

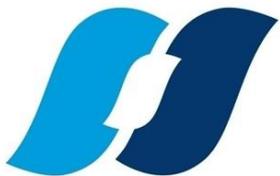


中国华电集团公司  
CHINA HUADIAN CORPORATION



# 火电厂锅炉“四管”泄漏 典型案例分析

二〇一二年四月·杭州



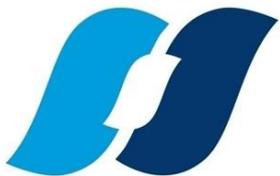
## 内 容 提 要

一 引言

二 锅炉四管主要失效形式

三 典型失效案例分析

四 总结与建议

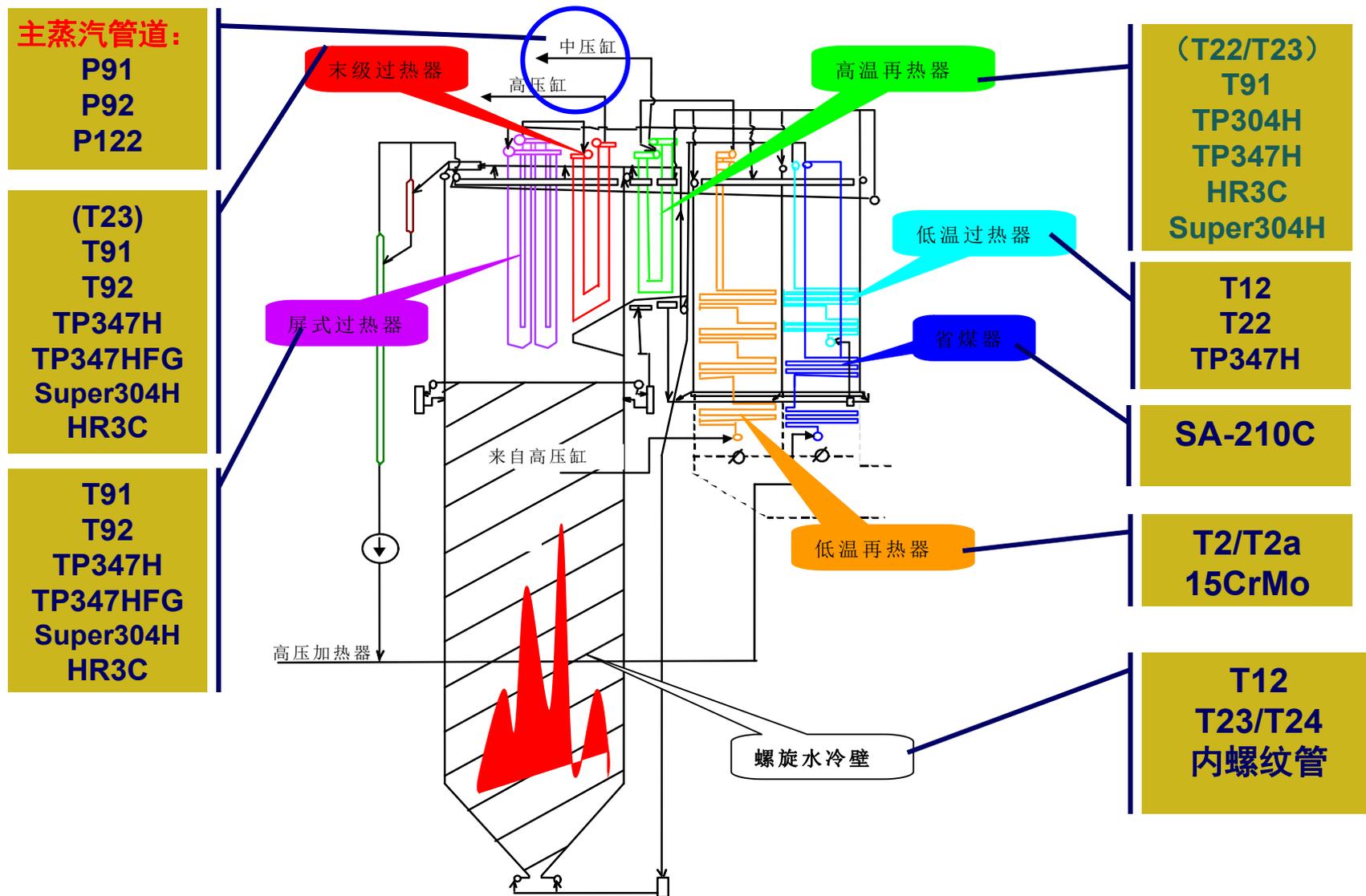
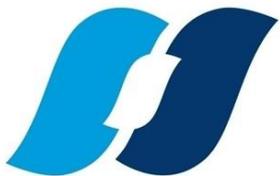


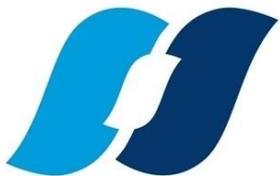
## 一、引言

2011年统计信息显示：

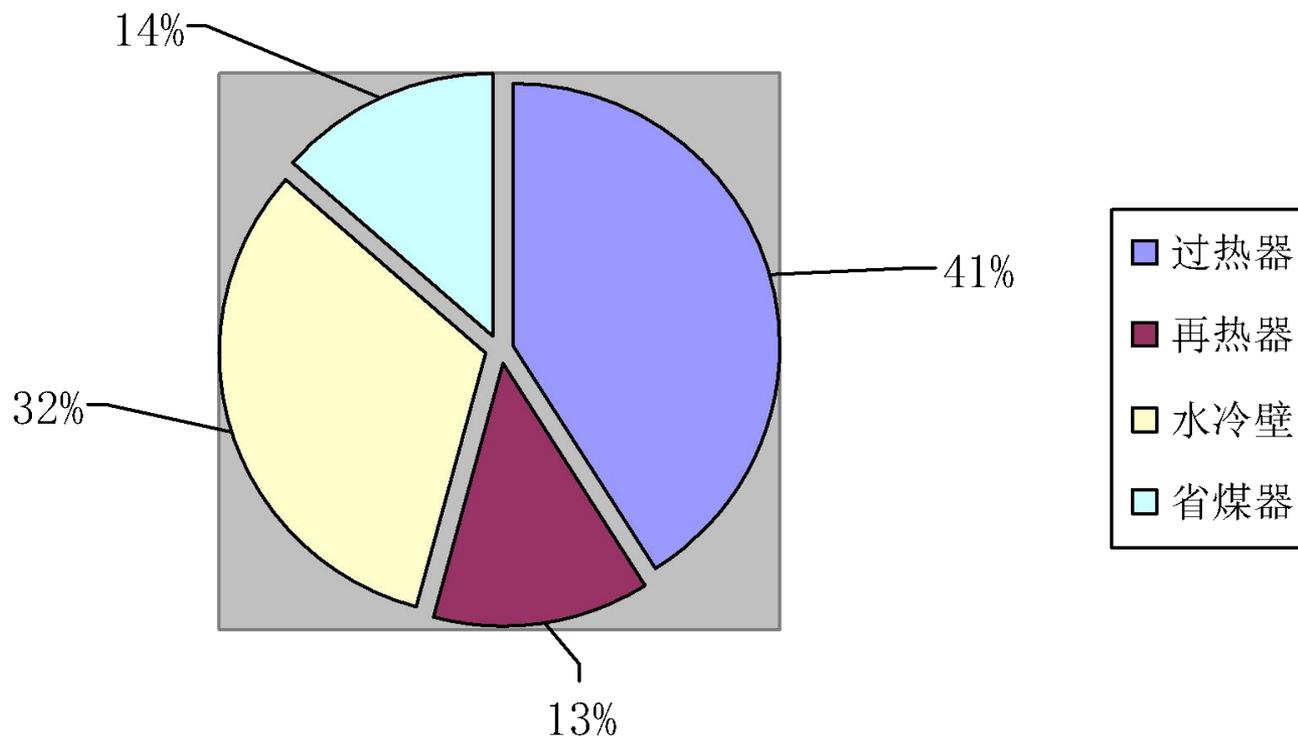
- ◆ 集团公司由锅炉设备故障引起的强迫停运占机组强迫停运的63%；
- ◆ 锅炉四管泄漏占锅炉设备故障的55%；
- ◆ 锅炉四管泄漏占年度停运次数的34%；
- ◆ 锅炉四管泄漏引起的停运占累计停运时间的60%以上。

**“四管”泄漏问题是影响机组安全稳定运行的罪魁祸首！**



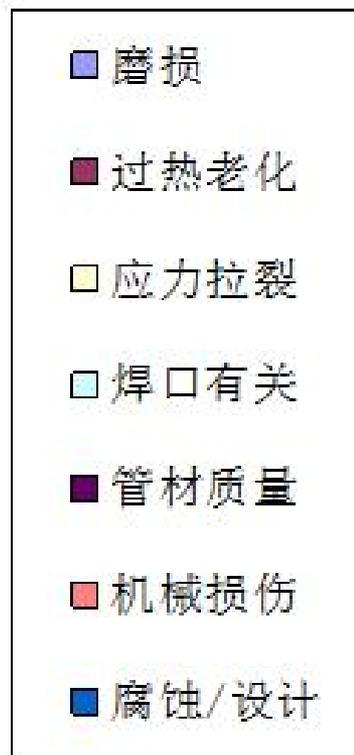
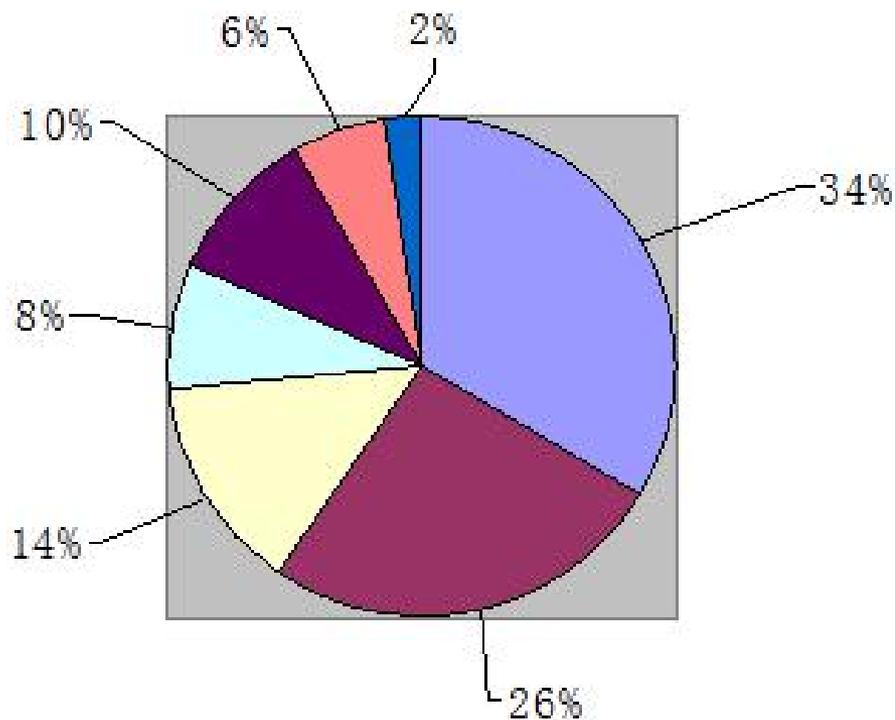


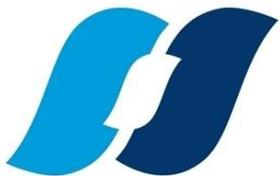
2011年锅炉四管泄漏统计信息显示:





2011年锅炉四管泄漏原因统计信息显示:





影响锅炉四管泄漏的因素:





## § 设计问题

主观上存在急功近利的特点，缺乏实事求是的科学态度；客观上社会环境、条件不利于设计工作。两者综合作用的结果：

- (1) 论证不充分，边设计、边修改；
- (2) 基础性研究不够，支持性数据缺乏；
- (3) 对国外研究跟踪不够；
- (4) 引进技术未进行充分消化吸收；
- (5) 未进行充分有效实际验证试验。

设计缺陷

**设计产生的缺陷对运行设备而言系先天不足。**



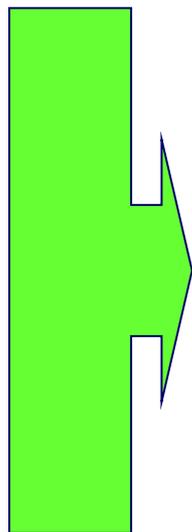
锅炉设备设计关键环节：

参数选择；

材料选择；

结构设计；

系统匹配；



强度计算

应力分析

锅炉热力计算

水动力计算



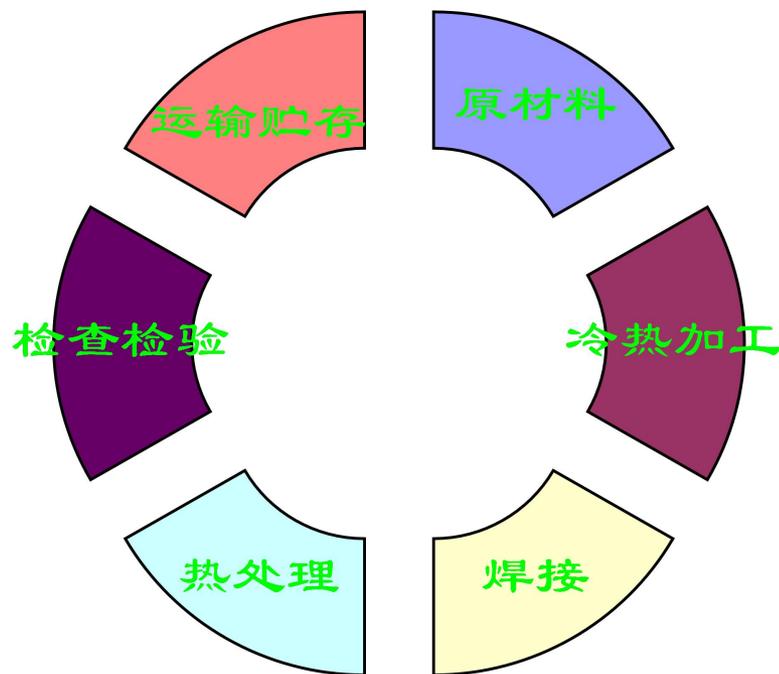


## 设计缺陷表现为：

- 1) 锅炉四管尤其是过热器管、再热器管选材问题；
- 2) 异种钢焊接匹配问题；
- 3) 结构与计算问题：
  - ◎结构布置不合理；
  - ◎计算分析条件不合理；
  - ◎理论计算与实际情况偏差过大；
  - ◎不同材料、结构、部件之间的协同匹配不合理；
  - ◎结构工艺设计不合理。



## § 制造与运输贮存





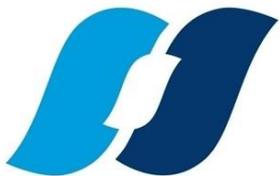
## § 安装、调试

进度  质量

树立基建为生产服务的理念！

安装质量达到设计及安装标准要求！

通过调试使机组达到最佳运行状态！



## § 运行

运行规程  安全可靠运行

防止锅炉四管超温、超压

确保汽水品质符合要求

强化吹灰管理

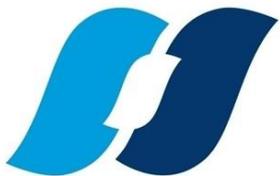
确保锅炉燃烧正常，防止结焦和热偏差过

大

及时发现  
设备异常



采取正确  
有效措施



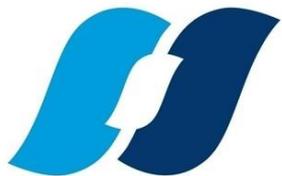
## § 检修维护

检修维护  确保设备健康

认真执行标准、规程

认真执行集团公司“防止四管泄漏暂行规定”等相关文件

发现设备、部件存在的缺陷  消缺认真、及时、彻底



## 二、锅炉四管主要失效形式





## 二、锅炉四管主要失效形式

### 1、应力失效

实际应力超过材料服役工况下的许用应力的一种失效形式，包括长期过热、短期过热、异种钢焊接蠕变裂纹、石墨化、热胀冷缩受阻等。

### 2、腐蚀

(1) 锅炉管外壁（火侧、烟气侧）的高温腐蚀和低温腐蚀。

高温腐蚀：高温硫腐蚀（硫酸盐型高温腐蚀、硫化物型高温腐蚀）、氯化物型高温腐蚀。

低温腐蚀：烟气中的硫酸蒸汽在空气预热器、省煤器管壁上骤然冷凝时发生的腐蚀。

(2) 锅炉管内壁（汽水侧）的腐蚀。

包括溶解氧腐蚀、沉积物垢下腐蚀、碱腐蚀、氢损伤、应力腐蚀等。



**氧腐蚀：**锅炉管在水溶液中含氧量过高引起的电化学腐蚀。

**垢下腐蚀：**锅炉内受热面管子的内表面附有水垢，金属表面在高温锅炉水中形成的致密Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜遭到破坏时，在水垢下面会形成严重腐蚀。垢下腐蚀分为酸性腐蚀和碱性腐蚀，这两种腐蚀常又根据其损伤情况的不同，分别称为氢损伤和苛性腐蚀。

**晶间腐蚀：**奥氏体钢的晶界处出现贫铬现象，使得晶界失去抗腐蚀的能力，而造成晶间腐蚀。

**应力腐蚀：**奥氏体不锈钢管排存在残余应力、组装应力，在特定的腐蚀介质环境与应力的双重作用下（如Cl<sup>-</sup>）将产生应力腐蚀现象。

### 3、疲劳

锅炉管的疲劳形式主要有机械（振动）疲劳、热疲劳、腐蚀疲劳。

锅炉管机械疲劳主要是振动引起的疲劳；热疲劳主要是温度变化及交变热应力引起的疲劳；腐蚀疲劳是指交变应力和腐蚀介质共同作用下引起的强度和寿命降低现象。

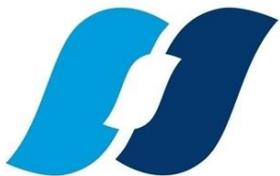


#### 4、磨损

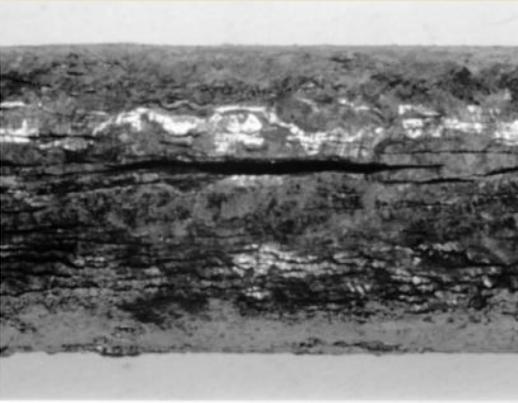
锅炉四管中磨损主要有飞灰磨损、吹灰器吹损和机械磨损三种形式，以飞灰磨损为主。

#### 5、质量缺陷

材质缺陷和焊接缺陷。

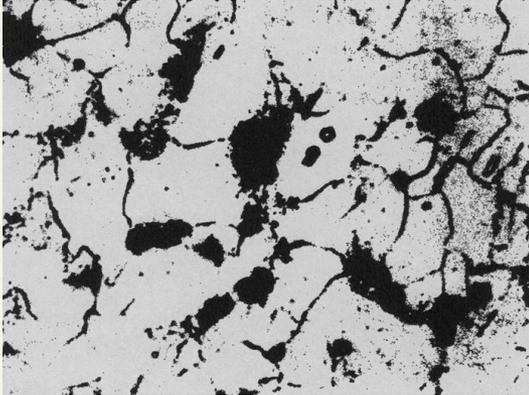


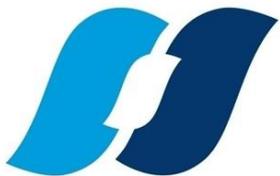
## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
应力失效	长期过热	 <p>脆性断口，爆口较小 边缘粗钝，管径胀粗 外壁有较厚的氧化皮 内外壁有纵向裂纹</p>
	短期过热	 <p>呈喇叭状，边缘锐利， 减薄较多，呈撕裂状， 其爆口断裂面较为光滑 远离爆口管子胀粗不大</p>



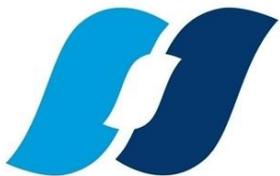
## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
应力失效	异种钢焊接蠕变裂纹	 <p>易在低合金钢侧产生环形裂纹，呈脆性断口特征</p>
	石墨化	 <p>脆性开裂</p>

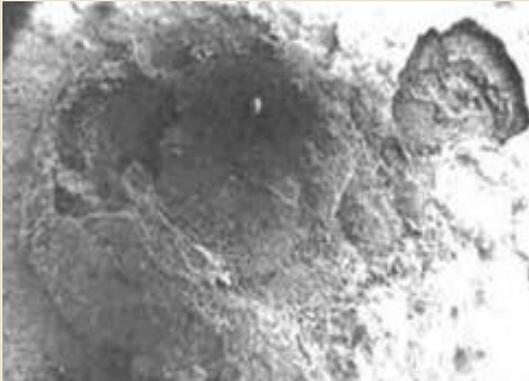


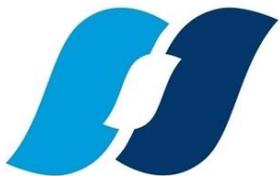
## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
腐蚀	高温腐蚀	 <p>腐蚀管子呈坑穴麻点或浅沟槽状，腐蚀减薄造成爆管</p>
	低温腐蚀	 <p>漏点附近有凹凸不平的腐蚀区，漏点边缘减薄严重</p>



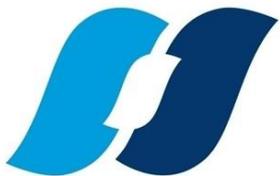
## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
腐蚀	氧腐蚀	 <p>管子内壁发生溃疡，点状、坑状腐蚀坑造成管壁减薄</p>
	氢损伤	 <p>脆性开裂，爆口边缘较钝，没有宏观塑性变形和管径胀粗现象</p>

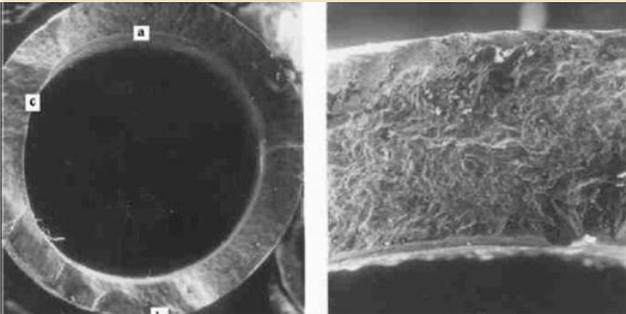


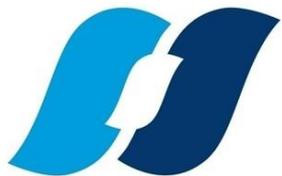
## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
腐蚀	碱性腐蚀	 <p>呈凿槽型，盐垢为多孔沉积物，无脱碳现象</p>
	晶间腐蚀	 <p>脆性断裂，断口呈颗粒状裂纹从蚀坑处萌生，易发生在应力较高的部位如弯头、焊缝和其它冷加工区</p>



## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
疲劳	机械（振动） 疲劳	 <p>横断面开裂，断面具有疲劳开裂的明显特征</p>
	热疲劳	 <p>易沿连接薄弱处开裂，断面具有疲劳开裂的明显特征</p>



## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
疲劳	腐蚀疲劳	 <p>裂纹短而粗，充满腐蚀产物，走向为穿晶型</p>
磨损	机械磨损	 <p>有明显磨损痕迹，管壁减薄，磨损表面平滑</p>

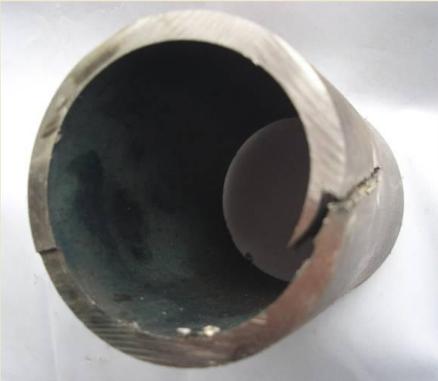


## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
磨损	飞灰磨损	 <p>断口处管壁减薄，呈刀刃状，磨损表面光滑，呈灰色</p>
	吹灰器吹损	 <p>易发生于吹灰器附近 管壁减薄</p>

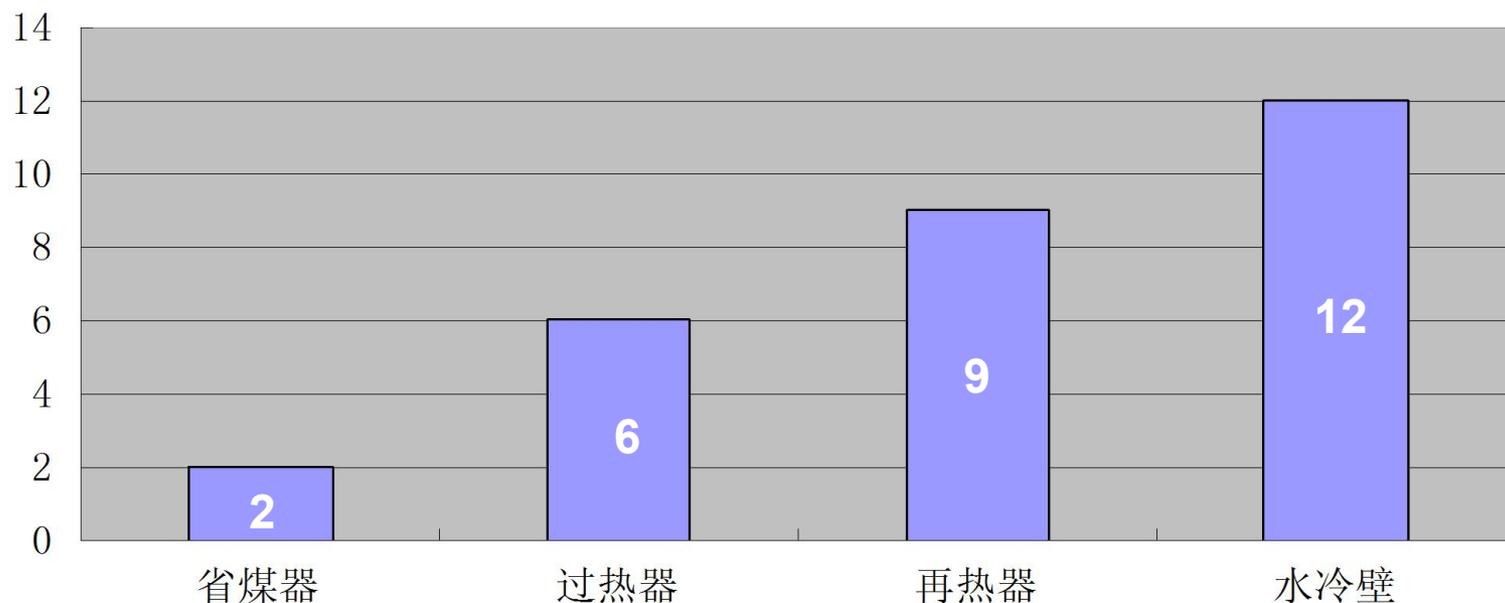


## 二、锅炉四管主要失效形式

	类型	特征
质量缺陷	材质问题	 <p>包括砂眼、重皮、折叠裂纹、壁厚不均，以及机械性能和化学成分不合格等</p>
	焊接缺陷及焊缝失效	 <p>包括咬边、焊瘤、凹陷气孔、夹渣，焊接裂纹等</p>



### 三、典型失效案例分析





### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

案例1：

泄漏区域：冷灰斗水冷壁管（T12）；

泄漏原因：水冷壁上部结焦脱落掉至冷灰斗处导致水冷壁管被砸伤变形后泄漏；



掉焦导致管子被砸炉外爆口



掉焦导致管子被砸炉内变形



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

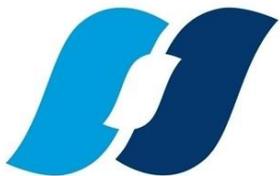
案例2:

泄漏区域：冷灰斗下弯头处水冷壁（T12）；

泄漏原因：非规则区域管子与鳍片等结合部位由于启停易产生应力集中而导致撕裂；



水冷壁管子与鳍片拉裂泄漏

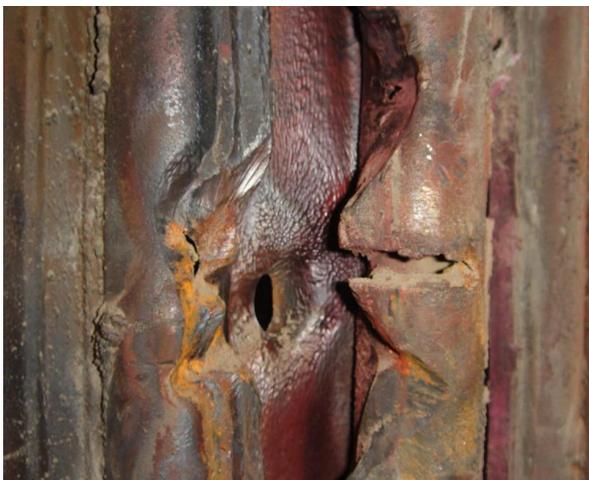


### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

#### 案例3:

泄漏区域：前墙上部水冷壁（12Cr1MoVG， $\Phi 31.8 \times 7$ ）；

泄漏原因：刚性梁死点未按照设计图纸焊接、此区域校平装置有2根自由端点焊造成水冷壁管屏不能正常膨胀，同时水冷壁可能存在受热不均的现象，导致水冷壁拉裂；



拉裂位置



刚性梁死点未按照设计图纸焊接



校平装置自由端错误点焊



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

案例4:

泄漏区域：前墙中间混合联箱中部水冷壁泄漏（T12， $\Phi 31.8 \times 5.5$ ）

泄漏原因：该处水冷壁管屏膨胀不畅，水冷壁管屏向炉膛拱出变形，膨胀中扁钢热应力拉裂水冷壁引起泄漏



水冷壁拉裂泄漏点照片



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

#### 案例5:

泄漏区域：水冷壁二次风口上方刚性梁支撑耳板旁边管子；

泄漏原因：水冷壁安装时高空拼缝焊接存在缺陷，同时耳板焊接应力造成裂纹，裂纹位置处于炉外侧（背火面）



水冷壁管安装缺陷裂纹



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

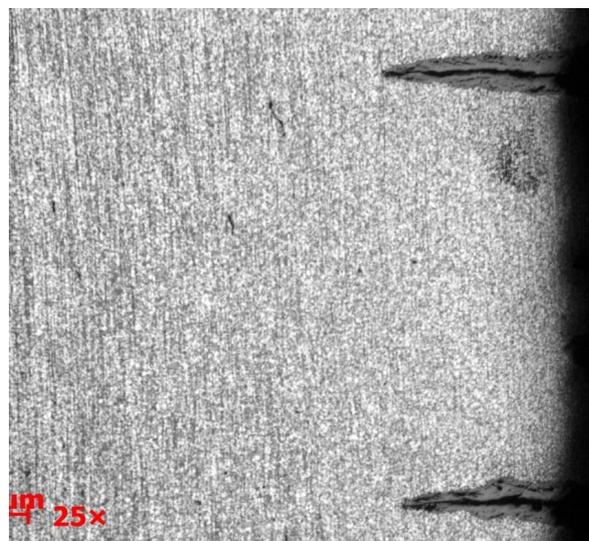
#### 案例6:

泄漏区域：蒸发区域水冷壁管（15CrMoG， $\Phi 28.6 \times 6.4$ ）；

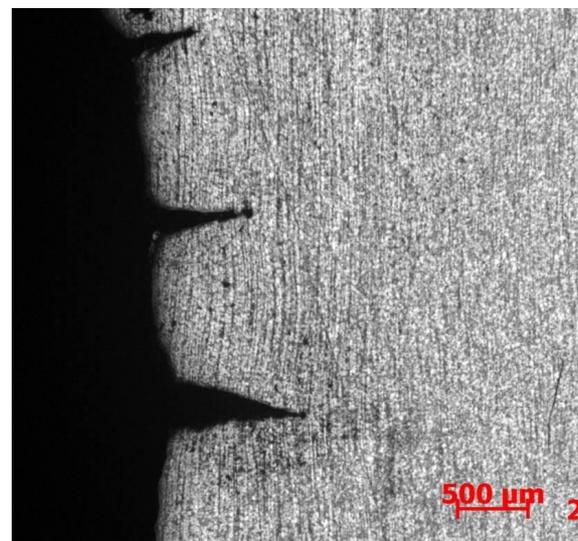
泄漏原因：直流锅炉蒸发段区域波动幅度较大（水、汽交变频繁区域）  
导致水冷壁管发生疲劳开裂，外壁开裂后，腐蚀性烟气加速了裂纹扩展。



宏观形貌



管外壁裂纹



管内壁裂纹



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

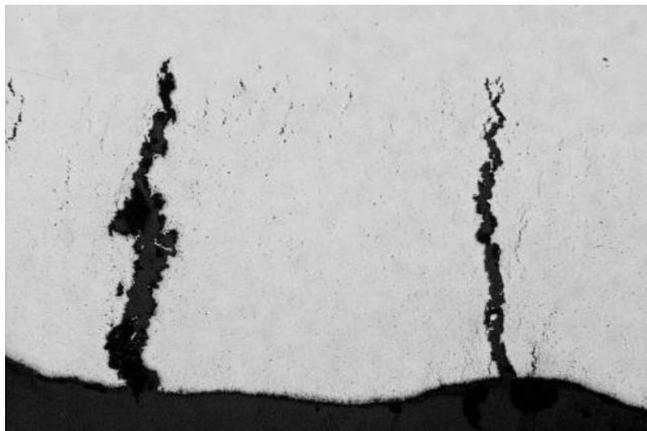
案例7:

泄漏区域：水冷壁（20G， $\Phi 60 \times 8$ ）

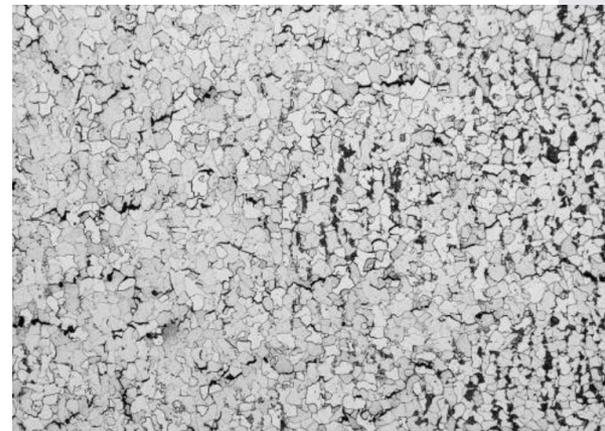
泄漏原因：爆口处无明显胀粗、减薄，为脆性断口，金相分析发现爆口组织中有大量沿晶微裂纹，且脱碳层明显，说明爆管原因为氢损伤；



宏观形貌



微裂纹



晶间裂纹与脱碳层



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

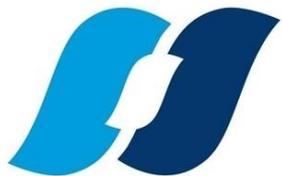
案例8:

泄漏区域：水冷壁中间联箱上部区域水冷壁管（ $\Phi 38.1 \times 7.2$ ）；

泄漏原因：爆口成喇叭状，胀粗明显，爆口出现淬硬性组织，显示泄漏原因为短时过热，具体原因为异物堵塞；



爆口宏观形貌



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

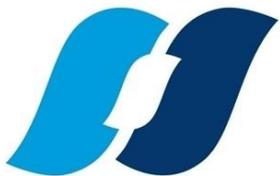
案例9：

泄漏区域：下辐射区水冷壁管（12Cr1MoV,  $\Phi 32 \times 6$ ）；

泄漏原因：机组长时间低负荷运行，工质减温效果不足，同时存在流量偏差，工质流量较少，使得该处水冷壁长期超温，导致泄漏；



爆口宏观形貌



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

案例10：

泄漏区域：水冷壁某吹灰器上方和下方管子；

泄漏原因：吹灰器电动总门及压力调节门一直处于开启状态，致使吹灰蒸汽对该处水冷壁长时间冲刷，最终造成了水冷壁爆管。



爆管处宏观形貌

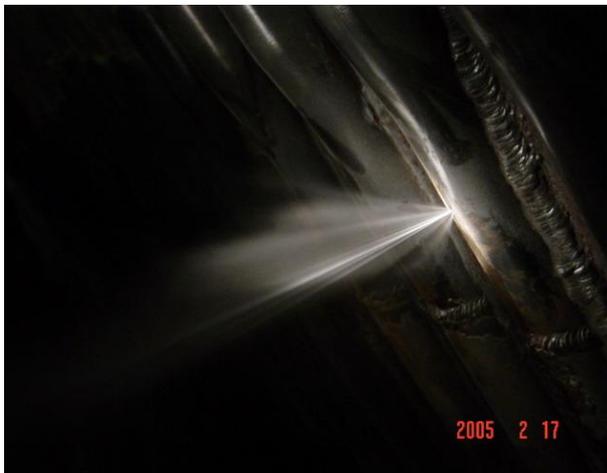


### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

案例11：

泄漏区域：燃烧器区域水冷壁（T12）；

泄漏原因：水冷壁管减薄严重导致泄漏，原因为该区域水冷壁长期工作在还原性气氛中，易产生高温硫腐蚀，最终导致泄漏。



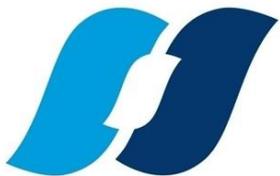
爆口处宏观形貌



爆口处表面情况



爆口处管子表面腐蚀产物



### 三、典型失效案例分析（水冷壁）

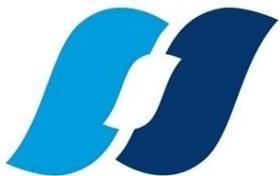
案例12:

泄漏区域：卫燃带区域水冷壁（T12）；

泄漏原因：浇铸抓钉焊接存在缺陷，长时间运行造成爆管。



爆口处宏观形貌



### 三、典型失效案例分析（过热器失效案例）

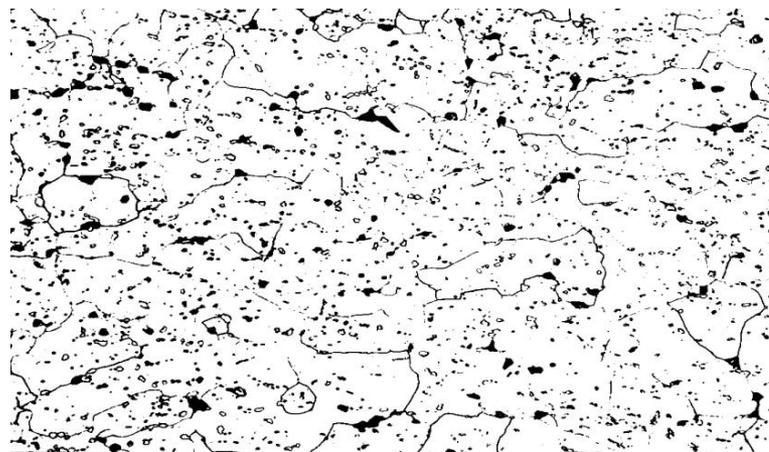
案例13:

泄漏区域：高温过热器外圈弯头（12Cr1MoV， $\Phi 42 \times 5$ ）；

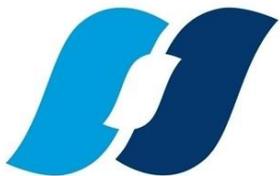
泄漏原因：管子内介质流量较小导致管子长期超温工作导致泄漏，管子表面氧化严重和内壁氧化层厚度较厚，爆口边缘较厚，为脆性爆口；



爆口处宏观形貌



爆口向火侧处组织



### 三、典型失效案例分析（过热器失效案例）

案例14:

泄漏区域：高温过热器（T91， $\Phi 31.8 \times 5$ ）；

泄漏原因：氧化皮脱落，堵塞于弯头处，使得工质流量减少，导致管子短时超温，发生泄漏；



爆口处宏观形貌



管内的氧化皮



### 三、典型失效案例分析（过热器失效案例）

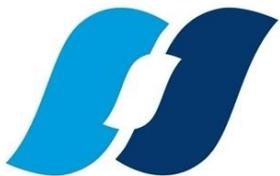
案例15：

泄漏区域：屏式过热器异种钢接头；

泄漏原因：焊接质量加接头老化，运行中导致裂纹产生；



爆口处宏观形貌



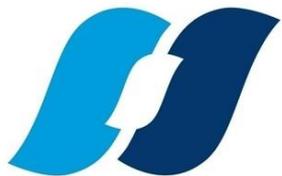
### 三、典型失效案例分析（过热器失效案例）

案例16:

泄漏区域：一级过热器（15CrMoG）及包墙过热器（20G，尾部烟道）；  
泄漏原因：阻风板脱落，管子位于角落部位，此处灰浓度大，且穿墙部位未密封严实而漏风造成气流形成漩涡，管壁受烟气长期冲刷减薄，造成泄漏；



管子磨损泄漏

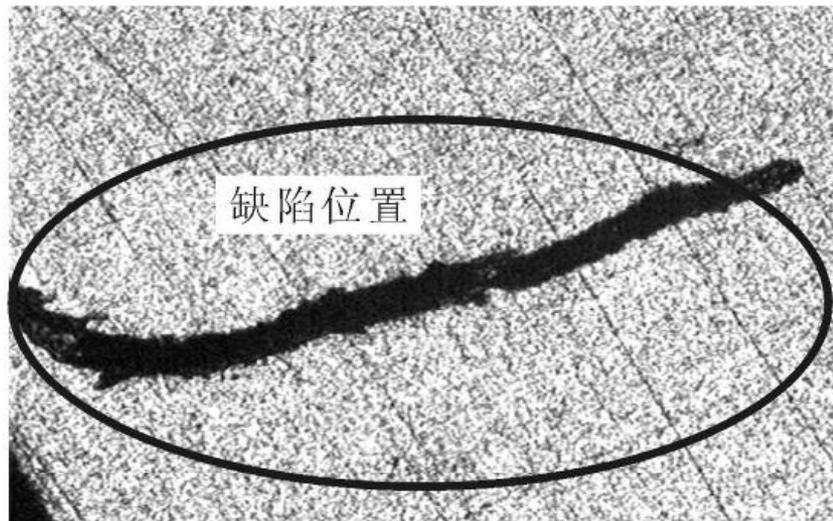


### 三、典型失效案例分析（过热器失效案例）

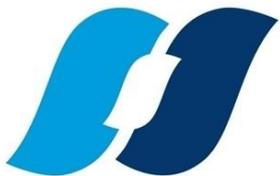
案例17:

泄漏区域：高温过热器（T91）；

泄漏原因：管子制造质量不良，焊接接头附近存在裂纹，导致该过热器管不能正常使用；



过热器管缺陷形貌



### 三、典型失效案例分析（过热器失效案例）

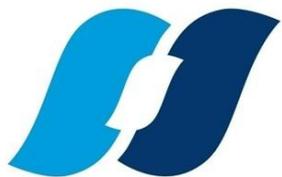
案例18:

泄漏区域：屏式过热器（钢102）汽冷定位管；

泄漏原因：定位管与过热器管子长期碰磨导致泄漏；



爆口处宏观形貌



### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

案例19：

泄漏区域：吹灰器区域低温再热器管（SA210C， $\Phi 60 \times 5$ ）；

泄漏原因：吹灰器吹扫区域被吹灰蒸汽冲刷减薄导致泄漏；



宏观形貌

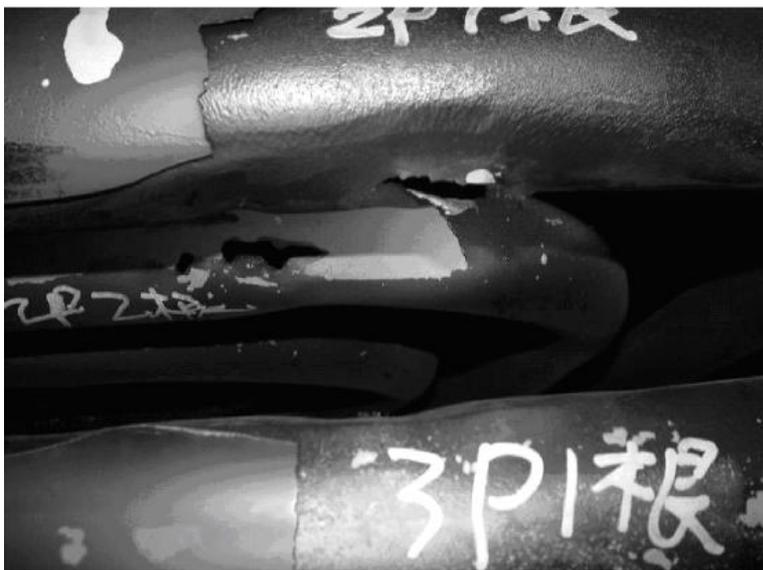


### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

案例20:

泄漏区域：人孔门附近低温再热器弯头（ $\Phi 63 \times 4.5$ ）；

泄漏原因：飞灰颗粒冲刷弯头导致弯头磨损减薄严重，同时由于人孔门漏风加剧了磨损，最终导致爆管，同时爆管后的泄漏的蒸汽吹损周围管子；



飞灰磨损泄漏

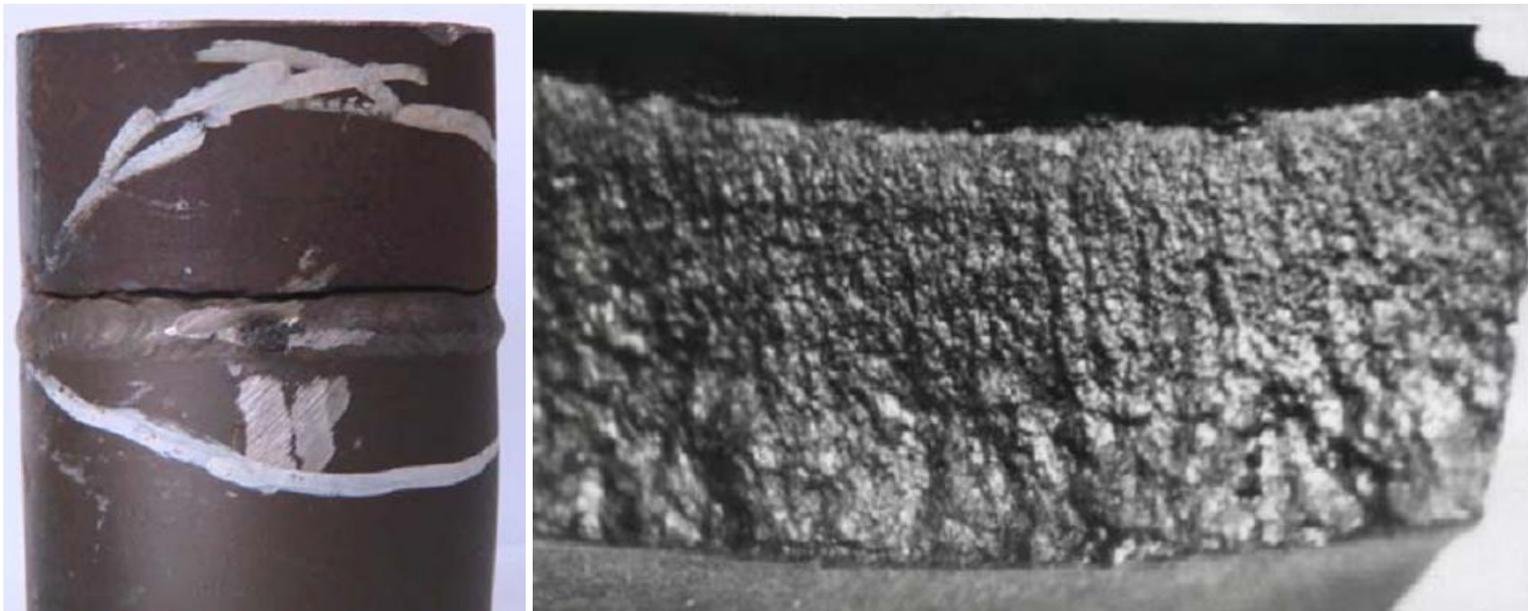


### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

案例21：

泄漏区域：高温再热器管异种钢接头（TP304H+钢102）；

泄漏原因：磁记忆检测发现该接头存在异常的应力集中，导致在低合金钢侧熔合线的薄弱环节发生断裂；



焊缝侧断口及断裂面形貌

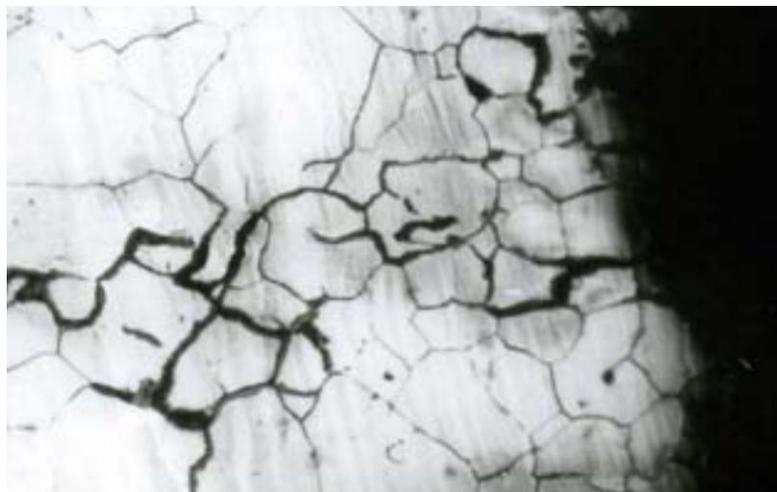


### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

案例22:

泄漏区域：后屏再热器管（1Cr19Ni9， $\Phi 63 \times 4$ ）；

泄漏原因：爆管管材断面上含有Cl元素，而1Cr19Ni9不锈钢对氯化物应力腐蚀极敏感，导致该管发生晶间应力腐蚀最终导致爆管；



裂纹形貌与金相组织

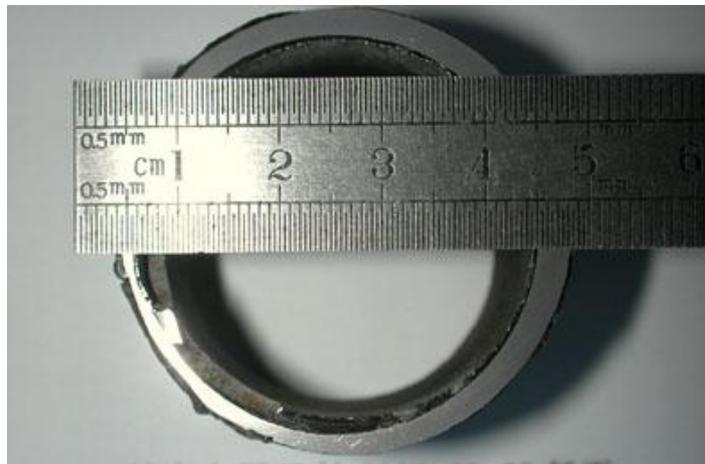


### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

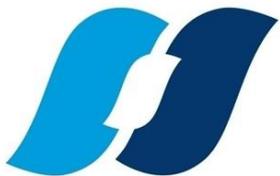
案例23:

泄漏区域：高温再热器管（12Cr1MoV， $\Phi 42 \times 3.5$ ）；

泄漏原因：高再管改造后，局部高再管壁温大幅提高，达到约620-650℃，大大超过12Cr1MoV钢允许使用壁温570℃。使管材迅速高温氧化腐蚀，导致长期超温爆管；



爆口形貌与氧化皮厚度

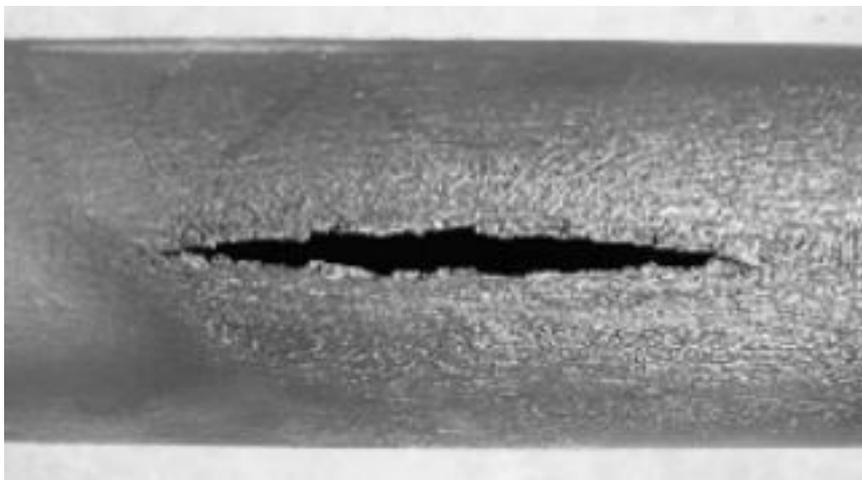


### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

案例24:

泄漏区域：高温再热器（T91）；

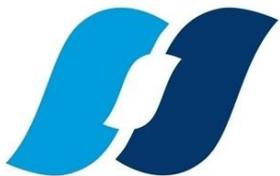
泄漏原因：锅炉安装过程中将螺栓落入管子内未取出，引起管子内部堵塞，工质流通不畅，锅炉运行时管子得不到充分冷却，使管壁长期超温导致最终爆管；



爆口宏观形貌



管子内部遗留的螺栓



### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

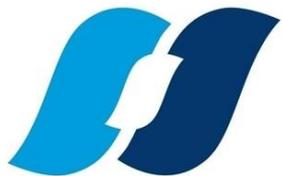
案例25:

泄漏区域：低温再热器（20G）；

泄漏原因：煤种变差，导致管子飞灰磨损严重，最终导致管子泄漏；



爆口宏观形貌

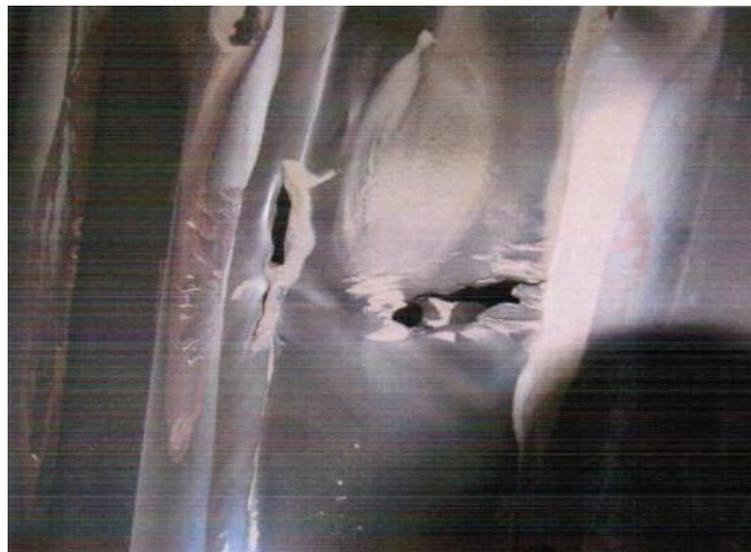
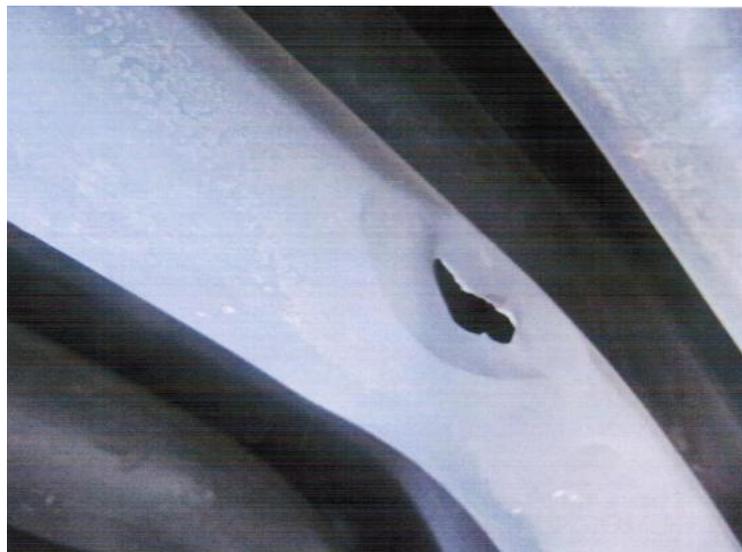


### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

案例26:

泄漏区域：吹灰器附近再热器管；

泄漏原因：吹灰器长时间吹扫导致管子减薄泄漏；



爆口宏观形貌



### 三、典型失效案例分析（再热器失效案例）

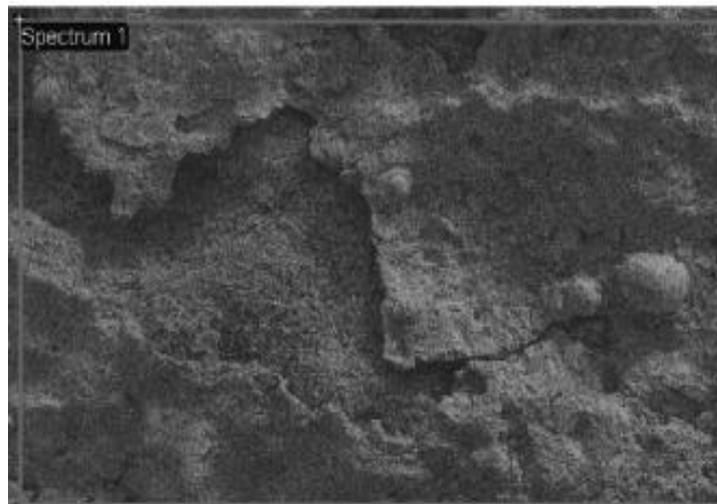
案例27:

泄漏区域：低温再热器管（20G， $\Phi 57 \times 3.5$ ）；

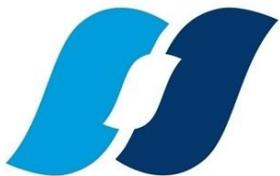
泄漏原因：该机组的停炉次数较多，停（备）用炉时，再热器的低温段往往会残留一定量的水，锅炉余热又不能将其完全烘干，金属表面被水浸润产生溶解氧腐蚀导致泄漏；

能谱和金相试样  
(带腐蚀坑)

金相试样  
(无腐蚀坑)



管内腐蚀坑内形貌

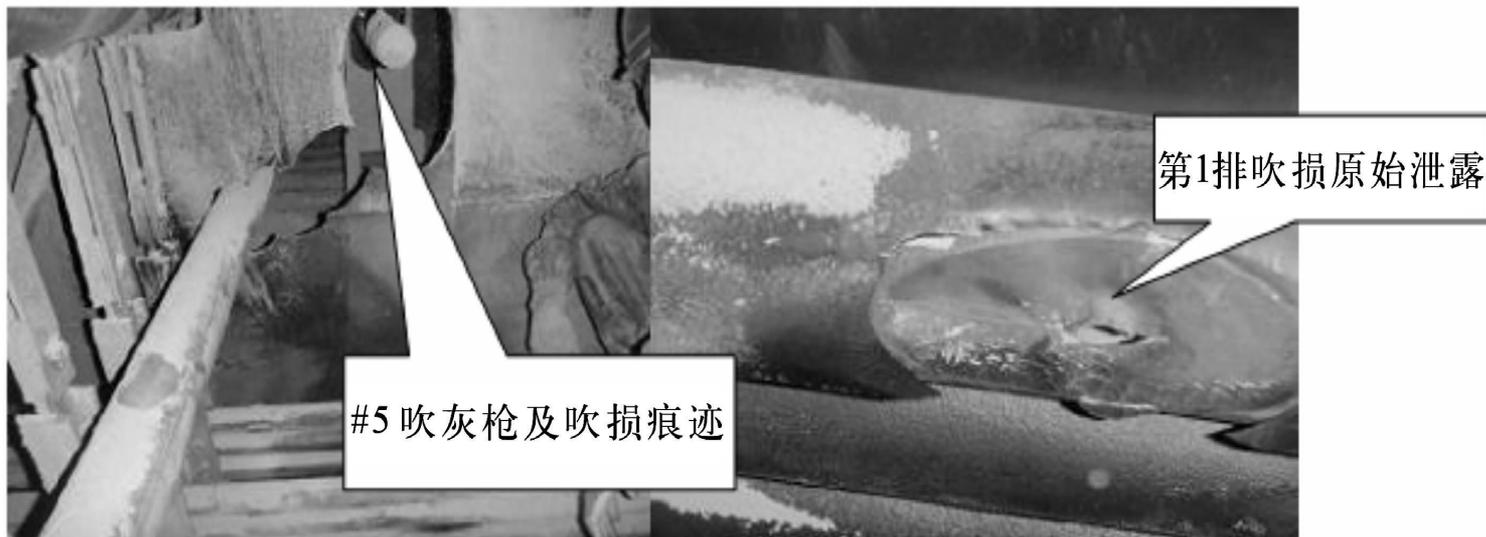


### 三、典型失效案例分析（省煤器失效案例）

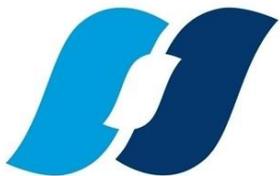
案例28：

泄漏区域：省煤器吹灰器区域（A210C）；

泄漏原因：吹灰器压力定值偏高，吹灰频率由每天一次改为每天两次，导致该区域省煤器管吹损；



吹损形貌



### 三、典型失效案例分析（省煤器失效案例）

案例29：

泄漏区域：中隔墙前省煤器迎风面管子（20G）；

泄漏原因：燃煤不符合设计煤种，飞灰颗粒磨损性增强，且中隔墙附近烟气流速高，冲刷区域固定，导致该区域管子磨损严重，发生泄漏；

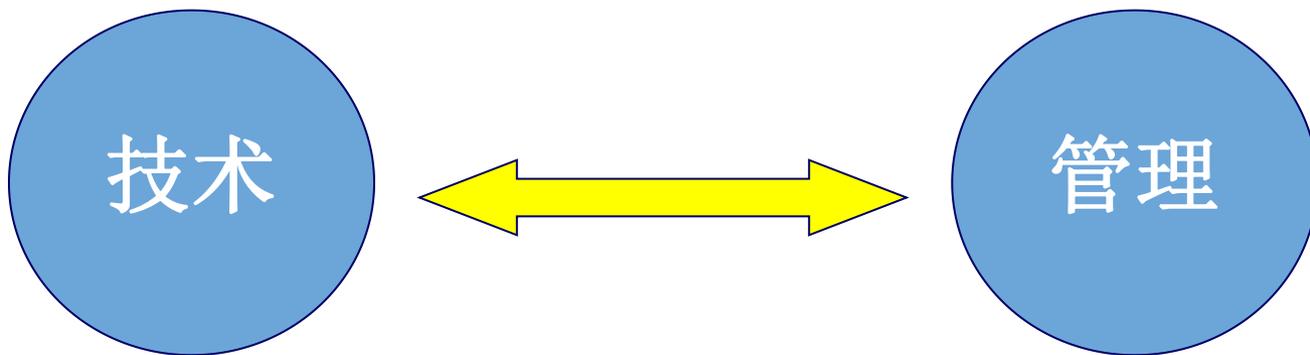


宏观形貌

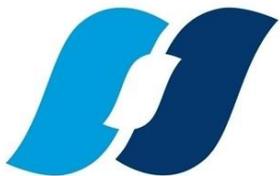


## 四、总结与建议

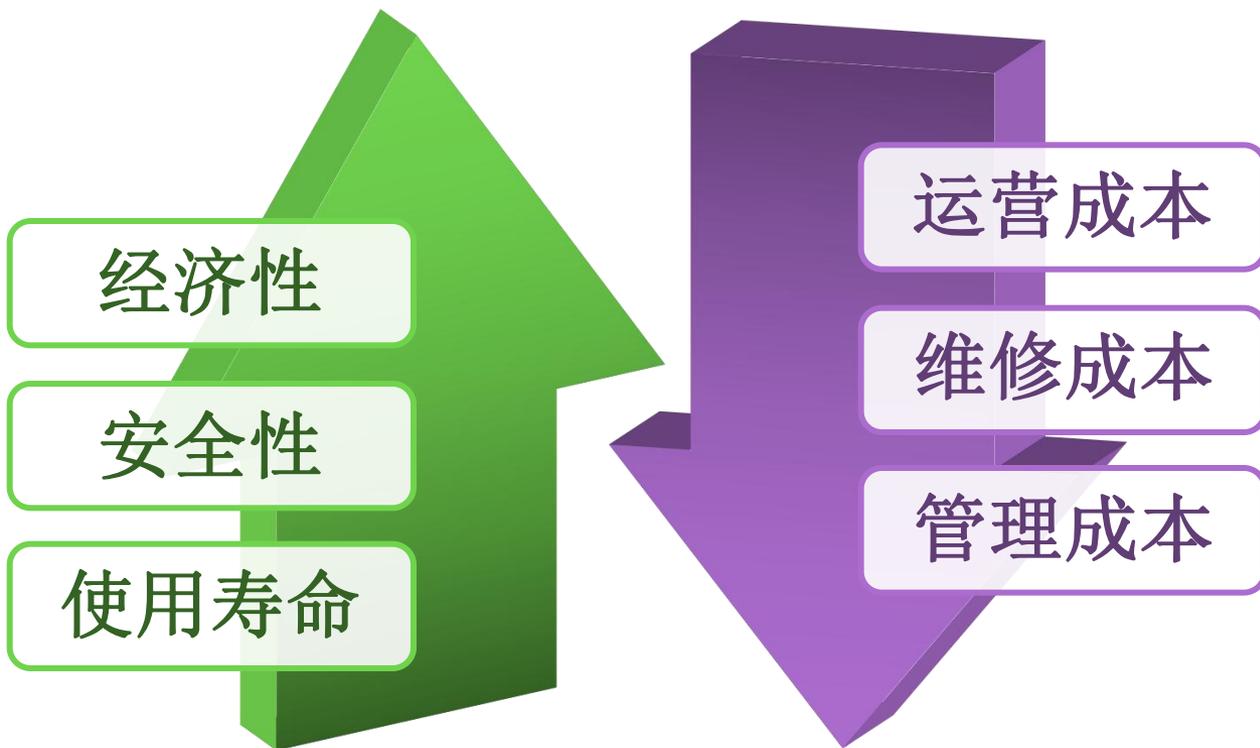
- 设计、制造、安装、调试、运行、检修与维护等环节都是影响锅炉四管泄漏的重要因素。
- 锅炉四管泄漏原因多种多样，但都与上述因素有关。
- 预防锅炉四管泄漏应从源头抓起，对设计选型、材料选用、制造、安装、调试、运行、检修各环节进行全过程闭环控制。
- 对在役机组而言，运行与检修维护至关重要。
  - 及时发现并处理水冷壁的磨损超标、鼓包、变形与拉裂部位，就可减少水冷壁泄漏频次的70%
  - 及时发现并处理过热器与再热器的超温、蠕胀、出列变形及机械磨损，就可减少过热器和再热器泄漏频次的70%
  - 及时发现并处理省煤器的烟灰磨损、管卡与管子的机械磨损，杜绝吹灰器的吹损，就可减少省煤器泄漏频次的70%

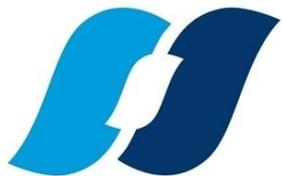


- 所有“锅炉四管”泄漏都可归于技术问题。但是，所有技术问题都通过科学管理来解决技术问题。
- 单从检修管理角度看，多做计划化性工作，少做应急性抢修。
- 就运行而言，预防四管泄漏，应坚持“宁可多停2天，不要多停1次”的管理理念。



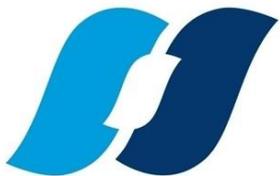
## 结束语





采取综合防治措施，减少锅炉“四管”泄漏，降低非停次数，获取最大经济效益。





华电电力科学研究院

华电电力科学研究院  
*HUADIAN ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE*



谢谢!