

矿山开采后地质环境修复的技术集成与实践

李启昕

中煤矿业集团有限公司, 北京 100000

DOI:10.61369/ETQM.2026030034

摘 要 : 为推动矿业与生态建设一体化发展, 实现矿区可持续发展, 本文系统构建矿山地质环境修复关键技术体系, 涵盖地质灾害治理与地形重塑、土壤重构与改良、植被恢复与生态重建、水土污染治理与水系修复四大核心模块, 并针对各模块提出差异化技术方案。在此基础上, 提出“地质工程 + 生态工程”“物理修复 + 化学修复 + 生物修复”“数字孪生 + 智能监测”“景观游憩价值再造”多维技术集成策略, 形成协同高效的修复模式。结合露天金属矿边坡、煤矿塌陷区、废弃铅锌矿尾矿库三类典型工程案例, 验证技术体系与集成策略的可行性与有效性。实践结果表明, 集成化修复技术可有效消除矿区地质灾害隐患, 恢复土壤与水系生态功能, 提升植被覆盖率, 同时实现废弃矿山的景观价值与经济价值再造。

关 键 词 : 矿山地质环境修复; 技术集成; 地质灾害治理; 土壤重构

Technology Integration and Practice of Geological Environment Restoration after Mining Operations

Li Qixin

China National Coal Mining Group Co., Ltd., Beijing 100000

Abstract : To promote the integrated development of mining and ecological construction and achieve sustainable development in mining areas, this paper systematically constructs a key technology system for the restoration of mine geological environments. This system encompasses four core modules: geological hazard control and terrain reshaping, soil reconstruction and improvement, vegetation restoration and ecological reconstruction, and soil and water pollution control and water system restoration, with differentiated technical solutions proposed for each module. Building on this foundation, a multidimensional technology integration strategy is proposed, including "geological engineering + ecological engineering," "physical restoration + chemical restoration + biological restoration," "digital twin + intelligent monitoring," and "recreation of landscape and recreational value," to form a collaborative and efficient restoration model. The feasibility and effectiveness of the technology system and integration strategy are validated through three typical engineering cases: an open-pit metal mine slope, a coal mine subsidence area, and an abandoned lead-zinc mine tailings pond. The practical results demonstrate that the integrated restoration technology can effectively eliminate geological hazard risks in mining areas, restore soil and water system ecological functions, increase vegetation coverage, and simultaneously realize the recreation of landscape and economic value in abandoned mines.

Keywords : mine geological environment restoration; technology integration; geological hazard control; soil reconstruction

引言

近年来, 我国先后出台多项政策规范矿山修复工作, 推动修复技术从单一治理向综合修复转型, 但当前实践中仍存在技术适配性不足、单一技术难以应对复杂污染场景、集成化程度偏低、修复效果稳定性欠佳等问题, 制约了修复工作的提质增效。尤其在历史遗留矿山与复杂矿区, 地质条件多样、污染类型复合, 亟需构建系统完善的技术体系与科学高效的集成策略, 实现地质安全保障、生态功能恢复与资源价值再造的协同推进。基于此, 本文聚焦矿山地质环境修复的技术集成与实践应用, 首先梳理地质灾害治理、土壤重构改良、植被恢复、水土污染治理四大核心技术模块, 构建全方位技术体系; 进而探索多技术协同集成路径, 破解单一技术局限; 结合不同类型矿区典型案例, 验证技术体系与集成策略的可行性。

一、矿山地质环境修复关键技术体系

（一）地质灾害治理与地形重塑技术

为了科学、合理开发利用矿区内矿产资源,进一步推进可持续发展战略,需要完善生态文明领域协调机制,构建生态文明体系,实现矿业与生态建设的一体化发展^[1]。地质灾害治理与地形重塑是矿山修复的基础工程,核心在于消除边坡失稳、地面塌陷等隐患,恢复地形地貌的完整性与稳定性,需针对不同场景制定差异化技术方案^[2]。边坡治理方面,岩质边坡采用锚杆、锚索、喷锚网等支护技术增强岩体整体性,土质边坡应用抗滑桩、挡土墙、植被混凝土护坡等技术抑制水土流失与滑动,同时辅以削坡减载、坡率优化降低应力集中风险。地面塌陷治理与地形重塑中,浅层塌陷区利用粉煤灰、建筑垃圾等废弃物充填修复,深层塌陷区结合水文地质条件注浆加固土体,或通过积水区改造、地形整理构建人工湿地、蓄水池等景观,实现功能重构^[3]。此外,地形重塑需兼顾生态适配性,合理设计坡度、坡向及平台宽度,为后续植被恢复与生态重建创造条件。

（二）土壤重构与改良技术

矿山开采造成的土壤剥离、压实、污染及结构破坏、肥力低下,是制约矿区植被生长的核心瓶颈,土壤重构与改良技术是恢复土壤理化性质与生态功能的关键路径^[4]。土壤重构以土层结构合理、养分供给充足、透气透水性良好为目标,采用分层模式,底层铺设砾石层(可掺入无害化处理的尾矿、煤矸石等矿区废弃物)提升透水性,中层回填改良土提供支撑,表层覆盖耕作土或腐殖土满足植被生长需求,既优化土层结构,又实现废弃物资源化、降低修复成本^[5]。土壤改良需针对性施策,重金属污染土壤可通过物理淋洗、固化/稳定化,化学钝化、螯合,生物植物提取、微生物修复等手段,降低重金属活性与迁移性;贫瘠土壤则通过施加有机肥、腐殖质、缓释肥,添加保水剂,接种有益微生物,提升肥力与保水保肥能力、优化土壤生态结构^[6]。同时需结合乡土物种适配性开展改良试验,确定适宜方案,为植被恢复筑牢基础。

（三）植被恢复与生态重建技术

植被恢复是矿山生态重建的核心环节,目标是构建结构稳定、功能完善的人工植被群落,实现生态系统自我维持与演化。物种选择遵循乡土优先、适地适树、先锋与乡土结合原则,优先选用沙棘、紫穗槐等抗逆性强的乡土物种^[7]。修复初期先在裸露区域种植狗尾草等先锋植物改善微环境,再逐步过渡到乔灌木混交群落。种植技术需结合地形土壤条件优化,客土喷播、植生袋护坡等技术被广泛应用,前者适用于陡峭边坡,后者可实现快速固坡与植被培育。此外,需构建乔木+灌木+草本多层级植被体系,优化群落结构,提升生态系统稳定性与生物多样性,最终实现生态功能全面恢复。

（四）水土污染治理与水系修复技术

矿山开采废水、废渣易污染地表水与地下水,水系修复需切断污染源头、净化水体、恢复水文连通性与生态功能。水污染治理遵循源头控制、过程净化、末端治理协同原则,通过截污纳

管、废渣防渗堆放阻断污染物入水体;对已污染水体,采用物理(沉淀、过滤、吸附)、化学(氧化还原、混凝沉淀)、生物(人工湿地、生物膜法等)技术净化,如人工湿地可依托水生植物、微生物与基质协同作用,降解水体重金属与有机物,实现废水达标排放与资源化利用^[8]。水系修复需结合矿区水文地质条件重构水系网络,恢复水循环;对断裂干涸水系,实施河道清淤、生态护岸、水系连通工程;对塌陷积水区,改建为人工湿地或生态湖泊,搭配水生植物构建协同净化体系,为水生生物提供栖息地。此外,需建立地下水动态监测系统,实时监控水位与水质,防范过度开采与污染扩散。

二、矿山修复技术的多维集成策略

（一）“地质工程+生态工程”集成

地质工程+生态工程集成是矿山修复的核心思路,二者协同保障修复的稳定性与可持续性。该策略遵循先地质固稳、后生态修复的原则,通过地质工程治理灾害、重塑地形,消除地质环境不稳定隐患,开展土壤改良与植被恢复,避免生态修复失效^[9]。如露天矿边坡修复,先以锚杆锚索加固、削坡减载等技术固稳边坡,再通过客土喷播等生态技术恢复植被,构建地质稳定-生态覆盖协同模式。同时,植被根系可固土固岩,增强边坡稳定性,减少灾害风险,形成地质加固-生态防护的良性循环。实践中需结合矿区地质条件与生态需求,优化二者衔接流程与技术配比,实现地质安全与生态功能的双重目标。

（二）“物理修复+化学修复+生物修复”集成

单一修复技术难以解决矿山土壤与水体的复合污染问题,物理-化学-生物多技术集成策略可通过技术协同互补,提升治理效率与效果,降低修复成本。该策略需结合污染物类型、污染程度及修复目标,设计阶梯式修复方案。初期以淋洗、筛分等物理技术快速削减污染负荷;中期通过钝化、螯合等化学技术降低残留污染物活性与迁移性;后期依托植物提取、微生物降解等生物技术深度净化污染物,同步修复生态功能。以重金属污染土壤修复为例,物理淋洗去除易迁移重金属,施加石灰、磷酸盐等钝化剂固定残留污染物,种植蜈蚣草等超富集植物提取微量重金属,并接种有益微生物优化土壤生态,实现污染治理与肥力恢复的协同推进。

（三）“数字孪生+智能监测”技术集成

智能化技术发展背景下,数字孪生+智能监测集成模式成为矿山修复精准化、高效化的核心支撑。数字孪生技术构建矿区地质环境与修复工程三维数字模型,模拟地形、土壤等要素动态变化,为修复方案设计优化提供数据支撑^[10]。智能监测技术依托物联网、传感器、无人机等设备,实时采集边坡稳定性、植被生长状况等数据,实现修复过程全时段、全方位监控。二者协同形成数据采集-模拟分析-方案优化-精准实施-动态调控的闭环体系,智能监测的真实数据驱动数字孪生模型迭代,模拟并优化修复方案与施工流程,再以模型结果指导现场施工,结合实时监测反馈动态调整方案,及时解决修复问题。如在煤矿塌陷区修复

中，通过数字孪生模型模拟充填与地形重塑效果，搭配无人机遥感和地面传感器监测地表沉降、植被覆盖率等指标，可实现修复工程的精准管控与高效推进。

（四）景观游憩价值再造集成

矿山修复需兼顾生态功能恢复与场地潜力挖掘，以实现生态、经济与社会价值协同提升，景观游憩价值再造集成策略由此形成。该策略以生态修复为基底，结合矿区地形地貌与历史文化特色，通过景观设计与功能重构，将废弃矿山转化为城市公园、遗址公园、科普基地、休闲度假区等，推动土地资源再利用与价值升级。实践中需坚守生态优先、因地制宜、文化赋能原则，保留矿坑、边坡、尾矿库等特色地貌并融入景观设计，同步配套休闲步道、观景平台、科普展馆等设施，完善游憩服务体系。例如露天矿坑可改造为生态湖泊，搭配景观植被与休闲设施，打造集生态保护、观光休闲、科普教育于一体的矿山公园；废弃尾矿库经土壤改良、植被恢复后，可建设高尔夫球场、露营基地等，实现生态修复与经济收益双赢。

三、典型工程实践与案例分析

（一）露天金属矿边坡修复实践

某露天铁矿长期开采形成30–80米岩质边坡，岩体破碎易引发地质灾害，坡面裸露、水土流失严重。本次采用地质工程+生态工程集成策略分三步修复，地质治理与地形优化，通过锚杆锚索支护、截排水沟设置、削坡减载（坡率调至1:1.2–1:1.5）及分级平台构建，提升边坡稳定性。土壤重构改良，铺设腐殖土与矿渣混合改良土，配施有机肥与钝化剂，改善肥力并降低重金属污染。植被恢复，以客土喷播技术种植乡土先锋物种，构建灌木+草本群落，平台配植乔木形成多层植被体系。修复后经智能监测，边坡稳定无灾害，坡面植被覆盖率从不足5%升至85%以上，水土流失受控，形成稳定生态系统。同时结合景观设计，打造生态景观带，实现生态修复与景观价值协同提升。

（二）煤矿塌陷区综合治理实践

某煤矿因长期开采形成2.5平方公里浅层塌陷区，积水严重、

土壤退化、植被衰退。修复采用地形重塑+水系修复+生态重建+价值再造策略，粉煤灰与建筑垃圾充填浅层塌陷并重构土壤，深层积水区改造为湿地与湖泊，构建水系网络；截污纳管治废水，水生植物净化水体，脱硫石膏与有机肥改良盐碱土；种植农作物、乡土乔木及耐水植物，构建复合生态系统；依托湿地湖泊打造生态旅游配套设施。治理后，土地利用率从30%升至80%，恢复耕地1.2平方公里、年产粮800吨，湿地水质达地表水Ⅲ类，生态旅游年均接待游客10万人次，实现生态、农业、旅游多元融合，提供可复制经验。

（三）废弃尾矿库生态修复实践

某0.8平方公里废弃铅锌矿尾矿库，含铅、锌、镉等重金属，存在淋溶污染风险，地表裸露无植被，生态恶劣。本次采用污染治理+土壤重构+植被恢复+长期监控策略修复，源头控制，铺设防渗膜、设截排水及淋溶水收集设施，用磷酸盐钝化剂固化稳定化尾矿以降低重金属活性；土壤重构，铺50–80厘米客土与腐殖土混合层，添加有机肥等改良土壤；植被恢复，选用超富集植物与乡土灌木，以植生袋+鱼鳞坑模式构建群落，净化重金属并覆盖地表；长期监测，实时监控土壤、地下水及植被状况，动态调整措施。修复后3年，土壤重金属含量降60%以上，地下水达标，植被覆盖率达90%，形成稳定生态群落。该区域转为生态林地，兼具水土保持、碳汇功能，实现废弃尾矿库生态化改造与可持续利用。

四、结束语

矿山地质环境修复是破解矿业开发与生态保护矛盾、推进生态文明建设的关键举措，其核心在于通过技术创新与多维度集成，实现矿区地质安全、生态功能与资源价值的协同提升。本文系统构建了涵盖地质灾害治理、土壤重构改良、植被恢复、水土污染治理的矿山修复关键技术体系，提出“地质工程+生态工程”“物理–化学–生物修复”“数字孪生+智能监测”及景观价值再造四大集成策略，明确了从基础治理到功能重构、从技术应用到效益转化的完整修复路径。

参考文献

[1] 易露. 大冶铜山口露天开采矿山地质环境问题及修复治理措施 [J]. 采矿技术, 2023, 23(5): 215–218. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2900.2023.05.043.

[2] 于洋, 陈炳乾, 花奋奋, 等. 矿山地质环境灾变与保护修复研究现状与展望 [J]. 金属矿山, 2024(3): 1–18. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202403001.

[3] 袁昕, 周华. 北京房山露天开采废弃大理石矿山地质环境治理与生态修复工程评价 [J]. 城市地质, 2022, 17(3): 340–345. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2022.03.011.

[4] 陈亮. 地质水工环境保护技术在矿山环境修复中的应用 [J]. 水上安全, 2024(9): 94–96.

[5] 李季. 桥山富平段废弃矿山地质环境问题及生态修复技术研究 [D]. 陕西: 西安工业大学, 2023.

[6] 陈明. 历史遗留矿山的地质环境问题与生态修复设计 [J]. 中国金属通报, 2024(8): 151–153. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2024.08.051.

[7] 缪发金, 邢永辉, 兰子强, 等. 云南省昌宁县矿山地质环境生态修复现状与治理 [J]. 低碳世界, 2024, 14(6): 25–27. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2066.2024.06.009.

[8] 刘妍芬. 矿山地质灾害治理及生态环境修复措施的应用探究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(19): 208–210. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2405-5042-3947.

[9] 项德生. 露天矿山开采区生态环境修复技术应用探析 [J]. 中国金属通报, 2024(18): 41–43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2024.18.014.

[10] 魏森. 矿山地质环境现状对生态修复工作的影响研究 [J]. 中国金属通报, 2023(10): 140–142. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2023.10.047.