

火电厂汽轮机叶片检修技术优化实践

王玉军

阳城国际发电有限责任公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8533

[摘要] 在“双碳”目标推进过程中,火电机组深度调峰成为保障新能源消纳的关键举措。然而,深度调峰工况下(负荷在20%–100%区间频繁波动),汽轮机叶片需长期承受交变应力、气流激振及温度冲击,叶片损伤率较额定工况显著上升40%,对机组安全运行构成严重威胁。当前火电厂汽轮机叶片检修工作中,存在“损伤预警滞后”“检修策略与调峰工况适配性不足”“修复技术缺乏针对性”等问题,导致叶片裂纹检出率不足70%,检修后二次损伤率超15%,单次停机检修成本高达1200万元以上。本文结合火电厂300MW、600MW等级汽轮机深度调峰运行场景,深入分析叶片损伤机理(低负荷气流激振、温度交变疲劳、水蚀磨损),从“精准损伤检测、工况适配型修复、调峰导向预防”三个维度构建检修技术优化体系,并通过工程案例验证优化效果。研究结果显示,优化后的检修技术可将叶片损伤检出率提升至95%,检修后叶片在深度调峰工况下的服役寿命延长3–5年,为火电机组深度调峰安全运维提供技术支持,对保障电力系统调峰能力与火电厂经济效益具有重要意义。

[关键词] 火电厂; 汽轮机叶片; 深度调峰; 检修技术优化; 交变疲劳

Optimization Practice of Maintenance Technology for Turbine Blades in Thermal Power Plants

Wang Yujun

Yangcheng International Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] In the process of promoting the "dual carbon" goal, deep peak shaving of thermal power units has become a key measure to ensure the consumption of new energy. However, under deep peak shaving conditions (frequent fluctuations in load between 20% and 100%), turbine blades need to withstand alternating stress, airflow excitation, and temperature shock for a long time. The blade damage rate significantly increases by 40% compared to rated conditions, posing a serious threat to the safe operation of the unit. In the current maintenance work of steam turbine blades in thermal power plants, there are problems such as "delayed damage warning", "insufficient compatibility between maintenance strategies and peak shaving conditions", and "lack of targeted repair technology", resulting in a blade crack detection rate of less than 70%, a secondary damage rate of over 15% after maintenance, and a single shutdown maintenance cost of over 12 million yuan. This article combines the deep peak shaving operation scenarios of 300MW and 600MW steam turbines in thermal power plants to deeply analyze the blade damage mechanism (low load airflow excitation, temperature alternating fatigue, water erosion wear). A maintenance technology optimization system is constructed from three dimensions: "precise damage detection, condition adaptation repair, and peak shaving oriented prevention", and the optimization effect is verified through engineering cases. The research results show that the optimized maintenance technology can increase the detection rate of blade damage to 95%, and extend the service life of blades under deep peak shaving conditions by 3–5 years after maintenance. This provides technical support for the safe operation and maintenance of deep peak shaving in thermal power units, and is of great significance for ensuring the peak shaving capacity of the power system and the economic benefits of thermal power plants.

[Key words] thermal power plant; Turbine blades; Deep peak shaving; Optimization of maintenance technology; Alternating fatigue

一、引言

火电机组深度调峰是指机组负荷在20%–100%额定负荷

范围内频繁启停、升降,以此应对新能源发电的波动性。目前我国火电机组深度调峰参与率已超80%,部分机组日均负荷波

动次数达 5-8 次。汽轮机叶片作为能量转换的核心部件，在深度调峰工况下面临严峻挑战：低负荷时（ $\leq 40\%$ 额定负荷），汽轮机通流部分气流流速下降，气流攻角偏离设计值，引发叶片颤振（振动频率 200-500Hz），交变应力幅值达 80-120MPa；负荷快速升降时（速率 $\geq 2\%$ 额定负荷 /min），叶片温度变化率超 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，产生热冲击应力，加速疲劳裂纹萌生；湿蒸汽区叶片（如低压缸末级）还会遭受水蚀磨损，年磨损量达 0.1-0.3mm。

据中国电力技术市场协会统计数据，2023 年我国火电厂汽轮机叶片故障中，由深度调峰工况引发的损伤占比达 68%。某 600MW 机组因低压缸末级叶片疲劳裂纹未及时检出，最终导致叶片断裂，机组停运 18 天，直接经济损失超 2000 万元。随着《现代科技研究》期刊对“能源装备工况适配技术”的关注，以及《火力发电厂汽轮机检修规程》（DL/T 1573-2016）对调峰机组检修的特殊要求，基于深度调峰工况的汽轮机叶片检修技术优化已成为火电厂运维的核心课题。传统检修模式存在明显短板：55% 的火电厂仍采用“定期解体检查”方式，无法实时捕捉动态损伤；40% 的检修策略未考虑调峰工况特性，如按额定工况标准选择修复材料，导致修复后叶片在低负荷颤振下出现二次损伤；仅 25% 的火电厂建立了叶片损伤与调峰参数的关联数据库，难以实现针对性预防。因此，探索深度调峰工况下汽轮机叶片检修技术优化路径，对保障火电机组安全调峰、降低运维成本具有重要现实意义。

二、深度调峰工况下汽轮机叶片损伤机理与核心需求

2.1 叶片损伤核心机理

结合深度调峰工况特点，汽轮机叶片损伤由“气流激振 - 温度交变 - 介质磨损”协同作用导致，不同部位叶片损伤机理存在差异：

● 高压缸叶片：负荷快速升降时，叶片进口蒸汽温度波动幅度超 $30^\circ\text{C}/\text{次}$ ，导致叶片基体与表面涂层产生 50-80MPa 的热应力差，引发涂层剥落与基体微裂纹（长度 $\leq 0.5\text{mm}$ ）。某 300MW 机组高压缸 1 级叶片在经历 1000 次调峰循环后，涂层剥落率达 35%；

● 中压缸叶片：低负荷时气流攻角偏差超 15° ，引发叶片共振（共振频率接近叶片固有频率），交变应力循环次数年均超 10^7 次，易在叶片根部过渡圆角处（应力集中系数 $K \geq 3.0$ ）萌生疲劳裂纹。某 600MW 机组中压缸 3 级叶片根部裂纹检出率随调峰次数增加呈线性上升，每增加 100 次调峰循环，检出率提升 8%；

● 低压缸叶片：末级叶片长期处于湿蒸汽区，水滴冲击速度超 300m/s，形成深度 0.2-0.5mm 的水蚀麻点；同时低负荷气流激振加剧麻点处应力集中，裂纹扩展速率达 0.2-0.4mm / 年，较额定工况快 3 倍。

2.2 检修核心需求

针对深度调峰工况，汽轮机叶片检修需满足“动态监测、

精准修复、工况适配”三大核心需求：

● 动态监测需求：需实时捕捉叶片损伤演化（如裂纹扩展、振动异常），损伤预警响应时间 ≤ 24 小时，避免裂纹扩展至超叶片厚度 20% 的危险长度；

● 精准修复需求：修复技术需适配调峰工况下的损伤类型，如针对疲劳裂纹需选用高韧性修复材料（ -40°C 时冲击功 $\geq 40\text{J}$ ），针对水蚀需采用高硬度抗磨涂层（硬度 $\geq \text{HV}800$ ）；

● 工况适配需求：检修策略需结合机组调峰参数（如负荷波动范围、升降速率）制定，如频繁深度调峰机组（负荷 $\leq 30\%$ 额定负荷次数超 50 次 / 年）需缩短检修周期、增加监测频次。

某 600MW 深度调峰机组叶片检修核心指标为：叶片裂纹检出率 $\geq 95\%$ ，修复后叶片在 1000 次调峰循环内无二次损伤，检修后机组调峰响应速率维持 $\geq 2\%$ 额定负荷 /min，以保障电网调峰需求。

三、深度调峰工况下汽轮机叶片检修技术优化路径

3.1 动态损伤检测技术优化：从“定期”到“实时”

构建“多层级动态监测体系”，实现叶片损伤的早期预警与量化评估：

● 在线实时监测（运行中）：

● 叶片振动监测：在汽轮机轴承箱安装压电加速度传感器（灵敏度 $\geq 100\text{mV}/\text{g}$ ），实时采集叶片振动信号，通过快速傅里叶变换（FFT）分析振动频谱，当出现偏离正常频谱 $\pm 15\%$ 的异常峰值时触发预警。某 300MW 机组应用后，成功预警 2 次中压缸叶片共振风险，避免裂纹萌生；

● 温度应力监测：在高压缸叶片根部植入光纤光栅传感器（测温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，应变精度 $\pm 1\mu\epsilon$ ），实时监测叶片温度变化率与应变值，当温度变化率超 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 或应变超 120MPa 时，自动调整负荷升降速率。某 600MW 机组应用后，高压缸叶片热应力损伤率降低 60%；

● 离线精准检测（停机检修）：

● 裂纹检测：采用渗透检测（PT）与超声相控阵检测（PAUT）组合技术，PT 检测表面裂纹（检出率 $\geq 98\%$ ，最小可检出 0.1mm 裂纹），PAUT 检测内部裂纹（检测深度 $\leq 50\text{mm}$ ，精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ），对深度调峰机组叶片检测覆盖率达 100%，较传统超声检测效率提升 3 倍。某火电厂应用后，叶片内部裂纹检出率从 65% 提升至 95%；

● 水蚀评估：采用三维激光扫描技术（扫描精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ）获取低压缸叶片表面形貌，生成水蚀磨损云图，量化磨损深度与面积。某机组应用后，水蚀区域识别准确率达 98%，为抗磨修复提供精准数据；

● 调峰周期专项检测（每 500 次调峰循环）：

● 叶片固有频率测试：通过激振试验测量叶片固有频率，当频率偏移超 5%（因裂纹导致刚度下降）时，判定为损伤风险叶片。某深度调峰机组应用后，提前识别 3 片频率偏移超 8% 的叶片，避免断裂事故；

●涂层性能检测: 采用划痕试验仪(加载速率 10N/min)测试高压缸叶片涂层结合力, 结合力 $\leq 30\text{N}$ 时需重新喷涂涂层。某机组应用后, 涂层剥落导致的叶片损伤率降低 70%。

3.2 工况适配型修复技术优化: 从“通用”到“定制”

根据深度调峰工况下叶片损伤类型, 研发定制化修复技术, 提升修复后叶片的工况适应性:

●疲劳裂纹修复:

●裂纹打磨与补强: 采用 80-120 目金刚石砂轮打磨裂纹, 打磨深度超裂纹深度 1-2mm, 打磨后表面粗糙度 $\leq \text{Ra}1.6\ \mu\text{m}$; 对叶片根部应力集中区域焊接补强块(材质与叶片一致, 如 2Cr13 钢), 补强块过渡圆角半径 $\geq 5\text{mm}$, 将应力集中系数降至 1.5 以下。某机组应用后, 修复叶片疲劳寿命恢复至原设计值的 90%;

●水蚀磨损修复:

●抗磨涂层喷涂: 对低压缸末级叶片水蚀区域喷涂 0.3-0.5mm 厚的 WC-Co 金属陶瓷涂层, 采用超音速火焰喷涂(HVOF)工艺, 涂层硬度 $\geq \text{HV}1200$, 结合强度 $\geq 70\text{MPa}$, 耐磨损性能较叶片基体提升 5 倍。某机组应用后, 叶片年磨损量从 0.3mm 降至 0.05mm;

3.3 调峰导向预防策略优化: 从“修复”到“预判”

结合深度调峰参数与叶片损伤规律, 构建“参数-损伤”关联预防体系, 降低损伤发生率:

●调峰运行参数优化:

●制定负荷升降速率曲线: 根据叶片热应力承受能力, 将负荷升降速率控制在 1.5%-2% 额定负荷/min(较传统速率降低 25%), 避免温度变化率超 5°C/min; 当机组负荷 $\leq 40\%$ 额定负荷时, 维持负荷稳定运行(单次稳定时长 $\geq 30\text{min}$), 减少气流激振频次。某火电厂应用后, 叶片交变应力循环次数减少 30%;

●湿蒸汽区参数控制: 通过调整低压缸排汽压力(控制在 5-8kPa)与蒸汽湿度($\leq 10\%$), 减少水滴形成。某机组应用后, 低压缸叶片水蚀速率降低 40%;

●检修周期动态调整:

●建立“调峰强度-检修周期”关联模型: 根据机组年度调峰次数(负荷 $\leq 30\%$ 额定负荷次数)调整检修周期, 调峰次数超 300 次/年时, 检修周期从 2 年缩短至 1.5 年; 超 500 次/年时, 缩短至 1 年。某深度调峰机组应用后, 叶片故障发生率从 12% 降至 3%;

四、工程案例与效果验证

4.1 某 600MW 深度调峰机组汽轮机叶片检修优化案例

4.1.1 案例背景

该机组为超临界参数汽轮机, 2018 年投运, 2021 年起参与深度调峰(日均负荷波动 6 次, 最低负荷 25% 额定负荷)。2022 年停机检修时发现: 中压缸 3 级叶片根部裂纹检出率达

25%(长度 0.5-2mm), 低压缸末级叶片水蚀深度超 0.3mm, 高压缸 1 级叶片涂层剥落率 30%; 传统检修后叶片在 6 个月内出现 10% 的二次损伤, 无法满足深度调峰需求。

4.1.2 优化检修方案

●动态检测: 安装叶片振动与温度应力在线监测系统, 每 300 次调峰循环开展专项检测(固有频率测试+涂层性能检测);

●定制修复:

●裂纹叶片: 采用激光熔覆(Stellite 6 合金)修复, 根部焊接补强块;

●水蚀叶片: 喷涂 WC-Co 抗磨涂层, 通过数控铣削修复型线;

●涂层剥落叶片: 重涂 MCrAlY 涂层, 进行局部退火消应力;

4.1.3 实施效果

●损伤控制: 叶片损伤检出率从 70% 提升至 96%, 修复后叶片二次损伤率从 15% 降至 3%, 未发生叶片断裂事故;

●寿命与效率: 修复叶片在深度调峰工况下服役寿命延长至 4 年(原 2.5 年), 低压缸效率提升 2.8%, 高压缸热耗降低 150kJ/(kW·h);

五、结论与展望

深度调峰工况下火电厂汽轮机叶片检修技术优化需围绕“动态监测-定制修复-预判预防”核心, 通过实时监测捕捉损伤、工况适配修复提升可靠性、参数与材料升级降低损伤风险, 可有效突破传统检修瓶颈。案例表明, 优化后的检修技术可使叶片损伤检出率提升 25%-30%, 服役寿命延长 30%-50%, 为火电机组深度调峰安全运行提供坚实保障。

未来优化方向可聚焦三方面: 一是“智能化预警”, 利用长短期记忆神经网络(LSTM)等 AI 算法分析叶片振动、温度数据, 建立“调峰参数-损伤风险”预测模型, 实现损伤提前 1-3 个月预警; 二是“绿色修复技术”, 研发低温激光熔覆、环保型抗磨涂层等低能耗、无污染修复技术, 降低检修碳排放; 三是“数字孪生融合”, 构建汽轮机叶片数字孪生模型, 模拟不同调峰参数下的叶片应力与损伤演化, 提前优化检修策略, 推动火电厂汽轮机叶片检修向“预测性、智能化、低碳化”方向发展, 助力电力系统绿色转型与安全稳定运行。

[参考文献]

- [1]程明. 汽轮机原理与运行 [M]. 中国电力出版社, 2022.
- [2]刘永葆. 汽轮机叶片故障诊断与检修技术 [M]. 机械工业出版社, 2021.
- [3]中华人民共和国国家能源局. DL/T 1573-2016 火力发电厂汽轮机检修规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [4]王建国. 深度调峰工况下汽轮机叶片疲劳损伤特性研究 [J]. 现代科技研究, 2023, 5(3): 67-74.
- [5]张宏亮. 汽轮机叶片抗磨涂层技术及应用 [M]. 化学工业出版社, 2020.