

水利工程帷幕灌浆施工技术及防渗效果分析

代峻儒

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 四川盆地广泛分布的红层软硬互层岩体, 具有裂隙发育不均、遇水软化、透水性差异大的特征, 坝基渗漏是该区域水利工程建设与运营的核心病害, 帷幕灌浆是坝基防渗处理的技术手段。本文结合四川地区某中型水库枢纽工程实例, 系统剖析红层地层帷幕灌浆施工的核心技术难点, 构建了“勘察设计—工艺优化—质量管控—效果验证”的全流程施工技术体系, 针对性优化关键施工参数, 以期为四川及西南红层地区同类水利工程帷幕灌浆施工提供实践参考。工程应用结果表明, 该技术体系可有效降低坝基岩体透水性, 防渗效果满足设计要求。

关键词 水利工程; 帷幕灌浆; 前期勘察; 参数设计; 防渗效果

中图分类号: TV543

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.002

0 引言

四川是我国的水利大省, 境内江河纵横, 水库枢纽工程众多, 是保障区域防洪安全、供水灌溉、农村饮水的核心基础设施。四川盆地广泛分布侏罗系、白垩系红层砂岩与泥岩互层岩体, 受区域构造运动与多雨气候影响, 岩体节理裂隙发育、局部存在溶蚀裂隙与软弱夹层, 坝基渗漏、绕坝渗流问题突出, 严重威胁水利工程的运行安全^[1]。帷幕灌浆通过高压灌注水泥浆液填充岩体裂隙, 形成连续防渗帷幕, 是当前水利工程坝基防渗处理的主流技术。但红层地层岩体性质不均、可灌性差异大, 传统灌浆工艺与地层适配性不足, 易出现漏浆、串浆、灌浆效果不达标的问题^[2]。本文结合四川地区水利工程实例, 剖析帷幕灌浆施工核心难点, 研究关键施工技术, 开展防渗效果分析。

1 工程概况

本项目为四川川中丘陵区某中型水库枢纽工程, 工程任务以农业灌溉、乡镇供水为主, 兼顾防洪与生态补水, 水库总库容 1 280 万 m³, 枢纽主体为碾压混凝土重力坝, 最大坝高 38.6 m, 坝顶长度 225 m, 共分为 8 个坝段。坝基岩体为侏罗系遂宁组红层, 以砂岩与泥岩互层为主, 岩层倾角 3°~5°, 其中砂岩岩体节理裂隙发育, 透水性强, 泥岩遇水易软化崩解, 局部存在泥化软弱夹层与溶蚀裂隙; 坝址区地下水位埋深 1.2 m~3.5 m, 存在承压水层, 承压水头最高达 8.2 m。坝基防渗采用垂直帷幕灌浆方案, 防渗标准为

坝基岩体透水性 $q \leq 5 \text{ Lu}$, 帷幕灌浆沿坝轴线单排布置, 灌浆孔孔距 2 m, 孔深穿透强透层进入相对隔水层不小于 5 m, 最大孔深 42 m, 灌浆总进尺 8 620 m^[3]。

2 水利工程帷幕灌浆施工核心技术难点

2.1 红层地质条件复杂, 地层可灌性差异大

四川红层砂岩与泥岩互层的地质特征, 是帷幕灌浆施工的首要难点。坝基岩体软硬不均, 砂岩质地坚硬, 节理裂隙发育, 透水性强, 浆液扩散性好; 而泥岩质地软弱, 裂隙不发育, 透水性极差, 遇水易软化崩解, 可灌性差, 同一灌浆孔内不同地层的可灌性差异悬殊, 统一的灌浆参数无法适配所有地层, 易出现砂岩段灌浆量过大、泥岩段无法灌进的问题。同时, 局部存在的泥化软弱夹层与溶蚀裂隙, 会导致浆液扩散失控, 出现无限制漏浆, 无法形成连续的防渗帷幕, 严重影响防渗效果。

2.2 特殊工况频发, 施工过程管控难度大

四川红层地区高地下水位、高承压水的水文特征, 导致帷幕灌浆施工过程中特殊工况频发, 管控难度极大。高承压水会抵消部分灌浆压力, 导致浆液无法有效填充裂隙, 甚至出现浆液倒灌的问题; 砂岩段裂隙连通性好, 易出现跨孔串浆、坝面冒浆、沿裂隙大面积漏浆等问题, 若处理不及时, 会导致灌浆饱满度不足, 帷幕出现断点。同时, 在钻孔过程中, 泥岩遇水软化易引发孔壁坍塌、缩径, 导致成孔质量不达标, 甚至出现卡钻、埋钻等事故; 灌浆压力控制不当, 会导致岩体

作者简介: 代峻儒 (1986-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电工程。

劈裂，破坏原有岩体完整性，反而加剧坝基渗漏风险。

2.3 隐蔽工程施工质量管控体系不完善

帷幕灌浆属于地下隐蔽工程，施工工序多、技术要求高，质量管控难度大，是施工过程中的核心难点。帷幕灌浆施工涵盖钻孔、洗孔、压水试验、灌浆、封孔等多道工序，每一道工序的质量都会直接影响最终防渗效果，尤其是灌浆压力、浆液配比、灌浆量、结束标准等关键参数，需全程精准管控。但四川地区中小型水利工程多位于偏远乡村，施工单位技术力量薄弱，一线作业人员专业水平参差不齐，普遍存在“重进度、轻质量”的误区，未建立完善的三检制度，过程管控流于形式，易出现钻孔偏斜、洗孔不彻底、灌浆参数控制不当等问题，导致帷幕灌浆质量不达标，防渗效果无法满足设计要求。

2.4 防渗效果精准评价与验证难度大

帷幕灌浆防渗效果的精准评价，是验证工程质量的核心环节，也是当前施工中的重要难点。传统的防渗效果评价主要依靠检查孔压水试验，仅能反映单点的岩体透水性，而四川红层地层透水性不均，检查孔的代表性有限，无法全面反映帷幕整体的连续性与防渗性能。同时，坝基渗流量监测易受降雨、地下水位波动等因素影响，难以精准区分帷幕防渗效果与水文变化的影响。

表 1 不同地层帷幕灌浆核心设计参数

地层透水性分级	岩体特征	灌浆段长 (m)	设计灌浆压力 (MPa)	水灰比分级	结束标准
强透水层 ($q \geq 30 \text{ Lu}$)	强风化砂岩、 溶蚀裂隙发育段	2 ~ 3	1.0 ~ 1.5	3:1、2:1、1:1、 0.8:1、0.5:1	注入率 $\leq 1 \text{ L/min}$ ， 持续 30 min
中等透水层 ($5 \text{ Lu} < q < 30 \text{ Lu}$)	中风化砂岩、 裂隙发育段	3 ~ 5	1.5 ~ 2.0	3:1、2:1、1:1、 0.8:1	注入率 $\leq 1 \text{ L/min}$ ， 持续 60 min
弱透水层 ($q \leq 5 \text{ Lu}$)	完整泥岩、微风 化砂岩段	5 ~ 8	2.0 ~ 2.5	2:1、1:1	注入率 $\leq 0.5 \text{ L/min}$ ， 持续 30 min

3.2 适配红层地层的灌浆施工工艺优化技术

针对四川红层地层特点，对帷幕灌浆全工序进行工艺优化，解决施工过程中的各类特殊工况，确保灌浆质量。钻孔施工采用地质钻机回转取芯钻进，针对泥岩段采用干钻或低转速、小给进量钻进，减少清水对泥岩的浸泡，避免孔壁坍塌；钻孔完成后采用测斜仪检测孔斜，确保孔底偏差不大于 1/100 孔深，避免钻孔偏斜导致帷幕搭接失效。洗孔采用高压水脉动冲洗，冲洗压力为灌浆压力的 80%，冲洗至回水清澈为止，彻底清除孔内岩粉与裂隙内的充填物，确保浆液与岩体裂隙有效黏结^[4]。

3 帷幕灌浆关键施工技术及防渗效果分析

3.1 前期勘察与灌浆参数精细化设计技术

前期勘察与参数设计是帷幕灌浆施工的前提，需结合四川红层地层特征，通过先导孔勘察精细化划分地层，优化灌浆设计参数，从源头保障防渗效果。首先，沿坝轴线每 20 m 布置一个先导孔，采用取芯钻进，详细查明坝基岩体的岩性分布、裂隙发育情况、透水率、地下水位与承压水头等核心参数，将坝基岩体划分为强透水层、中等透水层、弱透水层与相对隔水层，针对不同地层制定差异化的灌浆方案。

帷幕灌浆防渗控制的核心指标为岩体透水率，其计算公式为：

$$q = \frac{Q}{p \cdot L} \quad (1)$$

式 (1) 中： q 为岩体透水率，单位 Lu； Q 为压水试验稳定流量，单位 L/min； P 为试验段压水压力，单位 MPa； L 为试验段长度，单位 m。

基于公式与先导孔勘察结果，优化灌浆设计核心参数，针对不同透水性地层确定灌浆压力、浆液配比、灌浆段长等关键参数，具体设计参数见表 1。同时，采用分序加密的灌浆原则，将灌浆孔分为 I 序、II 序、III 序，依次施工，通过先序孔灌浆填充大裂隙，逐步提升地层密实度，控制后序孔浆液扩散范围，确保帷幕连续均匀。

灌浆施工采用自上而下分段卡塞灌浆法，每段灌浆完成后待凝 24 h，再进行下一段钻孔与灌浆，避免承压水顶托导致浆液流失。针对施工过程中常见的漏浆、串浆、冒浆等特殊工况，制定专项处理措施，具体见表 2。

3.3 全流程施工质量管控技术

针对帷幕灌浆隐蔽工程的特点，构建“事前控制—事中管控—事后验收”的全流程质量管控体系，确保施工全过程质量可控。

在事前控制方面，开工前开展灌浆试验段施工，

表 2 帷幕灌浆施工常见特殊工况处理措施

特殊工况类型	诱因	针对性处理措施
大面积漏浆	裂隙连通性好、溶蚀裂隙发育	降低灌浆压力，采用浓浆、间歇灌浆；漏浆严重时掺入速凝剂、砂料，待凝后复灌
跨孔串浆	岩体裂隙连通性好，浆液扩散至相邻钻孔	串浆孔为未灌浆孔，封堵孔口待灌；串浆孔为已灌浆孔，待凝后扫孔复灌
孔口冒浆	表层岩体裂隙发育、灌浆压力过大	降低灌浆压力，采用低压浓浆，孔口封堵待凝，间歇式灌浆
孔壁坍塌	泥岩遇水软化崩解	缩短灌浆段长，采用跟管钻进，坍塌段灌注水泥砂浆待凝后，重新扫孔钻进
浆液倒灌	高承压水顶托	提高灌浆初始压力，采用浓浆灌注，待凝后复灌，确保浆液有效填充裂隙

验证灌浆参数与工艺的适配性，优化施工方案；对水泥、外加剂等原材料进行进场复检，确保原材料质量符合规范要求；对一线作业人员开展技术交底与专业培训，明确施工工艺与质量标准，提升作业人员专业水平。

在事中管控方面，建立“班组自检、项目部复检、监理抽检”的三级质量管理体系，每道工序完成后，必须经检验合格后方可进入下一道工序；灌浆施工全过程实行旁站监理，实时监控灌浆压力、注入率、浆液水灰比等关键参数，详细记录灌浆全过程数据，确保施工过程可追溯；严禁擅自调整灌浆参数、缩短灌浆时间、违规结束灌浆等行为，对不合格的灌浆段，必须扫孔复灌，直至合格。

在事后验收方面，每序孔灌浆完成后，对灌浆资料进行全面整理分析，针对灌浆量异常、压水试验不合格的孔段，加密布置检查孔，开展补充灌浆；雨季施工时，制定专项施工方案，做好钻孔与灌浆孔的防雨封堵，避免雨水进入孔内浸泡泥岩，同时根据地下水位变化动态调整灌浆压力，确保灌浆质量^[5]。

3.4 防渗效果检测与分析

本项目帷幕灌浆施工完成后，采用检查孔压水试验、坝基渗流量监测、钻孔取芯检测三种方式，全面评价防渗效果。首先，按照规范要求，沿坝轴线共布置 42 个检查孔，检查孔数量为总灌浆孔数的 10%，重点布置在灌浆量异常、透水率大的坝段，检查孔压水试验结果显示，所有检查孔段岩体透水率均≤ 5 Lu，合格率 100%，远优于试验段 72% 的合格率，满足设计防渗标准。

钻孔取芯检测结果显示，岩体裂隙内水泥结石填充饱满，结石与岩体黏结紧密，泥岩段无软化崩解现象，岩体完整性显著提升，形成了连续、均匀的防渗帷幕。

坝体蓄水后，通过坝基渗压计与量水堰持续监测，

坝基总渗流量为 0.82 L/s，远小于设计允许值 5 L/s，坝基渗压系数小于 0.3，防渗效果显著。对比施工前后，坝基岩体平均透水率从 32.6 Lu 降至 2.1 Lu，降幅达 93.6%，验证了本次优化后的帷幕灌浆施工技术的有效性，可有效解决四川红层地层坝基渗漏问题。

4 结束语

本文结合四川地区某中型水库工程实例，针对红层软硬互层岩体的工程特性，系统剖析了水利工程帷幕灌浆施工的核心技术难点，构建了涵盖勘察设计、工艺优化、质量管控、效果验证的全流程施工技术体系，针对性解决了红层地层可灌性差异大、特殊工况频发、质量管控难等问题。工程应用结果表明，该技术体系可有效降低坝基岩体透水率，形成连续稳定的防渗帷幕，防渗效果满足设计要求。未来，可进一步结合物探检测技术，实现帷幕灌浆防渗效果的全域可视化评价，持续提升水利工程防渗处理的精细化水平。

参考文献：

[1] 张漪婷.帷幕灌浆施工技术在水工建筑工程施工中的应用研究[J].水上安全,2025(19):184-186.
[2] 杨晓旋.防渗加固目标下帷幕灌浆施工技术在水利工程中的应用[J].工程技术研究,2025,10(19):82-84.
[3] 张兴龙.水利水电工程施工阶段帷幕灌浆施工技术的应用研究[J].石河子科技,2025(05):42-43.
[4] 刘茜茜.水利工程施工中的防渗技术分析[J].工程技术研究,2025,10(18):62-64.
[5] 吴周.水利水电工程中的帷幕灌浆施工技术[J].科学技术创新,2025(17):149-152.