

火电厂锅炉四管防磨防爆及预防泄漏的有效策略

李宗阳

国能宁夏灵武发电有限公司 宁夏 银川 751400

摘要: 锅炉四管爆漏是制约机组安全稳定运行的关键问题,其故障类型主要涵盖飞灰磨损、内外壁腐蚀及热疲劳超温开裂三类。本文系统梳理了四管故障的产生机理与分布规律,从防磨优化、防爆防腐蚀管控及全周期检修检测三个维度提出针对性策略。防磨方面,通过优化烟道流场消除涡流、完善防磨防护结构、优化燃烧工况降低飞灰含量,实现磨损源头治理。防爆防腐蚀方面,严格管控水质抑制内壁腐蚀,精准管控管壁温度规避超温蠕变,分区防控高温外壁腐蚀。检修管理方面,建立分级测厚方案、复合无损检测工艺及缺陷闭环台账,实现隐患全周期管控。多措并举可有效降低四管故障率,保障机组长期安全运行。

关键词: 火电厂; 锅炉四管; 防磨防爆; 管道泄漏; 预防策略

引言: 锅炉四管受热面是机组核心承压部件,长期运行于高温高压、强腐蚀、高流速烟气环境中,爆漏事故频发严重威胁机组安全与经济运行。四管故障成因复杂,涉及磨损、腐蚀、热疲劳等多重机理耦合作用,单一管控手段难以全面覆盖。当前部分电厂在四管防控中仍存在防磨结构覆盖不全、水质管控粗放、检修检测缺乏系统性等问题,导致隐性缺陷未能及时发现,突发泄漏风险较高。本文围绕四管爆漏防控这一核心问题,从运行优化、材料防护、检修检测三个层面构建系统化管控策略,为电厂四管受热面全生命周期安全管理提供技术参考。

1 锅炉四管常见故障类型及产生成因

1.1 飞灰磨损故障

锅炉燃烧产生的烟气中携带大量未燃尽煤粉颗粒与飞灰颗粒,高速烟气横向、纵向冲刷四管外壁,长期冲击摩擦会造成管壁均匀减薄;同时烟道转弯处、管排弯头、防磨瓦脱落区域会形成烟气涡流,引发局部冲刷磨损,属于四管最普遍的故障类型。其中省煤器处于烟气低温尾部烟道,飞灰浓度最高,磨损问题最为突出;过热器、再热器管排间隙较小,烟气流速不畅,局部涡流磨损频发。

1.2 内外壁腐蚀故障

内壁腐蚀主要为水汽侧腐蚀,锅炉给水水质不达标、管道内壁结垢会引发垢下腐蚀、氢脆腐蚀,水冷壁热负荷较高区域极易出现管壁内部腐蚀凹坑;外壁腐蚀分为高温腐蚀与低温腐蚀,炉膛燃烧区域水冷壁、高温过热器管壁处于600℃以上高温环境,烟气中的硫化物、氯化物会破坏管道金属氧化保护膜,造成外壁点状腐蚀;尾部省煤器烟气温度低于露点温度,烟气中的硫酸

蒸汽凝结附着管壁,引发低温酸性腐蚀^[1]。

1.3 热疲劳与超温开裂故障

机组深度调峰、启停操作过程中,锅炉负荷快速升降,四管管壁温度急剧冷热交替,金属材料反复膨胀收缩产生热疲劳应力,长期累积会产生微观裂纹;此外炉膛局部燃烧偏斜、火焰贴壁、管内水汽流量不足,会导致管道局部超温,金属材质蠕变加速,管壁出现鼓包、裂纹,最终引发爆管泄漏。该类故障在过热器、再热器高温受热面管道中发生率最高。

2 锅炉四管防磨针对性优化策略

2.1 优化烟道流场,消除烟气涡流区域

烟气涡流是造成锅炉四管局部严重磨损的核心诱因。飞灰颗粒在涡流区域反复冲刷管壁,导致管壁减薄速度远高于正常区域,是四管爆漏事故的高发部位。

(1) 针对烟道弯头、进出口烟道、管排两侧及烟道截面突变处等易形成涡流的区域,应加装导流板与均流板,规整烟气流速方向,使烟气沿设计路径均匀通过受热面,避免飞灰颗粒集中冲刷局部管壁,从根本上消除涡流对管壁的局部冲击磨损。(2) 应根据锅炉实际运行烟气流量,合理调整各段烟道挡板开度,保证炉膛左右侧烟气流量分布均衡,消除因单侧烟气偏流导致的局部流速过高与管壁冲刷加剧问题。此外应建立烟道定期清灰制度,及时清理烟道内积灰与堵灰杂物,防止烟道流通截面缩小导致烟气流速异常升高。应将尾部烟道烟气流速严格控制在设计标准区间内,从流速层面降低飞灰颗粒对管壁的冲击力度,延长四管使用寿命^[2]。

2.2 完善受热面防磨防护结构

对锅炉四管高磨损区域应全面加装防磨防护构件,实现防磨保护全覆盖。(1) 省煤器管排迎烟面应加装加

厚防磨瓦与防磨护帘,有效阻挡飞灰颗粒对管壁的直接冲刷;过热器与再热器管排弯头处及穿墙管道位置应加装防磨盖板,对弯头转向区与管壁穿墙薄弱段进行重点防护;管排间隙过小的区域应加装分隔护板,避免烟气从管排间隙高速窜流冲刷管壁,消除因烟气短路导致的局部加剧磨损问题。(2)针对传统防磨瓦采用点焊固定方式易松动、脱落的问题,应优化焊接工艺,采用满焊加固方式替代点焊,确保防磨构件与管壁连接牢固,避免因防护件脱落导致管壁大面积暴露磨损。同时防护构件材质应选用高铬耐磨合金,该类材质硬度高、抗冲刷性能优异,可大幅提升耐磨件使用寿命,降低因防护件失效带来的突发管壁磨损风险,保障四管受热面长期安全稳定运行。

2.3 优化炉膛燃烧工况,降低飞灰含量

优化炉膛燃烧工况是从源头降低飞灰冲刷磨损的根本措施。(1)合理调整煤粉细度及一次风与二次风配比,保证炉膛内煤粉与空气充分混合燃烧,减少烟气中未燃尽粗煤粉及碳粒含量,从根本上降低飞灰颗粒对四管受热面的冲刷磨损强度。煤粉细度应根据煤种挥发分与灰分特性合理设定,过粗则燃烧不充分,过细则增加制粉电耗,需在燃烧效率与经济性之间取得平衡。(2)合理控制炉膛过量空气系数,避免送风量过大导致烟气流速异常升高而加剧管壁磨损,同时也应避免风量不足造成煤粉不完全燃烧,增加烟气中飞灰携带量。过量空气系数过高会显著提升烟气体积流量,使烟道内各受热面烟气流速普遍升高,加速管壁磨损进程;过量空气系数过低则导致炉膛内形成还原性气氛,不完全燃烧产物增多,烟气中粗颗粒飞灰含量大幅上升,同样加剧管壁冲刷。(3)建立燃烧器定期检修校准制度,保证四角燃烧器火焰中心居中,各燃烧器出力均衡,防止因火焰偏移导致局部烟气流速紊乱与流场不均,避免高流速烟气区域集中冲刷局部管壁。火焰居中可有效降低炉膛结焦概率,同步减少结焦脱落物对管壁的二次冲刷损伤,实现降低炉膛结焦与管道磨损的双重管控目标,从燃烧源头保障四管受热面长期安全运行^[3]。

3 锅炉四管防爆及防腐蚀泄漏管控策略

3.1 严格管控给水与炉水水质,抑制内壁水汽腐蚀

给水与炉水水质是决定锅炉四管内壁腐蚀速率的核心控制参数。(1)建立炉水水质实时在线监测机制,持续监测给水溶解氧、pH值、电导率及氯离子含量等关键指标,确保各项参数始终维持在设备运行最优区间内,从水质源头杜绝氧腐蚀与氯离子点蚀问题的发生。(2)根据管壁结垢速率合理制定酸洗周期,定期开展锅炉管

道酸洗除垢工作,彻底清除管道内壁已生成的水垢与腐蚀产物,避免垢下腐蚀在垢层覆盖区域持续发展,防止因垢层隔绝导致局部化学环境恶化而加速管壁减薄。

(3)优化水汽加药工艺,精准控制氨水与联氨的投加量,使药剂浓度维持在有效保护范围内,在管道内壁金属表面形成稳定致密的钝化保护膜,有效隔绝水汽与金属基体的直接接触,全面降低内壁均匀腐蚀与局部腐蚀速率,保障四管受热面长期安全运行。

3.2 精准管控管壁温度,规避超温蠕变与热疲劳损伤

管壁温度是决定锅炉四管受热面是否发生超温蠕变与热疲劳损伤的关键参数。(1)依托锅炉分布式控制系统,细化四管各区域管壁温度测点布置,重点补齐高温过热器与再热器等高温受热面的盲区测温点,实现管路温度全覆盖、无死角的连续监控体系,实现管壁温度全天候不间断监测与超温预警。(2)机组调峰运行与启停过程中,应严格执行升降负荷速率控制标准,合理控制汽温与汽压变化速率,禁止快速增减燃料量或快速开关风门,减少管壁因温度剧烈波动产生的冷热交变幅度,降低热疲劳裂纹萌生与扩展风险。(3)针对高温过热器与再热器等易超温区域,应优化蒸汽旁路调温逻辑,根据管壁温度实时反馈及时调整减温水流量,确保管壁金属温度始终控制在材料允许范围内,杜绝管道长期超温运行,有效延缓金属高温蠕变速度与抑制疲劳裂纹萌生,保障四管受热面结构完整性与长期安全运行^[4]。

3.3 分区防控高低温外壁腐蚀

锅炉四管外壁腐蚀按温度区间可分为炉膛高温腐蚀与尾部低温腐蚀两类,应分区制定针对性防控措施。

(1)针对炉膛高温腐蚀区域,水冷壁管火焰直接冲刷面长期处于高温强腐蚀环境,应采用高温防腐喷涂工艺,在水冷壁火焰冲刷区域喷涂镍基高温防腐涂层,利用涂层化学稳定性隔绝烟气中硫化物、碱金属氧化物等腐蚀性介质与管壁金属的直接接触。同时应建立炉膛壁挂焦定期清理制度,及时清除附着于管壁的焦块,防止焦块覆盖导致管壁局部散热受阻、温度升高,加剧高温腐蚀与管壁减薄。(2)针对尾部省煤器低温腐蚀,应合理控制排烟温度,保证排烟温度始终高于烟气酸露点温度,从根本上避免硫酸蒸汽在管壁表面凝结形成酸液。同时应在省煤器管壁外层加装低温防腐护板,并定期开展吹灰作业,彻底清除管壁附着的酸性积灰,避免酸性介质长期附着引发管壁外壁点蚀与均匀腐蚀,保障省煤器管排长期安全运行。

4 全周期精细化检修与检测管理策略

4.1 制定分级管壁测厚检测方案

锅炉四管各区域因所处烟气环境与运行工况差异,磨损与腐蚀风险等级存在显著区别,应据此制定分级测厚检测方案,实现检测资源的精准配置。(1)省煤器迎烟面、水冷壁火焰冲刷区及过热器弯头等飞灰冲刷与高温腐蚀集中区域划为高危检测区,每次停机检修期间应开展全覆盖管壁测厚,确保高危区域无检测盲区。(2)管排中部及烟道中部管道划为中危检测区,可间隔一次检修周期开展测厚作业,在保证检测覆盖率的同时合理控制检修工作量。炉膛内部背烟面管道因受烟气冲刷影响较小,划为低危检测区,统一纳入年度检修期间开展抽检测厚。(3)每次检测完成后,应将管壁厚度数据与历次检测结果进行纵向对比,绘制各测点管壁减薄趋势曲线,动态跟踪管壁减薄速率。对减薄速率超过标准限值的管道应提前纳入换管计划,在管壁剩余壁厚不足引发泄漏前完成更换处理,从检测管控层面杜绝因管壁厚度不足导致的泄漏爆管事故。

4.2 完善无损检测与裂纹排查工艺

四管焊缝、弯头及热应力集中区域是疲劳裂纹与焊接隐性缺陷的高发部位,应采用渗透检测、超声波检测与涡流检测相结合的复合无损检测方式,重点排查微观疲劳裂纹与焊接质量缺陷。(1)渗透检测适用于表面开口裂纹识别,超声波检测可精确测定管壁内部裂纹深度与走向,涡流检测则对管壁表面及近表面缺陷具有高灵敏度,三种检测方式互补可全面覆盖各类裂纹形态。(2)重点加强锅炉启停频繁及负荷波动较大管段的裂纹排查力度。对检出的长度较小的微小裂纹应及时采用打磨方式消除,对裂纹深度超过标准限值的管道应直接进行换管处理,避免裂纹在高温高压运行工况下快速扩展导致爆管事故。同时应严格管控检修焊接工艺,统一四管换管焊接参数,焊后对所有焊缝百分之百开展无损检测,确保焊接质量合格,杜绝焊接缺陷遗留于受热面管道中^[5]。

4.3 建立四管缺陷闭环台账管理

应搭建锅炉四管专属设备台账,完整记录每段管道的安装投运时间、历次管壁测厚数据、缺陷位置与类型、检修处理方式及管道更换记录,形成全生命周期可

追溯的设备档案。台账应涵盖管壁减薄、疲劳裂纹、防磨瓦松动脱落等各类缺陷信息,确保每项隐患均有据可查、有迹可循。(1)针对每次检修期间发现的管壁减薄、微小裂纹、防磨构件损坏等问题,应逐一明确整改责任人与整改完成时限,检修工作结束后须对整改部位进行二次复检,确认缺陷已彻底消除后方可销号,实现隐患发现、整改、复检、销号的全闭环管理流程,杜绝缺陷遗漏与整改不到位问题。(2)应定期汇总历年四管故障与检修数据,统计本台锅炉高频故障位置与高发缺陷类型,针对性提升该区域日常巡检与检测频次,将有限的检修资源集中投放于高风险部位,实现四管受热面缺陷的精准防控与长效管理。

结束语

锅炉四管防控是一项涉及运行优化、材料防护、检修检测多专业协同的系统工程,任何单一环节的疏漏均可能成为爆管事故的诱因。本文所提策略覆盖了从燃烧优化、流场治理、水质管控到分级检测、缺陷闭环的完整链条,核心思路在于将防控关口前移,从被动抢修转向主动预防。实际执行中,各电厂应结合自身煤种特性、设备状况与运行方式,对各项策略进行针对性调整与落地。同时应持续积累四管故障数据,动态优化防控重点与检测周期,逐步建立本厂化的四管精准防控体系,切实保障机组长周期安全稳定运行。

参考文献

- [1]靳国东.火电厂锅炉四管防磨防爆及预防泄漏的有效策略分析[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(5):060-063.
- [2]樊冲.火电厂锅炉四管防磨防爆及预防泄漏策略研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(2):111-113.
- [3]裴野.火电厂锅炉四管防磨防爆检查及预防策略[J].价值工程,2025,44(19):45-47.
- [4]丁浩,刘咏.火电厂锅炉四管防磨防爆检查策略优化及实践[J].电力设备管理,2025(4):59-61.
- [5]刘铭佳.火电厂锅炉四管防磨防爆检查重点及预防措施分析[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(3):094-098.