

水库堤坝劈裂灌浆防渗加固施工技术探究

张每文¹ 刘端婧²

1. 长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心 湖北 武汉 430000

2. 长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

摘要: 水库堤坝长期受水力侵蚀、地质沉降及材料老化等因素影响,易出现渗漏、裂缝等安全隐患,严重威胁工程安全运行。传统防渗加固方法存在施工周期长、成本高或适应性不足等问题,亟需探索更为高效可靠的技术手段。劈裂灌浆技术通过高压注浆形成连续防渗帷幕,兼具修复坝体内部缺陷与增强结构整体性的双重功能,近年来在水库堤坝加固领域得到广泛应用。本文对劈裂灌浆技术的核心原理与实施流程进行分析,并结合工程实践需求,系统探讨其在防渗加固中的关键作用,以期为提升水库堤坝安全性及延长服役寿命提供技术支撑。

关键词: 劈裂灌浆; 水库堤坝; 防渗加固; 施工技术

在长期服役过程中,坝体因材料性能退化、荷载变化或地质条件影响,易形成隐蔽渗流路径及局部应力集中区,导致抗渗能力下降与结构失稳风险。针对此类问题,劈裂灌浆技术通过定向压裂与浆液渗透协同作用,在坝体内构建空间连续的加固网络,不仅有效阻断渗漏通道,还可重塑坝体内部力学平衡。该技术凭借其隐蔽施工、精准干预及环境友好等特点,逐渐成为复杂工况下堤坝修复的重要选项,其科学应用对推动水利工程可持续发展具有重要意义。

1 劈裂灌浆技术概述

劈裂灌浆技术是一种通过高压注浆重塑坝体结构的防渗加固方法,主要针对土石坝、均质坝等因长期渗流、沉降或材料老化产生的内部裂缝及渗透通道。其核心原理是利用注浆压力主动劈裂坝体薄弱区域,使浆液沿特定方向扩散并充填裂隙,形成连续的防渗帷幕,同时通过浆液固结实现坝体整体补强。施工中,通过科学布孔、分段注浆及压力调控,确保浆液渗透与劈裂范围可控,兼顾修复隐蔽缺陷与改善坝体应力分布。该技术具有适应性强、施工干扰小、修复效果持久等特点,尤其适用于渗透隐患复杂、传统方法难以根治的水库堤坝工程,为提升坝体抗渗性与结构稳定性提供了高效解决方案^[1]。

2 水库堤坝劈裂灌浆防渗加固施工技术原理

2.1 高压注浆主动劈裂机制

随着水库堤坝服役年限增长,坝体内部因渗流侵蚀、干湿循环或地质沉降逐渐形成隐蔽裂隙与松散夹层,传统灌浆技术难以实现深部缺陷的有效修复。劈裂灌浆技术基于主动干预理念,通过高压注浆设备将水泥黏土浆或复合浆液加压注入坝体,当注浆压力超过土体

抗拉强度时,浆液沿坝体弱面定向劈裂,形成主次分明的裂隙网络。在此过程中,浆液不仅填充既有渗漏通道,还通过劈裂产生的次生裂隙向周边渗透扩散,形成以注浆孔为中心的多维防渗体。高压劈裂与渗透充填的协同作用,修复了分散性渗漏缺陷,又重塑了坝体内部密实结构,为后续浆液固结提供空间条件。

2.2 浆脉骨架网络强化效应

在复杂地质条件或非均匀填筑的堤坝中,局部渗透系数差异易导致渗流集中与管涌风险。劈裂灌浆技术通过多序次、分阶段的注浆工艺,使浆液在劈裂过程中逐步扩散并固结,形成纵横交错的树根状或片状浆脉骨架。这些浆脉以物理阻隔方式切断渗流路径,同时通过浆脉与土体间的摩擦咬合作用,显著提升坝体整体性与抗变形能力。例如,在黏土心墙坝中,浆脉骨架可弥补心墙局部断裂或压实不足的缺陷;在砂质坝体中,浆脉则运用胶结松散颗粒形成抗渗“硬壳层”,提升了坝体短期抗渗性能,还可运用调整浆液配比实现与坝体材料的长期协同变形,避免二次开裂。

2.3 动态调控与精准干预

在水库堤坝防渗加固工程中,过度劈裂可能破坏坝体原有结构,而注浆压力不足则导致浆液扩散范围受限。劈裂灌浆技术通过“压力-流量-时间”多参数联动控制,实现施工过程的动态优化。施工初期,采用低压渗透注浆充填浅层裂隙;待阻力增大后,逐步提高压力触发定向劈裂,扩大浆液影响半径。同时,结合坝体变形监测与注浆曲线分析,实时判断劈裂范围与裂隙发育形态,动态调整注浆孔间距、注浆速率及终灌标准^[2]。例如,在砂砾石坝基处理中,通过间歇性注浆控制浆液扩散速度,避免浆液过度流失;在黏土坝体中,则采用

“低压慢灌”策略，确保浆脉均匀发育。

3 劈裂灌浆技术在水库堤坝防渗加固中的应用

3.1 隐患精准识别与靶向布孔

随着水库堤坝服役年限的增长，坝体内部因材料老化、渗流侵蚀及外部荷载作用逐渐形成隐蔽性裂隙、松散夹层或渗透通道，这些隐患往往分布散乱且埋深较大，传统勘察手段难以准确定位。劈裂灌浆技术的实施效果高度依赖前期隐患的精准识别与注浆孔的靶向布设，需通过多技术融合的数据采集与分析，构建坝体隐患的三维诊断地图。在工程实践中，应采用地质雷达、高密度电法等物探技术对坝体进行无损扫描，结合坝面渗漏痕迹、湿润区分布及历史监测数据，初步圈定渗流异常区域。随后，通过钻孔取样、原位渗透试验及孔内成像技术，进一步验证隐患的空间形态、连通性及渗透特性。例如，对疑似松散夹层进行岩芯抗剪强度测试，分析其与周边土体的力学差异；利用孔内电视观测裂隙发育方向及充填状态，为注浆路径设计提供依据。基于上述数据，构建坝体渗透系数、裂缝密度及力学参数的梯度分布模型，明确劈裂灌浆的重点靶区^[3]。

而靶向布孔的核心在于实现隐患全覆盖与结构扰动最小化的平衡。根据三维诊断结果，采用“主控孔+验证孔”的布设模式，主控孔沿隐患密集带或渗流主通道布置，孔距依据浆液扩散半径（通常为2~5米）动态调整；验证孔则分布于隐患边缘或过渡区，用于实时修正注浆范围。对于纵向贯穿性裂缝，采用斜向交叉钻孔，利用浆液劈裂形成立体交错的防渗网络；针对局部松散体或空洞区，则采用梅花形加密布孔，通过多孔协同注浆实现充填加固。施工中还需结合坝体材料特性优化钻孔深度与倾角，例如在黏土心墙坝中，钻孔需穿透心墙底部接触面，确保浆脉与基岩衔接；在砂壳坝体中，钻孔深度则需避开透水层与相对隔水层的交界面，防止浆液无效扩散。在初始注浆阶段，应通过少量试验孔验证浆液扩散规律与劈裂效果，结合注浆压力-流量曲线、地表抬动监测及渗流监测数据，反演隐患真实分布状态。若发现浆液扩散范围偏离预期，则及时调整后续钻孔间距或注浆压力；对于未探明的隐蔽渗漏点，通过增设追踪孔或加密布孔实现补充控制，以提升隐患区域的覆盖精度，为后续大规模注浆奠定基础。

3.2 分层分序施工，适配坝体结构

在复杂坝体结构中，渗漏隐患往往呈现分层分布特征，浅层松散区与深层隐蔽裂隙并存，且不同材料分区的渗透特性差异显著。劈裂灌浆技术通过分层控制、分序推进的施工逻辑，针对性适配坝体材料与隐患空间分

布，确保浆液充填范围与结构补强需求精准匹配。施工前期，基于隐患诊断结果将坝体划分为若干注浆层次，优先处理深层隐患以阻断基底渗流通道。采用“由深至浅”的阶梯式注浆策略，首轮钻孔穿透坝体隐患下限（基岩接触面或历史渗漏区底部），通过高压注浆形成深层防渗帷幕；待浆液初凝后，逐步上移钻孔深度，分阶段处理中层及浅层裂隙，以避免浅层浆液过早硬化阻碍深部浆液扩散，通过逐层加固形成立体防渗体系，提升坝体整体抗渗稳定性。分序施工则聚焦于平面隐患分布的非均质性。针对坝体不同区域渗漏风险等级，采用“先外围后中心、先稀疏后加密”的注浆顺序。首序注浆孔沿坝体渗漏边界或潜在管涌带布置，通过低压渗透注浆形成外围闭合防渗圈，限制后续注浆过程中浆液的无序扩散；二序孔在首序孔固结后向中心区域推进，依据首序注浆效果动态加密孔距，重点处理内部松散体或裂隙密集区。对于横向贯穿性裂缝或集中渗流带，采用斜向交叉钻孔与垂直孔组合布设，以多序次注浆形成交叉浆脉网络，强化薄弱区抗渗能力^[4]。

施工过程中，需结合坝体材料特性动态调整分层分序参数。例如，在黏土心墙坝中，由于心墙渗透系数低且抗劈裂能力强，注浆压力需逐级提升，并延长单孔注浆时间，确保浆液充分劈裂渗透；在砂壳或堆石坝体中，则需控制注浆压力与浆液黏度，避免浆液沿大孔隙快速流失。此外，通过埋设变形监测传感器（测斜仪、沉降标）实时跟踪注浆引起的坝体位移，一旦发现异常抬动或侧向变形，立即暂停注浆并调整压力参数，确保施工过程安全可控。分层分序的协同实施，不仅提升了劈裂灌浆对复杂隐患的适应性，还通过“渐进式加固”减少了对坝体原有结构的扰动。例如，在多层渗漏坝体修复中，首轮深层注浆可先行稳定基底渗流，后续浅层注浆则针对坝体内部缺陷进行精细化修补；而外围闭合防渗圈的提前形成，有效抑制了后续注浆对周边环境的渗透影响。

3.3 动态调控注浆参数，保障安全可控

随着水库堤坝防渗加固工程的推进，施工环境与坝体内部状态往往呈现动态变化特征，如渗流路径迁移、土体孔隙率差异或地下水位波动等。而劈裂灌浆技术的核心优势在于其参数调控的灵活性，运用实时感知与动态响应机制，平衡防渗效果与结构安全，确保施工全程可控。施工初期，通过注浆试验段获取坝体初始渗透系数、抗劈裂强度等关键参数，建立注浆压力、浆液黏度与扩散半径的关联模型。基于此模型，制定分级压力控制策略：初始阶段采用低压渗透注浆，逐步充填表层裂

隙与松散孔隙；待注浆阻力显著上升后，切换至高压劈裂模式，定向扩展深层裂隙网络。在此过程中，注浆流量作为辅助调控指标，通过流量突变点识别裂隙贯通状态，避免因盲目增压导致坝体结构损伤。例如，当注浆流量骤减而压力持续上升时，表明浆液扩散受限，需及时调整浆液配比或暂停注浆，排查堵管风险。

针对不同坝体材料与工况条件，实时调整浆液的流动性、初凝时间及固结强度。例如，在渗透性较强的砂质坝体中，采用高黏度浆液掺加速凝剂，抑制浆液远距离流失；在黏土或粉质坝体中，则选用低黏度浆液配合缓凝剂，延长浆液渗透与劈裂作用的有效时间。施工中运用在线黏度计与流动性检测装置，实时监测浆液状态，结合注浆压力变化趋势，动态调整水灰比或外加剂掺量，确保浆液性能与地层条件精准匹配。此外，在注浆孔周边布设土压力计、位移计及渗压计，实时采集坝体变形、孔隙水压力及渗流场变化数据。当监测到局部抬动值超限或渗压异常上升时，立即启动预警机制，降低注浆压力或切换注浆孔位，避免结构破坏。同时，通过注浆曲线（压力-时间、流量-时间）的形态解析，反演浆液扩散路径与裂隙发育规模。例如，压力曲线的“平台型”波动反映浆液稳定充填，而“尖峰型”骤升则提示裂隙扩展受阻，需采取洗孔或间歇注浆等干预措施。

3.4 效果跟踪与长效维护机制

随着劈裂灌浆施工的完成，防渗效果的持续性与坝体长期稳定性成为工程成败的关键。施工结束后，应运用压水试验与渗流量监测综合评价防渗帷幕的完整性。压水试验在注浆孔间加密布设检测孔，测定不同深度段单位吸水量变化，验证浆脉的连续性与密实度；渗流量监测则结合坝体上下游水位差，分析加固前后渗流量的衰减趋势，量化防渗效果。对于局部未达标区域，采用钻孔全景成像技术精准定位浆脉缺失或松散区，制定补充注浆方案，例如在浆脉断裂处增设斜向注浆孔，或在渗透系数突增区实施加密补灌，确保防渗体系全域覆盖。

长效维护层面，应建立坝体健康档案与预警响应体系，通过布设渗压计、位移计及渗流自动监测设备，实

时采集坝体渗透压力、变形量及渗流水质数据，构建长期监测数据库。结合历史监测曲线与阈值设定，识别异常信号（渗流量陡增、渗水浑浊度上升），触发分级预警。例如，当渗压计数据连续超限时，启动应急排查与局部补灌；当渗流水质出现携砂现象时，则需评估管涌风险并实施加固干预。同时，定期开展人工巡检与无损检测，如采用地质雷达复测坝体内部浆脉分布状态，或通过声波透射法评估浆脉与土体界面胶结强度，动态更新隐患图谱^[5]。

最后，技术手段与人工管理的协同是维护机制落地的保障。利用物联网技术整合多源监测数据，开发智能分析平台，实现渗流场模拟、结构稳定性预测及维护决策的数字化支持。例如，基于机器学习算法分析渗流量与降雨、库水位的关系，预判潜在风险时段；通过三维可视化模型定位浆脉老化或脱空区域，指导精准维护。

结束语

综上所述，劈裂灌浆技术通过高压注浆主动重塑坝体结构、构建浆脉网络及动态调控施工参数，为水库坝坝防渗加固提供了系统性解决方案。其融合精准隐患识别、分层分序施工及长效监测维护的工程逻辑，显著提升了坝体抗渗性与结构稳定性，有效遏制了渗漏引发的安全隐患。该技术的科学应用不仅推动了传统加固工艺的革新，更为水利工程全生命周期安全运维与可持续发展提供了技术范式，具有广泛的工程推广价值与社会效益。

参考文献

- [1]李长勇.水库堤坝劈裂灌浆防渗加固施工技术[J].河南水利与南水北调,2024,53(07):58-59.
- [2]裴正鹤.水库堤坝工程中的防渗墙施工技术及管理[J].石材,2024,(08):120-122.
- [3]程文钰.水库堤坝工程中防渗墙施工技术研究[J].建筑技术开发,2024,51(07):48-50.
- [4]廖雪梅.水库堤坝工程中的防渗墙施工技术及管理[J].水上安全,2023,(12):148-150.
- [5]姜红斌.劈裂灌浆技术在水库堤坝防渗加固施工的应用[J].水利科学与寒区工程,2022,5(09):131-133.