

河道节制闸水工建筑物泥沙磨损破坏机理及防护措施

曹 阳 王金伟

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘 要:河道节制闸在多泥沙河道运行过程中,长期遭受含沙水流持续冲磨作用,易出现混凝土表层剥落、骨料裸露、闸墩沟槽及消能设施破损等典型病害,严重削弱结构稳定性与运行可靠性。本文系统阐述泥沙磨损的基本破坏机理,全面分析水力条件、泥沙特性、结构材料及运行管理的关键影响因素,提出水力体型优化、耐磨材料防护、泥沙治理及常态化运维的综合防控措施,并结合工程实例验证技术成效,为同类水闸磨损病害治理提供参考。

关键词:河道节制闸;水工建筑物;泥沙磨损破坏机理;防护措施

引言:河道节制闸是水资源调控、防洪排涝与河道治理的重要水工建筑物,在多泥沙河流工况下,水沙交替作用剧烈,闸区流态复杂多变。长期运行中,悬移质与推移质泥沙的持续磨蚀、高速水流冲蚀及气蚀耦合破坏,极易造成闸体结构损伤累积,引发设备运行隐患,缩短工程服役年限。为有效遏制泥沙磨损病害发展,提升水闸安全运行水平,本文深入探究其破坏规律,梳理科学完善的防护技术体系。

1 河道节制闸水工建筑物泥沙磨损破坏基础理论与病害特征

1.1 节制闸水工建筑物结构组成及运行特性

(1) 核心结构功能:闸室安装闸门与启闭设备,实现挡水与调流;底板承担荷载传递及防渗防冲;闸墩分隔闸孔并为闸门导向;门槽用于升降导向,其突变易诱发言生流动分离;消力池与海漫削减下泄动能,保障河床稳定。(2) 水流运动规律:高水位全开时,过闸流近似堰流,流态平稳;低水位小开度时,门后形成收缩断面,流速激增,下游常伴淹没水跃,流态复杂;水位频繁变动时,呈现明显非恒定特征^[1]。(3) 泥沙输移特性:闸前水流减速致悬移质落淤,形成淤积区;过闸后流速陡增,挟沙力上升,引发闸后冲刷;推移质在底板滚动,悬移质扩散下移,形成“闸前淤、闸后冲”的典型分布格局。

1.2 泥沙磨损基本理论

(1) 悬移质泥沙冲刷磨损机理。细颗粒悬移质以高速随水流运动,小角度冲击壁面时产生微切削作用,逐步磨蚀水泥砂浆层,导致表面粗糙度增大并加速后续材料损失。(2) 推移质泥沙撞击磨损机理。粗颗粒推移质沿底部滚动或低角度跃移,以凿削与碾磨方式冲击混凝

土表面,形成撞击坑并扩展为凹槽,其单次撞击破坏力明显强于悬移质。(3) 泥沙磨损与气蚀、冲蚀的耦合破坏机制。高速水流诱发空化,气泡溃灭产生冲击波,使表层萌生微裂纹;泥沙颗粒嵌入裂纹并加速扩展,冲蚀水流进一步剥离松散材料,三者循环叠加形成协同加速破坏效应。

1.3 节制闸典型泥沙磨损病害特征

(1) 底板、护坦混凝土表层剥落、骨料裸露磨损病害。表层砂浆遭受推移质反复碾磨后逐渐消失,粗骨料出露并松动脱落,形成深浅不一的剥蚀坑,集中分布在水跃跃动区域。(2) 闸墩、门槽局部凹陷、沟槽磨损病害。闸墩前缘因含沙水流切削形成纵向凹陷,门槽两侧因涡旋冲蚀产生马蹄形沟槽,中下部磨损深度较大,威胁闸门运行安全。(3) 消能设施磨损破损、结构剥蚀病害分布规律。消力池底板在射流冲击点出现点状冲坑,海漫段呈面状均匀剥蚀。病害从上游至下游呈现“局部点蚀—面状剥落—结构松散”的递进分布规律,且随水头与含沙量增加而明显加剧。

2 河道节制闸水工建筑物泥沙磨损破坏关键影响因素与机理分析

2.1 水流水力因素影响分析

(1) 水流流速、流态对泥沙磨损强度的影响。磨损强度与流速呈高次幂函数正相关,流速微增即引起磨损量急剧上升。层流状态下颗粒运动平顺,壁面冲磨较缓和;紊流状态下颗粒随机脉动增强,壁面受撞击频率显著增加。急流区底部剪切应力集中,推移质持续高强碾磨底板;缓流区以悬移质磨蚀为主,磨损强度相对较弱^[2]。(2) 水流紊动、局部涡流对结构局部磨损的加剧作用。高紊动强度增加泥沙颗粒与壁面的碰撞概率。

闸墩两侧绕流、门槽回流及消力池坎前涡旋处,高浓度泥沙循环扫掠壁面,涡流区磨损速率可达均匀流区的数倍,是结构局部加速破坏的关键水动力原因。(3)水位变幅、过闸流量波动的动态磨损效应。水位升降与流量波动迫使闸门频繁调节开度,闸后水跃位置随之摆动。磨损作用区域由静态定点扩展为动态往复扫掠,底板有效磨损范围扩大且损伤呈非均匀累积态势,加速结构整体性能衰减。

2.2 泥沙特性因素影响分析

(1)泥沙含沙量、颗粒级配与磨损程度的关联规律。含沙量增加提高磨粒浓度,壁面受撞击频率增大,磨损速率上升。颗粒级配影响磨损机制:粗颗粒以凿削剥落为主,细颗粒以微切削磨蚀为主,级配越宽粗细颗粒协同效应越强,材料去除效率显著高于单一粒径工况。(2)泥沙颗粒硬度、形状对结构表面的磨损差异。硬度决定磨粒压入深度,硬质矿物含量越高切削作用越强。棱角状颗粒具尖锐边缘,冲击时产生切削与犁沟作用,磨损量远高于磨圆度好的滚动碾磨颗粒。(3)汛期高含沙水流的高强度磨损破坏特性。汛期含沙量激增、颗粒偏粗且流速同步增大,三者叠加产生严重磨蚀效应。高密度含沙水流中颗粒撞击动能高、磨粒供给充沛,结构表面迅速出现骨料裸露与剥落,属最具破坏性的磨蚀工况。

2.3 结构与材料因素影响分析

(1)混凝土强度、密实度对抗磨损性能的影响。强度等级高的混凝土胶结力强,骨料与砂浆界面致密,颗粒压入困难。密实度高者内部孔隙少,表面致密层完整,能有效阻断裂纹切入。抗压强度每提升一个等级,体积磨损率可降低约15%~20%。(2)闸体结构体型缺陷、断面突变引发的局部冲磨加剧问题。闸墩头部过尖或消力池扩散角偏大均导致流线分离,含沙水流集中冲击局部壁面形成严重冲蚀沟槽。体型设计不合理者局部磨损深度常超设计预期,成为安全控制的关键部位^[3]。(3)老旧结构材料老化、表层破损对磨损的放大效应。碳化与冻融使表层疏松、微裂缝扩展,初始破损点成为应力集中区。含沙水流优先沿薄弱部位切削掏蚀,边缘不断后退加深,磨损呈放射性扩展,整体损伤远超材料未老化时的预期值。

2.4 运行管理因素影响分析

(1)闸门启闭运行方式对闸区流场、泥沙运动的影响。快速开启导致瞬时流量陡增,推移质大量冲击消力设施。频繁小开度运行使射流长期集中于固定带域,形

成底板纵向沟槽式集中磨损,缩短结构局部寿命。(2)长期淤积未清淤导致的局部泥沙集中磨损问题。闸前淤积压缩过水断面,流速被迫提高,挟沙能力增强。粗颗粒在底板附近富集并持续扫掠底表面,形成磨料流工况,底部磨损速率远超设计预估。(3)日常巡检维护不到位引发的磨损病害持续恶化。早期表层磨蚀与骨料外露若未及时处理,将迅速扩展为深层剥落坑。剥落坑改变局部边界、诱发更强紊动,形成损伤加重—流场恶化—磨损加速的自激循环,使可控磨蚀演变为深层破坏,大幅增加修复难度与成本。

3 河道节制闸水工建筑物泥沙磨损综合防护措施与工程应用

3.1 水力优化与结构体型防护措施

(1)闸体局部体型优化,改善闸区水流流态、消除涡流区。将闸墩头部设计为椭圆或流线型,减小绕流分离角,抑制尾涡脱落强度,从水动力源头降低壁面紊动冲击频率。门槽结构增设导流坡面或采用填充式活动盖板,消除腔体内回流滞留区,避免含沙水流在槽内循环扫掠。消力池边墙及扩散段采用渐变式曲线过渡,避免断面急剧变化引发的流动分离与回流带,使过流面流速梯度均匀化,减少局部磨损热点。(2)增设消能、导流设施,降低高速水流与泥沙冲击强度。在消力池内增设二级消力坎、趾墩及T型墩等辅助消能工,强迫水跃提前壅水归槽并稳定跃首位置,使主流冲击区由线状扩展为面状分散分布,降低单位面积上的泥沙冲击动能密度。闸墩两侧设置导流排或弧形导流板,平顺引导主流归中,削弱两侧边壁遭受的侧向含沙射流冲刷。(3)优化闸门启闭调度方案,规避高磨损运行工况。根据上游来水来沙条件制定多级开度操作规程,避免长期小开度大流量运行,防止射流长期集中于底板同一带域。汛前结合水文预报实施分级调度,将闸门调节至高磨损敏感度较低的运行区间,缩短高含沙与高流速叠加运行时长,实现运行方式与磨损安全的最优匹配^[4]。

3.2 抗磨损防护材料应用技术

(1)高性能抗冲磨混凝土、钢纤维混凝土改性应用。采用高强硅酸盐水泥并掺入硅灰、粉煤灰等活性掺合料,降低水胶比至0.32以下,使基体致密度大幅提高,抗冲磨强度较普通混凝土提升50%以上。钢纤维混凝土通过在基体中乱向分布钢纤维,有效阻滞微裂纹扩展,显著增强抗冲击韧性,适用于消力池底板及尾坎等强冲击磨蚀区域。浇筑过程中严格控制钢纤维均匀分散,避免结团。(2)环氧树脂、聚氨酯等耐磨防护涂层施工技术。环氧树脂涂层与混凝土基体粘结强度

可达 4MPa 以上, 固化后形成致密耐磨面层, 适用于门槽、闸墩前缘等精度要求高的局部区域。聚氨酯涂层弹性好、伸长率高, 抗冲击性能优良, 可用于变形缝附近及振动较大部位的柔性防护。施工前须喷砂或高压水射流处理基面至 Sa2.5 级粗糙度, 分层涂覆控制每层厚度 0.5~1.0mm, 避免起泡与开裂。(3) 钢板衬砌、聚合物砂浆等局部补强防护技术。在门槽轨道区、底板射流冲击点等重度磨损部位铺设 8~12mm 厚耐磨钢板衬砌, 通过植入锚筋与结构可靠连接, 接缝处过渡磨平处理。聚合物砂浆掺入高分子乳液增强粘结性与抗裂韧性, 固化快、施工便捷、成本适中, 适用于磨损深度 3~5cm 的浅表层修补。单次修补厚度控制在 3cm 以内, 超过时分层施工, 下层硬化后再铺设上层。

3.3 工程运维与泥沙治理防护措施

(1) 常态化闸区清淤、泥沙疏导治理技术。建立汛前汛后定期清淤制度, 采用高压射流扰动结合泵吸排沙联合工艺疏导闸前淤积物, 在下游设置集沙沉淀坑并定期外运处置。对于粗颗粒富集区, 增设拦沙槽或沉沙池先行拦截粒径大于 0.5mm 的推移质, 减少参与过流磨损的硬质磨粒总量, 从泥沙供给端有效降低磨损原料来源。(2) 磨损病害定期检测、预判与预防性养护机制。建立年度定期检测制度, 综合运用回弹仪检测表层强度、超声波测厚仪测定有效厚度变化、三维激光扫描精确重建磨损面形态。依据检测数据进行磨损速率趋势分析和剩余寿命预判, 在磨损量接近警戒值即启动预防性修补, 将维修时机由事后抢修提前至早期控制, 避免病害由浅表磨蚀演变为深层结构破坏^[5]。(3) 极端汛期工况下的专项防护管控措施。编制高含沙洪水专项应急预案, 汛期加密水沙实时监测频次至每 2 小时一次, 当含沙量超过设计警戒阈值时立即启动降库腾空运行模式, 减少高浓度含沙水流过闸时长。汛前加装临时防护钢板或应急耐磨盖板, 汛后及时检查评估结构状态并拆除或更换, 确保极端工况下结构安全度汛与工程长期运行可靠性。

3.4 工程案例应用与效果分析

(1) 典型多泥沙河道节制闸磨损防护工程实施方案。以黄河中游某大型节制闸为例, 该闸年均含沙量约 25kg/m³, 运行十余年出现底板冲坑、闸墩沟槽等严重磨损。实施方案为: 消力池底板采用 C60 钢纤维抗冲磨混

凝土修复, 厚度 40cm; 闸墩前缘及门槽区域敷设 8mm 厚耐磨钢板衬砌; 配套实施闸前高压射流清淤系统。工程总投资约 320 万元, 施工工期 75 天。(2) 不同防护技术的施工工艺与适配场景分析。钢纤维混凝土适用于大面积底板修复, 需控制搅拌时间确保纤维均匀分布、振捣密实。环氧涂层适用于精度要求高的门槽面层防护, 须在干燥环境施工、养护期不少于 7 天。钢板衬砌适用于局部重度磨损区, 锚固间距不宜大于 30cm。聚合物砂浆适用于中小面积浅层修补, 单次修补厚度控制在 3cm 以内, 分层施工保证粘结质量。(3) 防护工程运行效果、经济性与耐久性评价。该闸修复后经过两个汛期运行检验, 底板最大磨损深度由修复前的 8.5cm 降至 1.2cm, 闸墩沟槽深度无明显增加, 防护效果显著。钢纤维混凝土抗磨寿命预计可达 10~15 年, 年均防护成本约 25 万元, 仅为重建费用的 5%~8%。环氧涂层区在门槽部位服役 5 年后仍保持完好, 整体防护方案经济性与耐久性良好, 具备推广价值。

结束语

本文厘清了河道节制闸泥沙磨损的病害特征与多因素耦合破坏机理, 从水力优化、材料防护、泥沙治理、运维管控四个维度构建了全方位磨损防护体系。工程应用证明, 综合防护措施可显著降低闸体磨损程度, 有效延缓结构老化损伤, 提升节制闸运行稳定性与耐久性能。该防护方案经济适用、可行性强, 能够为多泥沙地区河道节制闸的病害防治与长效运维提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] 王磊, 李军, 张恒. 多泥沙河道节制闸混凝土结构泥沙磨蚀破坏机理及防护技术 [J]. 水利水电技术, 2024, 55(07): 89-96.
- [2] 刘坤涛, 王应周. CK 新型抗冲磨材料在水闸水工建筑物磨损修复中的应用 [J]. 四川水力发电, 2025, 44(03): 112-115.
- [3] 张明, 赵文博. 水工结构冲磨空蚀破坏影响因素及防护涂层性能对比 [J]. 水利水运工程学报, 2023, 14(05): 78-85.
- [4] 陈建军, 吴浩. 平原河道节制闸闸下泥沙冲刷磨损病害成因及防控措施 [J]. 江苏水利, 2024, 7(08): 41-44.
- [5] 周凯, 杨晓东. 高含沙水流下水工混凝土磨蚀机理与改性防护技术 [J]. 人民长江, 2022, 53(11): 165-170.