

高海拔多泥沙河流中水力机械过流部件 抗磨蚀设计与寿命提升

李月珠

青海省水利水电勘测规划设计研究院有限公司 青海 西宁 810000

摘要：本文探讨了高海拔多泥沙河流环境中水力机械过流部件的磨蚀问题及其解决方案，高海拔低气压、高含沙量及泥沙高硬度等特点加剧了水力机械过流部件的磨蚀程度，缩短了设备寿命并增加了维修成本。分析了泥沙磨损、空化剥蚀及低温水质协同影响等磨蚀机制，提出了抗磨蚀材料优化选择、结构形态改进和表面改性处理等设计技术，并结合运行参数优化、定期维护与检修及智能化监测与预警策略，实现了过流部件寿命的显著提升。实验验证表明，所提方案有效降低了磨蚀程度，延长了设备使用寿命。

关键词：高海拔；多泥沙河流；水力机械；过流部件；寿命提升

1 高海拔多泥沙河流环境对水力机械过流部件的磨蚀影响

1.1 泥沙磨损的影响

泥沙磨损是过流部件主要的损伤形式之一。含沙水流流经水力机械过流部件时，泥沙颗粒会按一定速度与角度撞击部件表面，致使表面材料逐步剥离。磨损程度和泥沙颗粒特性、水流速度、部件材料等因素紧密相关。在高海拔多泥沙河流里，因高水头，水流速度显著提升。以某高海拔水电站为例，其水轮机进口水流速度可达25-30m/s，远超平原地区水电站的15-20m/s。高速水流携带的泥沙颗粒动能更大、撞击力更强。实验显示，水流速度从20m/s升至30m/s时，过流部件表面磨损量增加2.3倍。同时，该区域泥沙颗粒硬度高，石英颗粒莫氏硬度为7，普通碳钢仅2.5-3。撞击时，泥沙颗粒易在部件表面形成凹坑、划痕，破坏表面完整性。此外，泥沙浓度增加也会加剧磨损。当泥沙浓度从100kg/m³增至800kg/m³，过流部件磨损速率从0.12mm/1000h升至0.85mm/1000h，呈近似线性增长。高浓度泥沙使单位时间内撞击部件表面的颗粒数量大幅增多，材料剥落速度加快。

1.2 空化剥蚀的影响

高海拔低气压环境会降低水的饱和蒸气压，使水力机械过流部件更容易发生空化现象。空化产生的气泡在高压区域溃灭时，会产生强烈的微射流和冲击波，对部件表面造成剥蚀。在标准大气压下，水的饱和蒸气压约为2.34kPa，而在海拔4000m处，环境气压降至62kPa，水的饱和蒸气压受气压影响有所下降，此时过流部件表面的局部低压区更易达到水的汽化压力，导致空化提前发

生。某仿真结果显示，在相同工况下，海拔4000m处水轮机叶片的空化区域面积较海拔1000m处增加45%（如表1所示）。

表1 不同海拔高度下空化区域面积与空化强度对比表

海拔高度 (m)	空化区域面积 (mm ²)	空化强度 (MPa)
1000	1250	50
2000	1580	58
3000	1920	65
4000	2210	72

空化剥蚀与泥沙磨损往往同时存在、相互促进。空化产生的剥蚀会使部件表面变得粗糙，增加泥沙颗粒的撞击概率和撞击力度；而泥沙磨损会破坏部件表面的保护膜，使空化更易发生^[1]。在两者的共同作用下，过流部件的损伤速度显著加快，某实验中，同时存在空化和泥沙磨损时，部件的寿命较单一泥沙磨损时缩短40%。

1.3 低温与水质的协同影响

高海拔地区气温较低，部分区域年均气温低于10℃，冬季极端气温可达-30℃。低温环境会使过流部件材料的韧性下降，脆性增加，在泥沙撞击和空化冲击作用下，更易发生脆性断裂。对在海拔3500m处运行的水轮机叶片检测发现，冬季叶片的裂纹发生率较夏季增加60%。同时，高海拔多泥沙河流的水质往往具有一定的腐蚀性，水中含有的硫酸盐、氯离子等会对过流部件材料产生腐蚀作用。腐蚀会使材料表面产生微小孔洞和裂纹，为泥沙磨损和空化剥蚀提供了起点，进一步加速部件的损伤。某监测数据显示，在含氯离子浓度为50mg/L的河流中，过流部件的腐蚀速率为0.05mm/年，而在无腐蚀的清水中，腐蚀速率仅为0.01mm/年。

2 水力机械过流部件抗磨蚀设计技术

2.1 抗磨蚀材料优化选择

选择合适的抗磨蚀材料是提升过流部件寿命的基础。目前常用的抗磨蚀材料主要有耐磨合金钢、陶瓷材料、复合材料等。耐磨合金钢通过添加铬、钼、钒等合金元素，提高材料的硬度和耐磨性。如高铬铸铁（Cr26）的硬度可达HRC60-65，其耐磨性是普通碳钢的5-8倍。在某高海拔水电站的应用中，采用高铬铸铁制造的水轮机导叶，使用寿命从原来的2000小时延长至4500小时，提升了125%。但高铬铸铁的韧性较差，在低温环境下易脆裂，因此在低温高海拔地区应用时，需进行适当的热处理，如时效处理，以提高其韧性；陶瓷材料具有极高的硬度和耐磨性，氧化铝陶瓷的莫氏硬度可达9，耐磨性是高铬铸铁的3-5倍。将陶瓷材料通过焊接、粘接等方式复合到过流部件表面，可形成有效的耐磨保护层。某实验中，在水轮机转轮表面喷涂氧化铝陶瓷涂层后，磨损量从0.85mm/1000h降至0.12mm/1000h。但陶瓷材料脆性大，抗冲击性能差，在泥沙颗粒高速撞击下易剥落，因此通常需要与金属基体结合使用，以提高其可

靠性；复合材料结合了不同材料的优点，如树脂基复合材料具有较好的韧性和抗腐蚀性，同时可通过添加耐磨颗粒（如碳化硅、金刚砂等）提高其耐磨性。一种添加30%碳化硅颗粒的树脂基复合材料，其耐磨性是普通碳钢的4倍，且密度小、耐腐蚀性能好，适用于制造水泵叶轮等部件。在某高海拔泵站的应用中，该复合材料叶轮的使用寿命较钢制叶轮延长了3倍。

2.2 过流部件结构形态改进

合理的结构形态设计可减少水流扰动和泥沙撞击，降低磨蚀程度。通过优化过流部件的几何形状，如叶片的进出口角度、曲率半径、流道的截面形状等，可改善水流的流动状态，减少涡流和局部低压区，从而降低泥沙磨损和空化剥蚀的可能性。对于水轮机叶片，将进口角从原来的15°优化至20°，出口角从30°优化至25°，可使叶片表面的水流速度分布更均匀，局部最高流速降低15%，泥沙撞击力度减小。某仿真结果显示，优化后的叶片磨损量减少28%（如表2所示）^[2]。同时，增大叶片的曲率半径，可减少水流的分离现象，降低空化发生的概率。

表2 叶片结构优化前后磨损量对比表

叶片结构	进口角(°)	出口角(°)	局部最高流速(m/s)	磨损量(mg/h)
原结构	15	30	32	179
优化结构	20	25	27	129

对于水泵叶轮，采用后弯式叶片可减少叶轮出口处的水流速度，降低泥沙对泵壳的撞击。实验数据表明，后弯式叶轮泵壳的磨损量较前弯式叶轮减少40%。此外，在过流部件的易磨损部位（如叶片头部、导叶进口边等）设置导流板或圆角过渡，可改变泥沙颗粒的撞击角度，从垂直撞击变为倾斜撞击，减少材料的剥离量。

2.3 表面改性处理技术

表面改性处理技术通过改变过流部件表面的物理或化学性能，提高其抗磨蚀能力。常见的表面改性技术包括表面淬火、渗碳渗氮、喷涂耐磨涂层等；表面淬火通过高频感应加热等方式，使部件表面快速升温并冷却，形成马氏体组织，提高表面硬度。对45钢制造的过流部件进行表面淬火后，表面硬度从HRC20-25提高至HRC50-55，耐磨性提高2-3倍。在某高海拔小型水电站的应用中，经过表面淬火的水轮机轴套，使用寿命延长了1倍；渗碳渗氮通过将碳原子或氮原子渗入部件表面，形成渗碳层或渗氮层，提高表面硬度和耐磨性。渗碳层的硬度可达HRC60-65，渗氮层的硬度可达HV1000-1200。某实验中，对35CrMo钢部件进行渗氮处理后，其磨损速率从0.12mm/1000h降至0.05mm/1000h；喷涂耐磨涂层是一种

高效的表面改性技术，包括等离子喷涂、电弧喷涂、火焰喷涂等。等离子喷涂可将陶瓷、金属陶瓷等材料喷涂到部件表面，形成厚度均匀、结合强度高的涂层。如等离子喷涂WC-Co涂层，硬度可达HRC70-75，耐磨性是高铬铸铁的2-3倍。在海拔3000m处的某水泵上应用该涂层后，叶轮的使用寿命从1500小时延长至6000小时，提升300%。

3 水力机械过流部件寿命提升策略

3.1 运行参数优化调整

合理调整水力机械的运行参数，可减少过流部件的磨蚀程度，延长其寿命。避免设备在低负荷或超负荷工况下运行，低负荷时水流在过流部件内易产生涡流，增加泥沙磨损；超负荷时水流速度过高，泥沙撞击力增大。某水电站通过将水轮机的运行负荷控制在额定负荷的70%-100%之间，过流部件的磨损量减少了30%。在河流汛期，泥沙含量较高时，可适当降低设备的运行转速，减少水流速度，从而降低泥沙的撞击力度。实验数据表明，当转速从1500r/min降至1200r/min时，过流部件的磨损速率下降25%。同时，可在进水口设置沉沙池、格栅等拦沙设施，减少进入水力机械的泥沙量。某泵站在

进水口设置沉沙池后,进入水泵的泥沙含量从500kg/m³降至100kg/m³,水泵叶轮的使用寿命延长了2倍^[3]。

3.2 定期维护与检修

定期对水力机械过流部件进行维护与检修,可及时发现并处理磨蚀问题,避免损伤扩大。建立完善的维护检修制度,定期对过流部件进行检查,如采用内窥镜检查叶片表面的磨损和空化情况,采用超声波检测部件内部的裂纹等。对轻微磨损的部件,可进行修复处理,如采用堆焊耐磨焊条、喷涂耐磨涂层等。某水电站对磨损量为0.3mm的水轮机叶片进行堆焊修复后,叶片的使用寿命延长了2000小时,修复成本仅为更换新叶片的1/5。对于严重磨损或出现裂纹的部件,应及时更换,避免发生安全事故。另外,定期对过流部件表面进行清洁,去除表面的泥沙和污垢,可减少泥沙对部件的持续磨损,同时便于观察部件的磨损情况。某监测数据显示,每周对过流部件进行一次清洁,可使部件的磨损速率降低10%。

3.3 智能化监测与预警

采用智能化监测与预警技术,可实时掌握过流部件的运行状态,提前预测磨蚀故障,为维护检修提供依据。通过在过流部件表面安装传感器(如振动传感器、温度传感器、磨损传感器等),实时采集部件的振动、

温度、磨损量等参数,并将数据传输至监控中心。利用大数据分析和人工智能算法,对采集到的数据进行分析处理,建立磨蚀故障预测模型。当监测参数超过设定阈值时,系统发出预警信号,提醒工作人员及时采取措施。某高海拔水电站采用智能化监测系统后,过流部件的故障预警准确率达到90%以上,避免了3次因磨蚀导致的重大设备事故,每年减少经济损失1000万元以上。

4 实验验证与结果分析

4.1 抗磨蚀设计方案验证

选取某高海拔多泥沙河流中的小型水电站作为实验对象,对水轮机过流部件采用抗磨蚀设计方案:叶片材料选用经过热处理的高铬铸铁(Cr26),表面喷涂300μm厚的WC-Co涂层,同时优化叶片的进出口角度(进口角20°,出口角25°)。以未经过优化的水轮机作为对照组,进行为期1000小时的运行实验。

实验结果如表3所示,实验组水轮机过流部件的平均磨损量为0.15mm,较对照组(0.78mm)减少80.8%;空化区域面积为520mm²,较对照组(1980mm²)减少73.7%;运行效率下降幅度为2.1%,较对照组(12.3%)降低10.2个百分点。实验结果表明,所采用的抗磨蚀设计方案具有良好的抗磨蚀效果^[4]。

表3 过流部件抗磨蚀设计方案实验效果对比表

组别	平均磨损量 (mm)	空化区域面积 (mm ²)	运行效率下降幅度 (%)
对照组	0.78	1980	12.3
实验组	0.15	520	2.1

4.2 寿命提升策略验证

在上述实验基础上,对实验组水轮机采用寿命提升策略:将运行负荷控制在额定负荷的70%-100%之间,汛期降低转速至额定转速的80%,每周对过流部件进行一次清洁,并采用智能化监测系统进行实时监测。继续运行实验至部件达到报废标准(磨损量超过1.0mm),记录其使用寿命。结果显示,实验组水轮机过流部件的使用寿命达到8500小时,较对照组(1800小时)提升了372.2%,较未采用寿命提升策略的抗磨蚀设计组(5200小时)提升了63.5%。验证了寿命提升策略的有效性,表明抗磨蚀设计与寿命提升策略相结合,可显著延长水力机械过流部件的使用寿命。

结束语

综上所述,针对高海拔多泥沙河流中水力机械过流部件的磨蚀问题,本文综合应用抗磨蚀设计与寿命提升策略,取得了显著成效。实验结果不仅验证了所提方案

的有效性,也为类似环境下的水力机械设计提供了重要参考。未来,将继续深化研究,探索更多高效抗磨蚀材料与技术,进一步优化设计策略,以提高水力机械在恶劣环境下的可靠性和耐用性,为我国水利事业的持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]曾懿.多泥沙河流日调节电站以库代池方案研究[J].红水河,2024,43(1):13-16.DOI:10.3969/j.issn.1001-408X.2024.01.003.
- [2]董耀华.长江流域河流泥沙与治河防洪研究及实践[J].长江科学院院报,2021,38(10):7-15.
- [3]孙利敏,王祥峰,曾敏,等.小市航运枢纽工程库区泥沙淤积及回水分析[J].水运工程,2023,(S1):52-55+62.
- [4]白云.引水枢纽工程闸前水沙演变模型试验研究[J].海河水利,2022,(02):101-105.