

固结灌浆在水利工程检测中的研究

李 阳 沈志平

江苏禹衡工程质量检测有限公司 江苏 盐城 224001

摘 要：固结灌浆通过注入浆液提升岩基性能，其检测技术对保障水利工程安全至关重要。本文阐述固结灌浆技术原理与工程应用场景，介绍物探、力学性能检测及综合检测方法，分析检测技术在施工前、中、后的关键作用，探讨检测技术面临的技术实施与管理机制挑战，提出智能化设备研发、标准化体系构建等优化方向，为水利工程固结灌浆检测提供参考。

关键词：固结灌浆；水利工程；检测技术；物探检测；施工监控

引言：水利工程中，坝基、隧洞等结构的稳定性关乎工程整体安全。固结灌浆作为提升岩基性能的关键技术，通过填充裂隙、固结成结石，增强岩基整体性、抗压强度与防渗性。然而，复杂地质条件与施工过程的不确定性，使固结灌浆质量难以保障。检测技术作为评估灌浆效果的重要手段，能及时发现质量问题并指导修复。深入研究固结灌浆检测技术，对水利工程安全运行意义重大。

1 固结灌浆技术原理与工程应用

1.1 技术原理

固结灌浆通过高压注入水泥基浆液，填充岩体裂隙并固结成结石，提升岩基整体性、抗压强度及防渗性能。浆液在压力作用下沿岩体原有裂隙渗透扩散，填充微小缝隙后逐渐形成连续的结石网络^[1]。这些结石与周围岩体紧密结合，将原本分散的岩块胶结成整体结构，减少岩体内部的应力集中现象。浆液硬化过程中产生的体积微膨胀，能进一步挤压岩体缝隙，增强结构密实度。浆液扩散机制涉及渗透灌浆、压密灌浆与劈裂灌浆的协同作用。渗透灌浆适用于岩体裂隙相对发育的区域，浆液依靠自身流动性渗透至细微缝隙，实现低压力下的均匀填充。压密灌浆通过较高压力将浆液注入岩体，挤压周围介质使孔隙减小，提升岩体密实度，适用于孔隙率较大的松散岩层。劈裂灌浆则在高压作用下使岩体产生新的裂隙，浆液沿劈裂路径扩散，扩大灌浆影响范围，常用于致密岩体的深层加固。三种机制根据岩体特性自动切换，形成互补效应。

1.2 工程应用场景

坝基处理中，固结灌浆可改善坝基承载力，减少不均匀沉降。坝基岩体往往存在不同程度的裂隙和风化层，灌浆浆液填充这些缺陷后，形成稳定的承载层。通过提升坝基整体刚度，使上部荷载均匀传递至深层岩

体，避免因局部岩体强度不足导致的沉降差异，保障坝体结构长期稳定。隧洞加固依赖固结灌浆增强围岩稳定性，防止变形破坏。隧洞开挖后，围岩原有的应力平衡被打破，易出现松动和坍塌风险。灌浆浆液注入围岩裂隙后，形成加固圈，提高岩体的抗变形能力。加固圈与支护结构协同作用，限制围岩位移，维持隧洞断面形状，确保施工及运行安全。断层及破碎带修复中，固结灌浆通过浆液充填降低透水性，提升抗变形能力。断层带岩体破碎且透水性强，易引发渗漏和结构失稳。浆液注入后填充破碎岩体间的空隙，形成防渗帷幕，阻断地下水渗透路径。结石将破碎岩块胶结为整体，提升断层带的抗剪强度，减少在外力作用下的变形可能性，保障工程结构的长期安全运行。

2 固结灌浆检测技术体系

2.1 物探检测技术

单孔声波检测通过分析声波在岩体中的传播速度，评估浆液充填效果及岩体完整性。声波发射器与接收器分别置于同一钻孔的不同深度，声波穿过灌浆处理后的岩体时，传播速度随岩体密实度增加而提升^[2]。岩体中未被浆液填充的裂隙会导致声波折射或散射，使传播时间延长，据此可判断裂隙充填程度。跨孔弹性波检测利用弹性波在孔间传播的衰减特性，定位灌浆缺陷区域。在多个钻孔中分别布置发射与接收装置，弹性波从一个钻孔传播至另一个钻孔的过程中，能量衰减程度与岩体灌浆质量相关。缺陷区域因存在空隙或松散结构，会吸收更多波能，导致接收信号强度降低，通过对比不同方向的波能衰减差异，可确定缺陷的大致范围。探地雷达检测基于电磁波反射原理，识别混凝土与围岩界面脱空、孔洞等缺陷。雷达天线向地下发射高频电磁波，电磁波遇到不同介质界面时发生反射，反射信号的强度和时间差反映界面性质。灌浆不密实区域与周围介质存在明显

电性差异,会产生较强反射信号,通过解析反射波形可区分脱空区域与完整结构。

2.2 力学性能检测技术

压水试验通过测量单位透水率,量化灌浆后岩体防渗性能提升效果。向钻孔内施加稳定水压,水在压力作用下渗入岩体裂隙,测量单位时间内的漏水量并计算透水率。灌浆效果良好的岩体因裂隙被填充,透水率显著降低,透水率变化幅度可直接反映防渗性能改善程度。试验过程中需控制水压稳定,分阶段维持不同压力等级,持续观测流量变化趋势,避免因压力波动影响测量准确性。静弹性模量测试利用钻孔液压弹模计,评估灌浆对岩体抗变形能力的改善程度。将弹模计放入钻孔并施加径向压力,按梯度递增压力值,测量岩体在不同压力下的变形量,计算得出静弹性模量。灌浆处理后的岩体因整体性增强,弹性模量会高于未处理区域,通过对比同一区域灌浆前后的弹性模量变化,可判断灌浆对岩体抗变形能力的提升效果。

2.3 综合检测方法

多技术联合应用结合物探与力学检测结果,建立灌浆质量三维评估模型。物探技术提供的空间分布信息与力学检测获得的量化指标相互印证,物探发现的异常区域可通过力学检测进一步验证。三维模型整合不同深度不同位置的检测数据,标注各区域力学参数与物探异常值,直观呈现灌浆质量的空间分布特征,清晰区分合格区域与需补充灌浆的薄弱部位。数值模拟辅助分析通过有限元软件模拟浆液扩散过程,优化检测参数设置。软件根据岩体初始裂隙分布和灌浆参数构建计算模型,模拟不同工况下浆液的扩散路径和填充效果。将模拟结果与实际检测数据对比,分析偏差产生的地质因素,可调整检测点布置密度和测试频率,使检测更贴合工程实际情况,提高检测效率和准确性。模拟过程中需考虑岩体非均质性和浆液流变特性,确保模拟结果的可靠性。

3 检测技术在固结灌浆施工中的关键作用

3.1 施工前检测

地质勘察通过多种手段明确岩体裂隙分布、透水性等参数,为灌浆设计提供依据。采用物探方法中的地震波反射与电磁感应技术对施工区域进行全域扫描,勾勒出裂隙密集带与透水通道的分布形态^[3]。结合钻探取样分析岩体矿物组成与结构特征,判断不同区域的灌浆难度,区分出完整岩体与破碎带的界限。这些信息共同构成灌浆设计的基础,决定浆液配比、灌浆压力等关键参数的设置,确保设计方案与实际地质条件相适配。基线数据采集建立灌浆前岩体声波速度、透水率等初始指标

库。在预设的检测点进行声波测试,通过改变声波频率记录岩体天然状态下的声波传播特征,捕捉不同深度岩体的声学差异。通过压水试验获取各区域的原始透水率,分时段测量以排除地下水波动干扰,标记出透水性较强的薄弱部位。这些基线数据成为后续评估灌浆效果的参照标准,清晰反映施工前后岩体性能的变化幅度,为效果验证提供直接依据。

3.2 施工过程监控

实时数据反馈依靠传感器网络监测灌浆压力、流量等参数,动态调整施工方案。压力传感器安装在灌浆管路中靠近孔口的位置,持续追踪浆液注入时的压力变化,当压力突然下降时提示可能存在未探明的裂隙通道。流量监测装置记录单位时间内的浆液注入量,结合压力数据绘制变化曲线,判断浆液扩散状态是均匀推进还是局部聚集。根据这些实时信息,可及时调整灌浆压力或更换浆液类型,添加速凝剂或增稠剂,确保浆液均匀填充目标区域。异常预警利用声波监测识别浆液漏失、设备故障等风险,及时采取补救措施。声波监测设备以灌浆孔为中心呈放射状布置在周围岩体中,每隔一定距离设置一个接收探头,浆液正常扩散时声波传播速度呈现稳定上升趋势。若出现浆液漏失,声波信号会出现异常波动且传播速度骤降,提示需采取暂停灌浆并注入封堵材料等措施。设备运行状态通过振动监测判断,在灌浆泵与管路连接部位安装振动传感器,当设备出现异常振动时,发出预警信号以便及时停机检修,避免故障扩大影响施工进度。

3.3 施工后质量评估

效果验证对比灌浆前后岩体物理力学性能指标,确认是否达到设计标准。再次进行声波测试时扩大检测范围,覆盖灌浆影响区边缘地带,若岩体声波速度较基线数据显著提高且波动范围缩小,说明整体性得到改善。压水试验测得的透水率若降至设计阈值以下,且多次测量结果保持稳定,表明防渗性能达标。通过力学性能测试评估岩体抗压强度与弹性模量的提升幅度,结合不同深度的测试结果判断灌浆效果的均匀性,全面验证灌浆效果是否满足工程要求。缺陷定位通过物探技术精准识别未充填区域,指导二次灌浆作业。采用跨孔弹性波检测对灌浆区域进行多角度扫查,变换发射与接收装置的相对位置,波能衰减异常的区域提示可能存在浆液未充分填充的空隙。探地雷达对疑似缺陷区域进行精细扫描,调整雷达频率以适应不同深度探测需求,确定未充填区域的具体位置与范围,区分空隙与裂隙的形态差异。根据这些定位结果制定二次灌浆方案,选择合适的注浆孔位与注

入参数,针对性地补充注浆,消除质量隐患。

4 检测技术面临的挑战与优化方向

4.1 技术实施挑战

复杂地质条件下的检测精度常受影响。断层破碎带中岩体结构松散且含大量裂隙水,声波信号在传播过程中遭遇多重反射与散射,能量衰减严重,导致缺陷识别分辨率下降,难以区分未充填裂隙与天然空隙^[4]。岩溶发育区域存在不规则溶洞,电磁波在传播时发生强烈折射,使探地雷达检测结果出现假阳性信号,干扰对真实缺陷的判断。多源数据融合难度体现在不同检测技术结果存在尺度差异。物探技术获取的是区域化宏观数据,力学测试则聚焦单点微观指标,两者在空间分辨率上不匹配。各类数据表达方式各异,声波速度以数值呈现,雷达图像以波形展示,缺乏统一转换标准,需开发标准化评估模型实现数据有效整合。

4.2 管理机制挑战

检测标准不统一制约行业规范化发展。行业内对检测频率的设定缺乏共识,部分工程采用固定周期检测,难以适应地质条件复杂区域的实际需求。合格阈值的判定依据模糊,同一类工程因采用不同评价指标,可能出现检测结果与实际质量脱节的情况,影响工程验收的公正性。部分工程仍沿用多年前的旧标准,与新型灌浆材料的性能特性不匹配,进一步加剧标准混乱。跨部门协同不足阻碍检测效能发挥。设计单位掌握地质勘察数据,施工单位拥有现场作业记录,检测单位持有质量评估报告,但各单位数据存储格式独立,接口互不兼容。信息传递需经过多层审核,流程繁琐且耗时,应急情况下难以快速调取完整数据,延缓问题处置决策效率,甚至可能因信息滞后导致二次隐患。各部门对数据的重要性认知不一,部分单位存在数据壁垒,不愿主动共享关键信息。

4.3 优化方向

智能化检测设备研发聚焦集成物联网与AI算法。在传感器中嵌入无线传输模块,实现检测数据自动采集与

远程上传,减少人工干预。AI算法对实时数据进行动态分析,识别异常信号模式并生成初步评估结果,辅助技术人员快速判断检测对象状态,提升数据处理效率。同时优化设备续航能力,采用低功耗芯片适应野外长时间作业,配备防水外壳应对潮湿环境,加装抗干扰组件减少电磁信号影响。标准化体系构建需制定分级检测标准。根据工程重要性与地质复杂度划分检测等级,明确不同工程等级的检测项目、频率及指标要求。统一数据采集格式与分析方法,建立通用数据库框架,配套开发数据校验工具,确保不同来源数据可直接比对,为跨项目评估提供基础。人才培养与技术创新需双管齐下。加强基层技术人员培训,结合实际工程案例讲解设备操作要点与数据解读技巧,编制简易操作手册,提升现场处置能力。定期组织技术交流活动,分享不同地质条件下的检测经验。推动检测技术与新材料、新工艺的协同发展,探索适用于高裂隙岩体的新型检测方法,适配新型环保灌浆材料的特性,增强技术体系的适应性与前瞻性。

结束语

固结灌浆检测技术在水利工程中发挥着不可替代的作用,从施工前地质勘察到施工后质量评估,贯穿工程全周期。当前检测技术虽取得一定成果,但在复杂地质条件下的检测精度、多源数据融合以及管理机制等方面仍面临挑战。未来,需通过研发智能化检测设备、构建标准化体系、加强人才培养等措施,推动检测技术持续创新,为水利工程固结灌浆质量提供更可靠的保障。

参考文献

- [1]侯磊.高压旋喷固结灌浆技术在水利工程中的应用[J].陕西水利,2025,(06):159-162.
- [2]苏建江.水利工程坝基固结灌浆施工技术质量控制研究[J].珠江水运,2021(5):67-68.
- [3]郭帅帅,毛成宾,张侗侗.固结灌浆在水利工程检测中的研究[J].建材与装饰,2025,21(12):160-162.
- [4]杨路.固结灌浆技术在水利工程中的应用与优化研究[J].水利电力技术与应用,2025,7(15).