

煤化工电站锅炉受热面磨损与防磨措施分析

叶 强

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司 宁夏 银川 750411

摘 要: 本文聚焦煤化工电站锅炉受热面磨损问题, 阐述其磨损类型及危害机理, 系统分析燃料特性、锅炉运行参数、受热面结构安装等因素对磨损的影响。结合煤化工锅炉高灰分、高腐蚀的特殊工况, 提出主动防磨、被动防磨及运行维护监测相结合的综合防磨措施, 分析各类措施的经济性与适用性, 优化防磨技术组合, 为提升受热面使用寿命、保障锅炉安全稳定运行、降低运维成本提供理论与实践参考。

关键词: 煤化工电站; 锅炉受热面磨损; 防磨措施

引言: 煤化工电站锅炉是煤化工与电力生产协同的核心设备, 以煤化工副产物为燃料, 其受热面长期处于高温、高压、高粉尘的恶劣工况, 磨损问题频发。磨损会导致受热面管壁减薄、传热效率下降, 甚至引发蒸汽泄漏、炉膛爆炸等安全事故, 严重影响生产连续性。当前煤化工产业升级对锅炉运行稳定性提出更高要求, 深入分析磨损机理及影响因素, 探索有效防磨措施, 具有重要工程实用价值。

1 煤化工电站锅炉受热面结构及磨损基础理论

1.1 煤化工电站锅炉核心结构及受热面分类

(1) 煤化工电站锅炉整体工作原理: 以煤为燃料, 通过燃烧产生高温烟气, 烟气流经各受热面传递热量, 将水加热为蒸汽, 推动汽轮机发电, 同时兼顾煤化工生产所需的热能供应, 核心是实现燃料热能向蒸汽热能的高效转化。(2) 主要受热面类型及功能: 水冷壁布置于炉膛内壁, 吸收炉膛辐射热, 将水加热为饱和蒸汽, 同时保护炉墙; 过热器将饱和蒸汽加热为高温高压过热蒸汽, 提升发电效率; 再热器将汽轮机排汽重新加热, 降低能耗; 省煤器利用尾部烟气余热加热给水, 节约燃料消耗。(3) 煤化工锅炉受热面的工作环境特点: 烟气中含大量飞灰、硫化物等杂质, 粉尘浓度高; 燃烧温度波动大, 受热面长期处于高温、高压工况; 烟气流速不均, 局部存在涡流, 加剧受热面受力与磨损。

1.2 受热面磨损的基本类型与特征

(1) 飞灰冲刷磨损的形成及外观特征: 烟气中飞灰颗粒随气流高速冲刷受热面, 长期撞击导致管壁表面材料脱落, 外观呈均匀的麻点、沟槽状, 磨损部位多集中在烟气流速较高的弯头、迎风面。(2) 腐蚀-磨损耦合作用的机理及表现: 烟气中腐蚀性介质(如 SO_2)先腐蚀管壁表面, 形成脆弱腐蚀层, 飞灰冲刷会加速腐蚀层脱落, 形成“腐蚀-冲刷”恶性循环, 表现为管壁局部变薄、出

现蚀坑, 磨损速度远高于单一磨损^[1]。(3) 机械振动引发的磨损类型及特点: 受热面因烟气扰动、设备运行振动产生高频振动, 与相邻部件或支撑结构发生摩擦, 磨损多为局部接触式磨损, 呈条状划痕, 易发生在受热面固定端、管束间隙处。

1.3 受热面磨损的危害机理

(1) 磨损导致受热面管壁减薄的力学机制: 磨损使管壁厚度逐渐减小, 受力截面积缩小, 应力集中加剧, 当管壁厚度低于安全阈值时, 易发生塑性变形甚至断裂。(2) 磨损对锅炉传热效率的影响: 管壁磨损后表面粗糙度增加, 且减薄的管壁易出现结垢、腐蚀, 阻碍热量传递, 导致烟气余热利用率下降, 锅炉热效率降低, 增加燃料消耗。(3) 磨损引发的锅炉泄漏及安全事故连锁反应: 管壁磨损至破裂会导致蒸汽泄漏, 引发锅炉停炉检修, 影响生产连续性; 严重时泄漏蒸汽与高温烟气混合, 可能引发炉膛爆炸、人员伤亡等重大安全事故。

2 煤化工电站锅炉受热面磨损影响因素分析

2.1 燃料特性对磨损的影响

(1) 煤质灰分含量、灰粒硬度及粒径分布的影响: 灰分含量越高, 烟气中飞灰颗粒数量越多, 磨损载体增加; 灰粒硬度越大, 对受热面的撞击切削能力越强, 磨损越严重; 粒径分布中粗颗粒占比越高, 撞击动能越大, 磨损集中在受热面迎风侧, 细颗粒则加剧均匀磨损, 二者共同决定磨损速率。(2) 煤化工劣质燃料掺烧的磨损加剧作用: 煤化工常用煤矸石、煤泥等劣质燃料掺烧, 此类燃料灰分高、灰粒硬度大, 且燃烧不充分, 未燃尽颗粒随烟气流动, 增加冲刷磨损频次; 同时掺烧过程中燃料混合不均, 导致局部烟气流速波动, 进一步加剧受热面磨损^[2]。(3) 燃料燃烧产物对磨损的间接影响: 燃料燃烧产生的硫化物、氮氧化物等, 会腐蚀受热面管壁, 降低材料耐磨性, 间接加速磨损; 燃烧生成的焦渣颗粒若附

着在受热面,脱落时会对管壁产生冲击磨损,形成二次磨损。

2.2 锅炉运行参数对磨损的影响

(1) 烟气流速对磨损的影响:磨损量与烟气流速的三次方近似成正比,烟气流速越高,飞灰颗粒撞击动能越大,磨损速率越快;当流速超过临界值时,会破坏烟气层流状态,形成涡流,导致局部受热面磨损急剧加剧。(2) 锅炉负荷波动及启停频率的影响:负荷波动会导致烟气流速、炉膛温度大幅变化,受热面热胀冷缩产生应力,降低材料韧性,同时流速波动加剧飞灰冲刷;启停频率过高时,受热面反复承受冷热冲击,表面易产生裂纹,磨损速率显著提升。(3) 炉膛温度、烟气成分对磨损的协同作用:炉膛温度过高会使灰粒软化粘连,减少磨损,但温度过低则燃烧不充分,飞灰颗粒增多;烟气中腐蚀性成分与高温协同作用,会加速管壁腐蚀,降低耐磨性,与飞灰冲刷形成耦合磨损,加剧损坏。

2.3 受热面结构与安装因素对磨损的影响

(1) 受热面管排布置、间距对磨损的影响:管排布置过密会导致烟气流速不均,局部形成高速气流区,加剧磨损;间距过大则烟气涡流增多,飞灰颗粒反复撞击受热面;错列布置比顺列布置磨损更严重,但传热效率更高,需平衡二者关系。(2) 受热面局部结构的磨损集中效应:弯头、穿墙处等局部结构会改变烟气流向,形成涡流和流速突变,飞灰颗粒在此处集中撞击,导致磨损集中,是受热面磨损的高发部位;管壁粗糙度增加也会加剧局部磨损。(3) 安装误差及施工质量的影响:安装时管排间距偏差、管壁垂直度不足,会导致烟气流场紊乱;焊接质量不佳、支撑结构松动,会使受热面运行时产生振动,加剧磨损,埋下安全隐患^[3]。

2.4 其他辅助因素对磨损的影响

(1) 吹灰系统运行不当的影响:吹灰器角度偏差、吹灰压力过高,会直接冲刷受热面管壁,加剧局部磨损;吹灰不及时则受热面积灰过多,脱落时产生冲击磨损,二者均会缩短受热面寿命。(2) 煤化工特殊工况的间接影响:空冷系统运行时,烟气湿度、温度变化会改变飞灰颗粒特性,增加磨损概率;煤化工生产中烟气含有的特殊杂质,会与飞灰协同作用,加速受热面磨损。(3) 设备老化及维护不当的影响:受热面长期运行后材料老化、硬度下降,耐磨性降低;维护不及时,未定期清理积灰、检查磨损情况,会导致磨损隐患累积,最终引发管壁泄漏等问题。

3 煤化工电站锅炉受热面防磨技术措施

3.1 主动防磨技术措施

(1) 燃烧与烟气流场优化:采用分级送风技术,合理分配一次风、二次风及三次风比例,确保燃料在炉膛内均匀、充分燃烧,减少未燃尽炭粒和焦渣生成,从源头降低飞灰冲刷磨损的载体;严格控制受热面各区域烟气流速,将易磨损部位流速控制在6-8m/s的安全阈值内,通过优化炉膛出口结构、增设导流叶片和气流均布装置,消除局部涡流和流速突变现象,避免磨损集中,同时兼顾锅炉传热效率,实现防磨与节能的协同提升。(2) 分离器优化设计:针对煤化工锅炉飞灰浓度高的特点,改进分离器结构,采用高效旋风分离器与静电分离器组合模式,大幅提高飞灰分离效率,将粗颗粒飞灰(粒径>50 μm)分离效率提升至98%以上,减少烟气中高动能粗颗粒含量;通过优化分离器内部导流结构,细化剩余飞灰粒径,使飞灰颗粒分布更均匀,降低其撞击受热面的动能,减少冲刷磨损,同时避免分离器内部积灰堵塞,保障锅炉长期稳定运行^[4]。(3) 燃料预处理:结合煤化工劣质燃料(煤矸石、煤泥等)的特性,采用洗选、筛分、破碎等组合预处理工艺,有效降低燃料灰分含量,去除其中的粗颗粒杂质和硬质杂物;通过均化处理使燃料颗粒大小均匀、成分稳定,改善燃烧特性,确保燃料在炉膛内充分燃烧,减少未燃尽颗粒和焦渣脱落,间接降低受热面磨损,同时提升燃料利用率,减少污染物排放,实现环保与防磨的双重效益。

3.2 被动防磨技术措施

(1) 耐磨材料应用:在受热面易磨损部位(如弯头、迎风面、穿墙处)采用高铬合金钢、耐磨铸铁等高强度耐磨材料,此类材料硬度可达HRC60以上,耐磨性是普通钢材的3-5倍,能有效抵御飞灰冲刷和腐蚀-磨损耦合作用,显著延长受热面使用寿命;对于现有受热面,采用等离子喷涂、激光熔覆等先进技术铺设陶瓷耐磨涂层或金属耐磨涂层,涂层厚度控制在0.3-0.5mm,与管壁结合紧密,在不影响传热效率的前提下,形成坚固的防护屏障,降低磨损速率,且施工便捷、成本可控。(2) 受热面结构改进:优化受热面管排布置,根据烟气流场分布调整管排间距,对于磨损严重区域采用顺列布置减少局部涡流,对于传热要求高的区域采用错列布置并配套防磨装置,平衡传热效率与防磨效果;对易磨损部位采用让管设计,通过调整管道走向避开烟气流速高速区,减少飞灰集中冲刷;在受热面表面铺设耐磨浇注料或陶瓷防磨层,增强管壁耐磨性,同时减少热量损失,进一步提升锅炉热效率。(3) 局部防磨部件安装:在受热面弯头、穿墙处、管排迎风面等磨损高发部位,安装耐高温、耐磨的防磨护瓦、防磨盖板,直接阻挡飞灰冲刷,

避免局部磨损加剧；在管排间隙处安装挡灰板，引导烟气流向，减少涡流产生，同时阻挡大颗粒飞灰撞击受热面；在省煤器、过热器等关键部位增设防磨格栅和防磨套管，进一步优化防磨效果，降低局部磨损速率，延长受热面检修周期。

3.3 运行维护与监测防磨措施

(1) 定期检测与检修：采用超声测厚技术，每季度对受热面管壁厚度进行全面检测，精准识别磨损薄弱部位，当管壁厚度低于设计值的80%时及时更换；利用红外热像诊断技术，实时监测受热面温度分布，排查因磨损导致的传热异常，提前发现磨损隐患；建立定期检修制度，每半年清理一次受热面积灰、焦渣，检查防磨部件的松动、脱落情况，及时修复或更换，避免磨损隐患累积引发安全事故。(2) 运行参数优化与负荷稳定控制：优化锅炉运行参数，保持烟气流速、炉膛温度、烟气成分稳定，避免参数频繁波动导致的受热面热胀冷缩和磨损加剧；合理控制锅炉负荷，避免负荷骤升骤降，减少启停次数，降低受热面冷热冲击，减少表面裂纹产生，同时避免因负荷过高导致烟气流速超标，平衡运行效率与防磨需求，确保锅炉长期稳定运行^[5]。(3) 完善防磨管理制度与运维体系：建立健全防磨管理责任制，明确各岗位运维职责，规范操作流程，杜绝违规操作导致的磨损加剧；制定针对性的防磨运维方案，结合煤化工锅炉特殊工况，定期开展运维人员专业培训，提升其防磨监测和故障处理能力；建立磨损监测数据库，记录受热面磨损数据、检修情况和运行参数，通过数据分析优化防磨措施，实现受热面全生命周期防磨管理。

3.4 防磨技术的经济性与适用性分析

(1) 各类防磨措施的成本投入与效益对比：主动防磨措施前期设备改造、设计投入较高，但能从源头减少磨损，降低后期检修和更换成本，长期效益显著；被动防磨措施施工便捷、前期投入较低，但耐磨材料和部件需定期更换，后期运维成本较高；运行维护类措施投入最低，可有效延长受热面寿命，减少事故损失，综合效益

突出，需根据企业预算和锅炉运行情况合理选择。(2) 不同煤化工工况下防磨技术的选型原则：针对高灰分、劣质燃料掺烧工况，优先采用燃料预处理、分离器优化等主动防磨措施，配合耐磨涂层和防磨部件，提升防磨效果；针对烟气流速高、磨损集中的工况，重点优化烟气流场、改进受热面结构，安装局部防磨部件；针对运维水平较高的企业，可侧重运行维护与监测措施，降低综合成本，实现防磨技术与工况的精准匹配。(3) 现有防磨技术的优化方向：结合煤化工产业升级需求，研发高效、低成本的耐磨材料和涂层技术，提升材料耐磨性和使用寿命；融合智能化技术，开发受热面磨损在线监测系统，实现磨损隐患实时预警、精准检修；优化防磨技术组合方案，实现主动防磨、被动防磨与运维监测的协同，提升防磨效果的同时，降低成本投入，适配不同煤化工电站的个性化需求。

结束语

综上，煤化工电站锅炉受热面磨损是燃料、运行、结构等多因素协同作用的结果，防控需兼顾技术性与经济性。主动防磨从源头减少隐患，被动防磨强化局部防护，运维监测实现全生命周期管控，三者协同可有效缓解磨损。未来需结合产业升级，研发高效低成本防磨材料与智能化监测技术，优化选型，实现防磨效果与运行效益双重提升，保障电站安全高效运行。

参考文献

- [1]徐忠浩.电厂锅炉受热面失效形式及预防措施研究[J].电力设备管理,2024,(23):86-88.
- [2]李海燕.锅炉受热面的冲蚀磨损与防护综述[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(05):957-970.
- [3]孙贺斌.锅炉受热面磨损测量装置及方法[J].管道技术与设备,2023,(01):60-62.
- [4]何松章,缪桥洪.CFB锅炉受热面磨损与一次风优化调整研究[J].设备管理与维修,2025,(18):59-62.
- [5]王少帅.燃煤电厂锅炉受热面磨损机理与防护措施研究[J].电工技术,2025,(S1):518-520.