

山塘防渗材料与技术对比研究及其环境适应性分析

官李勇

丽水市万源水利水电工程技术咨询有限公司 浙江 丽水 323000

摘要: 本文系统对比分析了山塘防渗工程中土工合成材料、刚性防渗材料及柔性防渗材料的技术性能, 并从自然环境、人为环境两个维度深入探讨了其环境适应性。研究指出, 防渗材料与技术的选择需因地制宜, 通过构建多维度环境适应性评价体系, 可实现防渗效果、耐久性与经济性的平衡, 为山塘防渗工程提供科学决策依据。

关键词: 山塘防渗; 防渗材料; 防渗技术; 环境适应性

1 山塘渗漏原因分析

1.1 地质因素

山塘渗漏的地质根源主要与坝基及周边岩土体的物理力学性质密切相关。首先, 若坝基存在断层破碎带、裂隙发育或风化严重的岩体, 地下水易沿这些薄弱通道渗透, 形成集中渗漏带。其次, 软弱夹层(如黏土、泥化夹层)的透水性差异会加剧渗透压力, 导致管涌或接触冲刷^[1]。部分山塘位于喀斯特地貌区, 溶洞、暗河等岩溶通道为地下水提供了快速运移路径, 极易引发突发性渗漏事故。地质条件复杂性还体现在区域水文地质特征上。地震活动、冻融循环等地质作用可能诱发坝基岩土体结构劣化, 进一步削弱其抗渗性能。

1.2 工程因素

工程因素是山塘渗漏的直接诱因, 主要源于防渗体系失效、施工质量问题、运行管理疏漏及设计缺陷等多方面: 防渗体系方面, 坝体防渗层可能因黏土心墙或土工膜厚度不足、接缝处理不当及材料老化破损导致防渗能力下降, 基础处理中若未彻底清除强透水层或未设置垂直防渗墙, 地下水易形成绕渗, 同时排水系统因反滤层堵塞或排水孔失效而无法及时排出渗水, 加剧渗透破坏; 施工质量方面, 坝体填筑时分层碾压不达标导致架空、松散区域形成渗流通道, 土料含水量或级配不均影响防渗体均匀性, 混凝土面板与防渗墙接缝处理不当也易形成薄弱环节; 运行管理方面, 超蓄水位运行长期抬高浸润线、增大渗透压力, 维护不足导致防渗体裂缝未修复或排水系统淤积未清理, 进一步加速渗漏恶化; 设计方面, 防渗标准未充分考虑区域水文地质条件导致参数取值偏低, 防渗体与坝基、岸坡连接处结构设计不合理而未有效封闭, 均可能形成渗漏通道。这些因素相互交织, 共同构成了山塘渗漏的工程性风险。

2 山塘防渗材料与技术分类

2.1 防渗材料分类

2.1.1 土工合成材料

土工合成材料以高分子聚合物(如聚乙烯、聚丙烯)为基材, 通过针刺、编织或热压等工艺制成, 形成具有防渗、隔离、反滤及加筋等功能的片状材料。典型代表包括土工膜(如高密度聚乙烯(HDPE)膜、低密度聚乙烯(LDPE)膜)和复合土工膜(土工布与土工膜通过热合或胶粘复合)。其核心优势在于: 抗拉强度高: 可承受坝体变形及施工荷载, 避免材料撕裂; 耐化学腐蚀: 对酸碱环境、微生物侵蚀具有良好抵抗力; 施工便捷: 可采用机械铺设、焊接连接, 适应复杂地形; 成本可控: 相较于传统刚性材料, 单位面积成本更低, 且施工周期短^[2]。应用场景包括: 大坝迎水面铺盖、库底防渗、垂直防渗墙芯材等, 尤其适用于软基或深厚覆盖层条件下的山塘防渗工程。

2.1.2 刚性防渗材料

刚性防渗材料以混凝土、水泥土等无机胶凝材料为核心, 通过硬化形成连续密实结构, 具备高强度、低渗透性的特点。典型应用包括: 混凝土防渗墙: 通过冲击钻、回转钻或抓斗成槽, 灌注混凝土形成连续墙体, 适用于深厚覆盖层或复杂地质条件下的坝基防渗; 水泥土防渗层: 采用深层搅拌或高压旋喷工艺, 将水泥浆液与土体混合, 形成均质防渗体, 兼具防渗与地基加固功能, 常用于坝体防渗加固或库周防渗帷幕; 沥青混凝土防渗心墙: 以沥青为胶结材料, 掺入矿料形成粘弹性体, 适应地基变形能力强, 常用于高土石坝或特殊地质条件下的防渗结构。

刚性材料的优势在于防渗性能稳定、耐久性高, 但施工工艺复杂, 对地基条件要求较高。

2.1.3 柔性防渗材料

柔性防渗材料以沥青、橡胶等有机材料为核心, 通过涂覆、灌浆或粘贴形成连续防渗层, 具备适应变形、耐老化等特点。典型应用包括: 沥青混凝土防渗层:

利用沥青的粘弹性和抗渗性,形成柔性防渗膜,适用于地基变形较大的山塘;橡胶止水带:通过硫化工艺与混凝土结构粘结,用于变形缝、施工缝防渗,具有弹性恢复率高、耐紫外线老化的优势;聚氨酯灌浆材料:通过高压注浆填充岩土体裂隙,形成柔性防渗屏障,适用于局部渗漏治理。柔性材料在抗裂性、耐久性方面表现优异,但需严格控制施工质量,避免材料老化或施工缺陷导致防渗失效。

2.2 防渗技术分类

2.2.1 垂直防渗技术

垂直防渗技术通过在坝基或库周设置连续垂直屏障,阻断地下水与库水的联系,典型方法包括:混凝土防渗墙:采用冲击钻、回转钻等成槽设备,灌注混凝土形成连续墙体,适用于深厚覆盖层、砂卵石层等复杂地质条件;高压喷射注浆:利用高压水射流切割土体,同步注入水泥浆液,形成防渗柱体或帷幕,适用于软基或裂隙发育岩体;塑性混凝土防渗墙:采用低强度、高延性的混凝土材料,适应地基变形能力更强,常用于土石坝坝基防渗;自凝灰浆防渗墙:通过水泥-膨润土浆液自凝硬化形成防渗体,施工效率高,适用于紧急抢险工程。

2.2.2 水平防渗技术

水平防渗技术通过在坝体或库底铺设防渗材料,延长渗径、降低渗透坡降,典型方法包括:土工膜铺盖:在坝体迎水面或库底铺设土工膜,覆盖范围需延伸至浸润线以下,形成水平防渗屏障;水泥土搅拌桩:通过深层搅拌设备将水泥浆与土体混合,形成连续防渗帷幕,适用于软基或深厚覆盖层条件;黏土斜墙:利用天然黏土或人工改良土分层碾压,形成防渗斜墙,兼具防渗与加固功能;砂砾石层反滤排水:在防渗层下设置反滤排水体,降低渗透压力,防止管涌破坏。水平防渗技术施工简便、成本较低,但需注意材料接缝处理及地基不均匀沉降问题。

2.2.3 复合防渗技术

复合防渗技术结合垂直与水平防渗措施,形成多道防线,典型组合包括:“垂直墙+水平铺盖”:坝基设置混凝土防渗墙,坝体铺设土工膜,兼顾垂直与水平防渗需求;“防渗墙+帷幕灌浆”:防渗墙外围补充水泥帷幕灌浆,封堵细微裂隙,提升整体防渗性能;“土工膜+排水体”:防渗层下设置反滤排水体,降低渗透压力,防止水力劈裂;“沥青混凝土心墙+土工膜”:坝体中心设置沥青混凝土心墙,两侧铺设土工膜,形成刚柔结合的防渗体系。复合防渗技术通过材料与技术的协同作用,可显著提升防渗体系的可靠性,适应不同工程条件与运

行需求,但需注意材料兼容性及施工顺序控制。通过科学分类与组合应用,山塘防渗材料与技术可有效降低渗漏风险,保障工程安全与水资源利用效率。

3 山塘防渗材料与技术性能对比

3.1 防渗性能对比

防渗性能是山塘防渗的核心指标,直接影响工程安全与水资源利用效率。土工合成材料:土工膜(如HDPE膜)的渗透系数通常低于 $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$,可实现“零渗漏”,尤其适用于大面积铺盖防渗。复合土工膜通过土工布与土工膜复合,既增强抗拉强度,又保持优异防渗性,但接缝处理需严格质量控制,否则易形成渗漏通道。刚性防渗材料:混凝土防渗墙的渗透系数可控制在 $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 以内,稳定性高,但需注意施工缝、冷缝等薄弱环节的防渗处理。水泥土防渗层因材料均匀性差异,防渗性能波动较大,需通过优化配合比、分层碾压等措施提升密实度。柔性防渗材料:沥青混凝土防渗心墙的渗透系数约为 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$,粘弹性特性使其适应地基变形能力强,但需控制施工温度与压实度,避免材料老化。技术对比:垂直防渗技术(如混凝土防渗墙)防渗深度大、屏障连续性好,但施工成本高;水平防渗技术(如土工膜铺盖)施工便捷、成本低,但需注意材料耐久性。复合防渗技术通过多道防线提升防渗效果,但需协调材料兼容性^[3]。

3.2 力学性能对比

力学性能决定防渗材料与技术(在承受荷载、适应变形方面的能力)。土工合成材料:抗拉强度高(如HDPE膜抗拉强度可达20MPa以上),但抗穿刺能力较弱,需避免尖锐物体刺穿。刚性防渗材料:混凝土防渗墙抗压强度高(抗压强度可达20MPa以上),但抗拉强度相对较低,需注意裂缝控制。柔性防渗材料:沥青混凝土防渗心墙弹性模量低(约100–500MPa),适应变形能力强,但需控制材料老化导致的力学性能衰减。技术对比:垂直防渗技术(如混凝土防渗墙)可承受高水头压力,但地基不均匀沉降易引发裂缝;水平防渗技术(如土工膜铺盖)抗拉性能受材料接缝影响大;复合防渗技术通过刚柔结合提升整体性能,但需协调材料兼容性。

3.3 施工性能对比

施工性能决定防渗工程的效率与质量,需结合材料特性与施工条件综合评估。土工合成材料:施工便捷性高,机械铺设效率可达每日数千平方米,但需严格控制焊接质量,避免接缝渗漏。刚性防渗材料:混凝土防渗墙施工周期长(单槽段成墙需8–12小时),对地质条件要求高(需穿透砂卵石层时效率更低);水泥土搅拌桩

施工受土层条件限制大,需优化搅拌工艺。柔性防渗材料:沥青混凝土心墙施工需高温控制(温度超160℃需精确温控),橡胶止水带硫化工艺需严格把控时间与温度。技术适配性:垂直防渗技术(如高压喷射注浆)对设备要求高,需专业团队操作;水平防渗技术(如土工膜铺盖)受地形影响大,需结合无人机测绘优化铺设路径。

综合对比与优化建议;性能匹配原则:根据山塘工程特点选择材料与技术组合。例如,软基山塘宜优先采用水泥土搅拌桩+土工膜铺盖的复合模式,兼顾成本与效率;硬质岩基山塘可侧重混凝土防渗墙+帷幕灌浆技术,确保防渗深度与稳定性。技术创新方向:研发新型复合材料(如纳米改性土工膜)提升防渗性能;推广BIM技术优化防渗墙施工模拟,降低裂缝风险。政策协同建议:政府应建立防渗材料认证体系,推动产学研用结合;出台施工技术补贴政策,鼓励企业研发适应复杂地质条件的微型桩防渗技术。

4 山塘防渗材料与技术的环境适应性分析

4.1 自然环境因素影响

自然环境因素对山塘防渗材料与技术的影响至关重要。首先,气候条件,特别是温度和湿度的变化,会直接影响防渗材料的性能和寿命。例如,极端高温可能导致材料老化加速,而低温则可能引起材料脆化,降低其抗拉和抗撕裂强度。此外,降雨量和地下水位的波动也对山塘防渗提出挑战。持续高强度的降雨可能增加水体对防渗层的渗透压力,而地下水位上升则可能导致防渗层下方的土壤膨胀,引发渗漏风险。地质条件同样不可忽视,如土壤的不均匀沉降、岩石层的断裂等,都可能对防渗层的完整性和稳定性构成威胁。

4.2 人为环境因素影响

人为环境因素对山塘防渗材料与技术的适应性同样具有重要影响。一方面,农业生产活动,如施肥、灌溉等,可能导致化学物质残留并随水流进入山塘,对防渗材料造成化学腐蚀。这些化学物质可能破坏防渗层的结构,降低其防渗性能。另一方面,人类活动还可能引发物理性破坏,如施工过程中的机械损伤、不当维护导致的磨损等。随着城市化进程的加快,周边土地的开发利用也可能对山塘防渗系统构成潜在威胁,如地面沉降、振动等。

4.3 环境适应性评价体系构建

为了全面、精准地评估山塘防渗材料与技术对环境的适应性,构建一套科学、系统的评价体系至关重要。该体系需综合考量自然环境因素(如气候、水文地质、地形地貌、生物侵蚀等)和人为环境因素(如工程扰动、水质污染、管理维护水平、政策法规等)的双重影响,并深入分析防渗材料与技术在不同环境条件下的性能表现^[4]。具体而言,评价体系应涵盖防渗层的耐久性、抗渗性、抗化学腐蚀性、抗拉强度、抗撕裂强度等物理力学性能指标,以量化材料在长期运行中的稳定性;同时,需纳入材料的环境友好性(如碳排放、可降解性)、施工便捷性(如机械化程度、施工周期)、维护成本(如检修频率、更换难度)等经济和环境效益指标,以综合评估技术的可持续性。在构建过程中,可借鉴国内外先进的评价标准(如ISO环境管理标准、欧盟生态设计指令)和实践经验,结合山塘所在地的地质条件、气候特征及工程需求进行本地化调整。通过该评价体系的实施,可为防渗材料与技术的科学选型、优化设计及规范施工提供坚实依据,确保防渗系统在复杂多变的环境条件下长期稳定运行,有效保障山塘安全、提升水资源利用效率,实现经济效益与环境效益的双赢。

结束语

山塘防渗材料与技术的选择需综合考量防渗性能、力学特性、施工效率及环境适应性。未来研究应聚焦绿色低碳材料研发(如生物基土工膜、自修复混凝土)、智能化监测技术(如光纤传感防渗墙)及标准化施工工艺,推动防渗工程向“环境友好、经济高效、智能可靠”方向转型。同时需加强全生命周期管理,通过动态监测与数据反馈优化防渗结构,确保山塘工程安全与水资源可持续利用。

参考文献

- [1]扈文凯.混凝土建筑材料试验检测及相关质量控制[J].冶金与材料,2022,42(04):184-186.
- [2]汪晨.建筑工程混凝土结构耐久性设计的探讨[J].价值工程,2022,41(14):48-50.
- [3]李灿,赵庆双,尹大刚.建筑材料的再生循环与利用[J].陶瓷,2021,(09):120-121.
- [4]高宇.基于环境适应性与环境工程的几点分析[J].成功:教育,2021,000(005):P.235-235.