

丰山铜矿露天坑固结回填生态修复关键技术研究

Research on Key Technologies for Ecological Restoration of Consolidated Backfilling in Open-pit of Fengshan Copper Mine

梁新民^{1,2}, 刘育明¹, 黄钢³, 陈小伟^{1,2}, 杜贵文¹, 张纯峰³,
毛勇³, 杨志国¹, 张少杰¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 北京科技大学资源与安全工程学院, 北京 100083;
3. 大冶有色大冶有色金属集团控股有限公司丰山铜矿, 北京 435229)

摘要:本文以丰山铜矿露天坑固结回填生态修复工程为案例,着重探讨了露天坑固结回填生态修复关键技术,并且利用数值仿真软件深入分析了露天坑固结回填生态修复工程与井下开采工程在安全性等方面的关联分析。研究表明,科学合理地开展露天坑固结回填生态修复工程,能为矿山绿色无废开采创造有利条件,可以实现生态效益与经济效益的双赢,为类似矿山的可持续发展提供重要参考。

关键词:露天坑固结回填; 生态修复; 生态效益; 经济效益

中图分类号: TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0031-08

Abstract: Taking the ecological restoration project of consolidated backfilling in the open-pit of Fengshan Copper Mine as a case study, this paper focuses on discussing the key technologies for ecological restoration through consolidated backfilling in open-pits. Additionally, numerical simulation software is used to conduct an in-depth analysis of the correlation between the ecological restoration project of open-pit consolidated backfilling and the underground mining project in terms of safety and other aspects. The study shows that scientifically and rationally carrying out ecological restoration projects through open-pit consolidated backfilling can create favorable conditions for green and waste-free mining in mines, achieve a win-win situation between ecological benefits and economic benefits, and provide important references for the sustainable development of similar mines.

Key words: open-pit consolidated backfilling; ecological restoration; ecological benefits; economic benefits

1 前言

露天坑作为矿山开采的典型遗迹,不仅破坏了原有的地形地貌,导致植被损毁、水土流失等生态问题,还可能引发地质灾害,对周边居民的生命财产安全构成威胁。此外,废弃的露天坑也影响了土地资源的有效利用,阻碍了区域经济的可持续发展。通过生态修复,能够恢复露天坑周边的生态系统功能,改善生态环境质量,减少水土流失,降低地质灾害风

险,同时实现土地资源的重新利用,促进区域经济与生态环境的协调发展,对矿业实现高质量可持续发展具有重要的意义^[1-2]。

近年来国家大力倡导绿色矿山建设,出台系列政策规范支持矿山生态修复。其中,自然资办函[2019]819号文指出要加强露天矿山生态修复,按“谁开采、谁治理,边开采、边治理”原则编制方案、开展修复;国办发[2021]40号文明确鼓励社会资本参与矿山生态修复;自然资办[2019]33号文则为长江经济带废弃露天坑生态修复提供了政策保障和技术指导。广东大宝山新山片区20世纪80年代初的无序、非法开采,引发水土流失、土壤酸化、地表水污染等生态问题,矿山采取“源头防控、过程阻断、末端治理”修复策略,实现植被覆盖度高达95%以上,外排水中重金属元素含量降低达90%以上,产

[作者简介] 梁新民(1990—),男,高级工程师,主要从事非煤矿山咨询设计、岩石力学、智能矿山等相关工作。

[基金项目] 国家重点研发计划重点专项—战略性矿产资源绿色高效开发与高质利用技术短板及风险评估(2024YFC2910003)

[引用格式] 梁新民,刘育明,黄钢,等.丰山铜矿露天坑固结回填生态修复关键技术研究[J].中国矿山工程,2025,54(3):31-38.

生了可观的经济、环境和社会效益。陕西宝鸡凤翔区渭河平原历史遗留矿山,存在植被损毁、水土流失、地质灾害等问题,通过因地制宜、分类施策,采取覆土复绿、清理废渣、土方回填等多种方式对35处废弃露天矿山进行生态修复,成功走出将生态文明建设与乡村振兴战略结合的新路子,实现了生态效益和经济效益的双赢^[3]。

但是,目前国内金属矿山的生态修复面临总复垦率与国外矿山差距较远、环境治理和生态恢复范围较小、缺乏系统的综合规划等问题,矿山的生态修复和治理相关标准规范体系也有待完善。

2 丰山铜矿地表露天坑现状

丰山铜矿位于湖北省阳新县,位处于长江经济带2 km范围内,是大冶有色金属有限责任公司的主力生产矿山之一,矿山历史上采用井下和露天联合开采,经多年露天开采,2001年后完全转为井下单一开采。

地表形成的废弃露天坑主要位于16线~21线之间,坑口标高约+40 m,坑底标高约-60 m,坑口南北向(23度方向)长约540 m,东西向宽约350 m,坑底长约320 m、宽220 m,坡面角约50°~64°,整体边坡坡度约42°~50°,露天坑总体积约 $634 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。露天坑西部边坡历史上曾发生过3次比较大的滑塌灾害,通过削坡降载,修筑安全平台,属暂时稳定状态。



图1 露天坑西部滑塌区和北部高陡边坡现场实拍图

丰山铜矿露天转地下采用崩落采矿法开采,坑底为破碎矿岩,坑底的塌陷坑与井下西部南缘-62.5 m井下巷道贯通。露天坑高陡边坡、地下崩落区形成塌陷区及露天坑底雨水汇集引发洪水等矿山地质环境问题和安全问题日益突出,亟需对丰山铜矿的露天坑生态环境进行修复治理工作。

3 露天坑固结回填生态修复关键技术

2021年,丰山铜矿尾矿库提前进行闭库,丰山



图2 露天坑底部-35 m平台的塌陷坑

铜矿面临选厂产出的尾砂难处置的难题。为了实现尾砂的采充平衡,以问题为导向,通常现场调研和技术创新,提出了金属矿山露天坑生态修复与井下采场废石+膏体充填协同作业的无尾、绿色开采新模式。技术方案主要包括三个方面内容:①新建全尾砂膏体充填站,满足井下采场膏体充填和地表露天坑固结回填需要;②露天坑底老旧采空区和硐口综合治理;③露天坑固结回填和生态修复技术。通过对露天坑进行生态修复,既消除了井下防水隐患,又解决了高陡边坡问题,同时解决了矿山尾矿处理出路问题,实现了矿山生产脱困和绿色无废、安全高效开采^[4-5]。

3.1 新建全尾砂膏体充填站

丰山铜矿选厂规模为 $66 \times 10^4 \text{ t/a}$,尾砂产率为96.5%,每年产生尾矿 $63.7 \times 10^4 \text{ t}$,其中 $25.2 \times 10^4 \text{ t}$ 用于矿山井下采场充填,剩余 $38.5 \times 10^4 \text{ t}$ 用于地表露天坑固结回填。矿山现有的分级尾砂充填站建设于20世纪90年代,尾砂制备效率和浓度已不能满足生产要求。新建充填搅拌站位于露天坑北侧采选工业场地附近,设2套制备输送系统,由1座 $\phi 16.0 \text{ m}$ 深锥浓密机、2座 $\phi 5.0 \text{ m}$ 胶固粉仓、2台微粉秤、2台 $\phi 2.0 \text{ m}$ 立式搅拌槽、2台充填工业泵组成。充填材料为选矿厂的全尾砂,采用胶固粉作为胶凝材料,单套充填能力约 $80 \sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$,设计充填浓度68%~70%。

新建充填站的充填料浆制备与输送工艺如图3所示:选厂产出的全尾砂通过渣浆泵输送至 $\phi 16.0 \text{ m}$ 深锥浓密机进行沉降浓缩,浓缩后的尾砂输送至立式搅拌槽搅拌,在搅拌槽内加入胶固粉和水,通过高速活化搅拌制备成高浓度料浆,然后利用充填泵经和充填管路泵送至井下或露天坑进行充填。

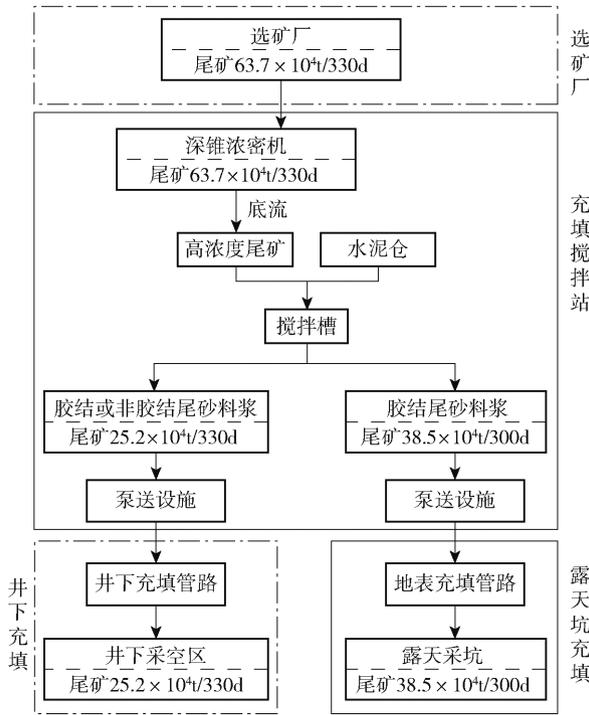


图3 充填料浆制备与输送工艺流程

3.2 露天坑底采空区和硐口治理

1) 井下采空区治理

丰山铜矿采空区主要为三种类型:一是相邻矿山盗采产生的老旧巷道和废弃采场,二是矿区南缘采用无底柱分段崩落法回采,上盘围岩和采场顶板没能自然冒落形成的采空区;三是历史上采用空场法开采留设大量矿柱形成的采空区。通过对露天坑底采空区及巷道进行工程勘察,利用巷道踏勘、地面物探、钻探验证等手段,总共布置了16条探测线和15个勘查钻孔,共圈出6个采空区,采空区总体积约为9782 m³。

采空区治理(包括塌陷坑等)先采用(28 d强度不低于3.0 MPa、浓度68%)的回填料浆进行灌注。先期可一次回填3~4 h,保养1 d待回填料浆凝固后在进行上部回填,后续回填可逐渐加长时间至6~8 h。同期做好井下-150 m等中段的防治水监测与管理工作,避免大量料浆回水进入井下造成危险。

2) 露天坑内现有硐口封堵

露天坑内存在柯家塘民采巷道硐口、0 m、-21 m及-34 m巷道硐口。回填露天坑开始前应利用已有平台对这些硐口进行封堵处理,防止回填料浆涌入井下巷道。



图4 井下遗留空区处理情况

根据充填挡墙经验公式(1):

$$2(a+b)\delta[\tau]_{黏} + S_{锚}[\tau]_{锚} > 1/2\rho g(2h-H)HW \quad (1)$$

式中: ρ 为容重,kg/m³; $a+b$ 为挡墙长+宽,m; h 为充填挡墙至充填料浆液位的高度,m; g 为重力加速度,9.8 m/s²; H 为充填挡墙高度; $S_{锚}$ 为锚杆横截面积; $W \times H$ 为中段巷道长×宽,m; $[\tau]_{锚}$ 为锚杆许用抗剪应力,采用HRB400钢材,抗剪切强度通常为(0.6~0.8)抗拉强度,取216 MPa; $[\tau]_{黏}$ 为混凝土与围岩界面黏结强度,取0.6 MPa。

巷道净断面按照长×宽4.0 m×4.0 m进行计算,不同厚度充填挡墙的可充填高度见表1。

表1 不同厚度充填挡墙计算可充填高度 (黏结强度0.6 MPa)

充填挡墙厚度/mm	300	400	500	600	700
计算h结果/m	17.4	20.5	23.7	26.9	30.1

露天坑回填每次的分层高度为3.0 m,下层固结后再进行上层的回填,根据上述计算结果,露天坑硐口先采用废石填充,长度为4.0 m;然后在封堵硐口露天坑侧表面敷设钢筋网,钢筋网由 $\phi 16$ mm钢筋制作,网度400 mm×400 mm,然后浇筑混凝土,厚度500 mm。

为了防止露天坑回填料浆回填过程中通过断层或开采生产的裂缝进入井下老旧巷道,对已有的井筒和下部生产中段造成威胁,在井下已有的0 m、-50 m、-62.5 m、-75 m、-100 m等水平巷道设置两道充填挡墙,第一道用混凝土墙浇筑,厚度为500 mm,并埋设2条滤水管($\phi 168$ mm×9 mm),管壁钻 $\phi 10$ mm滤水孔。第二道为废石堆,有效长度4.0 m。

3.3 露天坑固结回填治理和生态修复

矿区的地下水主要有上层滞水及基岩裂隙水,露采坑坑底为崩散的覆岩层,结构松散,透水性好,大气降水、地表汇水及坑壁补充的地下水易通过覆岩层下渗,经基岩裂隙、破碎带、采空区进入坑底的老旧巷道,因此需要对露天坑底进行封底加固处理。露天坑采用分层分区回填、逐步加高的形式进行露天坑固结回填。

1) 露天坑封底工程

通过对胶结充填体渗流特性研究,为防止露天坑充填料浆和雨季露天坑汇水渗入井下采矿作业中段,需要在露天坑底部构建人工防水层。考虑露天坑底部(垂直高度约200 m)区域不存在井下采矿生产活动,局部坑底岩体受露天生产期间采矿爆破震动影响等因素,封底工程确定为露天坑底-60 m至-39 m水平,防水层厚度为21 m。坑底(-60~-39 m)铺设钢筋网,底筋用 $\phi 16$ mm钢筋,网度400 mm \times 400 mm,钢筋网延深到边坡,顺坡敷设1~

2 m。为保证回填质量,采用28 d强度不低于3.0 MPa的充填料浆进行回填。

2) 露天坑(-39~0 m)及上部(0~35 m)区域回填

露天坑封底工程完成后,对露天坑(-39 m至0 m)进行回填。沿垂直露天坑轴向由西往东分成3个区块,分别为区块1、区块2、区块3,分区采用废石碾压堆筑而成的分区挡墙隔离,挡墙高3.5 m,墙顶宽3.0 m,上下游坡面坡度均为1:1。由于区块1靠近崩落法开采形成的塌陷冒落区,回填时,先采用28 d强度不低于1.5 MPa的充填料浆进行回填;区块2、区块3采用28 d强度不低于0.5 MPa充填料浆依次回填。回填标高0~35 m时,沿垂直露天坑轴向由西往东分成3个区块,分别为区块1、区块2、区块3。回填时,先回填区块1,然后再依次回填区块2、区块3,均采用28 d强度不低于0.5 MPa的充填料浆进行回填。露天坑回填治理如图5所示。

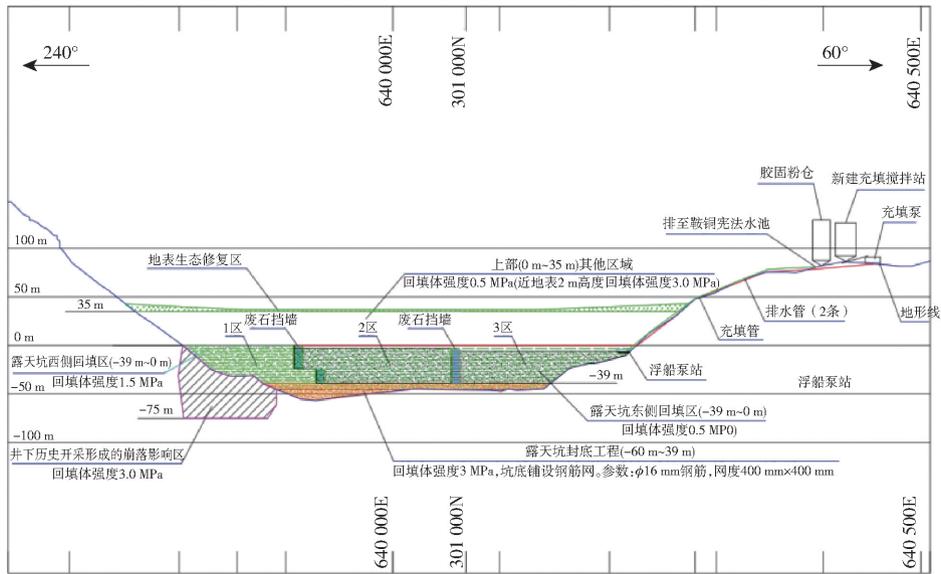


图5 露天坑回填治理纵投影示意图

在接近顶部回填标高33~35 m时,充填料浆采用28 d强度不低于3 MPa的回填料浆进行浇面回填,厚度2.0 m,上部进行生态修复。露天坑充填料浆的浓度为68%~70%。

3) 露天坑回填体脱、排水

露天坑封底工程完成后,坑底最低标高-39 m。为加快露天坑底部回填体脱水,在每分层回填体下方敷设3~5根滤水管($\phi 168$ mm \times 9 mm),滤水管倾

斜布置,管壁钻 $\phi 10$ mm滤水孔,间距50 mm \times 50 mm。在滤水管外部裹一层滤布,防止充填料浆进入滤水管堵塞管路,影响滤水效果。

回填滤水通过滤水管排出后,顺着地面自流至临时水窝。作为露天坑汇水以及回填体脱水的集水、排水区,临时水窝采用渗透系数为 1.0×10^{-12} m/s的10 mm厚的HDPE复合土工膜进行防渗处理。坑底临时水窝设置浮船泵站,利用2条

φ194 mm × 6 mm 排水管将水排至矿山地表水处理站。

4) 露天坑生态修复

为践行绿色发展理念,降低矿区裸露地表对周边环境的影响,丰山铜矿露天坑充填至设计标高后的生态修复治理范围为平台及四周裸露边坡区域,治理区面积约 177 152 m²,生态修复方案主要分为场地修整工程,截排水工程,土壤改良工程和生态恢复工程四个专项工程,采用“挂网喷播”和“覆土+基质改良+直接植被”生态恢复技术路线进行综合治理。

场地修整:露天坑充填后,对平台微地形整理,挖方填方形成 5°~10° 缓坡或台地,保障排水;土质边坡削高填低至 30°,清理坡面杂物;岩质边坡机械配合人工处理松动土石方,削平凸出部位,碎石填坡脚。

截排水:为了尽量减少露天坑内的地表汇水来源,露天坑周围设置截洪沟,采用浆砌片石砌筑,保证截洪沟发挥截水导水作用,生产中应对截洪沟进行定期清理,及时清除沟内的淤积物,以确保水流畅通,控制露天坑内的水蚀与水土流失。

土壤改良:对土质边坡、平台覆土等采用原位改良,工艺图如图 6 所示;岩质边坡喷播客土异位改良,以复合基质和生物措施增加土壤肥力,为后续生态恢复植物生长创造有利条件。

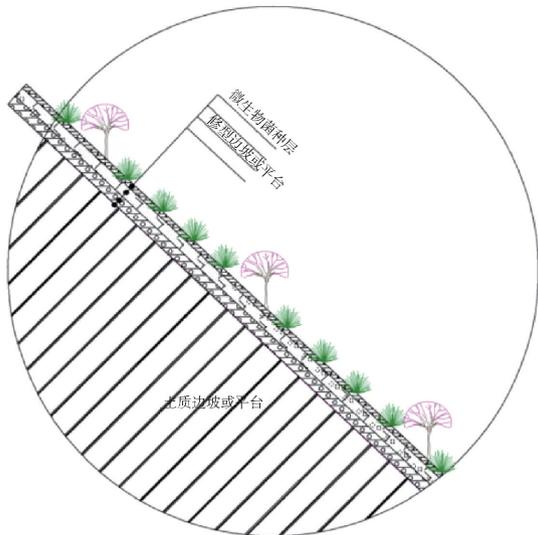


图 6 原位土壤改良工艺图

生态恢复:岩质边坡消灾除险后挂网喷播,搭配灌草与观赏植被;土质边坡土壤改良后构建乔灌草立体体系。选用当地先锋和适生植物,修复景观与周边融合。同时建立养护专项方案和制度,做好植

物抚育与补植。露天坑回填治理生态修复后最终效果图如图 7 所示。



图 7 露天坑回填治理生态修复后最终效果图

4 露天坑固结回填生态修复工程与井下开采安全性关联分析

丰山铜矿地表露天坑固结回填生态修复工程需与井下开采工程同步进行,有必要对两者之间的相互影响进行安全性关联分析,保障矿山地下开采和地表固露天坑结回填的安全性。

4.1 数值仿真模型建立

根据矿山的工程地质条件、地下开采设计和露天采坑回填治理方案,利用 FLAC3D 数值仿真软件建立三维模型,模型 X 轴方向长 2 000 m(与勘探线垂直),Y 轴方向长 1 600 m,模型高约 1 400 m 左右,具体如图 8 所示。根据丰山铜矿 -440 m 至 -740 m 原岩应力分布规律:随着中段深度的增加,自重应力和水平应力均成线性增大趋势,按式(2)施加边界条件。

$$\sigma_v = 0.02927D + 3.2778, R^2 = 0.9667$$

$$\sigma_H = 0.02317D + 4.3467, R^2 = 0.9810 \quad (2)$$

$$\sigma_h = 0.02083D - 2.7733, R^2 = 0.9432$$

式中: σ_v 表示自重应力; D 为中段深度; R^2 为均方差,其表示的是线性回归相关程度的大小。

各岩体和尾砂充填体的物理力学参数,见表 2。

根据矿山开采历史、回采进度计划和露天坑回填计划,本次模拟计算按以下步骤进行:

①计算在给定边界力学与位移条件下模型的初始状态;

②模拟露天坑的形成过程;

③模拟 -260 m 中段以上矿体的开采过程;

④模拟 -320 m 中段矿体的开采、露天坑回填至 -15 m;

⑤模拟 -380 m 中段矿体的开采、露天坑回填

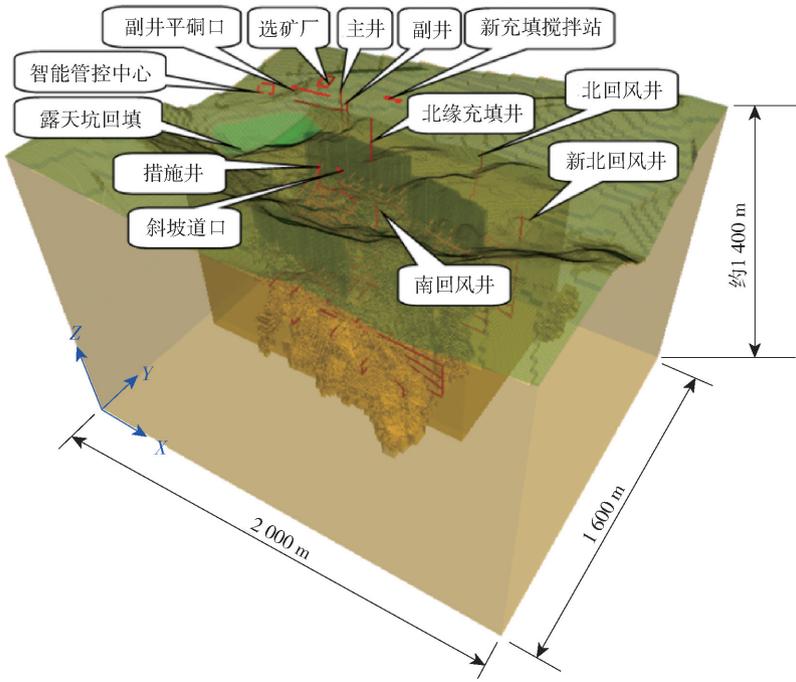


图8 露天坑及地表设施三维模型

表2 丰山铜矿岩体物理力学参数汇总表

岩性名称	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	抗拉强度 τ/MPa
角砾岩	2.94	13 500	0.15	0.16	31.2	0.2
大理岩	2.74	6 388	0.29	0.31	30	0.85
砂卡岩	3.31	4 492	0.19	0.32	31	1.0
花岗闪长斑岩	2.65	4 340	0.27	0.20	30	0.5
堆积废石	2.10	300	0.38	0.03	26	0
碎石胶结充填体	2.12	650	0.35	0.2	29	0.2
尾砂充填体	2.00	350	0.38	0.02	25	0.1

至 -3 m;

⑥模拟 -440 m 中段矿体的开采、露天坑回填至 9 m;

⑦模拟 -500 m 中段矿体的开采、露天坑回填至 18 m;

⑧模拟 -550 m 中段矿体的开采、露天坑回填至 27 m。

4.2 数值模拟结果分析

图9所示为-550 m中段未开采时的最大主应力场,图10所示为井下-550 m中段开采、露天坑回填18至27 m后的最大主应力场。通过最大应力场云图可以看出,井下-550 m中段开采前后,露天坑固结回填体的最大主应力场基本没有明显变化。从露天坑中选取一个单元进行分析,将其应力输出

进行对比;井下-550 m中段开采前该单元的最大主应力为0.7957 MPa;-550 m中段开采、露天坑回填18至27 m后,该单元的最大主应力为0.7971 MPa,增加值仅为0.0014 MPa,说明井下-550 m中段开采对露天坑固结回填作业基本无影响。

图11所示为井下-550 m中段未开采时的塑性区分布。图12所示为井下-550 m中段开采、露天坑回填18至27 m后的塑性区分布。通过塑性区分布图可以看出,井下-550 m中段开采前后对露天坑固结回填体的塑性区分布基本没有明显变化,说明井下-550 m中段未开采对露天坑回填基本无影响。

图13所示为井下-550 m中段开采、露天坑回填18至27 m地表的垂直位移等值线图,垂直位移

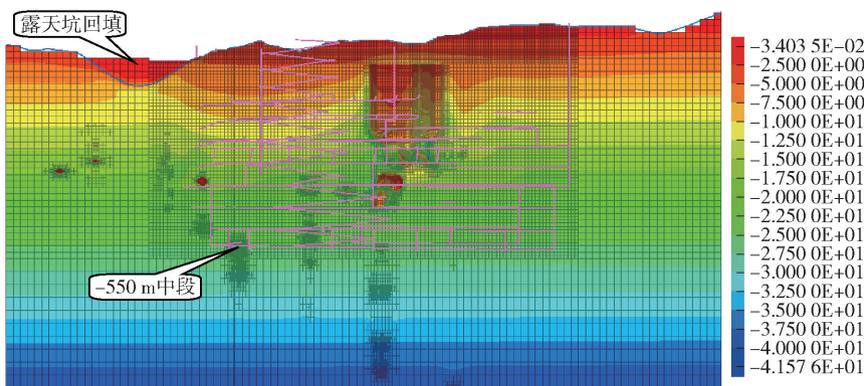


图9 -550 m 中段未开采时的最大主应力场

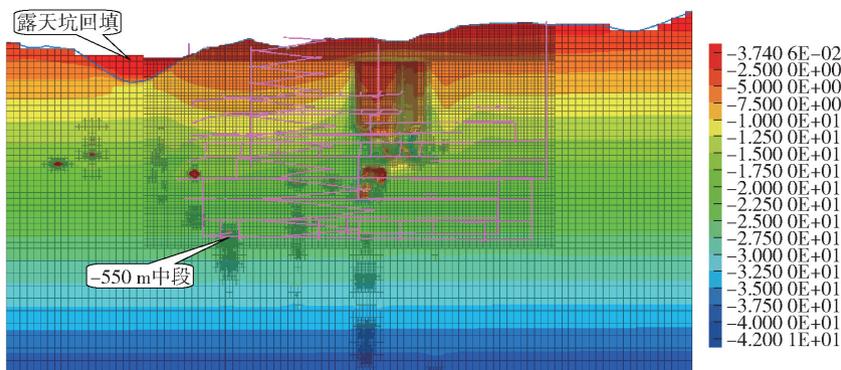


图10 -550 m 中段开采后的最大主应力场

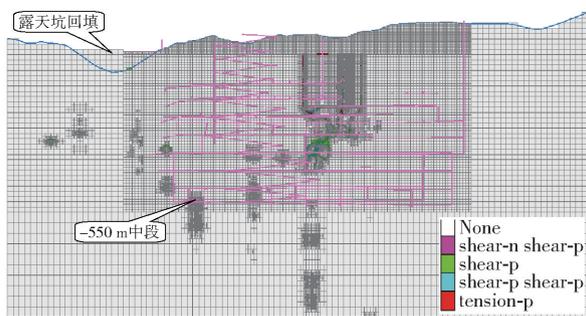


图11 -550 m 中段未开采时的塑性区分布

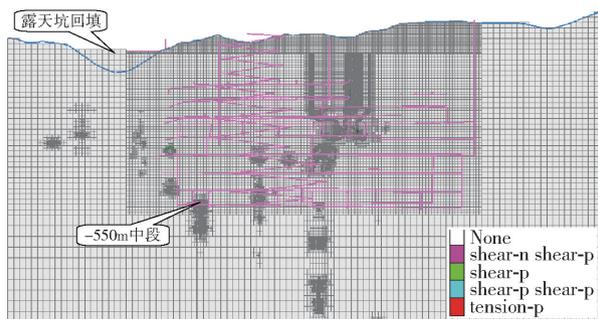


图12 -550 m 中段开采后的塑性区分布

最大值为 23 mm。分别计算地表的主要井筒、建筑物、构筑物的地表倾斜 i 、曲率 k 和水平变形 ϵ , 计算结果见表 3。根据计算结果, 地表移动变形值未达到规定的变形临界值, 因此, 深部开采工程引起的地表移动变形对地表建筑物以及露天坑固结回填体基本无影响。

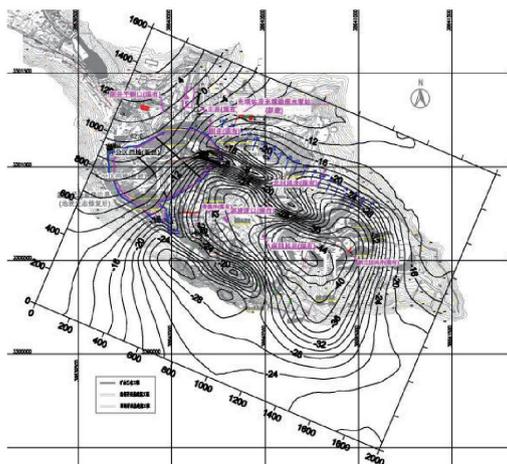


图13 -550 m 中段开采后地表的垂直位移场

表3 地表建、构筑物倾斜、曲率和水平变形值

建、构筑物	倾斜 $i/$ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	曲率 $k/$ 10^{-3} m^{-1}	水平变形 $\varepsilon/$ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$
主井	2.0×10^{-2}	1.55×10^{-4}	8.3×10^{-3}
副井	1.5×10^{-2}	2.87×10^{-4}	2.4×10^{-3}
副井平硐口	3.5×10^{-2}	3.69×10^{-4}	1.2×10^{-2}
南回风井	1.2×10^{-2}	4.88×10^{-5}	9.7×10^{-3}
新北回风井	7.5×10^{-3}	5.61×10^{-5}	6.6×10^{-3}
新充填搅拌站	6.8×10^{-3}	2.49×10^{-5}	2.0×10^{-3}
选矿厂	2.4×10^{-2}	1.86×10^{-4}	5.4×10^{-3}

通过仿真模拟分析,丰山铜矿地表露天坑固结回填生态修复工程与井下开采工程同步作业进行是安全的,而且露天坑固结回填生态修复工程对矿山安全生产具有保障作用。一方面,通过对露天坑回填形成的稳定的隔断层,能够有效阻隔露天坑与井下采空区之间的水力联系,降低井下突水风险,保障了井下开采作业的安全。另一方面,修复后的露天坑边坡稳定性得到提高,减少了因边坡失稳导致的井下开采安全事故。在露天坑回填过程中,对边坡进行了加固和生态修复,增强了边坡的抗滑能力,降低了滑坡、泥石流等地质灾害对井下开采设施和人员的威胁。

5 结论

(1) 露天坑回填前需要对现有的采空区、塌陷区、贯通巷道进行充填、封堵处理,露天坑底-60 m至-39 m水平需构建人工防水层,防止露天坑充填料浆和雨季露天坑汇水渗入井下采矿作业中段,保障深部采矿中段的安全生产。

(2) 通过对废弃露天坑固结回填,既消除了雨

季露天坑渗水井下洪水隐患,降低了高陡边坡滑坡风险,同时露天坑固结回填实现了尾矿的资源化利用,减少了尾矿堆存占用的土地资源,同时降低了尾矿处理成本,系统的解决矿山尾砂出路问题,保证矿山连续、安全开采。

(3) 通过露天坑生态修复,恢复了土地的生态功能,为矿山后续的土地综合利用创造了条件,提高了土地资源的利用价值,实现了资源在矿山开采与生态修复全生命周期的高效利用,促进生态体系的良好发展。

(4) 通过仿真模拟分析,丰山铜矿地表露天坑固结回填生态修复工程与井下开采工程同步作业进行是安全的,矿山可以通过露天坑生态修复与井下采场废膏体充填协同作业新模式实现无尾绿色、安全开采。本研究成果也为其他类似矿山在露天坑生态修复与地下开采工程的协同发展方面提供了重要的参考和借鉴。

[参考文献]

- [1] 梁新民,刘明权,张爱民,等. 无废、无尾生态智能矿山建设模式探讨[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(2): 66-71.
- [2] 张允慧. 废弃露天石灰岩矿山生态修复关键技术研究与应用[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(12): 194-196.
- [3] 廖永波,徐发伟. 露天边坡治理与生态修复关键技术研究与应用[J]. 云南化工, 2023, 50(4): 86-89.
- [4] 梁新民,王怀勇,江国建,陈小伟,谢盛青. 高浓度全尾砂充填料浆流变特性及管路输送沿程阻力损失研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3): 47-53.
- [5] 谢盛青,杜贵文,张少杰. 废弃露天坑充填治理技术研究[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(1): 1-4+22.