

水闸金属结构孪生腐蚀的声发射在线诊断技术

王 挺

杭州山科智能科技股份有限公司 浙江杭州

【摘要】水闸金属结构在长期服役过程中常因复杂水环境和载荷作用而产生孪生腐蚀，导致结构安全性下降与使用寿命缩短。声发射技术作为一种灵敏的无损检测手段，能够在腐蚀早期通过捕捉微弱能量释放信号实现在线诊断，突破了传统检测方法滞后、局限性大的问题。本文以水闸金属结构为研究对象，围绕孪生腐蚀机理与声发射特征展开分析，建立声发射信号参数与腐蚀发展过程之间的对应关系，并构建在线监测与识别模型，实现腐蚀状态的实时感知与预警。该方法能够有效提高水闸运行安全管理水平，为工程设施健康监测与寿命预测提供重要参考，具有较强的工程应用前景和推广价值。

【关键词】水闸金属结构；孪生腐蚀；声发射；在线诊断

【收稿日期】2025 年 7 月 14 日

【出刊日期】2025 年 8 月 12 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250363

Online acoustic emission diagnosis technology for twin corrosion in sluice metal structures

Ting Wang

Hangzhou Seck Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】In the long-term service of sluice metal structures, twin corrosion frequently occurs under the influence of complex aquatic environments and load actions, leading to reduced structural safety and shortened service life. Acoustic emission technology, as a sensitive non-destructive testing method, enables online diagnosis at the early stage of corrosion by capturing weak energy release signals, thus addressing the issues of lag and significant limitations associated with traditional testing methods. This paper takes sluice metal structures as the research subject, conducts an analysis focusing on the mechanism of twin corrosion and acoustic emission characteristics, establishes the corresponding relationship between acoustic emission signal parameters and the corrosion development process, and constructs an online monitoring and identification model to achieve real-time detection and early warning of corrosion conditions. This method can effectively enhance the safety management level of sluice operation, provide important references for the health monitoring and service life prediction of engineering facilities, and possesses strong prospects for engineering application and popularization value.

【Keywords】Sluice metal structure; Twin corrosion; Acoustic emission; Online diagnosis

引言

水利工程设施的安全运行直接关系到社会经济发展和人民生命财产安全，而水闸作为关键控制单元，其金属结构长期暴露于复杂水力环境与电化学反应中，极易发生孪生腐蚀。传统检测方法多依赖定期人工检查和实验室分析，难以实现腐蚀损伤的实时识别和动态追踪。声发射技术凭借高灵敏度、实时监测和在线诊断的优势，为解决这一难题提供了新思路。近年来，国内外学者对声发射在结构健康监测中的应用进行了广泛研究，但针对水闸金属结构孪生腐蚀的特定机理与特征识别尚存在不足。本文拟通过声发射信号的获取

与分析，探索其与腐蚀过程的内在联系，构建适用于工程现场的在线诊断方法，从而提升水闸设施的运行安全与寿命管理水平。

1 水闸金属结构孪生腐蚀的成因与危害

水闸金属结构长期处于复杂水环境中，其腐蚀过程并非单一因素作用，而是由电化学腐蚀、应力腐蚀和材料内部晶体缺陷共同导致。孪生腐蚀是一类特殊的腐蚀现象，通常表现为金属晶体孪晶界处由于电位差异形成优先腐蚀路径，从而加速局部损伤的扩展^[1]。水闸金属构件在受到周期性水流冲击、泥沙磨蚀以及温度湿度交替变化的情况下，孪晶界容易成为应力集中

和腐蚀反应的敏感区。随着腐蚀坑不断深化,局部微裂纹萌生并沿着孪晶界扩展,导致结构整体承载力下降和疲劳寿命缩短。若缺乏有效监测与干预,腐蚀损伤极易在短时间内演化为突发性断裂,威胁水闸运行安全。

从工程角度看,孪生腐蚀会造成水闸金属结构表面粗糙度增加、涂层失效和局部剥蚀,进一步破坏结构的整体防护体系。与普通均匀腐蚀不同,孪生腐蚀具有强烈的局部性和不可逆性,一旦腐蚀沿晶界扩展形成贯穿通道,就可能引发闸门变形、止水不严甚至无法开启的严重后果。对于承担调节水位、防洪泄洪等重要功能的水闸而言,这种局部腐蚀隐患极具危险性。历史上多起水利工程事故表明,未能及早发现孪晶界腐蚀的累积效应,往往导致金属构件提前失效,给下游区域带来不可估量的损失。

孪生腐蚀对运维管理也造成了显著挑战。传统防护措施如定期涂装、阴极保护或更换构件,无法精准应对孪晶界这种微观缺陷诱发的腐蚀模式。由于该类腐蚀在早期阶段缺乏明显的宏观可见特征,往往在常规目视检查和超声厚度测量中难以识别。结果是腐蚀损伤被延误发现,等到结构出现明显变形或功能受损时,治理成本已大幅增加。因此,如何在腐蚀萌生初期对水闸金属结构进行实时在线诊断,成为保障水闸安全运行的关键课题。

2 声发射信号特征在孪生腐蚀监测中的作用

声发射技术依赖材料内部能量释放所产生的瞬态弹性波信号进行监测,当孪生腐蚀导致晶界微裂纹萌生或局部剥蚀时,会产生独特的声发射活动。与疲劳裂纹或冲击损伤相比,腐蚀引起的声发射事件往往能量较低、频率分布具有特殊规律,因此可以通过特征参数识别其来源。在水闸金属结构中,孪晶界腐蚀释放的声发射信号多集中于中高频段,并伴随较高的累计事件数和持续增长的能量累积曲线,这为腐蚀早期诊断提供了可行途径^[2]。声发射参数如振铃计数、事件幅值、能量释放率与腐蚀发展过程呈现良好相关性,能够反映腐蚀程度和扩展速度。

为了更好地区分孪生腐蚀与其他损伤类型,需要综合分析声发射信号的时域与频域特征。在时域上,孪生腐蚀信号表现为低幅值高频率的连续事件,且事件间隔较短,反映了腐蚀电化学反应与微裂纹扩展的渐进性。在频域上,信号功率谱密度峰值偏向较窄频带,且随腐蚀程度加深呈现频率漂移的趋势。通过对比实验发现,这种特征与机械冲击、焊接缺陷等产生的宽频瞬态信号存在明显差异。因此,通过特征提取与模式识别

方法,可以建立声发射信号数据库,实现对孪生腐蚀的特征化监测。

在工程应用层面,声发射传感器可布设于水闸金属构件关键受力部位,利用多通道实时采集系统捕捉腐蚀信号。通过数据滤波与去噪处理,可有效剔除水流扰动、环境噪声及电磁干扰的影响。进一步结合定位算法,能够确定声发射事件在构件上的具体位置,实现腐蚀源的空间分布分析。实践表明,该方法可在腐蚀造成宏观损伤前实现预警,为运维人员提供科学决策依据。随着人工智能与大数据技术的引入,声发射信号特征识别的准确性和稳定性正不断提升,为孪生腐蚀的在线监测奠定了坚实基础。

3 基于声发射的水闸金属结构在线诊断方法

在线诊断方法的核心在于建立声发射信号与孪生腐蚀发展状态之间的耦合关系。通过实验室加速腐蚀试验,可以在受控条件下采集大量声发射数据,进而提取典型特征参数,并与电化学腐蚀速率、质量损失等指标进行对比验证。在此基础上,可构建声发射参数与腐蚀等级对应的诊断模型,实现对腐蚀演化的定量评估。该模型不仅能够区分腐蚀的萌生期、扩展期和加速期,还能预测潜在失效时间,为水闸全寿命周期管理提供参考。

为了提升诊断的实时性与可靠性,在线系统通常采用多传感器阵列布置,并通过数据融合技术提高监测精度。传感器信号经前置放大与数字化处理后,传输至中央控制单元进行实时分析。诊断方法结合阈值判别、模式识别和机器学习算法,可自动识别孪生腐蚀信号并输出预警等级。与传统人工判读相比,该方法具有更强的连续性和客观性,能够在长时间无人值守的情况下稳定运行。特别是在大中型水闸工程中,该系统能够实现分区监控,显著提高了结构健康监测的覆盖面和有效性。在实际运行中,传感器阵列不仅能够覆盖闸门的主要受力构件,还可以在局部高风险区域进行加密布置,使微弱的声发射事件也能被捕捉并加以分析。数据融合过程中,采用时空相关性判别和信号聚类算法,能够有效剔除环境噪声干扰,确保腐蚀信号的真实性和准确性^[3-7]。基于机器学习的识别模型可以不断进行在线训练和自我优化,使诊断系统在不同水文条件 and 环境变化下仍具备较高的适应性。实践结果表明,该技术能够在腐蚀发生初期提供多级预警信息,为水闸运行管理部门制定维护策略提供实时支持,也为智慧水利系统的构建奠定了可靠的技术基础。

在线诊断方法还强调与其他监测手段的综合应用。

例如,将声发射监测结果与电化学监测数据、环境参数监测结果结合,可以形成多维度的腐蚀状态判别框架。通过交叉验证和联合分析,不仅能提升诊断精度,还能识别复杂环境下可能出现的误判情况。近年来,基于云平台的远程监控技术也逐渐应用于该领域,声发射诊断数据可实时上传至监控中心,结合大数据分析与专家系统进行辅助决策。这种方法在提升运维效率、降低人工成本和延长结构寿命方面展现出显著优势,为未来智慧水利工程建设提供了新路径。

4 工程应用效果与技术推广价值

在实际工程中,基于声发射的在线诊断技术已在部分水闸设施开展试点应用,取得了良好效果。监测结果显示,该技术能够在腐蚀尚未引发宏观破坏前识别异常信号,并提供趋势性预警。例如,在某大型水闸运行过程中,系统在金属闸门关键部位捕捉到持续增强的声发射活动,经过数据分析判定为孪晶界腐蚀萌生,随后经现场检查得到了验证。这一案例充分说明该方法在工程实践中具有较高的灵敏度和可靠性,为避免潜在事故发挥了重要作用。

从经济角度看,在线诊断技术的推广有助于降低维护成本和延长结构寿命。传统模式下,金属结构的维护多依赖周期性停机检修,不仅耗费大量人力物力,还容易因检修周期不合理造成过度维护或延迟维修。而声发射在线诊断能够提供基于状态的维护决策,使维修计划更加科学和精准,显著提升资源利用效率。同时,避免了因突发性腐蚀失效造成的重大经济损失和安全隐患。对大型水利枢纽而言,这种价值尤为突出,其投资回报率和长期收益远高于传统防护措施。

从技术推广的角度看,该方法的应用前景十分广阔。随着传感器灵敏度提升、数据处理算法优化以及人工智能技术的融合,声发射在线诊断将逐渐形成标准化和模块化体系,便于在不同类型的水闸工程中推广应用^[8]。该技术还可拓展至桥梁、压力管道和电力设施等其他金属结构的健康监测领域,形成跨行业的应用价值。在国家大力推动智慧水利和基础设施数字化建设的背景下,基于声发射的在线诊断不仅是保障水闸

安全的技术手段,更是提升水利工程现代化管理水平的重要支撑。

5 结语

水闸金属结构孪生腐蚀的发生机理复杂,传统检测手段难以及时发现早期隐患。基于声发射的在线诊断技术通过捕捉能量释放信号,实现了对腐蚀过程的实时监测与有效识别,为水闸结构健康管理提供了新的技术途径。该方法不仅提升了监测的灵敏度和可靠性,还具备分区预警和远程智能化分析的优势,能够显著降低运维风险和成本。未来,随着传感器技术、信号处理算法以及人工智能的不断发展,声发射诊断将在更多水利工程中得到应用与推广,为水闸乃至其他重大基础设施的安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 余国华. 水闸工程维护与安全监测分析[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(08): 146-150.
- [2] 童丹丹, 管亚雯, 任朝印. 水闸基坑超期支护结构承载力的时效特性研究[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(08): 90-93.
- [3] 刘永宝. 绿色理念引领下农田水利水闸施工管理控制新举措[J]. 农业开发与装备, 2025, (08): 185-187.
- [4] 位云雷. 水闸项目施工导流与围堰技术运用分析[J]. 珠江水运, 2025, (14): 104-106.
- [5] 张东生, 李洪涛. 农田水利灌溉中小型水闸工程的施工技术与质量控制[J]. 南方农机, 2025, 56(14): 187-190.
- [6] 沈蔚, 庄梦如, 颜冲, 等. 水闸加固及水闸扩建设计分析[J]. 水上安全, 2024, (17): 129-131.
- [7] 高学先. 水利工程水闸金属结构施工方法[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(03): 92-96.
- [8] 杨文举, 武建, 张春树. 某大型水闸除险加固金属结构设计[J]. 甘肃水利水电技术, 2023, 59(04): 21-24.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

