

高喷灌浆技术在水库坝体坝基防渗中的关键参数控制研究

李 伟

奎屯第七师勘测设计研究院有限公司 新疆 奎屯 833200

摘 要: 水库坝体坝基防渗工程中, 精准控制防渗技术关键参数十分关键, 本文研究高喷灌浆技术在水库坝体坝基防渗中的关键参数控制。分析防渗机制、技术适配性, 阐述核心施工参数作用机理与控制边界, 提出精准控制方法与调控体系, 介绍过程保障技术, 包括参数匹配性检测、现场验证、异常工况应对及多工序衔接保障措施, 为提升防渗效果与工程可靠性提供依据。

关键词: 高喷灌浆技术; 水库坝体坝基; 关键参数控制; 防渗效果; 施工参数

引言: 水库坝体坝基防渗是保障水库安全的关键。高喷灌浆技术凭借灵活性和有效性, 成为常用防渗手段。但不同地质条件对参数要求差异大, 参数控制不当会影响防渗效果。因此, 深入研究高喷灌浆技术关键参数控制, 对提升水库防渗质量、保障工程安全意义重大。

1 高喷灌浆防渗作用机制与技术适配性分析

1.1 高喷灌浆成墙防渗的力学与渗流原理

高喷灌浆成墙防渗背后蕴含着复杂且精妙的力学与渗流原理。在高压喷射流的作用下, 浆液与周围土体充分混合搅拌, 形成具有一定强度和防渗性能的板墙结构^[1]。从力学角度看, 浆液与土体混合后, 内部颗粒间相互嵌锁、胶结, 形成紧密的整体, 能够承受来自坝体和水压力的作用, 有效抵抗变形和破坏。在渗流方面, 板墙结构改变了原有土体的孔隙结构, 大大降低了渗透系数, 阻止水流通过, 从而实现防渗目的。

1.2 坝体坝基介质特性对高喷灌浆工艺的影响路径

坝体坝基介质特性直接影响高喷灌浆的施工效果。砂性土层因颗粒间黏聚力弱, 射流易穿透并形成较大冲切范围, 但浆液流失风险较高, 需通过降低提升速度或增加浆液黏度控制扩散半径。黏性土层因抗冲切能力强, 射流能量消耗快, 需提高喷射压力或延长喷射时间确保成墙深度。岩层或硬土层中, 射流难以直接破碎基质, 需结合潜孔锤等辅助手段预先造孔, 再通过高压喷射完成浆土混合。介质渗透性对浆液扩散范围起决定性作用, 高渗透地层需采用速凝型浆液减少流失, 低渗透地层则需优化喷射参数确保浆液充分填充。

1.3 高喷灌浆技术与水库坝体坝基防渗需求的适配逻辑

高喷灌浆技术通过灵活调整参数满足不同防渗需求。对于坝体接缝或裂缝渗漏, 可采用定向喷射形成局部防

渗体; 对于大面积坝基渗漏, 则通过多孔布置构建连续防渗帷幕。技术适配性体现在对地质条件的包容性, 无论是均质土坝、堆石坝还是混凝土坝, 均可通过调整喷射压力、浆液配比等参数实现有效防渗。在深层渗漏治理中, 高喷灌浆可与其他技术(如帷幕灌浆)结合, 形成多道防线, 提升整体防渗可靠性。

1.4 高喷灌浆防渗结构的力学稳定性与渗流控制关联性

防渗结构的力学稳定性是渗流控制的基础。固结体需具备足够抗剪强度以承受坝体自重及水压力, 避免因变形导致防渗层断裂。渗流控制效果则通过降低水力梯度减少对结构的冲刷作用, 形成良性循环。两者关联性体现在: 力学稳定性不足会引发结构开裂, 削弱渗流控制能力; 渗流控制失效会导致水压力集中, 进一步威胁结构安全。因此, 设计时需统筹考虑强度与渗透性, 通过优化浆液配比及施工参数实现双重目标。

2 高喷灌浆核心施工参数的作用机理与控制边界

2.1 喷射参数的独立作用机制

喷射参数中, 压力是冲切土体的核心动力, 直接影响射流穿透深度与范围。高压水射流破坏土体结构, 压力值需根据地层强度动态调整, 软土层可适当降低压力避免过度冲刷, 硬土层则需提高压力确保有效破碎。流量与压力协同作用控制浆液输送量, 流量不足导致浆液填充不充分, 流量过大则可能引发浆液流失^[2]。提升速度决定防渗墙厚度与连续性, 速度过快易造成墙体薄厚不均, 速度过慢则增加施工成本与工期。旋转速度通过改变射流轨迹影响固结体形状, 低速旋转形成圆柱状墙体, 高速旋转可扩大覆盖范围, 适用于复杂地层防渗。不同类型坝体坝基地层对应的喷射参数参考范围, 如表1所示。

表1

地层类型	喷射压力 (MPa)	浆液流量 (L/min)	提升速度 (cm/min)	旋转速度 (r/min)
细砂层	20-25	80-100	8-12	10-15

续表:

地层类型	喷射压力 (MPa)	浆液流量 (L/min)	提升速度 (cm/min)	旋转速度 (r/min)
中粗砂层	25-30	100-120	12-15	15-20
粉质黏土层	30-35	120-140	5-8	8-12
黏土夹碎石层	35-40	140-160	3-5	5-8
风化岩层	40-45	160-180	2-4	4-6

2.2 浆材参数对防渗性能的影响规律

浆材类型是防渗性能的基础,水泥基浆材因成本低、适用性广被广泛采用,化学浆材则用于特殊地层或快速凝结需求。水灰比直接影响浆液流动性与固结强度,低水灰比浆液黏度高、凝结快,但易堵塞喷射管;高水灰比浆液扩散性好,但固结强度低,需通过外加剂调节性能。凝结时间需与施工进度匹配,过早凝结导致喷射中断,过晚凝结则延长工期并增加渗漏风险。固结强度是防渗墙耐久性的关键,需通过优化浆材配比与养护条件提升,确保墙体在长期水压力作用下保持稳定。

2.3 孔位参数与防渗墙连续性的关联逻辑

孔距与排距决定防渗墙的搭接效果,孔距过大会形成渗漏通道,孔距过小则增加施工量与成本。排距需根据地层渗透性调整,高渗透地层需缩小排距以增强阻断效果。孔深需穿透渗漏层并进入相对不透水层,确保防渗墙底部封闭性。倾斜角度影响墙体垂直度,过大倾斜会导致搭接不严密,需通过导向装置控制钻孔精度。孔位参数的合理组合是构建连续防渗体系的前提,需通过地质勘察与数值模拟优化设计。

2.4 核心参数耦合效应及控制边界确定方法

喷射参数、浆材参数与孔位参数间存在显著耦合关系。压力与流量需匹配地层吸收能力,提升速度与旋转速度需协调以确保墙体均匀性,水灰比与凝结时间需适应施工环境温度。参数控制边界的确定需通过试验段施工验证,结合地质条件、设备性能与防渗目标,采用正交试验法分析参数敏感性,建立多目标优化模型。施工中需实时监测参数变化,通过反馈调整机制确保各参数在控制边界内运行,最终实现防渗效果与经济性的平衡。

3 高喷灌浆关键参数的精准控制方法与调控体系

3.1 基于坝体坝基介质特性的参数预设方法

坝体坝基介质特性是参数预设定的核心依据。针对砂性土层,需根据颗粒级配与渗透系数调整喷射压力与浆液黏度,细砂层宜采用高压低流量参数组合以控制浆液扩散范围,粗砂层则需提高浆液稠度减少流失。黏性土层因抗冲切能力强,需通过延长喷射时间或增加旋转速度确保成墙深度,同时降低水灰比提升固结强度^[3]。岩层或硬土层中,需结合地质勘察数据预先确定破碎带位置,

针对性调整喷射角度与能量输出,避免能量浪费。参数预设定需通过地层分类与数值模拟建立量化模型,将介质物理力学指标转化为可操作的施工参数,为后续动态调控提供基准。

3.2 施工过程中参数实时监测与动态调控技术

施工参数实时监测是保障防渗质量的关键环节。通过在喷射管上安装压力传感器、流量计与位移传感器,可实时获取压力、流量、提升速度等核心数据,结合无线传输技术将数据反馈至控制终端。当监测值偏离预设范围时,系统自动触发预警机制,并通过变频控制技术调整高压泵、空压机等设备运行状态,实现参数动态修正。例如,压力骤降可能由地层突变或设备故障引起,需立即暂停施工并检查喷射管堵塞情况;流量波动过大则需调整浆液配比或清洗输浆管道。动态调控需建立参数-效果反馈模型,通过迭代优化确保施工参数始终处于最佳控制区间。

3.3 复杂地质条件下参数优化调整的核心逻辑

复杂地质条件对参数适应性提出更高要求。在断层破碎带或溶洞发育区,需采用“先探后灌”策略,通过超前钻探明确地质缺陷位置,调整孔位布置避开高风险区域或增加加密孔。在软硬交替地层中,需分段设定喷射参数,软土段降低提升速度增强浆液填充,硬土段提高压力确保破碎效果。渗透性突变地层需根据渗透系数梯度动态调整浆液水灰比,高渗透段采用速凝型浆液减少流失,低渗透段延长凝结时间保证充分扩散。参数优化需以地质勘察数据为基础,结合施工监测反馈建立动态调整机制,通过多参数协同控制实现复杂地质条件下的防渗目标。

3.4 关键参数控制的标准化流程与操作规范框架

标准化流程是参数控制落地的保障。施工前需编制参数控制专项方案,明确介质特性分析、参数预设定、监测点布置等环节的技术要求。施工过程中执行“三检制”,即操作人员自检、班组长互检、质检员专检,确保参数执行符合规范。操作规范需细化至设备启停顺序、参数调整幅度、数据记录频次等细节,例如喷射管提升速度每分钟不得超过规定值,压力波动范围需控制在预设区间内。施工完成后需通过钻孔取芯、压水试验等手段验

证防渗效果,将实测数据与控制目标对比分析,为后续工程提供经验参考。标准化框架的建立可减少人为因素干扰,提升参数控制的系统性与可靠性。

4 高喷灌浆参数控制的过程保障技术

4.1 防渗结构形成中的参数匹配性检测技术

防渗结构形成需通过多维度检测确保参数匹配性。施工过程中,利用压力传感器实时监测喷射压力波动,结合流量计数据判断浆液输送稳定性,避免因压力不足导致冲切深度不够或浆液稀释。通过在喷射管上安装位移传感器,可精确记录提升速度与旋转速度,确保墙体厚度与均匀性符合设计要求^[4]。采用声波透射法或电阻率法对成墙质量进行无损检测,通过分析声波传播速度或电阻率变化,判断浆液填充密实度及是否存在缺陷。检测数据需与预设参数阈值对比,当偏差超过允许范围时,立即调整施工参数或进行局部补强,保障防渗结构完整性。

4.2 施工参数与坝体坝基介质适配性的现场验证方法

现场验证是参数适配性调整的关键环节。施工前,通过地质钻探获取坝体坝基介质样本,开展室内渗透试验与强度试验,明确介质渗透系数、抗剪强度等关键指标,为参数预设提供依据。施工中,在典型地层段设置试验孔,按预设参数完成高喷灌浆后,立即进行钻孔取芯,观察芯样完整性及浆土混合比例,结合压水试验测定防渗墙渗透系数。若试验结果与设计目标偏差较大,需分析介质非均质性或参数设定偏差原因,针对性调整喷射压力、浆液配比或孔距排距。验证过程需贯穿施工全周期,确保参数始终与地质条件动态匹配。

4.3 参数控制中异常工况的识别与应对技术

异常工况识别依赖实时监测数据与经验模型结合。当压力骤降、流量突变或提升速度异常时,系统自动触发预警,结合地质雷达扫描判断是否因地层突变(如遇孤石、空洞)或设备故障(如喷嘴堵塞、泵体泄漏)引发。针对不同工况,采取差异化应对措施。地层突变时暂停

施工,通过超前钻探明确障碍物位置后调整孔位或参数;设备故障时立即停机检修,更换备用部件并重新校准参数。建立异常工况数据库,通过机器学习算法优化预警阈值与应对策略,提升响应效率与准确性。

4.4 多工序衔接中参数一致性的保障措施

多工序衔接需通过标准化流程保障参数连续性。钻孔、下管、喷射、成墙等工序间设置参数复核环节。钻孔完成后需测量孔深、孔斜,确保符合设计要求后再下管;喷射前核对浆液配比、喷射压力等参数与前序工序记录一致性。采用信息化管理平台实时共享参数数据,各工序负责人通过移动终端确认参数执行情况,避免信息传递滞后导致偏差。建立工序交接责任制,明确参数偏差责任界定标准,通过绩效考核强化执行力度,确保防渗墙从钻孔到成墙全流程参数稳定可控。

结束语

高喷灌浆技术关键参数控制对水库坝体坝基防渗至关重要。通过研究参数作用机理、精准控制方法及过程保障技术,可有效提升防渗质量。施工中应严格遵循操作规范,加强参数监测与动态调控,及时应对异常工况,保障各工序参数一致,为水库安全稳定运行筑牢基础。

参考文献

- [1]唐恺,任菲,张峰.高压喷射灌浆与帷幕灌浆联合防渗技术在矿山酸水库防渗工程中的应用[J].现代矿业,2025,41(6):94-98.
- [2]明佑妍,肖晓光.高压摆喷灌浆结合下游坝脚增设压浸平台在水库除险加固工程中的应用[J].河南水利与南水北调,2025,54(1):51-53.
- [3]何金梅.水库坝体防渗处理中的高压旋喷灌浆施工管理研究[J].电脑采购,2023(17):108-110.
- [4]张初涑.无损物探和摆喷灌浆技术在杨坑水库中的应用[J].地下水,2023,45(3):267-269.