



神华国华电力
SHENHUA GUOHUA POWER

600MW超临界机组电站锅炉受热面氧化 皮剥落问题综合治理

二零一一年十一月



神华国华电力
SHENHUA GUOHUA POWER



神华国华电力
SHENHUA GUOHUA POWER

杨红权：

陕西省技术比武第二名（2000年）

锅炉本体检修高级技师、高级考评员

**太仓市高技能突出人才、江苏省企业
首席技师（享受政府薪酬补贴）**



神华国华电力
SHENHUA GUOHUA POWER

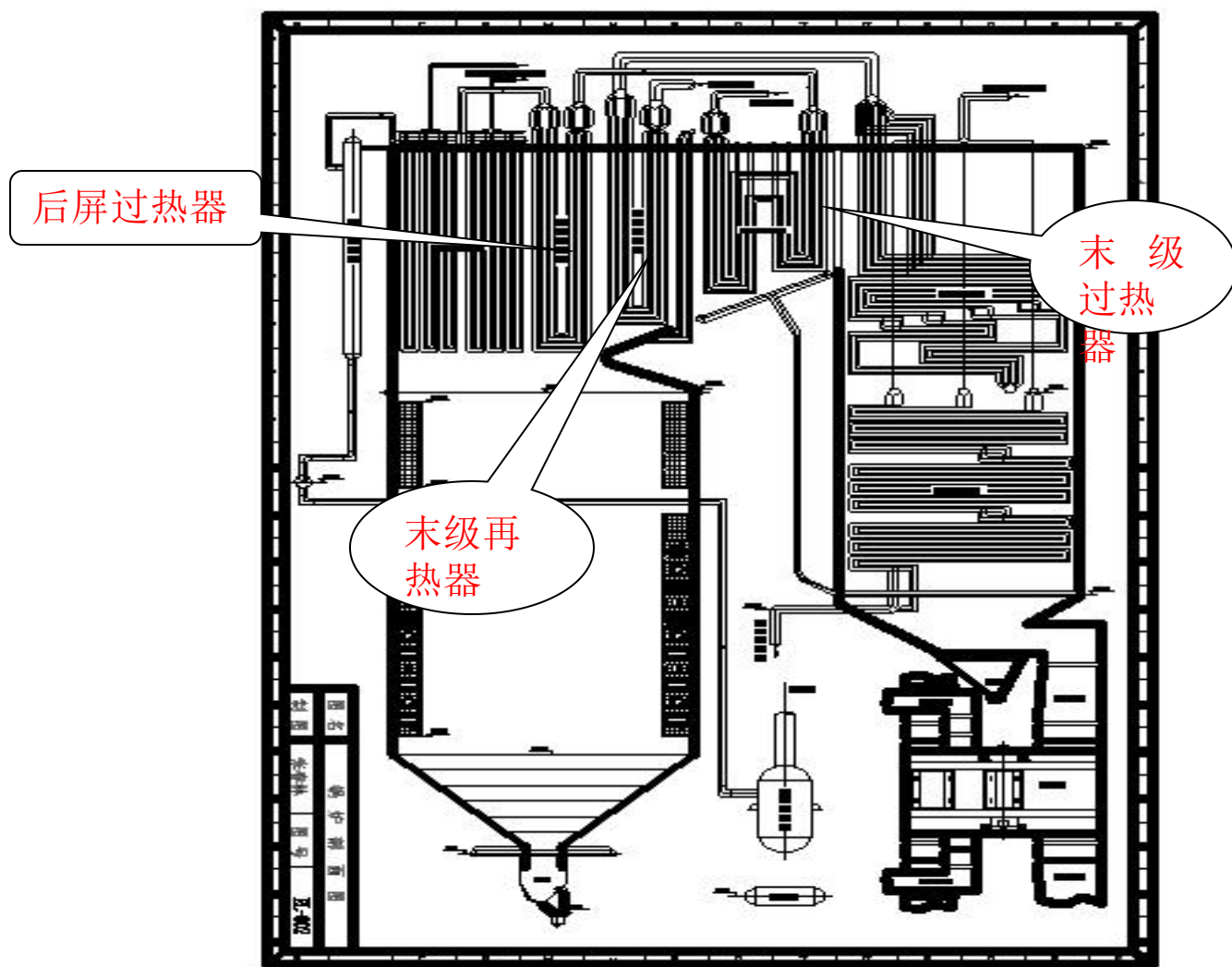
目 录

1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况
2. 太仓公司锅炉高温受热面T23、T91管材内壁氧化膜特征及材料状态
3. 防治锅炉氧化皮爆管的技术路线
4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术
5. 防治锅炉氧化皮爆管的检修技术
6. 给水加氧处理对高温受热面氧化物的影响
7. 太仓发电公司锅炉高温受热面改造
8. 锅炉高温受热面壁温智能管理系统研制
9. 总结

1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

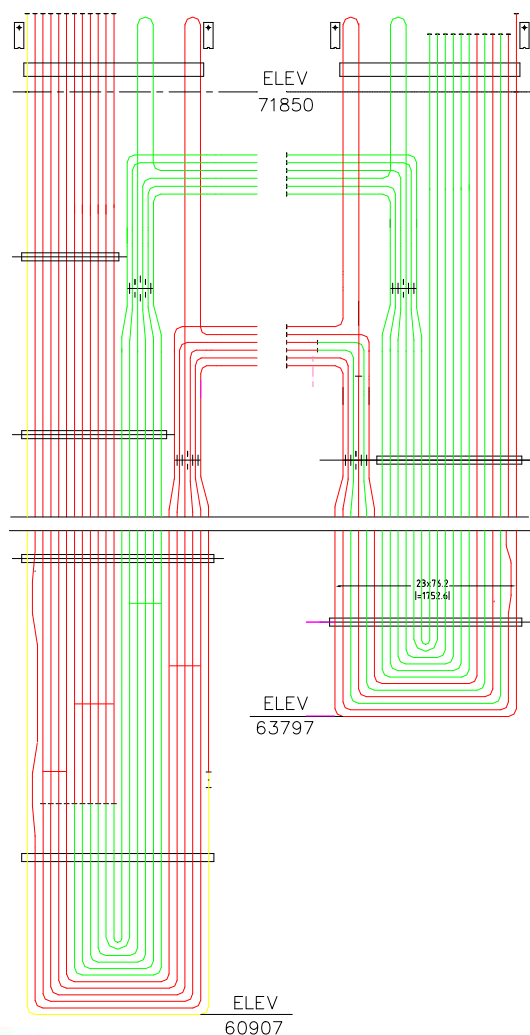
——上海锅炉厂设计特点

高温受热面在炉内总体布置



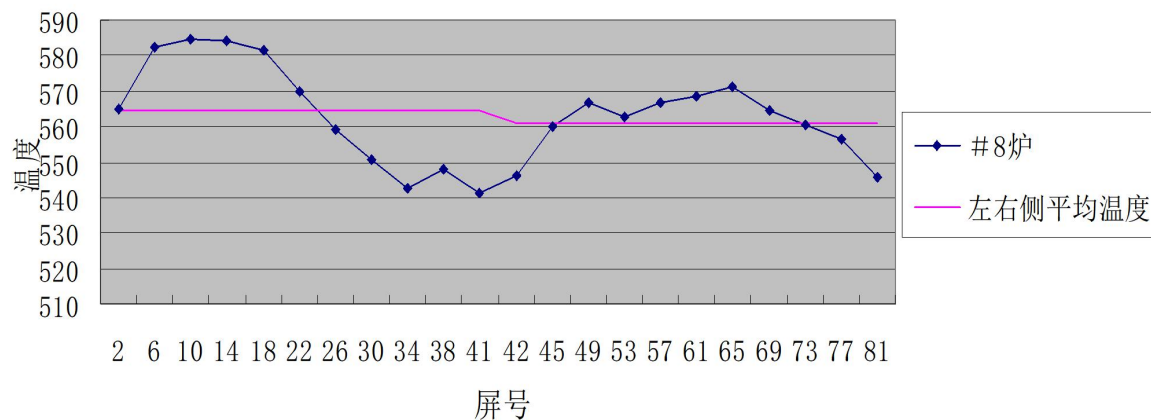
1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——上海锅炉厂设计特点



分为热段和冷段，每屏12根管，共82屏。管外径均为 $\phi 38.1\text{mm}$ ，每屏中根据每根管的热负荷情况选取不同的内径和材料，通过调整蒸汽流量的手段控制同屏热偏差。但由于采用入口集箱两侧进汽的方式，在三通效应下，各屏整体温度分布呈“双驼峰”型。热段最外圈主要采用TP347（黄色）、2~6圈采用T91（红色）、7~12圈采用T23（绿色）和T91。

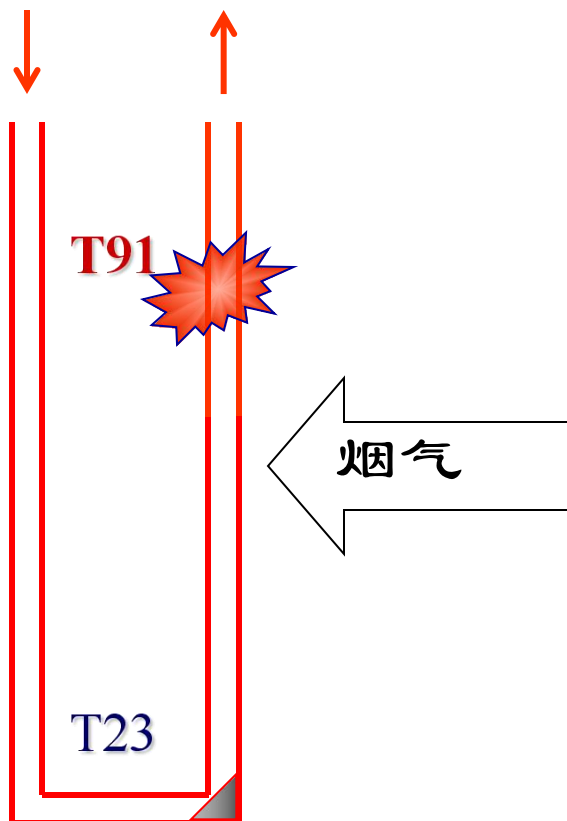
温度偏差示意图



1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——国华太仓公司

- 2007年6月22日，8号炉因停炉不足18h即**强制通风冷却**，造成高温过热器部分管段T23管材氧化皮大量脱落，启动后第59屏9号管、第69屏11号管出口段T91管材发生爆管，累计运行时间1万小时。



1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——国华太仓公司

- 2009年2月6日，7号炉因启动初期**减温水投用**过早造成高温过热器管壁温度大幅波动（30℃/min），T23管材氧化皮大量脱落、第15屏12号管T23管材发生爆管。（下页证明）

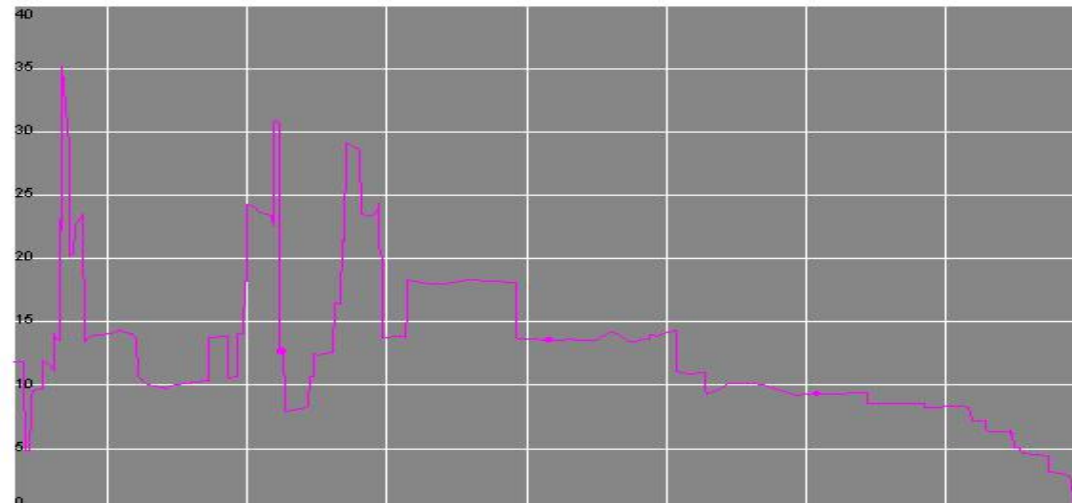


1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——国华太仓公司

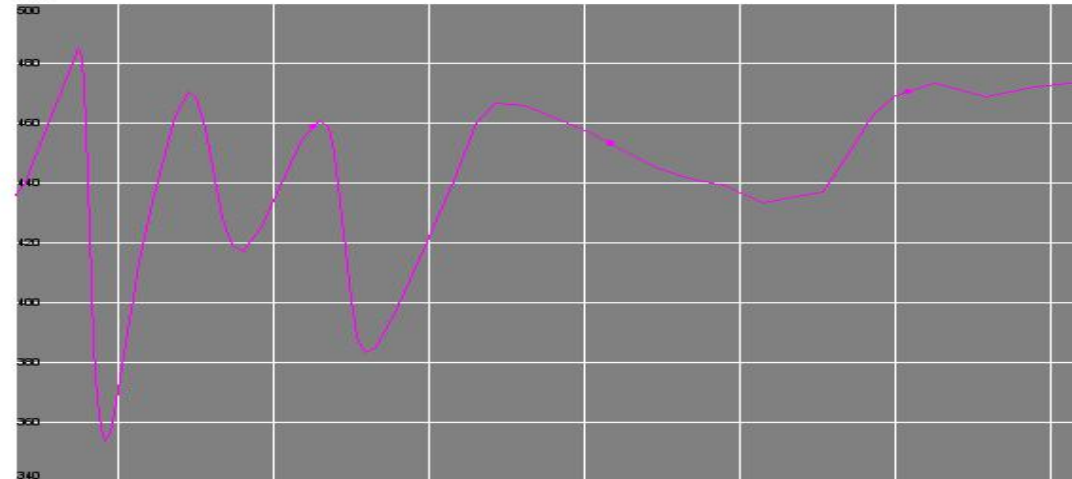
减温水系统

Plot-0



炉膛壁温 6

Plot-0



2009-2-3 13:10:00

3.88 Hour(s)

● 本组油枪系统内第10号油枪管



1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——国华太仓公司

- 2009年10月7日，7号炉在启动48h后高温过热器第9屏12号管发生氧化皮爆管，全面拍片检查清理后于10月12日再次启动，14日高温过热器第71屏4号管发生氧化皮爆管。机组运行累计26418h。**直接原因为打压后积水烘干不净，管屏振动导致氧化膜疏松、剥落。**
- T91管材两次爆口特征均呈现长期超温与短期过热现象，爆口附近T91管段内壁氧化皮最大厚度分别已达0.31mm、0.37mm，爆口附近管段金相组织老化程度约3.5至4.5级，力学性能明显劣化。

第一次爆口



第二次爆口

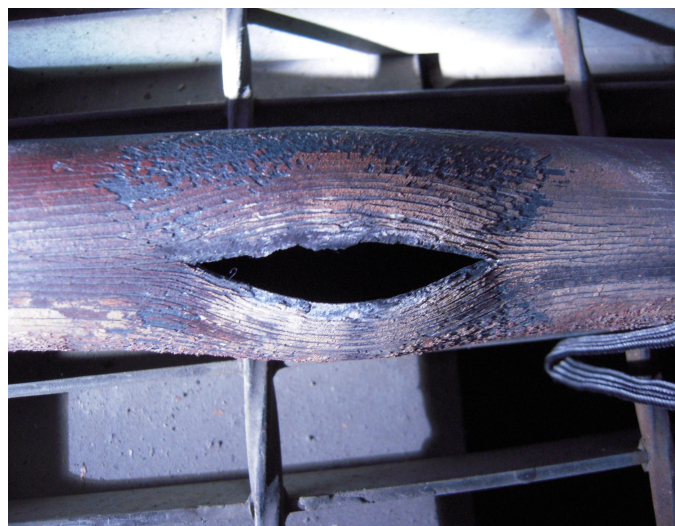


1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——国华太仓公

司

- 2009年11月19日，8号炉在大负荷运行42天后高温过热器第67屏6号管、71屏第6号管T91管材发生泄漏，爆口附近氧化皮厚度已达0.32mm。启动前对所有弯头进行拍片检查，未发现氧化皮堆积超标管段。这说明氧化皮厚度已达到其临界剥落厚度，即使小幅的负荷变化也足以导致其剥落。



1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——上海锅炉厂同类型锅

炉

- **高资某电厂：**2006年10~11月份42天内接连发生7次高温过热器爆管，其中4次由于T23管材、3次由于TP347管材氧化皮大面积脱落所致，2007年将高温过热器高温段的T23管材全部更换为抗高温氧化性能较好的T91管材。2008年5月发生1次T91管材氧化皮大面积脱落导致的氧化皮爆管。并在等离子节油启动前，首先使用常规油枪暖炉。
- **福建某电厂：**因氧化皮爆管频发，将高温过热器高温段的全部T23管材更换为T91管材。
- **沙洲某电厂：**2009年2月12日、2月20日接连发生氧化皮爆管，根据炉内实际检查过热情况，将高温过热器37根T23管材更换为T91，总计1400m。
- **珠海、潍坊某电厂的同类型锅炉也已发生氧化皮爆管事故。**

1. 国内600MW等级超临界锅炉氧化皮爆管情况

——东方和哈尔滨锅炉厂

	制造厂	蒸汽参数 (°C)	材料	入口烟温 (°C)	出口烟温 (°C)	平均烟温 (°C)	入口气温 (°C)	平均温升 (°C)	位置
国华太仓	上锅	571 569	TP347 T91 T23	963	822	893	508	63	高再后
华能太仓	东锅	571 569	TP347	1115	990	1053	503	68	屏过后
宝日希勒	哈锅	571 569	入口T91 出口TP347	1007	958	1007	513	58	屏过后
扬州二厂	哈锅	543 569	T91	1114	1020	1067	497	46	屏过后

三大锅炉厂均根据高温过热器不同的工作烟温和蒸汽参数选用了不同抗蒸汽氧化等级的金属材料。但在主蒸汽温度为571℃的超临界锅炉上均发生了高温过热器氧化皮爆管。华能太仓电厂已发生2次TP347爆管，乌沙山电厂近期也已发生TP347爆管。

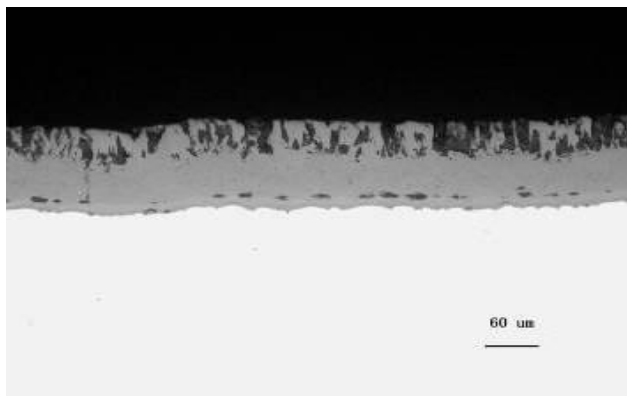
2. 高温受热面T23、T91管材内壁氧化膜结构特征(一)

T23钢管样的原生氧化膜为**二层结构**：**外层**为具有粗大柱状晶的纯磁铁矿 (Fe_3O_4) ；**内层**为具有等轴细晶的含W和Cr的尖晶石。**运行1万小时的T23管样原生氧化膜的厚度为0.12-0.26mm，运行2.8万小时的原生氧化膜的厚度为0.19-0.39mm。原生氧化膜内层存在一条或多条沿圆周方向排列的孔洞链，氧化膜容易沿孔洞链分离，从而造成氧化膜脱落。**

T23钢管样的原生氧化膜沿内层分离后，在后继运行中，残留内层氧化物转变为继生二层氧化物；原生氧化物和继生氧化物都是以二层氧化膜结构形式存在与长大。

T23钢末级过热器运行1万小时管样均发生内壁氧化膜脱落，脱离形式有大片状和椭圆状；T23 钢高温再热器运行1万小时管样未发生大面积内壁氧化膜脱落，管样内壁存在不同程度的氧化皮脱落。

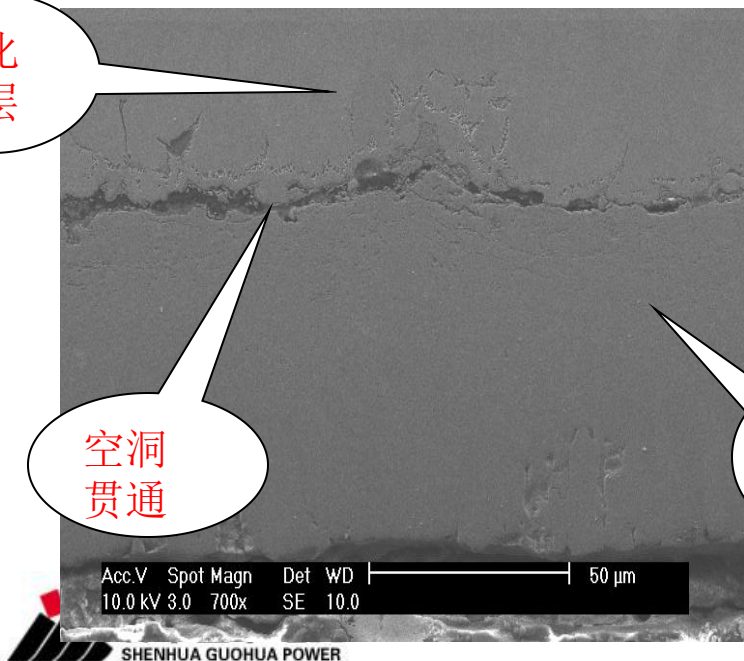
2. 高温受热面T23、T91管材内壁氧化膜结构特征(一)



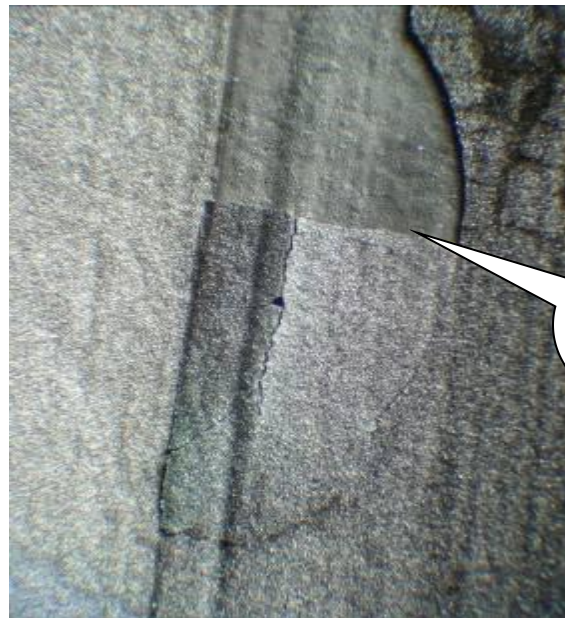
氧化
皮层

空洞
贯通

金属
基体



起皮
脱落



2. 高温受热面T23、T91管材内壁氧化膜结构特征(二)

T91钢末级过热器管样的氧化膜外层为磁铁矿，内层为含Cr和Mo的尖晶石。内层多细孔，一般内层氧化物致密带和疏松带相间存在，氧化膜可能会沿着圆周方向排列的相间带或孔洞链分离。**运行1万小时的T91管样原生氧化膜的厚度为0.12-0.16mm，运行1.5万小时的原生氧化膜的厚度为0.17-0.20mm，运行2.8万小时的原生氧化膜的厚度为0.20-0.33mm。**

T91钢末级过热器运行1万小时管样均未发生内壁氧化膜脱落；**T91运行管样氧化膜的开裂以径向开裂为主**，这有助于氧化层的热应力和生长应力松弛。

T23钢管内壁氧化速度大于T91钢管内壁氧化速度，T23钢的氧化膜剥落倾向比T91钢大得多。

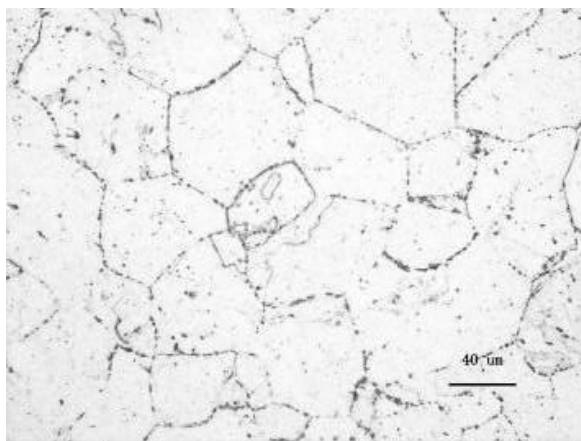


2. 高温受热面管T23、T91管材的材料状态

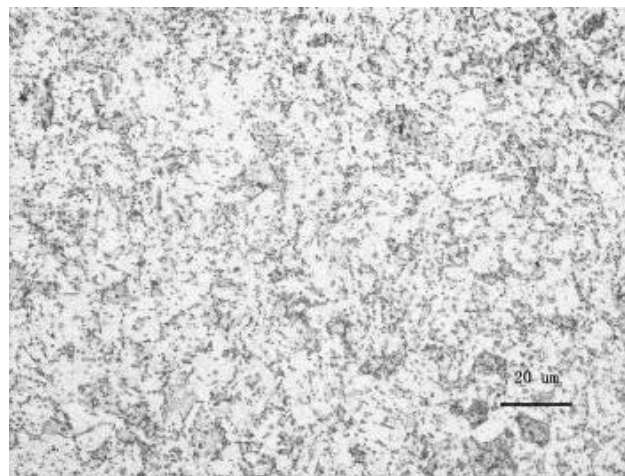
T23钢末级过热器各管样材料的老化程度：多数管样材料老化属运行初期的正常老化；少数管样材料老化属运行初期的加速老化。

T91钢末级过热器各管样材料的老化程度：多数管样材料老化属运行初期的正常老化；少数管样材料老化属运行初期的加速老化。

少数T23和T91管样材料运行初期的加速老化的原因是：管壁温度相对较高，因T23钢管内壁氧化物快速生长和脱落并在下弯管堆积导致壁温升高。



T23管金相组织，回火贝氏体严重退化



T91管金相组织，马氏体形态基本消失，老化4级

3. 防治锅炉氧化皮爆管的技术路线

在现有材料水平下，超（超）临界锅炉的氧化皮生成与剥落难以避免，因此现实可行的治理技术路线为：

减缓生成→控制剥落→加强检查→及时清理→及时换管与改造

减缓生成：金属管壁温度控制、合理选材。

控制剥落：温度、温度变化率、氧化皮与金属基体之间的温差

加强检查、及时清理、及时换管：拍片检查堆积情况、氧化皮测厚、内窥镜检查脱落情况、割管清理，更换氧化皮厚度超标管段。

及时改造：制定和实施锅炉高温受热面管材升级改造方案，确保一个大修期内锅炉安全运行。

4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

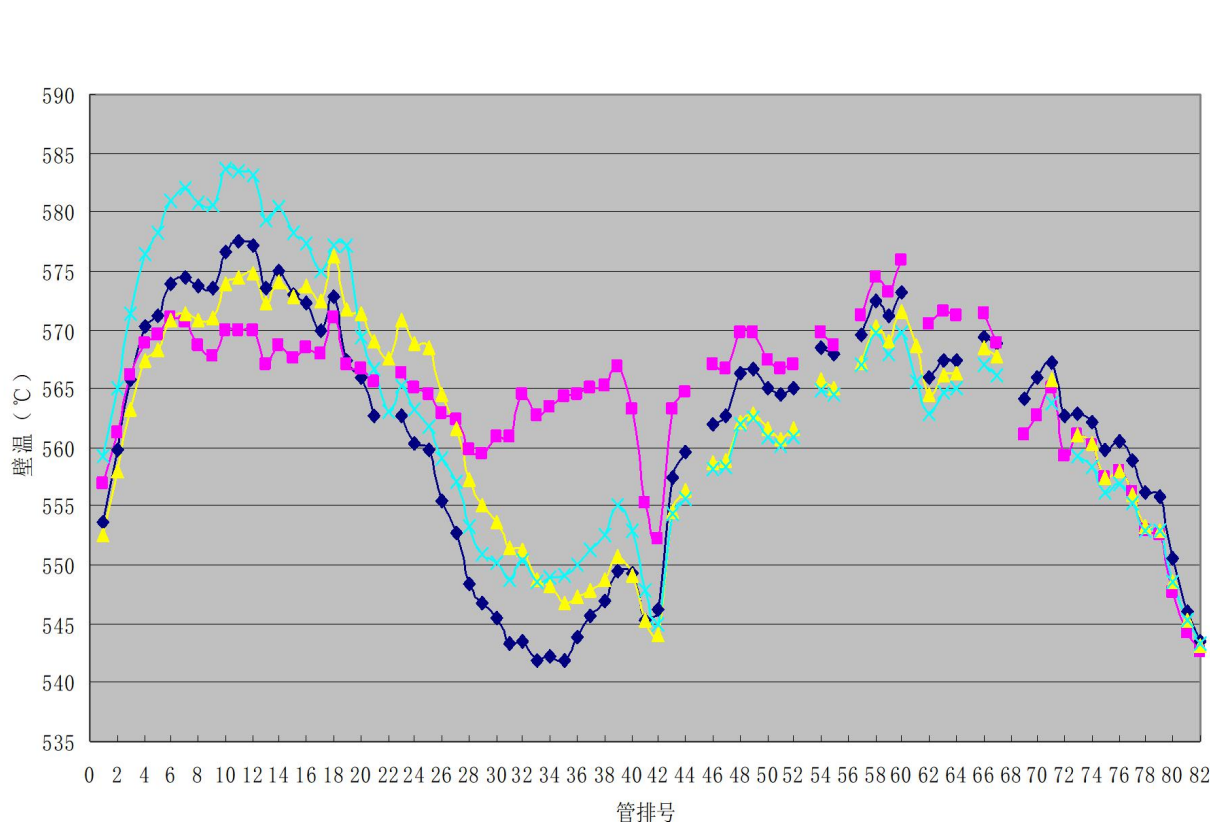
——完善壁温测点

- 高温过热器、高温再热器按布置方式考虑，对于半辐射式高温受热面（位于折焰角之上）沿宽度方向每隔2~3片屏至少装设一个壁温测点；对于对流式高温受热面（位于水平烟道）沿宽度方向每隔1m装设一个壁温测点，均装设在每屏壁温分布计算值最高的管子上。
- 对于切圆燃烧方式锅炉，沿宽度方向靠近两侧墙约1/4处装设全屏壁温测点；对于对冲燃烧方式锅炉，在宽度方向的中部应装设2~3片全屏壁温测点。
- 管屏最内圈管子如采用弯曲半径小于1倍管径的弯管，则应装设壁温测点。

4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——燃烧调整降低热偏差

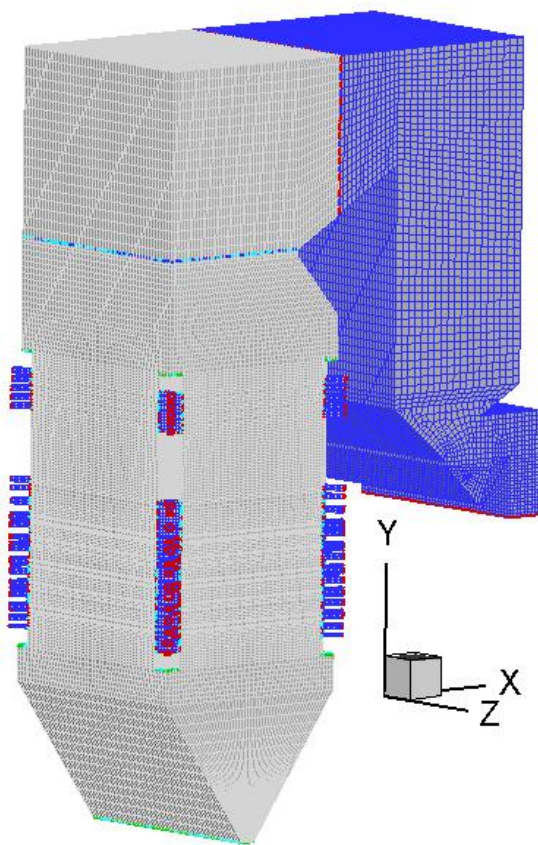
- “双驼峰”现象是入口集箱的进汽结构使然，无法通过燃烧调整改变，但可以通过炉内烟气消旋使两个“驼峰”区域的温度水平相当，达到降低热偏差和避免减温水单侧投用的目的。



太仓锅炉通过SOFA
喷口反切15°和加
大风量，高温过热
器管壁峰值温度降
低5~10℃。满负
荷全参数稳定运行
工况，可将峰值温
度控制在595℃。

4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——控制节油启动期间的屏底烟温



计算模型

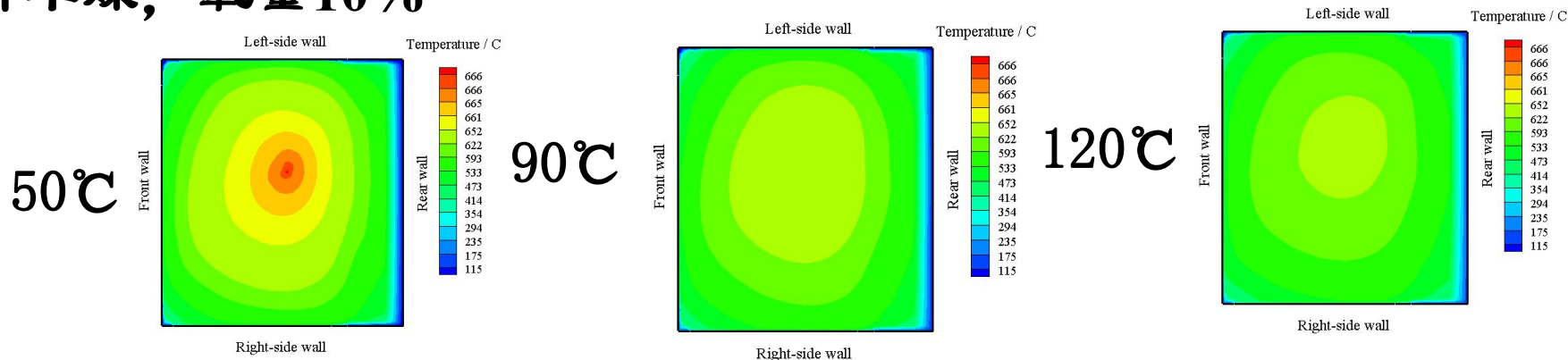
计算工况

计算燃料	炉膛出口氧量 (%)	给水温度 (℃)
神华烟煤	10	50/90/120
	15	50/90/120
宝日希勒煤	10	50/90/120
	15	50/90/120
燃油	10	50/90/120

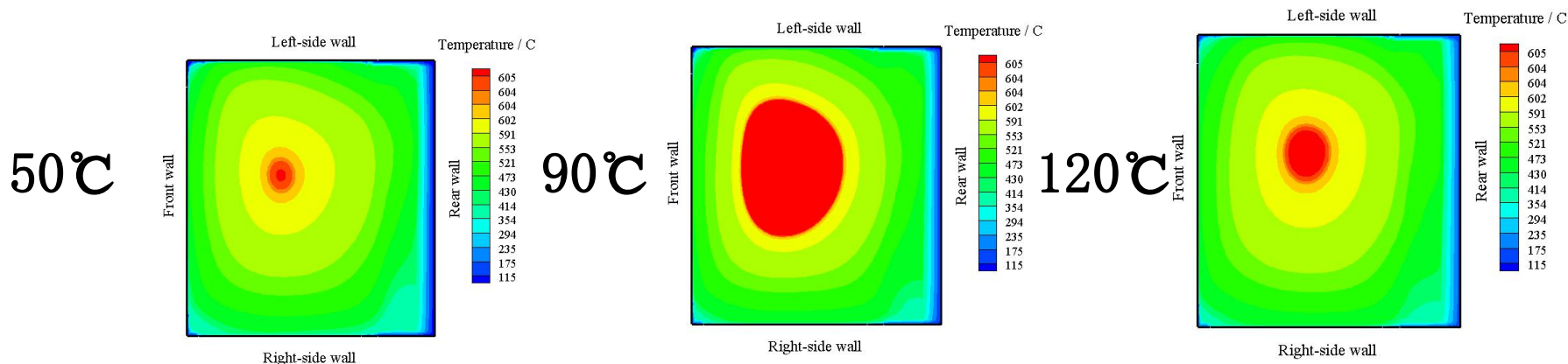
4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——控制节油启动期间的屏底烟温

神华煤，氧量10%



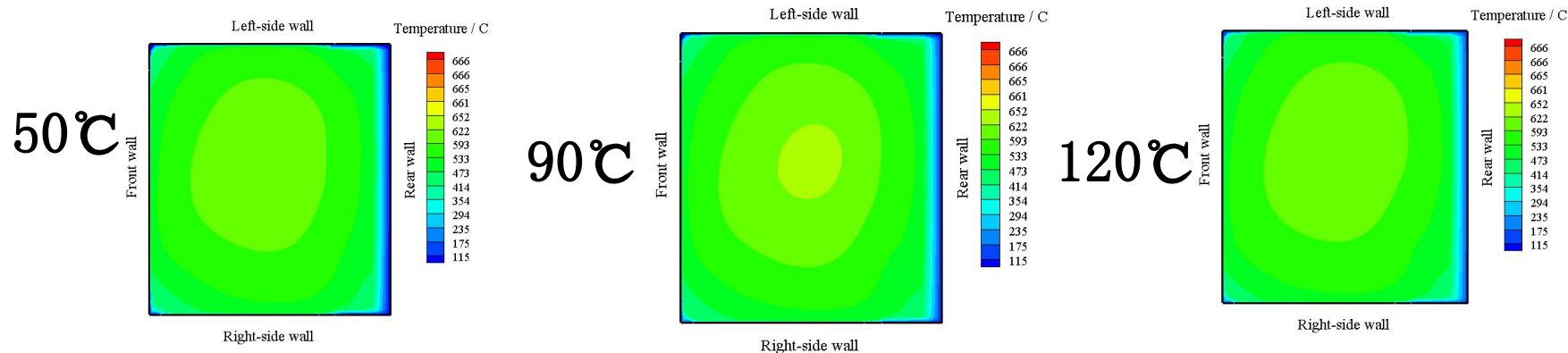
神华煤，氧量15%



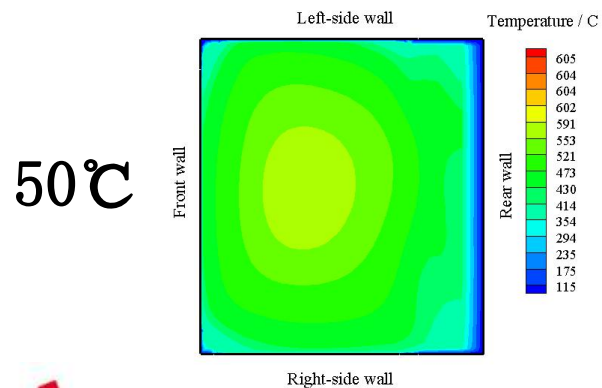
4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——控制节油启动期间的屏底烟温

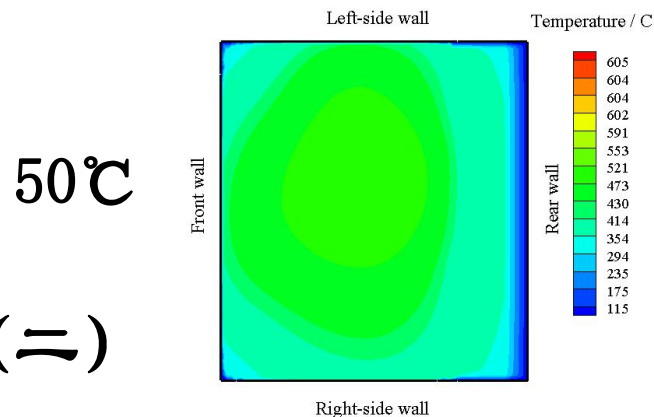
宝日希勒煤，氧量10%



宝日希勒煤，氧量15%



燃油，氧量10%



计算结果 (二)

4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——控制节油启动期间的屏底烟温

燃料种类	炉膛出口氧量 (%)	给水温度 (℃)	平均烟温 (℃)	最高烟温 (℃)	最低烟温 (℃)
神华煤	10	50	603	666	330
		90	585	641	307
		120	574	629	311
	15	50	521	605	298
		90	537	624	318
		120	527	606	308
宝日希勒煤	10	50	556	620	309
		90	562	626	321
		120	561	618	325
	15	50	481	571	285
		90	486	578	299
		120	494	583	314
燃油	10	50	427	501	254

4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——控制节油启动期间的屏底烟

温

- 控制措施

常规油枪暖炉

提高给水温度

适度增加二次风量

- 控制目标

100MW以下负荷不使用过热器二级减温水 and 再热器事故喷水,

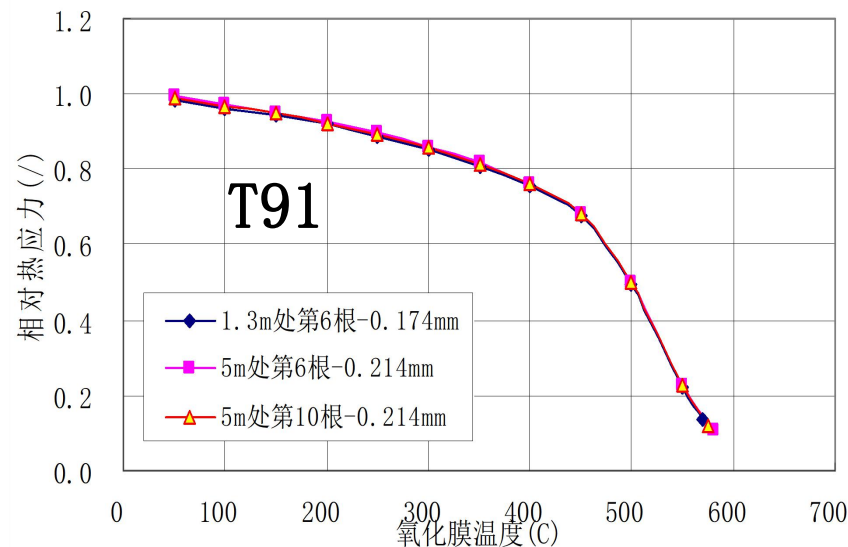
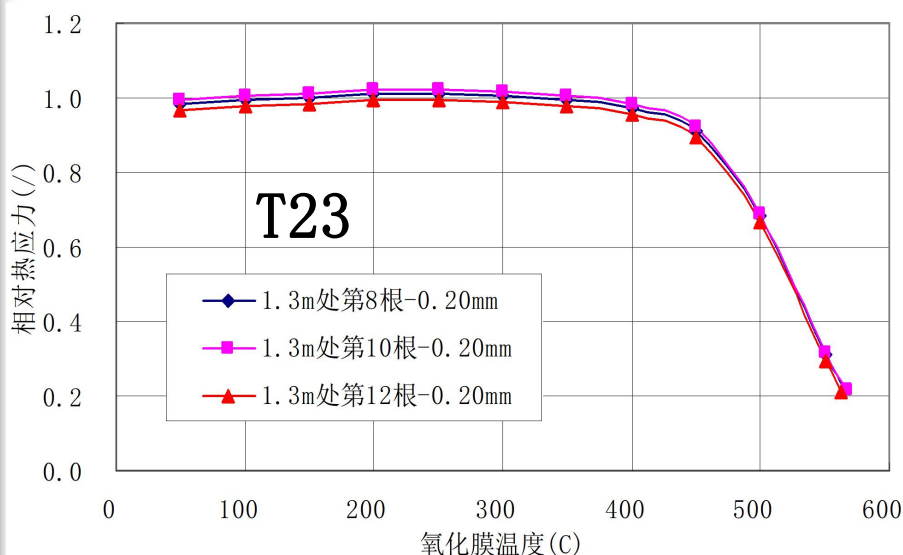
温升速率低于 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——控制停炉参数和强制冷却

● 控制停炉参数

在停炉前，不应通过降低蒸汽温度的方式冷却汽轮机。如果确实需要，需在检修计划中安排割管清理工期。



氧化皮在高温下生成，在稳态过程中，当温度偏离氧化皮生成温度时，氧化皮内就会产生热应力。停炉前的蒸汽温度实际控制不低于**530°C**。

4. 防治锅炉氧化皮爆管的运行技术

——控制停炉参数和强制冷却

- 控制强制冷却

若无检修工作则保持密闭冷却。否则，密闭冷却时间不应低于18h。1.5MPa压力下热炉放水后，可启动1套送、引风机维持25%风量缓慢冷却，12h后再加大冷却风量。风量控制以空预器前烟温下降速率低于 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 为准。若停炉冷却速率较快，需在检修计划中安排割管清理工期。

5. 防治锅炉氧化皮爆管的检修技术

——氧化皮堆积检查、形貌分析及换管

- 若停炉时间允许，应对高温受热面弯头氧化皮堆积情况进行抽查（射线方式或磁通量方式），视检查结果决定是否扩大检查范围。
- 割管清理脱落氧化皮堵塞流通面积达到1/3以上的管段。
- 机组大修过程中应割取高温区段管屏中不同金属材料的管样进行微观组织检验，力学性能试验，氧化皮厚度、形貌、结构和剥离程度检查。
- 采用内窥镜对不同金属材料的管内氧化皮剥落情况进行抽查。
- 对铁素体钢的氧化皮厚度进行无损监测，更换氧化皮厚度超过0.25mm的铁素体钢管。

5. 防治锅炉氧化皮爆管的检修技术

——打压技术措施

对于非塔式锅炉，打压后受热面管内积水不易排净，由于热偏差的存在和测点数量有限，烘干积水过程较为漫长。若积水烘干不净即开始锅炉升压，**管屏振动**？会导致氧化皮大量剥落，易于发生爆管事故。因此其重点要求如下：

- 采用油枪烘炉，缓慢增加燃油量，控制末级过热器和再热器的管壁温升速度在 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之内。
- 过热器和再热器内存水蒸干的标准是：每级受热面均有温升、出口温度均有 10°C 以上的过热度、**同屏管壁温差小于 30°C 、屏间温差小于 40°C 。**

6. 给水加氧处理对高温受热面氧化膜的影响

●通过太仓8号机组加氧一年前后数据分析认为：机组实施加氧后T23材质氧化膜生长速度没有明显改变，而对T91、TP347H讲，加氧处理后会使氧化膜**生长速度**略有降低。数据见下表：

材质	加氧前氧化膜生长速度 ($\mu\text{m/a}$)	加氧后氧化膜生长速度 ($\mu\text{m/a}$)
过热器T23	56	51
再热器T23	64-70	62
过热器T91	> 50	37
再热器T91	> 35	25
过热器TP347	在AVT处理13个月后，氧化物的厚度为 $55\mu\text{m}$ ，运行至30个月时，氧化物的厚度为 $44\mu\text{m}$ ；加氧处理一年后，氧化物的厚度为 $32\mu\text{m}$ 。	

6. 给水加氧处理对高温受热面氧化膜的影响

- 太仓8号机组加氧前后过热器氧化物成份分析得出：
加氧处理一年后T23、T91、TP347H材质氧化物中的 Fe_2O_3
成份所占比例有所增加，T23材质由12.46%增加到
13%；T91材质由3%增加到8%；TP347H材质由22.5%增
加到26%。
- 宏观上认为加氧处理不会明显影响氧化膜的生长速
度和氧化膜的**剥落**。**争论，微观待研究。**

7. 太仓公司超临界锅炉高温受热面改造

——改造原则及目标

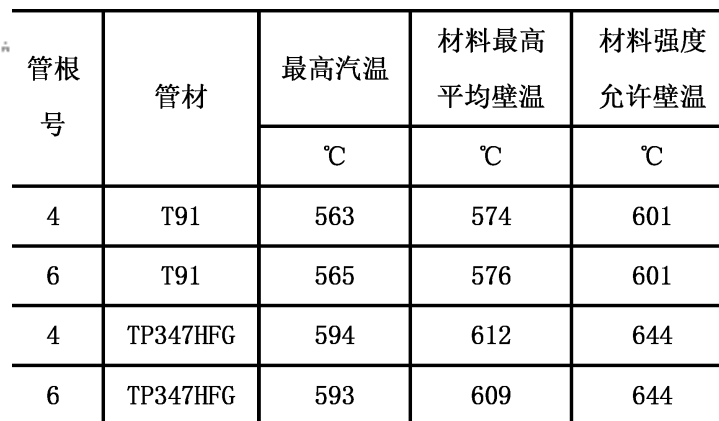
改造原则：

- 高温受热面**金属壁温**低于570℃使用T23、高于570℃使用T91、高于595℃使用TP347HFG；
- 壁厚选择上保持10℃以上裕量；
- 底部弯头半径大于3.2D。

改造目标：

- 保证锅炉在一个大修期内在额定蒸汽温度下安全运行；
- 锅炉热偏差不增大、效率不降低；
- 管屏应力满足锅炉全寿命期内的启动要求。

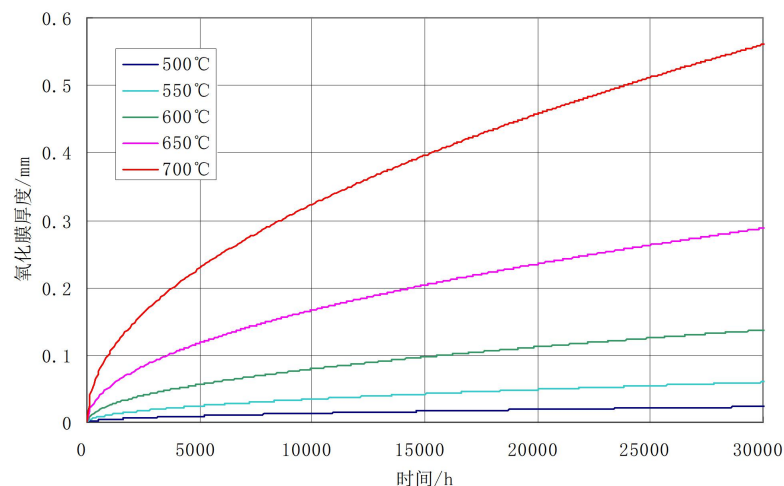
——改造方案



	T91	TP347HFG
末级过热器	77t	80t
末级再热器	50t	72t

7. 太仓公司锅炉高温受热面改造

——达到临界脱落厚度的时间估算



管屏 根号	管材	高温过热器氧化膜剥落预测	
		计算厚度(mm)	所需时间(h)
4	T91	0.32	66300
6	T91	0.32	61800

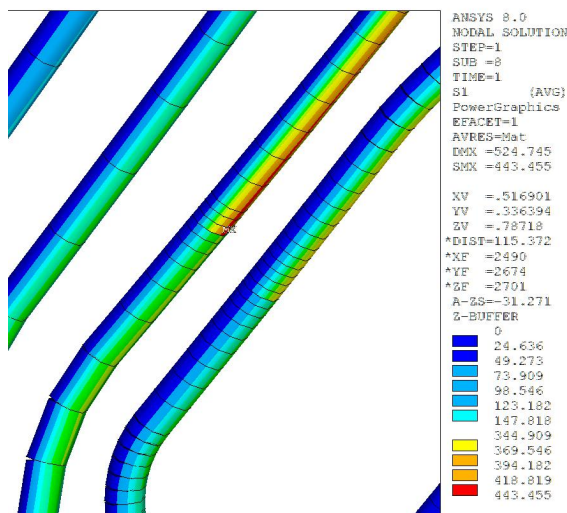
$$\delta_{ox} = \sqrt{2A\tau e^{Q/(T_{ox}+273.15)/R}}$$

由于热偏差的存在，这一时间并不表明所有管屏的第4、6根管的残余寿命已耗尽，而只是表明此时应加强检查，通过全面的氧化膜测厚工作和典型管段的氧化膜形貌分析，以及基于氧化膜厚度的残余寿命计算，根据检修间隔和工期要求，确定局部换管方案。

7. 太仓公司锅炉高温受热面改造

——改造后高温再热器焊口开裂原因分析

太电8号炉改造完成后，在两次启动过程中，位于高温区的高温再热器左侧第8屏和右侧第8屏**最内圈管入口TP347HFG和super304管材焊缝处**分别发生开裂。



金相分析结果表明：泄漏管段为内壁沿晶开裂，**呈现再热裂纹特征**。

应力计算结果表明：入口段T91和出口段TP347HFG材料的热膨胀系数差别较大，最内圈管热应力下的疲劳寿命仅允许2次冷态启停（线弹性、TRD规范）。

结构和工艺原因：焊口处变径、坡口为阶梯式。

7. 太仓公司锅炉高温受热面改造

——改造后高温再热器焊口开裂治理

抢修措施：高温再热器最内2圈不再使用super304制作弯头、将最内两圈入口段自炉顶下方1500mm处之后的T91和super304更换为喷丸的TP347H、弯头焊口和管卡上移200mm以及焊接坡口改为18° 倒角。

成套所疲劳寿命估算：

再热器：原改造方案6次，现改造方案22440次。

过热器：1625次。

锅炉厂疲劳寿命估算：

再热器：原改造方案2次，现改造方案1275次。

过热器：700次。

7. 太仓公司锅炉高温受热面改造

——高温受热面优化改造方案分析

优化方案：在8号炉抢修方案基础上将高温再热器最内4圈的出、入口段及弯头材料全部选用TP347HFG，将高温过热器热段入口处的第12圈管焊接拘束解除，并加装管卡。

成套所疲劳寿命估算：

再热器：30271次。

锅炉厂疲劳寿命估算：

再热器：124976次。

过热器：222094次。

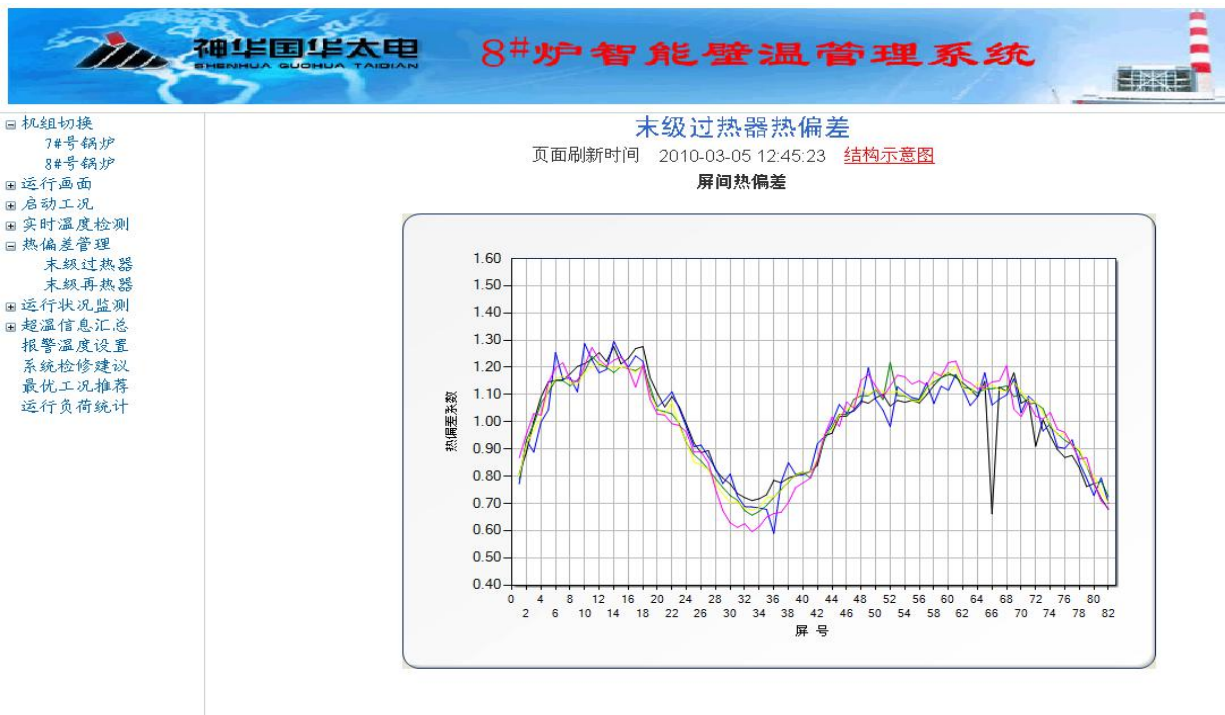
7. 太仓公司锅炉高温受热面改造

——改造效果评估

8号炉改造后，经过燃烧调整试验和高温受热面壁温计算，最大负荷、额定负荷、75%负荷保持主蒸汽和再热蒸汽温度达到设计参数下，T91管材壁温在595℃以下、蒸汽温度在570℃以下，高温过热器冷段T23壁温低于570℃。改造后锅炉可以达到6MW/min的负荷响应速度，主蒸汽和再热蒸汽温度以及高温受热面热罩内金属温度均不超温。改造后锅炉效率94.68%，与改造前基本持平。

8. 锅炉高温受热面热偏差在线监测和壁温智能管理系统研制

- 根据炉外管壁实测温度，采用“壁温分段计算模型”，综合考虑沿宽度和高度方向的吸热偏差系数、传热角系数、曝光系数、辐射穿透率、辐射因数等主要参数的影响，实现了锅炉高温受热面的运行炉内壁温、同屏热偏差系数和屏间热偏差系数等在线计算和管理。



8. 锅炉高温受热面热偏差在线监测和壁温智能管理系统研制

- 开发末级过热器壁温智能检测系统。为运行监测、调整提供手段。在线系统实时显示出超温管所处位置（第几屏、第几号管、具体哪一点超温）

末级过热器屏间温度监测

画面刷新时间

2009-10-26 10:08:34

结构示意图

选择管编号:

第10根管



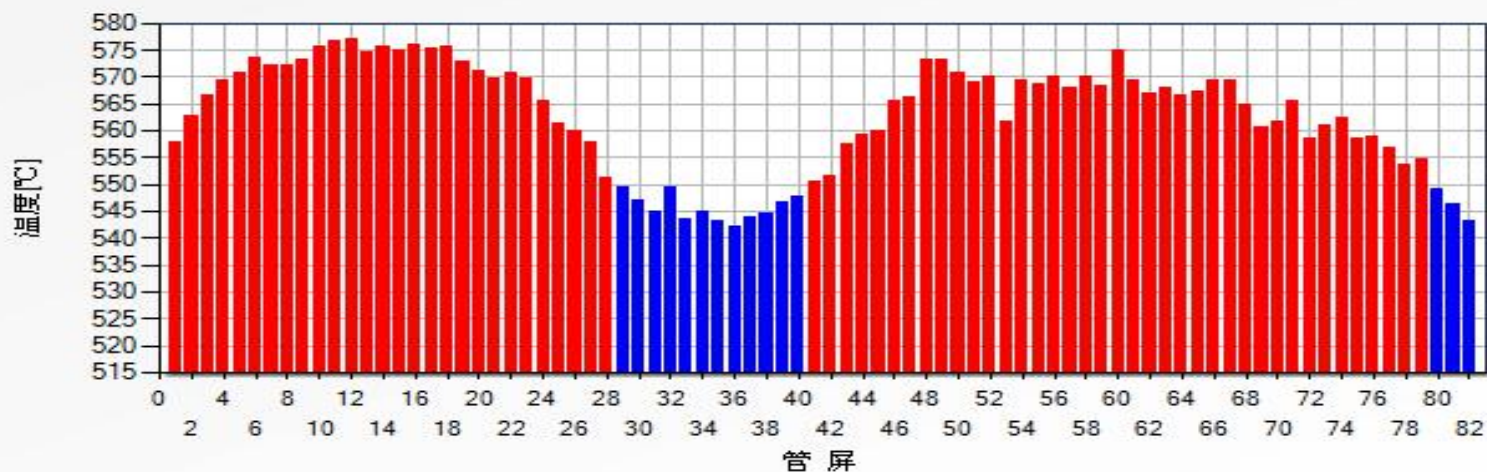
选择计算点:

第8点



管壁温度分布

合并曲线



8. 锅炉高温受热面热偏差在线监测和壁温智能管理系统研制

- 在线系统实时显示出温度峰值区域的各管温度情况（红色为超温）

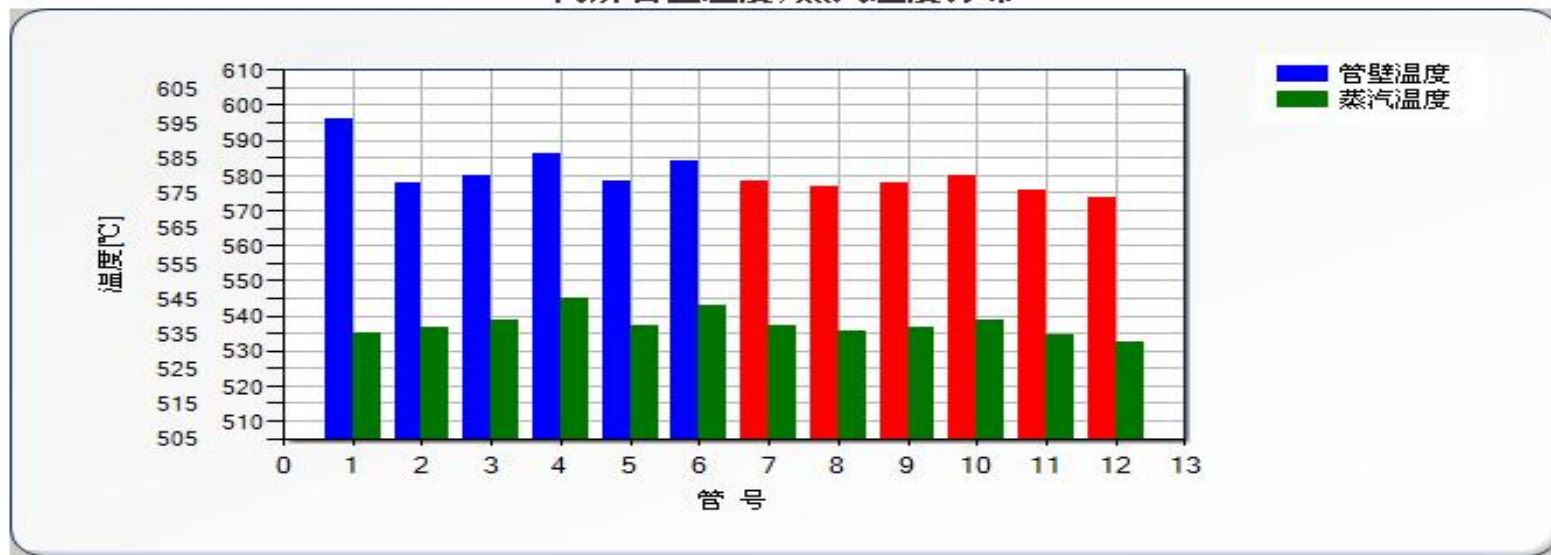
末级过热器同屏温度监测

画面刷新时间 2009-10-26 11:09:37 21

结构示意图

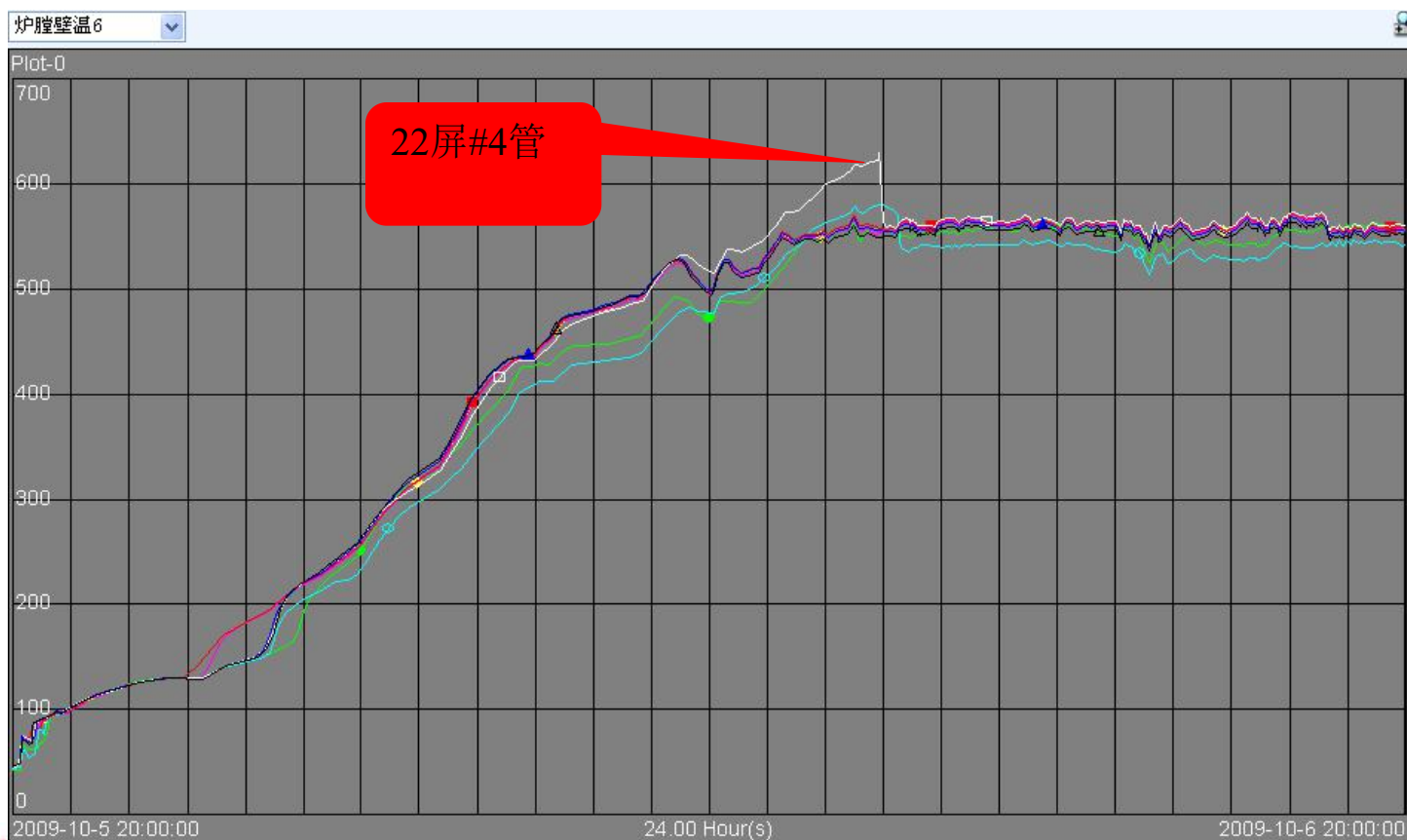
选择计算点: 第8点

同屏管壁温度/蒸汽温度分布



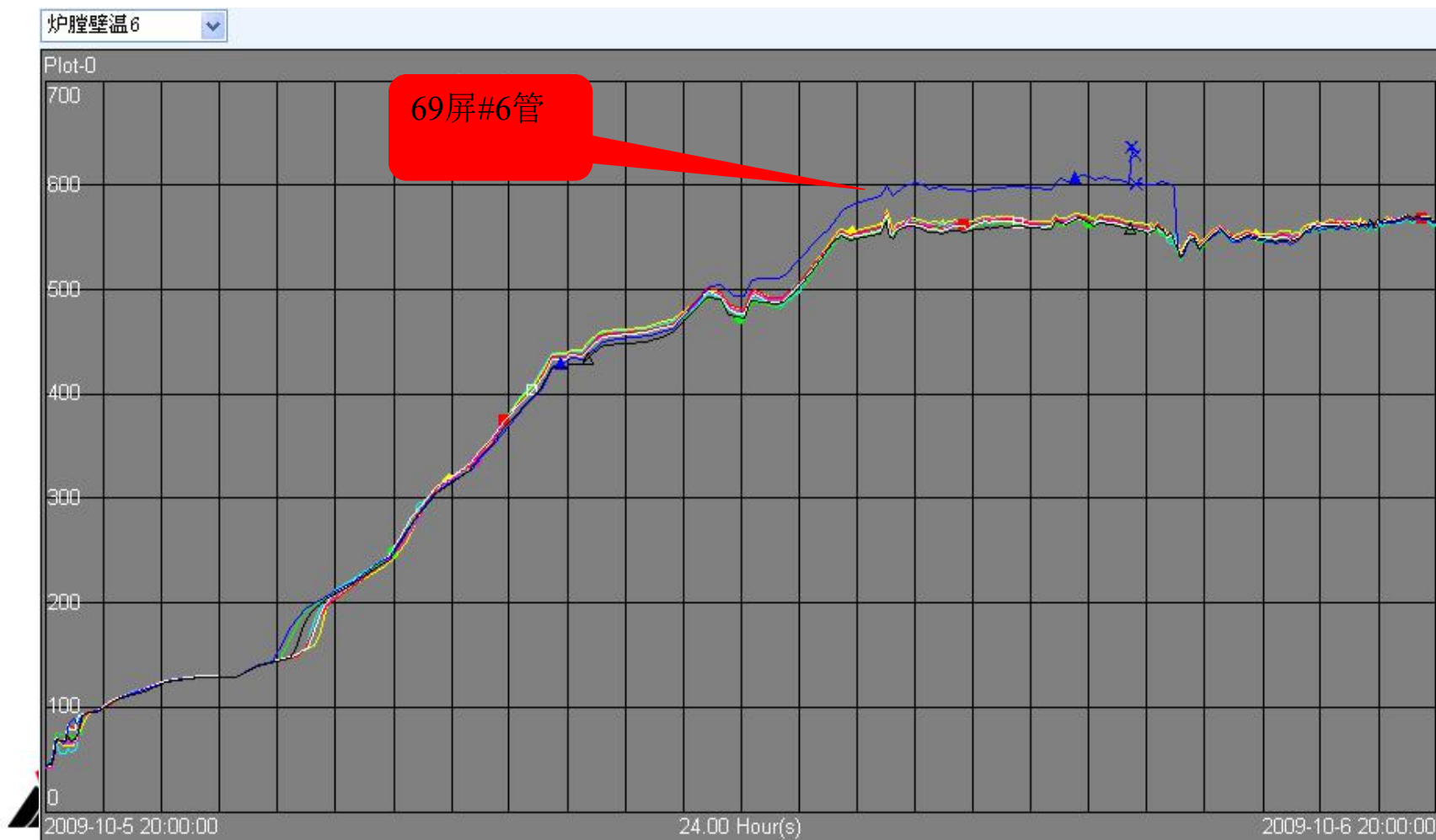
8. 锅炉高温受热面热偏差在线监测和壁温智能管理系统研制

启动阶段监测到的第22屏#4管壁温异常情况



8. 锅炉高温受热面热偏差在线监测和壁温智能管理系统研制

启动阶段监测到的第69屏#6管壁温异常情况



9. 总结

- 燃烧调整措施使锅炉高温受热面热偏差减小，高温受热面管壁峰值温度的降低有利于减缓氧化膜的生成，热偏差在线监测和壁温智能管理系统的研发与应用，实现了热偏差的及时调整。
- 形成了T23、T91受热面管材的基于抗蒸汽氧化性能的最高使用温度限值、高温受热面底部弯头弯曲半径应大于3倍管子外径的结构优化设计准则，提出了采用管系疲劳使用寿命作为高温受热面热应力评估标准的设计方法，太仓公司超临界锅炉的改造达到了预期目的。
- 形成了基于锅炉高温受热面氧化膜生成速度和剥落厚度的安全性分析方法，为合理选用受热面管材和制定检修计划提供了依据。根据锅炉高温受热面氧化膜在不同温度下的热应力计算结果，提出了T23、T91管材易于发生氧化膜剥落的危险温度区域，对指导锅炉安全运行有重要意义。



汇报结束
谢谢大家

136 1622 7017