水库大坝除险加固中帷幕灌浆施工技术应用研究

朱慧平

（淄博市太河水库管理中心，山东 淄博 255178）

摘 要 针对水库大坝长期运行中坝基裂隙及接触带渗漏问题，本文围绕帷幕连续成幕和施工扰动控制，分析浆材选择、钻孔布置、分序分段灌浆、压力调控及质量检测，并结合工程资料评价加固效果。结果表明，同一库水位下坝后渗漏量由421.632 m^3/d降至130.464 m^3/d，降幅约69.1%，压力、注入率和抬动响应可用于识别异常孔段和浆液扩散状态。帷幕灌浆施工应根据地层差异动态调整参数，通过检查孔压水试验和运行期渗流监测衔接局部检测与整体评价，提高防渗帷幕连续性及加固可靠性。

关键词 水库大坝；除险加固；帷幕灌浆；防渗性能；孔位布置

中图分类号：TV543.5；TV698.23 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.018

0 引言

水库大坝长期受水压、岩体风化及水位反复涨落影响，坝基裂隙、接触带和原防渗设施薄弱部位可能逐步形成渗漏通道。渗流异常既造成水量损失，也可能增加局部扬压力和渗透破坏风险，因此，除险加固需要兼顾阻水与结构稳定。表面封堵难以覆盖深部裂隙，局部修补也可能留下绕渗通道；防渗墙等措施则受施工空间、地层及接头质量约束。钻孔注入水泥浆的帷幕灌浆技术能够处理坝基内部渗漏通道，已有大坝基础防渗工程采用该方法[1]。其应用难点在于隐蔽地层条件与灌浆响应不断变化，施工参数难以全线统一。围绕钻孔精度、浆液扩散、压力调整及检测反馈展开研究，分析连续成幕条件及施工前后效果的评价边界具有现实意义。

1 水库大坝除险加固中帷幕灌浆技术基础

1.1 帷幕灌浆技术原理

帷幕灌浆沿设计轴线布孔，利用孔内压力将浆液送入岩体裂隙与孔隙，浆液凝结后压缩有效过水断面，相邻孔段的处理范围衔接形成低渗透带。在灌浆压力作用下，浆液首先沿张开度较大、连通性较好的裂隙扩散，随后逐步进入次级裂隙，通过充填、挤压和胶结作用降低岩体透水性。随着灌浆孔分序加密，相邻孔段浆液扩散范围相互搭接，可逐步封闭主要渗流通道。浆液沿优势通道扩散，帷幕并非厚度均匀的实体墙，连续性主要取决于裂隙交切关系、孔间衔接及边界封闭条件。其作用是降低坝基渗透性、调整水头分布，为大坝稳定运行改善渗流条件。帷幕形成后可延长坝基渗流路径，减小局部水力梯度，使坝基渗流状态由集中通道向相对均匀分布转变，从而削弱异常渗漏及局部扬压力的不利影响。对于坝体和坝基同时渗漏的砌石坝，垂直、水平补强灌浆可与坝基帷幕灌浆组合使用[2]。这类组合处理中，坝体修补承担砌体缺陷封闭，帷幕主要控制基础通道，二者接触部位仍是防渗连续性的控制位置。

1.2 帷幕灌浆施工材料与设备

水泥浆液是岩基灌浆的常用材料，选材需兼顾颗粒细度、稳定性及结石体耐久性。普通水泥适用于具备相应可灌性的裂隙，细裂隙宜通过试验判断超细水泥的适用性，不能仅靠稀释改善颗粒通行条件。水泥黏土浆液可调节浆液稳定性及结石体变形性能，适用于经试验确认的充填和防渗处理，但黏土掺量过大会影响强度与细裂隙可灌性。化学浆液可用于常规水泥难以进入的微细裂隙或特殊堵漏部位，选用时需核查凝胶时间、耐久性、地下水相容性及环境要求。

钻孔设备应满足地层适应性和轨迹控制要求，灌浆泵的压力、流量范围需覆盖试验确定的工况。制浆机、储浆桶和输浆管共同维持均匀供浆，压力检测设备与流量计用于识别孔段响应。自动记录系统同步保存时间、压力、注入率和浆液密度，传感器校准及管路密封直接影响数据可信度。

作者简介：朱慧平（1972-），男，本科，工程师，研究方向：水利工程。

1.3 帷幕灌浆施工主要技术参数

孔位布置与孔深决定防渗范围，孔距需适应裂隙方向及浆液扩散条件，帷幕底部和两岸端部应按设计与相对隔水地层或其他防渗构造可靠衔接。仅增加孔排或压力，仍可能因地层可灌性不匹配而无法形成有效帷幕，参数须经灌浆试验检验[3]。压力上限受覆盖厚度、岩体完整程度、结构约束和抬动响应控制；浆液配比则随吸浆变化调整，避免长时间稀浆灌注或过早加浓。灌浆顺序一般采用分序加密，结束条件同时考虑规定压力、注入率及稳定延续时间。具体控制值依据《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》（SL/T 62-2020）、设计文件和现场试验确定，不将某工程的孔距、压力或透水率目标直接作为统一限值。

2 水库大坝除险加固中帷幕灌浆施工技术应用

2.1 施工准备与钻孔施工

施工准备阶段核对地质剖面、既有帷幕位置及历次渗漏记录，查明断层、强风化带、坝肩绕渗区和防渗构造接头。测量放样沿设计灌浆轴线进行，孔号、坐标、孔口高程和倾角共同构成钻孔定位依据。施工平台须保持稳定，钻机安装后复核钻杆方向，避免基础松动使开孔位置与深部轨迹产生偏离。穿越土坝填筑体进入基岩时，护壁、隔离及钻进工法需兼顾坝体安全，防止钻孔供水造成冲蚀或串通。

钻进过程结合进尺、岩芯、返水和漏水情况识别地层变化，遇破碎、塌孔或突发漏失时调整钻进参数及护壁措施。先导孔取芯资料还应与原地质剖面对照，发现相对隔水层位置变化时重新核定终孔条件，防止按固定孔深收孔造成帷幕底部悬空。孔深通过钻具累计长度与终孔测量相互核对，孔斜分段检测，重点检查地层交界和软弱夹层附近。孔口定位合格并不保证深部孔距满足要求，倾斜累积可能扩大孔间空隙，使浆液处理区失去衔接。

孔壁和孔底清理以去除岩粉、沉渣及裂隙入口堵塞物为目的，冲洗压力与地层承受能力相匹配。回水澄清程度、沉积物变化和孔内通畅情况共同用于判断清理效果，软弱夹层采取适宜方式，避免过度冲洗扩大通道。清孔后及时进行孔段压水试验和灌浆，减少沉积物再次堵塞的影响。

2.2 灌浆施工工艺实施

灌浆分序与孔内分段分别控制平面加密和深度处理。Ⅰ序孔按较大间距先行施工，获取地层及吸浆特征，并处理主要通道；Ⅱ序孔插入其间，补充前序孔未覆盖区域；Ⅲ序孔继续加密，处理剩余透水通道。各序孔单位注入量及透水性变化是评价加密作用的线索，异常区域仍需结合检查孔结果决定补孔，完成三序施工不等于帷幕已经连续。

孔内分段方式由岩体稳定性、灌浆方法及试验结果确定。自上而下分段施工有利于先处理上部薄弱岩体，限制后续深段灌浆向浅部外逸；岩体条件适宜时，也可采用自下而上分段灌浆。接触段和断层带宜单独控制，段长过大容易使浆液集中进入某条大裂隙，掩盖同段其他部位的灌注不足。阻塞器位置应避开破碎孔壁，并检查密封效果。

浆液按质量比例计量，投料、搅拌和输送衔接进行，使用前检查密度、流动性、析水情况及存放时间。循环输浆过程中持续搅拌，过滤结块并检查管路，避免浓度变化及堵管造成压力突升。浆液由稀至浓的调整依据单位时间注入量和压力响应进行，不能单凭累计耗浆量机械换浆。

压力控制从试验确定的起始水平逐步进行。恒压下吸浆逐渐减少，可维持当前工况观察裂隙充填；吸浆突增而压力下降时，应排查外漏、串浆或通道扩展。压力升高同时出现抬动、裂缝或异常渗水，则需减压或暂停，并核查原因。循环式灌浆还需区分供浆量、回浆量和实际注入量，回浆管堵塞可能引起压力突升，流量计漂移也可能造成注入率误判。设备故障排除前，压力变化不宜直接解释为岩体充填状态改变。有效灌浆压力还受到地下水压力和管路损失影响，泵出口压力不能直接代表孔段压力。满足设计结束条件后进行闭浆、待凝及封孔，防止回流和孔道重新成为渗漏通道。

2.3 灌浆质量检测与问题处理

质量检查从孔段原始记录开始，核对钻进深度、分段位置、压力过程、浆液变换和异常处置，识别提前停灌、记录中断及压力异常。复杂地质条件下采用适应地层的帷幕灌浆技术能够实现基础防渗处理[4]，但局部岩性变化意味着全线平均耗浆量难以说明薄弱区质量，因此检测布置需兼顾代表性和异常位置。

检查孔宜覆盖断层、集中吸浆区、低吸浆异常区、帷幕端部及接头部位，在规定龄期后分段压水。透水率反映规定试验条件下岩体吸水特征，渗透系数则与采用的水力模型及边界条件有关，二者不能直接互换。压水试验前核验阻塞器密封和试段长度，记录稳定压力及流量，排除塞间漏水、管路漏水等影响。不同孔段比较时保持试验方法与统计口径一致，使低透水率确实对应目标岩段的渗透表现。结果评价同时核对各段透水率、合格段分布和帷幕完整性，避免整体平均值掩盖集中超标。

持续大量吸浆而压力难以建立时，应查明外逸方向，再选择加浓、限流、间歇灌浆或待凝复灌；细裂隙吸浆偏小但透水性仍高时，需排查孔壁堵塞、浆材不适及绕流。孔间串浆可根据连通范围封堵串浆孔或按批准工艺协同灌注。断层与裂隙集中区域经重复灌浆后仍异常时，可调整段长、浆材或补孔布置，处理后的检查孔复验与原异常孔段对应。封孔质量同样纳入检查，防止有效灌浆段合格而孔口、孔道留下缺陷。

3 帷幕灌浆施工效果分析与优化措施

3.1 防渗加固效果分析

罗田水库位于深圳市，是以供水为主、兼有防洪功能的水库，大坝采用均质土坝结构，基础风化岩及坝肩存在渗漏问题。其提标改造采用防渗墙配合坝基帷幕灌浆，相关灌浆工程于2023年10月至2024年1月实施。在库水位同为28.17 m时，坝后量水堰渗漏量由421.632 m^3/d降至130.464 m^3/d[5]。以施工前渗漏量为基数，根据原始数据复算，渗漏量减少291.168 m^3/d，降幅约69.1%。相同库水位提高了前后结果的可比性，该变化对应组合防渗措施的整体效果，未单独分解帷幕灌浆贡献。

局部检测与整体渗漏评价还存在不同尺度。该工程设计透水率目标为不大于5 Lu，而公开效果部分只给出抽检段透水率均小于10 Lu，后者不足以据此计算满足5 Lu目标的合格率。帷幕质量判断仍需逐段检测值及位置分布，不能以渗漏降幅替代局部验收。缺少同口径灌前、灌后渗透系数时，也不宜把渗漏量降幅换算成渗透系数降幅。稳定性评价应结合扬压力、坝体位移及下游渗流状态，确认防渗处理后未形成新的不利水头分布。

3.2 影响施工效果的主要因素

地质条件决定浆液迁移路径。宽大连通裂隙容易形成优先流动，局部耗浆增加却未必改善邻近细裂隙；充填裂隙则可能限制浆液进入，并在水压力变化后重新发生渗漏。岩性突变、强风化带与断层交切处，孔距和段长需要随地层变化调整。

施工参数之间存在制约关系。压力过低时浆液扩散不足，过高时可能引起水力劈裂和结构抬动；过稀浆液易析水，过浓浆液则可能在裂隙入口形成堵塞。分序施工间隔不当、邻孔相互干扰，也会改变浆液实际去向。

管理问题通常表现为参数变化未被完整记录、制浆与灌注衔接中断、异常处置后遗漏复验。自动记录仅能保存设备采集信息，孔段编码、浆液批次和现场异常仍需准确关联，否则压力曲线难以对应真实施工部位。

3.3 帷幕灌浆施工优化策略

优化应以满足防渗目标和结构安全约束为前提，将孔距、段长、浆液配比及压力过程作为可调整变量，同时考虑耗材、工期和补灌工作量。试验段可选择地质相近的部位比较不同配置，先排除出现抬动或透水性不满足要求的方案，再比较单位处理长度的材料消耗与施工时间。

方案比较还需记录材料批次、设备状态、检测龄期和施工中断情况，地层条件差异较大时进行分区评价，避免将部位差异归因于参数改进。

孔位调整重点关注帷幕端部、构造接头和残余透水通道，结合实测轨迹判断补孔位置，避免全线等量加密。浆液性能控制由单一配比检查扩展至制浆、输送和入孔状态检查，使入孔浆液与试验配方保持一致。

压力动态调整宜以孔段为单元，同步比较压力、注入率和抬动变化，在试验确认的安全范围内分级升压，异常时先判断通道变化再调整浆液。全过程检测则将钻孔资料、灌浆记录、检查孔结果和运行监测按空间位置关联。局部超标得到处理后复验，运行阶段在可比库水位下持续观察渗漏量及扬压力，识别帷幕端部绕渗和防渗设施接头变化。

4 结束语

帷幕灌浆通过充填坝基裂隙、减少有效渗流通道，能够成为水库大坝除险加固中的基础防渗措施。施工质量的控制重点是孔段处理范围有效衔接、浆液性能适应裂隙条件，以及压力过程兼顾扩散效果和结构承受能力。分序加密、孔斜控制与异常区复灌应由检测结果相互衔接，避免以耗浆量或工序完成数量判断加固质量。罗田水库同水位渗漏量的降低体现了组合防渗措施的应用效果，局部达标情况仍需逐段检测确认。将灌浆质量检查与运行渗流、变形监测结合，可为同类工程的参数调整和薄弱部位处理提供依据。

参考文献：

[1] 刘源.帷幕灌浆技术在大坝基础防渗工程中的应用[J].建设科技,2022(16):102-105.
[2] 杨志勇.溪口水库砌石拱坝渗漏原因分析及防渗加固处理[J].水利科技,2024(01):60-62.
[3] 杨绍良,李锡均,张绍平.水利工程帷幕灌浆误区之探讨[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S1):105-109.
[4] 周立忠,李绍平,杨永存.水利工程复杂地质条件下防渗帷幕灌浆施工技术[J].云南水力发电,2025,41(03):128-132.
[5] 高阳,黄贵,杨波.罗田水库提标改造工程坝基帷幕灌浆设计[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S1):18-22.