



扫描二维码订阅微信公众号
关注《中国循环流化床发电》

中国循环流化床发电技术 发展现状与展望 (2015)

中国华能集团清洁能源技术研究院

黄中

2015年9月17日 银川

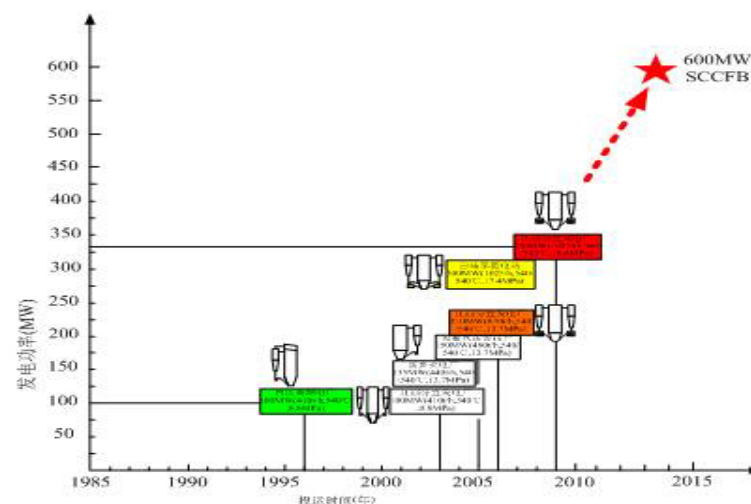
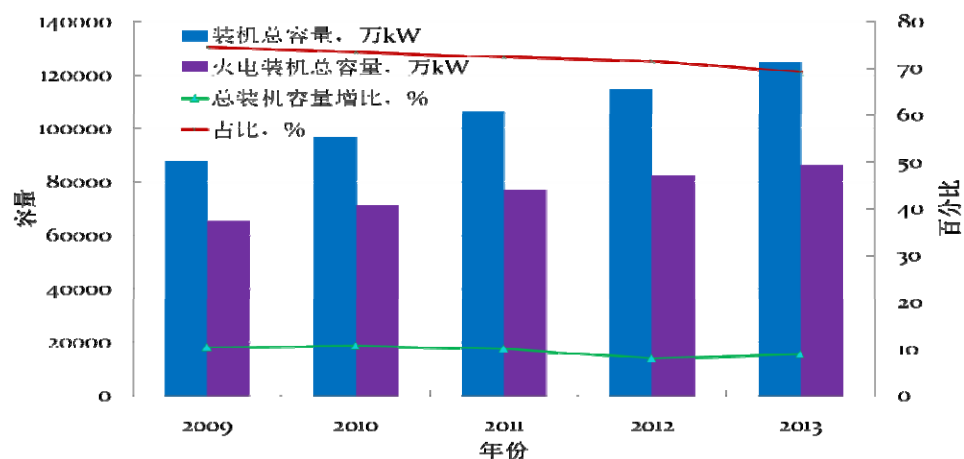
-
- 一、中国循环流化床锅炉的分布及特点
 - 二、在役循环流化床锅炉技术指标
 - 三、循环流化床发电的行业动向与发展分析
 - 四、结论与建议

-
- 一、中国循环流化床锅炉的分布及特点
 - 二、在役循环流化床锅炉技术指标
 - 三、循环流化床发电的行业动向与发展分析
 - 四、结论与建议

中国电力及循环流化床发电的发展

■ 2014年中国电力装机容量为13.6019亿kW，相比1949年的185万kW，65年间增长了735倍。火电装机9.1569亿kW，其中煤电装机8.2524亿kW、气电装机5567万kW

■ 中国循环流化床锅炉发电从1996年的100MW起步，2013年进入超临界时代



中国在役大型循环流化床锅炉区域统计

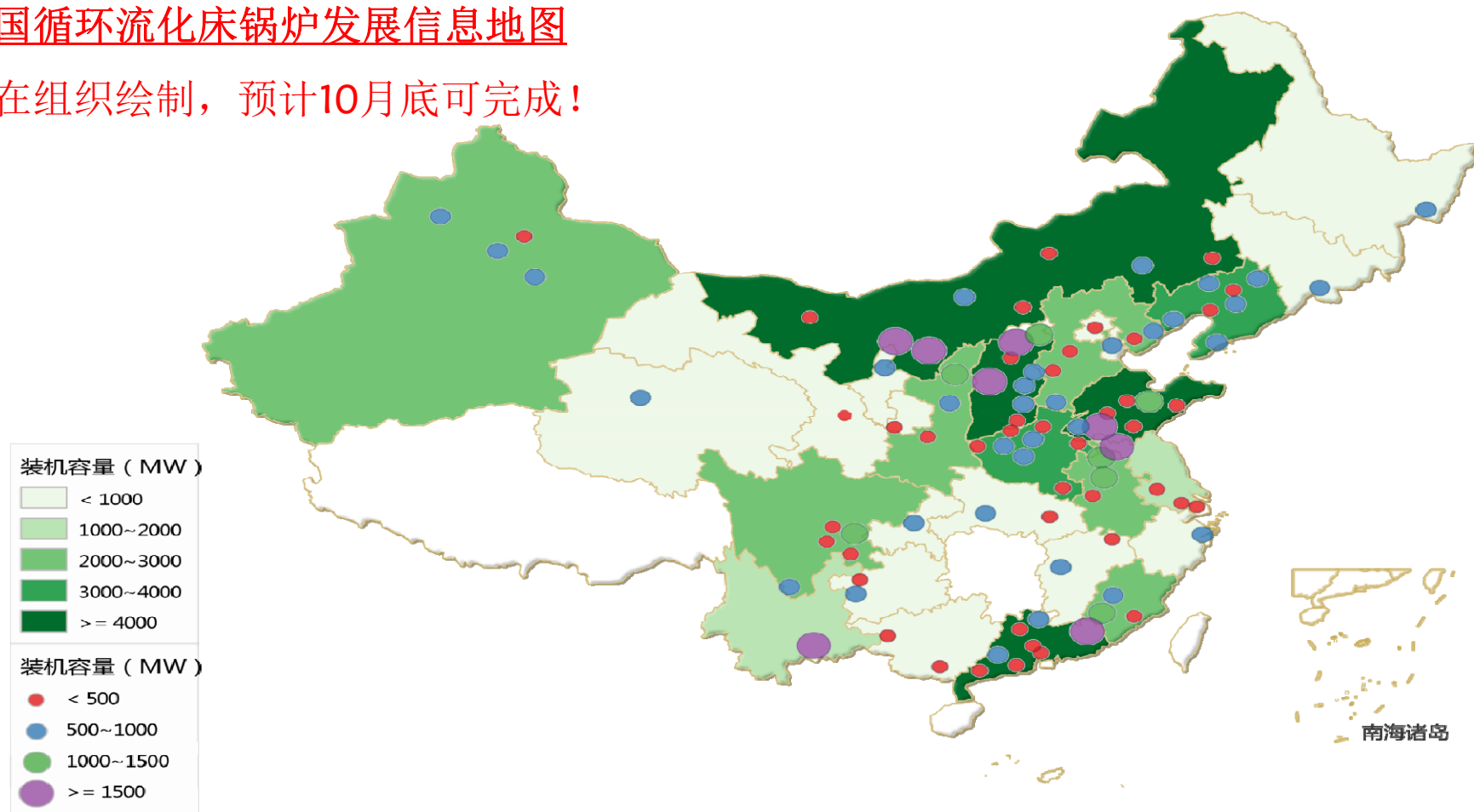
- 截止2014年12月底，全国除西藏、湖南、海南外均有大型循环流化床锅炉分布
- 92个地级以上城市拥有100MW以上等级循环流化床机组

所属地区	装机容量 (MW)	锅炉数量 (台)
华北	22225	117
华东	13430	78
西北	6310	33
西南	6065	30
东北	4800	26
华南	4910	26
华中	3935	28

中国在役大型循环流化床锅炉区域统计

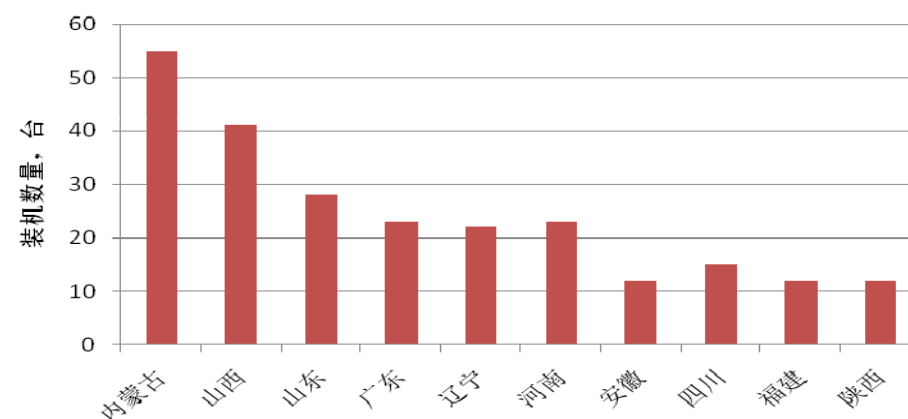
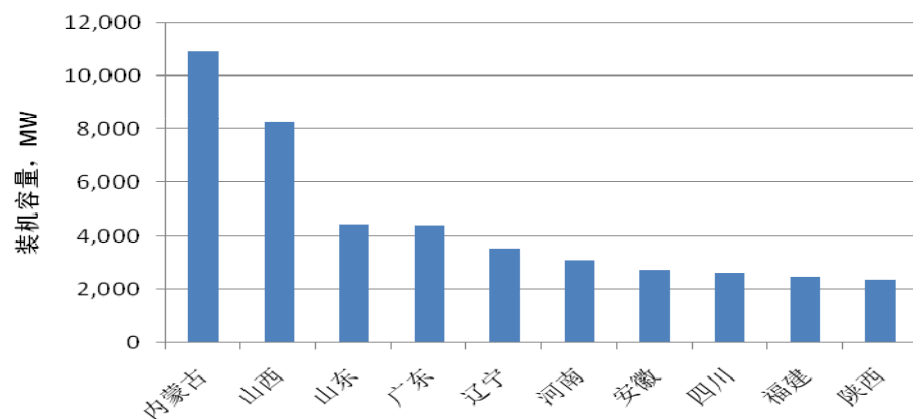
中国循环流化床锅炉发展信息地图

正在组织绘制，预计10月底可完成！



中国在役大型循环流化床锅炉区域统计

- 100MW等级以上循环流化床锅炉总装机容量达到了61675MW，装机台数338台（同期国内在役100MW~300MW等级机组约为1500台，6MW~100MW等级机组约为5000台）
- 内蒙、山西、山东、广东占据国内循环流化床锅炉装机容量和装机台数的前四位



循环流化床锅炉技术引进情况

1987年，北京锅炉厂引进德国巴威中温旋风筒循环床技术

1992年，哈尔滨锅炉厂为原芬兰奥斯龙作分包制造了首台220t/h循环床锅炉

1996 年，内江电厂购买了原芬兰奥斯龙公司设计的400t/h循环床锅炉

1996年， 东方锅炉厂购买了美国FW 公司220-400t/h 汽冷旋风筒循环床设计技术

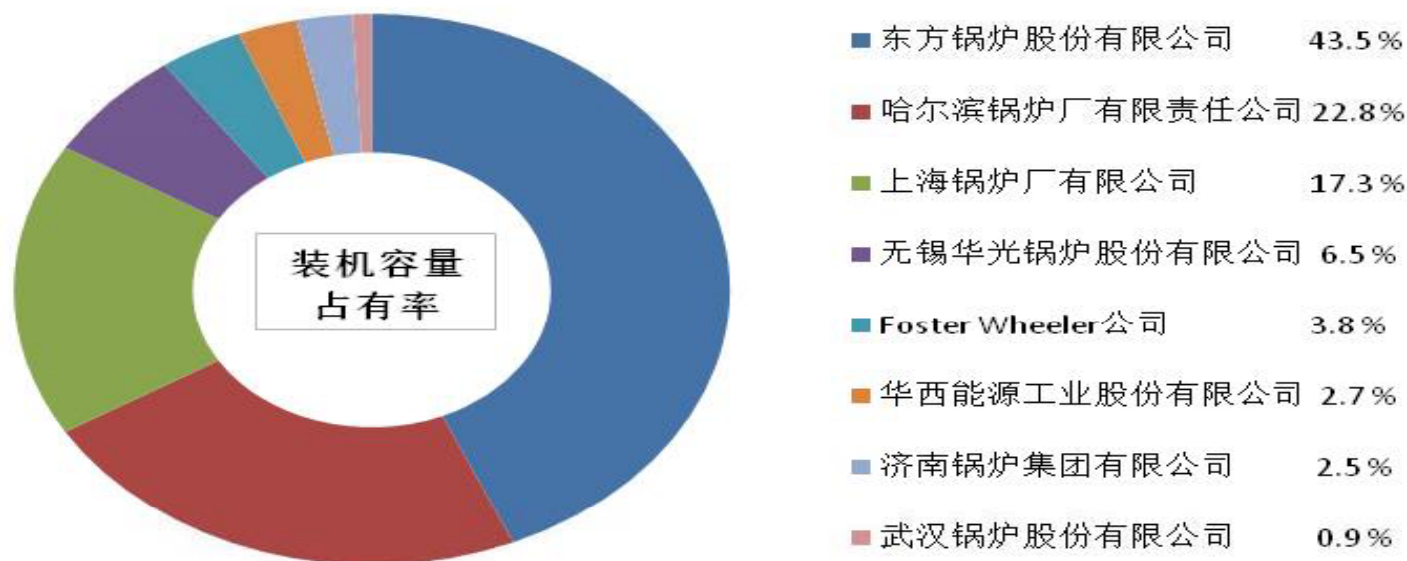
2001年， 哈尔滨锅炉厂从德国EVT公司购买了100-150MW再热循环床设计技术

2002 年，上海锅炉厂从原美国 ABB-CE 公司100-150MW 再热循环床设计技术

2003 年，国家发改委组织三大锅炉厂和四大设计院引进了法国阿尔斯通 300MW循环床设计技术

中国在役大型循环流化床锅炉制造厂家

■ 中国已经完全掌握了循环流化床锅炉的核心技术，主要锅炉制造企业形成了生产加工能力



循环流化床锅炉研究情况

起步阶段

1986年5月，赵长遂在《动力系统工程》上撰文《第二代沸腾炉——循环流化床锅炉》

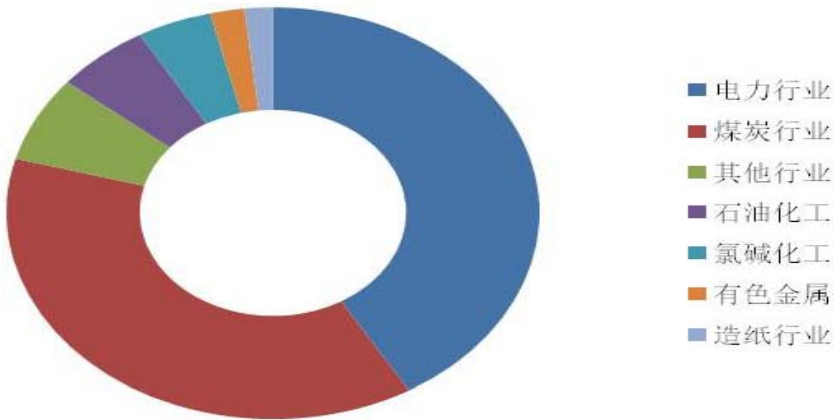
1987年3月，徐智勇、蒋敏华在《电力技术》上撰文《循环流化床锅炉进入电站应用阶段》

当前阶段



中国在役大型循环流化床锅炉用户分析

- 循环流化床锅炉在各行业内广泛使用
- 大型电力集团及煤炭企业均有一定的装机份额
- 装机分散度较高



电力行业

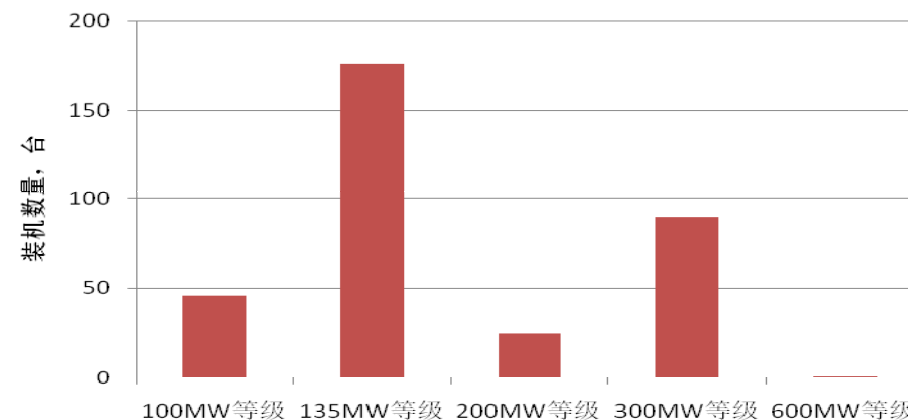
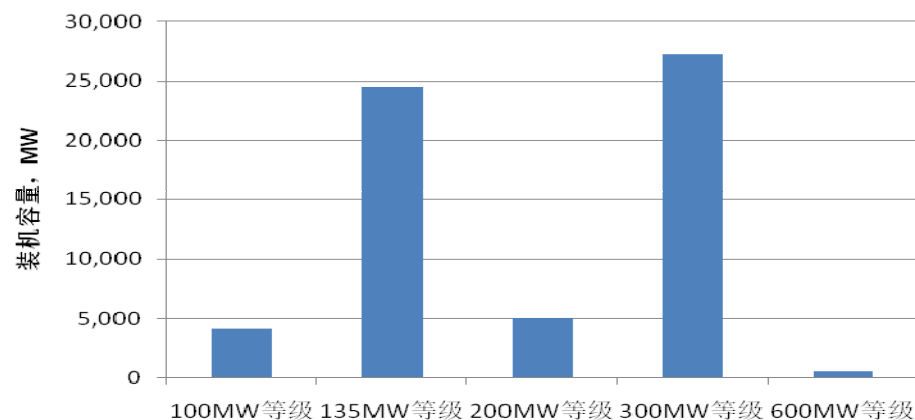
地方电力公司	10435MW
中国华电集团公司	6850MW
中国华能集团公司	2680MW
中国大唐集团公司	2050MW
中国国电集团公司	1830MW
国家电力投资集团公司	1750MW

煤炭行业

地方煤炭企业	8825MW
神华集团有限责任公司	8340MW
晋能集团有限公司	2800MW
北京能源集团有限责任公司	2430MW
淮南矿业集团	1200MW

中国在役大型循环流化床锅炉等级特点

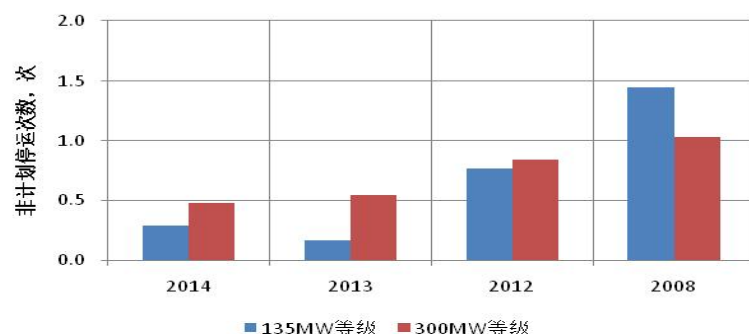
- 大型循环流化床锅炉的主力是135MW等级机组和300MW等级机组
- 上述二者占到总装机容量的84%，占到装机总台数的78.7%



-
- 一、中国循环流化床锅炉的分布及特点
 - 二、在役循环流化床锅炉技术指标
 - 三、循环流化床发电的行业动向与发展分析
 - 四、结论与建议

在役循环流化床锅炉技术指标分析

■ 非计划停运次数



✓ 2014年度全国火电300MW级机组竞赛平均非计划停运次数为0.33次/台·年

■ 可用小时数



✓ 部分机组已经实现了超长周期运行实现

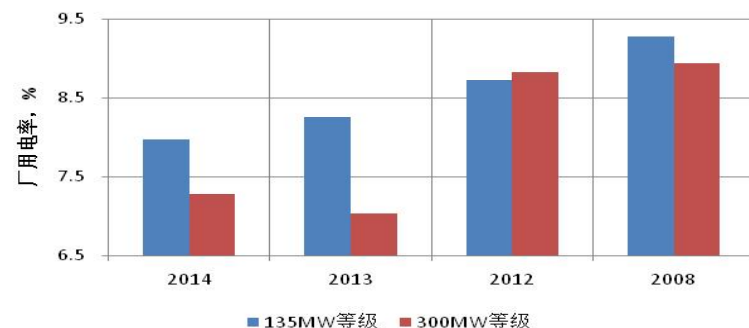
300MW等级，宝丽华#5机组连续运行434天

200MW等级，神华亿利#1机组连续运行341天

135MW等级，潘三电厂#1机组连续运行311天

在役循环流化床锅炉技术指标分析

厂用电率



✓ 2014年度全国火电300MW级机组竞赛：
厂用电率平均水平5.72%

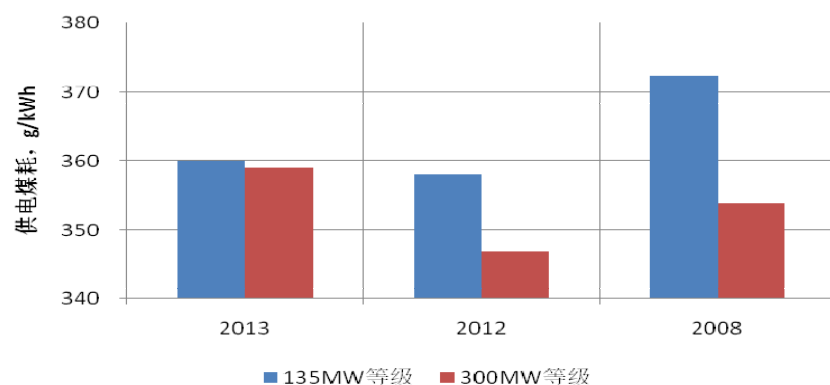
机组类型	平均值 (%)		最优值 (%)		2014 年最优值 电厂名称	机组容 量 (MW)
	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年		
湿冷纯凝	7.88	8.07	6.4	6.85	淮南矿业(集团)电力公司潘三电厂#2	135
湿冷供热	7.83	8.03	7.03	7.09	京能(赤峰)能源发展有限公司#2 机组	135
空冷纯凝	8.29	8.74	7.06	7.11	中国水电建设集团华亭发电有限责任公司#1	145

机组类型	平均值 (%)		最优值 (%)		2014 年最优值 电厂名称	机组容 量 (MW)
	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年		
湿冷纯凝	6.18	6.61	4.21	4.14	神华(福建雁石)发电有限责任公司#5 机组	300
湿冷供热	5.81	6.14	5.32	5.68	大唐鸡西第二热电有限公司#1 机组	300
空冷纯凝	8.34	8.8	6.93	6.89	内蒙古京泰发电有限责任公司#2 机组	300
空冷供热	10.21	9.24	7.13	7.89	山西昱光发电有限责任公司#1 机组	300

2014年度标杆电厂

在役循环流化床锅炉技术指标分析

■ 供电煤耗



✓ 2014年度全国火电300MW级机组竞赛：
供电煤耗平均水平318.3g/kWh

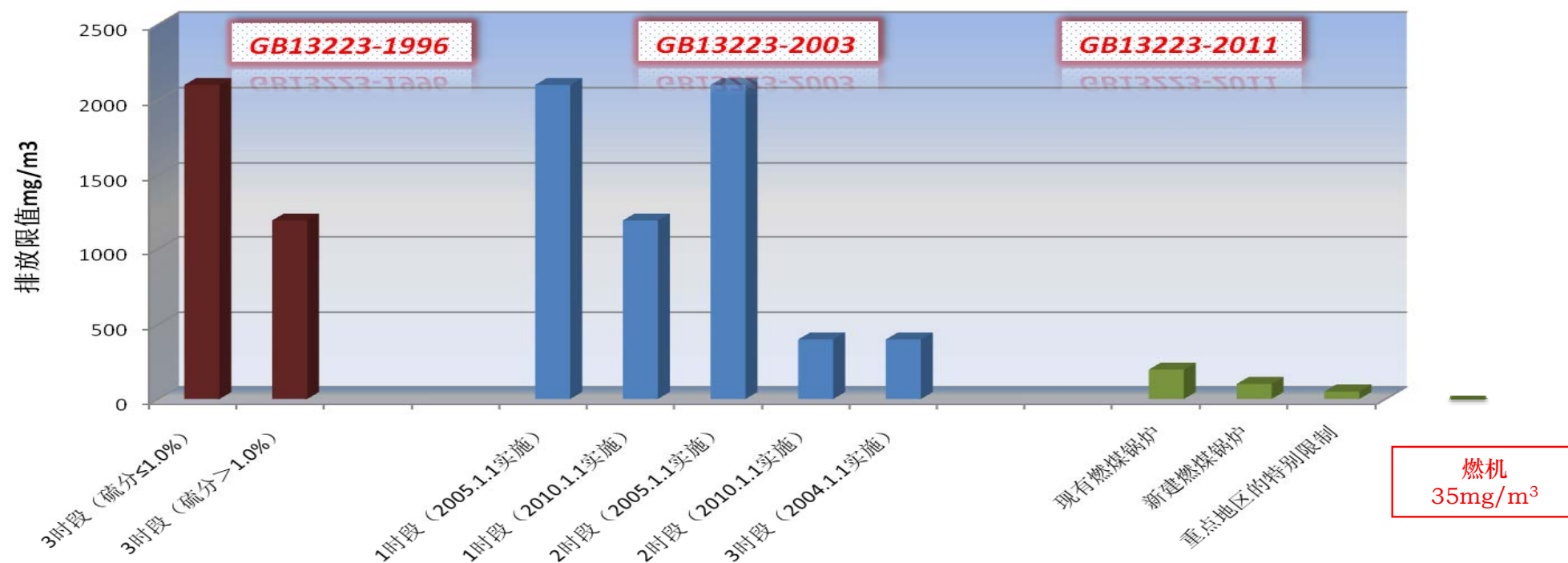
机组类型	平均值 (g/kWh)		最优值 (g/kWh)		2014 年最优值 电厂名称	机组 容量 (MW)
	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年		
湿冷纯凝	365.83	366	352.96	353.97	淮南矿业（集团）有限责 任公司潘三电厂#1 机组	135
湿冷供热	324.15	340	262.85	302	大连泰山热电有限公司#1 机组	135
空冷纯凝	371.09	376	362.52	362.93	保德神东发电有限责任公 司#2 机组	135

机组类型	平均值 (g/kWh)		最优值 (g/kWh)		2014 年最优值 电厂名称	机组 容量 (MW)
	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年		
湿冷纯凝	336.84	337.56	326.85	325.97	淮南矿业（集团）电力 公司顾桥电厂#2 机组	330
湿冷供热	321.44	323.42	309.72	311.35	大唐鸡西第二热电有限 公司#1 机组	300
空冷纯凝	350.87	355.03	340.3	342.02	内蒙古京泰发电有限责 任公司#2 机组	300
空冷供热	345.66	348.13	345.66	336	山西平朔煤研石发电有 限责任公司#3 机组	300

■ 2014年度标杆电厂

在役循环流化床锅炉技术指标分析

■ SO₂污染物排放控制



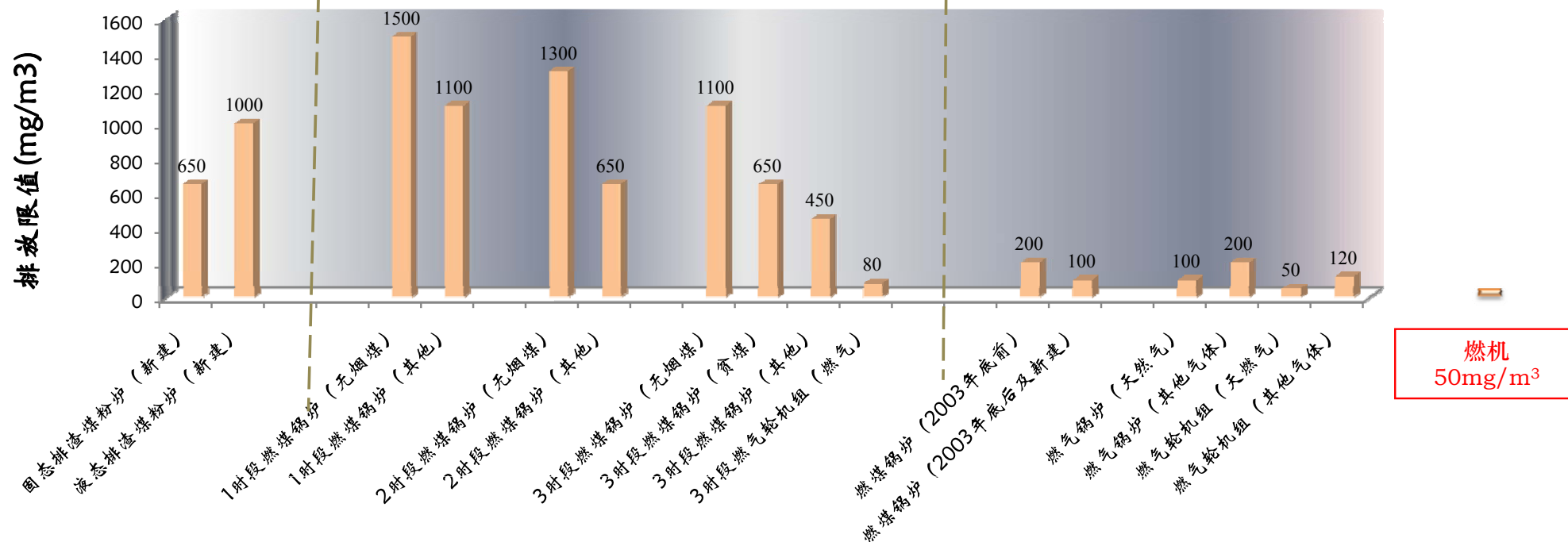
在役循环流化床锅炉技术指标分析

■ NO_x 污染物排放控制

GB13223-1996

GB13223-2003

GB13223-2011

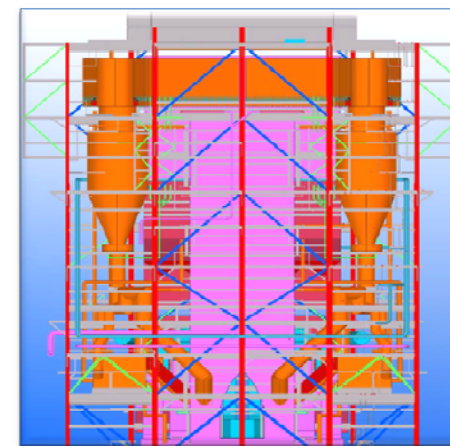
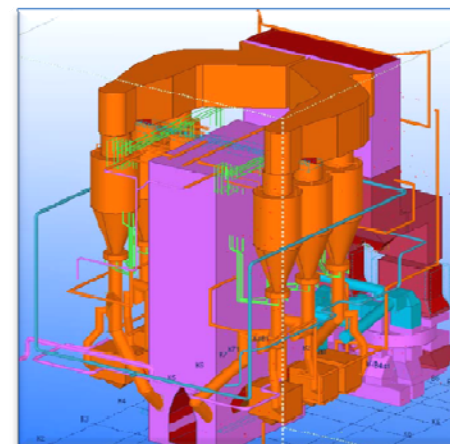


超临界机组运行情况

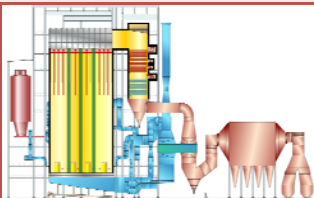
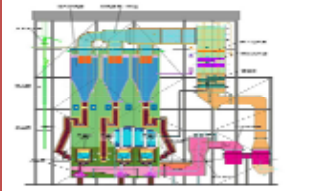
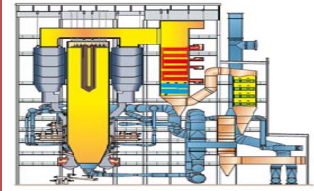
■ 白马电厂

- 最大连续蒸发量 1900t/h
- 主蒸汽压力 25.4MPa
- 主再蒸汽温度 571℃\569℃
- 锅炉热效率 <91.01%

年份	机组	发电量	发电煤耗	供电煤耗	运行小时
2013年	30万	10.99	320	343	4918
	60万	18.26	307	333	4559
2014年	30万	9.42	319	345	4427
	60万	28.24	306	329	6555



超临界机组比较

使用电厂		制造厂家	容量	参数等级	供电煤耗	锅炉效率
Lagisza 波兰		FW	1 × 460MW	超临界	329g/kWh	91% 设计92%
四川白马		东锅	1 × 600MW	超临界	43.3% 供电效率	设计91%
Samcheok 韩国		FW	2 × 550MW	超超临界	42.2% 供电效率	设计93%
设计方案		Alstom	1 × 660MW	超超临界	供电效率 42%以上	设计92%

超临界机组在建项目

- 华电朔州热电
- 山西国金
- 徐州华美热电二期
- 神华神东电力河曲
- 中煤平朔
- 阳煤远盛
- 华电南雄
- 山西河坡
- 中煤大屯
- 同煤朔南
- 国际能源山阴
- 同煤阳高
- 国电上海庙
-

预计2015年可投产一批350MW超临界机组

8月20日，华电朔州#1机组已经完成了一次送电，
具备进入168试运条件

超超临界机组规划项目

■ 2015年8月27日，中国国际工程咨询公司在北京主持召开了东方锅炉660MW等级超超临界循环流化床锅炉方案设计评审会

- 清华大学岳光溪院士、浙江大学岑可法院士等10位国内知名专家组成专家组对该技术方案进行评审，认为其在解决我国高硫无烟煤高效、清洁利用方面具有较好的示范作用
- 660MW等级超超临界CFB锅炉方案设计的顺利通过评审，为我国高参数、大容量CFB锅炉技术和产品的长远发展和继续保持世界领先地位打下了更加坚实的基础



国家有关政策

- 《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223-2011）、《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020年）》
 - 新建燃煤发电机组平均供电煤耗应低于300克标准煤/千瓦时
 - 东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度应基本达到燃气轮机组排放限值，中部地区新建机组原则上应接近或达到燃气轮机组排放限值
 - 2020年，现役燃煤发电机组改造后平均供电煤耗应低于310克/千瓦时
 - 东部地区现役30万千瓦及以上公用燃煤发电机组、10万千瓦及以上自备燃煤发电机组以及其他有条件的燃煤发电机组，改造后大气污染物排放浓度应基本达到燃气轮机组排放限值
 - ……河北等地要求提前至2015年，山西等地要求提前至2017年……

国家有关政策

- 《产业结构调整指导目录》、《行政审批事项公开目录》
 - 简政放权，项目核准主体变更
 - 鼓励类
 - 煤矸石、煤泥、洗中煤等低热值燃料综合利用
 - 30万千瓦及以上循环流化床、增压流化床、整体煤气化联合循环发电等洁净煤发电
 - 单机30万千瓦及以上采用流化床锅炉并利用煤矸石、中煤、煤泥等发电
 - 限制类
 - 小电网外，单机容量30万千瓦及以下的常规燃煤火电机组
 - 小电网外，发电煤耗高于300克标准煤/千瓦时的湿冷发电机组，发电煤耗高于305克标准煤/千瓦时的空冷发电机组

国家有关政策

■ 《煤矸石综合利用管理办法（2014年修订版）》

- 利用矸石为1200kCal/kg，入炉燃料3000kCal/kg

■ 《商品煤质量管理暂行办法》

- 灰分Ad：褐煤 $\leq 30\%$ ，其他煤种 $\leq 40\%$
- 硫分St, d：褐煤 $\leq 1.5\%$ ，其他煤种 $\leq 3\%$
- 运输半径超过600公里后的限制：

褐煤：发热量 $Q_{net, ar} \geq 16.5\text{MJ/kg}$ ，灰分 $\leq 20\%$ ，硫分 $\leq 1\%$

其他煤种：发热量 $Q_{net, ar} \geq 18\text{MJ/kg}$ ，灰分 $\leq 30\%$ ，硫分 $\leq 2\%$

国家有关政策

■ 国家重点研发计划重点专项实施方案《煤炭清洁高效利用和新型节能技术（征求意见稿）》

- 先进燃烧发电技术示范与运行优化（计划实施时间2016 年-2020 年）
- ……研究超超临界循环流化床锅炉关键技术和炉型方案，研究超超临界循环流化床锅炉调试及优化运行技术；研究循环流化床燃烧过程中NO_x 超低排放关键技术与系统集成研究……
- ……突破660 兆瓦超超临界循环流化床锅炉关键技术和系统集成技术，完成技术示范运行……技术达到国际先进水平
- ……研制出660 兆瓦超超临界循环流化床锅炉机组并实现工程示范，锅炉效率92%，供电煤耗300g/千瓦时；形成NO_x 原始排放直接达标的循环流化床锅炉技术与装备……

电力发展新常态

■ 发电设备利用小时持续下降

电力消费需求放缓、非化石能源发电量高速增长（占比已超过25%）

火电发电市场萎缩，火电发电量自1974年以来首次出现负增长电力

2014年全国发电设备利用小时4286小时，为1978年以来最低水平



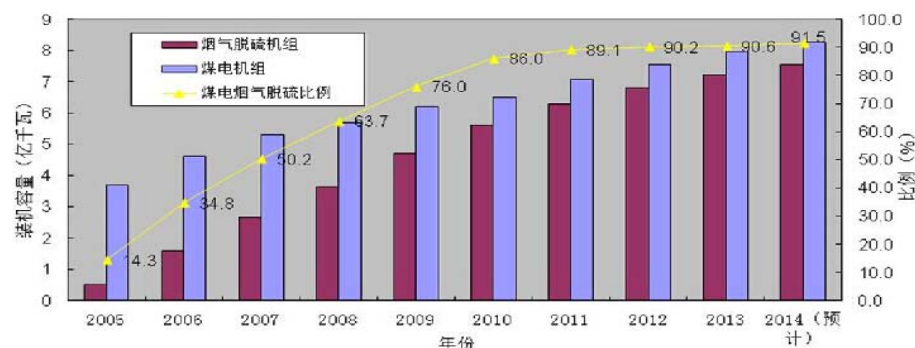
电力发展新常态

■ 环保标准尺度持续收紧

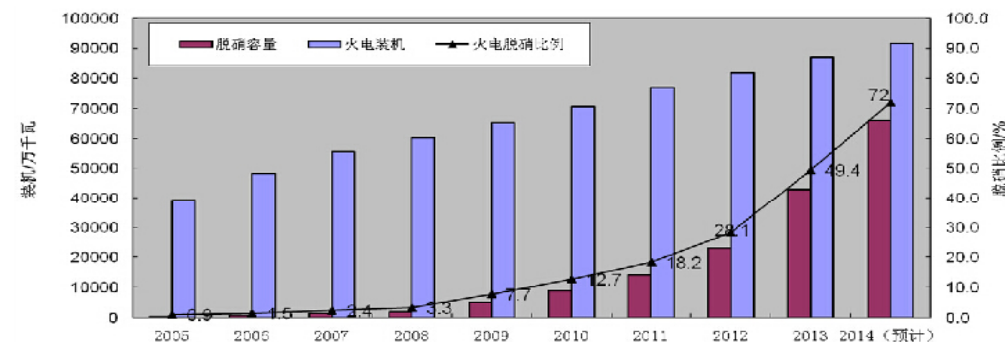
国家及地方标准几度收紧，电力企业进行了大规模环保设施改造，2014年环保建设和改造费用超过500亿元，环保设施每年运行的费用超过800亿元

燃煤发电机组全部采取了脱硫措施，约占全国煤电机组容量的91.5%，比美国2011年高31个百分点；烟气脱硝机组约占全国煤电装机容量的80%，比2013年提高了近22个百分点，比美国2011年高30个百分点

近十年全国烟气脱硫机组投运情况



近十年全国烟气脱硝机组投运情况



电力发展新常态

■ 升级改造压力持续加大

- 实施煤电节能减排升级改造
- 进一步提高燃煤发电机组能效水平
- 降低污染物排放
- 促进我国煤电高效清洁发展

国家能源局文件

国能电力[2015]93号

国家能源局关于印发2015年中央发电企业
煤电节能减排升级改造目标任务的通知

序号	发电集团	节能改造（万千瓦）	环保改造（万千瓦）
	合计	8974	4093
1	华能	1830	539
2	大唐	1121	184
3	华电	1390	647
4	国电	1500	528
5	中电投	1560	616
6	神华	170	900
7	华润	796	579
8	国投	608	100

-
- 一、中国循环流化床锅炉的分布及特点
 - 二、在役循环流化床锅炉技术指标
 - 三、循环流化床发电的行业动向与发展分析
 - 四、结论与建议

面临的问题

- 循环流化床锅炉涉及复杂的气固两相流动，设计、制造、安装、调试、辅机选型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
- 循环流化床技术是一项“发展中”的技术
- “发展中出现的问题要通过发展来解决”
- 循环流化床超临界过程中要稳扎稳打，要避免项目和技术的“一哄而上”和“一哄而下”
- 实践表明：及时总结设计制造、发电运行、检修维护经验，加强电厂之间的经验交流和技术推广，对于提高中国循环流化床发电技术的运行经济性、环保性和可靠性具有重要意义

循环流化床发电新型技术服务与创新体系

■ 行业标准需要加快制（修）定速度

标准编号	标准名称	标准状态
DL/T 964-2005	循环流化床锅炉性能试验规程	现行
DL/T 1034-2006	135MW级循环流化床锅炉运行导则	现行
DL/T 1035-2006	循环流化床锅炉检修导则	现行
DL/T 340-2010	循环流化床锅炉启动调试导则	现行
DL/T 1319-2014	循环流化床锅炉测点布置导则	现行
DL/T 1322-2014	循环流化床锅炉冷态与燃烧调整试验技术导则	现行
DL/T 1326-2014	300MW循环流化床锅炉运行导则	现行
DL/T 5705-2014	循环流化床锅炉砌筑工艺导则	现行
GB 50972-2014	循环流化床锅炉施工及质量验收规范	现行
	135MW 级循环流化床锅炉运行导则(修订)	报批
	循环流化床锅炉燃烧系统技术条件	报批
	循环流化床锅炉滚筒冷渣器运行及技术条件	报批
	流化床锅炉风机技术条件	报批
	循环流化床锅炉防磨喷涂技术导则	报批
	循环流化床锅炉耐火防磨层设计与施工导则	编制
	循环流化床锅炉煤制备系统选型导则	编制
	循环流化床锅炉检修导则（修订）	立项
	循环流化床锅炉炉膛防磨技术导则	立项
	半工业试验台流化床锅炉燃料试烧试验技术规范	立项



“电力行业循环流化床锅炉标准化技术委员会”筹建中

循环流化床发电新型技术服务与创新体系

■ 学术专著需要加强结构更新

近年来，中国电力出版社出版超过20种

《循环流化床锅炉技术600问》

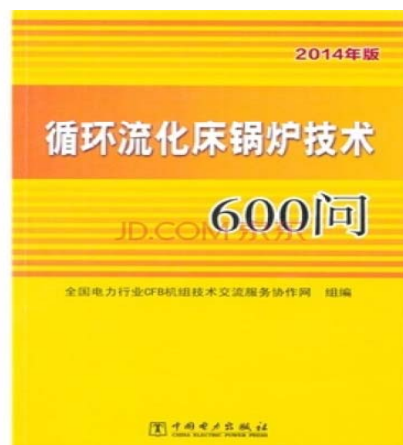
《大型循环流化床锅炉技术与工程应用》

《大型循环流化床锅炉技术》

.....

《中国循环流化床锅炉技术1000问》
进行二次审议

全书6章1064条，30万字，配图240
余张！



循环流化床发电新型技术服务与创新体系

■ 新媒体需要进行普及推广

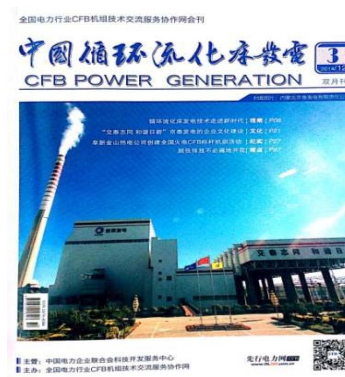
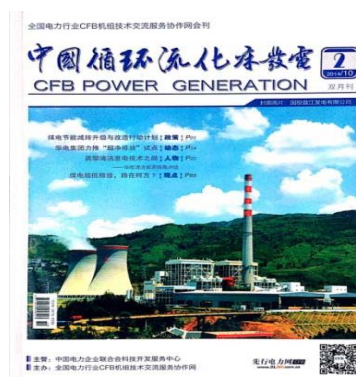
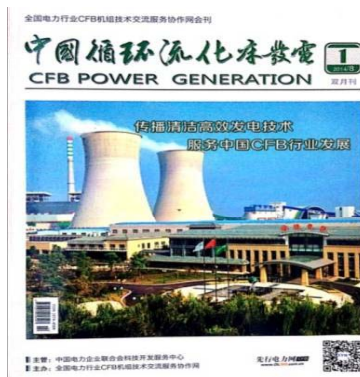
《中国循环流化床发电》微信公众号上线 (xh1hcf)

现有订阅人数超过1200余人 (月点击3万次)

“流化床协作网交流群”

《中国循环流化床发电》杂志

双月刊单期发行量2000册，国内电厂重点覆盖



循环流化床锅炉技术推广和服务体系建设

■ 学术交流活动需要扩大受益人群

- 中国电力企业联合会科技开发服务中心和全国电力行业CFB机组技术交流服务协作网通过每年组织学术交流年会和全国循环流化床发电机组能效水平对标及竞赛，已经形成了具有较大影响力的活动，每年发布的权威数据成为国家能源局的制定相关政策的重要参考
- 2016年全国电力行业CFB机组技术交流服务协作网将组织编制135MW等级、200MW等级和300MW等级循环流化床发电机组的节能降耗对标手册，进一步发挥服务行业的职能

循环流化床发电新型技术服务与创新体系

■ 业主工程师制度需要普及和推广

设计阶段

- 新技术通报
- 设计资料确认
- 选型审查
- 技术文件审查
- 技术图纸审查
- 设计联络会
- 设计变更确认

采购阶段

- 设备调研
- 技术协议完善
- 设备监造
- 技术谈判
- 招标评审

建设阶段

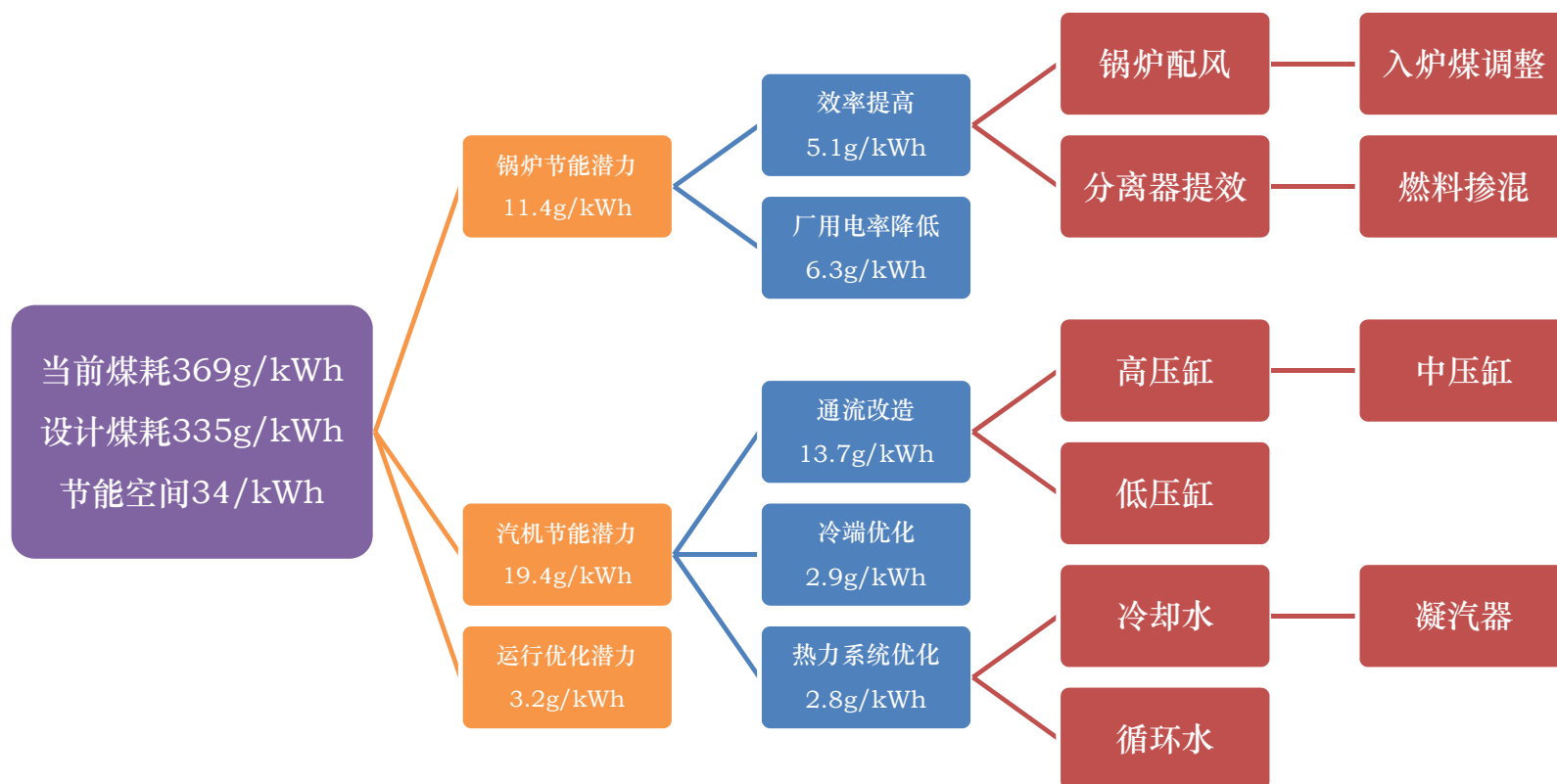
- 专家咨询
- 施工节点控制
- 施工图纸审查
- 施工变更审定
- 人员培训

运行阶段

- 试运计划
- 规程编制
- 分部试运
- 整体调试
- 性能考核
- 竣工验收
- 项目后评价

循环流化床锅炉技术推广和服务体系建设

■ 节能升级改造需要纳入规划日程



行业现状

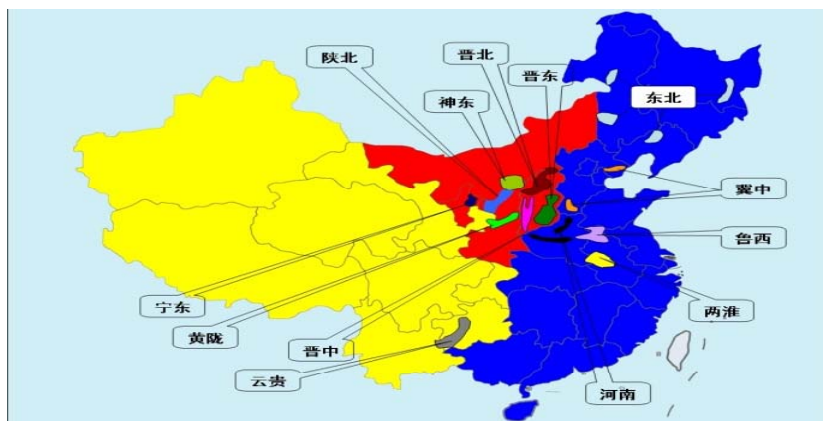
■ 技术已具备较大的存量规模，但细分市场尚待形成

装机容量、参数等级世界第一

国家重点建设和开发了十三个大型煤炭基地

净增煤炭入洗能力15亿吨，将产生5.36亿吨低热值煤

煤粉锅炉的填平补齐



十三个大型煤炭基地



油页岩



石煤

行业现状

- 大高参数等级机组将陆续涌现，但所占比例仍然较低
 - 白马600MW超临界机组累计运行时间已超过12000h
 - 华电朔州等一批350MW超临界机组具备投产条件
 - 预计超临界机组年内投产10台左右，但仅占在役机组比例<3%（2013年中国在役600MW及以上等级煤粉锅炉已达630台）
 - 超临界机组比亚临界机组净热耗率下降约2~3%；超超临界机组比超临界机组可再下降约3~4%

参 数 (MPa/℃/℃)	热耗率 (kJ/kWh)	发电标准煤耗率
亚临界 16.67/538/538	7888~7775	292.3~288.1
超临界 24.2/538/566	7570~7480	281~277.2
超超临界 25/600/600	7400~7360	274.2~272.7

行业现状

■ 超净排放成为改造重点，但遗留问题难解决

- 环境问题的集中爆发倒逼国家政策、法律重大调整
- 广州石化，神华米东，福建龙岩，山西低热值发电项目的应用
- 本质上是现有技术的组合和叠加
- 技术路线存在多元化
- 成本不容忽视，效果有待观察
- 煤质约束边界
- CFB优势何在？

未来发展

■ 超（超）临界及700度循环流化床锅炉技术

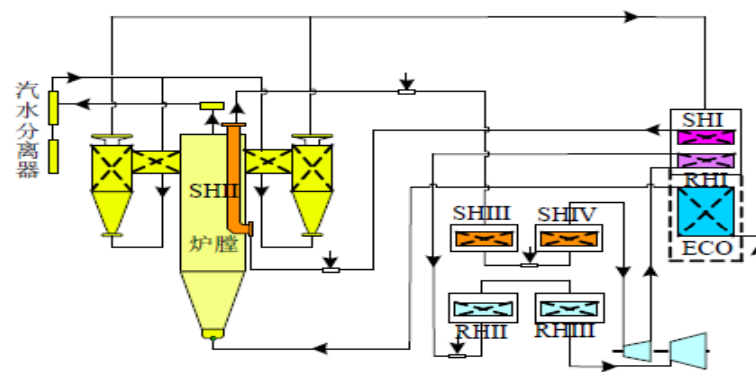
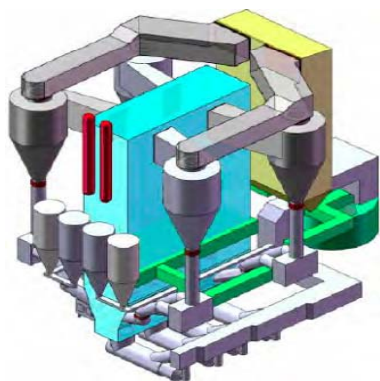
- 未来发展方向
- 显著提高供电效率、减少污染物的排放量

韩国Smacheok 项目4 × 550W超临界CFB 锅炉（在建）

美国Foster Wheeler 800MW 先进超超临界CFB 锅炉技术方案

法国ALSTOM 公司660MW 超超临界CFB 锅炉方案

先进超超临界350MW CFB 锅炉方案（AUSC）



未来发展

■ 燃用特定煤种的大型循环流化床锅炉

➤ 难燃无烟煤

高温型CFB锅炉，燃烧效率高，完全替代W火焰炉

➤ 低热值燃料

大比例燃用煤泥、矸石、油页岩、石煤，系统稳定性好

➤ 高钠煤（准东煤）

能够克服受热面沾污，利用量大

➤ 蒙东褐煤

炉膛尺寸小，燃烧稳定性好、炉膛不易结渣

无干燥系统出力不足、制粉系统爆炸和过热器堵灰风险

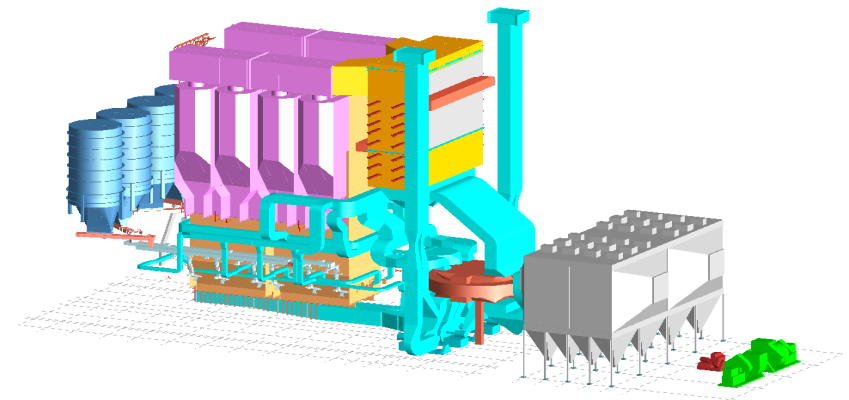
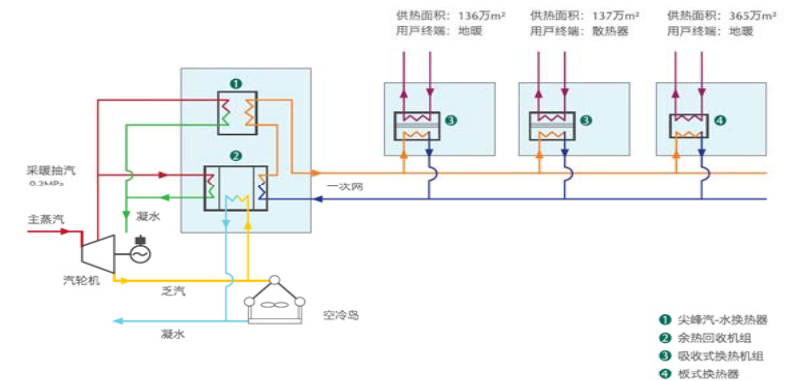
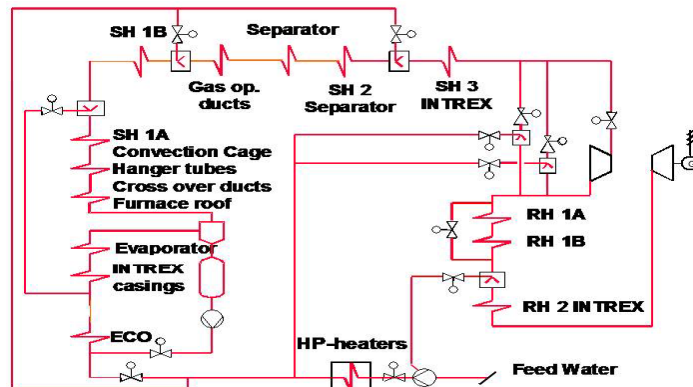
未来发展

■ 深度余热回收利用技术

- 热泵技术
- 相变换热器（第二代低温省煤器技术）
- 与机组设计耦合考虑

波兰Lagisza超临界CFB锅炉

排烟温度85 °C ， 供电效率：43.3%

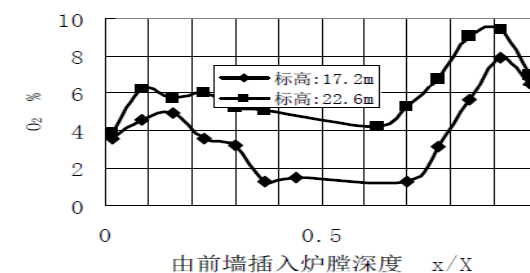
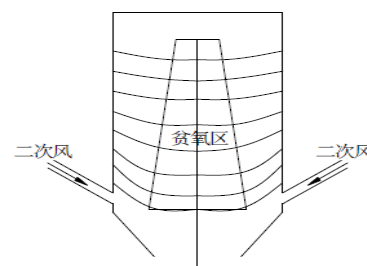


未来发展

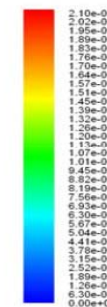
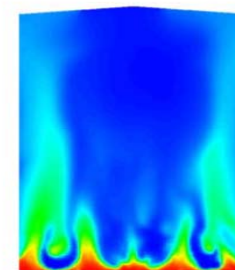
■ 适用技术的推广

- 节能环保一体化改造技术
- 自动控制技术
- 新型燃煤破碎筛分技术
- 烟气再循环技术（低氮燃烧）
- 二次风口改造技术
- 大比例煤泥掺烧技术
- 节油油枪技术

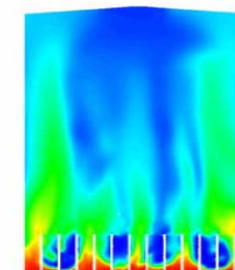
.....



Y
X-Z



Y
X-Z



未来发展

■ 走向海外市场

- 自主开发的循环流化床锅炉技术已经成熟，中国具备了锅炉和电站系统成套设计能力
- 循环流化床发电在机组效率、环保性能、工程投资仍有优势
- 广阔的亚非拉市场等待开发
- 中国制造抱团走出去



-
- 一、中国循环流化床锅炉的分布及特点
 - 二、在役循环流化床锅炉技术指标
 - 三、循环流化床发电的行业动向与发展分析
 - 四、结论与建议

结论与建议

- 经过近20年的发展，中国循环流化床发电技术已经取得了举世瞩目的成绩，未来仍将在火力发电技术领域占据重要地位
- 超净排放“浪潮”将对循环流化床技术发展产生深远影响
- 超临界机组的普及和应用是循环流化床的下一个发展方向
- 未来我们应该“走向蓝海，融入全球”
- 及时总结设计制造、发电运行、检修维护经验，加强电厂之间的经验交流和技术推广，对于提高中国循环流化床发电技术的运行经济性、环保性和可靠性具有重要意义

中国华能集团清洁能源技术研究院

煤炭清洁低碳利用技术研究所

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 所长、高级工程师

全国电力行业CFB协作网专家委员会委员

《中国循环流化床发电》执行主编

中国电机工程学会高级会员

手机：13636706755

邮件：huangzhong@hnceri.com

QQ：89181514

微信公众号：xhlhcfcd





只关注流化床发展的
《中国循环流化床发电》微信公
众号



只讨论流化床技术的
“中电联流化床协作网交流群”