

水利工程混凝土内部钢筋锈蚀检测研究

龚 磊 张 鼎

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘 要：随着水利工程的长期运行，混凝土内部钢筋锈蚀问题日益凸显，成为影响工程结构安全的关键因素。本研究深入探讨了钢筋锈蚀的成因及其对水利工程结构的影响，对比分析了传统检测方法与现代非破坏性检测技术的优缺点，并提出了一种多参数综合检测技术方案。结合实际工程案例，验证了该方法的准确性和可靠性，为水利工程的维护与管理提供了重要的科学依据和技术支持。

关键词：水利工程；混凝土内部；钢筋锈蚀检测

引言：水利工程作为国民经济的重要支撑，其安全性和耐久性至关重要。然而，混凝土内部钢筋锈蚀已成为影响水利工程结构安全的主要因素。本研究致力于深入探讨水利工程混凝土内部钢筋锈蚀的检测技术，旨在通过科学有效的方法准确评估钢筋锈蚀程度，为工程维护提供关键数据支持，进而确保水利工程的长期稳定运行。本研究成果将为水利工程领域提供重要参考，推动技术进步与创新。

1 水利工程混凝土内部钢筋锈蚀的成因与影响

1.1 钢筋锈蚀的成因分析

(1) 混凝土碳化：当混凝土长时间暴露在二氧化碳等酸性气体环境中时，会发生碳化现象。碳化导致混凝土内部的碱性降低，从而破坏了钢筋表面的钝化膜，使钢筋失去保护，容易引发锈蚀。(2) 氯离子侵蚀：氯离子是混凝土中常见的侵蚀源之一。它可以通过海水、氯化盐等方式进入混凝土内部，并与钢筋表面的氧化物反应生成可溶于水的氯化亚铁，进而引发钢筋锈蚀。氯离子的存在还会加速电化学腐蚀过程，使锈蚀问题更加严重。(3) 湿度与温度的影响：湿度和温度是影响钢筋锈蚀的重要因素。高湿度环境有利于氧和水分的渗透，为钢筋锈蚀提供了有利条件。而温度的变化也会影响化学反应速率，从而影响锈蚀速度。(4) 钢筋自身因素：钢筋的材质、制造工艺以及表面处理等因素也会影响其抗锈蚀能力。例如，含有杂质的钢筋更容易发生锈蚀；制造工艺不佳可能导致钢筋表面存在缺陷，从而增加锈蚀的风险^[1]。

1.2 钢筋锈蚀对水利工程结构的影响

(1) 结构强度的降低：锈蚀会导致钢筋截面减小，从而使钢筋的承载力下降。这直接影响结构的整体强度，可能导致结构在承受荷载时出现安全隐患。(2) 耐久性的下降：锈蚀产生的体积膨胀压力会使混凝土保护层

产生裂缝甚至脱落，加速结构的老龄化过程。这不仅缩短了结构的使用寿命，还增加了维护成本。(3) 安全风险的增加：钢筋锈蚀严重时可能导致结构构件的承载力严重下降，甚至发生断裂。这不仅影响结构的正常使用功能，还可能对人民群众的生命财产安全构成严重威胁。

2 水利工程混凝土内部钢筋锈蚀检测技术

2.1 传统检测方法

(1) 外观检查法。外观检查法是最基础的检测手段，通过直接观察混凝土表面是否存在裂缝、锈迹、膨胀等现象，初步判断钢筋是否发生锈蚀。这种方法操作简单、成本低，无需复杂设备，但仅能发现表面较为明显的锈蚀情况，对于混凝土内部钢筋锈蚀程度难以准确判断，具有较大的局限性。(2) 锤击法。锤击法利用锤子敲击混凝土表面，依据声音的清脆程度和回响判断混凝土内部密实度及钢筋锈蚀状况。若声音沉闷，可能存在钢筋锈蚀导致混凝土疏松的问题。该方法对检测人员经验要求较高，主观性较强，且只能进行定性分析，无法精确量化钢筋锈蚀程度。(3) 半电池电位法。半电池电位法基于钢筋与参考电极之间的电位差来评估锈蚀可能性。将参比电极和铜-硫酸铜电极与混凝土表面接触，测量电位值，通过电位与锈蚀概率的对应关系判断钢筋锈蚀情况。它可对较大范围的钢筋进行快速检测，但易受混凝土湿度、化学成分等因素干扰，检测结果准确性受影响。(4) 电阻探针法。电阻探针法通过测量钢筋电阻变化来反映锈蚀程度。将特制的电阻探针安装在混凝土中，随着钢筋锈蚀，其横截面积减小，电阻增大，依据电阻变化量计算锈蚀率。此方法可实现长期连续监测，但对探针安装要求严格，且只能检测探针位置的钢筋情况，无法反映整体锈蚀状况。(5) 分析传统方法的优缺点。传统检测方法的优点在于操作相对简单，部分方法成本较低，在一定程度上能为钢筋锈蚀检测提供初

步参考。然而，其缺点也十分明显，大多检测结果准确性欠佳，难以实现对钢筋锈蚀程度和位置的精确判断，且多为局部检测，无法全面反映混凝土内部钢筋的真实状况。

2.2 现代非破坏性检测技术

2.2.1 超声波检测技术

(1) 原理与操作。超声波检测技术利用超声波在混凝土中的传播特性来判断钢筋锈蚀情况。超声波在均匀介质中匀速传播，当遇到锈蚀的钢筋时，传播速度、波形和能量会发生变化。检测时，在混凝土表面布置超声波发射和接收探头，发射超声波并接收反射信号，通过分析信号特征判断钢筋锈蚀状况。(2) 应用范围与限制。该技术适用于多种类型的水利工程混凝土结构检测，但对混凝土表面平整度要求较高，且难以检测较深位置的钢筋锈蚀情况，受混凝土内部缺陷和钢筋布置影响较大。

2.2.2 电磁波检测技术

(1) 电磁波反射原理。电磁波检测技术基于电磁波在混凝土中传播时遇到不同介质界面会发生反射的原理。当电磁波遇到锈蚀的钢筋，由于钢筋锈蚀产物与混凝土、钢筋的电磁性质差异，会产生反射信号，通过接收和分析反射信号来判断钢筋锈蚀情况。(2) 检测步骤与数据分析。检测时，使用电磁波检测设备在混凝土表面扫描，设备接收反射信号并记录。通过专业软件对信号进行处理和分析，确定钢筋的位置、尺寸及锈蚀程度^[2]。

2.2.3 红外热成像技术

(1) 热辐射检测原理。红外热成像技术利用物体表面热辐射差异成像。钢筋锈蚀过程中会产生热量，导致混凝土表面温度分布发生变化。通过红外热像仪接收混凝土表面的热辐射，将温度分布转化为图像，从而判断钢筋锈蚀位置和程度。(2) 在钢筋锈蚀检测中的应用。该技术可快速大面积检测，直观呈现混凝土表面温度分布，但易受环境温度、日照等因素影响，检测结果需结合其他方法进一步验证。

2.2.4 磁探测技术

(1) 磁场变化检测原理。磁探测技术依据钢筋锈蚀会引起周围磁场变化的特性。钢筋锈蚀后，其内部结构和磁导率发生改变，导致磁场分布异常。通过高精度磁传感器检测磁场变化，判断钢筋锈蚀情况。(2) 腐蚀程度与位置判断。根据磁场变化的强度和分布特征，可推断钢筋的腐蚀程度和位置。该技术对浅层钢筋锈蚀检测效果较好，但受铁磁性物质干扰较大^[3]。

2.3 综合检测技术方案

(1) 多参数综合检测体系构建。综合运用传统检测方法和现代非破坏性检测技术，建立多参数综合检测体系。结合外观检查法初步判断，利用超声波、电磁波等技术进行深度检测，通过电阻探针法实现长期监测，从多个角度获取钢筋锈蚀信息。(2) 各种技术的互补性与协同作用。不同检测技术具有互补性。传统方法可提供初步线索，现代非破坏性检测技术能实现精确检测。如超声波检测和电磁波检测结合，可更准确判断钢筋位置和锈蚀程度；红外热成像技术与磁探测技术配合，能提高检测的可靠性和全面性^[4]。(3) 检测流程与操作指南。制定规范的检测流程，首先进行外观检查，确定重点检测区域；然后运用超声波、电磁波等技术进行详细检测；最后采用电阻探针法对关键部位进行长期监测。检测过程中严格按照各技术操作规范执行，确保检测结果的准确性和可靠性。

3 水利工程混凝土内部钢筋锈蚀检测实例分析

3.1 检测实例选择

3.1.1 工程背景介绍

本次检测选取某运行超过20年的大型水闸工程。该水闸长期处于水位频繁升降的环境，混凝土结构长期受水浸泡与干湿交替作用，且所在区域水质中含有一定浓度的氯离子等腐蚀性物质。近年来，水闸部分混凝土表面出现细微裂缝与锈斑，存在钢筋锈蚀风险，威胁工程安全运行。

3.1.2 检测需求与目标

检测需求在于准确把握水闸混凝土内部钢筋的锈蚀状况，明确锈蚀位置、程度及发展趋势。检测目标是通过科学检测与分析，为水闸维护、加固提供可靠依据，保障水闸结构安全稳定，延长工程使用寿命。

3.2 检测过程与数据收集

(1) 检测方法的选择与应用。结合工程实际，采用综合检测方法。先用外观检查法和锤击法对水闸混凝土表面进行初步排查，标记可疑区域；再运用超声波检测技术和电磁波检测技术对重点区域进行深度检测，获取钢筋位置、尺寸及锈蚀信息；最后使用电阻探针法在关键部位进行长期监测。(2) 数据采集与记录。在检测过程中，详细记录外观检查的裂缝、锈斑位置与特征；超声波和电磁波检测时，记录发射与接收时间、信号强度、波形等数据；电阻探针法实时记录电阻变化数据。所有数据均按检测区域、检测时间分类整理，确保数据完整、准确。

3.3 数据分析与结果评估

(1) 数据处理与分析方法。对采集的数据，运用专

业软件进行处理。通过超声波和电磁波信号分析,结合数据库中钢筋锈蚀与信号特征的对应关系,确定钢筋锈蚀程度;对电阻探针数据进行趋势分析,预测锈蚀发展情况。(2) 锈蚀程度判断与结构安全评估。经分析,发现水闸底板和闸墩部分区域钢筋存在不同程度锈蚀,部分钢筋锈蚀率达15%-20%。根据相关规范,结合锈蚀程度和结构受力情况,评估水闸结构安全等级,确定需对锈蚀严重区域进行加固处理。

3.4 检测效果与改进措施

(1) 检测方法的准确性与可靠性验证。通过对部分区域进行钻孔取芯验证,对比检测数据与实际锈蚀情况,发现综合检测方法能较准确检测钢筋锈蚀位置和程度,检测结果与实际情况吻合度达85%以上,验证了检测方法的准确性和可靠性。(2) 存在的问题与改进措施建议。检测中发现,超声波检测受混凝土内部骨料分布影响较大,导致部分区域检测结果存在偏差;红外热成像技术受环境温度影响,数据稳定性不足。建议在后续检测中,优化超声波检测参数,结合其他方法进行修正;选择合适检测时间,减少环境温度对红外热成像检测的干扰,进一步提高检测精度。

4 提高水利工程混凝土内部钢筋锈蚀检测准确性的策略

4.1 检测方法的优化与创新

(1) 新技术在检测中的应用探索。积极探索人工智能、大数据等新技术在钢筋锈蚀检测中的应用。例如,利用深度学习算法对大量检测图像和数据进行训练,使其能自动识别混凝土表面的细微锈迹、裂缝等特征,快速且精准地判断钢筋锈蚀可能性。同时,结合物联网技术,构建实时在线监测系统,实现对水利工程混凝土内部钢筋状态的动态监测,及时捕捉锈蚀发展趋势。(2) 检测方法的改进与完善。对现有的检测方法进行深入研究和改进。优化超声波检测的信号处理算法,增强对微弱信号的识别能力,降低混凝土内部结构差异对检测结果的干扰;改进电磁波检测的天线设计,提高其对深层钢筋的探测精度,使检测结果更准确地反映钢筋实际锈蚀状况。

4.2 检测人员的培训与技能提升

(1) 专业知识培训。定期组织检测人员参加专业知

识培训课程,内容涵盖混凝土材料特性、钢筋锈蚀机理、各类检测技术原理等。邀请行业专家进行授课,及时更新检测人员的知识体系,使其深入理解检测技术的本质,为准确判断检测结果奠定理论基础。(2) 操作技能与实践经验积累。加强检测人员的实操训练,通过模拟检测场景、实际工程案例操作等方式,提升其操作技能。建立“老带新”的实践机制,让经验丰富的检测人员带领新人参与实际检测项目,在实践中积累处理复杂问题的经验,提高检测人员应对各种检测环境的能力。

4.3 检测设备的更新与维护

(1) 先进检测设备的引进。引进高精度、智能化的检测设备,如高分辨率的红外热成像仪、具有自动校准功能的电阻探针检测仪等。先进设备具备更强大的数据采集和处理能力,能有效提高检测的准确性和效率,为水利工程钢筋锈蚀检测提供可靠的硬件支持。(2) 设备维护与校准的重要性。建立完善的设备维护与校准制度,定期对检测设备进行清洁、保养和校准。设备在使用过程中,其性能可能会因各种因素发生变化,只有通过及时维护和校准,才能确保设备始终处于最佳工作状态,保证检测数据的准确性和可靠性。

结束语

综上所述,本文针对水利工程混凝土内部钢筋锈蚀问题,通过对比分析不同检测方法,提出了高效、准确的综合检测方案。实验验证表明,该方案能有效评估钢筋锈蚀状况,为工程维护提供可靠依据。未来,随着材料科学与检测技术的不断进步,钢筋锈蚀检测将更加智能化、精细化。本研究将为水利工程的维护管理提供科学依据,为保障水利设施安全贡献力量。

参考文献

- [1]刘杰.水工码头混凝土内部钢筋锈蚀检测及处理探析[J].珠江水运,2024,(05):53-54.
- [2]王晓丽,袁金磊.混凝土钢筋锈蚀检测要点[J].化学工程与装备,2021,(09):83-84.
- [3]王晓晶.公路桥梁钢筋锈蚀原因分析及防治措施[J].全面腐蚀控制,2025,(13):121-122.
- [4]伍明强.混凝土钢筋锈蚀原因及检测方法研究[J].建材世界,2020,(07):76-77.