doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.010

基于爆破块度控制的空气间隔装药台阶爆破参数优化*

叶海旺[1a,1b,1c],余梦豪[1a],刘 聪[2],陈家涛[2],周发明[2],王 浩[2],杨保忠[2],雷 涛[1a,1b,1c]

(1.武汉理工大学 a.资源与环境工程学院;b.关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室;c.矿物资源加工与环境湖北省重点实验室,武汉 430070;2.滁州琅琊山矿业工程技术有限公司,滁州 239000)

摘 要: 为解决某灰岩建筑石料矿山爆破后小粒径矿石难以与土分离而导致矿石回收率低下的问题,首先基于现场实测数据和数值模拟结果,构建爆破块度与岩体动力损伤关联模型,确定不同岩块粒径对应的动力损伤阈值;其次选用不同空气间隔装药段数和孔网参数开展三维裂隙岩体台阶爆破数值模拟试验,以提高0.3~0.9 m矿石粒径产率为目的,兼顾控制大块率,获取最佳爆破参数;最后,在数值模拟结果的基础上,开展现场爆破试验,优化装药结构和孔网参数。结果表明:灰岩爆破块度尺寸与动力损伤值之间存在负指数函数关系,爆破块度尺寸0.3 m和0.9 m所对应的岩体动力损伤阈值分别为0.793和0.286;仅采用空气间隔装药结构可提高0.3~0.9 m粒径占比,但大块率增幅较大;采用空气间隔装药结构、适当缩小孔网参数可显著提升0.3~0.9 m粒径占比,同时大块率几乎不变;其中采用二段空气间隔装药结构、适当缩小孔网参数,爆破效果最优。矿山现场应用结果表明,0.3~0.9 m矿石粒径占比提高了20.09个百分点,大块率基本不变,炸药单耗降低10.29%。

关键词: 爆破块度;岩体损伤;空气间隔装药;裂隙岩体;数值模拟

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)04-0084-07

Bench Blasting Parameters Optimization with Air-decked Charge Structure based on Fragmentation Control

YE Hai-wang[1a,1b,1c], *YU Meng-hao*[1a], *LIU Cong*[2], *CHEN Jia-tao*[2], *ZHOU Fa-ming*[2], *WANG Hao*[2], *YANG Bao-zhong*[2], *LEI Tao*[1a,1b,1c]

(1. a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Ministry of Education Key Laboratory of Key Non-metallic Mineral Resources Green Utilization; c. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Chuzhou Langyashan Mining Engineering Technology Co., Ltd., Chuzhou 239000, China)

Abstract: This study presents a comprehensive approach to solve the problem of low ore recovery caused by the difficulty in separating small-particle size ore from soil after blasting in a limestone building stone mine. Firstly, a correlation model between blasting fragmentation and dynamic damage of rock mass was established based on field

收稿日期(Date of reception): 2024-05-21 **网络首发日期(Published online):** 2024-06-20
作者简介: 叶海旺(1971-),男,博士、教授,主要从事采矿、爆破、安全等方面的教学和科研工作,(E-mail)yehaiwang369@hotmail.com。
通讯作者: 雷 涛(1983-),男,博士、讲师,主要从事采矿、安全、数字化矿山等方面的教学和科研工作,(E-mail)leitao539@163.com。
基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1909602);湖北省重点研发计划项目(2021BCA152)
About the author: YE Hai-wang(1971-), male, Ph. D, professor, mainly engaged in mining, blasting, safety and other aspects of teaching and research work, (E-mail) yehaiwang@sina.com.
Corresponding author: LEI Tao(1983-), male Ph. D, lecturer, mainly engaged in mining, safety, numerical mining and other aspects of teaching and research, (E-mail) leitao539@163.com.
Fund Programs: National key research and development plan project(No. 2020YFC1909602); Hubei Province key research and development project(No. 2021BCA152)

measurement data and numerical simulation results, which can determine dynamic damage thresholds corresponding to various rock particle sizes. Secondly, the numerical simulation test of bench blasting in a three-dimensional fractured rock mass was carried out by using different air-decked charging stages and borehole distribution parameters, which can improve the particle size yield of 0.3 ~ 0.9 m and control the bulk ratio to obtain the best blasting parameters. Finally, the field blasting tests were conducted to optimize the charge structure and borehole distribution parameters based on numerical simulation results. The results show a negative exponential function relationship between the blasting block size and the dynamic damage value of the limestone. Specifically, the dynamic damage thresholds corresponding to the blasting size of 0.3 m and 0.9 m are 0.793 and 0.286, respectively. Using only an air-decked charging structure alone can increase the particle size ratio of 0.3 ~ 0.9 m and significantly raise the bulk rate. Conversely, combining an air-decked charging structure with a reduced hole spacing markedly enhances the particle size ratio of 0.3 ~ 0.9 m while maintaining a stable bulk rate. Optimal blasting results are achieved using a two-stage air interval charging structure and a strategic reduction in hole distribution parameters. The field application results show a 20.09 percentage point increase in the 0.3 ~ 0.9 m particle size ratio, with the bulk rate remaining virtually unchanged. Additionally, the unit consumption of explosives decreased by 10.29%.

Key words: blasting fragments; rock damage; air-decked charge; fractured rock mass; numerical simulation

台阶爆破是目前露天建材石料矿山破碎岩石最经济有效的手段,爆破效果的好坏直接影响矿山后续生产效率和经济效益[1]。爆堆块度分布是评价爆破效果的重要指标,合理的爆堆级配有利于提高矿山铲装效率和经济效益。因此,如何保证爆破后矿石块度的合理分布是骨料矿山亟需解决的关键问题之一。

轴向空气间隔装药结构对爆破块度分布有重要影响,一方面降低了爆压峰值,减少了岩石的过度粉碎;另一方面延长了爆压作用时间,使岩石获得更大的爆破冲量,从而提高了能量利用率[2-4]。其中轴向空气间隔装药结构涉及诸多因素,例如空气间隔长度、空气间隔位置、上下段装药比例等。池恩安等研究了小孔径炮孔不同空气间隔位置和间隔比例对岩体破碎效果的影响[5],发现中部空气间隔装药可以改善爆破块度均匀性,且最佳空气层比例为 5% ~ 15%。赵明生等通过数值模拟和现场爆破试验研究了不同空气间隔长度对爆破块度的影响规律[6],认为采用空气间隔装药结构显著地降低粉矿率,且下降比例与间隔长度的增长成正比。林继凯等基于 Starfield 叠加法推导出不同空气间隔位置时孔壁所受冲击压力的计算公式[7],并通过数值模拟和现场试验发现垂直台阶上下段装药长度接近时,矿石块度分布较为均匀。张晓平等研究了不同上下装药比例和不同空气间隔长度对岩石破碎效果的影响[8],认为倾斜台阶上下装药比例为 3∶7、空气间隔占比为 15%时,孔内有效平均压力最高且作用时间长,岩石破碎块度分布更均匀。

上述学者在应用空气间隔装药技术控制岩体爆破块度方面做出了许多有益探索,但其研究均只考虑了一段空气间隔,且为纯空气间隔,同时上述研究结果大多聚焦于描述大块率和粉矿率变化规律,对于中间粒径的变化情况尚不清楚。为此,以某灰岩骨料矿山为对象,以提高 0.3 ~ 0.9 m 矿石粒径占比为目标,首先基于现场实测数据和数值模拟构建岩体块度分布与动力损伤关联数值模型,确定不同岩块尺寸对应的损伤阈值,在此基础上,采用可传爆间隔器空气间隔爆破方法,研究不同空气间隔段数和孔网参数下各粒径占比变化规律,以获取最佳爆破参数来提高 0.3 ~ 0.9 m 矿石粒径占比,同时控制大块率。

1　矿山工程概况

某矿山岩体以寒武系灰岩为主,多为中厚层构造,矿石属坚硬岩、半坚硬岩,最终产品为不同粒级的建筑石料用灰岩矿。生产区域地表覆盖较厚的残坡积土层,矿区已出露岩体多为土夹石,大部分区域表层土含量为 20% 左右。爆破后小粒径的岩块与土混合,而被当作废石进行排放,超过采出矿石量的 20%,直接降低了矿石的回收率。根据矿山生产实际,需尽可能提高爆堆中 0.3 ~ 0.9 m 矿石粒径占比,以达到爆破后土岩分离目的,便于挖掘机采装。现场典型台阶坡面及爆堆如图 1 所示。

(a) 典型台阶坡面
(a) Typical bench slope

(b) 典型爆堆
(b) Typical blast pile

图 1　矿山生产现状
Fig. 1　Mine production status

通过室内试验获取矿石基本物理力学参数,见表 1。矿山爆破采用 2 号岩石乳化炸药连续装药、数码电子雷管逐孔起爆爆破工艺方法。台阶爆破基本参数见表 2。

表 1 矿石基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of ore

密度/(kg·m^{-3})	泊松比	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	内摩擦角/°	粘聚力/MPa
2700	0.25	79.90	11.64	69.5	42	13

表 2 露天台阶爆破参数

Table 2 Open – pit bench blasting parameters

钻孔参数						
钻孔形式	炮孔直径 d/mm	炮孔长度 l/m	超深 l_c/m	堵塞长度 l_d/m	孔距 a/m	排距 b/m
垂直炮孔	115	17.0	2	3.5	7	3.5
台阶参数		装药参数			起爆参数	
台阶高度 H/m	台阶坡面角 α/°	装药形式	单孔装药量 Q/kg	炸药单耗 q/(kg·t^{-1})	孔间延时/ms	排间延时/ms
15.0	70	连续耦合装药	125	0.126	35	95

2 基于现场实测和数值模拟的爆破块度与岩体损伤关联模型

2.1 基于工程实践的数值模型构建

选取一处岩体完整性较好、无明显表层土的待爆台阶作为试验区域,台阶高度 15 m,台阶坡面角 70°。经现场地质调查,该区域主要发育一组节理裂隙,其优势倾向倾角为 *NE*321° ∠69°,平均间距 0.8 m,平均迹长 11 m,试验区域如图 2 所示。

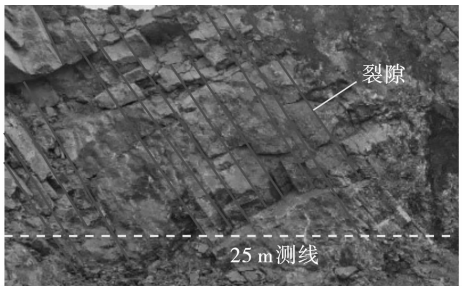

图 2 试验区域台阶坡面

Fig. 2 Bench face of the test area

根据现场台阶和生产爆破参数,采用有限元数值模拟软件 ANSYS/LS-DYNA 建立 5 孔三维均质岩体台阶爆破模型。为了模拟台阶爆破自由面条件,降低边界反射对数值模拟计算结果的影响,在模型周边增加 20 m 厚的岩体作为应力消减层,并将其外侧面设置为无反射边界。

节理裂隙的存在使岩体力学性质表现出各向异性和不连续性,对爆破效果有显著影响[9-11],因此需要在岩体爆破数值模型中构建符合实际分布规律的节理裂隙。通过 MATLAB 编写程序,结合实际节理裂隙分布参数对模型单元数据库进行解析、筛分、重组,得到符合实际节理裂隙分布规律的三维岩体台阶爆破数值模型[12],如图 3 所示。可以发现模型中的计算区域存在一组主要节理裂隙,其优势倾角和倾向与地质调查结果一致。

岩体模型均采用 Lagrange 网格划分,计算区域单元尺寸为 10 cm,外围应力消减层单元尺寸由 10 cm 渐变至 1 m。炸药、堵塞和 ALE 空间均采用 Eulerian 网格划分。岩石和节理裂隙采用 1#材料算法,其余材料均采用 11#材料算法。岩石、炸药和节理 3 种材料模型及状态方程参数见表 3,材料参数设置完毕之后,设置求解参数,进行计算。

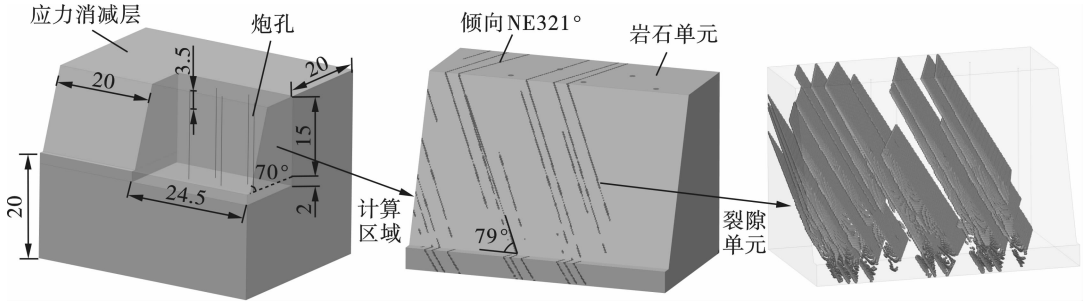

图 3 含裂隙岩体台阶爆破数值模型(单位:m)

Fig. 3 The numerical model of bench blasting with fracture(unit:m)

表 3　材料本构模型及状态方程参数

Table 3　Material constitutive model and state equation parameters

材料	本构模型	参数取值							
岩石	RHT	ρ_0/(kg·m^{-3})	f_c/MPa	G/GPa	f_T^*	f_s^*	β_c	β_t	
		2700	79.90	27.77	0.05	0.02	0.01	0.02	
炸药	MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	ρ_z/(kg·m^{-3})	D/(m·s^{-1})	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_{0e}/GPa
		1060	3900	49.4	1.89	3.9	1.11	0.33	2.84
节理裂隙	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	ρ_j/(kg·m^{-3})	E_0/GPa	μ	σ/GPa	β	$E_{\tan}$/MPa		
		1800	28	0.241	0.25	0.5	0.025		

注:ρ_0 为材料密度;f_c 和 G 分别为材料单轴抗压强度和弹性剪切模量;f_T^* 和 f_s^* 分别为相对抗拉强度和相对抗剪强度;β_c 和 β_t 分别为压缩和拉伸应变率指数;RHT 材料模型的其它参数设置参考了相关成果中的试验修正值[13-15];ρ_z 为炸药密度;D 为炸药爆速;A、B、R_1、R_2 均为材料特征参数;ω 为爆炸常数;E_{0e} 为炸药单位体积内能;ρ_j 为材料密度;E_0 为弹性模量;μ 为泊松比;σ 为屈服强度;β 为硬化参数;$E_{\tan}$ 为切线模量。

2.2　爆破块度与岩体动力损伤关联模型

根据岩体损伤破坏理论,损伤变量 D 越大,岩石破碎越彻底,块度尺寸越小[16]。台阶爆破数值模型损伤分布如图 4 所示。根据现场爆破试验发现爆破轮廓基本沿着最后一排炮孔扩展,因此以最后一排和最左侧炮孔轴线向外 0.2 m、台阶底面以上为爆破区域(见图 4),统计该区域不同损伤区间单元体积占比,结果见表 4 所示。同时采用 Split-Desktop 软件对现场试验区域爆破后的爆堆块度(见图 5)进行统计,结果见表 5 所示。

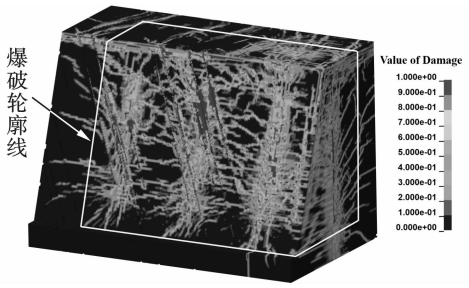

图 4　台阶爆破损伤云图

Fig. 4　Damage cloud map of bench blasting

表 4　数值模型爆破区域不同损伤区间单元体积占比

Table 4　The unit volume proportion of different damage intervals in the blasting area of numerical model

损伤区间	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5
体积占比/%	24.66	16.77	12.29	13.16	10.70
损伤区间	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
体积占比/%	8.28	6.40	4.35	2.14	1.25

图 5　现场试验区域爆堆

Fig. 5　The blast pile in the field test area

绘制数值模型损伤单元体积占比累计变化散点图和现场爆破块度分布累计折线图,如图 6 所示。可以发现,二者整体变化趋势基本一致,当块度尺寸较小(0~0.1 m)时,二者误差相对较大,这主要是由于现场统计方法基于图像识别技术,当岩块尺寸较小时,受识别精度影响较大。

对数值模型损伤单元体积占比累计变化散点图进行拟合,得到公式(1)

$$F(D) = 114.05(1 - e^{\frac{D-1}{0.44}}),0 < D < 1 \quad (1)$$

式中:D 为数值模型中单元损伤值;$F(D)$ 为损伤值大于 D 的数值模型单元体积与总单元体积比例,%。拟合精度 R^2 为 0.99。上式即为基于现场实测和数值模拟的爆破块度与岩体损伤关联模型。将现场爆破块度 0~0.3 m 和 0~0.9 m 的占比 42.73% 和 91.56% 代入式(1),得到对应的损伤变量 D 分别为 0.793 和 0.286。因此在 ANSYS 数值模拟试验中,可分别采用损伤区间 0.793~1、0.286~0.793 和 0~0.286 的单元体积占比表示粒径 0~

0.3 m、0.3 ~0.9 m 和 0.9 m 以上的块度分布情况。

表 5 现场试验区域爆堆不同粒径区间岩块体积占比

Table 5 The rock fragments volume proportion of different particle intervals in the blast pile of the field test area

粒径/m	0 ~0.1	0.1 ~0.2	0.2 ~0.3	0.3 ~0.4	0.4 ~0.5	0.5 ~0.6
占比/%	24.88	7.5	10.35	13.38	11.71	9.00
粒径/m	0.6 ~0.7	0.7 ~0.8	0.8 ~0.9	0.9 ~1.0	1.0 ~1.3	
占比/%	6.09	4.98	3.67	3.45	4.99	

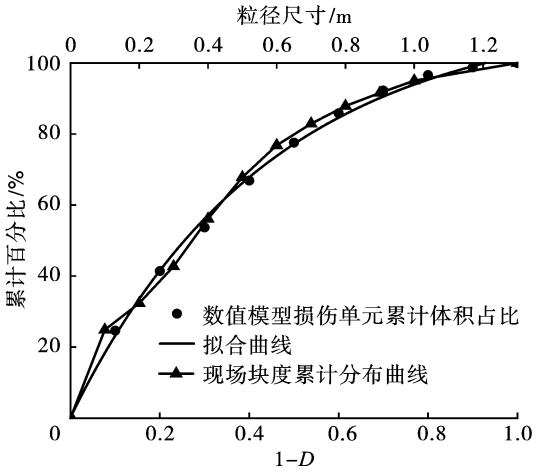

图 6 现场块度分布与数值模拟损伤体积累计曲线对比

Fig. 6 Cumulative curves comparison of on-site fragment distribution and numerical simulation damage volume

3 不同空气间隔装药结构的台阶爆破数值模拟

3.1 数值模拟方案

为研究空气间隔装药结构对台阶爆破块度分布的影响,设计如表 6 所示的 5 种数值模拟方案。按照 2.1 节所述步骤分别建立单排 3 孔三维裂隙岩体台阶爆破数值模型,其中每段空气间隔长度为 1 m,且同一炮孔内每段药包同时起爆。岩石、炸药、节理、堵塞的材料参数和本构方程与 2.1 节一致,空气采用 * MAT_NULL 材料本构模型和 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程对其能量传播、衰减规律进行描述[17]。其材料及状态方程参数见表 7。

表 6 数值模拟试验方案

Table 6 The numerical simulation test scheme

方案编号	装药结构	孔网参数/m	装药长度/m		
			下部	中部	上部
1	连续装药	7.0 ×3.5		13.5	
2	一段空气间隔	7.0 ×3.5	8.0	–	4.5
3	一段空气间隔	6.5 ×3.5	8.0	–	4.5
4	二段空气间隔	7.0 ×3.5	6.5	3.0	2.0
5	二段空气间隔	6.5 ×3.5	6.5	3.0	2.0

注:其余爆破参数与表 2 一致。

表 7 空气材料及状态方程参数

Table 7 Air material and state equation parameters

ρ_k/(kg · m^{-3})	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_{0a}	V_0
1.2	0	0	0	0	0.4	0.4	0	253 300	1

注:ρ_k 为材料密度,C_0 ~ C_6 分别为材料常数,E_{0a} 为单位体积空气介质的初始内能,V_0 为初始相对体积。

3.2 计算结果分析

不同试验方案的爆破数值模型损伤分布如图 7 所示。在 LS-Prepost 后处理中分别对爆破区域损伤区间 0.793 ~1、0.286 ~0.793 和 0 ~0.286 的单元体积进行统计,结果见表 8,并绘制不同工况下爆破后各粒径体积占比柱状图,如图 8 所示。

分析图 8 可知,与连续装药爆破相比,采用一段空气间隔装药结构时,孔网参数为 7 m ×3.5 m 工况下,0.3 ~0.9 m 矿石粒径占比增加 5 个百分点,但大块率显著提升,由 5% 增加到 11%;孔网参数为

6.5 m×3.5 m 工况下,0.3 ~0.9 m 矿石粒径占比增加 11 个百分点,大块率降低 1 个百分点。采用二段空气间隔装药结构时,孔网参数为 7 m×3.5 m 工况下,0.3 ~0.9 m 矿石粒径占比增加 5 个百分点,但大块率增加 14 个百分点,增幅较大;孔网参数为 6.5 m×3.5 m 工况下,0.3 ~0.9 m 矿石粒径占比增加 21 个百分点,大块率增加 1 个百分点。说明仅采用空气间隔装药结构可提升 0.3 ~0.9 m 矿石粒径占比,但大块率增幅较大;采用空气间隔装药结构、适当缩小孔网参数可显著提升 0.3 ~0.9 m 粒径占比,同时大块率几乎不变。

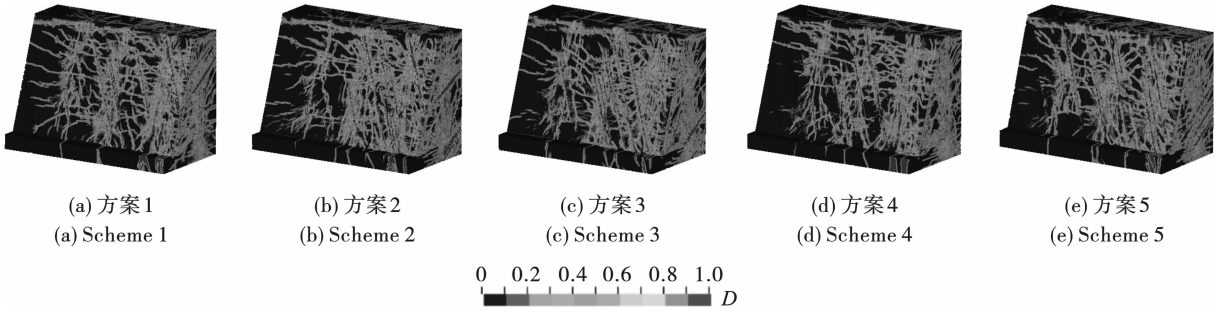

图 7　不同方案的爆破数值模型损伤云图

Fig. 7　Damage cloud map of blasting numerical model with different schemes

表 8　不同方案的爆破数值模型损伤单元体积统计表

Table 8　Damage unit volume statistics of blasting numerical models with different schemes

编号	装药结构	块度尺寸 损伤区间	0 ~0.3 m 0.793 < D < 1		0.3 ~0.9 m 0.286 < D < 0.793		0.9 m 以上 0 < D < 0.286	
		爆破总体积/m^3	体积/m^3	占比/%	体积/m^3	占比/%	体积/m^3	占比/%
1	连续装药 -7×3.5m	1238.2	663.6	53.59	515.4	41.62	59.2	4.79
2	一段空气间隔 -7×3.5m	1234.2	509.1	41.25	583.5	47.28	141.6	11.47
3	一段空气间隔 -6.5×3.5m	1086.0	473.1	43.56	570.9	52.57	42.0	3.87
4	二段空气间隔 -7×3.5m	1240.1	423.2	34.13	586.6	47.30	230.3	18.57
5	二段空气间隔 -6.5×3.5m	1051.6	326.5	31.05	662.2	62.97	62.9	5.98

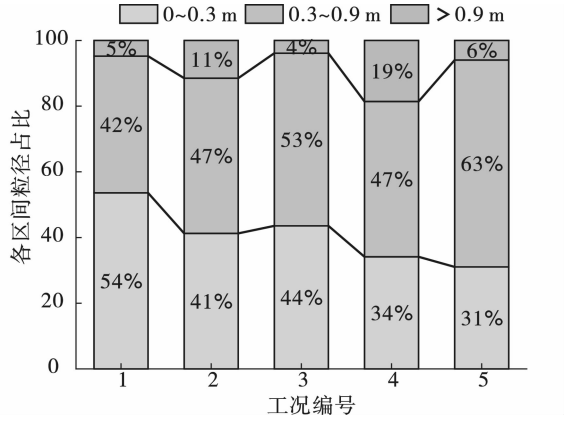

图 8　不同方案爆破后各区间粒径体积占比

Fig. 8　The volume proportion of each particle size after blasting with different schemes

由此可见,采用二段空气间隔装药结构、孔网参数为 6.5 m×3.5 m 时爆破效果最优,大块率为 6%。

4　矿山现场爆破试验

基于数值模拟结果,将矿山爆破生产原使用的连续装药结构、孔网参数 7 m×3.5 m 调整为二段空气间隔装药结构、孔网参数 6.5 m×3.5 m,其中空气间隔段采用 H 1 m×ϕ 35 mm 的可传爆间隔器,炮孔深度 17 m,装药段长度底部 6.5 m、中部 3 m、上部 2 m。本次试验在同一台阶开展,分为 1#试验组和 2#对照组,现场试验台阶边坡及装药结构如图 9 所示。

试验组与对照组典型的爆堆块度分布如图 10 所示,分别在爆堆表面和内部选取多个区域,利用 Split-Desktop 块度分析软件进行统计,结果见表 10。

根据表 9 可以发现,相较于矿山原装药结构和孔网参数,采用二段空气间隔装药结构、孔网参数 6.5 m×3.5 m 后,0 ~0.3 m 粒径占比降低了 22.08 个百分点,0.3 ~0.9 m 粒径占比提高了 20.09 个百分点,大块率提高了 1.99 个百分点,同时炸药单耗降低了 10.29%。优化后的爆堆整体块度分布更均匀,矿石级配更合理,炸药单耗有所降低,有利于提高矿山爆后铲装效率和经济效益。

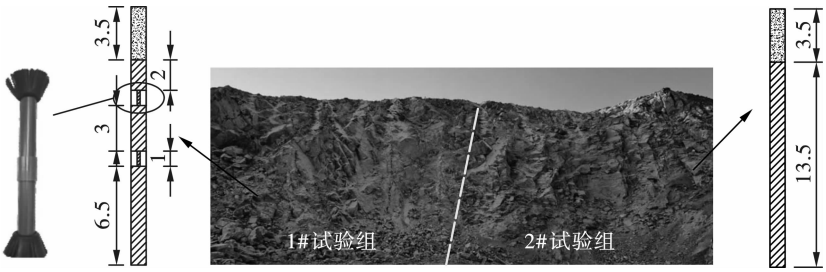

图 9 现场试验台阶边坡及装药结构(单位:m)

Fig. 9 Bench slope and charge structure of field test(unit:m)

表 9 现场爆破试验爆堆块度统计

Table 9 Fragmentation statistics of on-site blasting test

试验编号	工况	炸药单耗 q/(kg·m^{-3})	各粒径占比/%		
			0~0.3 m	0.3~0.9 m	>0.9 m
1#试验组	二段空气间隔装药-6.5×3.5 m	0.305	30.16	60.76	9.08
2#对照组	连续装药-7×3.5 m	0.340	52.24	40.67	7.09

(a) 1#试验组 (b) 2#对照组

(a) 1# experimental group (b) 2# control group

图 10 优化前后爆破效果对比

Fig. 10 Blasting effect comparison before and after optimization

5 结论

(1)基于现场实测数据和 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟构建了灰岩爆破块度尺寸与动力损伤关联模型,二者之间存在负指数函数关系,爆破块度尺寸 0.3 m 和 0.9 m 所对应的损伤阈值分别为 0.793 和 0.286。

(2)数值模拟结果表明,当仅采用空气间隔装药结构时可提高 0.3~0.9 m 粒径占比,但大块率增幅较大;当采用空气间隔装药结构、适当缩小孔网参数时,显著提升 0.3~0.9 m 粒径占比,同时大块率基本不变,其中采用二段空气间隔装药结构时0.3~0.9 m 粒径占比提升幅度最大。

(3)将矿山爆破参数由连续装药、孔网参数 7 m×3.5 m 调整为二段空气间隔装药、孔网参数 6.5 m×3.5 m 后,0.3~0.9 m 粒径占比提高了 20.09 个百分点,大块率基本不变,炸药单耗降低 10.29%。

参考文献(References)

[1] ZHANG Zong-xian. Chapter 22-effect of blasting on engineering economy[M]. Elsevier Inc,2016.

[2] 康永全,薛 里,孙崔源,等. 间隔不耦合装药结构形式及特点分析[J]. 工程爆破,2020,26(5):62-67.

[2] KANG Yong-quan, XUE Li, SUN Cui-yuan, et al. Structural form and characteristic analysis of charge structure with deck decoupling[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5):62-67. (in Chinese)

[3] 朱红兵,卢文波,吴 亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. 岩土力学,2007(5):986-990.

[3] ZHU Hong-bing, LU Wen-bo, WU Liang. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(5):986-990. (in Chinese)

[4] 涂书芳,冷振东. 空气间隔装药爆破损伤特性数值模拟研究[J]. 水电与新能源,2018,32(2):16-20,44.

[4] TU Shu-fang, LENG Zhen-dong. Numerical simulation study on damage characteristics of the air-decked charge blasting[J]. Hydro Power and Newenergy, 2018, 32(2): 16-20, 44. (in Chinese)

[5] 周后友,池恩安,张修玉,等. ϕ 42 mm 炮孔空气间隔装药爆破对岩体破碎效果的影响研究[J]. 爆破,2018,35(4):63-68.

[5] ZHOU Hou-you, CHI En-an, ZHANG Xiu-yu, et al. Influence of air-decking charge blasting with ϕ 42 mm blasthole on rock fragmentation[J]. Blasting, 2018, 35(4): 63-68. (in Chinese)

(下转第 100 页)