

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.015

## 黑山露天矿爆破参数优化数值模拟研究

戴林,李思维

(神华新疆托克逊矿业有限责任公司,托克逊县 838000)

**摘要:** 为了改善黑山露天煤矿爆破效果,减少大块率,针对具有较好完整性岩体及较坚硬岩性特征的2505及2520等平台的爆破参数进行优化,开展不同孔距、坡顶距对爆破效果影响的数值模拟研究。通过现场岩石取样,进行密度测试、单轴抗压强度测试、直剪试验、巴西劈裂试验测试岩石强度、弹性模量、泊松比,获得现场岩石的真实力学参数。基于岩石真实力学参数确定模拟参数,建立了2.5 m、3.0 m、3.5 m三种坡顶距工况与5.0 m、5.5 m、6.0 m三种孔距工况下的有限元分析模型,分别对比分析了岩体整体的爆破损伤范围及孔口、坡顶线、坡面三处单元的拉应力作用,确定了适合黑山露天矿2505及2520等平台的坡顶距为3.5 m及孔距为6 m。通过爆破参数优化,有效改善了黑山露天煤矿爆破效果,提高了采矿施工效率3%以上。

**关键词:** 台阶爆破;数值模拟;爆破效果

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0101-07

## Numerical Simulation of Blasting Parameters Optimization in Heishan Open-pit Mine

DAI Ling, LI Si-wei

(Shenhua Xinjiang Toksun Mining Co., Ltd., Toksun 838000, China)

**Abstract:** In order to improve the blasting effect of Heishan open-pit coal mine and reduce boulder yield, the blasting parameters of platforms 2505 and 2520 with good rock mass integrity and hard lithologic characteristics were optimized by numerical simulation of the influence on blasting effect with different hole spacings and slope-top distances. The true mechanical parameters of the rock, such as strength, elastic modulus and Poisson's ratio, were obtained by density test, uniaxial compressive strength test, direct shear test and Brazilian splitting test. Based on these rock mechanical parameters, simulation models of slope-top distances of 2.5 m, 3.0 m, 3.5 m and spacing of 5.0 m, 5.5 m, 6.0 m were built, respectively. Then the damage range of the whole model and the tensile stresses of the selected elements at the hole top, top line of slope and slope face were compared. Based on the analysis, the suitable blasting parameters were determined as slope-top distance of 3.5 m and spacing of 6 m for 2505 and 2520 platforms. Through the optimization of the blasting parameters, the blasting effect of Heishan open-pit coal mine was effectively improved, and the efficiency of mining construction was improved more than 3%.

**Key words:** bench blasting; numerical simulation; blasting effect

黑山露天煤矿隶属托克逊县,位于托克逊县西北约90 km,北距乌鲁木齐市约65 km。黑山矿生产

作业中面临的一个主要问题是地质岩性复杂多变、软硬岩夹杂,呈现裂隙发育不完整岩体与完整性较好岩体交错分布的状态,整体可爆性较差,导致爆后易产生大块、根底等不良爆破效果,矿山生产成本因此提高。针对黑山露天煤矿现状,有必要通过对不同地质条件区域针对性研究制定相适应的不同爆破

收稿日期:2021-06-29

作者简介:戴林(1987-),男,工程师、学士,从事露天开采技术研究,(E-mail)787031239@qq.com。

通讯作者:李思维(1988-),男,工程师、学士,从事露天开采技术研究,(E-mail)1197402388@qq.com。

参数及施工标准,从而提高整体爆破效果,减少大块等不良现象,有效降低成本。实验手段是爆破参数优化最常用的手段,通过不断地调整参数开展爆破试验并对比爆破效果,最终综合成本、质量等因素确定符合实际的最优爆破方案。实验手段的缺点在于对爆破效果影响的参数较多,实验规模较大成本较高,爆破效果精确统计不易。近二十年来,由于数值模拟理论及技术的发展,采用数值模拟技术辅助爆破参数优化逐渐成为一种常用的技术手段<sup>[1-4]</sup>。基于真实的岩石、炸药参数建立模型,不断调整模拟方法及模型,提高模拟效果与真实的接近程度,从而可以通过计算机模拟实现低成本、高效率的对众多爆破参数的优化给出有价值的参考数据。

本项课题研究主要针对黑山矿具有较好完整性

的 2505 及 2520 等具有较完整岩体且具有相同类型的较坚硬岩性岩石的平台,通过数值模拟方法分析孔距、坡顶距对爆破效果的影响,获得有利于降低爆破大块率的爆破参数。

## 1 岩石参数获取

在露天矿 2505 及 2520 平台现场获取岩石样品后切割打磨获得砂岩岩石样品,测试岩石样品的密度、抗压强度、抗剪强度、抗压强度、弹性模量等主要岩性参数,为后续数值模拟参数确定提供参考。测试如图 1 所示,测试结果如表 1 所示,其中剪切试验采用直剪试验测试,施加的垂直荷载为 10 MPa,抗拉强度采用巴西劈裂法测试获得。

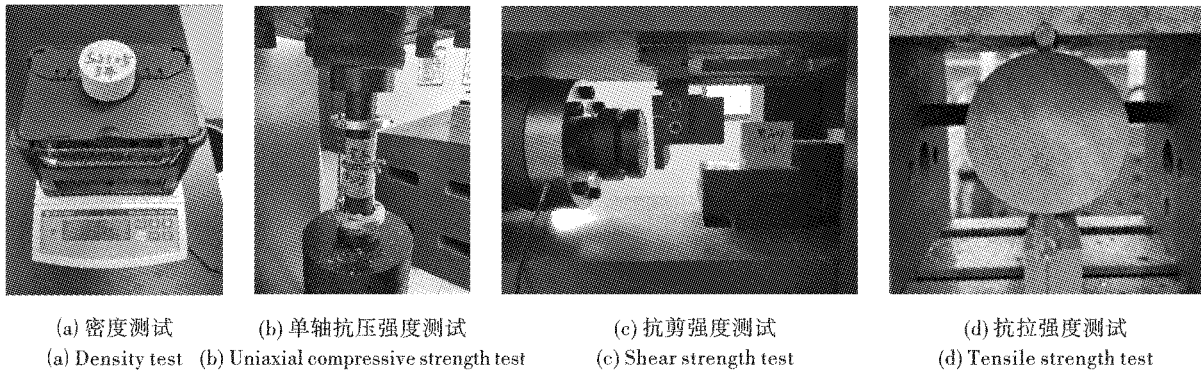


图 1 岩石力学性能测试

Fig. 1 Rock mechanical performance test

表 1 岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters

序号	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
01	2.618	85.77	4.27	12.9	16.03	0.31
02	2.601	98.64	4.07	14.3	13.52	0.28
03	2.606	91.89	4.50	13.1	14.49	0.29
04	2.606	84.19	3.67	15.2	15.61	0.30
05	2.620	80.60	3.45	12.6	18.29	0.29
06	2.561	91.99	4.64	12.7	19.32	0.28
平均值	2.602	88.85	4.10	13.5	16.21	0.29

## 2 黑山矿爆破参数优化数值模拟

采用在爆破工程领域应用广泛的 LS-DYNA 作为分析用有限元程序。

### 2.1 计算模型及参数

黑山煤矿主爆孔爆破参数为:孔径 138 mm,孔距 5~6 m,排距 4.5 m,台阶高度 15 m,超深 1.5 m,距坡顶线 2.5~3.5 m,孔间微差时间 42 ms,坡面角

70°。基于以上参数,本研究主要针对孔距、坡顶距设计 6 种工况条件:孔距 5 m、5.5 m、6 m,与坡顶线距离 2.5 m、3.0 m、3.5 m。

孔距 5 m、5.5 m、6 m 这 3 种工况条件,模型整体高度 20 m,宽度 12 m,坡面角 70°,单个炮孔,炮孔距离左侧模型边界固定为 3 m 距离,右侧则根据工况改变坡顶距。与坡顶线距离 2.5 m、3.0 m、3.5 m 这 3 种工况条件,模型整体高度 20 m,宽度 20 m,两个炮孔,炮孔

对称布置,根据工况改变两孔孔距。见图2。

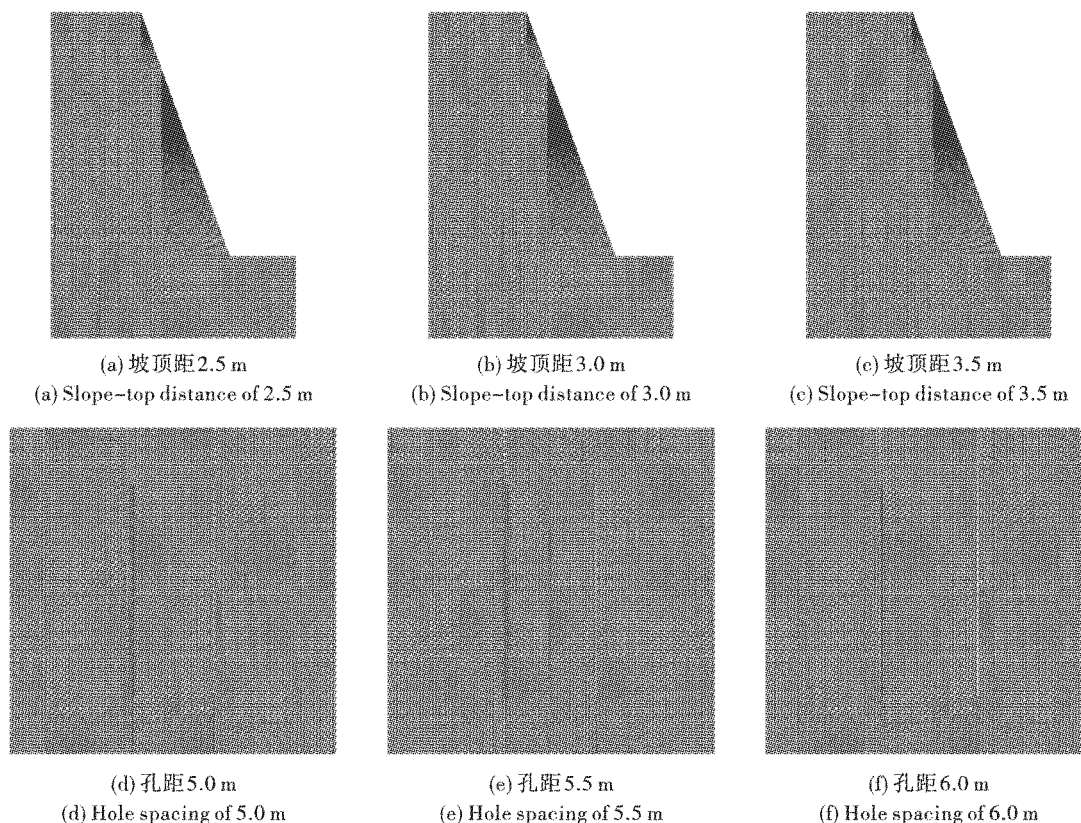


图2 模拟模型

Fig. 2 Simulation model

采用三维网格,建模时取单层单元,并约束垂直面的位移来模拟平面应变问题,左侧、右侧、下侧设为无反射边界<sup>[5]</sup>。模型中共有单元约2.3万~4万个,计算过程中都设置为炸药底部起爆。

岩石及堵塞材料采用 MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE 模拟岩石,该模型能较好模拟脆性材料在高温、高压、大应变率等条件下的受

力状态。该模型的参数较多,部分参数获取存在困难,因此本次模拟在测试得到的岩石力学参数基础上,参考相关文献提供的参数选取相同岩性相近力学参数值进行模拟<sup>[6]</sup>。采用高能炸药模型 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 以及JWL状态方程模拟炸药的爆炸过程。各种物质的材料参数如表2所示。

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料	材料计算本构模型,力学参数及状态方程(单位:kg、m、s)									
	* MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE									
	<i>RO</i>	<i>G</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>FC</i>	<i>T</i>	<i>EPS0</i>	<i>EFMIN</i>
岩石及	2600	16.21E+9	0.79	1.60	0.007	0.61	88.85E+6	4.1E+6	1.0	0.01
堵塞	<i>SFMAX</i>	<i>PC</i>	<i>UC</i>	<i>PL</i>	<i>UL</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>K3</i>
	7.0	16E+6	0.001	0.8E+9	0.1	0.04	1.0	85E+9	-171E+9	208E+9
	* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN									
	<i>RO</i>	<i>D</i>	<i>PCJ</i>							
	850.0	3500.0	5.5E+9							
炸药	* EOS_JWL									
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>OMEG</i>	<i>E0</i>	<i>V0</i>			
	2.144E+11	0.182E+9	4.2	0.9	0.15	4.192E+9	1.0			

## 2.2 数值模拟结果及分析

### 2.2.1 岩体的损伤范围发展过程

通过数值模拟软件计算,获得不同坡顶距爆破

条件下岩体的损伤发展过程如图3所示,获得不同孔距双孔爆破条件下岩体的损伤发展过程如图4所示。

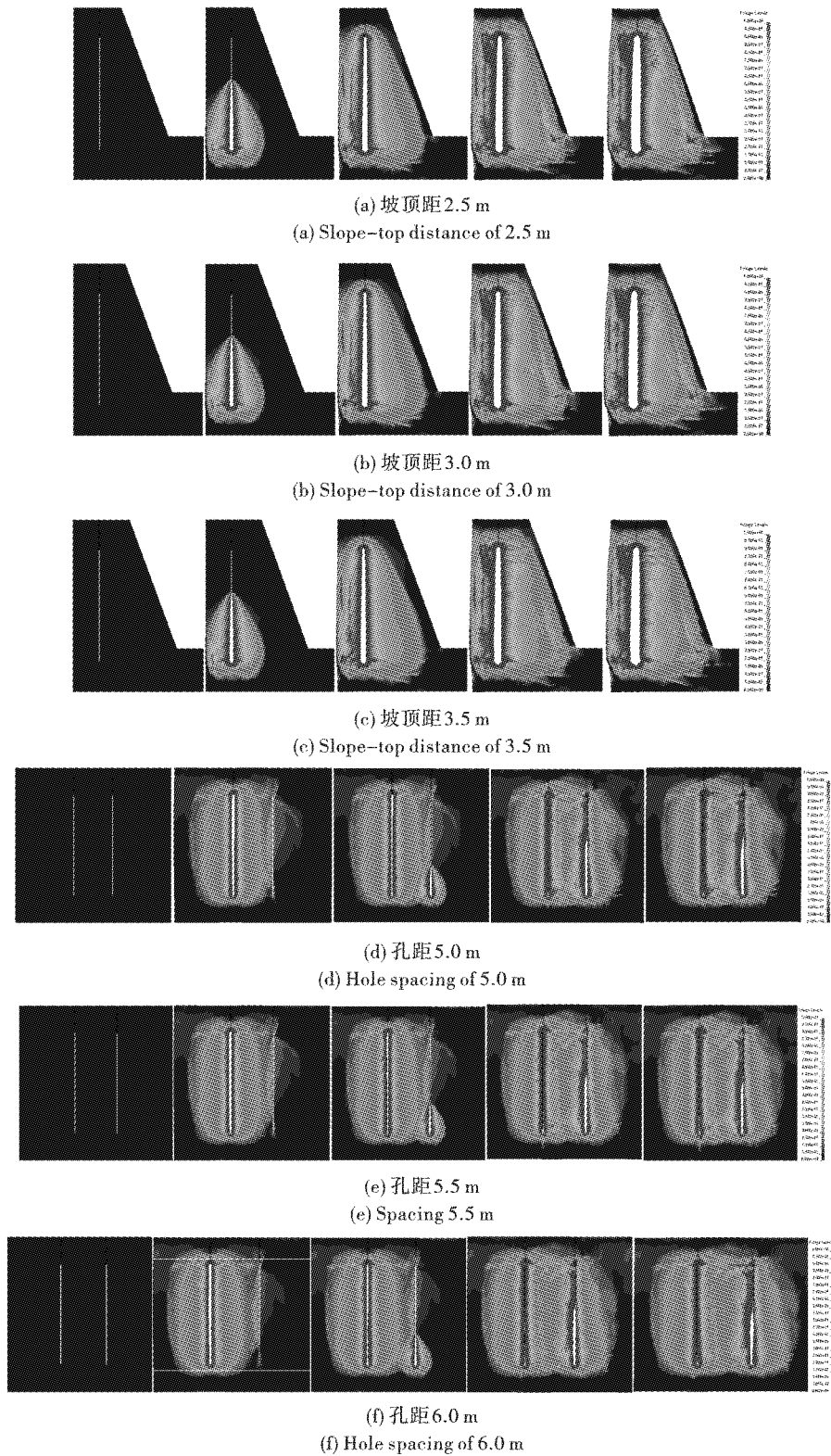


图3 损伤发展过程

Fig. 3 Damage development process

从 JHC 模型的损伤范围来看,孔距 5 m、5.5 m、6 m 双孔爆破,与坡顶线距离 2.5 m、3.0 m、3.5 m

单孔爆破,总共6种现有爆破参数工况条件下,爆破后在单孔爆破破岩负担体积范围内均能达到理想的爆破破坏效果。

在坡顶线距离2.5 m、3.0 m、3.5 m的3种工况条件下,炮孔至台阶坡面处的岩体都实现了有效的破坏,只是在坡脚处存在一定差异,随着坡顶线距离的增大坡脚处损伤范围略有减少,但在3.5 m工况条件下也基本可以保证前排炮孔范围内岩体的破岩作用。

在孔距5 m、5.5 m、6 m的3种工况条件下,可以看到右边炮孔爆破后顶部的损伤范围有一定程度的减少,这是由于左边先爆炮孔爆破后已经造成了两孔间岩石的破坏,这种破坏改变了右边炮孔左侧的自由面条件,导致了后爆的右边炮孔相比左边其爆破能量一定程度上更多的作用于炮孔左侧,于是减少了右侧的损伤作用。随着炮孔孔距的变化,两孔微差爆破整体的损伤范围基本是没有变化的,区别主要在于两孔间由于孔距的增大,爆破损伤作用程度有所减少,但是也还是保证了两孔间岩石的破坏作用。由于黑山矿目前采用固定的排距,因此常

规的梅花形布孔条件下后排炮孔爆破后可以进一步保证前排两孔间岩石的充分爆破破坏。

因此,如果仅仅根据JHC模型的损伤范围模拟结果,坡顶线距离、孔距均宜采用现有参数的最大值,即取坡顶线距离3.5 m、孔距6 m,可以充分利用宽孔距小排距布孔方式,在满足爆破破岩效果的前提下提高爆破效率并降低爆破成本。

2.2.2 自由面拉应力作用分析

由于计算过程中采用的JHC模型,其损伤范围只能考虑岩石的压剪损伤,未能反映拉应力引起的岩体损伤<sup>[7-9]</sup>,而台阶自由面处的破坏形式主要是爆炸应力波在自由面处的反射引起的拉伸破坏,因此,我们选取自由面上不同位置的3个单元,考察其第一主应力的变化和变化情况,可以有效判断爆破作用下自由面处的拉伸破坏情况<sup>[10]</sup>。

选取单元的位置如图4所示,分别位于平台孔口、坡面、坡底线的3个单元。由于3种工况下坡顶距越大,模型面积越大,单元数量越多,因此三个模型取单元点的编号存在差异,但是取点的位置是一致的。

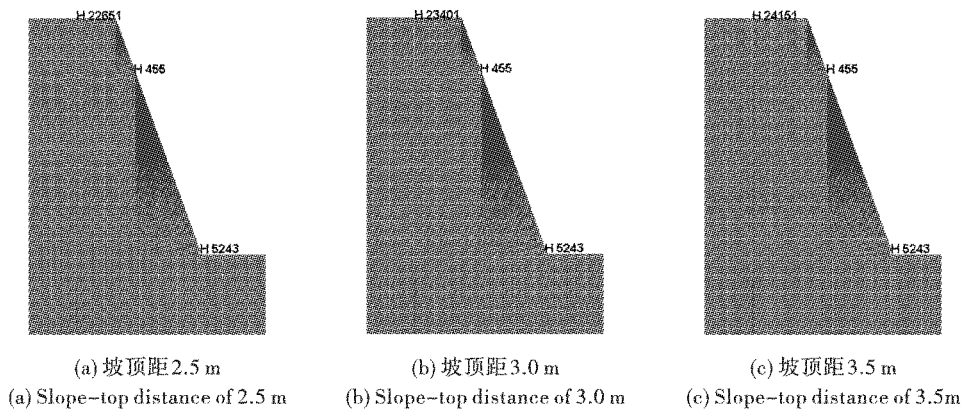


图4 选取单元

Fig. 4 Selected elements

不同工况下三个单元的第一主应力时程曲线如图5所示。

不同工况下三个单元处的最大拉应力统计如表3所示。

表3 选取单元拉应力(单位:MPa)

Table 3 Tensile stress of selected elements(unit:MPa)

坡底线距离/m	单元		
	孔口	坡面	坡脚
2.5	41.7	48.4	16.3
3.0	42.1	48.2	17.0
3.5	42.0	48.4	18.8

依据黑山矿岩样抗剪强度测试结果,其在10 MPa轴压下的直剪试验抗剪强度平均值为13.5 MPa。依据砂岩性质有关研究,砂岩抗拉强度一般不大于其抗剪强度。自由面处岩石不受围压,因此自由面处砂岩抗拉强度应小于13.5 MPa。可见,在坡顶线距离2.5 m、3.0 m、3.5 m的3种工况条件下,爆破炮孔在孔口、坡面、坡脚处的拉应力作用均大于黑山矿砂岩的抗拉强度值,均可以对自由面附近岩石产生拉伸破坏作用效果。

因此,综合损伤范围与自由面拉伸应力作用分析结果,宜采用坡顶线距离3.5 m、孔距6.0 m的爆破参数取值,不同工况相比较下较具有技术经济价值。

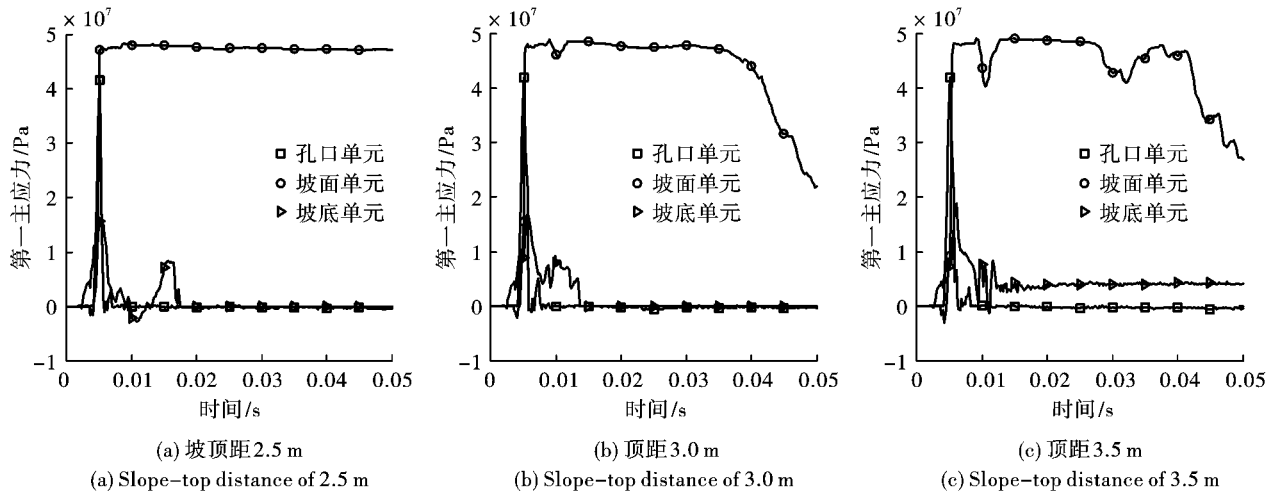


图5 选取单元拉应力

Fig. 5 Tensile stress of selected elements

### 3 爆破参数优化效果

南帮 2505 台阶岩体相对完整,初始炮孔参数为:炮孔直径 138 mm,坡顶距 4.0 m,孔间距离为 6.5 m,排间距离为 5.0 m,台阶高度为 15 m,超深 1.5 m,孔深为 1~15.5 m。经过现场勘查及块度分析,在爆破后效果一般,坡顶可见大块。针对该台阶,基于数值模拟分析结果,孔间距离减小为 6.0 m,坡顶距减小为 3.5 m。

基于上述优化建议,进行了爆破试验,试验孔数 25 个。采用上述优化参数的爆破情况如图 6 所示,经过现场勘查及块度分析,在爆破后效果良好,基本未见大块,无根底,铲装效果得到改善,装运效率提高 3% 以上。

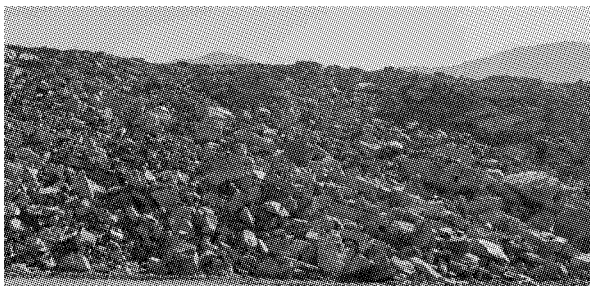


图6 2505 台阶优化后爆破效果

Fig. 6 Blast effect of 2505 bench after optimization

### 4 结论

针对黑山露天煤矿地质岩性复杂,爆破效果不够理想的问题,开展了如下研究工作:

(1) 对于黑山矿的 2505 平台等具有较完整岩体与相同较坚硬岩石的平台,实地采样加工试件测试了岩石力学参数,从而在实测力学参数的基础上确定数值模拟材料参数。

(2) 采用 LS-DYNA 模拟了不同孔距、坡顶距对爆破损伤范围、拉应力作用的影响。

(3) 基于数值模拟分析结果,提出黑山露天煤矿中 2505 平台及类似岩体完整性与岩性下的适用爆破参数为坡顶线距离 3.5 m、孔距 6.0 m,并开展了爆破试验,试验结果表明参数优化后有效改善了爆破效果。

### 参考文献 (References)

- [1] 杨懿全,许永权,郭其林,等. 刚果(金)某铜钴矿露天台阶爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2019(4):126-130.
- [1] YANG Yi-quan, XU Yong-quan, GUO Qi-lin, et al. Study on the parameters optimization of bench blasting for a copper and open-pit mine in Dre Congo[J]. Mining Research and Development, 2019(4):126-130. (in Chinese)
- [2] LI Q, LUO Z, HUANG M, et al. Control of rock block fragmentation based on the optimization of shaft blasting parameters[J]. Geofluids, 2020, 2020(11):1-10.
- [3] ADEYEMI R A. Optimization of blast design for quarries: a case study of Zibo quarry, Nigeria[J]. American Journal of Engineering Research, 2020, 8(8):84-92.
- [4] MIAO Y, ZHANG Y, WU D, et al. Rock fragmentation size distribution prediction and blasting parameter optimization based on the muck-pile model[J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2021, 38:1071-1080.
- [5] 龚永超,陆锦涛,林卫星,等. 基于三维精细数值模型的李楼铁矿爆破参数优化[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(11):24-28.
- [5] GONG Yong-chao, LU Jin-tao, LIN Wei-xing, et al. Blasting parameters optimization in Lilou Iron Mine based on 3d refined numerical model[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11):24-28. (in Chinese)
- [6] 霍晓锋,史秀志,苟永刚. 边帮控制爆破裂纹扩展模拟

- 及参数优化[J]. 爆破, 2019, 36(1): 25-32.
- [6] HUO Xiao-feng, SHI Xiu-zhi, GOU Yong-gang. Simulation of crack growth in sidewall controlled blasting and parameter optimization[J]. *Blasting*, 2019, 36(1): 25-32. (in Chinese)
- [7] 张理维, 王卫华, 戴怡文. 基于岩石爆破损伤的炮孔布置优化研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 36-43.
- [7] ZHANG Li-wei, WANG Wei-hua, DAI Yi-wen. Blast hole arrangement optimization based on rock blasting damage [J]. *Blasting*, 2020, 37(1): 36-43. (in Chinese)
- [8] 唐海, 易帅, 王建龙, 等. 考虑裂隙岩体爆破损伤的装药结构研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 74-80, 93.
- [8] TANG Hai, YI Shuai, WANG Jian-long, et al. Study on charge structure based on blasting damage of fractured rock [J]. *Blasting*, 2019, 36(1): 74-80, 93. (in Chinese)
- [9] SILVA J, WORSEY T, LUSK B. Practical assessment of rock damage due to blasting [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(3): 379-389.
- [10] 陈立军. 开采爆破作用下台阶岩体损伤区分布规律研究[J]. 爆破, 2020(3), 37(3): 85-89.
- [10] CHEN Li-jun. Distribution law of damage zone in bench rock mass under mining blasting [J]. *Blasting*, 2020(3): 85-89, 114. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚

(上接第60页)

- [12] 凌天龙. 长城站开挖围岩爆破损伤与累积效应研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [12] LING T L. Study on blasting damage and cumulative effect of surrounding of Rock in excavation of Great Wall Station [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 章诚. 深埋隧洞连续爆破开挖围岩损伤演化机制 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [13] ZHANG C. Damage evolution mechanism of surrounding rock during continuous blasting excavation of deep tunnel [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. (in Chinese)
- [14] 许红涛, 卢文波, 周小恒. 爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2008(1): 67-71, 103.
- [14] XU H T, LU W B, ZHOU X H. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2008(1): 67-71, 103. (in Chinese)
- [15] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2001(2): 144-147.
- [15] DAI J. Calculation of rock crushing circle and fissure circle in columnar charge blasting [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2001(2): 144-147. (in Chinese)
- [16] 杨建华, 卢文波, 陈明, 等. 岩石爆破开挖诱发振动的等效模拟方法 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2): 157-163.
- [16] YANG J H, LU W B, CHEN M, et al. An equivalent simulation method for blasting vibration of surrounding rock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2): 157-163. (in Chinese)
- [17] JONG Y, LEE C, JEON S, et al. Numerical modeling of the circular-cut using particle flaw code [C] // 31st Annual Conference of Explosives and Blasting Technique. Orlando, CO, USA, CD-ROM, 2005.
- [18] YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. Experimental and numerical study of damage characteristics of RC slabs subjected to air and underwater contact explosions [J]. *Marine Ecology*, 2019, 66(JUL.): 242-257.
- [19] 李洪超, 陈勇, 刘殿书, 等. 岩石 RHT 模型主要参数敏感性及其确定方法研究 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 779-785.
- [19] LI H C, CHEN Y, LIU D S, et al. Sensitivity analysis determination and optimization of rock RHT parameters [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(8): 779-785. (in Chinese)
- [20] 高启栋, 卢文波, 冷振东, 等. 岩石爆破中孔内起爆位置对爆炸能量传输的调控作用研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2050-2058.
- [20] GAO Q D, LU W B, LENG Z D, et al. Regulating effect of detonator location in blast-holes on transmission of explosion energy in rock blasting [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(11): 2050-2058. (in Chinese)
- [21] 郭东明, 刘康, 杨仁树, 等. 爆炸冲击荷载下相邻巷道裂隙扩展机理模拟试验 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 178-183.
- [21] GUO D M, LIU K, YANG R S, et al. Simulation experiments on the mechanism of adjacent tunnel crack extension induced by explosion load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2): 178-183. (in Chinese)
- [22] 闫长斌, 徐国元, 杨飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究 [J]. 岩土工程学报, 2007(1): 88-93.
- [22] YAN C B, XU G Y, YANG F. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007(1): 88-93. (in Chinese)
- [23] 林从谋, 蔡丽光, 蒋丽丽. 小净距隧道爆破中夹岩累积损伤测试研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 228-232.
- [23] LIN C M, CAI L G, JIANG L L. Study on cumulative damage of shared rock in small interval tunnel blast [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(S2): 228-232. (in Chinese)

英文编辑: 柯波