

# 银铅锌矿山土地复垦与生态修复综合治理技术研究

高峰

河南发恩德矿业有限公司 河南 洛阳 471716

**摘要:** 银铅锌矿山开采带来经济效益的同时,也造成土地损毁、重金属污染、植被退化等生态问题。本文针对其废弃地特性,系统剖析了矿区土地压占挖损、重金属迁移累积、酸性废水产生等主要生态环境问题。综述土地复垦与生态修复关键技术,如地形重塑、重金属稳定化修复、植被恢复等,提出工程、生物、化学结合的综合治理体系。生态修复应遵循“源头控制”-“过程阻隔”-“末端修复”路径,达成生态功能恢复与土地资源再利用的目标。

**关键词:** 银铅锌矿山;土地复垦;生态修复;重金属污染;综合治理

引言:银、铅、锌是我国重要有色金属,应用于多领域。但长期大规模开采使矿区土地资源严重受损,形成大量尾矿库等废弃地,占用土地且重金属在雨水淋溶下迁移,威胁农产品安全与人体健康。我国有色金属矿区废弃地复垦率不足30%,远低于发达国家。银铅锌矿山生态修复面临地形破碎等多重挑战,传统单一修复技术效果不佳,开展综合治理技术研究对矿业绿色发展和区域生态安全意义重大。

## 1 银铅锌矿山开采对生态环境的影响

### 1.1 土地资源损毁

银铅锌矿山开采对土地的破坏有挖损、压占与塌陷三种形式。露天开采剥离表土形成采坑,破坏地形、土壤结构,让土地丧失耕种与生态功能;地下开采或致地表塌陷,出现裂缝与塌陷坑,破坏土地完整性。废石堆场和尾矿库大面积压占土地是普遍现象,堆积物覆盖土壤,阻碍植被自然恢复。中型矿山尾矿库占地可达数十公顷,尾矿颗粒细、渗透性差,表层难长植物。此外,矿山配套设施也加剧土地占用。土地损毁造成耕地流失,还破坏区域生态系统的连续性与稳定性。

### 1.2 重金属污染特征

银铅锌矿山废弃地重金属污染有复合性、持久性与隐蔽性。复合性是多种重金属伴生,交互作用产生协同毒性,危害远超单一重金属;持久性是重金属难被微生物降解,存留时间长,威胁生态系统安全;隐蔽性是污染难察觉,却能通过食物链富集危害人体。尾矿和废石中的重金属经风化、淋溶,以多种形式进入土壤溶液,生物有效性和迁移能力强<sup>[1]</sup>。研究显示,铅锌矿区周边农田土壤铅、镉含量常超国家筛选值数倍至数十倍。

### 1.3 土壤退化与植被破坏

矿山开采使矿区土壤物理、化学、生物严重退化。物理上,土壤结构破坏,透水透气性差;化学上,尾矿和

废石pH值异常,营养元素匮乏,加上重金属毒害,基质环境极端贫瘠;生物上,土壤微生物和酶活性降低,物质循环与能量流动功能基本丧失。在多重胁迫下,矿区植被覆盖度低,仅少数耐性先锋植物能生长,大部分植物无法存活,废弃地长期裸露,在风力作用下成为扬尘源,加剧周边环境污染。

## 2 土地复垦与生态修复技术体系

### 2.1 地形重塑与土壤重构技术

地形重塑是土地复垦的基础工程,旨在恢复与周边地貌相协调的地形条件。对露天采坑,可采用矿坑回填方式,利用废石、尾矿等矿山固体废物进行分层回填压实,恢复至设计标高。对废石堆场和尾矿库,则需进行削坡减载,按照安全稳定要求修整边坡坡度,一般控制在1:2至1:3之间,并设置马道平台,既保证边坡稳定,又为后续植被恢复提供作业面。土壤重构是复垦的核心环节,因矿山废弃地普遍缺乏表土资源,需采用客土覆盖或人工配制生长基质。客土覆盖厚度应根据复垦用途确定,农业复垦一般要求覆土50cm以上,林业复垦覆土30cm左右,草地复垦覆土可减至15-20cm。当客土来源受限时,可采用尾矿改性技术,通过添加有机物料(城市污泥、农家肥、秸秆等)和黏土矿物(膨润土、沸石等),改善尾矿的物理结构和养分状况,构建人工土壤剖面。

### 2.2 重金属稳定化修复技术

重金属稳定化修复是通过物理、化学或生物手段改变重金属赋存形态,降低其溶解性、迁移性和生物有效性的关键技术。化学稳定化应用最广,常用材料包括磷酸盐类(磷矿粉)、碱性材料(石灰)、黏土矿物(膨润土)及有机质(生物炭)等。磷酸盐可与铅离子形成稳定的氯磷铅矿沉淀,使铅的生物有效性降低80%以上;石灰通过提高土壤pH值,促进重金属形成氢氧化物或碳酸盐沉淀。稳定化材料需根据重金属污染特征和土壤性质

进行配比优化,复合稳定剂因能同时固定多种重金属而效果更佳<sup>[2]</sup>。施用时可采用表层撒施后翻耕混合或深层注入等方式,确保稳定剂与污染介质充分接触。修复后需进行长期跟踪监测,评估稳定效果的持久性。

### 2.3 植被恢复技术

植被恢复的核心在于构建能够自我维持的植物群落。银铅锌矿山废弃地面临重金属毒性、土壤贫瘠、干旱缺水等多重胁迫,植物选择需遵循耐性优先、本土优先、乔灌木结合的原则。耐性植物包括超富集植物和耐性植物两类,前者如蜈蚣草、东南景天可用于植物提取修复,后者如狗牙根、香根草、紫穗槐等可用于植被覆盖。植物稳定利用耐性植物根系固定土壤、钝化重金属,适用于中低污染场地;植物提取利用超富集植物吸收并向地上部转运重金属,通过收割实现污染减量,但修复周期需5-10年。工程中通常先播种草本植物快速形成地被覆盖,待微环境改善后再逐步引入灌木和乔木,构建多层次植被群落。

### 2.4 生物-化学联合修复技术

单一修复技术难以应对银铅锌矿山复杂污染条件,联合修复成为发展趋势。生物-化学联合修复将化学稳定剂的快速固定效应与生物的长期改良作用相结合。典型技术路线为:首先施用化学稳定剂进行快速钝化处理,降低重金属急性毒性;待基质环境改善后,接种丛枝菌根真菌等微生物菌剂,微生物一方面进一步钝化重金属,另一方面促进植物对养分的吸收;最后种植耐性植物,形成“稳定剂-微生物-植物”三位一体修复系统。研究表明,应用菌根真菌辅助修复后,宿主植物生物量提高30%-50%,体内铅浓度降低20%-30%,体现了显著的联合增效作用。此外,还可引入蚯蚓等土壤动物,通过其掘穴、取食、排泄等活动改善土壤结构和养分状况,加速生态恢复进程。

## 3 综合治理技术体系构建

### 3.1 “源头控制-过程阻隔-末端修复”技术路径

银铅锌矿山生态修复应遵循“源头控制-过程阻隔-末端修复”的系统化技术路径。源头控制针对污染产生源头,主要措施包括:对尾矿库和废石堆场实施覆盖封闭,减少雨水入渗和氧化风化;修建截排水系统,将清洁径流引离污染区;对采空区进行充填处理,防止塌陷引发次生灾害。过程阻隔旨在切断污染物的扩散通道,常用技术包括:在污染区下游修建垂直防渗墙或可渗透反应墙(PRB),拦截地下水中迁移的重金属;在边坡坡脚设置沉淀池,收集并处理径流携带的悬浮物和溶解态重金属;构建隔离层,阻止植物根系深入高污染层位。末端修复是对已受

损生态系统进行直接修复,包括土壤改良、植被重建和生物多样性恢复。三条防线层层递进、相互配合,形成全链条治理体系。实践证明,缺少源头控制的末端修复往往治标不治本,污染物仍可通过侧向或垂向迁移持续影响修复区,导致修复效果难以持久。

### 3.2 分区分类修复策略

银铅锌矿山不同区域的污染特征和修复目标差异显著,采取分区分类的差异化修复策略。尾矿库区污染最为严重,重金属总量高、基质极端贫瘠,应以风险管控为主,优先进行表面覆盖和边坡稳定化处理,防止扬尘扩散和水土流失,在条件允许时实施植被恢复但不宜种植进入食物链的植物。废石堆场块石含量高、持水能力差,可采用“客土填充+喷播绿化”技术,利用团粒化喷播材料将种子、基质、黏合剂喷射至坡面,形成人工植被。采空塌陷区以地形重塑和土地复垦为重点,可采用“充填复垦”或“疏排复垦”方式恢复土地功能。选厂工业场地建筑物拆除后,需对场地土壤进行调查评估,若存在油污或药剂污染,需采用化学氧化或生物修复技术处理<sup>[3]</sup>。周边受污染农田应以安全利用为主,通过施用钝化材料降低重金属活性,种植低累积作物品种,确保农产品质量安全。分区分类策略可在有限投入下实现修复效益最大化。

### 3.3 修复效果评估与长期监测

修复效果评估是验证治理成效、指导后期管护的重要环节。评估指标体系应涵盖土壤质量、水环境质量、植被状况和生态功能四个维度。土壤质量指标包括pH值、有机质含量、重金属全量及有效态含量、土壤酶活性等;水环境指标包括地表水和地下水的pH、重金属浓度、硫酸根浓度等;植被状况指标包括植被覆盖度、植物多样性、优势种生物量等;生态功能指标包括水土保持能力、土壤微生物生物量等。评估标准应参照相关技术规范,如《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范》和《土地复垦质量控制标准》。修复工程完成后需建立长期监测制度,监测频率一般为第一年每季度一次、第二至三年每半年一次、之后每年一次。若发现重金属含量反弹或植被退化迹象,应及时启动补充修复措施。监测数据应建立数据库,用于评估修复效果的持久性并为后续工程提供经验借鉴。

## 4 工程案例分析

### 4.1 案例概况

以我国北方某大型银铅锌矿山为例,该矿开采历史超过30年,累计产生尾矿约500万吨,形成占地35公顷的尾矿库,以及废石堆场12公顷、露天采坑8公顷。尾矿

库内尾矿呈灰黑色,颗粒细(-200目占75%),pH值4.2-5.0,呈强酸性,铅、锌、镉含量分别达到2800mg/kg、4500mg/kg、38mg/kg,远超风险筛选值。尾矿库周边300米范围内农田土壤镉含量平均为1.2mg/kg,超出《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》限值。矿区植被覆盖度不足10%,水土流失严重,下游河道底泥重金属超标。该矿区被列为省级重点生态修复治理项目,要求通过综合治理使土地复垦率达到85%以上,植被覆盖度提升至70%以上,消除重金属污染对周边农田的威胁<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 技术方案与实施

针对该矿区实际情况,采用了“源头控制+联合修复”的综合治理方案。首先实施源头控制工程:对尾矿库坝体进行加固并修整边坡至坡比1:2.5,库顶铺设HDPE土工膜(厚度1.5mm)并进行黏土覆盖(厚度30cm),顶部覆土50cm后种植耐性草本;沿尾矿库周边修建截洪沟和排水沟,将上游径流引离库区;在尾矿库下游设置沉淀池,库区渗滤液经收集处理后达标排放。在土壤改良环节,对尾矿库表层和周边污染农田施用钝化材料,配方为石灰2.5t/ha+磷矿粉3t/ha+有机肥45t/ha,通过旋耕机混合均匀,保持土壤湿度养护30天。植被恢复方面,筛选出香根草、紫花苜蓿、高羊茅、沙打旺等4种耐性植物,采用条播方式种植,播种密度为草本15g/m<sup>2</sup>、灌木5g/穴。对废石堆场边坡采用客土喷播技术,喷播厚度8-10cm,含保水剂、黏合剂和混合草种。同时接种丛枝菌根真菌菌剂,用量为5kg/亩,与种子同时施入。

#### 4.3 修复效果评价

修复工程实施后,经过3年跟踪监测,各项指标均达到设计要求。尾矿库区植被覆盖度由不足5%提升至75%,主要植物群落为香根草-紫花苜蓿群落,植物生长状况良好,未出现明显中毒症状。土壤pH值由4.5提升至6.8,有

机质含量由3.2g/kg提高至12.5g/kg。采用改进的BCR连续提取法分析显示,尾矿中铅、锌、镉的酸可提取态比例分别由修复前的28%、35%、42%下降至12%、15%、18%,残渣态比例显著上升,表明重金属稳定性大幅提高。尾矿库下游监测井水质指标持续改善,铅、锌、镉浓度分别由修复前的0.35mg/L、0.82mg/L、0.028mg/L降至0.05mg/L、0.12mg/L、0.005mg/L,满足地表水III类标准。周边农田土壤镉含量降至0.6mg/kg,种植的小麦籽粒镉含量符合食品安全标准。项目总投资2800万元,恢复可利用土地面积约50公顷,综合效益显著。

#### 结束语

银铅锌矿山土地复垦与生态修复是一项复杂的系统工程,面临重金属复合污染、土壤极端贫瘠、生态功能丧失等多重挑战。本文系统分析了银铅锌矿山开采对土地和生态系统的损毁特征,梳理了地形重塑、土壤重构、重金属稳定化、植被恢复及生物-化学联合修复等关键技术,构建了“源头控制-过程阻隔-末端修复”的技术路径和分区分类修复策略,并通过工程案例验证了技术体系的可行性。同时探索“生态修复+产业导入”的可持续治理机制,实现生态效益、经济效益与社会效益的统一。

#### 参考文献

- [1]冯梦丹.葫芦岛八家铅锌矿矿山环境恢复治理与土地复垦实例[J].有色矿冶,2024,40(3):55-57.
- [2]朱莉叶,刘雨晴,严冰,等.四川省德昌县大陆槽稀土矿山土地复垦研究[J].矿产勘查,2023,14(9):1749-1758.
- [3]曾庆宏.探析矿山生态环境恢复治理及土地复垦[J].区域治理,2021(20):186-187.
- [4]邢倩云.金属矿山开采中重金属污染对生态环境的影响研究[J].世界有色金属,2024(11):124-126.