



第十届超超临界机组技术交流2016年会



夏良伟

哈尔滨锅炉厂有限责任公司锅炉设计开发处副处长，高级工程师。长期致力于煤粉锅炉性能设计和锅炉新技术开发方面的工作，在高效超超临界、二次再热锅炉技术方面做了大量扎实、卓有成效的工作，相关科技成果多次荣获国家、省、市科技进步奖，负责国家、省部级以上科研项目6项，取得专利20余项。

国产首台最高参数百万二次再热塔式锅炉设计及运行

2017年2月28日-3月2日 中国·济南

主办单位：中国动力工程学会

协办单位：华能山东发电有限公司

承办单位：中国电力科技网

哈锅1000MW等级二次再热 超超临界锅炉的开发与运行



哈尔滨锅炉厂有限责任公司
2017年3月

主要内容

- 1 锅炉基本方案
- 2 技术发展的国产化情况
- 2 锅炉设计关键技术
- 3 锅炉实际运行情况
- 4 后续项目及技术发展



锅炉基本方案

锅炉基本方案

汽水参数

名称	单位	锅炉汽水参数	
		BMCR	BRL
主蒸汽流量	t/h	2752.0	2623.4
主蒸汽出口压力	Mpa. g	32.87	31.98
给水温度	℃	329.3	327.2
主蒸汽出口温度	℃	605	605
再热蒸汽流量 (高再/低再)	t/h	2412.4/2093.4	2341.8/2028.8
再热蒸汽出口压力 (高再/低再)	Mpa. g	10.612/3.259	10.302/3.152
再热蒸汽出口温度 (高再/低再)	℃	623/623	623/623
再热蒸汽进口压力 (高再/低再)	Mpa. g	11.012/3.449	10.691/3.336
再热蒸汽进口温度 (高再/低再)	℃	424.0/440.9	424.0/449.7

锅炉基本方案

煤质资料

设计煤种：荷泽新汶混煤

校核煤种1：神华煤

名称	符号	单位	设计煤种	校核煤种1	校核煤种2
收到基全水分	Mar	%	7.0	14	8
空气干燥基水分	MAD	%	4.07	8.49	1.52
收到基灰分	Aar	%	23.07	11	30.89
干燥无灰基挥发份	Vdaf	%	37.90	36.44	30.01
冲刷磨损指数	Ke		3.0		4.0
哈氏可磨系数	HGI		58	56	62
低位发热量	Qnet, ar	kJ/kg	21.37	22.76	19.32
收到基碳	Car	%	56.20	60.33	49.72
收到基氢	Har	%	3.50	3.62	3.2
收到基氧	Oar	%	0.97	0.69	0.86
收到基氮	Nar	%	8.05	9.95	5.58
收到基全硫	Sar	%	1.21	0.41	1.75

锅炉基本方案

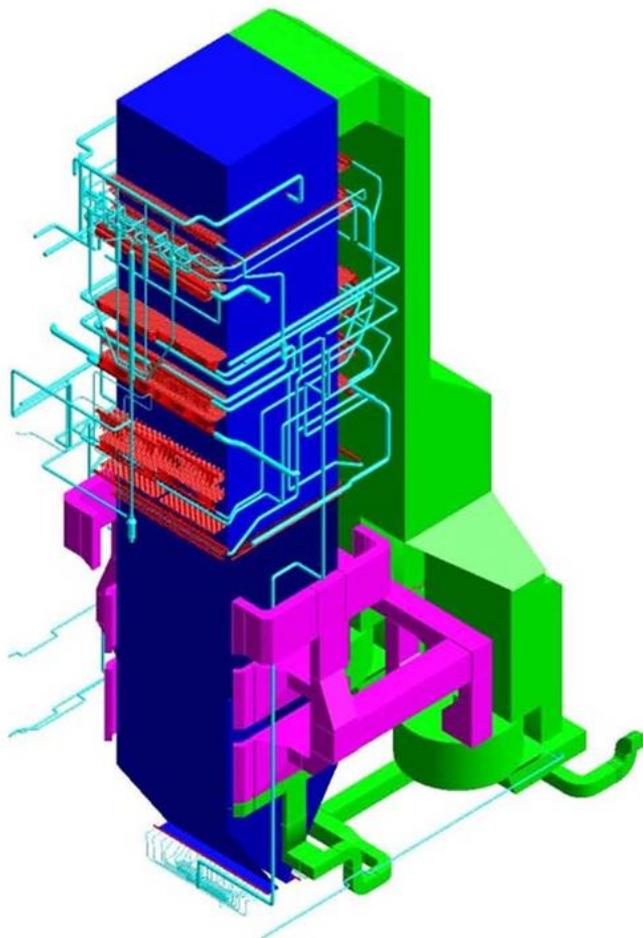
煤质资料

灰成分分析

名称	符号	单位	设计煤种	校核煤种1	校核煤种2
变形温度	DT	℃	1.32	1.13	1.2
软化温度	ST	℃	1.38	1.16	1.25
半球温度	HT	℃	1.40		
溶化温度	FT	℃	1.42	1.21	1.31
二氧化硅	SiO ₂	%	47.82	36.71	49.75
三氧化二铝	Al ₂ O ₃	%	26.86	13.99	31.76
三氧化二铁	Fe ₂ O ₃	%	10.87	13.85	10.16
氧化钙	CaO	%	5.69	22.92	2.25
氧化镁	MgO	%	1.09	1.28	0.71
氧化钠	Na ₂ O	%	0.35	1.23	0.4
氧化钾	K ₂ O	%	1.30	0.72	1.4
二氧化钛	TiO ₂	%	1.12		1.14
三氧化硫	SO ₃	%	3.95	9.3	1.88

锅炉基本方案

总体布置



设计布置特点:

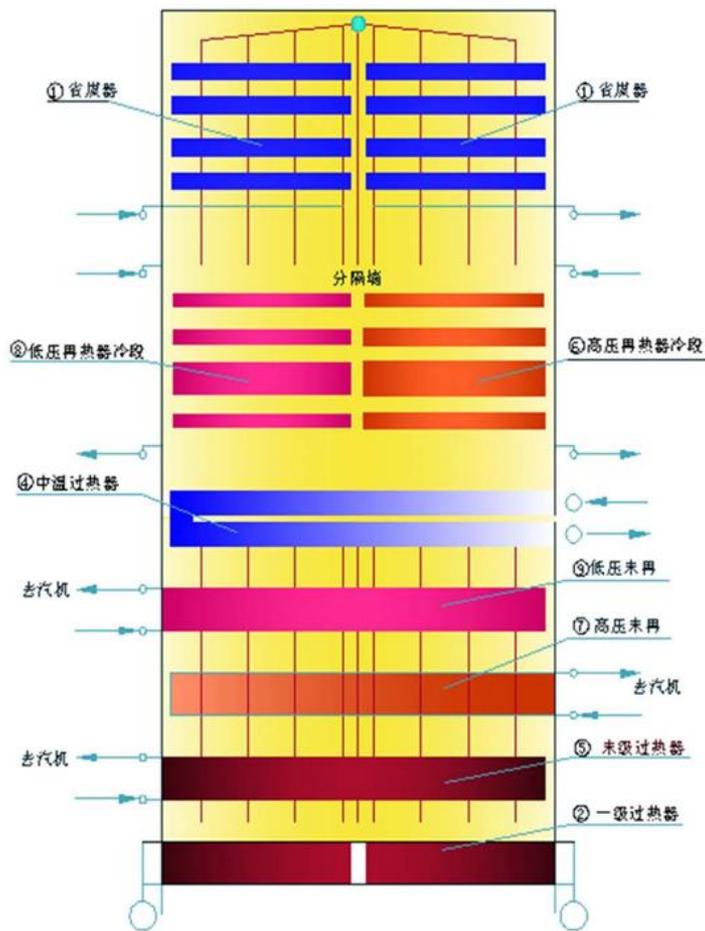
- ❖ 塔式布置;
- ❖ 二次再热, 两级再热器出口623℃;
- ❖ 新型超低NO_x燃烧器+高位SOFA风, 单切圆燃烧方式;
- ❖ 热烟再循环+调温挡板+燃烧器摆动;
- ❖ 采用冷烟再循环, 取自引风机出口;
- ❖ 过热器采用煤水比+两级喷水减温;
- ❖ 采用预热器旁路系统, 提高几组效率;
- ❖ 低漏风率的四分仓空气预热器;
- ❖ 带循环泵启动系统。

主要结构数据:

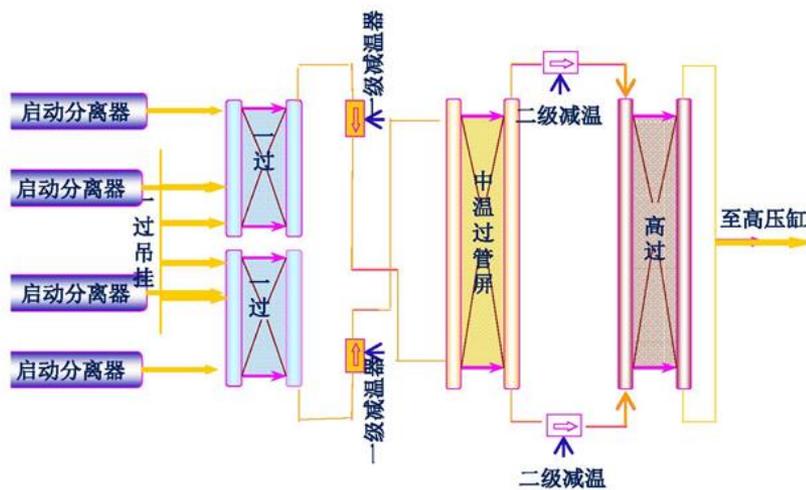
➤ 炉膛断面:	22.1873 X 22.1873	m
➤ 燃烧器高度:	19.49	m
➤ 燃尽高度:	25.8	m
➤ 最下层燃烧器到拐点距离:	6.84	m
➤ 顶棚管标高:	133.3	m

锅炉基本方案

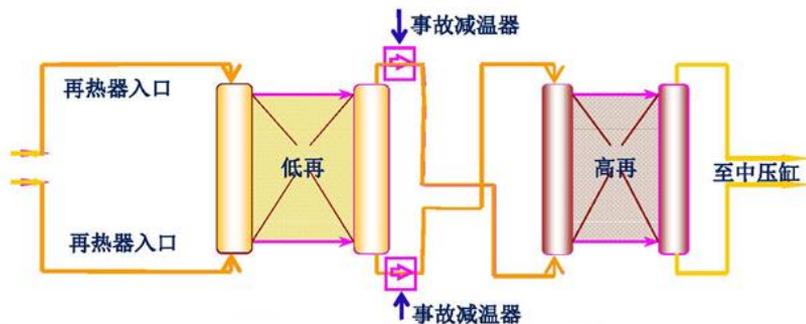
汽水系统



过热器系统



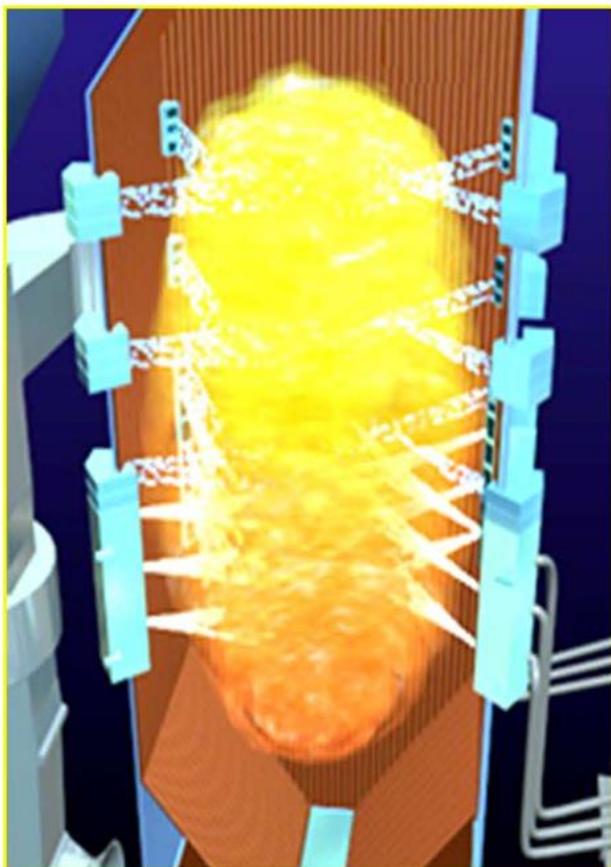
低/高压再热器系统



锅炉基本方案

燃烧器系统

切圆燃烧系统方案



●主燃烧器系统

布置方式：单切圆

燃烧器形式：新型低NO_x烧器，摆动

燃烧器层数：12层

燃烧器只数：48只

●燃尽风系统

布置方式：反向切圆，上下和水平摆动

布置层数：2组8层

布置位置：主燃烧器上方

●微油点火系统+常规大油枪

布置位置：最底两层/主燃烧器之间

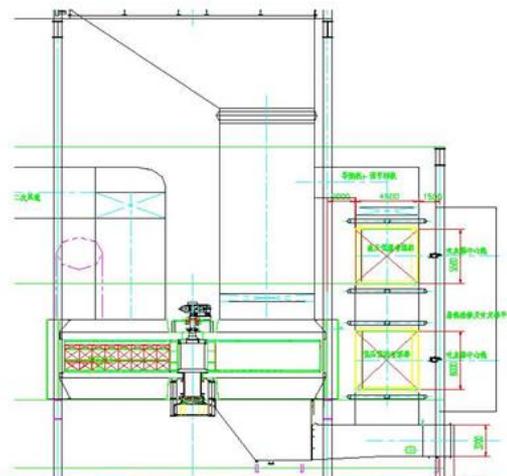
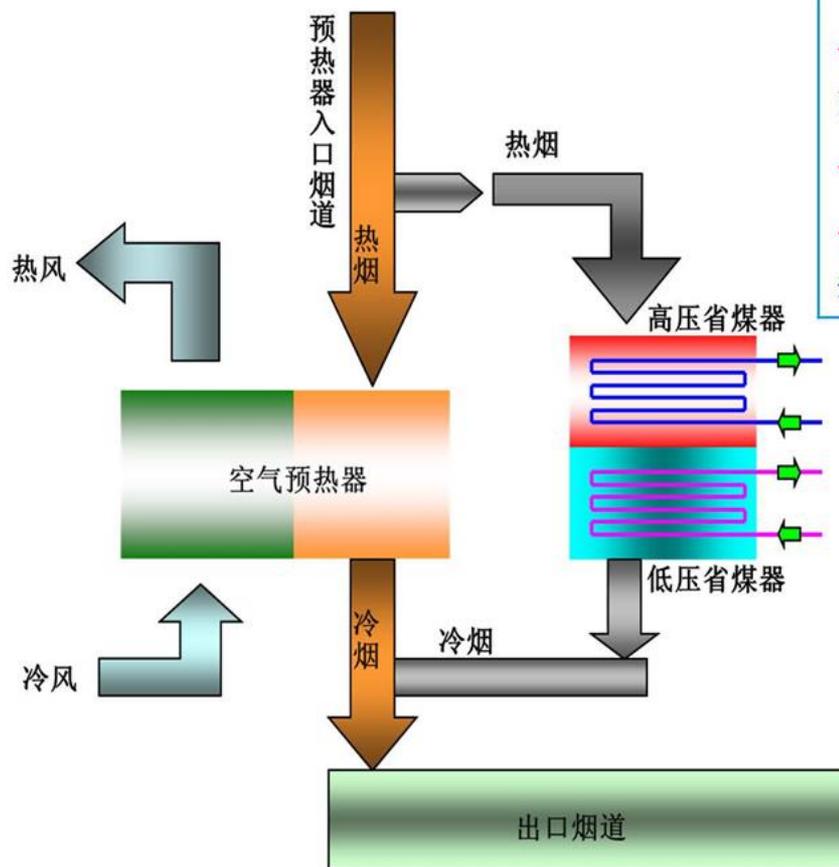
布置层数：2层/6层

锅炉基本方案

预热器旁路

预热器旁路系统的设计及性能特点：

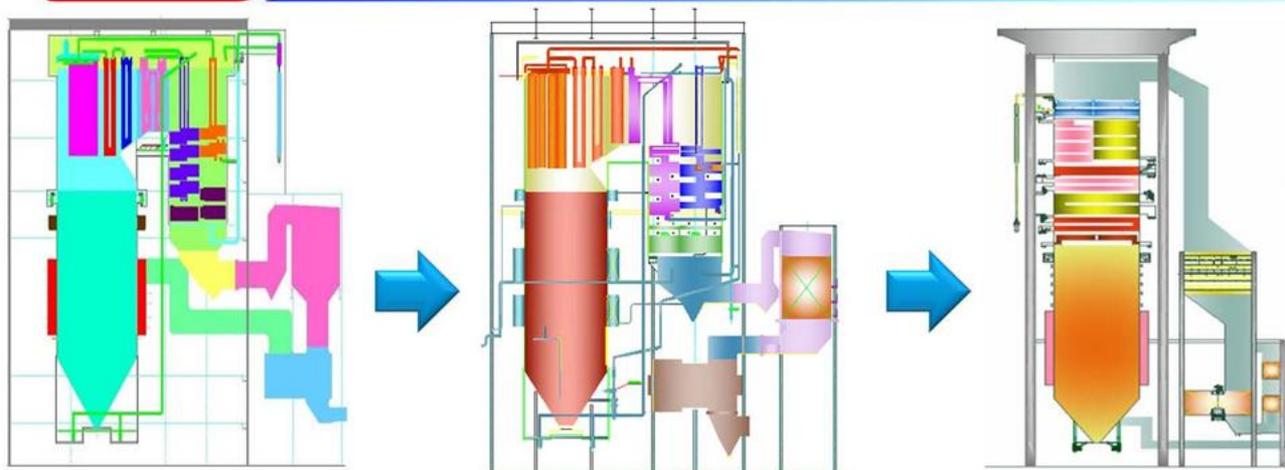
- ❖ 设计回转式空气预热器并联旁路烟道，在烟道中分别布置有高、低压的热回收受热面；
- ❖ 有效降低锅炉的排烟温度和排烟损失；
- ❖ 提高了余热回收系统的换热温差，允许用高温高压的水回收热量，回收热量的利用效率大幅度提高。





技术发展的国产化情况

技术发展的国产化情况



玉环1000MW
营口600MW
营口常规超超
采用引进技术
设计

安源600MW
二次再热工程
自主设计

本工程1000MW
二次再热工程
完全自主设计

设计国产化
计算程序
设计理念
↓
工艺国产化
产品工艺
焊接工艺
↓
生产国产化
全部国内生产
↓
调试国产化



锅炉设计关键技术

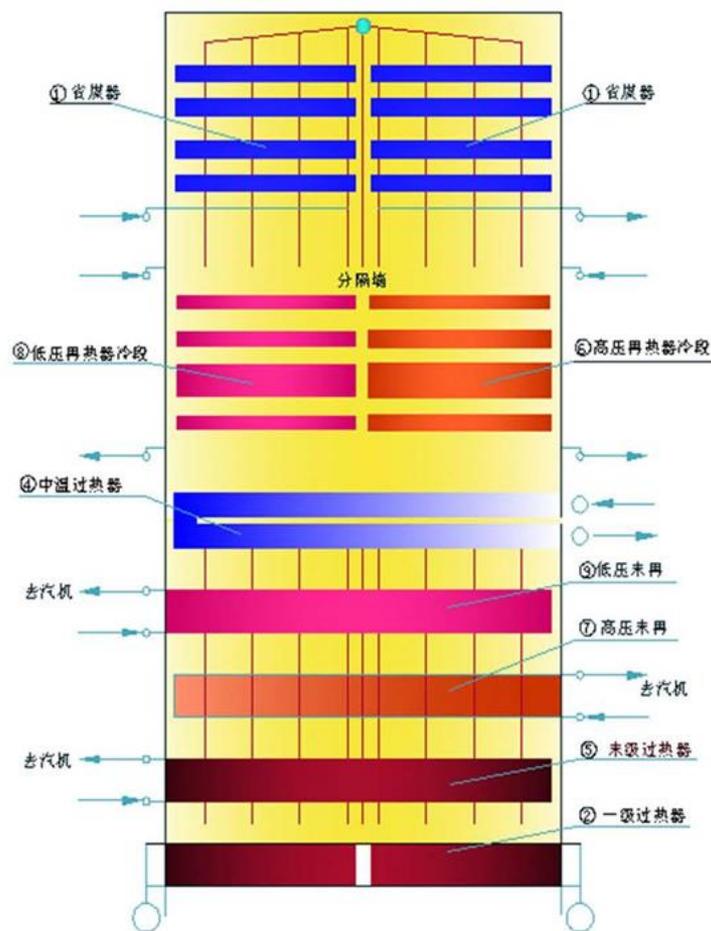
我国二次再热机组的特点

- 参数水平高：蒸汽温度、压力高、再热汽温高于主汽温度。
- 煤质稳定性差：煤质变化大，对煤质变化的适应能力要求高。
- 对负荷调节要求高：参与调峰，对部分负荷性能要求高。



锅炉设计要解决的关键问题

- 过、再热蒸汽能够达到额定汽温，并具有较好的调节性能
 - ◆ 三级高温受热面汽温都超过了600℃，受热面布置和吸热量的匹配；
 - ◆ 能够在较大的负荷范围内保证蒸汽温度的汽温调节方式。
- 在过、再热蒸汽达到额定温度的条件下锅炉能够安全稳定运行
 - ◆ 锅炉设计与实际运行的具有非常高的拟合程度；
 - ◆ 有效的降低烟气侧偏差和蒸汽侧偏差的措施；



主要解决方案

- 受热面布置:

综合考虑各方需求，合理布置各级受热面

- 采用多种调温手段:

过热器：煤水比+两级喷水

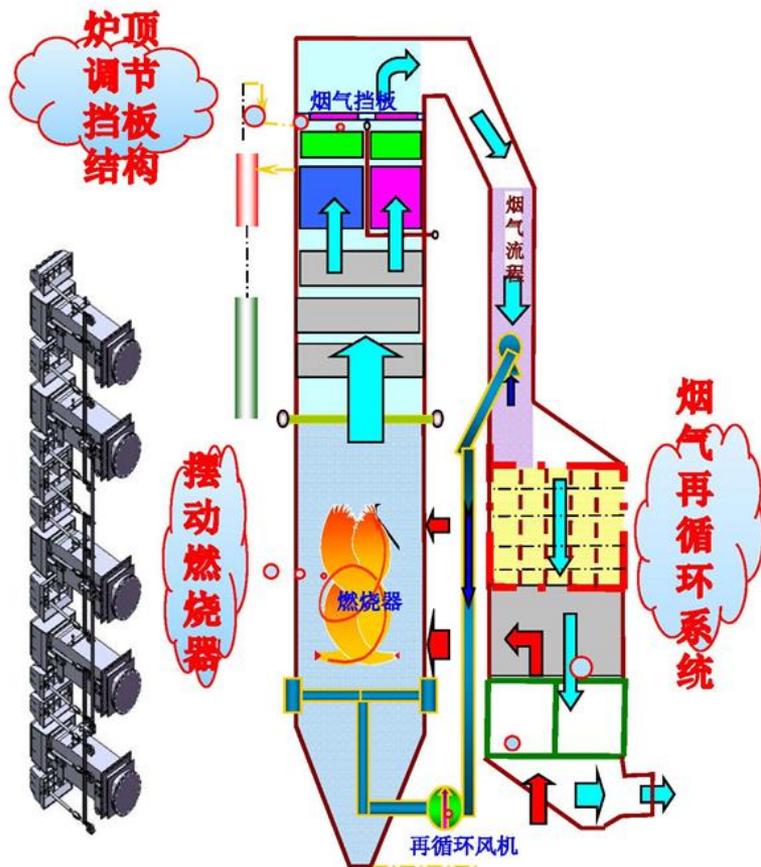
再热器：烟气再循环+挡板+燃烧器摆动+事故喷水

- 有效控制烟气侧和工质侧偏差:

部分负荷性能要求高。

锅炉设计关键技术

汽温控制方案



主调方式

烟气挡板
(分配)

辅助手段

烟气再循环系统
(总热量)

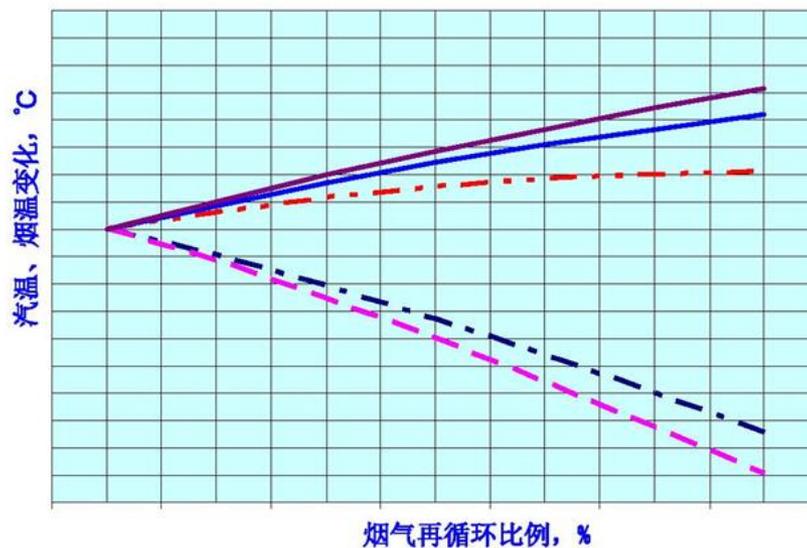
燃烧器摆动
(火焰中心)

事故状态

喷水减温
(响应快)

烟气再循环系统的理论分析

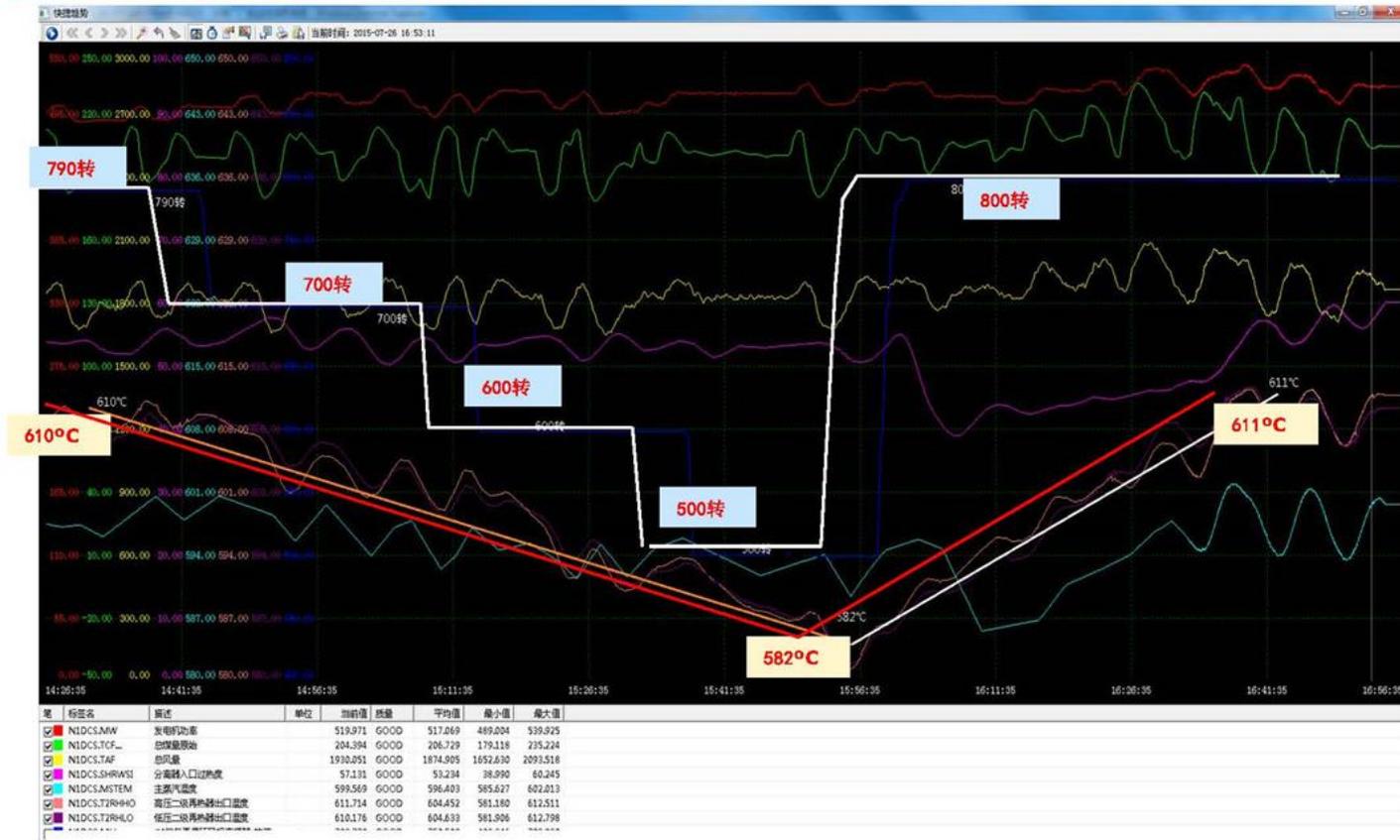
烟气再循环对于炉内汽温的影响



- 注：“深红”为FGR对于高压再热器汽温变化；
“蓝色”为FGR对于低压再热器汽温变化；
“红色”为FGR对于主蒸汽汽温变化；
“深蓝”为FGR对于屏底烟气温度变化；
“粉色”为FGR对于理论燃烧温度的变化。

锅炉设计关键技术

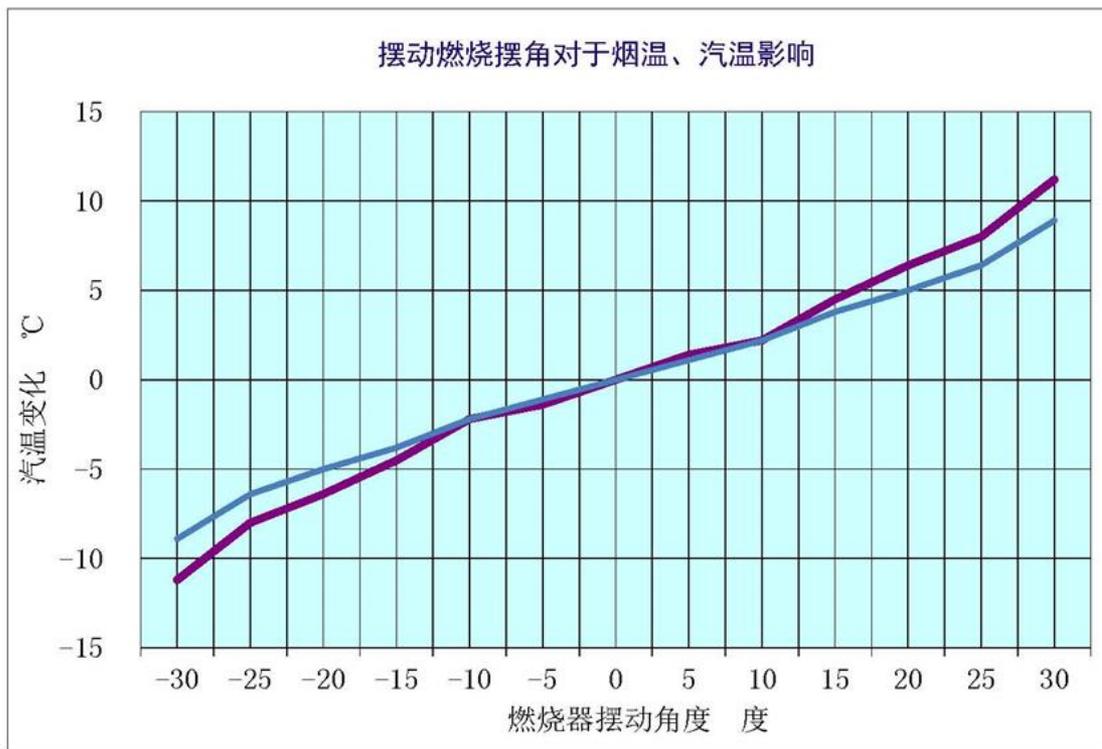
烟气再循环实际效果



风机转速由790rpm降到500rpm时，再热汽温降低28℃

风机转速由500rpm升到800rpm时，再热汽温升高29℃

燃烧器摆动对于汽温调节的影响



紫色为高压再热蒸汽
蓝色为低压再热蒸汽

从理论计算结果来看，BMCR工况燃烧器摆角从下摆30°到上摆30°高压再热蒸汽温度增加22℃，低压再热蒸汽温度增加18℃。

锅炉设计关键技术 燃烧器摆动实际效果



下摆20° 到上摆15°，低压高再汽温升高11℃，高压高再汽温升高12℃；
上摆15° 到下摆5°，低压高再汽温降低5℃，高压高再汽温降低4℃。

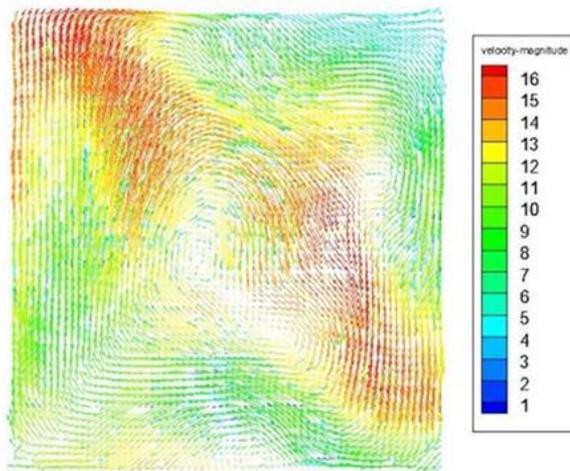
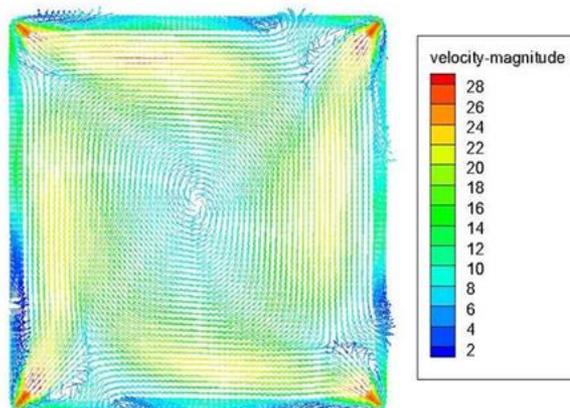
烟气偏差控制：

A、通过燃烧系统的合理设计及合理配风降低烟气流动偏差；

B、燃尽风的水平、上下摆动消除烟气偏差；

C、烟气再循环摆动消除烟气偏差；

D、数模计算及燃烧试验台实验为设计提供依据。



采取以下措施：

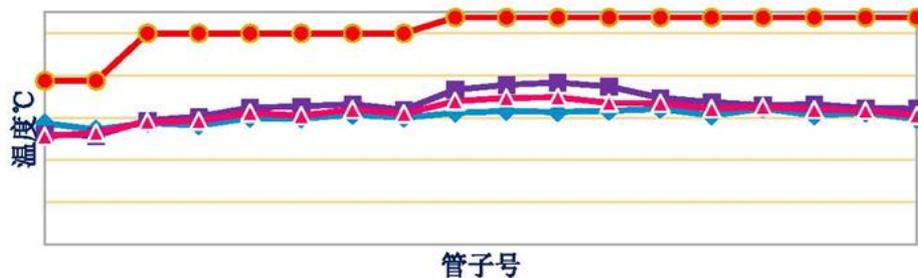
- A、同屏管采取有效的流量调整方式，减少管间偏差；
- B、集箱的合理选择、集箱进出口的合理连接，减少屏间偏差；



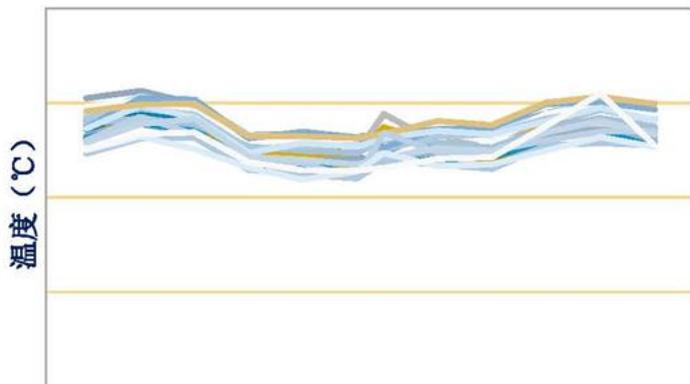
锅炉设计关键技术

偏差控制效果

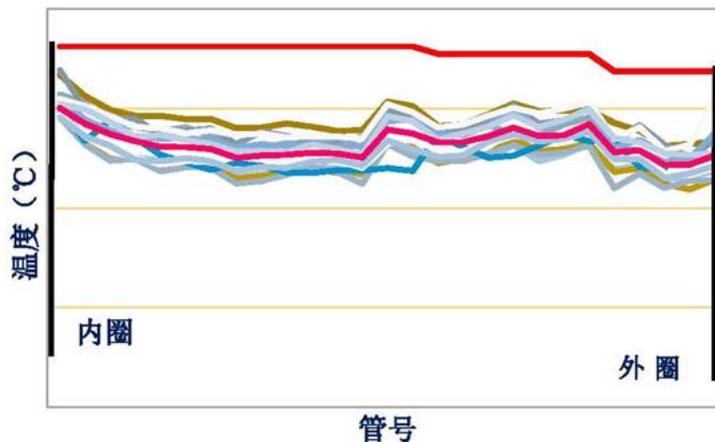
一级过热器前墙壁温



同管号不同屏壁温



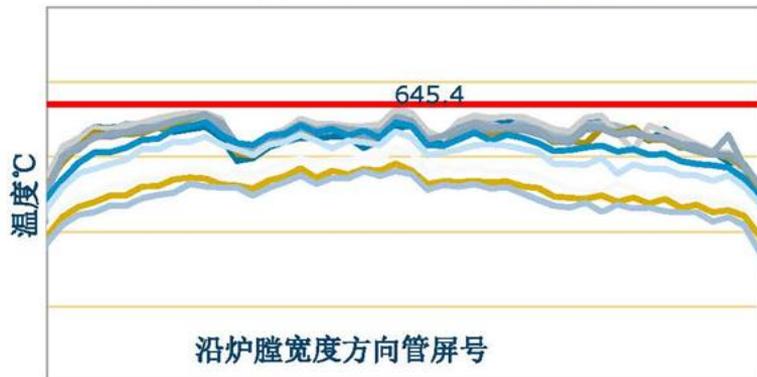
三级过热器壁温 (同屏管)



锅炉设计关键技术

偏差控制效果

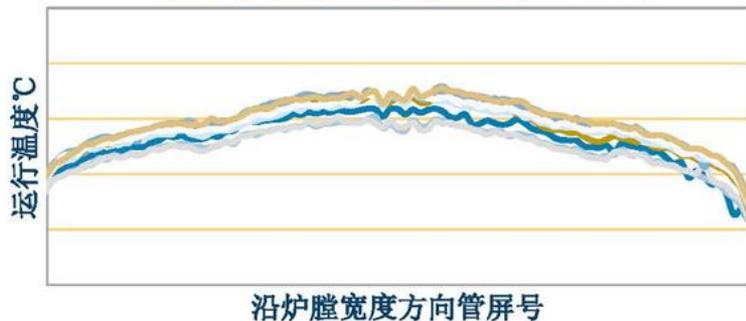
高压高温再热器壁温（再热汽温623℃）



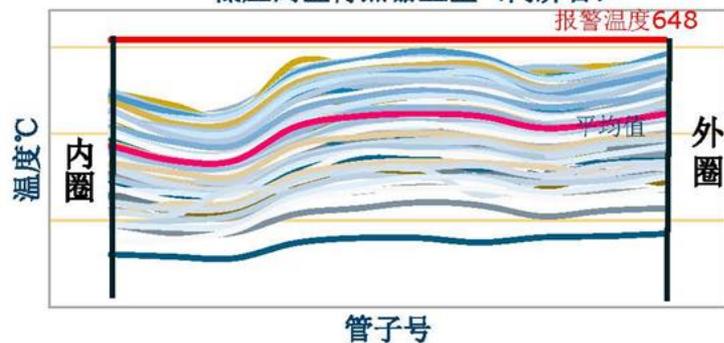
高压高温再热器壁温（同屏管）



低压高温再热器壁温（蒸汽温度623℃）



低压高温再热器壁温（同屏管）





锅炉实际运行情况

锅炉实际运行情况

华能莱芜1000MW超超临界二次再热锅炉运行情况



2015年12月23日和2016年11月9日，莱芜6#、7#机组分别通过168小时试运，投入商业运行。

该机组各项性能指标刷新了世界纪录。为目前世界上效率最高、能耗最低、指标最优、环保最好的火电机组。

6#机组：

锅炉热效率：BRL工况实测95.40%

NO_x排放量：178 mg/Nm³

漏风率：漏风率小于4.0%

机组发电效率：48.12%

发电煤耗：255.29 g/kWh

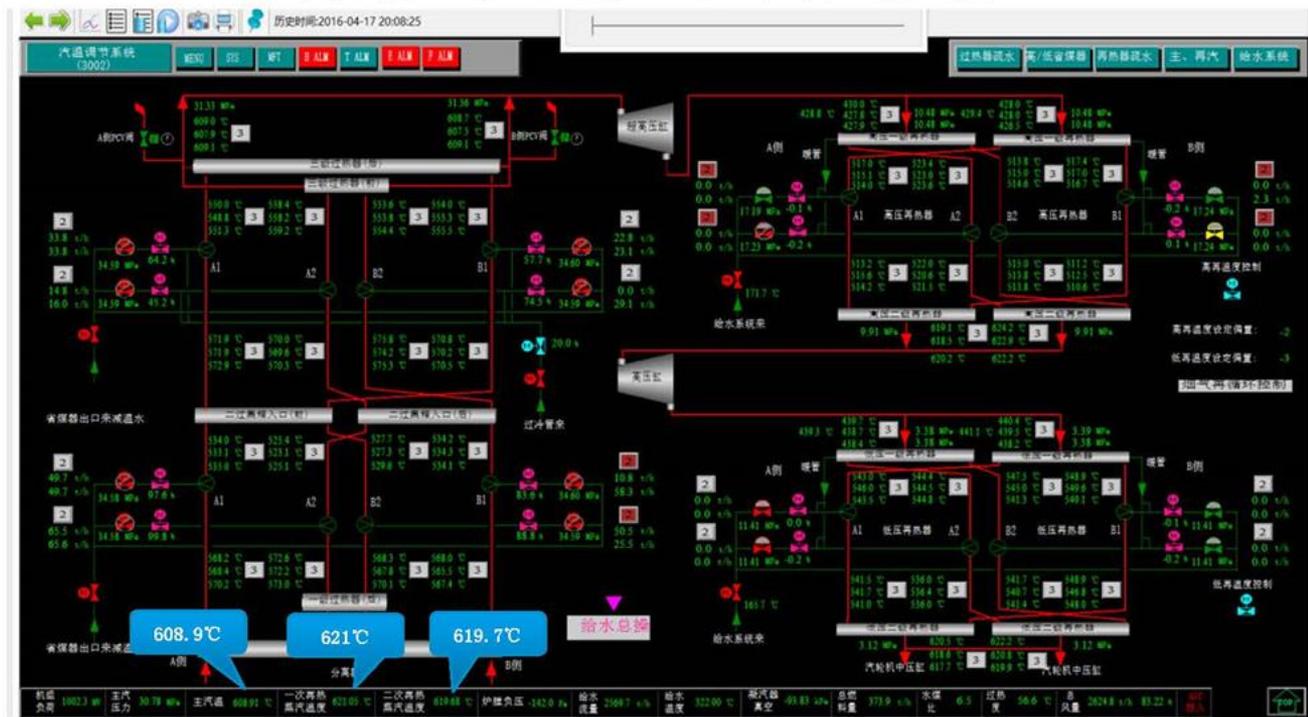
供电煤耗：266.18g/kWh

——西安热工院苏州分院 2016.6

锅炉实际运行情况

典型运行画面

华能莱芜电厂#6锅炉1000MW负荷运行画面

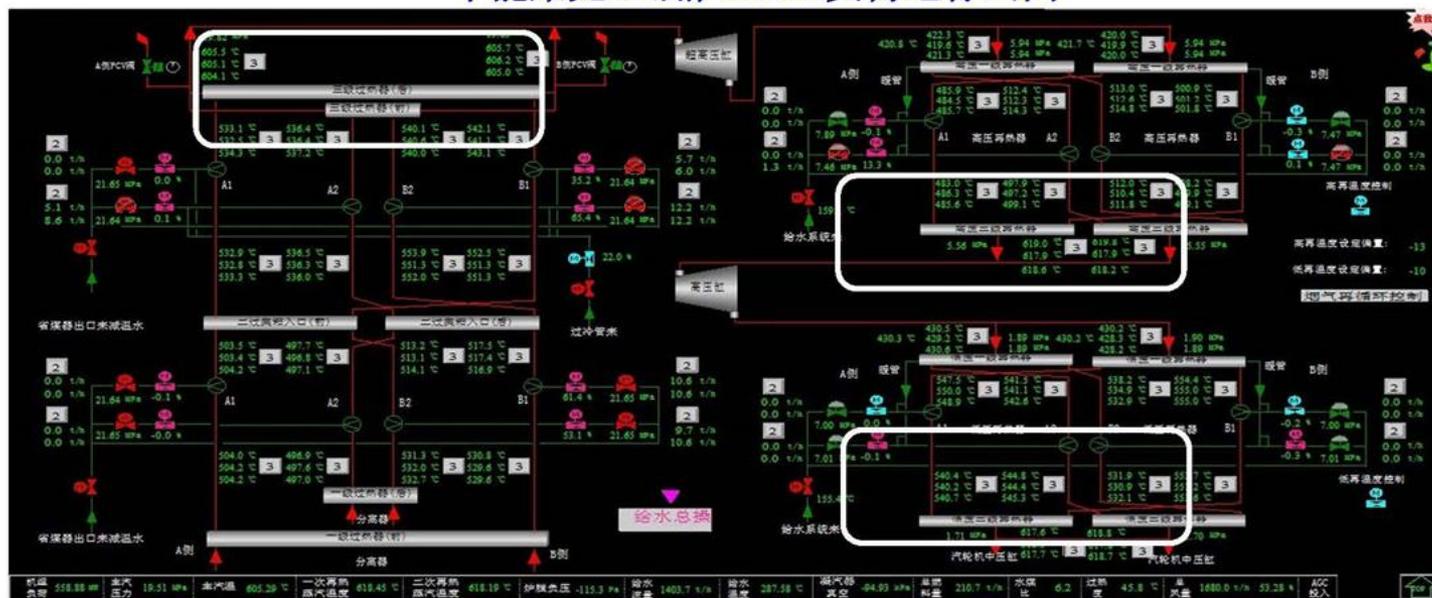


时间	负荷	主汽温度	高压再热蒸汽温度	低压再热蒸汽温度
2016. 4. 17	1002. 3MW	608. 9°C	621°C	619. 7°C

锅炉实际运行情况

典型运行画面

华能莱芜6#锅炉558MW负荷运行画面



时间	负荷	主汽温度	高压再热蒸汽温度	低压再热蒸汽温度
2016. 8. 20	558MW	605.3°C	618.5°C	618.2°C



后续项目及技术发展

后续项目及技术发展

后续项目情况

序号	项目名称	主要参数	运行时间
1	江西安源电厂 2X660MW (π)	主汽流量: 1938t/h, 主汽压力: 32.45MPa. g, 给水温度330℃, 两级再热器出口温度: 623℃	1#: 2015.6.27 2#: 2015.8.24
2	山东莱芜电厂 2X1000MW (塔)	主汽流量: 2752t/h, 主汽压力: 32.87MPa. g, 给水温度329.3℃, 两级再热器出口温度: 623℃	1#: 2015.12.23 2#: 正在调试
3	大唐雷州电厂 2X1000MW (π)	主汽流量: 2708.7t/h, 主汽压力: 33.40MPa. g, 给水温度330℃, 两级再热器出口温度: 623℃	正在设计
4	华电句容电厂 2X1000MW (塔)	主汽流量: 2773t/h, 主汽压力: 33.60MPa. g, 给水温度330℃, 两级再热器出口温度: 623℃	正在设计
5	江西丰城电厂 2X1000MW (塔)	主汽流量: 2770t/h, 主汽压力: 33.30MPa. g, 给水温度330℃, 两级再热器出口温度: 623℃	正在设计
6	神华清远电厂 2X1000MW (π)	主汽流量: 2750t/h, 主汽压力: 33.30MPa. g, 给水温度330℃, 两级再热器出口温度: 623℃	正在设计
7	国电博兴电厂 2X1000MW (π)	主汽流量: 2750t/h, 主汽压力: 33.70MPa. g, 给水温度325℃, 两级再热器出口温度: 623℃	正在设计

哈锅二次再热超超临界锅炉14台, 投运4台 (安源2台、莱芜2台)

后续项目及技术发展

技术发展情况

汽机进汽参数	汽机热耗 kJ/kW. h	发电煤耗 g/kW. h
26. 25MPa/600/600℃	7424	273. 47
28. 00MPa/600/620℃	7352	266. 70
31MPa/600/620/620℃	7045	256. 75
35. 95MPa/615/630/630℃	6966	253. 87

据测算，机组效率提升的效果如下：

主蒸汽压力每提高1MPa，热效率可相对提高0. 2%~0. 25%

主蒸汽温度每提高10℃，热效率可相对提高0. 25%~0. 30%

再热蒸汽每提高10℃，热效率可相对提高0. 15%~0. 2%

- 二次再热机组热耗相对于常规超超临界机组，汽机热耗降低5%，发电降低煤耗15g/kw. h以上。
- 630℃二次再热机组相对于常规二次再热机组，发电煤耗可再降低约2. 9g/kw. h。

结束语

莱芜工程的顺利投运标志着哈锅在二次再热超超临界锅炉技术上又迈出了坚实的一步，在此特别感谢华能集团、华能山东分公司、山东省电力设计院及。实际上，哈锅在技术上的每一次的发展和进步离不开各位领导和专家的大力支持和帮助。借此机会，我代表哈锅对各位领导和专家一直以来对哈锅的理解、支持、帮助表示最真诚的感谢！

并祝各大家身体健康、工作愉快！