

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.011

## 利用浅孔改善深孔台阶爆破孔口块度技术研究\*

李志鹏<sup>1</sup>, 王园园<sup>2</sup>, 张光雄<sup>1,3</sup>, 赵明生<sup>1,3</sup>

(1. 哈密市和翔工贸有限责任公司, 哈密 839202; 2. 贵州建设职业技术学院, 贵阳 551499;

3. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002)

**摘要:** 新疆别斯库都克露天煤矿由于岩体节理裂隙发育, 深孔台阶爆破中孔口部分容易产生大块。为了改善该露天矿岩石爆破效果, 采用了深孔之间布设浅孔的方式对孔口的爆破破碎效果进行改善。为了确定合理的爆破参数, 采用了数值模拟方法对参数进行模拟验证。在露天矿现场取样制作试件测试了现场砂岩的岩石力学性质, 基于实测岩石力学性质与现场爆破参数建立了数值模拟模型。对不同浅孔深度的五种模拟条件进行了模拟, 分析了不同条件下孔口 1~4 m 范围内的爆破应力波应力峰值, 确定了 4 m 浅孔深度下对于孔口部分爆破效果的改善效果最佳。在别斯库都克露天矿 1216 台阶尝试采用了增加 4 m 深度 1.5 m 装药长度的浅孔, 明显改善了现场爆破效果。该研究结果可以对利用浅孔改善深孔露天台阶爆破孔口部分爆破效果, 减少孔口大块提供技术参考。

**关键词:** 台阶爆破; 浅孔爆破; 数值模拟; 现场试验

**中图分类号:** TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0075-06

## Study on Usage of Shallow Hole to Improve Blasting Effect of Deep Hole Bench Blasting

LI Zhi-peng<sup>1</sup>, WANG Yuan-yuan<sup>2</sup>, ZHANG Guang-xiong<sup>1,3</sup>, ZHAO Ming-sheng<sup>1,3</sup>

(1. Hami City Hexiang Industry and Trade Co., Ltd., Hami 839202, China;

2. Guizhou Polytechnic of Construction, Guiyang 551499, China;

3. Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Beskuduk Coal Mine due to the development of the rock crack, it is easy to produce large rock in the top section of the deep hole bench blasting. In order to improve the rock blasting effect, shallow holes between the deep holes are used to improve the blasting effect of the hole top section. In order to determine reasonable blasting parameters, the parameters are simulated and verified by numerical simulation methods. The rock mechanical properties of the on-site sandstone were tested, and the numerical simulation model was established based on the measured rock mechanics and the on-site blasting parameters. The five simulation conditions of different shallow depth were simulated. The peak of blasting stress wave in the range of 1 to 4 m under different conditions was analyzed. The improvement effect of the blasting effect of the apertures in the 4 m depth was determined. good. On the 1216 bench in Beskuduk, the shallow hole of the length of 1.5 m charge length was applied and significantly improved the on-site blasting effect. The results of the study can provide technical reference for improving the blasting effect of deep-hole bench and reducing the big rock by using shallow hole.

**Key words:** bench blasting; shallow hole blasting; numerical simulation; field test

收稿日期: 2021-08-28

作者简介: 李志鹏(1966-), 男, 高级工程师、学士, 从事露天开采技术研究, (E-mail) 13994177600@139.com。

通讯作者: 王园园(1987-), 女, 讲师、学士, 从事建设工程技术研究, (E-mail) 609991197@qq.com。

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合成果[2020]2Y049)

岩石爆破的质量主要由爆破块度分布、根底大小、爆堆形态、超欠挖等反映, 其中的块度分布由于反映了岩体整体的破坏效果, 并通过影响铲装运输、

破碎加工等后续工序而影响整个施工进度、成本、质量,因此是最为重要的一个质量指标。炮孔孔网参数是决定爆破块度分布一个最主要的因素,在岩石炸药单耗保持不变的条件下,炮孔越多炸药能量越分散利用率越高,对岩石爆破破碎作用效果越好,但同时也由于增加钻孔导致爆破成本的显著提高<sup>[1,2]</sup>。因此,采用适当的爆破参数,达成爆破效果与施工成本的综合平衡,是爆破设计的核心目标。

爆破大块主要由孔口和孔底的爆破质量决定。随着炮孔深度的增加,自由面的效应减弱,孔底的岩体受到的夹制作用增强,岩体破坏效果降低,容易产生大块。孔底大块除了合理的爆破孔网参数外,还通过加强装药,加大超深等办法进行控制。孔口部分由于堵塞的存在不与炸药直接接触,受到的炸药应力波直接作用的压剪破坏减少,依靠自由面应力波反射效应提供的拉伸破坏作用综合控制爆破效果,爆破效果受到爆破孔网参数更大的影响,堵塞过长、孔网参数不合理时孔口部分就容易产生大块。孔口部分的大块主要依靠合理堵塞长度和孔网参数控制。除深孔外额外布设浅孔加强爆破效果也是一种可用于减少孔口大块,改善爆破效果的方法<sup>[3,4]</sup>。这种方法改善爆破效果的同时增加的成本很小,可以针对多种岩性条件针对性设计,不过由于提高了设计复杂性同时也缺乏可供参考的成熟设计方法,因此少见

采用,近年来仅有个别研究与应用案例,如曹进军等在露天煤矿中采用深孔、浅孔联合布孔以改善煤层与岩层力学性能差异导致的爆破效果问题<sup>[5]</sup>,周俊采用混凝土模型爆破试验研究了上硬下软岩体条件下运用深孔浅孔联合布孔方法的合理参数<sup>[6]</sup>。

别斯库都克露天煤矿位于新疆巴里坤哈萨克自治县,矿内岩石以中砂岩、细砂岩为主,夹杂粉砂岩与泥岩,矿内不同区域岩体完整性存在差异,部分台阶如1216、1240、1252等的岩体节理裂隙发育。爆破应力波在节理裂隙、结构面等影响下衰减更为迅速,影响孔口自由面反射拉应力作用,导致岩石爆破孔口容易产生大块,爆破效果不佳<sup>[7,8]</sup>。针对节理裂隙发育区域孔口大块较多的问题,尝试采用了深孔间增设浅孔的方法,通过数值模拟方法对浅孔参数进行调整,并在实际施工中进行了应用。

## 1 别矿岩石参数

为了获取准确的现场岩石参数,提高数值模拟工作的可靠性,在别斯库都克露天矿选取代表性岩石岩样加工后获得砂岩岩石样品,分别测试密度、抗压强度、抗剪强度、抗压强度、弹性模量、泊松比等性能参数。抗剪强度采用直剪试验测试,抗拉强度采用巴西劈裂法,开展的各项测试如图1所示,测试结果见表1。

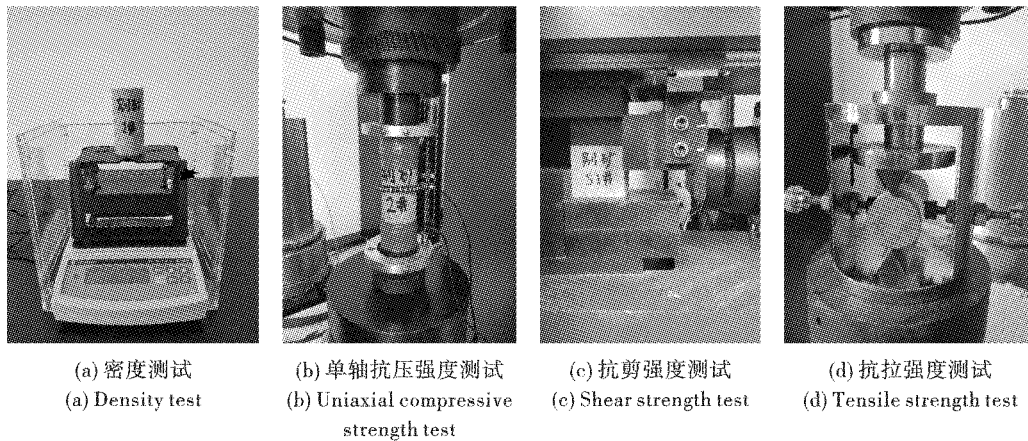


图1 岩石力学性能测试

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	2.565	46.32	3.78	10.90	13.86	0.28
02	2.572	45.70	3.64	12.10	13.47	0.28
03	2.598	47.05	4.19	11.30	14.32	0.29
平均值	2.578	46.37	3.87	11.43	13.88	0.28

## 2 浅孔爆破参数数值模拟

模拟软件为 LS-DYNA,采用有限元拉格朗日方法分析<sup>[7,8]</sup>。

### 2.1 计算模型及参数

别斯库都克露天煤矿岩体爆破参数为:孔径120 mm,孔距4~5 m,排距3.5 m,孔深8.5~12 m,距坡顶线3.5 m,孔间微差时间50 ms,坡面角70°。模拟选取常用参数的孔深8.5 m,堵塞4 m,孔距4 m,排距3.5 m。

模拟主要针对不同浅孔深度的条件进行模拟分析,孔径为90 mm,浅孔孔深采用3 m、3.5 m、4 m、

4.5 m 四种,装药长度均为1 m,再包括不设置浅孔的情况,总共有五种条件。通过对比分析不同条件下岩体受到的应力作用即可比较不同参数对孔口岩体的破坏效果。

模型整体高度11 m,长度6 m,宽度3 m。依据现场常用的3.5 m排距与4 m孔距参数,两个深孔炮孔距离3.5 m,浅孔设置在两个与两个深孔连线垂直距离2 m的孔距中点位置。模拟中所有炮孔齐发爆破,孔底起爆。模型正面约束垂直位移为对称面,左侧、右侧、下侧、后侧设为无反射边界<sup>[9,10]</sup>。模型中共有单元约21.8万个,图2所示为模型示意图、整体及三个炮孔部分的网格划分情况。模拟模型见图3。

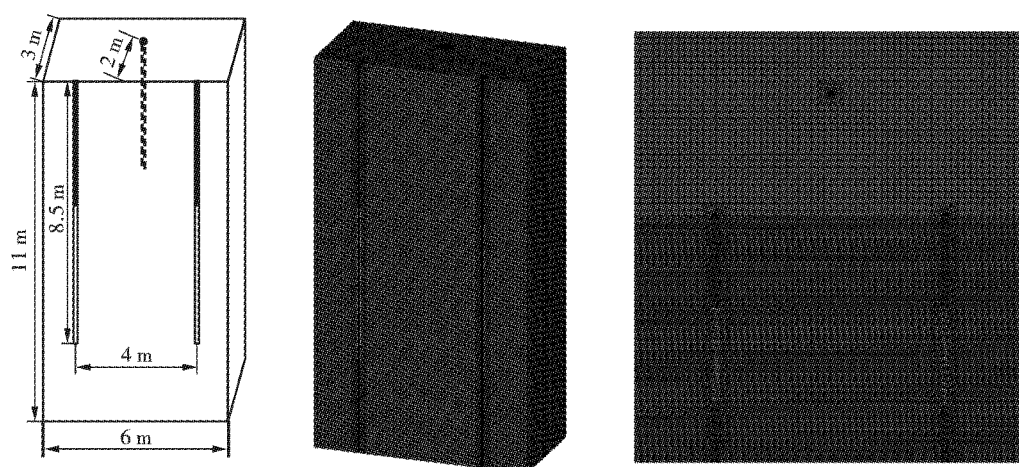


图2 示意图及网格划分  
Fig. 2 Schematic and mesh

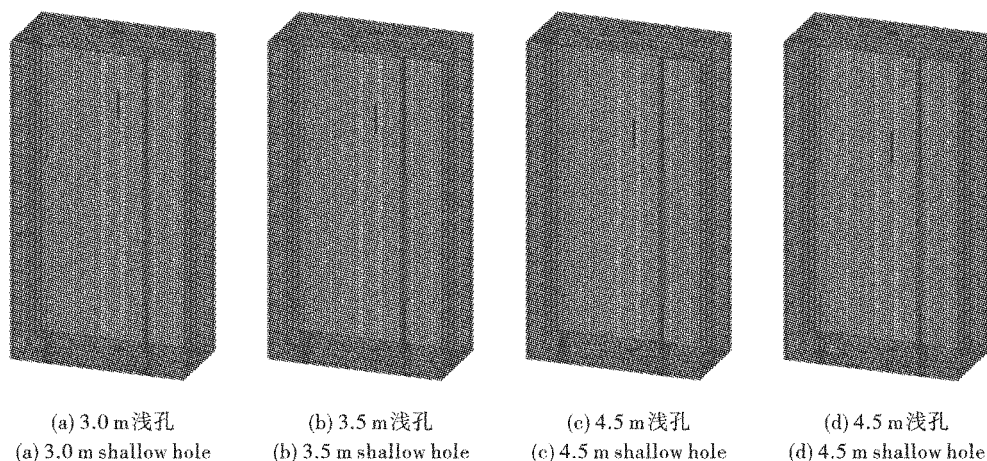


图3 模拟模型

Fig. 3 Simulation model

采用常用的动力塑性材料 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 模拟岩石及堵塞材料岩石爆破模拟,该材料的参数较少且容易获取因此应用十分广泛,在此采用前述的实测现场砂岩岩石力学参数。采用高

能炸药材料 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 以及 JWL 状态方程模拟炸药爆炸,参数为现场所采用的混装乳化炸药生产商提供的密度、爆速测试数据及参考类似参数<sup>[11,12]</sup>。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)									
岩石及堵塞	* MAT_PLASTIC_KINEMATIC									
	<i>RO</i>	<i>E</i>	<i>PR</i>	<i>SIGY</i>	<i>ETAN</i>	<i>BETA</i>	<i>SRC</i>	<i>SRP</i>	<i>FS</i>	<i>VP</i>
	2578	13.88E+9	0.28	55.82E+6	5E+9	0	0	0	0	0
炸药	* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN									
	<i>RO</i>	<i>D</i>	<i>P<sub>CJ</sub></i>							
	1300.0	4000.0	5.5E+9							
	* EOS_JWL									
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R<sub>1</sub></i>	<i>R<sub>2</sub></i>	<i>OMEG</i>	<i>E<sub>0</sub></i>	<i>V<sub>0</sub></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

图4所示为以4 m浅孔条件为例的模拟模型在

不同时点的爆破应力云图。

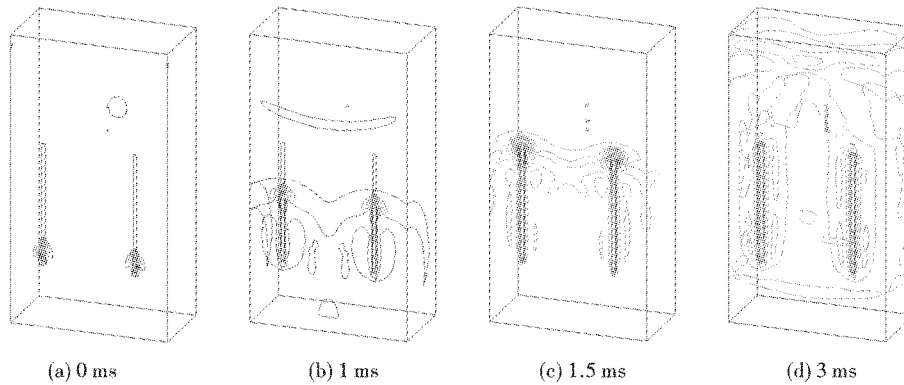


图4 爆破模拟

Fig. 4 Blasting simulation

如图5所示,从地表至4 m深度,在模型上均匀选取8个单元点,对比各个条件下该8个单元点的应力作用,可以反映不同浅孔条件下地表至4 m深度这一深孔孔口作用范围内的爆破作用强度差异,以分析不同浅孔条件的优劣。图6所示为模型选取

的该8个单元点的应力时程曲线(以3.5 m浅孔为例),显示了各个单元点的应力变化过程及峰值。表3所示为各个条件下各单元点的压应力与拉应力峰值,图7与图8分别显示了压应力与拉应力峰值时程曲线图。

表3 选取单元应力(单位:MPa)

Table 3 Stress of selected elements(unit:MPa)

深度/m	应力峰值/MPa									
	无浅孔		3.0 m 浅孔		3.5 m 浅孔		4.0 m 浅孔		4.5 m 浅孔	
	压应力	拉应力	压应力	拉应力	压应力	拉应力	压应力	拉应力	压应力	拉应力
0.5	33.0	30.5	33.9	30.7	33.7	30.7	33.2	31.4	35.2	33.1
1.0	33.3	19.0	34.1	18.9	34.3	19.1	35.3	19.2	34.1	19.2
1.5	30.3	21.5	31.6	21.0	31.6	21.8	31.5	21.0	32.4	22.3
2.0	43.6	18.0	44.2	17.2	45.0	21.1	45.7	25.8	45.4	17.8
2.5	41.6	22.5	42.6	26.1	43.6	23.0	44.1	22.4	43.5	22.4
3.0	46.1	24.4	47.7	24.4	47.9	23.6	47.4	24.3	47.8	25.0
3.5	51.8	21.6	52.9	20.1	52.3	21.1	52.2	22.3	61.0	23.4
4.0	52.3	19.2	53.0	25.2	52.2	20.8	61.3	19.1	54.1	19.9

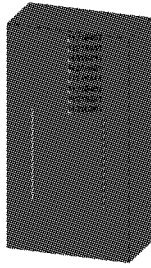


图5 选取单元图

Fig. 5 Selected elements

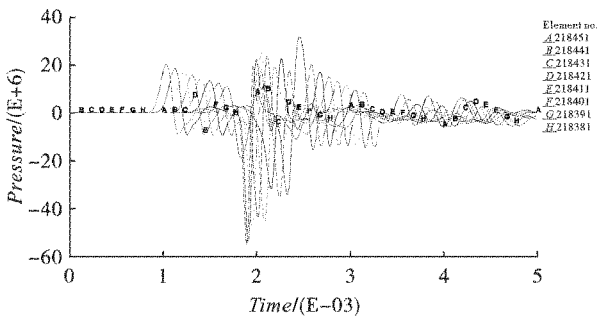


图6 选取单元应力

Fig. 6 Stress of selected elements

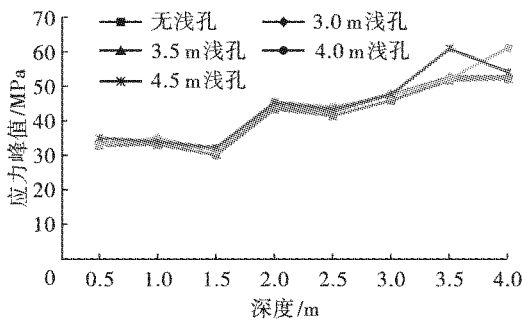


图7 压应力时程曲线图

Fig. 7 Pressure stress time curve diagram

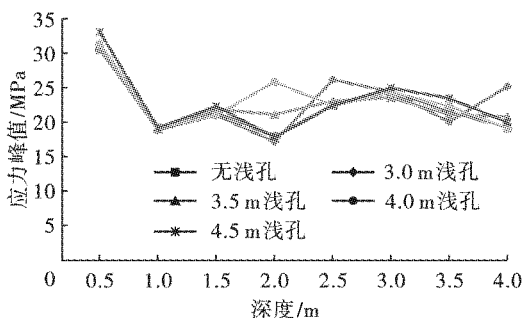


图8 拉应力时程曲线图

Fig. 8 Tensile stress time curve diagram

从模拟分析结果来看,在8.5 m孔深4 m堵塞4 m×3.5 m孔排距参数下,由于别斯库都克矿的砂岩强度较低,在3 m深度以下接近爆破装药的部分,爆破压应力峰值大于砂岩抗压强度,因此可以对岩

体产生有效破坏,3 m以上区域随着压应力的减少则难以依赖压应力作用对岩体产生破坏。5种条件对比额而言,3 m以上区域不同条件的压应力峰值强度基本相同,3 m以下区域,则在4.0 m、4.5 m浅孔两种条件下有所增大有利于破坏作用。总体而言,浅孔对于压应力作用的影响主要集中于装药附近,在浅孔装药附近有利于增强压应力破坏作用。

拉应力作用,在0~1.5 m深度各个条件接近,1.5 m以下,存在显著差异,2 m深度处4 m浅孔的拉应力作用最大,达到26.3 MPa,2.5 m处3 m浅孔的拉应力作用最佳为27.2 MPa。总体上看4 m浅孔条件下的拉应力作用效果最优。

综合压应力与拉应力作用分析结果,宜采用4 m浅孔,在压应力与拉应力作用效果的增强效果最优有利于提高爆破破碎效果。

### 3 爆破参数优化效果

在别斯库都克露天煤矿1216台阶对浅孔改善孔口大块的作用进行了应用。1216台阶的岩体发育,对于爆破效果影响较大易产生大块。1216台阶炮孔参数为:炮孔直径120 mm,坡顶距3.5 m,孔间距离为4.0 m,排间距离为3.5 m,台阶高度为12 m,超深1.0 m,堵塞长度4 m。依据数值模拟效果取90 mm孔径浅孔孔深4 m,同时考虑到模拟中岩体为完整状态,现场受岩体节理裂隙影响爆破作用范围小于模拟,因此在实际应用中略微增大浅孔装药长度为1.5 m。在梅花形布孔的深孔中心布置浅孔,浅孔以25 ms延期时间并入现场的逐孔起爆网路。见图9、图10。

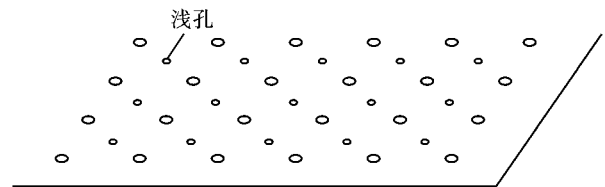


图9 炮孔布置示意图

Fig. 9 Hole arrangement



图10 1216台阶优化后爆破效果

Fig. 10 Blast effect of 1216 bench after optimization

应用4 m浅孔后,总体看爆破成本仅略有提升,现场孔口大块情况有明显的下降,孔口处基本不会产生大块,显著减少了破碎大块工作量,爆堆的铲装运输效率提升3%以上。

## 4 结论

针对别斯库都克露天煤矿岩体裂隙发育,孔口容易产生大块的问题,尝试在深孔中间杂浅孔的方式改善孔口的爆破破碎效果减少大块,开展了如下研究工作:

(1)实地取样测试了岩石性能,为数值模拟提供可靠现场岩石数据。

(2)采用LS-DYNA模拟了五种不同浅孔装药深度条件,比较了孔口不同深度下的压应力与拉应力峰值,根据对比分析结果确定了4 m浅孔可以提高孔口部分的爆破应力波破坏效应。

(3)基于数值模拟分析结果,在别斯库都克露天煤矿1216台阶尝试应用了浅孔减少孔口大块,取得了较好的改善效果。

### 参考文献(References)

- [1] 武仁杰,李海波,于崇,等.基于统计分级判别的爆破块度预测模型[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):141-147.
- [1] WU Ren-jie,LI Hai-bo,YU Chong,et al. Model for blasting fragmentation prediction based on statistical classification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(1):141-147. (in Chinese)
- [2] 张强,许梦国,程爱平,等.程潮铁矿采场生产成本的爆破参数优化[J].爆破,2017,34(1):61-66.
- [2] ZHANG Qiang,XU Meng-guo,CHEN Ai-ping,et al. Optimal blasting parameters based on stope production cost at chengchao iron mine[J]. Blasting,2017,34(1):61-66. (in Chinese)
- [3] 汪旭光.爆破手册[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [4] 王玉杰,梁开水.爆破工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2009.
- [5] 张德明,张志旭,王建华.中深孔和浅孔相结合的爆破技术在永久边坡开挖中的应用[J].爆破,2008,25(1):34-35.
- [5] ZHANG De-ming,ZHANG Zhi-xu,WANG Jian-hua. Application of medium-length and post hole joint blasting technique in slope excavation[J]. Blasting,2008,25(1):34-35. (in Chinese)
- [6] 周俊.联合布孔露天台阶爆破数值模拟研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- [6] ZHOU Jun. Simulation of numerical simulation of combined bore open-air storm blasting[D]. Guiyang: Guizhou University,2019. (in Chinese)
- [7] 李杰,张力,汪帅文,等.结构面对露天矿山台阶爆破大块率的影响研究[J].化工矿物与加工,2019,48(10):19-21.
- [7] LI Jie,ZHANG Li,WANG Shuai-wen,et al. Study on influence of structure surface on block rate of bench blasting in open pit mine[J]. Industrial Minerals & Processing,2019,48(10):19-21. (in Chinese)
- [8] 郭春阳,张力,牛国庭,等.别矿台阶岩与煤同爆技术研究与实践[J].爆破,2020,37(4):73-78.
- [8] GUO Chun-yang,ZHANG Li,NIU Guo-ting,et al. Research and practice on co-blasting of rock and coal in Beskuduk Mine[J]. Blasting,2020,37(4):73-78. (in Chinese)
- [9] 白金泽. LS-DYNA3D理论基础与实例分析[M].北京:科学出版社,2005.
- [10] 尚晓江,苏建宇. ANSYS/LS-DYNA动力分析方法与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [11] 叶海旺,王皓永,雷涛,等.基于孔间延时优化的骨料用石灰岩爆破粉矿率控制[J].爆破,2019,36(4):43-48,68.
- [11] YE Hai-wang,WANG Hao-yong,LEI Tao,et al. Rock fragmentation distribution control of limestone blasting for aggregate based on optimization of delay time between blasting holes[J]. Blasting,2019,36(4):43-48,68. (in Chinese)
- [12] 李梅,王禹函,吴矾,等.不同装药形式对柱状结构爆破效果影响分析[J].爆破,2019,36(2):60-64,104.
- [12] LI Mei,WANG Yu-han,WU Fan,et al. Analysis on influence of different charge formson columnar structure blasting[J]. Blasting,2019,36(2):60-64,104. (in Chinese)