

基于离散元方法的急倾斜极薄矿脉机械化开采 爆破参数仿真优化

熊有为^{1,2}, 朱建国¹, 刘福春^{1*}, 张 军³, 陈 伟²

(1. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 长沙 410083;

2. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;

3. 广西桂华成有限责任公司, 广西 贺州 542800)

摘 要:急倾斜极薄矿脉留矿法开采爆破空间规整平齐是实现小型采矿机器人高效通行和稳定作业的关键因素。为了提高狭小空间爆破光面控制效果,采用离散元方法和黏结颗粒模型耦合仿真方法,开展了不同炮孔参数条件下急倾斜极薄矿脉爆破模拟,以爆破空间轮廓规整性系数为评价指标,对急倾斜极薄矿脉炮孔布置方式和参数进行了优化。研究表明:同等排距和孔距条件下,矩形方式布孔的爆破规整性系数最高,矩形+间隔空孔布孔方式爆破规整性系数次之,之字形炮孔布置方式爆破效果最差;结合爆破经济性指标和采场断面规整性系数综合考虑,对于急倾斜极薄矿脉机械化开采,推荐采用矩形+间隔空孔装药的爆破方式,炮孔排距 0.4 m,孔距 0.8 m。

关键词:急倾斜极薄矿脉;机械化开采;留矿法;爆破;离散元仿真

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2024)03-0032-07

Simulation and optimization of blasting parameters for mechanized mining of steeply inclined thin veins based on discrete element method

XIONG Youwei^{1,2}, ZHU Jianguo¹, LIU Fuchun^{1*}, ZHANG Jun³, CHEN Wei²

(1. CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410083, China;

2. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Guangxi Guihuacheng Co., Ltd., Hezhou Guangxi 542800, China)

Abstract: It is the key factor to realize the high efficiency and stable operation of small-sized mining robots that the blasting space is regular and even in steep and extremely thin vein shrinkage mining. To improve the smooth surface control effect of blasting in narrow space, the discrete element method (DEM) and the coupled simulation method of bonded particle model are adopted, the blasting effect of steeply inclined extremely thin veins under different blasting parameters was studied, and the blasting layout and parameters were optimized by taking the regularity of blasting spatial profile as the evaluation index. The results show that, under the same row and hole spacing, the regularity coefficient of the rectangular hole arrangement is the highest, and that of the rectangle and interval empty hole is the second. Combined with the economic index of blasting and the regularity coefficient of the stope section, the blasting method of rectangle and interval empty hole charge is recommended, the best mesh parameters of the holes is 0.4 m × 0.8 m.

Key words: steep extremely thin vein; mechanized mining; shrinkage method; blasting; discrete element simulation

收稿日期:2023-12-08

基金项目:湖南省科技创新计划资助项目(2023RC3237)

作者简介:熊有为(1987—),男,高级工程师,博士,采矿工程专业,主要从事金属非金属矿山安全高效开采技术研究, E-mail: xywcf@126.com。

通信作者:刘福春(1964—),男,正高级工程师,采矿工程专业,主要从事金属非金属矿山安全高效开采技术研究, E-mail: lfc2210@sina.com。

长期以来,金属矿山急倾斜极薄矿脉主要采用浅孔留矿法或削壁充填法进行开采^[1-4]。该类方法以人工凿岩方式分层上行浅孔回采,有利于控制矿石损失和贫化,但由于机械化程度极低,导致劳动强度大,作业效率低,安全风险高,严重制约矿山安全

高效生产。随着机器人技术的不断发展,小型采矿机器人进入采场作业成为可能^[5-6]。然而,急倾斜极薄矿脉开采幅宽极窄,在受限窄小空间内爆破夹制作用显著,若爆破参数控制不当,极易造成超挖或欠挖,导致采场边帮凹凸不平,空间轮廓规整性差,影响机械化设备的高效通行和稳定作业^[7-11]。

在矿岩爆破参数优化的研究工作中,数值模拟是一种行之有效的研究手段^[12-14]。安龙等^[15-16]采用 LS-DYNA 数值仿真方法,分析了不同爆破参数下薄矿脉中深孔爆破围岩裂纹演化规律,优化了薄矿脉中深孔爆破参数;马春德等^[17]利用非线性动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对连续段毫秒微差爆破、跳段毫秒微差爆破和瞬间爆破方式进行了数值模拟对比分析,提出了一种浅孔多段毫秒微差爆破技术。然而,以往针对急倾斜薄矿脉爆破方面的研究,主要是以控制围岩扰动、减少矿石贫化、提高爆破效率为目标进行爆破参数优化。对于急倾斜极薄矿脉机械化开采,如何通过合理的炮孔布置以提高爆后空间轮廓规整性是保障机械化设备充分发挥效能的关键因素,目前对于该方面的研究甚少,难以有效指导现场生产。

本文通过采用离散元和黏结颗粒模型耦合仿真方法,研究不同炮孔参数条件下急倾斜极薄矿脉爆破效果,以爆破空间轮廓规整性系数为评价指标,优化急倾斜极薄矿脉精细化控制爆破参数,为急倾斜极薄矿脉机械化开采提供技术支撑。

1 离散元方法基本原理

离散元方法(DEM)基本原理是将系统划分为许多小体积或小颗粒,并对每个小颗粒进行运动方程的求解,通过模拟颗粒之间以及颗粒与外界的相互作用力,从而模拟整个系统的行为^[18]。

离散元中描述颗粒之间的相互作用力的模型为 Hertz-Mindlin 模型,模型作用力由切向与法向两部分组成^[19]。

$$F = F_n + F_t \quad (1)$$

$$F = (k_n \cdot \delta n_{ij} - \gamma_n \cdot v n_{ij}) + (k_t \cdot \delta t_{ij} - \gamma_t \cdot v t_{ij}) \quad (2)$$

式中, F 为颗粒间相互作用力,N; F_n 与 F_t 分别为法向和切向作用力,N; k_n 与 k_t 为法向与切向弹性系数,Pa/m; δn_{ij} 与 δt_{ij} 为颗粒法向与切向重叠量面积,m²; γ_n 与 γ_t 为法向与切向阻尼系数,N · m⁻¹ · s; $v n_{ij}$ 与 $v t_{ij}$ 为法向与切向相对速度,m/s。

现实中的固体颗粒一般为非球形,而离散元方

法采用球形颗粒提升计算效率,因此需要补偿颗粒形状所致额外的滚动阻力^[20]。此处采用 Elastic-Plastic Spring Dashboard 模型补偿颗粒的滚动扭矩。

$$M_{r,t+\Delta t}^k = \begin{cases} M_{r,t}^k - k_r \cdot \omega_r \cdot \Delta t; & |M_{r,t}^k - k_r \cdot \omega_r \cdot \Delta t| < \mu_r \cdot R^* |F_n| \\ \mu_r \cdot R^* |F_n| & \frac{M_{r,t}^k - k_r \cdot \omega_r \cdot \Delta t}{|M_{r,t}^k - k_r \cdot \omega_r \cdot \Delta t|} \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $M_{r,t+\Delta t}^k$ 与 $M_{r,t}^k$ 为颗粒滚动扭矩,二者相差一个时间步长 Δt ; k_r 与 μ_r 为颗粒的滚动摩擦系数和静摩擦系数; ω_r 为颗粒的相对角速度,rad/s; R^* 为颗粒等效半径,m。

2 离散元爆破仿真模型及参数设置

2.1 离散元爆破仿真模型

适用于爆破过程模拟及岩石破碎过程的离散元数值模拟一般采用黏结颗粒模型(Bonded Particle Method,BPM)。BPM 模型是 Potyody 和 Cundall^[21]为模拟岩石破碎而提出的,该方法不需要复杂的本构方程,只需设置黏结颗粒模型的微观属性参数去满足岩石宏观变化结果,因此被广泛应用到岩土工程、岩石力学、采矿工程等领域中。

BPM 模型的基本思想是将一群装配好的球形颗粒集合体,在各球的黏结点处通过添加平行键,形成可破碎的矿石颗粒模型。因此,它将矿石颗粒模型看成是由颗粒和平行键组成,分别由刚性颗粒单元和键来模拟,如图 1 所示。

颗粒间的力-位移行为由法向刚度 k_n 、切向刚度 k_t 、摩擦系数 μ 三个参数描述,平行键的力-位移行为由单位面积上的法向、切向的刚度 k_n 和 k_t ,抗拉、抗压强度 τ_c 和 σ_c ,键的半径倍数 λ 五个参数描述。其中黏结键半径为两颗粒半径的 $\lambda_{\min}(R(A), R(B))$ 。两颗粒间的黏结键为弹性关系,它与颗粒自身的力-位移为平行存在,称为平行键,因此颗粒间即使存在平行键也不能阻止颗粒间滑动。两者不同之处,在于平行键可传递力和力矩,而颗粒之间只传递力。

平行键的总受力及扭矩由式(4)~(7)定义,

$$\Delta F_{ij}^n = -k^n A \Delta \delta^n \quad (4)$$

$$\Delta F_{ij}^t = -k^t A \Delta \delta^t \quad (5)$$

$$\Delta T_{ij}^n = -k^n J \Delta \delta^n \quad (6)$$

$$\Delta T_{ij}^t = -k^t J \Delta \delta^t \quad (7)$$

式(4)~(7)中, k^n 和 k^t 是键的法向和切向刚度; $\Delta \delta^n$ 、 $\Delta \delta^t$ 、 $\Delta \theta^n$ 、 $\Delta \theta^t$ 分别是法向和切向的位移和旋

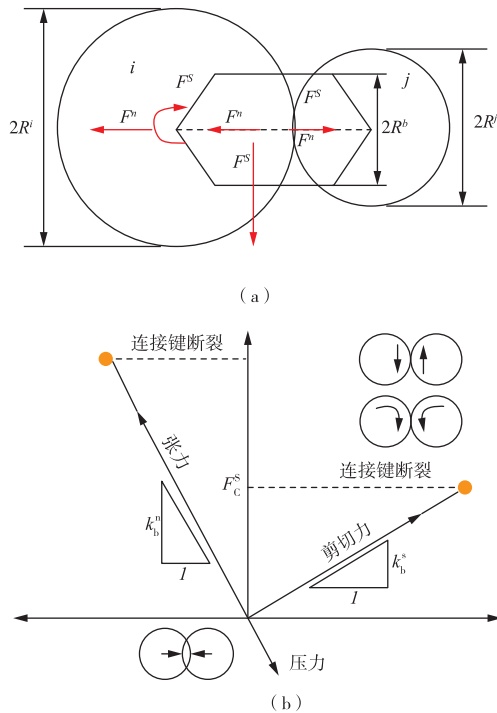


图 1 黏结颗粒模型及平行键的力-位移行为

Fig. 1 The force-displacement behavior of bonded particle model and parallel bond

转。当平行键的张力或剪切力满足如式(8)所示的条件时,键断裂。

$$\min\left(\frac{|F_{ij}^{tn}|}{A} + \frac{|T_{ij}^{tn}|}{I}, \frac{|F_{ij}^{te}|}{A} + \frac{|T_{ij}^{te}|}{J}\right) \geq \sigma_b \quad (8)$$

式(8)中, σ_b 为平行键的断裂阈值。

2.2 离散元仿真参数及模型设置

爆破过程中炸药对岩体所产生的破坏由动态冲击载荷及爆破后气体的准静压作用两部分组成。通过采用 BPM 模型,可模拟岩体在爆破压力下的破碎过程,而如何在选定的爆孔区域施加动态冲击载荷及爆破后的准静压表征目前无相应的离散元模型。因此,本文中爆破动、静压的施加通过在爆破瞬间增加爆孔内颗粒粒径的方式来仿真炸药所产生的瞬时能量。

如图 2 所示,建立与矿山机械化留矿法采场实际尺寸一致的离散元仿真模型。其中,采场作业空间(近似为一巷道)宽度为 1.2 m,与水平方向的夹角为 70° ;拟上向浅孔爆破岩体的厚度为 1.5 m。除采场作业空间外,都设置为 60 mm 粒径的球形离散元颗粒。

基于 BPM 模型的岩石模拟模型需定义多项数值模拟参数,如表 1 所示,本文采用文献报导中描述类似岩体的 BPM 模型参数进行数值模拟^[22]。



图 2 离散元模拟爆破的截面及炮孔布置方式示意图

Fig. 2 Section of blasting simulated by discrete element method and the arrangement of blast holes

表 1 离散元数值模拟参数设置

Table 1 Parameter setting of discrete element numerical simulation

离散元参数	值
离散元颗粒参数	
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 600
剪切刚度/Pa	5.57×10^8
泊松比	0.35
静摩擦系数	0.5
恢复系数	0.2
滚动摩擦系数	0.001
颗粒黏结模型参数	
法向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	1 670
切向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	667
法向应力阈值/MPa	36
切向应力阈值/MPa	24
时间步长/s	1e^{-7}

针对数值模拟的设置流程,在仿真初始化后,图 3 中的爆破相岩体首先被生成。根据不同的布孔方式,相应的爆孔位置中的颗粒粒径在起爆瞬间按照预先选定的值进行设置,产生爆破效果。爆破后,追踪并保存遗留岩体在选定位置的截面进行超挖与欠挖的评估。以实际爆破断面轮廓面积 S 与爆破理想断面轮廓面积 S_0 的比值作为评价爆破轮廓断面规整性的指标,即“爆破轮廓规整性系数 $S_{\text{规}}$ ”。

$$S_{\text{规}} = S/S_0 \quad (9)$$

如图3所示的离散元爆破数值模拟的示意结果,可通过选取特定的岩体界面来评估当前布孔方式及参数的超挖及欠挖的表现。

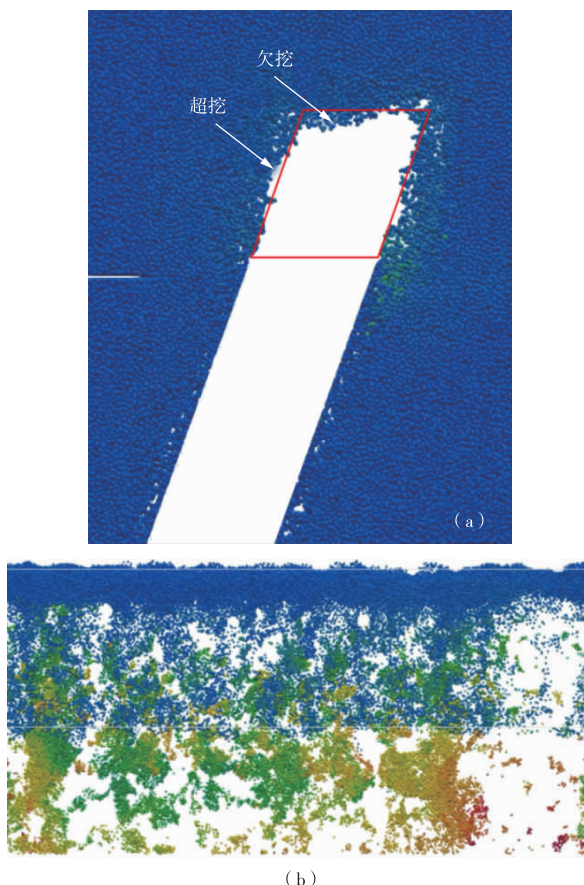


图3 离散元模拟爆破的结果

Fig. 3 The results of blasting simulation by discrete element method (a) Overbreak and underbreak assessment; (b) Simulation of blasting in the direction of stope strike

3 仿真结果分析

3.1 之字形布孔方式数值模拟结果

采用之字形布孔方式时,通过采用不同的排距及孔距参数进行组合模拟,结果如图4所示。结果表明,在同一排距工况下,逐步增加孔距,爆破后空间断面不断增大,欠挖量逐渐减小,爆破轮廓规整性系数不断提高,但总体均表现为欠挖现象,爆破轮廓规整性系数最大为70.1%(图5)。在选定孔距工况下,逐渐增加排距,爆破后的空间轮廓的断面逐渐缩小,即欠挖量增加,这一现象是由于炮孔排距的增加导致单位体积矿石的炸药用量降低,爆破不充分。较多的欠挖轮廓将可能对机械化设备的通行效率和安全稳定性造成影响。

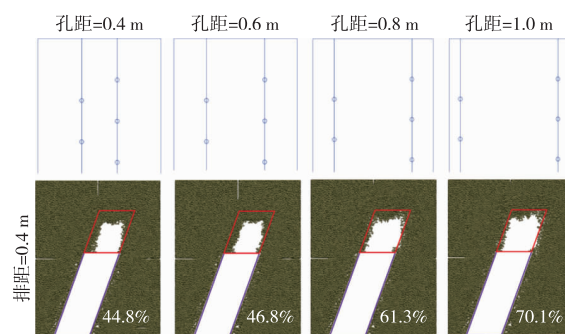


图4 之字形布孔方式下排距为0.4 m及不同孔距的数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of zigzag hole arrangement with 0.4 m bottom row spacing and different hole spacings

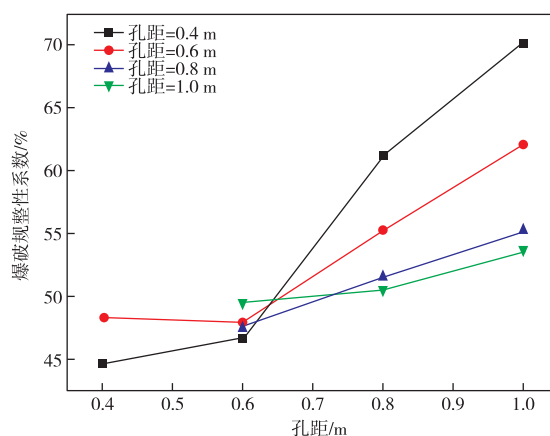


图5 之字形布孔不同炮孔参数爆破规整性系数

Fig. 5 The blasting regularity coefficient of different parameters of zigzag holes

3.2 矩形布孔方式数值模拟结果

采用矩形布孔方式时,通过采用不同的排距及孔距参数进行组合模拟,结果如图6所示。结果表明,在同一排距工况下,逐步增加孔距,爆破后壁面逐渐从欠挖转变为超挖,爆破轮廓规整性系数达到104%。造成这一现象的原因是炮孔孔距增大,使炮孔更加接近理想轮廓边界,爆破冲击波对采场边界破坏性增加。在一定孔距工况下,逐渐增加排距,爆破后的壁面超挖程度有所降低(欠挖程度有所升高),如图7所示。相比之字形,在同等排距及孔距设置条件下,矩形布孔方式的爆破轮廓规整性系数明显提升。从图中可以看出,当排距为0.6 m,孔距为0.8 m时,矩形布孔爆破轮廓规整性系数可达97.9%,此时爆破后的空间轮廓规整性较好,但还需结合炸药单耗量和爆破块度均匀性指标,对其参数合理性进行综合评价。

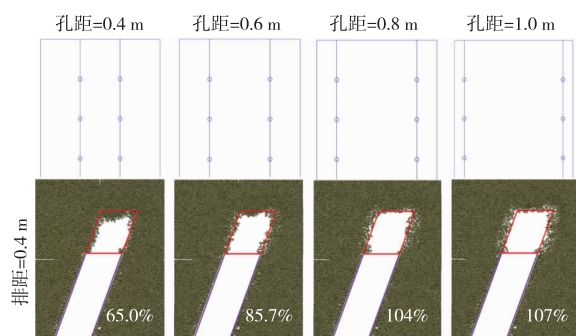


图6 矩形布孔方式下排距为0.4 m及不同孔距的数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of 0.4 m bottom row spacing and different hole spacing in rectangular hole layout

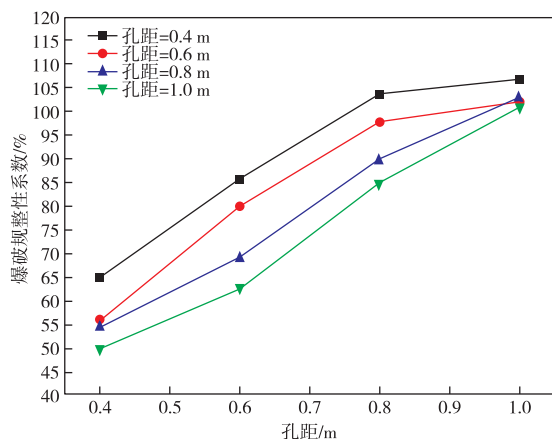


图7 矩形布孔不同炮孔参数爆破规整性系数

Fig. 7 Blasting regularity coefficient of different parameters of rectangular holes

3.3 矩形+间隔空孔布孔方式数值模拟结果

采用矩形+间隔空孔的布孔方式,通过采用不同的排距及孔距参数组合进行模拟,结果如图8所示。结果表明,固定排距条件下增加孔距,或固定孔距条件下增加排距,爆破轮廓规整性系数均未出现

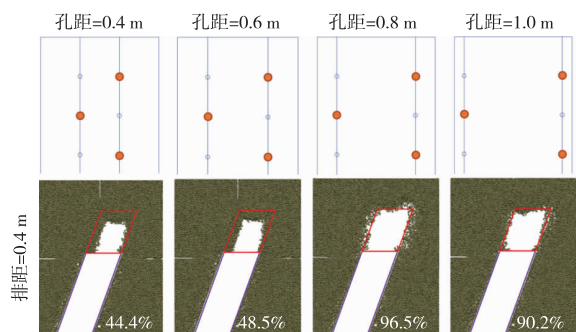


图8 矩形+间隔空孔布孔,排距为0.4 m不同孔距的数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation of 0.4 m row spacing with different hole spacing of rectangular and interval of empty holes

线性变化(图9);在炮孔排距为0.4 m、孔距为0.8 m时,爆破轮廓规整性系数达到96.5%;其次为炮孔排距为0.4 m、孔距为1.0 m时,爆破轮廓规整性系数为90.2%,其他工况条件下爆破轮廓规整性系数均不高。

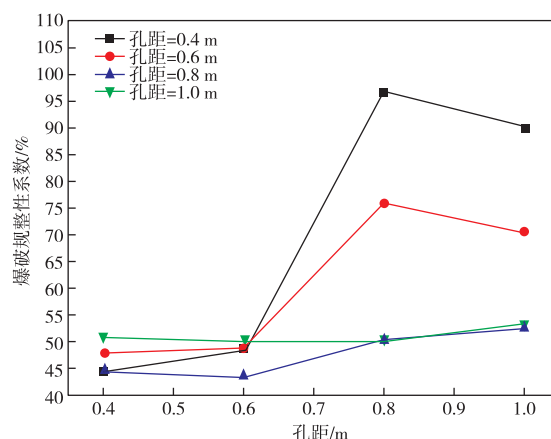


图9 矩形+间隔空孔布孔不同炮孔参数爆破规整性系数

Fig. 9 Blasting regularity coefficient of different parameters of rectangular and interval of empty holes

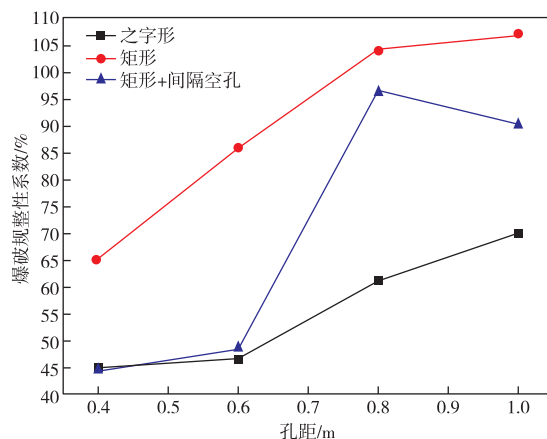


图10 排距0.4 m不同布孔方式条件下爆破规整性系数

Fig. 10 The regularity coefficient of blasting with 0.4 m distance and different hole arrangement

如图11~13所示,同等排距和孔距条件下,矩形方式布孔的爆破规整性系数均为最高;当排距为0.4 m和0.6 m时,矩形+间隔空孔比之字形布孔方式的爆破规整性系数要高,其爆破效果更好;当排距为0.8 m和1.0 m时,矩形+间隔空孔比之字形布孔方式的爆破规整性系数相差不大。

对于急倾斜极薄矿脉,矩形布孔方式由于炮孔装药密集,爆破炸药单耗较高。结合爆破经济性指标和采场断面规整性系数综合考虑,对于急倾斜极薄矿脉机械化开采,推荐采用矩形+间隔空孔装药的爆破方式,炮孔排距0.4 m,孔距0.8 m。

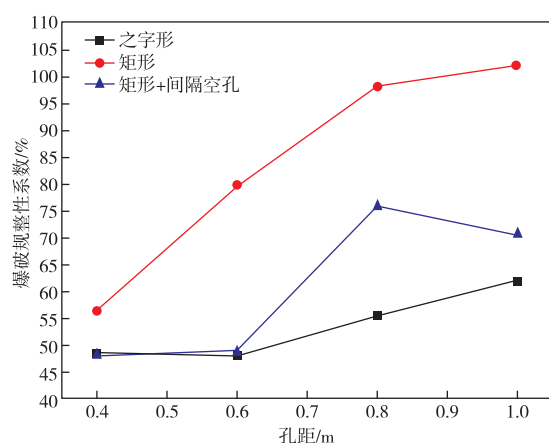


图 11 排距 0.6 m 不同布孔方式条件下爆破规整性系数

Fig. 11 The regularity coefficient of blasting with 0.6 m distance and different hole arrangement

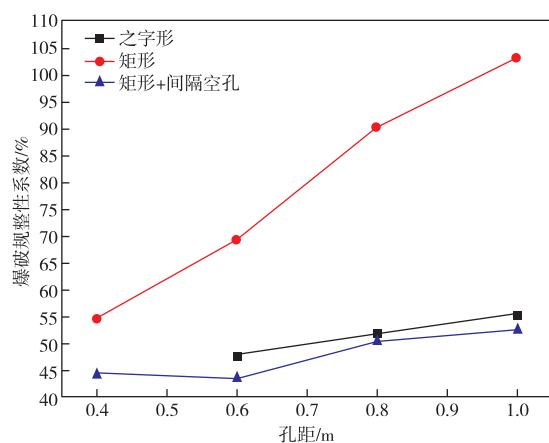


图 12 排距 0.8 m 不同布孔方式条件下爆破规整性系数

Fig. 12 The regularity coefficient of blasting with 0.8 m distance and different hole arrangement

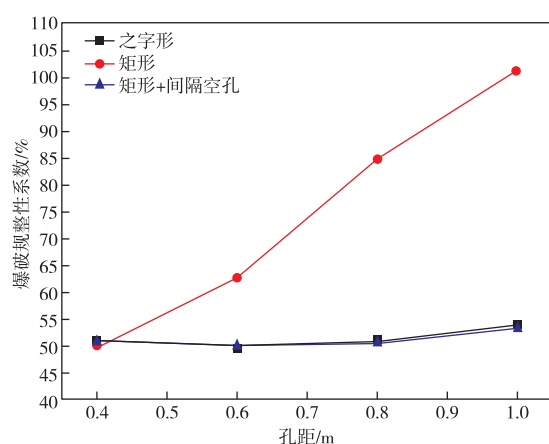


图 13 排距 1.0 m 不同布孔方式条件下爆破规整性系数

Fig. 13 The regularity coefficient of blasting with 1.0 m distance and different hole arrangement

4 结论

1) 采用离散元方法和黏结颗粒模型 BPM 耦

合,实现了急倾斜极薄矿脉不同炮孔参数条件下的爆破仿真;提出以爆破规整性系数作为爆破质量评价指标,适应机械化留矿法小型采矿机器人高效通行的工艺特点。

2) 在同等排距和孔距条件下,矩形方式布孔的爆破规整性系数均为最高;当排距为 0.4 m 和 0.6 m 时,矩形+间隔空孔比之字形布孔方式的爆破规整性系数明显要高,其爆破效果更好;当排距为 0.8 m 和 1.0 m 时,矩形+间隔空孔比之字形布孔方式的爆破规整性系数相差不大。

3) 结合爆破经济性指标和采场断面规整性系数综合考虑,对于急倾斜极薄矿脉机械化开采,推荐采用矩形+间隔空孔装药的爆破方式,炮孔排距 0.4 m,孔距 0.8 m。

参 考 文 献

- [1] 周佳琦,任玉东. 黄金矿山急倾斜薄矿脉开采工艺及发展趋势[J]. 黄金, 2022, 43(9): 35-38.
ZHOU Jiaqi, REN Yudong. Mining technology and development trend of steeply inclined veins in gold mines[J]. Gold, 2022, 43(9): 35-38.
- [2] 张庆旭,刘东锐,李士超. 典型急倾斜薄矿脉浅孔回采工艺优化[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(5): 22-25, 75.
ZHANG Qingxu, LIU Dongrui, LI Shichao. Optimization of shallow hole stoping technology in typical steep thin veins[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2023, 75(5): 22-25, 75.
- [3] 郑相悦,关贤欢,荣帅. 急倾斜薄矿脉采矿方法优选模型研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(6): 25-29.
ZHENG Xiangyue, GUAN Xianhuan, RONG Shuai. Study on optimization model of mining method for steeply inclined thin ore vein[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018, 47(6): 25-29.
- [4] 贾小东,韩国生. 急倾斜薄矿脉探矿与回采工艺实践[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(3): 15-17.
JIA Xiaodong, HAN Guosheng. Practice of prospecting and mining technology for steeply inclined and thin vein[J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(3): 15-17.
- [5] 胡际平. 国外小型地下采掘设备的发展与应用[J]. 国外金属矿山, 1991(11): 78-87.
HU Jiping. Development and application of small underground mining equipment abroad[J]. Mining Engineering, 1991(11): 78-87.
- [6] 刘翔宇. 论采矿设备的自动化[J]. 科技创新导报, 2013(12): 30.
LIU Xiangyu. On the automation of mining equipment[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(12): 30.
- [7] 张尧涛,林卫星,欧任泽,等. 深埋复杂倾斜薄矿体高效回采方案研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(10): 1-5.
ZHANG Yuantao, LIN Weixing, OU Renze, et al. Study on efficient mining scheme for deep-buried complex inclined thin orebody[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(10): 1-5.

- [8] 郑迪,陈才贤,杨福斗,等. 某钨矿近水平薄矿体采矿方法选择及开采保障措施[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(8): 1-4.
ZHENG Di, CHEN Caixian, YANG Fudou, et al. Selection of mining method and mining safeguard measures for a nearly-horizontal thin orebody in a tungsten ore[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(8): 1-4.
- [9] 张莉鹏. 缓倾斜至倾斜薄矿体的进路掏槽式采矿法[J]. 现代矿业, 2019, 35(11): 106-107.
ZHANG Lipeng. Tunnel cutting mining method for mining low-angle dip to dip thin ore bodies[J]. Modern Mining, 2019, 35(11): 106-107.
- [10] 廖九波, 范文录. 急倾斜极薄矿脉机械化开采新技术及应用[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(7): 10-14.
LIAO Jiubo, FAN Wenlu. A new machined mining technology of steeply inclined and extremely thin ore vein and its application[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(7): 10-14.
- [11] 柏杨, 周亚博, 崔越, 等. 急倾斜薄矿体脉外采准上向水平分层充填采矿法研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(5): 1-6.
BO Yang, ZHOU Yabo, CUI Yue, et al. Study on upward horizontal cut and fill mining method with mining preparation out of veins in steeply-inclined thin ore body[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(5): 1-6.
- [12] ALEXANDER P N, CLAUDIO T V, LUIS A G, et al. Pre-split blasting design to reduce costs and improve safety in underground mining[J]. Energy Reports, 2022(8): 1208-1225.
- [13] LI X D, LIU K W, YANG J C, et al. Numerical study on blast-induced fragmentation in deep rock mass[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022(170): 104367. DOI: 10.1016/j.ijimpeng. 2022. 104367.
- [14] LI G W, DENG G Z, MA J G. Numerical modelling of the response of cemented paste backfill under the blasting of an adjacent ore stope[J]. Construction and Building Materials, 2022(343): 128051. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2022. 128051.
- [15] 安龙, 张家华, 李元辉, 等. 急倾斜薄矿脉夹制作用下中深孔爆破模拟与参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 567-574.
AN Long, ZHANG Jiahua, LI Yuanhui, et al. Simulation and parameters optimization of medium deep hole blasting in steeply narrow vein mine under confinement[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(4): 567-574.
- [16] AN L, SUORINENI F T, XU S, et al. A feasibility study on confinement effect on blasting performance in narrow vein mining through numerical modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018(12): 84-94.
- [17] 马春德, 王业顺, 胡顺喜, 等. 毫秒微差爆破技术在深部缓倾斜薄矿体安全强采中的应用研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(1): 6-10.
MA Chunde, WANG Yeshun, HU Shunxi, et al. Application of millisecond-delay blasting technology safe and intensive mining of gently-dipping thin ore bodies[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(1): 6-10.
- [18] CHEN W, ROBERTS A, KATTERFELD A, et al. Modelling the stability of iron ore bulk cargoes during marine transport[J]. Powder Technology, 2018, 326: 255-264.
- [19] 熊有为, 刘福春, 陈伟, 等. 基于离散元与光滑粒子流体力学耦合的高浓度尾砂浓密过程仿真[J]. 金属矿山, 2021, 50(11): 19-24.
XIONG Youwei, LIU Fuchun, CHEN Wei, et al. Simulation of thickening process for high solids concentration tailings using coupled DEM-SPH method[J]. Metal Mine, 2021, 50(11): 19-24.
- [20] WENSRICH C, KATTERFELD A. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM[J]. Powder Technology, 2012, 217: 409-417.
- [21] POTYONDY D O, CUNDALL P. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [22] QUIST J, EVERTSSON C M. Cone crusher modelling and simulation using DEM[J]. Minerals Engineering, 2016, 85: 92-105.