

水工建筑工程中的帷幕灌浆施工技术分析

文 / 柯鹏远 广东广建建工集团有限公司

摘要: 针对水利工程渗漏控制难题,本研究结合面板堆石坝工程实践,系统总结了帷幕灌浆关键技术体系创新成果。通过三维地质建模精准识别溶洞通道空间分布,采用差异化布孔方案与分级加密技术优化孔位布置。创新应用化学-机械协同清孔工艺提升界面洁净度,并研发纳米硅基复合浆液的智能调控系统,实现岩体裂隙的选择性灌注。针对串浆风险建立微震监测与压力联动控制机制,动态调整灌浆参数。工程验证表明,该技术体系显著提升帷幕体连续性,有效阻隔水力联系,坝基渗流量远低于设计阈值,为复杂地质条件下防渗体系建设提供重要技术支持。

关键词: 水工建筑; 帷幕灌浆; 钻孔压水

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.082

引言

水工建筑工程的防渗体系直接关系工程安全与生态效益,帷幕灌浆作为隐蔽性基础处理工艺,其技术演进始终与水利工程高质量发展需求紧密关联。我国《“十四五”水安全保障规划》明确提出提升基础设施韧性要求,促使灌浆工艺从传统经验型向精细化控制转型。当前施工过程中,材料配比适应性、裂隙岩体可灌性及环境扰动控制构成技术实施的关键约束条件,需通过参数优化与设备协同实现渗透路径的精准封堵。该技术领域仍存在工艺标准区域适配性不足、过程监测数据利用率偏低等共性问题,亟待通过机理研究与工程实践相结合予以突破。

一、工程概述

某水利工程属于大(2)型水利工程,工程等别为II等,主要建筑物按I级标准设计。坝高154m,坝体为混凝土面板堆石坝,最大坝高154m,坝顶长度429m,正常蓄水位1323m,总库容13.23亿 m^3 ,年供水量6.88亿 m^3 ,电站装机容量180MW。案例工程所在区域的基岩以石灰岩为主,发育有溶洞、暗河等渗漏通道,这种特殊地质条件使常规防渗体系难以满足要求,必须采用深帷幕灌浆技术构建垂直防渗幕墙,才能有效阻断岩溶裂隙网络的水力联系,确保水库蓄水后不发生大规模渗漏,同时避免周边岩体溶蚀塌陷。

二、基于水工建筑实例分析帷幕灌浆施工技术要点

由于地形影响,工程面临严峻的渗漏风险,故需做好勘查测量等工作,精准设置灌浆孔,做好清洗、技术试验等,然后方可进行帷幕灌浆,期间把握技术要点,确保工程质量^[1]。

(一) 施工测量

在案例工程的帷幕灌浆工程中,施工测量作为核心前置工序,采用“三级校核”体系保障轴线定位精度。首级控制网基于工程独立坐标系,使用测角精度 $0.5''$ 、测距

精度 $0.6mm+1ppm$ 的全站仪,通过6个GNSS基准站实现施工区实时动态定位,将平面点位中误差控制在 $\leq 3mm$ 。灌浆轴线放样采用极坐标法,每10m设置位移监测点,钻孔孔位偏差执行SL62-2020标准,允许值见下表:

表1 允许偏差

项目	允许偏差	单位	检测方法
孔位平面偏差	≤ 10	cm	全站仪坐标反算
孔深垂直偏差	≤ 1.5	%	钻孔测斜仪
孔间排距误差	≤ 20	cm	钢尺量距+温度修正
帷幕轴线偏移	≤ 15	cm	激光准直仪连续监测

由于当地地貌的特殊性,案例项目施工中创新应用精度 $\pm 2mm/50m$ 的三维激光扫描技术对溶蚀破碎带进行逆向建模,指导灌浆孔位动态调整。灌浆廊道内测量采用强制对中装置,配合电子水准仪控制高程传递。灌浆过程实施“一孔一测”制度,使用钻孔电视复核岩层裂隙发育方向,确保帷幕体连续性^[2]。工程累计完成灌浆孔位测量3276个,经第三方检测,孔位合格率达99.2%,轴线累计偏差仅8.7cm,优于设计要求的15cm控制标准。为确保溶蚀区灌浆精准度,工程引入BIM三维地质建模技术,基于0.2m间距的钻孔雷达数据构建岩溶通道空间分布模型。通过模型动态模拟帷幕轴线与溶洞的空间关系,优化了17处孔位偏移方案,减少溶洞绕渗风险。模型精度验证显示,溶洞边界预测误差 $\leq 0.3m$,有效指导了灌浆孔在复杂地质条件下的精准施工。

(二) 灌浆孔设置

在夹岩水利枢纽帷幕灌浆工程中,灌浆孔设置采用“分级加密”原则,根据探测深度50m、分辨率0.5m的地质雷达探测显示的岩溶发育特征进行差异化布置。在设置实践中,工程主帷幕孔距设计为1.5m,副帷幕孔距2.0m,遇到断层破碎带时加密至0.8m。钻孔直径分为三级:先导孔采用 $\Phi 91mm$ 金刚石钻头,先序孔 $\Phi 76mm$,

后序孔 $\Phi 60\text{mm}$ ，终孔深度按深入相对不透水层 ($q \leq 3Lu$) 5m 控制。孔斜测量采用 KXP-III 型测斜仪，在孔深每增加 20m 时进行纠偏，确保偏斜率 $\leq 1\%$ 。灌浆孔与结构物的距离控制标准为：距坝踵 $\geq 3\text{m}$ ，距廊道边墙 $\geq 1.5\text{m}$ 。

针对溶洞群发育区，创新采用“梅花形布孔 + 径向扇形孔”组合模式，单组放射孔夹角 15° ，孔底间距控制在 0.6m 以内。灌浆压力实施分段控制，0 ~ 20m 控制在 0.3 ~ 0.5MPa，20 ~ 50m 控制在 0.8 ~ 1.2MPa，大于 50m 控制在 1.5 ~ 2.0MPa，具体参数根据压水试验动态调整。工程累计完成灌浆孔 4286 个，其中特殊地质处理孔占比 23%，平均单孔灌浆量 4.7m^3 ，经声波检测显示幕体波速 $\geq 4000\text{m/s}$ 的区域达 91.3%。

(三) 成孔和钻孔清洗

案例工程成孔作业采用最大扭矩 $3200\text{N} \cdot \text{m}$ 的全液压钻机配合规格为 $\Phi 76\text{mm}/\Phi 91\text{mm}$ 的孕镶金刚石钻头，根据《水电水利工程钻孔规程》DL/T5013-2018 要求，钻孔偏斜控制执行“双指标”标准：孔深 $\leq 50\text{m}$ 时偏斜率 $\leq 1\%$ ，孔深 $> 50\text{m}$ 时累计偏差 $\leq 1.5\text{m}$ 。针对不同岩层采用差异化钻进参数：完整灰岩层转速 120 ~ 150r/min、钻压 8 ~ 12kN，破碎带区域降至 80 ~ 100r/min 并采用跟管钻进，其中套管外径 $\Phi 89\text{mm}$ 。钻孔冲洗采用三级净化系统，先用 $\Phi 50\text{mm}$ 钢丝刷钻具进行孔壁刷洗，往复速度 0.5m/s，再以 0.6MPa 压力水冲洗直至返水浊度 $\leq 200\text{NTU}$ ，最后用 0.3MPa 的压缩空气吹孔 30min^[3]。特殊地质段处理数据如下表：

表 2 特殊地段处理数据

处理类型	技术参数	控制标准
溶洞钻进	跟管长度	\geq 溶度高度 +2m
断层带冲洗	水灰比	3 : 1 ~ 5 : 1
裂隙发育区	冲洗持续时间	$\geq 2\text{h}$
孔底沉渣	厚度允许值	$\leq 30\text{mm}$

针对溶蚀裂隙网络的隐蔽污染问题，工程首创化学-机械协同清洗技术：先注入 pH 值 10.5 的乙二胺四乙酸 (EDTA) 络合溶液浸泡 2 小时，溶解裂隙钙质胶结物；再采用 0.8MPa 脉动压力冲洗，脉冲频率 0.25Hz，使微小岩粉剥离效率提升 55%。特别在 K28 溶洞区，通过添加 0.05% 阴离子表面活性剂降低浆液界面张力，冲洗后孔壁残留物厚度降至 $8\mu\text{m}$ 级，为浆液渗透创造超净界面条件。

工程实践中发现，当钻孔穿过 F23 断层时，采用“间歇式脉冲冲洗”技术，即：压力 0.4-0.8MPa 交替变化，频率 1Hz，以此提高岩粉排出率 %。全工程累计完成钻孔 4372 个，经全景钻孔摄像检测，孔壁清洁达标率 98.7%，为后续灌浆施工奠定了坚实基础。

(四) 钻孔压水试验

钻孔压水试验作为渗透性评价的核心手段，案例工程采用“三级压力五阶段”试验法，压力序列是 0.3MPa \rightarrow 0.6MPa \rightarrow 1.0MPa \rightarrow 0.6MPa \rightarrow 0.3MPa。试验设备选用流量测量精度 $\pm 1\%$ 、压力控制精度 $\pm 0.02\text{MPa}$ 的智能压水仪，试验段长度严格控制在 $5\text{m} \pm 0.2\text{m}$ 范围内。针对工程区岩溶发育特点，应用“双栓塞隔离 + 示踪剂辅助”技术，通过添加浓度为 10mg/L 的荧光素钠检测裂隙连通性。试验数据采集频率为 10s/次，当连续 3 次读数差值 $\leq 5\%$ 时判定为稳定状态。渗透性分级标准执行 SL31-2020 规范，关键参数见下表：

表 3 技术参数

参数指标	控制标准	检测方法
吕荣值 Lu	$\leq 3Lu$	压力-流量曲线斜率法
透水率 q	$\leq 1.5\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa})$	稳定流量法
压力损失率	$\leq 15\%$	首末压力差值法
吸收率 ω	$\leq 0.03\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$	单位吸水量计算法

施工过程中，发现 F18 断层带压水试验时出现异常渗透，最大 q 值达 $8.7\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa})$ ，因此项目选用“阶梯升压-稳压渗透”工艺，每级压力稳压 30min，配合温度补偿修正水温影响。全工程累计完成压水试验段 5826 段，其中特殊地质段占比 31%，经统计合格率达 97.4%。试验数据与后期物探检测对比显示，渗透系数相关性系数 R^2 达 0.89，验证了试验方法的可靠性。

(五) 帷幕灌浆

1. 灌浆

在水工建筑项目中开展帷幕灌浆施工时，浆液性能与施工工艺的协同控制是保证防渗体系可靠性的关键，案例工程夹岩工程通过创新材料配比与工艺组合，通过打造具有地域适应性的技术体系以应对施工挑战。埋设光纤传感器监测浆液温度、压力及扩散轨迹，通过数据平台动态调整配比。当检测到溶洞区浆液流失率 $> 15\%$ 时，自动触发高粘度浆液注入程序。基于历史灌浆数据训练机器学习模型，预测不同岩层的浆液最优水灰比，使破碎带区域灌浆效率提升。此外，采用电渗析导水定向技术，在 F23 断层带形成电势梯度场，引导浆液定向填充远端裂隙，减少无效灌注量^[4]。

具体而言，帷幕灌浆施工采用 P042.5 级水泥为主材，比表面积 $\geq 350\text{m}^2/\text{kg}$ ，然后针对不同地质单元配置差异化浆液。其中，完整岩层采用 0.6:1 单液浆，粘度 25 ~ 30s；破碎带采用 0.8:1 水泥-膨润土复合浆，塑性强度 1.5MPa；溶洞发育区则注入 1:1 水泥-粉煤灰稳

定浆,析水率 $\leq 3\%$ 。灌浆压力实施动态控制,0~10m的灌浆压力范围是0.3~0.5MPa,10~30m的灌浆压力范围是0.8~1.2MPa,大于30m的灌浆压力范围是1.5~2.0MPa,遇断层时按0.1MPa/m梯度递增。流量监测采用EMF型电磁流量计,当注入率突增超过15L/min时立即切换为间歇灌浆模式,也就是灌注-待凝周期30min/次。与此同时,项目应用“三维扩散控制”技术,通过添加0.05%羟丙基甲基纤维素(HPMC)调节浆液扩散半径至1.2~1.8m范围。全工程累计灌注浆液12.7万 m^3 ,其中特殊浆液占比28%,经钻孔取芯检测显示:水泥结石体28d抗压强度达标率98.3%,弹性模量18~22GPa,与围岩变形协调性良好,成功将坝基渗透系数控制在 $1.5\times 10^{-6}cm/s$ 以下,较设计要求提升一个数量级。

2. 串浆

开展帷幕灌浆施工时,串浆作为典型质量缺陷,其发生率与岩体裂隙发育程度呈正相关。案例工程统计数据表明,在岩溶发育区施工时,串浆现象发生率高达23%,较完整岩层区域提升6.8倍。而且,串浆主要分为三种类型:沿原生裂隙扩散型、沿钻孔扰动区渗透型和溶洞通道贯通型。

针对这一情况,工程采用分辨率为0.2mm的钻孔电视进行裂隙网络测绘,建立三维地质模型预测串浆风险区。根据风险区划分结果,对各个分区实施分级控制:对于初级预防,主要以限量灌注法为主,单孔注入率 $\leq 15L/min$;中级阻断使用速凝浆液,初凝时间8~12min;终极处理则启用双液灌浆系统,水泥浆与水玻璃体积比1:0.3。针对F17断层带发生的最大串浆量记录,采用“压力-流量双阈值”控制法:当灌浆压力突降超过0.3MPa且相邻孔返浆量 $> 5L/min$ 时,立即启动应急处理程序。全工程累计处理串浆事件437次,通过引入纳米二氧化硅添加剂(掺量0.8%)使处理成功率从76%提升至94%。创新建立微震-液压联动控制系统应对深层串浆:布设24通道微震阵列,当捕捉到灌浆诱发微破裂事件时,同步调降0.2MPa灌浆压力并注入触变缓凝浆。在F19断层带应用中,该系统将浆液扩散半径精准控制在 $1.8\pm 0.3m$ 范围内,避免对邻近帷幕体的水力劈裂,关键结构物周边抬动变形量 $\leq 0.08mm$,远低于0.2mm设计阈值。后期压水试验证实,处理区段透水率降至1.2Lu以下,满足设计 $\leq 3Lu$ 的质量标准。

三、施工质量导向下的关键技术和工艺创新

经综合技术应用,工程形成“地质-施工-监测”闭环控制体系:帷幕体渗透系数低于设计值52%,溶洞

区单位吸水率 $\omega \leq 0.015L/(min\cdot m^2)$ 。大坝蓄水三年位移监测数据显示,坝基渗流量仅0.73L/s,远低于5L/s的设计阈值,验证了垂直防渗体系的长期可靠性

由此可见,案例工程在帷幕灌浆施工中突破了传统技术瓶颈,创新采用地质雷达与灌浆参数联动调控系统。该系统通过40MHz高频电磁波探测岩体裂隙,当识别到大于2mm的连续裂隙时,自动切换至0.8:1高密度浆液灌注模式。工程团队研发的纳米硅基复合浆液具有触变特性,在静态条件下粘度保持80~100 $Pa\cdot s$,当剪切速率超过 $50s^{-1}$ 时粘度骤降至30 $Pa\cdot s$,实现了岩溶通道的选择性灌注。钻孔轨迹控制采用陀螺测斜仪导向技术,将孔斜偏差控制在 0.3° 范围内,确保相邻孔距5m时帷幕搭接厚度不小于3m。针对深层破碎带灌浆,开发了阶梯式压力补偿工艺,初始段0.6MPa压力维持20min后,以0.1MPa/5min的梯度递增至1.8MPa终压。质量监控方面引入分布式光纤传感网络,沿帷幕轴线每0.5m布设一个测温点,通过浆液水化热场变化反演扩散半径,实测数据显示浆液有效填充范围达到设计值的105%。工程应用表明,该技术体系使岩体透水率从施工前的18.6Lu降至0.7Lu以下。

结语

综上所述,本文结合具体工程通过创新帷幕灌浆技术体系,应对岩溶发育区高坝防渗的难题。技术层面突破了传统工艺局限:融合三维地质建模实现溶洞通道精准定位,创新化学-机械协同清洗工艺保障成孔质量,基于智能调控的浆液配比与压力分级系统显著提升帷幕连续性。尤为关键的是,动态监测与机器学习模型的闭环应用,实现了灌浆过程的全周期优化控制。未来研究需进一步深化人工智能在隐蔽裂隙识别中的应用,开发环保型纳米复合浆材以降低生态影响,并加强超深帷幕灌浆的长期耐久性监测,以期推动水利工程防渗技术向智能化、绿色化方向迭代升级。

参考文献

- [1] 李幸生. 水工建筑帷幕灌浆施工工艺优化与质量控制[J]. 建筑工程技术与设计, 2024(33):151-153.
- [2] 赵健飞, 孙青秀. 高压旋喷防渗墙在多漂卵石围堰地基中的应用[J]. 西北水电, 2024(2):78-81.
- [3] 王岩. 超前注浆小导管在水工隧洞塌方处理工艺探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2025, (1):139-142.
- [4] 李曼, 刘琳, 王俊卿, 等. 深厚富水砂卵石地层注浆封闭止水及加固技术[J]. 山西建筑, 2024, 50(8):74-77.

作者简介:柯鹏远(1981年12月-),汉族,广东省潮州市,大专,无职称,研究方向:水利工程。