

混流式水轮机过流部件磨损机理及防护措施研究

秦庆松

大唐云南发电有限公司德宏分公司, 云南 德宏 678400

DOI:10.61369/WCEST.2024090011

摘要 : 混流式水轮机过流部件长期服役于复杂多相水流环境, 不可避免地遭受严重的磨损破坏。针对其磨损机理, 本文展开了深入探讨, 涉及的系统性防护途径涵盖多个方面, 其中有高性能材料的研发、表面强化技术的革新、部件结构的水力优化、精细化的运行维护, 还有基于数据的智能监测预警等内容。研究成果旨在为提升水轮机关键部件服役寿命和电站运行可靠性提供坚实的理论支撑与实用技术参考。

关键词 : 混流式水轮机; 过流部件; 磨损机理; 防护措施

Study on Wear Mechanism and Protective Measures of Flow Passages in Francis Turbines

Qin Qingsong

Dehong Branch of Datang Yunnan Power Generation Co., Ltd., Dehong, Yunnan 678400

Abstract : The flow passages of Francis turbines are constantly exposed to a complex multiphase water flow environment during long-term operation, leading to inevitable and severe wear damage. This paper conducts an in-depth exploration of the wear mechanism involved, discussing systematic protective measures including the research and development of high-performance materials, innovations in surface strengthening technology, hydraulic optimization of component structures, refined operation and maintenance, as well as intelligent monitoring and early warning based on data. The research results aim to provide solid theoretical support and practical technical reference for improving the service life of key turbine components and the operational reliability of power stations.

Keywords : francis turbine; flow passage components; wear mechanism; protective measures

引言

混流式水轮机作为水能转换的核心装备, 其过流部件长时间经受着高速含沙水流以及剧烈水力脉动带来的严酷考验, 它可不单单是直接对导叶、转轮叶片等部件的材料完整性进行侵蚀, 而且还降低了水轮机的水力效率与运行稳定性, 这已然变成了对大型水电站经济性和可靠性起到制约作用的瓶颈难题。本文对磨损内在规律展开探究, 这对于保障水能资源得以高效且稳定地利用而言有着极为深远的现实意义。

一、混流式水轮机过流部件概述

(一) 混流式水轮机的工作原理

在混流式水轮机中, 能量转换的核心所在是凭借特定的流道结构, 对具有高势能的水流予以精确引导以及高效利用。压力水流沿空间螺旋状蜗壳内壁收敛加速, 形成包裹导水机构的均匀环流进入固定导叶阵列, 导叶精密调节水流方向与流量后精准冲向转轮入口。旋转的弯扭转叶片组迫使水流由径向急剧转向为轴向流出, 此过程中水流动量矩的改变对转轮产生持续扭转力矩, 驱动主轴连接的外部发电机转子切割磁感线, 将流体动能转化为机

械能最终变成电能。流出转轮的尾流在渐扩型尾水管内流速降低, 部分剩余动能重新转变为静压势能完成有效回收, 整套水力机械的高效率运行依托于这种从压力势能到旋转机械能的递进式转化机理。

(二) 过流部件的组成与结构

混流式水轮机的过流部件构成了引导水流并驱动能量转换的核心物理系统。蜗壳作为压力引水通道, 其空间螺旋结构使得高速水流均匀覆盖静止导水机构外缘, 形成具备稳定流向与动量的环流环境。布置在蜗壳内部的固定导叶及可调节导叶阵列肩负精确调整进入转轮水流角度与流量的关键任务, 为能量高效转化

奠定基础。高速水流冲击具有三维扭曲叶型的旋转转轮装置，强迫流体急剧改变轴向方向并释放动量驱动主轴旋转产生机械功。经转轮流出的尾水进入渐扩型尾水管，水流在此扩散空间内速度梯度显著下降，部分动能有效地重新转化为静压能量。这些相互衔接的结构单元共同履行水力传递、动能转换和残余能量回收的系统职责。

（三）过流部件的材料选择

混流式水轮机过流部件制造商必须针对水轮机内苛刻水沙环境制定严格材料选配规范。蜗壳与固定导叶通常选用具备优异整体强度和抗磨损能力的普通碳钢或低合金钢材料，确保抵抗高静水压力下的结构稳定性。旋转转轮叶片等承受剧烈流场冲击区域需要应用硬度显著提升的高铬不锈钢或马氏体沉淀硬化不锈钢，强化其对抗高速水流携带固体颗粒持续冲刷破坏的能力。关键表面修复工程依赖专门研发的高铬铸铁或钴基硬质合金堆焊层，最大限度减缓磨粒冲击与空蚀溃灭导致材料流失。高应力部件可考虑特殊调质的高强度结构钢，依靠淬火与回火处理的微观组织强化提升疲劳寿命。材料工程师综合成本约束与服役需求选取不同金属体系，构建起覆盖整机从压力边界到高耗损区域的梯度防护方案。

二、混流式水轮机过流部件磨损机理分析

（一）磨粒磨损机理

混粒磨损是过流部件材料表面遭受高速水流携带硬质固体颗粒反复撞击和摩擦形成的渐进式破坏现象。旋转机械内沙粒在湍流裹挟下以不同入射角度冲击导叶和转轮叶片工作曲面，瞬时高压接触产生局部塑性变形或微观撕裂。粒子尖锐棱角对金属表面施加的微切削作用刮除材料形成密集划痕，伴随冲击能量转化导致材料表层微观疲劳裂纹快速萌生与扩展。后续粒子持续涌入流道造成撞击路径重叠区域材料薄片分层剥离，使磨损深度随服役时间逐步加剧。高流速下大量粒子脱离主流轨迹撞击区域边界产生难以预测的二次侵蚀，显著扩大损伤范围。该磨损过程与沙粒浓度、粒子几何特性和材料动态韧性特征密切相关，迫使制造商采用新型耐冲击合金建立韧性防护体系^[1]。

（二）冲蚀磨损机理

冲蚀磨损源于高速流体中局部压力骤变诱发空化泡剧烈溃灭对材料造成的冲击破坏。水流在压力梯度急剧变化区域分离形成瞬时微小气泡，遭遇高压环境时气泡突然崩溃产生超高速微射流冲击邻近金属表面。这些微米级高速液弹以数十倍水速持续轰击过流表面特定区域，造成金属晶格瞬间塑性变形和局部残余应力集中。材料反复承受极高冲击应力引发位错密度持续累积，促成表面保护性氧化膜早期碎裂形成裸露活性金属区。溃灭空泡释放的高能量不断驱动微裂纹向材料纵深方向扩展并相互连接为宏观裂纹网络，最终导致疲劳累积至临界值的表层金属薄片成片剥落。该失效模式在转轮叶片出口边和固定导叶卡门涡脱流区表现尤其突出，迫使设计人员加强流体动力学分析优化壁面曲率半径抑制流动分离。

（三）空蚀磨损机理

空蚀磨损主要由过流系统内周期性压力波动诱发的蒸汽空泡连续生成、溃灭循环引起。高速水流在低压区域超越汽化压力时孕育微米级蒸汽空泡，伴随流动进入高压区域产生剧烈内爆，释放强大的冲击波动能冲击金属表面。反复作用的激波传播在材料表层引发弹性变形场叠加效应，导致微观位错密度超出临界值形成亚微观裂纹源。腐蚀介质在冲击波连续撬动下深入活化新形成的微裂纹缝隙，加速裂纹尖端的化学腐蚀与机械撕裂协同作用。材料经历数万次应力循环后产生疲劳性能衰减，保护膜层与基体交界面逐渐累积裂纹网络形成蜂窝状破损结构。损伤区域深度随时间扩展至临界尺寸时，表层金属因强度丧失而呈脆性剥落。该现象在转轮上冠迷宫环区域和活动导叶枢轴端面尤其严重，驱使运维团队采取流态整型装置减轻局部压降梯度。

（四）腐蚀磨损机理

腐蚀磨损表现为水流溶解性化学成分与机械运动联合驱动的材料渐进失效模式。腐蚀介质持续侵蚀破坏金属表面具有保护作用的钝化膜层，暴露出活跃金属晶格与电解液发生电化学反应，阳极区域金属离子不断溶解流失形成点蚀坑。湍流冲击持续作用于蚀坑边缘造成应力集中与冷加工硬化现象，加速坑底微观裂纹沿晶界方向扩展进程。剥落碎屑随水流冲刷带走加速材料流失，新生金属表面再度暴露于化学腐蚀循环。溶解氧浓度与水流流速变化共同决定阴阳极反应强度，特定区域的涡流运动持续输送高活性介质抑制再钝化形成。蚀坑网络在交变流体压力作用下向纵深发展，深度逐步超过表面硬化层临界厚度时引发结构强度突变性能下降。该协同作用严重影响固定导叶端面间隙密封环耐久性，推动选材侧重耐蚀合金配合流道抗湍流设计来缓解复合破坏。

三、混流式水轮机过流部件磨损的防护措施

（一）高性能抗磨材料的开发与应用

高性能抗磨材料的开发聚焦于三个核心方向。材料成分设计必须兼顾基础强度与抗冲击韧性，在传统马氏体不锈钢基体中精确引入微量铌、钒等碳化物形成元素，促使硬质相均匀弥散分布，既提升基体抵抗硬质粒子犁削的能力，又避免因脆性相过量引发的宏观裂纹。制造工艺革新关键在于控制材料内部组织的均匀性与致密性，采用多级控轧控冷技术优化奥氏体晶粒度，配合真空脱气冶炼降低非金属夹杂物含量，使锻件在承受高频水流冲击时能有效延缓疲劳裂纹的萌生扩展。服役适应性设计则要求材料体系具备环境响应特性，例如在含沙量波动水域服役的转轮叶片，其表层可设计为梯度硬化的微观结构，内层保持韧性支撑而外层逐步递增硬度，实实在在缓冲高速涡流对材料表面的反复撕扯效应。这类材料体系从成分到结构的协同优化，为过流部件提供了贯穿全生命周期的稳定抗磨保障^[2]。

（二）表面强化技术的优化选择

针对混流式水轮机过流部件的独特磨损特性，表面强化技术的优化选择需紧密结合具体区域的冲蚀环境与受力状态。涂层材

料的匹配性是核心考量, 优先选用兼具优异抗冲击韧性及高显微硬度的金属陶瓷复合体系, 例如碳化钨基涂层凭借其高硬度和韧性成为优选, 确保其在高速含沙水流反复冲击下维持良好的界面结合力, 避免硬质粒子嵌入引发的涂层剥落。工艺参数的精细调控直接决定了强化层的内在质量, 通过优化热喷涂或堆焊过程中的热输入、粒子速度及沉积温度场分布, 能有效抑制涂层内部气孔、微裂纹等缺陷生成, 形成致密均匀的强化表层。几何结构的适应性优化同样不可或缺, 在满足过流要求的前提下, 对易损部位如转轮叶片出水边、下环内侧等区域实施适度增厚或局部流线型改良, 能够显著削弱高速涡流对边界的直接剪切作用, 分散流体动压负荷。这种系统性的技术选配显著提升了过流部件在严苛水力条件下的表层抗损能力, 延长关键区域的实际服役周期。

(三) 过流部件结构的水力优化

针对混流式水轮机高速含沙水流引发的磨损问题^[3], 过流部件结构的水力优化需从流场本质入手。流道形状的精心规划着力削弱局部涡旋强度, 适当扩大蜗壳进口截面曲率半径并平滑过渡到尾水管锥段, 有效降低高流速区对固定导叶根部的直接冲刷强度。叶片几何参数的精确调整成为关键环节, 依据实际水沙特性重新计算叶片安放角和包角分布, 使水流相对速度更贴近设计攻角范围, 大幅减轻转轮叶片吸力面头部与出水边区域的空蚀-磨蚀耦合损伤^[4]。局部结构细节的改良同样不容忽视, 在导叶端面增设流体动力学修型圆角, 引导水流平顺掠过密封间隙而非垂直冲击, 同时优化泄水锥的锥度匹配关系, 使从转轮下泄的固液混合物能迅速扩散降压。这些基于流场重构的几何改进措施, 从根源上削弱了高速粒子对过流边界的机械破坏能量, 切实提升关键区域的流体润滑保护效果。

(四) 运行维护策略的改进

基于历史运行数据, 维护人员对日常操作流程予以分析优化; 针对汛期水流泥沙含量升高这一特征, 操作员对机组负荷分配进行动态调整, 以此避开导叶空蚀风险区间。在关键过流区域, 智能监测系统部署高灵敏度振动传感器以连续采集数据, 借助内置算法识别异常频率分量, 进而触发预警信号来指导及时干预。结合磨损速率模型, 维护团队对部件检查周期加以修正; 对于固定导叶根部等易损位置, 采用便携式硬度检测工具评估其表面退化程度, 从而制定出差异化保养决策。当日常水流条件发生变化时, 操作员依据实时仪表数据对叶片角度分布作微调, 通过该措施确保流体动力压力均匀分布, 减轻局部冲刷破坏的强

度^[5]。智能监测系统将转轮密封区热成像数据与历史曲线自动关联, 以此预测寿命拐点, 为维护团队制定精准更换时机提供支撑, 减少非计划停机的频率。把部件状态数据导入维修计划管理软件, 生成优先干预清单, 维护人员在雨季前后实施针对性清洁工艺, 清除滞留磨粒, 阻止几何尺寸变形的积累。通过连续优化运行维护实践, 累积形成动态防护屏障, 显著削弱非正常工况对材料的侵蚀效应, 维持水轮机稳定且高效的运转状态^[6]。

(五) 智能监测与预警系统的构建

面对混流式水轮机过流部件复杂的磨损演变过程, 构建智能监测与预警系统依赖于三个紧密关联的核心环节。多源传感器阵列的科学布设构成了感知基础, 依据磨蚀敏感区域的水动力特性, 在蜗壳过渡段、活动导叶枢轴及转轮上冠腔室等关键位置部署耐高压的振动、声发射复合探头, 持续捕捉材料表面遭受粒子冲击产生的应力波微妙特征。磨损状态识别模型的深度开发是核心中枢, 融合流体力学机理与运行大数据训练神经网络算法, 从海量噪声信号中剥离出表征涂层微裂纹萌生或基体材料疲劳损伤的特定频谱模态, 建立磨损速率与声学特征量之间的动态映射关系。预警响应机制的闭环设计则保障了干预时效性, 当模型输出的磨损累积量逼近预设阈值时, 系统自动触发分级报警并联动调速机构调整机组负荷点, 同步生成包含损伤定位与预估剩余寿命的诊断报告供维护决策。这套从实时感知到智能诊断再到主动调控的闭环管理链条, 为过流部件磨损风险提供了前置化管控的技术支撑。

四、结语

对于混流式水轮机过流部件而言, 其磨损呈现出复杂的动态状况, 仅依靠单一的防护手段, 往往是难以收获理想效果的。材料的流失, 因磨粒、冲蚀、空蚀及腐蚀的协同作用而被显著加速, 这也将其防护所面临挑战的深层原因揭示了出来。在现有材料体系范畴内对耐磨性极限进行提升的同时, 高耐磨抗蚀合金以及先进涂层的应用, 再加上经精准水力优化的部件设计, 这些都为减轻磨蚀给予了关键的突破契机。唯有把科学制定的运行维护规程和基于先进感知技术的早期磨损预警系统相结合, 才能够达成从被动修复朝着主动防御与寿命管理模式转变的目标, 进而为保障水轮机长期处于高效可靠运行的状态奠定极为坚实的基础。

参考文献

- [1] 庞佑霞, 郭源君, 刘厚才. 水轮机过流部件磨蚀机理的研究 [J]. 润滑与密封, 2001(4):2.
- [2] 雷军, 江雄, 刘丁. 高水头混流式水轮机过流部件磨损的特点分析 [J]. 水电站设计, 2009, 25(02):55-58.
- [3] 王华仁. 水轮机过流部件的磨蚀与表面防护 [J]. 东方电气评论, 2008, 22(4):5.
- [4] 张庆霞. 水轮机过流部件磨蚀原因与有效防治措施研究 [J]. 华东科技: 学术版, 2012(11):1.
- [5] 刘娟, 陆力, 朱雷, 等. 冲击式水轮机过流部件泥沙磨蚀的试验研究 [C]// 第十九次中国水电设备学术讨论会论文集. 2013.
- [6] 熊茂涛, 卢池, 杨昌明, 等. 水轮机过流部件磨蚀问题的研究与防护 [J]. 小水电, 2006(1):4.