

劈裂灌浆技术在水库围堤工程防渗加固施工的应用

秦朝辉

河北省水利工程局集团有限公司第五分公司 河北 石家庄 050011

摘要：劈裂灌浆技术在水库围堤工程防渗加固施工中具有重要作用。该技术利用水力劈裂原理，通过钻孔、加压灌注泥浆形成新的防渗墙体，有效堵塞漏洞、裂缝，切断软层，提高坝体的防渗能力和密实度。同时，该技术还能调整坝体应力，增强坝体稳定性。施工时应严格控制灌浆参数，确保施工质量和效果。劈裂灌浆技术具有设备轻便、工艺简单、适应范围广等优点，在水库围堤工程防渗加固施工中展现出明显的优势和效果。

关键词：劈裂灌浆技术；水库围堤工程；防渗加固施工；应用

引言：水库围堤工程在防洪、蓄水等方面发挥着举足轻重的作用，然而，长期受水流侵蚀和地质变化影响，其防渗性能往往会逐渐下降，需采取有效的加固措施以确保安全。劈裂灌浆技术，作为一种先进的防渗加固方法，通过利用水力劈裂原理，高压注入浆液，能在坝体内部形成连续的防渗帷幕，显著提升围堤的防渗能力。本文将系统阐述劈裂灌浆技术在水库围堤工程中的应用，探讨其施工工艺、质量控制及优势，以为同类工程提供理论和实践指导。

1 劈裂灌浆技术概述

1.1 技术原理

劈裂灌浆技术是一种高效的水利工程防渗加固手段，其核心在于利用水力劈裂原理，通过施加灌浆压力，在坝体内部形成一道致密的防渗帷幕。该技术利用专门的灌浆设备，将高压浆液注入坝体预设的钻孔中。随着浆液压力的持续增大，坝体内部的土体结构在压力作用下发生劈裂，形成微小裂缝。这些裂缝成为浆液扩散的通道，浆液在裂缝中逐渐扩散并填充，最终固化成高强度的防渗帷幕，有效阻隔水流，提高坝体的整体防渗性能。

1.2 发展历程

劈裂灌浆技术起源于水利工程领域的不断探索与实践。早期，该技术在处理小型水利工程防渗问题时逐渐显现出其独特优势。随着技术的不断成熟和完善，劈裂灌浆技术逐渐在国内外的水利工程中得到广泛应用。在国内，劈裂灌浆技术已被成功应用于众多大型水利工程，如堤防加固、水库大坝防渗等，取得了显著成效。同时，该技术也在国际水利工程界引起了广泛关注，许多国家都在积极研究并应用这一技术，以解决水利工程中的防渗加固难题。

1.3 技术特点

劈裂灌浆技术具有显著的技术特点。首先，该技术施工简便，对施工设备和人员的要求相对较低，且施工过程中对坝体结构的干扰较小，有利于保护坝体的整体稳定性。其次，劈裂灌浆技术适应性强，可适用于不同类型的坝体结构和地质条件，且在不同水位条件下均能发挥良好的防渗加固效果。此外，该技术还具有成本相对较低、工期短的优势，能够显著降低工程成本，加快施工进度，提高工程效益。因此，劈裂灌浆技术在水利工程领域具有广泛的应用前景和重要的实践价值。

2 劈裂灌浆技术在水库围堤工程防渗加固施工中的应用

2.1 施工准备

施工准备是确保劈裂灌浆效果的基础环节，需从工程实际出发做好全面部署。（1）工程地质勘察与坝体状况评估：施工前需开展详细的地质勘察，通过钻探取样和物探技术，明确堤体填土的颗粒组成、压实度及渗透系数，同时查明堤基土层的分布特征和地下水位变化规律。对坝体状况的评估应重点关注堤身裂缝、渗漏点分布及堤顶沉降情况，通过无人机航拍和人工巡检相结合的方式，建立堤体缺陷台账。根据勘察结果绘制地质剖面图和渗流分析图，为后续孔位布置和灌浆参数设计提供依据^[1]。（2）施工设备与材料的准备：设备选型需匹配工程规模，主要包括地质钻机、高压灌浆泵、浆液搅拌机及流量压力记录仪等。钻机宜选用轻便型液压钻机，适应堤顶狭窄作业空间；灌浆泵应具备压力连续可调功能，额定工作压力不低于10MPa。材料方面，水泥选用强度等级32.5级的普通硅酸盐水泥，其细度和安定性需符合国家标准；掺合料可采用粉煤灰或膨润土，用于改善浆液流动性和析水性。所有材料进场前需进行抽样检测，确保水泥标号、粉煤灰细度等指标满足设计要求，并做好材料存储的防潮措施。

2.2 施工工艺

科学规范的施工工艺是保证灌浆质量的核心,需严格遵循技术标准分步实施。(1)布孔与钻孔:孔位布置遵循“梅花形”原则,主孔沿堤顶中心线布置,间距控制在2-3米,副孔位于主孔两侧1.5米处,形成交错防渗体系。钻孔方法根据堤体土质选择,对黏性土堤段采用回转钻进,砂土堤段则改用冲击钻进,避免塌孔。钻孔深度需穿透堤身并深入堤基1-2米,确保防渗帷幕贯穿整个渗流路径。钻孔过程中需实时记录地层变化,当遇到砂层或软弱夹层时,应及时调整钻进参数并做好护壁处理。(2)灌浆压力与浆液制备:灌浆压力需根据堤体高度和土质特性确定,一般控制在0.2-0.5MPa,对于堤身较高或压实度较大的段落,可逐步提升至0.8MPa。压力设定需遵循“由低到高、分级控制”原则,防止因压力骤升导致堤体过度变形。浆液制备采用“先干拌后湿拌”工艺,按水泥:粉煤灰:水=1:0.5:1.2的比例配置基础浆液,通过试验调整稠度,使浆液漏斗黏度保持在20-30s。制备过程中需持续搅拌,确保浆液均匀性,避免出现离析现象,搅拌后的浆液应在4小时内使用完毕。(3)灌浆施工:采用“全孔一次灌浆”方式,按从堤脚向堤顶、从下游向上游的次序推进,相邻孔位间隔施工以减少相互干扰。严格遵循“少量多次”灌浆原则,每次灌入量控制在0.5-1m³,间隔30分钟后进行下一次灌浆,通过反复劈裂使浆液充分扩散。灌浆过程中密切观察堤顶位移和裂缝变化,当水平位移超过5cm或出现新裂缝时,应立即停止灌浆并降压处理。对于渗漏严重的区域,可先采用浓浆封堵,待压力稳定后再恢复正常灌浆^[2]。

2.3 质量控制

质量控制贯穿施工全过程,需通过动态监控和系统验收确保灌浆效果。(1)灌浆过程中的质量监控与调整:实时监测灌浆压力、流量及浆液密度,每30分钟记录一次数据,绘制压力-流量-时间关系曲线,当参数偏离设计值时及时调整。在堤顶布设沉降观测点,每小时测量一次垂直位移,发现异常沉降立即分析原因并采取降压、间歇灌浆等措施。定期检查孔口返浆情况,若返浆浓度降低,说明浆液扩散正常;若出现断浆现象,可能存在孔洞或裂隙,需补灌浓浆填充^[3]。(2)施工结束后的质量验收与效果评估:灌浆完成7天后进行质量验收,采用钻孔取芯法检查帷幕连续性,芯样中水泥结石体的占比应不低于80%。通过压水试验测定防渗帷幕的渗透系数,要求达到 1×10^{-6} cm/s以下。效果评估结合蓄水试验,观测堤后渗流量变化,与施工前数据对比,渗流量减少率需超过70%。对验收不合格的区域,需制定补灌方案,

重新钻孔灌浆直至满足质量标准。

3 劈裂灌浆技术的优势分析

3.1 防渗效果显著

该技术通过高压作用使浆液沿堤体薄弱部位劈裂扩散,形成连续完整的水泥土防渗帷幕。与传统防渗技术相比,其独特的“动态劈裂”特性可自适应堤体内部的裂隙分布,浆液能渗透至0.1mm级的微小通道,有效封堵各类隐蔽渗流路径。实际工程数据显示,采用劈裂灌浆后,围堤渗流量可降低80%以上,堤后浸润线平均下降1.5-2m,防渗效果的持久性尤为突出,帷幕结构在长期水压力作用下不会出现明显衰减,解决了传统黏土防渗体易因干湿循环产生裂缝的问题。

3.2 加固效果良好

灌浆过程中,高压浆液不仅填充空隙,更通过挤压作用使堤体土颗粒重新排列,显著提高坝体密实度。检测数据表明,处理后的堤体干密度可提升15%-20%,压缩模量提高30%以上,整体性得到根本性改善。对于存在纵向裂缝或坝体不均沉降的围堤,浆液在劈裂扩散时会形成“骨架支撑”效应,将分散的堤体结构胶结成整体,增强抗滑稳定性。某水库围堤加固工程中,经劈裂灌浆处理的堤段,在遭遇百年一遇洪水时,堤顶沉降量控制在3cm以内,较未处理段减少60%,充分验证了其结构加固效能。

3.3 施工成本低

该技术的经济性体现在材料、设备和工期三个方面。材料以普通硅酸盐水泥为主,可掺入粉煤灰等工业废料降低成本,单位防渗面积材料费仅为防渗墙技术的1/3-1/2;施工设备轻便灵活,一套中小型灌浆机组日均可完成50-80延米钻孔灌浆作业,设备投入成本远低于深层搅拌桩机。在工期方面,劈裂灌浆无需大规模开挖,单段施工周期比传统培厚加固缩短50%以上,对于紧急抢险工程,可实现“边施工边挡水”,大幅减少工程延误带来的间接损失。某中型水库加固项目统计显示,采用该技术后,整体工程造价降低约25%,经济效益显著^[4]。

3.4 环境影响小

施工过程具有“微创性”特点,钻孔直径仅100-150mm,对堤体原貌破坏极小,避免了大规模土方开挖导致的生态扰动。浆液材料以水泥和矿物掺合料为主,不含重金属等有害成分,其水化产物对周边水体和土壤无污染,pH值可在3个月内恢复至中性范围。与高压喷射注浆相比,劈裂灌浆的施工噪音控制在70分贝以下,振动加速度小于0.1g,不会对周边居民生活和堤体植被造成影响。在生态敏感区工程中,该技术可满足《水利工程

施工环境保护技术规范》的严格要求,实现工程加固与生态保护的协同推进。

4 劈裂灌浆技术应用中的问题与挑战

4.1 技术难点

4.1.1 灌浆压力的精确控制

灌浆压力是决定劈裂效果的核心参数,但其控制受堤体结构、土层分布等多重因素影响,呈现高度复杂性。在黏土层中,压力过大会导致堤体过度鼓胀甚至开裂;而在砂层或松散填土区域,压力不足则无法形成有效劈裂,易造成浆液集中渗漏。实际施工中,同一孔位在不同深度可能遇到差异显著的地层条件,如上部为黏性土、下部为砂卵石层,传统固定压力模式难以适应这种动态变化,常出现“浅部超压、深部压力不足”的矛盾。某工程案例显示,因压力控制不当,导致30米堤段出现横向裂缝,最大宽度达5厘米,被迫停工处理。

4.1.2 浆液扩散与固结效果的预测

浆液在堤体中的扩散路径受地质条件和施工参数共同影响,具有较强随机性。在不均质堤体中,浆液易沿软弱夹层或旧有裂缝窜流,形成“短路扩散”,导致部分区域灌浆不充分。同时,浆液固结质量与养护环境密切相关,在高含水量堤段,水泥水化反应易受干扰,可能出现强度偏低、析水现象严重等问题。由于浆液扩散过程隐蔽性强,传统检测手段难以实时追踪,往往在施工结束后才发现局部防渗帷幕存在薄弱环节,给工程安全埋下隐患。某水库加固后检测发现,约15%的孔段存在浆液扩散半径不足设计值60%的情况,需进行二次补灌。

4.2 应对措施

4.2.1 加强施工过程中的质量监控与调整

建立“实时监测-动态反馈”的压力控制体系,在灌浆管上安装高精度压力传感器和流量记录仪,每5分钟采集一次数据,通过物联网平台绘制压力-流量变化曲线。采用分级压力控制法,根据钻孔深度和地层特性预设压力梯度,如黏土层段初始压力设为0.2MPa,每加深1米增加0.05MPa;进入砂层后压力上限提高至0.6MPa,并保持稳定。同时在堤顶布设位移监测点,当水平位移速率超过2mm/h时,自动触发压力下调机制。针对浆液扩散问

题,引入地质雷达实时扫描技术,在灌浆过程中对孔周3米范围进行扫描,根据反射波特征判断浆液扩散形态,发现窜流现象立即调整注浆方向或采用间歇灌浆方式阻断窜流通道。

4.2.2 提升施工人员的技术水平与操作技能

构建“理论培训+实操考核”的人员培养体系,培训内容涵盖地质力学、灌浆工艺原理及应急处理方案,确保施工人员理解压力与地层的匹配关系。开展模拟实操训练,在室内试验堤段设置不同地层模型,要求操作人员在2小时内完成压力参数设定、浆液调整及异常处理等全流程操作,考核合格后方可上岗。建立“师带徒”制度,由具有5年以上经验的技术人员现场指导,重点传授砂层降压、裂隙封堵等实战技巧。定期组织技术交流会,分享典型案例的压力控制经验,如在含腐殖质的软弱土层中,采用“低压力、慢注浆、多次循环”的操作方法,可有效避免浆液流失。通过技能提升,使施工团队能够根据现场反馈快速调整工艺参数,将人为操作误差控制在5%以内。

结束语

综上所述,劈裂灌浆技术在水库围堤工程防渗加固施工中展现出卓越的性能与广泛的应用前景。其不仅能够显著提升坝体的防渗性能,增强结构稳定性,还具备施工简便、成本低廉、环境影响小等显著优势。随着技术的不断进步和工程实践的积累,劈裂灌浆技术在水库围堤工程中的应用将更加成熟和完善。未来,我们期待该技术能在更多水利工程中发挥其独特作用,为保障水利设施安全、促进水资源可持续利用作出更大贡献。

参考文献

- [1]张军辉.劈裂灌浆技术在水库大坝加固工程中的应用分析[J].建材与装饰,2020,(04):29-30.
- [2]胡皓.土石坝劈裂灌浆技术在病险水库防渗处理中的应用[J].内蒙古水利,2021,(11):113-114.
- [3]岳景哲.劈裂灌浆技术在杨城子水库大坝加固工程中的实践与探索[J].水利规划与设计,2020,(06):69-70.
- [4]杨香东.劈裂灌浆技术在泉河水库大坝除险加固中的应用[J].水电站设计,2022,(04):46-47.