

当前锅炉运维中面临的主要问题及防范措施探讨

景德镇发电厂 程鸿
jdych1968@163.com
13879830809

知识产权声明

本文件的知识产权属国家电力投资集团公司及其相关产权人所有，并含有其保密信息。对本文件的使用及处置应严格遵循获取本文件的合同及约定的条件和要求。未经国家电力投资集团公司事先书面同意，不得对外披露、复制。

Intellectual Property Rights Statement

This document is the property of and contains proprietary information owned by SPIC and/or its related proprietor. You agree to treat this document in strict accordance with the terms and conditions of the agreement under which it was provided to you. No disclosure or copy of this document is permitted without the prior written permission of SPIC.

CONTENTS

目录

- 火电机组面临的形势
- 锅炉运维中的主要问题
- 锅炉典型问题与预防措施

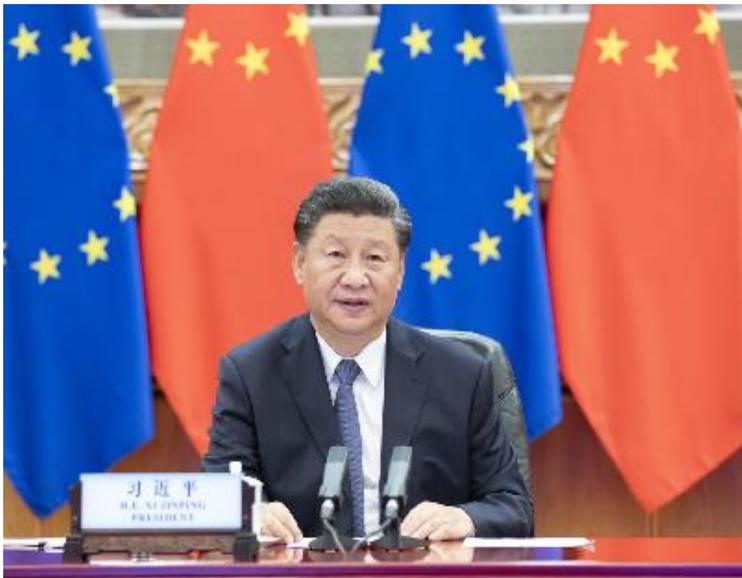
一、火电机组面临的形势

PART 01

一、火电机组面临的形势

(一) 火电机组面临的低碳形势

中国能源发展趋势 ——> 新能源为主体的新型电力系统



2020年9月，习总书记在联合国大会提出**2030年前碳达峰、2060年前碳中和目标**。各国要树立创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念，抓住新一轮科技革命和产业，变革的历史性机遇，推动疫情后世界经济“绿色复苏”，汇聚起可持续发展的强大合力。

2021年3月，习总书记提出构建以**新能源为主体**的新型电力系统，明确能源电力转型方向。

一、火电机组面临的形势

发电行业的低碳路线



一、火电机组面临的形势

火电机组低碳研究方向

- 更高效率的火电技术、煤基发电技术、耦合互补发电技术等；
- 更高效率的燃烧/发电前减碳、中减碳、后减碳技术等；
- 更精细化使用煤炭：煤块到煤颗粒、煤粉、煤气化的过程；

火电机组低碳研究重点技术

- 630-650-700°C高参数高效超超临界技术
- 更高参数高效燃机联合循环发电技术
- IGCC整体煤气化联合发电技术
- CCS/CCU/CCUS 碳捕捉、碳封存技术（化学吸收、固体吸附、膜分离技术），核心在利用
- 绿氨掺烧、新型煤基及煤基（生物质掺烧）耦合发电技术（国家能源局：煤电低碳化改造建设行动方案）

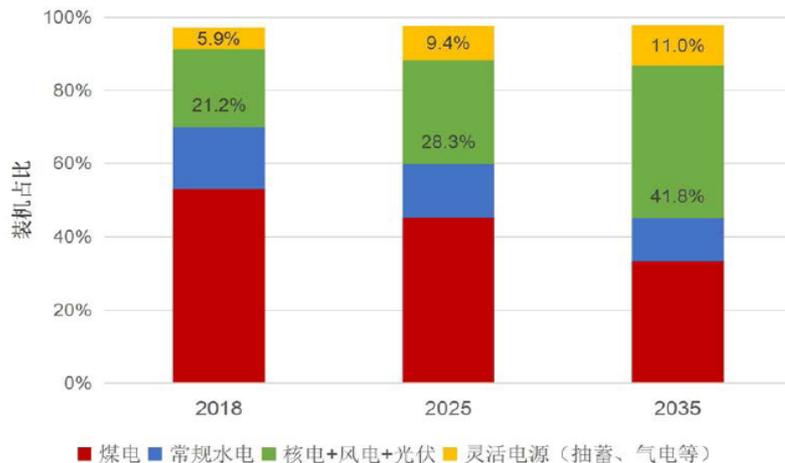
其他：富氧燃烧技术、劣质煤利用超超临界CFB发电技术（12月，世界单机容量最大660MW陕西彬长CFB机组投产，哈电集团）等

一、火电机组面临的形势

能源转型现状

火电主体地位逐步让位于新能源

- 过去十年我国**新能源发电发展迅猛**，风电和光伏并网容量增长均超过100倍。
- 火电在电源结构中占比逐年下降，但目前**火电发电量仍占据主导地位**。
- 火电由**电量型电源逐渐向调节型电源转变**，承担**托底保供**的重要角色。



中国电源装机结构变化预测

一、火电机组面临的形势

火电机组低碳形势下面临的主要问题

- **深度变负荷调峰**：深度调峰、快速调峰、启停调峰带来的锅炉低负荷稳燃、水动力安全性、运行经济性、设备超温、宽负荷脱硝、预热器防堵、积灰等问题；
- **高参数高效超（超）临界发电技术**：新材料应用带来的结构设计、选材；制造、安装、检修质量；运行控制（氧化皮）等技术问题；
- **耦合生物质、绿氨等多燃料及多能互补耦合发电技术**：燃煤成分及掺烧比例的不合理，对锅炉稳燃、结焦、高温腐蚀及运行经济性的影响。

一、火电机组面临的形势

(二) 火电机组面临的严峻环保形势



2005年8月，习总书记首次提出、
2017年10月，写进
党的十九大报告和党的
章程。

★ **超低排放**——2014年9月12日，国家三部委联合发文**全面实施尘硫硝煤电节能减排超低排放**
限值：503510 / 50355。

支持同步开展大气污染物联合协同脱除，减少二氧化硫、汞、砷等污染物排放。

一、火电机组面临的形势

火电机组低碳形势下面临的主要问题

为适应严峻的环保排放标准，燃煤发电机组必须安装**高效脱硫、脱硝和除尘设施**，未达标排放的要加快实施环保设施改造升级（**因厂制宜、成熟、适用的技术**），**确保满足最低技术出力以上全负荷、全时段稳定达标排放**要求。

除尘：改造采用低低温静电除尘器（低温省煤器）、布袋除尘器、旋转电极除尘、湿式静电除尘装置等，改造后存在阻力增大、低温省煤器磨损泄漏、电除尘板结等影响；

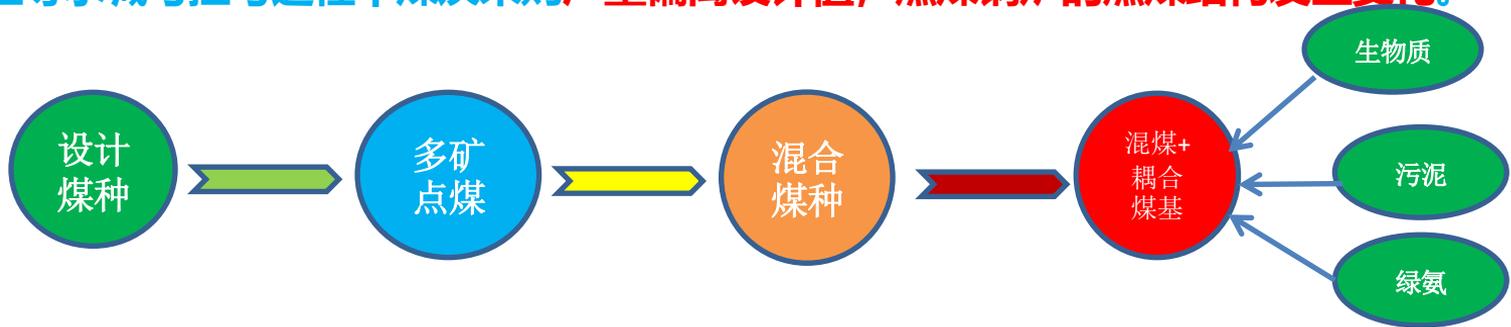
脱硫：增容改造采用高效脱硫除尘一体化技术（BFI）、必要时采用单塔双循环、双塔双循环等改造，存在除雾器堵、差压大等问题，对燃料提出了更高的要求；

脱硝：改造采用低氮燃烧器、高效率SCR、宽负荷脱硝改造、精准喷氨等，但氨逃逸对锅炉尾部的腐蚀、堵塞是致命的问题。

一、火电机组面临的形势

(三) 火电机组面临的煤炭市场开放形势

随着电厂煤炭市场的放开，煤炭价格上涨，发电成本上升，发电企业亏损不断加剧，各发电企业寻求减亏控亏过程中煤炭采购严重偏离设计值，燃煤锅炉的燃煤结构发生变化。



★在煤炭严重偏离设计值的形势下的问题：火电机组运行中大量的贫煤、无烟煤、高硫、低灰熔点等煤进入炉内燃烧,造成锅炉燃烧不稳定、炉效降低；受热面管磨损加剧、超温；炉内高温燃烧区域的水冷壁大面积腐蚀、结焦和空预器的低温腐蚀、积灰、堵塞等,严重影响火电机组的安全运行。

二、锅炉运维中的主要问题

PART 02

二、锅炉运行中的主要问题

(一) 锅炉运行中的主要问题



其他问题:

磨煤机振动;

烟道积灰;

电除尘板结;

脱硫浆液中毒。

二、锅炉运维中的主要问题

(一) 锅炉运行中的主要问题

- ◆ 锅炉严重结焦：水冷壁结焦、燃烧器区域结焦、过热器（大屏）结焦
- ◆ 高温腐蚀：烟气侧（水冷壁和过、再热器高温腐蚀）、水侧（高温蒸汽氧化）。
- ◆ 风机失速：失速
- ◆ 热偏差：汽温偏差、壁温偏差
- ◆ 金属壁温超温：水冷壁超温、过热器超温、再热器超温
- ◆ 氧化皮生成：过热器及再热器爆管
- ◆ 汽温参数异常：整体超温、欠温，再热器减温水大等
- ◆ 空预器堵塞：烟气差压过大，风机出力不足

二、锅炉运维中的主要问题

(二) 锅炉运行中受热面失效的常见问题



二、锅炉运维中的主要问题

(二) 锅炉运行中受热面失效的常见问题

- ▣ **应力断裂**：短期过热、高温蠕变、异种钢接头失效、拉裂
- ▣ **疲劳**：振动疲劳、腐蚀疲劳、热疲劳
- ▣ **冲蚀**：飞灰冲蚀、结渣冲蚀、吹灰冲蚀、煤粒冲蚀
- ▣ **磨损**：机械碰磨、飞灰磨蚀
- ▣ **水侧腐蚀**：碱性腐蚀、氢损伤、坑蚀、应力腐蚀
- ▣ **火侧腐蚀**：低温腐蚀、高温腐蚀（水冷壁腐蚀、煤灰腐蚀、灰渣腐蚀）。
- ▣ **材料质量**：材料缺陷、错用材料
- ▣ **设计问题**：材料选择不合理或裕度不够，结构存在缺陷
- ▣ **质量控制失误**：清洗损伤、化学损伤、检修缺陷、焊接缺陷

三、锅炉典型问题分析与预防措施

PART 03

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(一)、锅炉结焦 (结渣)

1、锅炉结焦过程

在煤粉炉的炉膛中，燃烧形成的**熔融、半熔融**灰渣黏结在受热面上，并积聚发展成一层硬结的灰渣层，这个现象称为结焦。

部位:通常在燃烧器区域水冷壁、炉膛折焰角、屏式过热器及其后面的对流受热面等处；有时炉膛下部的冷灰斗处也会发生结焦，水冷壁结焦如图1，大屏结焦如图2。



图1水冷壁结焦形貌



图2大屏结焦形貌

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(一)、锅炉结焦（结渣）

2. 结焦的危害

- ▷影响传热，炉膛水冷壁吸热量减少，排烟温度升高，锅炉热效率下降；
- ▷导致炉膛出口烟温升高和过、再热汽温超温以及通风阻力增大，需要降低负荷，影响锅炉出力；
- ▷燃烧器喷口结焦影响流动状态，造成气流偏斜和炉内燃烧状况恶化，未完全燃烧热损失增大；
- ▷导致高温对流受热面吸热不均，使过热器热偏差增大。对自然循环锅炉的水循环安全性以及强制循环锅炉的水冷壁热偏差带来不利影响；
- ▷掉渣会砸坏冷灰斗，造成炉膛灭火或砸停捞渣机，使锅炉被迫停止运行，影响锅炉的安全运行。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(一)、锅炉结焦（结渣）

3、锅炉结焦的现象

- ▷主蒸汽、再热蒸汽温度异常升高，减温水量增加；
- ▷就地从锅炉观火孔观察炉膛，有结焦现象，火焰颜色呈白色并刺眼，结渣处炉膛温度升高；
- ▷过热器、再热器管壁温异常升高或管壁温偏差增大；
- ▷排烟温度异常升高；
- ▷两侧烟温偏差增大；
- ▷通风阻力异常增大；
- ▷有时发生明显的掉焦迹象。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(一)、锅炉结焦 (结渣)

4、影响结渣的主要因素

■ 燃用煤的灰分特性

✱ 煤灰中低熔点成分的含量：燃煤矿物质的成分有关，一般矿物成分有8种元素:Si、Al、Fe、Ca、Mg、Ti、K、Na，在煤灰分析中，灰组分均以氧化物成分给出：酸性氧化物 (SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2)、碱性氧化物 (Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O)；一般酸性氧化物 \uparrow ，灰熔点 \uparrow ；碱性氧化物 \uparrow ，灰熔点 \downarrow ，同时煤灰成分之间会生成低熔点共熔体，灰熔点更低。煤中碱金属（主要是Na及K）成分对结渣和高温对流受热面积灰有重要影响。

✱ 燃煤矿物质中硫化物 (FeS_2)及有机硫。

✱ 衡量煤灰结焦倾向的重要指标：灰的熔点： $ST < 1260^\circ\text{C}$ ，结焦倾向严重， $ST > 1350^\circ\text{C}$ ，结焦倾向轻微；
碱酸比 (B/A)： $B/A > 0.4$ ，结渣倾向严重， $B/A < 0.206$ ，结渣倾向轻微；
结渣指数 ($R_s = B/A * St,d$)：
 $R_s > 2.6$ ，结渣倾向严重， $R_s = 2.0-2.6$ ，结渣倾向强， $R_s < 0.6$ ，结渣倾向轻微；

三、锅炉典型问题分析与预防措施

4、影响结渣的主要因素

- ▣ **燃煤影响**：入炉煤的**硫含量**及煤灰中的**碱金属含量**
- ▣ 炉膛的设计特性（炉内温度水平和热负荷）：炉内燃烧器区域的温度越高，结焦的可能性就越大。锅炉负荷越高，结焦的可能性也越大；
- ▣ 炉内空气动力特性：火焰中心偏斜、火焰贴墙或冲墙，燃烧器风粉分配不均或粉包风等；
- ▣ 水冷壁附近的局部还原性气氛，低熔共晶体使得灰的熔点明显降低；
- ▣ 燃烧器出口着火时间太短，煤粉燃烧太过剧烈；
- ▣ 过热器（大屏）结焦：火焰中心上移、煤粉燃尽太差，炉膛出口烟气温度较高；灰熔点低；
- ★ **混煤掺烧的影响**：将两种(多种差异很大的煤质，如褐煤和贫煤、无烟煤按照一定的比例掺配，但是，这两种或多种煤质并不会因为掺配丧失其各自的**燃烧特性**，特别是两种或以上易结焦煤同时掺烧时，会加剧结焦，如褐煤（极易着火）和无烟煤（难着火、难燃尽）、高硫与低灰熔点煤掺烧（ $R_s = B/A * St,d$ ），生物质中Na、K含量、污泥中的腐蚀物质S\Cl。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(一)、锅炉结焦 (结渣)

5、锅炉结焦预防措施

▣ 燃用煤种的合理采购、配煤掺烧。控制入炉煤的灰熔点、硫、氯含量及煤灰中的碱金属含量；一般燃用低灰熔点煤的磨煤机不超过两台。掺入低灰熔点的混煤热值不宜过高，尤其是W火焰锅炉；中高负荷下不宜在中上层磨燃用低灰熔点煤；负荷大于80%，应减少或不掺烧低灰熔点煤；80%额定负荷以下，控制掺烧比例，一般在单台磨煤机上进行；当煤种 $ST < 1200^{\circ}\text{C}$ 时，掺混不宜超过一台磨煤机，可采用分时段间歇性掺烧。

▣ 燃烧器区域结焦运行措施：对四角切圆锅炉，可调整燃烧器左右摆角（如有）减小切圆，对旋流对冲锅炉调节降低旋流强度；降低磨煤机出口一次风温度；适当增加二次风，减少还原性气氛过浓；煤粉颗粒适当放粗；

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(一)、锅炉结焦（结渣）

5、锅炉结焦预防措施

- 过热（大屏）器结焦运行措施：强化着火，缩短着火时间；优化配风组织，强化燃尽，降低火焰中心；
- 加强吹灰工作：定期进行吹灰，特别是在结焦倾向较大的区域，要增加吹灰次数；
- 控制检修质量：防止炉膛、制粉系统漏风等，控制进入炉内的风量，降低燃烧室的温度水平，推迟燃烧进程，从而导致结焦。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(二)、高温腐蚀

1、水冷壁高温腐蚀

■水冷壁高温腐蚀机理

高温腐蚀是炉内高温烟气与金属壁面相互作用的一个复杂的物理化学过程，主要是燃料中的硫在燃烧过程中生成腐蚀性灰污层或渣层以及腐蚀性气氛，使高温受热面金属管子表面受到侵蚀的现象。通常可分**熔盐类高温腐蚀**和**气体类高温腐蚀**（SO₃\HCl\H₂S）型。

硫化物腐蚀：

煤中硫（FeS₂和有机硫）在火焰中还原性气氛下反应生成S和H₂S；硫及H₂S与受热面的氧化层、受热面金属反应导致腐蚀。



硫酸盐腐蚀：水冷壁表面灰渣层熔融的硫酸盐吸收烟气中的SO₃并在Fe₂O₃、Al₂O₃作用下，生成复和硫酸盐，管壁表面的Fe₂O₃氧化保护膜被复合硫酸盐破坏，使得管壁继续腐蚀。



氯化物型腐蚀：煤中氯在烟气中挥发，在火焰中生成HCl；HCl与受热面的氧化层、受热面金属反应(在400-600°C时反应最活跃)导致腐蚀：



三、锅炉典型问题分析与预防措施

1、水冷壁高温腐蚀

■ 水冷壁高温腐蚀机理

水冷壁管高温腐蚀的区域：通常多在燃烧高温和还原性气氛浓度高的区域，即局部热负荷较高，管壁温度也较高的区域，如燃烧器区附近，其余区域的高温腐蚀明显减弱或根本不发生；发生高温腐蚀的管子向火侧正面的腐蚀速度最快，管壁减薄量最大，背火侧则不发生。

对（四墙）切圆燃烧锅炉：当燃烧切圆直径过大、火焰中心未形成切圆或燃烧切圆偏移时，炉内空气动力场倾斜，燃烧器区域出现火焰冲墙和还原性气氛，从而发生高温腐蚀。腐蚀和冲刷反复交替作用，大大加快了腐蚀速度，管壁上形成的冲刷平面，腐蚀减薄区域位于主燃烧室靠近燃烧器处（如图3）。

对前后墙布置对冲燃烧锅炉：两侧墙水冷壁附近存在强还原性气氛、高浓度 H_2S 、煤粉刷墙，腐蚀减薄区域位于两侧墙（如图4）。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

1、水冷壁高温腐蚀:

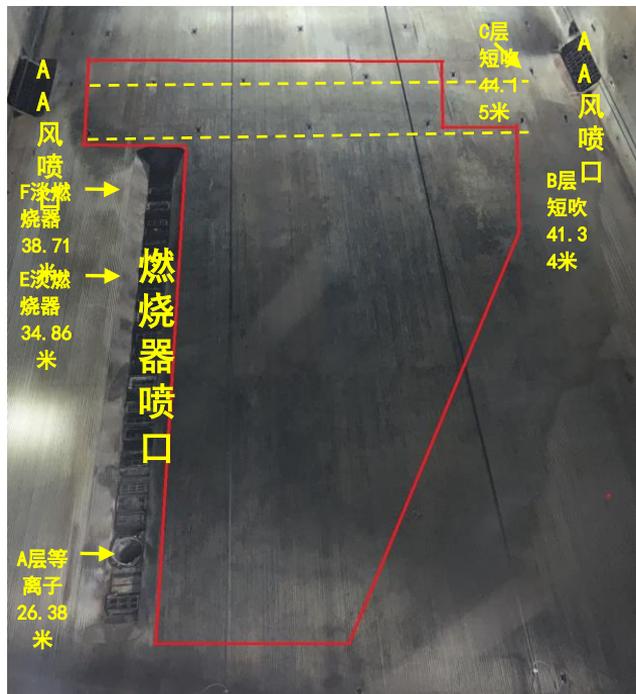


图3: 切圆炉腐蚀区域

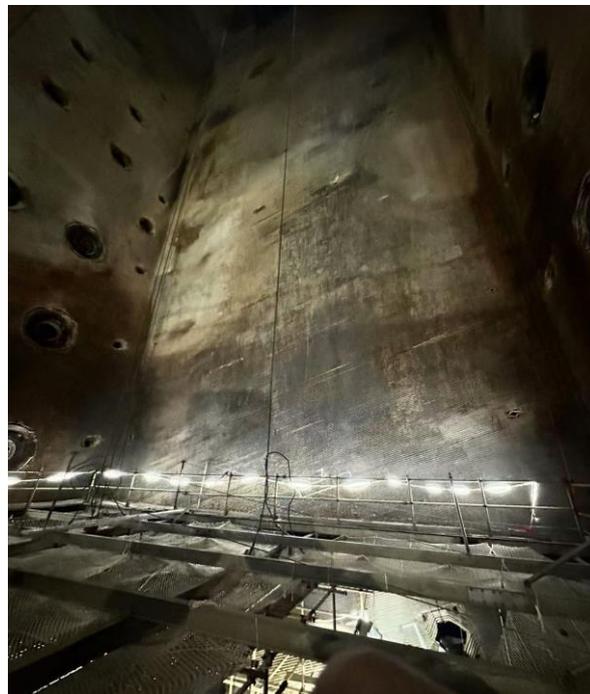


图4: 对冲炉腐蚀区域

三、锅炉典型问题分析与预防措施

1、水冷壁高温腐蚀

水冷壁管腐蚀的**形貌**如（图5），水冷壁管壁**减薄情况**如图（6）。



图5水冷壁管形貌

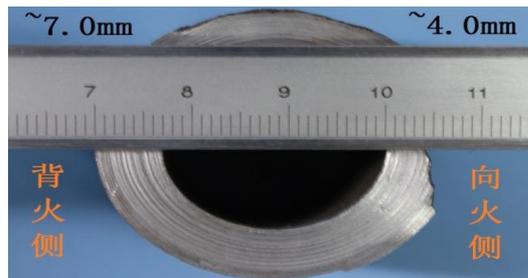
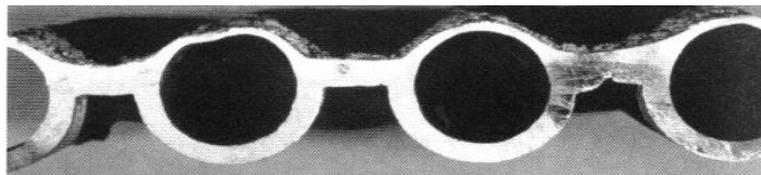


图6 水冷壁管壁减薄情况

三、锅炉典型问题分析与预防措施

1、水冷壁高温腐蚀

■ 水冷壁高温腐蚀影响因素

- **燃料性质**：燃煤的含硫量、含氯量高；煤粉中粗颗粒多，粘结在水冷壁上继续燃烧；
- **水冷壁管壁温度**：管壁温度大于 350°C ，温度越高，腐蚀速度越快（ 600°C 的速率是 400°C 的7倍）；
- **还原性气氛**：炉膛出口 $\text{CO}>300\text{ppm}$ ；燃烧器区域 $\text{H}_2\text{S}>250\text{ppm}$ ；
- **燃烧工况**：采用低氧量燃烧，锅炉局部缺氧， $\text{O}_2<1\%$ ；
- **空气动力场**：切圆过大，火焰中心偏斜，烟气冲刷水冷壁，导致水冷壁附近剧烈燃烧，缺氧。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

1、水冷壁高温腐蚀

■ 水冷壁高温腐蚀防治措施

- ✓ 加强对燃料的控制。控制入炉煤的硫、氯含量及煤灰中的碱金属含量；
- ✓ 优化运行方法（合理调整燃烧器的一、二次风速、风量等参数；控制热负荷、汽水品质及燃料供给量）：避免结焦造成熔盐类腐蚀、避免出现局部超温现象、避免火焰刷墙、避免水冷壁贴壁氧量过低、避免过量空气系数过低；
- ✓ 提高金属抗腐蚀的能力：材料升级（耐腐蚀合金钢）、水冷壁表面防腐（纳米陶瓷、Ni、Cr合金等）；
- ✓ 燃烧器改造、缩小切圆、水平浓淡风煤粉燃烧器、贴壁风。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

2、过热器、再热器的高温腐蚀

★过热器、再热器高温腐蚀机理：

过热器和再热器的高温腐蚀主要包括硫酸型高温腐蚀和钒腐蚀（燃油、燃气机组）两种类型

硫酸型高温腐蚀是由于管壁外存在高温粘结性灰粒污染层，凝结在管壁的碱金属氧化物（ Na_2O 、 K_2O ）及金属表面或灰分中的氧化铁与 SO_3 长期作用形成 M_2SO_4 （如 $\text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$ ）或硫酸铁（ $3\text{SO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ）， Na_2SO_4 有粘性，熔点低，会进一步吸收 SO_3 ，并与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等作用生成具有腐蚀性的复合硫酸盐（如 $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3 \rightarrow 2\text{Na}_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ ），随着硫酸盐沉积量的增多，热阻加大，外表温度升高至硫酸盐熔点时，管壁上 Fe_2O_3 保护层会被溶解破坏，复合硫酸盐会与铁反响，形成 $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ 循环作用，使腐蚀不断进行。



三、锅炉典型问题分析与预防措施

2、过热器、再热器的高温腐蚀

★过热器、再热器高温腐蚀机理：

复合硫酸盐的熔点很低，且复合硫酸盐具有由高温处向低温壁面移聚的能力，从而使腐蚀过程继续下去和增强。金属壁温在650~700℃时腐蚀速度到达最严重。

$\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ 熔点624℃； $\text{K}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ 熔点618℃。

腐蚀形貌：铁素体钢管的腐蚀为浅沟槽，奥氏体不锈钢管外表面的高温煤灰腐蚀呈“麻点”状（如图：高过、后屏过热器弯头腐蚀形貌）。



高过热器弯头腐蚀形貌



后屏过热器弯头腐蚀形貌

三、锅炉典型问题分析与预防措施

2、过热器、再热器的高温腐蚀

★影响过热器、再热器的高温腐蚀的因素

- ▶ 烟气成分及组成，煤（生物质、污泥及垃圾）中含硫、氯元素和煤灰含碱金属；
- ▶ 受热面金属材料的抗腐蚀性能；
- ▶ 受热面管壁温度；
- ▶ 受热面布置区域的烟气温度
- ▶ 还原性气氛。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

2、过热器、再热器的高温腐蚀

★过热器、再热器的高温腐预防措施

- ✓加强对燃料的控制。控制入炉煤的硫、氯含量及煤灰中的碱金属含量；
- ✓控制管壁温度，以防止和减缓腐蚀；
- ✓采用低氧燃烧技术，降低烟气中的 SO_3 ；
- ✓选择合理的炉膛出口烟温，避免出现炉膛出口烟温过高。
- ✓加强对过热器和再热器进行吹灰，去除含有碱金属氧化物和复合硫酸盐的灰污层，阻止高温腐蚀的发生。
- ✓合理组织燃烧，改善炉内空气动力及燃烧工况，防止水冷壁结渣、火焰中心偏斜或后移等可能引起热偏差的现象发生，减少过热器与再热器的沾污结渣；
- ✓采用顺列管排，加大管间节距。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(三)、氧化皮的生成与控制

1、氧化皮生成与脱落的机理

目前高温过热器管、高温再热器管多为高Cr钢，奥氏体不锈钢较为常见，当高Cr钢长时间处于高温高压的水蒸汽中时，管子内壁会自然的氧化。一般说来，在某个温度段（570 ~600℃），温度越高，氧化皮生长速度越快。奥氏体不锈钢氧化皮的热膨胀系数与基体材料的热膨胀系数有较大差异，在设备快速启停时，氧化皮容易脱落，脱落后使基材暴露在蒸汽中，而抛物线特征为初期氧化速度极快，导致反复脱落，反复氧化，氧化速度加快，并且脱落的氧化皮反过来也降低此处管材的蒸汽流量，使其容易超温，并使管子氧化速度显著增加。氧化皮的生成、脱落控制与材料抗氧化力、运行温度及热偏差、负荷变化速率有关。

不同材料的抗氧化能力差别很大，所以材料成分是管材抗氧化性能的基础影响因素，因此，在不同的需求下选择合适的管材，对于控制和减缓氧化皮的生成有着重要的作用。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(三)、氧化皮的生成与控制

2、影响氧化皮生成与脱落的因素



三、锅炉典型问题分析与预防措施

(三)、氧化皮的生成与控制

3、氧化皮堆积形貌



图8：高温再热器内壁氧化皮堆积

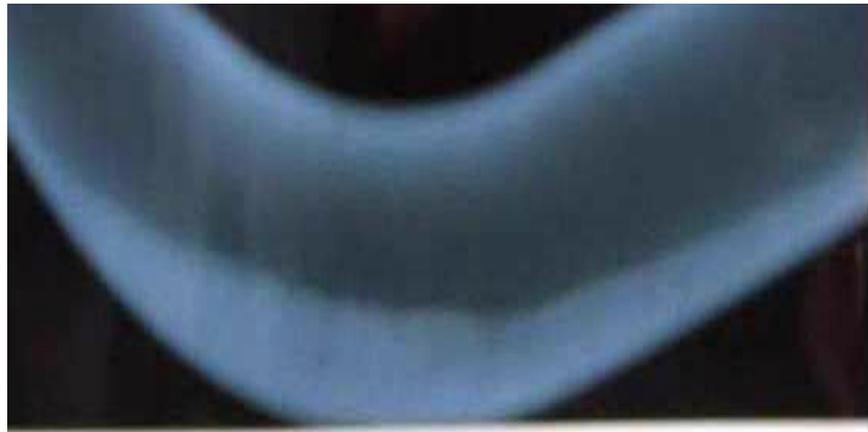


图9：氧化皮堆积射线检测情况

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(三)、氧化皮的生成与控制

4、控制氧化皮的运行措施

▣ **正常运行过程**，避免超负荷运行，防止超温及热偏差，控制负荷变化速率，禁止负荷突升或突降。

▣ **启动过程**：

- 严格控制水汽品质（冷、热态冲洗）；
- 启动旁路吹扫；
- 启动过程尤其汽机带负荷前，减温水尽量不投，如果实在控制不住冲转参数可投一级减温水（通过调整冲转参数，或调门开度可不投过热器减温水）；
- 启动过程控制升温、升压速度（温升不大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，升压不大 $0.1\text{MPa}/\text{min}$ ），延缓启炉时间；但在热态启动过程中，为防止受热面金属温度降低，点火后要尽快增加燃料量，控制屏过、高过、高再的温升速率为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(三)、氧化皮的生成与控制

4、控制氧化皮的运行措施

▣停炉过程:

- 在锅炉停炉时应避免锅炉快速冷却。停炉过程中，控制主蒸汽、再热蒸汽温度下降速率不超过 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，主汽压力下降速率不超过 $0.1\text{MPa}/\text{min}$ 。
- 避免在低负荷投用减温水；
- 停机后注意焖炉。锅炉熄火后，维持 $30\%\sim 40\%$ 额定风量，对炉膛进行吹扫5-10分钟吹扫。吹扫完毕，停用送、引风机，执行闷炉程序，时间不宜低于48小时。
- 通风冷却时，防止通风冷却过程造成内壁温度快速下降。控制冷段过热器和冷段再热器入口烟气降温速率不高于 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(三)、氧化皮的生成与控制

5、控制氧化皮的检修措施

- 氧化皮的检测与清理应理为等级检修项目，利用射线拍片法(铁素体钢)、磁性检测法(奥氏体钢)、必要时割管清理。
- 对存在出列、变形、超温或胀粗值偏大的管子，停炉时，应进行检测。
- 水压试验尽量减少，如果水压试验后启动，尤其注意温升速度及各级受热面蒸干情况（水压试验后一般分割屏先蒸干，后屏次之，末过一般最后，末过发生水塞的可能性最大，氧化皮遭到破坏的程度也最大）：
 - 尽量避免过热器、再热器灌水查漏（每一次水压试验及灌水查漏后启动都可能对氧化皮造成严重损伤，而一旦损伤可能造成多次爆管事故）
 - 更换过热器、再热器管材（升级材料等级+内部喷丸）；
 - 化学清洗去除氧化皮。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(四) 空预器堵塞

1、空预器堵塞机理

在燃煤锅炉炉膛内燃烧，烟气中的 SO_2 被氧化成 SO_3 。加装SCR（选择性催化还原）系统后，催化剂在把 NO_x 还原成 N_2 的同时，将 SO_2 氧化成 SO_3 。SCR反应器出口烟气中存在的未反应的逃逸氨（ NH_3 ）、 SO_3 及水蒸气反应生成硫酸氢铵或硫酸氨。当烟气中的 SO_3 浓度高于逃逸氨浓度时，生成物主要为硫酸氢铵。硫酸氢铵在 147°C 以下时表现为固态，具有较强的坚固性；在 200°C 左右时，难以通过常规的蒸汽吹灰和激波吹灰去除；而在 250°C 以上时则会升华。由于空预器运行过程中的温度梯度变化，硫酸氢铵容易在空预器换热元件中部粘结和沉积，导致堵塞。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(四) 空预器堵塞

2、空预器堵塞原因

直接原因

空预器堵塞主要是因为硫酸氢铵过高

间接原因

进入空预器的烟气中 SO_3 及 NH_4 偏高

根本原因

SO_3 生成量太高
及喷氨运行方式不合理、空预器冷端温度低

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(四) 空预器堵塞

3、空预器堵塞预防措施

- ▣ 设计选型：宜采用两段式、大通道、防堵型蓄热元件；
- ▣ 控制含灰量和含硫量，减少灰尘颗粒和硫化物含量；
- ▣ 减少SO₃生成：强化分级配风，实施“高温低氧，低温加风”的运行；
- ▣ 控制炉内热负荷分布均匀，避免局部温度高温造成NO_x偏高；总风量控制，降低过量空气系数；
- ▣ 优化SCR系统，进行喷氨优化调整，避免氨逃逸率过高；
- ▣ 控制入口烟温，增加暖风器等；
- ▣ 强化空预器的吹扫。运行中出现积灰堵塞时，适当提升吹灰压力等措施，必要时可采取空气预热器单侧升温、在线高压水冲洗等措施；
- ▣ 加强设备检修，控制漏风率；

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(五) 水冷壁疲劳裂纹

1、水冷壁疲劳裂纹机理：

锅炉水冷壁为全焊式膜式水冷壁，轴向刚性较大而横向刚性小。机组启停、调峰等原因导致管壁温度大幅度波动，产生轴向交变热应力，由于向火侧壁温变化最大，向火侧壁温峰值也加大，产生的交变热应力也最大，最终导致材料的抗热疲劳能力降低，造成向火侧管壁外侧发生热疲劳破坏，表面产生横向裂纹的水冷壁管处于高热负荷区，。

另外，煤灰中的硫元素对裂纹的产生及扩展起明显促进作用。燃料煤中硫及其它有害杂质的存在，使水冷壁管普遍受到高温腐蚀，其中硫化物是高温腐蚀的主要因素。烟气中的硫化氢等腐蚀介质从水冷壁管涂层孔隙中进入，与管壁金属作用产生腐蚀，并易于成为应力集中点和裂纹源。

在轴向交变应力和腐蚀介质的共同作用下，金属的抗热疲劳强度降低，最终水冷壁管产生横向裂纹。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(五) 水冷壁疲劳裂纹

2、水冷壁疲劳裂纹特征：

大量环向裂纹，裂口形貌为钝边，内有氧化层。



管子内壁氧化层



水冷壁母材裂纹



经PT检测，水冷壁母材裂纹



经MT检测，水冷壁焊缝及热影响区裂纹

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(五) 水冷壁疲劳裂纹

2、水冷壁疲劳裂纹特征:



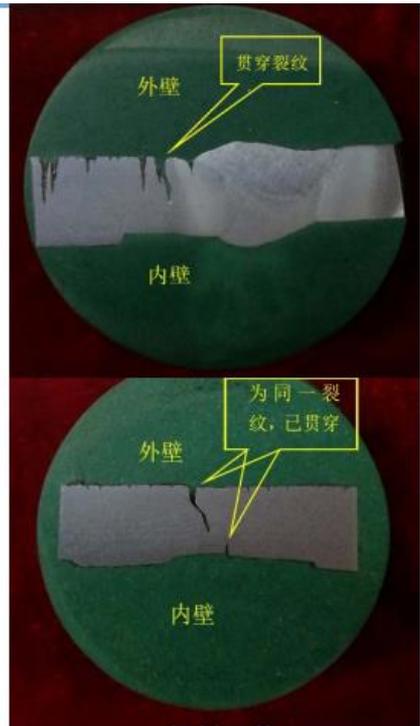
爆管整体形貌



外壁形貌



内壁形貌



解剖形貌

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(五) 水冷壁疲劳裂纹

3、影响水冷壁疲劳裂纹的因素

- 空气（水）动力场不均匀，**调峰**时启停频繁，负荷变化波动大且频繁，局部超温、应力变化；
- 设计问题，中间混合器进出管交替，两根管子之间温度梯度大；
- 向火侧管壁高温氧化、腐蚀；
- 鳍片（管间距）超宽；鳍片单边焊接；
- 管内部结垢，壁温升高；
- 运行中结焦、落焦频繁；

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(五) 水冷壁疲劳裂纹

4、水冷壁疲劳裂纹的预防措施

- 控制燃用煤种含硫量；
- 加强燃烧工况调整、合理配风，确保炉膛火焰中心位置适宜，不发生偏斜或冲刷炉墙现象，防止局部超温；
- 在机组启停、**调峰过程**中严格遵守操作规程，严禁快速升降负荷和停炉强制冷却；
- 尽量避免在高负荷区域形成还原性燃烧气氛，减轻炉管外壁高温腐蚀程度；
- 加强化学监督，严格控制炉水工况和汽、水品质，减少管内结垢，从而降低向火侧壁温升高趋势；
- 检修时防止出现宽鳍片、鳍片单边焊接、膨胀受阻等。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(六) 异种钢接头失效

1、宏观形貌

2020年6月19日后屏过发生爆管，爆口位置位于炉B侧数第27屏炉前数第13根（以下简称13号）进口联箱大罩内的F91-TP347H异种钢接头，并在进口联箱接管处甩断。

镍基焊材



三、锅炉典型问题分析与预防措施

(六) 异种钢接头失效

1、宏观形貌

> 宏观形貌观察



> 管样沿F91侧熔合线环向断开，断面呈灰黑色，清晰可见焊道轮廓，断面两侧未见宏观塑性变形。

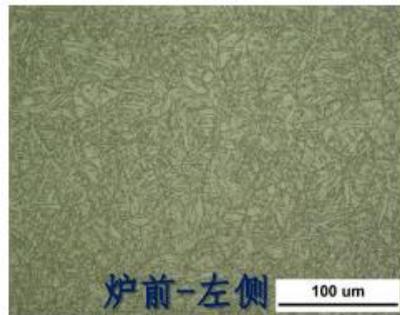
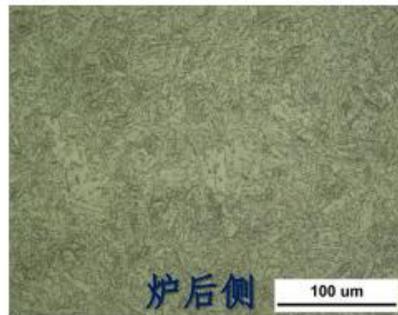
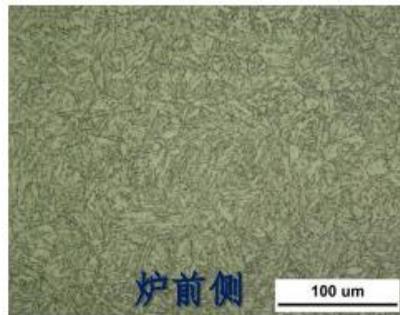
> 炉前侧断面上隐约可见蒸汽吹损痕迹，断面其他部位未见蒸汽吹损痕迹。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

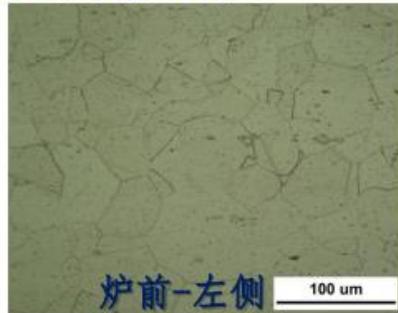
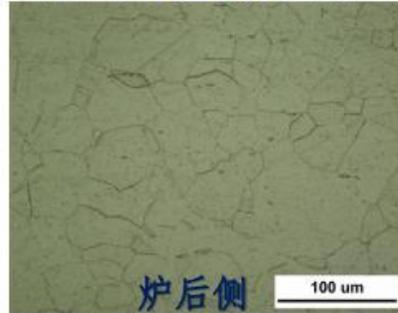
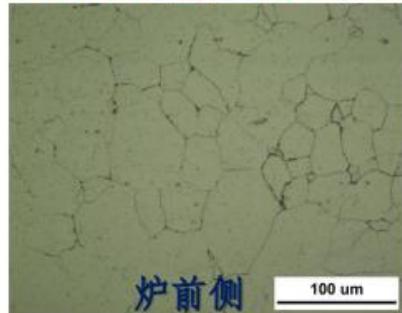
(六) 异种钢接头失效

2、微观形貌

> **F91母材金相** 回火马氏体，老化2级



> **TP347H母材金相** 奥氏体+第二相析出物，老化2级，晶粒度6-7级。

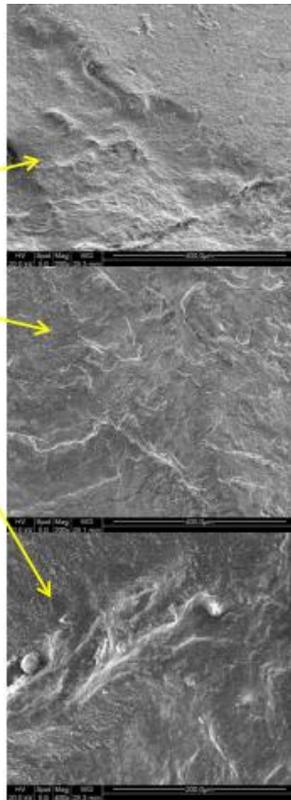
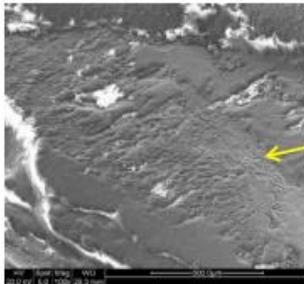
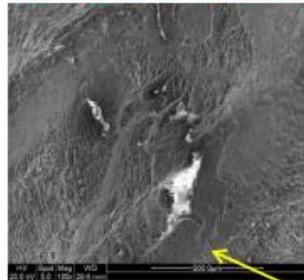


三、锅炉典型问题分析与预防措施

(六) 异种钢接头失效

3、扫描电镜形貌

扫描电镜形貌观察



断面清晰可见焊道轮廓，
微观下较平坦，覆盖有一
薄层的氧化产物，未见疲
劳、沿晶等特征。

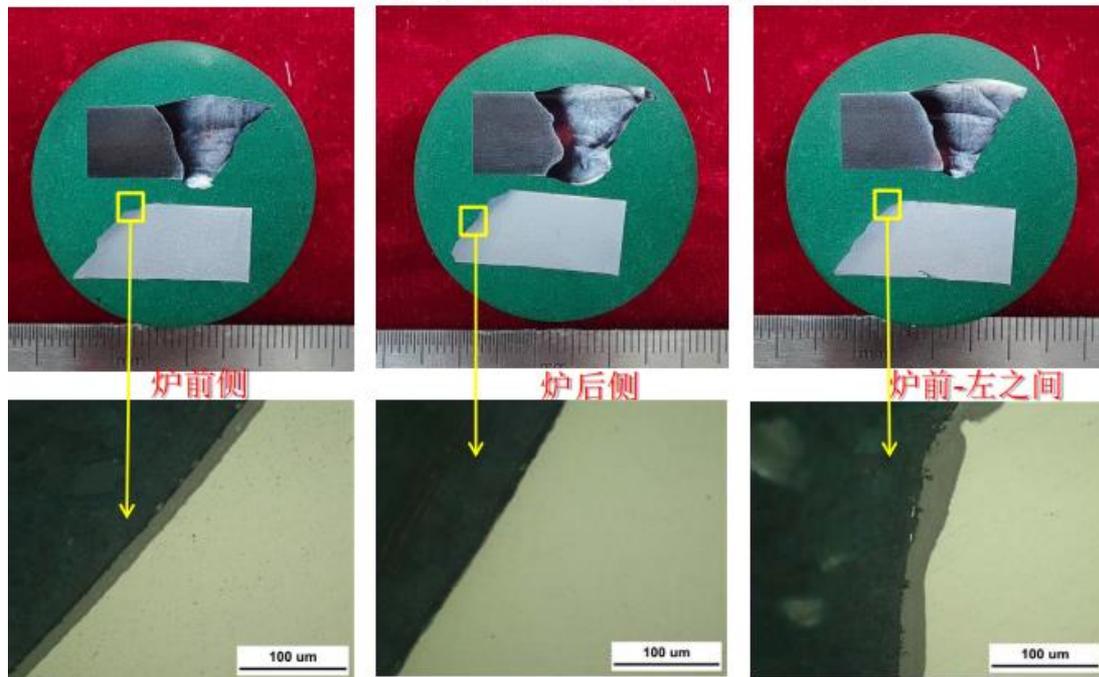
三、锅炉典型问题分析与预防措施

(六) 异种钢接头失效

3、断面金相

断面金相检验

➤F91可见炉前侧断面有一薄层氧化层，炉后侧大部分断面无氧化层。



三、锅炉典型问题分析与预防措施

(六) 异种钢接头失效

4、本次失效原因

➤ 开裂原因分析

引起B27-13管样爆管的主要原因与该管圈进出口管段间壁温差及可能存在的膨胀不均，在异种钢接头处引起的附加弯曲应力、镍基焊缝与F91间线膨胀系数差异在熔合线界面产生的热应力等因素有关。

➤ 现场排查

相控阵检测+PT检测

现场发现10余处缺陷，更换后未出现问题。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(六) 异种钢接头失效

5、失效机理及原因 (A/F、M钢)

- ✓ 异种钢存在化学成分差异，焊接过程存在C元素的迁移，增、脱C，熔合区会形成化学成分不均匀的过渡区；熔合区存在硬度较高的马氏体过渡层和增碳层，蠕变强度下降；
- ✓ 异种钢接头存在薄弱环节，热膨胀系数差异，蠕变强度不匹配，两种金属的蠕变强度相差极大；
- ✓ 焊接工艺不当，焊接残余应力大；
- ✓ 弯曲应力大（尤其是靠近顶棚管处的焊口），管屏晃动产生的交变应力导致异种钢接头疲劳断裂；
- ✓ 焊接缺陷（未焊透、未熔合、夹渣、气孔）对异种钢接头的失效有一定影响；所有
- ✓ 异种钢接头均在铁素体、马氏体一侧的熔合区断裂。

三、锅炉典型问题分析与预防措施

(六) 异种钢接头失效

6、异种钢接头裂纹的预防措施

- 严格控制锅炉的运行温度，避免温度急剧变化；控制启、停炉升降温速率；稳定锅炉运行压力。
- 保证水质良好，控制水中的杂质、溶解氧（腐蚀作用）；
- 焊接质量控制：焊接材料选择、焊接工艺参数、预热及焊后热处理、接头设计合理。
- 按DL/T 438 要求，对过热器和再热器A/F接头取样进行金相组织的老化和力学性能的劣化检查，第一次5万h，10万h后每次大修取样检验。
- 定期进行外观检查 and 无损检测。

特别注意：炉外联样、热工仪表管座角焊缝安装缺陷及疲劳裂纹的定期检查及处理。

谢 谢
Thank you

