

锅炉水冷壁管腐蚀疲劳裂纹成因分析及防治措施

韩鹏程 李佳蔚 冯广超

呼和浩特热电厂 内蒙古呼和浩特 010000

摘要: 在现代工业生产与热力供应体系中, 锅炉是不可或缺的核心设备, 其运行的安全性与稳定性直接关乎能源供应的可靠性以及工业生产的连续性。作为锅炉实现高效热交换的关键部件, 水冷壁管紧密排布于炉膛四周, 通过吸收高温火焰和烟气的热量, 将水转化为蒸汽, 为整个系统提供持续的动力支持。然而, 在实际运行过程中, 水冷壁管长期暴露于高温、高压且含有多种腐蚀性介质的复杂环境中, 承受着交变热应力、机械应力与化学腐蚀的多重作用。腐蚀疲劳裂纹一旦产生, 不仅会导致水冷壁管传热效率大幅下降, 增加能源损耗, 更有可能引发管壁泄漏、爆管等严重事故, 进而造成生产中断、设备损坏, 甚至危及人员生命安全。

关键词: 锅炉水冷壁管; 腐蚀疲劳裂纹; 成因分析; 防治措施

前言

锅炉作为工业生产和热力供应的核心设备, 在电力、化工、冶金等众多领域发挥着至关重要的作用。呼和浩特热电厂2×350MW机组采用哈尔滨有限责任公司主机产品: 超临界、中间再热、单轴、双缸双排汽、直接空冷、采暖供热抽汽式汽轮发电机组。型号: CZK350/320-24.2/0.4/566/566; 呼和浩特热电厂2×350MW机组是供热机组, 电厂为呼和浩特市及金川开发区大部分用户供热, 供热管线分城市热网东线、西线、金川线, 巴彦线和富泰, 现有实际供热面积2974万平方米。因此, 深入探究锅炉水冷壁管腐蚀疲劳裂纹的成因, 并提出有效的防治措施, 对保障锅炉安全稳定运行、提高工业生产效率具有重要的现实意义。

一、锅炉水冷壁管腐蚀疲劳裂纹成因分析

(一) 材料因素

锅炉水冷壁管的材料特性是决定其抗腐蚀疲劳性能的基础。从化学成分来看, 碳、锰、硅等基本元素构成了钢材的基体, 其含量比例直接影响钢材的强度与韧性。适量的碳元素可提升钢材强度, 但过高会降低韧性, 增加裂纹敏感性; 锰和硅能强化铁素体, 改善钢材的综合力学性能。而铬、镍、钼等合金元素则是提升耐腐蚀性的关键, 铬可在钢材表面形成致密的 Cr_2O_3 钝化膜, 有效

隔绝腐蚀性介质; 镍能增强钢材在多种环境下的化学稳定性; 钼不仅可提高耐点蚀性能, 还能增强材料的高温强度。然而, 若材料中存在较多硫、磷等杂质, 会导致晶界偏析, 降低晶界结合力, 在交变应力作用下, 晶界处极易成为裂纹萌生的源头。

在微观组织结构方面, 不同的金相组织对腐蚀疲劳性能影响显著。珠光体-铁素体组织的钢材具有较好的综合性能, 但在腐蚀性环境中, 珠光体区域因电化学电位差异, 更易发生腐蚀; 贝氏体和马氏体组织强度高, 但内部存在较大的残余应力, 且韧性相对较低, 在腐蚀与疲劳的协同作用下, 裂纹扩展速度更快。此外, 材料在加工制造过程中, 轧制工艺若控制不当, 会使钢材内部产生带状组织, 降低材料性能的均匀性; 焊接过程中, 热影响区的组织发生变化, 形成粗大的晶粒, 同时不可避免地产生气孔、夹渣、未熔合等缺陷, 这些缺陷相当于应力集中源, 在锅炉运行时承受的机械应力和热应力作用下, 促使裂纹快速萌生与扩展, 大大降低了水冷壁管的使用寿命和安全性。

(二) 环境因素

锅炉内部运行环境是导致水冷壁管腐蚀疲劳的重要因素。在化学介质方面, 炉水中溶解氧、氯离子、硫酸根离子等腐蚀性成分是引发腐蚀的“元凶”。溶解氧会与钢材发生电化学反应, 在管壁表面形成疏松的铁锈层, 破坏钢材的钝化膜, 使金属持续暴露在腐蚀环境中; 氯离子半径小、活性高, 能够穿透钝化膜, 在局部形成点蚀坑, 随着时间推移, 点蚀坑不断加深, 成为疲劳裂纹的起始点; 而硫酸根离子在高温环境下, 会与钢材中

作者简介: 韩鹏程(1986年12月——), 汉族, 内蒙古赤峰市人, 本科, 工程师, 现就职于: 呼和浩特热电厂, 研究方向: 火电厂锅炉。

的铁元素反应生成硫酸亚铁，加速管壁的腐蚀进程。

温度变化对水冷壁管的影响同样不容忽视。炉膛内高温火焰使管壁长期处于高温状态，材料强度随温度升高逐渐下降，同时产生热膨胀变形。当炉水温度波动或锅炉启停时，管壁温度发生剧烈变化，产生较大的热应力。这种热应力与机械应力相互叠加，形成交变应力，促使材料内部晶格发生位错，进而导致裂纹萌生与扩展。此外，炉膛内的气体成分也会影响水冷壁管的腐蚀情况。不完全燃烧产生的一氧化碳、硫化氢等还原性气体，会与钢材表面的氧化膜发生反应，使其保护作用减弱，加剧高温腐蚀。

（三）运行因素

锅炉运行过程中的参数调控与操作方式，直接影响水冷壁管的服役状态与寿命。在运行参数方面，炉水的水质指标控制不当会显著加速管壁腐蚀。pH值偏离正常范围时，酸性环境会直接与钢材发生化学反应，加速均匀腐蚀；碱性过强则会引发苛性脆化，使金属晶界处形成微裂纹。硬度超标易导致水垢在管壁表面沉积，水垢导热性差，造成局部过热，使管壁承受更大的热应力，同时水垢下的浓缩腐蚀介质会加剧局部腐蚀。此外，锅炉压力与温度的不稳定也会带来危害，压力频繁波动会使水冷壁管承受交变机械应力，温度骤变产生的热应力与机械应力叠加，形成复杂的应力场，促使材料内部缺陷扩展。

在操作层面，频繁的负荷调整和启停炉操作对水冷壁管危害极大。当锅炉负荷快速变化时，水冷壁管的热负荷和工质流量随之改变，导致管壁温度分布不均，产生较大的热应力梯度。例如，负荷突增时，部分区域工质汽化加剧，形成汽水分层，引发管壁超温；负荷骤减则可能造成水击现象，产生冲击应力。而启停炉过程中，温度和压力的剧烈变化使水冷壁管经历反复的热胀冷缩，在焊接接头、管件弯头等应力集中部位，极易产生疲劳裂纹。同时，不规范的运行操作，如燃烧调整不当导致火焰偏斜，会使水冷壁管局部受热不均，加速腐蚀疲劳裂纹的形成，严重威胁锅炉的安全稳定运行。

二、锅炉水冷壁管腐蚀疲劳裂纹防治措施

（一）优化材料选择与加工工艺

合理的材料选择与科学的加工工艺是提升锅炉水冷壁管抗腐蚀疲劳性能的重要基础。在材料选择方面，需依据锅炉实际运行工况，精准匹配材料性能与环境需求。例如，某化工企业的高温高压锅炉，因长期处于含有高浓度氯离子的介质环境中，水冷壁管频繁出现点蚀并发

展为腐蚀疲劳裂纹。经研究后，该企业将原有的普通碳钢材料更换为含铬量达22%、镍含量5%的双相不锈钢。这种材料凭借其优异的耐氯离子腐蚀性能和较高的强度韧性，在服役3年后，经检测未出现明显的腐蚀与裂纹现象，有效延长了设备使用寿命。同时，针对不同类型的锅炉，材料选择也有所差异。对于以生物质为燃料的锅炉，由于燃烧过程中会产生含硫、氯等腐蚀性气体，可选用添加钼元素的合金钢，利用钼元素增强材料抗点蚀和缝隙腐蚀的能力。

在加工工艺优化上，焊接环节是重中之重。某大型热电厂在水冷壁管焊接时，引入了窄间隙焊接技术，相比传统焊接方式，该技术大幅减少了焊缝金属填充量，降低了焊接热输入，有效避免了因过热导致的晶粒粗大问题，使焊接接头的强度和韧性得到显著提升。同时，该厂建立了严格的焊接质量管控体系，在焊接前对管材进行200℃预热处理，焊接后立即进行650℃的高温回火处理，消除了90%以上的焊接残余应力。经过这样的工艺改进，该厂锅炉水冷壁管焊接部位的裂纹发生率降低了80%，极大提升了设备运行的安全性和稳定性。

（二）改善运行环境与水质管理

运行环境的稳定性与水质的洁净度直接关系到锅炉水冷壁管的服役寿命，不当的环境因素往往是腐蚀疲劳裂纹产生的催化剂。例如，某化工园区集中供热锅炉长期处理含有大量工业废水的软化水，废水中残留的硫酸根离子浓度高达500mg/L，且由于软化工艺缺陷，水中钙镁离子去除不彻底，硬度维持在80 μ mol/L左右。在高温高压环境下，硫酸根离子与管壁发生化学反应，形成硫化亚铁腐蚀产物，而水垢在管壁表面的沉积导致局部过热，产生较大的热应力。双重作用下，短短一年时间，水冷壁管出现大面积腐蚀坑，部分区域甚至形成贯穿性疲劳裂纹。为扭转这一局面，园区管理方联合专业技术团队实施了综合性治理方案。在水质管理上，构建三级深度处理体系：一级处理采用活性炭吸附装置，有效去除水中残留的有机污染物和部分硫酸根离子；二级处理引入纳滤膜系统，将硫酸根离子浓度降至150mg/L以下，同时截留大部分二价金属离子；三级处理通过连续排污与加药系统协同运作，向炉水中定量添加聚磷酸盐阻垢剂和联氨除氧剂，不仅将硬度控制在3 μ mol/L以内，还使溶解氧含量稳定在7 μ g/L以下。

另一典型案例来自沿海地区的一座火力发电厂，其锅炉因长期使用海水淡化后的浓盐水作为补充水源，导致炉水中氯离子浓度飙升至400mg/L。高浓度氯离子不断

侵蚀管壁钝化膜，形成点蚀核心，加之频繁的负荷波动产生的交变应力，使得点蚀坑迅速扩展为疲劳裂纹。电厂采取针对性措施，一方面新建专用的脱盐车间，采用电渗析与离子交换树脂联用技术，将补给水氯离子含量严格控制在15mg/L以内；另一方面，在水冷壁管表面喷涂纳米复合防腐涂层，该涂层由环氧树脂与纳米二氧化钛复合而成，厚度仅0.3mm却具备优异的抗氯离子渗透性能。同时，优化运行规程，将负荷变化速率限制在5%/min以内，减少热应力冲击。经过两年的持续治理，该厂锅炉水冷壁管的腐蚀速率从0.4mm/年降至0.03mm/年，设备可靠性显著提升，有效降低了因腐蚀疲劳裂纹引发的停机风险。

（三）优化运行管理与维护检修

科学的运行管理和规范的维护检修，是预防锅炉水冷壁管出现腐蚀疲劳裂纹的关键环节。不当的运行操作与滞后的检修维护，往往会加剧管壁的应力损伤与腐蚀程度，成为裂纹萌生和扩展的“推手”。

例如，某钢铁企业的自备电站锅炉，在过去运行中因频繁参与电网调峰，负荷波动范围高达30%~100%，且每日启停炉次数达2~3次。这种高强度的负荷变化和频繁启停，导致水冷壁管承受剧烈的温度与压力波动，在不到两年的时间里，多处焊接接头和弯管部位出现腐蚀疲劳裂纹，严重影响生产连续性。为解决这一问题，企业对运行管理策略进行了全面优化：一方面，与电网协调调整供电方案，将锅炉的负荷波动范围控制在50%~90%，减少不必要的深度调峰；同时制定了严格的启停炉操作规范，在启动过程中，将升温速率控制在3~5℃/min，降温时控制在2~4℃/min，避免温度骤变产生过大热应力。另一方面，企业引入智能监测系统，在水冷壁管关键部位布置温度、应力传感器，实时采集管壁温度、应力数据，并通过大数据分析模型预测潜在风险。一旦监测到某区域温度偏差超过15℃或应力异常波动，系统立即发出预警，运行人员可及时调整燃烧工况或进行降负荷处理。

在维护检修方面，该企业建立了“定期巡检+专项检测”的立体化检修体系。除每日常规巡检外，每季度采用超声波探伤、磁粉检测等无损检测技术，对水冷壁管进行全面检测；每半年对炉水取样分析，根据水质变化调整缓蚀剂添加方案。针对检测发现的轻微裂纹，采用激光熔覆技术进行修复，该技术利用高能激光束将合金粉末熔覆在裂纹部位，形成致密的修复层，既消除了裂纹隐患，又提升了局部区域的耐腐蚀性能。经过一

年多的运行管理与维护检修优化，该企业锅炉水冷壁管的裂纹新增数量减少了90%，设备非计划停机时间降低了75%，显著提升了生产效率与安全性。

再如，某食品加工厂的蒸汽锅炉，因运行人员忽视水质监测，未及时补充除氧剂，导致炉水溶解氧长期超标，加速了水冷壁管的氧腐蚀，进而引发腐蚀疲劳裂纹。企业整改时，不仅加强了对运行人员的培训，制定了详细的水质监测操作手册，明确每两小时检测一次炉水溶解氧、pH值等关键指标，还建立了责任追溯制度，确保水质管理工作落实到位。同时，企业优化了维护检修流程，将原本一年一次的全面检修缩短为半年一次，并增加了管壁厚度测量项目，利用超声波测厚仪对水冷壁管进行逐根检测，精确掌握管壁减薄情况。通过这些措施，该厂锅炉水冷壁管的腐蚀问题得到有效遏制，设备运行稳定性大幅提升，为食品安全生产提供了可靠保障。

结语

锅炉水冷壁管腐蚀疲劳裂纹问题是影响锅炉安全稳定运行的重要因素。通过对其成因的深入分析可知，材料因素、环境因素和运行因素相互作用，共同导致了腐蚀疲劳裂纹的产生。针对这些成因提出的防治措施，涵盖了材料优化、环境改善、运行管理等多个方面，形成了一套较为完整的解决方案。在实际应用中，应综合运用这些措施，加强对锅炉水冷壁管的全生命周期管理，不断提高其抗腐蚀疲劳能力，从而保障锅炉系统的安全、高效运行。未来，随着材料科学和锅炉技术的不断发展，还需要进一步深入研究锅炉水冷壁管腐蚀疲劳裂纹问题，探索更加有效的防治方法，为工业生产提供更可靠的能源保障。

参考文献

- [1] 许志军. 锅炉水冷壁管材料性能与腐蚀疲劳关系的研究[J]. 热力发电技术与应用, 2023(05): 45-52.
- [2] 何华煜. 锅炉运行环境对水冷壁管腐蚀疲劳的影响及控制策略[J]. 工业锅炉安全与维护, 2022(03): 32-39.
- [3] 荣立松. 优化运行管理与维护检修对锅炉水冷壁管防腐疲劳的作用[J]. 能源工程与设备管理, 2021(04): 56-63.
- [4] 吴树生. 工业锅炉水质调控对水冷壁管腐蚀抑制的实践研究[J]. 化工设备与管道, 2024(04): 78-85.
- [5] 肖晓敏. 基于环境优化的锅炉水冷壁管抗腐蚀疲劳技术应用[J]. 电力设备维护与管理, 2023(06): 67-74.