

沥青混凝土心墙坝防渗处理技术

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：沥青混凝土心墙坝防渗技术以沥青混凝土为核心材料，通过物理阻隔、变形协调及自愈特性构建防渗屏障。其结构设计综合地质条件与受力特性，施工注重材料控制与工艺优化，具备防渗性能强、变形适应性好等优势，但也存在材料敏感、温度控制难等局限。未来材料创新、工艺革新及结构演进将推动技术持续发展，提升工程安全性与经济性。

关键词：沥青混凝土心墙坝；防渗技术；施工关键技术；技术优势；发展趋势

引言：水利工程中，防渗处理至关重要，关乎工程安全与稳定运行。沥青混凝土心墙坝防渗技术凭借独特优势，在众多防渗方案中脱颖而出。它以沥青混凝土作为防渗主体，通过材料特性与结构设计的协同作用，有效阻断水流渗透。深入了解该技术原理、施工要点、优势局限及发展趋势，对提升水利工程防渗水平，保障工程长期安全运行，具有重要的现实意义。

1 沥青混凝土心墙坝防渗技术原理

1.1 材料特性与防渗机制

沥青混凝土作为防渗核心材料，由沥青、矿料两大组分构成。其中矿料涵盖粗骨料、细骨料及填料，三者按特定比例经拌和工艺形成连续致密结构。该材料的防渗作用体现在多重机制协同效应上^[1]。物理阻隔方面，沥青的黏弹性特性使其在混合料中形成粘性基质，有效填充矿料颗粒间直径小于0.01毫米的微观间隙，构建起渗透系数低于 1×10^{-8} 厘米/秒的低渗透性屏障，阻断水流渗透通道。变形协调机制则表现为材料良好的柔韧性，可随坝体沉降及温度变化产生适应性变形，当坝体沉降量在10-50厘米范围内时，避免因不均匀沉降或温度应力导致结构性裂缝产生。更值得关注的是其自愈特性，当出现宽度小于2毫米的微小裂缝时，在温度循环作用下沥青材料发生流动与再分布，促使裂缝部分闭合，恢复整体防渗性能。这种动态修复能力显著延长了防渗体系的使用寿命，预计可延长10-20年。

1.2 结构与参数控制

心墙断面形式选择需综合考量工程地质条件与结构受力特性。垂直型心墙适用于地质条件稳定、坝体变形预期较小的工程场景，其简洁的构造形式便于施工质量控制。斜心墙型则通过略倾向上游的布置方式，在增强结构抗震性能的同时，有效减少水平推力对坝体的不利影响。厚度设计遵循分级控制原则，顶部厚度通常设

定不小于30厘米，确保施工操作空间及运行期结构安全。底部厚度与坝高呈比例关系，一般取坝高的1/50至1/100，采用台阶形渐变结构实现应力平稳过渡，台阶高度一般控制在50-100厘米。为协调心墙与坝体变形，上下游侧均需设置过渡层，上游侧通过细颗粒级配优化增强裂缝自愈效果，过渡层两侧宽度一般为2-3m；下游侧采用透水性良好的块石排水结构，形成完整的防渗-排水系统。这种结构体系通过材料性能与构造措施的双重保障，构建起可靠的防渗屏障。

2 沥青混凝土心墙坝防渗施工关键技术

2.1 施工准备与材料控制

原材料选择是保障防渗性能的基础环节。沥青材料需严格检测针入度在60-80（0.1毫米）、软化点在43-49℃等关键指标，确保符合水工建筑物设计规范要求。工程实践表明，低蜡含量（蜡含量小于2%）、高延度（15℃延度大于100厘米）的沥青品种能有效提升混合料的抗裂性能与耐久性。除了常规指标，沥青的感温性、老化后的性能保留率等长期性能指标也应纳入评估体系，以预测在数十年运行期内的表现^[2]。矿料选用方面，碱性岩石如石灰岩因天然具备良好的沥青黏附性成为首选材料；若采用酸性岩石，需通过掺加消石灰等改性措施，消石灰掺量在1%-3%，增强界面结合强度。矿料的岩性、粒形、表面纹理和清洁度都直接影响与沥青的黏附性及混合料的整体力学性能，因此必须建立严格的进场检验制度。配合比设计需通过系统室内试验优化确定，既要保证矿料级配形成骨架密实结构，又要控制沥青含量在5%-7%的合理范围，在满足防渗性能要求的同时兼顾施工和易性与工程经济性。配合比设计并非一劳永逸，需根据实际采用的原材料进行动态验证和微调，以确保实验室理想配比能在施工现场完美复现。

2.2 施工工艺流程

基础处理阶段需构建双重防渗体系。基岩部位采用固结灌浆与帷幕灌浆组合工艺,通过高压注入水泥基浆液形成连续防渗屏障,有效截断基岩裂隙渗流通道,灌浆压力一般控制在1-3MPa。混凝土垫座设置于心墙与基岩接触面,其作用在于提供稳定支撑平台并协调不同结构变形。心墙铺筑环节,钢模板架设要求尺寸精确、拼接严密,定位偏差不得超过5毫米设计允许值。混合料摊铺根据工程条件选择适宜工艺:碾压式施工采用专用摊铺机分层作业,每层厚度严格控制28厘米以内,摊铺厚度通过现场摊铺实验确定,通过实时监测摊铺温度与行进速度确保质量稳定,行进速度一般控制在1-3米/分钟,或由现场摊铺实验确定;沥青混合料碾压采用1-1.5t钢轮振动碾,过渡层碾压宜采用2-2.5t振动碾。沥青混合料与过渡料的碾压设备不易混用。碾压时,可先静压两遍,再震动碾压,最后静压收光;初碾温度不宜低于130℃,终碾温度不宜低于110℃。沥青混凝土心墙宜全线保持同一高程施工,以避免出现横缝,当需要设置横缝时,其结合坡度不陡于1:3,坡面应压实。

2.3 施工质量控制要点

温度管理体系贯穿施工全过程,沥青混合料的入仓温度应根据不同环境温度通过实验确定,宜为140-165℃,避免高温导致沥青老化或低温引发硬化问题。温度是沥青混凝土施工的“生命线”,从出厂、运输、摊铺到碾压,必须实施全链条的温度监控与保障,任何环节的温度失控都可能导致质量缺陷。密实度检测采用钻孔取芯与无损检测相结合方式,核子密度仪等先进设备可实现快速精准检测,核子密度仪检测每10-30m设置一个测点,渗气仪检测每100m设置一个测点。无损检测用于大面积快速普查和过程控制,钻孔取芯则用于最终验证和获取真实芯样进行性能试验,二者互补,构建了立体的质量验证网络。心墙每升高2-4m应钻取芯样一组(3个芯样)进行密度、孔隙率、沥青含量和矿料级配等验证性检验,并检查层间结合情况。心墙每升高10-12m应钻孔取芯,进行三轴、小梁弯曲等力学性能检查。芯样长度应根据实验项目确定,宜为30-40cm。施工过程中建立全过程质量追溯机制,确保每个环节均满足技术规范要求,最终形成可靠的防渗结构体系。现代质量管理强调数字化和可追溯性,利用物联网、二维码等技术,将每一批材料、每一段施工过程的数据关联起来,为工程终身质量档案奠定基础。

3 沥青混凝土心墙坝防渗技术优势与局限性

3.1 技术优势

该技术防渗性能显著,沥青混凝土材料形成的连续

致密结构使渗透系数达到极低水平,可有效应对高水头工况下的渗流压力,满足大型水利工程防渗标准要求^[1]。其防渗性能的可靠性已经过大量高坝工程的长期运行实践所验证,成为在高烈度地震区、深厚覆盖层等复杂条件下可选用的重要防渗方案。其变形适应能力突出,黏弹性沥青基质与矿料骨架的协同作用,使结构能随坝体沉降及温度波动产生适应性变形,显著降低因不均匀沉降或温度应力引发的开裂风险。这种“以柔克刚”的特性,使其特别适用于可能发生较大或不均匀沉降的地基条件,这是许多刚性防渗结构难以比拟的。施工环节具备较高便捷性,机械化摊铺与碾压工艺可大幅缩短建设周期,且混合料性能受气候条件影响较小,在多雨或温差较大地区仍能保持稳定施工效率。相较于混凝土防渗体,其施工受温度和湿度制约更小,作业面也更灵活,有利于加快工程进度。耐久性方面,沥青材料的抗老化特性与矿料的抗侵蚀能力形成双重保障,使防渗体系在长期运行中保持性能稳定,显著降低后期维护成本与频率。只要处于设计预期的工作环境中,并隔绝强氧化性介质,沥青混凝土心墙可以保持数十年的稳定性能,全寿命周期经济性良好。

3.2 技术局限性

材料参数敏感性是该技术的主要制约因素,沥青含量波动超过0.5%或矿料级配偏离设计范围,均可能导致孔隙率增大、防渗性能下降,因此需建立严格的原材料检测与配合比控制系统。这种敏感性要求从生产到施工的全过程必须精细化管理,任何粗放的操作都可能造成质量隐患,对项目管理水平提出了更高要求。施工温度窗口较窄,混合料摊铺温度需维持在140-165℃区间,低温环境需采用加热保温措施,高温季节则需通过冷却工艺控制温度上升,否则易引发沥青老化或混合料离析问题。温度控制增加了施工组织的复杂性和成本,尤其在极端气候地区或高原环境下,温度保障措施成为影响工期和质量的关键。运行期检修难度较大,心墙作为隐蔽工程结构,常规检测手段难以直接获取内部缺陷信息,渗漏定位与修复需依赖钻孔取芯等侵入式方法,可能对坝体结构造成二次损伤。这一局限性凸显了施工期质量控制无可替代的重要性,必须力求“一次成优”,因为运行期的修复不仅代价高昂,而且技术复杂、风险较大。这些局限性要求工程实践中需加强全过程质量控制,通过优化材料设计、完善施工监控体系及建立预防性维护机制,最大限度发挥技术优势并规避潜在风险。

4 技术发展趋势与展望

4.1 材料创新方向

材料研发领域正朝着提升综合性能与环保效益的方向深入推进。高性能沥青改性剂的研制成为关键突破点,当前研发更注重靶向性改良,通过精准配比纳米级聚合物或纤维增强材料,不仅可显著改善沥青基体的黏弹性特征,还能提升其抗紫外线老化和抗化学侵蚀能力。这使其在低温环境下保持柔韧性,高温条件下维持稳定性,从而增强混合料抵抗开裂与老化损伤的能力。这种改性技术不仅能延长防渗体系的服务寿命,减少因材料失效引发的维修频次,更能为极端气候区域工程提供可靠保障。与此同时,新型矿料的开发利用备受关注,再生骨料作为建筑垃圾资源化利用的重要方向,经科学处理后具备替代天然骨料的潜力。其应用不仅能降低对自然资源的依赖,还能减少开采加工过程中的碳排放,符合绿色工程发展理念。部分研究聚焦于工业废渣的改性利用,通过物理活化或化学激发手段,将矿渣、粉煤灰、煤矸石等工业固废转化为具有良好力学性能的矿料组分,进一步拓展材料选择范围,实现环保与效益的双赢。

4.2 施工工艺革新

施工工艺优化聚焦于效率提升与质量可控性增强。厚层摊铺技术的推广标志着施工方式的重大转变,通过采用大功率摊铺机、优化摊铺速度与振捣频率等工艺参数,可实现单层铺筑厚度从传统的5-8cm提升至20-28cm,有效减少纵向接缝数量,提升防渗体结构整体性。这种工艺不仅能将施工周期缩短20%-30%,还能降低接缝处理不当引发的渗漏风险,提升整体防渗可靠性,尤其适用于大型水库、堤坝等大规模水利防渗工程。智能化监测系统的引入则将质量控制推向精准化阶段,通过在摊铺、压实等关键施工环节部署温度传感器、压实度检测仪、平整度测量仪等组成的传感器网络,实时采集核心参数,并借助5G无线传输技术将数据快速反馈至控制中心。系统基于预设标准自动分析施工状态,当检测值偏离允许范围时立即发出声光预警,指导现场人员及时调整操作参数,形成"监测-分析-修正"的闭环控制机制,确保施工质量始终处于受控状态,大幅

降低后期渗漏隐患。

4.3 结构形式演进

结构创新依托理论分析与试验验证的双重支撑持续深化。数值模拟技术为心墙断面优化提供了科学依据,通过建立三维有限元模型,结合工程地质勘察数据与实际荷载工况,可系统分析梯形、弧形等不同断面形式下的应力分布规律与变形特征,通过多目标优化算法平衡防渗效果与结构强度,进而确定最优结构方案。这种基于性能的设计方法突破了传统经验模式的局限,使结构形式更加适应复杂地质与水文条件。复合结构探索则着眼于功能集成与优势互补,沥青混凝土心墙与面板坝的组合形式通过整合两种坝型的优势,既利用钢筋混凝土面板承担主要水压力,又依靠沥青混凝土心墙阻断渗流通道,形成双重防渗保障体系。这种结构在地震多发区展现出独特适应性,面板的柔性连接特性与心墙的弹塑性变形协调能力相结合,可有效耗散地震能量,降低坝体开裂风险,提升坝体整体抗震性能,为高地震烈度、复杂地形地区的水利工程建设提供新的解决方案,助力构建更具安全性、耐久性与经济性的防渗防护体系。

结束语

沥青混凝土心墙坝防渗技术经过长期实践与发展,已成为水利工程防渗的重要手段。凭借良好的防渗性能、变形适应能力等优势,在复杂工程条件下展现出强大适应性。尽管存在材料参数敏感、施工温度窗口窄等局限,但通过加强全过程质量控制可有效规避。随着材料创新、工艺革新与结构演进,该技术将不断完善,为水利工程建设提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]王凯,丁凯.水库碾压式沥青混凝土心墙堆石坝填筑质量控制[J].中国新技术新产品,2021,(04):110-112.
- [2]杨云超.防渗墙裂缝对沥青混凝土心墙坝坝基渗流的影响分析[J].水电与新能源,2023,37(11):51-54.
- [3]徐力群,赵邵峰,沈振中等.特高土心墙堆石坝坝基防渗体渗流-溶蚀特征研究[J].水利学报,2023,54(08):942-954.