

大坝基础防渗中帷幕灌浆技术应用

王军帅

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 大坝基础防渗中,帷幕灌浆技术是关键防渗手段。其通过钻孔将浆液注入岩体裂隙,形成连续防渗帷幕,降低渗透系数,减少渗流量,提升抗渗能力。技术分材料、工艺、功能等类别,优势在于适应性强、成本可控、施工灵活。然而,其对地质条件有依赖性,施工质量控制难度大。实际应用中,需结合地质勘察、参数设计、施工工艺及质量控制等环节,确保防渗效果,保障大坝安全稳定运行。

关键词: 大坝基础防渗;帷幕灌浆技术;应用案例

引言:大坝作为水利工程的关键枢纽,其基础防渗性能直接关乎工程安全与长久运行。在众多防渗技术中,帷幕灌浆技术凭借独特优势脱颖而出,成为保障大坝基础防渗效果的核心手段。它通过向岩体裂隙精准注入浆液,构建起连续的防渗屏障,有效阻挡水流渗透。不过,不同地质条件与工程需求,给该技术的应用带来诸多挑战。深入研究其应用要点,对提升大坝防渗质量意义重大。

1 大坝基础防渗中帷幕灌浆技术原理与分类

1.1 技术原理

(1) 浆液渗透与固结机制:帷幕灌浆核心是将特定浆液通过压力作用注入大坝基础岩体的裂隙、孔隙中,浆液在渗透过程中填充各类空隙,同时发生物理化学反应,逐渐失去流动性并凝固硬化,形成整体结构。该过程需依托压力突破岩体空隙阻力,确保浆液均匀扩散,为后续防渗结构成型奠定基础。(2) 防渗帷幕形成机理:浆液固结后与岩体紧密结合,形成连续、完整的防渗帷幕。其核心作用是显著降低基础岩体的渗透系数,减少渗流量;同时提升基础的抗渗能力,阻断渗透水流通道,避免渗透变形等病害,保障大坝稳定性。

1.2 技术分类

(1) 按材料分类:包括水泥基浆液、化学浆液、复合浆液。水泥基浆液性价比高、取材便捷,适用于多数常规地质条件;化学浆液渗透性强,适配细微裂隙,但成本较高;复合浆液融合两者优势,可应对复杂地质需求。(2) 按工艺分类:涵盖单孔灌浆、群孔灌浆、自上而下/自下而上分段灌浆。单孔灌浆施工简单,适用于小规模防渗;群孔灌浆形成帷幕效果更优,用于大面积防渗工程;分段灌浆可精准控制灌浆质量,适配深度较大或地质复杂的基础。(3) 按功能分类:有常规帷幕、高压喷射帷幕、超细颗粒帷幕。常规帷幕适用于一般防渗

要求;高压喷射帷幕通过高压喷射形成连续防渗体,适配松散地层;超细颗粒帷幕可填充细微空隙,提升防渗精度^[1]。

1.3 技术优势与局限性

(1) 优势:适应性强,可适配不同地质条件和防渗需求;成本可控,能根据工程规模选择合适材料与工艺;施工灵活,可结合大坝施工进度调整作业方案,兼容性高。(2) 局限性:存在地质条件依赖性,对极端复杂地质(如大规模溶蚀洞穴)处理效果受限;施工质量控制难度大,浆液配比、灌浆压力等参数波动易影响帷幕完整性,需严格管控施工流程。

2 大坝基础防渗中帷幕灌浆关键技术环节

2.1 前期勘察与设计

(1) 地质勘察:作为帷幕灌浆施工的前提基础,需精准探明大坝基础岩层的核心地质参数,重点核查岩层渗透性等级、裂隙发育分布特征(包括裂隙密度、走向、开度及连通性),同时全面掌握地下水埋藏深度、水位变化规律、水流流速及水质情况。通过钻孔取样、原位测试等综合勘察手段,明确地质缺陷分布范围,为后续设计方案制定提供可靠依据,避免因地质勘察疏漏导致灌浆方案与实际地质条件不匹配,影响防渗效果。

(2) 帷幕参数设计:基于地质勘察成果,科学确定核心设计参数。孔距与排距需结合岩层渗透性调整,渗透性强的区域需缩小孔距、增设排数,确保帷幕连续性;灌浆深度应穿透主要透水岩层,延伸至相对隔水层一定深度,保障防渗帷幕的封闭性;浆液配合比需根据裂隙大小、岩层吸水性等因素优化,常规裂隙选用普通水泥浆液,细微裂隙需配置超细水泥浆液或化学浆液,确保浆液能充分填充裂隙并固结成型^[2]。

2.2 施工工艺流程

(1) 钻孔:核心在于保障孔位精度与孔壁完整性。

钻孔设备选型需匹配地质条件,坚硬岩层选用回转式钻机,松散地层采用冲击式钻机;孔位布置严格遵循设计坐标,偏差控制在规范允许范围内;孔径根据灌浆工艺要求确定,一般为50-110mm,同时控制钻孔垂直度,避免孔斜导致帷幕搭接出现缝隙。钻孔过程中需做好岩芯记录,实时核对地质情况与勘察报告的一致性。(2)洗孔与压水试验:洗孔目的是清除钻孔过程中产生的岩粉、泥砂等杂质,避免堵塞裂隙影响浆液渗透,常用高压水冲洗或压缩空气洗孔,直至孔内排出清水为止;压水试验需在洗孔完成后进行,通过向孔内注入清水并施加稳定压力,测定岩层渗透系数,验证地质勘察数据的准确性,同时为后续灌浆压力确定提供参考依据,试验结果需及时记录并反馈至施工管控环节。(3)灌浆材料制备与输送:材料选择以适配地质条件和设计要求为原则,优先选用强度高、稳定性好的水泥材料,特殊情况搭配化学外加剂;浆液制备需严格按配比计量,采用机械搅拌确保搅拌均匀,搅拌时间不少于2分钟,同时监测浆液密度,避免出现离析、沉淀现象;输送采用专用灌浆泵,管道需清洗通畅,输送过程中保持浆液连续流动,防止管道堵塞导致灌浆中断^[3]。(4)灌浆施工:关键在于精准控制灌浆压力,根据压水试验结果和岩层特性分级施加压力,避免压力过高导致岩层抬动破坏,或压力过低无法使浆液充分扩散;分段灌浆需按“自上而下”或“自下而上”的顺序进行,分段长度一般为5-10m,每段灌浆完成后需封堵段间缝隙;灌浆结束标准需满足设计要求,通常以灌浆压力稳定、吸浆量持续减少至规定值,且稳定时间不少于30分钟为准。

2.3 质量控制与检测

(1)施工过程监控:实施全程动态监测,重点监控灌浆压力、浆液流量及浆液密度三大核心参数,采用自动化监测设备实时采集数据,当参数出现异常波动时,及时调整施工方案,如增加浆液浓度、调整灌浆压力等;同时管控灌浆材料进场质量,对水泥、外加剂等原材料进行抽样检测,杜绝不合格材料投入使用,确保施工各环节符合规范要求^[4]。(2)效果检测方法:采用多种检测手段综合验证防渗效果。压水试验在灌浆完成28天后进行,检测孔数量不少于总灌浆孔数的10%,要求渗透系数满足设计限值;物探检测采用地震波法、电磁法等无损检测技术,排查帷幕内部是否存在空隙、不密实等缺陷;钻孔取芯通过对芯样进行外观观察和强度试验,验证浆液固结质量及帷幕与岩层的结合程度,检测不合格区域需及时进行补灌处理。

3 大坝基础防渗中帷幕灌浆技术应用案例分析

3.1 案例选择依据

(1)典型地质条件:选取涵盖深厚覆盖层、断层破碎带、岩溶地区等代表性地质场景的案例,这些地质条件是大坝基础防渗的核心难点,其帷幕灌浆技术应用经验具有广泛借鉴价值,可为同类地质工程提供技术参考。(2)工程规模与防渗要求:兼顾高坝与中低坝不同规模工程,高坝工程通常面临更高的水头压力和更严格的防渗标准,中低坝则侧重经济性与实用性平衡,不同规模案例可覆盖多样化的工程需求场景。

3.2 案例1:白鹤滩水电站大坝基础防渗

(1)工程概况与地质条件:白鹤滩水电站为特高坝工程,大坝最大坝高289米,基础穿越金沙江流域复杂地质带,存在大规模断层破碎带及岩溶发育区,岩层渗透性强,地下水动力条件复杂,防渗难度极大。(2)帷幕灌浆方案设计:采用双排帷幕布置,孔距2.5米、排距2米,灌浆深度穿透透水岩层至隔水层5米以下;材料选用普通硅酸盐水泥+超细水泥复合浆液,针对岩溶区添加化学浆液;工艺采用自上而下分段灌浆,分段长度5米。(3)施工难点与解决措施:难点为断层破碎带易发生串浆、岩溶区冒浆严重且地层吸浆量差异大。解决措施:串浆时采用“间隔灌浆+阻塞器封堵”方式;冒浆区域采用低压慢灌结合间歇灌浆,必要时注入浓浆封堵;根据吸浆量动态调整浆液浓度,确保灌浆密实。(4)应用效果评估:灌浆后基础岩层渗透系数从 10^{-3} cm/s降至 10^{-7} cm/s以下,满足设计限值;通过物探检测及压水试验验证,防渗帷幕连续完整,无明显渗漏通道,保障了特高坝运行安全。

3.3 案例2:密云水库大坝加固工程

(1)既有防渗体系缺陷分析:密云水库为大型综合利用水库,大坝为中低坝,运行多年后原有防渗帷幕出现局部破损,存在裂隙渗漏,部分区域渗透系数超标,同时原有防渗墙与基础结合处出现剥离缝隙,影响防渗稳定性。(2)帷幕灌浆与原有防渗结构结合方案:采用“补孔灌浆+界面补强”方案,在破损帷幕区域布置补充灌浆孔,选用聚合物改性水泥浆液;对防渗墙与基础结合处,采用高压注浆方式填充缝隙,实现新老防渗结构协同工作。(3)长期运行效果监测:通过5年持续监测,防渗帷幕耐久性良好,无新的渗漏缺陷;在汛期高水位作用下,抗冲刷能力达标,坝基渗流量稳定控制在设计允许范围内,加固效果显著,保障了水库长期安全运行。

4 大坝基础防渗中帷幕灌浆技术优化与创新方向

4.1 现有技术瓶颈

(1) 复杂地质条件适应性不足: 在软岩、高水头压力等极端地质环境下, 传统帷幕灌浆技术存在明显短板。软岩地层强度低、易变形, 灌浆压力控制不当易引发岩层抬动或裂隙扩展, 导致帷幕体不密实; 高水头作用下, 水流渗透动力强, 常规浆液易被冲刷稀释, 难以形成稳定的防渗屏障, 无法满足深层、高压工况下的防渗需求。(2) 环保型浆液材料研发滞后: 当前主流灌浆材料多为水泥基浆液或化学浆液, 部分化学浆液存在有毒有害物质残留, 易污染地下水环境; 水泥基浆液生产过程碳排放较高, 且废弃浆液处理难度大, 不符合绿色工程建设理念。同时, 兼具环保性、高耐久性与强适应性的新型浆液种类匮乏, 难以匹配生态敏感区域的工程需求。(3) 施工效率与成本控制矛盾: 传统帷幕灌浆施工多依赖人工操作, 如浆液配比、压力调控等环节自动化程度低, 施工效率低下, 尤其在大规模工程中易延误工期; 若为提升效率盲目增加施工设备与人员投入, 又会导致人力、物力成本激增。此外, 复杂地质条件下的补灌作业频繁, 进一步加剧了效率与成本的失衡问题。

4.2 技术优化方向

(1) 智能化灌浆设备研发: 重点突破自动配浆与压力实时调控技术, 研发集成传感器、智能控制系统的一体化灌浆设备。通过传感器实时采集浆液密度、流量、灌浆压力等参数, 由智能系统自动调整材料配比与压力输出, 减少人工干预, 提升施工精度与效率。同时, 配备数据存储与分析功能, 实现施工过程可追溯, 为质量管控提供数据支撑。(2) 新型环保浆液材料: 聚焦低污染、高固结强度的浆液研发, 利用工业固废(如粉煤灰、矿渣)替代部分水泥, 降低碳排放与资源消耗; 开发生物降解型化学浆液, 减少有毒有害物质释放, 降低对地下水环境的影响。此外, 通过添加新型外加剂优化浆液性能, 提升其在复杂地质条件下的固结强度与抗冲刷能力。(3) 数值模拟与BIM技术应用: 将数值模拟与BIM技术深度融合, 构建大坝基础地质与灌浆施工三维模型。通过数值模拟仿真不同地质条件、施工参数下的浆液扩散过程与帷幕形成效果, 精准预测施工风险; 利用BIM技术实现施工过程可视化管理, 整合勘察、设计、施

工等全流程数据, 优化施工方案, 提升工程统筹效率。

4.3 未来发展趋势

(1) 与其他防渗技术联合应用: 推动帷幕灌浆与高压喷射灌浆、防渗墙等技术的协同融合。针对复杂地质区域, 采用“帷幕灌浆+防渗墙”组合方案, 利用防渗墙阻断浅层大裂隙渗漏, 帷幕灌浆填充深层细微裂隙, 形成多层次、全方位的防渗体系; 在松散地层中, 结合高压喷射灌浆的强扩散能力与帷幕灌浆的高精度优势, 提升防渗效果的稳定性与可靠性。(2) 极端环境下的技术适应性研究: 加强高寒、地震带等极端环境下的帷幕灌浆技术研发。针对高寒地区低温冻融问题, 开发抗冻型浆液材料与防冻施工工艺, 确保帷幕体在低温环境下不脆裂、不失效; 针对地震带区域的抗震需求, 优化帷幕结构设计, 研发柔性注浆材料, 提升帷幕体的抗变形能力, 保障大坝在地震作用下的防渗稳定性。

结束语

帷幕灌浆技术在大坝基础防渗领域发挥着不可替代的重要作用, 凭借其多样的技术分类和突出优势, 有效保障了大坝的安全稳定。然而, 面对复杂地质条件、环保要求以及施工效率与成本等挑战, 该技术仍有待优化创新。未来, 通过智能化设备研发、新材料探索以及与其他技术联合应用等方向的发展, 帷幕灌浆技术将不断提升适应性、环保性与经济性, 为大坝工程的长久安全运行提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1] 关明, 刘向军. 帷幕灌浆施工技术在水库大坝基础防渗加固处理中的应用[J]. 建筑·建材·装饰, 2023(20): 169-171.
- [2] 李毅, 刘田珂. 病险水库大坝加固工程帷幕灌浆施工技术研究[J]. 四川建材, 2024, 50(2): 135-137.
- [3] 范世权. 帷幕灌浆施工技术在水库大坝基础防渗加固处理中的应用[J]. 砖瓦世界, 2022(20): 175-177.
- [4] 司利斌, 郭雷. 帷幕灌浆施工技术在水利工程大坝基础防渗加固处理中的应用研究[J]. 价值工程, 2025, 44(11): 128-130.