

“三改联动” 典型技术

中国·哈尔滨
2022年4月24日



哈尔滨电气集团有限公司
HARBIN ELECTRIC CORPORATION

目 录

汽轮机改造技术

锅炉改造技术

发电机改造技术



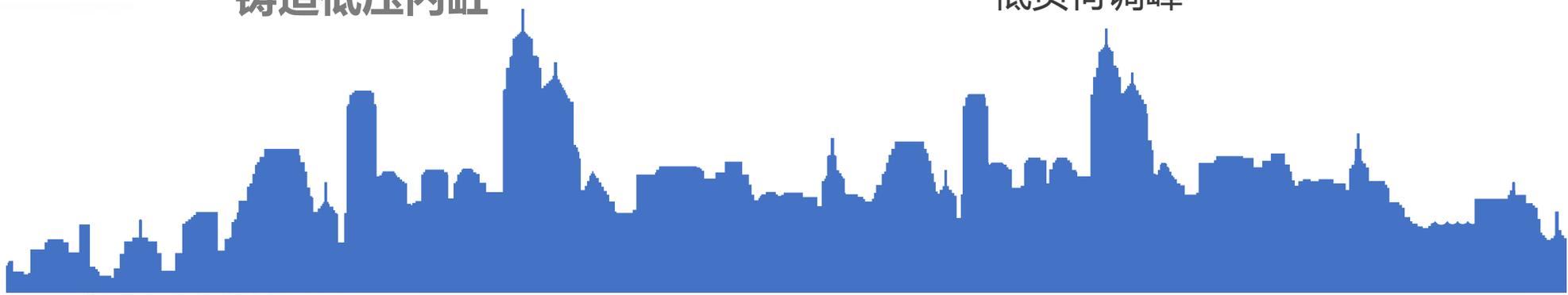
01

汽轮机改造技术



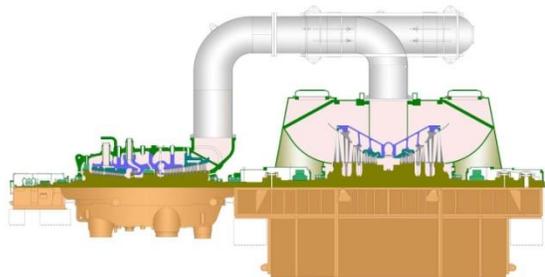
汽轮机改造技术

“三改联动”核心内容



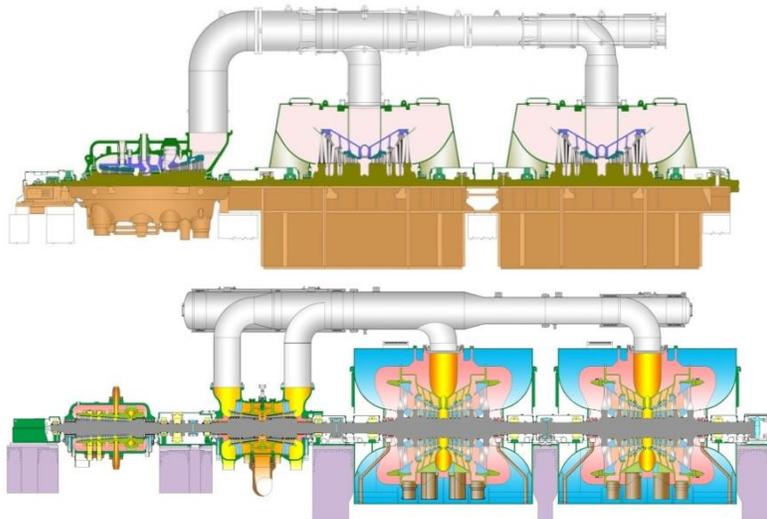
三改联动——通流改造技术

300MW等级机组



- 亚临界通流提效改造
- 超临界通流提效改造

600MW等级及以上机组



- 亚临界通流提效改造
- 超临界通流提效改造
- 超超临界通流提效改造

改造机组参数容量 MW-MPa/°C/°C	仅升温 566°C收益 kJ/kW.h	仅升温 600°C收益 kJ/kW.h	升温升压收益 25MPa /600°C kJ/kW.h
300MW- 16.7/535/535	-110	-240	-330
350MW- 24.2/566/566	/	-130	/
600MW- 16.7/535/535	-110	-240	-330
600MW- 24.2/566/566	/	-130	/

- 亚临界升温不升压提效
- 亚临界升温升压提效
- 超临界升温不升压提效

汽轮机改造技术

三改联动——通流改造技术

大焓降叶片通流设计理念，影响级效率

内部套接配面过多，机组存在不同程度内漏

进、排汽损失偏大，影响缸效

低压内缸存在变形和漏汽

汽封间隙质量控制不佳，影响漏汽损失

回热系统设置落后，影响效率

焊接隔板易产生变形，不利于通流尺寸精确控制

机组技术
升级方向

小焓降多级小焓降反动式设计

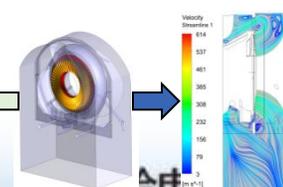
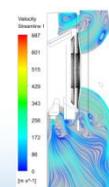
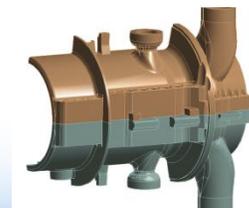
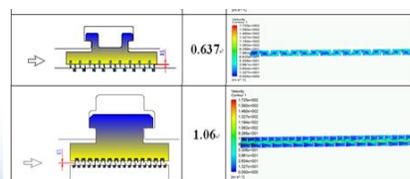
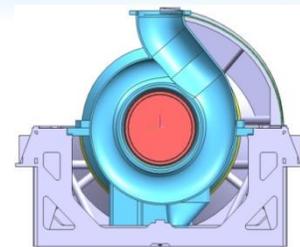
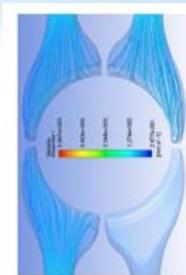
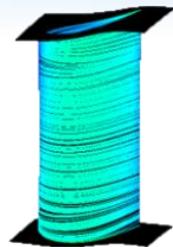
整体高中压内缸、优化进排汽腔室

低压360°蜗壳进汽铸造内缸、优化末三级动静叶

AIS汽封设计，综合控制汽封漏汽

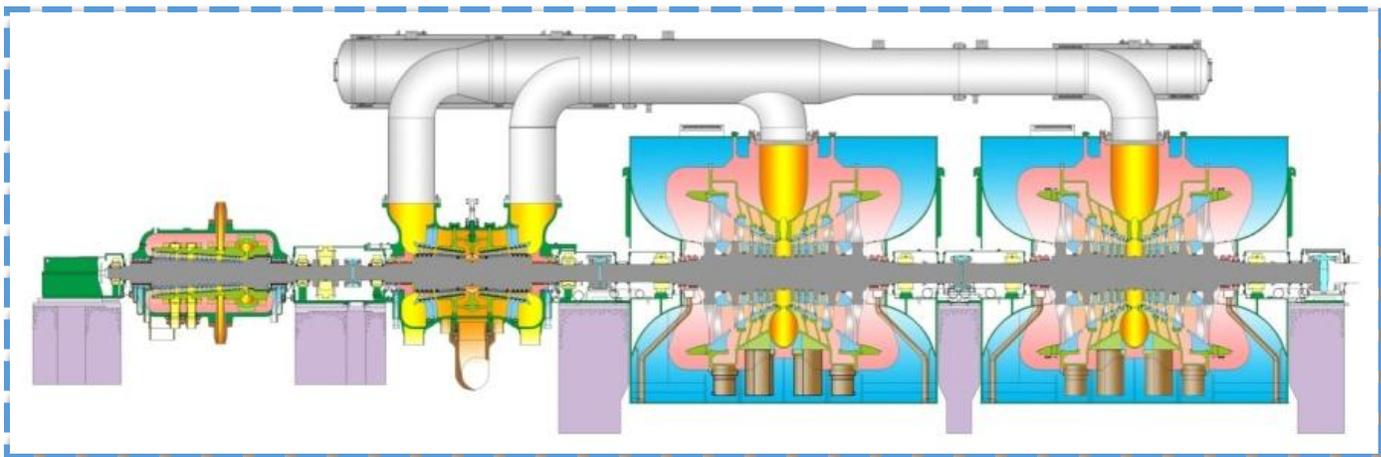
回热系统优化，增设0号高加等

采用预扭装配式隔板，五轴数控加工



三改联动——通流改造示范项目

原东芝技术百万机组**自主升级改造—平顶山改造-同类性能最优**



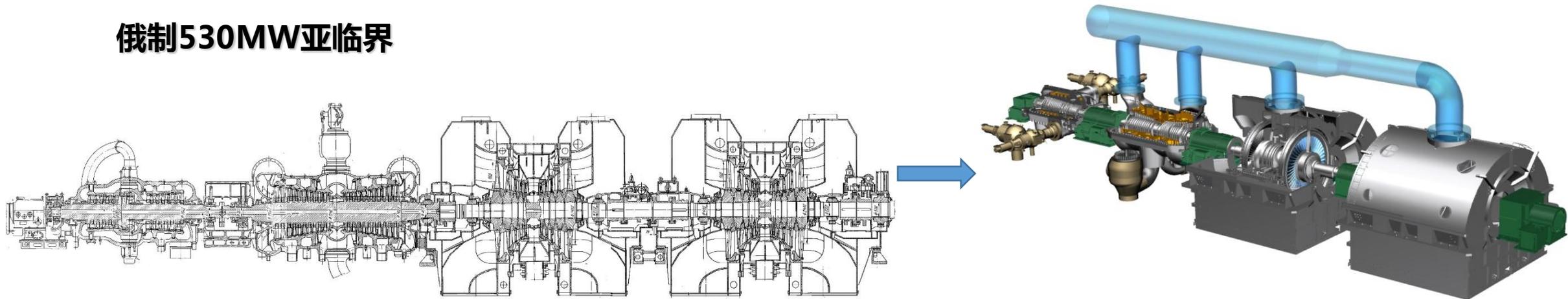
平顶山百万机组通流升级改造后，节约供电煤耗15.80g/kw.h，本项目实施后每年节约标煤消耗量**约9万吨**，直接经济效益**7000余万元**；每年减少二氧化碳排放**约13万吨**，减少二氧化硫排放**约10吨**，减少氮氧化物排放**约18吨**，节能减排效果显著。

核心技术应用：

- ◆ 高效的“多级小焓降反动式”通流技术
- ◆ 高效宽负荷后加载叶型
- ◆ 预扭装配式动静叶片+五轴叶片加工工艺
- ◆ 通流面积设计流程优化
- ◆ 叶型端壁优化
- ◆ AIS汽封设计技术
- ◆ 全周进汽+补汽阀配汽方式
- ◆ 低压损型一体化（含补汽阀）阀门结构
- ◆ 高压、低压均采用蜗壳进汽结构
- ◆ 高压红套环密封，模块化整体运输
- ◆ 高、中压排汽结构气动优化
- ◆ 360°蜗壳进汽式低压整体铸铁内缸
- ◆ 新型排汽导流环
- ◆ 变参数1#高加抽汽口设计

三改联动——升温升压（国家能源集团盘山项目）国家示范

俄制530MW亚临界



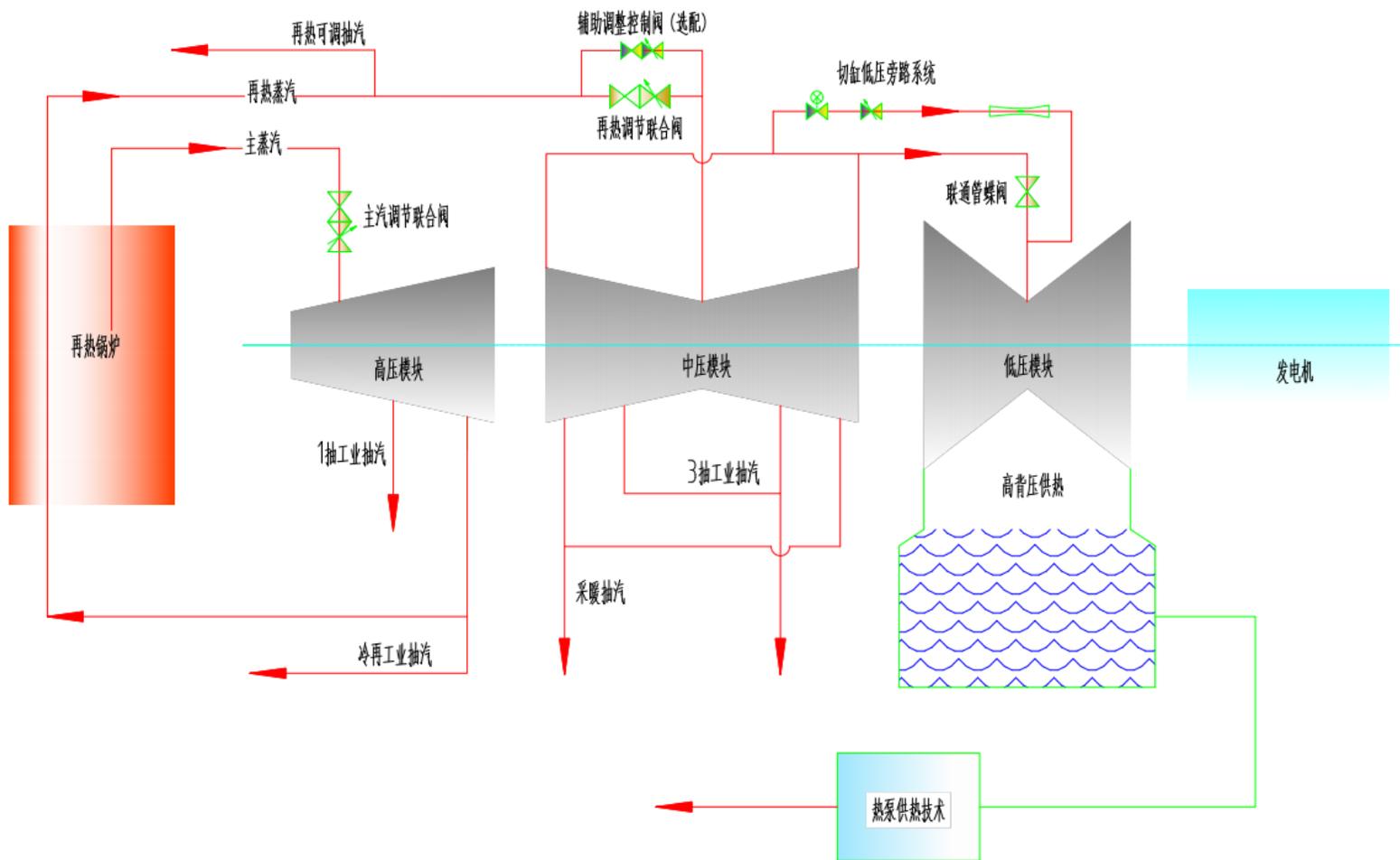
项目概况：

23.54Mpa/540°C/540°C升级为28Mpa/600°C/620°C，设备全部换新（仅保留锅炉钢结构），整套采用哈电集团最先进的高效超超临界技术。跨代升级后全厂供电煤耗 $\leq 278\text{g/kWh}$ ，降低供电煤耗 45g/kWh ，深调负荷20%THA，两台机组年减少二氧化碳排放约35万吨，具备延寿30年能力。

项目情况：

国家能源领域首台重大技术装备示范工程

三改联动——供热改造方式

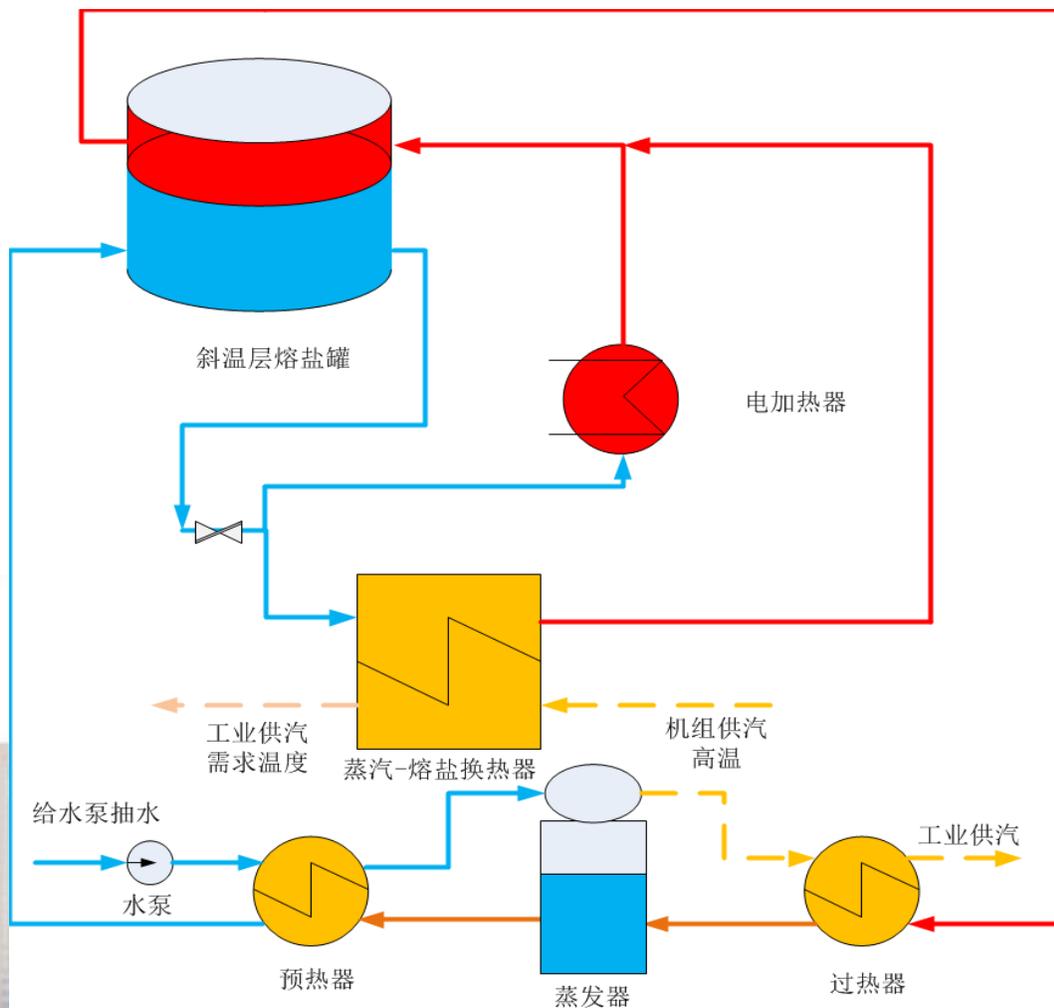


汽轮机多能级抽汽方案示意图

综合供热节能降耗：

- ① 1#抽汽 (通流改造) + 热再抽汽 + 中调门改造：4MPa+2.5MPa工业用汽需求；（泉州改造已应用）
- ② 冷再/热再抽汽 + 中调门改造：2.5MPa工业用汽需求；
- ③ 3#抽汽位置 + 调整蝶阀/旋转隔板优化：1.3MPa工业用汽需求；
- ④ 中排位置 + 调整蝶阀优化：可满足0.5Mpa工业/采暖用汽需求；
- ⑤ 中排位置 + 切缸系统：可满足供热最大化，灵活性运行；
- ⑥ 低真空供热：低压区域改造、凝汽器优化，满足高背压供热。

三改联动——熔盐蓄热供汽



系统设备

- 蒸汽-熔盐换热器；
- 斜温层熔盐罐及熔盐电加热装置；
- 蒸汽发生系统；

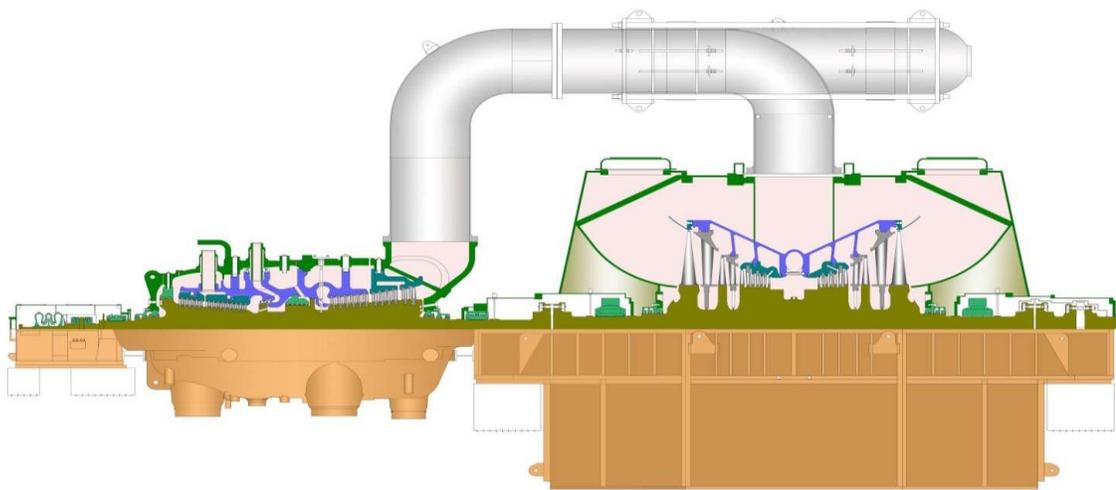
技术原理

- 通过利用高温抽汽显热或波谷低价电加热熔盐进行高温热量储存；
- 汽轮机低负荷运行时释放热量加热给水做为工业供汽的稳定性来源；

技术状态

- 配合深能源保定等项目进行系统设计；

三改联动——国家能源集团泉州改造示范项目



项目概况：泉州基于能级匹配的大容量高参数工业供热系统研究与示范工程建设，项目按**通流改造+供热改造**方案实施后供电煤耗同比**降低了约28g/kW.h**，该项目每年**节约标煤约9万吨**，减少二氧化碳排放约**25万吨**。

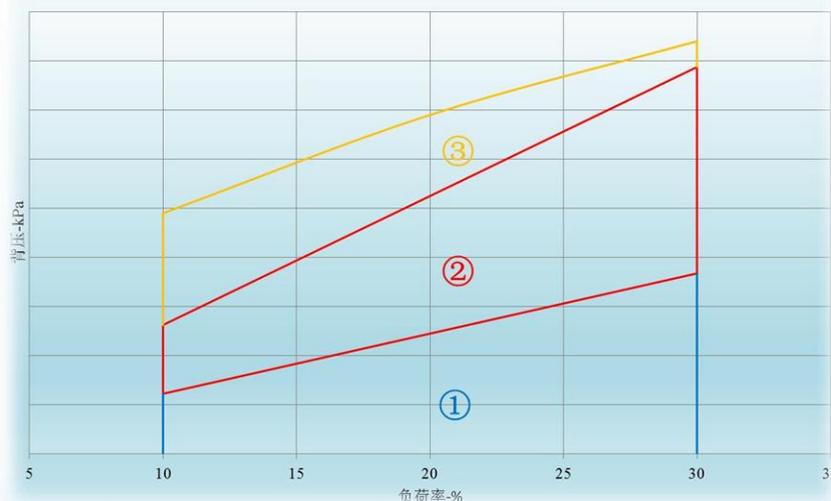
参数	通流改造后供热能力	抽汽位置
4.2MPa	165t/h	1#抽汽
2.8MPa	100t/h	热再抽汽

三改联动——灵活性改造技术

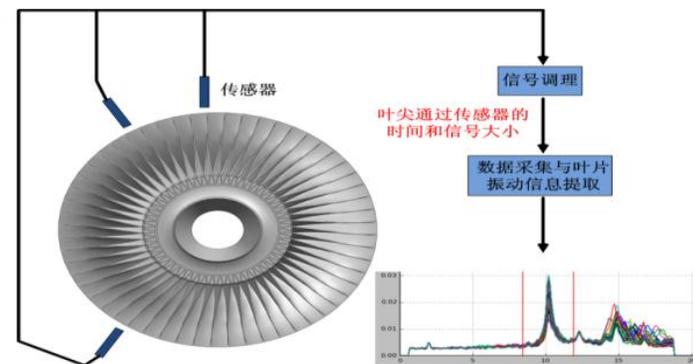
超低负荷深度调峰
安全性、经济性保障措施

1. 末两级叶片安全性及寿命（比切缸状态更恶劣）；
2. 辅助系统及运行参数控制；
3. 汽轮机本体及系统改造设计；
4. 胀差、轴系及稳定性评估；
5. 宽负荷提效技术及变负荷速率提升；

30%负荷以下长时间运行背压控制线

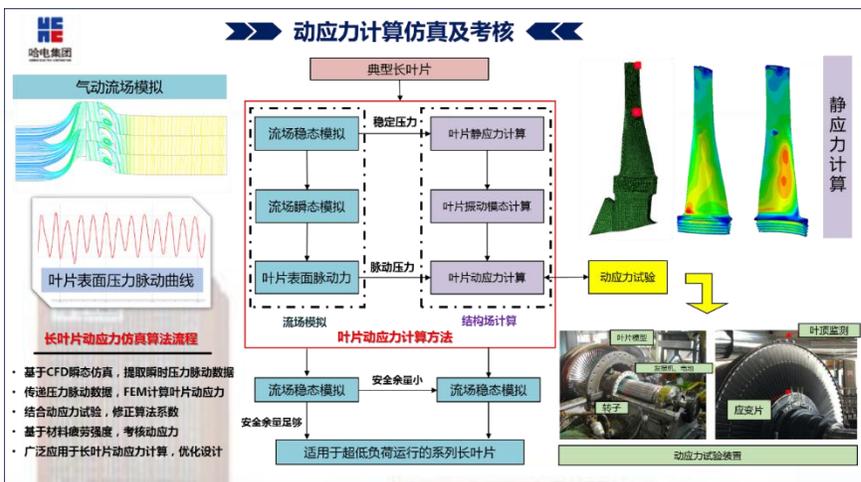


汽轮机低负荷运行智能诊断系统

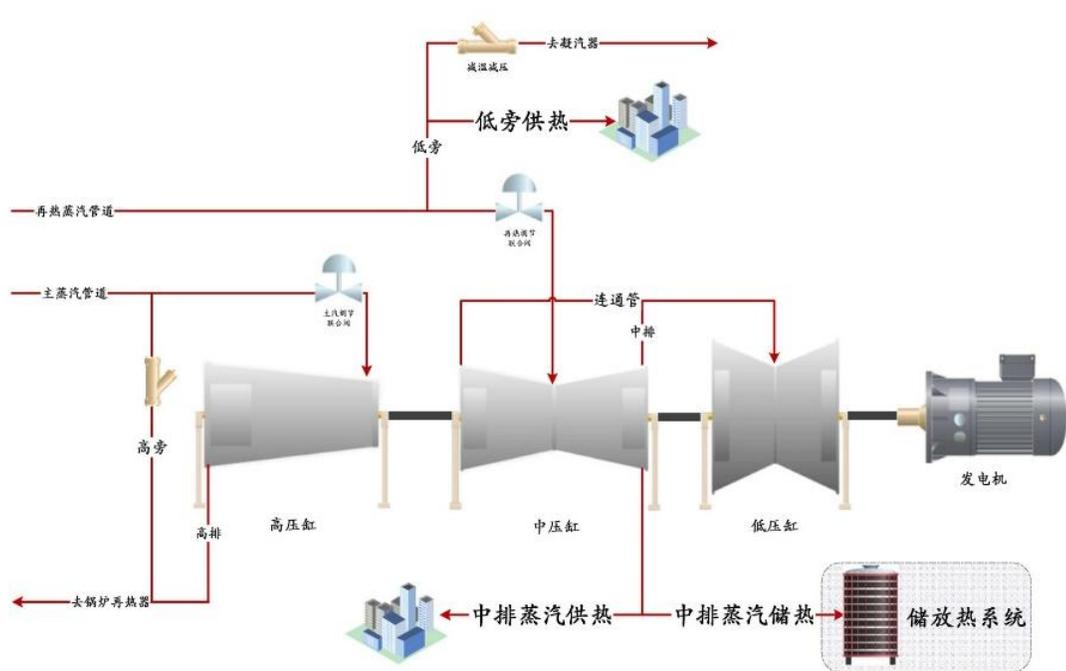


末级叶片在线监测系统

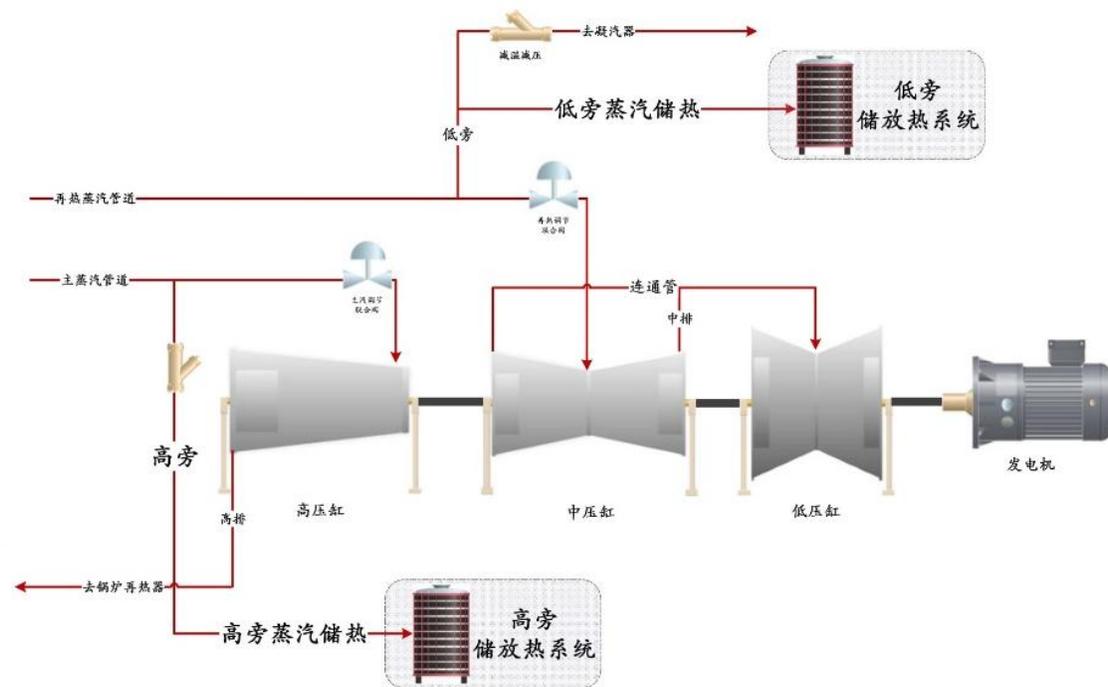
末叶动应力评估



三改联动——灵活性改造——蓄热调峰



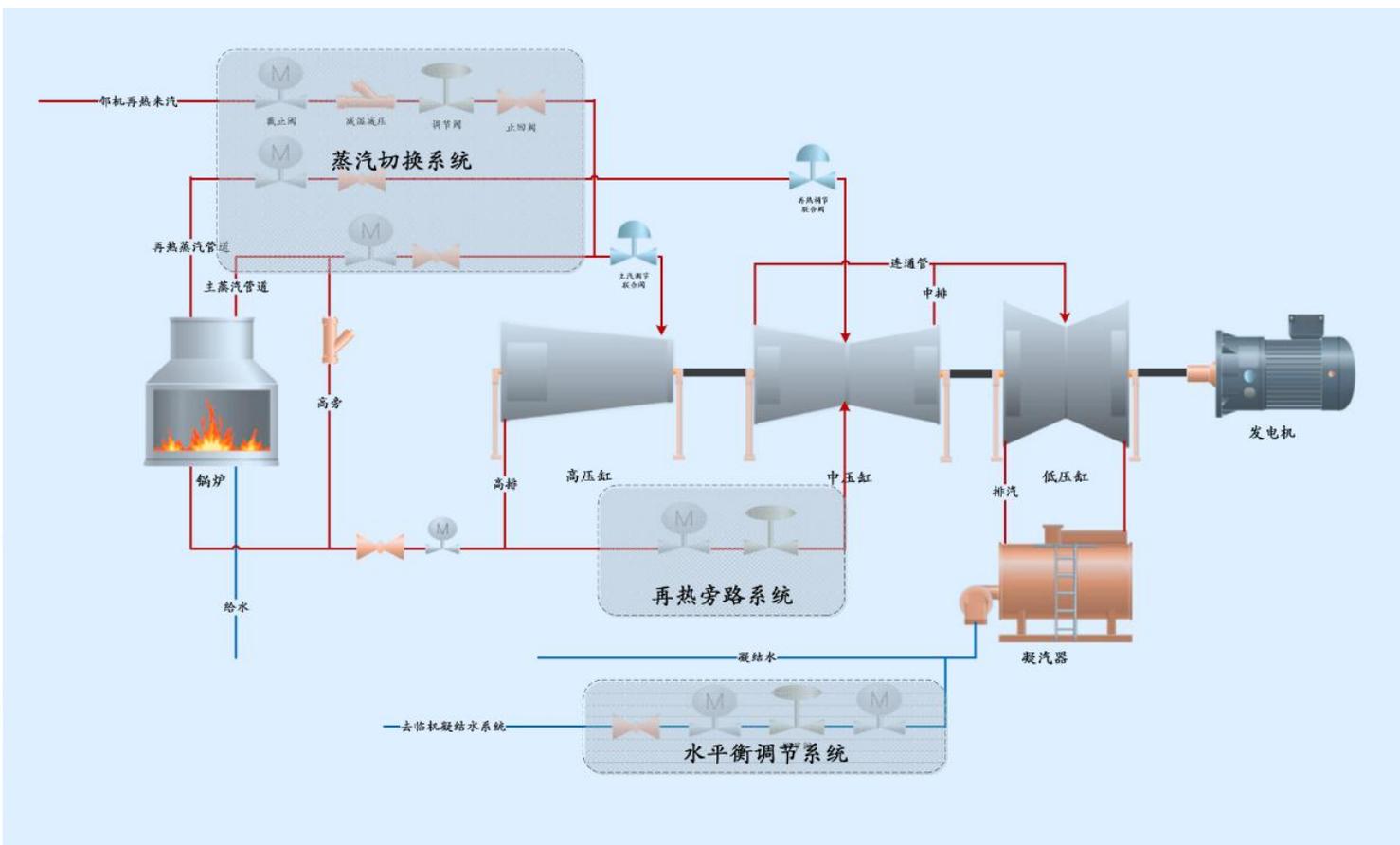
低压缸零出力蓄热调峰设计



高低旁蓄热调峰设计

当锅炉侧低负荷稳燃能力不足以满足调峰需求时，充分利用换热设备、电热设备、储热设备构建燃煤电站低负荷调峰阶段富裕能量的高/低温存储及再利用场景，实现能量高效转化利用。

三改联动——灵活性改造——快速启停



煤电机组快速启停调峰成套技术系统示意图

煤电机组启停调峰技术通过在汽轮机热力系统中增加**蒸汽切换系统、再热旁路系统、水平衡调节系统**，可实现汽轮机**停机备用及高速启动、全年高负荷经济运行**等多种运行模式。

类型	冷态启动	温态启动	热态启动	极热态启动
燃煤机组正常启动时间（分钟）	360	180	90	90
燃煤机组快速启停时间（分钟）	260	120	60	60
缩短时间时间（分钟）	100	60	30	30
联合循环启动时间（分钟）	120	90	60	60

由上表可看到，**现有机组经临炉汽源及汽轮机本体改造后，实现快速启停功能，启动速度与联合循环机组相比，温态启动仅相差30min，热态、极热态启动时间相同**



02

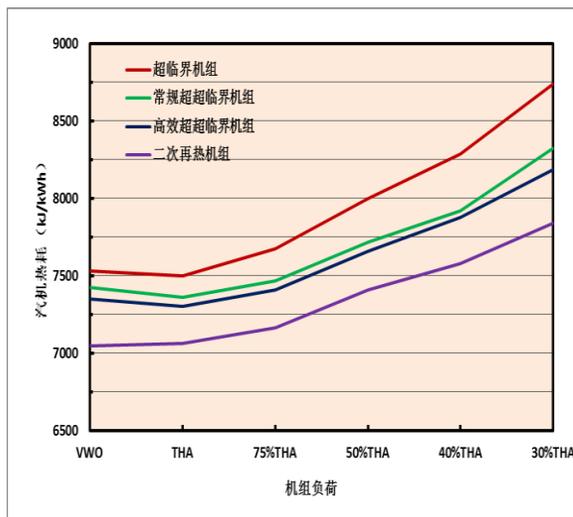
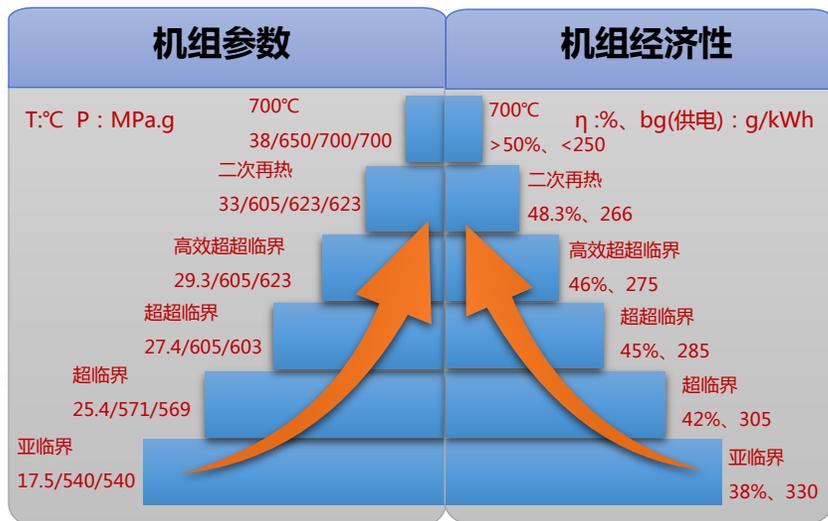
锅炉改造技术



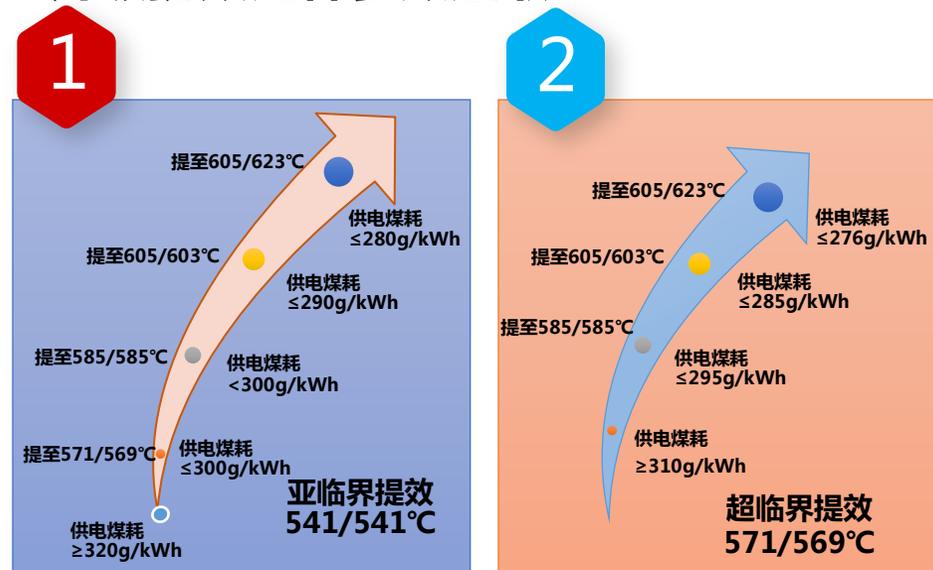
锅炉改造技术

- 通过对机组提效改造后满足最新能耗指标及排放指标要求
- 通过对接近服役期的机组寿命进行评估，机组运行参数提升，延长服役时间

提效升级的方向



升级提效几种参数选取



提效业绩：华润常熟640MW超临界、阜阳600MW超临界机组。

主汽压力不变，
温度提高

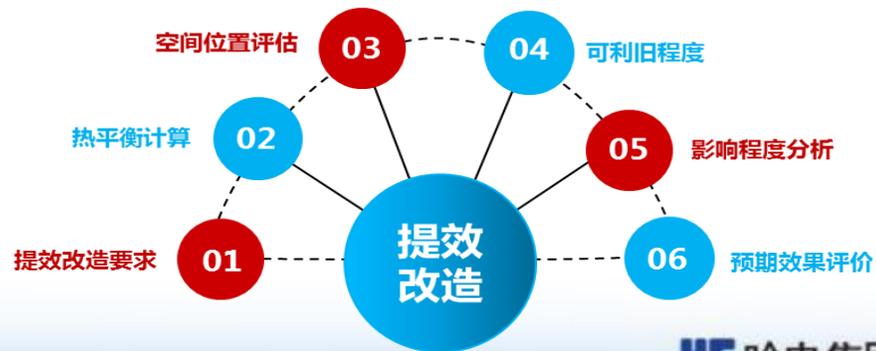
壹

- 锅炉系统整体优化
- 非承压元件最大利旧
- 承压部件更新换代
- 风烟、燃烧优化升级
- 烟气系统高效利用

主汽压力提高，
温度提高

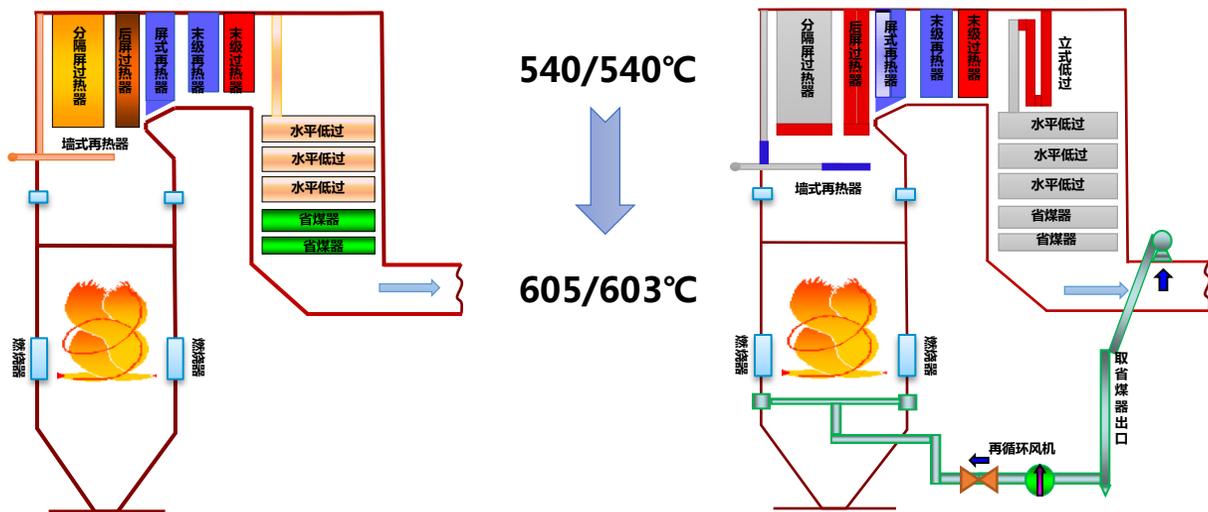
贰

- 水循环系统进行优化
- 过、再热器系统升级
- 辅机阀门部分更新换代
- 风烟、制粉优化升级
- 烟气系统高效利用



锅炉改造技术

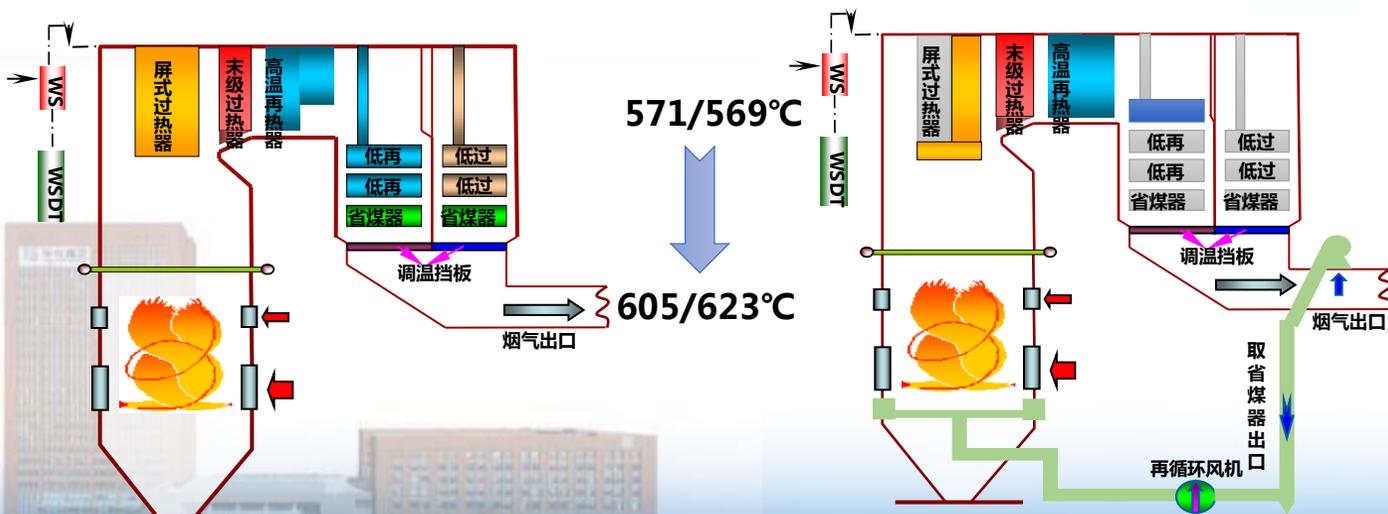
➤ 亚临界升级提效（压力不变、温度提升）



亚临界机组升级提效后，主要变化是蒸发吸热比例降低，过热蒸汽吸热比例增加，再热蒸汽吸热比例降低。相应的受热面面积要适应这种变化，具体如下：

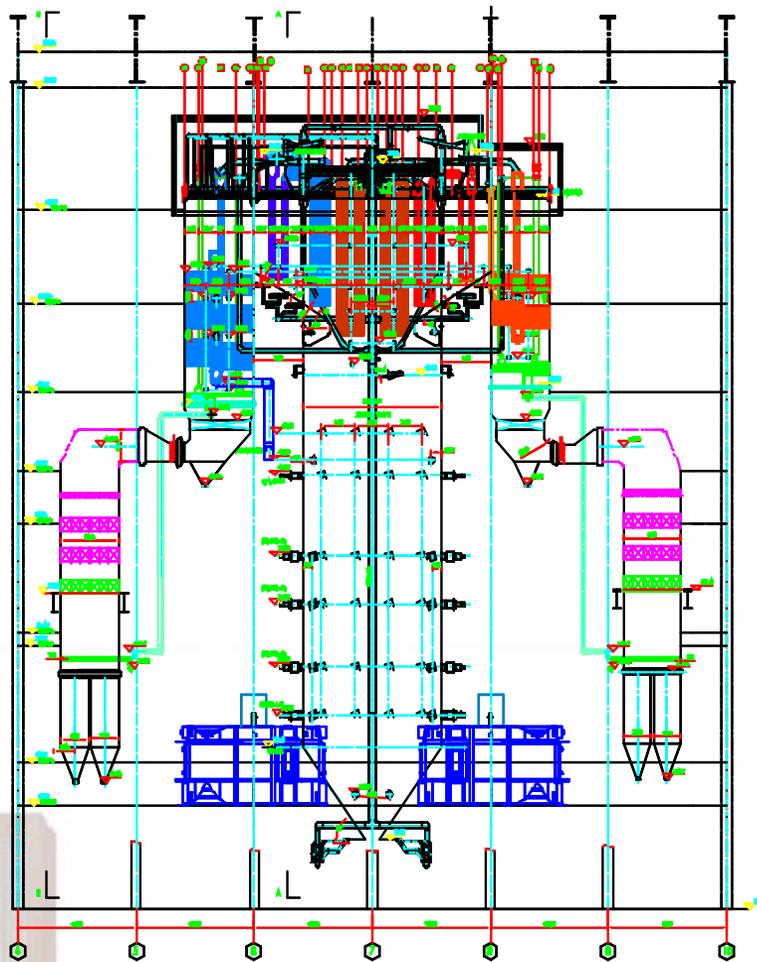
- ❑ 立式低过：增加受热面积，材料升档；
- ❑ 未过：增加管子根数及面积，材料升档，控制蒸汽偏差；
- ❑ 墙再及屏再：增加根数及面积，材料升档；
- ❑ 未再：增加管径及面积，材料升档，控制蒸汽偏差；
- ❑ 同时增加烟气再循环系统：进一步提高对流受热面换热能力

➤ 超临界升级提效（压力不变、温度提升）



超临界机组升级提效后，主要变化是分离器出口温度省，过热蒸汽和再热蒸汽吸热比例均增加。相应的受热面面积要适应这种变化，具体如下：

- ❑ 屏过：入口段利旧，底部向下探，出口段材料升档；
- ❑ 未过：整体优化设计，增加面积，控制蒸汽偏差；
- ❑ 低再：利用转向室空间增加面积，出口段材料升档；
- ❑ 未再：出口段增加面积，材料升档，控制蒸汽偏差；
- ❑ 同时增加烟气再循环系统：进一步提高对流受热面换热能力



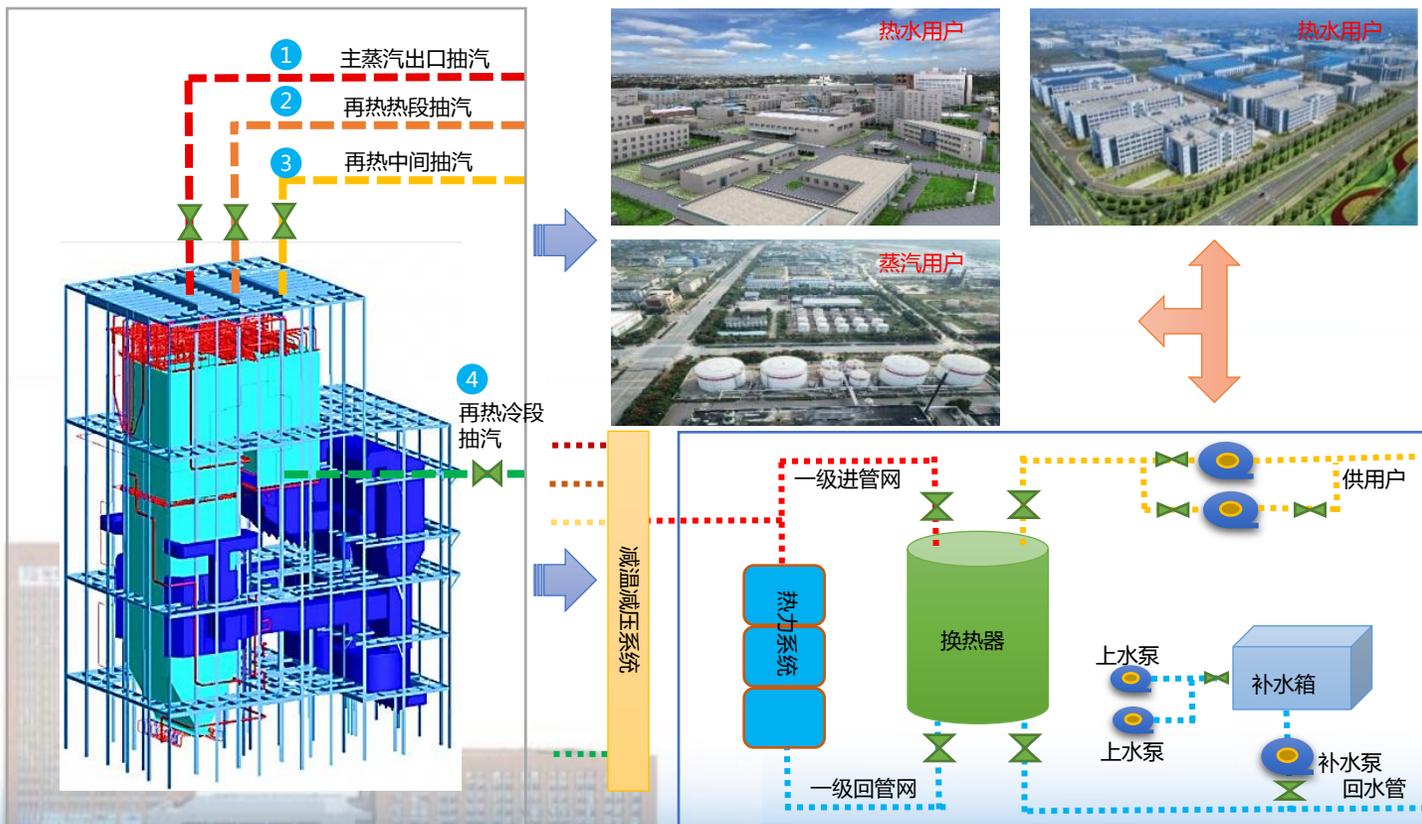
名称	单位	改造后	原设计
		BMCR	BMCR
过热蒸汽流量	t/h	1670	1650
过热器出口蒸汽压力	MPa.g	29.3	25
过热器出口蒸汽温度	°C	605	545
再热蒸汽流量	t/h	1344	1350
再热器进口蒸汽压力	MPa.g	6.128	6.409
再热器出口蒸汽压力	MPa.g	5.928	6.149
再热器出口蒸汽温度	°C	623	545
排烟温度 (修正后)	°C	118	134
总燃煤量	t/h	214.4	208
锅炉计算效率(按低位发热值)	%	94.9	91.96

锅炉改造技术

- 提升机组的经济效益、降低煤耗、增加运行效益
- 提供多种稳定连续的汽源，满足各类热、汽用户的不同需求
- 抽取一定量蒸汽时电功率不受影响，机组运行安全

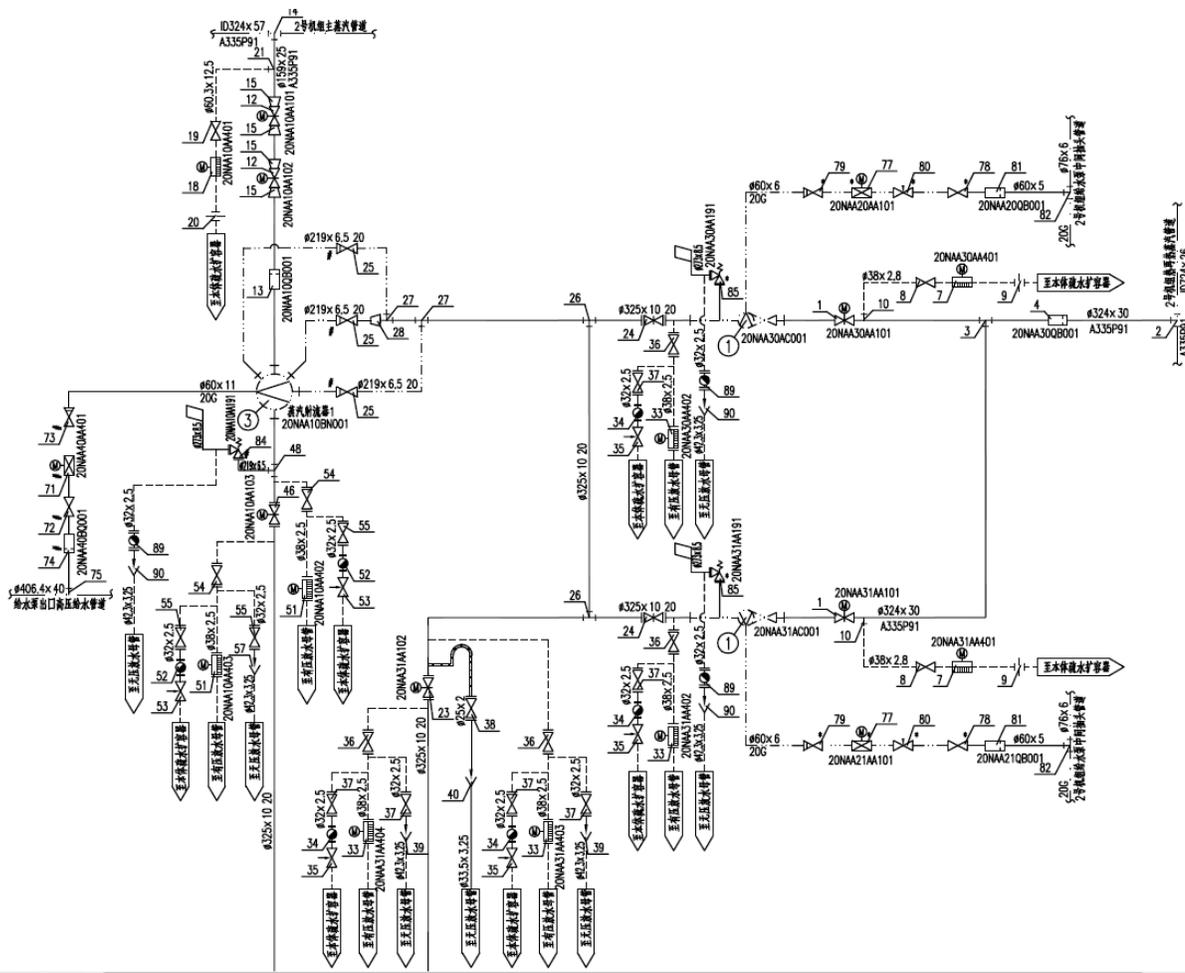
煤电抽汽供热改造

➤ 锅炉侧抽汽位置



➤ 抽汽参数

	抽汽位置	锅炉侧参数	工业用汽
1	主蒸汽出口管道	17.5-29.3MPa 540-605℃	>4MPa >400℃
2	再热热段管道	4.1-6.3MPa 540-623℃	2.5-3.5MPa 300-400℃
3	再热中间管道	4.2-6.4MPa 480-545℃	2.5-3.5MPa 300-400℃
4	再热冷段管道	4.3-6.5MPa , 350-375℃	<2.0 Mpa <300℃



新增工业抽汽来自再热热段蒸汽管道，经过减温减压后接至原工业抽汽管道。两台机组工业抽汽管道合并后接至电厂围墙外一米。减温减压器出口蒸汽参数按2.3MPa.g，350℃，流量为240t/h，即每台机新增工业蒸汽供汽能力120t/h。减温水使用给水泵中间抽头来水，设计压力11.31MPa.g，设计温度188.42℃。

锅炉改造技术

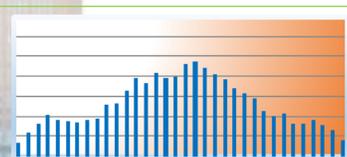
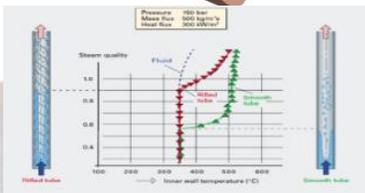
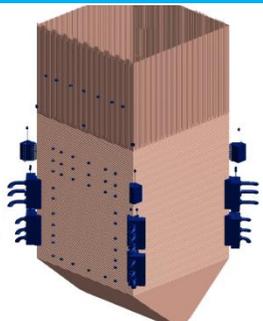
- 锅炉及辅机高效灵活性
- 蒸汽侧整体解决措施

目标原则

- 锅炉本体通过改造后实现电网要求的深度调峰需求，同时满足新能源灵活性需求
- 锅炉满足灵活性运行，并符合国家深度调峰政策，能够快速获取深度调峰高收益
- 锅炉及辅机进行改造后锅炉安全温度运行，长期运行不对寿命造成大幅度影响等

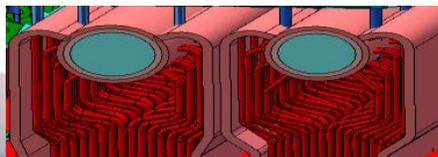
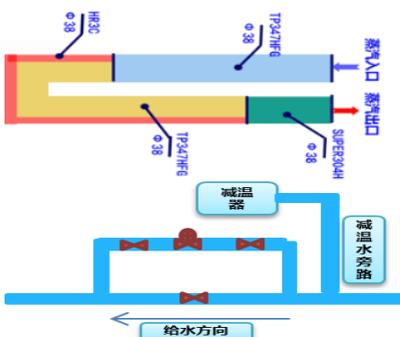
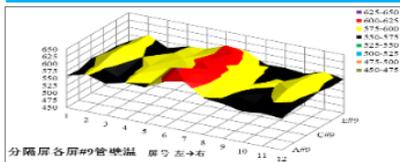
01

水循环系统：
解决低负荷水循环稳定性
解决超低负荷水冷壁冷却
解决火焰偏斜水冷壁偏差



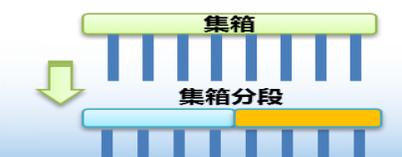
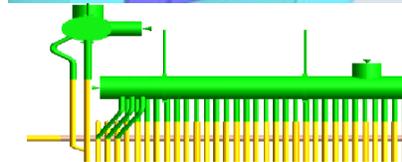
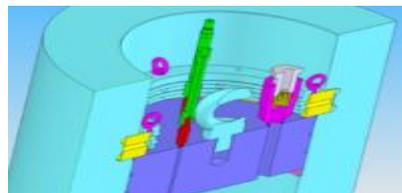
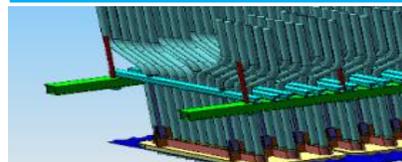
02

受热面安全：
解决运行受热面偏差问题
解决超低负荷受热面裕量
解决超温、偏差响应程度



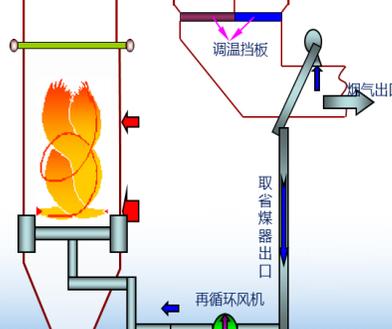
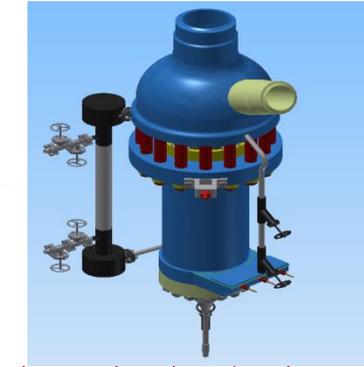
03

受热面应力：
解决厚壁元件的疲劳寿命
解决高温管屏吊挂问题
解决集箱管接头疲劳应力



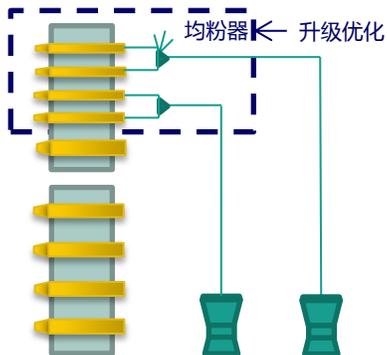
04

蒸汽汽温：
解决深度调峰的干态运行
解决深度调峰的蒸汽汽温

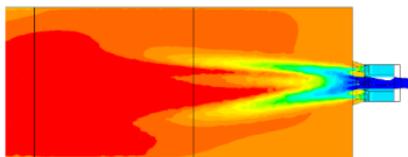
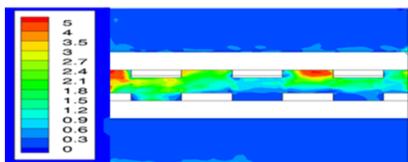


锅炉改造技术

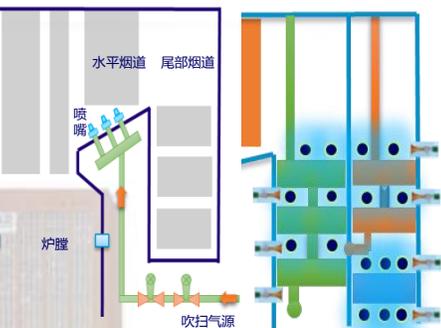
- 锅炉及辅机高效灵活性
- 燃烧系统整体解决措施



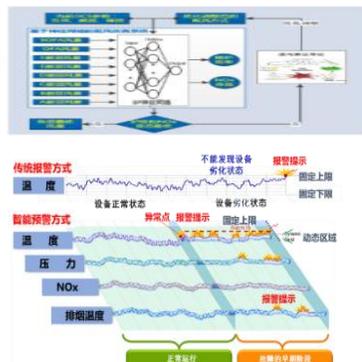
稳燃燃烧器：
解决低负荷稳定燃烧问题
提高低负荷运行燃烧效率



低NOx燃烧器：
严格控制低负荷运行NOx
提升低负荷着火强化

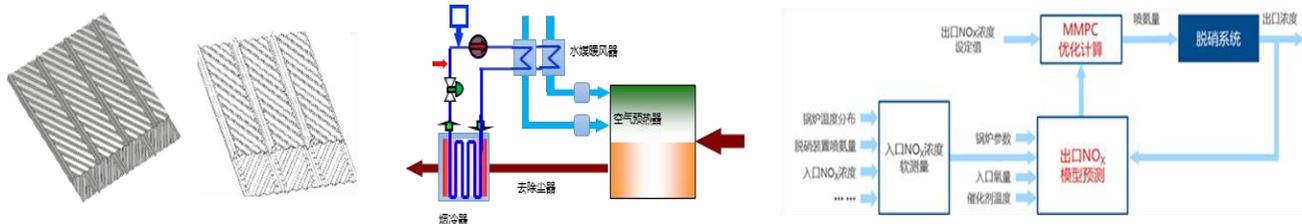


水平烟道、尾部防积灰：
解决低负荷积灰、堵灰问题
解决低负荷吹灰器不能投运

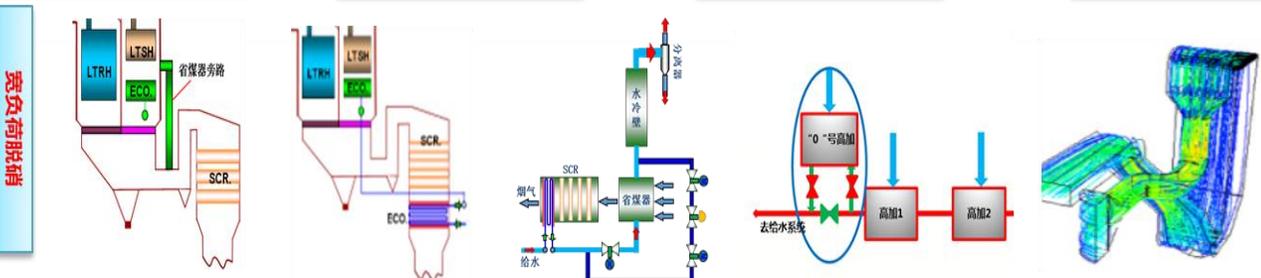


低负荷控制策略：
解决灵活性响应速率
解决调峰运行参数高效

➤ 烟气侧整体解决措施



预热器板型更换 + 冷风加热 + 智能喷氨 + 预热器防堵



煤电灵活性改造 蒙泰东胜660MW超超临界改造项目

蒙泰东胜二期2×660MW锅炉为一次中间再热、超超临界压力变压运行、单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢架、全悬吊结构、紧身封闭布置的π型锅炉，采用**不带再循环泵的大气扩容式启动系统**。采用正压直吹式制粉系统，每炉配6台中速磨煤机，燃用设计煤种时5台运行，1台备用。锅炉采用四角切圆燃烧方式，**水平浓淡燃烧器**。



序号	改造范围	解决问题
1	增加启动再循环泵及配套循环泵冷却水系统	降低工质流量波动及壁温波动，匹配蒸发受热面及过热器受热面吸热比例，减少工质至热量浪费，增强机组低负荷工况运行的稳定性及安全性。
2	水冷壁上集箱分段改造，将前水上及侧水上出口集箱进行分段改造	解决锅炉负荷工况频繁调整及低负荷运行时，由于炉膛内外材料壁温不同，交变应力引起的膨胀拉裂
3	低负荷稳燃问题，将最上两层燃烧器更换为中心富燃料燃烧器，同时调整等离子点火燃烧器位置	解决锅炉 25%THA 负荷工况燃烧器稳燃及污染物排放问题
4	吹灰器汽源改造，增设分隔屏出口吹灰汽源及相应管路系统，增加水平烟道吹灰器及相应管路	解决锅炉 25%THA 负荷工况下吹灰器汽源不能满足吹灰要求及水平烟道积灰问题
5	高温受热面壁温测点增加	增强锅炉深度调峰阶段控制经济性，安全性



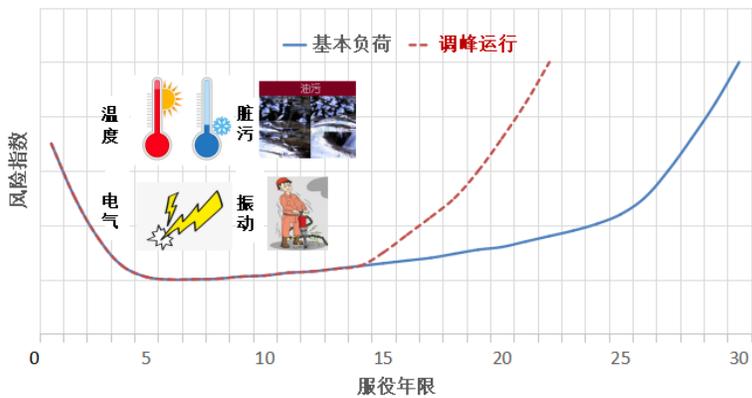
03

发电机改造技术



发电机灵活性改造技术

灵活性运行（深度调峰）对发电机的影响



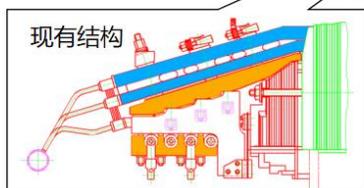
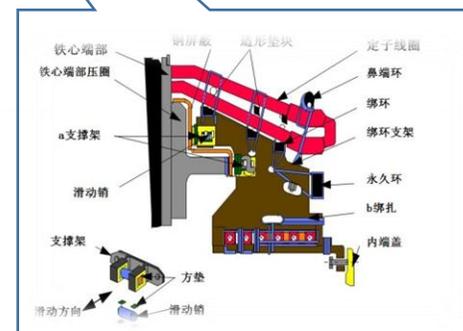
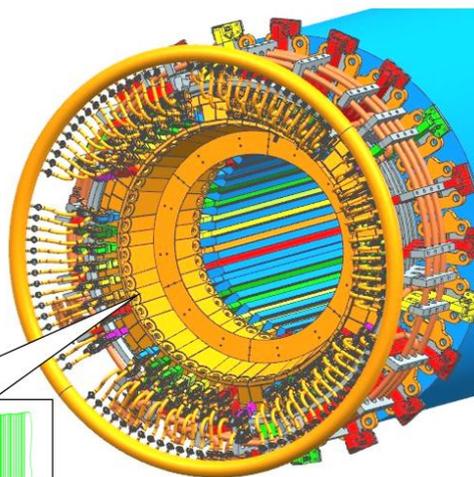
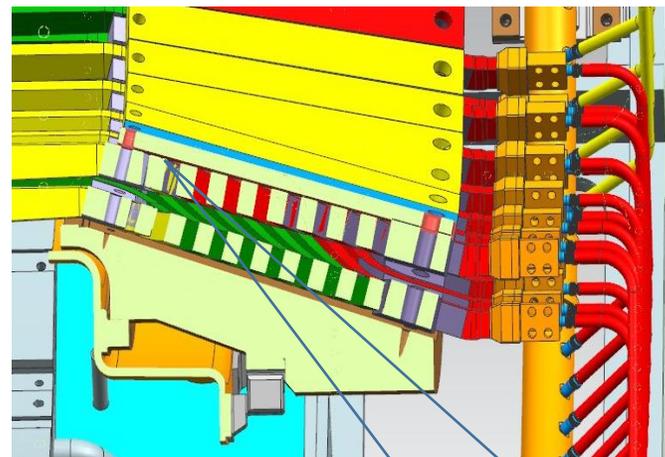
煤电机组灵活性改造目标超出存量煤电发电机的调峰能力范围，在上述工况下运行将对发电机各部件造成不同程度的损害，危害机组的安全稳定可靠运行，影响使用寿命，对煤电的兜底保障作用和灵活调节能力构成威胁，需进行改造。

发电机灵活性改造技术

灵活性改造先进技术—定子端部固定及滑移结构改造

定子绕组端部支撑系统优化为锥环+灌胶的形式：

- 端部整体性好，线圈切向、径向受力均匀，轴向整体一致滑移，特别适用于灵活性运行
- 提高整机防晕水平和绝缘
- 防油、防水、防异物
- 提升机组运行的可靠性。



定子线棒端部结构优化升级

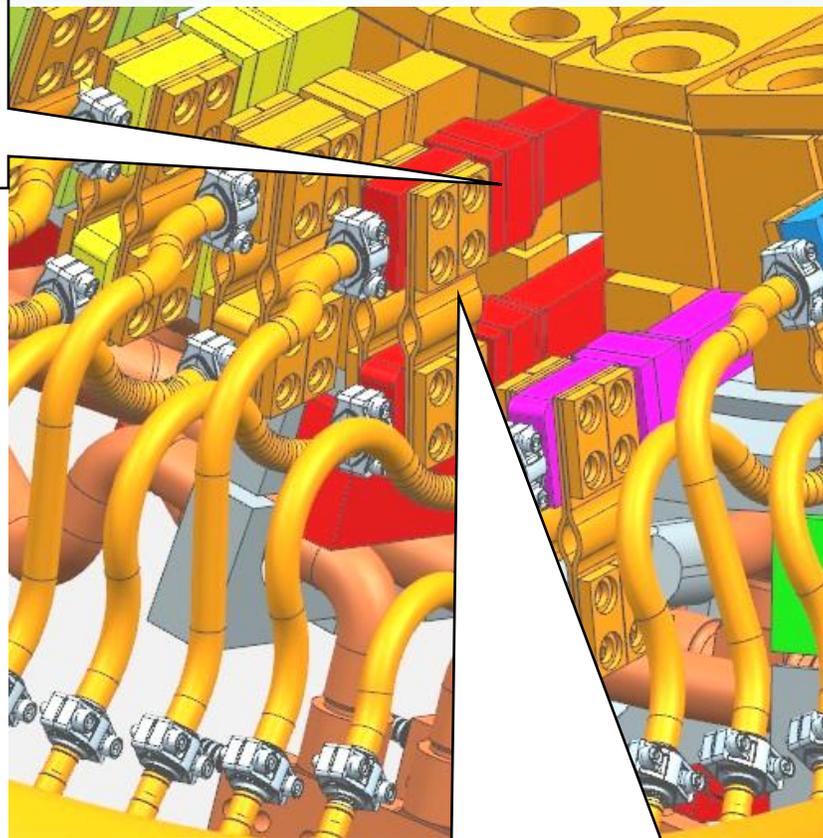
✓ 水盒盖结构优化:

实现水盒和水盒盖钎焊缝的可检、可探，根源上杜绝泄漏，提高机组安全性（线棒和水盒保留）。

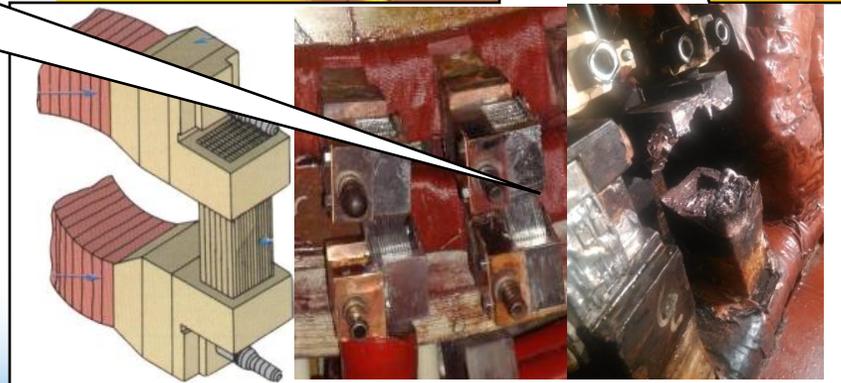
✓ 水电连接结构优化:

采用装配式柔性连接片结构结构，安全可靠，并适应上下层线棒两者升温或降温的速率并不完全一致而形成不均匀的热膨胀差。

双焊缝双保险
可检、可探

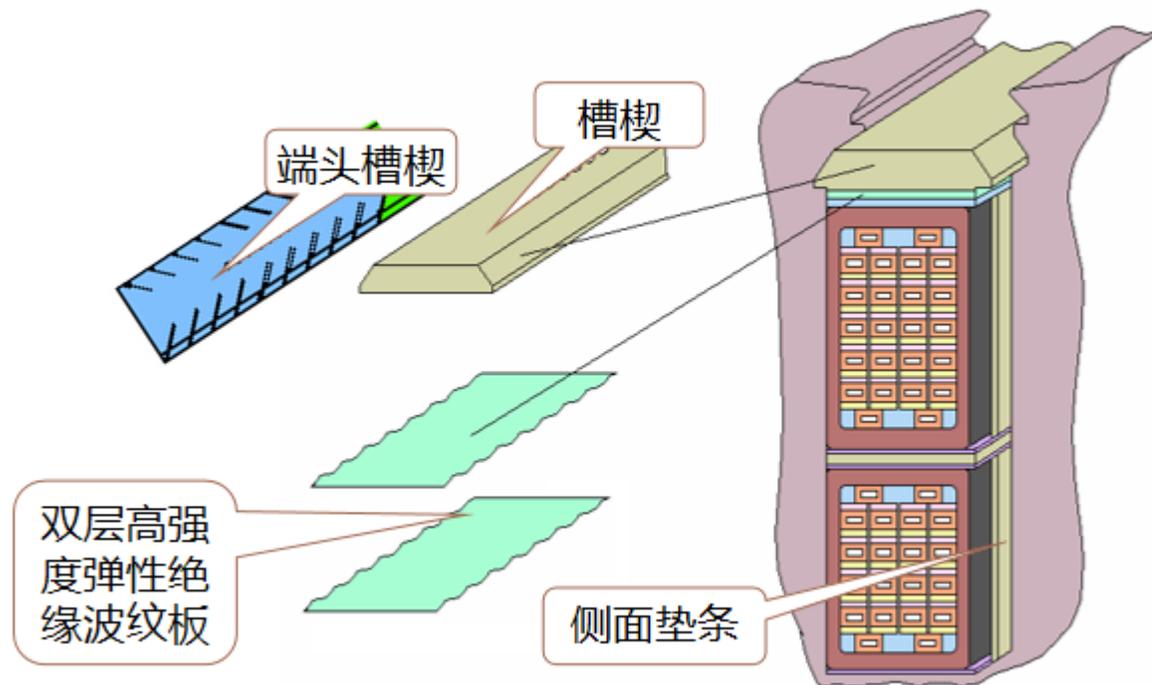


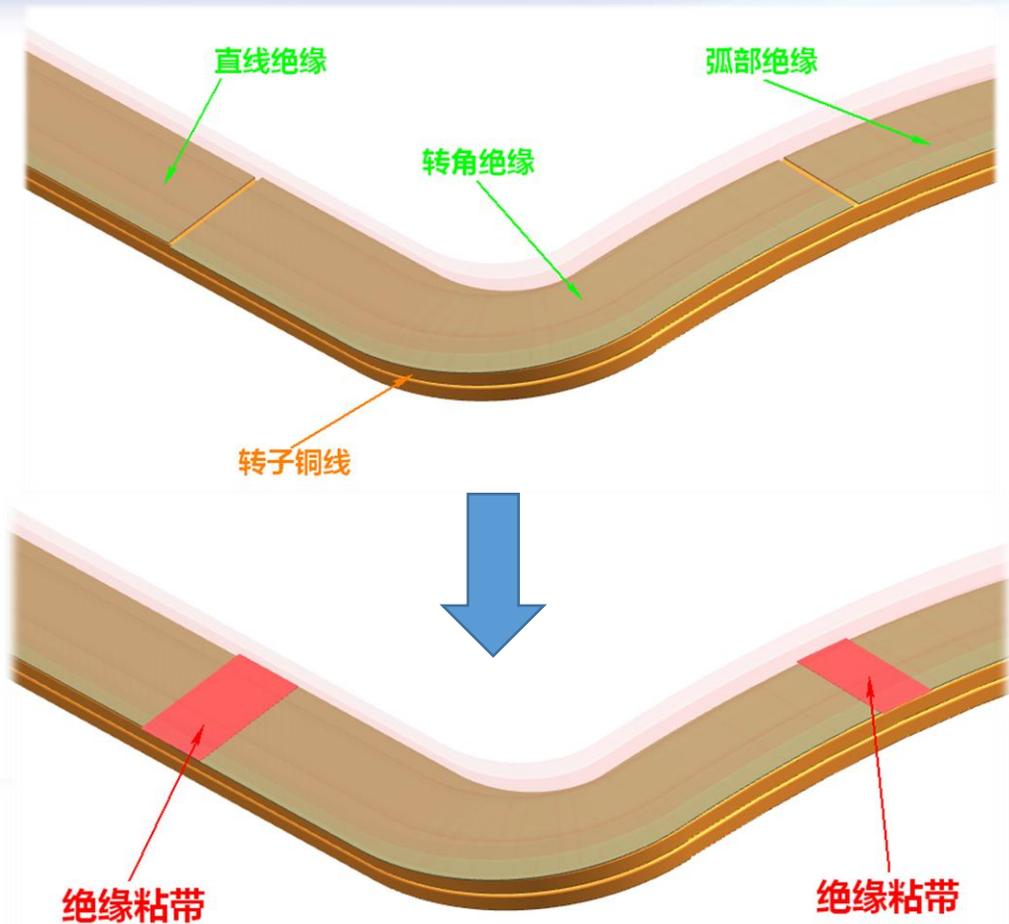
大电流试验检
查鼻端股线



高度可靠的定子槽内固定及滑移

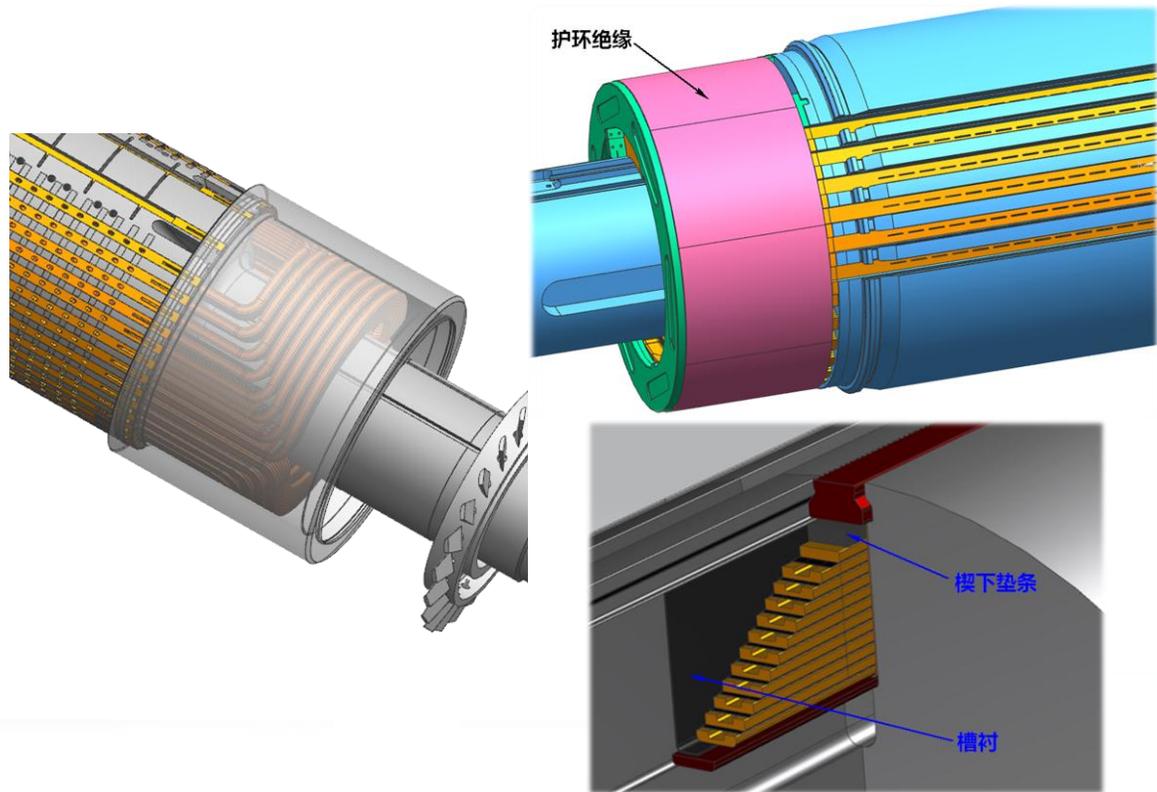
切向和径向波纹板固定+轴向可滑移结构，从基本上杜绝深度调峰灵活性运行导致槽楔松动问题。





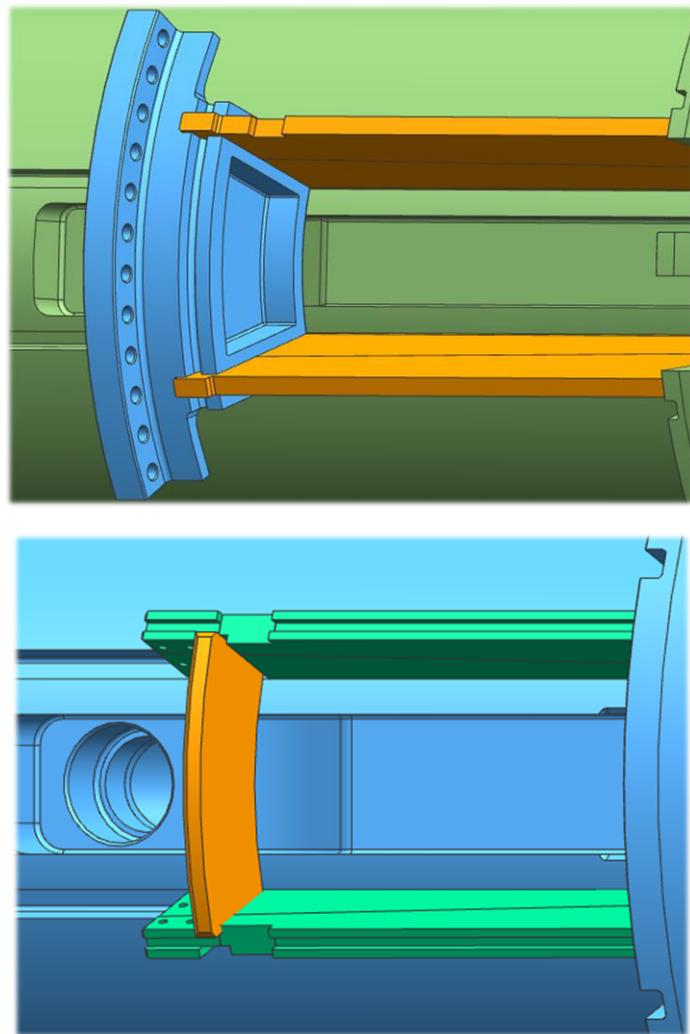
项目	现有结构	技术升级
匝间绝缘材料	环氧层压布板 □ 厚、随形一般	高性能绝缘纤维纸 ✓ 薄，随形好
粘接胶	酚醛丁腈橡胶 □ 剪切强度2MPa □ 耐热等级B 	高性能粘接胶 ✓ 剪切强度4MPa ✓ 耐热等级F 
绝缘结构	单层	双层

- ✓ 匝间绝缘对接处加粘绝缘粘带（聚酯薄膜粘带），双保险，提高接缝处绝缘强度。
- ✓ 使用燃机机组的高性能高可靠性粘接胶对端弧部位匝间绝缘进行粘接（中温加热固化），提高绝缘可靠性。



- ✓ 转子护环绝缘瓦采用多层瓦结构，绝缘和适形性更高
- ✓ 升级绝缘瓦、楔下垫条滑移层材料，进一步提高端部整体滑移顺畅性。

端部双路通风结构优化



高强度铝合金横向风区，增强结构限位，提高可靠性，降低绝缘板磨损风险。

感谢聆听！

