doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.05.009

矿房回采爆破时中深孔拉槽爆破的参数优化研究*

赵兴东 宋景仪 周 鑫 东北大学深部金属矿采动安全实验室(辽宁沈阳,110816)

[摘 要] 作为回采爆破的初始自由面和爆破补偿空间,拉槽质量直接影响落矿效果。以三山岛金矿无人采矿示范区为工程背景,采用经验类比、数值模拟和现场试验等方法,分析了不同拉槽爆破参数下的矿岩损伤演化规律,得到了超挖或欠挖面积、爆破块度、自由面质点峰值速度、监测点环向应力 4 个指标与爆破孔网参数间的关系。结果表明:在最小抵抗线不变的情况下,随着孔间距的增加,爆破超挖或欠挖面积先减小、后增大,最优孔间距为 1.4 m;在孔间距不变的情况下,随着最小抵抗线的增加,爆破大块率逐渐增加,自由面质点峰值速度和应力测点的环向拉应力峰值逐渐减小;且最小抵抗线越小,自由面爆破能量分布越均匀,确定最优最小抵抗线为 0.8 m。现场中深孔拉槽爆破试验表明:采用优化后的孔网参数爆破后,块度均匀,没有明显的超挖或欠挖现象,切割槽形成质量较好,验证了理论分析结果。

[关键词] 拉槽爆破;爆破参数;数值模拟;岩石块度;超挖;欠挖

[分类号] TD235

Optimization of Parameters for Medium-Deep Hole Slot Blasting during Mining Blasting

ZHAO Xingdong, SONG Jingyi, ZHOU Xin

Labrotary of Safe Mining in Deep Metal Mine, Northeastern University (Liaoning Shenyang, 110816)

[ABSTRACT] As the initial free surface and blast compensation space for mining blasting, the quality of the slot directly affects the outcomes of ore falling. Taking the unmanned mining demonstration area of Sanshandao Gold Mine as the engineering background, using methods such as empirical analogy, numerical simulation, and on-site testing, the evolution law of rock damage under different excavation blasting parameters was analyzed. The relationship between the four indicators, including over excavation or under excavation area, rock fragmentation, peak velocity of free surface particles, and circumferential stress of monitoring points, and blasting hole network parameters was obtained. The results show that, under the condition of constant minimum resistance line, with the increase of hole spacing, the area of blasting over excavation or under excavation first decreases and then increases, and the optimal hole spacing is 1.4 m. Under the condition of constant hole spacing, with the increase of the minimum resistance line, the rate of large blasting blocks gradually increases, and the peak velocity of free surface particles and the peak circumferential tensile stress of stress observation points gradually decrease. The smaller the minimum resistance line, the more uniform the distribution of free surface blasting energy, and the optimal minimum resistance line is determined to be 0.8 m. The field tests on the deep hole slotting show that the optimized medium-deep network parameters could result in uniform block size, no obvious over excavation or under excavation, and good quality of cut slot formation, which verifies the theoretical analysis results

[KEYWORDS] slot blasting; blasting parameters; numerical simulation; rock fragmentation; over excavation; under excavation

^{*} 收稿日期:2023-03-02

0 引言

切割槽主要作用是为矿房回采爆破提供初始自由面和补偿空间,拉槽质量的好坏直接影响到整个矿房的回采工作^[15]。中深孔拉槽爆破技术具有效率高、安全性好、一次起爆量大等优点,但中深孔拉槽爆破参数对切割槽形成质量影响较大,参数不合理极易导致切割槽形成失败^[68]。因此,设计合理的拉槽爆破参数、准确控制爆破能量分布、减少拉槽爆破超挖或欠挖程度和大块率、改善切割槽形成质量是中深孔拉槽爆破成功的关键。

以三山岛金矿-645 m 水平无人采矿项目为工程依托,开展中深孔拉槽爆破参数的优化研究。通过经验公式,初步确定中深孔拉槽爆破的孔网参数;运用 LS-DYNA 软件模拟中深孔拉槽爆破过程中岩体的损伤演化规律,分析不同孔网参数对拉槽爆破超挖或欠挖、大块率、自由面质点峰值速度以及测点环向应力的影响;进而确定了最优中深孔拉槽爆破参数,并进行了现场拉槽爆破试验验证。

1 工程概况

三山岛金矿无人采矿试验区 - 645 m 中段 1[#]采 场位于1 440 线与1 460 线之间。矿体平均厚度为15 m,走向长度为80 m,倾角为38°~45°。矿体岩性主要为黄铁绢英岩。试验区三维模型见图1。

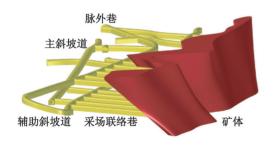
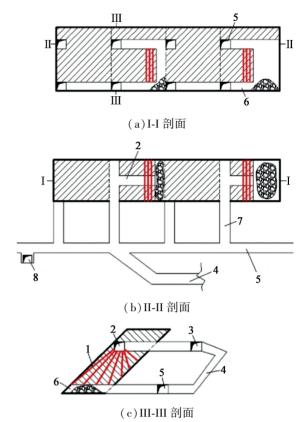


图 1 矿区三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the test area

试验区采用下向扇形中深孔落矿嗣后充填连续采矿法(图 2) 开采, 采场尺寸为 15 m×8 m×15 m^[9-10]。切割槽垂直矿体走向布置于矿房端部, 采用上向平行中深孔进行爆破, 拉槽宽度 5 m。试验区切割井已经施工完成, 拉槽时的初始自由面和补偿空间是切割井扩井后形成的, 尺寸为 2 m×5 m, 高度 15 m。

根据矿山所做的地应力现场实测数据,可得最



1-炮孔;2-凿岩巷道;3-分段平巷;4-辅助斜坡道; 5-中段平巷;6-拉底空间;7-采场联络巷;8-溜井。

图 2 下向扇形中深孔落矿嗣后充填连续采矿法

Fig. 2 Downward fan-shaped medium-deep hole caving and subsequent filling continuous mining method

大水平主应力、最小水平主应力随深度的回归方程:

$$\sigma_{h,max} = 2.074 + 0.041H;$$
 (1)

$$\sigma_{\rm h,min} = 0.976 + 0.025 H_{\odot}$$
 (2)

式中: $\sigma_{h,max}$ 与 $\sigma_{h,min}$ 分别为最大水平主应力、最小水平主应力;H为开采深度。

2 中深孔拉槽爆破参数初设

抵抗线 B 主要受炮孔直径、岩体质量、炸药威力等因素影响。抵抗线计算采用文献[11]中提出的炮孔直径 d 与最小抵抗线 B 的经验关系式:

$$B = 11.8d^{0.63}$$
 (3)

由于切割槽爆破存在较大的夹制作用,宜减小炮孔孔网参数,以达到良好的爆破破岩效果。根据现场实际爆破工程经验,夹制作用下的中深孔抵抗线为正常抵抗线的 0.5~0.8 倍^[12]。经计算,当炮孔直径为 60 mm 时,炮孔抵抗线范围为 0.8~1.2 m。孔间距 a 与抵抗线、矿体几何形态有关,为保证岩体爆破指向自由面方向,而不是排内相邻炮孔先联通,一般情况下,孔间距应大于抵抗线^[12]。孔间距 a 与

抵抗线 B 的关系式为

1.
$$15B < a < 2.00B_{\odot}$$
 (4)

考虑到切割槽宽度为 5 m,设计炮孔间距 a 的 范围为 1.2~1.6 m。

3 数值模型

3.1 中深孔拉槽爆破数值模型

假定炸药爆速无限大,柱状炮孔内的炸药同时起爆。这样,由于设计炮孔的长度远大于炮孔直径,可以将问题简化为平面应变模型进行研究。

建立如图 3 所示的准二维(厚度为 1 cm)中深 孔拉槽爆破参数优化计算模型,模型尺寸 9 m×8 m。炮孔直径 60 mm,采用耦合装药结构。模型四周设置无反射边界条件,以消除边界处应力波反射对数值计算结果的影响;添加法向约束,以模拟平面应变情况。由于炮孔周围的岩体赋存于地应力环境之中,故结合现场地应力方向,设定水平向地应力 $\sigma_x=28$ MPa、竖直向地应力 $\sigma_y=17$ MPa。地应力采用 Dynain 文件法进行施加,通过关键字* Interface_Springback_LSDYNA 输出预应力岩体模型;而后使用关键字* Include,将预应力岩体模型导入包含炸药和空气的流体域模型中,更新边界条件,完成爆炸动态计算。

中深孔拉槽爆破数值计算模型采用三维实体单元进行网格划分。由于采用二维模型进行研究,计算量较小,故为了保证计算精度,将单元尺寸控制在1 cm 以内,模型一共划分 720 080 个单元。岩体采用拉格朗日单元建模,而炸药、空气采用任意拉格朗日欧拉单元(ALE)建模,采用流固耦合方法进行计算。通过试算,当t=2.3 ms后,岩石损伤分布基本

不发生变化,故确定模拟计算时长为3.0 ms。

3.2 数值模型材料参数

3.2.1 空气和炸药材料参数

空气采用 * Mat_Null 材料结合 Linear_Polynomial 状态方程进行模拟,参数见表 1。

表1 空气材料模型参数

Tab. 1 Meterial parameters of air

密度/ (kg·m ⁻³)	C4	C5	E_0	V_0
1.2	0.4	0.4	2.5×10^{-6}	0

炸药采用 * Mat_High_Explosive_Burn 材料模型模拟,炸药爆轰产物压力、体积和能量之间的关系采用 JWL 状态方程来描述:

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}$$
(5)

式中:p 为压力;V 为相对体积; E_0 为初始比内能;A、B、 R_1 、 R_2 、 ω 为试验确定的常数。

采用的2#岩石乳化炸药的参数见表2。

表 2 2 岩石乳化炸药参数

Tab. 2 Parameters of 2[#] rock emulsion explosive

密度/ (kg·m ⁻³)	/	速/ · s ⁻¹)	p _{CJ} /GPa	A/GPa
1.2×10^3	4.2	$\times 10^3$	10.5	276.2
B/GPa	R_1	R_2	ω	E ₀ /GPa
8.44	5.2	2.1	0.5	3.87

3.2.2 岩石 RHT 模型参数

在爆破作用中,裂隙区裂纹的扩展主要以拉应力破坏为主。因此,当选用HJC模型时,会存在明

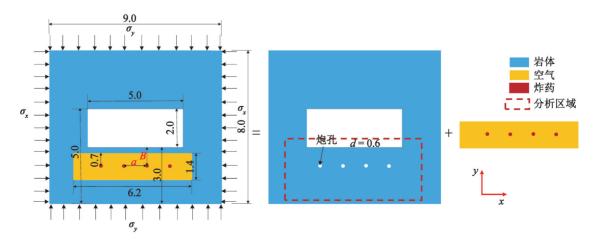


图 3 中深孔拉槽爆破参数优化计算模型(单位:m)

Fig. 3 Optimization calculation model for parameters of medium-deep hole slot blasting (Unit: m)

显的缺陷。RHT模型引入了偏应力张量第三不变量,用来定性判定材料的应变类型和应力状态,进而克服了HJC模型表征拉伸损伤不足的缺点。因此,选用RHT模型进行研究[13-14]。该模型中的损伤

$$D = \sum \frac{\triangle \varepsilon_{\rm p}}{\varepsilon_{\rm f}} \tag{6}$$

式中: $\triangle \varepsilon_{p}$ 为累积塑性应变; ε_{f} 为材料破坏时的塑性应变。

根据矿山岩石的力学试验结果,得出岩石 RHT 模型参数,如表 3 所示。

表3 岩石 RHT 模型参数

Tab. 3 RHT model parameters of rock

参数名称	参数值
单轴抗压强度 $f_{ m e}/{ m MPa}$	75.6
拉压强度比 F_{t}^{*}	0.05
剪压强度比 $F_{\rm s}^*$	0.24
切变模量 G/GPa	5.5
材料密度 $\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 718
初始孔隙度 α_0	1. 1
孔隙开始压碎时压力 p_c/MPa	50.4
孔隙完全压实时压力 p_1 /GPa	6
孔隙度指数 $N_{_{ m p}}$	3
Hugonoit 多项式参数 A_1/GPa	16.10
Hugonoit 多项式参数 A_2/GPa	27.04
Hugonoit 多项式参数 A ₃ /GPa	16.53
状态方程参数 B_0	1. 68
状态方程参数 B_1	1. 68
状态方程参数 T_1/GPa	16.1
压缩屈服面参数 G_c^*	0.4
拉伸屈服面参数 G_{ι}^*	0.7
切变模量缩减系数 X_{I}	0.5
失效面参数 A	2. 51
失效面指数 N	0.72
拉压子午比参数 Q_0	0. 68
罗德角相关系数 B	0.05
压缩应变率指数 β_c	0.016 2
拉伸应变率指数 β_{ι}	0.0209
损伤参数 D_1	0. 04
最小失效应变 $ arepsilon_{ m pm} $	0.015
残余应力强度参数 $A_{\rm f}$	1.6
残余应力强度指数 $N_{\rm f}$	0.6

4 中深孔拉槽爆破参数优化

4.1 炮孔间距优化

初设中深孔拉槽爆破参数为:炮孔直径60 mm,

最小抵抗线 0.8~1.2 m,炮孔间距 1.2~1.6 m。为了实现中深孔拉槽爆破孔网参数的优化,先设定最小抵抗线为 1.0 m,再建立炮孔间距分别为 1.2、1.4、1.6 m 的 3 个数值模型,并分别记为方案 1[#]、方案 2[#]、方案 3[#]。通过对切割槽两帮爆破超挖或欠挖程度进行分析,确定最优炮孔间距。

使用上述3个模型进行数值模拟。图4为不同方案时岩石的爆破损伤演化过程。图4(a)为方案1**的岩石爆破损伤演化过程。在t=0.2 ms内,4个炮孔造成的岩石爆破损伤区呈同心圆分布,此时岩石主要受到冲击波的压缩破坏作用;t=0.5 ms时,由于受到地应力的影响,两个边孔造成的损伤呈椭圆形分布;在t=0.6 ms时,压缩应力波到达自由面,发生反射,变成拉伸应力波,进而造成自由面附近岩石的拉伸损伤;此后,应力波在炮孔与自由面之间往复循环,拉压振荡,造成岩石的进一步损伤。由图4(b)、图4(c)可知,方案2*、方案3**的岩石爆破损伤演化过程和方案1**基本相似。

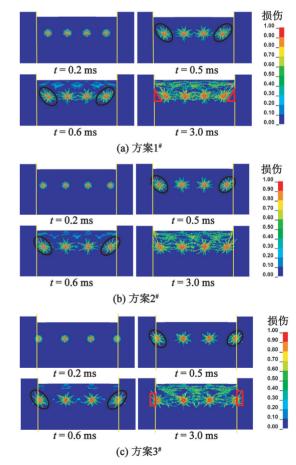


图 4 不同方案岩石的爆破损伤演化过程

Fig. 4 Evolution process of rock blasting damage in different schemes

由图 4(a)可知,方案 1*由于炮孔距离切割槽两帮较远,导致出现欠挖现象(红色三角形区域);由

图 4(c)可知,由于炮孔距离切割槽两帮过近,方案 3*中出现超挖现象(红色矩形区域);由图 4(b)可知,方案 2*基本不出现超挖、欠挖现象。通过上述分析可知,最优炮孔间距为 1.4 m,此时切割槽两帮 爆破超挖、欠挖面积最小。

4.2 最小抵抗线优化

中深孔拉槽爆破最小抵抗线范围为 0.8~1.2 m。故建立炮孔间距 1.4 m、最小抵抗线分别为 0.8 m 和 1.2 m 的两个数值模型,分别记为方案 4[#]和方案 5[#]。通过对方案 2[#]、方案 4[#]和方案 5[#]的爆破块度、应力测点的环向应力时程曲线、自由面质点峰值速度 3 个指标进行分析,进而确定最优中深孔拉槽爆破的孔网参数。自由面质点及应力测点布置如图 5 所示。

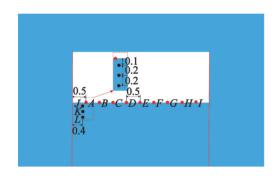


图 5 自由面质点及应力测点的布置示意图(单位:m) Fig. 5 Layout diagram of free surface particles and stress measuring points (Unit: m)

爆破块度是评价爆破效果的重要指标。采用RHT模型进行岩石爆破数值模拟研究时,当岩石损伤 D 高于 0.5 时,即可认为该处岩石被完全破碎,在岩石中形成爆破裂纹 $^{[15]}$ 。基于此,设定岩石损伤阈值 D=0.5。计算结束后,剔除损伤大于 0.5 的岩石,得到方案 2^* 、方案 4^* 和方案 5^* 的岩石破碎模式和最终损伤云图,如图 6 所示。

由图 6 可知,随着抵抗线的增大,爆破块度逐渐变大。测量得到,方案 2^* 较大碎块的尺寸为 15 cm×162 cm、14 cm×170 cm、26 cm×36 cm、35 cm×52 cm;方案 4^* 较大碎块的尺寸为 29 cm×45 cm;方案 5^* 较大碎块的尺寸为 48 cm×145 cm、32 cm×79 cm、18 cm×286 cm。

自由面质点速度是不同爆破参数条件下自由面处的爆破能量传播特征^[12]。图 7 为方案 2[#]、方案 4[#]、方案 5[#]时自由面质点峰值速度曲线。由图 7 可知,随着最小抵抗线的增加,自由面质点峰值速度逐渐下降。方案 4[#]的自由面质点峰值速度波动最小,说明爆破能量分布最均匀;方案 5[#]的自由面质点峰值速度波动最大,爆破能量分布最不均匀。

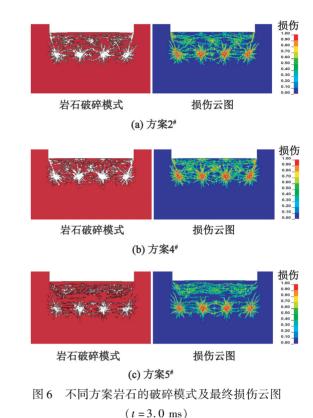


Fig. 6 Rock fragmentation mode and final damage nephogram in different schemes (t=3.0 ms)

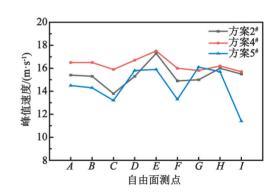


图 7 不同方案自由面质点的峰值速度曲线 Fig. 7 Peak velocity curves of free surface particles in different schemes

图 8 给出了方案 2^* 、方案 4^* 、方案 5^* 在 3 个应力测点处环向应力的时程曲线。图 8 中,应力以受拉为正,受压为负。由图 8 可知,由于地应力的存在,各测点在 t=0 时刻的环向应力均不为 0;由于爆炸载荷的冲击特性,围岩环向应力在爆炸载荷作用的初始阶段为压应力,随之由于岩体的径向位移转变为拉应力,在应力测点 J、K、L 中,仅有方案 4^* 产生了环向拉应力,且高于岩体抗拉强度 3.76 MPa,岩体发生张拉破坏;而方案 2^* 、方案 5^* 则由于地应力的夹制作用,没有产生环向拉应力,说明在应力测点 J、K、L 上,仅有方案 4^* 能够产生垂直于自由面的

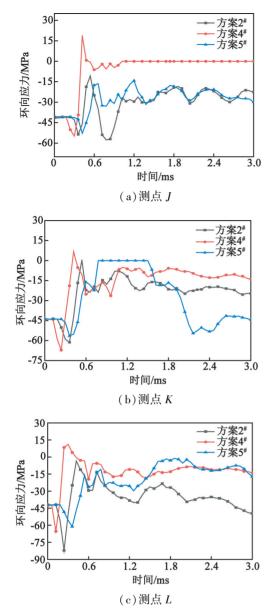


图 8 不同方案测点的环向应力时程曲线

Fig. 8 Time history curves of circumferential stress of measuring points in different schemes

裂纹。方案 2[#]、方案 5[#]在测点均不能产生径向裂纹,极有可能产生大量平行于自由面的细长大块,这和块度分析得到的结果一致。

综上所述,根据爆破超挖、欠挖分析得出,最优炮孔间距为1.4 m;根据爆破块度、应力测点的环向应力时程曲线、自由面质点峰值速度3个指标的分析结果,确定最优最小抵抗线为0.8 m。

5 现场试验

为验证优化孔网参数后的中深孔拉槽爆破的效果,依托三山岛金矿无人采矿工程示范区开展现场爆破试验。试验地点选在-645 m 中段1*采场。事

先已完成切割井及扩井等施工工作,可为中深孔拉槽爆破提供初始自由面和足够的补偿空间。如图 9 所示,切割拉槽爆破共布置 10 排 40 个垂直炮孔,分两次爆破拉槽。第一次爆破前 3 排,炮孔直径为 60 mm,炮孔施工深度为 10.5 m;采用装药车灌装乳化炸药,填塞长度 1.2 m,最小抵抗线为 0.8 m,孔间距为 1.4 m;采用非电导爆管雷管起爆,毫秒微差爆破,微差间隔时间为 25 ms;同排炮孔采用相同段别的导爆管雷管同时起爆,排间炮孔为延时起爆。

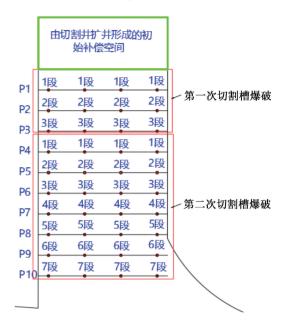


图 9 试验采场切割槽炮孔布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of blast hole layout for cutting groove in experimental mining site

利用优化的孔网参数爆破后,最大大块尺寸为53 cm×39 cm,与数值模拟结果较为接近,无超级大块产生。爆破对切割槽两帮岩体损伤较小,没有明显的超挖或欠挖现象,边界面基本完整,空区形态与设计切割槽形态基本吻合(图10)。



图 10 现场爆破效果 g. 10 Blasting outcomes on site

6 结论

采用数值模拟的方法研究了不同孔网参数下的

岩石爆破过程,进而实现了爆破孔网参数的优化,并 使用优化后的爆破参数进行了现场爆破验证,得到 了以下结论:

- 1)结合三山岛具体开采条件,采用经验方法初步确定了中深孔拉槽爆破参数,即炮孔直径60 mm、抵抗线0.8~1.2 m、孔间距1.2~1.6 m。
- 2)综合爆破超挖或欠挖面积、爆破块度、自由面质点峰值速度、测点环向应力4个指标,确定最优爆破参数为最小抵抗线0.8 m、孔间距1.4 m,并在三山岛金矿无人采矿示范区-645 m 中段1*采场开展现场爆破试验。爆破试验结果表明,爆破后的矿岩块度分布均匀,无大块产出,爆破空区形态与设计切割槽形态相吻合,成槽质量较好。
- 3)地应力对爆破裂纹扩展具有一定的阻碍作用,爆破设计应当充分考虑地应力的影响。

参考文献

- [1] 綦晓磊, 梁彦波, 宋肖杰, 等. 切割槽拉槽爆破悬顶现象产生的原因及处理技术[J]. 中国矿山工程, 2015, 44(1): 32-34.

 QI X L, LIANG Y B, SONG X J, et al. Reason of causing flap top in cutting and kerf blasting and its treatment measures [J]. China Mine Engineering, 2015, 44(1): 32-34.
- [2] 岳建忠. 无切割井拉槽法在茶店磷矿的成功应用[J]. 中国矿业, 2006, 15(8): 73-74.
 YUE J Z. Application of pull open grooving without grooving well in Cha Dian Phosphate Mine [J]. China Mining Magazine, 2006, 15(8): 73-74.
- [3] 陶铿. 无切割井一次爆破拉槽法试验[J]. 化工矿山技术,1983(5):19-20.
- [4] 郭良银, 蒋万飞, 宋召法, 等. 新城金矿阶段空场嗣后充填法开采大直径深孔切槽爆破方法[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(4): 585-593.
 GUO L Y, JIANG W F, SONG Z F, et al. Large diameter long hole cutoff slot blasting method for sublevel open stoping with delayed filling in Xincheng Gold Mine [J]. Gold Science and Technology, 2022, 30(4): 585-593.
- [5] 王晓涛, 齐朝鹏, 郭子林, 等. "双碳"目标下倾斜厚 矿体切割槽的优化设计与施工[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(1): 34-38.

 WANG X T, QI Z P, GUO Z L, et al. Optimized design and construction of inclined thick ore body cutting trough under "double carbon" target [J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2023, 75(1): 34-38.
- [6] 郑跃飞,蒋荣,孙海帝,等.湖南某矿山切割槽爆破 参数优化[J].采矿技术,2020,20(2):125-126,

130.

- [7] 何斌全,高宇梁,张德明,等.中深孔切槽爆破设计与起爆网路可靠性分析[J].爆破,2014,31(4):26-30.
 - HE B Q, GAO Y L, ZHANG D M, et al. Mid-deep hole blasting design on cutting grooves and reliability analysis of blasting circuit [J]. Blasting, 2014, 31(4): 26-30.
- [8] 罗佳,柳小胜,宋嘉栋,等. 地下采矿切割槽形成技术研究[J]. 有色金属(矿山部分),2015,67(6):14-19.
 - LUO J, LIU X S, SONG J D, et al. Study on cutting groove forming technology of underground mining [J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2015, 67(6): 14-19.
- [9] 赵兴东,曾楠,陈玉民,等. 三山岛金矿井下无人开采区域中深孔落矿嗣后充填连续采矿工艺设计[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(2): 200-207.

 ZHAO X D, ZENG N, CHEN Y M, et al. Design of the medium-deep hole caving and subsequent filling continuous mining technology in underground unmanned mining area of Sanshandao Gold Mine [J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(2): 200-207.
- [10] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等. 三山岛金矿连续规模化智能开采工艺研究及应用[J]. 金属矿山,2022(5):45-49.

 ZHAO X D, ZHOU X, ZHAO Y F, et al. Study and application of continuous large-scale intelligent mining technology in Sanshandao Gold Mine [J]. Metal Mine, 2022(5):45-49.
- [11] VILLAESCUSA E. Geotechnical design for sublevel open stoping [M]. New York: CRC Press, 2014.
- [12] 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 L, ZHANG J H, LI Y H, 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.
- [13] WANG Z L, WANG H C, WANG J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104172.
- [14] 凌天龙, 王宇涛, 刘殿书, 等. 修正 RHT 模型在岩体爆破响应数值模拟中的应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增刊2): 434-442. LING T L, WANG Y T, LIU D S, et al. Modified RHT

model for numerical simulation of dynamic response of

(下转第64页)

merical simulation of blasting cutting angle of ultra-high reinforced concrete [J]. Engineering Blasting, 2022, 28 (1): 99-106.

- [6] 费鸿禄,钱起飞,刘雨,等. 切口形状对高烟囱拆除 爆破倾倒后坐的影响[J]. 工程爆破,2021,27(1):53-61.
 - FEI H L, QIAN Q F, LIU Y, et al. Effect of cut shapes on dumping backward collapse of high chimney in demolition blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 53-61.
- [7] MUNJZA A. The combined finite-discrete element method [M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2004; 9-13.
- [8] 高文乐,朱茂迅,李元振,等. 发电厂双曲线型冷却 塔的定向爆破拆除及爆破效果数值分析[J]. 爆破器 材,2020,49(4):52-57.
 - GAO W L, ZHU M X, LI Y Z, et al. Directional blasting demolition of hyperbolic cooling tower in power plant and numerical analysis of blasting outcome [J]. Explosive Materials, 2020, 49(4): 52-57.
- [9] 何煌,魏万鑫,毛益松,等. 烟囱爆破方案的数值模拟[J]. 采矿技术,2009,9(5):66-67.
- [10] 林哲, 张世平. 砖烟囱爆破拆除不同切口形状的数值模拟[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 91-94. LIN Z, ZHANG S P. Numerical simulation study on the

- removal of chimney with different blasting notch shape [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(4): 91-94.
- [11] 高文乐, 李坤鹏, 刘志成, 等. 减荷槽数量对双曲线 冷却塔倒塌效果的影响研究[J]. 爆破, 2020, 37 (4): 116-126.
 - GAO W L, LI K P, LIU Z C, et al. Research on influence of number of load reducing slots on collapse effect of hyperbolic cooling towers [J]. Blasting, 2020, 37 (4): 116-126.
- [12] 郑欣, 王伟杰. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的竖井掏槽延时爆破研究 [J]. 工程爆破, 2021, 27(6): 59-64, 79.
 - ZHENG X, WANG W J. Research on delayed blasting of shaft cutting based on ANSYS/LS-DYNA $[\,J\,]$. Engineering Blasting, 2021, 27(6): 59-64, 79.
- [13] 周瑞权. 基于 ANSYS 的某双曲线冷却塔结构分析 [J]. 工程建设与设计, 2019 (15): 17-20. ZHOU R Q. Structural analysis of a hyperbolic cooling tower based on ANSYS [J]. Construction & Design for Engineering, 2019 (15): 17-20.
- [14] 赵宇明, 陈剑宇. 关于采用有限元软件 ANSYS 进行 冷却塔计算的探讨[J]. 内蒙古科技与经济, 2017 (9): 69-70.

(上接第56页)

rock mass under blasting load [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Suppl. 2): 434-442.

[15] 王卫华, 刘洋, 张理维, 等. 基于 RHT 模型双孔同时爆破均质岩体损伤的数值模拟[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(3): 414-426.

WANG W H, LIU Y, ZHANG L W, et al. Numerical simulation of homogeneous rock mass damage caused by two-hole simultaneous blasting based on RHT model [J]. Gold Science and Technology, 2022, 30 (3): 414-426.

版 权 声 明

- 1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。
 - 2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部