

巴润矿露天开采贫化控制技术研究及应用^①

宋德林¹, 王春旺¹, 郭建新², 王德胜³, 付明宇², 赵剑²

(1.内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 2.内蒙古包钢钢联股份有限公司巴润矿业分公司, 内蒙古 包头 014080; 3.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 在分析巴润矿贫化原因基础上, 结合矿山生产实际, 对巴润露天矿矿岩交界处的贫化率进行控制, 提出了通过穿孔取样的方式精准确定矿岩边界、矿岩爆破分离、混合爆堆中矿岩石边界的精准识别及优化铲装技术等措施, 有效降低了矿岩混杂情况, 贫化率降到了2%以下, 回采指标明显改善。

关键词: 露天矿山; 穿孔取样; 爆破分离; 矿岩边界; 精准识别; 铲装优化; 贫化率; 岩石边界; 回采指标

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.005

文章编号: 0253-6099(2024)02-0018-04

Dilution Control Technology in Open-Pit Mining and Its Application in Barun Mine

SONG Delin¹, WANG Chunwang¹, GUO Jianxin², WANG Desheng³, FU Mingyu², ZHAO Jian²

(1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Barun Mining Branch of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co Ltd, Baotou 014080, Inner Mongolia, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the analysis of ore dilution in Barun mine, the dilution rate at the junction of ore and rock in Barun open-pit mine was controlled. With the actual production into consideration, some controlling measures are put forward for the mine, including accurately identifying ore-rock boundary by drilling and sampling, separating ore and rock by blasting, accurately identifying the ore-rock boundary in muck-pile by blasting, and optimizing shovel loading operation among others. As a result, less waste rock has been mixed with ore, leading to the ore dilution down to below 2%. It is shown that the rate of extraction can be obviously improved.

Key words: open-pit mine; drilling and sampling; separation by blasting; ore-rock boundary; accurate identification; shovel-loading optimization; dilution rate; rock boundary; rate of extraction

巴润矿是以铁矿石开采为主、多金属矿种统筹开采的特大型露天矿山,其矿、岩交错赋存,边界复杂,爆破推进至矿岩交界处时,矿石贫化率增加,不利于矿山整体经济效益的提升。针对露天矿贫化控制,目前已有诸多研究成果,如乌山露天铜铅矿通过开发矿岩交界处损失贫化控制系统、建立科学管理制度等措施,实现损失贫化有效控制^[1-2];文献[3]通过炮孔岩粉取样化验分析,绘制正确的爆区质量图,确定合理的采剥边界,从而降低损失贫化;文献[4]采用控制爆破和清渣

爆破的方法,将贫化率、损失率分别控制在7%、1%以下;文献[5]推导出不同条件下矿石的贫化率和台阶起采厚度的关系式,实现根据不同矿石贫化率要求推算合理的台阶起采厚度,有效控制了贫化率。另外,国内许多露天矿山选用爆破分离技术降低矿岩交界处的混杂。巴润矿使用爆破分离、等时线抛掷堆聚等相关技术,达到了矿岩边界有效分离、复杂矿岩混合爆区中矿石或岩石中部堆积的预期效果^[6-8];文献[9-12]通过设计起爆时序和确定相邻孔合理的延迟时间,实

① 收稿日期: 2023-10-13

基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目

作者简介: 宋德林(1986—),男,山东招远人,博士研究生,讲师,主要研究方向为金属矿复杂难采矿体采矿方法、放矿规律、地压活动规律及控制。E-mail: dadadelin@163.com

通信作者: 王春旺(1999—),男,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为金属矿山采矿方法研究。E-mail: 1097934315@qq.com

现对岩石爆破移动方向的控制,使得矿岩有效分离;文献[13-15]通过改变和优化爆破装药量、装药结构以及连接方式等手段,同样达到了矿岩分离的效果。

巴润矿矿床成因复杂,爆区平面图上矿、岩相互穿插的现象普遍存在,采用矿石部位和岩石部位分穿、分爆和分采的方式进行开采时效率低,需探索适用于巴润矿矿岩混合大规模爆区的贫化控制措施,实现巴润矿战略资源精细开采,提高开采经济效益。

1 矿山概况及贫化原因分析

巴润矿矿区具有以下特点:①矿床复杂,数十种稀土、铁矿类矿种形成了数百个不规则矿体,穿插交错,边界复杂且较难通过肉眼识别;②矿区内战略价值巨大的稀土类矿物目前尚不能充分提取和利用,不能作为废石排弃,需与铁矿石统筹开采,分类集中堆存;③矿山年采剥总量超1.2亿吨,采场已进入深凹开采状态,下部作业空间有限,生产爆破规模需保持在(40~50)万吨/次才能满足正常生产要求。

矿山开采过程中,矿岩混合爆区进行爆破时,在矿岩分界位置,矿体与岩块体互相侵入,部分矿石抛入岩石堆中引起损失,部分岩石抛入矿石堆中造成贫化,矿石回收率下降、贫化率上升。矿石与岩石难以肉眼区分,矿岩交界区域铲装时矿、岩容易相互混杂。另外,矿岩分界处铲挖后废石或矿石滑落加剧了矿、岩混杂。这些是造成巴润矿矿岩混合爆区贫化大的原因。

基于上述情况,若继续采用矿体形态简单、矿种单一条件下的微差爆破,会造成各种矿、岩相互混入,使得有用矿物贫化大。若采用矿岩分穿分爆模式,则严重影响生产能力。为解决上述问题,在穿孔取样化验、准确确定矿岩边界基础上,采用矿岩爆破分离技术、混

合爆堆矿岩边界精准识别以及铲装优化技术,提高矿石回收率、降低贫化率。

2 钻孔岩粉采样及矿岩边界确定

准确确定矿岩边界是实现矿岩贫化控制开采的前提。牙轮钻机穿孔过程中,钻孔穿过的矿岩层位于地面岩粉堆中均可得到相应的似层状堆积,因此可在岩粉堆上采样,获得反应台阶立剖面上矿岩的分布,用于爆区矿石和岩石质量、矿岩层位评价及边界控制;另外由于钻孔取样地点比常规勘探钻孔更加密集,通过穿孔取样获得的岩粉品位更接近矿山实际品位,是指导矿山生产的重要资料。

2.1 钻孔岩粉取样

钻孔岩粉取样可采用岩粉堆掏沟法或探管多线法。

掏沟取样法:选择钻孔岩粉堆保持原状较好的部位,铲开一条贯通岩粉堆半径的沟槽,使其剖面完整暴露,然后在沟槽的一侧壁面上,截取整个沟壁上厚度2~3 cm、质量大于2 kg的矿(岩)粉为试样。当矿石品位变化大时,可沿矿(岩)粉堆直径铲开相对的两条槽沟分别取样。

探管多线取样法:在矿(岩)粉堆上,布设4条放射状取样线,在每条取样线上离孔口10~15 cm处以点距10 cm多点取样。每点均需用取样器贯穿整个矿(岩)粉堆厚度,每个钻孔的多点取样组合为1个样品。

2.2 矿岩边界确定

所取的矿(岩)粉样品经磨矿、化验,获得样品矿岩成分及含量,依据化验结果及取样孔位图绘制爆区矿石质量图,根据爆区矿石质量图确定爆区矿岩分布及矿岩交界线。以牙22-1482段为例,爆区矿岩分布质量图如图1所示。

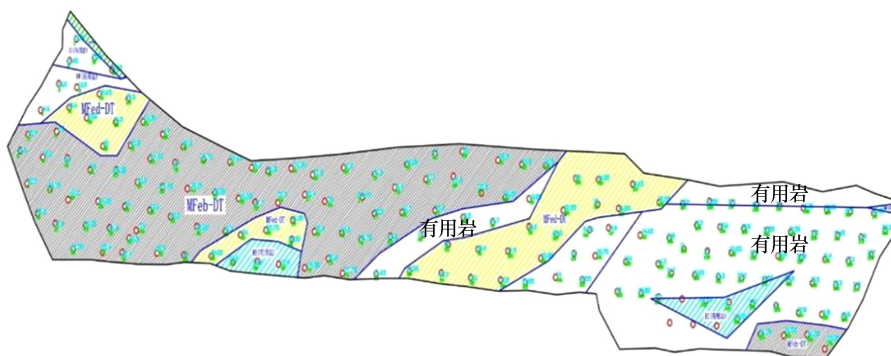


图1 牙22-1482段爆区矿岩分布质量图

3 矿岩爆破分离技术

考虑爆破规模,矿岩混爆无法避免,需采用爆破分

离技术,减少爆破时矿和岩混杂,并实现分别堆积,便于分别铲装,以此降低贫化。完成钻孔后,需根据爆破质量图划分的矿岩界线,确定分离炮孔,通过设定各炮

孔延时,实现矿岩爆破分离。

3.1 分离炮孔及爆破顺序

在矿岩交界区域,以矿、岩界线为分界,从矿、岩两侧分别选取紧邻分界的炮孔作为分离炮孔,称作对孔组炮孔,分别将矿体、岩体区域的似中心位置炮孔用作起爆“0”点,矿、岩分别以各区域的起爆“0”点为中心,按照等时线逐孔起爆进行设计。起爆开始时,中心炮孔的起爆“0”点最先起爆,剩余炮孔由中心炮孔起爆“0”点开始进行等时线毫秒延时起爆,最后实现矿、岩分类堆积的效果。

在矿岩交界部位,同排炮孔中紧邻对孔组炮孔的2个炮孔先起爆,同排对孔组炮孔延时后同时起爆,实现矿、岩沿界线分离。矿岩爆破分离原理如图2所示。

3.2 爆破参数

根据矿山矿、岩性质,采用岩石部位炮孔减弱装药、矿石部位炮孔加强装药的原则,岩石位置设计炸药

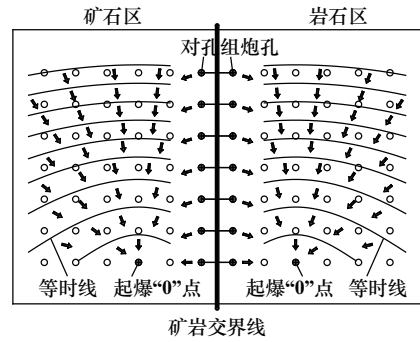


图2 矿岩爆破分离原理

单耗为 0.85 kg/m^3 , 矿体位置设计炸药平均单耗为 1.20 kg/m^3 。采用电子雷管实现精准延时起爆,矿、岩区域炮孔排间前半部分采用 $60 \sim 100 \text{ ms}$ 长延时起爆,后半部分采用 $100 \sim 135 \text{ ms}$ 长延时起爆,孔间延期 $20 \sim 50 \text{ ms}$,对孔组炮孔与紧邻的同排两个炮孔的爆破延时为 $110 \sim 150 \text{ ms}$ 。混合爆区分界及起爆网设计如图3所示。

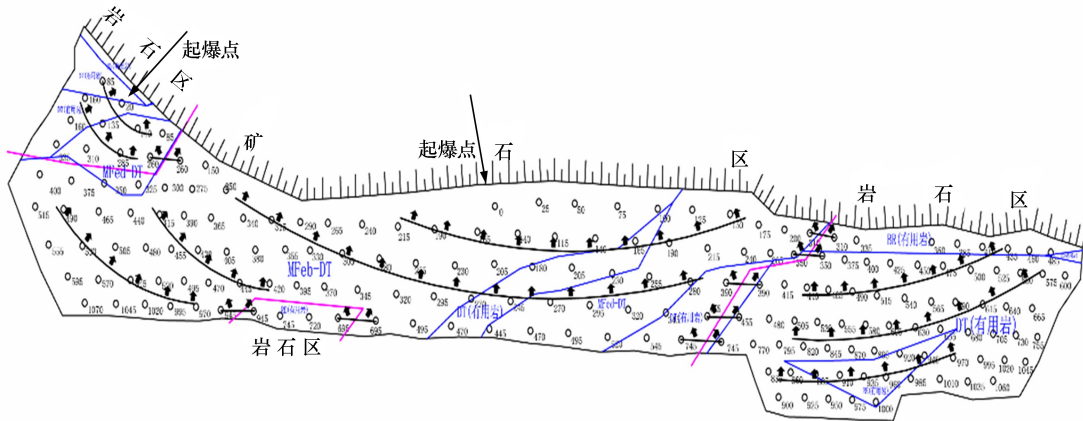


图3 混合爆区分界及起爆网设计

含水炮孔装填乳化炸药,无水炮孔使用铵油炸药,最后一排炮孔、矿体后的岩石炮孔采用减弱装药。采用钻孔直径 0.31 m 的牙轮钻机,炮孔超深 $2.0 \sim 2.5 \text{ m}$,炮孔内连续耦合装药,装药高度 $10.0 \sim 11.0 \text{ m}$ 。岩体为白云岩、板岩等时,炮孔堵塞长度取 7.0 m ;岩体为磁铁矿、混合矿时,炮孔堵塞长度取 5.5 m ;第一排、最后一排孔和矿体炮孔后的岩石孔炮孔堵塞长度 $7.5 \sim 8.0 \text{ m}$ 。

4 混合爆堆矿岩边界精准识别及铲装

矿岩混合爆区爆破时矿岩会发生移动、互相侵入等变化,爆堆内部矿、岩分界线的实际位置较难准确确定。为了防止挖掘过程造成破碎矿岩的二次混合,需在爆破后精准、快速识别矿岩边界的前提下,结合铲装方式,实现定向挖掘爆破后的混合爆堆,从而减少混合爆堆中矿岩互混现象,减少矿石损失率。

4.1 混合爆堆矿岩边界精确识别

为了更加精准、快速地识别混合爆堆中的矿石与岩石,设计并选用了基于信标识别的矿岩指示系统。它由信标和信号监测系统两部分组成,其中信标置于炮孔内,监测系统安装于电铲上。在混合爆区执行分离爆破之前将信标置于矿岩交界处的矿石侧炮孔堵塞段,爆破后,信标会随着矿石和岩石的抛掷一并堆积在矿岩分离沟槽的矿石堆中,当电铲工作过程中铲装到混合爆堆中的信标时,电铲上安装的信号接收器会立即接收到的信号通过监测系统提示电铲司机,从而实现精准挖掘。

4.2 混合爆堆矿岩铲装方法

混合爆区已实现矿、岩深凹沟槽分离的效果,为降低电铲铲装过程中的破碎矿石和岩石的互混,在现有条带挖装基础上,对矿岩交界爆堆处沿沟槽方向的纵

深进行适度超深挖掘,超深挖掘深度不超过 5 m。按照信标的提示信息,优先挖装矿岩分离沟槽一侧的岩石,最后挖装另一侧的矿石,达到矿岩混合爆堆中精准挖掘的效果,最大限度地减少挖掘过程中破碎矿石与岩石的无序互混,降低矿石贫化率。

5 现场应用情况

巴润矿业各采场的矿岩分布差异较大,针对各采场实际情况,按照巴润矿业总体生产计划安排,分别就矿体与岩体不同组合、不同采场部位的矿岩产状分布对 7 个采场进行现场试验爆破,试验地点分布如图 4

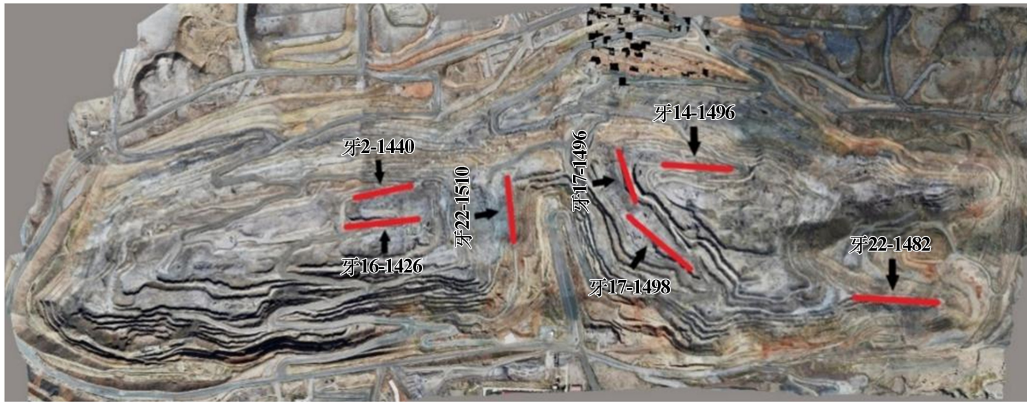


图 4 爆破分离现场试验地点分布

表 1 混合爆区台阶深孔爆破分离现场试验数据

试验爆区	总矿量/万吨	平均品位/%	矿石贫化率/%
牙 22-1482	23.32	30.00	1.83
牙 17-1496	10.87	31.69	0.79
牙 2-1440	17.18	31.35	1.64
牙 22-1510	2.39	28.35	0.80
牙 14-1496	17.63	32.54	1.42
牙 16-1426	8.40	35.21	0.93
牙 17-1498	7.54	26.41	1.64
合计	87.33	31.13	1.45

另外,在牙 16-1426 爆区试验应用了矿岩指示系统,在矿石区以及矿岩分界线处选取 15 处炮孔(其中矿石区域 4 处、矿岩交界处 11 处),放置信标 20 个。爆破完出矿过程中共监测到信标 11 个,其中 6 个安放于矿岩分界线处、5 个安放于矿石区。经过计算,信标回收率为 61.1%(不包含放置在装药段中用于验证的 2 个信标),证实了通过信标系统精确识别爆破后矿岩交界线的可行性。

6 结 论

1) 根据巴润矿实际情况,在钻孔岩粉取样化验基

所示。

现场爆破后的矿、岩破碎均匀,表面无不规则大块,各个采场的爆区均按设计预期在矿岩交界处实现抛掷分离,矿岩交界处形成清晰的深凹沟槽,沟槽深度 3.5~4.0 m,后续电铲铲装工作中可清楚识别矿石和岩石,有效控制了出矿过程中矿石和岩石滚堆互混,达到了降低贫化率的效果。现场试验结果和电铲出矿效果统计表明,7 个采场总出矿量为 87.33 万吨,平均品位为 31.13%,矿石贫化率 0.79%~1.83%,爆堆松散,无根底、岩墙等不良爆破现象。各试验爆区试验数据见表 1。

基础上确定混合爆区矿石质量图,可更准确地反映爆区矿岩分布,为混合爆区矿岩体界限的圈定和爆破分离设计提供依据。

2) 以矿、岩界线为分界,采用矿、岩各区中部等时线逐孔起爆,矿岩边界两侧同组的对孔组炮孔长延时后同时起爆的矿岩爆破分离方法,可以实现矿、岩在交界处分离抛掷,形成明显深凹沟槽,减少爆破时矿岩互混,也可以方便电铲司机铲装过程中对矿(岩)石的辨识,提高了铲装效率。

3) 在爆破分离形成深凹沟槽的基础上,通过信标系统精准识别爆破后矿岩界线,采用沿着沟槽纵向出矿的方式,先挖净分离沟槽一侧的岩石,再挖装矿石,可以最大限度地减少出矿过程中矿石和岩石滚堆互混,降低矿石贫化率。

参考文献:

[1] 范国敏. 乌努格吐山露天铜矿损失贫化管控措施分析[J]. 世界有色金属, 2019(12): 170-172.
 [2] 李金玲, 王李管, 陈 鑫. 露天台阶爆破矿岩交界处损失贫化控制系统[J]. 黄金科学技术, 2016, 24(3): 14-20.
 [3] 刘亚飞. 露天铜矿开采过程中降低矿石损失贫化的技术措施分析[J]. 世界有色金属, 2019(21): 34-36.

计算沉降值在趋势以及数值上都十分接近,说明HGWO-SVR模型对于竖向荷载作用下斜坡桩基沉降预测具有较高的精度。其中工况1理论计算与模型预测结果最大误差为6.55%,工况2理论计算与模型预测结果最大误差为5.33%,两者趋势基本一致,进一步证明了HGWO-SVR模型预测斜坡桩基沉降是可行的。

4 结 论

1) 通过灰色关联分析法分析各项输入参数对竖向荷载作用下斜坡桩基沉降的影响,各因素影响程度由大到小排列顺序为:弹性模量>临坡距>斜坡坡度>内摩擦角>黏聚力>土体密度>土体泊松比>桩长>桩径。

2) 通过差分进化改进灰狼算法,将其用于SVR模型惩罚因子及核函数参数寻优中优化支持向量回归模型,提出HGWO-SVR模型,并与已有模型进行对比,结果表明,HGWO-SVR模型整体预测精度高、误差小,预测效果明显优于GWO-SVR、GS-SVR模型。

3) 通过HGWO-SVR模型建立斜坡桩基沉降预测模型,并将其与现有沉降计算公式进行比较,模型与理论计算结果最大误差为6.55%,证明了HGWO-SVR模型应用于斜坡桩基沉降的可行性。

参考文献:

- [1] FU Z, JIANG G, YUAN S, et al. Lateral behavior of piled bridge foundation and stabilizing piles on steep slope[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(10):4223-4236.
- [2] JIANG C, ZHANG Z, HE J. Nonlinear analysis of combined loaded rigid piles in cohesionless soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2020,117:103225.
- [3] Jesmani M, Kasranian A, Kamalzare M. Finite element modelling of undrained vertical bearing capacity of piles adjacent to different types

of clayey slopes[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016,12(2):147-154.

- [4] ZHANG P, YIN Z Y, JIN Y F. Machine learning-based modelling of soil properties for geotechnical design: review, tool development and comparison[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022,29:1229-1245.
- [5] 阳俊,曾维伟. 基于GA-BP神经网络的采空区地表沉降预测模型[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):42-45.
- [6] 陈仁朋,戴田,张品,等. 基于机器学习算法的盾构掘进地表沉降预测方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021,48(7):111-118.
- [7] 工程地质手册编委会. 工程地质手册(第5版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.
- [8] 阳吉宝,钟正雄. 超长桩的荷载传递机理[J]. 岩土工程学报, 1998(6):111-115.
- [9] 邓聚龙. 灰色系统理论的关联空间[J]. 模糊数学, 1985(2):1-10.
- [10] Sarikaya M, Gullu A. Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25[J]. J Clean Prod, 2015,91:347-357.
- [11] Vapnik V N. An overview of statistical learning theory[J]. IEEE Trans Neural Netw, 1999,10(5):988-999.
- [12] Chih-Chung C, Chih-Jen L. Libsvm: a library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011,2(3):1-27.
- [13] Sm A, Smm B, Al A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014,69:46-61.
- [14] Storm R, Price K. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. IEEE, 1996:842-844.
- [15] JIANG C, WU W Y, HE J L, et al. Computation method for the settlement of a vertically loaded pile in sloping ground[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(sm11):1-10.

引用本文: 蒋冲,施泽雄. 基于HGWO-SVR模型的竖向受荷斜坡桩基沉降预测[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):22-26.

(上接第21页)

- [4] 章海象. 控制爆破技术在锦丰露天矿的应用[J]. 矿业研究与开发, 2018,38(5):33-36.
- [5] 潘世华,刘艳章,柯丽华,等. 基于贫化率控制的乌龙泉矿生产台阶矿石起采厚度研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(4):21-25.
- [6] 宋德林,张浩,王德胜,等. 巴润矿矿岩混合爆区爆破分离技术研究[J]. 金属矿山, 2021(12):149-153.
- [7] 郭建新,张波,付明宇. 矿岩分离爆破技术在某大型复杂露天铁矿的应用研究[J]. 现代矿业, 2020,36(12):93-95.
- [8] 刘占全,王德胜,崔凤,等. 巴润矿矿岩混合复杂爆区爆破分离技术试验研究[J]. 金属矿山, 2022(1):136-141.
- [9] 李顺波,李泽华,杨军,等. 矿岩分离露天爆破毫秒延时间隔研究[J]. 爆破器材, 2019,48(3):55-58.
- [10] 余铁钢,彭业宣. 矿岩分离爆破技术在瓮福磷矿英坪矿段开采中的应用[J]. 采矿技术, 2013,13(4):119-120.

- [11] 张乐,颜景龙,张宪玉,等. 露天采矿矿岩分离爆破技术探索[J]. 工程爆破, 2011,17(3):77-80.
- [12] 梁冰. 利用延时爆破降低矿石贫化的应用研究[J]. 爆破, 2021,38(3):58-61.
- [13] 黄刚,周文涛,张建华,等. 东沟钨矿露天台阶爆破参数优化研究[J]. 金属矿山, 2018(8):1-6.
- [14] 刘文胜,陈能革,朱末琳,等. 数码雷管高精度延时对爆破震动影响试验研究[J]. 金属矿山, 2021(9):37-43.
- [15] 蔡文琪,董文明,谭期仁,等. 基于品位控制模型的露天钨矿爆破流程优化[J]. 金属矿山, 2022(7):105-112.

引用本文: 宋德林,王春旺,郭建新,等. 巴润矿露天开采贫化控制技术的研究及应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):18-21.