

灌浆施工技术在水利水电工程防渗处理中的应用研究

刘喜东

陕西省汉中市宁强县水利资源发展服务中心 陕西 汉中 724400

摘要: 文章立足于灌浆施工技术的防渗机理与类型, 围绕灌浆施工技术在水利水电工程防渗处理中的应用展开研究。首先, 系统阐述灌浆施工技术的防渗机理, 深入分析其在大坝基础、隧洞围岩等不同工程场景的具体应用, 探讨灌浆施工的关键技术与质量控制方法, 并通过实际工程案例验证技术的有效性。研究结果表明, 基于地层特性的灌浆压力计算模型与分序次灌浆工艺显著提升防渗效果, 差异化灌浆技术方案能满足不同工程需求, 复合灌浆工艺在复杂地层适应性良好。本研究为水利水电工程防渗处理提供了科学依据与实践指导。

关键词: 灌浆施工技术; 水利水电工程; 防渗处理; 质量控制

引言

水利水电工程作为保障水资源合理利用与能源供应的重要基础设施, 其防渗处理直接关系到工程的安全性与耐久性。渗漏问题不仅会导致水资源浪费, 还可能引发坝基失稳、隧洞坍塌等严重事故。灌浆施工技术凭借其高效、灵活的特点, 成为水利水电工程防渗处理的关键手段。通过将灌浆材料注入地层裂隙或孔隙, 能够有效降低介质渗透系数, 形成防渗帷幕。随着水利水电工程建设向复杂地质条件区域拓展, 对灌浆施工技术的科学性与精准性提出了更高要求。本文从灌浆施工技术的防渗机理出发, 系统研究其在水利水电工程防渗处理中的应用, 旨在为工程实践提供理论支撑与技术参考。

1 灌浆施工技术的防渗机理与分类

1.1 灌浆防渗的基本原理

灌浆施工技术的核心在于利用压力将灌浆材料注入岩土体裂隙或孔隙中, 通过物理填充与化学胶结作用,

改变介质的渗透特性, 降低其渗透系数。根据不同的作用方式, 灌浆可分为渗透灌浆、压密灌浆和劈裂灌浆三种类型。

渗透灌浆适用于裂隙发育的岩石地层, 其原理是在压力作用下, 灌浆材料以渗透方式填充岩石裂隙, 形成连续的防渗结构, 从而阻断水流通道。压密灌浆则通过浆体膨胀产生的压力, 挤压周边土体, 使土体孔隙减小, 密实度增加, 进而提高土体的防渗性能。劈裂灌浆主要应用于低渗透性地层, 当灌浆压力超过地层的抗裂强度时, 地层中会形成劈裂通道, 灌浆材料随之填充其中, 形成防渗帷幕^[1]。

1.2 灌浆材料与技术分类

不同的灌浆材料与技术适用于不同的地层条件, 其防渗特点也各有差异。常见的灌浆类型包括水泥灌浆、化学灌浆和复合灌浆(表1)。

表1 常见灌浆类型、材料、适用地层及防渗特点对比表

灌浆类型	主要材料	适用地层	防渗特点
水泥灌浆	普通硅酸盐水泥	岩石、砂砾石地层	可将地层渗透系数降低至 10^{-5} cm/s及以下
化学灌浆	聚氨酯、环氧树脂	粉细砂、黏土地层	渗透性好, 固化快, 成本较高
复合灌浆	水泥+化学添加剂	复杂裂隙地层	综合性能优, 适应范围广

水泥灌浆以普通硅酸盐水泥为主要材料, 因其成本低、强度高, 在岩石和砂砾石地层的防渗处理中广泛应用, 可将地层渗透系数降低至 10^{-5} cm/s及以下。化学灌浆采用聚氨酯、环氧树脂等材料, 具有良好的渗透性和快

速固化特性, 适用于粉细砂、黏土地层等难以用水泥灌浆处理的地层, 但成本相对较高。复合灌浆结合了水泥和化学添加剂的优势, 在复杂裂隙地层中展现出良好的综合性能, 既能保证防渗效果, 又能适应不同的地质条件^[2]。

1.3 灌浆压力计算模型

灌浆压力是影响灌浆效果的关键参数之一, 压力过大可能导致地层破坏, 压力过小则无法保证灌浆材料充分填充裂隙。为准确计算灌浆压力, 建立基于地层特性的灌浆压力模型:

作者简介: 刘喜东(1975年—), 男, 汉族, 陕西宁强人, 水利水电工程专业高级工程师, 水利水电工程与管理专业大专学历。主要研究方向: 水利水电工程规划、勘察设计、建设与管理。

$$P = 0.25\gamma H + K$$

式中：P为灌浆压力（MPa）， γ 为浆液容重（kN/m³），H为灌浆深度（m），K为地层修正系数（岩石地层取0.3-0.5，砂砾石地层取0.5-0.8）^[3]。该模型综合考虑了浆液容重、灌浆深度和地层特性等因素，为不同地层条件下的灌浆施工提供了科学的压力计算依据，确保灌浆施工既能达到良好的防渗效果，又能保证地层的稳定性。

2 水利水电工程防渗处理的灌浆技术应用

2.1 大坝基础防渗灌浆

2.1.1 帷幕灌浆工艺

在大坝基础防渗处理中，帷幕灌浆是常用的技术手段。采用三排孔布置方式，孔距设定为2.0m，排距为1.5m，这种布置方式能够形成连续、有效的防渗帷幕。灌浆顺序遵循“分序加密”原则：首先施工下游排孔，降低下游水位，减少灌浆过程中的水压力影响；接着施工上游排孔，形成初步的防渗屏障；最后施工中间排孔，进一步加密灌浆，提高帷幕的防渗性能。每排孔又分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序次施工，通过逐步加密的方式，使灌浆材料充分填充地层裂隙，提高灌浆效果。终灌标准设定为压力达到设计值，且注入率 $\leq 1\text{L}/\text{min}$ 并持续30min，以此确保帷幕的密实度和防渗效果^[4]。

2.1.2 特殊地层处理

对于喀斯特地区等溶洞发育的特殊地层，常规的灌浆工艺难以达到理想的防渗效果。针对此类地层，采用“充填-固结-帷幕”三级灌浆工艺。首先，使用级配砂石对大溶洞进行填充，初步堵塞溶洞通道，减少水流通量；然后，注入水泥浆对破碎岩体进行固结，增强岩体的整体性和强度；最后，施工水泥-水玻璃双液灌浆帷幕，利用双液浆的快速凝固特性，形成密实的防渗结构，有效阻断地下水的渗透路径^[5]。

2.2 隧洞围岩防渗灌浆

2.2.1 超前预灌浆技术

在隧洞开挖前，为防止开挖过程中出现涌水、塌方等问题，采用管棚式超前灌浆技术。钻孔直径设定为76mm，外插角控制在5°-10°，以确保注浆管能够有效覆盖开挖前方的地层区域。注浆管选用 $\Phi 42\text{mm}$ 无缝钢管，长度为6-8m，保证其具有足够的强度和注浆范围。浆液采用1:1水泥浆，压力控制在0.5-1.0MPa，在该压力下，水泥浆能够充分渗透到地层裂隙中，形成预加固和防渗结构，为隧洞开挖创造安全的施工条件。

2.2.2 后处理灌浆工艺

隧洞开挖完成后，对于出现渗漏水点的区域，采用埋管注浆处理工艺。首先，钻孔至漏水点后方0.5m处，

确保钻孔深度能够覆盖漏水区域；然后，埋设 $\Phi 25\text{mm}$ 注浆管，其深度 $\geq 1.5\text{m}$ ，保证注浆管能够有效注入浆液。注入聚氨酯浆液，该浆液具有良好的膨胀性能，膨胀倍数 ≥ 20 倍，能够充分填充裂隙，封堵渗漏水通道，达到良好的防渗效果。

3 灌浆施工关键技术与质量控制

3.1 灌浆参数优化

3.1.1 浆液配比设计

针对砂砾石地层的特性，优化设计水泥浆配比至关重要。水灰比控制在0.8:1-1:1之间，这一比例范围能够在保证水泥浆具有良好流动性的同时，确保其硬化后具有足够的强度，满足防渗工程的要求。当水灰比过大时，水泥浆流动性过强，硬化后强度较低；水灰比过小时，水泥浆流动性差，不利于灌注施工。

添加3%-5%的UEA膨胀剂，UEA膨胀剂能够在水泥浆硬化过程中产生适度的膨胀，有效补偿水泥浆因水化反应导致的收缩，提高浆液与地层之间的粘结性能，增强防渗结构的整体性和稳定性^[6]。

砂率控制在10%-15%（采用中粗砂），适量的中粗砂能够增加浆液的内摩擦力和抗渗性能，提高结石强度，使灌浆后的防渗结构更加坚固耐用，有效抵御地下水的渗透压力。

3.1.2 施工工艺控制

采用“小泵量、慢升压”的灌浆方式，严格控制施工工艺参数，以确保灌浆施工的质量和效果。

初始泵量不超过30L/min，较小的初始泵量可以避免因瞬间压力过大对地层造成破坏，使地层有一个逐渐适应压力变化的过程，防止地层出现劈裂或抬动现象。

压力提升速率不超过0.1MPa/5min，缓慢的压力提升速度能够使灌浆材料充分渗透到地层裂隙中，同时避免压力突变对地层结构造成损害。每级压力维持时间不少于15min，确保灌浆材料在该压力下充分扩散和填充裂隙，提高灌浆的密实度和防渗效果。

3.2 质量检测方法

3.2.1 渗透系数检测

渗透系数是衡量防渗帷幕灌浆性能的关键指标，采用压水试验进行测定。检测孔的布置需遵循科学合理的原则（图1），通常在灌浆孔之间或根据地质勘察结果判断的帷幕薄弱区域布置检测孔。检测孔与灌浆孔保持适当的距离，以准确反映防渗帷幕的实际渗透性能。

在压水试验过程中，通过向检测孔内施加不同压力的水流，测量单位时间内的吸水量，根据相关公式计算出地层的渗透系数。将计算得到的渗透系数与设计要求

的渗透系数进行对比,判断防渗帷幕是否满足工程的防渗要求。若渗透系数不达标,则需分析原因,采取相应的补强灌浆措施,确保防渗效果。

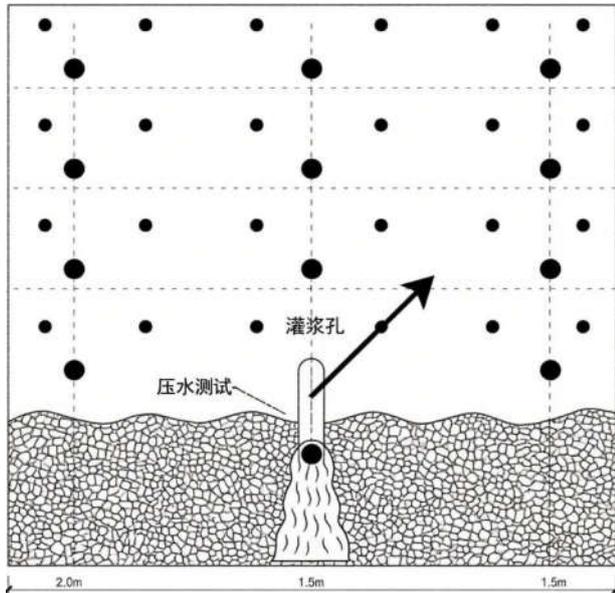


图1 灌浆孔与检测孔的平面布置关系

注:灌浆孔分三排布置(孔距2.0m,排距1.5m),检测孔位于灌浆孔中间区域,孔深穿透帷幕底线5m,箭头方向表示压水试验水流方向

3.2.2 物探检测

使用地质雷达扫描帷幕体的完整性是一种高效、无损的检测方法。地质雷达以200MHz的检测频率、10-20m/min的扫描速度对帷幕体进行探测。

地质雷达发射的高频电磁波在遇到不同介质的界面时会发生反射,通过接收和分析反射波的信号特征,能够识别出帷幕体中存在的空洞、不密实区域等缺陷。该方法能够检测出尺寸不小于0.2m的缺陷区,为及时发现和处理帷幕体中的质量问题提供了准确的依据。一旦发现缺陷,可根据缺陷的具体情况采取针对性地处理措施,确保防渗帷幕的整体质量和防渗性能。

4 工程案例

4.1 案例概况

某水库大坝基础为砂砾石地层,地质条件复杂,渗透问题突出。大坝最大坝高85m,坝基宽度达120m,原始地层渗透系数为 $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,严重威胁大坝的安全稳定运行。根据工程设计要求,需将防渗帷幕的渗透系数降低至不大于 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$,以满足大坝防渗和稳定的要求。

4.2 灌浆方案设计

针对该水库大坝基础的地质条件,经过详细的技术经济分析,最终确定采用水泥-水玻璃双液灌浆工艺。

灌浆孔深度设定为45m,分5序次进行施工。分序次施工能够逐步加密灌浆,使灌浆材料更充分地填充地层裂隙,提高灌浆效果和防渗帷幕的密实度。水玻璃浓度选择35Be',模数为2.4,该浓度和模数的水玻璃与水泥浆混合后,能够实现快速凝固,在砂砾石地层中形成有效的防渗结构。水泥浆水灰比为1:1,双液体积比同样为1:1,在此配比下,双液浆具有良好的流动性和合适的凝固时间,既能保证浆液顺利灌注,又能在短时间内形成具有一定强度的防渗体。

4.3 实施效果

经过严格按照灌浆方案进行施工后,对防渗帷幕进行全面检测。检测结果显示,帷幕体平均渗透系数达到 $8.6 \times 10^{-8} \text{cm/s}$,显著低于设计要求的 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$,表明防渗帷幕的防渗性能完全满足工程要求。

同时,灌浆后坝基扬压力大幅降低,渗漏量得到有效控制,有力地保障了大坝的安全运行。与传统的单液灌浆工艺相比,采用水泥-水玻璃双液灌浆工艺在保证防渗效果的前提下,大幅缩短了施工工期,有效降低了工程成本,充分体现了该工艺在砂砾石地层防渗处理中的优越性和实用性。

5 结论与展望

5.1 结论

建立的基于地层特性的灌浆压力计算模型,结合分序次灌浆工艺,在砂砾石地层等工程实践中取得显著成效,可使地层渗透系数降低4-5个数量级,为灌浆施工压力控制提供了科学依据。

针对大坝基础与隧洞围岩等不同水利水电工程场景,形成了差异化的灌浆技术方案,通过工程案例验证,这些方案具有良好的防渗效果和工程适应性。

复合灌浆工艺在复杂地层的防渗处理中展现出良好的综合性能,既能满足防渗要求,又能实现地层加固,为复杂地质条件下的工程建设提供了有效技术手段。

5.2 未来展望

随着智能化技术的发展,应加强智能灌浆监控系统的研发与应用,实现对灌浆过程中压力、流量、浆液浓度等参数的实时监测与自动调整,提高灌浆施工的精准性和效率。

鉴于环保要求的不断提高,需加大对环保型化学灌浆材料的研发力度,降低化学灌浆材料对水环境和土壤环境的潜在影响,实现水利水电工程建设的绿色发展。

探索3D地质模型与灌浆设计的深度融合,利用3D地质模型更直观、准确地反映地层结构和地质条件,为灌浆方案设计提供更精准的基础数据,进一步提升灌浆设

设计的科学性和合理性。

参考文献

[1]张宏远.浅析水利水电工程防渗施工技术分析[J].水上安全,2024,(06):187-189.

[2]陈静林.水利水电工程灌浆施工技术与质量管理对策研究[J].中国设备工程,2024,(05):255-258.

[3]陈立文,周敏.复合灌浆工艺在砂砾石地层中的应用[J].水力发电,2022,48(09):34-38.

[4]伏杰,徐书洋,戴莹,王浩宇,鲍书娜.灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用[J].中国新技术新产品,2023,(24):118-120.

[5]蔡兴浩.水利水电工程防渗施工技术探讨[J].工程技术研究,2023,8(24):86-88.

[6]王雄.水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用[J].山西水利,2023,(12):48-49+53.