

# 病险水闸金属结构可靠性检测与修复技术

孙珍珍

新疆维吾尔自治区水利运行调度中心

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6260

**[摘要]** 病险水闸金属结构存在腐蚀、裂纹、变形等病害,严重影响水利工程安全。病害成因包括环境因素、设计缺陷和运行管理问题。通过无损检测、应力应变监测、材料性能检测等技术,可系统评估结构可靠性。修复技术涵盖表面修复、结构加固、更换与局部改造,需根据病害类型与施工条件选择。修复效果评价包括短期性能恢复与长期可靠性保障,通过现场检测与试验验证确保质量。本文形成了一套完整的解决方案,为病险水闸金属结构的安全运行提供技术支撑。

**[关键词]** 病险水闸; 金属结构; 可靠性检测; 修复技术; 健康监测

中图分类号: TV66 文献标识码: A

## Reliability testing and repair technology for metal structures of dangerous water gates

Zhenzhen Sun

Xinjiang Uyghur Autonomous Region Water Conservancy Operation and Dispatch Center

**[Abstract]** The metal structure of the dangerous water gate suffers from corrosion, cracks, deformation and other diseases, which seriously affect the safety of water conservancy projects. The causes of diseases include environmental factors, design defects, and operational management issues. Through non-destructive testing, stress-strain monitoring, material performance testing and other technologies, the reliability of structures can be systematically evaluated. Repair techniques include surface repair, structural reinforcement, replacement, and local modification, which need to be selected according to the type of disease and construction conditions. The evaluation of repair effect includes short-term performance recovery and long-term reliability guarantee, ensuring quality through on-site testing and experimental verification. This article presents a complete solution to provide technical support for the safe operation of metal structures in hazardous water gates.

**[Key words]** critical water gate; Metal structure; Reliability testing; Repair technology; Health monitoring

## 引言

水闸作为水利工程中的关键控制性建筑物,承担着防洪、灌溉、供水、排沙等重要功能,其金属结构(如闸门、启闭机、拦污栅等)的可靠性直接关系到工程的安全运行与效益发挥。然而,由于长期暴露于复杂水环境(如水质腐蚀、泥沙磨损、水流冲刷)及交变荷载作用下,加之部分水闸设计标准偏低、运行维护不当,金属结构普遍存在腐蚀、裂纹、变形等病害,导致结构性能劣化、启闭失灵甚至失效风险加剧,严重威胁水利工程安全。据统计,新疆病险水闸数量101座,其中金属结构病害占比超过80%,亟需开展系统性检测与修复技术研究。

## 1 病险水闸金属结构病害特征与成因分析

### 1.1 金属结构常见病害类型

病险水闸金属结构的病害类型多样,主要表现为腐蚀、裂纹和变形三大类。腐蚀是金属结构最常见的病害形式,包括均匀腐蚀和局部腐蚀。均匀腐蚀多因长期接触含氧或含氯离子的水体

导致,表现为金属表面均匀减薄,降低结构整体强度;局部腐蚀如点蚀和缝隙腐蚀则更具隐蔽性,易在焊缝、螺栓连接处等应力集中区域发生,可能引发突发性破坏。裂纹病害以疲劳裂纹和应力腐蚀裂纹为主,前者由交变荷载反复作用引起,常见于闸门启闭机构的连接件;后者则与水质中的腐蚀性介质(如硫化物)及拉应力共同作用相关,多发生于高强度钢材的焊接部位。变形病害包括局部屈曲和整体失稳,局部屈曲多由长期超载或局部腐蚀导致,如闸门面板凹陷;整体失稳则与结构刚度不足或支撑体系失效有关,可能引发闸门无法正常启闭。

### 1.2 病害成因分析

金属结构病害的成因可归结为环境因素、设计缺陷和运行管理问题三方面。环境因素中,水质条件是主要诱因。例如,含盐量高的水体易引发氯离子侵蚀,导致钢材点蚀;泥沙淤积产生的磨损与冲刷则会加速表面防护层破坏。设计缺陷方面,部分早期水闸采用低强度钢材或未充分考虑环境腐蚀性,导致结构耐

久性不足; 焊接工艺不合理(如未焊透、残余应力集中)也会埋下裂纹隐患。运行管理问题则体现在超载使用、维护不当等环节, 如部分工程管理人员管理水平有限, 未严格按照水闸控制运用方案执行, 长期超过设计水位运行, 加剧结构疲劳损伤; 工程管理人员数量严重不足, 部分水闸管理人员仅一人, 仅负责开闸、关闸工作, 未定期清理闸门表面附着物或未及时修补涂层破损, 加速腐蚀进程。

### 1.3 病害对结构可靠性的影响机制

病害对金属结构可靠性的影响主要体现在承载能力退化、耐久性降低和功能失效三方面。腐蚀直接减少截面厚度, 削弱结构抗压、抗弯能力; 裂纹扩展则可能引发断裂失效, 尤其在交变荷载作用下, 裂纹尖端应力集中效应会显著加速扩展速率。变形病害不仅影响结构几何稳定性, 还会导致启闭力异常增大, 增加驱动系统负荷。耐久性方面, 腐蚀与裂纹的协同作用会缩短结构使用寿命, 例如点蚀坑可能成为裂纹源, 加速疲劳破坏。功能失效则表现为闸门密封不严、启闭卡顿等问题, 直接影响水闸防洪、灌溉等核心功能。长期病害还会导致结构刚度非线性下降, 使可靠性评估中的不确定性显著增加, 需通过动态监测与概率分析综合评估其安全风险。

## 2 金属结构可靠性检测技术与方法

### 2.1 无损检测技术

无损检测是评估金属结构内部缺陷与表面损伤的关键手段。超声波检测(UT)通过高频声波在材料中的传播特性, 可精准识别焊缝、板材内部的裂纹与气孔, 尤其适用于厚壁构件的检测。磁粉检测(MT)利用铁磁性材料在磁场中的磁化现象, 通过施加磁粉显示表面或近表面裂纹, 具有操作简便、灵敏度高的特点, 常用于闸门连接件与轴类零件的检测。渗透检测(PT)则通过毛细作用使渗透剂渗入缺陷, 适用于检测非磁性材料(如不锈钢)的表面开口缺陷。涡流检测(ET)基于电磁感应原理, 可快速扫描涂层厚度、材质均匀性及腐蚀情况, 在闸门防腐层完整性评估中应用广泛。

### 2.2 应力应变监测技术

应力应变监测技术用于实时捕捉结构受力状态与变形特征。光纤光栅传感器(FBG)通过光栅波长变化反映应变与温度, 具有抗干扰强、分布式测量优势, 可嵌入闸门主梁、支臂等关键部位, 长期监测交变荷载下的疲劳损伤。振弦式传感器则通过钢弦振动频率变化测量应力, 适用于大型构件的长期稳定性监测。动态监测中, 还可结合加速度计与位移计, 分析结构振动模式与变形规律。例如, 在启闭机运行过程中, 通过监测关键节点应变幅值, 可判断结构是否存在局部过载风险。此类技术需与有限元模型联动, 将实测数据与理论计算对比, 验证结构安全性。

### 2.3 材料性能检测

材料性能检测为结构可靠性评估提供基础数据。硬度测试通过压痕深度反映材料局部强度, 常用于检测焊接热影响区性能退化。金相分析可观察微观组织(如晶粒尺寸、夹杂物分布), 判断材料是否发生脆化或相变。化学成分分析则通过光谱或质谱

技术, 确定钢材中碳、硫、磷等关键元素含量, 评估其耐腐蚀性。拉伸试验直接测定材料的屈服强度、抗拉强度与延伸率, 为结构剩余寿命预测提供依据。例如, 若检测发现闸门面板钢材屈服强度低于设计值, 则需进一步分析腐蚀或过载对材料性能的影响。

### 2.4 检测方案优化与数据处理

检测方案需综合结构特点、病害类型与环境条件优化。例如, 对长期浸水区域优先采用涡流与超声检测, 对振动频繁部位增加动态应力监测。多技术融合时, 需统一数据格式与坐标系, 避免信息孤岛。数据处理方面, 需修正检测误差(如超声波声速偏差、传感器温度漂移), 并通过概率统计方法量化缺陷尺寸与位置的不确定性。例如, 采用蒙特卡洛模拟分析腐蚀坑深度对结构强度的影响, 或利用神经网络算法识别应力监测数据中的异常模式。最终, 将检测结果与可靠性评估模型对接, 形成“检测-分析-预警”闭环, 为修复决策提供科学依据。

## 3 病险水闸金属结构修复技术

### 3.1 修复技术分类与适用条件

病险水闸金属结构的修复技术需根据病害类型、结构形式及运行环境分类选择。表面修复技术主要用于处理腐蚀、磨损等浅层缺陷, 包括喷涂、堆焊和热喷涂。喷涂技术(如金属陶瓷喷涂)适用于大面积防腐或磨损修复, 可快速形成致密防护层; 堆焊则用于恢复局部厚度或修复裂纹, 尤其适用于高应力区域。热喷涂技术(如等离子喷涂)可制备耐高温、耐腐蚀的合金涂层, 常用于闸门迎水面或水流冲刷区的修复。结构加固技术针对变形、裂纹等深层病害, 包括粘贴钢板、碳纤维增强及增设支撑结构。粘贴钢板法通过结构胶将钢板与构件粘结, 适用于抗拉、抗剪强度不足的梁体加固; 碳纤维增强复合材料(CFRP)具有重量轻、强度高优势, 适用于复杂曲面或空间受限部位的修复。更换与局部改造技术则用于不可修复或经济性差的构件, 如更换严重腐蚀的闸门面板或改造不合理的连接节点。选择修复技术时需综合评估病害程度、施工条件及成本效益, 例如对处于水下或潮湿环境的结构, 应优先选用耐蚀性强的修复材料与工艺。

### 3.2 关键修复工艺研究

关键修复工艺需结合病害特征优化实施。防腐防护工艺中, 表面预处理是核心环节, 需彻底清除锈蚀产物并达到Sa2.5级清洁度, 随后采用喷砂或抛丸工艺增强表面粗糙度, 提高涂层附着力。防腐涂层体系可采用环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+聚氨酯面漆的组合, 兼顾耐蚀性与耐磨性。裂纹修复工艺需根据裂纹类型选择方法, 对微小裂纹可采用止裂孔法或打磨消除应力集中; 对贯穿性裂纹, 需先开V型坡口, 再采用焊接修复并辅以焊后热处理消除残余应力。变形矫正工艺包括热矫正与机械矫正, 热矫正通过局部加热使材料屈服点降低, 配合外力恢复形状, 适用于低碳钢构件; 机械矫正则通过千斤顶或液压机施加外力, 适用于高强度钢或精度要求高的部件。修复过程中需严格控制温度、湿度等参数, 例如焊接修复时环境温度应高于5℃, 避免冷脆现象。

### 3.3 修复材料选型与性能要求

修复材料的选型需匹配结构功能与环境需求。防腐材料方面,高性能环氧涂料具有附着力强、耐化学性能优异的特点,适用于淡水或微咸水环境;锌铝合金涂层则通过牺牲阳极保护机制,适用于高盐度环境。结构胶材料需具备高强度、耐老化性能,如改性环氧树脂胶黏剂,其剪切强度应不低于30MPa,且能通过湿热老化测试。焊接材料需与母材匹配,例如对Q345钢材,应选用E50型低氢焊条,并控制焊缝扩散氢含量低于5ml/100g,防止氢致裂纹。碳纤维增强材料需满足抗拉强度 $\geq 2400\text{MPa}$ 、弹性模量 $\geq 150\text{GPa}$ 的要求,且与基材的粘结强度应不低于10MPa。此外,修复材料还需考虑施工便利性,如喷涂材料应具备良好的流平性与干燥速度,确保单次施工厚度可控。材料性能验证需通过实验室测试与现场试件验证双重把关,例如对新型防腐涂层进行盐雾试验( $\geq 5000$ 小时)以评估其耐久性。

## 4 修复效果评价与长期监测技术

### 4.1 修复效果评价指标体系

修复效果评价需构建多维度指标体系,涵盖短期性能恢复与长期可靠性保障。短期指标以结构强度、密封性及功能恢复为核心,例如通过无损检测(如超声、磁粉)验证焊缝质量,确保无新生裂纹或未熔合缺陷;采用水压试验检测闸门抗渗性能,要求渗漏量不超过设计标准的5%;启闭试验则评估驱动系统灵活性,确保启闭力偏差在 $\pm 10\%$ 以内。长期指标聚焦耐久性提升与可靠性维持,包括涂层附着力(划格法测试需达1级)、腐蚀速率(年腐蚀深度 $\leq 0.05\text{mm}$ )及疲劳寿命(通过疲劳试验模拟10万次循环无破坏)。此外,需引入经济性指标,如修复成本与维护费用比值,评估技术方案的性价比。指标权重分配需结合病害类型,例如腐蚀修复侧重耐久性指标,裂纹修复则强化强度指标。

### 4.2 现场检测与试验验证

现场检测与试验验证是修复效果评估的关键环节。修复后需立即开展无损复检,采用交叉检测方法(如超声+磁粉)覆盖所有修复区域,确保无遗漏缺陷。水压试验需分阶段加压至设计水

头的1.25倍,持续30分钟观察渗漏与变形情况,同步监测应变数据验证结构安全性。启闭试验需模拟实际工况,记录启闭时间、振动幅度及电机电流,与修复前数据对比评估性能提升。对防腐涂层,需通过附着力测试(拉开法)与厚度测量(涡流测厚仪)验证施工质量,要求涂层厚度偏差 $\leq \pm 10\%$ 。试验数据需结合有限元模型对比分析,例如将实测应力分布与模拟结果对比,偏差超过15%时需重新校核修复方案。验证过程需形成完整记录,包括检测数据、影像资料及专家评审意见,作为工程验收依据。

## 5 结论

本文针对病险水闸金属结构的可靠性问题,系统开展了病害特征分析、检测评估及修复技术研究,形成了一套完整的解决方案。研究揭示了腐蚀、裂纹与变形等典型病害的演化规律,明确了环境侵蚀与运行管理不当等多因素耦合作用机制;构建了基于无损检测、应力监测与材料分析的多维度检测技术体系,提出了多技术融合检测策略,显著提升了病害识别精度;建立了包含承载能力、耐久性与功能性的可靠性评估指标体系,结合有限元分析与层次分析法,实现了结构剩余寿命精准预测;研发了表面修复、结构加固及更换改造等关键技术,明确了修复材料选型标准与工艺参数。

## [参考文献]

- [1]高卫喜.病险水闸安全监测方式探讨与分析[J].江苏水利,2024,(03):45-48.
- [2]张杨.病险水闸成因及其对应加固方式研究[J].河南水利与南水北调,2017,(01):55-56.
- [3]艾拉提·托克逊.喀什噶尔河流域枢纽病险水闸的探讨[J].地下水,2016,38(06):124-125.
- [4]胡安民.三四类病险水闸常见问题及除险对策[J].黑龙江水利科技,2016,44(08):51-52.

## 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。