

Research on the Protection Technology of Turbine Blade Corrosion in Waste Power Plant

Rizheng Lin

China Electric International New Energy Hainan Co., Ltd., Chengmai, Hainan, 571923, China

Abstract

Waste-to-energy incineration serves as a crucial method for solid waste resource utilization. However, steam turbine blades are susceptible to failure from corrosive media containing chlorine and sulfur. This study investigates corrosion protection technologies for blades in waste-to-energy power plants, demonstrating that such measures ensure safe and stable unit operation, reduce maintenance costs, enhance economic efficiency, and comply with environmental regulations, thereby promoting standardized industry development. To address this, a comprehensive protection strategy is proposed, focusing on three key aspects: optimizing corrosion-resistant material selection, refining surface protection processes, and regulating operating conditions to minimize corrosion triggers. This approach provides a technical foundation for mitigating blade corrosion, extending equipment lifespan, and ensuring efficient unit operation.

Keywords

Waste-to-energy plant; Steam turbine; Blade corrosion protection

垃圾发电厂汽轮机叶片腐蚀防护技术研究

林日成

中电国际新能源海南有限公司, 中国·海南 澄迈 571923

摘要

垃圾焚烧发电是固废资源化利用的重要方式, 汽轮机叶片易受含氯、含硫腐蚀介质侵蚀而失效。本文研究垃圾发电厂汽轮机叶片腐蚀防护技术, 指出防护工作能保障机组安全稳定运行, 降低运维成本、提升经济效益, 同时契合环保要求, 推动行业规范发展。基于此, 从优化防腐材料选型、完善表面防护工艺、调控运行工况减少腐蚀诱因三方面, 构建系统防护方案, 为解决叶片腐蚀问题、延长设备寿命、保障机组高效运行提供技术依据。

关键词

垃圾发电厂; 汽轮机; 叶片腐蚀防护

1 引言

随着垃圾焚烧发电行业快速发展, 汽轮机作为核心动力设备, 长期在含氯、硫化物及酸性冷凝液的复杂工况下运行, 叶片腐蚀、冲蚀问题日益突出, 不仅降低机组运行效率, 还威胁设备安全与使用寿命。开展汽轮机叶片腐蚀防护技术研究, 分析腐蚀机理、优化防护工艺、研发新型防护材料, 对提升机组稳定性、延长服役周期、降低运维成本, 推动垃圾焚烧发电产业绿色高效发展具有重要现实意义。

2 垃圾发电厂汽轮机叶片腐蚀防护的重要性

2.1 保障机组安全稳定运行

汽轮机是垃圾焚烧发电系统中热能向机械能转换的核

心枢纽, 叶片通过高速旋转实现能量传递, 其结构完整性直接关系到机组能否连续稳定运行。垃圾焚烧过程中, 因垃圾成分复杂(含塑料、橡胶、厨余等), 燃烧后会产生含氯、硫、碱金属等元素的烟气, 经余热锅炉换热后, 这些腐蚀性成分会进入蒸汽系统, 伴随蒸汽流经汽轮机叶片表面, 引发腐蚀损伤。叶片腐蚀会导致表面出现麻点、裂纹、材料剥落等缺陷, 严重时会造成叶片断裂, 引发汽轮机停机甚至爆炸等恶性事故, 不仅影响垃圾处理进度, 还会导致电力供应中断, 冲击区域电网稳定性。某垃圾焚烧电站数据显示, 未采取防护措施的汽轮机运行3年后, 末级叶片磨损量达0.3mm, 效率下降约2%, 凸显了腐蚀防护的必要性。

【作者简介】林日成(1996—), 男, 中国海南琼海人, 硕士, 助理工程师, 从事动力工程及工程热物理研究。



图 1 腐蚀防护

2.2 降低运维成本，提升经济效益

垃圾发电厂汽轮机叶片腐蚀后，需定期进行检修、修复或更换，而叶片作为高精度核心部件，制造与更换成本高昂，且检修过程需停机作业，会造成发电量损失。同时，腐蚀会导致汽轮机通流效率下降，热耗增加，发电能耗升高，进一步压缩电厂盈利空间。通过有效的腐蚀防护技术，可显著延长叶片使用寿命，减少检修频次与停机时间，降低备品备件消耗和运维成本，同时维持汽轮机高效运行，提升发电效率。实践表明，采用专项防护优化策略后，汽轮机效率可提升 1.5%-2%，非计划停机比率大幅削减，能够有效提升垃圾发电厂的综合经济效益，助力行业可持续发展。

2.3 契合环保要求，推动行业规范发展

垃圾焚烧发电行业的发展始终围绕“环保优先”原则，汽轮机叶片腐蚀不仅影响设备运行，还可能因设备故障导致烟气处理系统协同失效，增加污染物排放风险，违背环保法规要求。此外，随着垃圾焚烧发电技术的不断升级，机组参数逐步提高，对叶片的耐腐蚀性能提出了更高要求。完善叶片腐蚀防护体系，提升设备运行可靠性，可避免因设备故障引发的环保超标问题，同时推动垃圾焚烧发电行业向高效、低碳、安全的方向发展，契合我国“双碳”目标下能源结构优化的战略需求。

3 垃圾发电厂汽轮机叶片腐蚀防护策略

3.1 优化材料选用，提升基材耐腐蚀性能

基材耐腐蚀性能是叶片抗腐蚀的基础，垃圾焚烧蒸汽中高浓度 Cl^- 、 SO_4^{2-} 及碱金属等腐蚀性介质，对叶片基材提出了严苛要求，因此需结合介质特性与电厂运维成本，优化叶片材料选用方案，实现耐腐蚀性与经济性的双向平衡。一是推广应用耐腐合金材料，针对高压级叶片长期处于高温（400-550℃）、高硫蒸汽环境的特点，优先选用耐高温、抗硫化腐蚀的镍基合金（如 GY200）或高铬马氏体不锈钢，这类材料通过合理的合金元素配比，兼具优异的高温强度与耐腐蚀性能，可有效抑制高温氧化皮脱落与硫化物侵蚀，延长高压级叶片使用寿命；针对低压级叶片所处的湿蒸汽环境，选用抗水蚀、点蚀的沉淀硬化不锈钢（如 17-4PH），其经固溶时效处理后屈服强度可达 1100MPa 以上，表面易形成致密

钝化膜，耐湿蒸汽腐蚀及水滴冲击性能突出，适配低压缸的工作工况。二是采用材料改性技术，针对存量普通不锈钢叶片，通过表面合金化处理实现提质增效，避免整体更换带来的高额成本，常用渗铬、渗硼等热加工工艺，在叶片表面形成均匀致密的耐腐合金层，既提升表面耐腐蚀性能，又保留基材原有韧性。其中渗硼处理可在叶片表面形成 0.2mm 厚的硼化铁层，硬度可达基材的 3 倍，能有效抵御湿蒸汽中水滴的高速冲击，将叶片侵蚀量控制在行业安全范围，适配中低压级叶片的防护需求。三是优化叶片结构设计，结合腐蚀与水蚀协同损伤机理，通过改进叶片型线减少腐蚀诱因，采用前段直线 + 后段小曲率弧的内弧线型，可降低水滴撞击角度与冲击力，减少表面损伤；同时在末级叶片增设空心导叶吸水槽、隔板环形吸水槽等除湿结构，高效抽吸附着在叶片表面的水膜，抽湿率可提升 30%-40%，从结构层面减少水蚀与汽蚀损伤，配合耐腐材料形成双重防护，进一步提升叶片抗腐蚀能力。

表 1 叶片基材耐腐蚀性能提升措施表

措施类型		
推广耐腐合金材料	高压级用镍基合金（如 GY200）或高铬马氏体不锈钢；低压级用沉淀硬化不锈钢（如 17-4PH）	适配不同工况，提升高温耐硫化、抗水蚀点蚀能力，延长叶片使用寿命
采用材料改性技术	对存量叶片做渗铬、渗硼等表面合金化处理，形成耐腐合金层（如渗硼形成 0.2mm 硼化铁层）	低成本提质，提升表面硬度与耐腐蚀性，保留基材韧性，抵御水滴冲击
优化叶片结构设计	改进型线减少水滴撞击，增设空心导叶、隔板环形吸水槽等除湿结构	减少腐蚀诱因，提升抽湿率 30%-40%，形成双重防护，降低水蚀汽蚀

3.2 完善表面防护技术，构建多重防护屏障

针对垃圾焚烧蒸汽中高氯、高硫及固体颗粒共存的复杂腐蚀环境，结合汽轮机不同级段叶片的腐蚀差异的特点，需精准匹配表面防护技术，构建分层分类的多重防护屏障，破解单一防护技术适配性不足的难题，全面提升叶片防护效果与使用寿命。一是推广高端喷涂与熔覆技术，聚焦叶片叶尖、前缘等易受冲击腐蚀的关键部位，针对性采用等离子喷涂、超音速火焰喷涂或激光熔覆技术制备耐腐耐磨涂层，适配不同工况需求。其中超音速火焰喷涂依托高温高速焰流，将 $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2$ 或 WC-Co 粉末颗粒熔融后均匀附着于叶片表面，形成的涂层孔隙率低于 1%、结合强度可达 60MPa 以上，能显著提升叶片抗冲蚀与耐化学腐蚀性能，适配中低压级叶片防护；激光熔覆技术通过高能量密度激光束使司太立合金与叶片基材实现冶金结合，涂层致密无孔隙，可有效抵御高速水滴撞击与腐蚀性介质侵蚀，且激光热输入集中可控，能最大限度减少叶片几何变形，适配带围带结构、沉淀硬化钢等各类叶片的防护需求。二是优化传统防护工艺，摒弃适配性较差的传统技术，对镀铬、氧化处理等工艺进行升级改造，

通过优化工艺参数降低防护层孔隙率,提升涂层与基材的结合力,避免长期运行中出现脱落、开裂问题。采用激光硬化技术替代传统火焰硬化,利用高功率激光器对叶片前缘等应力集中部位进行局部硬化处理,可将基材硬度从 250HV 提升至 500HV 左右,同时在叶片表面形成一定厚度的残余压应力,有效抵消叶片高速旋转产生的拉伸载荷,降低应力腐蚀开裂风险,适配高压级叶片高温工况防护。三是采用复合防护方案,针对垃圾发电厂叶片“磨损-腐蚀”协同损伤的突出问题,构建“底层耐腐涂层+表层耐磨涂层”的复合防护结构,实现双重防护。底层选用镍基耐腐合金材料,重点阻挡 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等腐蚀性介质渗透,保护叶片基材;表层选用硬质合金材料,提升叶片表面硬度与耐磨性,抵御飞灰等固体颗粒高速冲击,两种涂层协同作用,可大幅提升叶片抗复合损伤能力,适配全级段叶片复杂腐蚀工况。

3.3 优化运行工况,减少腐蚀诱因

运行工况波动是加剧垃圾发电厂汽轮机叶片腐蚀的核心诱因之一,垃圾成分不稳定、负荷变化频繁易导致蒸汽参数失衡、腐蚀性介质超标,因此需通过系统性优化垃圾焚烧与汽轮机运行工况,稳定蒸汽品质、严控腐蚀介质含量,从源头遏制叶片腐蚀发生。一是加强垃圾配伍与焚烧控制,建立完善的垃圾进场检测与预处理体系,通过在线检测设备精准把控垃圾中氯、硫等腐蚀性元素含量,对不同品类垃圾进行分类、破碎与科学配伍,避免高氯、高硫垃圾集中焚烧。同时优化焚烧炉燃烧参数,采用分段燃烧、低温燃烧工艺,精准控制炉膛温度与氧气浓度,减少 HCl 、 SO_2 等腐蚀性气体生成;定期开展锅炉受热面清理工作,改良吹灰工艺、合理规划吹灰频次,避免受热面积灰结焦导致的蒸汽温度偏移,保障换热效率与蒸汽参数稳定性。二是稳定蒸汽与水质参数,搭建智能化工况控制系统,结合垃圾热值与机组负荷动态变化,实时调节燃烧配风与给料速度,将主蒸汽温度、压力稳定在额定范围,避免参数波动破坏叶片表面钝化膜。强化给水与凝结水全流程处理,优化给水回热系统,严格把

控水质指标,确保无铜系统给水 pH 值稳定在 9.0-9.6、溶解氧 $\leq 5\mu\text{g/L}$ 、凝结水精处理出水 $\text{Cl}^- \leq 1\mu\text{g/L}$,从根源上抑制电化学腐蚀与点蚀。同时优化冷端系统运行,精准调控凝汽器循环水流量与温度,维持真空度稳定,减少低压缸内气泡生成与破灭频次,有效减轻汽蚀对叶片的冲击损伤。三是优化汽轮机运行策略,规避长期低负荷运行工况,控制排汽容积流量高于临界值,防止倒涡流扩大引发的局部流场紊乱与腐蚀加剧;深度调峰时,将机组负荷控制在不低于 20%THA,减少鼓风效应导致的叶片表面氧化腐蚀。合理规划机组启停流程,减少启停频次,启停阶段采用梯度升温、降温方式,降低叶片热应力,避免表面产生微裂纹为腐蚀性介质渗透提供通道,通过全流程工况优化,最大化减少腐蚀诱因,为叶片防护筑牢运行保障。

4 结语

垃圾发电厂汽轮机叶片的腐蚀防护,直接关系到机组安全稳定运行、运维成本管控与行业绿色规范发展,是保障垃圾焚烧发电高效运营的关键环节。通过优选耐腐蚀基材、创新表面防护工艺、优化运行工况等多维度措施,能够有效抑制叶片腐蚀,延长设备使用寿命。未来需持续深化腐蚀机理研究,推动防护技术迭代升级,助力垃圾焚烧发电产业安全、高效、可持续发展。

参考文献

- [1] 丁慧芳,白洋,刘洪福,郭系陈,徐畅,马硕.垃圾发电厂余热利用技术及其经济性分析[J].节能,2023,42(05):21-25.
- [2] 杨杰,邓德兵,陈伟,王加勇,张鼎.蒸汽空气预热器抽汽量对某垃圾发电厂热力性能影响分析[J].电站系统工程,2023,39(03):30-32.
- [3] 尹成龙.提高生活垃圾焚烧发电厂汽轮机经济效益的研究[J].化工管理,2021,(20):26-27.
- [4] 曲文龙.垃圾发电厂扩容优化改造分析[J].黑龙江电力,2021,43(03):269-273.