

# 水利工程材料性能检测与质量控制技术研究

贾森伟

雄铁工程检测有限公司，雄安 新区 071600

DOI:10.61369/ETQM.2025070034

**摘 要：** 水利工程材料性能检测与质量控制技术研究对保障工程耐久性和安全性具有关键作用。本文系统分析了混凝土、钢材等主要材料的性能要求，探讨了传统检测方法的局限性及现代无损检测技术的优势。重点研究了生产过程和施工阶段的质量控制关键技术，包括配比优化、参数监控和智能监测系统。结合典型案例，阐述了标准化管理体系和智能化技术的应用成效，为提升水利工程材料质量管理水平提供了理论依据和技术路径。

**关 键 词：** 水利工程材料；性能检测；质量控制

## Research on Performance Testing and Quality Control Technology of Materials for Water Conservancy Projects

Jia Senwei

Xiongtie Engineering Inspection Co., LTD. Xiong'an New Area 071600

**Abstract：** The research on the performance testing and quality control technology of materials for water conservancy projects plays a crucial role in ensuring the durability and safety of the projects. This paper systematically analyzes the performance requirements of main materials such as concrete and steel, and discusses the limitations of traditional detection methods and the advantages of modern non-destructive testing technologies. The key technologies for quality control in the production process and construction stage were mainly studied, including proportioning optimization, parameter monitoring and intelligent monitoring systems. Combined with typical cases, the application effects of the standardized management system and intelligent technology are expounded, providing a theoretical basis and technical path for improving the quality management level of materials in water conservancy projects.

**Keywords：** materials for water conservancy projects; performance testing; quality control

## 引言

水利工程材料性能检测与质量控制是保障工程结构安全及国家水安全的重要技术支撑。《国家水网建设规划纲要》（2023 年）要求“强化工程全生命周期质量管理”，对材料性能提出更高标准。材料长期受水流冲刷、冻融循环等复杂环境影响，抗渗性、耐久性等指标直接关系工程寿命。当前检测技术向智能无损检测转型，质量控制模式从终端验收转向全过程管控。随着《水利工程建设质量提升三年行动方案（2023–2025 年）》推进，材料性能精准评估与智能化质控技术成为焦点。新型设备研发、大数据分析为构建科学质控体系提供可能，探究材料性能演变规律、发展适配的质控方法，对水利工程高质量发展意义重大。

## 一、水利工程材料分类与性能要求

### （一）主要材料类型及其工程应用

水利工程材料的选择直接影响工程结构的可靠性与服役寿命，其质量控制需贯穿材料生产、施工及运维全过程<sup>[1]</sup>。混凝土作为核心材料，广泛应用于大坝、闸墩等承重结构，高性能混凝土通过优化配合比可显著提升强度与耐久性<sup>[2]</sup>。钢材主要用于压力管道、闸门等需承受高应力或动态荷载的部件，其焊接性与耐腐蚀性尤为关键。土工合成材料包括土工膜、土工布等，在堤防

加固中发挥隔离与排水作用，施工中需严格控制铺设工艺以避免结构损伤。防渗材料如膨润土防水毯、喷射混凝土等，通过特殊工艺实现快速施工与高效防渗，尤其适用于隧洞衬砌等异形结构<sup>[3]</sup>。

### （二）水利环境下的关键性能指标

水利工程材料的性能评估需针对特殊环境荷载展开。抗渗性直接决定结构防渗能力，防渗材料的渗透系数需通过现场抽检确保低于规范限值。耐久性涉及材料在长期浸泡下的性能衰变，高性能混凝土的氯离子扩散系数应控制在 $1.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 以内以

保障百年寿命。抗冻融性要求材料在冻融循环中保持微观结构稳定，寒冷地区混凝土需通过300次冻融循环质量损失率 $\leq 5\%$ 的检测。抗冲刷性针对高速水流作用，喷射混凝土的28天抗压强度需达到40MPa以上以满足过流面保护要求。土工合成材料则需通过顶破强度与摩擦系数测试以保证边坡稳定<sup>[4]</sup>。这些性能指标共同构成水利工程材料质量控制的技术基准。

## 二、材料性能检测技术体系

### （一）传统检测方法及其局限性

传统材料性能检测主要依赖破坏性试验与实验室标准测试，其局限性日益凸显。破坏性试验通过钻芯取样、拉伸试验等手段获取材料强度与变形特性，但会导致结构局部损伤，且样本代表性受取样位置影响显著。实验室标准测试虽能提供精确数据，但试件制备与养护条件与实际工程环境存在差异，导致测试结果与现场性能出现偏差<sup>[5]</sup>。时效性问题尤为突出，混凝土28天标准养护期无法满足施工过程快速质量控制需求，特殊注浆材料的凝结时间测试滞后性可能延误工程进度<sup>[6]</sup>。传统方法难以实现结构整体性能评估，亟需更高效、非破坏的检测技术补充。

### （二）现代无损检测技术进展

无损检测技术的发展为材料性能评估提供了新的解决方案。超声波检测通过声波传播速度与衰减特性反演混凝土内部缺陷与强度分布，其检测精度受骨料类型和含水率影响需进行参数修正。红外热成像利用材料热传导特性差异识别脱空、渗漏等隐蔽缺陷，在新型PA改良注浆材料固化过程监测中表现出独特优势。X射线断层扫描通过三维成像揭示材料内部孔隙结构与损伤演化规律，为水泥基材料耐久性研究提供微观尺度观测手段<sup>[7]</sup>。这些技术具有非接触、高精度特点，可实现材料性能的实时监测与长期跟踪，显著提升质量控制的时效性与可靠性。

## 三、质量控制关键技术研究

### （一）生产过程中的质量控制

#### 1. 原材料筛选与配比优化

水利工程材料的质量控制始于严格的原材料筛选与科学的配比设计。骨料级配、含泥量等指标直接影响混凝土的和易性与强度发展，需通过筛分试验与矿物成分分析确保符合规范要求<sup>[8]</sup>。胶凝材料的选择需兼顾活性指数与耐久性需求，掺合料的加入比例应通过系统的正交试验确定最优参数<sup>[9]</sup>。水胶比的精确控制对保证抗渗性能至关重要，渠道防渗工程中需根据地下水位变化进行动态调整。外加剂的选用需考虑与主体材料的相容性，通过坍落度经时损失试验验证工作性能稳定性。配比优化需建立多目标函数，在强度、耐久性和经济性之间取得平衡，特别是中小型水利工程更需注重成本控制。

#### 2. 工业化生产参数监控

工业化生产阶段的质量控制依赖于关键工艺参数的实时监测与反馈调节。混凝土搅拌过程中，投料顺序与搅拌时间直接影响

匀质性，需通过电流监测与拌合物均匀性测试确保混合质量。温度控制对高温季节施工尤为重要，渠道防渗混凝土施工中骨料预冷与拌合水加冰工艺需根据出机温度实时调整<sup>[10]</sup>。计量系统的精度应定期校验，胶凝材料称量误差需控制在 $\pm 1\%$ 以内，这是保证水利工程结构耐久性的基本要求。生产数据应实现自动化采集与存储，通过统计过程控制（SPC）方法分析变异系数，防渗工程中特别要关注水胶比的波动范围。智能化控制系统可基于历史数据建立预测模型，实现配合比的动态优化与工艺参数的自动补偿，这对提升施工质量具有显著效果。

### （二）施工阶段的质量监测

#### 1. 现场快速检测技术

施工阶段的质量监测依赖高效的现场快速检测技术确保工程实体质量。回弹仪通过测定混凝土表面硬度推定抗压强度，其操作便捷性使其成为现场强度抽检的主要手段，但需结合碳化深度修正以提高测试精度。贯入式强度检测利用探针贯入阻力与混凝土强度的相关性，可实现对早期强度的快速评估，特别适用于模板拆除时机的判定。这些技术能在不破坏结构的前提下获取强度发展数据，但受表面状态和材料均质性影响较大，需配合见证取样进行结果验证。快速检测数据应及时录入质量管理体系，为施工决策提供支持。

#### 2. 基于物联网的实时监测系统

物联网技术的应用实现了施工质量监测的智能化和实时化。通过在关键部位部署温湿度、应变等传感器，构建起覆盖全施工区域的监测网络。数据采集终端将实时监测信息传输至云平台，利用大数据分析技术识别质量异常波动。监测系统可自动预警混凝土内外温差超标、养护湿度不足等常见问题，指导现场及时采取调控措施。结合BIM模型的可视化展示，实现质量数据的空间定位与趋势分析，为质量管理提供多维决策依据。这种全天候、全过程的监控模式显著提升了质量控制的时效性和精确性。

## 四、技术管理优化与案例分析

### （一）标准化管理体系建设

#### 1. 国际/国内检测标准对比分析

水利工程材料检测标准体系呈现国际化与本土化并重的发展趋势。国际标准（如ASTM、ISO）侧重材料基础性能测试方法的普适性，检测指标设定相对严格，但部分试验条件与我国地域特征存在差异。国内标准（GB、SL系列）更注重工程适用性，针对不同气候分区和工程类型制定了差异化要求，在抗冻性、抗硫酸盐侵蚀等指标上具有区域适应性优势。标准对比显示，国内标准在快速检测方法、现场验收标准等方面需进一步与国际接轨，而国际标准则可借鉴我国在特殊材料（如膨胀土）检测方面的实践经验。

#### 2. 全生命周期质量管理框架

全生命周期质量管理框架涵盖材料生产、施工建造、运行维护三个阶段的质量控制要点。生产阶段建立原材料追溯系统和配合比动态优化机制；施工阶段实施工艺参数监控和实体质量抽检

的双重控制；运行阶段通过定期检测评估材料性能退化规律。该框架采用 PDCA 循环模式，依托信息化管理平台实现各阶段质量数据的无缝衔接。关键创新点在于将传统以验收为核心的质量控制，转变为覆盖材料服役全过程的性能保障体系，通过大数据分析预测材料退化趋势，实现预防性维护。

（二）典型工程应用案例

1. 大坝混凝土耐久性提升案例

某重力坝工程针对混凝土碳化与冻融破坏问题，采用多元胶凝材料体系优化配合比设计，将粉煤灰掺量提升至30%并复合掺入5%硅灰，使氯离子扩散系数降低至 $1.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。施工阶段引入智能温控系统，通过冷却水管网络与表面保温措施将内外温差控制在18℃以内。配合比优化结合全过程温度监控使混凝土抗冻等级达到 F300，28天强度标准差由4.5MPa降至2.8MPa。工程实践表明，基于材料性能提升与施工工艺改进的综合措施可有效延长大坝混凝土服役寿命。

2. 渠道防渗材料失效分析与改进

某灌区渠道防渗层出现大面积剥落，检测分析表明原聚乙烯土工膜存在焊接缺陷与紫外线老化问题。改进方案采用复合土工膜（PE膜+无纺布）增强抗穿刺性能，设置紫外线吸收剂添加层。施工环节引入红外热成像技术检测焊缝质量，缺陷检出率提升至95%以上。优化后的防渗系统经三年运行监测，渗漏量由 $0.45\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降至 $0.08\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，材料抗拉强度保留率达85%。案例证明防渗材料选择需综合考虑环境应力与施工质量控制因素。

（三）智能化技术发展趋势

1. 大数据驱动的质量预测模型

水利工程材料质量控制正逐步向数据驱动的智能化方向发展。基于历史检测数据、环境参数与材料配合比构建的质量预测模型，通过机器学习算法建立材料性能与多因素的映射关系。模型可实时分析生产过程中的原材料波动、工艺参数变化对最终质

量的影响程度，提前预警潜在风险。深度学习技术进一步提升了模型对非线性关系的捕捉能力，使抗压强度、耐久性等关键指标的预测准确率达到90%以上。这种预测性质量控制模式改变了传统事后检测的被动局面，实现从“经验判断”向“数据决策”的转变。

2. 机器视觉在表观缺陷检测中的应用

高精度图像识别技术为水利工程材料表观质量检测提供了高效解决方案。基于深度卷积神经网络的视觉系统可自动识别混凝土裂缝、蜂窝麻面等缺陷，检测精度达到0.1mm级。多光谱成像技术扩展了检测维度，通过红外波段识别隐蔽的空鼓问题，紫外波段发现早期的微裂缝发育。智能检测设备集成定位系统，实现缺陷的精准空间标注与量化统计。相比传统人工检测，机器视觉系统检测效率提升5倍以上，且避免了主观判断的差异性，为工程质量验收提供了客观统一的标准。

五、结束语

水利工程材料性能检测与质量控制技术的研究与实践表明，材料性能的精准评估与全过程质量管理对工程耐久性具有决定性影响。从传统检测方法到现代无损技术的进步，实现了从破坏性抽样到整体性能评估的转变，提升了质量控制的时效性与可靠性。生产过程中的原材料优化与工艺监控、施工阶段的快速检测与物联网技术应用，形成了多层级质量控制体系。标准化管理与全生命周期框架的建立，为工程质量提供了系统性保障。典型案例验证了材料性能提升与施工工艺改进的综合效益，而大数据与机器视觉等智能化技术的引入，推动了质量控制向预测性、精准化方向发展。未来研究应进一步探索材料性能与环境作用的耦合机制，开发更高效的智能监测技术，构建覆盖设计、施工、运维全过程的数字化质量管理平台，为水利工程长效安全运行提供技术支撑。

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(11Z):1.  
[2] 何江. 水利施工中高性能混凝土强度及耐久性能研究 [J]. 水利科技与经济, 2023, 29(6): 150-154.  
[3] 李佳宁. 浅谈水利水电工程喷射混凝土施工材料的应用 [J]. 广东科技, 2013, 22(2):2.  
[4] 刘茂丕. 浅谈水利工程中土工合成材料的应用及施工 [J]. 科学与财富, 2014(8):1.  
[5] 靳璐. 混凝土原材料对水利工程混凝土性能的影响与检测控制 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(2): 73-74.  
[6] 付宝宁. 水利工程 PA 改良注浆材料工程性能研究 [J]. 水利技术监督, 2021(9):3.  
[7] 赵圆. 水利工程中水泥材料检测方法的研究 [J]. 城市建设理论(电子版), 2023(32):90-92.  
[8] 鲁芳芳. 中小型水利工程施工质量控制问题研究 [J]. 科学技术创新, 2010(2): 235-235.  
[9] 郝丽荣. 对水利工程施工质量控制技术的研究 [J]. 新材料新装饰, 2014, 000(009):365-365.  
[10] 顾军. 水利工程渠道防渗施工的关键技术探究 [J]. 2023(5):236-238.