

水利水电工程施工中的灌浆施工技术

张 傲

中国水电基础局有限公司 天津 301700

摘 要: 水利水电工程施工中, 灌浆施工技术是保障工程稳定与防渗的关键。该技术通过钻孔将水泥、化学等浆液注入地层裂隙或构筑物裂缝, 形成密实结构。按工艺分, 包括帷幕灌浆防渗、固结灌浆增强整体性、接触灌浆改善结合面、回填灌浆填充间隙等。施工中需严格控制浆液配比、灌浆压力与孔斜精度, 并采用无损检测、取样试验等手段确保质量。其广泛应用于坝基处理、地下洞室加固及边坡稳定等场景。

关键词: 水利水电工程施工; 灌浆施工技术; 质量控制; 检测技术

引言: 在水利水电工程中, 灌浆施工技术是确保大坝、堤防等水工建筑物稳定与防渗的关键环节。面对复杂多变的岩土体条件及高水头、强渗透等工程挑战, 灌浆技术通过精准注入浆液, 有效填充裂隙、加固地基并形成防渗帷幕。本文将从灌浆技术的基础理论出发, 结合其在不同工程场景中的应用, 分析施工质量控制要点, 并探讨智能化、绿色化等未来发展方向。

1 水利水电工程施工中的灌浆施工技术基础理论

1.1 灌浆技术分类与原理

(1) 按材料分类: 水泥灌浆以水泥为主要原料, 依靠水泥水化反应形成结石封堵缝隙, 适用于大多数岩土体防渗加固; 化学灌浆采用环氧树脂、聚氨酯等化学浆液, 具备高渗透性, 可填充细微裂隙, 但成本较高; 复合灌浆结合水泥与化学材料优势, 兼顾强度与渗透性, 用于复杂地质条件。(2) 按工艺分类: 帷幕灌浆形成防渗帷幕, 阻断地下水渗透, 常用于坝基防渗; 固结灌浆增强岩土体整体性, 提高承载能力, 多应用于地基处理; 接触灌浆改善混凝土与基岩接触面结合性能, 避免渗漏; 回填灌浆填充隧洞衬砌与围岩间隙, 保障结构稳定。(3) 灌浆作用机理: 渗透机理是浆液在压力作用下渗入孔隙, 胶结颗粒; 劈裂机理利用高压使岩土体产生裂隙, 浆液填充形成骨架; 压密机理通过压力挤压孔隙, 减少孔隙率, 提升密实度。

1.2 灌浆材料性能与选择

(1) 水泥基材料特性为强度高、成本低、耐久性好, 但流动性与渗透性较差, 适用于中粗孔隙地层的防渗加固。(2) 化学灌浆材料中, 环氧树脂强度高、粘结力强, 但脆性大、耐候性差; 聚氨酯弹性好、防渗效果佳, 却存在毒性与环保问题。(3) 新型环保材料研发趋势聚焦于可降解、低毒性、高性价比, 如生物基灌浆材料、工业废渣改性灌浆材料。

1.3 灌浆施工设备与工艺流程

(1) 钻孔设备包括回转式钻机、冲击式钻机, 分别适用于硬岩、松散地层; 灌浆泵有往复式活塞泵、螺杆泵, 满足不同压力需求; 自动记录仪实时监测灌浆压力、流量、浆液浓度, 保障施工质量。(2) 典型灌浆工艺流程: 钻孔按设计孔位、孔径钻进; 冲洗清除孔内岩屑、泥皮, 采用高压水冲洗或压缩空气冲洗; 压水试验测定地层渗透系数, 确定灌浆参数; 灌浆按设定压力、浆液浓度分层灌注; 封孔采用水泥浆封堵孔口, 防止渗漏。

2 水利水电工程施工中的灌浆施工技术应用

2.1 不同工程场景的灌浆技术选择

(1) 坝基处理: 帷幕灌浆防渗设计需结合坝基岩性与水头压力确定参数, 通常采用多排孔布置形成连续防渗幕体。对于砂卵石坝基, 需先进行高压喷射灌浆形成防渗墙, 再配合水泥帷幕灌浆; 对于岩基坝基, 采用自上而下分段灌浆法, 控制灌浆压力不超过岩基抗压强度的1/3, 避免岩基抬动, 确保防渗帷幕渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 。(2) 坝体加固: 固结灌浆多用于混凝土重力坝、拱坝的坝体与坝基结合部位, 采用梅花形布孔, 孔深穿透坝体进入基岩0.5-1.0m。灌浆压力根据坝体混凝土强度确定, 一般为0.2-0.5MPa, 通过浆液渗透与压密作用, 减少坝体裂缝, 提高坝体与基岩的整体承载能力, 降低坝体渗漏量^[1]。(3) 地下洞室: 回填灌浆与接触灌浆协同应用, 回填灌浆针对隧洞衬砌与围岩间隙, 采用顶拱预埋管灌浆, 分2-3序施工, 灌浆压力0.2-0.3MPa, 填充间隙防止围岩变形; 接触灌浆用于衬砌混凝土与围岩接触面, 采用钻孔灌浆法, 孔距2-3m, 通过浆液粘结作用增强接触面结合强度, 避免地下水沿接触面渗漏。(4) 边坡稳定: 预应力锚索灌浆技术需先钻孔至设计深度, 放入锚索后进行一次灌浆, 采用水泥浆灌注, 压力0.3-0.5MPa, 待浆液初凝后进行二次高压灌浆, 压力1.5-2.0MPa, 使浆液充分渗透到边坡岩体裂隙中, 形成锚固体, 结合锚索

张拉锁定,提高边坡抗滑稳定性,适用于岩质边坡与土质边坡加固。

2.2 特殊地质条件下的灌浆技术

(1) 软弱破碎带灌浆处理:采用“先导孔勘探+分段灌浆”工艺,先导孔查明破碎带范围与渗透特性,再采用小口径钻孔(孔径50-75mm),自上而下分段灌浆,段长1-2m。浆液选用水泥-水玻璃双液浆,初凝时间控制在3-5min,快速填充破碎带孔隙,同时配合套管跟进技术,防止孔壁坍塌,提高破碎带整体强度。(2) 溶洞、断层等复杂地质的适应性技术:对于小型溶洞(直径小于2m),采用水泥-粉煤灰混合浆液灌注,添加膨胀剂减少浆液收缩;对于大型溶洞,先填入级配砂石骨料,再进行灌浆填充,形成骨架-浆液复合防渗体。断层处理采用“断层带开挖清理+灌浆加固”,沿断层走向布置灌浆孔,孔距1-1.5m,采用高压劈裂灌浆,使浆液沿断层破碎带扩散,形成连续防渗帷幕。(3) 高水头、高压力条件下的灌浆工艺:采用“分级升压+限流灌浆”法,初始压力为设计压力的50%,每30min升压10%-15%,直至设计压力。同时控制灌浆流量不超过30L/min,避免浆液过度扩散。选用高强度水泥(42.5级以上),添加硅灰改善浆液流动性与强度,灌浆结束后采用高压封孔(压力为设计压力的1.2倍),确保封孔密实,适用于水电站厂房、高坝等高压工况^[2]。

3 水利水电工程施工中灌浆施工质量控制与检测技术

3.1 施工过程质量控制要点

(1) 钻孔精度与孔斜控制:严格按照设计孔位放线,偏差不得超过5cm;采用全站仪实时监测孔位坐标,确保孔位符合设计要求。钻孔过程中,每钻进10m使用测斜仪检测孔斜,岩基钻孔孔斜率控制在0.5%以内,松散地层控制在1%以内。若孔斜超标,需采用纠偏钻具调整,如更换偏心钻头或采用导向钻杆,避免因孔斜导致灌浆范围偏移,影响防添加固效果。(2) 浆液配比与流动性调控:根据地质条件确定浆液配比,水泥灌浆常用水灰比为0.5:1-2:1,化学灌浆需精确控制环氧树脂、固化剂等组分比例,误差不超过 $\pm 2\%$ 。采用浆液搅拌机匀速搅拌,搅拌时间不少于3min,确保浆液均匀。通过漏斗黏度计实时监测浆液流动性,水泥浆液黏度控制在15-25s,化学浆液黏度根据材料类型调整,如聚氨酯浆液黏度需小于50mPa·s,若流动性不佳,可适量添加减水剂或稀释剂,保证浆液顺利输送与扩散^[3]。(3) 灌浆压力与分段升压法应用:依据地层渗透性与结构强度确定初始灌浆压力,软土地层初始压力控制在0.1-0.3MPa,岩基地层初始压力为0.3-0.5MPa。采用分段升压法,每级升压间隔30min,

每级升压幅度为0.1-0.2MPa,直至达到设计压力。升压过程中,密切观察地层变形与孔口返浆情况,若出现地层抬动(抬动值超过2mm)或孔口无返浆,立即停止升压并降低压力,待稳定后再继续,防止因压力过高破坏地层结构。

3.2 质量检测方法与标准

(1) 无损检测:声波检测通过发射声波穿透灌浆体,接收端分析声波速度,若波速大于3000m/s,表明灌浆密实;电阻率法利用不同介质电阻率差异,灌浆密实区域电阻率高于未密实区域,当电阻率差值超过 $50\Omega\cdot\text{m}$ 时,判定存在不密实区;CT成像技术通过计算机断层扫描生成灌浆体内部图像,可清晰识别空洞、裂隙等缺陷,缺陷面积占比需小于1%为合格。(2) 取样检测:岩芯取样采用金刚石钻头钻进,获取完整岩芯,观察灌浆体与岩体结合情况,结合面粘结率需大于90%;压水试验在灌浆结束7天后进行,采用单点法或五点法,试验压力为设计灌浆压力的80%,若渗透系数小于 $1\times 10^{-6}\text{cm/s}$,判定防渗效果合格;浆液结石强度测试需制作标准试块,养护28天后进行抗压强度试验,水泥结石抗压强度不低于15MPa,化学结石抗压强度不低于20MPa。(3) 实时监测:灌浆自动记录仪需全程记录灌浆压力、流量、浆液浓度等数据,每5min存储一次数据。数据分析时,若压力稳定上升、流量逐渐下降且浆液浓度符合设计要求,表明灌浆正常;若出现压力骤降、流量突增,可能存在漏浆或溶洞,需及时排查。同时,对比不同孔段数据,偏差超过10%时需重新校验设备,确保数据准确性^[4]。

3.3 常见问题与防治措施

(1) 串浆、冒浆、固管等异常现象处理:串浆时,若相邻孔未灌浆,可同时进行灌浆;若已灌浆,需关闭串浆孔阀门,待本孔灌浆结束后,对串浆孔补灌。冒浆发生在地表或裂缝处,可采用低压慢灌,同时在冒浆处铺设黏土或沙袋压实,若冒浆严重,暂停灌浆并注入浓浆,待浆液初凝后继续。固管多因浆液过早凝固,需控制浆液初凝时间,钻孔时确保孔壁光滑,若发生固管,采用高压水冲洗或钻机缓慢提拔钻杆,避免强行拔管导致孔壁坍塌。(2) 灌浆不密实的原因分析与补救方案:原因包括浆液配比不当(如水灰比过大)、灌浆压力不足、地层渗漏通道未封堵。补救时,先通过无损检测确定不密实区域范围,再采用补孔灌浆,补孔间距为原孔距的1/2,选用浓浆(水灰比0.5:1),采用高压劈裂灌浆,压力比原灌浆压力提高20%。若存在大型空洞,先填入碎石骨料,再分层灌浆,每层灌浆高度不超过1m,确保浆液充分填充。灌浆结束后,重新进行质量检测,直至符合标准。

4 水利水电工程施工中的灌浆施工技术创新与发展趋势

4.1 智能化灌浆技术应用

(1) 智能灌浆系统：集成自动配浆、压力调控与数据采集功能，通过传感器实时监测浆液密度、黏度，结合PLC控制系统精准调配水灰比，误差控制在 $\pm 1\%$ ；压力调控模块依据地层反馈动态调整压力，避免超压或欠压，适配不同地质条件；数据采集单元同步记录流量、压力、浆液参数，生成可视化报表，实现施工全过程自动化管控，减少人工干预误差，提升施工效率30%以上。

(2) 物联网与大数据在灌浆施工中的融合：借助物联网设备搭建云端监测平台，实时传输多工位灌浆数据，形成施工数据库；通过大数据算法分析历史数据，建立地质条件与灌浆参数的关联模型，实现参数智能预判；同时对施工异常数据实时预警，如流量骤增时自动推送漏浆风险提示，辅助管理人员快速决策，保障施工质量稳定性。

4.2 绿色灌浆材料研发

(1) 低污染、可降解材料的工业化应用：研发生物基化学灌浆材料，以植物淀粉、纤维素为原料，替代传统有毒溶剂，降解率达90%以上，且防渗性能与传统材料相当；推动水性环氧树脂灌浆材料量产，VOC排放量降低80%，适用于生态敏感区域施工，已在多个水库防渗工程中试点应用，效果显著。

(2) 废弃物资源化利用：将粉煤灰、矿渣微粉按30%-50%比例掺入水泥基灌浆材料，通过改性技术提升浆液流动性与结石强度，既降低工业固废污染，又减少水泥用量，成本降低15%-20%；此外，利用建筑垃圾破碎骨料制备灌浆填充料，实现资源循环利用，符合绿色施工理念^[5]。

4.3 未来发展方向

(1) 极端环境下的灌浆技术突破：针对高寒、高海拔、深海等极端场景，研发低温早强灌浆材料（-20℃环

境下24h强度达10MPa）、抗高渗透压浆液，结合耐寒、耐高压设备，解决极端环境下灌浆难题，满足跨流域调水、深海水电站等工程需求。(2) 3D打印灌浆工艺的探索：利用3D打印技术精准控制浆液喷射路径与用量，实现复杂地质条件下定制化灌浆，如在溶洞、断层区域打印连续防渗体，提升灌浆精度与效率，目前已在实验室阶段取得突破，未来有望规模化应用。(3) 灌浆与地质预报技术的协同优化：结合地质雷达、超前钻探等预报技术，提前探明地层分布，动态调整灌浆方案；通过建立灌浆效果与地质参数的反馈模型，实现“预报-灌浆-验证”闭环管控，提升灌浆施工的科学性与针对性。

结束语

水利水电工程中，灌浆施工技术作为保障结构安全与防渗效能的核心手段，其重要性不言而喻。通过科学分类材料、优化工艺流程及严格质量控制，该技术有效解决了复杂地质条件下的施工难题。未来，随着智能化装备、绿色环保材料的深度应用，以及极端环境适应能力的持续提升，灌浆技术将向更高效、更精准、更可持续的方向迈进，为水利水电工程的高质量建设提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1]李波.水利水电工程施工中灌浆技术的应用分析[J].四川水利,2022,(S1):43-46.
- [2]王新斌.水利水电工程施工中灌浆技术的应用分析[J].长江技术经济,2022,6(S1):104-106.
- [3]李四红.水利水电工程灌浆施工技术与质量管理措施分析[J].湖南水利水电,2022,(01):31-33.
- [4]罗伟钊.水利工程中帷幕灌浆施工技术分析[J].住宅与房地产,2021,(30):69-70.
- [5]田洪波.水利施工技术及其灌浆施工应用研究[J].四川水泥,2021,(10):215-216.