

汽轮机叶片磨损机理及检修工艺研究

王波波

申能吴忠热电有限责任公司 宁夏 吴忠 751101

摘要: 汽轮机叶片在汽轮机运行中起着关键作用,然而其长期处于复杂恶劣工况下,易出现多种磨损情况,影响汽轮机性能与安全。本文围绕汽轮机叶片展开研究,先是阐述其重要性,随后详细分析高温腐蚀磨损、机械应力磨损等多种磨损机理,同时对叶片检修工艺进行深入探讨,涵盖检修前准备、损伤评估方法以及修复工艺等内容,还提出检修工艺的优化与改进策略,旨在为保障汽轮机叶片良好状态、提高汽轮机运行可靠性提供参考依据。

关键词: 汽轮机;叶片磨损机理;检修工艺;研究

引言:汽轮机作为众多工业领域的核心动力设备,其能量转换效率及稳定运行对生产意义重大。而汽轮机叶片更是整个机组的关键部件,它直接参与能量转换过程,其性能优劣关乎汽轮机能否高效、安全地运行。但在实际运行中,叶片常面临高温、高压、高速蒸汽以及各类杂质等复杂工况,不可避免地会遭受磨损,进而引发一系列问题。因此,深入研究汽轮机叶片的磨损机理以及对应的检修工艺,对于保障汽轮机可靠运行、延长设备使用寿命是十分必要的。

1 汽轮机叶片的重要性

汽轮机叶片是汽轮机的核心部件之一,其重要性体现在多个关键方面。第一,叶片是实现能量转换的关键媒介。在汽轮机运行过程中,高温高压的蒸汽冲击叶片,使叶片高速旋转,从而将蒸汽的内能转化为机械能,进而驱动发电机发电或带动其他机械设备运转。其转换效率的高低直接影响整个汽轮机系统的能源利用效率,优质的叶片能确保能量转换过程更为高效、稳定,减少能量损耗,对于提高发电经济性和工业生产效益具有不可忽视的作用。第二,叶片的性能决定了汽轮机的运行可靠性。汽轮机通常在高温、高压、高速的恶劣环境下长时间连续运行,叶片需要承受巨大的机械应力、热应力以及蒸汽中杂质带来的侵蚀作用。设计合理、制造精良且维护良好的叶片能够在这样的极端条件下保持结构完整性和性能稳定性,有效降低叶片断裂、变形等故障发生的概率,避免因叶片故障引发的汽轮机停机事故,保障工业生产的连续性和电力供应的稳定性,减少因停机维修造成的巨大经济损失和对社会生产生活的不利影响^[1]。

2 汽轮机叶片磨损机理分析

2.1 高温腐蚀磨损

在汽轮机的运行环境中,高温是一个显著特征。高

温会加速化学反应的速率,使得叶片材料与周围介质之间的化学反应更为剧烈。当蒸汽中含有腐蚀性成分,如硫氧化物、氮氧化物等酸性气体,以及钠、钾等碱金属元素时,在高温作用下,这些腐蚀性物质会与叶片表面的金属发生化学反应,形成腐蚀产物。例如,硫氧化物与水蒸气反应生成硫酸,进而腐蚀叶片金属。随着腐蚀过程的持续,叶片表面的金属逐渐被消耗,材料的组织结构发生变化,导致其强度和硬度降低,腐蚀产物会改变叶片表面的粗糙度,增加蒸汽流动时的摩擦阻力。在高速蒸汽流的冲刷下,这些腐蚀产物容易脱落,进一步暴露新鲜的金属表面,使腐蚀过程持续循环进行,从而加剧叶片的磨损。而且,高温环境还会影响腐蚀产物的稳定性和附着性,使得叶片更容易遭受侵蚀,最终导致叶片的厚度减薄、形状改变,严重影响其正常的能量转换功能和机械性能,降低汽轮机的效率并可能引发安全隐患。

2.2 机械应力磨损

汽轮机叶片在高速旋转过程中,承受着复杂的机械应力。一方面,离心力是叶片所承受的主要机械应力来源之一。由于叶片安装在高速旋转的叶轮上,随着叶轮转速的提高,叶片所受离心力呈指数增长。这种巨大的离心力会使叶片产生拉伸应力,长期作用下,叶片可能会发生疲劳损伤,在叶片的根部或应力集中部位出现微小裂纹。另一方面,蒸汽对叶片的冲击力也不容忽视。高速流动的蒸汽冲击叶片表面,产生交变的弯曲应力。当蒸汽的流量、压力或温度发生波动时,冲击力的大小和方向也会随之改变,进一步加剧了叶片所受应力的复杂性。在这种交变应力的反复作用下,叶片材料内部的微观结构逐渐发生变化,位错等缺陷不断累积,导致材料的强度和韧性下降。随着时间的推移,叶片表面会出现磨损痕迹,如划痕、麻点等,严重时甚至会导致叶片

断裂,使汽轮机无法正常运行,对整个动力系统造成严重破坏,影响生产的连续性并可能引发安全事故。

2.3 水冲蚀与汽蚀磨损

在汽轮机运行过程中,蒸汽中可能会存在水分,尤其是在启动、停机或工况不稳定时。当含有水滴的蒸汽高速冲击叶片时,就会发生水冲蚀现象。水滴具有较高的动量,撞击叶片表面时会产生瞬间的高压,使叶片材料发生塑性变形或局部剥落。由于水滴的分布通常不均匀,这会导致叶片表面的磨损呈现出局部性和不均匀性的特点。汽蚀磨损则是在特定条件下发生的一种较为复杂的磨损形式。当蒸汽在叶片表面的局部区域压力降低到液体的饱和蒸汽压以下时,液体就会发生汽化形成气泡。这些气泡随着蒸汽流运动到压力较高的区域时,会迅速溃灭。气泡溃灭瞬间产生的极高压力和高温,以及强烈的冲击波和微射流,会反复冲击叶片表面,使叶片材料遭受侵蚀。汽蚀磨损通常发生在叶片的进出口边缘、叶型的凹陷部位等蒸汽流动条件较为复杂的区域,其对叶片的破坏作用极为迅速和严重,会导致叶片表面出现蜂窝状的麻点、坑洞,严重削弱叶片的强度和刚度,降低汽轮机的性能和可靠性,甚至可能导致叶片提前失效。

2.4 硬质异物击伤与固体粒子侵蚀

汽轮机的蒸汽源往往来自锅炉等设备,在蒸汽产生和输送过程中,可能会携带一些硬质异物,如锅炉燃烧产生的未燃尽颗粒、管道腐蚀脱落的锈渣等。当这些硬质异物随着蒸汽高速冲向叶片时,就会对叶片造成击伤。硬质异物具有较高的硬度和动能,撞击叶片表面时,会在叶片上形成凹坑、划痕甚至裂纹。固体粒子侵蚀类似于硬质异物击伤,但通常是指大量微小固体粒子在蒸汽流中对叶片的持续侵蚀作用。这些微小粒子在高速蒸汽的带动下,以一定的角度撞击叶片表面,通过微切削、微疲劳等机制逐渐去除叶片材料。固体粒子的硬度、形状、大小和浓度等因素都会影响侵蚀的程度。例如,尖锐形状的粒子更容易切入叶片材料,而高浓度的粒子则会增加撞击的频率。长期的固体粒子侵蚀会使叶片的表面粗糙度增加,叶型发生改变,导致叶片的气动性能下降,降低汽轮机的效率,叶片表面的损伤也会成为应力集中点,加速叶片的疲劳损伤和断裂失效,严重影响汽轮机的安全稳定运行^[2]。

3 汽轮机叶片检修工艺研究

3.1 叶片检修前的准备工作

3.1.1 设备停机与拆卸

设备停机是汽轮机叶片检修的首要步骤,需严格按

照操作规程进行有序停机操作,以确保机组安全停运并为后续检修创造有利条件。停机后,待汽轮机充分冷却至合适温度,方可开展拆卸工作。拆卸过程要细致规划,先拆除与叶片相关的外部连接部件,如围带、拉筋等,记录好各部件的原始安装位置与连接方式,以便后续复装。对于大型汽轮机,可能需要专用的拆卸工具与起吊设备,在拆卸叶片时要注重保护叶片,避免因操作不当造成二次损伤,例如使用软质材料包裹叶片边缘,防止碰撞划伤,为后续的评估与修复奠定良好基础。

3.1.2 叶片状况评估

叶片状况评估是检修的关键环节。首先进行外观检查,凭借肉眼和放大镜仔细观察叶片表面,查看是否有明显的磨损痕迹、裂纹、腐蚀斑点、变形等缺陷,并对缺陷的位置、范围与严重程度进行初步记录。接着采用无损检测技术,如超声波探伤可检测叶片内部隐藏的裂纹及缺陷深度,磁粉探伤用于检测铁磁性材料叶片表面和近表面的裂纹,渗透探伤则能发现非多孔性材料叶片表面的开口缺陷,通过这些检测手段全面掌握叶片内部结构状况。同时利用量具精确测量叶片的关键尺寸,如长度、宽度、厚度以及叶型轮廓的相关参数,与原始设计尺寸对比,从而确定叶片的磨损量与变形程度,为制定精准的修复方案提供依据。

3.2 叶片损伤评估方法

3.2.1 外观检查

外观检查是叶片损伤评估最基础且直观的方法。检修人员借助照明设备和简单工具,对叶片进行全面细致的目视检查。查看叶片表面色泽是否均匀,有无腐蚀导致的变色、锈斑或蚀坑。观察叶型是否完整,是否存在弯曲、扭曲等变形情况,边缘是否有崩裂、缺口或磨损变钝的现象。对于表面可能附着的污垢、杂质,需先进行清理以便更精准判断。通过外观检查,能快速发现一些明显的损伤迹象,初步判断损伤类型和大致范围,例如大面积的腐蚀区域或严重的撞击变形,这些信息可为后续进一步采用其他检测手段提供方向,同时也能对叶片整体状况有一个宏观的认识。

3.2.2 无损检测

无损检测在叶片损伤评估中至关重要,可在不破坏叶片结构完整性的前提下深入探测内部缺陷。超声波检测利用超声波在叶片材料中的传播特性,当遇到内部裂纹、夹杂物等缺陷时会产生反射、折射和散射现象,通过分析反射波的时间、幅度等参数确定缺陷位置、大小和形状。磁粉检测适用于铁磁性叶片材料,将叶片磁化后,表面或近表面的裂纹会使磁力线畸变,吸附磁粉形

成显示痕迹,从而清晰呈现缺陷轮廓。渗透检测则利用液体渗透剂对非多孔性叶片表面开口缺陷的渗透作用,再经显像剂将缺陷显示出来,可有效检测细微裂纹等缺陷,多种无损检测方法相互配合能全面、精准地掌握叶片内部状况。

3.2.3 尺寸测量

尺寸测量是评估叶片损伤程度的量化手段。使用高精度的量具,如卡尺、千分尺、三坐标测量仪等,对叶片的关键尺寸参数进行精确测量。包括叶片的长度、宽度、厚度等基本尺寸,以及叶型轮廓的曲率半径、进出口角度等与气动性能密切相关的尺寸。将测量结果与叶片的原始设计图纸或标准尺寸进行对比,计算出各部位的磨损量和变形量。例如,通过测量叶片厚度在不同位置的变化,确定磨损最严重的区域和磨损深度;对比叶型轮廓的偏差,评估变形对气动效率的影响程度。

3.3 叶片修复工艺

3.3.1 焊接修复

焊接修复是汽轮机叶片修复常用的工艺之一。首先要依据叶片的材质与损伤状况挑选适配的焊接材料与焊接工艺,如针对不锈钢叶片,常采用氩弧焊以保障焊缝质量并防止合金元素烧损。焊接前,需对叶片焊接部位进行细致清理,去除油污、氧化皮等杂质,针对有裂纹的叶片,要在裂纹两端钻止裂孔防止其扩展,同时加工合适的坡口。在焊接进程中,精准把控焊接电流、电压、焊接速度等参数,确保焊缝成型美观且无气孔、夹渣、未熔合等缺陷。对于多层多道焊,要留意各层焊缝间的清理与熔合情形。焊接完成后,进行去应力处理,比如采用热处理或锤击等方法,削减焊接残余应力对叶片性能的不良影响,使修复后的叶片能满足强度与运行要求。

3.3.2 激光熔覆修复

激光熔覆修复借助高能量密度的激光束将熔覆材料快速熔化并凝固于叶片表面形成修复层。先对叶片表面预处理,清除污垢与氧化层并适当粗化,提升熔覆层与母材结合强度。然后将选定的熔覆材料均匀涂覆在修复部位,根据叶片材质与修复需求确定熔覆材料成分,如

采用高硬度合金粉末提升耐磨性。利用激光熔覆设备,依照设定参数如激光功率、扫描速度、光斑直径等进行熔覆操作,过程中严密控制熔池形状与温度,保障熔覆层质量均匀无气孔、裂纹等缺陷。熔覆完成后,对叶片进行后处理,通过打磨、抛光使其表面光洁度达标,恢复叶片原有形状与气动性能,这种修复工艺热影响区小、熔覆层与母材结合好,能有效延长叶片使用寿命^[3]。

3.4 检修工艺的优化与改进

在汽轮机叶片检修中,数字化技术的应用成为关键优化方向。利用智能检测设备,如高精度 3D 扫描仪与智能超声探伤仪,快速获取叶片精确数据并智能分析,建立大数据平台,深度挖掘叶片磨损规律,制定个性化检修方案,采用数字化管理平台监控检修流程,对修复工艺参数实时监测预警,借助远程监控与专家指导提升检修质量与效率。新型修复材料与工艺也在不断推进。研发高性能金属基复合材料与纳米陶瓷涂层,增强叶片抗磨损与抗腐蚀能力,运用热等静压等先进制备工艺提升材料性能。在焊接与激光熔覆修复方面,创新脉冲激光焊接、多方式送粉及优化熔覆算法等技术,提高修复精度与质量,减少热影响和加工余量。

结束语

在对汽轮机叶片磨损机理及检修工艺深入探究后,可知叶片磨损受多种复杂因素交互影响,高温腐蚀、机械应力、水冲蚀与汽蚀以及硬质异物撞击等均威胁叶片健康。而完善的检修工艺是保障叶片性能的关键,从停机拆卸的精心操作、损伤评估的多法并用,到焊接修复与激光熔覆修复的有效实施,乃至检修工艺的持续优化改进,都为汽轮机稳定运行筑牢根基。

参考文献

- [1]贾治.汽轮机叶片的焊接工艺[J].科技创新与应用.2019(04).123-134
- [2]王文丹.汽轮机叶片加工新技术分析[J].现代制造技术与装备.2019(06).143-145
- [3]梁天赋.浅谈激光加工技术在汽轮机叶片制造中的应用[J].内燃机与配件.2019(04).156-157