

水闸老化病害类型及其对工程安全运行的影响机制分析

薛 峰 黄安琪

江苏省水利工程科技咨询股份有限公司 江苏 南京 210029

摘 要: 水闸工程在长期服役过程中,混凝土碳化、裂缝扩展、闸基不均匀沉降、防渗体系失效、金属结构腐蚀及机电设备老化等病害持续叠加,严重威胁工程安全运行。本文围绕水闸主体结构老化病害的分类体系、材料衰减与荷载环境耦合的成因机理,系统分析了结构性病害、渗流性病害及功能性病害对承载安全、防渗安全与运行安全的影响路径,并从病害演变规律、安全诊断监测技术与处治保障措施三个层面提出防控技术路径,为水闸老化病害的综合治理提供技术支撑。

关键词: 水闸老化; 病害分类; 安全影响机制; 防渗失效; 结构劣化

引言: 水闸作为水利枢纽中承担挡水与泄水双重职能的关键建筑物,服役年限增长后各类老化病害相继显现。混凝土结构开裂、闸基沉降变形、防渗体系失效、金属构件锈蚀等问题相互交织,对水闸承载能力、防渗性能与运行功能构成多维度冲击。深入剖析各类病害的类型特征与影响机制,是制定科学养护策略、保障工程长期安全运行的前提与基础。

1 水闸主体结构老化病害分类

1.1 闸室混凝土结构病害

水工混凝土结构长期暴露在干湿交替的水环境与户外大气环境中,碳化反应会持续向结构内部延伸,不断增加的碳化深度会破坏混凝土对钢筋的防护体系,让钢筋保护层原有防护功效逐步消退^[1]。结构服役阶段会产生多种类型的裂缝缺陷,干缩裂缝、温度裂缝、荷载裂缝、沉降裂缝会根据成型诱因形成不同的外观形态,依托结构受力状态和外部环境变化呈现差异化的空间分布特征。混凝土表层会随着服役年限增长出现多种劣化问题,表层结构逐渐脱落剥离会造成内部钢筋直接暴露在外界介质中,钢筋接触水汽和氧气后会产生锈蚀病变。结构施工阶段留存的蜂窝麻面等细微缺陷,会在长期水力冲刷和介质侵蚀作用下持续扩张恶化。混凝土内部骨料与胶凝材料会发生碱骨料化学反应,反应生成的膨胀性物质会在结构内部产生扩张应力,造成混凝土基体出现开裂损伤,持续破坏混凝土结构的密实度和整体完整性,弱化闸室混凝土结构的承载能力与耐久性能。

1.2 闸基与防渗体系病害

闸基土体长期承受上部结构自重与水体渗透压力的共同作用,土层会产生不均匀的压缩形变,不平衡的土体沉降会对闸底板结构产生剪切破坏作用,引发底板结构出现断裂或错位损伤。防渗帷幕结构长期处于水土

耦合的复杂工况下,结构材质会逐步老化破损,整体防渗性能持续衰减,渗透水流能够顺着结构薄弱位置持续渗透,慢慢形成贯通性绕渗通道。铺盖和闸底板的连接接触面会在长期结构形变与水力冲刷作用下产生分离缝隙,水体持续渗入缝隙内部会不断抬升结构承受的渗透压力。消力池与海漫作为主要消能导流结构,长期接受高速水流冲击和泥沙磨蚀作用,结构表层会持续损耗并形成冲刷坑。冲刷坑持续发育扩张会逐步掏空下部闸基土体,破坏闸基整体支撑体系的稳定性。

1.3 金属结构与机电设备病害

水闸钢制闸门长期接触水体和潮湿大气,表面会持续发生氧化腐蚀,钢材厚度不断减薄会降低闸门整体刚度与结构强度。配套止水橡胶构件会随服役时长增加出现材质硬化与弹性衰退,无法紧密贴合闸门衔接界面,彻底丧失阻水密封的基础能力。启闭机械设备长期持续运转,内部齿轮构件会出现渐进式磨损,齿轮咬合匹配度持续下降,承载钢丝绳会出现单丝或多丝断裂问题。液压传动系统密封构件老化失效后,油路会出现渗漏问题,影响设备传动稳定性。潮湿的户外工况会持续侵蚀各类电气控制元件,造成元件绝缘性能和工作性能衰退失效,自动化监控设备的数据采集、传输及分析功能逐步紊乱,引发整套监控系统丧失正常运行能力。闸体预埋金属构件长期埋藏于混凝土和水土环境中,腐蚀病变会改变构件外形与贴合状态,干扰闸门滑动运行轨迹,造成启闭作业出现卡滞问题,引发启闭作业所需作用力出现异常波动。

2 水闸老化病害的成因机理

2.1 材料性能自然衰减机理

混凝土材料长期处于水体浸润、化学离子侵蚀与温度往复变化的复合环境中,内部微观孔隙结构会持续发

生改变, 基材密实度逐步下降, 内部胶结体系不断弱化, 整体结构性能呈现渐进性劣化趋势^[2]。钢筋结构长期处于潮湿工况与氯离子富集环境中, 会持续触发电化学腐蚀反应, 腐蚀反应随时间不断推进, 逐步损耗钢筋有效截面积, 弱化钢筋与混凝土之间的粘结锚固效果。橡胶止水构件长期暴露在紫外线照射、臭氧氧化以及持续水体浸泡的环境中, 内部高分子分子链会逐步发生断裂分解, 材料柔韧性持续下降, 质地逐步硬化脆化, 密封适配性能大幅降低。各类金属构件长期经历干湿交替的环境变化, 表层氧化反应速率持续提升, 氧化腐蚀不断向构件内部延伸, 结构承受的交变应力会进一步诱发应力腐蚀问题, 加速金属材质的性能损耗与结构损伤。

2.2 荷载与环境耦合作用机理

水闸结构持续承受静态静水压力作用, 水位快速升降带来的荷载突变状态交替出现, 结构内部会不断产生细微损伤积累, 疲劳损伤的持续堆积会逐步改变结构固有受力状态。区域温度变化引发的冻融循环作用, 会反复挤压扩张混凝土内部孔隙, 逐步破坏混凝土原始孔隙结构, 促使表层及内部细微裂隙不断发育延伸。地基土体随环境干湿状态转换产生收缩与膨胀的体积变动, 持续对闸基础体形成往复挤压与扰动作用, 破坏闸基结构的稳定受力状态。河道水流携带的泥沙颗粒会持续摩擦撞击闸体过流表面, 水流产生的脉动冲击力反复作用于结构表层, 对过流混凝土及金属结构形成持续性冲刷剥蚀, 逐步削减结构表层厚度, 诱发各类表层及内部病害。

2.3 施工与运维缺陷叠加机理

工程建设阶段留存的施工质量隐患, 会在长期的荷载作用与环境侵蚀中不断发展, 细微缺陷逐步扩张为可见的结构损伤。伸缩缝密封结构出现失效问题后, 外界水分能够持续渗入结构缝隙, 持续侵蚀周边混凝土基材, 加快混凝土材质劣化与裂隙发育速度。排水通道出现淤积堵塞问题后, 闸室内部积水无法及时排出, 潮湿积水的环境会大幅加快钢筋锈蚀发展速度, 加剧内部结构损伤程度。日常运行过程中未能开展精细化养护作业, 各类初期细微病害无法得到及时处置, 轻微的表层损伤与材料劣化会持续蔓延, 逐步演变为影响整体运行状态的结构性损伤, 持续降低水闸工程的服役稳定性与耐久性能。

3 各类病害对工程安全运行的影响机制

3.1 结构性病害对承载安全的影响

闸室结构内部萌生的各类裂缝会在持续荷载与环境作用下不断延展贯通, 彻底打乱混凝土结构完整的受力框架, 造成结构整体刚度逐步衰减^[3]。结构抵抗形变与外

部荷载的基础性能持续弱化, 整体承载水平出现持续性下滑。闸基土体产生的不均匀沉降会改变闸体整体空间姿态, 造成闸室主体出现倾斜偏移的状态, 闸门与门槽的匹配关系随之发生改变, 正常启闭行程受到阻碍, 干扰水闸常态化运行流程。底板出现断裂破损后, 水闸原有完整的荷载传递体系遭到破坏, 结构内部受力路径发生紊乱, 应力会在结构薄弱区域不断聚集, 进一步加速破损区域的损伤扩展速度。混凝土保护层出现剥落破损后, 内部钢筋直接暴露在复杂水土环境中, 锈蚀病变会持续损耗钢筋有效受力截面, 结构能够承受的极限荷载不断降低, 大幅削弱闸室主体结构的安全储备, 弱化工程长期稳定承载的基础条件。

3.2 渗流性病害对防渗安全的影响

防渗结构破损发育形成贯通性绕渗通道后, 闸基内部原有渗流分布格局发生改变, 渗透压力在基底重新分配, 闸体底部承受的扬压力持续提升, 对闸体竖向稳定与抗滑移性能造成不利影响。渗流水体持续沿结构缝隙流动, 会不断冲刷搬运地基内部的细小填充颗粒, 改变地基土体的原始密实结构, 土体孔隙不断扩张, 大幅提升基础出现管涌等渗透破坏的风险。渗流作用力持续增长并超越土体自身具备的抗剪强度时, 地基表层土体就会出现隆起变形, 深层土体在水流持续淘刷作用下逐步剥离流失, 引发基础整体形变与结构失稳。防渗体系整体性能衰退失效后, 闸后水域会出现非正常水位抬升现象, 上下游水域形成的水头差值无法维持稳定状态, 水闸挡水、控水的基础功能失去可控条件, 严重扰乱工程防渗体系的稳定运行状态。

3.3 功能性病害对运行安全的影响

闸门止水构件密封性能衰退失效后, 闸门闭合状态下无法实现完全阻水, 渗漏水流量会持续出现, 过闸水体流量难以实现精准调控, 直接干扰流域上下游水量调配的整体节奏与运行秩序。启闭设备内部构件出现磨损、渗漏等各类故障问题时, 闸门开合动作的流畅度大幅下降, 作业效率受到明显制约, 无法按照调度标准在规定时间内完成完整的启闭作业流程。消力池结构遭受水流冲刷损毁后, 下泄高速水流携带的巨大动能缺少有效的消解途径, 高速紊动水流直接冲击下游河道及防护设施, 破坏下游水域与岸坡结构的稳定状态, 带来持续性安全隐患。监测系统设备出现失灵问题后, 水闸运行过程中的各类动态参数无法正常采集与传输, 结构病害与运行隐患处于隐匿状态, 各类潜在风险无法及时排查处置, 持续威胁水闸整体运行的稳定性与安全性。

4 病害演变趋势与安全防控技术路径

4.1 病害演变的时空特征与发展规律

混凝土结构产生的裂缝会跟随结构荷载的反复循环作用呈现阶段性的扩展特征,表层细微裂隙会持续向结构内部延伸拓展,逐步贯穿混凝土保护层与基材层,持续破坏结构整体的完整形态^[4]。水闸长期服役过程中,闸基内部零散的渗流缝隙会不断发育连通,逐步形成贯通性的渗流通道,水体渗透体量会跟随结构破损程度持续提升,整体增长状态具备非线性变化特征。金属构件的腐蚀损伤会呈现阶段性发展特点,服役初期的腐蚀进程相对平缓,材质损耗速度处于较低水平,运行进入中后期后腐蚀进程会持续加快,材质性能会快速衰减,结构状态会在特定节点突破稳定阈值,进入快速失效阶段。水闸工程各类老化病害并非独立发展,不同类型病害能够形成相互影响的耦合作用,单一结构出现的材质劣化或局部损伤,会持续诱发周边结构产生同类或异类病害,推动整体结构性能出现连锁式劣化,加速工程整体服役状态的衰退进程。

4.2 结构安全状态诊断与监测技术

依托成熟的无损检测技术体系,可以对混凝土结构裂缝开展深度以及内部钢筋锈蚀发展程度开展精细化探测,无需破坏结构表层形态即可精准获取结构内部损伤状态,为结构病害研判提供精准数据支撑。针对闸基隐蔽性渗流问题,可运用专业化监测技术捕捉渗流场的动态分布变化,持续追踪结构底部扬压力的动态波动情况,实现对闸基防渗运行状态的全天候动态把控。依托智能化在线感知设备,能够实时捕捉闸门运行过程中的形体形变数据,精准识别启闭作业过程中的作用力异常状态,及时捕捉机械设备运行隐患。多维度监测渠道采集的各类原始数据可开展融合处理与深度分析,结合水闸结构受力特征与运行标准,完成对结构整体安全运行状态的综合性研判,精准判别结构损伤发展阶段与潜在运行风险。

4.3 病害处治与安全保障技术措施

针对混凝土结构裂缝病害,可采用高压注浆工艺填充裂隙内部空间,注浆压力通常控制在0.3~0.5MPa,完全封闭裂缝发育通道,搭配高性能表面防护涂层作业,

封堵结构表层细微孔隙,阻隔外界侵蚀介质侵入结构内部,抑制混凝土材质持续劣化。针对闸基防渗体系老化破损问题,可通过高压旋喷灌浆工艺加固松散地基土体,旋喷直径可达0.6~1.2m,填充基底渗流空隙,针对破损严重的防渗结构开展防渗墙重建施工,防渗墙厚度一般不小于0.8m,全面恢复闸基防渗控水能力^[5]。金属结构养护修复作业以表层除锈处理为基础,清除结构表面腐蚀介质后涂刷长效防腐材料,涂层厚度不低于200 μm ,提升金属结构抗腐蚀能力,对弹性衰退、密封失效的止水构件进行整体更换,恢复闸门闭合后的密封止水效果。针对消力池与海漫护坦的冲刷破损病害,采用高强度抗冲刷耐磨材料修复破损结构,抗压强度不低于C40,重塑过流结构标准形态,通过结构加固工艺提升防护设施抗水流冲击与泥沙磨蚀能力,稳固水闸消能防冲体系的运行性能。

结束语

水闸老化病害的发生与发展是材料性能衰减、荷载环境耦合及运维缺陷叠加的综合产物,结构性、渗流性与功能性病害分别从承载安全、防渗安全与运行安全三个维度持续侵蚀工程服役性能。病害之间存在明显的耦合促进关系,单一病害可诱发连锁劣化。依托无损检测与智能化监测手段开展结构安全诊断,结合高压注浆、防渗墙重建、金属防腐及抗冲刷加固等处治技术,能够有效遏制病害蔓延势头,维持水闸工程整体安全运行状态。

参考文献

- [1]于文涛,刘柱法,董继坤.水闸结构运行中的常见病害及加固处理技术[J].大众标准化,2025(14):56-58.
- [2]陈海波.水利工程中水闸加固施工技术的应用分析[J].中华建设,2025(30):180-182.
- [3]余杰.水利工程施工中水闸安全运行措施研究[J].水上安全,2026(4):136-138.
- [4]林森.水利工程施工中水闸安全运行措施分析[J].水上安全,2025(3):173-175.
- [5]李兰平.水利工程施工中水闸安全运行措施研究[J].中国科技纵横,2025(22):134-136.