

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.006

基于小直径装药技术骨料矿山爆破 粉矿率控制研究*

叶海旺^{1,2,3}, 李亚伟¹, 路东⁴, 于燕⁵, 张智谋⁵, 余梦豪¹, 雷涛^{1,2,3}, 王其洲^{1,2,3}, 李宁^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070;

2. 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室, 武汉 430070;

3. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 武汉 430070; 4. 武汉市公安局治安管理局, 武汉 430077;

5. 华新水泥股份有限公司, 黄石 435000)

摘要: 某骨料矿山石灰岩区域由于节理裂隙较发育且长期采用连续耦合装药结构导致爆破后粉矿率高, 为降低该区域爆破粉矿率, 优化爆破块度, 基于不耦合装药爆破作用机理, 提出小直径装药技术。首先在 ANSYS/LS-DYNA 软件中构建基于现场实测的爆破块度与节理岩体损伤关联模型; 之后开展数值模拟试验, 通过对比小直径装药结构与传统不耦合装药结构的爆破效果来验证小直径装药技术可行性; 再次通过模拟试验探究小直径装药段长度与爆破粉矿率的关系, 进一步优化小直径装药技术; 最后在模拟试验结果基础上进行现场爆破试验, 探究优化后小直径装药技术的爆破效果。由数值模拟结果可知, 小直径装药技术具有更好的爆破块度控制效果, 采用两段 2.0 m 小直径药包装药结构粉矿率最低; 现场试验结果表明, 相比于连续耦合装药爆破, 采用含有两段 2.0 m 小直径药包的装药结构爆破, 爆破粉矿率降低了 6.53 个百分点, 且大块率基本不变。为同类型骨料矿山爆破提供了有益的参考。

关键词: 骨料矿山; 爆破粉矿率; 小直径装药; 爆破数值模拟; 岩体损伤

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2026)02-0058-13

Study on Control of Fines Generation in Aggregate Quarry Blasting based on Small-diameter Charge Technology

YE Hai-wang^{1,2,3}, LI Ya-wei¹, LU Dong⁴, YU Yan⁵, ZHANG Zhi-mou⁵,

YU Meng-hao¹, LEI Tao^{1,2,3}, WANG Qi-zhou^{1,2,3}, LI Ning^{1,2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Key Non-metallic Mineral Resources Green Utilization, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, China; 4. Security Administration of Wuhan Public Security Bureau, Wuhan 430077, China; 5. Huaxin Cement Co., Ltd., Huangshi 435000, China)

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-10

网络首发日期 (Published online): 2025-12-19

作者简介: 叶海旺 (1971-), 男, 安徽省安庆市, 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。

通信作者: 李亚伟 (2001-), 男, 宁夏回族自治区固原市, 硕士研究生, 主要从事采矿、爆破等方面的科研工作, (E-mail) 2953587610@qq.com。

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项 (2025ZD1010901、2024ZD1003802)

About the author: YE Hai-wang (1971-), male, born in Anqing city, Anhui province, Ph. D, professor, mainly engaged in teaching and scientific research in the fields of mining, blasting and safety, (E-mail) yehaiwang369@hotmail.com.

Corresponding author: LI Ya-wei (2001-), male, born in Guyuan city, Ningxia province, postgraduate student, mainly engaged in scientific research in mining and blasting, (E-mail) 2953587610@qq.com.

Fund Programs: Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration - National Science and Technology Major Project of China (Grant No. 2025ZD1010901, 2024ZD1003802)

Abstract: In a limestone aggregate quarry, excessive fines generation following blasting was primarily caused by extensively developed joint fractures and prolonged implementation of continuous coupled charging configurations. To minimize the generation of blasting fines and improve rock fragmentation, a small-diameter charge technology was developed based on the principles of decoupled charge blasting. Firstly, a fragmentation-damage correlation model for blast-induced fractured rock mass was developed in ANSYS/LS-DYNA based on field-collected measurement data. Secondly, numerical simulations were conducted to evaluate the blasting performance of the small-diameter charge structure relative to traditional decoupled charge methods, thereby confirming the technical viability of the proposed small-diameter charging approach. Thirdly, numerical simulations were conducted to determine the correlation between segmented small-diameter charge lengths and fines generation rates, thereby enabling technical optimization. Finally, field verification tests were conducted in accordance with simulation findings to assess the performance of the refined small-diameter charging method. Numerical simulations demonstrate that the small-diameter charging technique provides superior control over rock fragmentation, with the optimal dust reduction achieved using a dual-segment 2.0 m small-diameter charge configuration. Field tests demonstrate that employing a dual-segment 2.0 m small-diameter charge configuration reduces blasting fines generation by 6.53 percentage points compared to conventional continuous coupled charging, while maintaining comparable boulder yield, offering practical guidance for similar aggregate quarry operations.

Key words: aggregate quarry; fines generation rate; small diameter charge; blasting simulation; rock damage

我国对于骨料矿的大规模开采最早可以追溯到上世纪90年代^[1],早期,多数矿山企业只将大块率作为评判爆破效果的唯一标准,且在爆破时多选择连续装药结构。较大的炸药单耗导致爆破后粉矿率高,会给矿山企业带来直接经济损失,因此如何有效地降低爆破后粉矿(≤ 4.75 mm)含量,使爆破后岩石块度保持在合理的范围也成为亟需解决的问题。

目前,很多专家学者和科研工作者针对不耦合装药结构对爆破粉矿率的影响也开展了大量研究。理论研究方面,戴俊基于强度准则^[2],通过推导粉碎圈和裂隙圈半径在三向应力作用下的数学表达式,得出粉碎圈半径与不耦合系数呈负相关关系。楼晓明等则进一步考虑节理裂隙对爆破粉矿率的影响^[3],通过将裂隙岩体初始损伤因子 D_0 引入粉碎圈半径与不耦合系数的关系表达式,证明初始损伤因子和不耦合系数都会对粉碎圈大小造成影响。除了空气作为间隔介质外,宗琦等还构建了以水为间隔介质时的粉碎圈半径表达式^[4],并以此指导现场爆破参数设计,实现了爆破粉矿率和大块率的有效控制。数值模拟和现场试验方面,王皓永等通过ANSYS/LS-DYNA软件开展数值模拟实验^[5],得出当空气间隔长度为1.5 m时骨料灰岩矿爆破粉矿率能得到有效控制。罗志华等以地下铅锌矿为背景^[6],基于ANSYS/LS-DYNA数值模拟实验,总结得出爆破粉矿率随径向不耦合系数的增大而减小。尹岳降等从石灰岩的破碎特性出发^[7],分析了灰岩矿山粉矿率高的原因并提出采用空气间隔、混装乳化炸药的方法降低爆破粉矿率,后通过现场实验证明

1.0 m的空气间隔可以有效降低灰岩矿爆破粉矿率。杨跃宗等通过在LS-DYNA构建二维数值模型^[8],对比分析当径向不耦合系数和轴向不耦合系数都为2时的损伤分布情况,发现采用径向不耦合装药方式时药包爆炸后产生的粉碎区明显小于轴向不耦合装药方式,因此采用径向不耦合装药方式可以有效降低爆破粉矿率。

现有研究针对不耦合装药结构对爆破粉矿率的影响这一问题做出了大量有益探索。基于此,提出一种小直径装药技术,以某骨料矿山爆破为背景,通过现场调查、数值模拟、现场试验等技术方法,开展关于小直径装药爆破技术控制爆破粉矿率的研究,以期降低骨料矿山爆破粉矿率。

1 研究背景

1.1 矿区工程概况

某灰岩骨料矿山年产7000万t,产出矿石主要包括水泥用灰岩和建筑用白云岩,由于矿区面积较大,因此选择+160平台石灰岩区域作为主要研究对象。经过地质调查发现:该区域内存在一组主要节理裂隙,裂隙倾角为 $20^\circ \sim 40^\circ$,裂隙主要倾向为 $NE320^\circ \sim NE350^\circ$,区域内矿体呈层状分布,裂隙层间距为 $0.32 \sim 0.62$ m,平均迹长为15.6 m。区域内矿体节理裂隙发育,且由于矿山爆破长期采用连续装药结构,导致爆破后矿石粉矿含量较高。在前期调查中,利用块度分析软件识别爆堆块度,再通过人工筛分法筛分爆堆表面及内部矿石,统计得到该区域爆破粉矿率最高可达到10.21%,平均粉矿率为

7.85%。现场典型台阶坡面及爆堆如图 1 所示,现场爆破参数如表 1 所示。

1.2 岩石物理参数

根据 ISRM 岩石力学测试推荐试验方法^[9],将矿岩原样加工成直径 $\phi 50 \text{ mm} \times$ 高度 $H 100 \text{ mm}$ 的标准试样,如图 2(a)所示。采用 TAW-2000 岩石三轴压力试验机开展岩石单轴抗压试验,如图 2(b)所示。选取 5 个试样为一组按照试验流程规范对岩样进行加载直至破坏,获取的单轴抗压强度及弹性模量等岩石物理参数见表 2。

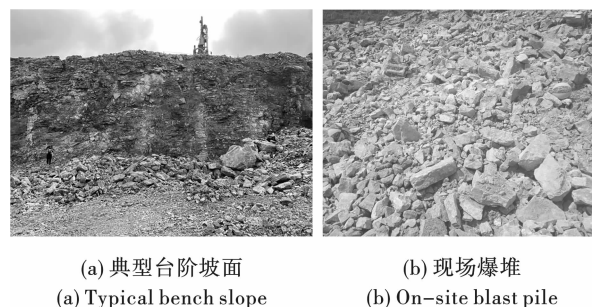


图 1 现场图片

Fig. 1 On-site photos

表 1 矿山生产爆破参数

Table 1 Mining production blasting parameters

项目 Projects	参数 Parameters	项目 Projects	参数 Parameters	项目 Projects	参数 Parameters
台阶高度 Bench height/m	15	排距 Row spacing/m	4.5	装药长度 Charge length/m	9.2
孔径 Hole diameter/mm	150	孔距 Hole spacing/m	5.5	填塞长度 Stemming length/m	7.3
孔深 Hole depth/m	16.5	单孔装药量 Charge weight per hole/kg	125	孔间延时 Inter-hole delay/ms	17
超深 Subdrilling/m	1.5	炸药单耗 Powder factor/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.125	排间延时 Inter-row delay/ms	42

表 2 岩石物理力学参数

Table 2 Rock physical mechanical parameters

密度 Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 Poisson's ratio	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength/MPa	抗拉强度 Tensile strength/MPa	弹性模量 Elastic modulus/GPa	内摩擦角 Internal friction angle/ $^{\circ}$	粘聚力 Cohesion/MPa
2700	0.15	116.59	14.33	33.08	50.03	22.46

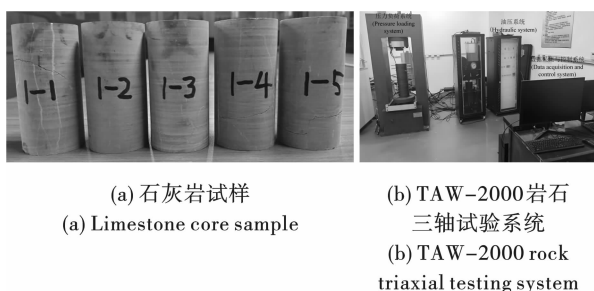


图 2 室内岩石力学试验

Fig. 2 Laboratory rock mechanics testing

1.3 小直径装药技术

径向不耦合装药结构和轴向不耦合装药结构是矿山实际生产中两种常见的用于爆破粉矿控制的装药方式,两种不耦合装药结构在破岩机理上也存在些许差异,径向不耦合装药主要通过爆炸应力波在

不耦合介质和孔壁交界面处的入射、透射、反射来达到破岩效果^[10-12],轴向不耦合装药更侧重于通过爆炸应力波在炮孔内的反射叠加实现破岩^[13-16]。但轴向不耦合装药结构爆破破岩效果过于依赖空气间隔的位置,并且当空气间隔较长时会引起间隔处应力波叠加不足从而影响破岩效果;径向不耦合装药结构主要用于预裂爆破和光面爆破,近年来也开始用于骨料矿山爆破破岩,破岩效果主要取决于径向不耦合系数,当径向不耦合系数较大时,一方面会因管道效应而引起拒爆,另一方面会因孔壁峰值压力过低而导致爆破大块的产生,而且在实际应用中很难保证径向不耦合药包位于炮孔中心位置,从而影响爆破粉矿率控制效果。

基于不耦合装药结构爆破作用机理,提出一种小直径装药技术,通过在轴向不耦合装药结构的空

气间隔段加入不小于炸药临界直径的小直径可传爆柱状药包,并确保药包位于炮孔中心位置,实现有效降低孔壁峰值压力并均匀作用于孔壁,从而降低岩体过度破坏而产生粉矿。该装药结构一是可以确保炸药能稳定传递爆轰;二是可以降低炸药爆炸所产生的孔壁峰值压力,三是可以减少因空气间隔装药而导致的雷管用量增加而带来的经济成本压力。

2 基于爆破块度与岩体损伤关联的节理岩体数值模型

2.1 三维节理岩体台阶爆破模型构建

在 +160 平台石灰岩区域选择一处未进行开采的台阶作为试验区域,通过现场测量调查得到:试验区域台阶高度为 15 m,台阶坡面角 75°,区域内存在一组主要节理裂隙,其优势倾向倾向角为 NE320°∠25°,平均层间距为 0.6 m,平均迹长 15.3 m。节理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^[17-19]。因此采用文献[20]的建模方法,建立三维岩体台阶爆破数值模型,如图 3 所示。

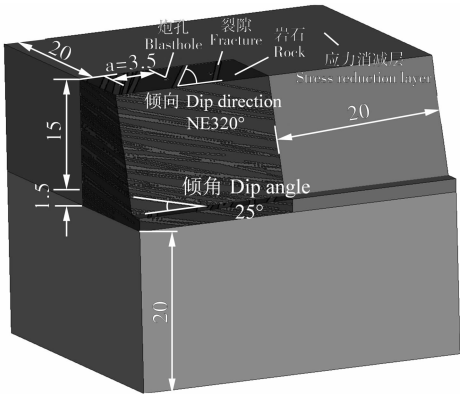


图 3 三维岩体台阶爆破模型
Fig. 3 3D rock mass bench blasting model

岩石、节理裂隙、炸药、堵塞、空气间隔五种材料本构模型以及对应模型的基本参数取值见表 3 至表 7。

表 3 岩石材料模型及参数选取

Table 3 Constitutive models and parameter selection for rock material

材料模型 Constitutive models		参数取值 Parameter selection					
<i>RHT</i>	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	f_c/MPa	G_1/GPa	f_t^*/GPa	f_s^*/GPa	β_c	β_t
	2700	96.13	12.24	0.10	0.18	0.01	0.0136

注: ρ_0 为材料密度; f_c 为单轴抗压强度; G_1 为剪切模量; f_t^* 为拉压强度比; f_s^* 为剪压强度比; β_c 为压缩应变率指数; β_t 为拉伸应变率指数。

Note: ρ_0 is material density; f_c is uniaxial compressive strength; G_1 is shear modulus; f_t^* is tension-compression strength ratio; f_s^* is shear-compression strength ratio; β_c is compressive strain rate exponent; β_t is tensile strain rate exponent.

表 4 节理裂隙材料模型及参数选取

Table 4 Constitutive models and parameter selection for fracture material

材料模型 Constitutive models		参数取值 Parameter selection				
* MAT_PLASTIC_KINEMATIC	$\rho_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	σ/GPa	$E_{\text{tan}}/\text{MPa}$	β
	1800	28	0.241	0.25	0.025	0.50

注: ρ_1 为材料密度; E 为杨氏模量; μ 为泊松比; σ 为屈服应力; E_{tan} 为切线模量; β 为硬化参数。

Note: ρ_1 is material density; E is elastic modulus; μ is poisson's ratio; σ is yield stress; E_{tan} is tangent modulus; β is hardening parameter.

表 5 炸药材料模型及参数选取

Table 5 Constitutive models and parameter selection for explosive material

材料模型 Constitutive models		参数取值 Parameter selection							
* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	$\rho_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$V/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	P_{CJ}/GPa	A	B	R_1	R_2	ω	E_0
	1170	3800	5.9	49.4	1.89	3.9	1.11	0.33	2.84

注: ρ_2 为材料密度; V 为爆速; P_{CJ} 为爆压; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料输入参数; E_0 为初始比内能。

Note: ρ_2 is material density; V is detonation velocity; P_{CJ} is detonation pressure; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω are all equation of state parameters; E_0 is initial specific internal energy.

表 6 堵塞材料模型及参数选取

Table 6 Constitutive models and parameter selection for stemming material

材料模型 Constitutive models	参数取值 Parameter selection									
* MAT_SOIL_AND_FOAM	$\rho_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G_2/MPa	A_0	A_1	A_2	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
	1800	16	3.3×10^8	1.31×10^4	1.232×10^{10}	0	0.05	0.09	0.11	0.15

注: ρ_3 为材料密度; G_2 为剪切模量; A_0 、 A_1 、 A_2 、 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 为材料输入参数。

Note: ρ_3 is material density; G_2 is shear modulus; A_0 、 A_1 、 A_2 、 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 are all equation of state parameters.

表 7 空气材料模型及参数选取

Table 7 Constitutive models and parameter selection for air material

材料模型 Constitutive models	参数取值 Parameter selection									
* MAT_NULL	$\rho_4/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_6	V_0
	1.293	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.533×10^5	1

注: ρ_4 为材料密度; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为材料输入参数; E_6 为初始内能; V_0 为初始相对体积。

Note: ρ_4 is material density; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 are all equation of state parameters; E_6 is initial specific internal energy; V_0 is initial relative volume.

2.2 爆破块度与节理岩体损伤关联模型

试验区域台阶爆破完成后,采用 Split-desktop 块度分析软件和人工筛分法对现场试验区域爆破后

的爆堆块度进行统计,现场爆堆图及块度统计结果如图 4 及表 8 所示。

表 8 试验区域爆堆不同粒径区间岩块体积占比

Table 8 Volume percentage distribution of rock fragments by size fraction in the test area muck pile

粒径区间 Distribution of rock fragments/mm	≤ 4.75	4.75 ~ 9.5	9.5 ~ 16	16 ~ 19	19 ~ 31.5	31.5 ~ 37.5	37.5 ~ 53	53 ~ 75	75 ~ 100
占比/%	9.83	3.55	3.26	1.94	5.15	2.89	4.76	6.09	5.62
粒径区间 Distribution of rock fragments/mm	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	500 ~ 600	600 ~ 700	700 ~ 800	≥ 800	
占比/%	14.40	11.94	9.67	7.65	4.80	2.78	1.64	4.03	



图 4 试验区域爆堆图

Fig. 4 Blast pile of the test area

基于岩石损伤力学原理,数值模型中损伤参数 D 的增大反映岩石破碎程度的提升。将数值模拟得到的 $1-D$ 体积占比曲线与现场实测的爆破块度级配曲线置于同一坐标体系下进行对比分析^[21,22]。绘制如图 5 所示的曲线图。

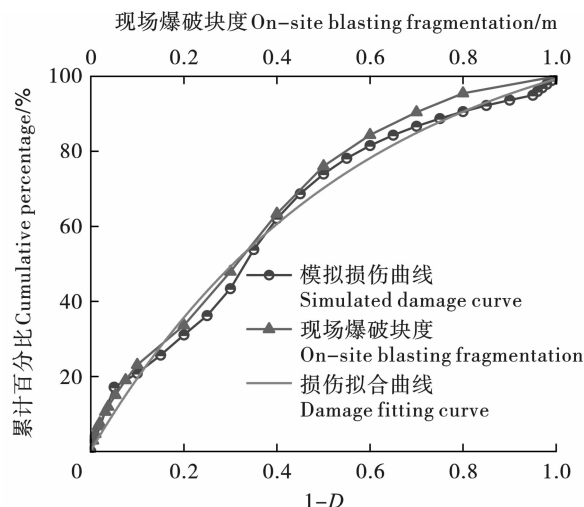


图 5 现场块度分布与数值模拟损伤体积分布对比

Fig. 5 Comparison of on-site fragment distribution and numerical simulation damage volume

采用图像识别软件与人工筛分结合的块度统计方法,分析模拟损伤和现场爆破块度变化可以发现,两条曲线基本重合。对损伤分布曲线进行数学拟合,为便于分析现场块度曲线和数值模拟损伤的关联性,将损伤横坐标定为 D_1 , ($D_1 = 1 - D$), 得到损伤拟合曲线方程

$$F(D_1) = 120 - 119 \frac{-D_1}{0.57} \quad (1)$$

拟合精度 R^2 为 0.98。现场爆破统计粉矿率约为 9.83%, 0~800 mm 粒径累计占比 95.97%, 将以上数据代入公式(1)中, 得到损伤 D 分别为 0.956 和 0.088。以该模型为依据, 可定义数值模拟后续试验中损伤变量 $D \leq 0.088$ 的为爆破大块、 $D \geq$

0.956 的为爆破粉矿。

3 小直径装药技术爆破数值模拟

3.1 小直径装药技术爆破效果对比模拟

基于文献[8]中提出的岩石爆破中径向不耦合装药结构不耦合系数取值为 2 时可以达到最好的爆破效果, 为对比当不耦合系数相同时轴向、径向、小直径药包三种不耦合装药结构的爆破效果, 取不耦合系数均为 2, 并按照 2.1 所述步骤建立单排 3 孔三维裂隙岩体台阶爆破数值模型, 开展数值模拟试验。三种装药结构如图 6 所示。其中, 乳化炸药的临界直径为 7~10 mm。炮孔直径 150 mm, 小直径装药直径为 75 mm。

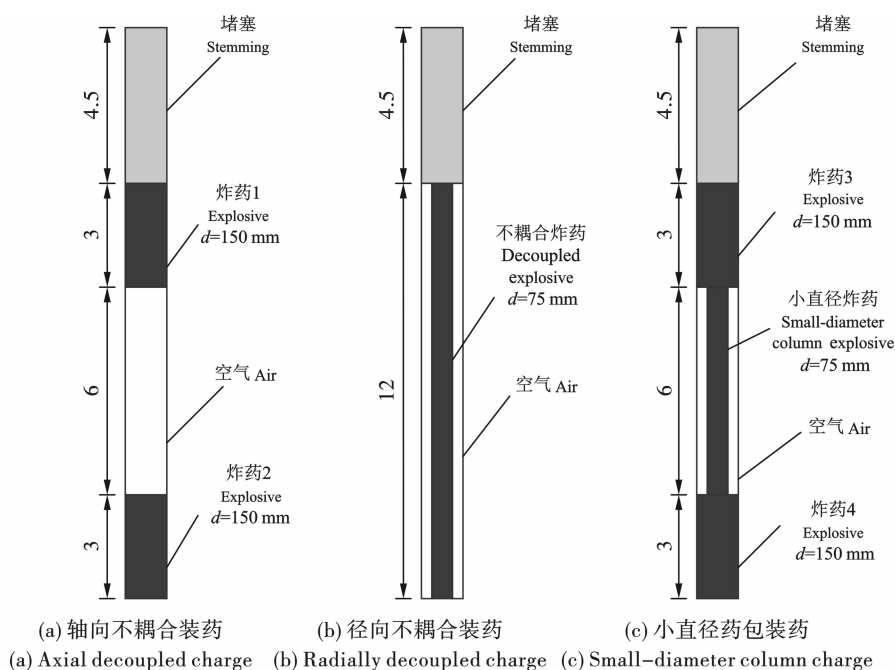


图 6 三种不耦合装药结构示意图(单位:m)

Fig. 6 Schematic diagrams of three decoupled charging configurations(unit:m)

在 LS-DYNA 中完成对模型的求解计算后,通过 Prepost 后处理软件统计分析损伤区间在 0.956~1 (块度 ≤ 4.75 mm)、0.18~0.63 (200 mm < 块度 < 600 mm)、0~0.088 (块度 ≥ 800 mm) 范围内的单元体积占比,结果如表 9 所示,同时将三种不耦合装药结构模拟爆破后的粉矿率和大块率绘制成折线图,如图 7 所示。

分析图 7 中三种不耦合装药方式块度占比可以发现:当不耦合系数相同时,径向不耦合装药爆破后粉矿率最小,粉矿率最大的小直径装药结构仅比最小的径向不耦合多出 1.6%;大块率方面,小直径装药的控制效果是最好的,并且爆破后大块率相较于径向与轴向不耦合装药分别低 4.83% 和 2.85%;

200~600 mm 矿石(即可以直接通过粉碎机的矿石)占比方面,小直径装药中间矿石的总体占比要明显大于其他两种装药方式。可以认为,在试验条件下当不耦合系数相同时,小直径装药相较于传统的不耦合装药方式具有较好的爆破块度控制效果。

3.2 基于爆破粉矿控制的小直径装药技术优化模拟

通过对比模拟试验得出小直径装药技术具有较好的爆破效果,但分析结果发现仍存在粉矿率较高的问题。为进一步降低爆破粉矿,开展关于小直径装药段长度对爆破粉矿影响的数值模拟研究。首先建立单排 3 孔三维裂隙岩体台阶爆破数值模型,每孔只有一段小直径药包,爆破参数选取方面^[23],倾斜边坡参考林继凯等结论选定小直径药包上方与下

方耦合装药段装药比例为 3:7,堵塞段长度为 4.5 m,设定不同小直径药包长度分别为:0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m,之后对模型进行求解计算。

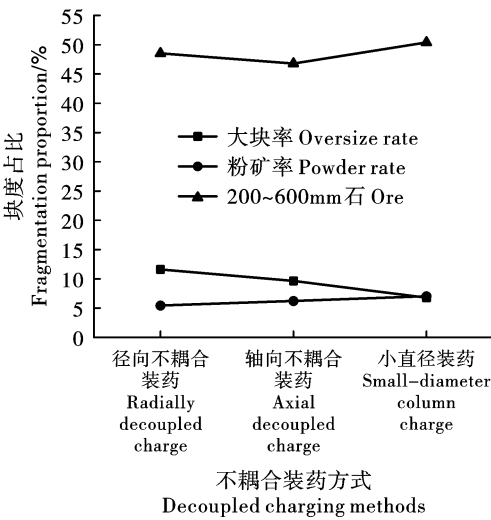


图 7 矿岩粒径占比随装药方式变化曲线图

Fig. 7 Variation plot of rock fragment size distribution with charging configurations

不同小直径药包长度的爆破数值模型损伤分布

如图 8 所示。对计算结果进行处理后统计不同损伤区间的单元体积占比,汇总结果如表 10 所示,同时将采用不同小直径药包长度所对应的大块率和粉矿率绘制成折线图,以进行后续分析,结果如图 9 所示。

分析图 9 爆破块度随小直径药包长度的变化关系可以发现,粉矿率随着小直径药包长度的增加呈现先减小后增大的趋势,这是由于小直径药包一开始被布置在炮孔中部,随着小直径药包长度从 0.5 m 开始增加,炮孔中部装药量逐渐减少,孔壁峰值压力降低,直到小直径药包长度为 2.0 m 时粉矿率达到最小值,而由于堵塞段长度固定,当小直径装药段长度继续增加时会导致炮孔中部药量增加,从而使整体粉矿率有了小幅度的上升;大块率方面呈现和粉矿率相同的变化趋势,分析原因是:小直径药包上方与下方耦合装药段装药长度始终保持不变,随着小直径药包长度的增加,炮孔中部装药段药量与待爆破岩体积逐渐相适应,使岩体得到更充分破碎,并在药包长度等于 2.0 m 时达到最佳效果,当药包长度持续增加,堵塞长度一定,炮孔内总药量减少,炸药单耗降低,所以整体大块率又会明显上升。

表 9 不同不耦合装药结构试验损伤统计表

Table 9 Statistics of damage test results for different decoupled charging configurations

不耦合装药结构 Decoupled charging configurations	爆破总体积 Total blasting volume/m ³	0.956 ≤ D < 1		0.18 < D < 0.63		0 < D ≤ 0.088	
		≤ 4.75 mm		> 200 mm 且 < 600 mm		≥ 800 mm	
		体积	占比	体积	占比	体积	占比
		Volume/m ³	Proportion/%	Volume/m ³	Proportion/%	Volume/m ³	Proportion/%
径向不耦合 Radially decoupled charge	1113	61	5.45	540	48.54	129	11.62
轴向不耦合 Axial decoupled charge	1113	69	6.21	521	46.79	107	9.64
小直径药包不耦合 Small-diameter column charge	1113	78	7.05	561	50.39	76	6.79

表 10 不同小直径药包长度试验损伤统计表

Table 10 Statistics of damage test metrics for small-diameter charge of varying lengths

小直径药包长度 Length of small-diameter charge/m	爆破总体积 Total blasting volume/m ³	0.956 ≤ D < 1		0 < D ≤ 0.088	
		≤ 4.75 mm		≥ 800 mm	
		体积	占比	体积	占比
		Volume/m ³	Proportion/%	Volume/m ³	Proportion/%
0.5	1113	86	7.73	65	5.84
1.0	1113	83	7.46	62	5.57
1.5	1113	75	6.74	61	5.48
2.0	1113	69	6.20	57	5.12
2.5	1113	71	6.38	63	5.66
3.0	1113	73	6.56	66	5.93

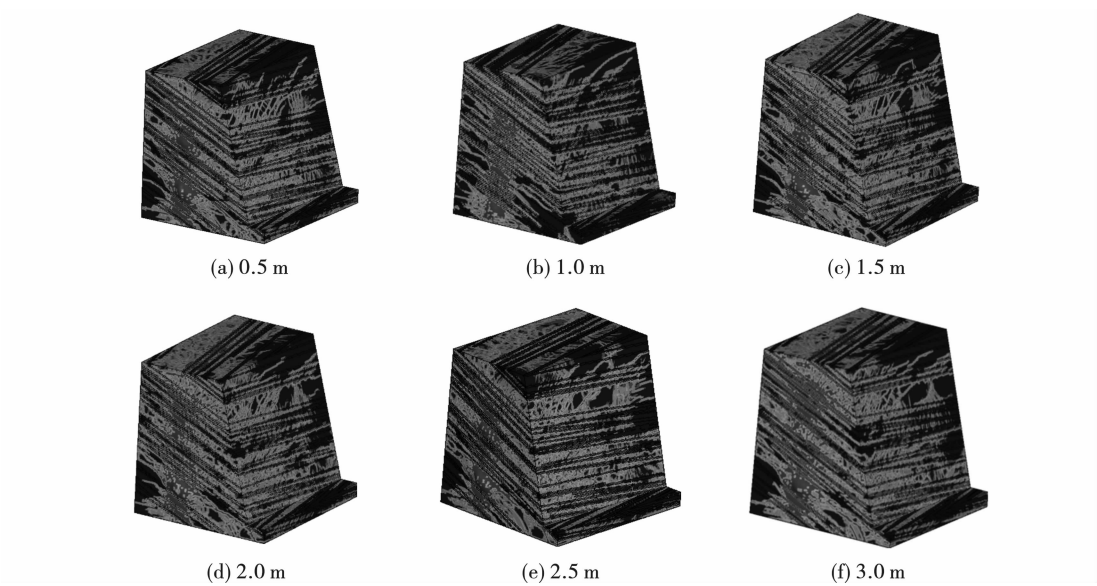


图 8 不同小直径药包长度的岩体损伤分布云图

Fig. 8 Contour maps of rock damage distribution for small-diameter charge of varying lengths

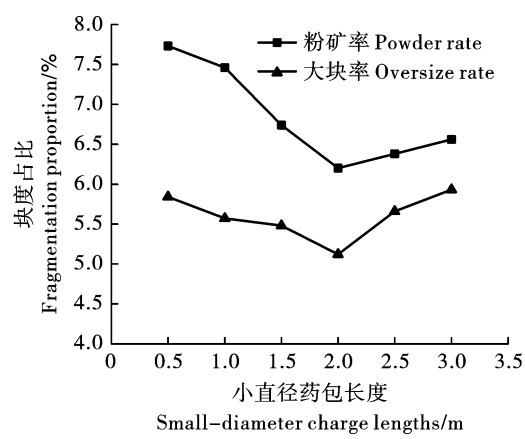


图 9 矿岩粒径占比随小直径药包长度变化曲线图

Fig. 9 Variation plot of rock fragment size distribution with small-diameter charge lengths

模拟结果证明只增加单个小直径药包的长度不会使粉矿率一直降低。但增加小直径药包个数也可以变相增加小直径装药段的长度,为探究这一方法的可行性,继续构建单排 3 孔三维裂隙岩体台阶爆破数值模型,开展关于小直径药包个数对爆破粉矿率的影响的数值模拟研究。为达到破岩效果,结合现场实际,设定小直径药包个数分别为一段、两段、三段,药包长度采用 2.0 m,不同药包个数的装药结构如图 10 所示。

对模型进行求解计算,通过 Prepost 软件处理后得到不同小直径药包个数的爆破数值模型损伤分布如图 11 所示。统计不同损伤区域的单元体积占比,结果见表 11,并将统计得到的大块率及粉矿率绘制成折线图,结果见图 12。

表 11 不同小直径药包个数试验损伤统计表

Table 11 Statistics of damage test metrics for varying numbers of small-diameter charge

装药结构 Charging configurations	爆破总体积 Total blasting volume/m ³	0.956≤D<1		0<D≤0.088	
		≤4.75 mm		≥800 mm	
		体积 Volume/m ³	占比 Proportion/%	体积 Volume/m ³	占比 Proportion/%
一段小直径药包 (Single charge)	1113	69	6.19	57	5.13
两段小直径药包 (Two charges)	1113	62	5.57	70	6.32
三段小直径药包 (Three charges)	1113	57	5.10	103	9.27

分析图 12 中两条折线的变化规律可以发现:随着炮孔内小直径药包个数的增加,爆破后粉矿率呈缓慢递减的趋势,大块率出现明显的递增趋势。这主要是由于在保证堵塞长度不变的情况下采用三段小直径药包会导致孔内总装药量减少,炸药单耗减

小,同时炮孔中部耦合装药段长度较短(均为 1.0 m)且分布不均,因此爆破后大块率增加明显。综合上述,在模拟试验条件下采用两段 2.0 m 小药包的小直径药包不耦合装药结构可以实现最优的爆破粉矿率降低以及整体块度控制的效果。

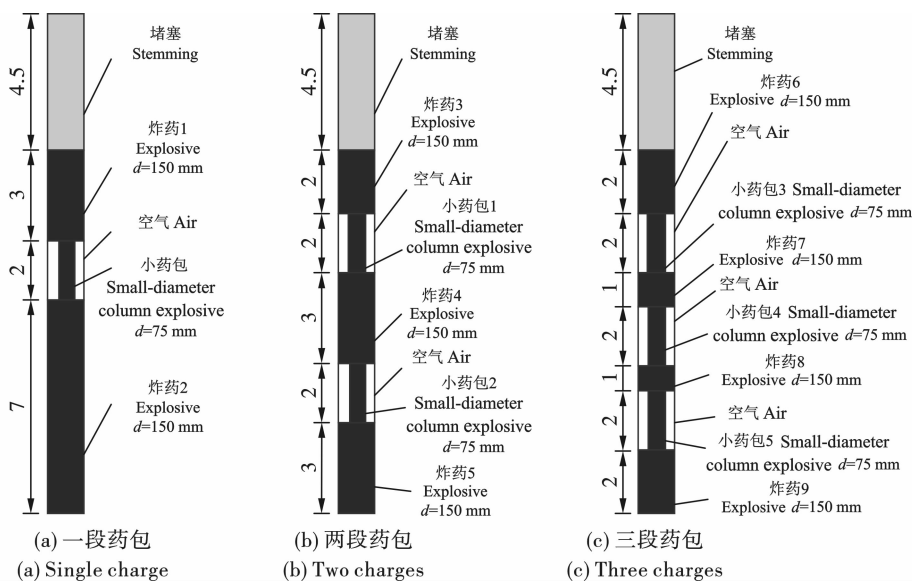


图 10 不同小直径药包个数装药结构示意图(单位:m)

Fig. 10 Schematic diagrams of charging configurations with varying numbers of small-diameter cartridge (unit: m)

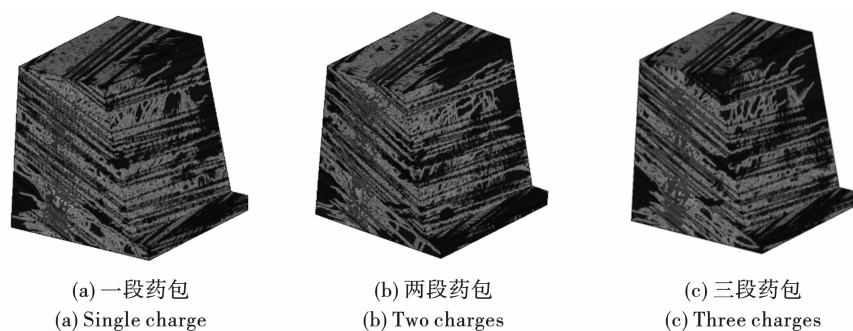


图 11 不同小直径药包个数的岩体损伤分布云图

Fig. 11 Contour map series of rock damage distribution for varying numbers of small-diameter charge

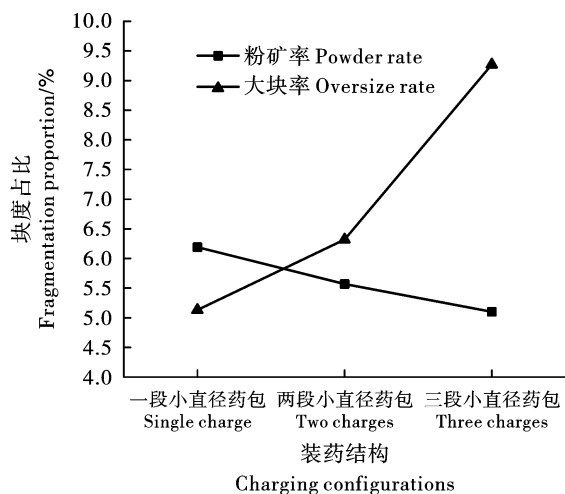


图 12 矿岩粒径占比随小直径药包个数变化曲线图

Fig. 12 Variation plot of rock fragment size distribution with numbers of small-diameter charge

4 现场爆破试验

4.1 现场试验方案

基于模拟试验的结果,在矿山现场开展爆破试

验,现场试验分为四组,包括一组对照组和三组试验组,对照组采用矿山生产爆破参数,四组试验方案见表 12,不同方案的装药结构如图 13 所示,其中小直径药包采用可改变长度的可传爆间隔器代替(其中,小直径药包采用可传爆间隔器代替,间隔器由上部托盘和下部可调节长度的塑料软管组成,托盘可确保间隔器在放入炮孔后位于中心位置,塑料软管直径与设计的小直径药包直径相等,因此该可传爆间隔器在爆炸性能和爆破效果方面可以达到与小直径药包设计要求基本一致)。试验地点选取在相同区域的未开采台阶,将试验区域均匀地划分为四部分,为减小实验误差,四组试验均选择在同一次爆破中完成,试验现场爆堆如图 14 所示。

4.2 爆破块度统计及试验结果分析

爆破结束后,分别拍摄四个试验组的爆堆分布图片,采用 Split-desktop 块度分析软件和人工筛分法对现场试验区域爆破后的爆堆块度进行统计,结果见表 13。

表 12 现场爆破试验方案
Table 12 Field blasting test program

试验编号 Test number	装药结构 Charging configurations	耦合 装药段长度 Coupled charge length/m	小直径 装药段长度 Small-diameter charge length/m	药包上部 装药长度 Upper charge length/m	药包下部 装药长度 Bottom charge length/m	中部 装药长度 Middle charge length/m
#1 对照组 #1 Control group	连续装药 Continuous column charging	12.00	—	—	—	—
#2 试验组 #2 Test group	一段 2.0 m 小直径药包 Single 2.0 m small-diameter charge	10.00	2.00	3.00	7.00	—
#3 试验组 #3 Test group	一段 2.5 m 小直径药包 Single 2.5 m small-diameter charge	9.50	2.50	2.85	6.65	—
#4 试验组 #4 Test group	两段 2.0 m 小直径药包 Two 2.0 m small-diameter charges	8.00	4.00	2.00	3.00	3.00

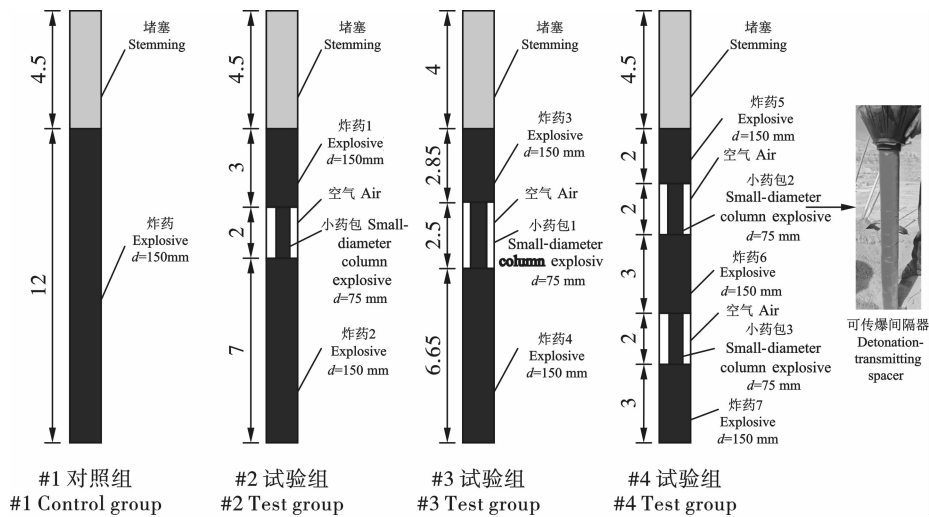


图 13 不同试验组装药结构示意图(单位:m)

Fig. 13 Schematic diagrams of charging configurations for different test groups(unit:m)

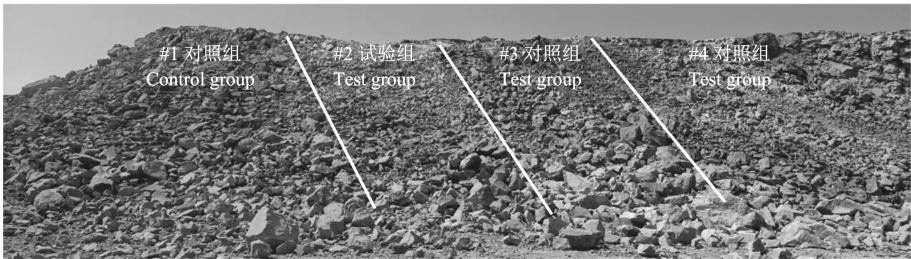


图 14 不同试验组现场爆堆图

Fig. 14 Field blast piles of different test group

分析表 13 块度尺寸分布可得:对比#1 和#2 的试验结果发现小直径装药技术可以有效降低爆破粉矿;对比#2、#3 和#4 可知增加单个小直径药包长度不会使爆破粉矿率一直降低,但可以通过增加小直

径药包的个数来进一步降低粉矿,这与数值模拟试验所得到的结论相吻合;采用两段 2.0 m 小直径药包装药结构的#4 试验组对比采用矿山生产爆破参数的#1 对照组,粉矿率降低了 6.53 个百分点,大块

率提高了 0.77 个百分点。综上,采用优化后的小直径药包不耦合装药结构可以明显降低爆破后矿石中

粉矿含量,并有效控制爆破块度,减少了矿山企业因爆破粉矿而造成的经济损失。

表 13 现场爆破试验爆堆块度统计表

Table 13 Statistics of blast pile fragmentation metrics from field blasting tests

块度尺寸 Fragment size/mm	#1 对照组 #1 Control group)	#2 试验组 #2 Test group	#3 试验组 #3 Test group	#4 试验组 #4 Test group
	连续装药 Continuous column charging/%	一段 2.0 m 小直径药包 Single 2.0 m small- diameter charge/%	一段 2.5 m 小直径药包 Single 2.5 m small- diameter charge/%	两段 2.0 m 小直径药包 Two 2.0 m small- diameter charges/%
≥800	4.50	4.54	4.85	5.27
700 ~ 800	4.08	2.82	3.26	1.89
600 ~ 700	6.03	4.23	2.83	3.27
500 ~ 600	8.34	7.27	4.08	4.35
400 ~ 500	11.69	11.24	8.59	5.54
300 ~ 400	14.43	12.07	14.82	8.78
200 ~ 300	13.31	14.97	14.82	17.73
100 ~ 200	9.55	15.07	15.50	12.98
75 ~ 100	4.05	4.89	5.53	6.55
53 ~ 75	3.96	4.83	5.52	6.75
37 ~ 53	3.13	3.91	4.62	5.62
31 ~ 37	1.32	1.59	1.94	2.34
19 ~ 31	2.07	3.53	2.39	5.30
16 ~ 19	0.82	0.99	1.25	3.64
9.5 ~ 16	2.00	2.37	3.11	4.05
4.75 ~ 9.5	1.77	2.09	2.87	3.52
≤4.75	8.95	3.59	4.02	2.42

5 结论

(1) 在 ANSYS/LS-DYNA 软件中构建基于现场实测的爆破块度与节理岩体损伤关联模型,拟合现场块度与爆破损伤分布曲线,现场爆破块度与模拟损伤之间存在指数函数关系,粉矿 (≤ 4.75 mm) 和大块 (≥ 800 mm) 对应的 D 分别为 0.956 和 0.088。

(2) 构建单排 3 孔三维裂隙岩体台阶爆破数值模型并进行求解计算,结果表明:当不耦合系数为 2 时,小直径装药方式对爆破块度的控制效果更好;粉矿率和大块率随单个小直径药包长度的增加都呈现先减小后增大的变化规律,并且当小直径药包长度为 2 m 时粉矿率和大块率达到最低;增加小直径药包个数可以实现爆破粉矿率的进一步降低,但当药包个数超过 3 个时会导致大块率的明显上升。

(3) 将矿山原有装药结构分别调整为一段 2.0 m 小直径药包、一段 2.5 m 小直径药包、两段 2.0 m 小直径药包装药结构并开展现场爆破试验,结果表明:小直径药包长度达到 2 m 后继续增加长

度不会使粉矿率降低,但可以通过增加小直径药包个数来实现,采用两段 2.0 m 小直径药包装药结构时爆破粉矿率降低了 6.53 个百分点,且大块率基本不变。

参考文献 (References)

- [1] 郝 芳. 建筑用碎石骨料矿山投资评价方法及可持续发展研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.
- [1] HAO Fang. A study on investment evaluation method and sustainable development of crushed stone for construction [D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing), 2013. (in Chinese)
- [2] 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.
- [2] DAI Jun. Prevention and control mechanism of deep-hole blasting in deep mining[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2001 (2): 144-147. (in Chinese)
- [3] 楼晓明,马建军. 裂隙岩体不耦合装药的爆破破坏分

- 区计算[J]. 矿业研究与开发,2004(4):50-53.
- [3] LOU Xiao-ming, MA Jian-jun. The damage zones calculation of uncoupled charge blasting in fractured rock[J]. Mining Research and Development, 2004(4):50-53. (in Chinese)
- [4] 宗琦,田立,汪海波. 水介质不耦合装药爆破岩石破坏范围的研究和应用[J]. 爆破,2012,29(2):42-46.
- [4] ZONG Qi, TIAN Li, WANG Hai-bo. Study and application on rock damage range by blasting with water-decoupled charge[J]. Blasting, 2012, 29(2):42-46. (in Chinese)
- [5] 王皓永,任晓玲,沈强,等. 基于空气间隔优化的骨料用灰岩爆破粉矿率控制[J]. 爆破,2023,40(4):110-114,223.
- [5] WANG Hao-yong, REN Xiao-ling, SHEN Qiang, et al. Control of blasting powder rate of limestone for aggregate based on air decking optimization[J]. Blasting, 2023, 40(4):110-114,223. (in Chinese)
- [6] 罗志华,史秀志,陈飞,等. 径向不耦合装药对粉矿控制的影响研究[J]. 爆破,2020,37(3):47-55.
- [6] LUO Zhi-hua, SHI Xiu-zhi, CHEN Fei, et al. Study on influence of radial decoupling charge on fine ore control[J]. Blasting, 2020, 37(3):47-55. (in Chinese)
- [7] 尹岳降,夏文俊,卢文波,等. 灰岩矿爆破开采岩粉成因及其控制研究[J]. 工程爆破,2021,27(6):44-51.
- [7] YIN Yue-xiang, XIA Wen-jun, LU Wen-bo, et al. Study on genesis and control of rock powder of limestone mine during rock blasting[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(6):44-51. (in Chinese)
- [8] 杨跃宗,邵珠山,熊小锋,等. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J]. 爆破,2018,35(4):26-33,146.
- [8] YANG Yue-zong, SHAO Zhu-shan, XIONG Xiao-feng, et al. Comparison of radial and axial uncoupled charge in rock blasting[J]. Blasting, 2018, 35(4):26-33,146. (in Chinese)
- [9] 郑虹,冯夏庭,陈祖煜. 岩石力学室内试验 ISRM 建议方法的标准化和数字化[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(12):2456-2468.
- [9] ZHEN Hong, FENG Xia-ting, CHEN Zu-yu. Standardization and digitization for ISRM suggested methods of rock mechanics laboratory tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12):2456-2468. (in Chinese)
- [10] 梁为民,LIU Hong-yuan,周丰峻. 不耦合装药结构对岩石爆破的影响[J]. 北京理工大学学报,2012,32(12):1215-1218,1228.
- [10] LIANG Wei-min, LIU Hong-yuan, ZHOU Feng-jun. Influence of air-decoupling charge on rock blasting[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(12):1215-1218,1228. (in Chinese)
- [11] 姜鹏飞,唐德高,龙源. 不耦合装药爆破对硬岩应力场影响的数值分析[J]. 岩土力学,2009,30(1):275-279.
- [11] JIANG Peng-fei, TANG De-gao, LONG Yuan. Numerical analysis of influence of un-coupled explosive-charge structure on stress field in hard rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1):275-279. (in Chinese)
- [12] 王志亮,李永池. 工程爆破中径向水不耦合系数效应数值仿真[J]. 岩土力学,2005(12):1926-1930.
- [12] WANG Zhi-liang, LI Yong-chi. Numerical simulation on effects of radial water-decoupling coefficient in engineering blast[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(12):1926-1930. (in Chinese)
- [13] 杨国梁,杨仁树,姜琳琳. 轴向间隔装药爆破沿炮孔的压力分布[J]. 爆炸与冲击,2012,32(6):653-657.
- [13] YANG Guo-liang, YANG Ren-shu, JIANG Lin-lin. Pressure distribution along borehole with axial air-deck charge blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(6):653-657. (in Chinese)
- [14] 吴亮,卢文波,钟冬望,等. 混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理[J]. 爆炸与冲击,2010,30(1):58-64.
- [14] WU Liang, LU Wen-bo, ZHONG Dong-wang, et al. Study of concrete damage under blast loading of air-decking[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1):58-64. (in Chinese)
- [15] 杨国梁,程帅杰,王平,等. 切缝管轴向不耦合装药爆破实验[J]. 爆炸与冲击,2017,37(1):134-139.
- [15] YANG Guo-liang, CHENG Shuai-jie, WANG Ping, et al. Experiment on slotted tube blasting of axial decoupling coefficient charging[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1):134-139. (in Chinese)
- [16] 严鸿海,张义平,任少峰,等. 孔底真空空间隔装药的爆破效果试验研究[J]. 爆破,2018,35(1):66-74.
- [16] YAN Hong-hai, ZHANG Yi-ping, REN Shao-feng, et al. Experimental study on blasting effect of quasi vacuum-decking in hole bottom[J]. Blasting, 2018, 35(1):66-74. (in Chinese)
- [17] KUMAR V H, K A M, P M R, et al. Influence of joint orientation and spacing on induced rock mass damage due to blasting in limestone mines[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2023, 40(6):2349-2359.
- [18] WANG Zhi-liang, HUANG You-peng, XIONG Feng. Three-dimensional numerical analysis of blast-induced damage characteristics of the intact and jointed rock mass[J]. Computers, Materials & Continua, 2019, 60(3):1189-1206.

- [19] JAYASINGHE L, SHANG J, ZHAO Z, et al. Numerical investigation into the blasting-induced damage characteristics of rocks considering the role of in-situ stresses and discontinuity persistence[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 116:103207-103207.
- [20] 叶海旺, 韦文蓬, 周汉红, 等. 裂隙岩体精细化数值模型构建与爆破模拟[J]. 爆破, 2023, 40(4):44-51.
- [20] YE Hai-wang, WEI Wen-peng, ZHOU Han-hong, et al. Refined numerical model construction and blasting simulation of fractured rock mass[J]. Blasting, 2023, 40(4):44-51. (in Chinese)
- [21] 叶海旺, 彭瑞, 田治平, 等. 基于孔间延时优化的骨料矿山台阶爆破大块率控制[J/OL]. 金属矿山:1-10. [2025-08-14]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1055.td.20240812.1438.004>.
- [21] YE Hai-wang, PENG Rui, TIAN Zhi-ping, et al. Large lump rate control of aggregate mine bench blasting based on inter-hole delay optimization[J/OL]. Metal Mine:1-10. [2025-08-14]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1055.td.20240812.1438.004>.
- [22] 叶海旺, 杨 坤, 马宝臣, 等. 基于排间延时的柱状节理岩体爆破块度优化研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(6):1-8.
- [22] YE Hai-wang, YANG Kun, MA Bao-chen, et al. Columnar jointed rock blasting fragmentation optimization based on changing inter-row delay time[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(6):1-8. (in Chinese)
- [23] 林继凯, 孙梦迪, 刘增辉, 等. 中部空气间隔不同比例装药对炮孔孔壁受力及碎石块度的影响[J]. 爆破器材, 2023, 52(6):55-64.
- [23] LIN Ji-kai, SUN Meng-di, LIU Zeng-hui, et al. Influence of charge with different proportions under the condition of middle air separation on the stress on the borehole wall and the rock fragmentation[J]. Explosive Materials, 2023, 52(6):55-64. (in Chinese)

(上接第 13 页)

- [21] 刘永胜, 朱思源, 杨小林, 等. 多次爆破对大跨度硐室围岩的损伤累积及松动圈范围研究[J]. 爆破, 2022, 39(1):9-15, 35.
- [21] LIU Yong-sheng, ZHU Si-yuan, YANG Xiao-lin, et al. Study on damage accumulation and broken rock zone range of surrounding rock of large span chamber caused by multiple blasts[J]. Blasting, 2022, 39(1):9-15, 35. (in Chinese)
- [22] YAN Xing, KULATILAKE P H S W, SANDBAK L A. Investigation of rock mass stability around the tunnels in an underground mine in USA using three-dimensional numerical modeling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(2):579-597.
- [23] 李仁强, 马至刚, 衣忠强, 等. 地震高烈度区软岩隧道结构动力响应特性研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(9):56-63, 92.
- [23] LI Ren-qiang, MA Zhi-gang, YI Zhong-qiang, et al. Research on the dynamic response characteristics of soft rock tunnel structure in high seismic intensity area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(9):56-63, 92. (in Chinese)
- [24] SUN Bing-jun, LI Wei-teng, LI Yang, et al. Study on the deformation and failure control of massive surrounding rock in shallow buried tunnel based on a new simulation technology[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 162:106677.
- [25] 魏明尧, 刘 春, 刘应科, 等. 深部矿井频繁微扰动下煤巷损伤累积演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8):2689-2701.
- [25] WEI Ming-yao, LIU Chun, LIU Ying-ke, et al. Evolution of accumulated damage in deep coal roadway with repeated dynamic disturbance[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8):2689-2701. (in Chinese)
- [26] KUILI S, SASTRY V R. A numerical modelling approach to assess the behaviour of underground cavern subjected to blast loads[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6):975-983.
- [27] LIU Kai, LI Qi-yue, WU Cheng-qing, et al. A study of cut blasting for one-step raise excavation based on numerical simulation and field blast tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 109:91-104.
- [28] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17):3003-3010.
- [28] XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17):3003-3010. (in Chinese)