

水库防渗工程新型材料选型与施工工艺创新

王 耀

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：水库防渗工程对保障蓄水安全意义重大。本文先阐述防渗工程核心要求与技术基础，包括技术指标与工程技术体系。接着分析新型材料分类与特性，涵盖高分子合成、无机改性、生态友好型材料。随后构建选型体系，探讨选型影响因素、原则方法与风险防控。最后提出施工工艺创新路径，涉及高分子、无机改性、生态友好型材料施工工艺及施工装备与技术集成创新，为水库防渗工程提供全面指导。

关键词：水库防渗工程；新型材料选型；施工工艺创新

引言：水库作为重要的水利工程设施，在防洪、灌溉、供水、发电等方面发挥着不可替代的作用。然而，水库渗漏问题一直是影响其安全运行与效益发挥的关键因素。传统的防渗材料与施工工艺在应对复杂地质条件、长期运行需求以及环保要求等方面逐渐显现出局限性。因此，探索水库防渗工程新型材料选型与施工工艺创新，成为提升水库防渗性能、保障水库长期稳定运行的重要课题，对推动水利事业可持续发展具有重要意义。

1 水库防渗工程核心要求与技术基础

1.1 防渗工程核心技术指标

水库防渗工程需满足一系列严格的技术指标，以确保长期稳定运行与防渗效能。渗透系数作为衡量材料防渗性能的关键参数，要求所选材料必须具备极低的渗透性，一般要求渗透系数低于 $1 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ ，有效阻止水分渗透，保障水库蓄水安全^[1]。抗渗耐久性则是评估材料在长期水压、水流冲刷及环境因素作用下保持防渗性能的能力，需确保材料在至少50年的使用周期内仍能维持稳定防渗效果。材料与结构的力学适配性同样重要，涉及抗裂、抗压、抗冻融等多方面性能。抗裂性能要求材料在温度变化范围达 -30°C 至 50°C 、地基沉降达5厘米的条件下不易产生裂缝，抗压性能则需满足水库水位变化达20米及外部荷载达100千牛/平方米作用下的强度要求，抗冻融性能则针对寒冷地区，确保材料在经历300次冻融循环后不发生破坏。环境适应性方面，材料需具备耐酸碱、抗腐蚀特性，以应对水库水质pH值在4-9范围内的变化及化学侵蚀，同时需适应水温在 0°C 至 40°C 的变化，避免因热胀冷缩导致性能下降。

1.2 防渗工程技术体系基础

防渗工程技术体系涵盖多种结构类型与技术分类，包括水平防渗、垂直防渗及复合防渗等。水平防渗通过铺设防渗膜、压实黏土等材料形成连续防渗层，一般防

渗膜厚度为0.5-2毫米，压实黏土层厚度为0.8-1.5米；垂直防渗则采用灌浆、防渗墙等技术构建垂直屏障，防渗墙深度可达50-100米，灌浆孔间距为1-3米；复合防渗则结合两者优势，形成多层次防渗体系。新型材料与工艺创新的技术衔接点在于，需针对传统材料与工艺的局限性，开发具备更高性能、更易施工、更环保的新型材料，并优化施工工艺，实现材料性能与施工效率的双重提升，推动防渗工程技术向更高水平发展。

2 水库防渗工程新型材料分类与特性分析

2.1 高分子合成类防渗材料

高分子合成类防渗材料凭借优异的物理化学性能，在水库防渗工程中占据重要地位。土工合成材料，如新型土工膜与复合土工布，由高分子聚合物经特殊工艺加工而成，厚度范围为0.5mm-3.0mm，具备低渗透系数、高抗拉强度及良好柔韧性，其抗拉强度可达15MPa以上。其抗渗机理在于材料分子结构紧密，这种紧密结构使得水分分子难以穿透，而且材料整体质地均匀，有效阻止了水分分子通过，进而减少了渗漏通道的形成^[2]。高分子涂料，如弹性聚氨酯与丙烯酸酯，具有优异的成膜特性，能在基材表面形成连续、致密的防水层，干膜厚度通常控制在1.2mm-2.0mm。这类涂料粘结性能强，可与多种基材牢固结合，且耐老化性突出，能在长期紫外线照射与温度变化下保持性能稳定。高分子复合材料则通过功能复合方式，将不同高分子材料的优势结合，形成综合性能更优异的新型防渗材料，如兼具高强度与高柔韧性的复合土工膜，有效提升了防渗工程的可靠性与耐久性。

2.2 无机改性类防渗材料

无机改性类防渗材料通过物理或化学方法对传统无机材料进行改性，显著提升了其防渗性能。改性水泥基材料，如渗透结晶型与纤维增强型水泥，通过优化水化

机理,使水泥石结构更加致密,28天抗压强度可达35MPa以上,渗透系数可降低至 1×10^{-8} cm/s以下。纤维的加入增强了材料的抗裂性能,实现了强度与抗渗的协同提升。新型灌浆材料,如超细水泥基与化学改性无机浆,颗粒直径可细至5 μ m以下,具有优异的流动性与凝结特性,能深入渗透到地基裂缝中,形成坚固的结石体,结石体抗压强度可达25MPa以上。矿物基复合防渗材料则通过矿物组分优化,利用不同矿物间的协同作用,提升了材料的抗渗性能与界面结合强度,适用于复杂地质条件下的防渗工程。

2.3 生态友好型防渗材料

生态友好型防渗材料注重材料的环境友好性与可持续性。可降解高分子防渗材料在保持使用周期内抗渗稳定性的同时,能在自然环境中逐渐降解,其有效使用年限可达15年以上,降解周期控制在20年以内,减少了对环境的长期污染。植物纤维复合防渗材料以天然植物纤维为原料,经特殊工艺加工成型,厚度通常为2mm-5mm,具有良好的抗渗性能与生态相容性,适用于对环保要求较高的防渗工程。生态相容型无机材料则通过优化材料配方与制备工艺,减少了对水体与周边生态的影响,实现了防渗工程与生态环境的和谐共生。

3 新型防渗材料选型体系构建

3.1 选型核心影响因素分析

新型防渗材料选型需综合考量多重核心因素。工程地质与水文条件适配性是首要考量,地基特性如软土、岩基等对材料承载力与变形要求各异,地下水位高低则直接影响材料抗浮与防渗压力,当地下水位高于防渗层底部3m以上时,需选用抗浮性能更强的材料^[3]。水库运行工况要求同样关键,水位频繁变化(年变幅超过10m)要求材料具备良好柔韧性与抗疲劳性能,水温范围波动大(超过40 $^{\circ}$ C)则需材料耐温变能力强,避免因热胀冷缩导致开裂。材料自身性能匹配度需与工程指标紧密契合,如渗透系数需远低于工程允许值,抗拉强度需满足地基沉降与水流冲刷要求。施工条件约束亦不可忽视,施工环境如高温(超过35 $^{\circ}$ C)、高湿或寒冷(低于-10 $^{\circ}$ C)地区对材料施工性能提出特殊要求,设备适配性则关乎施工效率与质量,需确保材料能与现有施工设备良好配合。

3.2 选型原则与方法

选型应遵循性能优先、经济合理、技术可行原则。性能优先确保材料满足工程防渗核心需求,经济合理则要求在全生命周期内成本最优,技术可行则需材料施工工艺成熟,易于操作。多因素综合评估方法通过构建

特性匹配矩阵,量化材料性能与工程需求的契合度,结合层次分析逻辑,对各因素权重进行科学分配,形成综合选型方案。针对不同工程场景,材料选型导向需差异化。坝体防渗需注重材料抗裂与耐久性,其伸长率需达到15%以上;坝基防渗则强调材料与地基的粘结强度,粘结强度需不低于2MPa;库区防渗则需考虑材料大面积铺设的便捷性与成本,单卷材料长度宜选用50m以上规格。

3.3 选型风险防控要点

选型过程中需重点识别材料性能衰减风险,此风险关乎工程长期防渗性能的稳定性。环境因素如紫外线、化学腐蚀、冻融循环等均可能引发材料性能下降,需通过加速老化试验等手段提前评估,模拟材料在数十年使用周期内的性能变化趋势,为材料选型提供科学的数据支撑,保障选型决策的准确性。选型与施工的衔接风险亦需规避,若衔接不当将严重影响工程进度与质量。如材料施工窗口期短与施工进度冲突、材料性能与施工工艺不匹配等,需通过施工前模拟试验与工艺优化,确保选型材料能顺利转化为高质量防渗工程,实现选型与施工的无缝对接。同时,还需关注材料供应链风险,稳定的供应链是工程顺利推进的重要保障。优先选择产能稳定、质量可控的供应商,避免因材料供应中断或质量波动影响工程进度与质量,建立多渠道供应商备选机制,提升选型方案的抗风险能力,确保工程顺利完工。

4 水库防渗工程施工工艺创新路径

4.1 高分子材料防渗施工工艺创新

高分子材料防渗施工工艺创新聚焦于提升铺设效率与施工质量。土工合成材料铺设工艺通过机械化铺设技术,实现单日1000m²以上的大面积快速铺展,减少人工操作误差;无缝焊接技术优化采用高频振动焊接或热熔焊接,焊接温度控制在200 $^{\circ}$ C-250 $^{\circ}$ C,增强接缝强度,接缝抗拉强度不低于母材的80%,避免渗漏隐患。针对异形部位,开发适配工艺,如定制化裁剪与局部加固,确保防渗层整体性。高分子涂料施工工艺方面,无气喷涂优化采用高压无气喷涂设备,喷涂压力控制在15MPa-20MPa,提升涂料雾化效果与涂覆均匀性;多层涂覆控制技术通过精确控制每层涂覆厚度(0.5mm-0.8mm)与间隔时间(4h-6h),形成致密防水层。潮湿基面施工改良采用特殊底涂剂,增强涂料与基面粘结力,拓宽施工条件范围^[4]。施工质量实时监测技术集成应用焊接质量无损检测,如超声波检测或红外热成像检测,及时发现焊接缺陷;涂层厚度精准控制采用激光测厚仪或电磁感应测厚仪,确保涂层厚度符合设计要求。

4.2 无机改性材料防渗施工工艺创新

无机改性材料防渗施工工艺创新侧重于提升材料性能与施工便捷性。改性水泥基材料施工采用机械化浇筑,浇筑速度可达 $3\text{m}^3/\text{h}$ 以上,提高浇筑效率与均匀性;振捣优化通过调整振捣频率(50Hz-80Hz)与振捣时间(20s-30s),减少气泡与空隙,提升材料密实度。养护工艺创新采用智能温控养护系统,根据材料水化特性自动调节养护温度与湿度,加速强度发展。新型灌浆工艺方面,精准定位灌浆利用地质雷达或声波探测技术,精确确定灌浆位置与范围,定位误差控制在5cm以内;压力控制优化采用智能压力控制系统,灌浆压力控制在1MPa-3MPa,根据地层吸浆量自动调节灌浆压力,避免浆液浪费与地层扰动。复合灌浆序列设计结合不同浆液特性,形成由粗到细、由稀到稠的灌浆序列,提升灌浆效果。无机材料与土工合成材料复合施工技术注重界面处理,采用特殊粘结剂或机械咬合方式,增强层间结合强度;层间结合强化通过增加中间过渡层或采用多层复合结构,提升复合体系整体性能。

4.3 生态友好型材料施工工艺创新

生态友好型材料施工工艺创新强调环保与可持续性。可降解材料施工保护技术通过优化材料配方与施工工艺,避免施工期过早降解,同时采用铺设完整性控制技术,如采用整体铺设或无缝拼接方式,减少材料破损与渗漏,铺设破损率控制在1%以下。施工过程中需严格把控施工机械的行走路线,避免尖锐部件划伤材料表面,同时配套专用的修补材料与工艺,对局部破损部位进行及时修复。生态材料与自然基底融合施工工艺注重材料与基底的适应性,采用生物粘结剂或自然纤维增强材料,提升材料与基底的结合力;低扰动施工设备与操作方法采用轻型化施工设备与低噪音、低振动操作方式,减少对周边生态环境的干扰,尤其适用于水源保护区、生态敏感区等特殊区域的防渗工程,实现工程建设与生态保护的协同发展。

4.4 施工装备与技术集成创新

施工装备与技术集成创新推动防渗施工向智能化、

精准化方向发展。智能化施工装备应用如自动化铺设机械、精准灌浆设备等,提升施工效率与质量;BIM技术在施工工艺设计与过程控制中集成应用,通过三维建模与仿真分析,将施工误差控制在3cm以内,优化施工方案与资源配置。基于物联网技术的施工监测系统可实时采集施工参数与设备运行状态,实现数据的远程传输与智能分析,及时预警施工过程中的异常情况^[5]。恶劣环境下施工工艺优化针对高温、严寒、高湿等特殊环境,开发适应性施工工艺,如采用保温措施应对严寒环境(确保施工环境温度不低于 -5°C),采用降温措施应对高温环境(确保施工环境温度不高于 35°C),确保施工质量与安全。同时整合施工、监测、养护等全流程技术,构建一体化施工技术体系,实现防渗工程的全生命周期精细化管理,为工程长期稳定运行提供保障。

结束语

水库防渗工程新型材料选型与施工工艺创新是提升防渗效能、保障水库安全运行的关键举措。通过科学选型新型材料,综合考虑地质、工况、性能等多方面因素,可精准匹配工程需求;创新施工工艺,从高分子、无机改性、生态友好型材料施工及装备技术集成等多维度发力,能提升施工质量与效率。这些创新成果为水库防渗工程提供了坚实支撑,有助于构建更可靠、更环保、更高效的防渗体系,推动水利行业技术进步。

参考文献

- [1]王桂国,孔令峰.防渗处理施工技术在水利工程中的具体应用[J].数字化用户,2024(37):41-42.
- [2]许旭南.老旧水库土石坝加高工程防渗墙施工时机优选[J].云南水力发电,2025,41(6):57-61.
- [3]习立飞.水库除险加固工程中防渗墙高压喷射灌浆施工技术研究[J].水上安全,2025(19):166-168.
- [4]李永昌.探讨水利工程中水库大坝防渗加固施工技术[J].建筑与装饰,2025(15):121-123.
- [5]程文征.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(7):48-50.