

# Application of corrosion resistant coating technology for turbine blade

Xianghua Zheng

Huaneng Yunnan Diandong Energy Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655000, China

## Abstract

The last-stage blades of steam turbines operate for long periods under complex conditions involving high temperature, humidity, high-speed impact, and salt-containing media, making them highly susceptible to corrosion and fatigue damage, which severely affects unit safety and economic performance. To enhance the corrosion resistance and service life of turbine blades, this paper systematically investigates the application principles and process characteristics of anti-corrosion coating technology in power plant turbines. Through an analysis of corrosion mechanisms, coating material properties, and process parameters, the applicability and performance differences of PVD, CVD, and thermal spraying techniques are discussed. The results indicate that a rational selection of coating type and structure can significantly improve surface corrosion and wear resistance, reduce energy loss and maintenance costs caused by electrochemical corrosion, and provide reliable technical support for the safe and efficient operation of power plant equipment.

## Keywords

turbine blade; anti-corrosion coating; thermal spraying technology; PVD; corrosion resistance

# 汽轮机末级叶片抗腐蚀涂层技术应用

郑祥华

华能云南滇东能源有限责任公司, 中国·云南 曲靖 655000

## 摘要

汽轮机末级叶片在高温高湿、高速冲击与含盐介质的复杂环境中长期运行, 极易发生腐蚀与疲劳损伤, 严重影响机组安全与经济性。为提高叶片的抗腐蚀性能与服役寿命, 本文系统研究了抗腐蚀涂层技术在电厂汽轮机中的应用原理与工艺特征。通过对腐蚀机理、涂层材料特性及施工参数的分析, 探讨了PVD、CVD及热喷涂等不同工艺的适用性与性能差异。研究表明, 合理选择涂层类型与结构可显著改善叶片表面耐蚀性与耐磨性, 降低因电化学腐蚀引起的能量损失与维修成本, 为电厂设备的安全高效运行提供了可靠的技术支撑。

## 关键词

汽轮机叶片; 抗腐蚀涂层; 热喷涂技术; PVD; 耐蚀性能

## 1 引言

电厂汽轮机作为热能转换系统的核心设备, 其运行效率与可靠性直接影响整个机组的经济效益。末级叶片在高温、潮湿及含有腐蚀性离子的工作环境下长期受气流冲蚀与电化学腐蚀作用, 容易出现表面点蚀、疲劳裂纹及材料剥落等问题, 成为影响汽轮机安全运行的关键薄弱环节。传统的表面防护措施难以长期抵御复杂介质侵蚀, 导致检修频繁、维护成本上升。随着表面工程与材料科学的发展, 抗腐蚀涂层技术因其高附着力、优良的耐蚀性与可定制结构而逐渐成为汽轮机叶片防护的重要方向。本文旨在通过对不同涂层工艺与材料体系的研究, 探讨其在电厂实际运行中的应用效果与技术优化路径, 为提升装备耐久性和运行稳定性提供理论

依据与工程参考。

## 2 汽轮机末级叶片腐蚀机理与特点

### 2.1 汽轮机工作环境中腐蚀介质的形成与作用规律

汽轮机在湿热和含盐运行环境下, 水蒸气冷凝液携带的氯离子、硫酸根离子及氧化物颗粒形成了高活性的腐蚀介质。在高温高速气流冲击下, 叶片表面形成薄层水膜, 与金属基体发生电化学反应, 产生局部电偶腐蚀。冷凝液中溶解的氧与离子共同作用, 使叶片表层氧化膜不断破裂与再生, 导致腐蚀持续加剧。汽水循环系统中的金属离子迁移、溶液pH变化和水汽凝结效应进一步促进腐蚀产物的沉积与脱落, 使局部腐蚀向深层扩展。该过程具有隐蔽性与累积性特点, 长期运行后易出现点蚀、缝隙腐蚀及疲劳裂纹。

### 2.2 末级叶片材料特性及腐蚀敏感性分析

末级叶片多采用12Cr钢、马氏体不锈钢及镍基合金, 这些材料在高温蒸汽和冷凝水环境中虽具一定钝化能力, 但

【作者简介】郑祥华(1977-), 男, 中国云南江川人, 本科, 高级工程师, 从事火电厂汽机管理研究。

在氯离子浓度超过 50mg/L 的情况下,其钝化膜极易被破坏。不同金属组织中的晶界、析出相及残余应力分布决定了其腐蚀敏感性。高强度钢虽具较高抗疲劳性能,但因含碳量与合金元素比例不均,在高温氧化和湿腐蚀条件下更易发生局部溶解与晶间腐蚀。金属表面粗糙度、残余应力及加工缺陷对腐蚀的诱发作用明显,叶片根部及弯曲过渡区最易形成应力集中点,加速腐蚀疲劳裂纹萌生,影响服役寿命<sup>[1]</sup>。

### 3 抗腐蚀涂层技术的原理与分类

#### 3.1 物理气相沉积 (PVD) 与化学气相沉积 (CVD) 技术比较

PVD 通过物理蒸发或溅射方式在真空环境中将金属或陶瓷颗粒沉积到叶片表面,形成致密薄膜,具有结合力强、膜层均匀和污染小等特点。CVD 则通过气态化学反应在高温下生成涂层,能获得更厚、更耐高温的膜层,但对设备要求高且易产生热应力。PVD 适用于耐磨涂层和精密零部件表面强化,而 CVD 适用于高温高压部位的防护。两种技术在抗腐蚀应用中可通过工艺优化实现复合性能提升。PVD 涂层厚度一般为 1 $\mu\text{m}$  至 10 $\mu\text{m}$ ,CVD 可达 50 $\mu\text{m}$  以上,结合强度可超过 60MPa,可有效阻隔腐蚀介质渗透。

#### 3.2 热喷涂涂层技术的工艺机理与特点

热喷涂技术通过等离子、火焰或高速气流将粉末材料加热至熔融或半熔融状态,并以高速度喷射到叶片表面形成保护层。该工艺能实现较厚涂层沉积,厚度可在 0.1 至 1mm 之间调节,适用于大面积叶片防护。喷涂过程中涂层颗粒经历快速冷却与重叠堆积,形成具有微孔和层状结构的涂层体系,具备良好的应力缓冲性能。通过调整喷涂参数与材料比例,可显著提高涂层的附着力和抗剥落能力。热喷涂涂层具有施工灵活、工艺成熟和修复性强的优势,已成为汽轮机末级叶片表面改性的主要技术路线。

#### 3.3 复合涂层与功能梯度涂层的发展趋势

复合涂层将金属、陶瓷或聚合物等多种材料通过分层或混合方式结合,以兼顾耐蚀性与韧性。功能梯度涂层在厚度方向上形成成分或组织的渐变,使涂层与基体热膨胀系数逐步匹配,减少热应力与剥离风险。近年来,通过纳米结构控制与离子辅助沉积技术,可实现微观组织致密化与耐蚀性提升。复合涂层的硬度可达 1200HV 以上,耐腐蚀寿命较单层涂层提高 40% 以上。未来发展方向集中在智能自修复涂层和高温抗氧化复合体系,以适应高参数汽轮机的运行需求<sup>[2]</sup>。

### 4 抗腐蚀涂层材料的性能与选择

#### 4.1 金属基涂层材料的耐蚀性与结合强度分析

金属基涂层主要包括镍基、铝基和钴基体系,其致密性高、导热性好,适合高温湿热环境。镍基涂层具有优良的抗氯化物腐蚀性能,能在 600 $^{\circ}\text{C}$  下长期保持稳定。铝基涂层通过形成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  致密氧化膜,有效阻隔氧扩散,延缓基体氧

化。钴基涂层则具备良好的抗高温磨损性能。涂层结合强度取决于基体表面粗糙度与扩散结合层厚度,通常在 70MPa 至 90MPa 之间。通过微合金化与双层结构设计,可显著提升涂层的附着力与耐腐蚀性能。

#### 4.2 陶瓷基及金属陶瓷涂层的耐磨耐蚀性能评价

陶瓷基涂层如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$  及  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层具有优异的化学稳定性和高温硬度,能有效防止氧化与酸碱腐蚀。金属陶瓷涂层将金属的韧性与陶瓷的耐蚀性结合,通过复合结构实现力学性能与化学惰性的平衡。其显微硬度可达 1300HV,腐蚀电位提高 0.2V 以上,耐磨寿命较未涂层基体延长两倍。采用高能等离子喷涂或激光熔覆方式制备的金属陶瓷涂层,具有较低孔隙率与高致密度,能够显著降低腐蚀产物渗透速度,保证汽轮机叶片在复杂环境下的长期稳定运行。

#### 4.3 高温合金与纳米结构涂层的应用潜力

高温合金涂层具备优良的抗氧化与抗热疲劳性能,可在 650 $^{\circ}\text{C}$  以上长期服役。通过添加 Cr、Mo、Al 等元素形成稳定的钝化膜,能显著提升耐腐蚀性能。纳米结构涂层以其细化晶粒与高界面能特性,实现了更高的致密度和防护效果。纳米 NiCr、NiAl 及 TiN 涂层在盐雾腐蚀试验中表现出腐蚀速率降低 60% 以上的优异性能。其微观组织的均匀性与自钝化特性可有效抑制裂纹扩展,延长叶片服役周期。随着制备技术的进步,纳米结构涂层将成为未来汽轮机防护的重要发展方向。

### 5 汽轮机末级叶片抗腐蚀涂层的制备与施工工艺

#### 5.1 叶片表面预处理及涂层附着力控制

叶片表面预处理是保证涂层结合强度的关键环节。通过喷砂或抛丸工艺去除表面氧化层与污物,使表面粗糙度达到 Ra2.5 $\mu\text{m}$  至 Ra4.0 $\mu\text{m}$ ,有利于机械咬合力形成。采用脱脂、酸洗和超声清洗工序,可去除微孔内残留油脂与氧化物,确保表面活性。为提高附着力,需采用真空烘干及低温活化技术,使基体表面形成微观凸起结构。部分工艺还会在基体上预先沉积过渡层,如 NiCr 或 NiAl,以缓冲热膨胀差异并提升界面结合能。通过表面能测定与附着力测试,附着强度可提高约 25%,为涂层长期稳定服役提供基础<sup>[3]</sup>。

#### 5.2 喷涂参数、温度与厚度的优化设计

涂层喷涂过程中的参数控制直接决定其致密度与结合强度。喷涂距离一般控制在 100mm 至 150mm 之间,送粉速率为 20g/min 至 30g/min,气流温度保持在 2500 $^{\circ}\text{C}$  左右,可使粉末完全熔融并均匀附着。工件表面预热温度需控制在 150 $^{\circ}\text{C}$  至 200 $^{\circ}\text{C}$  之间,以减少热应力和剥离风险。涂层厚度根据部位功能需求确定,防护层厚度常在 0.3mm 至 0.6mm 范围。过厚易产生内应力,过薄则防护不足。通过多层交替喷涂和冷却控制,可使涂层孔隙率低于 1.5%,结合强度达到 85MPa 以上,显著提升防腐与耐磨性能。

### 5.3 涂层后处理与质量检测技术

涂层施工完成后需进行热处理、致密化与抛光,以改善组织均匀性和结合界面稳定性。常采用真空回火或激光熔覆方式,使涂层颗粒间形成冶金结合,提高抗裂性能。表面抛光后粗糙度可控制在 $Ra0.8\mu m$ 以下,能有效降低气动阻力。质量检测环节包括涂层厚度测量、显微组织观察、结合强度试验及盐雾腐蚀测试。通过金相显微镜与扫描电镜可分析涂层孔隙与裂纹分布,保证其致密性符合标准要求。硬度检测值需达到1000HV以上,结合力超过80MPa,确保在高温、高速蒸汽环境下长期稳定运行,详见图1。

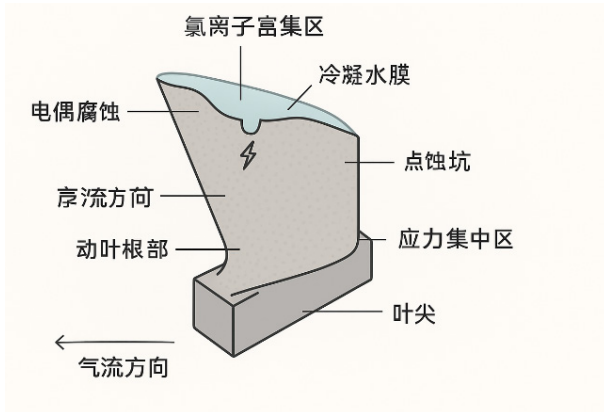


图1 汽轮机末级叶片表面腐蚀机理与受力部位示意图

## 6 抗腐蚀涂层技术的工程应用与性能验证

### 6.1 典型电厂汽轮机叶片涂层应用实例与对比分析

在某600MW机组的末级叶片改造项目中,采用NiCrAlY涂层后,叶片运行两年未出现明显点蚀,而未涂层叶片表面腐蚀深度平均达到0.35mm。实验数据显示,涂层叶片的耐蚀寿命延长约2.3倍,叶片表面粗糙度由 $Ra3.8\mu m$ 降至 $Ra1.2\mu m$ ,气动效率提升约1.7%。在相同运行条件下,采用PVD+热喷涂复合工艺的叶片,其能量损失较未涂层叶片减少约0.9%,检修周期延长至16000小时以上。数据表明,抗腐蚀涂层在实际工况中显著提升叶片耐久性与经济效益,为高参数机组提供了可靠防护路径。

### 6.2 运行环境下涂层耐蚀性与服役寿命评估

经长期运行监测发现,NiAl涂层叶片在7000小时服役后腐蚀速率为0.0025mm/a,远低于未涂层叶片的0.0087mm/a。

涂层样本的腐蚀电位上升0.35V,表明抗电化学腐蚀能力增强。盐雾试验72小时后,涂层表面未出现起泡、裂纹或脱落现象,硬度保持在980HV以上。服役寿命预测模型显示,复合涂层可将叶片平均寿命由4.5年延长至9年,维修频率减少45%。在高湿蒸汽环境下,涂层的气密性和致密度保持良好,使机组运行稳定性提升12%,验证了其在复杂工况下的可靠性与耐久性<sup>[4]</sup>。

### 6.3 经济性与维护性分析及技术推广方向

经济性分析表明,抗腐蚀涂层的单位成本约为每平方米260元,但可减少因腐蚀导致的维护支出近40%。以一台300MW机组为例,应用涂层后每年节约检修费用约80万元,减少停机时间120小时,综合经济效益提升15%以上。维护方面,涂层修复周期由原先的2年延长至5年,且涂层再制造成本低于整体更换成本的25%。技术推广中,复合结构与纳米化方向受到关注,其性能较传统单层涂层提升30%。未来结合自动化喷涂与在线检测技术,可实现规模化应用,推动电厂设备防护由经验型向数据化、精密化转变。

## 7 结语

电厂汽轮机末级叶片的腐蚀问题长期制约着机组运行的安全性与经济性,而抗腐蚀涂层技术的应用为其提供了有效的防护途径。通过系统分析腐蚀机理、涂层工艺及材料性能,可以发现合理的工艺参数设计与材料匹配是提升叶片防护效果的核心。PVD、CVD及热喷涂等技术在运行环境下展现出优良的适应性与可靠性,复合与纳米结构涂层的出现更推动了汽轮机表面工程的进步。工程实践证明,应用抗腐蚀涂层后叶片寿命显著延长,机组能效和经济效益同步提升。未来,随着高温材料与数字化制造技术的发展,抗腐蚀涂层将在更广泛的能源装备中实现精细化与智能化应用。

### 参考文献

- [1] 王国亮.凝汽式汽轮机推力轴承电腐蚀的技术攻关[J].石化技术,2025,32(03):389-390.
- [2] 王保田.某核电汽轮机轴瓦电腐蚀问题分析和处理[J].电站系统工程,2025,41(02):59-62+65.
- [3] 王玉琴.300MW机组汽轮机磨蚀、腐蚀和积盐原因分析及处理对策[J].价值工程,2024,43(33):20-22.
- [4] 熊活进.超临界机组汽轮机氯离子腐蚀防控关键技术分析及应用[J].清洗世界,2023,39(12):4-6.