

水利水电工程施工中防渗技术研究

曲俊韬 姜东毅

中国水利水电第十一工程局

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8416

[摘要] 水利水电工程是支撑社会经济发展的关键基础设施，在防洪减灾、水资源配置、能源保障及生态维护方面承担着核心使命。然而，渗漏问题始终是制约此类工程安全与长效运行的普遍性难题，不仅侵蚀结构耐久性，更潜藏灾害风险。防渗技术的合理应用与持续创新，直接关联工程本体质量、服役寿命及公共安全屏障的构筑。因此，深化防渗技术研究，提升其工程适配性与可靠性，对确保水利水电工程发挥持久效益，护航生命财产安全具有根本性意义。

[关键词] 水利水电工程；防渗技术；防渗施工

Research on Anti-Seepage Technology in Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction

Qu Juntao Jiang Dongyi

China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Ltd

[Abstract] Hydropower and water conservancy projects are critical infrastructure that underpin socio-economic development, bearing core responsibilities in flood prevention and disaster mitigation, water resource allocation, energy supply, and ecological conservation. However, leakage remains a pervasive challenge that constrains the safety and long-term operation of such projects, not only eroding structural durability but also harboring disaster risks. The rational application and continuous innovation of anti-seepage technologies are directly linked to the quality of the project itself, its service life, and the construction of public safety barriers. Therefore, deepening research on anti-seepage technologies and enhancing their engineering adaptability and reliability are fundamentally significant for ensuring the sustained benefits of hydropower and water conservancy projects and safeguarding life and property security.

[Key words] Water conservancy and hydropower engineering; Seepage prevention technology; Seepage prevention construction

引言：

当前防渗施工实践面临系统性挑战：技术选型与地质水文条件脱节，施工参数失准削弱技术效能，技术组合协同性不足；质量监管体系缺位与执行乏力导致过程控制薄弱；施工技术资料零散缺失，严重制约科学决策与工艺传承。这些关键瓶颈共同阻碍了防渗体系可靠性的构建。因此，深化防渗技术研究，探索适配性技术路径并强化全流程管控机制，是实现工程结构耐久性与运行安全性的根本保障。

1 引发水利水电工程渗水原因

1.1 人为因素

水利水电工程渗漏的人为诱因主要源于全周期管控失效。设计环节未能精准耦合场址水文地质特征与极端气候荷载，致使防水结构体系存在原生缺陷——典型如防水层厚度-水压失配、排水网络拓扑失序及变形缝止水系统适配性不足。施工阶段则因工艺执行偏差与材料管控失当，衍生微观渗漏通道：混凝土振捣密实度缺失、材料搭接界面薄弱、劣质材料耐候性衰

减及复合材料界面相容性失效。更关键的是，服役期维护机制缺位加速了结构退化进程，周期性检测中断与预防性养护空白使材料在水力侵蚀与化学腐蚀下突破防渗临界阈值。

1.2 自然因素

水利水电工程的渗漏风险根植于复杂的地质-气候-水文耦合系统。场址区地质非均质性构成渗流主导通道：断层破碎带形成高渗透廊道，节理密集区发育三维渗流网络，岩溶管道系统则具备极强的导储水能力。特殊土层通过差异化力学响应加剧渗漏风险——软土地基在饱和状态下产生潜变变形，膨胀土遇水湿胀失水干缩，均导致防渗结构应力重分布。气候要素通过热力学-水力学双重路径驱动渗漏。极端降水事件引发库水位骤变，使防渗体承受超设计水力梯度；持续性高温则诱发聚合物材料分子链解聚，加速密封系统脆化失效。水文动力作用表现为水流剪切应力对防水界面的持续磨损，水位变动区更因干湿循环诱发材料疲劳损伤。地下水系统呈现多相侵蚀特征：水位季节性波动引发基底扬压力振荡，导致防渗帷幕反复承受拉压应力；水化学场中的溶解性离子通过浓度梯度扩散，在材料毛细孔隙内结晶膨胀；酸性环境则催化水泥基材料钙溶蚀，形成贯通性腐蚀通道。这些自然要素在时空维度交织作用，共同塑造了工程防渗体系面临的严酷服役环境。

2 当前水利水电工程防渗施工存在的问题

2.1 防渗技术合理性不足

水利水电工程防渗效能弱化的核心症结在于技术体系与工程场址的适配性断裂。技术选型层面普遍存在环境认知脱节——未建构地质构造渗透各向异性、水文动态荷载谱系与气候侵蚀潜势的耦合模型，机械套用通用工法导致技术靶向性缺失（如岩溶区水泥灌浆遭遇浆液流散失效）。施工实施阶段则因工艺参数与地质力学响应失谐引发次生灾害：灌浆压力超越岩体破裂阈值诱发水力劈裂，浆液流变特性与裂隙网络不匹配造成封堵盲区，注浆速率未适应地下水动力学场形成绕渗通道。更本质的矛盾在于多技术协同的集成缺失。防水材料界面与灌浆加固区缺乏应力过渡设计，排水系统与防渗墙的空间拓扑关系未遵循渗流场重分布规律，形成局部防渗单元间的性能断层。这种技术要素的碎片化应用，根源在于未建立“地质结构-材料行为-水力路径”的系统控制论模型，使本应互补的技术组合反而产生干涉耗散效应。当前困境揭示出防渗技术从经验范式向科学决策转型的迫切性：亟需发展基于地质信息模型（GIM）的技术适配评估系统，构建施工参数岩土响应预测算法，创立多技术耦合的渗流控制拓扑优化理论，方能实现防渗

体系从被动抵御到主动调控的范式跃迁。

2.2 缺乏完善的质量监管制度

水利水电工程防渗质量监管失效呈现三重断裂。制度架构层面存在责任矩阵模糊与监管拓扑失序，导致关键控制节点覆盖不全。执行维度暴露主体能力断层：监管人员岩土工程认知不足削弱风险辨识力，数字化监测手段缺失使隐蔽工程质量失控，追责机制疲软纵容工艺偏离。更根本的是信息链崩塌——数据采集盲区阻碍质量态势感知，异构系统间信息孤岛延缓异常响应，决策闭环缺失致使纠偏滞后。这种制度供给-执行传导-信息反馈的系统失灵，使防渗体系丧失过程纠错能力，最终将局部缺陷放大为结构性渗漏通道。

2.3 防渗施工技术资料不全

水利水电工程防渗体系的知识管理存在三重断裂。原始资料采集呈现碎片化特征：地质参数与设计边界条件脱节，施工工法记录未关联实时工况，技术交底信息流断裂导致执行基准漂移。资料结构化缺失表现为元数据框架崩塌——分类拓扑混乱阻碍关键信息检索，版本控制失效引发图纸参照冲突，异构格式阻碍多源数据融合。最严峻的是动态更新机制瘫痪：设计变更未形成闭环追溯，工艺优化路径脱离现场反馈，技术决策与实施层产生认知时差。这种全周期知识链的断裂，使防渗施工丧失经验迭代能力，最终将技术不确定性转化为实体质量风险。

3 防渗技术在水利水电工程施工中的应用

3.1 灌浆技术

灌浆技术通过浆液相变固化构建地下防渗连续体，其技术内核在于材料-地质-工艺的精准适配。水泥基浆液凭借胶凝强度优势成为普适性选择，但复杂渗流场需启用化学浆液实现分子级渗透——岩溶区依赖硅酸盐体系的高扩散性，断层带需环氧树脂的断裂韧度提升。工艺维度存在双重控制逻辑：压力场调控须平衡岩体水力劈裂临界点与浆液有效运移半径；流变学参数则决定裂隙网络填充度，触变性浆液可抑制重力分层效应。质量保障体系构建多尺度验证机制：岩芯 CT 扫描揭示微观孔隙封堵形态，示踪剂水力试验量化宏观渗透系数衰减率，声波阻抗成像反演固结体空间连续性。异常工况下需启动智能补救程序：基于分布式光纤传感的渗漏路径追踪，配合温度敏感型自修复浆液实现靶向修复。该技术体系正从经验导向转向地质信息模型（GIM）驱动，通过数字孪生平台优化注浆参数动态响应策略，最终实现防渗结构从被动填充到主动调控的范式跃迁。

3.2 防渗墙施工技术

防渗墙技术通过构建地下连续阻水体实现渗流路径重构，其技术演进聚焦于材料-结构-工艺的协同创新。塑性混凝土凭借流变阈值可调特性成为适应性核心材料，而纳米改性聚合物则在高侵蚀区实现分子级致密屏障。现代工法呈现双向突破：多头搅拌技术通过剪切速率梯度控制形成层状复合材料，锯槽工艺则利用高频振动实现基岩界面精准咬合。质量控制需破解三大界面难题：墙体-基岩接触带剪应力集中诱发水力劈裂，施工冷缝处渗透系数呈数量级跃变，异质材料过渡区易形成化学腐蚀通道。监测体系正从点式检测转向分布式光纤传感网络，结合介电谱响应技术实时反演墙体介质均匀性。维护策略进入智能预警阶段：基于渗流-应力耦合模型的寿命预测算法，触发形状记忆聚合物对裂缝的自修复响应。该技术范式已从被动阻水转向地质环境自适应调节，通过数字孪生驱动墙体拓扑结构动态优化，实现防渗体系与水文地质场的协同进化。

3.3 膜料水泥施工技术

膜料水泥技术通过柔性阻隔层与刚性保护体的结构耦合，实现渗流路径的分子级切断。其技术优势源于材料界面的协同效应：聚乙烯膜凭借非极性分子链构筑化学惰性屏障，大坝水泥则通过钙矾石晶体生长形成机械装甲。核心工艺突破在于三维热熔焊接形成的拓扑密封网络，其焊缝强度超越母材本体，而水泥浇筑时的流变控制技术确保骨料在膜面定向排布，消除界面剪切薄弱带。质量风险聚焦于环境应力耦合作用：紫外线辐射诱发聚合物断链形成微渗通道，冻融循环导致水泥-膜料膨胀系数失配引发脱粘。现代监测采用介电谱分析实时追踪界面水化状态，结合分布式光纤传感捕捉温度应力场演变。修复策略进入智能响应阶段：基于形状记忆聚合物的自闭合补丁技术可主动修复机械损伤，纳米硅溶胶渗透结晶则实现微观裂缝自愈合。该体系正从静态防渗转向环境响应型智能结构，通过材料基因工程优化湿热变形协调性，最终形成与服役环境共适应的生命期防渗机制。

3.4 沥青防渗施工技术

青防渗体系的技术内核在于胶体相变与流变行为的精准调控。材料科学层面，芳香组分与胶质相形成胶束网络，赋予体系自修复特性；施工工艺则构建热力学-流变学双重控制模型：拌和温度场决定胶体相分离临界点，碾压剪切速率触发触变恢复效应形成致密拓扑结构。核心突破在于分子级接缝融合技术——红外再活化促使边界层分子链缠结度超越本体材料，消除界面弱化带。耐久性风险源于环境熵增效应：紫外辐射催

化自由基断链形成亚微米渗径，温度梯度导致蜡晶定向析出引发脆性转变。现代监控采用介电弛豫谱实时追踪胶体老化度，结合数字图像相关技术（DIC）量化应变场演化。修复机制进入仿生阶段：基于二硫键交换的自愈合微胶囊响应应力集中释放，碳纳米管网络则实现电热诱导裂缝闭合。该技术正从被动防渗转向熵减调控型智能体系，通过分子动力学模拟优化胶束重构动力学，最终形成与环境涨落协同演化的生命期防水机制。

3.4 高压喷射防渗施工技术

高压喷射技术的本质在于动能-相变协同调控。高速射流对土体实施动态剪切重组，触发矿物颗粒表面能跃迁，促使浆液以超临界流体态渗透至次生孔隙系统。工艺核心在于喷射模态的流变学设计：旋喷形成螺旋状水泥-土复合骨架，摆喷构建枝晶互锁网络，定喷则生成层状抗渗帷幕。其地质适应性源于能量场的自组织特性——射流动压随土层阻抗自适应调整，实现从砂层到黏土的连续性界面冶金结合。该技术通过微观尺度再造原生地质结构，形成与围岩变形协调的仿生防渗体系。

4 结束语

水利水电工程防渗体系的发展正经历从经验范式向科学范式的深刻转型。当前研究揭示了材料-结构-环境耦合作用机制，推动了仿生自愈合防渗体、智能响应型屏障等颠覆性技术涌现。未来技术演进将聚焦于多场耦合控制理论突破，通过数字孪生实现渗流路径的实时重构与主动干预。防渗体系作为工程韧性的核心载体，其创新不仅关乎结构耐久性本质提升，更是水资源可持续管理的战略支点。随着量子传感、人工智能等使能技术的深度融入，防渗技术将完成从被动抵御到生命期智能调控的范式跃迁，最终构建与自然水文循环相协同的韧性水安全屏障。

[参考文献]

- [1]罗观荣.水利水电工程灌浆施工技术与质量管理对策探讨[J].城市建设理论研究（电子版），2025，（21）：216-218.
- [2]张雪梅.水利水电工程灌浆施工技术与质量管控探析[J].珠江水运，2025，（13）：140-142.
- [3]黄新千.水利水电建筑工程中防渗墙施工技术的优化与应用分析[J].城市建设理论研究（电子版），2025，（14）：106-108.
- [4]李延霖.水利水电工程的防渗渠道施工技术研究[J].水上安全，2025，（09）：110-112.
- [5]周洪阳.基于水利水电工程中防渗处理施工技术的研究[J].湖南水利水电，2025，（01）：11-12.