

高水头水电站混流式水轮机转轮空化磨损修复技术研究

王海博

雅砻江流域水电开发有限公司 四川成都 610051

摘要: 高水头水电站是现代能源结构的重要组成部分,是实现可持续发展的重要保障。混流式水轮机是高水头电站的核心设备,其空蚀问题十分严重。空化指的是流体在高速流动及压力作用下,局部区域内产生气泡,并快速破碎。这不仅降低了机组的工作效率,而且存在着严重的安全隐患,会降低机组的使用寿命。因此,开展混流式水轮机转轮空蚀修复技术研究,为当前相关行业的热议课题。

关键词: 高水头水电站;混流式水轮机;转轮空化磨损;修复技术

混流式水轮机空蚀问题是高水头电站运行中较为复杂和棘手的难题。空化不仅与水轮机结构设计和运行条件有密切关系,而且受来流特性和材料特性等多方面的影响。随着现代水电事业的飞速发展,对水轮机性能及可靠性的要求越来越高。因此,探索高效的空蚀修复技术,不仅要深入认识空蚀机理,而且要从修复材料性能、修复技术可靠性和修复后的长期稳定性等方面综合考虑。近几年来,材料学与修复技术的发展,为解决这一难题提供新的途径。通过对先进修复技术的研究与应用,可大幅提升水轮机抗空蚀性能,延长其使用寿命,为高水头电站的安全运行与经济效益提供有力保证。

一、高水头水电站混流式水轮机转轮空化磨损原因

(一) 水流流动特性引发空化现象

高水头水电站混流式水轮机转轮空蚀破坏的首要原因是水流的流动特性。在高水头环境中,进水流道内的水流速度急剧上升,根据伯努利原理,流速的增大将引起局部水流压力的大幅下降^[1]。当局部压强低于水的饱和蒸汽压时,水流中就会出现大量的气泡,从而产生空化现象。这些气泡随着水流运动到转轮高压区后迅速溃灭,并在溃灭的瞬间形成强烈的冲击波和微喷。这种高频、高强度的撞击将持续作用在转轮表面,使其表面的金属结构逐渐被破坏,从而导致材料的剥落,从而引发磨损。同时,高水头下水流紊动程度高,水流运动轨迹复杂,容易在叶片进口和叶片后缘形成旋涡,进一步加剧局部压力脉动,加速空化现象的发生,加速了转轮的磨蚀进程。

(二) 转轮设计与材质存在缺陷

高水头混流式水轮机转轮本身设计是否合理、材料性能等因素对转轮空蚀也有很大的影响。从设计层次上看,如果叶片型线设计不合理,如叶片进角太大或太小,或

者叶片曲率不合理,都会使叶片表面流动发生分离,形成低气压区域,为气泡的生成创造条件。另外,叶片出缘处厚度设计得太薄,容易受到高速水流的冲击,从而加剧空泡溃灭冲击对叶片的损伤。在材料选择方面,如果转轮所使用的金属材料硬度较低,抗冲击韧性不够强,在空泡溃灭产生的高频冲击下,其耐磨性能将大大降低。为降低成本,一些水电站采用普通碳钢或低合金钢材制造转轮,在高水头和强冲击工况下,这些材料表面容易产生凹坑和裂纹,难以长时间承受空蚀磨损。

(三) 机组运行工况偏离设计参数

高水头水电站混流式水轮机长时间工作在偏离设计参数范围内,其空蚀风险大大增加。设计工况下,转轮与来流匹配较好,水流流态平稳,空蚀减少。但是在实际运行中,由于电网负荷的波动和来水量的变化,使得机组经常处于低负荷或过载的运行状态^[2]。在小负荷工况下,叶轮进口流量减小,水流流速减小,叶片入口易产生回流,引起局部压力降低,引起空化;超负荷工况下,由于过流能力过大,转轮内水流紊动程度加剧,局部压力脉动加剧,空蚀加剧。另外,当机组在运行中出现轴向偏斜、叶片与导叶间间隙不均匀等现象时,将造成水流冲击强度不均匀,局部区域应力集中,加速空蚀发展,缩短转轮使用寿命。

二、高水头水电站混流式水轮机转轮空化磨损修复技术应用

(一) 转轮空化磨损前期全面评估

需要结合水电站日常运行管理文件,对其运行历史进行系统梳理,包括累计运行时长、历史检修和维修记录、各阶段运行状态变化趋势等关键信息^[3]。重点研究机组在过流工况下的出力有无不稳定波动,有无异常振

动噪声,有无异常流动现象,可以直观地反映转轮的运行状况,为初步判断空蚀磨损程度提供依据。随后,组织了一支专业的技术队伍,在现场进行了现场测试,利用各种无损检测手段,对转轮的关键部位进行了细致的探测。

超声探测技术可以深入到转轮内部,对材料内部可能存在的微小裂纹、材料减薄等隐蔽损伤进行有效识别,并对声波反射信号进行分析,确定损伤位置及大致范围。以转轮表面和近表面缺陷为研究对象,通过对转轮表面、叶根、转轮本体等部位的微小裂纹、针孔等缺陷进行精确检测,两者相互补充,实现对转轮内外表面损伤的全面检测,避免单一检测模式的局限而造成的损伤漏检。

同时,根据水电站的实际运行条件和环境条件,对空蚀产生的原因进行了分析。重点研究水电站运行过程中的水质状态(含杂质、硬度、pH值等),水流在转轮内的流动速度和压力分布,判断空蚀是否与水质异常或水动力特征有关。同时,结合转轮设计参数和实际负载的匹配度,分析长时间偏离设计工况是否会加剧空蚀磨损。在此基础上,建立完整的转轮空蚀状态评估报告,揭示空蚀发生的具体部位、程度和主要原因,为科学制定下一步的修复方案提供依据,以确保修复工作能够精准定位于问题根源,避免盲目修复造成资源浪费和修复效果低下。

(二) 修复材料科学选型与性能适配

科学选择修复材料直接关系到转轮应用寿命和运行稳定性,需要充分考虑材料与转轮基体的适配性及真实工况下的综合性能。金属基复合材料、耐磨合金焊条和聚合物耐磨涂层是当前转轮修复领域中常用的三种材料,每种材料都有其各自的优点和应用场合,需要根据转轮的实际磨损状况进行合理选择^[4]。金属基复合材料具有高强度、高硬度的特点,同时具有优良的耐磨抗空蚀性能,在严重磨损部位的修复中占有重要地位。该类材料多采用不锈钢或高强合金为基体,经特殊工艺加入碳化钨、氧化铝等高性能增强相,可显著提高材料表面硬度和耐磨性,同时保持基体的良好韧性,可有效抵抗高水头条件下水流中杂质高速冲刷及空泡溃灭冲击效应。

耐磨合金电极主要用于砂轮表面裂纹的修复和局部磨损部位的堆焊修复,焊条的选择首先要考虑的是它与转轮衬底的焊接相容性,转轮衬底以不锈钢或高强铸钢为主,焊条组分必须与基材相匹配,保证焊接后接头的强度、韧性等力学性能不低于基材本身,避免因焊接接头性能不佳而引发新的故障隐患。同时,根据实际运行条

件选择焊条种类,在高水头、高流速的苛刻工况下,优先使用Cr、Mo、V等高合金元素的耐磨焊条,以提高其耐磨性能和抗空蚀性能,使其能够长时间经受恶劣工况的考验。

聚合物耐磨涂料具有施工方便,固化速度快,对基体损伤小等突出优势,适合对磨损程度不大、结构复杂的转轮进行修复。在选用高分子耐磨涂层时,需要注意涂层的附着力、耐磨性、耐水性和耐老化性,保证涂层能够紧密地附着在转轮表面上,长时间经受水流的冲刷也不会脱落,同时还具有很好的化学稳定性,能够适应水电站的水质环境,避免涂层性能的衰减造成修复效果的降低。在此基础上,通过对不同修复材料进行性能分析和工况适应性评价,并结合转轮磨损部位的特点,科学地选择合适的修补材料,为后续修复工作打下坚实的基础。

(三) 修复工艺规范实施与过程控制

在使用金属基复合材料修复严重磨损区域时,需要在施工前对修复部位进行预处理,用专用的打磨工具彻底清除磨损区域表面的氧化物、锈斑、油垢等杂质,让基体表面暴露出新鲜的金属层,并对磨损区的边缘进行打磨,使其具有平缓过渡的斜面,防止尖锐的棱角影响材料的结合效果^[5]。然后,根据材料的施工要求,通过特殊的成型工艺,在修补部位喷涂或浇注金属基复合材料,并对其铺设厚度和密实度进行控制,保证材料与基体表面紧密结合,不出现气泡、空洞等缺陷。

在成型后,需要根据材料的特性对其进行适当的固化处理,通过对温度、湿度等环境因素的控制,保证其充分固化并形成稳定的力学性能。在使用耐磨合金电极进行堆焊修复工作时,需要对转轮待焊部位进行预热处理,根据基体材料和焊条的种类来确定预热温度,预热可以有效降低焊接时的温度应力,防止焊接裂纹的产生。在堆焊时,焊工必须严格按照设定好的工艺参数进行操作,并对焊接电流、电压、速度等关键参数进行控制,保证堆焊层厚度均匀,成形好,并采用分层堆焊的方法,在每一层焊接结束后,对其进行锤击或保温处理,以释放焊接应力。

高分子耐磨涂料施工时,要对修补部位进行精细打磨,使其表面粗糙度满足涂料附着要求,然后根据涂料施工规范,通过喷涂或刮涂等方法,在修补部位均匀地涂敷涂层,控制涂层厚度,防止漏涂、流挂等现象,施工后按规定固化养护,保证涂层的性能得到充分发挥。在整个修缮施工过程中,要有专门的技术人员对整个施

工过程进行全程监控,对施工作业是否满足规范要求进行实时监控,对施工过程中可能发生的问题及时发现和纠正。同时,要做好施工过程的记录,对各个施工环节的操作参数、施工时间、操作人员等资料进行详细的记录,建立完善的施工档案,为以后的质量验收和可追溯提供依据,保证修缮工艺的各个环节都得到有效的控制,保证修缮施工质量的稳定性和可靠性。

(四) 修复后质量验收与长期管护

产品的质量验收需要从外观检验、性能检验和工况检验三个方面进行,全面评价修复质量是否达到了预期标准^[6]。在外观检验方面,由专业人员通过目视检查和精密测量工具对修补部位进行检查,检查修补部位的表面是否平整光滑,有没有明显的凹凸或缺陷,修补区与周围基材的过渡是否光滑自然,没有明显的焊痕和涂层脱落,并对修补部位进行尺寸参数的测量,以保证满足转轮设计要求。

在性能检测方面,再次采用NDT技术对修补部位进行检测,利用超声检测来确定修补材料与基体的结合是否紧密,是否有空洞、裂缝等缺陷。采用硬度测试仪对修补部位进行表面硬度测试,以验证其耐磨性是否满足设计要求,对修复部位进行拉伸、弯曲等力学性能测试,检验其强度和韧性是否能满足转轮工作条件。运行状态验证需要将修复好的转轮重新装回机组上进行试车试验,监测机组在不同工况下的出力稳定性、振频、噪声水平等运行参数,观测转轮过流时的来流状态,检验修复后的转轮能否恢复正常工作性能,能否有效抵御空蚀磨损。

通过质量验收后,要建立健全长效管理机制,并制定科学的定期巡检计划。水电站运行人员需要根据检修计划定期检查转轮的运行状况,特别是检修部位有没有新的磨损、裂纹或其它损伤迹象,同时监测机组运行参数的变化,及时发现隐患并采取相应措施。同时,加强电站运行工况优化管理,根据机组设计特点和大修后运行状态,对机组负荷和运行模式进行合理调整,防止机组长时间偏离设计工况,降低空蚀发生概率。

三、案例分析

某高水头电站2×300 MW机组,采用混流式水轮机组,工作水头在280~320米之间。经过5年的运行,电站转轮在检修过程中发现,转轮叶片进口边缘及叶片背面均有明显的空蚀痕迹,某些部位有2~3 mm深的凹坑,叶片出缘处也有轻微的卷边现象,如得不到及时修补,将

严重影响机组的运行效率及安全稳定。根据水轮机转轮的磨损状况和现场施工情况,采用堆焊修复法和聚合物复合材料法对水轮机转轮进行了修复。针对严重磨损叶片进口及出水处,采用马氏体不锈钢丝堆焊修复叶片几何尺寸,堆焊后热处理消除应力,并对表面进行机加工。针对叶片背面的小坑,采用聚合物复合材料对其进行修补,首先清除其表面的油污、锈斑,然后进行粗磨,然后涂以复合材料,然后固化后进行表面修整。修理完毕后,对转轮做了动平衡、水压等试验,以保证转轮的各项性能满足使用要求。经过两年多的运行观测,转轮表面没有新的空蚀痕迹,修复效果明显,能有效地保证水电站的安全稳定运行。

结束语

综上所述,开展混流式水轮机轮空蚀修复技术研究,可为高水头水电站的安全运行提供理论依据,也可为其其它水力设备的抗空蚀设计与修复提供借鉴。随着材料学、流体力学及修复技术的不断进步,我们希望能建立更有效、更可靠的修复方法。不仅可以提高水轮机组的运行效率与可靠性,而且可以促进水电工业向智能化、绿色化的方向发展,为实现可持续能源利用作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 蔡焱, 蔡正华. 高水头、多泥沙、径流式电站的转轮选型研究[J]. 自动化仪表, 2024, 45(12): 95-98+105.
- [2] 张骁, 罗华伟, 钱敏, 潘磊. 某高水头混流式水电站水轮机圆筒阀模型试验研究[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(05): 1-3+6+148.
- [3] 张宝勇, 胡雄峰. 高水头、多泥沙水电站水轮机机型选择[J]. 浙江水利科技, 2021, 49(04): 35-39.
- [4] 张恒, 许永强, 李林伟, 王利杰. 基于热力学法的高水头混流式水轮机效率试验研究[J]. 人民长江, 2021, 52(S1): 322-327.
- [5] 田文文, 刘小兵, 李佳楠, 袁帅, 鲁思阳, 李叶兵. 高水头水电站混流式水轮机导叶泥沙磨损试验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(08): 686-692.
- [6] 田文文, 刘小兵, 卢加兴, 袁帅. 高水头水电站混流式水轮机导叶端面空化的数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2019, (08): 211-216+220.