

# 热电锅炉炉管泄漏原因分析及设备改进

张宝靖 毛帅远

河南神马尼龙化工有限责任公司 河南 平顶山 467000

**摘要:** 热电锅炉炉管是能量转换与介质输送的核心部件, 长期处于高温高压工况, 泄漏问题频发且危害严重。本文结合炉管结构与运行特点, 系统分析泄漏主要原因, 包括材质选型不合理、制造工艺缺陷、运行工况异常、维护检修不到位及辅助结构设计不当。针对各类诱因, 从材质制造、运行优化、维护检修、辅助设备四维度, 提出针对性改进方案, 为降低泄漏概率、保障锅炉安全稳定运行、减少经济损失提供理论与实践支撑。

**关键词:** 热电锅炉; 炉管泄漏; 原因分析; 设备改进

引言: 热电锅炉是热电供应系统的核心设备, 炉管运行状态直接关系生产连续性与人员设备安全。当前, 炉管泄漏已成为制约锅炉高效稳定运行的突出问题, 常导致锅炉紧急停运、热电供应中断, 既造成巨额经济损失, 还可能引发安全事故。为破解这一难题, 深入剖析泄漏各类诱因, 明确影响机制, 结合实际工况制定科学改进措施, 对提升锅炉运行可靠性、降低安全风险具有重要现实意义。

## 1 热电锅炉炉管相关基础理论与泄漏危害

### 1.1 热电锅炉炉管的结构与工作原理

(1) 炉管的核心结构: 热电锅炉炉管结构随锅炉类型差异有所不同, 煤粉锅炉炉管多采用垂直布置, 材质以耐高温合金钢管为主, 规格根据锅炉容量选用 $\Phi 38-60\text{mm}$ 不等; 循环流化床锅炉炉管多为膜式壁结构, 布置更密集, 材质侧重耐磨、抗腐蚀, 规格适配床内工况。炉管核心由管体、管接头及保温层组成, 确保结构稳定性与隔热效果。(2) 炉管的工作原理: 炉管是锅炉传热与介质输送的核心部件, 高温烟气在炉管外侧流动, 将热量传递给管内的水或蒸汽, 实现能量转换。工作过程中, 炉管承受管内介质的压力与管外高温冲刷, 受热不均且长期处于高温高压环境, 易出现局部应力集中, 为泄漏隐患埋下伏笔。

### 1.2 热电锅炉炉管泄漏的常见类型

(1) 磨损泄漏: 主要因烟气携带飞灰高速冲刷炉管内壁或弯头部位, 导致管壁逐渐减薄, 当厚度低于安全阈值时发生泄漏, 表现为局部管壁变薄、出现凹坑, 泄漏时伴随蒸汽喷射声, 多发生在炉膛水冷壁、对流管束等部位。(2) 腐蚀泄漏: 分为多种类型, 高温腐蚀多发生在炉膛高温区域, 由烟气中腐蚀性气体引发, 管壁出现点蚀、开裂; 低温腐蚀集中在尾部烟道炉管, 因烟气结露产生酸性物质腐蚀管壁; 电化学腐蚀则因炉管材质

不均或介质污染引发, 泄漏特征为局部穿孔、锈迹明显。(3) 疲劳泄漏: 炉管长期处于启停、负荷波动导致的冷热交替工况, 产生热疲劳与机械疲劳, 管壁出现微小裂纹并逐步扩展, 最终发生泄漏, 此类泄漏多为裂纹型, 泄漏初期流量较小, 后期裂纹扩大后泄漏量骤增<sup>[1]</sup>。

### 1.3 炉管泄漏的危害分析

(1) 对设备安全的危害: 炉管泄漏会直接导致锅炉紧急停运, 泄漏的高温高压介质会冲刷、损坏周边管路及阀门等设备, 严重时会导致炉管爆裂, 甚至导致锅炉爆炸, 造成设备毁灭性损坏。(2) 对生产运行的危害: 泄漏导致热电供应中断, 破坏生产连续性, 降低发电、供热效率, 同时停机维修需投入大量人力、物力, 增加维修成本, 还需启用备用设备, 进一步提升运行成本。(3) 对环境的危害: 泄漏的蒸汽、热水等介质会造成现场环境潮湿、高温, 引发二次安全隐患, 同时可能携带少量污染物, 造成轻微环境污染; 高温介质易烫伤现场操作人员, 威胁人身安全。

## 2 热电锅炉炉管泄漏原因详细分析

### 2.1 材质与制造因素导致的泄漏

(1) 材质选型不合理: 热电锅炉不同区域炉管的工作环境差异较大, 若未根据实际工况选型, 会直接导致泄漏隐患。例如炉膛高温区域炉管未选用耐高温合金材质, 长期处于高温环境下会出现材质软化、蠕变, 进而产生裂纹; 介质含腐蚀性成分时, 未选用抗腐蚀材质, 会加速管壁腐蚀变薄, 最终引发泄漏, 材质性能与工况不匹配是初期泄漏的重要诱因。(2) 制造工艺缺陷: 炉管生产过程中, 若工艺控制不严格, 会留下先天性隐患。焊缝不合格是常见缺陷, 如焊缝未焊透、夹渣、气孔等, 运行中焊缝处易成为应力集中点, 长期受高温高压作用会率先开裂; 管壁厚度不均会导致局部受力、受热失衡, 薄处易因强度不足破损; 表面划痕、凹坑等缺陷会加速

腐蚀和磨损,逐步发展为泄漏点。

## 2.2 运行工况因素导致的泄漏

(1) 负荷波动过大: 锅炉运行中若负荷频繁升降, 炉管会经历快速升温、降温的交替过程, 温度和压力的急剧变化会产生较大热应力, 反复作用下会导致管壁出现热疲劳裂纹, 裂纹不断扩展后穿透管壁, 引发泄漏, 尤其在启停频繁的锅炉中, 此类泄漏更为常见。(2) 水质不达标: 锅炉给水、炉水水质若未达到标准, 会对炉管造成双重危害。水质过硬会导致炉管内壁结垢, 水垢导热性差, 使管壁局部温度升高, 引发材质过热损坏; 水中含有的氯离子、硫酸盐等腐蚀性离子, 会直接腐蚀管壁, 形成点蚀、坑蚀, 降低管壁强度, 长期积累后导致泄漏<sup>[2]</sup>。(3) 燃烧工况异常: 燃料燃烧不充分时, 会产生大量飞灰和有害气体, 飞灰颗粒随烟气高速流动, 加剧对炉管的冲刷磨损, 使管壁逐渐减薄; 同时, 燃烧产生的二氧化硫、氮氧化物等有害气体, 会与烟气中的水汽结合形成腐蚀性物质, 加速炉管腐蚀, 双重作用下易诱发泄漏。

## 2.3 维护与检修因素导致的泄漏

(1) 日常维护不到位: 日常运行中若未定期对炉管进行清理、检查, 炉管内壁结垢、外壁腐蚀和磨损等隐患会持续发展, 无法及时发现和处理, 小隐患逐步扩大为泄漏问题; 此外, 未定期对炉管进行防腐、防磨处理, 也会加速炉管损坏, 增加泄漏风险。(2) 检修质量不达标: 检修过程中, 若炉管更换时选用不合格管材, 或焊缝修复操作不规范, 会留下新的泄漏隐患; 检修时未彻底清理炉管内的结垢、杂物, 会导致检修后运行中局部受热不均, 引发泄漏; 密封件安装不当也会导致连接处泄漏<sup>[3]</sup>。(3) 检修周期不合理: 检修周期过长, 炉管的潜在隐患无法及时排查和处理, 会逐步发展为泄漏; 检修过于频繁, 会频繁拆卸、安装炉管, 破坏炉管的密封性和结构完整性, 反而增加泄漏风险, 同时也会大幅提升检修成本。

## 2.4 其他辅助因素导致的泄漏

(1) 烟气冲刷不均: 锅炉烟道设计不合理, 会导致烟气流速分布不均, 局部区域烟气流速过高, 携带的飞灰对炉管的冲刷力度显著增大, 长期冲刷会使该区域炉管磨损速度加快, 管壁减薄至安全阈值后发生泄漏, 多发生在烟道转弯、变径等部位。(2) 保温层损坏: 炉管保温层脱落、破损后, 会导致管壁温度分布不均, 裸露部位温度骤升骤降, 与保温完好部位形成温差, 产生热应力, 长期作用下会引发管壁裂纹, 裂纹扩展后导致泄漏, 同时保温层损坏还会加剧能源损耗, 间接影响炉管

运行稳定性。

## 3 热电锅炉炉管泄漏防控及设备改进方案

### 3.1 炉管材质与制造工艺改进

(1) 优化材质选型: 结合锅炉不同区域炉管的工作工况, 实行差异化材质选型, 从源头提升炉管抗泄漏能力。对于炉膛高温区域、燃烧器周围等长期处于800℃以上高温环境的炉管, 选用Cr-Mo合金、奥氏体不锈钢等耐高温、抗蠕变材质, 确保材质在高温高压下保持良好的力学性能; 对于尾部烟道等易发生腐蚀的区域, 选用耐低温腐蚀、抗电化学腐蚀的特种合金管材, 适配烟气中腐蚀性介质的特性; 对于对流管束等易受飞灰冲刷的部位, 选用耐磨合金材质或在管外壁喷涂耐磨涂层, 提升抗磨损能力, 确保材质性能与工作工况精准匹配, 从根本上减少材质损坏导致的泄漏。(2) 改进制造工艺: 规范炉管生产全流程, 杜绝先天性工艺缺陷。严格把控炉管原材料质量, 进场前对管材进行化学成分、力学性能检测, 不合格原材料严禁投入生产; 优化焊缝加工流程, 采用全自动埋弧焊、氩弧焊等先进焊接工艺, 减少焊缝夹渣、气孔、未焊透等缺陷, 焊接后对焊缝进行100%无损检测, 包括超声波检测、射线检测等, 确保焊缝质量达标; 严格控制炉管壁厚公差, 避免壁厚不均问题, 同时对炉管表面进行打磨、除锈处理, 消除表面划痕、凹坑等缺陷, 确保炉管制造质量符合行业标准, 从源头杜绝制造缺陷引发的泄漏隐患<sup>[4]</sup>。

### 3.2 运行工况优化改进

(1) 稳定锅炉负荷: 建立科学的负荷调节机制, 优化运行控制系统, 避免负荷频繁波动。结合热电供应需求, 提前制定负荷调整计划, 循序渐进升降负荷, 严格控制炉管温压变化幅度及温度变化速率, 减少热应力产生; 锅炉启停时, 严格执行操作规程, 延长升降温时间, 使炉管平稳适应温度变化, 规避热应力集中引发的裂纹; 配备负荷稳定装置, 实时监测负荷动态, 及时调整运行参数, 保障负荷稳定, 降低热疲劳泄漏风险。(2) 提升水质管理水平: 完善给水、炉水处理系统, 建立全流程水质管控体系, 从源头防范水质不达标引发的泄漏。优化给水预处理工艺, 采用过滤、软化、除盐等技术, 去除水中杂质、硬度离子及腐蚀性离子, 确保给水符合GB/T1576-2018《工业锅炉水质》标准; 定期检测给水、炉水pH值、硬度、氯离子等关键指标, 建立监测台账, 及时处理水质异常; 定期对炉管内壁进行化学清洗, 清除结垢与腐蚀产物, 同时添加缓蚀剂、阻垢剂形成保护膜, 提升炉管内壁抗腐蚀能力<sup>[5]</sup>。(3) 优化燃烧工况: 调整燃料配比, 选用热值稳定、灰分低的燃料, 避免杂质过多导

致燃烧异常；改进燃烧设备，优化燃烧器结构、调整火焰参数，确保燃料充分燃烧，减少飞灰生成；加强炉膛通风调节，合理控制过剩空气系数，降低烟气中二氧化硫、氮氧化物等有害气体含量，减轻对炉管的腐蚀；定期清理炉膛及烟道积灰，避免飞灰堆积导致局部烟气流速加快，缓解炉管磨损，从燃烧环节减少泄漏诱因。

### 3.3 维护检修体系改进

(1) 建立常态化维护机制：制定炉管定期清理、检查计划，实行“日常巡检+定期检测+专项排查”相结合的维护模式。日常巡检重点检查炉管外观、保温层完整性及泄漏迹象，及时发现表面腐蚀、磨损等问题；定期采用超声波检测、红外测温等先进检测技术，对炉管壁厚、内部裂纹进行全面检测，精准排查隐蔽性隐患，建立检测台账，对存在隐患的炉管进行分级管控；定期对炉管进行防腐、防磨维护，在易磨损部位加装防磨护瓦，对腐蚀部位进行防腐处理，及时清理炉管内外结垢，确保炉管处于良好运行状态。(2) 规范检修流程：明确炉管检修标准和操作规范，建立检修质量管控体系。检修前制定详细的检修方案，明确检修内容、流程和质量要求；检修过程中，严格按照规范进行炉管更换、焊缝修复等操作，选用合格的配件和材料，焊接后进行无损检测，确保检修质量；检修后进行水压试验、气密性试验等，检验炉管密封性和结构完整性，杜绝检修过程中留下新的泄漏隐患；同时，加强检修人员培训，提升检修人员专业技能，确保检修操作规范达标。(3) 优化检修周期：结合锅炉运行实际情况，综合考虑炉管材质、运行工况、维护情况等因素，科学制定检修周期，实现隐患排查与成本控制的平衡。对于运行负荷高、工况恶劣的锅炉，适当缩短检修周期，加大隐患排查力度；对于运行稳定、工况良好的锅炉，可适当延长检修周期，但需加强日常监测；定期对检修周期的合理性进行评估，根据炉管运行状态和检测结果及时调整，避免检修过于频繁增加成本，或检修间隔过长无法及时排查隐患。

### 3.4 辅助设备与结构改进

(1) 优化烟道设计：结合锅炉烟气流动规律，调整

烟道结构，优化烟气流道，使烟气流速分布均匀，减少局部烟气流速过高的问题。在烟道转弯、变径等易产生局部冲刷的部位，加装导流板，引导烟气平稳流动，降低局部冲刷力度；合理设计烟道截面积，控制烟气流速在合理范围，避免流速过快加剧炉管磨损；同时，定期清理烟道积灰，避免积灰导致烟气流道堵塞，确保烟气流速均匀，减少局部炉管冲刷磨损引发的泄漏。(2) 完善保温系统：建立保温层定期检查、更换机制，定期对炉管保温层进行全面排查，及时更换脱落、破损、老化的保温层，确保保温层完好无损；选用导热系数低、耐高温、防水性能好的保温材料，提升保温效果，确保炉管温度分布均匀，减少因保温层损坏导致的管壁温差和热应力；在炉管弯头、接头等温度易波动的部位，加强保温处理，增加保温层厚度，避免局部温度骤升骤降，降低热应力对炉管的影响，防止裂纹产生，减少泄漏风险。

### 结束语

热电锅炉炉管泄漏是材质、制造、运行、维护等多因素协同作用的结果，防控需立足全流程。本文提出的改进方案贴合实际运行工况，可有效弥补现有不足、降低泄漏风险。后续需结合锅炉运行反馈，持续优化改进措施，加强各环节管控，提升炉管抗磨损、抗腐蚀、抗疲劳能力，从根本上减少泄漏事故，保障热电系统安全高效稳定运行。

### 参考文献

- [1] 贾丙丽, 蒋楠楠, 范方辉, 等. 一起管壳式余热锅炉烟管泄漏原因分析[J]. 工业锅炉, 2023, (4): 48-51.
- [2] 刘志刚, 陈晓明. 火电厂锅炉管道焊接缺陷分析与预防[J]. 焊接技术, 2023, 48(5): 12-19.
- [3] 张华, 魏威. 电厂锅炉水冷壁爆管泄漏原因与解决对策分析[J]. 电力设备管理, 2024, (15): 75-77.
- [4] 高建国, 孙丽娜. 先进无损检测技术在锅炉管道焊接中的应用研究[J]. 电力设备管理, 2024, 36(3): 45-52.
- [5] 赵宏伟, 杨柳青. 提高火电厂锅炉管道焊接质量的综合管理措施[J]. 工程质量, 2022, 40(7): 67-73.