

长叶片水蚀机理与防护技术研究

王铁钢

(中石化(天津)石油化工有限公司, 天津 300270)

摘要 本研究以汽轮机末级长叶片的水蚀问题为研究对象, 系统阐述了水蚀现象的形成条件及影响因素, 从微观和宏观两个层面深入分析了其作用机理。在全面总结现有防护技术的基础上, 客观评价了各类技术的优缺点及适用范围, 并对未来技术发展方向进行了前瞻性探讨。研究成果可为汽轮机末级长叶片的设计优化、制造工艺改进及运行维护提供理论依据, 对确保机组安全稳定运行、提高发电经济性具有重要的工程指导意义。

关键词 汽轮机末级长叶片; 水蚀机理; 防护技术

中图分类号: TK26

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.035

0 引言

汽轮机作为火电、核电及联合循环发电系统的核心动力装置, 其运行效率与可靠性直接影响整个发电系统的经济性和安全性。其中, 末级长叶片作为汽轮机通流部分的关键部件, 承担着将蒸汽热能转化为机械能的最终环节, 工作环境极其恶劣。随着汽轮机向高参数、大容量、长周期方向发展, 末级长叶片的长度不断增加, 所承受的蒸汽载荷、气动载荷及机械应力显著提升, 同时面临严重的水蚀问题。水蚀是导致汽轮机末级长叶片失效的主要形式, 具体表现为叶片表面出现麻点、凹坑、沟槽乃至裂纹等损伤。因此, 深入研究末级长叶片的水蚀机理, 开发高效可靠的防护技术, 不仅有助于延长叶片使用寿命, 保障汽轮机安全稳定运行, 而且对降低发电成本具有重要的理论意义和工程应用价值。

1 汽轮机末级长叶片水蚀机理

1.1 水蚀产生的前提条件

汽轮机末级长叶片发生水蚀现象的本质原因在于高速流动的湿蒸汽中所携带的液态水滴与叶片表面发生剧烈碰撞和切削作用, 从而导致叶片材料产生塑性变形、疲劳剥落及质量损失等损伤^[1]。该现象的产生必须同时满足两个基本条件: 首先, 蒸汽介质中必须存在液态水滴; 其次, 水滴与叶片表面之间需保持足够高的相对冲击速度。在汽轮机常规运行工况下, 末级蒸汽处于湿蒸汽区域, 这是由于蒸汽在膨胀做功过程中, 其压力和温度持续下降, 当温度降至对应压力下的饱和温度时, 蒸汽开始凝结形成大量微细液态水

滴。这些水滴在高速蒸汽流带动下与旋转叶片发生强烈冲击, 最终导致叶片表面材料逐渐流失, 形成水蚀损伤。这一过程不仅影响叶片的气动性能, 还会显著降低叶片的结构强度和使用寿命。

1.2 水蚀的核心机理

1. 弹性冲击与塑性变形阶段。当高速水滴撞击叶片表面时, 首先会产生瞬时弹性冲击, 导致叶片表面发生极短暂的弹性变形。若水滴冲击速度超过临界值, 其产生的冲击载荷将超过叶片材料的屈服强度, 从而引发叶片表面永久性塑性变形, 最终形成微观凹坑。这一过程涉及从弹性变形到塑性变形的转变, 其临界条件取决于材料特性和冲击参数。

2. 疲劳损伤与裂纹扩展阶段。在汽轮机运行过程中, 高速旋转的叶片持续受到蒸汽中水滴的反复冲击, 这种周期性冲击载荷会在叶片表面特定区域形成应力集中。随着时间推移, 应力集中区域会逐渐产生微米级的疲劳裂纹。这些初始裂纹主要沿着金属晶界扩展, 或在塑性变形区域延伸。值得注意的是, 这种损伤机制具有明显的累积效应, 裂纹的萌生与扩展过程呈现出典型的疲劳失效特征, 对汽轮机叶片的长期运行可靠性构成潜在威胁。

3. 材料剥离与失效阶段。当疲劳裂纹扩展至临界尺寸时, 叶片表面金属材料因失去有效支撑, 在高速水滴冲击与旋转离心力的复合作用下, 发生片状或块状剥落现象, 从而形成显著的凹坑、缺口甚至穿孔。若此类损伤持续发展, 剥落区域将不断扩大, 导致叶片原有的机械强度和结构刚度显著降低。这一渐进性损

作者简介: 王铁钢(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 热能与动力工程。

伤过程最终会严重影响叶片的力学性能和使用寿命^[2]。

1.3 影响水蚀的主要因素

1. 水滴特性。在影响水蚀损伤的关键参数中,水滴直径、浓度及冲击速度尤为重要。具体而言,水滴直径的增大会显著提升其冲击动能,从而增强对叶片表面的冲击作用,加剧材料的水蚀破坏程度。同时,当水滴浓度提高时,单位时间内撞击叶片表面的水滴数量随之增加,这将加速疲劳损伤的累积进程。这些因素共同作用,直接影响着水蚀损伤的发展速率和严重程度。

2. 叶片特性。叶片特性主要涉及材料性能、表面状态及结构设计三个关键方面。在材料性能方面,硬度、韧性和耐磨性等力学特性对抗水蚀能力具有决定性影响。研究表明,材料硬度与韧性呈正相关时,其抗水蚀性能显著提升。以马氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢为例,其抗水蚀性能明显优于普通碳钢。此外,通过降低叶片表面粗糙度,可有效缓解水滴冲击时产生的应力集中现象,从而显著减轻水蚀损伤程度^[3]。

3. 运行工况。机组运行工况涵盖多个关键参数,包括负荷水平、启停频率以及蒸汽特性等。在低负荷运行状态下,末级蒸汽湿度会显著上升,导致水滴浓度增加,从而加剧水蚀损伤程度。特别值得注意的是,在机组启停过程中,蒸汽参数往往出现较大幅度的波动,其中末级蒸汽湿度的变化尤为剧烈。与此同时,叶片还需承受热应力和机械应力的双重作用,这两种应力的叠加效应极易引发叶片表面裂纹的形成,进而加速水蚀的发展进程。这种复合作用机制使得机组在特定工况下更容易出现严重的侵蚀问题,对设备长期运行的可靠性构成显著威胁。

2 汽轮机末级长叶片水蚀防护技术

2.1 表面改性防护技术

表面改性防护技术通过物理和化学方法对叶片表面金属组织进行优化处理,从而显著改善其硬度、韧性和耐磨性等关键性能指标。这种技术能够有效提升叶片表面的抗水蚀能力,延长其使用寿命。

1. 喷丸强化。喷丸强化是一种通过高速喷射硬质弹丸(如钢丸或陶瓷丸)冲击叶片表面的表面处理技术。该工艺能够使叶片表层材料产生塑性变形,从而在表面形成残余压应力层,同时实现晶粒细化,显著提升表面硬度和疲劳强度。这种强化机制能有效抑制疲劳裂纹的萌生与扩展,显著延长叶片使用寿命。该技术具有工艺简单、成本低廉等优势,在汽轮机叶片水蚀

防护领域应用最为广泛,尤其适用于叶片排气边等水蚀情况严重的区域。作为当前最经济有效的防护手段之一,喷丸强化技术已在工业实践中获得充分验证。

2. 激光淬火。激光淬火是一种先进的表面改性技术,其原理是利用高能量密度的激光束对叶片表面进行快速加热。当激光照射时,材料表层可在极短时间内达到奥氏体化温度,随后通过快速冷却形成马氏体组织。这种处理工艺显著提升了材料表面的硬度和耐磨性能,同时由于加热和冷却过程极为迅速,对基体材料的性能影响极小。该技术特别适用于对尺寸精度要求严格的叶片类零件的表面强化处理,具有工艺稳定、变形量小等显著优势^[4]。

3. 离子注入。离子注入技术是一种通过高能离子束轰击金属表面,从而改变材料表面特性的先进表面改性工艺。该工艺利用加速电场将特定离子注入叶片表面,使其与基体金属原子发生相互作用,形成化合物或固溶体,进而显著改善材料表面的微观组织结构。这种处理方式能够有效提升叶片表面的硬度和耐磨性能,同时增强其抗腐蚀能力。该技术的主要优势在于可在常温条件下实施,避免了热处理可能导致的变形问题,且形成的防护层具有优异的稳定性与持久性。然而,该工艺也存在设备投资成本高、处理周期较长等局限性,因此目前主要应用于特殊工况条件下的叶片防护领域。

2.2 涂层防护技术

涂层防护技术是指在叶片表面制备一层具有高强度和高耐磨性的防护涂层,通过该涂层将叶片基体与水滴隔离,使其承受水滴冲击造成的损伤,从而有效保护叶片基体。该技术通过物理隔离和能量吸收的方式显著提升了叶片的抗侵蚀性能。

1. 金属涂层。金属涂层主要通过等离子喷涂和火焰喷涂等工艺,将钴基合金、镍基合金等耐磨金属材料均匀覆盖于叶片表面。该涂层与基体结合紧密,具有良好的韧性和耐磨性,其抗水蚀性能显著优于叶片基体材料,因此特别适用于中等水蚀程度的叶片防护。然而,由于涂层硬度相对较低,在长期运行过程中易发生磨损和剥落现象,这在一定程度上限制了其使用寿命。这种防护方式在特定工况下仍具有重要的应用价值。

2. 陶瓷涂层。陶瓷涂层主要通过等离子喷涂和激光熔覆等先进工艺,将氧化铝、氧化锆及碳化硅等陶瓷材料均匀沉积于叶片表面。这类材料具有优异的硬度、耐磨性以及突出的抗水蚀性能,尤其适用于水蚀

环境恶劣的工作区域。然而,陶瓷涂层存在韧性不足的固有缺陷,在应力作用下易产生裂纹甚至剥落。为此,需结合表面改性技术进行协同处理,以显著提升涂层与基体的结合强度,确保其在复杂工况下的长期稳定性。

3. 复合涂层。复合涂层通过将金属涂层与陶瓷涂层的优势特性有机结合,采用“金属底层—陶瓷表层”的层状结构设计。其中,金属底层可显著增强涂层与基体材料的结合强度,而陶瓷表层则能提供优异的耐磨性和抗水蚀性能。这种复合结构在保持材料韧性的同时提高了表面硬度,其综合防护性能明显优于单一涂层体系,已成为当前涂层防护技术的重要发展方向,并已在大型汽轮机末级长叶片等关键部件中得到实际应用。

2.3 结构优化防护技术

结构优化防护技术是一种通过优化叶片气动外形、改进排气边设计以及合理配置叶片组布局,从而有效减少蒸汽中水滴生成和撞击的防护方法。该技术从水蚀产生的机理入手,通过控制水蚀源头的形成条件来实现防护目的。其优势在于能够与其他防护技术形成协同效应,共同提升整体防护性能。这种基于结构优化的防护方案,不仅能够显著降低水蚀损伤,还能提高机组运行的安全性和经济性。

1. 叶型结构优化。叶型结构优化的核心在于通过改进叶片气动外形来降低末级蒸汽湿度并抑制水滴形成。具体而言,采用分流叶型设计将末级叶片分为主叶片和分流叶片两部分,其中分流叶片可提前分离蒸汽中的部分水滴,从而显著减少撞击主叶片的水滴数量。此外,对叶片曲率和弦长的优化处理能够有效改善蒸汽流动特性。

2. 排气边优化。针对叶片排气边水蚀现象严重的问题,本研究提出了一套系统性的优化方案。首先,通过增加排气边厚度并采用圆角过渡设计,有效缓解水滴冲击造成的应力集中问题。其次,在排气边区域设置导流槽结构,引导水滴沿预定路径流动,避免直接撞击叶片表面。此外,在叶片表面涂覆疏水涂层,显著降低水滴附着率,从而减少水滴与叶片的冲击频率。这些措施共同作用,能够显著提升叶片排气边的抗水蚀性能,延长叶片使用寿命^[5]。

3. 叶片组布局优化。叶片组布局优化的核心在于合理调整末级叶片的间距与排列方式,通过优化蒸汽流动特性来减少水滴聚集和冲击现象。此外,在末级叶片后加装水滴分离装置可有效分离蒸汽中的水滴,从而显著降低水蚀损伤的发生概率。

2.4 运行工况优化防护技术

运行工况优化防护技术是通过科学调控汽轮机运行参数及运行模式,从而有效抑制水蚀损伤的形成与发展。

1. 合理控制机组负荷。为确保机组安全稳定运行,需科学调控机组负荷,避免长期处于低负荷工况运行。当负荷降至临界值以下时,应及时调节蒸汽参数以降低末级蒸汽湿度,从而有效控制水滴浓度。同时,应持续优化机组启停程序,通过缩短启停时间、减小蒸汽参数波动幅度等措施,降低叶片承受的热应力和机械应力,防止表面裂纹的产生。

2. 加强蒸汽品质控制。为确保机组安全稳定运行,需重点加强蒸汽品质管控,严格执行蒸汽管道及汽轮机通流部位的定期清垢除杂工作,有效控制水滴形成与积聚。同时应建立末级叶片定期巡检维护机制,通过专业检测手段及时发现叶片表面微损伤,并采用打磨、补焊等工艺进行修复处理,防止损伤进一步扩展。建议引入在线监测系统对末级叶片水蚀状况进行实时监控,根据监测数据及时优化运行参数,切实保障叶片运行安全。

3 结束语

汽轮机末级长叶片的水蚀现象是由多种因素共同作用所致。目前,表面改性技术、涂层防护技术、结构优化技术以及运行工况优化技术等防护措施已在汽轮机末级长叶片领域得到广泛应用。在实际应用中,需根据机组运行工况、叶片材料特性及水蚀程度等具体情况,选择最适宜的防护技术或组合方案,以实现最优的防护效果。

参考文献:

- [1] 方镜森,孙长青,董子豪,等.激光熔覆技术在汽轮机末级叶片水蚀防护中的应用[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2024,20(02):83-90.
- [2] 杨建道.汽轮机低压缸末级长叶片水蚀研究[J].发电设备,2022,36(04):235-240,248.
- [3] 李戈,景岗呈,朱海宝,等.电厂汽轮机低压转子末级叶片水蚀防护分析[J].黑龙江电力,2020,42(05):453-456.
- [4] 高照.汽轮机末级叶片水蚀机理及数值模拟[D].保定:华北电力大学,2020.
- [5] 刘云锋,杨晓辉,李宇峰,等.大型核电汽轮机末级长叶片开发中若干问题讨论[J].热能动力工程,2022,37(03):81-85.