

水库大坝渗流监测与防渗技术研究

屈 龙

新疆生产建设兵团第七师奎屯河引水工程建设管理局 新疆 奎屯 833200

摘 要：本文围绕水库大坝渗流监测与防渗技术展开研究。分析了大坝渗流特性，包括渗流基本理论、影响因素及破坏类型与机理；探讨了传统与现代渗流监测技术，以及监测系统的设计与优化；阐述了防渗技术体系，涵盖防渗墙、灌浆、复合土工膜及其他防渗技术；提出了渗流监测与防渗技术的协同应用策略。为水库大坝的安全运行提供技术支持，保障其防渗性能，确保水库大坝的安全稳定。

关键词：水库大坝；渗流监测；防渗技术；协同应用

引言：水库大坝作为重要水利设施，其安全运行至关重要，而渗流问题是大坝安全的主要隐患之一。为有效应对这一挑战，本文深入探讨了水库大坝的渗流监测与防渗技术。研究全面分析了渗流特性，介绍了先进的监测技术与方法，并构建了完善的防渗技术体系。同时强调了监测与防渗技术的协同应用，以期为水库大坝的安全运行与管理提供科学依据和技术支撑，确保水利工程效益与人民生命财产安全。

1 水库大坝渗流特性分析

1.1 渗流基本理论

渗流，是水在土体或岩体孔隙中的流动现象，其基本理论依托达西定律与渗流基本方程。达西定律表明，层流状态下，渗流速度与水力梯度呈线性关联，二者关系为渗流速度等于渗透系数乘以水力梯度。渗透系数反映介质透水能力，受孔隙率、颗粒形状与排列影响。渗流基本方程以达西定律为根基，结合连续性方程，描述渗流场水流的动态平衡。渗流场通过水头、流速场、压力场等参数表征。渗流力方向与渗流一致，大小与水力梯度成正比，当超过土颗粒有效重力，可能引发渗流破坏。

1.2 大坝渗流影响因素

大坝渗流特性受地质、水文、坝体结构与材料特性综合作用。地质条件中，岩土类型与裂隙发育程度影响显著。砂土渗透系数大，易形成渗流通道；黏土渗透系数小，渗流路径复杂。裂隙发育的岩体则可能成为渗流优势通道，增加局部渗流量^[1]。水文条件方面，水位变化与降雨入渗是主要驱动力。水位升降改变坝体内外水头差，影响渗流方向与速度；降雨入渗增加坝体含水量，降低抗渗能力。坝体结构与材料特性上，坝体材料类型（如混凝土、土石料）及其密实度、孔隙率决定渗透性能，坝体与坝基接触面处理方式（防渗墙、灌浆帷幕等）对渗流控制起关键作用。

1.3 渗流破坏类型与机理

渗流破坏主要有管涌、流土、接触冲刷等形式。管涌是渗流作用下，土体细颗粒被水流带走的现象，常见于砂土或砂砾石层。流土是土体在渗流力作用下整体上浮或隆起，多发生于黏性土或粉质土。接触冲刷指不同介质接触面在渗流作用下颗粒迁移，常出现在坝体与坝基、岸坡接触带。渗流破坏临界水力梯度是判断渗流稳定性的关键指标，实际水力梯度超临界值，土体结构就会被破坏。临界水力梯度与土体颗粒级配、孔隙率、渗透系数相关。均匀砂土临界水力梯度低，易发生管涌；级配良好土体因颗粒咬合作用强，临界水力梯度相对较高。渗流路径曲折程度、渗流速度分布等也影响临界水力梯度取值。渗流特性分析需结合理论模型与实际工况，通过渗流监测与数值模拟，揭示渗流场时空演化规律，评估渗流破坏风险，为防渗设计提供依据。未来研究应深入探索复杂地质条件下渗流机理，发展多尺度、多场耦合数值模拟技术，提升渗流预测与控制的精度和可靠性。

2 渗流监测技术与方法

2.1 传统监测技术

传统渗流监测技术以直接观测与简单仪器测量为核心，主要包括测压管法、渗压计法、钻孔测斜及水位观测技术。测压管法通过埋设于坝体或坝基中的测压管，利用液面高度反映测点水头变化，适用于浅层渗流监测。测压管需定期校准，避免管内淤积影响测量精度。渗压计法采用高灵敏度传感器直接测量土体或岩体中的孔隙水压力，其优势在于可连续记录数据，适用于深层及动态渗流监测。渗压计需考虑温度补偿与长期稳定性，确保测量结果可靠。钻孔测斜技术通过监测钻孔内测斜仪的倾斜角度变化，评估坝体或坝基的变形与渗流引起的应力调整。该技术可揭示渗流对坝体稳定性的潜

在影响,但需注意钻孔对土体结构的扰动。水位观测技术则通过水位计或浮子式水位计,实时监测库水位及坝体内外水位差,为渗流分析提供基础数据。水位观测需确保设备耐久性,避免极端水位波动导致设备损坏。

2.2 现代监测技术

现代渗流监测技术依托新型传感器与信息化手段,显著提升了监测精度与效率。分布式光纤传感技术(DTS/DAS)通过光纤中光的散射特性,实现温度、应变或振动的分布式测量,进而反演渗流场变化。DTS技术可连续监测光纤沿线的温度分布,通过热传导效应间接推算渗流速度;DAS技术则通过光纤振动信号分析,识别渗流引起的微小形变^[2]。该技术具有抗干扰能力强、空间分辨率高的优势,但需解决光纤长期埋设的耐久性问题。地球物理探测技术包括电阻率法与探地雷达,前者通过测量土体电阻率变化推断含水率分布,后者利用高频电磁波反射特性探测地下结构。地球物理探测技术适用于大范围、非破坏性监测,但需结合地质资料进行数据解释,避免多解性。无人机与遥感监测技术通过搭载高分辨率相机或红外传感器,获取坝体表面形变、温度异常等信息。无人机可实现快速巡查,遥感技术则适用于长期监测,二者结合可有效识别渗流引起的表面裂缝或湿润区。

2.3 监测系统设计与优化

监测系统设计需遵循科学性、经济性与可维护性原则。监测点布置需覆盖坝体、坝基及坝肩等关键区域,重点关注渗流优势通道、地质缺陷带及结构薄弱部位。监测点密度需根据坝体规模、地质条件及监测目标动态调整,例如高风险区域应加密布置,低风险区域可适当稀疏。数据采集与传输系统需确保数据实时性、准确性与完整性。采集设备应具备自动校准功能,传输网络需冗余设计,避免数据丢失。数据实时处理与分析方法包括阈值预警、时序分析、空间插值及数值模拟等。阈值预警通过设定安全阈值,快速识别异常数据;时序分析可揭示渗流趋势变化;空间插值可生成渗流场分布图;数值模拟则用于验证监测结果并预测渗流发展。监测系统优化需结合新技术发展,例如引入机器学习算法提升数据解析能力,或采用物联网技术实现设备远程控制与状态监测。

3 防渗技术体系

3.1 防渗墙技术

防渗墙技术通过构建连续的墙体结构阻断渗流通道,是水库大坝防渗的核心手段之一。混凝土防渗墙采用刚性材料,适用于深厚覆盖层或岩基,其强度高、抗

渗性好,但施工难度较大,需解决槽孔稳定与混凝土浇筑质量控制问题。塑性混凝土防渗墙在混凝土中掺入膨润土等掺合料,降低弹性模量,增强变形适应性,适用于地基变形较大的区域。高压喷射灌浆防渗墙利用高压水流切割地层,同步注入水泥浆液形成防渗体,适用于松散地层或裂隙发育岩体。该技术施工效率高,但需注意浆液扩散范围与墙体均匀性控制。防渗墙施工工艺包括成槽、清孔、浇筑或喷射等环节。成槽需根据地质条件选择抓斗、冲击钻或旋挖钻等设备,确保槽孔垂直度与深度满足设计要求。清孔需彻底清除槽底沉渣,避免影响墙体与基岩接触质量。浇筑或喷射过程中需控制材料配比与施工参数,确保墙体连续性与完整性。质量控制需贯穿施工全过程,包括原材料检验、过程监测与成品检测,例如通过钻孔取芯验证墙体强度与抗渗性。

3.2 灌浆防渗技术

灌浆防渗技术通过向地层或结构裂缝注入浆液,填充空隙并形成防渗帷幕。帷幕灌浆主要针对坝基岩体,采用水泥浆液或化学浆液,沿设计轴线布置灌浆孔,形成连续的防渗屏障。固结灌浆则用于加固坝体或地基,通过提高岩体整体性减少渗流通道。化学灌浆利用高分子材料(如环氧树脂、聚氨酯)的黏结性与渗透性,适用于细微裂隙或混凝土缺陷修复。高分子材料灌浆可实现快速固化与高强度粘结,但需注意材料耐久性与环境影响。灌浆效果检测与评价需综合多种方法。压水试验通过向灌浆孔注水,测量单位吸水量,评估岩体渗透性改善程度。钻孔取芯可直观观察浆液填充情况与结石体质量^[3]。声波检测则利用弹性波传播特性,推断岩体密实度与裂缝愈合情况。数值模拟与长期监测数据对比分析,可验证灌浆工程的防渗效果与耐久性。

3.3 复合土工膜防渗技术

复合土工膜防渗技术以土工膜为核心材料,通过铺设与连接形成柔性防渗层。土工膜材料需具备高抗拉强度、低延伸率与优异的抗渗性能,常见类型包括聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)及乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)。材料选型需考虑工程环境(如温度、化学腐蚀)与使用年限,例如紫外线照射会导致PE膜老化,需采取防护措施。土工膜铺设需确保平整无褶皱,接缝处理是关键环节。焊接法通过热风枪或高频焊接机实现膜材熔融结合,适用于大面积铺设;粘结法则采用专用胶水,适用于复杂地形或修补作业。连接质量需通过剥离试验与气压检测验证。防渗系统耐久性分析需考虑材料老化、生物侵蚀与机械损伤等因素,例如植物根系穿刺可能破坏土工膜,需设置保护层或采用抗穿刺型土工膜。

3.4 其他防渗技术

混凝土面板堆石坝防渗体系通过在堆石体上游面铺设钢筋混凝土面板,形成刚性防渗屏障。面板需具备抗裂性与抗渗性,分缝设计与止水结构是关键。沥青混凝土心墙防渗技术利用沥青混凝土的自密实性与柔性,适应地基变形,施工需控制温度与压实度,避免裂缝与渗流通道形成。生态防渗技术强调与自然环境的协调性,例如植被护坡通过根系固土与植被覆盖,减少雨水入渗与坡面侵蚀。生态袋、土工格栅等材料可辅助植被生长,同时提供一定的防渗功能。生态防渗技术需平衡防渗效果与生态效益,避免过度工程化导致生态破坏。防渗技术体系需根据工程特点与地质条件综合选择,实现安全、经济与环保的统一。未来研究应聚焦于新型材料开发、施工工艺创新与全生命周期性能评估,推动防渗技术向智能化、绿色化方向发展。

4 渗流监测与防渗技术协同应用

4.1 监测-预警-反馈机制

构建基于监测数据的渗流风险预警模型对保障工程安全意义重大。在工程关键部位部署渗压计、流量计等设备,持续采集渗流压力、流量变化、水质特征等数据。运用先进算法与数学模型深度分析这些数据,一旦数据超出预设安全阈值,模型立即触发预警信号,以声光警报、系统弹窗等直观形式呈现,让相关人员及时察觉渗流异常。防渗措施依预警反馈动态调整优化。预警模型报警后,迅速评估防渗措施。针对渗流路径改变、渗流量突增等异常,精准剖析根源。若是防渗材料局部损坏,即刻安排专业人员修补或更换;若因地质条件变化影响防渗效果,重新设计方案,调整防渗材料铺设方式或增加处理深度、范围,有效应对渗流风险。

4.2 数值模拟与监测数据融合

渗流有限元模拟通过构建复杂数学模型,综合考虑工程地质结构、防渗设施布局、水力边界条件等,对渗流场展开模拟分析。将模拟结果与实际监测数据对比,能检验模型准确性与可靠性。若二者偏差大,深入排查原因,可能是参数设置不当或关键因素考虑不周。不断校准模型,使其更精准反映实际渗流情况^[4]。数值模拟在防渗设计中起重要指导作用。工程规划阶段,利用模拟

预演不同防渗方案,对比渗流场分布、渗流量等指标,评估防渗效果,据此选出最优方案,避免施工后才发现防渗缺陷,降低工程成本与安全风险。

4.3 多技术耦合防渗体系

多技术耦合防渗体系整合防渗墙、灌浆、土工膜等技术优势构建综合屏障。在防渗墙+灌浆+土工膜组合中,防渗墙作为刚性结构阻断深层渗流通道,灌浆加固坝基岩体、填充防渗墙接缝缺陷,土工膜覆盖坝体表面形成柔性防渗层。不同技术通过空间互补与功能叠加协同作用:防渗墙与灌浆协同控制坝基渗流,土工膜增强坝体表面抗渗能力,防渗墙与土工膜接缝处用灌浆或密封胶处理,防止形成渗流优势通道。多技术耦合需解决技术衔接难题,如防渗墙施工避免破坏土工膜,控制灌浆压力以防土工膜变形。还需长期监测验证协同效应,评估各技术对渗流控制的贡献率,为后续防渗加固提供优化方向。渗流监测与防渗技术协同以数据驱动为核心,融合监测预警、数值模拟与多技术耦合手段,实现防渗工程全生命周期管理。未来研究应着重开发智能化监测装备、推进多物理场耦合模拟技术、提升防渗材料耐久性,推动防渗体系朝高效、精准、可持续方向发展。

结束语

水库大坝渗流监测与防渗技术研究对保障大坝安全意义深远。通过分析渗流特性、介绍监测技术与方法、构建防渗技术体系,以及强调监测与防渗的协同应用,为解决大坝渗流问题提供了全面思路。未来,应持续探索新技术、新方法,不断提升监测精度与防渗效果,加强多技术耦合研究,推动防渗体系向智能化、绿色化发展,为水库大坝的安全稳定运行提供更可靠的保障。

参考文献

- [1]陈伟强.大坝渗流控制与安全管理的实践探索[J].岩土工程学报,2021,39(3): 238-245.
- [2]何时建.溪源水库大坝安全位移监测自动化改造浅析[J].黑龙江水利科技,2022,50(05):169-173.
- [3]周海波.水库大坝渗漏问题与加固措施的探讨[J].水利科学进展,2023,50(2): 302-309.
- [4]陈金强.中型水库大坝安全监测与评估技术研究[J].装饰装修天地,2023(24):73-75.