

Doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.02.003

露天矿地下采空区探测与综合整治技术研究

林毅斌¹,董凯程^{2,3},赖渊平¹,林春平¹

(1. 西藏巨龙铜业有限公司,拉萨 850200;

2. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;

3. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心,北京 102628)

摘要:为探索露天矿开采过程地下未知采空区的探测与整治方法,实现露天矿安全开采与地下采空区处置的协同进行。以巨龙铜矿露天采矿过程中的地下采空区为研究对象,研究采空区探测及处置方法。结合露天矿开采条件及采空区状况,提出钻孔探测和三维激光扫描相结合的采空区探测手段。提出大直径深孔爆破崩落的采空区处置方法,消除采空区安全隐患、回收残矿资源。通过现场工业试验,验证了技术方案并大规模应用于矿山实际生产。研究表明:钻孔探测和三维激光扫描相结合的方式探测采空区精确简便,大孔爆破崩落处置采空区的方式安全有效,为高原露天矿开采过程中的地下采空区探测与快速处置提供了技术支撑与借鉴。

关键词:露天矿;地下采空区;钻孔探测;爆破崩落;综合整治;三维激光扫描;协同;快速处置;安全

中图分类号:TD852;TD853.391

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)02-0011-06

Study on detection and comprehensive disposal technology of underground goaf in open-pit mine

LIN Yibin¹, DONG Kaicheng^{2,3}, LAI Yuanping¹, LIN Chunping¹

(1. Tibet Julong Copper Industry Co., Ltd., Lhasa 850200, China;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

3. National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China)

Abstract: In order to research the method of detection and disposal of unknown underground goaf of open-pit mine, and realize the safe mining with underground goaf disposal. Taking the underground goaf disposal in Julong open-pit Copper Mine as the research object, the detection and disposal method of the unknown goaf in open-pit mine were studied. Combined with open-pit mining and goaf conditions, a plan was presented by that drilling detection and 3D laser scanning to detect the goaf disposal method using long holes caving, which can eliminate the potential safety hazard and recovery the remnant ore. Through industrial experiment, verifying the technical scheme was verified and applied to mine production on a large scale. The result of research shows that drilling detection and 3D laser scanning method can get the precise form of the goaf, caving with long holes method is safe and effective, which provides technical support and reference for the goaf detection and fast disposal of in open-pit mine.

Key words: open-pit mine; underground goaf; drilling detection; blast caving; comprehensive disposal technology; 3D laser scanning; synergy; quick disposal; security

我国科研及生产单位在露天矿开采过程中的地下未知采空区探测、治理与监测等方面取得了一定的研究成果及生产经验,针对不同情况提出了相应的理论及实践方案。贾三石等^[1]提出

基于模糊数学的露天铁矿采空区地球物理探测评价方法。解联库等^[2]提出采空区地球物理探测及爆破崩落处置方法。杨树志等^[3]提出利用三维激光扫描技术探测复杂采空区群,利用边坡自由面及加大局部采空区侧的炸药单耗的方法爆破治理复杂采空区群。李杰林等^[4]研究无人机三维激光扫描技术在地下采空区探测中的应用,对于人员

收稿日期:2021-11-22

作者简介:林毅斌(1986—),男,工程师,行政管理专业,主要从事采矿管理及技术工作。

设备可进入的采空区提供了一种有效的精确探测方法。实际露天开采过程中如何对未知地下采空区进行有效的探测,制定切实有效的采空区处置及残矿回采方案,仍有一些亟需解决的关键技术问题,例如:露天开采过程中的采空区快速精确探测、采空区处置与露天协同开采、大规模采空区群集约化处置等。露天开采过程中的地下未知采空区具有极大的安全隐患,对周边作业的人员和设备造成安全威胁。探测方式不当、处理方式不合理很有可能诱发安全事故,造成人员设备及经济上的重大损失。因此,有必要对露天开采过程中的未知采空区进行快速、精确探测,研究制定安全合理的采空区整治方案,从根本上消除安全隐患,实现采空区整治与露天开采的协同化进行。

针对已经探明的采空区,处理的方法较为成熟,处理的效果也较为理想。对于地下未知采空区,如何在露天开采过程中对采空区进行探测与处理并回采残矿资源,需要进行系统性的研究论证,并通过现场的实施验证方案的可靠性,获取相应的技术经济指标,为矿山大规模应用奠定基础,为同类露天矿开采过程中的地下采空区处置提供借鉴。

1 矿区开采技术条件

知不拉矿区内共有四个铜矿体。I号铜矿体为知不拉主矿体之一,矿体由四个子矿体组成,I-1、I-2、I-3、I-4号矿体呈平行状沿近东西向层间断裂破碎带分布。紫金矿业在矿山资源整合后,采用露天方式大规模开采。原民采采空区主要位于I、II号矿体,采用浅孔留矿法进行开采,采矿的范围较大、分布零散、开采的采空区形态极不规则。

表1 5 336 m及5 348 m采空区钻探代表性数据

Table 1 5 336 m and 5 348 m platform representative goaf drilling data

平台	孔号	设计孔深/m	实际深度/m	空区高度/m
5336	TCK3	29.5	11.0	25.0
5336	TCK7	30.7	31.0	7.6
5336	TCK38	31.2	19.7	3.3
5336	TCK37	31.2	16.5	20.5
5348	Z153	31.0	9.5	4.6
5348	Z157	31.2	9.6	7.8
5348	TCK83	31.9	28.0	11.5
5348	TCK82	30.0	26.0	14.0

矿山露天开采过程中防止采空区垮塌造成安全事故,在露天台阶钻孔过程中施工了部分孔对地下采空区进行探测,利用炮孔来获取顶板高度及采空

区高度信息,大致确定采空区赋存范围。目前主要对5 336 m、5 348 m两个生产的作业平台进行采空区钻孔探测。

从现场钻孔数据来看,采空区高度0.3~28.8 m不等,采空区(巷道除外)高度基本平均在15 m左右。设计的炮孔深度为30 m左右,不考虑打穿的巷道,采空区顶板厚度(空区顶板距离平台作业面高度)8.5~31 m。利用钻孔数据分析的5 336 m平台形成的采空区宽度约16 m,长度约49 m,从采空区的空间信息分析,原地下采空区主要采用空场法开采,采空区形成的时期较为久远,产生一定程度的垮落,因此顶板呈现不同的高度,总体形态较为复杂。

2 采空区探测方案

2.1 探测方法分析

地下采空区探测的手段较多,常用的方式有地球物理探测、三维激光扫描探测、钻孔探测等。国内大多数矿山都是采用其中一种或几种相结合的方式

进行采空区探测^[5]。驱龙铜矿知不拉矿区采用露天开采,原民采施工的坑道已经被冻住且发生严重垮塌,导致人员设备无法进入。且原开采资料缺失,地下空区分布情况不明,成为威胁露天安全开采的主要隐患。随着露天开采的不断推进,亟需对井下采空区进行安全、有效的探明,并进行有效的处理。

综合分析国内外常用的采空区探测手段,地球物理方法探测速度快,但其探测精度有限,无法满足生产设计的精度需求^[6]。三维激光扫描的方式进行扫描,需要对采空区资料有充分的掌握,或能够进入采空区周边实施扫描作业,且地下采空区的环境能够满足激光扫描作业条件^[7]。钻孔探测能够直接探测采空区顶板底板高度,通过多个钻孔探测结果可以绘制采空区形态轮廓,但探测速度较慢,探测的成本也较高^[8]。

总体来说,三维激光扫描探测方式的精度最高,能够得到采空区准确的三维形态。地球物理探测方式的精度较低、受外界干扰较大,能够大致确定采空区分布范围。钻孔探测的方式能够获取采空区的大致轮廓形态,同时可以为后续激光扫描探测创造条件,用于探测的炮孔也可以在采空区爆破崩落时使用,炮孔的利用率高。

2.2 探测方案

结合知不拉矿区开采条件,露天矿现在正在进行凿岩爆破等作业,具备现场施工钻孔的条件。

三维激光扫描方式的精度较高,可利用钻孔下放至采空区获取其准确三维形态。因此,采用“钻孔探测与三维激光扫描相结合”的方式,能够满足露天矿地下采空区探测的要求。实际生产中,采用露天生产爆破的钻孔按照一定网度和深度进行钻孔施工(图1),探测到采空区后采用钻孔式三维激光扫描系统对采空区进行扫描测量,获取采空区精确的三维形态。

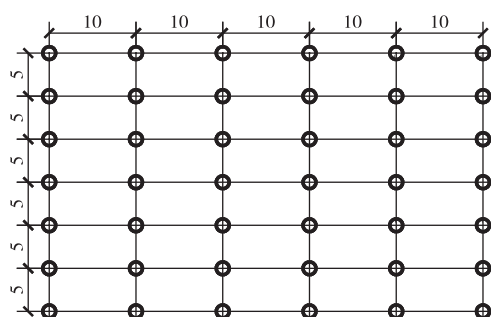


图1 探测钻孔布置平面(单位:m)

Fig. 1 Layout plan of probe hole(Unit:m)

为保障露天坑上部及周边采空区钻孔探测的安全性,采空区钻孔探测须超前露天开采,由坑底向边坡方向进行钻探推进。结合露天开采的台阶高度、矿体的厚度,钻孔的深度设计为30m,钻孔的直径为152mm,钻孔的间距为5m,钻孔的排距为10m。探测到采空区后,分析采空区顶板和底板标高及采空区高度信息,利用钻杆式三维激光伸入采空区扫描,根据采空区形态实施后续钻孔探测施工或采空区处置(图2)。

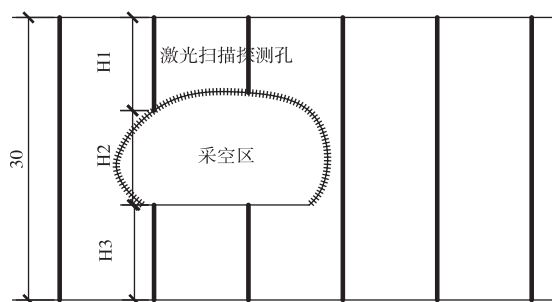


图2 探测钻孔布置剖面

Fig. 2 Sectional plane of probe hole

采空区探测的钻孔同时可以被后续露天采矿及采空区爆破崩落使用,三维激光扫描获取的采空区三维形态是分析采空区上部露天生产安全性的关键依据,通过钻孔和三维激光扫描相结合的探测方式能够充分兼顾矿山生产及空区扫描需求,为后续采空区处置创造良好的条件。

3 采空区治理方案

在炮孔探测的基础上,结合露天开采及采空区处置的特点,制定合理的采空区治理方案,消除安全隐患的同时回采残矿资源,实现露天开采与地下采空区处置的协同进行。

3.1 采空区治理方法分析

对于采空区治理而言,常用的方法为充填、封闭、崩落以及上述三种方式联合进行处理。采用尾砂、废石等充填的方法处理采空区,能够彻底将采空区进行处置,解决采空区空置导致的地压问题,有利于采空区内残矿资源的回采。但需要建立相应的充填系统,一次建设投资大且采空区处理的成本也较高^[9]。采空区封闭主要针对地下矿山的小型采空区,采空区封闭后使其对周边采矿区不造成影响,对于露天开采而言并不适用。崩落处理采空区的方式,在露天矿处理采空区中较为常见^[10-11],常用的VCR采矿方法和露天台阶开采方法处理。采用崩落的方式,能够充分利用前期空区探测炮孔,空区崩落后可消除安全隐患同时回采残矿资源。对于知不拉矿区露天开采而言,采用崩落法处理采空区成本最低,经济性最佳。

知不拉矿区原采用地下开采的方式,地下形成众多不明采空区。现采用露天开采的方式进行残矿回采及后续开采作业。根据矿山的开采工艺及开采技术条件,采用崩落处理采空区同时回采残矿的方式较为适用。一方面可以通过崩落的方式解决采空区安全隐患,同时可以利用露天开采工艺过程充分回采残矿资源。

3.2 治理方案研究

在对采空区进行探测获取采空区形态特征信息的基础上,研究制定相应的治理方案。处理方案的制定不仅要考虑采空区的安全有效处置,同时要兼顾露天开采生产的需求,以实现露天开采与采空区的处理的协同进行,同时对残矿资源进行安全高效开采。

1) 探测炮孔布置

在前期采空区钻探炮孔的基础上(网度为 $10\text{ m} \times 5\text{ m}$),加密设计采空区崩落爆破炮孔,使得炮孔整体的网度为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,达到合理的炮孔探测网度,提高采空区探测的精度。在采空区上部布置加密炮孔做为后期爆破的拉槽区。在露天作业平台利用 $\Phi 140\text{ mm}$ 潜孔钻向下打垂直孔至距采空区顶板,并在炮孔施工过程中逐孔记录采空区穿透情况,为后期爆破设计提供更加准确的依据(图3)。

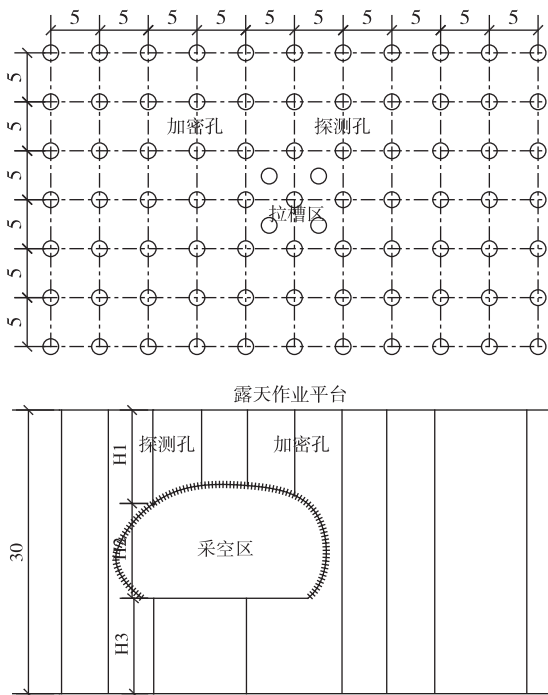


图3 采空区崩落处理炮孔布置方案

Fig. 3 Hole layout scheme for goaf caving treatment

2) 采空区爆破

炮孔内采用全长装药,分段微差起爆。即:采用微差起爆的方式,中间拉槽区先起爆,其余炮孔以台阶和采空区为自由面后起爆,一次性对采空区进行爆破处理。

爆破时候炮孔布置的范围尽量控制在矿体范围之内,尽可能在爆破过程中不产生废石崩落。采空区顶板及周边矿柱一定崩落后形成塌陷区,露天开采时对残矿进行回收。

4 工程实践

露天坑钻孔施工作业过程中,北露天坑 5 324 m 平台西北 2 号矿体探测到明显的地下采空区存在。按照本项目的研究成果,对该区域采空区进行炮孔加密探测,获取采空区形态数据,并制定现场爆破崩落方案。

4.1 采空区探测

5 324 m 西北 2 号矿体在平台钻孔施工过程中有打穿炮孔,为确保平台作业安全,遂对该区域进行钻孔超前探测。目前 5 324 m 平台西北 2 号矿体位置已打穿 31 个,空区顶板高度在 5.5~29.4 m,空区深度在 1~27.8 m。由于采空区封闭时间过久,采空区受上部平台作业扰动的影响产生了大量粉尘,采空区三维激光扫描探测效果欠佳,因此现场采

用加密钻孔探测的方式。

根据探测孔数据建立采空区三维模型(图 4),通过三维模型可知采空区的基本参数信息,空区顶板沿矿体走向整体由东往西呈增厚情况,但空区形态不规则,根据空区数据进行估算,计算得到空区体积为 $6\,639.96\text{ m}^3$,空区正上方基岩体积为 $3\,902.759\text{ m}^3$ 。

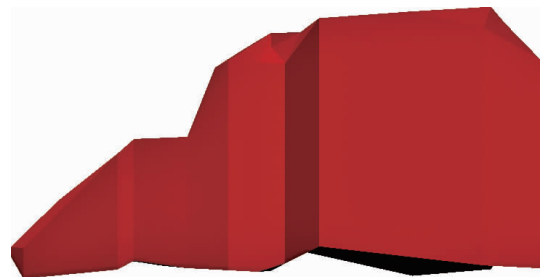


图4 采空区三维模型

Fig. 4 3D model of goaf

4.2 采空区处理方案

北露天坑 5 324 m 平台西北 2 号矿体采空区已通过钻孔探测的方式确定了采空区基本三维形态。结合矿区生产现状及前述研究成果,拟采用爆破崩落的方法处理采空区,即:利用采空区上部及周边炮孔爆破的方式,对采空区进行崩落处置,崩落后对矿石和废石进行分出,处理采空区的同时,可以有效地回采采空区周边残矿资源。

本次爆破的炮孔共 126 个,炮孔内采用全长装药的方式(图 5),孔内全长起爆。炮孔直径 152 mm,炮孔的长度为 2.3~38 m,孔口堵塞的长度为 1.3~7.6 m。

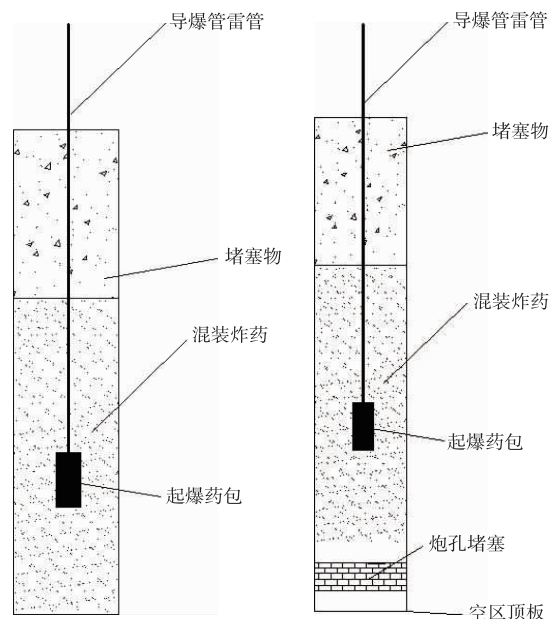


图5 炮孔装药结构

Fig. 5 Charge structure of the hole

本次爆破采用微差起爆方式,深孔采用双发16段高精度雷管,地表起爆网络采用3段和6段高精度雷管

连接孔内导爆管雷管形成起爆网络(图6)。起爆点位于台阶作业平台处,采用电雷管引至安全范围外起爆。

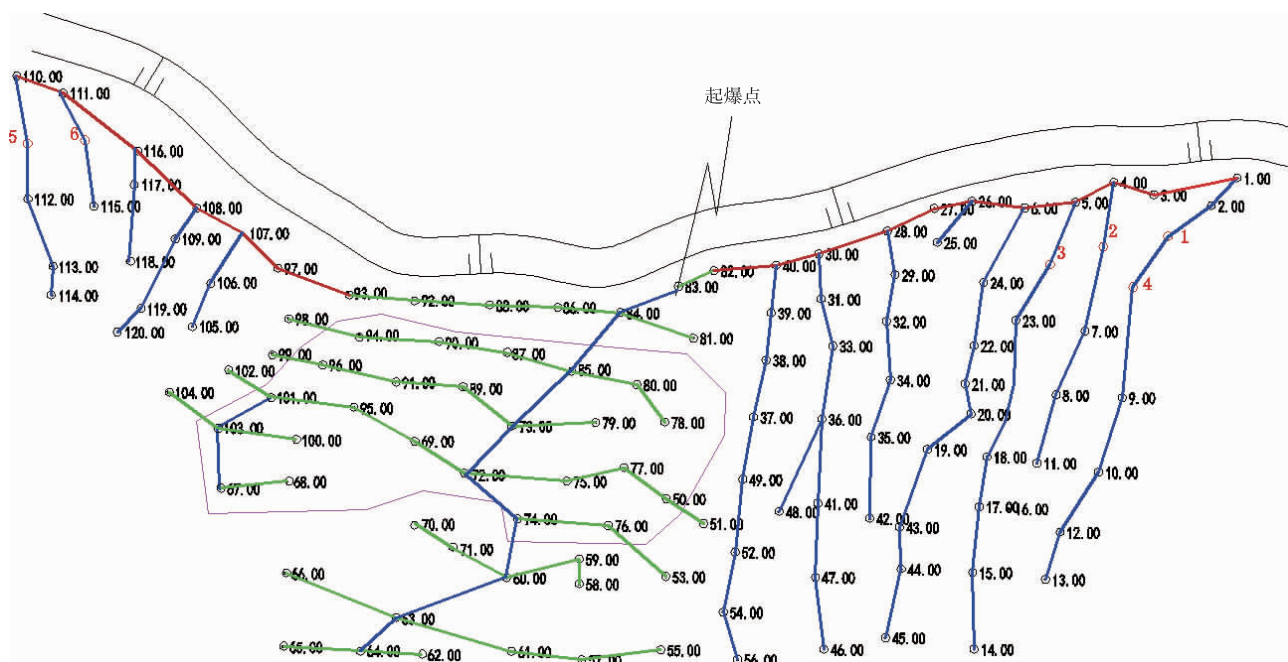


图6 采空区爆破起爆网络示意图

Fig. 6 Schematic diagram of blasting initiation network in goaf

4.3 采空区处理效果

本次爆破总的爆破药量为22 953 kg,雷管510发,爆破方量为32 862 m³,最大单段药量为1 094.4 kg,炸药单耗为0.7 kg/m³。

北露天坑5 324 m平台西北2号矿体采空区实施爆破后,采空区产生明显的垮塌,露天作业平台可见爆破后的采空区轮廓(图7)。本次爆破不仅消除了采空区的安全隐患,同时可以有效的回采该区域的资源,也验证了技术方案的可行性。



图7 采空区爆破效果

Fig. 7 Goaf blasting effect

5 结论

在对比分析不同采空区探测及处置方案的基础上,根据知不拉矿区露天开采技术条件,研究露天矿开采过程中的地下采空区处置技术。对露天矿开采过程中的地下采空区处理与残矿开采具有很好的借鉴意义。

1)露天开采过程中的地下未知采空区,宜采用钻孔探测和三维激光扫描相结合的方法进行探测。结合露天台阶爆破钻孔施工,钻孔探测到采空区后对该区域利用三维激光扫描的方式进行精确探测,获取采空区三维形态。

2)采空区采用爆破崩落的方法进行处置技术可行,即:对露天爆破的炮孔进行加密后,利用采空区和台阶面作为补偿空间进行集中崩落。采空区崩落后进行相应的出矿作业,并进行矿废分离。

3)对5 324 m平台2号矿体进行爆破设计及现场爆破,爆破后采空区得到了有效处置、地下残矿有效回采,并得到采空区爆破处置的相关技术经济参数,总体效果良好,为后续的大规模采空区处置与残矿开采提供了借鉴和依据。

参考文献

[1] 贾三石,付建飞,王恩德,等.基于模糊数学的露天铁矿采空区

- 地球物理探测评价研究[J]. 金属矿山, 2020, 49(1): 63-68.
- JIA Sanshi, FU Jianfei, WANG Ende, et al. Geophysical prospecting and evaluation of goaf in open-pit iron mine based on fuzzy mathematics[J]. Metal Mine, 2020, 49(1): 63-68.
- [2] 解联库, 熊代余, 杨天鸿, 等. 露天采场边坡下隐伏空区灾害影响分析及其治理[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2504-2507.
- XIE Lianku, XIONG Daiyu, YANG Tianhong, et al. Analysis on disaster impact of concealed goaves underneath open-pit slope and its treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(10): 2504-2507.
- [3] 杨树志, 束学来, 张兵兵, 等. 基于三维激光扫描技术的复杂采空区群爆破治理[J]. 工程爆破, 2021, 27(4): 64-68.
- YANG Shuzhi, SHU Xuelai, ZHANG Bingbing, et al. Control of risks in exploitation of oversea mineral resources [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4): 64-68.
- [4] 李杰林, 杨承业, 胡远, 等. 无人机三维激光扫描技术在地下采空区探测中的应用研究[J]. 金属矿山, 2020, 49(12): 168-171.
- LI Jielin, YANG Chengye, HU Yuan, et al. Application research of uav-lidar in detection of underground goaf [J]. Metal Mine, 2020, 49(12): 168-171.
- [5] 李宁, 刘海林, 肖益盖, 等. 马山采区第四系下浅埋民采空区探测及治理方案研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(5): 60-64.
- LI Ning, LIU Hailin, XIAO Yigai, et al. Exploration and treatment of shallow buried civilian goaf in quaternary system of Mashan mining area[J]. Modern Mining, 2021, 37(5): 60-64.
- [6] 刘长会, 刘树才, 闫赛, 等. 综合物探技术在浅埋煤层采空区勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(1): 51-52.
- LIU Changhui, LIU Shucui, YAN Sai, et al. Application of integrated geophysical exploration techniques to detecting shallow coal gob [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(1): 51-52.
- [7] 姚志伟, 方志甫, 桂旺华, 等. 三维激光扫描技术在冬瓜山铜矿采空区探测中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(5): 67-69.
- YAO Zhiwei, FANG Zhipu, GUI Wanghua, et al. Application of 3D laser scanning technology in goaf detection of Dongguashan copper mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72(5): 67-69.
- [8] 林秀云, 邱振华. 基于潜孔钻探测浅层采空区的应用实践[J]. 采矿技术, 2021, 21(1): 101-103.
- LIN Xiuyun, QIU Zhenhua. Based on the application practice of DTH drilling to detect shallow goaf [J]. Mining Technology, 2021, 21(1): 101-103.
- [9] 胡亚桥, 韦章能, 覃星朗, 等. 多中段复杂大面积采空区综合治理方案研究[J]. 采矿技术, 2021, 21(3): 117-119.
- HU Yaqiao, WEI Zhangneng, QIN Xinglang, et al. Study on comprehensive treatment scheme of multi-stage complex large area goaf [J]. Mining Technology, 2021, 21(3): 117-119.
- [10] 解治宇, 李翰林, 房洪亮, 等. 露天采场高陡边坡下深部采空区的爆破处理研究[J]. 金属矿山, 2020, 49(1): 49-53.
- XIE Zhiyu, LI Hanlin, FANG Hongliang, et al. Study on blasting treatment of deep goaf under high and steep slope in open-pit mining [J]. Metal Mine, 2020, 49(1): 49-53.
- [11] 郎啟富. 台阶爆破处理采空区方法在露天熔岩铁矿的应用[J]. 现代矿业, 2017, 33(10): 171-174.
- LANG Qifu. Application of step blasting to treat goaf in open-pit iron mine [J]. Modern Mining, 2017, 33(10): 171-174.

(编辑:周叶)

(上接第5页)

- [5] 李金锋, 于莺翔, 张豪. 江西宜春钽铌矿数字化智能矿山建设与成果[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(6): 42-45.
- LI Jinfeng, YU Qianxiang, ZHANG Hao. Digital intelligent mine construction and achievements of Yichun Tantalum-Niobium Mine in Jiangxi province [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(6): 42-45.
- [6] 王鹏. 智慧矿山安全管控大数据平台建设探讨[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 154-158.
- WANG Peng. Discussion on the construction of big data platform for smart mine safety management and control [J]. Coal Engineering, 2020, 52(8): 154-158.
- [7] 庞义辉, 王国法, 任怀伟. 智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 35-42.
- PANG Yihui, WANG Guofa, REN Huaiwei. The key technology of smart coal mine main architecture design and system platform construction [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 35-42.
- [8] 张元生, 战凯, 马朝阳, 等. 智能矿山技术架构与建设思路[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(3): 1-6.
- ZHANG Yuansheng, ZHAN Kai, MA Chaoyang, et al. Technical architecture and construction ideas of intelligent mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72(3): 1-6.
- [9] 赵春波, 张海涛, 周杰. 采矿数字化生产管控系统在乌山铜钼矿的综合应用[J]. 矿冶, 2019, 28(4): 30-37.
- ZHAO Chunbo, ZHANG Haitao, ZHOU Jie. Comprehensive application of mining digital production management and control system in Wushan copper and molybdenum mine [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(4): 30-37.
- [10] 宋和清, 范文涛. 浅谈数字矿山建设中矿山地理信息的构建[J]. 中国矿业, 2007, 16(8): 77-79.
- SONG Heqing, FAN Wentao. Discussion on the construction of mine geographic information in the construction of digital mines [J]. China Mining Magazine, 2007, 16(8): 77-79.
- [11] 唐庆腾. 数字矿山三维可视化及虚拟现实技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- TANG Qingteng. Research on 3D visualization and virtual reality technology of digital mines [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

(编辑:周叶)