

DOI: 10.19666/j.rlfed.202301014

火电机组锅炉炉管沉积物类型和影响分析

滕维忠¹, 郭俊文¹, 刘炎伟¹, 邓彪², 林崑², 秦建柱²,
郭上科², 曹志刚², 黄俊谐², 伊朝品², 黄修喜²

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 华能海南发电股份有限公司东方电厂, 海南 东方 572600)

[摘要] 火电机组锅炉炉管失效爆管, 会造成机组非停和一定的经济损失。炉管内沉积物是其失效的重要原因, 减少炉管内沉积物的产生对机组的安全稳定运行具有重大意义。研究发现, 沉积物的形成与炉管过热、高热负荷、水汽品质不佳、出现水汽相变、工质扰动和管材表面缺陷等多种因素有关。结合目前机组灵活性和深度调峰运行、环保改造等情况, 用实际沉积物事故案例对各种类型沉积物的形成机理和影响因素进行了分析; 进一步论述了炉管内沉积物带来的过热、盐类富集浓缩和对垢下腐蚀的影响; 提出了对给水水质、停炉保护、机组启动水汽净化、机组调峰、锅炉换管、锅炉改造和检修时的应对措施, 以有效减少锅炉受热面沉积物的产生和降低锅炉炉管失效的风险。

[关键词] 炉管失效; 沉积物; 热负荷; 水汽品质; 流体状态

[引用本文格式] 滕维忠, 郭俊文, 刘炎伟, 等. 火电机组锅炉炉管沉积物类型和影响分析[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 181-190.
TENG Weizhong, GUO Junwen, LIU Yanwei, et al. Analysis on types and effects of deposits in boiler tubes of thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 181-190.

Analysis on types and effects of deposits in boiler tubes of thermal power unit

TENG Weizhong¹, GUO Junwen¹, LIU Yanwei¹, DENG Biao², LIN Wei², QIN Jianzhu²,
GUO Shangke², CAO Zhigang², HUANG Junxie², YI Chaopin², HUANG Xiuxi²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Dongfang Power Plant of Huaneng Hainan Power Generation Co., Ltd., Dongfang 572600, China)

Abstract: The failure of boiler tubes in thermal power units will cause non shutdown of units and greater economic losses. Deposits in boiler tubes are an important reason for their failure, and reducing deposits in boiler tubes is of great significance to the safe and stable operation of units. It is found that the formation of deposits is related to many factors, such as overheating of furnace tubes, high heat load, poor water vapor quality, water vapor phase transition, working medium disturbance and pipe surface defects. Combined with the flexibility of units, deep peak shaving operation, environmental protection reform and other conditions, the formation mechanism and influencing factors of various types of deposits are analyzed with actual accident case pictures. The effects of overheating, salt concentration and corrosion under scale caused by deposits in furnace tubes are further discussed. The countermeasures for feedwater quality, boiler shutdown protection, unit startup steam purification, unit peak shaving, boiler tube replacement, boiler transformation and maintenance are proposed, which can effectively reduce the generation of boiler heating surface deposits and reduce the risk of boiler tube failure.

Key words: boiler tube failure; deposits; thermal load; water and steam quality; fluid state

火电厂锅炉炉管水汽侧泄漏失效的主要类型 性腐蚀、酸性腐蚀、氧腐蚀、冲刷腐蚀及氢脆等^[1-3],
有短期和长期超温过热、应力腐蚀、腐蚀疲劳、碱 造成上述锅炉炉管泄漏失效的原因均与炉管内表

收稿日期: 2023-01-04

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-HF201)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-HF201)

第一作者简介: 滕维忠 (1965), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为发电厂化学监督技术, tengweizhong@tpri.com.cn.

面有致密或疏松的沉积物有关。

锅炉运行和停用保护过程中,各种原因会在炉管水汽受热面形成致密或疏松的沉积物。沉积物的覆盖会导致炉管传热不良、管壁温度大幅上升,增加了炉管金属超温氧化物的生成速率和沉积量^[4]。炉管壁温长期超标会导致金属材料性能下降,出现炉管鼓泡、破裂泄漏事故;当短时间大幅超温时会出现炉管开裂爆管泄漏事故;炉管表面覆盖有沉积物时,还会造成沉积物下介质的浓缩,富集水汽中的杂质离子形成腐蚀的条件和环境,出现各种类型的沉积物下腐蚀,造成腐蚀穿孔、氢脆等炉管泄漏事故^[5-6]。沉积物中富集的腐蚀性氯离子、硫酸根离子和硫离子在有交变应力的部位形成腐蚀疲劳,在拉力的部位形成应力腐蚀开裂^[7]。炉管表面凸起的沉积物还会造成其工质流向后部水汽的扰动、形成紊流状态,出现冲刷腐蚀和腐蚀产物在其扰动部位后炉管表面的沉积^[8]。

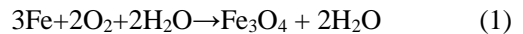
21世纪以来,国内火电机组的容量和参数逐步提高,超(超)临界、亚临界机组对给水、炉水、蒸汽品质提出了更高的质量标准,对各部分炉管水工况的均匀性也提出了更高的要求。随着火力发电机组深度调峰、灵活性运行的普遍实施,掺烧非设计煤种或污水处理污泥,锅炉环保改造等工作的实施,给机组运行特别是锅炉运行带来了一些变化。如:机组启停动次数增加、快速启动带负荷和升负荷速率增加;深度调峰时锅炉在低于稳燃负荷以下运行;灵活性运行时负荷变动速率大和频繁;环保改造和燃煤成本的增加也给锅炉运行带来了许多问题^[9]。这些变化都会使炉管容易生成沉积物,给机组的安全稳定运行带来影响。

1 锅炉炉管沉积物类型和原因

1.1 氧腐蚀沉积物

金属表面保护膜存在局部缺陷,如硫化物夹杂、金相缺陷、表面局部粗糙等情况;运行锅炉中部分管段由于管材在运输、保存、安装、焊接和运行中保管、保养不当,表面出现腐蚀点位和沉积物;当停用保护时系统内相对湿度大于60%或系统不密闭发生“呼吸效应”(由于昼夜温差,系统内空气膨胀和收缩的过程造成夜间大气进入系统在炉管表面结露的现象)后,会在炉管表面结露或积水。水滴的溶解氧量高,基本是饱和浓度。由于炉管表面有局部缺陷部位的电极电位低于钝化膜完整的

部分,从而形成微腐蚀电池,电极电位较负的部位为阳极区,电极电位较正的部位为阴极区,在中性或碱性水中,发生氧腐蚀。氧腐蚀的总体电化学反应式见式(1)。



氧腐蚀的一般特征是出现腐蚀产物堆积鼓包。鼓包的大小差异较大,约为1~30 mm,这种腐蚀特征也称为溃疡腐蚀。鼓包表面的颜色可能呈黄褐色、砖红色或黑褐色,次层是黑色粉末状物,颜色不同是因为腐蚀产物由不同中间化合物或晶态不同的物质组成。将腐蚀产物除去后,可发现一些大小不一的腐蚀坑。图1为某超临界机组锅炉采用“热炉放水、余热烘干”保护方法3个月后,水冷壁割管检查管样表面氧腐蚀形态。图2为某亚临界锅炉省煤器水平段管氧腐蚀坑。



图1 水冷壁管停用氧腐蚀

Fig.1 Oxygen corrosion of water wall during shutdown



图2 水平段省煤器管氧腐蚀坑

Fig.2 Oxygen corrosion of economizer in horizontal section

氧腐蚀形成的腐蚀产物,不进行清理或化学清洗不会完全脱离,在锅炉运行过程中由于炉管温度、溶解氧质量浓度的变化会逐步转化成致密的铁氧化物沉积层。锅炉设备中氧腐蚀多发生在省煤器水平管段、水冷壁、过热器和再热器管弯管等部位。

1.2 钙镁和硅酸盐沉积物

炉水硬度、二氧化硅质量浓度超标,会在炉管表面生成碳酸钙(CaCO_3),硫酸钙(CaSO_4 、 $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $2\text{CaSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$)、硅酸钙(CaSiO_3 、 $5\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$)及镁垢($\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$)

等固体沉积物（水垢）。当炉水、蒸汽中硬度、铁、铝、钠、硅质量分数达到或超过标准规定时，易在蒸汽炉管表面形成铝钠硅酸盐水垢，一般组成为 40%~50%（质量分数，下同）二氧化硅、25%~30% 铝和铁氧化物、10%~20% 钠的氧化物及钙、镁氧化

物等。其组成随着水汽中硬度、铁、铝、钠、硅等各元素质量分数的不同有较大的差别。

表 1 为不同物质的导热系数。从表 1 可以看出，水垢的导热系数比钢材低几十到几百倍，严重阻碍管壁的传热。

表 1 物质的导热系数
Tab.1 Thermal conductivity of material

单位: W/(m·°C)

钢材	铁氧化物垢	硅酸盐垢	硫酸钙垢	碳酸钙垢
46.400~69.600	0.116~0.232	0.058~0.232	0.580~2.900	0.580~6.960

图 3 为水垢的厚度和导热系数对金属管壁温度的影响曲线。炉管壁温数据是按照燃烧室温度 1100 °C、炉水温度 200 °C、炉管壁厚 5 mm、炉管导热系数 58.11 W/(m·°C) 时不同垢类厚度的管壁温度计算值。即使炉管中附着一层薄垢，也可能使管壁温度大大超过金属材料的最高允许值^[7]。

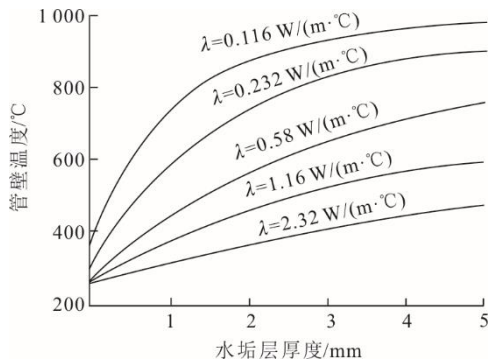


图 3 水垢的厚度和导热系数对金属管壁温度的影响
Fig.3 Influence of incrustation thickness and thermal conductivity on tube temperature

21 世纪以来，电厂中压及以上参数锅炉补给水处理工艺已采用二级除盐系统，锅炉补给水电导率小于等于 0.4 μS/cm，基本消除了因锅炉补水有硬度造成的炉管钙镁硅垢的沉积问题。但蒸汽炉管出现硅酸盐水垢的问题时有发生，其主要原因除凝汽器、热网换热器泄漏造成水汽品质降低、杂质质量浓度升高外，炉管更换时没有对新管内部表面沙土、锈蚀产物进行清理也有主要影响。蒸汽中的硬度、铁、铝、钠、硅杂质还会在汽轮机高压通流表面形成坚固焦炭状的金属硅酸盐垢，使汽轮机高压部分通流截面减小，不能带满负荷。图 4 和图 5 分别为锅炉水冷壁管和汽轮机高压动叶片、静叶片表面硬垢和铝钠硅酸盐垢的情形^[10]。

1.3 磷酸盐沉积物

近 10 余年来，汽包锅炉的炉水处理多已采用低磷酸盐等处理工艺，基本消除了严重的“磷酸盐隐藏”

问题。但部分机组由于凝汽器、热网换热器泄漏以及停备用启动时系统冲洗不合格，为了控制炉水参数和避免炉管沉积钙镁垢，在短时间内加入浓度较高的磷酸盐，因此不可避免地产生“磷酸盐隐藏”问题。



图 4 水冷壁钙镁垢和腐蚀坑
Fig.4 Water wall scale and corrosion pit



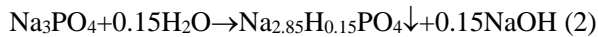
图 5 汽轮机高压调节级表面硅酸盐沉积
Fig.5 Silicate deposition on the surface of high pressure governing stage of steam turbine

产生“磷酸盐隐藏”原因之一是在水冷壁管存在超温、湍流冲刷和有沉积物分布的管段时，近壁层炉水会剧烈蒸发使炉水中的磷酸钠盐被浓缩到其饱和浓度，在炉管表面上结晶析出磷酸钠盐的固相沉积物。

磷酸盐处理常用的药品是 Na₃PO₄，当水温超过 120 °C 后，其溶解度随水温升高急剧下降^[7]。在高温水中，Na₃PO₄ 的溶解度很小。在压力为 15.0 MPa 的炉水饱和温度下，其溶解度仅有 0.15%。因此，近壁层炉水中 Na₃PO₄ 的浓度很容易达到和超过其饱和浓度析出。

原因之二是析出沉积的 Na_{2.85}H_{0.15}PO₄、Na₂HPO₄ 和 NaH₂PO₄ 的混合物与炉管内壁上的

Fe_3O_4 保护膜发生反应, 在金属表面生成钠铁复合磷酸盐 NaFePO_4 固相附着物。磷酸钠盐的沉积及其与 Fe_3O_4 的反应是可逆的, 当磷酸钠盐溶液浓度超过临界值时, 发生反应(式(2)), 并且该临界值随温度的提高而降低。因此, 温度越高, 式(2)反应越容易发生。实践表明即使采用低磷酸盐处理工艺也会产生“磷酸盐隐藏”问题。



“磷酸盐隐藏”产生的沉积物在反应(式(2))向右时在炉水中产生游离 NaOH 、使炉水 pH 值升高; 向左时, 炉水 pH 值降低。

“磷酸盐隐藏”的出现使水冷壁管内近壁层炉水中产生游离 NaOH , 可能引起炉管金属的碱性腐蚀。“磷酸盐隐藏”还可能引起炉管的酸性磷酸盐腐蚀, 其原理详见图 6, 实际腐蚀管样如图 7 所示。酸性磷酸盐腐蚀的腐蚀产物通常有 2 个明显区别的层, 外层呈黑色, 内层呈透明的灰色, 并且有 NaFePO_4 。腐蚀产物中存在 NaFePO_4 是酸性磷酸盐腐蚀的一个关键特征^[4]。

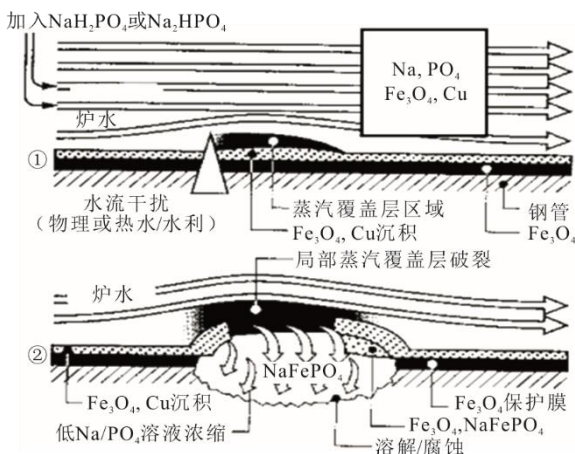


图 6 酸性磷酸盐腐蚀机理
Fig.6 Corrosion mechanism of acid phosphate



图 7 酸性磷酸盐沉积和腐蚀管样
Fig.7 Acid phosphate deposition and corrosion pipe sample

1.4 水汽系统中铁的沉积

水汽中铁氧化物在炉管表面主要沉积在热负

荷高的炉管管壁上, 如喷燃器附近^[9]、偏烧、水动力不足、结焦和落焦接触的炉管等处。铁氧化物垢沉积的机理^[4,7]是锅炉水汽中铁的化合物主要以胶体形式溶解于水汽中, 并且呈正电性, 而在热负荷很高的金属表面区域, 因高温电子活跃和趋向集中而带负电性在静电引力作用下, 带正电的胶体铁氧化物微粒就向带负电的金属表面聚集, 最终形成铁氧化物沉积。

高参数和大容量锅炉热负荷高, 水汽中铁质量浓度满足标准值时也会产生铁氧化物垢, 主要原因是局部炉管热负荷高于正常运行温度。超临界机组的给水和蒸汽的铁质量浓度标准值和期望值分别是小于等于 $5 \mu\text{g/L}$ 和小于等于 $3 \mu\text{g/L}$, 亚临界机组的分别是小于等于 $10 \mu\text{g/L}$ 和小于等于 $5 \mu\text{g/L}$ ^[11]。研究表明, 当炉管的局部热负荷达到 $3.50 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 时, 炉水含铁量只要超过 $10 \mu\text{g/L}$, 就会产生铁氧化物沉积^[7]。

炉水和蒸汽中铁的主要来源有以下几种情况: 给水系统流动加速腐蚀产生的铁氧化物; 给水、炉水处理 pH 值较低的系统腐蚀产物; 给水加热器疏水系统腐蚀产物; 凝汽器、除氧器和汽包表面以及内部装置表面沉积铁氧化物; 蒸汽系统氧化皮带入; 热网、暖风器等疏水回收带入的腐蚀产物; 除盐水中的微量铁离子; 停备用机组启动热力系统冲洗不合格。

机组实际运行经验表明, 水汽中铁质量浓度达到期望值, 才可基本避免在汽轮机通流表面产生铁氧化物沉积垢层, 使炉管结垢速率降低, 达到 10 年不需要进行化学清洗的程度。图 8 和图 9 为某超临界 350 MW 机组投产 4 年后的省煤器和水冷壁铁氧化物沉积管样, 图 10 为该厂锅炉化学清洗后水冷壁管样。该厂运行前 2.5 年未实施给水加氧处理工艺。加氧 1.5 年后, 凝结水精处理出水、给水中铁的质量浓度分别为 1.36 、 $2.87 \mu\text{g/L}$, 蒸汽中铁的质量分数为 $2.32 \mu\text{g/kg}$ 。



图 8 省煤器进口管段铁氧化物沉积量 (460 g/m^2 管样)
Fig.8 Iron oxide deposition in the inlet pipe section of economizer (460 g/m^2 pipe sample)



图9 水冷壁管段铁氧化物沉积 (237 g/m²管样)
Fig.9 Iron oxide deposition in water wall pipe section
(237 g/m² pipe sample)

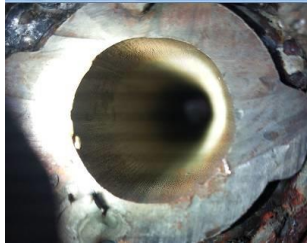


图10 水冷壁管段铁氧化物沉积物化学清洗后管样
Fig.10 Tube sample after chemical cleaning of water wall

机组的深度调峰和灵活性运行给锅炉部分炉管的水汽动力带来影响,造成局部受热面热负荷高于设计值^[12],燃料成本的上涨造成电厂掺烧非设计煤种,加剧了锅炉偏烧、结焦、局部吹损等问题的出现并造成了局部炉管过热;由于深度调峰、环保改造、燃用非设计煤种、掺烧劣质煤或城市废水处理污泥等情况对锅炉进行改造,如增加或减少受热面、增加尿素喷孔、配风口等情况下,没有系统考虑改造部分水汽回路的水动力分配情况,造成改造炉管水动力不均匀,形成局部冲刷、通流量减少等问题,发生局部冲刷腐蚀和超温问题。

1.5 高温铁氧化物的沉积

当水、蒸汽温度超过 450 °C 时^[4],炉水、蒸汽可与碳钢、铬镍合金钢中的铁直接发生化学反应生成 Fe₃O₄ (3Fe+4H₂O→Fe₃O₄+4H₂), Fe₃O₄ 一般会附着在金属表面,这种化学腐蚀称为汽水腐蚀,汽水腐蚀会发生在水冷壁、过热器或再热器中。汽水腐蚀的程度与金属管材的耐高温水汽氧化的性能有关。高温蒸汽腐蚀产物会在金属表面形成密实的铁氧化物,连续、致密与金属结合紧密的氧化膜对抑制金属管材的高温水汽和氧腐蚀具有一定的作用。

当汽水腐蚀发生在蒸汽和水交替出现的管段或在一些金属温度的变化经常高于等于 70 °C 的管段时,则会形成局部腐蚀。局部腐蚀可能是溃疡、沟痕、裂纹或点蚀等形态。汽水相变和较大的温差加速了保护膜的部分破裂,使蒸汽得以反复地与裸露的局部金属表面接触,从而加快了局部的腐蚀速度,并在

膜态蒸发部位沉积过多的铁氧化物,形成沉积物下浓缩腐蚀,去除腐蚀产物后为溃疡状。图 11 为过热水冷壁管段铁氧化物沉积物去除后管样,图 12 为过热水冷壁管段铁氧化物沉积物堆积管样,图 13、图 14 分别为某超超临界电厂过热器 TP347HFG 管段和 T91 管段铁氧化物沉积和剥离管样。防止汽水腐蚀的主要措施就是防止炉管金属过热。如消除局部水动力不足、偏烧、原始管段表面状况不良等问题,其次是选用合适的耐热钢等方法。



图11 过热水冷壁管段铁氧化物沉积物去除后管样
Fig.11 Removal of iron oxide deposits in superheated water wall

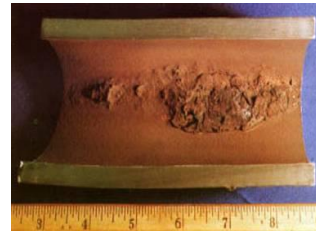


图12 过热水冷壁管段铁氧化物沉积物堆积管样
Fig.12 Pipe sample of iron oxide deposit accumulation in superheated waterwall

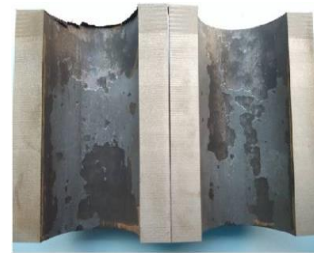


图13 过热器 TP347HFG 管段铁氧化物沉积和剥离管样
Fig.13 Iron oxide deposition and stripping sample of TP347HFG superheater



图14 过热器 TP91 管段铁氧化物沉积和剥离管样
Fig.14 Iron oxide deposition and stripping sample of TP91 superheater

1.6 炉管内表面凹凸不平造成的沉积物

当炉管局部热负荷高于设计值时,炉管表面由核态传热状态转为膜态,接触炉管的水在炉管表面汽化,是炉管在热负荷高的部位和直流锅炉炉水由湿态转为干态的管段容易形成沉积物的原因。

当雷诺数小于临界值时,一定条件下的水汽在比较光洁的平直、竖直和平滑(半径满足一定流速下要求)的弯管中以层流状态流动;但是当炉管内表面存在高出或低于管内表面的焊缝(类似流量孔板、节流、减压孔板)、对接相同直径但不同心管段、异经管段对接未倒角、局部堆积腐蚀产物等情况时,在这些部位工质流向的后部管段会出现旋流、汽液两相、膜态蒸发区域,随着远离产生节流效应的部位,炉水逐步恢复层流状态。蒸汽管段也会在类似区域后形成旋流、冲刷以及其后的层流过渡区域。

孙海生等^[8]对因焊缝内壁凸起诱发的流体加速腐蚀(FAC)失效案例进行了流体动力学数值模拟。计算结果表明焊缝下游流体最大雷诺数较最初的流动状态下大很多。因此,焊缝凸起导致其下游流动发生剧烈变化,凸起焊缝后流速最大的管段管径倍数与层流流速、管内压力和凸起焊缝的高度有关。焊缝下游 FAC 速率与流体湍动能有密切联系,流体湍流程度越剧烈, FAC 的速率愈大。图 15 为管段内焊缝凸起后炉水扰动影响区域模型。由图 15 可知:存在问题的炉水管段,在凸起部位后出依次现旋流区域、冲刷区域、汽液两相区域,膜态蒸发区域;蒸汽管段中出现回旋区域、冲刷区域。旋流区域和冲刷区域形成的单相或两相 FAC,产生的铁氧化物腐蚀产物,在其后传热不佳的膜态区域沉积。这些铁氧化物沉积一般是致密、较厚的垢层,给垢下浓缩腐蚀形成了腐蚀环境。如果炉水和蒸汽质量不高或某一阶段超标劣化,可能短时间内在垢下形成盐类浓缩和腐蚀,造成穿孔、氢脆等破坏。

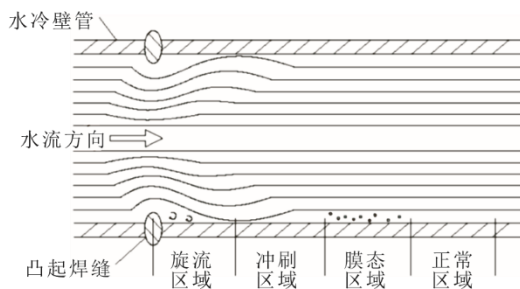


图 15 焊缝凸起炉水管段水流扰动模型
Fig.15 Flow disturbance model of the water pipe of the Weld Protruding Boiler

林彤等^[13]使用计算流体软件对电厂孔板下流

场分布、传质系数的影响规律以及 FAC 发生部位和程度行了模拟分析。指出当流速一定时,孔径比越小,传质系数和 FAC 速率越大,腐蚀高发区向孔板移动;孔径比大时,流场影响长度增加,节流造成的紊流距离较长。存在内部焊缝凸起或管口对接不同心的失效管样表明,结垢部位一般在炉管产生节流部位后的 50~150 mm 处。

图 16 为某厂高温过热器爆管管样,爆口具体位置为第 13 屏出口侧的第 8 圈管。沿介质流向,该炉过热器管屏 U 型管圈入口侧全部和出口侧下半部分为 TP347H 材质,出口侧上半部分为 T91 材质。由图 16 可知,失效管段为 P347H+T91 材质对接焊缝后的 T91 管段,爆口特征为长期过热材质性能下降后的蠕变开口。其原因是管内环形凸起焊缝后出现前述的冲刷腐蚀和铁氧化物沉积。



图 16 过热器 TP347 和 T91 对接焊缝后爆口管样
Fig.16 Pipe sample of rear exposure of butt weld of superheater TP347 and T91

图 17 为某亚临界机组墙式再热器对接管段内部焊缝凸起造成焊缝后 12Cr1MoV 钢管段冲刷和垢层沉积,发生垢下腐蚀穿孔泄漏的管样。



图 17 对接管段内部焊缝凸起爆管管样
Fig.17 Pipe sample of bulged tube blasting for weld of connecting pipe section

图 18 为某厂高压加热器盘管内部焊缝凸起造成冲刷腐蚀情况。

1.7 弯管段水汽冲刷形成的沉积物

锅炉受热面系统管路中有许多弯管段,易产生冲刷腐蚀^[4]。图 19 为某厂环保改造尿素喷孔弯管曲率不当冲刷减薄造成泄漏管样示意^[15]。其原因是弯管曲率不当,在弯管出口段内侧出现紊流冲刷较强烈点位,产生 FAC,造成弯管内侧局部减薄较严

重、穿孔^[16]，其冲刷腐蚀产物沉积在冲刷部位后的管段上并形成了垢层。



图 18 某厂高压加热器管段焊缝后腐蚀管样

Fig.18 Corrosion pipe sample at the rear side of the weld of high-pressure heater pipe

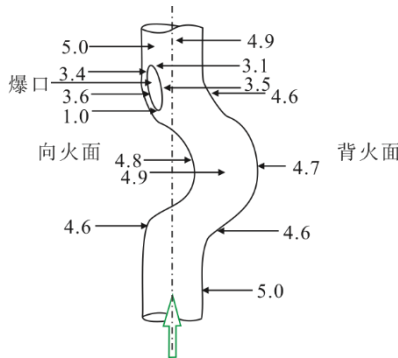


图 19 某厂弯管曲率不当冲刷减薄泄漏管样示意 (mm)

Fig.19 Leakage pipe sample due to improper elbow curvature scouring and thinning (mm)

1.8 因更换炉管问题形成的沉积物

如果新换炉管内表面的锈蚀产物没有清理或清理不彻底，锅炉运行后成为腐蚀和结垢部位并形成疏松或致密垢层如图 20 所示。如果炉管已存在明显的腐蚀坑点，则这些腐蚀坑点容易成为腐蚀阳极点和积存溶解盐类，并发生腐蚀、覆盖腐蚀产物、形成垢层。



图 20 水冷壁向火侧有原始腐蚀管段管样

Fig.20 Original corrosion pipe sample on the fire side of water wall

2 沉积物下的腐蚀

2.1 沉积物下盐类的富集浓缩

金属的氧腐蚀、FAC 产物、高温水汽腐蚀产物一般形成多孔、疏松的 Fe_3O_4 沉积层。水冷壁和蒸汽管道中冲刷的腐蚀产物、高温铁氧化物膜层由于

是在超温表面形成的沉积，一般是 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的混合沉积物，比较致密。实施给水 OT 处理的机组，热力系统管道铁氧化物沉积物一般是较致密少孔的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的混合物。硅酸盐、硫酸钙水垢是坚硬密实的、碳酸钙水垢软硬兼有。在锅炉炉管产生沉积物的各种情况中，除氧腐蚀和换管表面不洁情况以外，都与局部炉管过热有关。

沉积物在炉管局部区域形成相对封闭的区域，炉水可以经过沉积物孔洞进入沉积物中间和炉管表面，沉积物区域的炉管是过热的，会使沉积物中的盐类浓缩结晶沉积，浓度不断增加。在过热和不过热过程的交替中进行着沉积、溶解过程，并发生电化学腐蚀反应^[17]。

2.2 锅炉浓缩腐蚀机理和主要类型

2.2.1 闭塞电池

由于沉积物覆盖了反应区域，通常用闭塞电池^[17]来描述此类垢下腐蚀的情况。图 21 为闭塞电池电化学原理。依据垢下沉积盐类的碱性、酸性环境，出现几种不同形式的腐蚀类型。停用后，如果碱化和垢层的干燥程度不好、没有隔绝空气（尤其是海边盐雾），垢层下的腐蚀是加速进行的。

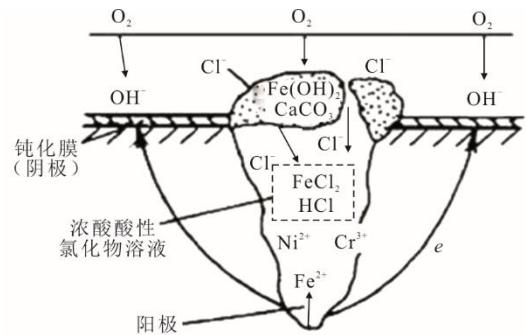


图 21 闭塞电池原理

Fig.21 Block battery schematic diagram

2.2.2 酸性腐蚀

火电机组热力系统水汽质量在其规定的各项指标达到国家标准的要求下，也是含有微量或痕量的杂质离子。主要阴离子有氯根、硫酸根、硝酸根、有机酸根和氟离子等，阳离子有铁、钠、铝、钙和镁离子等。水汽处理药剂有磷酸钠、氢氧化钠和氨水等。

炉管出现结垢、腐蚀沉积物，特别是高负荷部位出现致密、坚硬垢层后，覆盖物下会有腐蚀性氯离子、硫酸根、硫离子浓缩。强酸根阴离子会与氢离子形成强酸环境，使垢层下溶液的 pH 值降低到 4.0 以下，形成加速腐蚀闭塞电池，可能很快发生腐

蚀穿孔泄漏事故。

在非自钝化金属上发生的垢下腐蚀泄漏孔洞，其底部一般是钝化的、没有尖锐底部泄漏点位。这是与自钝化金属发生沉积物下酸性腐蚀穿孔泄漏的基本区别。

2.2.3 氢脆

沉积物会妨碍水中溶解氧向金属表面扩散，使其下面的溶解氧浓度低于其周围钢表面的溶解氧浓度，形成氧浓差腐蚀电池。氧浓度从沉积物孔洞和与金属的结合面向下到腐蚀坑里、氧气浓度逐渐降低。腐蚀覆盖物下的钢材成为腐蚀电池的阳极区。此时，氧气浓度大的地方为吸氧反应；没有氧的部位，由于以下原因出现析氢反应。氧气不能达到部位，金属和水发生水解、电离 $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ ，腐蚀坑的金属阳极释放电子 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ ，出现析氢反应 $H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ 。炉管致密、坚硬的垢会阻碍氢气扩散，在锅炉的高运行压力运行下，氢气与钢材中的碳元素形成甲烷，造成晶间脱碳，而且甲烷和氢气在晶间空穴、夹杂物聚集，产生局部高压、形成晶间裂纹，造成氢脆爆管^[18]。

2.2.4 自钝化金属的点蚀

点蚀是在自钝化金属沉积物下发生的闭塞电池酸性腐蚀。其特征是泄漏点直径呈纵深逐渐缩小的特点，形象的称为针状穿孔，这种腐蚀形态叫点蚀。点蚀的特征是孔径小、洞口有腐蚀产物遮盖、金属损失量小。

电厂设备中高参数机组的锅炉过热器、再热器一般都采用 TP304、TP347 等奥氏体不锈钢和低含铬量的马氏体不锈钢；凝汽器和各种冷却器换热管、板基本采用 TP304、TP316 或 TP317 材质。目前间接空冷机组的冷却器基本采用铝管作为换热管排。属于易发生点蚀材质，应注意防止沉积物的生成。图 22、图 23 分别为某电厂亚临界 300 MW 压力锅炉 12Cr1MoV 材质再热器 U 型管排底部沉积物下腐蚀穿孔泄漏宏观和微观图。从图 22 可明显看到铁氧化物沉积层，图 23b)显示的是典型的点蚀形态，孔洞直径向下逐步减小呈针状。

3 减少锅炉受热面沉积物及防止爆管措施

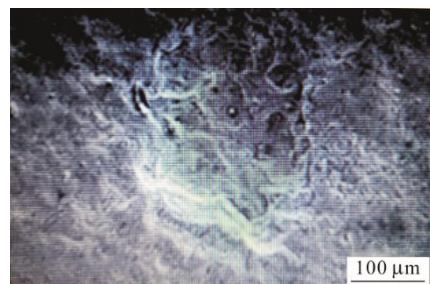
3.1 保证机组给水、炉水质量达标

安装和投用凝汽器检漏装置，能同时检测高低

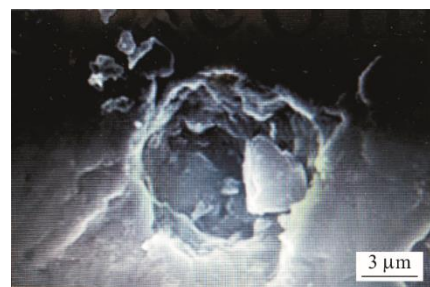
背压侧凝汽器水样。各热网加热器在疏水侧设置氢电导率在线仪表。电导率信号应引接到值班室并设置声报警。



图 22 某 12Cr1MoV 再热器 U 型管排底部穿孔泄漏宏观图
Fig.22 Macro view of perforation leakage at the bottom of U-shaped tube bank of 12Cr1MoV reheater



a) 泄漏部位 100 μm 微观图



b) 泄漏部位 3 μm 微观图

图 23 某 12Cr1MoV 再热器 U 型管排底部穿孔泄漏微观图
Fig.23 Micro view of perforation leakage at the bottom of U-shaped tube bank of 12Cr1MoV reheater

根据过滤器除铁效率和出水质量做好擦洗操作。高速混床应 100% 氢型运行，出水质量满足《火力发电厂及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016) 的规定^[19]。

优化机组水汽处理工艺，具备加氧条件应实施给水加氧处理工艺。汽包锅炉湿冷机组宜实施低磷酸盐或氢氧化钠处理工艺，空冷机组热网换热器基本不泄漏条件下宜实施全挥发处理。

3.2 提高机组停用保护效果

目前比较有效的运行机组常用的 4 种中长期停用保护方法为氨水碱化烘干加抽真空法、充氮法、热风吹干法及干燥剂去湿法。停用保护的目的是使

机组热力系统管道和设备内的湿度低于 60%，同时避免空气进入热力系统。

有效的停用保护措施可以避免机组停用期间氧腐蚀的发生、基本消除炉管沉积物中浓缩杂质盐类水解的电化学腐蚀。可以为机组在较短时间内启动带负荷打好基础。

经验表明，较好执行氨水碱化烘干加抽真空法的机组，可以在 12 h 内实现机组带负荷、并且在带负荷 8 h 内机组各项水汽指标满足标准规定。热力系统净化冲洗用水量在 800 t 以内，冷态冲洗排水铁质量浓度不大于 500 $\mu\text{g/L}$ 。

3.3 严格执行机组启动热力系统净化措施和指标

最有效的热力系统净化方法是凝汽器、除氧器、锅炉整体放水。除氧器加热蒸汽在除氧器上水后可以投用。可以利用邻炉底部联箱蒸汽加热系统进行锅炉的热态冲洗。

做到热力系统逐级进行冷、热态水冲洗，前级系统冲洗不合格，不能进入下一级。给水、炉水水质不合格锅炉不能升参数，蒸汽参数不合格不能冲转^[19]。

总结机组启动过程热力系统净化冷、热态冲洗用水量、冲洗水铁质量浓度的高低、满足标准的时间以及带负荷后水汽指标满足运行标准的时间，对机组停用保护效果进行评价、总结和改进。

3.4 锅炉更换炉管时的检查和处理

备用管段应端口密封，定期检查，防止空气进入和出现结露现象。安装前对封口缺失的管子使用仪用压缩空气吹扫，锅炉换管垢量超过 35 g/m^2 应采取化学清洗方法去除锈蚀产物^[20]。换管数量达到炉管 30% 且垢量超过 35 g/m^2 时，宜整炉进行化学清洗^[21]。

3.5 锅炉改造时的注意事项

锅炉增加受热面、延长或缩短管排、形成新的炉墙孔洞时应系统性考虑锅炉水动力、弯管曲度，并考虑运行时受热面热负荷的情况。选用不易产生冲刷腐蚀的材料用于弯管部位或选用壁厚管段用于弯管冲刷部位。

3.6 灵活性和深度调峰机组的注意事项

监测深度调峰过程锅炉热负荷分布情况，及时发现炉管壁温较高的管段。

灵活性调峰机组应注意检查喷燃器、炉墙固定钢架等有外部焊接件的炉管运行温度。这些管段由于部位和空间限制，可能存在焊接影响不良区域，造成金属材料性能降低，在正常运行温度下也会形

成高温氧化沉积物而出现超温现象。这些部位因有固定点或外挂设备，存在拉应力或在负荷高低变化时的交变应力，容易发生应力腐蚀开裂或腐蚀疲劳问题。图 24 为某厂靠近工字钢与风箱焊接部位炉管爆管的图片，近几年该机组频繁启停和深度调峰，存在腐蚀疲劳情况。后续金相和元素分析表明该爆管形式为腐蚀疲劳。



图 24 工字钢与风箱焊接部位炉管爆管
Fig.24 Furnace tube explosion at the welding position of I-beam and bellows

3.7 机组检修重点检查部位

加强高热负荷、超温、结焦、有外部焊点等部位炉管的检查，加强锅炉改造后炉管的检查。及时更换存在问题的管段。

锅炉水冷壁割管检查垢量大于等于《火力发电厂锅炉化学清洗导则》(DL/T 794) 规定时，应安排进行化学清洗；对于运行时间超过 50 000 h 的锅炉，应结合割管垢量数据、检查金属材料性能。灵活性、深度调峰的机组，虽然垢量未达到清洗规定垢量，也应安排化学清洗，消除沉积物炉管金属温度高于设计温度造成的金属材料性能降低的安全隐患。

3.8 做好技术监督工作

按照锅炉、化学等专业技术监督导则的规定，制定技术监督的台账种类和格式。将机组调试、运行、启动过程的水汽、炉管壁温、停用保护、检修检查垢量、重点部位检查信息、技术改造等监督数据和信息填写在台账中。历史数据是技术、经济和事故分析的基础，应将各种数据台账按照工作职责分配到岗位和人员，确保技术监督数据和信息的可靠性、完整性和连贯性。

4 结 语

锅炉炉管沉积物的形成有热负荷、水汽品质、水汽相变、流体扰动和管材状态不佳等多种影响因素。沉积物会造成炉管过热、盐类富集浓缩和垢下腐蚀，导致炉管泄漏、爆管。根据监测数据和事故经验，主动性的检查、检测和合理的处理措施，是

减少锅炉受热面产生沉积物和降低爆管风险的有效方法。

[参考文献]

- [1] 殷尊. 超超临界 1 000 MW 机组锅炉水冷壁爆管原因分析[J]. 热力发电, 2013, 42(7): 92-96.
YIN Zun. Reason analysis on tube burst in water wall of an ultra supercritical 1 000 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(7): 92-96.
- [2] 陈文卫, 胡振辉, 俞玲, 等. 火电厂锅炉四管泄漏的原因及预防控制措施[J]. 湖北电力, 2017, 41(6): 35-39.
CHEN Wenwei, HU Zhenhui, YU Ling, et al. The reasons for the leakage of "Four Pipes" and the control measures of the boiler in the thermal power plant[J]. Hubei Electric Power, 2017, 41(6): 35-39.
- [3] 陈浩, 张涛, 田峰, 等. 火电厂锅炉受热面失效形式分析及预防措施[J]. 内蒙古电力, 2018, 36(1): 71-75.
CHEN Hao, ZHANG Tao, TIAN Feng, et al. Failure type of heating surface of thermal power plant and its precaution[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2018, 36(1): 71-75.
- [4] 朱志平, 孙本达, 李宇春. 电站锅炉水化学工况及优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 13-14.
ZHU Zhiping, SUN Benda, LI Yuchun. Water chemistry condition and optimization of power station boiler[M]. Beijing: China Power Press, 2009: 13-14.
- [5] 崔仑, 孙凯, 陈俊峰. 电站锅炉水冷壁管的氢腐蚀[J]. 吉林电力, 2004, 174(5): 40-43.
CUI Lun, SUN Kai, CHEN Junfeng. Hydrogen corrosion in water wall of boiler in power plant[J]. Jilin Electric Power, 2004, 174(5): 40-43.
- [6] 李贵海, 刘国强, 侯亚琴, 等. 锅炉水冷壁爆管泄漏事故分析[J]. 山东电力技术, 2016, 43(3): 45-47.
LI Guihai, LIU Guoqiang, HOU Yaqin, et al. Boiler water wall tube leakage accident analysis[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(3): 45-47.
- [7] 周柏青, 陈志和. 热力发电厂水处理[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2009: 661-666.
ZHOU Baiqing, CHEN Zhihe. Thermal power plant water treatment[M]. 4th ed. Beijing: China Power Press, 2009: 661-666.
- [8] 孙海生, 郝开开, 常春梅. 管道内壁凸起诱发的流体加速腐蚀模拟计算[J]. 石油化工设备, 2014, 43(4): 36-39.
SUN Haisheng, HAO Kaikai, CHANG Chunmei. Research on pipe inwall bulge inducing fluid acceleration corrosion[J]. Petro-chemical Equipment, 2014, 43(4): 36-39.
- [9] 彭哲言. 热电站煤粉锅炉水冷壁爆管原因分析及预防措施研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014: 41-58.
PENG Zheyang. Study on failure causes and prevention measures of cracked water wall tubes at power station boiler[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014: 41-58.
- [10] 张维科. 超临界机组汽轮机高压缸严重结垢原因分析[C]. 超临界机组技术交流研讨会, 2011: 422-426.
ZHANG Weike. Cause analysis of severe scaling in high pressure cylinder of supercritical turbine[C]. Supercritical unit technical exchange conference, 2011: 422-426.
- [11] 霍金仙, 楼台芳, 吴玲. 锅炉水冷壁介质浓缩腐蚀研究[J]. 材料保护, 2001, 34(4): 13-14.
HUO Jinxian, LOU Taifang, WU Ling. Corrosion of boiler wall by enriched media[J]. Materials Protection, 2001, 34(4): 13-14.
- [12] 范圣平, 韩倩倩, 曹顺安. 火电厂热力设备结垢、积盐与腐蚀现状及防治对策[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(5): 9-14.
FAN Shengping, HAN Qianqian, CAO Shunan. Present situation and prevention countermeasures of scale formation, salt precipitation and corrosion in thermal equipment of power plant[J]. Industrial Water & Wastewater, 2010, 41(5): 9-14.
- [13] 林彤, 周克毅, 司晓东. 电厂孔板下游流动加速腐蚀模拟研究[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 14-21.
LIN Tong, ZHOU Keyi, SI Xiaodong. Simulation research on flow-accelerated corrosion in downstream of orifice plate for power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 14-21.
- [14] 闫振星. 石油化工管道冲刷腐蚀失效分析与预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021: 27.
YAN Zhenxing. Failure analysis and prediction of erosion-corrosion of petrochemical pipeline[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021: 27.
- [15] 滕维忠, 张宇博. 汇流河发电厂化学技术监督现场服务报告[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2017: 8-16.
TENG Weizhong, ZHANG Yubo. Report of chemical technical supervision of Huiliuhe Power Plant[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2017: 8-16.
- [16] 曾莉. 管道弯管段冲刷腐蚀机理与流体动力学特征[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 58.
ZENG Li. Erosion-corrosion mechanism and hydrodynamic characteristics at an elbow of pipelines [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 58.
- [17] 谢学军, 龚洵洁. 热力设备的腐蚀与防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 123.
XIE Xuejun, GONG Xunjie. Corrosion and protection of thermal equipment[M]. Beijing: China Power Press, 2011: 123.
- [18] 张冰清, 田进, 张志博, 等. 火电厂锅炉水冷壁管失效原因分析[J]. 热力发电, 2019, 48(5): 97-101.
ZHANG Bingqing, TIAN Jin, ZHANG Zhibo, et al. Failure analysis for boiler water wall tubes in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 97-101.
- [19] 火力发电厂及蒸汽动力设备水汽质量: GB/T 12145—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2-9.
Quality criterion of water and steam for power plant and steam-generating equipment: GB/T 12145—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 2-9.
- [20] 火力发电厂水汽化学监督导则: DL/T 561—2022[S]. 北京: 中国电力出版社, 2022: 1-6.
Guide of chemical supervision for water and steam in thermal power plant: DL/T 561—2022[S]. Beijing: China Power Press, 2022: 1-6.
- [21] 火力发电厂燃煤机组化学监督标准: Q/HN-1-0000.08.028—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 1-6.
Supervision standard of chemistry for coal-fired thermal power plant: Q/HN-1-0000.08.028—2015[S]. Beijing: China Power Press, 2015: 1-6.

(责任编辑 邓玲惠)