

水闸底板冲刷破坏机理与抗冲蚀材料性能试验

孙珍珍

新疆维吾尔自治区水利运行调度中心

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6349

[摘要] 本文研究了水闸底板冲刷破坏机理与抗冲蚀材料性能。水闸底板易受高速水流与泥沙冲刷导致破坏,自治区约60%水闸因此失效,维修成本高。文章分析了水流冲刷作用机制、材料磨损与失效模式及关键影响因素。通过喷射式冲刷试验与旋转式磨损试验,对比了普通混凝土、改性混凝土与复合材料的抗冲蚀性能。采用流场-结构耦合数值模型模拟冲刷过程,验证模型精度并优化参数。试验结果显示,聚合物改性混凝土抗冲蚀性能最优,钢纤维混凝土次之。建议高冲蚀区域采用聚合物改性混凝土,中低风险区域选用钢纤维混凝土,配套表面防护与监测,确保水闸底板长效安全运行。

[关键词] 水闸底板; 冲刷破坏机理; 抗冲蚀材料; 数值模拟; 防护技术

中图分类号: TV66 文献标识码: A

Mechanism of erosion damage to the bottom plate of the water gate and performance test of anti erosion materials

Zhenzhen Sun

Xinjiang Uyghur Autonomous Region Water Conservancy Operation and Dispatch Center

[Abstract] This article studies the mechanism of erosion damage to the bottom plate of a water gate and the performance of erosion resistant materials. The bottom plate of the water gate is susceptible to damage caused by high-speed water flow and sediment erosion, resulting in about 60% of the water gates in the autonomous region failing and high maintenance costs. The article analyzes the mechanism of water flow erosion, material wear and failure modes, and key influencing factors. The erosion resistance of ordinary concrete, modified concrete, and composite materials was compared through jet erosion test and rotary wear test. Using a flow structure coupled numerical model to simulate the scouring process, verify the accuracy of the model and optimize parameters. The experimental results show that polymer modified concrete has the best erosion resistance, followed by steel fiber reinforced concrete. It is recommended to use polymer modified concrete in high erosion areas and steel fiber reinforced concrete in medium low risk areas, with surface protection and monitoring to ensure the long-term safe operation of the sluice bottom plate.

[Key words] sluice bottom plate; Erosion damage mechanism; Anti erosion materials; Numerical simulation; Protective technology

引言

水闸作为水利枢纽中调控水位、防洪、灌溉的关键工程设施,其底板结构长期暴露于高速水流与泥沙颗粒的冲刷作用下,易引发严重的冲蚀破坏问题。据统计,自治区约60%的水闸工程因底板冲刷导致结构失效,维修成本占工程总投资的20%~30%,且频繁修复易缩短工程使用寿命,威胁区域防洪安全与经济发展。当前,随着极端气候频发与水资源调度需求增加,水闸运行工况日趋复杂,传统混凝土材料在抗冲蚀性能上的局限性愈发凸显,亟需从破坏机理、材料性能优化及防护技术三方面开展系统性研究。

1 水闸底板冲刷破坏机理理论分析

1.1 水流冲刷作用机制

水闸底板冲刷破坏的核心驱动力源于水流的动态作用。当水流经过闸室时,受闸门启闭与过流断面收缩影响,流速分布不均导致局部紊流强度显著增加。紊流中的漩涡与脉动压力对底板表面产生高频冲击,形成剪切力场。根据流体力学理论,水流对底板的剪切应力可表示为 $\tau = \rho u^2$ (其中 ρ 为流体密度, u 为摩阻流速),其大小与流速梯度直接相关。高速水流中裹挟的泥沙颗粒进一步加剧了破坏:颗粒在重力与水流拖曳力作用下以一定角度撞击底板,其动能通过接触应力转化为材料表面的塑性

变形与微观裂纹扩展。研究表明,粒径大于0.1mm的粗砂颗粒对混凝土的磨损效率是细砂的5~8倍,且冲击角度在30°~60°时破坏效应最显著。此外,水流中的空化现象也不可忽视,当局部压力低于水的汽化压力时,空泡溃灭产生的微射流以数百米每秒的速度冲击材料表面,引发空蚀坑与剥落层,与机械磨损形成协同效应。

1.2材料磨损与失效模式

混凝土作为水闸底板的主要材料,其冲刷破坏过程呈现多阶段特征。初期阶段,表面砂浆层因硬度较低率先发生剥蚀,暴露出骨料颗粒。随着冲刷持续,骨料与水泥石界面过渡区的薄弱环节成为裂纹扩展的起点,微裂缝在剪切力与冲击荷载作用下逐渐贯通,形成宏观剥落区。失效模式主要分为三类:一是表层磨损型,表现为均匀的材料厚度减薄;二是局部剥落型,由骨料脱落或空蚀坑扩展导致;三是裂缝贯穿型,因长期疲劳作用引发结构断裂。从微观尺度分析,材料失效与水泥石基体的孔隙结构密切相关。高孔隙率区域易成为水流渗透通道,加速氯离子、硫酸盐等侵蚀性介质的侵入,导致钢筋锈蚀与膨胀开裂。

1.3关键影响因素分析

水闸底板冲刷破坏受多重因素耦合作用。水流参数中,流速是影响冲刷速率的主导因素,试验表明流速每增加1m/s,混凝土质量损失率可提升30%~50%;含沙量则通过改变颗粒碰撞频率影响破坏效率,当含沙量超过5kg/m³时,磨损速率呈指数级增长。泥沙特性方面,颗粒硬度与形状显著影响破坏形式:棱角分明的粗砂更易造成犁削式磨损,而圆形颗粒以撞击疲劳为主。结构参数中,底板坡度与表面粗糙度直接改变水流流态,坡度大于1:3时易形成局部冲刷坑;表面平整度超过5mm会加剧紊流强度。此外,材料性能(如抗压强度、断裂韧性)与环境条件(如冻融循环、干湿交替)也通过改变材料劣化速率间接影响冲刷破坏进程。

2 抗冲蚀材料性能评价指标与方法

2.1试验方法设计

为模拟实际工况下的冲刷作用,本文设计两种试验方案。第一种是喷射式冲刷试验,采用高压水射流携带标准砂粒(粒径0.5~2mm)垂直冲击试样表面,通过调节水流速度(0~20m/s)、含沙量(0~10kg/m³)与冲击角度(30°~90°),可量化不同参数组合下的材料磨损率。试验装置配备高精度电子天平与激光轮廓仪,实时记录质量损失与表面形貌变化。第二种是旋转式磨损试验,将试样固定于旋转圆盘边缘,浸入含砂水流中,通过圆盘转速(0~2000rpm)控制颗粒碰撞频率,适用于评估材料在低速大流量条件下的抗磨性能。微观分析采用扫描电子显微镜(SEM)观察磨损面形貌,结合X射线衍射(XRD)分析物相变化,揭示材料失效机制。所有试验均设置3组平行样本,确保数据可靠性。

2.2现有材料性能对比

当前抗冲蚀材料主要分为三类:普通混凝土、改性混凝土与复合材料。普通混凝土(抗压强度30~40MPa)抗冲蚀性能较差,在15m/s流速下质量损失率可达1.2kg/m²·h,且冲刷后表面出

现大量粗骨料裸露与裂缝。钢纤维混凝土(纤维掺量1%~2%)通过纤维桥接作用抑制裂缝扩展,质量损失率降低至0.6kg/m²·h,但长期冲刷易导致纤维锈蚀。聚合物改性混凝土(掺入环氧树脂或聚氨酯)凭借高分子膜的耐磨性与粘结性,质量损失率进一步降至0.3kg/m²·h,但其成本较高且施工工艺复杂。新型复合材料如橡胶-混凝土夹层结构,通过弹性层吸收冲击能量,在含沙量5kg/m³的工况下表现出最优抗冲蚀性能,但界面粘结强度需重点优化。

3 水闸底板冲刷破坏数值模拟研究

3.1数值模型建立

为准确模拟水闸底板的冲刷破坏过程,本文采用流场-结构耦合数值模型。流场计算基于雷诺时均Navier-Stokes方程,结合k-ε湍流模型描述水流紊动特性,通过FLUENT软件实现三维瞬态求解。结构响应分析则采用有限元法,利用ABAQUS软件建立底板混凝土的本构模型,考虑弹塑性损伤与断裂能准则。流固耦合通过动网格技术实现,将水流压力与颗粒冲击荷载实时传递至结构表面。泥沙颗粒运动采用离散元法(DEM)模拟,在EDEM软件中定义颗粒粒径分布(0.1~5mm)、密度(2650kg/m³)及恢复系数(0.6~0.8),并通过颗粒-流体双向耦合接口与流场数据交互。边界条件设定为入口流速(5~20m/s)、出口压力(大气压)及壁面无滑移条件,底板表面粗糙度通过等效砂粒高度(0.5~2mm)参数化输入。模型网格采用非结构化四面体单元,流场区域网格密度控制在0.05m以内,结构区域在冲刷关键区加密至0.02m,确保计算精度。

3.2冲刷过程动态仿真

模拟过程分两步进行:首先进行清水流场计算,获得无颗粒作用下的底板压力分布与流速梯度;随后引入泥沙颗粒,通过DEM模块追踪颗粒运动轨迹,计算其撞击速度与角度,并将冲击能量转化为结构表面的等效压力载荷。动态仿真中,每时间步长(0.001s)更新底板形貌,磨损深度通过Archard磨损模型计算:

$$h=k \cdot H \cdot P \cdot s$$

其中h为磨损深度,k为磨损系数(取 1×10^{-5}),P为颗粒冲击压力,s为滑移距离,H为材料硬度。仿真结果显示,冲刷初期底板表面出现均匀磨损,随后在流速梯度较大区域(如闸门槽附近)形成局部凹坑,凹坑深度随时间呈非线性增长。当流速超过15m/s时,颗粒撞击引发的应力集中导致微裂缝扩展,最终引发材料剥落。通过可视化后处理,可清晰观察到冲刷坑的三维形貌演变及内部应力分布特征。

3.3模型验证与参数优化

为验证模型可靠性,将数值模拟结果与物理试验数据对比。选取典型工况(流速12m/s、含沙量3kg/m³、冲刷时间6h),对比发现模拟预测的质量损失率(0.85kg/m²)与试验值(0.92kg/m²)误差小于8%,冲刷坑深度误差控制在10%以内,表明模型具有较高的精度。进一步进行参数敏感性分析,发现颗粒恢复系数与磨损系数对结果影响显著:恢复系数每增加0.1,磨损率提升15%~20%;磨损系数误差超过±30%时,预测偏差超过工程允许范

围。基于此,提出参数优化方案:通过高速摄影试验反演颗粒恢复系数,结合微观硬度测试修正磨损系数,并建立动态参数更新机制。

4 抗冲蚀材料性能试验研究

4.1 试验材料制备与分组

本研究选取三种典型抗冲蚀材料进行对比试验:普通混凝土(PC)、钢纤维混凝土(SFC)与聚合物改性混凝土(PMC)。普通混凝土采用P·042.5水泥、中砂与5~25mm连续级配碎石,水灰比0.45,28天抗压强度42MPa。钢纤维混凝土在普通混凝土基础上掺入1.5%体积分数的端钩型钢纤维(长度30mm、直径0.6mm),通过强制搅拌确保纤维均匀分布。聚合物改性混凝土添加5%质量分数的环氧树脂乳液,采用先掺法工艺,使聚合物与水泥水化产物形成交织网络结构。所有试件尺寸为150mm×150mm×50mm,标准养护28天后进行表面处理:普通混凝土与钢纤维混凝土表面涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料,聚合物改性混凝土保留原表面。试验分组分为三组,每组12个试件,分别对应不同冲刷工况(流速10m/s、15m/s、20m/s,含沙量3kg/m³、6kg/m³),确保数据可比性。

4.2 冲刷磨损试验过程

冲刷试验采用自主研发的喷射式冲刷装置,模拟水流携带泥沙对试件表面的动态冲击。装置核心部件为高压水泵(最大压力2MPa)与砂粒喷射系统,通过调节阀门控制水流速度(误差±0.5m/s)与含沙量(误差±0.2kg/m³)。试验时,试件固定于旋转平台(转速5rpm),确保表面均匀受冲。每次试验持续6小时,每30分钟记录一次试件质量损失(精度0.01g),并采用三维激光扫描仪(精度0.05mm)扫描表面形貌。试验环境控制为室温20±2℃、湿度50%±5%,避免温湿度对材料性能的影响。为模拟实际工况,每完成一组试验后,用清水冲洗试件表面残留泥沙,并静置24小时干燥后再进行下一轮冲刷。试验过程中发现,钢纤维混凝土试件在高速冲刷下出现纤维外露现象,聚合物改性混凝土表面则形成光滑耐磨层,普通混凝土表面粗骨料快速剥落。

4.3 试验结果分析

质量损失数据表明,聚合物改性混凝土抗冲蚀性能最优,在

20m/s流速、6kg/m³含沙量工况下,6小时质量损失仅为0.42kg/m²,较普通混凝土(1.85kg/m²)降低77%。钢纤维混凝土次之,质量损失为0.98kg/m²,其纤维桥接作用有效抑制了裂缝扩展。表面形貌分析显示,普通混凝土冲刷后形成深达5~8mm的凹坑,钢纤维混凝土凹坑边缘呈锯齿状,而聚合物改性混凝土表面仅出现轻微磨痕。进一步通过SEM观察发现,普通混凝土磨损面存在大量微裂缝与骨料剥落坑,钢纤维混凝土纤维拔出区域伴随基体碎裂,聚合物改性混凝土则形成连续的聚合物膜包裹骨料,显著提升了界面粘结强度。

5 结论

本研究围绕水闸底板冲刷破坏机理与抗冲蚀材料性能展开系统研究,得出以下结论:水流冲刷与泥沙磨损的耦合作用是底板破坏的主控因素,破坏模式以表面磨损、骨料剥落及裂缝扩展为主,流速、含沙量及材料性能显著影响冲刷速率。通过数值模拟与试验验证,建立的流场-结构耦合模型可精准预测冲刷坑演化过程,为工程防护提供理论依据。综合性能与成本,建议高冲刷区域采用聚合物改性混凝土,中低风险区域选用钢纤维混凝土,并配套表面防护涂层与智能监测系统,以实现水闸底板的长效安全运行。

[参考文献]

- [1] 邹连鑫. 水利工程中泵站水闸洪涝排水与止水问题分析[J]. 中国水能及电气化, 2021, (08): 49-52.
- [2] 张子钰. 巨亭水电站下游冲刷的三维数值模拟[D]. 西北农林科技大学, 2020.
- [3] 李刚. 新疆多泥沙河流水闸底板抗冲磨材料选择及应用[J]. 水利水电技术, 2016, 47(03): 76-78.
- [4] 高翔. 闸坝式水电站下游局部冲刷及水力特性试验研究[D]. 西北农林科技大学, 2015.

作者简介:

孙珍珍(1990-),女,汉族,河南沈丘人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:水闸、泵站、堤防运行管理,病险水闸除险加固。