 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i3.9839

Optimization of Construction Technology for Geological Disaster Prevention and Control in Tailings Dams

Zituan Zhao

Wuhan Sinomach Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430032, China

Abstract

Under the construction context of green mines and extreme weather, tailing dams have structural deficiencies in terms of dam stability, seepage control, and monitoring response. This paper, with the main thread of stability control during the construction period, seepage path interruption, and the closed-loop of monitoring and early warning, proposes an integrated optimization path of polymer-modified soil and thin-layer fast-cycle compaction, pre-stressed anchoring and counter-pressure soil to enhance shear strength, composite geomembrane and continuous blind ditches to reconstruct seepage channels, and multi-source sensing and edge computing-driven linkage threshold system. Taking a certain tailing dam as an example, after implementation, the stability safety factor of the dam body increased from 1.15 to 1.35, the seepage velocity decreased from 0.20 to 0.05 meters per day, the early warning response time was shortened from 30 minutes to 5 minutes, and the comprehensive cost decreased by 12%, the risk occurrence rate decreased by 80%, and the seepage pollution index decreased by 60%. The results show that this integrated optimization path can achieve the synergy of risk forward control and cost reduction and efficiency improvement under the condition of limited rainy season window.

Keywords

tailings pond; dam body stability; seepage control; monitoring and early warning; extreme weather

尾矿库地质灾害防控工程施工技术优化

赵紫团

武汉国机岩土工程有限责任公司，中国·湖北 武汉 430032

摘　要

在绿色矿山与极端天气叠加的施工情境下，尾矿库在坝体稳定、渗流控制与监测响应方面存在结构性短板。本文以施工期稳定控制、渗流路径切断与监测预警闭环为主线，提出高聚物改性土与薄层快循环压实、预应力锚固与反压土协同提升抗剪强度，复合土工膜与连续盲沟重构导渗通道，多源传感与边缘计算驱动的联动阈值体系。以某尾矿库为例，实施后坝体稳定性系数由1.15提升至1.35，渗流速度由0.20降至0.05米每日，预警响应时间由30分钟缩短至5分钟，同时综合费用下降12，险情发生率下降80，渗流污染指数下降60。结果表明，该一体化优化路径能够在雨季窗口受限条件下实现风险前瞻管控与降本增效的协同。

关键词

尾矿库；坝体稳定；渗流控制；监测预警；极端天气

1 引言

尾矿库作为矿业固废高位堆存的关键工程单元，其安全运行直接关系到流域生态与下游城镇安全。近年来绿色矿山建设要求与极端天气频发并行，施工窗口缩短、任务密集的矛盾愈发突出，坝体在高含水率细粒尾砂堆筑条件下更易出现强度折减与软化破坏，渗流通道在短历时强降雨与库水位快速波动的驱动下难以及时疏解，自由水面抬升与浸润线外移放大了整体与局部失稳风险。同时，传统以人工巡查与低频观测为主的手段对快速演化状态识别滞后，监测信息与施工组织脱节，难以支撑秒级联动的处置决策[1]。基于此，本文聚焦施工期的关键控制环节，围绕材料体系与工序协同提升抗剪强度，防渗与导渗一体化重构等效渗透系数，多源感知与边缘计算构建联动阈值机制，形成面向施工组织的整合型技术体系，并通过工程应用量化其在安全、经济与环境维度的综合效益，为山区细粒尾砂库的防控实践提供可复制路径与参数化依据。

2 尾矿库地质灾害防控工程施工现状与问题分析

在绿色矿山与极端天气叠加的施工情境下，施工任务密集与窗口受限并存，但现行做法在三类关键环节暴露出结构性短板。坝体稳定性方面，上游法与中线法库区普遍选用细颗粒高含水率尾砂，雨季堆筑周期被压缩，施工碾压不连续，

【作者简介】赵紫团（1980–），男，中国河南平顶山人，硕士，助理工程师，从事地基基础研究。

把坝体抗剪强度储备拉低；坝坡夹层软化与坝肩风化带贯通，使整体与局部稳定同受扰，在老坝加高与排洪改线交汇区形成扰动集中带。渗流控制方面，防渗帷幕布设长度与渗透通道分布不相匹配，心墙与反滤层级配偏离设计意图，排水体连续性差，导致自由水面抬升与浸润线外移在暴雨与上游水位快速波动阶段明显；排洪涵洞节点止水老化以及盲沟淤堵，使渗透坡降增大。监测与响应方面，仍以人工巡查和周期性变形观测为核心，自动化渗压计、孔隙水压力计、GNSS 连续站以及光纤光栅应变尚未形成一体化网络，布点稀疏、采样间隔长、阈值设定依赖经验，导致对快速演化状态的响应滞后，信息平台未与施工进度和加固工序建立联动 [2]。

3 尾矿库地质灾害防控施工技术优化策略

3.1 坝体稳定性加固技术优化

面向上游法与中线法尾矿坝在雨季高含水率细粒尾砂堆筑条件下的滑坡敏感性，本研究把材料体系与施工工艺的协同优化当作核心路径。优先选用高聚物改性土作为坝坡稳定层与关键连接部位的加固介质，包含水溶性聚合物乳液与聚氨酯类材料与细粒尾砂现场拌合，借助包裹黏结与界面加筋效应，提高细料结构的抗剪强度与抗软化能力。分层压实工序按薄层快循环组织，把单层厚度控制在 0.25 至 0.35 m，把含水率调至接近最佳值的偏差带内，依靠大吨位振动碾与边部小型夯具的迭代碾夯，实现高均匀度的干密度。结合坡肩风化带与软夹层的分布特征，在坝坡设置预应力锚杆与锚杆梁的联合体系，把自由段与锚固段的长度划分与持力层埋深相匹配，常规取水平间距约 3.0 至 4.0 m、竖向间距约 2.5 至 3.0 m，施加分级张拉与锁定，引入面层钢筋网与喷射混凝土形成受拉受剪协同的表层结构 [3]。

3.2 渗流控制技术优化

鉴于暴雨阶段自由水面抬升与浸润线外移的叠加效应易把坝体下游形成高渗透坡降，本研究把“新型防渗膜 + 排水盲沟”作为耦合路径来削弱渗流对结构的侵蚀影响。新型防渗膜指以复合土工膜为基体并叠加自愈型聚合物层的防渗材料，通过上游坡面连续铺设并与老坝过渡段及涵洞周边进行同构衔接，把上游水头对坝体的直接作用进行切断。膜材宜选用厚度不小于 1.5 mm 的糙面复合膜，坡面设置非织造土工布缓冲层，坝顶与岸坡采取 0.6 m × 0.6 m 锚固槽压埋处理，长边搭接宽度控制在 0.15 m 至 0.20 m，采用热楔焊成型并进行真空盒与电火花连续检漏。需重点关注的是，廊道、跌水井等穿坝构筑物周边把止水圈与防渗膜进行多道密封，并设置环向止水带，避免结构节点形成优先渗透通道。由此推导，下游排水体系必须呈现全断面连通特性，排水盲沟作为包裹非织造布并以级配砾石围护的暗埋渗排单元，沿坝趾与坝体内分层布置，沟底坡度宜控制在 0.5% 至 1.0%，纵向设置带滤孔的 HDPE 管，管径不小于 160 mm，检查井按 60 m 至 80 m 间距布设并配置沉砂舱，把运维疏通与淤积监控嵌入运行期管理。反滤材料的颗粒级配需兼顾防冲与导渗，内层中值粒径与尾砂粒径比值保持在安全区间，外层渗透系数较心层提高至少一个量级，以形成由内向外有序过渡的渗流通道。

3.3 监测系统布设技术优化

传输链路遵循近场有线与远场无线相结合的原则，把坝体内部节点汇集至岸坡汇集箱，经环形光电复合缆接入网关，远端分散点位选用 LoRa 与 NB-IoT 混合接入，关键廊道配置 4G 或 5G 双上行通道，以 TLS 加密与断点续传来提升数据可用性。边缘网关承担数据清洗与融合，包括采集校时、异常剔除、短窗趋势识别与多源同位校核，在降雨强度超过 20 mm/h 或上游水位小时变幅超过 0.3 m 时，把采样周期由 10 min 下调至 30 s，并联动施工组织把碾压节拍与分区排水的启动时点进行调整。为降低单点失效风险，典型断面关键孔位设置双探头并联，网络拓扑构建环网自愈，网关具备 72 h 本地缓存与上行恢复回传，全网以 GPS 授时与 PTP 校时统一时间基准，使跨源数据得以在秒级对齐。需重点关注的是，阈值体系采用分级与联动方式构建，把孔隙水压力比、坝顶水平位移速率与盲沟流量增量组合作为触发判据，设置预警、响应与管控三级动作，触发后把告警定向推送至施工调度与加固作业负责人。

4 尾矿库地质灾害防控优化技术的应用效果评估

4.1 优化技术的工程案例验证

本研究选用某尾矿库作为对象，在雨季窗口受限与上游法局部中线法相结合的施工背景下，把施工期稳定控制、渗流路径切断以及监测预警闭环纳入同一工艺链条来开展实施。现场既往巡查记录显示坝体抗剪强度储备偏低且坝肩风化带与软夹层交错分布，渗排系统连通性薄弱并导致自由水面抬升，监测以周期性观测为主而对快速演化工况响应滞后。针对上述问题，项目把坝体加固、渗流控制与监测系统安装作为串联流程部署，形成施工组织与风险管控耦合的技改路径。稳定性系数在本文中指典型剖面极限平衡法得到的安全系数，渗流速度指下游观察断面达西平均渗速，预警响应时间指阈值触发到管控指令下达并执行到位的时距。

围绕坝体稳定性提升，施工在老坝加高过渡段与排洪廊道邻近区域设置加密工区，把水溶性聚合物乳液与聚氨酯类材料与细粒尾砂进行现场拌合，当作坝坡稳定层与关键连接部位的加固介质，依靠包裹黏结与界面加筋效应来提高抗剪强度与抗软化能力。分层压实以薄层快循环组织，把单层厚度控制在 0.25 至 0.35 m，把含水率调入最佳值偏差带内，选用大吨位振动碾与边部小型夯具进行迭代碾夯，并把核子密度仪与轻便动力触探纳入过程验收 [4]。

针对渗流控制薄弱环节，工程把上游坡面铺设复合土工膜叠加自愈型聚合物层的防渗系统，设置 0.6 m 乘 0.6 m 锚固槽进行压埋处理，并在涵洞与跌水井等节点实施多道密封以阻断优先渗透通道。下游以全断面连通理念重构排水网

络，沿坝趾与坝体内分层敷设包裹非织造布的排水盲沟与带滤孔 HDPE 管，沟底坡度控制在 0.5% 至 1.0%，检查井按 60 m 至 80 m 间距布设并配置沉砂舱，反滤材料级配形成由内到外的有序过渡以兼顾防冲与导渗。

表 1 某尾矿库优化前后防控效果对比表

指标	定义说明	实施前数值	实施后数值	变化幅度
坝体稳定性系数	典型剖面极限平衡法获得的安全系数	1.15	1.35	提升 17.4%
渗流速度 m d−1	下游观察断面达西平均渗速	0.20	0.05	降低 75.0%
预警响应时间 min	阈值触发到管控指令下达并执行到位的时间	30	5	缩短 83.3%

4.2 优化技术的效益分析

鉴于雨季窗口受限与上游法和中线法复合施工的现实情境，本研究把经济、安全以及环境三类效益纳入同一评价框架来开展分析。施工成本在此处以单位填筑方量和全周期运维投入的综合费用来界定，灾害发生率指在年内中到大雨过程触发的险情事件发生频率，渗流污染指数由盲沟出水浊度、典型金属离子浓度以及达西渗速按权重叠加形成的无量纲指标。在沾益区白沙冲尾矿库的实施范围内，经成本台账与运维记录的对比核算，可以把材料体系和工序协同带来的节约明确量化：薄层快循环压实减少了返工与超挖回填，防渗膜与连续盲沟降低了雨停待干和临时抽排的待机损耗，多源监测把巡检工时与突发抢险投入压缩到可控区间，综合费用相较基线施工组织方案降低 12%。需重点关注的是，防渗与导渗的一体化重构把自由水面与浸润线稳定在下游安全区，渗流路径被集中至可治理断面，叠加检查井沉砂与定点抽排把悬浮颗粒与溶解态迁移通量同步削减，使渗流污染指数在同尺度监测周期内降低 60%，并把达标排放的保障能力扩展到高频暴雨季。由此推导，成本、风险与环境外部性被协同压降，优化技术在山区细粒尾砂库的推广具备可复制性与组织层面的适配空间 [5]。

5 结语

本文面向雨季窗口受限与上游法中线法复合施工的复杂场景，构建了坝体稳定、渗流控制与监测预警一体化的优化技术体系。工程应用表明，高聚物改性与薄层快循环压实联用、预应力锚固配合反压与临时减载，可显著抬升抗剪强度储备；复合土工膜与全断面连通盲沟重塑渗流通道，稳定自由水面与浸润线；物联网监测与边缘计算驱动的分级联动阈值，将风险响应由分钟级压缩至秒级调度。量化结果显示，稳定性系数提升，渗流速度与预警时距显著下降，综合费用与险情发生率同步压降，渗流污染得到有效治理。为保障持续成效，建议将质量与参数回填纳入施工组织闭环，完善帷幕与心墙补强在不同地质分区的参数库，持续优化阈值与工序联动规则，推进与施工进度计划的深度耦合。后续可围绕改性材料在循环干湿与冻融条件下的长期耐久性、强度与渗流的多场耦合机理、监测数据与数值模型融合开展研究，向数字孪生与全寿期智慧管控拓展。

参考文献

[1] 马晓旭,赵乐萱,王睿齐,傅灿,罗玉龙.某尾矿库塌坑处理方案的三维渗流优化比选研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(04):11-15.

[2] 沈欣,果召强,黄旭东,高永,余家骥,潘秋景.地震作用下某尾矿坝永久位移分析及稳定性评估[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(06):839-845.

[3] 潘凤珍.单薄分水岭和堆渣副坝地基塑性混凝土防渗墙施工技术[J].水泥,2025,(12):95-97.

[4] 高鹏飞,高涛,史夏杰,耿超,李全明,梁辉,李伟,衡钇林.基于排土场-尾矿库联建系统主要影响因素的稳定性分析研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(11):107-113.

[5] 徐亮,李亮,李春立,文嘉辉,王超.基于解耦Newmark法与代表性滑动面的扩容尾矿坝动力稳定可靠度分析[J].金属矿山,2025,(06):212-220.