

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.006

露天矿深孔台阶爆破间隔装药爆破试验研究

金鑫¹,高佳明²,苏宏伟¹,陈化南¹,毕京九²

(1. 成远矿业开发股份有限公司,辽阳 111000;2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要: 基于吉朗德露天煤矿现场实际生产研究空气间隔装药爆破技术的应用,明确两点试验意义:一是“降本增效”,二是“控制爆破块度”,采用三组正交试验来对空气间隔爆破技术的应用效果进行评价。运用照片摄影法来识别爆后块度分布,首先参考相关文献优化设计 matlab 程序将块度图像处理为块度分布数据,其次将数据导入 Origin 软件生成块度分布曲线评价爆破效果。试验结果为间隔 17.3% 爆破块度分布接近连续装药爆破,得出结论 1:空气间隔高度并非越低越好,而是存在一个合理间隔高度,即在合理间隔高度爆破后的效果可以达到连续装药爆破的效果,符合企业降本增效的目的。运用块度级配评价方法分析不同装药爆破效果的均匀性,首先将块度分布数据导入 Origin 软件拟合为爆破块度级配曲线,其次参考相关文献总结五个块度评价指标。分析结果为爆破块度均匀性优劣:连续装药 > 间隔 17.3% > 间隔 11.5%,得出结论 2:可以通过中部空气间隔装药技术控制减少装药量使得爆破效果接近传统的连续装药,达到控制爆破块度的目的。

关键词: 露天爆破;空气间隔装药;块度控制

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)02-0042-06

Experimental Study on Interval Charging Blasting of Deep Hole Bench Blasting in Open Pit Mine

JIN Xin¹, GAO Jia-ming², SU Hong-wei¹, CHEN Hua-nan¹, BI Jing-jiu²

(1. Chengyuan Mining Development Co., Ltd., Liaoyang 111000, China;

2. School of Mechanics and Architectural Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the actual production in jilangde open pit coal mine, the application of air interval charging blasting technology was clarified, defining two test significance: one is “reducing cost and increasing efficiency”, the other is “controlling blasting fragmentation”. Three groups of orthogonal tests are used to evaluate the application effect of air interval blasting technology. The photo photography method is used to identify the fragmentation distribution after blasting. Firstly, the matlab program is optimized with reference to relevant literature to process the fragmentation image into fragmentation distribution data. Secondly, the data is imported into Origin software to generate fragmentation distribution curve to evaluate the blasting effect. The test results show that the fragment size distribution of 17.3% interval blasting is close to continuous charging blasting. Conclusions 1: The air interval height has no positive correlation with the final effect. There is a reasonable interval height which is in line with the purpose of reducing cost and increasing efficiency of enterprises. The fragmentation grading evaluation method is used to analyze the uniformity of blasting effects of different charges. Firstly, the fragmentation distribution data is imported into Origin software to fit the blasting fragmentation grading curve. Secondly, five fragmentation evaluation indexes are summa-

收稿日期:2023-01-15

作者简介:金鑫(1985-),男,采矿工程师,从事露天采矿及爆破工作,(E-mail)395985299@qq.com.

ized with reference to relevant literature. The analysis results are the uniformity of blasting block; continuous charge > interval 17.3% > interval 11.5% Conclusion 2: The charging amount can be reduced through the control of central air interval charging technology, so that the blasting effect is close to the traditional continuous charging, which can achieve the purpose of controlling blasting fragmentation.

Key words: open air blasting; air interval charge; block size control

目前,国内外许多学者研究空气间隔装药技术的应用。但由于评价爆破效果的标准不同,其应用效果存在一定的差异。

杨仁树等采用不同装药结构进行爆破试验,分别考虑试样表面裂缝扩展和爆破块度的分布特征评价不同装药结构的爆破效果^[1];李顺波等通过理论和现场试验分析顶部空气间隔对岩石破碎块度的影响^[2];谢烽等应用三种不同孔径的合理间隔长度装药,综合分析间隔装药爆破后大块率和块度级配的影响^[3];常建平等利用数值模拟和现场试验研究6组空气间隔装药模型分析平均有效应力^[4];管伟明等应用间隔装药爆破技术设计互层岩体台阶爆破参数,结合波阻抗原理构建能耗分级体系^[5];邱胜光等运用利文斯顿爆破漏斗理论优化不同间隔装药爆破参数,改善矿山爆破效果^[6];夏治园等建立二维模型进行装药结构优化降低不良地质对台阶爆破作用的影响^[7];朱宽等应用空气间隔堵塞爆破结构改善岩石爆破效果^[8];张晓平等采用中部空气间隔装药模拟分析有效应力,降低爆破后大块率^[9];朱子晗等进行现场爆破试验结合Kuz-Ram爆破块度预测模型分析爆破块度^[10]。

通过在吉朗德露天煤矿进行的三组正交试验来对空气间隔爆破技术的应用效果进行评价,分别从降本增效和控制爆破块度两个角度分析间隔装药和连续装药爆破效果优劣,获得最佳间隔装药参数。

1 现场试验

1.1 工程概况

矿田地质上层主要由厚度6.62~47.44 m的砂土和粉土堆积形成,中下层主要由泥岩、砂岩组成的

淡黄色的岩层。因为矿田整体的由粉砂岩组成,所以在爆破生产作业时产生的震动会导致滑坡问题。由于纸房地区的西南部存在大面积的凹陷,且吉朗德煤矿处于这个位置所以产生了一条东西翘起的向斜。

本次爆破区域周边环境情况:本次爆破区域位于采坑西帮1356南区,周边无其他设备作业,周边无其他固定建筑及设施。试验区如图1所示。



图1 试验区

Fig. 1 Test area

1.2 现场爆破参数

试验区爆破设计如表1所示。试验分3个试验区,一部分为连续装药区,其余两部分为中部间隔装药爆破区(间隔11.5%,间隔17.3%),每区钻20个炮孔,共60孔。选择的台阶高度均为12 m,坡脚无根底,石渣全部清空,孔径为120 mm,梅花形布孔,炮孔深12 m(取实际高度,有超深),堵塞长度为4 m,孔距为8 m,排距为4 m(根据实际平台的岩性来调整),钻孔倾角为90°。

其本次试验空气间隔设置在中部和上部间位置,参考有关学者研究结果,确定上部装药段:下部装药段=2:3,本次试验设计空气间隔层高度分别占炮孔长度的11.5%、17.3%。

表1 试验区爆破设计表

Table 1 Blasting design of test area

| | | | | |
|-------------|----------------|----------|---------------------------------|---------|
| 爆破位置 与规模 | 爆破位置 | 西帮1356南区 | 钻孔米数/m | 795.4 |
| | 底盘标高/m | 1344 | 爆破面积/m ² | 1702.2 |
| | 爆破孔数/个 | 60 | 爆破方量/m ³ | 22565.4 |
| 爆破设计 参数 | 钻孔直径 D /mm | 120 | 钻孔角度/度 | 90 |
| | 台阶高度 H /m | 12 | 孔距 a /m | 8 |
| | 底盘抵抗线 W_q /m | 5.0 | 排距 b /m | 4.5~5 |
| | 超深 h /m | 1.0 | 炸药单耗 q /(kg·m ⁻³) | 0.27 |
| | 边孔距 B /m | 1.5 | 岩石台阶炮孔堵塞长度/m | 4.0 |

表 2 装药参数
Table 2 Charging parameters

| 装药方式 | 孔深/m | 堵塞长度/m | 延米药量/(kg·m ⁻¹) | 单孔药量/kg | 本次爆破总药量/kg |
|----------|------|--------|----------------------------|---------|------------|
| 连续装药 | 13 | 4 | 10 | 90.0 | 1800 |
| 间隔 11.5% | 13 | 4 | 10 | 75.0 | 1500 |
| 间隔 17.3% | 13 | 4 | 10 | 67.5 | 1350 |

装药结构 I :间隔 11.5% 的间隔装药结构,下部装药高度为 4.5 m (装药 45 kg),上部装药高度 3 m,中间间隔 1.5 m。装药参数见表 2,装药结构见图 2。

装药结构 II :间隔 17.3% 的间隔装药结构,下部装药高度为 4.05 m (装药 40.5 kg),上部装药高度 2.7 m,中间间隔 2.25 m。装药参数见表 2,装药结构见图 2。

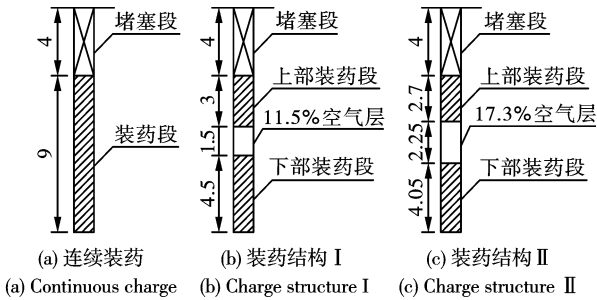


图 2 空气间隔装药结构示意图(单位:m)

Fig. 2 Structural diagram of air interval charge(unit:m)

1.3 现场试验结果

图 3 为现场试验结果。从现场爆后的效果照片来看,可见在平台表面,连续装药区域的粉碎效果最好,空气间隔 17.3% 区破裂效果次之,空气间隔 11.5% 区平台表面破裂效果不如其他两个分区。而从坡面方向来看,连续装药区破碎碎块较为不均匀,小块较小而大块较大,空气间隔区碎块较为均匀,但此处现象仍和平台坡面一样特殊, 17.3% 区要优于

11.5% 区,当然,这是直接观察的结果,具体破碎块度的分布以及破碎块度的均匀性仍需定量的描述与研究。见图 4。

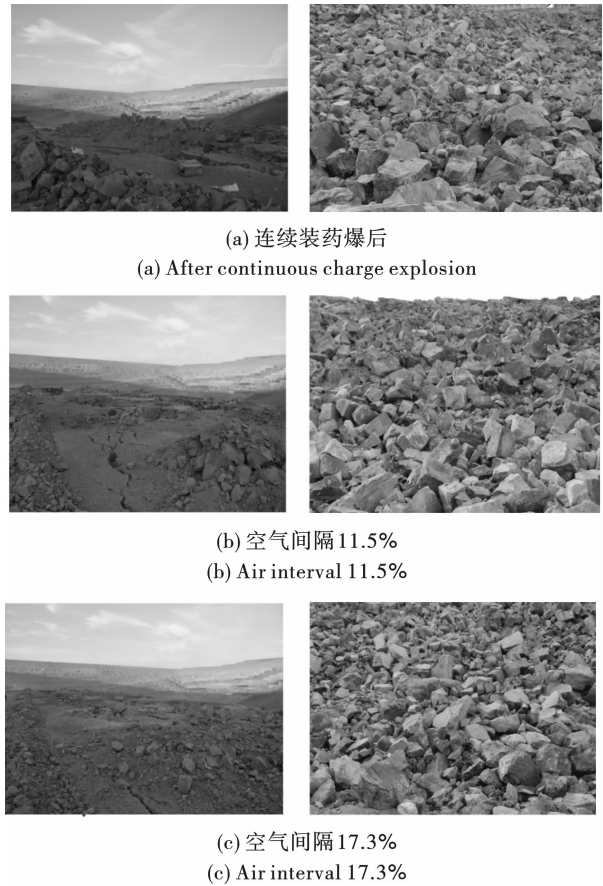


图 3 现场试验结果

Fig. 3 Field test results

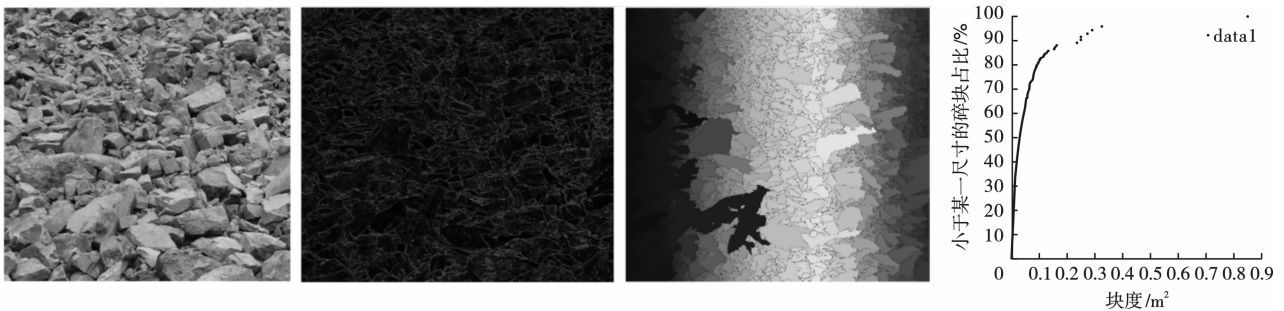


图 4 过程处理图像

Fig. 4 Process image processing

2 “降本增效”侧爆后效果分析

2.1 爆破后的块度分布评价

由于照片是二维图像,因此由 matlab 程序分析所得到的块度分布为平面面积分布^[11,12],为便于分析,将块体等效为立方体,由程序所得块度开平方,以其根为该碎块的特征尺寸,由其特征尺寸所确定的块度分布曲线如图5所示。

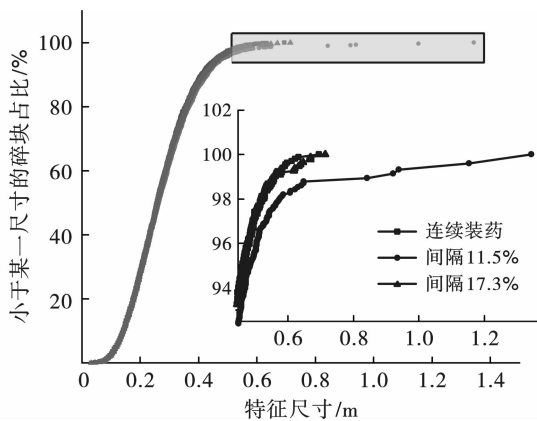


图5 块度分布曲线

Fig. 5 Block size distribution curve

由分布曲线可见,本次爆破试验的大块控制较好,这与试验地质条件有较大的关系,吉朗德煤矿多粉土软岩,爆破效果容易控制。可见在间隔17.3%时,块度分布曲线的碎块控制接近连续装药的爆后效果,而在间隔11.5%时,则出现了大块区域的不良效果,最大块度的特征尺寸甚至达到了1.30 m,本文以吉朗德煤矿常用沃尔沃挖掘机挖斗的最大限制尺寸做为大块率衡量指标,即1.56 m,可见在间隔11.5%时的效果虽然也满足了大块率指标,但相较于间隔17.3%区的爆后效果,仍然算得上差强人意。

试验结果说明了,空气间隔距离并非越低越好,而是存在一优势距离,即在这一优势距离附近时,空气间隔爆破所取得的效果可以达到甚至超过连续装药爆破的效果,本文试验取间隔17.3%时效果就显著接近于这一最优值。当然,对于现场的生产来说,

常常受惯性思维的牵制,认为多装药要强于少装药,取较大间隔距离时爆破效果会具有一定的风险,因此在取值时存在一定保守,但是作为探究,勇敢的尝试和大胆的验证是极有必要的。

2.2 爆破后的经济效益评价

对于空气间隔爆破技术的应用,其在“降本”侧具有较大优势,即降低了炸药用量,但本文试验选择了中部间隔装药技术,在起爆装置的选择上又同时存在一定成本的增加。

以本次试验所取得效果来看,在空气间隔2.25 m时,试验效果接近于连续装药,因此若重复试验能确定这一效果,则以此间隔距离为例,其每孔节约药量22.5 kg,以铵油炸药成品售价6元,则每孔节约资金135元;增加的成本包括雷管30元,成品乳化炸药所做的炮头(此处可忽略),以及间隔器15元(大规模购进可进一步压低价格),则总增加成本在45元,可知单孔省资金约90元。当然这是单次试验所得的结果,假设以极端情况,取最小距离间隔11.5%,则每孔节约资金81元,去掉增加的成本,仍有36元的节余。

在施工方面,虽然重复装药增加了一定的工人工作强度,但保利民爆的工人师傅们具有娴熟且准确的施工技术,在30 min附近即完成了60孔的装药工作,其中包括40孔的间隔装药段。可见在施工方面,如果装药工作足够熟练,这一技术并不存在拖累进度的情况。

由以往研究结果和本次试验结果来看,取极小值并不能保证试验效果,还有可能造成相反的结果,所以间隔距离的选取,是要偏大一些的,因此在“降本”侧的应用是有前景的。

3 “控制爆破块度”侧的块度均匀性评价

为了对“控制爆破块度”侧的块度均匀性进行全面分析评价,参考相关文献[13,14],提出五个评价指标的含义及获取方式如表3所示。

表3 爆破块度评价指标

Table 3 Evaluation index of blasting fragmentation

| 评价指标 | 评价指标含义及获取方式 |
|----------------------------|--|
| 小块破碎尺寸(d_{10}) | 块度分布曲线中通过率为0.10时对应的尺寸;该值越小,爆破碎块的小块尺寸越小。 |
| 平均破碎尺寸(d_{50}) | 块度分布曲线中通过率为0.50时对应的尺寸;该值越小,爆破碎块块体尺寸的平均值越小。 |
| 大块破碎尺寸(d_{90}) | 块度分布曲线中通过率为0.90时对应的尺寸;该值越大,爆破碎块的大块尺寸越大。 |
| 块体不均匀系数(d_{90}/d_{50}) | 块破碎尺寸与平均破碎尺寸的比;该值越大,块度分布均匀性越差。 |
| 最大块度(d_{max}) | 块度分布曲线中通过率为1.00时对应的尺寸;该值越大,爆破碎块的大块尺寸越大。 |

根据拟合的爆破块度级配曲线图6,分别计算得到不同装药爆破下的爆破块度分布评价指标,见表4。

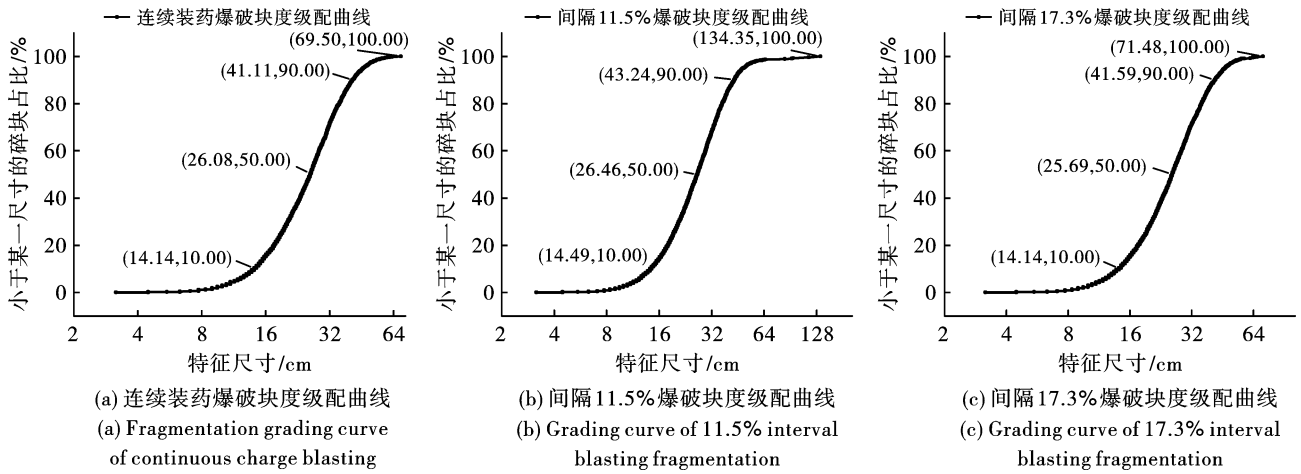


图6 爆破块度级配曲线

Fig. 6 Blasting fragmentation grading curve

表4 爆破块度分布评价指标

Table 4 Evaluation index of blasting fragmentation distribution

| 装药结构 | d_{10}/cm | d_{50}/cm | d_{90}/cm | d_{90}/d_{50} | d_{\max}/cm |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| 连续装药 | 14.14 | 26.08 | 41.11 | 1.58 | 69.50 |
| 间隔 11.5% | 14.49 | 26.46 | 43.24 | 1.63 | 134.35 |
| 间隔 17.3% | 14.14 | 25.69 | 41.59 | 1.62 | 71.48 |

由表4可知:连续装药爆破后的爆破块度评价指标为最优值,其中评价指标 d_{10} 和 d_{90} 最小说明连续爆破后的大块率最低且没有过度粉碎的小块,评价指标 d_{90}/d_{50} 是三个装药结构中最小的,表明对应装药结构爆破块度分布均匀。间隔17.3%爆破的块度评价指标接近连续装药爆破,间隔11.5%爆破的块度评价指标有明显的大块率的特征,其中 d_{\max} 达到1.30 cm显著高于装药的最大块度直径。

综合分析爆破块度级配曲线和块度分布评价指标,可知:间隔17.3%装药爆破的均匀性接近连续装药,说明可以通过中部空气间隔装药技术控制减少装药量使得爆破效果接近传统的连续装药,这样可以达到控制爆破块度的目的好。

4 结论

通过在吉朗德露天煤矿进行的三组正交试验来对空气间隔爆破技术的应用效果进行评价,基于现场生产的两点实际意义评价此次间隔爆破技术应用的效果:

(1)从降本增效角度分析,运用照片摄影法来识别爆后块度分布。试验结果为间隔17.3%爆破

块度分布接近连续装药爆破,而间隔11.5%爆破时则出现了特征尺寸1.30 m的不良大块现象。得出结论:空气间隔高度并非越低越好,而是存在一个合理间隔高度,即在合理间隔高度爆破后的效果可以达到连续装药爆破的效果,符合企业降本增效的目的。

(2)从控制爆破块度角度分析,运用块度级配评价方法分析不同装药爆破效果的均匀性。根据爆破块度集配曲线评价爆破块度均匀性优劣:连续装药>间隔17.3%>间隔11.5%,结果表明间隔17.3%爆破的块度评价指标接近连续装药爆破。得出结论:可以通过中部空气间隔装药技术控制减少装药量使得爆破效果接近传统的连续装药,这样可以达到控制爆破块度的目的。

参考文献 (References)

- [1] 杨仁树,李炜煜,杨国梁,等. 炸药类型对富铁矿爆破效果影响的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(6): 96-107.
- [1] YANG R S, LI W Y, YANG G L, et al. Experimental study on the influence of explosive type on blasting effect

- of rich iron ore[J]. *Explosion and Impact*, 2020, 40(6): 96-107. (in Chinese)
- [2] 李顺波,李泽华,李宏伟,等. 顶部空气间隔装药对岩石爆破块度影响的试验研究[J]. *爆破器材*, 2020, 49(6): 61-64.
- [2] LI S B, LI Z H, LI H W, et al. Experimental study on the influence of top air interval charge on rock blasting fragmentation[J]. *Blasting Equipment*, 2020, 49(6): 61-64. (in Chinese)
- [3] 谢 烽,江雅勤,余德运,等. 钙结砾岩空气间隔装药爆破试验及应用[J]. *爆破*, 2020, 37(4): 63-68.
- [3] XIE F, JIANG Y Q, YU D Y, et al. Blasting test and application of calcium conglomerate air interval charging[J]. *Blasting*, 2020, 37(4): 63-68. (in Chinese)
- [4] 常建平,张鹏飞,段 军,等. 高台阶孔内微差爆破参数的确定与爆破效果分析[J]. *金属矿山*, 2020(12): 81-87.
- [4] CHANG J P, ZHANG P F, DUAN Jun, et al. Determination of millisecond blasting parameters and analysis of blasting effect in high bench hole [J]. *Metal Mine*, 2020(12): 81-87. (in Chinese)
- [5] 管伟明,南森林,齐 琦,等. 互层岩体台阶爆破主控岩层的判别方法[J]. *中国矿业*, 2020, 29(7): 100-105.
- [5] GUAN W M, NAN S L, QI Q, et al. Discrimination method of main control rock stratum of bench blasting in interbedded rock mass[J]. *China Mining*, 2020, 29(7): 100-105. (in Chinese)
- [6] 邱胜光,孙明武. 基于爆破漏斗试验的大直径深孔爆破参数研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(1): 64-69.
- [6] QIU S G, SUN M W. Study on blasting parameters of large diameter deep hole based on blasting funnel test[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(1): 64-69. (in Chinese)
- [7] 夏治园,高朋飞,钱明渊,等. 既有溶洞岩体爆破装药结构优化及数值模拟[J]. *金属矿山*, 2022(2): 42-47.
- [7] XIA Z Y, GAO P F, QIAN M Y, et al. Optimization and numerical simulation of blasting charge structure in existing karst cave rock mass[J]. *Metal Mines*, 2022(2): 42-47. (in Chinese)
- [8] 朱 宽,钟冬望,周桂松. 空气间隔堵塞爆破数值模拟与试验研究[J]. *爆破*, 2022, 39(1): 43-50.
- [8] ZHU K, ZHONG D W, ZHOU G S. Numerical simulation and experimental study on air interval blocking blasting [J]. *Blasting*, 2022, 39(1): 43-50. (in Chinese)
- [9] 张晓平,马建军,刘 令. 露天深孔空气间隔装药爆破的数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(33): 13599-13605.
- [9] ZHANG X P, MA J J, LIU L. Numerical simulation of open-pit deep hole air interval charging blasting[J]. *Science and Technology*, 2020, 20(33): 13599-13605. (in Chinese)
- [10] 朱子晗,尹岳降,陈 明,等. 长九神山灰岩矿开采爆破块度预测研究[J]. *爆破*, 2021, 38(2): 17-23, 31.
- [10] ZHU Z H, YIN Y J, CHEN M, et al. Study on prediction of blasting fragmentation in mining of changjiushenshan limestone mine [J]. *Blasting*, 2021, 38(2): 17-23, 31. (in Chinese)
- [11] 朱仕强,陈星明,杜 军,等. 基于 MATLAB 图像处理的冒落胶结充填体块度测定[J]. *化工矿物与加工*, 2019, 48(6): 32-35, 61.
- [11] ZHU S Q, CHEN X M, DU J, et al. Fragmentation measurement of caving cemented backfill based on MATLAB image processing [J]. *Chemical Minerals and Processing*, 2019, 48(6): 32-35, 61. (in Chinese)
- [12] 吕 林. 图像处理技术在岩体块度分析中的应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [12] LU L. Application of image processing technology in rock mass fragmentation analysis [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 赵安平,冯 春,郭汝坤,等. 节理特性对应力波传播及爆破效果的影响规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(9): 2027-2036.
- [13] ZHAO A P, FENG C, GUO R K, et al. Study on the influence of joint characteristics on stress wave propagation and blasting effect [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(9): 2027-2036. (in Chinese)
- [14] 冷振东,卢文波,范 勇,等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 661-669.
- [14] LENG Z D, LU W B, FAN Y, et al. Explosion energy distribution under lateral initiation and its influence on rock breaking effect [J]. *Explosion and Shock*, 2017, 37(4): 661-669. (in Chinese)