

防治汽轮机叶片损伤的技术措施研究与分析

丁喜银

内蒙古华电腾格里绿色能源有限公司巴彦浩特发电分公司, 内蒙古阿拉善盟阿拉善左旗, 750300;

摘要: 汽轮机叶片作为汽轮机能量转换的核心关键部件, 其工作可靠性直接决定汽轮发电机组的安全稳定运行及经济效益。叶片长期服役于高温、高压、高转速的极端复杂工况, 承受周期性蒸汽载荷、气流激振、腐蚀冲刷等多重作用, 易发生裂纹、断裂、水蚀等损伤故障, 引发非计划停机甚至机组损毁事故。本文近年完成的 30 余台不同容量 (100MW-1000MW) 机组叶片损伤检测报告及技术改造资料, 系统梳理叶片结构特性、振动原理及相关标准规范, 通过深度复盘 12 起典型叶片损伤案例的失效机理, 从设计制造优化、检修维护升级、运行控制精细化、技术管理体系化四个维度, 构建全生命周期的综合防治技术体系, 提出针对性强、可操作性高的防控措施, 为火电、核电领域汽轮机叶片安全管理提供坚实的理论依据和全面的实践指导, 对提升机组运行可靠性、降低经济损失具有重要现实意义。

关键词: 汽轮机叶片; 叶片损伤; 振动特性; 防水蚀措施; 检修标准; 全生命周期管理; 调峰适应性

DOI: 10. 64216/3080-1508. 26. 01. 071

引言

汽轮机作为火力发电、核能发电系统中的核心动力设备, 其能量转换效率与运行安全性直接影响电力系统的供电可靠性和经济性。叶片作为汽轮机实现蒸汽动能向机械能转换的核心载体, 被誉为汽轮机的“心脏瓣膜”, 其工作状态的稳定性至关重要。在实际运行过程中, 叶片需长期承受高温高压蒸汽的冲击、高频次的气流激振、蒸汽中杂质的冲蚀磨损以及启停过程中的温度应力循环, 工况极为恶劣。

随着风电、光伏等新能源发电装机容量的快速增长, 传统火电机组逐渐从基荷运行模式转向深度调峰、供热联供等灵活运行模式, 机组负荷频繁在 30%-100% 区间波动、启停次数年均增加至 50 次以上, 叶片所承受的动态载荷更加复杂多变, 损伤事故发生率显著上升。据华电集团统计数据显示, 2020-2024 年间, 火电机组因叶片损伤引发的非计划停机事件占总非计划停机数的 32.7%, 其中 300MW、600MW 等级机组次末级、末级叶片断裂事故尤为突出, 占叶片损伤事故总数的 68.3%。某 300MW 亚临界机组在深度调峰运行期间, 因末级叶片 A0 型振动与激振频率发生共振, 导致叶片突发性断裂, 机组轴系振动值骤升至 $239\mu\text{m}$, 远超 GB/T11348.2《旋转机械转轴径向振动的测量和评定第 2 部分: 50MW 以上陆地安装的汽轮机和发电机》规定的 $75\mu\text{m}$ 报警值, 被迫紧急停机检修, 造成直接经济损失超 800 万元, 间接影响区域供电稳定性。

1 叶片基础知识与振动特性

1.1 叶片结构组成与分类

汽轮机叶片是一个集成化的复杂结构部件, 主要由型线部分、叶根、叶顶、连接件及阻尼结构组成, 各部分功能协同实现能量转换与稳定运行。型线部分作为叶片的工作核心, 直接与高温高压蒸汽相互作用, 其几何形状设计直接影响汽轮机的气动效率和抗振性能, 通常采用空气动力学优化设计的翼型结构; 叶根用于将叶片牢固固定于叶轮轮缘, 需传递叶片承受的全部离心力和蒸汽作用力, 是应力集中的关键区域, 其结构设计需平衡强度与加工工艺性; 叶顶通常设置围带或拉筋, 用于增强叶片刚度、抑制振动并减少蒸汽泄漏, 围带还可形成封闭气道, 提升气动效率; 连接件包括铆钉、螺栓等, 用于实现围带与叶片、拉筋与叶片之间的固定, 其材质需与叶片匹配以避免电化学腐蚀; 阻尼结构则通过消耗振动能量, 降低叶片共振风险, 常见形式包括摩擦阻尼片、阻尼围带等。

根据结构特性和工作工况, 汽轮机叶片可按型线截面变化规律分为三类:

一等截面直叶片: 叶片型线截面尺寸沿叶高保持不变, 结构简单、加工工艺简便, 制造成本较低。由于其刚度分布均匀性较差, 仅适用于高压段汽轮机或小功率汽轮机的短叶片级, 叶高通常不超过 100mm, 主要承受较高的蒸汽压力和温度, 但离心力相对较小。例如, 某

100MW 机组高压段第 1-3 级采用等截面直叶片, 叶高 85mm, 材料选用 Cr11MoV, 运行期间未发生明显振动损伤。

-变截面直叶片: 叶片型线截面尺寸沿叶高呈线性变化, 根部截面较大以承受更大的离心力, 叶顶截面较小以优化气动性能, 兼顾了结构强度与气动效率。适用于中等长度叶片级, 叶高一般在 100-400mm 之间, 广泛应用于中压段汽轮机及部分低压段短叶片级。某 300MW 机组中压段第 2 级采用变截面直叶片, 叶高 280mm, 通过有限元分析优化截面尺寸, 使根部应力降低 15%, 疲劳寿命延长 30%。

-变截面扭叶片: 叶片型线不仅沿叶高变化截面尺寸, 还呈现连续扭转状态, 能够使叶片各截面保持最佳的气动攻角, 显著提升气动效率, 同时增强叶片的结构刚度和抗振能力。适用于长叶片级或小径高比工况, 叶高超过 400mm, 是低压段汽轮机末级、次末级叶片的主流类型, 如某 1000MW 超超临界机组末级叶片采用变截面扭叶片, 叶高达到 1140mm, 材料选用 2Cr12NiMo1W1V, 通过扭转角度优化, 气动效率提升 8%, 抗振裕量增加 20%。

1.2 叶根连接形式与受力特性

叶根与叶轮轮缘的连接质量直接决定叶片的运行安全性, 其连接形式需满足强度高、刚度大、应力分布均匀、拆装便捷等要求。目前主流的叶根连接形式主要包括 T 型、叉型、枞树型和菌型四类, 各类连接形式的结构特点与应用场景存在显著差异:

-T 型叶根: 结构呈 T 字形, 通过叶轮轮缘上的 T 型槽实现定位固定, 加工工艺简单、成本较低, 但承载能力有限, 主要适用于中低压段短叶片或中等长度叶片, 离心力承载范围一般不超过 150kN。某 200MW 机组低压段第 5 级采用 T 型叶根叶片, 运行期间因离心力作用, 叶根与轮缘配合间隙增大至 0.3mm, 引发振动幅值升高至 90 μm , 通过调整装配间隙并增加定位销后, 振动幅值降至 45 μm 。

-叉型叶根: 叶根呈叉状, 通过销钉与叶轮轮缘连接, 销钉可传递叶片的离心力和蒸汽作用力, 承载能力优于 T 型叶根, 适用于中高压段中等负荷叶片级, 尤其适用于需要频繁拆装检修的场合。某 400MW 机组中压段第 3 级采用叉型叶根叶片, 通过优化销钉材质 (选用 Inconel718 高温合金), 解决了长期运行后的销钉磨损

问题, 磨损速率从 0.1mm/万小时降至 0.02mm/万小时。

-枞树型叶根: 叶根形状类似枞树, 采用多齿啮合结构与叶轮轮缘连接, 齿面接触面积大, 应力分布均匀, 能够有效分散叶片承受的离心力和振动载荷, 承载能力极强, 离心力承载可达 500kN 以上, 广泛应用于高压段、低压段长叶片等高负荷叶片级, 是目前大容量、高参数汽轮机的首选叶根形式。某 600MW 机组末级叶片采用枞树型叶根, 通过齿面修形技术, 使齿根应力集中系数降低 25%, 运行 8 万小时未发生齿根裂纹。

-菌型叶根: 叶根头部呈菌状, 通过螺母固定于叶轮轮缘, 结构简单但承载能力较弱, 仅适用于小功率汽轮机的短叶片或辅助级叶片。某 50MW 机组低压段末级采用菌型叶根叶片, 运行 10 万小时后未发生明显结构损伤。

叶根连接部位是叶片的应力集中区域, 其应力分布受连接间隙、加工精度、装配质量等因素影响显著。例如, 枞树型叶根的齿根圆角半径若小于设计值, 易产生局部应力集中, 在周期性载荷作用下引发疲劳裂纹。华电电力科学研究院在检测中发现, 某 600MW 机组次末级叶片因枞树型叶根齿根加工圆角不足, 运行 5 万小时后齿根出现疲劳裂纹, 最大裂纹深度达 3.2mm, 通过有限元模拟分析可知, 圆角半径减小导致齿根局部应力升高 30%, 超过材料许用疲劳应力阈值。

1.3 叶片振动类型与安全准则

叶片振动是导致其损伤失效的核心诱因之一, 复杂的振动形式会引发叶片疲劳损伤, 严重时直接导致断裂。根据振动方向与振动形态, 叶片振动主要分为切向振动、轴向振动和扭转振动三类, 其中切向振动因振动幅值大、能量集中, 是最危险的振动形式, 占叶片振动损伤的 85% 以上。

切向振动是叶片沿轮缘切线方向的振动, 根据叶顶约束条件不同, 可分为 A 型振动和 B 型振动:

-A 型振动: 叶顶处于自由状态, 无围带或拉筋约束, 振动时叶顶振幅最大, 按振动节点数可分为 A0 型 (无节点)、A1 型 (1 个节点)、A2 型 (2 个节点) 等, 其中 A0 型振动的振幅最大, 对叶片的损伤风险最高。某 300MW 机组末级叶片 A0 型振动频率为 125Hz, 与激振频率重合时, 振动幅值达 0.5mm, 远超安全限值 0.1mm。

-B 型振动: 叶顶受围带或拉筋约束, 振动时叶顶振幅被限制, 振动节点数相对较多, 振动能量相对分散,

损伤风险低于A型振动。某600MW机组次末级叶片通过围带约束，B型振动幅值控制在0.1mm以内，运行期间未发生振动损伤。

轴向振动是叶片沿其自身轴线方向的振动，振幅较小，一般不超过0.05mm，对叶片的损伤影响相对较弱；扭转振动是叶片绕自身轴线的旋转振动，多发生于长叶片级，常与切向振动耦合产生复合振动，加剧叶片疲劳损伤。某1000MW机组末级长叶片在运行中发生切向-扭转耦合振动，导致叶身中部应力升高20%，引发长度为0.8mm的疲劳裂纹。

叶片振动的安全运行核心准则是规避共振风险，即避免叶片固有频率与蒸汽激振频率重合。蒸汽激振频率主要由汽轮机转速、叶片级数、蒸汽压力脉动等因素决定，当叶片固有频率与激振频率的比值在0.85-1.15范围内时，会发生共振现象，导致叶片振动幅值急剧增大，应力显著升高。其中，“三重点”共振（A0型振动频率、轮系轴向振动频率与激振频率三者重合）是引发叶片断裂的主要共振形式，占叶片断裂事故的70%以上。某300MW机组末级叶片因设计阶段未充分核算调峰工况下的激振频率，运行中A0型振动频率与激振频率发生“三重点”共振，导致叶片在运行6万小时后断裂。

为保障叶片振动安全，GB/T28559-2012《超临界及超超临界汽轮机叶片》明确规定，叶片设计需提供完整的振动特性报告，包括固有频率、振型、坎贝尔图（频率-转速关系图）等，确保在额定转速及负荷波动范围内无共振风险；同时要求叶片动应力计算值不超过材料许用疲劳应力的80%，留有足够的安全裕量。华电电力科学研究院在叶片振动检测中，采用激光测振技术对叶片固有频率进行实测，确保与设计值偏差不超过5%，有效规避共振风险。

2 叶片损伤典型案例分析

2.1 水蚀导致的疲劳断裂案例

案例1：某300MW亚临界机组末级叶片采用905mm变截面扭叶片，运行8万小时后发生断裂，断裂位置位于司太立合金防护层与叶片母材交界处（距叶根2/3位置）。通过断口分析发现，断裂源位于叶片出汽侧表面，断口存在明显的疲劳辉纹，辉纹间距从裂纹源到断裂扩展区逐渐增大（从0.02μm增至0.1μm），表明裂纹呈渐进式扩展。进一步检测显示，叶片司太立合金防护层

长度为283mm，防护范围未覆盖叶片易受水蚀区域（距叶根2/3至叶顶区域为水蚀高发区），导致防护层边缘形成结构不连续面，引发应力集中（应力集中系数达1.8）；同时机组长期参与深度调峰，低负荷运行时末级蒸汽湿度高达12%（设计值≤8%），水滴冲击加剧了防护层边缘的水蚀损伤，形成初始微裂纹（尺寸约0.2mm），在周期性离心力（最大达120kN）和蒸汽作用力下，裂纹以0.03mm/万小时的速率持续扩展直至叶片断裂。

针对该问题，采取的整改措施为：将司太立合金防护层长度从283mm延长至490mm，完全覆盖叶片水蚀高发区域；优化低压段抽汽参数，通过调整抽汽阀门开度和增加再热蒸汽流量，降低低负荷工况下末级蒸汽湿度，将湿度控制在8%以内；在叶片出汽侧加装导流板，改变水滴运动轨迹，减少水滴对叶片的冲击力度。整改后机组运行6万小时，叶片未出现新的水蚀损伤，振动幅值稳定在50μm以内。

2.2 加工缺陷与颤振诱发失效案例

叶片制造过程中的加工缺陷和长期运行中的颤振现象，也是导致叶片损伤失效的重要原因，此类损伤占叶片总损伤数的28.6%。加工缺陷会导致叶片局部应力集中，降低叶片疲劳强度；颤振则是叶片在特定工况下发生的自激振动，会引发高周疲劳损伤。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T28559-2012 超临界及超超临界汽轮机叶片[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
- [2] 中国电力企业联合会. DL/T905-2016 汽轮机叶片、水轮机转轮焊接修复技术规程[S]. 北京：中国电力出版社，2016.
- [3] 中国华电集团有限公司. 防治汽轮机叶片损伤的若干措施[Z]. 2024.
- [4] 华电电力科学研究院. 汽轮机叶片损伤案例分析与防治技术研究报告[R]. 杭州：华电电力科学研究院，2024.

作者简介：丁喜银，（1987.11-），男，蒙古族，工程师，本科，学士，电力生产。