

面板堆石坝帷幕灌浆施工工艺优化与防渗效果研究

刘朝纲

长江水利水电开发集团(湖北)有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要: 本文聚焦面板堆石坝帷幕灌浆施工工艺优化、防渗效果进行研究, 对坝基和两岸岩体渗透控制里存在的诸如地质条件繁杂、灌浆参数适配欠佳、施工过程控制难度高、防渗效果评价缺乏系统性等问题加以剖析, 进而提出施工工艺优化途径。文章运用文献归纳、理论分析与施工技术研究相融合的方式, 涵盖面板堆石坝防渗模式、帷幕灌浆作用机理、施工难点、工艺优化、效果评价等方面予以阐述。研究表明, 帷幕灌浆质量与面板堆石坝坝基防渗能力、运行安全直接相关联, 要经由孔序优化、浆液配比控制、压力分级调整、过程监测和质量检验闭环管理来提高施工成效。结论表明, 建立精细化、动态化、全过程管控的帷幕灌浆施工模式, 利于增强坝基防渗性能, 降低渗流风险, 保障面板堆石坝长期安全运行。

关键词: 面板堆石坝; 帷幕灌浆; 施工工艺; 防渗效果; 质量控制

Optimization of Curtain Grouting Construction Process and Seepage Control Effect of Faced Rockfill Dams

Liu Chaogang

Yangtze River Water Resources and Hydropower Development Group (Hubei) Co., Ltd., China Hubei Wuhan 430000

Abstract: This article focuses on the optimization of the curtain grouting construction process and the seepage control effect of faced rockfill dams. It analyzes issues existing in seepage control of dam foundation and abutment rock masses, such as complex geological conditions, poor adaptation of grouting parameters, difficulty in controlling the construction process, and a lack of systematic evaluation of seepage control effects, and then proposes ways to optimize the construction process. The paper combines literature review, theoretical analysis, and construction technology research to explain aspects such as seepage control patterns of faced rockfill dams, the mechanism of curtain grouting, construction difficulties, process optimization, and effect evaluation. The study shows that the quality of curtain grouting is directly related to the foundation seepage control capability and operational safety of faced rockfill dams. To improve construction results, it is necessary to optimize hole sequences, control slurry mix ratios, adjust pressure by levels, monitor processes, and implement closed-loop quality inspection management. The conclusion indicates that establishing a refined, dynamic, and full-process management mode for curtain grouting construction helps enhance the foundation's seepage control performance, reduce seepage risks, and ensure long-term safe operation of faced rockfill dams.

Keywords: Faced rockfill dam; Curtain grouting; Construction process; Seepage control effect; Quality control

0 引言

面板堆石坝具备适应地形能力较强、施工效率相对较高、材料利用比较充分等特性, 在水利水电工程项目里得到广泛应用。它的防渗模式一般是由混凝土面板、趾板、坝基防渗帷幕、接缝止水等部分共同建立而成, 其中帷幕灌浆是把控坝基和岸坡渗流的关键举措。若灌浆施工质量欠缺, 就可能产生渗漏通道、渗透变形、坝体运行方面的隐患。现阶段国内帷幕灌浆研究多聚焦单一工艺参数优化, 多依靠完工压水试验开展质量判定, 缺少结合地质分区的动态参数调控机制, 且施工期检测与大坝蓄水运行期渗流

监测未形成一体化评价体系, 难以实现隐蔽灌浆工程全周期质量管控。基于此, 本文从帷幕灌浆现场施工难点切入, 梳理工艺优化核心原则, 提出可落地的钻孔、浆液、压力及异常工况处置优化方案, 并建立多指标综合防渗效果评价体系。所以, 对帷幕灌浆施工工艺展开优化、对防渗效果予以评价, 对于提高面板堆石坝施工质量、运行安全得到重要价值。

1 面板堆石坝帷幕灌浆施工的基本认识

1.1 面板堆石坝防渗体系的构成

面板堆石坝的防渗模式是一个整模式统, 由坝体上游

混凝土面板、趾板、周边缝止水、坝基帷幕灌浆、必要的排水反滤结构共同构成。混凝土面板主要负责坝体上游的防渗功能,趾板是连接面板与坝基防渗模式的关键所在,帷幕灌浆能够通过坝基岩体裂隙和透水带条件进行改善,形成连续或者相对连续的地下防渗屏障。面板堆石坝以堆石体作为主要支承结构,不过其安全运行不但取决于堆石体压实质量,还取决于防渗模式的完整性。若坝基存在断层、裂隙发育带、岩溶通道或者强透水层,虽然面板结构比较完整,依然有可能出现坝基渗漏问题。帷幕灌浆在面板堆石坝防渗模式里得到基础性作用。

1.2 帷幕灌浆的作用机理

帷幕灌浆这项施工技术,是借助钻孔的方式,朝着坝基岩体的裂隙、孔隙、破碎带其中压入水泥浆液或者其他浆材。在一定压力的作用之下,浆液会扩散、充填、胶结、固化,进而降低岩体的透水性,提高其整体性,同时改善抗渗能力。它的作用并非仅仅是将浆液注入地下那么简单,而是要通过浆液与岩体结构面之间产生的相互作用,去封堵渗流通道,对坝基渗流场加以改善。灌浆效果会受到诸多因素的影响,像岩体裂隙开度、连通性、地下水条件、浆液性能、灌浆压力、孔距、段长、施工顺序等。对于面板堆石坝来讲,帷幕灌浆一般布置在趾板或者防渗轴线附近,需要与上部面板防渗结构形成可靠的衔接。唯有帷幕具备足够的深度、厚度、连续性,才能够切实减少坝基渗漏。

2 面板堆石坝帷幕灌浆施工面临的主要问题

2.1 坝基地质条件复杂影响灌浆适应性

面板堆石坝大多建造在峡谷、山地或者河床覆盖层比较复杂区域,这里坝基、两岸的岩体条件差异比较大。有的区域岩体完整性良好,透水性较弱,有的区域裂隙发育,卸荷现象明显,或者存在软弱夹层,透水性较强。地质条件的不均匀使应灌浆施工难以采用完全一样的参数。若孔距过大,强透水裂隙或许无法应到充分封堵,若压力过高,可能会引发岩体劈裂、串浆或者地表冒浆,若浆液过稀,很难形成有效的结石体,若浆液过稠,又可能会影响扩散范围。坝基地下水的活动也会对浆液的稳定和凝结产生影响。地质复杂性决定了帷幕灌浆必须坚持分区控制、动态调整,不能机械地套用固定工艺。

2.2 灌浆参数控制难度较大

帷幕灌浆施工参数包括孔距、孔深、孔序、段长、灌浆压力、浆液水灰比、变浆标准、结束标准、复灌要求等方面。这些参数彼此关联,一同对灌浆质量起着决定性作

用。在实际施工过程中,若灌浆压力过小,那么浆液进入深部裂隙的能力就会不足,若压力过大,就可能引发抬动变形、浆液失控扩散的情况。浆液水灰比若变化不合理,有可能致使浆液沉淀、析水或者充填能力欠缺。当段长设置过大时,对于判断不同深度岩体的吸浆特征是不利的,而段长过小的话,又会使施工时间增加,成本也会提高。若灌浆结束标准仅仅依据注入率下降,却忽略压力稳定、持续时间,就可能造成局部封堵不充分的问题。参数控制存在较大难度,这是影响帷幕灌浆效果的一个重要因素。

2.3 质量检测与防渗评价不够系统

帷幕灌浆质量评价一般要依据压水试验、钻孔检查、灌浆记录、单位注入量、运行期渗流监测等资料来进行综合判定。在部分施工管理其中,质量检测比较侧重完工后的检查孔压水结果,而对施工过程数据的分析不够充分。若仅在局部区域布置检查孔,或许很难全面展现帷幕的连续性,若缺乏对灌浆压力、注入量、变浆过程、异常情况的统计分析,同样不利于找出潜在的薄弱区域。防渗效果评价还应当结合蓄水后的渗压、渗流量、扬压力、水位变化来做长期判断。帷幕灌浆属于隐蔽工程,质量评价必须从单一指标转向多指标综合分析。检测与评价缺乏系统性,容易致使施工质量判断出现片面化的情况。

3 面板堆石坝帷幕灌浆施工工艺优化原则

国内帷幕灌浆研究已由经验控制逐步转向“地质分析—生产性试验—参数调整—效果验证”的全过程控制,工程实践尤其重视压水试验、分序加密和灌浆压力的动态调整;国外以美国陆军工程兵团、美国垦务局的技术体系为代表,更强调依据钻探、压水试验和灌浆响应持续修正孔距、压力及浆液参数,并要求地质人员和施工技术人员对灌浆资料连续评价。因此,面板堆石坝帷幕灌浆工艺优化不能采用统一参数,而应建立以地质条件为基础、量化指标为约束的动态控制体系。

3.1 坚持地质条件与工艺参数匹配原则

施工前应综合勘察资料、试验孔、压水试验和钻孔揭露成果,对岩体完整程度、裂隙连通性及透水率进行分区。依据《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》SL 62—2014,透水率小于 5 Lu 为相对隔水层控制标准,帷幕底线需伸入相对隔水层 2~3 m,可为坝基帷幕深度确定提供量化参考。对岩体完整、透水率达到设计控制要求的区域,可保持设计孔距和常规压力;当出现断层破碎带、强透水裂隙或压水试验结果明显超过设计值时,则应通过缩小孔距、增加排数、调整段长及复灌等方式处理。参数并非一次确

定，而应根据先序孔单位注入量、压力—流量变化及透水率结果进行修正。

3.2 坚持分序加密与量化封堵原则

帷幕灌浆宜按照Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序孔逐步加密，通过先序孔判断岩体可灌性，再利用后序孔验证浆液扩散范围和帷幕连续性。孔距可将1.5~3.0 m作为初步设计参考，破碎、裂隙发育区域可由单排调整为双排，但具体数值必须通过生产性试验确定。灌浆过程应以压力和注入率共同控制，当某级浆液注入量达到约300 L或持续30 min而压力、注入率变化不明显时，可考虑提高浆液浓度；注入率超过30 L/min时，则应重点排查集中渗漏通道，并采取限量、间歇、待凝或复灌措施。

3.3 坚持过程控制与效果检验并重原则

施工质量控制应覆盖孔位、孔斜、冲洗、压水、浆液制备、压力、注入率及异常处理等环节，并利用自动记录设备形成压力—注入率—累计注入量曲线。国外工程技术资料同样强调利用连续测试和监测资料评价帷幕及坝基渗流状态。完工后应以检查孔压水试验为核心，结合钻孔取芯、灌浆资料及运行期渗流监测综合判定，形成“施工控制—检查验证—局部补灌”的闭环。

4 面板堆石坝帷幕灌浆施工工艺优化路径

4.1 优化钻孔布置与孔序控制

钻孔应沿趾板防渗轴线连续布置，重点控制坝肩、断层、强风化带及高透水区。常规区可将孔距控制在1.5~3.0 m范围内进行试验优化，破碎区域宜采取缩小孔距或增设第二排帷幕的方法。钻进过程中同步绘制孔深—岩性—透水率剖面图，并比较Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序孔单位注入量。当后序孔单位注入量明显降低且检查孔透水率达到设计标准时，可判断加密效果基本满足要求。水布垭面板堆石坝基础灌浆试验中，趾板基础帷幕灌浆最大压力达到1.5 MPa，说明高坝工程的实际压力需要通过现场灌浆试验确定，而不能直接套用固定经验值。

表1 帷幕灌浆主要工艺参数优化参考

控制项目	建议控制指标	调整依据
帷幕孔距	1.5~3.0 m	裂隙发育时适当加密
相对隔水层	<5 Lu	不满足时增加帷幕深度
表层参考压力	0.2~0.5 MPa	以不产生抬动为前提
孔底参考压力	0.4~0.8 MPa	经生产性试验修正
浆液调整	300 L或30 min响应不明显时变浓	结合压力、注入率判断
结束控制	≤1 L/min后屏浆约30 min	最终执行设计及试验标准

注：本表为通用工程参考参数，所有指标均需结合现场地

质条件、生产性灌浆试验修正；中高面板堆石坝深部帷幕灌浆压力可经专项试验提高，全程以不发生基岩抬动、趾板变形为控制底线。

表中孔距、压力及透水率属于工艺设计参考值，不能替代具体工程的生产性试验。相关导则明确提出表层段、孔底段压力应结合试验确定，并以不引起岩体抬动为基本控制条件。

4.2 优化浆液配比与灌浆压力控制

浆液控制应由“固定水灰比”转为根据注入率动态变浆。初期可采用较稀浆液提高裂隙扩散能力，随着注入率降低逐级加浓，封孔阶段可采用水灰比0.5左右的新鲜水泥浆液。压力则采用分级升压模式，表层宜从较低压力开始，深部根据盖重和岩体条件逐步提高，并同步监测趾板或基岩抬动。施工中应重点分析压力P、注入率Q和累计注入量V三项指标，当P持续上升而Q逐渐下降时说明裂隙正在封堵；若P长期不上升而Q持续偏大，则表明可能存在开放裂隙或集中渗漏通道，应及时转换处理方案。常规灌浆浆液由稀至浓梯度采用8:1、5:1、3:1、2:1、1:1、0.5:1；初始灌注选用稀浆液提升裂隙扩散范围，随注入率持续下降逐级加浓浆液，封孔阶段统一采用0.5:1浓水泥浆，保障孔道充填密实。

4.3 优化异常处理与动态调整机制

针对大吸浆、串浆、冒浆、塌孔和压力异常，应建立量化判别与处置机制。大吸浆段可依据注入率、累计注入量和压力增长情况采取浓浆、限量、间歇待凝及复灌；串浆时应记录串浆孔距离和发生压力，据此判断裂隙连通方向，并采用封堵与分孔灌注措施；出现冒浆或趾板抬动趋势时应立即降低压力或暂停灌浆。灌浆结束不宜单纯以时间确定，可采用“达到最大设计压力后注入率不大于1 L/min并稳定约30 min”等指标进行综合判断。通过将钻孔资料、压水试验、压力—流量曲线和检查孔成果实时反馈至施工参数，可使帷幕灌浆由经验施工转变为数据驱动的动态优化，从而提高面板堆石坝坝基防渗帷幕的连续性与可靠性。

处置细则：

- (1) 大吸浆段：注入率持续大于30 L/min、累计注入量超300 L仍无升压趋势，采用浓浆灌注、限量间歇灌浆、待凝复灌；
- (2) 串浆：记录串浆孔距、串浆发生压力，对串浆孔封堵后分段单独灌注；
- (3) 地表/趾板冒浆、岩体抬动：立即降压或暂停灌

浆,采取嵌缝封堵、间歇灌注措施;

(4) 塌孔:提前加大钻孔冲洗力度,破碎段采用护壁浆液钻进。

5 面板堆石坝帷幕灌浆防渗效果评价与质量保障

5.1 建立多指标防渗效果评价体系

评价面板堆石坝帷幕灌浆防渗效果时,要综合考虑透水率、单位注入量、灌浆压力、检查孔结果、渗流量、渗压变化、运行监测资料等诸多方面。压水试验是评价岩体透水性改善情况的重要手段,可体现灌浆前后岩体渗透能力的变化。单位注入量能反映裂隙充填程度和地层吸浆特征。检查孔结果可验证帷幕质量是否符合设计要求。施工期评价指标:压水试验透水率、各序孔单位注入量、灌浆 $P-Q-V$ 曲线、检查孔取芯结石完整性。运行期渗流监测能检验防渗模式在蓄水条件下的实际运行表现。运行期监测指标:坝基渗流量、扬压力、渗压计数据、排水水质、面板及趾板变形量。

5.2 强化施工资料管理与质量追溯

帷幕灌浆属于那种典型隐蔽工程,其施工资料对于质量追溯、效果评价来说是至关重要的依据。在施工的时候要把孔位、孔深、孔斜、岩芯的具体情况、压水试验的结果、浆液的配比、灌浆的压力、注入量、变浆的过程、结束的时间、出现的异常情况、处理措施都完整地记录下来。资料记录必须应真实、准确而且还应及时,绝对不可在事后补填或者进行笼统的描述。借助对施工资料的分析,能够判断帷幕形成的过程是不是符合设计要求,同时也能够给后续的补强、运行维护提供相应依据。当前水利工程已推行灌浆数据数字化存档,采用自动灌浆记录仪采集全过程数据,资料云端存储,实现灌浆质量全流程可追溯,为后期补强、大坝运维提供数据支撑。

5.3 完善运行监测与后期维护机制

帷幕灌浆防渗效果的检验,施工期固然需要进行,而大坝运行期也需持续观察。面板堆石坝蓄水之后,需依据渗流量、渗压、扬压力、坝体变形、面板接缝状态、排水系统运行情况等监测资料,来综合判断防渗模式的运行效果。若出现局部渗流量异常增多、渗压变化不符合规律或

者排水浑浊等现象,要及时剖析原因,判断是否和帷幕薄弱区、面板接缝、趾板连接或者坝基结构面相关。蓄水后若出现渗流量突增、排水浑浊、渗压异常波动,需加密布设检查孔复核帷幕完整性,针对薄弱区域采用低压复灌、增设补强帷幕孔等防渗处理措施。

6 结语

帷幕灌浆是面板堆石坝坝基与岸坡渗控核心工程,施工质量受地质条件、钻孔布置、孔序方案、浆液配比、灌浆压力、异常处置及质量检测多因素共同制约。鉴于帷幕灌浆隐蔽性、地质条件差异性突出,仅依靠施工经验或单一压水指标无法全面评判防渗效果。本文遵循地质参数匹配、分序加密封堵、过程管控与效果检验并重三大原则,从钻孔布设、浆液动态调配、分级升压、异常工况处置四个维度优化施工工艺,建立覆盖施工期、蓄水运行期的多指标综合防渗评价体系,同步完善施工资料数字化管理与大坝长期监测运维机制。研究成果可有效提升坝基防渗帷幕连续性,降低长期渗流安全风险,为峡谷地区面板堆石坝帷幕灌浆精细化施工提供理论与实操参考。后续可结合渗流场数值模拟技术,量化长期蓄水工况下帷幕防渗性能衰减规律,进一步完善帷幕长效运维补强技术体系。

参考文献:

- [1] 水利部. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范: SL 62—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [2] 国家能源局. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范: DL/T 5148—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 水利部. 混凝土面板堆石坝设计规范: SL 228—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [4] 朱伯芳. 混凝土坝设计理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [5] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

作者简介: 刘朝纲(1983.01.06), 男, 汉族, 湖北省大悟县, 本科, 长江水利水电开发集团(湖北)有限公司, 中级, 研究方向: 面板堆石坝坝基帷幕灌浆防渗效果数值模拟与渗流反演分析。