分支管配比的不均匀性

减少了床温的偏差，改造前床温偏差大于 100°C （最大时可以达到 150°C ），改造后则可以稳定控制在 40°C 以内，对于降低 NO_x 排放浓度发挥了重要作用。



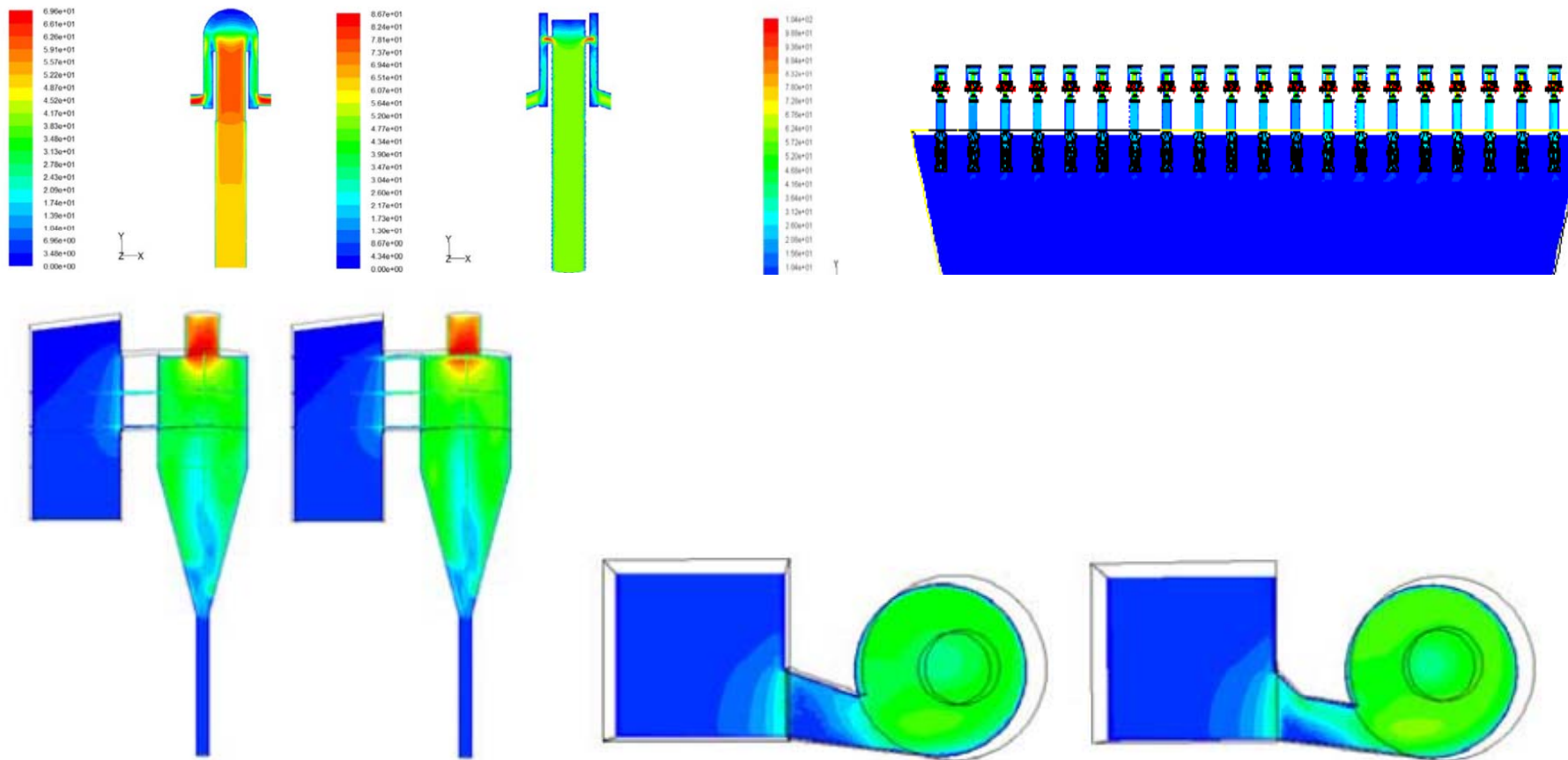
全尺度数值模拟优化

- 随着计算机性能的大幅度提高和计算方法的改善，数值模拟采用模型的可靠程度明显提高，目前常规的数值模拟精度已经可以满足工业环境下应用的需要
- 华能清能院结合CFB锅炉自身特点，利用Fluent软件和Barracuda软件对“CFB锅炉节能环保一体化改造”中所涉及方案进行了全尺度数值模拟优化



全尺度数值模拟优化

- 通过实炉数据反复修正计算模型，所得到的结果与实际情况已知，完全真实可信



主要内容

一、研究背景

二、节能环保一体化改造核心技术

三、节能环保一体化改造工程应用

四、技术展望

五、结论

CFB锅炉一体化改造示范项目测试结果

- 改造项目锅炉一体化改造第一阶段工作结束后，6月5日13:00~22:00进行了锅炉启动后的首次测试试验，试验安排在220t/h负荷下进行（ECR工况）
- 烟气污染物排放浓度的检测采用CEMS仪器与就地仪表同步测量、互相校核记录的方式进行
- 试验用煤的收到基低位发热量 $Q_{\text{net, ar}}$ 为4285kCal/kg（17.9MJ/kg），收到基全硫 $S_{\text{t, ar}}$ 为1.06%

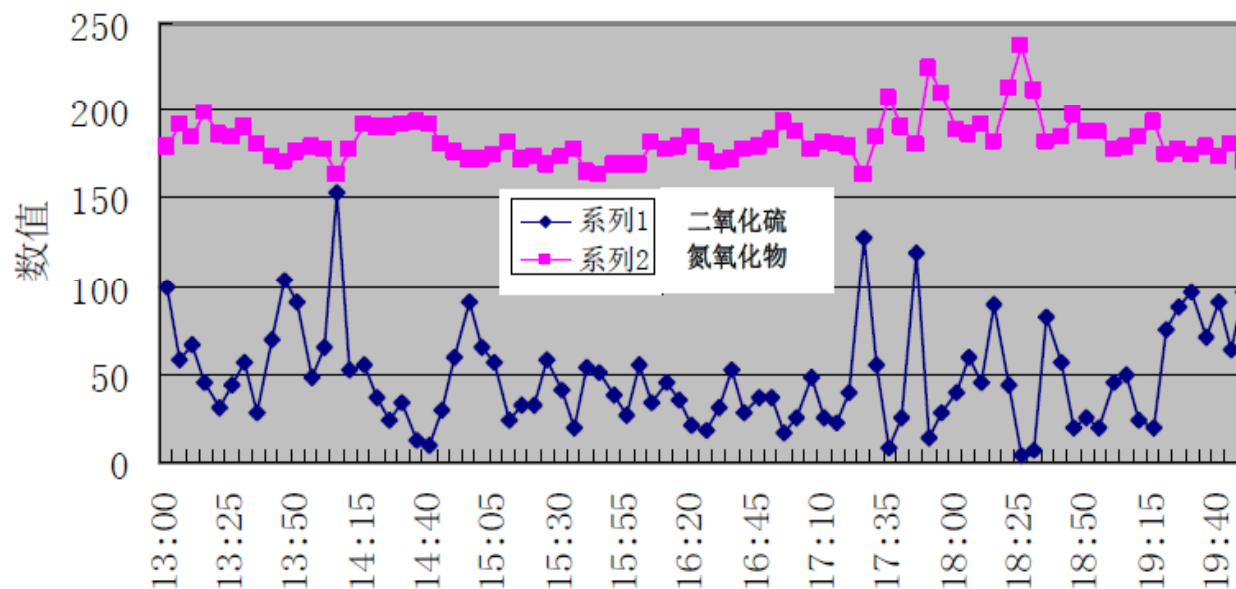
样品名称	全水分	灰分	挥发分	固定碳	低位发热量	全硫
符号	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	$Q_{\text{net, v, ar}}$	$S_{\text{t, ar}}$
单位	%	%	%	%	kcal/kg	%
均化堆1号样	7.20	32.46	22.10	38.24	4231	1.23
均化堆2号样	7.20	33.16	22.35	37.30	4193	1.17
原煤皮带1号样	5.90	31.66	23.25	39.19	4430	0.95
平均值	6.77	32.43	22.56	38.24	4285	1.06

CFB锅炉一体化改造示范项目测试结果

测试时间	煤量	负荷	平均床温	最高床温	甲侧氧量	乙侧氧量
单位	t/h	t/h	℃	℃	%	%
13:00	35.0	219	942	962	4.4	4.1
14:00	35.0	220	945	964	4.1	3.7
15:00	35.0	219	940	958	4.0	3.9
16:00	35.1	220	947	965	3.5	3.7
17:00	35.3	219	945	963	3.6	4.2
18:00	34.0	220	949	968	3.8	4.0
19:00	34.2	218	939	955	4.4	4.3
20:00	34.6	221	941	958	4.3	4.2
21:00	34.6	220	937	956	4.6	4.8
22:00	34.4	217	928	947	4.4	4.7
平均值	34.7	219	941	960	4.1	4.2

CFB锅炉一体化改造示范项目测试结果

- 锅炉平均燃煤量34.7t/h，入炉煤收到基全硫含量1.06%，平均石灰石用量3.9t/h，钙硫摩尔比为3.3
- 床温平均941℃，二氧化硫排放波动范围完全可以控制在200mg/m³以内，氮氧化物维持在150-200mg/m³，个别点有超标（SO₂排放浓度超低时）
- 较一体化改造前有明显下降，完全实现“双二百”

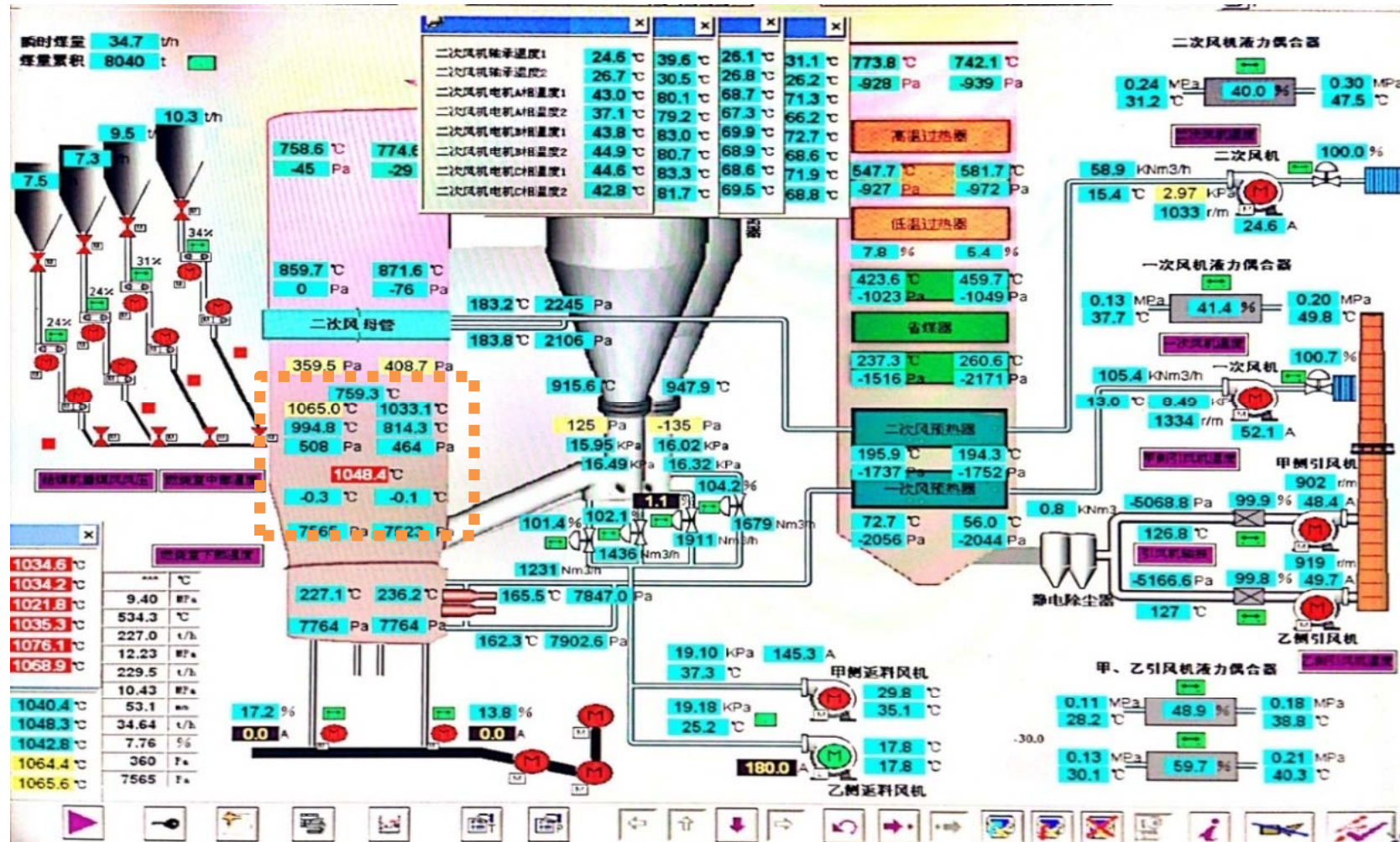


CFB锅炉一体化改造前后主要运行数据比较

项目	单位	改造前	改造后	备注及改造效果
主汽流量	t/h	227	237	锅炉最大出力提升
环境温度	℃	-5	20	改造前冬季，改造后夏季
平均床温	℃	1048	950	床温显著降低
风室压力	kPa	7.76	9.62	布风板阻力增加，布风均匀性改善
炉膛压差	Pa	508	1550	差压增大
床温偏差	℃	>100	<40	显著改善
二次风分支管均匀性	-	差	好	冷态时逐一进行调整
空预器入口平均氧量	%	6.6	3.9	下降
排烟温度	℃	127	150	增加
NO _x 排放浓度	mg/m ³	385	187	显著降低
SO ₂ 排放浓度	mg/m ³	-	95	显著降低
钙硫摩尔比	-	5~6	3~3.5	减少30%以上
飞灰含碳量	%	3.8	2.9	下降
底渣含碳量	%	4.6	3.1	下降
锅炉效率（简算）	%	87.6	89.5	增加1.5%以上

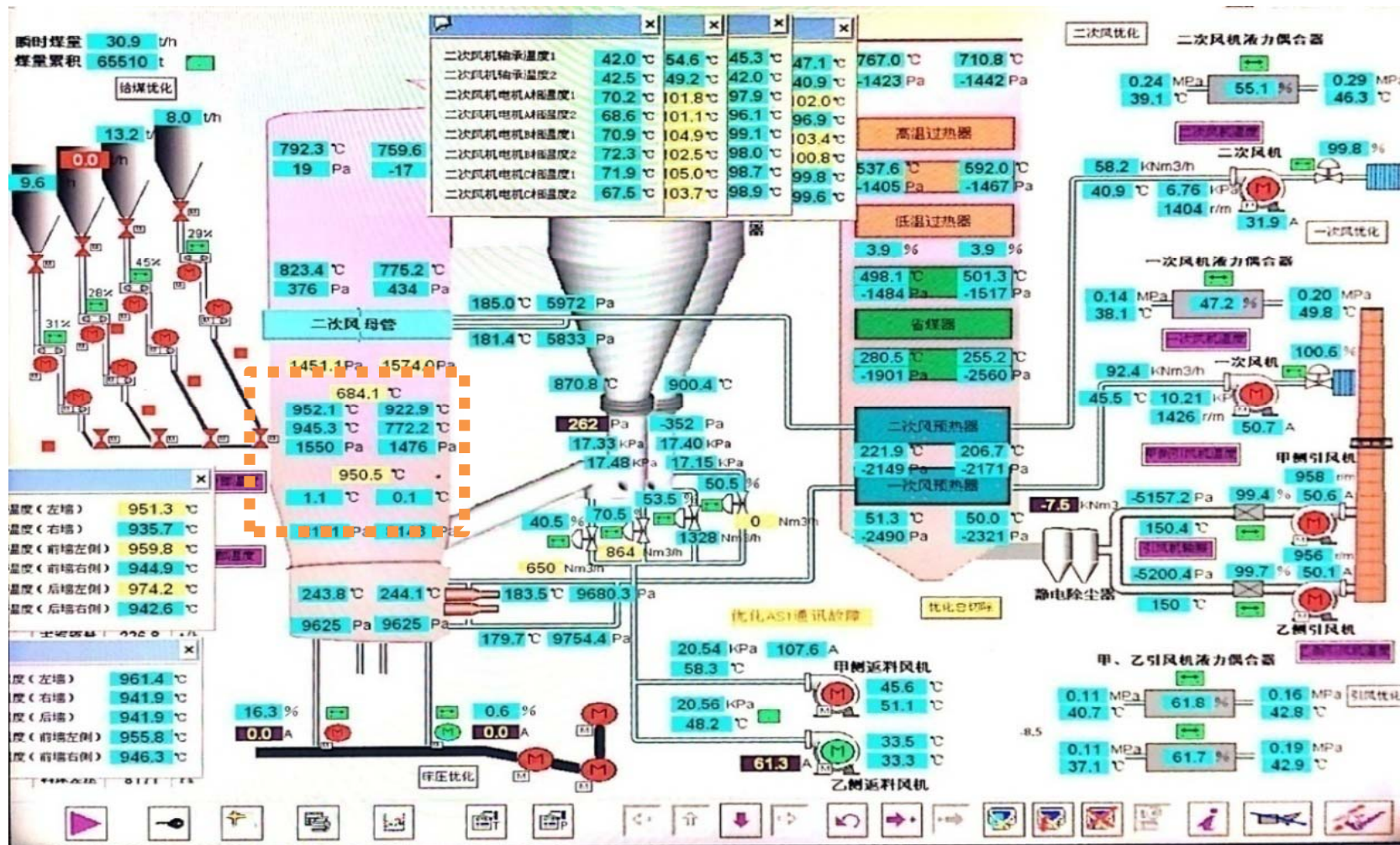
改造结果：“四降” + “两升”

CFB锅炉一体化改造前后主要运行数据比较



改造前运行画面

CFB锅炉一体化改造前后主要运行数据比较



改造后运行画面

一体化改造技术研发过程

➤ 基础研究阶段

华能清能院在2008年~2010年期间，结合承担国家“十一五”科技支撑计划和国家“863”计划的良好契机，华能清能院针对国内CFB锅炉存在的各种问题开展了大量基础研究工作

通过总结首台国产自主知识产权210MW和330MW CFB锅炉设计开发经验，对CFB锅炉核心部件和机理进行了深入研究，初步奠定了“CFB锅炉节能环保一体化改造技术”的理论和设计基础

一体化改造技术研发过程

➤ 独立实践阶段

2011年~2013年，华能清能院结合国内CFB锅炉暴露的典型问题分布开展了独立改造实践

先后完成了高效炉内脱硫技术、炉膛防磨综合治理技术、风帽改造技术、分离器提效技术、靶区磨损防治技术、渣自流控制技术、锅炉增容改造技术、烟气余热回收利用技术等研发和工程实践，累计应用达150台（套）

发现并成功解决了影响CFB锅炉发展的诸多生产实际问题，广泛积累了“CFB锅炉节能环保一体化改造技术”的工程实践经验

一体化改造技术研发过程

► 示范推广阶段

2014年，借助《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）全面实施的契机，华能清能院成功完成了“CFB锅炉节能环保一体化改造技术”的工程示范

实施“CFB锅炉节能环保一体化改造技术”可以显著改善在役CFB锅炉的运行特性，提高锅炉效率、延长锅炉连续运行周期，特别是在不新增炉外脱硫湿法装置和SNCR脱硝系统的前提下，可以实现SO₂和NO_x的“双二百”稳定排放

“CFB锅炉节能环保一体化改造技术”已正式转入示范推广阶段

目前华能清能院已完成工程示范改造1台，签订改造合同7台，达成改造意向9台（完成方案设计），预计2014年底前将完成不少15台锅炉的一体化改造工作，实现技术的全面深化应用

一体化改造技术的特点

- (1) 改造所有设计均为改造锅炉量身定做，采用“一炉一方案”，针对性强
- (2) 从锅炉设计角度出发，全面解决影响CFB锅炉运行的各种疑难问题
- (3) 总体技术适应性广，几乎能够用于国内在役各型CFB锅炉
- (4) 提升环保特性的同时，还可以提高锅炉效率和自动化水平，做到了真正的节能减排
- (5) 改造周期短，见效快，结合机组小修也可实施

一体化改造技术的意义

- (1) 改造投资少，避免了新增炉外脱硫系统和SNCR脱硝系统的高昂设备投入，且不存在后期运行费用，不增加维护工作量
- (2) 缩小了CFB锅炉与煤粉锅炉之间的技术指标差异
- (3) 改造后SO₂排放浓度可以降低20%~70%，NO_x排放浓度可以降低15%~50%，石灰石消耗量可以降低20%~50%
- (4) 改造的同时能够同步解决锅炉受热面磨损、床温偏高、物料循环差、风帽漏渣、流化不均、灰渣含碳量高等问题，全面提高锅炉运行的经济性和可靠性

主要内容

一、研究背景

二、节能环保一体化改造核心技术

三、节能环保一体化改造工程应用

四、技术展望

五、结论

结论

- “CFB锅炉节能环保一体化改造”是华能清能院原创性提出的CFB锅炉节能环保新技术，显著降低了在役CFB锅炉烟气的SO₂和NO_x排放浓度，减少了石灰石消耗量，改造后锅炉环保指标能够全面满足《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223-2011）要求
- 一体化改造技术能够显著提高锅炉效率，改善锅炉的煤种适用性和运行特性，大幅度延长锅炉连续运行周期
- 华能清能院愿意利用一体化改造技术与广大电力生产企业一起促进循环流化床锅炉技术进步，为中国电力的全面、协调和可持续发展多做贡献

特别感谢

- 中电投国际矿业有限公司
- 中国电力投资集团公司火电部
- 中国华能集团公司科技环保部
- 神华集团公司电力管理部
- 中电投山西铝业有限公司

致谢（排名不分先后）

- 国能（神东）电力有限公司
- 神华亿利能源有限责任公司
- 中电投江西分宜电厂
- 中国石油天然气股份有限公司独山子石化分公司
- 华能苏州热电有限责任公司
- 华电乌达热电有限公司
- 中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司
- 山西兆丰铝业有限责任公司
- 神华乌海能源有限责任公司
- 内蒙古京海煤矸石发电有限公司
- 华电大同第一热电厂有限公司
- 神华新疆米东热电厂
- 北方联合电力公司蒙西发电厂
- 神华国华（北京）电力研究院有限公司
- 中盐吉兰泰氯碱化工有限公司
- 神华神东电力有限责任公司上湾热电厂
- 湖南耒阳综合利用电厂
- 西安热工研究院有限公司

中国华能集团清洁能源技术研究院

低质煤清洁高效利用技术部

北京市昌平区北七家镇未来科技城华能创新基地实验楼A楼

黄 中

高级工程师

中国电机工程学会高级会员

CFB协作网专家委员会委员

手机：13636706755

电话：010-89181277 029-82102325

传真：010-89181000 029-82102702

邮件：huangzhong@hnceri.com, chinacfb@gmail.com

QQ：89181514

