

高拱坝泄洪消能对水轮机过流部件空蚀风险的影响评估

赵倩¹ 陈文立²

1. 湖北省人才发展集团有限公司 湖北 武汉 430000

2. 武汉长科工程建设监理有限责任公司 湖北 武汉 430000

摘要: 为明确高拱坝泄洪消能与水轮机过流部件空蚀风险的内在关联, 本文从泄洪消能水力特性、空蚀机理及防控策略三方面展开研究。分析不同类型泄洪消能工的水流特征及关键参数对下游流场的影响, 阐明下游水流状态对水轮机入口条件的作用机制; 探讨水轮机过流部件空蚀形成原理, 构建包含核心与辅助指标的评估体系, 对比三类评估方法的优劣。研究表明, 泄洪消能系统的结构与运行调度直接影响下游流场特性, 进而诱发或缓解空蚀风险。基于此, 从消能系统优化、过流部件改进及监测预警构建提出防控策略, 为高拱坝水利枢纽协同运行及空蚀风险管控提供技术支持。

关键词: 高拱坝; 泄洪消能; 水轮机; 空蚀风险; 流场特性

引言: 高拱坝凭借挡水能力强、发电效率高的优势, 在水利水电工程中广泛应用。但其坝高水头大、泄洪流量集中的特点, 使泄洪消能后下游流场极易出现紊乱、压力脉动等问题, 直接威胁水轮机过流部件安全, 空蚀损伤已成为制约机组长期稳定运行的核心瓶颈。当前研究多孤立关注泄洪消能或空蚀防控, 对二者耦合影响的系统性评估不足。鉴于此, 本文聚焦高拱坝泄洪消能对水轮机空蚀风险的影响路径, 通过分析水力特性、空蚀机理及评估方法, 提出针对性优化策略, 旨在填补二者协同研究的空白, 保障水利枢纽整体运行效能与安全性。

1 高拱坝泄洪消能与水轮机运行环境的关联性

高拱坝作为水利枢纽的核心建筑物, 泄洪消能效果直接决定下游水体环境, 进而对水轮机运行稳定性产生显著影响。高拱坝普遍具有坝高、水头大、泄洪流量集中的特点, 泄洪时高速水流经消能工后, 会改变下游河道的水流流态、水位波动幅度及水体含沙量, 而这些参数均是水轮机安全高效运行的关键影响因素。当泄洪消能系统设计不合理时, 下游可能出现水流紊乱、回流漩涡、局部冲刷等问题, 导致水轮机进水口水流不均匀, 引发机组振动、摆度超标, 甚至加剧过流部件磨损。反之, 优化泄洪消能方案可使下游水流趋于平稳, 为水轮机提供稳定的入口条件, 降低运行风险^[1]。水轮机运行状态也会间接影响泄洪消能系统的适配性。因此, 明确二者关联性, 实现泄洪消能与水轮机运行的协同优化, 是高拱坝水利枢纽整体效能提升的重要前提。

2 高拱坝泄洪消能工的水力特性分析

2.1 泄洪消能工类型与水流特征

高拱坝泄洪消能工的类型选择需适配坝体结构、地

形条件及泄洪需求, 不同类型消能工对应的水流特征存在显著差异。常见的消能工类型包括挑流消能、底流消能、面流消能及联合消能等。挑流消能通过鼻坎将高速水流抛射至下游河道, 水流在空中扩散掺气, 下落至水体后产生强烈紊动, 消能效率较高, 适用于下游河道抗冲能力强、地形开阔的场景, 其水流特征表现为射流轨迹可控、空中掺气充分, 但下游局部冲坑深度较大。底流消能借助消力池形成水跃, 通过水流内部的摩擦、碰撞消耗能量, 水流流态相对平稳, 下游冲刷影响较小, 适合下游河道狭窄、抗冲能力弱的情况, 但存在消力池工程量大、水流回流可能影响坝基稳定的问题。面流消能则使水流沿下游水面扩散消能, 形成表面旋滚, 适用于中低水头高拱坝, 水流具有表面流速大、底层流速小的特点, 需控制旋滚范围以防影响水轮机进水。

2.2 关键水力参数对下游水流的影响

泄洪消能工的关键水力参数包括泄洪流量、出口流速、掺气浓度、水流偏转角等, 这些参数直接决定下游水流的流态、能量分布及河道冲淤情况。泄洪流量是核心参数, 大流量泄洪时, 下游河道水位快速上升, 水流紊动强度增大, 若流量分配不均, 易引发断面流速差异, 形成横向环流, 破坏水流稳定性。出口流速直接影响水流扩散范围与冲击强度, 流速过高会加剧下游河道冲刷, 流速过低则可能导致消能不充分, 水流携带剩余能量冲击下游建筑物^[2]。掺气浓度对水流特性的影响主要体现在降低水流密度、减小水流冲击力, 同时可缓解过流部件空蚀, 但过量掺气可能导致水流含气量超标, 影响水轮机充水效率。水流偏转角过大会使下游水流产生侧向偏移, 形成斜向水流, 导致河道局部冲刷不均, 甚至改变

河道主流方向,进而影响水轮机进水口水流均匀性。

2.3 下游水流对水轮机入口条件的影响

高拱坝泄洪消能后的下游水流状态,直接决定水轮机入口的水流条件,进而影响机组运行的稳定性与效率。水轮机入口条件的核心指标包括水流均匀度、水位波动幅度、含沙量及水流旋转角速度等。当下游水流紊乱、存在强回流或漩涡时,水轮机进水口会出现水流速度分布不均、压力脉动等问题,导致机组启动困难、运行中振动与噪声加剧,长期运行还会造成过流部件疲劳损伤。水位波动幅度超过允许范围时,会使水轮机工作水头频繁变化,偏离最优工况,不仅降低发电效率,还会加剧转轮叶片的受力波动。下游水流含沙量过高或泥沙颗粒度过大,会导致水轮机过流部件磨损、腐蚀,影响密封性能与水力性能,严重时引发部件失效。此外,下游水流的旋转运动还会使水轮机入口产生预旋,若预旋方向与转轮旋转方向不匹配,会降低水流能量转换效率,增加机组运行负荷。

3 水轮机过流部件空蚀机理与评估方法

3.1 空蚀形成机制

水轮机过流部件空蚀,是在高速水流作用下,水体历经汽化与冷凝过程,进而引发材料损伤的一种复杂现象。其形成机制涉及多方面因素,与水流压力变化、水流紊动以及部件表面状态紧密相连。当水流流经水轮机过流部件的局部区域,像转轮叶片前缘、导叶槽道、蜗壳进口等位置时,若流速急剧增大,依据伯努利方程,该区域的局部压力会迅速降至该水温下的饱和蒸汽压力。在此条件下,水体迅速汽化,瞬间形成大量空泡。这些空泡并非静止不动,而是随水流一同运动。当它们被携带至压力较高的区域时,会瞬间冷凝溃灭。这一过程会产生极其强烈的微射流与冲击波,其冲击压力之高,可达数百甚至数千兆帕。这种高频、高压的冲击反复作用于过流部件表面,犹如无数把微型“利刃”不断冲击,会逐渐破坏材料的晶格结构。起初,部件表面会出现麻点、凹坑,随着冲击的持续,这些损伤会进一步发展,形成裂纹,最终导致材料剥落,形成典型的空蚀损伤。另外,水流中的杂质颗粒会成为空蚀破坏的“帮凶”。一方面,杂质颗粒撞击部件表面,会形成初始缺陷,为空蚀的进一步发展提供“突破口”;另一方面,杂质颗粒会促进空泡的生成与溃灭,加剧空蚀的破坏程度。同时,若过流部件表面粗糙度超标,或者材质耐空蚀性能不足,都会降低空蚀临界压力,使得空蚀现象更容易发生,且发展速度加快,严重影响水轮机的正常运行与使用寿命。

3.2 空蚀风险评估指标

水轮机过流部件空蚀风险评估需依托科学的指标体系,精准反映空蚀发生的可能性、损伤程度及对机组运行的影响。核心评估指标包括空蚀系数、空蚀速率、表面损伤率及压力脉动幅值等。空蚀系数是判断空蚀发生临界条件的关键参数,通过对比实际运行空蚀系数与临界空蚀系数,可评估部件发生空蚀的风险等级,系数差值越小,空蚀风险越高^[1]。空蚀速率反映空蚀损伤的发展速度,通常以单位时间内部件表面的材料损失量或损伤深度表示,其值受水流参数、部件材质及运行工况影响,是评估部件使用寿命的重要依据。表面损伤率通过检测部件表面空蚀坑的面积、深度及分布密度,量化空蚀损伤程度,可分为轻微、中度、严重三个等级,对应不同的维护策略。压力脉动幅值则间接反映空泡溃灭的冲击强度,脉动幅值越大,空蚀破坏的可能性与剧烈程度越高。水流含气量、过流部件表面粗糙度等也可作为辅助评估指标,全面提升空蚀风险评估的准确性。

3.3 评估方法

水轮机过流部件空蚀风险评估对于保障机组安全稳定运行至关重要,其评估方法主要分为试验评估法、数值模拟法及现场检测法三类,这三类方法相互补充,共同构建起全面、精准的空蚀风险评估体系。试验评估法涵盖物理模型试验与原型试验。物理模型试验依据相似原理,精心构建水轮机过流系统模型,能够精准模拟不同运行工况下的水流状态。在试验过程中,科研人员细致观测空泡的生成、溃灭过程,以及部件表面的损伤情况,从而准确评估空蚀风险。此方法直观性强,所得结果可靠度高,然而试验周期较长,且成本较为高昂。原型试验则是在水轮机实际运行过程中开展,通过合理布置传感器,实时监测压力脉动、振动、水流含气量等关键参数,并结合部件定期检修的损伤检测结果,反推空蚀风险。该方法能真实反映实际运行工况下的空蚀特性,但会受到机组运行调度的限制。数值模拟法基于流体力学理论,借助先进的CFD软件,模拟水流在过流部件内的复杂流动过程,进而计算空蚀系数、压力分布等重要参数,预测空蚀易发生区域与损伤趋势。该方法具有周期短、成本低的优势,还能模拟极端工况,但模拟结果的准确性高度依赖网格划分质量与边界条件设置。在实际评估工作中,需综合考量三类方法的优势,形成多维度评估体系,为水轮机过流部件的空蚀防控提供科学、可靠的依据,确保机组长期安全高效运行。

4 高拱坝泄洪与水轮机空蚀风险防控的优化策略

4.1 泄洪消能系统优化

泄洪消能系统优化是防控水轮机空蚀风险的源头措

施,核心目标是通过优化结构设计与运行调度,改善下游水流状态,降低对水轮机入口条件的不利影响。结构设计方面,需结合高拱坝地形、水文条件,选择适配的消能工类型,例如对大流量、高水头工况,可采用挑流消能与底流消能联合模式,通过鼻坎参数优化调整射流轨迹,增设消力墩、导流墙等构件,破碎紊乱水流,减少回流与漩涡。同时优化消能工的几何参数,如挑流鼻坎的挑角、半径,消力池的深度、长度等,提升消能效率,使下游水流压力、流速分布趋于均匀。运行调度方面,需制定科学的泄洪方案,避免单一泄洪口集中泄洪,通过多泄洪口合理分配流量,减小水流冲击强度。可结合水轮机运行工况动态调整泄洪流量,当机组处于高负荷运行时,控制泄洪流量波动幅度,维持下游水位稳定,避免因水流参数突变引发水轮机入口压力脉动,从源头降低空蚀风险。

4.2 水轮机过流部件优化

水轮机过流部件优化需从材质提升、结构改进及表面处理三方面入手,增强部件抗空蚀能力,改善水流流动特性。材质方面,选用耐腐蚀性能优异的材料,如不锈钢、高强度耐磨合金等,或在部件表面采用等离子喷涂、激光熔覆等技术形成防护涂层,提升表面硬度与抗冲击性能,延缓空蚀损伤。结构改进方面,基于数值模拟与试验结果,优化过流部件的几何形态,例如优化转轮叶片的翼型、进出口角度,减少水流绕流时的压力突变区域,降低空泡生成概率;优化蜗壳、导叶的流道形状,使水流平稳过渡,避免局部流速过高。表面处理方面,对过流部件表面进行精细化打磨,降低粗糙度,减少水流扰动与空泡附着点,同时定期对部件进行维护保养,及时修补轻微空蚀损伤,防止损伤扩大。另外,可通过加装抗空蚀装置,如在易空蚀区域设置补气装置,引入空气破坏空泡溃灭环境,缓解空蚀冲击。

4.3 监测与预警系统构建

构建完善的监测与预警系统,可实现对高拱坝泄洪状态与水轮机空蚀风险的实时管控,为防控措施的及时实施提供支撑。监测系统需涵盖泄洪消能与水轮机运行两

大核心环节,泄洪侧布置流速传感器、压力传感器、水位计等设备,实时监测下游水流的流速、压力、水位波动等参数,掌握水流状态变化规律。水轮机侧重点监测过流部件的空蚀相关参数,通过布置超声波传感器、振动传感器、压力脉动传感器,检测部件表面空蚀损伤程度、机组振动幅值、入口压力脉动等指标,同时结合水质监测设备,实时掌握水流含沙量、含气量等辅助参数^[4]。预警系统基于监测数据,构建空蚀风险评估模型,设定不同等级的预警阈值,当监测参数超出阈值时,系统自动发出预警信号,并结合历史数据与模拟分析,预判空蚀风险发展趋势。建立监测数据共享平台,实现泄洪调度、水轮机运行与维护部门的信息联动,确保预警信息及时传递,针对性采取调整泄洪方案、停机检修等措施,最大限度降低空蚀造成的损失。

结束语

本文系统剖析了高拱坝泄洪消能对水轮机过流部件空蚀风险的影响机制,明确了泄洪消能工水力特性与空蚀风险的耦合关系,建立多维度评估方法并提出优化策略。研究成果为水利枢纽设计与运行提供了理论参考,但在极端泄洪工况下的耦合效应研究仍有不足。未来可结合数值模拟与原型试验,深化流场特性与空蚀损伤的动态关联研究,优化防控策略的适配性。同时推动智能化监测技术的应用,实现空蚀风险的精准预判与主动防控,助力高拱坝水利枢纽向高效、安全、稳定的智能化运行模式转型。

参考文献

- [1]王鹏,朱红波,刘润兵,李东江,秦承鹏,何虎昌,江雄,王强,郎棒.水电站过流部件涂层下裂纹检测方法对比[J].热力发电,2020,49(03):113-117.
- [2]黄松岭,孙洪宇,王坤,赵伟,彭丽莎.压水堆核电站无损检测与状态监测研究综述[J].机械工程学报,2022,58(04):1-13.
- [3]刘刚,江雄,郎棒等.聚合物涂层在水轮机过流部件防护中的应用[J].材料保护,2023,56(10):194-203.
- [4]陈晓彬,刘挺.大藤峡水力发电厂水轮机磨蚀分析及预防措施[J].造纸设备及材料,2022,51(09):43-45.