

汽轮机叶片损伤的检修与预防方法研究

王哲

大唐七台河发电有限责任公司，黑龙江 七台河 154622

DOI:10.61369/EPTSM.2026020028

摘 要： 本研究旨在系统阐述汽轮机叶片损伤检修与预防的三大目的（保障安全、提升经济性、建立标准体系），并提出针对性技术方案。核心方法在于构建“无损检测－分类修复－质量验证”的检修闭环，以及融合“运行优化－设计强化－智能预警”的预防体系。应用结果表明，该方法能显著提升机组可靠性，使叶片损伤率降幅超过60%，有效延长服役周期。最终结论指出，坚持“检防结合、预防为主”，建立一体化叶片全生命周期健康管理体系，是实现汽轮机安全、经济、长周期运行的必由之路。

关 键 词： 汽轮机叶片；损伤检修；预防策略；无损检测；状态监测

Research on Maintenance and Prevention Methods of Turbine Blade Damage

Wang Zhe

Datang Qitaihe Power Generation Co., Ltd., Qitaihe, Heilongjiang 154622

Abstract： This study systematically elucidates the three objectives of turbine blade damage maintenance and prevention (ensuring safety, enhancing economic efficiency, and establishing a standard system), while proposing targeted technical solutions. The core methodology involves constructing a maintenance closed-loop system of "non-destructive testing-classified repair-quality verification" and integrating a preventive framework combining "operational optimization-design reinforcement-intelligent early warning". Application results demonstrate that this approach significantly improves unit reliability, reduces blade damage rates by over 60%, and effectively extends service life. The final conclusion emphasizes that adhering to the principle of "combining inspection with prevention, prioritizing prevention" and establishing an integrated blade lifecycle health management system is the essential path to achieving safe, economical, and long-term turbine operation.

Keywords： turbine blade; damage repair; preventive strategy; non-destructive testing; condition monitoring

引言

汽轮机叶片属于核心高速部件，长时间承受复杂应力及介质冲蚀，存在损坏情况时会危及机组的安全稳定运行，还会带来大幅经济损失。鉴于此关键问题，系统探究其检修及预防方法具备重要的工程实用价值^[1]。本文期望通过明晰检修预防目标，全面整理无损检测、分类修缮等技术手段，详细剖析运行优化、状态监测等预防措施，并对应用成果加以分析，从而形成包含叶片全生命时段的系统性解决方案，为提升汽轮机运行可靠性与经济性提供理论依据与实践指导。

一、汽轮机叶片损伤的检修与预防目的阐述

（一）评估确保汽轮机安全稳定运行的核心目的

汽轮机叶片的失效并非孤立事件，其引起的一系列连锁反应，这些反应会危及整个发电系统的安全稳定运行。当叶片损伤发展到断裂程度时，高速旋转下的动平衡会被严重破坏，这会造

成机组剧烈震动，动静部件发生碰撞，从而必定引发非计划停

机；如果损伤碎片穿透汽缸，就有可能变成灾难性事故，致使设备严重受损，甚至危及人员安全^[2]。因此，系统性的检修和预防工作重点在于积极识别并解决叶片潜在的损伤，从源头上规避可能导致重大安全事故的风险，进而为电力供应的连续性和机组的本质安全形成坚实基础。

（二）评估延长叶片服役寿命与降低维护成本的经济目的

汽轮机叶片更换属于一项成本很高的系统工程，其经济压力

远远超出叶片自身价值。单支或者整级叶片的备件采购费用常常达到几十万到数百万元，而且还要加上完成更换所需长达数周的停机时间、设备拆解与重新组装的人工成本，还有由于发电中断而造成的直接收入损失。单纯等到损坏后再去更换，在经济上非常不合理。应该执行科学的积极检查和预防措施，通过精确的状态评定，及时开展局部修复并改善寿命管理，最大程度地延长已有叶片的有效使用期限，把昂贵的被迫更换成本变成可以计划、可以掌控的预防性维护投入，达成全生命时段维护成本大幅缩减，电厂经济效益的实质性提升。

（三）评估形成标准化检修预防体系的管理目的

在传统维护模式当中，汽轮机叶片的检修决策以及操作质量很大程度上依靠技术人员自身经验和判断，造成标准不统一、流程不规范、难以评判效果，管理方面存在很大的不确定因素和风险。创建标准化检修预防体系的主要管理目标就是要促使从“经验引领”的随机性维修朝着“体系引领”的科学化管理过渡，把成熟的检测技术、修缮工艺以及预防策略固定成清晰的技术标准、作业程序和管理规范，形成包含叶片全生命时段健康管理的标准化工作体系^[3]。这样就能保证每次维护活动的质量和效果是可以预见、可以追溯的，而且能够做到从被动回应式的维护向积极预测性的维护发生根本性的转变，给电厂创建现代、精准、可持续的设备资产管理模式提供坚实的支撑。

二、汽轮机叶片损伤的主要检修方法

（一）评估损伤叶片的无损检测与状态评估技术

要想精准评定叶片损伤情况，就务必综合利用大量无损检测技术。超声检测可用于查找叶片内部裂纹、夹杂之类的瑕疵，不过对于表面及近表面的瑕疵不太灵敏。渗透检测能把表面开口性瑕疵直观显现出来，其操作较为简单，但对工件表面有着较高要求。涡流检测针对导电材料而言，对表面及近表面裂纹反应很灵敏，可是并不适合非导电材料。而内窥镜检测合适于狭小空间执行直接目视观察，可以察觉到一些宏观瑕疵却不能实施量化处理^[4]。技术的选择要按照损伤部位是否易于到达、叶片材质特点以及预期存在的瑕疵种类来综合评估，一般会用两种或者更多的方法互相验证，从而保证评价结果既全面又准确。

（二）评估基于损伤类型的在机与离机修复工艺

若汽轮机在潮湿环境下工作，则周围充满着大量的水蒸气，水蒸气中所含的氧气会与构成叶片的活跃金属发生得失电子的化学反应，即人们通常所说的氧化还原反应，对叶片造成一定程度的腐蚀，使其强度下降，引发断裂。针对不同损伤类型需采用相应修复工艺：浅表腐蚀坑要通过精细打磨抛光来去除应力集中现象；微裂纹应采用钨极惰性气体保护焊这种精密焊接工艺，并严格控制热输入以防产生二次损伤；水蚀区域一般用等离子堆焊或者激光熔覆工艺来做尺寸的重新获取和加强；如果出现断裂失效情况就要更换叶片。修复材料应当选用与原材相适应或者性能更好的专用合金，而且在修复过程中要严格控制层间温度、热影响区范围等参数，保证修复部位的力学性能及其服役寿命符合

要求。

（三）评估检修后的性能验证与质量控制标准

检修之后的质量验证对于保证修复效果十分关键。动平衡检测会以高速对修复完毕的转子部件执行平衡校验，使得振动指标控制在允许范围内；尺寸复核必要采用三坐标测量这种高精度方法来核实修复区域的几何精度，格外是气动型线是否被准确复原；探伤复查还要对修复区域以及热影响区开展全面的无损检测，杜绝出现新的瑕疵^[5]。各个验证阶段都应该按照行业标准制定清晰的质量评定标准，并创建完整的质量文档，做到检修流程的可追溯性。唯有经过所有质量验证的叶片才具备投入使用的资格。

三、汽轮机叶片损伤的关键预防方法

（一）评估优化运行工况与启停操作预防应力损伤

运行优化属于预防叶片损伤的关键举措。在实际运作时，要形成起完备的运行参数控制体系，把主蒸汽的压力和温度限制在设计范围内，免除因超参数运行而使叶片承受更多的离心力与热应力；还要找出机组的低负荷共振区域，并规避之，免除叶片在某些工况下产生共振疲劳^[6]。在机组启停期间，应该按照经过精确计算得出的温升温降曲线来执行，一般而言，温升率被控制在1.5℃/分钟~2.0℃/分钟，温降率则处于1.0℃/分钟~1.5℃/分钟这个合理区间之内，从而减轻热冲击引发的疲劳损害；也要重视汽水品质的管理，保证给水质量达标，阻止腐蚀性介质以及固体颗粒给叶片表面带来冲刷破坏。通过这些细致的运行控制手段，可以从根本上大幅缩减叶片所承受的各种应力程度，有效地推迟损伤的出现及其进程。

（二）评估改进叶片设计与表面强化工艺预防固有缺陷

要想达成主动预防的目的，就务必要从设计制造这个层面去优化叶片的性能。利用先进的三维气动设计技术来优化叶片的型线，从而改善流场的分布状况，并减小气动激振力；在挑选材料的时候，可以选用钛合金TC4、镍基超合金IN718这种高强度又耐腐蚀的材料，其屈服强度能够达到900MPa之上，这样就能明显加强叶片的抗疲劳性能。至于表面强化工艺，激光熔覆技术会用高能激光束把特别的合金粉末熔覆到叶片表面，生成结合强度很高而且厚度可以控制的优化层；渗硼处理是在高温条件下让硼元素渗进金属表面，进而形成硬度达到1500HV~2000HV的硼化物层；等离子喷涂技术能够给叶片表面创建起耐磨耐蚀的陶瓷涂层。这些优化技术可以使叶片关键部位表面的硬度增大2~3倍，其耐磨寿命增长3~5倍，进而突出增强叶片抵御复杂工况损害的能力。

（三）评估建立状态监测与预警系统实现早期干预

创建智能化的状态监测及警报系统，是做到预测性维护的关键所在。在线振动监测系统需在机组关键部位设置加速度传感器，以随时监测振动速度的有效值，一般而言，报警阈值被设定为基线值的1.5倍，而停机阈值则为基线值的2.5倍；声发射监测系统通过收集叶片损伤时产生的高频应力波信号，可以察觉到微

米级别的裂纹产生情况；定时开展的性能评定涵盖效率评定、红外热成像检测等内容，这些能够找出性能下降的趋势^[7]。系统应该运用先进的数据分析算法，把时域分析、频域分析和趋势分析融合起来的办法，如果振动幅值连续3个小时超出报警阈值，或者声发射事件率在24小时内上升超过30%，就会自动启动预防性维护的工作单。依靠这种多层次、智能化的监测警报体系，可以在损伤初期发出警报，给计划性检修留出足够的时间，从而有效地防止非计划停机事故的发生。

四、方法应用的结果分析与整体结论

（一）评估检修方法实施后的可靠性提升结果

系统化检修方法的执行使得汽轮机机组的运行可靠性得到很大加强。某电厂350MW机组采用精密无损检测和激光焊接修补以后，关键监测点的振动值从原来的56μm缩减到25μm，缩减比例约为55%，这完全符合安全运行的标准；该机组的连续安全运行时间也从原先的平均6000小时增长到8500小时，增幅达到41.7%。另一个案例显示，利用等离子堆焊修复水蚀叶片的机组，在检修完毕后的3000小时运行阶段，并没有出现过因为叶片问题而产生的异常振动或者非计划减负荷情况^[8]。这些量化数据很好地表明了科学检修方法对于改善设备状况、提升运行稳定性方面的有效性。

（二）评估预防措施执行下的损伤率下降结果

全面执行预防措施之后，叶片损伤的发生率以及相关非计划停运次数明显缩减。统计资料表明，某发电集团推行运行优化和状态监测系统后，其旗下6台同类型机组的叶片损伤年发生率由之前的0.48次/台缩减到0.15次/台，降幅达60%以上；由于叶片问题引发的非计划停运次数从每年2.5次减到0.8次，同样超过60%的幅度；特别是装有表面加强涂层的末级叶片上，水蚀穿孔故障的间隔时间从原先的18000小时扩大到45000小时之上。为更直观地展示上述综合预防措施的实施成效，现将关键指标的对比如下（见表1）。这些数据有力地验证了预防措施在降低故障率、减少非计划停运方面的实际效果。

表1 评估预防措施实施前后关键指标对比

评估指标	实施前	实施后	效果变化
叶片损伤年发生率 (次/台)	0.48	0.15	下降评估 > 评估 60%
非计划停运次数 (次/年)	2.5	0.8	下降评估 > 评估 60%
水蚀穿孔故障间隔时间 (小时)	18,000	> 评估 45,000	延长评估 > 评估 150%

表1数据清晰表明，预防体系在降低故障频率与提升部件耐久性两方面均取得了显著效果。这种多指标的同步优化，从量化角度强有力地证实了构建系统性预防策略的工程价值与实践必要性。

（三）评估综合提升机组经济性与安全性的总体结论

本研究通过系统分析显示，要想有效地管理汽轮机叶片损伤，就务必采取检修与预防关联的综合策略。精准的无损检测和修缮技术可及时复原设备功能，而且，运行优化、设计改进以及智能监测之类的预防手段可以从源头把控风险。应用数据显示，这种一体化管理方案能突出增强机组的可靠性，减低维护成本，保证运行安全^[9]。创建包含叶片整个生命时段的标准化健康维护体系，是达成汽轮机长期、经济又安全运行的最佳路径，对于改善电厂的整体维护水平有着非常关键的工程实践意义。

五、结语

研究表明，汽轮机叶片损伤的成因具备确切的多因素耦合特性，其检修与预防原理有着全面的工程指导意义。研究成果表现出从损伤检测到积极预防的全过程运作规律，表明创建“运行优化-设计强化-智能监测”三位一体的预防体系可有效减小叶片故障率，降幅超过60%，此规律适合同类型旋转机械的维护管理。相比传统研究侧重于单一技术领域，本文创新性地塑造起牵涉全生命时段的系统性解决方案，具备突出的理论集成价值^[10]。然而，该研究针对极端工况下材料性能下降的微观机理还需进一步深入探究。未来建议融合数字孪生技术来形成更为精确的叶片寿命预测模型，这将为智能电站的建设提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 罗烽. 垃圾焚烧发电厂汽轮机转子叶片损伤研究分析 [J]. 电力设备管理, 2024, (23): 294-296.
- [2] 艾郑, 孙力. 电厂汽轮机检修及维护技术要点研究 [J]. 电工技术, 2025, (03): 225-227+230.
- [3] 章志龙. 火电厂汽轮机运行故障处理技术探究 [J]. 中国设备工程, 2025, (02): 205-207.
- [4] 李传海, 葛云双, 翟观文. 火力发电厂汽轮机设备安装检修技术分析 [J]. 清洗世界, 2024, 40(10): 181-183.
- [5] 石钰. 汽轮机调节级叶片优化及应用分析 [J]. 家电维修, 2024, (09): 104-106.
- [6] 沈琦. 状态检修在汽轮机检修中的应用研究 [J]. 设备管理与维修, 2023, (14): 82-83.
- [7] 许恒, 赵洪岗, 杜伟. 状态检修在汽轮机检修中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (23): 78-80.
- [8] 张岩, 袁明玉. 热电厂汽轮机的检修及安全运行分析 [J]. 电站系统工程, 2021, 37(03): 53-54.
- [9] 李功甲. 火电厂机组汽轮机本体检修分析 [J]. 科技资讯, 2020, 18(06): 68-69.
- [10] 任飞. 论状态检修在汽轮机检修中的应用 [J]. 内燃机与配件, 2019, (24): 161-162.