

露采金属矿山采坑境界面生态修复技术研究

程睿

(深圳市如茵生态环境建设有限公司,广东 深圳 518057)

摘要:【目的】研究适宜露采金属矿山采坑境界面的生态修复技术,为同类废弃地的生态修复提供借鉴。【方法】以江西某露采铜矿为例,通过实地调研对其采坑境界面生态环境破坏问题及成因进行识别与分析,并结合工程实例对采坑境界面生态修复工程技术模式进行了研究。【结果】采坑废弃地的生态环境问题主要包括原生态系统和地貌景观损毁、裸露创面自然修复的立地条件缺失、采坑边坡长高陡峭且风化易崩塌、持续且极端的酸性及重金属污染等,几乎不具备自然恢复的条件,通过人工干预重建生态系统成效显著。【结论】以重塑地貌稳固地形为前提,以修复污染重构(建)土壤环境为基础,以恢复植被促进自身演替为手段,以修复生态系统重现生态功能为最终目标的人工修复模式,通过人工干预引导生态系统恢复才是露采金属矿山采坑境界面最有效的模式。

关键词: 露采金属矿山,采坑境界,植被恢复,生态修复

中图分类号: X53;X852

文献标志码: A

文章编号: 2095-7300(2022)01-0050-08

Study on Ecological Restoration Technology of Stope Boundary Interface in Open Pit Metal Mines

CHENG Rui

(Shenzhen Ruyin Ecological Construction Co., Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract:【Objective】The ecological restoration technology suitable for the stope boundary interface of openpit metal mines is discussed to provide a reference for the ecological restoration of similar wastelands.【Methods】Through field investigation and research, the problems and causes of ecological environment damage were identified and analyzed in the open pit mining boundary of copper mine in Jiangxi Province. And combined with engineering examples, the technical model of ecological restoration engineering of mining pit wasteland was studied.【Results】The results show that the eco-environmental problems of open pit metal mines mainly include the destruction of original ecology and natural landscape, the lack of site conditions for natural restoration of exposed wounds, the long, steep, serious weathering and easy collapse of exposed pit slope, the continuous and serious acid and heavy metal pollution, and etc. There are few conditions for natural recovery, and the reconstruction of ecosystem through manual inter-

收稿日期:2021-09-13

基金项目:江铜集团科技项目(2018012)

作者简介:程睿,硕士,高级工程师,研究方向:环境治理与生态修复技术研究,E-mail:chengrui99888@163.com。

引文格式:程睿.露采金属矿山采坑境界面生态修复技术研究[J].湖南生态科学学报,2022,9(1):50-57. CHENG R. Study on ecological restoration technology of stope boundary interface in open pit metal mines[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2022, 9(1): 50-57.

vention has achieved remarkable results. 【Conclusion】The artificial restoration mode takes the reconstructing of landform and stable terrain as the premise, the restoration of pollution and the reconstruction of soil environment as the basis, the restoration of vegetation to promote its own succession as the means, the restoration of ecosystem and the reproduction of ecological function as the ultimate goal. And guiding ecosystem restoration through manual intervention is the most effective mode of pit boundary interface in open pit metal mines.

Keywords: Open pit metal mine; stope boundary interface; vegetation restoration; ecological restoration

自二十世纪五十年代以来,露天采矿工艺因适合大规模和机械化开采,且具有前期基建工程量少、周期短、后期作业条件好、生产效率及回采率高等优点,成为矿产资源开采的首选方式并始终占据主导地位^[1]。目前,我国露采矿山众多,其中铁矿占80%,有色金属矿山(其中90%重点金属矿)占50%,化工矿山占70%。值得注意的是,近100%的建材矿山均采用露天开采^[2]。据中国地质调查局的调查结果^[3],截止到2018年,全国涉及露天开采的各类矿山近19万个,废弃的露采矿山8万余座。露天采矿所形成的底平面、终了边坡及边帮构成了巨大的采场境界面,占到矿山总面积的近三成。在矿山各种废弃地中,由采坑帮面、台阶、采掘、运输平台和坑底所构成的采坑废弃地面积占比最大。

我国露采矿山主要采取全境界开采方式,普遍采用陡帮、高台阶和穿爆等现代采矿技术开采作业。现代化采矿技术显著提高了露天开采强度和效率^[3],但也带来了一系列的环境问题。例如:陡帮开采造成开采面坡度($50^{\circ} \sim 70^{\circ}$)较大,局部崩塌后呈倒坡状;高台阶开采的单台阶高度多在25~30 m,甚至45~50 m,当岩石强度不足时台阶坡面受到高应力干扰,则长自由边界的岩体易形成爆裂体而发生崩塌;穿爆作业造成开采面岩体结构碎裂严重,危岩耸立,浅表岩体稳定性差等。露采矿山开采寿命一般长达数十年,随着采矿场的延深,露天境界面越来越大,采坑地质环境长期受风蚀、雨蚀、采矿爆破振动等外力因素的破坏也更严重。同时,随着矿山生命的延续,暴露在空气中的硫矿物越多,时间越久,矿区土壤酸化和重金属污染水平也更严重,造成采坑废弃地数十年都难以自然恢复植被。当前,采坑废弃地生态修复问题已成为我国露采矿山普遍面临的难题。因此,开展采坑废弃地生态修复技术研究,提出可行的生态修复模式已成为一项紧迫且极其重要的课题。近年,国内关于矿山修复技术的研究颇多^[4-8],但关于典型的露采金

属矿山采坑废弃地的生态治理研究的报道却很少^[9-11]。本研究以江西某露采铜矿为研究对象,开展采坑废弃地生态修复技术模式研究,以期同类废弃地的生态治理提供借鉴。

1 治理区基本情况

1.1 矿山开采历史及现状

该铜矿于二十世纪八十年代建成投产,后经延深扩帮开采,至今已30余年,因露采资源殆尽,即将闭坑。现矿区总面积超过13 km²,露天开采境界面积约180 hm²。目前,露采境界面内遗留大面积采坑裸岩边坡及采掘、运输平台等废弃地,已生态治理面积尚不足15%。

1.2 矿山地质概况

1.2.1 地形地貌

矿区为低山、丘陵地貌,其露天采场为不规则的环形深凹采坑,极限高程为-55~441 m,最大高差约500 m。采坑坡面基岩裸露,坡度多在 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,台阶高差25~30 m,各级平台宽度从数米到十数米不等,多有松散堆积的废矿或崩塌的较大碎石块。

1.2.2 地层岩性

矿区位于扬子与华南两板块的拼接地带,萍乡—广丰深断裂南侧的晚古生代裂陷海槽内,地层主要为前震旦纪周潭群和晚古生界^[12],由基底地层和盖层地层组成。矿体围岩以混合岩为主,含矿层和近矿围岩,主要为矽卡岩,其次为常与矽卡岩、矿体呈夹层或互层状的千枚岩和页岩。矿物为典型的多金属硫化矿,主要为黄铜矿(CuFeS_2),方铅矿(PbS),闪锌矿(ZnS)和黄铁矿(FeS_2),脉石矿物主要为石英和绢云母等。

1.2.3 地质构造

地质构造以近南北向的侯家—嵩山倒转背斜与F1(应天寺—火烧岗逆掩断层)和F2(天排山逆

断层)断层为主,区内出露的最大侵入岩为十字头岩体。

1.2.4 气象水文

矿区地处中亚热带季风气候区,日照充足,雨量充沛。年平均气温在 17.2 ~ 19.6 ℃ 之间,无霜期为 225 ~ 270 d,年均降水量 1 700 ~ 2 100 mm,主要集中在 4—6 月份,常年以东南风为主。

1.2.5 自然植被

矿区属亚热带常绿阔叶林区域,周边自然植物群落以亚热带常绿阔叶林为主,如青冈栎、苦槠、木荷等,人工植被群落以马尾松等亚热带针叶林为主,其次是荒山灌木草丛。

2 露采境界面生态环境问题识别及破坏成因分析

2.1 生态环境问题识别

2.1.1 原生态系统和地貌景观损毁严重

露采境界面内的原生植被和表土被彻底剥离殆尽,边坡基岩裸露,使植物彻底失去生长的立地条件。原有生态系统彻底损毁,造成矿区水土流失、植被退化、生物栖息地破坏以及生物多样性降低。巨大的裸露创面破坏了矿区地貌景观,支离破

碎的山体也破坏了自然生态景观的连续性和协调性。

2.1.2 裸露创面自然修复能力差

露采境界面内除采坑顶帮剥离区的一两级土质或强风化坡面及平台等有少量野生植被侵入之外,其他坡面和平台无植被覆盖,而且严重缺乏土壤种子库和土、肥、水等植被恢复所需的基本要素,完全不具备自然修复能力。

2.1.3 采坑边坡长高陡峭易崩塌

采坑裸岩坡面长、高、陡、峭,不仅岩体节理发育,结构碎裂;受爆破振动、风蚀、雨蚀尤其酸蚀等外力破坏严重,采坑边坡危岩耸立,岩体稳定性较差,风化脱落现象严重,滑坡、崩塌等地质灾害隐患较大,局部崩塌的碎岩在平台松散杂乱堆积。

2.1.4 酸性废水及重金属污染严重

采坑岩体表面和岩缝裂隙附存大量酸性沉积物,受降雨和地表水影响,岩缝裂隙不断有酸性矿山废水 (Acid Mine Drainage, AMD) 滤出,与平台遗留或崩塌的废矿堆浸出的 AMD (pH 1.0 ~ 3.0) 汇聚在凹地;尤其是雨季,容易导致暗红色的 AMD 积聚,从而加剧对废矿的酸浸,使大量的有害重金属持续浸出,向环境释放,对下游开采面形成严重的酸蚀和环境污染(见图 1)。

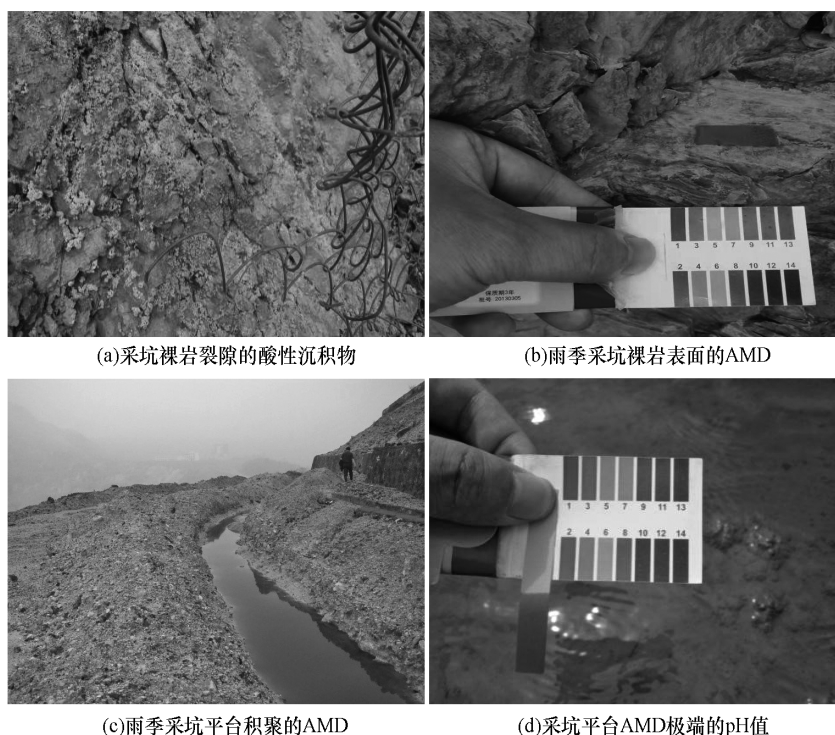


图 1 采坑废弃地裸岩边坡及平台 AMD 污染

Figure 1 AMD pollution of pit wasteland slope & platform

2.2 生态环境破坏成因分析

造成矿区生态破坏和环境污染的成因虽复杂多样,但主要归为人为因素和自然因素。人为因素首先是露采清表和采矿剥离直接造成矿区生态环境破坏,基岩裸露,废矿碎渣杂乱堆积并暴露于空气。其次是陡帮和高台阶开采方式必然形成高陡的临空面,增加岩体变形崩塌风险。另外,采掘过程中穿爆作业造成开采面受爆破影响,不仅岩体结构被破坏,导致裂隙加剧,碎裂松散,而且坡面地形凹凸不平、陡石嶙峋,危岩耸立。

自然因素主要是矿区地处中亚热带季风气候区,温度高、雨量多、湿度大和光照足,适宜的气候环境加上暴露于空气的金属硫化矿物,促使嗜酸和产酸性环境微生物比较活跃,繁殖快、活性高,造成矿区环境持续酸化。其次是各种环境因素的综合作用加速了裸岩坡面风化和裂隙发育,增加滑坡、崩塌风险,促使结构碎裂的裸露岩体和崩塌的松散碎石堆中的金属硫化矿物暴露面更大,也更易氧化酸化。第三是受地表水影响,含硫化矿废石堆及裸露岩面会浸出大量 AMD,不仅通过酸浸效应持续向环境释放有害重金属,加剧环境污染,造成恶性循环,而且对裸岩表面和裂隙长期形成酸蚀效应破坏岩体结构,加剧岩体裂隙发育、变形、崩解,诱发地质灾害。此外,暴雨冲刷、水土侵蚀及泥石流冲击均加剧了地质环境破坏。

3 露采境界面生态修复工程技术模式

3.1 生态修复模式

生态修复是以修复生态系统为终极目标^[13],基于生态学原理以生物修复为基础,结合物理、化学、工程等多种技术措施^[14],尽可能将受损的生态系统恢复到最初状态,并与周围自然生态系统相协调融合,以重现原有生态系统的完整结构与功能的一种技术手段。生态修复模式主要有自然恢复、自然与人工修复相结合、人工修复三种^[15]。针对地质环境损毁严重,立地条件恶劣,污染水平极端,几乎不具备自然恢复条件的采坑废弃地,最有效的模式就是人工修复。通过人工修复消除地质灾害隐患,重构(建)土壤环境,改善土壤理化性质,为植被恢复创造必要的立地条件。实践表明,矿山生态修复应坚持复垦先覆绿,覆绿先培土,培土先治污,治污先整

地的原则。因此,矿山生态修复应以重塑地貌、稳固地形为前提,以修复污染、重构(建)土壤环境为基础,以恢复植被群落、促进正向演替为手段,以修复生态系统、重现生态功能为最终目标。

3.2 地质地貌工程修复及防护技术

3.2.1 清危排险,重塑地貌

不宜机械施工作业的采坑坡面,借助人工清理坡面松动的危岩、浮石、陡石,消除坠落、崩塌等安全隐患。平台沟道等采用机械修整残留或崩塌的碎石废矿,重塑地形地貌,使平台场地以 2% 坡度指向坡脚,以利平台截排水。对强风化不稳定或滑坡体废石坡面进行适当的削坡卸载,重塑稳定的地形条件。通过清危排险和地形地貌修整,稳固坡体,消除安全隐患,重塑有利地形,为围堰防护、拦蓄分流和植被恢复创造立地条件。

3.2.2 完善水系,清污分流

采坑坡体长、平台宽,各级坡体与平台均构成较大汇水面。遵循因势利导、分级截留的原则梳理水系,沿帮顶和各级平台构筑必要的截排水网以截流排洪,减少水土侵蚀及泥石流灾害,同时将清污分流以遏制污染扩散,消减 AMD 流量,降低后续 AMD 处理负荷。采场周边及平台纵向排水沟采用梯形浆砌石或现浇混凝土结构,平台排水沟采用矩形混凝土结构。参照《滑坡防治工程设计与施工技术规范》^[16](DZ/T 0219—2006)中计算方法,截排水沟设计流量为:

$$\text{当 } F \geq 3 \text{ km 时 } Q_p = \phi S_p F^{2/3}$$

$$\text{当 } F < 3 \text{ km 时 } Q_p = \phi S_p F$$

式中, Q_p 为设计频率地表汇水量(单位: m^3/s); ϕ 为径流系数; S_p 为设计降雨强度(单位: mm/h); F 为汇水面积(单位: km^2)。

过流量计算公式为:

$$Q = WC\sqrt{R \times i}$$

式中, Q 为洪峰流量(单位: m^3/s); W 为过水断面(单位: m^2); C 为流速系数(单位: m/s), $C = R^{1/6}/n$, n 为沟渠断面粗糙系数,混凝土护面取 0.015,浆砌块石护面取 0.02; R 为水力半径(单位: m),为过水断面面积与湿周之比; i 为水力坡降,取 2%。

3.2.3 围堰加固,柔性防护为先

排土场坡脚及山体缺口的围堰加固,应优先采用柔性固土防护技术,即生态型围堰防护技术。生

态围堰固土修复技术是在较复杂地形条件下利用生态袋进行围堰固土和植被防护的一种柔性防护措施。如表 1 所示,在崩塌或失稳坡脚临空面及坡面崩塌或侵蚀缺口等,结合植被恢复采用生态袋垒砌的生态围堰设施修复微地形地貌环境;在滑塌形成的松散填方边坡,结合植被恢复技术采用生态袋

加抗滑木桩加固的生态围堰设施进行固土护坡。用于生态围堰的生态袋内充填改良的有机营养客土和乔、灌植物种子,匹配地形条件按品字形灵活码放并用连接扣固定,进行植被恢复后形成生态型挡墙,即有传统工程拦挡、保持水土的作用,同时避免了工程拦挡措施致景观效果差的缺点。

表 1 露采矿山采坑废弃地固土护坡辅助措施
Table1 Auxiliary measures for slope protection of wasteland in open pit mines

边坡类型	坡度	地质地貌特征	防护拦挡措施
中风化采坑边坡	$\geq 45^\circ$	坡脚基础稳定,但坡面碎岩易脱落或易崩塌	混凝土重力挡墙
	$< 45^\circ$	坡脚临空面陡峭或易崩塌	生态袋防护
强风化采坑边坡	$\geq 45^\circ$	坡脚基础松软,坡面易崩塌或滑坡	悬臂式混凝土挡墙
	$< 45^\circ$	坡脚及坡面临空面陡峭或易滑塌	生态袋辅以木桩加固防护
采坑作业面上游	$\geq 45^\circ$	上游碎岩易风化坠落或崩塌且无有效缓冲平台	被动防护网附加铁丝网

3.2.4 固土护坡,工程为辅

采坑废弃地固土护坡遵循植被为主,工程为辅原则。在存在岩体崩塌甚至滑坡等地质灾害隐患的边坡坡脚临空面,采用必要的工程加固措施进行防护。如表 1 所示,在坡脚基础较为稳定,坡度 $\geq 45^\circ$ 有崩塌隐患的中风化边坡坡脚,采用 C15 及以上混凝土浇筑 1.5 ~ 2 m 高的重力式挡墙进行拦挡,防止滚石滑落或岩体崩塌;在坡脚基础松软,坡度 $\geq 45^\circ$ 有滑坡隐患的强风化边坡坡脚,采用 C15 及以上混凝土浇筑 1.5 ~ 2 m 高悬臂式挡墙,并进行回填压脚处理,消除临空面,稳固边坡;坡度 $< 45^\circ$ 的坡面或坡脚采用生态袋防护。在采坑作业区上一级平台边沿,设置附加有铁丝网的被动防护网,对上游区域形成全面防护,阻止坠落碎石威胁下游生产、运输作业人员及财产安全。

3.3 采坑裸岩边坡原位固化及客土重建技术

采坑高台阶采空面即没有植物生长所需的土肥水,也基本不具备稳定固持土壤的立地条件,还面临严重的 AMD 污染问题。原位固化修复及客土重建技术是专门针对采坑酸性裸岩边坡的特殊地质条件和环境特征开发的生态防护技术,其中,原位固化修复工艺简单高效,能有效解决酸性沉积物造成的存量污染及遏制硫矿物氧化释酸造成的增量污染问题;而客土重建技术将工程措施与生物技

术紧密结合,技术模式成熟可靠,能在复杂立地条件营造稳定的土肥水条件。技术要点如下:

3.3.1 酸性裸岩原位固化修复

根据酸性裸岩污染和环境特征,利用碱性钝化剂、固结剂及表面活性剂等阻控材料喷浆法对裸岩表面及裂隙的酸性沉积物进行浸透式中和、钝化,同时对其进行固化封阻,防止持续氧化酸化和污染浸出。

3.3.2 挂网及植生条

沿裸岩坡面自上而下挂 12 号镀锌铁丝网,网孔 50 mm×50 mm,铁丝网间搭接宽度 ≥ 10 cm,采用涂有防锈漆的 L 型 12 号螺纹钢进行锚固。锚杆长度 30 cm,按 2 m×2 m 布置,出露 6 cm。同时沿坡面纵向每隔 30 cm,在网面与坡面之间水平方向挂由无纺布制作,并填充有改良营养客土及乔灌木种子的直径不小于 6 cm 的植生条,用扎丝与铁丝网固定,使网面与坡面保持不小于 6 cm 的空间。

3.3.3 微地形条件营造

在地形极不规则或复杂多变的裸露岩面,充分利用微地形条件在坡面凹坑、台阶、陡石等临空面混凝土浇筑或浆砌飘台、种植坑、鱼鳞坑等;在较为平整但坡度 $\geq 60^\circ$ 的裸岩边坡,沿坡面纵向间隔 1.5 ~ 2 m,横向现浇 V 型种植槽。充分利用微地形条件营造具有拦土、储水、保肥、种植等功能的微工程设施营造微地形条件,是改善立地条件和小气候

环境的重要措施。

3.3.4 有机营养客土喷播

有机营养客土由80%的耕植土、10%的生物有机肥、5%的谷糠、4%的土壤调理剂及1%的复合肥、钙镁磷肥等组成,添加乔灌木植物种子后,利用液压湿喷机或多功能喷浆机喷播有机营养客土层,喷播厚度不小于8 cm。

3.4 沟底平台及松散渣土边坡土壤重构技术

沟底平台及渣土边坡的土壤质地极差,营养极度贫瘠,污染极为严重。土壤重构技术采用化学改良修复本底污染,生物基质提高土壤肥力,微生物改善土壤生物学特性,通过多技术协同优势能全面改善矿区废弃地土壤环境、肥力和健康状况。技术要点如下:

3.4.1 土壤化学改良

修复酸性和重金属污染是土壤环境重构的重要内容。采坑平台沟道及松散渣土边坡虽较裸岩坡面立地条件稍好,但酸性废水和重金属污染则更为严重。尤其雨季酸性废水在平台、沟道等洼地积聚,对废矿渣形成持续酸浸并向环境释放有害重金属。撒施石灰是快速高效中和土壤酸性的化学改良方式,还能利用 Ca^{2+} 的拮抗作用有效降低重金属有害性。石灰用量一般 $15 \sim 45 \text{ t/hm}^2$,撒施后对表层 $15 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤进行松耙,强化修复效果。

3.4.2 生物基质改良

良好的土壤环境是植被快速恢复和健康生长发育的关键。采坑平台等废弃地以强风化碎石渣土为主,土壤介质性能差,而且极度贫瘠,缺乏必要的营养元素和有机质。采用生物基质原位改良法,能快速改善土壤理化性质,重构土壤环境,恢复土壤生产力。生物基质包括腐熟或半腐熟的鸡粪、猪粪与谷糠等组分,同时添加复合肥、钙镁磷肥等。生物基质用量 $75 \sim 150 \text{ t/hm}^2$,撒施后人工松耙深度改良土壤,为植被恢复创造肥沃的土壤条件。

3.4.3 微生物改良

在生物基质改良基础上施用微生物菌剂以重建土壤微生物群落体系,能抑制产酸、嗜酸微生物活动,重建土壤生态功能,恢复土壤自净功能,强化土壤改良效果,加快土壤发育进程。此外,微生物还能通过吸附、积累和矿化作用修复重金属污染,尤其与生物基质并用能辅助固定化微生物并强化

微生物修复效果^[17]。

3.5 立体植被群落恢复及抚育技术

采坑废弃地地质条件复杂,立地条件差,小气候环境恶劣,人工干预恢复植被离不开科学建植和高效抚育,三分建植加七分抚育,才能确保矿山生态修复的成功。立体植被群落恢复及抚育技术不仅种养并重,而且植被群落建植速度快,植物适应性好,共生互补性强,生物多样性高,群落自然演替能力强。技术要点如下:

3.5.1 植物配置选择

植物选择耐旱、耐酸、耐贫瘠及抗逆性强的种类,尤其是矿区适应性强、根系发达的乡土植物。采用乔、灌、藤、草立体植物配置模式,豆科固氮植物优先,多科属结合,营造多样性高、层次结构合理、可稳定演替的立体植被群落(如表2)。

3.5.2 植物种植方案

适宜的种植方案即是植被恢复成功的技术保障,也是植被群落快速恢复、稳定演替的关键。先锋草本生长迅速,但不利于发芽周期长、苗期生长慢、长势弱的乔灌木植物。基于实践经验,采用栽植营养袋苗与播种相结合的直接植被种植方案能促进立体植被快速恢复。其中,播种方案是将经过适当催芽处理的乔、灌、藤种子与草本植物种子及保水剂、胶粉、复合肥、植物纤维、水等进行混合喷播。营养袋苗栽植方案是利用乔灌木种子在苗圃直接培育或利用地苗移栽的两年袋苗,间隔栽植于经过原位土壤改良的平台沟道等,以及回填有机营养客土的V型槽、种植坑、飘台等立地条件较好的区域。

3.5.3 植被抚育

充足的水分供应是植被正常生长的关键,也是植被抚育需要解决的首要问题。采坑废弃地小气候环境差,仅靠微地形工程设施拦蓄自然降水不足以满足植被生长对水分的需要。根据治理面积,在帮顶或平台修砌适当容量的蓄水池,就近由采场给水管网取水送入蓄水池,以供植被养护需要。采坑高程过大、距离过远则根据高差、距离在输水管中部加装加压泵接力输送,或按高差在中间平台修砌中转水池逐级向上输水。用于植被抚育的养护管网由上游蓄水池引出,借助重力作用采用节水型滴管或喷灌进行养护为主,人工养护为辅。

表 2 亚热带矿区生态修复适生植物及种植方式

Table 2 Suitable plants and planting patterns for ecological restoration in subtropical mining areas

种	拉丁名	科	属	植被类型	种植方式
田 簕	<i>Sesbania cannabina</i> Pers.	豆科	田 簕属	一年生草本	种植混播
毛 苕子	<i>Viciavillosa</i> Roth.	豆科	野豌豆属	一年生草本	种子混播
黄秋英	<i>Cosmossulphureus</i> Cav.	菊科	秋英属	一年生草本花卉	种子混播
百日菊	<i>Zinnia elegans</i> Jacq.	菊科	百日菊属	一年生草本花卉	种子混播
波斯菊	<i>Cosmosbipinnata</i> Cav.	菊科	秋英属	多年生草本花卉	种子混播
狗牙根	<i>Cynodondactylon</i> (L.) Pers.	禾本科	狗牙根属	多年生草本	种子混播
黑麦草	<i>Loliumperenne</i> L.	禾本科	黑麦草属	多年生草本	种子混播
百喜草	<i>Paspalum notatum</i> Flugge	禾本科	雀稗属	多年生草本	种子混播
高羊茅	<i>Festucaelata</i> Keng ex E. Alexeev	禾本科	羊茅属	多年生草本	种子混播
紫花苜蓿	<i>Medicago sativa</i> L.	豆科	苜蓿属	多年生草本	种子混播
爬山虎	<i>Parthenocissustricuspidata</i> (S. Et Z.) Planch.	葡萄科	地锦属	多年生落叶藤本	扦插或栽植袋苗
葛 藤	<i>Pueraria lobate</i> (Willd.) Ohwi	豆科	葛 属	多年生落叶藤本	扦插或栽植袋苗
胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	豆科	胡枝子属	落叶亚灌木	种子混播
多花木兰	<i>Magnolia multiflora</i> M. C. Wang et C. L. Min	木兰科	木兰属	落叶亚灌木	种子混播
苎 麻	<i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaudich.	荨麻科	苎 麻属	落叶亚灌木	种子混播
紫穗槐	<i>Amorphafruticosa</i> Linn.	豆科	紫穗槐属	落叶灌木	栽植裸苗
红叶石楠	<i>Photinia ×fraseri</i> Dress	蔷薇科	石楠树	常绿灌木	栽植袋苗
大花栀子	<i>Gardeniajasminoides</i> Ellis var. <i>grandiflora</i> Nakai.	茜草科	栀子属	常绿灌木	栽植袋苗
夹竹桃	<i>Nerium oleander</i> L.	夹竹桃科	夹竹桃属	常绿灌木	栽植袋苗
麻疯树	<i>Jatropha curcas</i> L.	大戟科	麻疯树属	落叶灌木或小乔木	扦插或栽植袋苗
刺 槐	<i>Robiniapseudoacacia</i> L.	豆科	刺槐属	落叶乔木	种子混播
盐肤木	<i>Rhus chinensis</i> Mill.	漆树科	盐肤木属	落叶乔木	种子混播
构 树	<i>Broussonetiapapyrifera</i>	桑科	构 属	落叶乔木	栽植袋苗
乌 柏	<i>Sapiumsebiferum</i> (L.) Roxb.	大戟科	乌柏属	落叶乔木	栽植袋苗
大叶女贞	<i>Ligustrum compactum</i> (Wall. ex G. Don) Hook. f.	木犀科	女贞属	常绿小乔木	栽植袋苗
白背叶	<i>Mallotusapelta</i> (Lour.) Muell. Arg.	大戟科	野桐属	常绿小乔木	栽植袋苗
湿地松	<i>Pinus elliotii</i> Engelmann	松科	松 属	常绿乔木	栽植袋苗

4 结 论 与 讨 论

地质损毁、环境污染和生态破坏是矿山生态修复需要解决的三大难题^[18]。因此,矿山修复是一项复杂性、系统性工作,不只是简单的植被恢复,而是生态系统重建与功能的恢复。采坑作为露采金属矿山典型废弃地,不具备自然修复条件,但借助人

工修复措施,已建立起覆盖度大、层次结构合理、多样性高、均匀度好的立体植被系统,生态修复工作日见成效,其修复技术模式对同类废弃地生态修复具有借鉴意义。

(1)采坑裸岩受人为和自然因素影响,结构碎裂松散,裂隙发育,风化侵蚀严重,崩塌滑坡风险较大。梳理水系、修复地貌、稳固地形,并结合必要工程防护措施消除安全隐患、固土保水,才能为植被

恢复创造有利条件。

(2)不同立地条件的采坑废弃地污染特征差异很大。原位固化法通过浸透式中和、钝化及封阻能够有效修复裸岩表面和裂隙沉积的酸性污染物;原位化学改良对地形及土壤介质条件较好的平台及渣土边坡土壤污染具有非常好的修复效果。

(3)营养客土的配置及稳定固持、污染土壤的改良修复是采坑废弃地植被恢复的关键。采坑边坡长、高、陡、峭,结合挂网加植生条工艺喷播营养客土才能稳定固持,充分营造种植槽、鱼鳞坑及V型槽等创造种植条件,有利于在岩面营造多层次的植被群落结构和景观效果。平台沟道及渣土边坡等废弃地,利用生物基质和微生物原位改良能有效改善土壤理化性质,修复土壤生态功能。此外,生态围堰也是复杂地形创造有利立地条件、恢复植被、保持水土的有效措施。

(4)湿地松、大叶女贞、刺槐、紫穗槐、盐肤木、多花木兰、苕麻等乔灌木植物品种及狗牙根、黑麦草等草本植物均表现出良好的适应性,是矿区生态修复重要的供选植物。

(5)栽植营养袋苗与播种相结合的种植方案能促进立体植被快速恢复,提高植被覆盖率和群落多样性、均匀度及植被群落的自然演替能力。

参考文献:

- [1]章林.我国金属矿山露天采矿技术进展及发展趋势[J].金属矿山,2016,(7):20-25.
- [2]赵文斌,阎南,蔡增祥.浅论我国金属矿山采矿技术现状与发展趋势[J].有色金属设计,2011,38(3):1-5.
- [3]李建中,张进德.我国矿山地质环境调查工作探讨[J].水文地质工程地质,2018,45(4):169-172.
- [4]孙忠铭.露天金属矿山高台阶陡帮开采的新概念及连续运输工艺[J].矿业研究与开发,2006,26(22):33-35,43.
- [5]程睿.金属矿山废弃地土壤质量综合评价指标体系初

探[J].江西农业学报,2021,33(3):106-112.

- [6]罗明,周妍,鞠正山,等.粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估——基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架[J].生态学报,2019,39(23):8911-8919.
- [7]叶鑫,石松林,顾羊羊,等.紫金矿山生态影响与生态修复效果研究[J].环境生态学,2019,1(1):84-90.
- [8]张进德,郝富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].生态学报,2020,40(21):7921-7930.
- [9]兰利花,田毅.土壤地带性分布下的典型矿区土壤修复模式[J].江西农业学报,2021,33(1):40-49.
- [10]程睿.我国露采金属矿山采场边坡植被恢复技术实践[J].亚热带水土保持,2017,29(2):64-67.
- [11]付天池,叶小舟,何宝林.某废弃矿山地质环境治理及生态修复技术研究[J].现代矿业,2020,36(12):230-233.
- [12]李成,彭捷,陈建平,等.陕西省矿山地形地貌景观损毁现状及修复技术[J].灾害学,2019,34(4):143-147.
- [13]田明君,李永刚,万浩章,等.江西永平铜矿矽卡岩矿物特征及其地质意义[J].岩石学报,2014,30(12):3741-3758.
- [14]MCDONALD T, GANN G D, JONSON J, et al. International Standards for the Practice of Ecological Restoration-Including Principles and Key Concepts [R]. Washington (EUA): Society for Ecological Restoration (SER), 2016.
- [15]付战勇,马一丁,罗明,等.生态保护与修复理论和技术国外研究进展[J].生态学报,2019,39(23):9008-9021.
- [16]孙晓玲,韦宝玺.废弃矿山生态修复模式探讨[J].环境生态学,2020,2(10):55-63.
- [17]中华人民共和国国土资源部.滑坡防治工程设计与施工技术规范:DZ/T 0219-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [18]金建勇,孙玉焕.固定化微生物技术在重金属污染土壤修复中的研究进展[J].湖南生态科学学报,2021,8(2):90-96.
- [19]陈伟,宁平,黎慧娟,等.矿山废弃地生态环境恢复治理进展[J].环境工程技术学报,2017,7(1):78-87.

责任编辑:罗小宁
英文校对:王芬