

水闸上下游冲刷坑形成机制与防护方法探讨

卢艳丰 王红飞

内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘要】：水闸上下游冲刷坑的形成机制通常与水流的流速、流态及底床材质等因素密切相关。在长期使用过程中，水流的冲击和流动特性可能导致水闸区域的底床发生破坏，形成冲刷坑。研究这些冲刷坑的形成机制对于预防水闸故障具有重要意义。本文分析了水闸上下游冲刷坑的形成过程，并提出了几种有效的防护方法，包括改善水流的流态、采用抗冲刷材料以及增加底床稳定性等措施，以保障水闸的安全运行。

【关键词】：水闸；冲刷坑；形成机制；防护方法；水流特性

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.072

水闸是水利工程中的核心组成部分，它直接影响着水利设施的功能和安全。随着使用年限的增加，水流冲刷作用可能导致水闸上下游出现坑洞，这些坑洞不仅影响水流的稳定性，还可能引起设备的损坏，甚至威胁到水闸的整体结构安全。尽管现有研究已对水流冲刷有了一定的了解，但针对水闸上下游冲刷坑的形成机制及其防护方法的系统探讨仍然较少。因此，针对这一问题的深入研究具有重要的理论意义和实际应用价值。通过揭示冲刷坑的形成机制，并提出科学有效的防护措施，能够有效延长水闸的使用寿命，提高其抗冲刷能力，保障水利设施的正常运作。

1 水闸上下游冲刷坑的形成原因

1.1 水流流速对冲刷坑形成的影响

水闸启闭运行过程中，过闸水流在闸孔收缩断面形成高速射流，流速骤增使底床切应力显著提高。当近底流速超过床沙起动流速时，颗粒发生推移与跃移运动，局部河床迅速下切，逐步演变为冲刷坑。尤其在泄洪或大流量工况下，紊动强度加大，湍流脉动对床面的冲击频率增加，导致冲刷深度持续扩大。下游消能条件不足或水深偏小情况下，水流能量难以有效衰减，高速主流沿河床轴线集中发展，使冲刷坑呈现纵向延伸和深槽化特征。

1.2 底床材质对冲刷坑的作用

水闸上下游河床结构直接决定抗冲性能差异。若底床以粉砂或细砂为主，颗粒粒径小、黏聚力弱，临界起动切应力较低，在高速水流作用下易发生整体扰动，形成较大范围淘刷^[1]。若为卵石或块石结构，颗粒级配良好且嵌挤作用明显，抗冲能力相对较强，但在局部冲击集中区域仍可能出现架空与掏蚀现象。基岩覆盖层较薄或存在软弱夹层时，冲刷后易产生基底裸露，削弱闸基稳定性。河床材料的不均匀分布还会造成差异冲刷，加剧坑槽形态不规则发展。

1.3 水流态对冲刷坑的影响

闸下水流在消能工以下常呈现复杂流态结构，包括紊流区、回流区及水跃区等多种形态。若水跃位置控制不当，跃后滚动水流会对下游床面产生强烈冲击，形成局部强剪切区，促使冲刷坑迅速加深。回流涡旋的存在使床沙产生反复扰动，导致坑缘失稳塌落，扩大冲刷范围。主流摆动频繁时，冲刷位置随之偏移，形成多点分布的坑槽格局。流态不稳定还会增强三维流动效应，使冲刷过程呈现明显的空间非均匀性。

2 水闸冲刷坑的防护技术

2.1 改善水流流态的技术措施

水闸上下游冲刷坑的治理关键在于调控闸下水流结构，使动能有效分散并降低近底流速。通过优化消能工型式，可改变高速射流的扩散路径，削弱主流集中冲击效应。底流消能可采用消力池与尾坎组合结构，利用水跃形成强烈掺气与紊动耗散能量，使水流由急变缓，降低床面剪切应力。挑流消能方式适用于高水头工况，通过挑坎将射流抛向远离闸基区域，使冲击点外移，从而减轻闸下基础部位淘刷风险。增设导流墩、分流墙及护坦延伸段，可调整流速分布，减弱偏流现象，控制主流轴线稳定。针对局部冲击强烈区域，可布设消力齿或消能块体，增加紊流尺度，破坏高速射流的完整结构。通过水力模型试验与数值模拟对流态进行校核，可精确确定水跃位置与能量衰减范围，避免消能不足或过度紊动引发新的冲刷集中区。

2.2 抗冲刷材料的选择与应用

水闸上下游防护结构的耐久性与材料性能密切相关。护坦及护坡常采用高强度混凝土或钢筋混凝土结构，以提高抗压与抗剪能力，抵御高速水流冲击。块石或卵石护面适用于流速变化较大的区域，通过颗粒间嵌锁作用增强整体稳定性。为提高抗掏蚀性能，可采用粒径级配合理的抛石护底结构，使上层块石形成稳定防护层，下部铺设反滤层，防止细颗粒流失^[2]。近

年来,高性能纤维混凝土与聚合物改性材料在护坦结构中得到应用,能够提升抗裂与抗冲击性能,延缓结构疲劳破坏。土工合成材料在护底工程中具有良好适应性,土工布可作为反滤与隔离层,防止渗流带走细颗粒;土工格栅可增强整体抗拉强度,提高防护体系的整体性。材料选型需结合设计流速、冲刷深度及水力条件进行计算分析,确保抗冲安全系数满足规范要求。

2.3 底床稳定性增强技术

提升闸下底床整体抗冲能力是控制冲刷坑扩展的重要手段。对软弱河床可实施换填处理,将原有细粒土层替换为级配碎石或块石垫层,形成高抗剪强度基础。采用深层搅拌桩或水泥土桩加固,可提高地基承载力与抗渗性能,减少渗透破坏对床面的削弱影响。在护坦下方设置排水减压系统,有助于降低扬压力与孔隙水压力,防止底板掀起或结构失稳。为防止冲刷坑向两侧扩展,可构建护脚结构与防冲槽,形成空间约束体系,限制坑槽发展范围。对冲刷较为严重河段,可通过抬高下游水位或修建尾水控制工程,增加水深以降低单位宽度流速。工程实施过程中需结合地质勘察资料与水动力计算结果,合理确定加固深度与防护范围,确保底床结构在长期运行条件下保持稳定状态。

3 水闸上下游冲刷坑防护效果评估

3.1 防护措施的实际效果

对水闸上下游冲刷坑防护体系进行效果检验,应以实测水力参数与地形演变数据为依据。通过布设断面测量点与水下地形扫描,可对冲刷深度、冲刷范围及河床高程变化进行动态比对,分析防护结构实施前后的差异。运行期监测显示,当消能工与护底结构匹配合理时,近底流速明显降低,床面切应力控制在临界起动值以下,冲刷坑扩展趋势得到抑制。对护坦稳定性进行结构应力检测,可评估混凝土板块的受力分布与裂缝发展情况,判断抗冲性能是否满足设计要求。洪水过程中的实况观测尤为关键,通过对高水头工况下水跃形态与流态分布的记录,可验证防护体系在极端流量条件下的可靠性。长期运行资料表明,防护措施有效时,冲刷坑形态趋于稳定,河床演变速率显著减缓。

3.2 防护措施的经济性分析

水闸冲刷坑治理方案的合理性不仅取决于技术可行性,还需兼顾投资与运行成本。工程造价主要包括结构施工费用、材料采购费用及后期维护支出。采用高等级混凝土或新型复合材料虽可提升抗冲能力,但单位造价相对较高,需要通过寿命周期成本法进行综合测算。对比不同防护型式的耐久年限与维修频率,可量化长期经济投入差异^[3]。若防护结构在设计期内保持稳定,维护费用与加固频次降低,整体经济效益更为显著。

通过对洪水损失风险进行估算,可将潜在冲毁修复成本纳入评估体系,从而衡量防护投入与风险降低之间的关系。结合工程规模与水力条件,建立成本—效益分析模型,有助于选择投资合理且稳定性可靠的治理方案。

3.3 防护措施的可持续性评价

冲刷坑防护工程在运行周期内需保持结构稳定与生态协调。对结构耐久性进行评估时,应考虑材料抗疲劳性能、抗渗性能及抗冻融能力,避免因环境因素导致防护体系性能衰减。河道形态演变对防护效果具有长期影响,通过连续地形监测可分析河床调整趋势与防护结构之间的耦合关系。若防护措施导致局部流速重新分配,应评估其对下游河段冲淤平衡的影响,避免产生新的不稳定区域。生态因素亦需纳入评价体系,护底结构形式应兼顾水生生态环境,避免对河床生态结构造成破坏。通过构建多指标评价体系,将结构安全、运行稳定及环境适应性进行综合分析,可判断防护措施在长期运行条件下的协调程度。

4 水闸冲刷坑防护方法的优化策略

4.1 防护技术的多维度优化

水闸上下游冲刷坑治理需在水力条件、结构安全与地基特性等多因素耦合框架下进行系统优化。基于水动力数值模拟与物理模型试验成果,可对消能工尺度、护坦长度及尾坎高程进行参数校核,使水跃位置稳定于设计控制区间,避免冲击点偏移引发新的淘刷。通过对近底流速分布与床面剪切应力场进行三维分析,可优化护底厚度与防冲槽布置形式,提高结构抗冲安全储备。地基条件差异较大的河段,应结合地质勘察成果,对换填深度与加固范围进行分区设计,增强整体协同稳定性。运行阶段可引入在线监测系统,对流速、水位及床面变形进行实时采集,利用数据反馈调整调度方式,实现工程运行与防护结构之间的动态匹配,提升防护体系的整体可靠性。

4.2 新型材料的开发与应用

提高水闸冲刷坑防护能力,需要在材料性能层面实现突破。高韧性纤维增强混凝土可显著提升抗裂与抗冲击性能,降低高速水流长期作用下的疲劳破坏风险。超高性能混凝土在护坦关键部位应用,可增强抗压强度与抗磨蚀能力,适应高水头工况。复合土工材料在护底结构中表现出良好的抗拉与抗渗性能,能够与块石层形成整体受力体系,减少颗粒流失^[4]。对水下施工环境要求较高区域,可采用水下不分散混凝土或抗冲刷自密实材料,保证浇筑质量与结构完整性。材料耐久性需通过抗冻融、抗碳化及抗硫酸盐侵蚀试验进行验证,确保在复杂水环境下保持稳定性能。通过材料性能提升与结构形式改进相结合,可增强防护结构的长期稳定性。

4.3 防护技术的实施标准与规范

水闸冲刷坑防护工程的实施质量直接关系到结构安全与运行稳定,需建立明确的技术控制体系。设计阶段应依据水力计算成果与冲刷深度预测值,确定防护等级与安全系数,保证结构尺寸满足规范要求。施工过程中应严格控制基底处理质量,确保换填材料级配合理,压实度达到设计指标。护坦浇筑需保证混凝土强度等级与厚度均匀,避免因局部薄弱区产生应力集中。对抛石护底结构,应按设计粒径分级堆放,形成稳定嵌锁体系。工程验收阶段需开展水下检测与结构完整性检查,评估防护范围与实际冲刷边界是否一致。运行管理中应定期开展河床断面复测与结构巡查,及时发现异常变形与局部掏蚀现象,确保防护技术在规范约束下稳定实施。

5 水闸冲刷坑防护措施的未来发展方向

5.1 智能化监测与预警技术

水闸上下游冲刷坑演变具有隐蔽性与突发性特征,引入智能化监测系统可提升风险识别精度。通过布设多波束测深仪、声呐扫描设备及水下摄像装置,对河床形态进行连续获取,构建三维地形数据模型,实现冲刷坑空间形态的动态更新。结合流速仪与压力传感器采集的水动力参数,可建立床面切应力与冲刷深度之间的响应关系。依托物联网平台,将监测数据实时传输至控制中心,利用大数据分析机器学习算法识别异常趋势,提前发出预警信号。对关键结构部位可设置沉降与位移监测点,掌握护坦及防冲槽的变形状态。通过监测数据与调度信息联动,可在高流量运行前采取针对性控制措施,降低冲刷加剧风险。

5.2 防护材料的绿色化发展

水闸冲刷坑治理在强调结构安全的同时,应兼顾资源利用

与环境协调。绿色防护材料的研发方向集中于低碳配比与耐久性能提升。利用工业副产物替代部分水泥,可减少碳排放并改善混凝土抗渗性能。高耐磨再生骨料在护底结构中应用,可提高材料循环利用率^[5]。生态混凝土与多孔结构材料在护坡与护底工程中可形成适宜水生生物附着的界面,改善河道生态条件。植物纤维增强材料在低流速区域具有一定应用潜力,可增强土体抗冲能力并保持一定透水性。材料绿色化发展需在满足抗压强度与抗冲磨指标的前提下进行性能优化,使防护结构在长期运行中兼具稳定性与环境适应性。

5.3 水闸防护技术的集成创新

冲刷坑防护体系的提升依赖多学科技术融合。将水力学分析、结构工程技术与地基处理方法进行协同设计,可形成整体化防护模式。基于数值模拟成果优化消能工布置,与高性能材料应用相结合,增强防护层抗冲能力。信息化管理平台与工程监测系统整合后,可实现运行调度、结构状态与河床变化的统一管理。对不同水头等级与河床类型进行分类设计,形成标准化与模块化防护方案,提高工程适应性。通过试验研究与现场验证相结合的方式,不断修正设计参数与结构形式,使防护技术在复杂水文条件下保持稳定运行状态。

6 结语

水闸上下游冲刷坑的演变受水动力条件、河床结构及工程布置等多因素共同影响,合理配置消能结构、优化护底体系并强化监测管理,有助于控制冲刷范围与深度。结合材料性能提升与标准化施工管理,可增强结构整体稳定性与耐久水平。智能化监测与绿色材料应用的推进,为水闸安全运行提供更为可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 包宇.基于改进荷载传递方法的水闸地基土体抗拔受力变形分析[J].水利技术监督,2026(3):173-176.
- [2] 贺艳红.水闸深基坑锚杆抗拔承载特性研究[J].水利技术监督,2026(1):166-170.
- [3] 褚震洲.水闸工程卷扬式启闭机急停装置的设计与应用研究[J].水利技术监督,2026(2):265-267+304,343.
- [4] 施翔,龚志诚,陈柏.拦河坝水闸远程启闭智能化控制系统的设计研究[J].四川水力发电,2025,44(1):141-144.
- [5] 张挺,贾恺,李川,孙昌利,王飞,余允吉,马勇.水闸消力池排水孔淤堵修复技术研究[J].广东水利水电,2025(4):59-63.