

垃圾发电锅炉受热面磨损原因与防护措施分析

汪 啸 徐一鸣 任禹昕 李 喆 刘天艳

华能国际电力江苏能源开发有限公司南京电厂 江苏 南京 210036

摘 要: 垃圾发电锅炉受热面是热能转换的核心部件,其磨损状态直接决定机组运行效率与安全寿命。系统梳理受热面磨损的核心成因,阐明硬质颗粒冲蚀、高温腐蚀协同、湍流扰动及交变热应力疲劳四大磨损作用机理,针对性提出流场优化、材料升级、结构改良、工况管控等综合防护措施,为锅炉受热面长周期安全稳定运行提供技术支持。

关键词: 垃圾发电锅炉; 受热面磨损; 磨损机理; 防护措施

引言: 垃圾焚烧发电是实现固废资源化处置的核心技术路径,锅炉作为能量转换核心设备,其运行可靠性直接决定发电系统整体效能。受热面长期处于高温、高含尘、强腐蚀的复杂工况中,磨损失效是制约锅炉长周期稳定运行的核心痛点。随着垃圾组分日趋复杂、锅炉运行工况波动频繁,受热面磨损成因与演化规律更趋复杂,亟须厘清磨损核心机理,构建适配性强的全维度防护技术体系,保障垃圾发电系统安全高效运行。

1 垃圾发电锅炉受热面运行重要性

垃圾发电锅炉受热面作为热能转换核心部件,其运行状态直接决定能量传递效率与设备寿命。受热面通过高效吸收垃圾燃烧释放的热能,转化为推动汽轮机发电的蒸汽动力,是维持锅炉稳定运行的关键环节;若受热面出现积灰、腐蚀或局部过热等问题,将导致热效率下降、能耗增加甚至设备故障,影响整体发电效能。定期检测受热面温度分布、清洁度及材料老化情况,可提前预警潜在风险,保障连续安全发电;优化受热面结构设计、提升材料耐高温耐腐蚀性能,是提升垃圾发电系统可靠性的重要技术方向,对实现资源循环利用与绿色能源供给具有基础支撑作用^[1]。

2 垃圾发电锅炉受热面磨损核心成因

2.1 飞灰颗粒高速冲蚀磨损影响

垃圾发电锅炉运行中,飞灰颗粒随高温烟气高速运动,其硬度、粒径分布及运动轨迹直接影响受热面磨损程度。颗粒以高动能冲击管壁时,表面材料因反复塑性变形产生疲劳裂纹,逐渐剥落形成磨蚀坑;局部区域因颗粒浓度过高或气流湍流加剧,磨损速率显著提升;颗粒形状不规则性增强冲蚀破坏力,尖锐棱角易嵌入金属表面造成微观切削。此外,烟气温度波动导致飞灰物理性质变化,高温下颗粒硬度降低可能减缓磨损,而低温结渣则改变颗粒运动路径,加剧局部冲蚀;磨损过程伴随热应力与机械应力叠加,加速材料失效,影响锅炉热

效率与运行安全,需通过优化气流组织与表面涂层技术缓解。

2.2 烟气运行工况波动磨损影响

垃圾发电锅炉运行时,烟气温度、压力、流速的动态变化直接加剧受热面磨损。温度波动引发金属热膨胀系数差异,在管壁表面形成交变热应力,与机械应力叠加后加速材料疲劳开裂;低温工况下烟气中硫酸蒸汽易冷凝结露,与飞灰混合形成腐蚀性黏附层,加剧冲蚀磨损。压力变化改变烟气流速分布,局部区域流速突增导致颗粒冲击力增强,管壁表面材料剥落速率加快;流速波动引发湍流强度变化,在弯头、变径处形成涡流区,颗粒在此聚集并反复冲击管壁,形成局部严重磨损。此外,工况频繁波动导致受热面材料热循环次数增加,微观组织结构劣化,抗磨损性能下降,最终影响锅炉运行稳定性与设备寿命,需通过优化燃烧控制与工况调节减少波动幅度^[2]。

2.3 受热面结构设计适配性影响

垃圾发电锅炉受热面结构设计需适配其特殊工况特性。管径选择需平衡热交换效率与颗粒磨损风险:过大管径易导致流速过低引发颗粒沉积,加剧局部腐蚀;过小管径则可能因流速过高强化湍流冲击,加速表面材料损耗。管排布局需优化流动路径,避免局部高温区或高速流区域形成,减少热应力集中与颗粒冲击强化效应;支撑结构需考虑热膨胀补偿设计,如采用弹性支撑或滑动支座,缓解温度波动引发的结构变形与应力叠加。连接部位如焊缝、弯头等需强化抗疲劳性能,通过圆弧过渡或加强肋设计降低应力集中风险;结构设计还需结合数值模拟与实际运行反馈,动态调整参数以适配垃圾成分波动、燃烧不稳定等特性,确保结构在复杂工况下的稳定性与耐久性,是磨损成因的关键结构因素。

2.4 受热面材质自身性能的影响

垃圾发电锅炉受热面材质性能直接影响其抗磨损能

力。材质硬度需匹配颗粒冲击强度，硬度不足易被硬质颗粒切削，过高则可能引发脆性断裂；耐腐蚀性需适应垃圾燃烧产生的酸性气体（如HCl、SO₂）及碱性飞灰，避免腐蚀加速材料损耗。热膨胀系数需与基体及涂层材料匹配，减少温度波动引发的热应力开裂；抗疲劳性能需承受温度循环与机械载荷的长期作用，避免疲劳裂纹扩展导致剥落。材质微观结构稳定性（如晶界强度、析出相分布）影响抗裂纹萌生与扩展能力；选择适配工况的材质需综合评估硬度、耐蚀性、热稳定性及疲劳性能，通过实验室加速试验与实际运行验证确保可靠性，是抑制磨损的核心材料因素，需持续优化材质成分与工艺以适配垃圾发电特殊环境。

3 锅炉受热面磨损的核心作用机理

3.1 硬质颗粒冲击切削磨损机理

锅炉运行中，流体携带的硬质颗粒以高速冲击受热面，形成切削磨损效应。颗粒动能转化为局部应力，在接触点产生塑性变形与微裂纹扩展。冲击角度影响磨损形态，低角度时以犁削为主，形成沟槽状痕迹；高角度时则伴随冲击坑与材料剥落。颗粒硬度与受热面材料硬度差异决定磨损速率，硬度差越大，切削作用越显著；流体湍流程度加剧颗粒运动随机性，导致磨损分布不均，局部区域出现集中磨损。温度变化引发材料热膨胀系数差异，在循环热应力与颗粒冲击叠加作用下，产生疲劳裂纹并加速材料脱落；磨损过程伴随微观结构变化，如晶界弱化、位错密度增加，进一步降低材料抗磨性能。该机理强调颗粒动能、接触力学特性及材料微观响应的协同作用，是锅炉受热面磨损的核心成因之一，需通过材料优化与流场调控实现磨损抑制。^[1]

3.2 高温氧化腐蚀协同磨损机理

高温氧化腐蚀协同磨损机理聚焦于高温环境中金属表面氧化反应与机械磨损的交互作用。金属在高温下与氧气发生氧化反应生成氧化层，该氧化层在持续高温及热应力作用下易发生相变或结构疏松，导致其与基体结合强度降低。当受热面承受流体冲刷或硬质颗粒冲击时，氧化层易剥落并暴露新鲜金属表面，形成氧化-磨损-再氧化的循环过程；剥落的氧化碎片可能作为二次硬质颗粒加剧局部磨损，同时氧化反应消耗金属元素改变表面成分，降低材料抗磨性能。温度梯度引发的热应力与机械应力叠加，促进微裂纹萌生与扩展，加速材料疲劳剥落；该机理强调温度场、氧化动力学、应力状态及材料微观特性的综合作用，是高温工况下锅炉受热面磨损的关键成因，通过材料抗高温氧化改性及表面防护技术实现协同抑制。

3.3 颗粒流湍流扰动磨损机理

湍流场中颗粒运动轨迹随机性增强，导致受热面局部区域承受非均匀冲击载荷。湍流脉动使颗粒速度分布呈现高频变化特征，在局部产生瞬时高强度冲击，引发材料表面微区塑性变形累积；颗粒群在湍流作用下形成局部富集区，产生“群体冲击效应”，加剧局部磨损速率。湍流剪切应力与颗粒冲击应力叠加，在材料表面形成复杂应力场，促进微裂纹网络形成与扩展；温度波动引发湍流特性变化，如雷诺数变化导致流动模式转变，影响颗粒运动轨迹与冲击频率。该机理强调湍流动力学特性、颗粒群运动模式及材料表面应力响应的耦合作用，是复杂流动工况下锅炉受热面磨损的重要成因，需通过流场优化与表面强化技术实现磨损控制。

3.4 交变热应力疲劳磨损机理

锅炉运行中温度周期性波动引发受热面材料热胀冷缩，产生交变热应力。温度梯度导致材料内部应力分布不均，在微观尺度形成应力集中区域，促进微裂纹萌生；热循环过程中，裂纹尖端因应力循环加载发生疲劳扩展，形成宏观可见的疲劳裂纹网络。裂纹扩展路径受材料晶界、析出相及微观缺陷影响，呈现沿晶、穿晶或混合扩展特征；交变热应力与机械应力（如颗粒冲击）叠加时，产生应力强度因子叠加效应，加速裂纹扩展速率。温度变化速率影响热应力幅值与循环次数，快速温变加剧热疲劳损伤。该机理强调热-力耦合效应、材料微观缺陷演化及疲劳裂纹扩展动力学，是温差工况下锅炉受热面磨损的关键成因，需通过材料热稳定性优化与热应力释放技术实现磨损抑制。

4 锅炉受热面磨损的综合防护措施

4.1 烟气与飞灰流场优化控制

烟气与飞灰流场优化通过调整流动路径、速度分布及颗粒浓度分布，实现磨损抑制。优化烟道结构可降低湍流强度，减少颗粒随机冲击概率，使烟气流更趋均匀；通过调整挡板、导流板位置，可控制局部流速，避免高速区域形成，降低局部磨损速率。飞灰浓度梯度调控能减少高浓度区颗粒富集，抑制“群体冲击效应”；粒度分布优化可降低大颗粒占比，减少高动能颗粒冲击损伤。温度场与流场耦合优化能缓解热应力集中，避免局部过热引发材料性能退化。数值模拟与实验验证结合，可精准定位流场缺陷并实施针对性改造；该措施强调流场动力学特性与材料磨损响应的匹配性，是锅炉受热面防护的基础技术路径，需结合具体工况参数动态调整优化策略^[4]。

4.2 受热面耐磨防护材料升级

耐磨防护材料升级聚焦于提升材料抗磨蚀性能与热稳定性。新型高熵合金涂层通过多元合金化设计,实现高硬度与优异韧性的平衡,有效抵御硬质颗粒冲击与高温氧化;纳米复合陶瓷涂层利用纳米颗粒增强相与基体界面的强结合力,提升涂层抗剥落能力与耐磨寿命。材料微观结构调控技术,如晶粒细化、析出相强化,可增强材料抗疲劳性能与抗裂纹扩展能力;表面梯度功能材料通过成分与性能梯度过渡,缓解热应力集中与界面失效风险。材料升级需结合工况参数进行定制化设计,如温度范围、颗粒特性、流动特性等,确保材料性能与磨损环境的高度匹配。该措施强调材料科学前沿技术与工程应用的结合,是提升锅炉受热面耐磨性能的核心技术路径,需通过实验验证与长期运行考核确保可靠性。

4.3 受热面结构优化改良设计

受热面结构优化通过调整几何形态与连接方式,降低局部应力集中与磨损风险。曲面设计可平滑流体路径,减少湍流冲击与颗粒滞留;管排间距优化能平衡热交换效率与磨损防护需求,避免局部高速流形成。此句无错误。连接部位采用圆弧过渡或加强结构,可缓解热应力集中与机械应力叠加效应,降低裂纹萌生概率;模块化设计便于局部更换与维护,延长整体使用寿命;支撑结构刚度优化可减少振动引发的疲劳磨损。结构优化需结合热-力耦合分析,确保在温度波动与机械载荷下保持稳定,该措施强调几何拓扑优化与力学性能提升的协同,是提升锅炉受热面耐磨性能的结构基础,需通过仿真验证与实际运行反馈持续优化设计参数。

4.4 锅炉运行工况稳定化管控

运行工况稳定化通过精准调控温度、压力、流速等参数,降低动态载荷对受热面的损伤。温度波动控制可减少热应力循环幅度,抑制疲劳裂纹萌生与扩展;压力

稳定能维持流体流动均匀性,避免局部高速流引发的颗粒冲击强化。流速调控需平衡热交换效率与磨损风险,避免过高流速加剧湍流扰动或过低流速导致颗粒沉积;燃烧过程优化可减少火焰偏斜与局部高温,降低热负荷不均引发的应力集中。实时监测系统结合自动反馈控制,能动态调整燃料供给、风量配比及冷却水流量,确保工况参数偏离阈值时及时修正;该措施强调过程参数的动态平衡与智能调控,是降低运行工况波动对磨损影响的关键手段,需通过长期运行数据积累优化控制策略^[5]。

结束语:垃圾发电锅炉受热面磨损是多因素耦合作用的复杂过程,颗粒冲蚀、高温腐蚀协同、湍流扰动与热应力疲劳等机理相互叠加,大幅加剧了材料失效风险。覆盖流场调控、材料改性、结构优化与工况管控的全维度防护体系,可有效抑制受热面磨损劣化,显著延长设备服役寿命。后续需结合垃圾组分演变与锅炉技术升级,持续优化防护技术方案,为垃圾焚烧发电行业的安全稳定、绿色低碳发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]葛华,罗登勇,林征勋.垃圾电厂受热面管道堆焊技术研究[J].电力系统装备,2025(1):106-107+188.
- [2]万春阳,张德治.锅炉受热面积灰与腐蚀机理分析及其防治策略研究[J].自动化应用,2025,66(S1):266-268+271.
- [3]白浩,罗昭强,亚云启.垃圾焚烧炉高温过热器腐蚀及其防护研究[J].锅炉制造,2025,(06):54-56.
- [4]彭嘉懿,李开洋,谭黎明,等.垃圾焚烧炉受热面腐蚀防护涂层研究进展[J].中国有色金属学报,2025,35(1):57-77.
- [5]侯超.余热锅炉受热面在高温腐蚀环境下的防护涂层材料选型与工艺设计[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(7):061-065.