

水利工程中灌浆施工技术的防渗效果分析与优化

李广杰 史东祥

开封黄河河务局兰考黄河河务局 河南 开封 475300

摘要：灌浆施工技术作为水利工程中关键的防添加固手段，广泛应用于坝基、堤防、隧洞及地下工程等场景。其核心目标在于通过注入特定浆液填充岩土体裂隙或孔隙，形成连续、致密的防渗帷幕，从而有效控制渗流、提高结构稳定性。然而，实际工程中灌浆防渗效果常受地质条件复杂性、浆液性能、施工工艺及质量控制等因素影响，导致防渗效果不理想甚至失效。本文系统梳理了灌浆技术在水利工程中的应用类型与原理，深入分析影响防渗效果的关键因素，并探讨当前灌浆施工中存在的主要问题。在此基础上，从材料优化、工艺改进、智能监测与全过程质量控制等方面提出系统性优化策略，旨在提升灌浆防渗的可靠性与耐久性，为现代水利工程建设提供理论支撑与实践指导。

关键词：水利工程；灌浆技术；防渗效果；浆液材料；施工工艺；质量控制

引言

渗流控制是保障水利工程长期稳定运行的核心环节之一。若防渗措施不到位，不仅会导致水资源浪费、库容损失，更可能诱发管涌、流土、坝体滑坡等严重安全事故，威胁人民生命财产安全。灌浆技术因其适应性强、施工灵活、效果显著等特点，成为解决岩土体渗漏问题的重要手段。自20世纪初以来，灌浆技术经历了从水泥浆到化学浆、从单液到双液、从传统钻孔到智能注浆的演进过程。然而，面对复杂多变的地质环境（如断层破碎带、溶蚀裂隙、高渗透性砂卵石层等），传统灌浆方法在防渗效果上仍存在局限性。例如，浆液扩散不均、结石体强度不足、后期收缩开裂等问题频发，直接影响防渗帷幕的完整性与持久性。因此，深入研究灌浆施工技术的防渗机理，系统分析影响防渗效果的关键因素，并提出科学有效的优化路径，具有重要的理论价值与工程意义。

1 灌浆技术在水利工程中的应用类型与防渗机理

1.1 主要灌浆类型

在水利工程实践中，灌浆技术根据工程目的、地质条件和结构特点的不同，形成了多种针对性的应用形式。其中，帷幕灌浆是最为典型且应用最广的一种，主要用于在坝基或地下结构周围构建一道连续的低渗透屏障，以阻断地下水的渗流路径，显著降低扬压力，从而保障大坝等挡水建筑物的整体稳定性。固结灌浆则侧重于提升岩体的整体力学性能，通过填充岩体内部的节理、裂隙和孔隙，增强其变形模量和抗剪强度，虽然其主要功能并非专门防渗，但在改善岩体完整性的同时，也间接起到了减少局部渗漏的作用。接缝灌浆针对混凝土坝体施工过程中形成的横缝、纵缝或伸缩缝，通过注

入浆液实现缝面的密闭，防止水流沿结构薄弱面渗透，进而提升坝体的整体性和防渗能力。回填灌浆多用于水工隧洞工程中，在混凝土衬砌完成后，对衬砌背后因施工空隙或围岩变形形成的脱空区域进行填充，不仅可改善衬砌与围岩之间的协同受力状态，还能有效封堵潜在的渗水通道。此外，在处理微细裂隙、高流速渗漏点或对环保要求较高的特殊区域时，化学灌浆因其浆液颗粒极细、可灌性好、凝胶时间可控等优势，逐渐成为传统水泥灌浆的重要补充手段。

1.2 防渗机理

灌浆防渗的本质在于通过物理填充与化学胶结的协同作用，从根本上改变岩土介质的渗透特性。当浆液在压力驱动下被注入岩体裂隙或土体孔隙后，首先发生的是物理堵塞效应——浆液中的固体颗粒随水流迁移并在狭窄通道处沉积、堆积，逐步缩小乃至封闭渗流通道。与此同时，水泥类浆液在水化反应过程中生成大量水化硅酸钙（C-S-H）凝胶及其他结晶产物，这些物质不仅自身具有低渗透性，还能牢固地粘附于裂隙壁面，形成一层致密的胶结膜，从而显著降低岩体的有效孔隙率和渗透系数^[1]。在某些高压灌浆条件下，浆液还可能引发“渗透-劈裂”复合机制，即在浆液压强超过岩体抗拉强度时，促使原有闭合微裂隙张开，使浆液得以进入更深层或更细微的空间，实现更大范围的填充与加固。经过多排、多序次的系统灌注后，相邻钻孔所形成的浆脉相互搭接、融合，最终构成一道空间上连续、物理上致密、水力学上低透的防渗帷幕体，其整体渗透系数通常可降至 10^{-6} 至 10^{-8} cm/s量级，远低于未处理岩体的原始渗透性，从而有效实现工程防渗目标。

2 影响灌浆防渗效果的关键因素分析

2.1 地质条件复杂性

在实际工程中,岩体往往并非均质连续介质,而是包含断层、节理、溶洞、风化夹层等多种地质构造单元。这些不良地质体具有高度的非均质性与各向异性,使得浆液在注入过程中极易沿高渗透通道优先流动,造成“短路”现象,而其他低渗透区域则难以被有效充填。例如,在喀斯特发育地区,地下溶蚀管道纵横交错,浆液一旦进入大尺度溶洞或暗河系统,便会迅速流失,无法形成有效结石体;而在强透水的砂卵石地层中,高速渗流会不断稀释和冲刷注入的浆液,使其难以沉淀凝结;相反,在致密完整的花岗岩或玄武岩中,原生裂隙极其微细,常规水泥浆因颗粒尺寸过大而无法有效注入,必须依赖高压劈裂或采用超细水泥、化学浆液等特殊手段。由此可见,若对地质条件认识不清或灌浆方案缺乏针对性,即便施工参数控制得当,也难以获得理想的防渗效果。

2.2 浆液性能参数

水灰比是影响浆液性能的最基础参数,过高的水灰比虽能提高流动性,但会导致浆液稀薄、析水率高、结石体孔隙率大,最终强度与抗渗性显著下降;而过低的水灰比虽能获得高强度结石,却因粘度过大而难以注入微细裂隙,甚至造成堵管事故。此外,外加剂的合理使用对调控浆液性能至关重要,例如膨润土可提高浆液稳定性、减少离析,减水剂可改善流动性而不增加用水量,速凝剂则适用于动水条件下的快速封堵^[2]。然而,若外加剂种类选择不当或掺量控制失准,反而可能引发早凝、缓凝、强度倒缩等负面效应。对于化学灌浆而言,浆液的选择还需兼顾环保性、耐老化性与成本效益。部分有机高分子浆材虽具有优异的可灌性和膨胀止水能力,但长期服役过程中可能出现溶胀失效、化学降解或释放有害物质等问题,限制了其在重要水利工程中的广泛应用。

2.3 施工工艺控制

灌浆施工是一个高度动态且不可逆的过程,其工艺控制的精细程度直接关系到防渗帷幕的完整性与均匀性。灌浆压力的设定尤为关键,压力过低时,浆液无法克服裂隙阻力有效扩散,导致灌注范围有限;压力过高则可能引起地层抬动、地面冒浆,甚至破坏已有结构。因此,合理的压力制度应根据岩体强度、覆盖层厚度及邻近建筑物安全等因素综合确定,并在施工中动态调整。灌浆顺序与段长的安排同样不容忽视,通常应遵循“分序加密、自上而下”的原则,先灌外围孔形成封闭边界,再逐序向内加密,以防止浆液无序扩散;同时,采用合理的灌浆段长可

避免上下段串浆,确保每一段都能充分充填。此外,灌浆结束标准的科学制定是保证质量的最后一道关口。目前普遍采用“注入率+压力”双控法,即当注入率降至某一阈值且稳定维持规定时间后方可结束。然而,该标准在不同地质条件下缺乏普适性,易导致欠灌(防渗不足)或过灌(资源浪费、地层扰动),亟需结合实时监测数据建立更为精准的终止判据。

2.4 质量检测与评价滞后

当前灌浆工程质量的验收与评价体系仍存在明显滞后性与局限性。压水试验(Lugeon test)作为最常用的检测手段,虽能反映钻孔周围局部岩体的渗透性,但其测试范围有限,无法全面评估整个防渗帷幕的空间连续性与整体有效性。尤其在存在“绕渗”或“侧渗”路径的情况下,压水结果可能显示合格,而实际运行中仍出现较大渗漏。更严重的是,压水试验通常在灌浆完成数天甚至数周后进行,属于典型的“事后检验”,难以在施工过程中提供及时反馈以指导工艺调整。这种“盲灌—盲检”模式不仅降低了施工效率,也增加了质量风险。近年来,尽管物探技术(如高密度电法、地震CT、地质雷达)在灌后检测中有所应用,但其解释精度受多种因素干扰,尚难完全替代钻孔验证。因此,构建一套集施工过程实时监控、灌后快速无损检测与长期性能跟踪于一体的全生命周期质量评价体系,已成为提升灌浆防渗可靠性的迫切需求。

3 灌浆防渗效果优化策略

3.1 浆液材料创新与复合化

传统纯水泥浆虽成本低廉,但在应对复杂地质时往往力不从心。为此,发展高性能复合浆液成为重要方向。例如,水泥-水玻璃双液浆通过调节两种组分的混合比例,可实现从秒级到分钟级的可控凝结,特别适用于动水或大裂隙封堵;而水泥-膨润土-粉煤灰三元体系则通过膨润土提高悬浮稳定性、粉煤灰改善后期强度与耐久性,形成兼具经济性与功能性的绿色浆材。与此同时,环保型化学浆液的研发亦不容忽视。传统聚氨酯虽止水效果好,但部分产品含有有毒异氰酸酯单体,存在环境风险。近年来,丙烯酸盐类、木质素基等可生物降解、无毒无害的新型化学浆材逐渐成熟,为生态敏感区的防渗工程提供了更可持续的选择。此外,纳米技术的引入为浆液性能提升开辟了新路径。在水泥浆中掺入适量纳米 SiO_2 或纳米 CaCO_3 ,可显著细化水化产物结构,填充微观孔隙,从而大幅提升结石体的密实度、抗渗性与抗化学侵蚀能力,延长防渗帷幕的服役寿命。

3.2 智能化施工工艺升级

数字化灌浆控制系统通过集成高精度压力、流量、浆液密度及温度传感器,可实现全过程参数的自动采集、存储与分析。例如,中国三峡集团开发的“智能灌浆云平台”不仅能实时绘制灌浆曲线,还能基于预设算法自动识别异常工况(如突增注入率、压力骤降),并发出预警,辅助技术人员及时干预。在此基础上,自适应灌浆技术进一步提升了施工的精准性。通过融合地质雷达、微震监测或随钻测量(MWD)等前端探测数据,系统可动态构建地下裂隙网络模型,并据此实时调整灌浆压力、浆液配比及注浆速率,实现“按需注浆、精准填充”^[3]。对于高危或空间受限区域(如深埋长隧洞、核电站地下厂房),自动化灌浆机器人也开始试点应用,其具备自主定位、钻孔、注浆与回收功能,不仅提高了施工安全性,也减少了人为操作误差,为未来无人化灌浆施工奠定了基础。

3.3 全过程质量监控体系构建

亟需构建覆盖灌前、灌中、灌后的全过程质量监控体系。在施工前,应基于三维地质建模与数值模拟(如采用FLAC3D或COMSOL Multiphysics软件)对灌浆过程进行虚拟推演,预测浆液扩散范围与可能存在的薄弱区,从而优化孔位布置与参数设计。施工过程中,依托物联网技术实现数据实时回传与云端分析,形成“感知—决策—执行”闭环。施工完成后,除常规压水试验外,应综合运用地质雷达、高密度电法、跨孔CT等无损探测手段,对帷幕的连续性、厚度及空间分布进行三维成像评估。更进一步,可引入数字孪生技术,将物理灌浆工程与其虚拟模型同步映射,通过持续数据交互实现性能预测与运维优化。在验收标准方面,应推动从单一指标向多维综合评价转变,除渗透系数外,还应纳入帷幕连续性指数、有效覆盖面积率、长期稳定性等指标,建立更加科学、全面的质量评判体系。

3.4 多技术协同防渗体系

面对极端复杂的水文地质条件,单一灌浆技术往往难以独立承担全部防渗任务,构建“灌+排+护”一体化的多技术协同防渗体系成为必然趋势。在高水头坝基区

域,可在帷幕下游设置系统排水孔,主动降低扬压力,减轻灌浆帷幕的水力负荷,从而提升整体防渗系统的可靠性与耐久性^[4]。在混凝土面板堆石坝等工程中,常采用“表面防渗+深层灌浆”相结合的立体模式:上游混凝土面板或沥青混凝土心墙作为第一道防线,拦截大部分渗水;坝基帷幕灌浆则作为第二道防线,处理深层绕渗问题,二者互为补充,形成立体防御网络。此外,在生态保护区或水源地附近,应优先选用环境友好型防渗措施,如黏土心墙、复合土工膜等,尽量减少化学浆液的使用,必要时可将灌浆仅作为局部应急或补强手段,以实现工程安全与生态保护的双赢。

4 结语

灌浆施工技术作为水利工程防渗体系的核心组成部分,其效果直接关系到工程安全与运行寿命。本文通过系统分析表明,灌浆防渗效果受地质条件、材料性能、施工工艺及质量控制等多因素耦合影响。当前工程实践中仍存在浆液适配性不足、施工智能化水平低、质量评价滞后等问题。未来灌浆技术的发展方向应聚焦于“精准化、绿色化、智能化”:精准化要求基于高精度地质探测与数值模拟,实现“靶向灌浆”,提升材料利用率与防渗效率;绿色化强调推广低碳、可再生、无污染的新型灌浆材料,响应国家“双碳”战略;智能化则需深度融合物联网、大数据与人工智能,构建“感知-决策-执行”一体化的智能灌浆系统。此外,应加强灌浆长期性能监测与老化机理研究,建立全生命周期防渗性能评估模型,为水利工程百年大计提供坚实技术保障。

参考文献

- [1]赵小娟.灌浆技术在水利工程大坝施工中的应用[J].产品可靠性报告,2025,(08):179-180.
- [2]李燕.灌浆施工技术在水利工程中的应用与质量控制研究[J].水上安全,2025,(15):168-170.
- [3]刘雨.灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(16):120-122.
- [4]朱红波.水利工程中基础灌浆施工技术应用研究[J].农业灾害研究,2025,15(02):227-229.