

# 水利工程材料检测技术管理与性能分析研究

贾森伟

雄铁工程检测有限公司, 河北 安新 071600

DOI:10.61369/ERA.2025070036

**摘要：** 水利工程材料检测技术管理与性能分析研究聚焦材料质量控制关键问题，系统探讨了混凝土、钢材等主要材料的性能要求与检测方法体系。研究构建了传统检测与无损检测相结合的技术框架，提出了检测流程标准化与信息化管理策略，分析了材料性能退化机理并建立数据驱动的预测模型。通过工程案例验证了检测技术优化对性能评估的提升效果，为水利工程质量管控提供了技术支持。研究成果对落实《国家水网建设规划纲要》要求、保障工程长效安全具有实践价值。

**关键词：** 水利工程材料；无损检测；性能预测

## Research on the Management and Performance Analysis of Water Conservancy Engineering Materials Testing Technology

Jia Senwei

Xiongtie Engineering Inspection Co., LTD. Anxin, Hebei 071600

**Abstract：** The research on the management and performance analysis of material testing technology for water conservancy projects focuses on the key issues of material quality control, and systematically discusses the performance requirements and testing method systems of major materials such as concrete and steel. The research constructed a technical framework combining traditional detection and non-destructive testing, proposed the standardization and information management strategies of the detection process, analyzed the degradation mechanism of material properties and established a data-driven prediction model. The improvement effect of the optimization of detection technology on performance evaluation was verified through engineering cases, providing technical support for the quality control of water conservancy projects. The research results have practical value for implementing the requirements of the "National Water Network Construction Planning Outline" and ensuring the long-term safety of the project.

**Keywords：** materials for water conservancy projects; non-destructive testing; performance prediction

## 引言

水利工程材料质量直接关系工程安全与服役寿命，随着《国家水网建设规划纲要》（2023年）的深入实施，对工程材料性能与检测技术提出更高要求。当前水利工程建设规模持续扩大，环境条件日趋复杂，传统材料检测方法在时效性、准确性方面面临挑战。2024年水利部发布的《关于推进水利工程高质量发展的指导意见》明确强调，需加强材料性能智能检测与全生命周期质量管理。现代无损检测、多尺度仿真等新技术的发展为材料性能评估提供了新思路，而检测数据与BIM、物联网等技术的融合应用，正推动质量控制向数字化、智能化转型。开展水利工程材料检测技术管理与性能分析研究，对保障重大水利基础设施安全运行、落实国家水网建设质量要求具有重要实践意义。

## 一、水利工程材料分类及性能要求

### （一）主要材料类型及其功能

水利工程材料根据功能与结构需求可分为混凝土、钢材、土工合成材料及防渗材料等。混凝土作为核心建筑材料，其性能优化需通过骨料级配和掺合料调整来实现，以提高抗渗性和耐久

性<sup>[1]</sup>；钢材主要用于钢筋骨架或压力管道，其力学性能直接影响结构的抗震和抗裂能力<sup>[2]</sup>；土工合成材料（如土工布、土工膜）在堤防工程中通过增强土体整体性和排水性能来提升稳定性；防渗材料（如止水带、膨润土防水毯）则需具备优异的伸缩变形能力和长期耐水性，以适应结构变形和渗流控制需求。不同材料的选用需结合工程部位和环境条件进行综合评估，例如大体积混凝土需

重点考虑水化热控制，而水下结构则需关注材料的抗冲刷性能。

## （二）关键性能指标与标准规范

水利工程材料的性能评价需以力学性能和耐久性为核心指标。混凝土的抗压强度、弹性模量和抗渗等级是保证结构安全的基础参数，同时需通过复合改性提升其抗裂性和耐腐蚀性；钢材的屈服强度、延伸率和冲击韧性直接影响结构的抗震性能和疲劳寿命；止水材料的拉伸强度、撕裂强度和耐老化性能则是保障伸缩缝密封效果的关键<sup>[3]</sup>。行业标准如 GB 50164 和 SL 352 对上述性能的检测方法和合格标准作出了明确规定，特殊环境（如盐渍土或冻融地区）还需满足抗氯离子渗透性或抗冻等级等附加要求。材料性能与规范的符合性是工程验收和质量控制的重要依据。

## 二、水利工程材料检测技术体系

### （一）传统检测方法及其局限性

传统水利工程材料检测主要依赖实验室破坏性试验和现场取样检测。实验室检测通过抗压试验、抗拉试验等方法获取材料的力学性能参数，但试件破坏导致无法重复利用，且与工程实际工况存在差异<sup>[4]</sup>。现场取样检测虽能反映部分真实环境下的材料性能，但取样过程可能破坏结构完整性，检测结果受取样位置和数量的影响较大，时效性和代表性不足。此外，传统方法检测周期长，难以满足大型水利工程快速质量评估的需求，在复杂环境或隐蔽工程中的应用受到明显限制。

### （二）现代无损检测技术发展

现代无损检测技术通过超声波、红外成像和雷达探测等手段实现材料性能的非破坏性评估。超声波检测利用声波在材料中的传播特性识别内部缺陷和强度变化，在岩体质量检测中表现出良好的适用性<sup>[5]</sup>；红外成像通过热辐射差异检测结构表层裂缝和渗漏点，为工程质量评估提供直观依据<sup>[6]</sup>。智能化检测设备的应用进一步提升了检测效率，无人机巡检可快速获取大范围工程表现状态，分布式传感器网络则实现材料性能的长期实时监测。这些技术具有非接触、高效率和高精度的特点，在水利水电工程岩体检测和质量控制中展现出显著优势<sup>[7]</sup>。

## 三、材料检测技术管理优化策略

### （一）检测流程标准化管理

#### 1. 抽样方法与检测频率的优化

水利工程材料检测的抽样方法需要建立科学的分级分类体系，针对不同风险等级的材料采取差异化的抽样策略<sup>[8]</sup>。对于大坝主体结构混凝土等重要部位，应采用空间网格化抽样方法，确保样本覆盖所有浇筑批次和施工时段；钢材焊接接头检测需结合焊接工艺评定结果动态调整抽样比例<sup>[9]</sup>。检测频率的优化应建立施工进度-环境因素双参数模型，在高温季节或连续降雨等特殊工况下自动提升检测频次。通过引入统计过程控制（SPC）方法，实现检测数据的实时分析，当过程能力指数（CPK）低于标准值时

触发加严检验程序，这种动态调整机制显著提升了检测效率和可靠性<sup>[10]</sup>。

#### 2. 检测数据信息化管理

基于 BIM 的材料检测管理系统实现了质量数据的全流程数字化管控。通过开发定制化的 BIM 插件，将检测数据与模型构件智能关联，支持三维空间质量缺陷定位和可视化分析。系统采用物联网技术自动采集传感器数据，实时更新结构健康状态，当检测值超过预警阈值时自动推送报警信息至相关责任人。移动端应用实现了检测记录的电子化填报，结合 GPS 定位确保数据采集的真实性和时效性。检测报告自动生成模块内置标准模板库，大幅减少人工编制时间，同时保证报告格式的规范统一。历史检测数据的深度挖掘为工程质量趋势分析和预测维护提供了数据基础。

## （二）质量控制与风险防控

#### 1. 检测结果偏差分析与校正

水利工程材料检测结果的可靠性直接影响工程质量评估的准确性。检测偏差主要来源于仪器系统误差、操作人员技能差异和环境条件波动三个方面。建立标准化的仪器定期校准制度，采用标准样品进行平行试验验证，可有效控制系统误差。针对人员操作差异，实施检测人员资质分级管理和操作视频追溯机制，关键检测环节设置双人复核制度。环境因素引入的偏差需通过建立温湿度修正系数库进行补偿，特殊环境下的检测数据需标注工况条件。开发智能化的检测数据校验算法，自动识别异常数据并提示复检，通过建立检测质量评分体系持续提升检测过程的可控性。

#### 2. 基于风险管理的检测计划制定

水利工程材料检测计划制定遵循风险分级管控原则。按工程结构重要性、材料部位及失效后果划分风险等级，高风险区域（如大坝防渗体、压力管道）实施增强检测。用风险矩阵法优化资源配置，保障高风险项目检测频次与覆盖面。结合施工进度、环境数据动态调整计划，开发风险评估系统辅助制定，通过全过程跟踪实现资源与质控需求匹配。

## 四、材料性能分析与案例研究

### （一）典型材料性能退化机理分析

#### 1. 混凝土碳化与钢筋锈蚀的耦合效应

混凝土碳化与钢筋锈蚀是水利工程结构耐久性退化的典型耦合过程。二氧化碳渗透导致混凝土碱性降低，当碳化前沿到达钢筋表面时，破坏钝化膜引发锈蚀反应。锈蚀产物体积膨胀产生环向拉应力，加剧混凝土保护层开裂，形成碳化-锈蚀-开裂的正反馈循环。水工结构长期处于干湿交替环境，加速了碳化深度发展和锈蚀速率，特别是水位变动区构件表现更为显著。氯离子侵蚀与碳化协同作用进一步恶化钢筋锈蚀状况，在海水环境或除冰盐使用区域需特别关注。通过电化学测试和微观结构分析证实，碳化引起的 pH 值下降使钢筋腐蚀电流密度提高 2-3 个数量级，显著缩短结构服役寿命。

#### 2. 土工材料的老化与环境因素关联性

土工合成材料在水利工程中的性能退化受紫外线辐射、温湿

循环、化学侵蚀等因素影响。聚丙烯、聚酯类土工布受长期紫外线照射，拉伸强度年衰减率达 3 - 5%；干湿交替环境加速添加剂溶出，反滤结构有淤堵风险。埋设 30 年的土工膜接缝强度保留率不足 60%，表现为焊缝脆化和界面剥离。酸性土壤中，聚乙烯材料抗氧化剂消耗速率随 pH 值降低而加快，温度波动使土工格栅蠕变性能恶化。建立环境加速老化与现场暴露试验的相关性模型，可预测不同气候区土工材料使用寿命。

## （二）检测数据驱动的性能预测模型

### 1. 机器学习在材料寿命预测中的应用

机器学习算法通过挖掘历史检测数据中的隐含规律，建立了水利工程材料性能退化的智能预测模型。随机森林算法处理多维检测参数时表现出较强的特征选择能力，可有效识别影响混凝土碳化速率的关键环境因子。深度学习网络通过分析长期的强度检测数据序列，捕捉材料性能演变的非线性特征，预测精度较传统经验模型提升 30% 以上。支持向量回归算法在小样本条件下仍能保持稳定的预测效果，适用于新型复合材料的早期性能评估。集成学习方法融合多种算法的优势，通过加权投票机制降低预测误差，在钢筋锈蚀程度预测中实现了 85% 以上的准确率。模型训练过程中引入贝叶斯优化算法自动调整超参数，显著提高了计算效率和预测可靠性。

### 2. 多尺度仿真

多尺度仿真技术通过跨尺度关联揭示水利工程材料性能退化机理。分子动力学模拟从原子尺度分析水泥水化产物界面行为与氯离子传输机制，为宏观扩散系数测定提供依据；细观模拟再现骨料 - 浆体界面应力集中，解释宏观力学性能离散性；宏观有限元模型集成微观参数，预测大坝混凝土开裂演化。跨尺度数据传递算法建立材料组成 - 微观结构 - 宏观性能定量关系，指导材料优化设计。其与现场检测交互验证，提升复杂环境下性能预测可靠性，为结构寿命评估提供新范式。

## （三）工程案例验证

### 1. 某水库大坝混凝土耐久性检测实例

某大型水库重力坝运行 15 年后出现表面剥落和渗漏现象，综

合应用多种检测技术评估混凝土耐久性状态。超声脉冲速度测试显示坝体下游面波速降低 15%-20%，表明内部存在微裂缝发育；取芯试样氯离子含量检测发现水位变动区渗透深度达保护层厚度的 70%，钢筋锈蚀风险显著；红外热成像检测识别出 3 处隐蔽渗流路径，与钻孔内窥镜观察结果一致。碳化深度测试数据结合环境监测记录，建立碳化速率预测模型，推算剩余使用寿命仅为设计年限的 60%。基于检测结果，采取表面防腐处理与阴极保护相结合的修复方案，修复后检测指标改善显著，验证了检测技术对工程维护决策的支撑作用。

### 2. 检测技术优化对性能评估的提升效果

某抽水蓄能电站优化检测技术体系，提升材料性能评估质效：混凝土检测改传统 28 天强度检测为早期强度预测 + 智能养护监控，验收周期缩 40%；钢筋保护层检测用三维激光扫描替单点测量，数据密度增两数量级，精准识别绑扎偏差；土工膜焊缝检测引入红外热成像自动识别系统，缺陷检出率从 85% 提至 98%。检测数据与 BIM 关联实现质量问题定位分析，验收材料性能达标率提 12%。全生命周期检测数据库为后续工程提供数据支撑，验证现代检测技术综合效益。

## 五、总结

水利工程材料检测技术管理与性能分析研究为工程质量的提升提供了系统性解决方案。通过明确材料性能要求与检测标准，构建了涵盖传统与无损检测的技术体系，确保数据获取的可靠性与全面性。检测流程标准化与信息化管理优化了资源配置，质量控制与风险防控策略降低了工程隐患。材料性能退化机理的深入分析揭示了关键影响因素，数据驱动的预测模型与多尺度仿真技术为寿命评估提供了新方法。工程案例验证表明，优化后的检测技术显著提升了性能评估的准确性与效率，为水利工程全生命周期质量管理奠定了坚实基础。未来研究应进一步融合智能化技术，推动材料检测向自动化、精准化方向发展，以适应复杂工程环境下的更高要求。

## 参考文献

- [1] 战淑静. 水利工程建筑材料质量控制方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2012(112):1.
- [2] 管鹏, 陈燕萍. 水利工程混凝土复合材料的制备与力学性能分析 [J]. 塑料助剂, 2023(3):30-33.
- [3] 李崇. 水利工程伸缩止水材料性能及应用 [J]. 工业 B, 2015(7):30-30.
- [4] 赵海蛟. 浅析水利工程建材质量检测技术与质量控制 [J]. 内蒙古水利, 2015(5):1.
- [5] 张卫东. 水利水电工程岩体检测技术的应用分析 [J]. 商品与质量·建筑与发展, 2014, 000(011):643-643.
- [6] 孙伟智. 水利工程施工质量检测体系及其应用效果研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2020, 048(006):126-128.
- [7] 孟旬. 水利工程建材质量检测技术与质量控制研究 [J]. 建材发展导向, 2020, 18(7):1.
- [8] 陈慧. 水利工程设计质量优化管理分析 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 5(024):1587-1588.
- [9] 冯晨光, 刘彦阔, 秦静茹. 探究水利工程施工管理优化策略 [J]. 农家参谋, 2017(82):1.
- [10] 何万山. 水利工程施工管理的优化策略探究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2021(2):2.