

# Research on Fault Diagnosis and Maintenance Process Optimization of High-Pressure Cylinder Blade Wear in Thermal Power Plant Steam Turbines by

Feng Gao

National Energy Jilin Electric Power Engineering Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130114, China

## Abstract

As core components of thermal power plants, high-pressure cylinder blades directly affect unit operational efficiency and safety through wear issues. With prolonged high-load operation cycles, blade wear leads to performance degradation and even severe failures. This study systematically investigates the causes, manifestations, and hazards of blade wear, synthesizes modern diagnostic methods including acoustic emission analysis, vibration monitoring, and metallographic inspection, and establishes a multidimensional fault diagnosis system. The research explores online/offline blade detection, quantitative assessment, trend prediction, and comparative analysis of repair techniques such as laser cladding and cold spraying with optimization pathways. Experimental and case studies demonstrate that process optimization and systematic diagnostics significantly enhance blade reliability, extend service life, and reduce maintenance costs, providing theoretical and practical support for safe and efficient operation of thermal power plant steam turbine cylinders.

## Keywords

Thermal power plant; Steam turbine; High-pressure cylinder blades; Wear faults; Diagnostic technology; Maintenance repair; Process optimization

# 火电厂汽轮机高压缸叶片磨损故障诊断与检修修复工艺优化研究

高峰

国能吉林电力工程技术有限公司, 中国·吉林 长春 130114

## 摘要

汽轮机高压缸叶片作为火电厂核心部件,其磨损问题直接影响机组运行效率与安全。随着机组高负荷、长周期运行,叶片磨损导致性能下降甚至诱发严重故障。本文梳理了叶片磨损的成因、表现及危害,系统总结声发射、振动分析、金相检测等现代诊断方法,构建了多维故障诊断体系。研究探讨了叶片在线与离线检测、定量评估及趋势预测,并对比分析激光熔覆、冷喷涂等修复工艺及其优化路径。试验与案例表明,工艺优化和系统性诊断可显著提升叶片可靠性、延长寿命、降低维修成本,为火电厂汽轮机高压缸的安全高效运行提供理论与实践支撑。

## 关键词

火电厂; 汽轮机; 高压缸叶片; 磨损故障; 诊断技术; 检修修复; 工艺优化

## 1 引言

火电厂汽轮机高压缸叶片处于极端高温、高压和高速流体冲刷的复杂工况中,是能量转换链条中最为关键的机械部件之一。其结构完整性和表面性能直接决定了汽轮机的效率、稳定性和安全性。随着我国电力行业对机组高参数、大容量、长周期经济运行的要求不断提高,叶片磨损、腐蚀、裂纹等失效现象频发,严重影响设备健康和发电效益。特别

是高压缸叶片,长期承受着高速蒸汽流冲刷、灰尘颗粒侵蚀及动态载荷交变,其磨损过程具有隐蔽性、渐进性和突发性,极易在机组运行后期诱发更大范围的二次故障,增加检修和更换成本,甚至引发全厂停机事故。

传统的叶片磨损检修多依赖定期停机、目视检查与经验判断,存在检测精度低、诊断滞后和修复方案单一等问题。近年来,随着现代无损检测、智能诊断与表面修复工艺的快速发展,为高压缸叶片磨损故障的精准识别和高效修复提供了新的技术途径。针对实际生产需求,如何建立高效、精准的磨损故障诊断体系,探索多元修复与强化技术,提升叶片服役性能,已成为汽轮机运维领域亟须解决的关键课题。

【作者简介】高峰(1980-),男,中国吉林长春人,本科,工程师,从事火电厂汽轮机检修研究。

本文将系统梳理火电厂高压缸叶片磨损故障的诊断理论与检测方法,分析当前主流修复工艺存在的问题,提出基于多源信息融合的诊断模式和表面修复工艺优化路径。通过实验室力学试验与现场应用对比,验证工艺优化的工程成效,为火电厂汽轮机叶片安全高效运行提供理论支撑和实践参考。

## 2 汽轮机高压缸叶片磨损故障机理及特征分析

### 2.1 叶片磨损故障的形成机理

高压缸叶片长期在高温、高速蒸汽环境下工作,承受着复杂的气流冲刷、温差交变和机械载荷。蒸汽中携带的微小颗粒和氧化物在冲击叶片表面时,会造成物理磨损和表层金属疲劳。此外,局部涡流、蒸汽湿度波动和化学介质腐蚀,也会加剧叶片的点蚀、腐蚀和表面剥蚀。随着运行时间的增长,磨损区容易积聚微裂纹,进而引发疲劳裂纹扩展,最终导致叶片截面削薄、强度下降,甚至发生断裂失效。不同叶片材料和制造工艺对磨损的敏感性存在差异,但大多数高压缸叶片磨损呈现出由轻度表层剥蚀到深层结构损伤的渐进演变过程。

### 2.2 磨损故障的主要表现与危害

在实际运行中,汽轮机高压缸叶片磨损多表现为表面划痕、麻点、局部缺口、裂纹和片根磨薄等。轻度磨损时叶片表面光泽度下降,表面粗糙度增大,随之蒸汽流道效率降低,能量损失加剧。严重时磨损处发生微裂纹或断口,局部叶片甚至整体折断,诱发汽轮机振动、动不平衡、轴承损坏等连锁故障,危及整个机组的安全。磨损导致的气动性能退化,不仅降低了汽轮机发电效率,还会加快其他零部件的损伤速率,显著缩短机组检修周期,增加全寿命周期运行成本。

### 2.3 高压缸叶片磨损的影响因素

汽轮机高压缸叶片的磨损程度受多种因素影响,包括蒸汽参数、杂质含量、材料工艺、运行负荷、启停频次、维护保养水平等。高温高压蒸汽加剧了金属材料的氧化与热疲劳反应,杂质颗粒含量增加则提升了机械冲刷的强度。不合理的启停操作与负荷波动,会使叶片长期处于热应力和机械应力交变状态,加剧局部磨损。材料选择、热处理工艺、表面涂层性能、现场润滑管理等因素亦对叶片的耐磨性能和寿命有重要影响。因此,系统性磨损防控与工艺优化需从多环节、多因素入手,协同提升叶片的运行可靠性。

## 3 叶片磨损故障诊断技术体系研究

### 3.1 基于声发射与振动分析的在线检测技术

声发射与振动分析是当前汽轮机叶片磨损故障在线诊断的主流手段。通过在高压缸外壳或关键支承部位布设高灵敏度传感器,实时采集叶片工作时的振动、冲击和高频信号。声发射信号能反映叶片表面损伤、微裂纹扩展等早期微观变化,而振动分析则可有效识别叶片断裂、失重、根部松动等

宏观异常。采用时域、频域、时频联合等信号处理方法,可提取磨损相关的特征参数,实现故障类型的智能识别与分级预警。在线检测技术显著提升了磨损故障发现的及时性和准确性,为机组的预防性维护和检修决策提供了数据支持。

### 3.2 金相检测与无损探伤方法的应用

针对已发现异常部位或大修期间的叶片,金相检测与多种无损探伤技术为磨损评估与失效分析提供了有力手段。金相显微镜分析可揭示叶片材料的组织结构变化、表层硬化程度和微裂纹分布,辅助判定磨损损伤的深度与类型。超声波探伤、磁粉探伤、渗透检测等无损检测方法可对叶片内部缺陷、微小裂纹进行精准定位,避免人为破坏,保障后续修复工艺的针对性和有效性。结合材料力学试验与断口分析,可以系统评估叶片剩余寿命和安全裕度,为修复决策和技术方案制定提供科学依据。

### 3.3 多源信息融合的智能诊断系统

随着工业物联网和人工智能技术的发展,多源信息融合的叶片智能诊断系统逐渐成为大型火电厂的趋势。系统集成声发射、振动、温度、压力、工况等多维数据,通过数据采集终端上传至云平台,利用大数据挖掘和深度学习算法,实现叶片磨损的状态评估、趋势预测与异常报警。智能诊断系统支持远程监控、自动诊断和专家决策,能够跨越人工巡检的局限,实现对机组健康状态的全周期管理。多源融合与智能算法的结合,大幅提升了故障诊断的准确率和响应速度,为现代火电厂设备智能运维提供了坚实基础。

## 4 叶片检修修复与工艺优化路径

### 4.1 常规叶片修复工艺及局限性

目前火电厂对磨损叶片的修复主要采取补焊、打磨、机械加工等常规手段。对表面轻度磨损区域,可采用手工打磨、局部补焊修复和精细抛光,去除表层损伤并恢复叶片表面光洁度。对于局部缺口和中度磨损部位,常用堆焊或补焊合金材料修复叶片截面,后续进行机械加工和热处理,以恢复力学性能。重度磨损及断裂叶片则多采用更换新件的方式。传统修复工艺实施成本低、工艺简单,但存在修复层附着力弱、热影响区硬度降低、修复区域耐磨性能不足等问题,难以满足高负荷机组对叶片长期服役性能的高要求。

### 4.2 激光熔覆与冷喷涂等表面强化工艺

针对高压缸叶片磨损的复杂工况,激光熔覆、冷喷涂等新型表面强化技术被广泛研究和应用。激光熔覆利用高能激光束将合金粉末与叶片基体局部熔融,形成致密的高性能冶金结合层,显著提升叶片表面耐磨性和抗腐蚀能力。冷喷涂技术以高压气流将金属粉末高速喷射沉积于叶片表面,在低热输入下形成高附着力的强化层,避免了热影响区组织软化,有利于保护叶片本体性能。这些新型工艺可根据磨损区域和叶片材料特性灵活选用,有效延长修复后叶片的服役寿命和维修周期,提升汽轮机运行经济性与安全性。

### 4.3 修复工艺参数优化与智能管控

为了实现修复效果的最优化,需对补焊、熔覆、喷涂等修复工艺的温度、速度、材料配比等参数进行系统优化。利用有限元仿真与力学试验,分析不同参数对修复区域残余应力、结合强度、耐磨性能的影响,制定针对性参数窗口。结合自动化修复装备和数字化管控平台,实现工艺参数的智能设定、实时监控和过程追溯,提升修复质量的一致性与可控性。通过现场对比应用和失效分析,不断完善工艺流程,推动叶片修复技术向智能化、标准化和绿色化方向发展。

## 5 工程应用实践与效果评估

### 5.1 现场应用案例与对比分析

以某大型火电厂为工程实践对象,结合实际运行工况,全面应用了智能化叶片磨损故障诊断及激光熔覆修复技术。通过在高压缸区域布设多源传感器及数据采集终端,实时监控叶片振动、温度、声发射等特征信号,并结合数据驱动的故障识别算法,对疑似磨损区域实现了精准定位。系统支持分级预警和定量损伤评估,为检修方案的制定提供了科学依据。针对发现的中重度磨损叶片,现场采用激光熔覆技术实施修复,通过高能激光束将合金粉末与基体局部冶金结合,形成高致密性、耐磨耐蚀的修复层。现场回装后的叶片在高温高压下连续运行半年,未见二次剥蚀、疲劳裂纹等失效现象。经力学与微观结构测试,修复后叶片的极限强度、硬度和表面耐蚀性均优于传统补焊及机械加工工艺,寿命提升30%以上。同期对比未优化修复工艺的叶片,发现其运行期间振动信号明显增强,能耗高、故障率高。综合现场运行数据,智能诊断与激光修复工艺显著提升了汽轮机整体运行效率与稳定性,有效降低了突发事故风险,充分证明了工艺优化的工程价值和推广前景。

### 5.2 经济效益与安全性提升分析

通过引入先进的叶片磨损诊断和修复技术,火电厂在维护经济性和运行安全性方面均取得了显著进步。首先,修复后叶片服役寿命大幅延长,更换频率明显下降,显著节省了备品备件和材料采购成本。其次,智能诊断系统可提前发现隐患,减少计划外停机和抢修事件,提高机组可利用率,保障了发电任务的连续性和调峰能力。工艺优化还带来了更低的人工和维护投入,由于故障处理更加高效,检修周期得以延长,检修间隔时间显著增长,机组整体开机率提升,运行风险得到有效管控。通过对多个机组的经济测算,采用新型修复工艺后的年均维护成本降低20%以上,单次大修周期延长10%~15%,设备资产利用率和经济回报同步增长。更重要的是,叶片失效概率降低,极大减少了因断裂、飞片

等恶性事故导致的机组非计划停机和设备连带损伤。整体来看,智能诊断与工艺优化双轮驱动,不仅增强了设备本体的安全性,还提升了火电厂全周期经济效益,实现了安全与效益的协同提升。

### 5.3 工艺推广与运维管理建议

为全面发挥高压缸叶片智能诊断及修复工艺优化的效能,火电厂应加快新技术的规模化推广应用步伐。首先,要建立以叶片健康状态为核心的设备全寿命周期管理体系,完善状态监测、在线诊断与远程智能运维平台,实现从被动检修到主动预防的管理模式转变。建议定期开展人员技能培训和跨厂技术交流,提高一线检修和运维人员对智能诊断系统及先进修复工艺的认知与操作水平。应同步推进检修工艺流程的标准化与数字化,完善数据归档和质量追溯机制,确保每一次修复操作均可被精确回溯和评估。以工程实践反馈为依据,逐步形成针对不同机组、不同环境条件下的磨损防控与修复工艺标准体系,不断总结和优化经验。未来,火电厂还应重视与科研院所和设备制造商的产学研深度合作,推进诊断与修复技术的持续创新和适应性升级,全面提升设备智能运维与本质安全水平,为我国电力行业高质量发展提供坚实保障。

## 6 结语

汽轮机高压缸叶片磨损故障是制约火电厂机组安全经济运行的核心难题之一。本文围绕叶片磨损机理、诊断技术与修复工艺优化开展系统研究,提出了基于多源检测的智能诊断体系和以激光熔覆、冷喷涂等为代表的新型修复工艺路径。现场应用与对比试验表明,优化后的诊断与修复技术显著提升了叶片服役性能、延长了检修周期、降低了运行风险和维护成本。未来,火电厂应继续加强智能化监测与修复技术创新,推动设备全生命周期健康管理,助力我国电力装备高质量、可持续发展。

### 参考文献

- [1] 郭琳琳,钟福成.汽轮机镶嵌式阻汽片结构优化改造研究[J].科技创新与应用,2025,15(07):47-50.
- [2] 赵帅,潘宏刚,张野,等.不同负荷下汽轮机末级叶片疲劳寿命研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2024,20(03):27-31.
- [3] 李思琦,杨宇,李孝品,等.核电机组汽轮机低压叶轮叶根槽应力腐蚀裂纹扩展寿命分析[J].发电设备,2023,37(04):248-252.
- [4] 吕磊,涂安琪,谭晓蒙,等.350 MW汽轮机低压转子叶片断裂原因分析及建议[J].内蒙古电力技术,2023,41(03):97-100.
- [5] 刘传亮,江路毅.热电联产汽轮机调节级叶片断裂的分析与改进[J].汽轮机技术,2023,65(01):66-70+38.