金属矿山露天采场生态修复方法研究

刘志双
云南省有色地质局勘测设计院　云南　昆明　650000

摘　要：本文针对金属矿山露天采场生态损伤的整体性、顽固性与复合型特征，围绕地形地貌重塑、土壤环境改良、植被与生态系统重构三大核心维度，构建了全流程系统化的生态修复技术体系。技术路径涵盖采坑回填压实、边坡分级稳固、微地形优化等地貌整治工艺，配套土壤理化性质改良、重金属原位钝化的土壤修复技术，结合适配性植被优选、分层配置及稳态培育完成生态重建。整套技术方案贴合露天采场特殊立地条件，可系统性破解地貌失稳、土壤退化、植被难以定植等多维度生态退化难题，为金属矿山露天采场生态修复工程提供工序清晰、适配性强的实操技术方案与工程参考。

关键词：金属矿山；露天采场；生态损毁；地貌重塑；生态修复

引言：金属矿山露天开采活动对区域原生生态系统造成了全域性的剧烈扰动，形成了覆盖地形、土壤、植被、水文多维度的复合型生态损伤，这类损伤具备影响周期长、修复难度大、次生风险高的典型特征，长期制约资源型区域的生态安全与可持续发展。传统零散的修复技术难以适配露天采场复杂的受损本底条件，无法形成闭环的修复逻辑，往往出现修复后植被存活率低、地貌稳定性不足的问题。在此背景下，构建一套覆盖全工序、适配特殊立地条件的系统化修复技术体系，成为当前金属矿山生态修复领域亟需解决的核心技术命题，也是落实区域生态安全屏障建设的关键支撑。

1 金属矿山露天采场生态受损核心特征

金属矿山露天采场的生态损伤具有整体性、顽固性与复合型特征，损伤覆盖地形地貌、土壤环境、植被系统、水文环境等多个生态维度，各维度损伤相互关联、相互影响，形成系统性生态退化格局，也是生态修复工作需要解决的核心问题。（1）地形地貌损伤是露天采场最直观的生态损伤类型。露天开采彻底颠覆区域原生地形，形成深浅不一的采坑、陡峭裸露的岩质边坡、杂乱堆积的矿渣堆，地表平整度完全破坏，地形坡度、高差大幅增加，地表径流路径紊乱，为水土流失、边坡失稳提供了基础条件。同时，破碎的地貌结构导致区域地表连通性中断，动植物栖息空间彻底损毁，生态系统的空间载体完全破坏。（2）土壤环境损伤是制约生态恢复的核心因素。开采过程中表土剥离、机械碾压、矿渣覆盖等行为，导致采场区域原生土壤层完全消失，剩余基质多为风化岩体、矿渣碎屑，存在土层浅薄、孔隙结构失衡、养分匮乏、土体板结严重等问题。同时，金属矿山开采易导致土体中重金属元素富集，土壤酸碱失衡，微生物群落消亡，土壤保水、保肥能力大幅下降，无法为植被生长提供基础条件。（3）植被与生物系统损伤具有彻底性特征。露天开采的全域式地表扰动，直接清除区域原生植被，造成植被覆盖率趋近于零。同时，土壤退化、地形破碎、水土条件恶劣的现状，导致草本、灌木等原生植物难以自然定植，动植物栖息地消失，生物多样性急剧下降，生态系统的物质循环与能量流动链条断裂，区域生态自我修复的生物基础完全丧失。（4）水文水土损伤呈现持续性发展态势。陡峭的采场边坡与松散的矿渣堆积体，抗冲刷、抗侵蚀能力极差，降雨条件下极易产生坡面径流冲刷，引发严重的水土流失与坡面沟蚀问题。同时，采坑地貌改变了区域原生地下水径流格局，导致地下水渗漏、地表积水或干旱缺水等问题，进一步加剧土壤干旱化与生态退化[1]。

2 露天采场地形地貌重塑修复方法

2.1 采坑地形平整与回填塑形

针对露天采坑普遍存在的地势低洼、空间凹陷、地表凹凸不平问题，区域内原有松散堆积体结构稳定性差，汇水条件集中，易形成持续性积水洼地与失稳松散堆积区域，整体地形承载能力不足，存在较高的次生地质隐患。针对该类区域的修复作业，核心采用分级回填、分层压实的塑形技术路径。工程实施阶段优先就地消纳矿山开采全流程产生的废弃矿渣、风化岩土作为回填基质，无需远距离外运大量外来土方，在降低工程实施成本的同时同步推进矿区固废源头减量。回填作业严格遵循由下至上的顺序逐层填筑，每一层填筑作业完成后配套开展标准化机械压实作业，全过程动态管控土体压实状态，从施工源头规避后续运行阶段出现地面沉降、塌陷的风险。回填推进过程中全程参照区域原生地

形自然走势进行动态调控，合理控制整体地形坡度，避免出现局部区域低洼积水或坡度过大引发的表层水土流失问题。塑形作业全部完成后，对表层区域开展精细化平整处理，彻底清理表层尖锐岩块、松散浮渣，构建平缓规整的基面地形，保障地表径流顺畅导排，全面消除区域积水隐患，为后续土壤覆层铺设与植被定植作业提供稳定平整的基础载体[2]。

2.2 边坡分级削坡与稳固处理

露天采场边坡多为陡峭岩质或土石混合结构，坡面长期裸露受外力扰动，岩体完整性差，在外部荷载与环境作用下极易发生滑坡、坍塌与坡面侵蚀问题，是整个地形修复工作的重点管控区域。该类区域的修复核心采用分级削坡减载技术路径，作业前先完成全坡面的岩土结构勘察与稳定性评估，依据边坡岩体的稳定状态与内部构造特征，将原有高陡边坡拆解为多级缓坡结构，合理管控单级边坡的坡度与高度，逐步释放并降低边坡内部的自重应力，从根源层面提升边坡的整体抗滑能力。削坡作业全程遵循自上而下的施工顺序，过程中产生的松散岩土体随产随清，或在指定区域规整堆存，避免在坡面局部形成额外荷载，影响边坡临时稳定性。针对岩体破碎、裂隙发育的薄弱边坡区域，配套采用局部嵌补、裂隙封堵的工艺处理岩体缝隙，填充内部空洞与松散带，强化坡面结构的整体性，阻断裂隙持续扩张的路径，避免因结构面贯通引发后续坡面坍塌风险。

2.3 地表微地形优化调控

在整体地形平整、边坡稳固的基础上开展微地形优化，可进一步提升修复区域的水土保持能力与自然生态系统适配性。针对平整后的基面与缓坡区域，通过人工干预方式构建浅沟、鱼鳞坑、水平阶等差异化微地形结构，直接改变原有地表径流的运动路径，减缓径流流动速度，从过程层面提升地表的蓄水、保土能力。微地形构建全程遵循因地制宜的实施原则，结合不同区域的地形本底条件匹配对应工艺，坡度较大的坡面区域布设鱼鳞坑结构，平缓开阔的基面与缓坡区域布设水平浅沟，通过差异化的工程布局实现雨水高效截留、表层水分持续蓄积，有效改善表层土体的水分赋存条件。同时，经过优化后的微地形单元，可为植被种子留存、幼苗初期生长提供相对稳定的局地微环境，减少地表径流对种子与幼苗的冲刷扰动，大幅提升后续植被修复作业的整体成活率，为矿区生态系统的自然恢复构建稳定的初始条件。

3 露天采场土壤环境改良修复方法

3.1 土壤物理结构改良

露天采场经地形重塑后留存的基底物质多为矿渣、碎石与风化岩体，普遍存在有效土层厚度不足、颗粒级配失衡、表层板结严重、通气透水性能弱等物理层面的缺陷，无法直接满足植被生长的立地需求。该环节的物理改良作业以构建疏松透气、持水保肥的稳定土壤结构为核心目标，首先对划定的修复区域内的基底介质实施全域深耕翻松处理，彻底破除表层压实形成的板结土层，同步筛除作业层内的大块碎石、坚硬岩块，从基础层面优化土体的孔隙分布状态。针对有效土层厚度不达标的区域，采用分层客土覆盖工艺，回填适配当地植被生长的优质耕作土、腐殖土，合理管控覆土层级的厚度范围，为植被根系延展提供充足的生长空间。同时在改良层内均匀混入秸秆、木屑、河沙等有机与无机改良物料，调整土体内部砂粒、粉粒、黏粒的组成占比，系统性改善土壤的透水性能、通气性能与持水能力，解决原生基质板结、保水性能不足的核心问题，强化改良后土壤物理结构的长期稳定性。

3.2 土壤化学性质调控

金属矿山露天采场经前期地形重塑与物理结构改良后，留存的土壤介质普遍存在酸碱失衡、养分库缺失、重金属富集等典型化学层面问题，会直接抑制植被正常生长与土壤微生物群落的定殖活动，是生态修复过程中必须优先解决的核心障碍。针对酸碱失衡问题，先通过全域布点采样完成土壤pH值的精准检测，再根据不同分区的酸碱特征针对性施加适配的改良物料，酸性土壤区域施用石灰、草木灰等碱性物料逐步中和游离酸度，碱性土壤区域施加腐殖酸、硫磺等酸性调节物料逐步调整酸碱度，最终将土壤pH值调控至适配多数本土植物生长的合理区间。针对土壤养分匮乏问题，通过施加完全腐熟的有机肥、缓释型复合肥，补充土壤中氮、磷、钾三类核心大量元素，同时配套添加适配区域植被需求的微量元素肥料，系统性弥补原生土壤矿物质组分缺失的短板。针对轻度重金属富集问题，采用原位钝化改良工艺，均匀施加膨润土、沸石、腐殖质等环境友好型钝化剂，通过吸附、络合、共沉淀作用固化土壤中的重金属离子，降低重金属的生物活性，减少重金属组分对植被根系的直接毒害作用，全面改善修复区域的土壤化学环境[3]。

4 露天采场植被与生态系统重构方法

4.1 植被品种优选原则

露天采场经前期地形重塑与土壤改良后，整体立地条件仍存在明显约束，普遍表现为有效土层浅薄、养分供给不足、表层水分留存难度大、局地温差波动显著，植被品种的适配性筛选是破解这类生境限制的核心前提。本次植被优选严格遵循本土化、强抗逆性、低养

护性三大核心原则推进。选型阶段优先选取矿区周边自然分布的原生草本、灌木品类，本土物种经长期区域自然演化，完全适配当地气候节律与水土禀赋，定植后环境适配性强，不存在外来物种入侵风险，可快速接入周边原有生态系统的物质循环路径。同步定向筛选具备耐旱、耐贫瘠、耐盐碱、抗重金属特性的植被，匹配采场特殊的土壤与局地环境条件，降低极端生境因子对植被存活的负面影响。选型过程中优先判定物种根系发育特征，选取土体固结作用突出的品类，通过植被根系的穿插缠绕作用稳固表层土体，辅助实现区域水土保持、边坡长效稳定，同步达成生态修复与地貌安全防护的双重目标。[4]

4.2 分层植被配置模式

该模式针对露天采场不同分区的地形特征与土壤改良状态，采用差异化的植被空间布局方案，系统性提升植被群落的长期稳定性与地表覆盖水平。边坡区域以固土护坡为核心管控目标，配置灌木与草本结合的复合群落，依托灌木深根系的土体锚固作用稳固边坡内部结构，借助草本植物的快速生长特性实现裸露坡面的快速覆盖，从过程层面减少坡面水土流失风险。平整基面区域经前期土壤改良后立地条件相对优越，采用草本与灌木混播的配置模式，构建结构密集的植被群落，在提升地表植被覆盖率的同时，同步推动表层土壤微生物群落的定殖与恢复。低洼易积水区域定向适配耐湿草本品类，规避季节性积水引发的植被枯萎死亡问题，实现不同地形单元的精准植被配置。该模式完全摒弃单一植被种植的传统方案，通过多品类混种形成空间错落的分层植被结构，有效提升群落的外部抗干扰能力与自然自我演替能力。

4.3 植被养护与生态稳态培育

露天采场植被立地条件严苛，幼苗抗逆性薄弱，需建立分阶段时序养护机制、配套量化监测指标，保障植被存活与群落稳态演替。整体设置3年标准化养护周期，定植后1年内为幼苗关键管护期，需按月监测土壤墒情、植被成活率，及时适度灌溉保墒、定点清除杂草，保障幼苗成活率稳定在85%以上，杜绝水肥争夺导致的幼苗枯死。定植后1-2年为群落培育期，按季度核查植被覆盖率、植株长势，针对性补植缺株区域，优化群落结构，同步监测土壤有机质、含水率等核心指标，依托枯枝落叶腐解推动土壤微生物群落自然恢复。定植后第3年为生态稳定期，逐步降低人工干预强度，重点监测植被郁闭度、水土保持效果及边坡稳定性。养护期满后，以植被保存率、地表覆盖率、土壤理化稳定性为核心验收指标，达标后停止高强度人工管护。通过时序化养护与量化管控，推动植被群落正向演替，逐步形成可自我维持、自然更新的稳定生态系统[5]。

结束语

本文立足金属矿山露天采场生态损伤的核心特质，构建了适配矿区恶劣立地条件的全流程生态修复技术体系，实现了地质安全治理、土壤环境改良与生态系统重构的有机融合。通过地形微整形、土壤理化修复、分层植被配置的分层施策模式，有效解决了露天采场地貌失稳、水土侵蚀、植被难定植等核心痛点，打破了单一工程修复的局限性。整套技术方案兼顾工程安全性与生态自然演替规律，可高效修复矿区受损生态结构、恢复生态核心功能。未来可结合矿区地域气候、矿种特性优化修复参数，推动修复技术标准化、本土化落地，助力矿山生态治理与绿色可持续发展。

参考文献

[1]史雁冰,刘冰权,李淑梅,杨忠芳,余涛.金属矿区土壤重金属污染生态风险评价及修复技术[J].中国地质,2026,53(2):551-574.

[2]陈芝聪,卢方欣,蔡图,薄怀志,孙小银,李东杰.绿色矿山背景下露天矿山开采与修复管控研究[J].有色金属（矿山部分）,2026,78(2):65-75.

[3]陆大丞,邓云腾,傅峥,付俊.金属矿山露转地开采岩体移动及安全防控研究进展[J].有色金属（矿山部分）,2025,77(1):13-30.

[4]张永利,张开,刘家良,姚玉增,付建飞.露天煤矿区修复对阜新主城区热环境效应的影响研究[J].中国矿业,2025,34(6):154-161.

[5]陈善成,钱程.采石场废弃矿山地质环境恢复治理措施探究[J].河南科技,2023,42(16):102-105.