

混流式水轮机转轮叶片出水边空蚀损伤的成因分析与修复工艺

贺小瑜

广东省建筑工程集团股份有限公司 广东 广州 511340

【摘要】：混流式水轮机转轮叶片出水边因长期受到高流速水流冲击与压力脉动作用，易在局部形成低压区并产生气穴，导致空蚀损伤。本文通过对典型叶片损伤案例进行分析，探讨了空蚀的主要成因，包括水力不稳定性、流道设计缺陷、材料耐蚀性能不足及运行工况不合理等因素。同时提出了一套综合修复工艺，结合表面激光熔覆、堆焊补强与叶型优化修正，以提升叶片表面抗空蚀性能和延长服役寿命。研究结果为水轮机维护提供了可行的技术路径与实践参考。

【关键词】：混流式水轮机；转轮叶片；出水边；空蚀损伤；修复工艺

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.002

引言

混流式水轮机在水电站应用中占据核心地位，其性能直接影响整体发电效率。转轮叶片出水边处因长期受高速水流冲击，极易形成局部低压区，从而诱发气穴并导致材料表面逐步剥蚀。随着运行时间增加，空蚀损伤会加剧叶片表面粗糙度，降低水力性能，甚至引发叶片结构疲劳破坏。如何深入分析空蚀成因并制定高效的修复工艺，已成为提升设备运行可靠性和经济效益的关键问题。

1 混流式水轮机转轮叶片出水边空蚀问题概述

混流式水轮机作为大型水电站的核心动力设备，其运行稳定性与水力效率直接影响整体发电性能。在长期高负荷运行的工况下，转轮叶片出水边位置因受到高速水流、压力梯度和涡流冲击的综合作用，极易形成局部低压区，引发气穴现象。高速液流在叶片背面流经出水边时，当局部静压低于饱和蒸汽压，液体会迅速汽化形成大量微小气泡，这些气泡在随后的高压区塌陷时，会产生高强度微射流和冲击波，持续作用于金属表面，导致材料表层剥蚀、表面粗糙度增加，并进一步加剧流道紊乱。这一系列水力学与力学耦合作用，使得叶片出水边空蚀损伤成为混流式水轮机运行中最为典型且危害性较大的问题之一。

空蚀损伤的发生与水轮机的水力设计、材料性能及运行工况密切相关。转轮叶片的出水边是流体能量交换的关键区域，其几何形状、安装角度及叶片表面光洁度均对流场稳定性具有重要影响。当设计不合理或加工精度不足时，流道内会形成高湍流区和强烈涡流，诱发局部静压降低并促进气穴产生。此外，运行工况的频繁波动也会放大空蚀效应，例如高负荷工况下的过大流量和超负荷运行导致叶片受力不均，而低负荷下的反向涡区同样容易引起压力不稳定。叶片材料的耐蚀性和抗疲劳性能在此过程中亦起到决定性作用，若材料的硬度、韧性不足或表面存在微裂纹，将进一步降低其抵抗气泡冲击的能力，加速出水边的剥蚀进程。

在实际工程中，出水边空蚀损伤不仅会导致叶片几何外形

失真，降低水轮机的水力性能，还可能引发振动、噪声和结构疲劳等次生问题。大量的空蚀坑和表面凹陷会改变叶片的水力特性，导致流道效率降低，甚至产生紊流与失速现象，从而影响整个机组的稳定运行。长期的空蚀累积还可能导致叶片局部穿孔、断裂，甚至威胁水轮机的安全性与可靠性。针对这一问题，需要在设计、运行和维护多个环节进行优化，结合高精度流场仿真、材料性能改进及定期状态监测等技术手段，对出水边区域的水力特性与疲劳强度进行全面评估，以便为后续修复工艺和防护措施的制定奠定坚实基础。

2 转轮叶片出水边空蚀损伤的主要成因分析

转轮叶片出水边空蚀损伤的形成与水轮机内部复杂的流体动力学环境密切相关。高速水流在通过叶片出水边时，由于压力分布不均，容易在局部区域形成低压区。当局部静压降至饱和蒸汽压以下时，液体会瞬间汽化形成大量气泡，这一过程被称为气穴生成。当气泡进入高压区后急速塌陷，产生强烈的微射流和冲击波作用于叶片表面，局部应力集中使金属表层反复剥蚀，形成典型的空蚀坑。长期的微观冲击与剥蚀效应不断破坏金属晶格结构，导致叶片出水边表面粗糙度急剧增加，加重流场扰动和能量损失，形成恶性循环。此外，流道设计不合理会引发局部涡流，增加湍流强度和压力波动，从而显著提高空蚀发生的概率与严重程度。

叶片材料性能在空蚀损伤过程中同样起到决定性作用。转轮叶片多采用不锈钢、高强度合金钢等材料，其耐空蚀能力与硬度、韧性和显微组织密切相关。当材料存在夹杂物、气孔或微裂纹等缺陷时，在高频压力脉动作用下，这些缺陷会成为应力集中点，极易扩展并导致局部剥蚀。若材料耐腐蚀性能不足，在水流携带的微小固体颗粒、化学成分和溶解氧作用下，表面易发生电化学腐蚀，与空蚀形成叠加效应，加速出水边损伤。此外，焊接修复区由于热影响区组织不均，常出现硬度降低或残余应力集中现象，使得焊缝附近成为空蚀损伤的高发区域。随着叶片材料在高速冲击环境中不断疲劳累积，出水边抗空蚀性能会进一步下降，导致损伤范围和深度迅速扩大。

运行工况的变化对出水边空蚀的影响同样不容忽视。在高

水头、高流速和大负荷条件下,流体动能显著增加,叶片表面受到的水动力冲击更为剧烈,空蚀现象大幅加重。低负荷运行时,流道内易形成回流区和强烈湍流,导致压力分布更加不均,从而加剧局部气穴形成。此外,水轮机频繁启停、工况切换以及不合理的开度调节会引发压力脉动叠加效应,导致叶片出水边承受交变应力,增加疲劳损伤风险。水体中夹带的砂石颗粒和硬质杂质对叶片表面的机械冲刷作用,也与空蚀叠加产生复合型损伤,表现为表面凹坑扩大、材料剥落和金属晶粒脱落。综合来看,复杂的水力环境、材料缺陷和运行工况共同作用,使转轮叶片出水边成为混流式水轮机最易发生空蚀损伤的关键部位。

3 空蚀对转轮叶片结构与水力性能的影响

转轮叶片出水边的空蚀损伤对结构完整性造成显著威胁。高能气泡塌陷产生的微射流和冲击波不断冲击叶片表面,使材料局部反复受压与剥蚀,导致表面金属晶格发生塑性变形和疲劳裂纹扩展。随着空蚀坑的持续扩大,叶片出水边的截面厚度逐渐减薄,承载能力下降,局部应力集中现象愈发明显。当表面微裂纹在高频应力作用下逐渐贯通时,极易引发局部断裂甚至大面积破坏,导致叶片失稳或形状失真。结构损伤不仅局限于叶片本体,焊缝及热影响区因组织性能不均更容易产生疲劳裂纹,成为结构薄弱点。长期累积的空蚀效应使得转轮整体力学性能降低,耐冲击性和抗疲劳强度显著下降,严重时会造成转轮失衡,影响机组的安全运行。

在水力性能方面,空蚀损伤改变了叶片出水边的几何形状,直接破坏原有的流场分布。表面粗糙度的增加使边界层分离提前,流体附着能力降低,导致流道内的湍流度显著提升,进而引发二次流动和强烈涡流。叶片出水边局部压力分布异常,诱发能量转换效率下降,使得水轮机的有效水头和流量系数受到影响。空蚀坑和凹陷区域会形成高紊流区,造成水流速度场不均,进而增加流体动能损失。此外,叶片外形失真会破坏原本精确的水力设计参数,使流道特性发生偏移,降低水轮机的水力效率。随着损伤程度的加剧,机组在高负荷下运行时可能出现失速现象,不仅导致能量转换率下降,还会引起流道压力波动,增加系统不稳定性。水力性能恶化进一步加剧空蚀现象,形成恶性循环,造成损伤范围不断扩大。

空蚀还会对机组的运行稳定性和经济性产生综合影响。叶片表面的不规则损伤会显著改变流体激励力,导致叶片及整个转轮振动幅值增加,振动频率与水轮机固有频率耦合时更可能引发共振风险,威胁结构安全。高频噪声的产生不仅影响运行环境,还会反映出严重的水力不平衡状态。长期空蚀损伤造成的水力效率降低意味着机组发电量减少,增加了单位电量的运行成本,同时需要更频繁的停机维护与修复工作,提升了运维费用。此外,空蚀导致的裂纹扩展与叶片局部断裂风险增加,使设备可用性降低,运行寿命缩短,严重时甚至引发整机故障

事故。为避免机组长期经济损失和安全风险,需要对空蚀损伤引发的结构失效与水力性能退化进行持续监测,并结合精细化修复技术和防护措施来控制空蚀的进一步发展。

4 混流式水轮机转轮叶片出水边修复工艺研究

转轮叶片出水边空蚀损伤的修复工艺需要兼顾结构完整性、表面性能和水力特性,以确保修复后的叶片在长期运行中具备高可靠性和耐久性。在实际工程中,针对不同程度的空蚀损伤,通常采用激光熔覆、堆焊修复、表面热喷涂等综合技术。激光熔覆工艺通过高能激光束在损伤表面形成熔池,将高性能合金粉末与基体金属实现冶金结合,可在损伤区域形成高硬度、耐空蚀的强化层,显著提升材料表面抗冲击能力。对于较大面积或深度空蚀坑,堆焊修复工艺能够通过逐层金属填充恢复叶片几何形状,保证修复部位的强度与韧性。热喷涂技术则在表面形成耐磨、耐腐蚀涂层,降低流体冲击和化学腐蚀的耦合作用,改善出水边抗空蚀性能。

在修复过程中,对损伤区域的缺陷检测与表面预处理至关重要。使用超声波探伤和磁粉检测等无损检测技术可以准确定位内部裂纹和隐蔽损伤,确保修复措施的针对性和有效性。对于空蚀坑区域,需要采用机械打磨或精密抛光手段去除疲劳层与剥蚀区,避免缺陷向修复层扩展。修复材料的选择同样具有关键意义,高强度马氏体不锈钢、镍基合金等耐蚀性强、硬度高的材料能够有效提升出水边表面抗疲劳性能。通过对修复层与基体金属之间的组织兼容性和残余应力控制,确保在高流速水流冲击下不出现分层、开裂或剥落问题,从而保证修复部位的长期稳定性。

经过修复后的叶片还需通过精密加工和水力特性优化,恢复原有几何外形及流场匹配度。采用三维激光扫描与数值模拟技术对修复后的表面形貌进行检测和校正,使其满足设计要求并减小表面粗糙度,降低湍流和局部压力波动对水力性能的影响。结合流体动力学分析对叶片出水边的叶型进行局部优化,可以改善流道内压力分布,减少再空蚀风险。为保证修复效果的长期稳定性,还需在运行过程中配合状态监测技术,对修复区域的表面形貌、振动特性和压力脉动进行实时监测,从而在早期发现潜在缺陷,防止损伤再次扩展。

5 提升转轮叶片抗空蚀性能的综合技术措施

提升转轮叶片出水边的抗空蚀性能需要在设计、材料、制造和运行等多方面采取综合技术措施,确保水轮机在长期高负荷运行条件下保持高效与稳定。优化水力设计是控制空蚀的基础,通过三维流场仿真和数值模拟技术,能够对叶片出水边的压力分布和流体速度场进行精确分析,避免因局部低压区形成气穴。通过改进叶型设计、调整出水角和弯度分布,使流体在叶片表面附着更加均匀,减少高紊流区和强涡流的产生,显著降低空蚀发生概率。同时结合实验室水洞试验和可视化流动分

析,可以在设计阶段提前预测潜在空蚀敏感区,确保在制造前就对高风险部位进行优化处理,从源头上提高抗空蚀能力。

在材料选择和表面强化方面,采用高耐蚀性与高韧性的高性能材料对提升抗空蚀性能具有重要作用。高强度马氏体不锈钢、双相不锈钢以及镍基合金等材料因具备优良的硬度、冲击韧性和抗腐蚀能力,被广泛用于高水头水轮机转轮叶片的制造。同时可通过表面激光熔覆、等离子喷涂或离子渗氮等先进表面工程技术,在出水边形成高硬度、低粗糙度且耐腐蚀的强化层,从而有效提高表面抗冲击和抗疲劳性能。对于运行中叶片已出现轻微空蚀的情况,可结合高性能陶瓷涂层或复合涂层进行防护,利用超疏水特性降低水流对叶片表面的剪切力,并减缓气泡塌陷造成的微冲击应力,延长出水边的使用寿命。

在运行维护方面,采取动态监测与精细化控制技术是保障抗空蚀性能的关键手段。通过安装在线压力传感器、振动监测装置和声发射检测系统,可实时采集出水边的压力脉动、流速变化及叶片振动状态,及时发现潜在空蚀风险。结合智能控制

系统对水轮机负荷、开度及流量进行精准调节,可避免长时间在高端流区或低负荷回流区运行,从源头上减少空蚀诱发条件。对于高风险工况,还可结合数字孪生技术对机组进行实时建模与预测,利用仿真结果优化运行策略,确保叶片出水边始终处于低损伤状态。同时,在定期维护中引入无损检测技术和三维扫描复测,对叶片表面形貌和流道状态进行精确评估,为后续修复、强化与优化提供数据支撑,从而在全生命周期内有效提升转轮叶片出水边的抗空蚀性能。

6 结语

混流式水轮机转轮叶片出水边的空蚀损伤是影响水轮机运行效率与结构安全的关键问题。通过对空蚀机理的深入分析、损伤特征的系统研究以及修复与防护工艺的优化,可以有效提升叶片表面的抗空蚀性能,改善流场稳定性并延长设备使用寿命。在水力设计、材料强化及运行监测等多方面协同控制下,能够形成一套完整的防护与修复体系,为大型水电机组的安全稳定运行提供有力技术支持和工程保障。

参考文献:

- [1] 王建国.混流式水轮机叶片空蚀机理分析[J].水力发电学报,2021,40(3):112-118.
- [2] 刘志强.水轮机转轮叶片空蚀损伤研究及修复技术[J].水电能源科学,2020,38(5):85-91.
- [3] 陈国华.激光熔覆在水轮机叶片修复中的应用[J].机械工程与自动化,2023,48(2):56-62.
- [4] 赵明辉.转轮叶片出水边空蚀特性与防护措施[J].水动力学研究与进展,2022,37(1):43-50.
- [5] 郑伟.水轮机叶片空蚀损伤与材料强化研究[J].金属热处理,2021,46(7):72-78.