

溢洪道挑流鼻坎冲蚀破坏的主要诱因及结构优化方法

陈智勇

樟树市水利工程服务中心 江西宜春 331200

【摘要】溢洪道挑流鼻坎在泄洪过程中，受高能水流持续冲击常发生严重冲蚀破坏，直接威胁水工建筑物正常运行安全。水流特性、地质条件及结构设计等因素，共同构成挑流鼻坎冲蚀破坏的主要诱因，其破坏过程呈现突发性与扩展性双重特征。为有效提升结构稳定性与抗冲能力，可采用改进结构型式、优化能量消耗设计及强化基础处理等方式，为同类水工工程提供可靠理论支持与实用工程参考。

【关键词】挑流鼻坎；冲蚀破坏；溢洪道；结构优化；水工安全

Primary Causes of Erosion Damage in Spillway Flow Diversion Weirs and Structural Optimization Methods

Chen Zhiyong

Zhangshu City Water Conservancy Engineering Service Center, Yichun, Jiangxi 331200

【Abstract】 During flood discharge, spillway flow diversion weirs frequently suffer severe erosion damage due to continuous high-energy water flow impact, directly threatening the operational safety of hydraulic structures. The primary causes of erosion damage include water flow characteristics, geological conditions, and structural design, with the destruction process exhibiting dual features of sudden onset and progressive expansion. To effectively enhance structural stability and erosion resistance, measures such as adopting improved structural configurations, optimizing energy dissipation designs, and reinforcing foundation treatment can be implemented, providing reliable theoretical support and practical engineering references for similar hydraulic projects.

【Key words】 flow-induced scouring; erosion damage; spillway; structural optimization; hydraulic safety

引言：

挑流鼻坎是溢洪道关键消能构造，运行安全关联整个泄洪系统稳定性，强泄流条件下，鼻坎部位易发生冲蚀破坏，造成局部结构失稳乃至失效，成为水利工程安全管理难题。工程实践中对该结构冲蚀机理认知欠缺，优化设计策略缺乏系统支撑。本文聚焦挑流鼻坎冲蚀主要诱因及结构优化策略，提升溢洪道工程整体抗冲性能，为水工结构设计与运行管理提供支撑。

一、挑流鼻坎冲蚀破坏的表现形式与危害机理

（一）冲蚀破坏的典型现象分析

高能泄洪工况下，挑流鼻坎常发生局部严重冲蚀，鼻坎迎水面及下游侧会形成冲坑、剥蚀、掉块等破坏形态。鼻坎挑流流股集中作用点附近，岩体结构松散或混凝土强度不足的区域，易遭高压水流反复冲刷而出现局部结构失稳。冲刷形成的凹坑持续扩大，削弱鼻坎结构对水流的偏转作用，造成流态失控，冲击范围逐步延伸。不少工程中，鼻坎根部受冲下切，出现翻板破损、塌落等严重状况，引发溢洪道底板及边墙连锁损坏，造成水流紊乱、结构稳定性骤降，极端工

况下，冲蚀范围持续蔓延，会影响闸室结构与坝体安全，埋下重大隐患。

这类冲蚀破坏存在明显空间扩展性与时间加速性，不及时干预会从局部损伤发展为整体结构破坏。表层材料剥蚀之外，下部结构基础会遭掏蚀、承载力大幅削弱，导致防冲设施彻底丧失功能。不少溢洪道工程里，挑流鼻坎后方冲蚀坑深度已超出设计厚度，危及坝体及泄洪洞主体稳定。冲蚀区域突破初始范围后，会对下游泄洪渠、消力池产生不利扰动，诱发新的冲蚀中心，形成恶性循环，识别掌握典型冲蚀现象，是后续优化设计与防护处理的关键。

（二）水动力作用下的破坏过程机制

泄洪运行时，挑流鼻坎直面高速水流冲击，破坏过程由高速水流携带的动能冲击、水体压力波动及气蚀现象协同诱发。高速水流流经鼻坎端部时形成急剧速度梯度，随之产生的湍流剪切力持续作用，加快结构表面材料的脱落速度。水流射后坠入下游冲击区域，形成动压集中与低压回流交替出现的复杂水流状态，极易引发负压附着现象与局部空蚀问题。水体中混杂的大小砂砾颗粒不断摩擦鼻坎混凝土表层及岩面，逐步加快整体冲蚀进程与速率。鼻坎结构形式与边界受力条件存在差异时，水力冲刷的作用机制呈现多样特征，直接对鼻坎抗冲性能形成挑战。

水动力还会在冲坑处引发涡旋效应,让局部水流维持回流状态,强化掏蚀效果时,促使结构内部产生周期性动应力,进而诱发疲劳损坏。结构裂缝及接缝位置,水流渗透后会产生高频率压力波动,直接造成界面性能劣化与混凝土表层剥离^[1]。基础岩体节理发育情况下,冲击应力作用下极易发生岩体劈裂与块体滑移现象,进而导致结构根基松动不稳。鼻坎结构在水动力作用下出现失效,原有挑流功能无法正常发挥,水流直接作用于下游各类设施,破坏范围逐步扩大。

(三) 冲蚀对溢洪道结构安全的影响

挑流鼻坎冲蚀破坏不只是局部构件损伤,会给整个溢洪道泄洪系统带来系统性安全隐患。冲蚀过程形成初始破坏面后,鼻坎失稳、底板掏空、护坡垮塌等连锁反应极易发生,溢洪道的能量消耗体系随之遭到破坏。中大型水库溢洪量大、水头高,挑流鼻坎功能失效后,水流会无序冲击下游结构,加剧设备及渠道磨损,还可能波及坝基安全引发工程事故。实际工程中这类损伤多次出现,给运行单位运维工作与防汛安全带来巨大压力。

结构安全性降低会削弱泄洪能力,限制调洪调度灵活性,洪水频发区域,高频率水流冲击会快速恶化鼻坎结构的稳定性与耐久性。冲蚀还可能造成坝前回水区水流回旋,扰乱溢洪道整体流态,引发振动与非对称冲击,作用于闸墩、底板与翼墙等关键构件。严重时会出现坝体渗漏、结构穿孔等危机,提升鼻坎抗冲蚀能力不是单纯的局部结构优化,关系到整个溢洪系统的安全冗余与灾害防控能力,是保障水工建筑物安全运行的核心环节。

二、冲蚀破坏的主要诱因分析

(一) 高能水流冲击特征及其控制因素

高能水流在挑流鼻坎处形成显著的动能集中,冲击特征体现为高流速、高水头差与瞬变冲击力的多重叠加。水流经鼻坎完成挑射运动后,落点区域会形成剧烈扰动区,流速可达到 10~20 m/s 以上,区域内存在大量空化核与气泡团,容易诱发空蚀破坏。挑流鼻坎形成的自由射流在落水阶段会持续携带并加速底部砂砾颗粒,提升颗粒冲击动能,对受冲区域结构形成显著磨蚀。射流与迎水坡、冲击池等结构发生相互作用,冲刷力量分布呈现高度不均,局部区域会出现冲坑、回流旋涡等状况,扩大结构损伤的覆盖范围。

影响高能水流冲击强度的核心要素包含水头高度、流量规模、鼻坎几何形态、入射角度及下游承载条件等内容。鼻坎挑流长度设计存在欠缺时,流股会出现过早坠落的情况,冲击点位置偏离预设消能区,降低整体消能作用。挑流角偏大容易造成射流飞溅或是涡流回卷,提升不规则冲击的发生概率。运行调度方案缺乏合理性,例如闸门频繁启闭、突发性泄洪等操作,会让水流工况出现剧烈波动,提升水流冲刷

作用。各类控制因素未得到充分预判与优化,会加快鼻坎区域冲蚀破坏的发展进程,加深结构受损的实际深度。

(二) 地质结构与材料抗冲性能的影响

溢洪道鼻坎及下游区域的地质条件,直接决定其抗冲蚀能力,基础岩体节理发育、风化强烈或存在断层破碎带时,结构整体性与抗剪强度显著下降,高能水流持续冲击下,剥蚀、崩塌与掏蚀现象极易发生^[2]。砂质岩层、页岩、泥岩等软质岩基,短期内便会形成深冲坑,无支护松散填土难以承受冲击剪切力,成为冲蚀发展的薄弱区域。地层不均、软硬互层的结构特性,让水流作用时出现差异性侵蚀,局部弱面先被破坏,破坏范围随之不断扩展。

材料自身抗冲性能,直接关联结构稳定性,传统混凝土强度等级不足、抗磨性差,或施工中存在蜂窝麻面、界面脱空等缺陷,水力冲击与空蚀作用下,极易破损剥离。未采用抗冲蚀专用混凝土、未添加防蚀外加剂时,耐久性无法保障。鼻坎与基础岩体粘结不牢、界面处理不当,会形成应力集中区,动态荷载下诱发结构剥离与位移,加速冲蚀演化进程。节理裂隙发育、软弱夹层分布不均的地基上,冲击水流易沿结构接触面渗透,掏蚀与空蚀同步发生,基础承载力逐步衰减,最终导致局部失稳乃至整体破坏。

(三) 结构设计缺陷与运行工况的耦合作用

挑流鼻坎结构设计存在尺寸不合理、能量消耗布置不足或与下游衔接不协调等问题,易形成水流紊动、冲击失控等不良工况。结构断面变化突兀,曲线过渡不顺畅,会引发局部水流加速与流线偏移,冲击力集中于单一薄弱位置,诱发局部冲坑。消力池深度或尺寸不足,落水区水位无法形成有效回流压强,射流会直接冲击底板,产生强烈掏蚀。鼻坎端部缺少足够抗磨保护层,反复冲刷下会快速磨损,降低整体防护效果,诱发连锁性破坏。

运行工况不稳定会放大设计缺陷的负面作用,实际调度阶段,超设计工况运行多由突发暴雨、非常规泄洪或闸门故障引发,使水流压力和流速屡次波动。原有水流管控系统失灵,水力冲击位置偏移,甚至越出鼻坎防护区域,导致预设防冲区域和实际冲刷区不吻合。若无科学监测和定期检修,无法及时发现细微裂缝与局部掏空,结构随耦合作用不断劣化。设计工作要兼顾各类泄洪流量组合、闸门启闭规律及极端洪水工况,核查水力响应,避免冲击点偏移和能量聚集;构建运行监测及维护机制,实现结构状态评估与调度参数的动态关联,切实防范冲蚀风险。

(四) 长期小流量泄洪下的累积性冲蚀效应

实际工程作业中往往忽略长期小流量、低流速泄洪给挑流鼻坎带来的隐性损坏影响,这类工况单次水流能量偏低,但时长久、频次密,容易在鼻坎局部位置(如导流边缘、接缝处或微凹面)形成稳定贴壁流或回流区,造成水流长期冲击同一位置。尤其碰到含沙水流情形,即便流速低于空蚀阈

值,细颗粒泥沙还可不断磨蚀混凝土表层,导致表面粗糙度上升、保护层脱落,进而引发微裂缝延伸和钢筋锈蚀。小流量泄洪期间水流一般难以充分避开鼻坎,易顺着鼻坎底部或侧壁泄出,形成“贴底流”或“侧向绕流”。强化鼻坎根部与翼墙结合部位的局部掏蚀,这类破坏具备隐蔽性强、进展慢且无法逆转的属性,往往在大流量泄洪到来前,就已让结构耐久性大幅降低。

三、挑流鼻坎结构优化方法研究

(一) 结构型式与几何参数的优化设计

挑流鼻坎的几何形式与尺寸参数,直接决定泄洪水流的流态特征及冲击位置,优化设计可有效控制高能射流路径,削弱局部冲击强度。优化需考量鼻坎挑流角度、长度、高差及端部形态,让水流脱离鼻坎后形成良好抛射曲线,精准落入预设消能区。翼墙与鼻坎结合部过渡曲线需流畅,削减紊流与旋涡区,防止射流偏移。曲线型鼻坎较直线型引导水流效果更优,可分散流速峰值,削弱局部冲蚀风险,需结合不同水库工况开展多工况水力计算与数值模拟,明确最不利工况下的流速分布、冲击落点及冲击强度。高水头、大流量溢洪道工程,可适度加大鼻坎挑距与高度,增强水流飞跃能力,增设挑流导板调整出流方向。

鼻坎底部设引流槽或减能坎,分散底板区域冲击压力,几何优化提升结构水力效率,强化抗冲蚀能力,是防控结构早期损毁的关键手段,设计阶段需统筹施工难度与运行安全性。合理确定鼻坎曲线半径、挑距、高差及端部形态,可有效控制水流流速分布与冲击落点,削弱局部动能集中;结合施工条件优化结构参数,助力提高施工精度与结构整体稳定性,为后期安全运行筑牢基础。

(二) 能量消耗与消能措施的合理配置

高能泄洪水流通过挑流鼻坎后需在落点区域完成充分消能,规避超高速水流对结构与地基造成损伤。消能措施配置的重点为削减水流动能、分散流速峰值,构建稳定的水流回流区域。常见消能构造涵盖挑流冲击池、翻滚消能池、跌坎式消能设施与尾坎导流平台等^[1]。这些构造与鼻坎水流特性适配布置后,可在冲击区域形成能量耗散带,减小水流冲刷作用强度,落点区布设消力池与防冲墩结构,可促使水流产生剧烈翻滚运动,快速耗散水体携带动能,减慢底板受冲

刷的速率。

消能区布设工作需结合现场地形条件、泄洪流量等级与坝体结构类型开展适配调整。陡坡地场景可选用深型冲击池搭配消力墩构件,形成形态稳定的回流水舌;地基土质偏软的区域需增设消力台与防冲板结构,提升底部结构的整体稳定性能。借助水力模型试验与三维数值模拟手段,可测算各类消能措施组合的实际应用效果,确定适配性最强的实施方案。项目运行阶段需搭建实时监测体系,跟踪消能设施受力状态与局部构件磨损程度,开展针对性维护与改造工作。

(三) 基础防护与抗冲蚀材料的应用技术

鼻坎及下游区域的基础防护,是抵御强烈冲蚀破坏的最后一道关键防线,优化基础防护措施,需兼顾材料自身强度、抗渗性、附着性能及耐久性,保障结构在长周期高频次冲击作用下始终保持稳定状态。工程中基础加固可铺设抗冲蚀混凝土衬砌、设立钢筋网加固层、埋设锚杆稳固层,全方位提升基础承载能力。节理发育或风化程度严重的岩基,可用高压灌浆或深层注浆法填充内部裂隙与空隙,显著提升整体抗剪性能与抗渗能力,避免掏蚀过程中引发的结构滑移或基础冲蚀范围持续扩大。

材料选型优先高强度耐磨抗冲蚀混凝土,掺入钢纤维、聚丙烯纤维等增强材料的专用复合型混凝土,在强水流磨损与空蚀叠加环境下抗劣化能力表现优良。部分工程采用新型聚合物防护涂层或橡胶垫片,在高冲击受力区域形成柔性缓冲保护层,有效延长结构使用寿命。施工过程中重视接缝处理与防渗构造合理布置,避免高压水流从细微缝隙渗入内部,进而破坏结构整体完整性。应对长期小流量冲刷风险,应在易受贴壁流影响的区域加装耐磨涂层或局部加厚防护层,调整鼻坎端部曲率,减少低流速时的水流附着。

结语:

溢洪道挑流鼻坎冲蚀破坏的主要诱因与结构优化方法得到全面梳理,高能水流冲击、地质条件薄弱、结构设计缺陷相互耦合,共同构成冲蚀损伤的核心成因。调整鼻坎结构型式、布设消能设施、加固基础防护并选用适配材料,可增强结构抗冲能力,保障长期运行安全。研究结论可为同类水工工程提供技术参考,助力延长工程使用年限,强化防灾与减灾的实际效能。

参考文献

- [1]周志鹏.溢洪道水力特性模型试验及数值模拟研究[D].大连理工大学, 2024.
- [2]岑嘉豪.某溢洪洞水力特性模型试验与数值模拟研究[D].大连理工大学, 2022.
- [3]吴鹏.矩形水舌表面初次破碎的大涡模拟研究[D].华北电力大学(北京), 2022.