

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.008

## 径向不耦合装药对粉矿控制的影响研究\*

罗志华, 史秀志, 陈飞, 邱贤阳, 霍晓锋  
(中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 粉矿率是矿山经济技术指标评定的重要因素之一, 粉矿数量多会增大铲装、运输的难度, 也会扩大矿石损失进而影响矿山开采经济效益。为了在爆破开采过程中有效降低粉矿的数量, 减少矿石的损失, 提高经济效益, 通过 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟的方法, 分析模型单元失效比例和运用块度处理系统加工处理模型裂纹进一步分析块度, 研究径向不耦合装药对粉矿控制的影响。研究结果得出: 当炮孔直径为 110 m 时, 随着药包直径从 60 mm 增大到 110 mm, 整体失效体积比例由 27.83% 增大到 46.73%, 岩体破碎粉矿程度逐渐增高, 与此同时, 大块率比例由初始的 17.60% 先下降至 0 再升高至 20.01%。药包直径在 80 mm 时, 粉矿率低, 大块率符合要求。现场实证表明: 优化后的装药药包直径爆破过程中, 所产生粉矿有明显的降低, 且块度适中。

**关键词:** 粉矿; 径向不耦合装药; 块度; 裂纹

**中图分类号:** TD235      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0047-09

## Study on Influence of Radial Decoupling Charge on Fine Ore Control

LUO Zhi-hua, SHI Xiu-zhi, CHEN Fei, QIU Xian-yang, HUO Xiao-feng

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Fine ore is one of the important factors in the evaluation of economic and technical indicators of mines. The increase of fine ore will not only complicate the difficulty of shovel loading and transportation, but also will increase the economic loss of ore which would further affect the economic benefits of a mine. In order to effectively reduce the quantity of fine ore during the blasting process, and improve the economic benefit, this paper analyzed the failure ratio of the model through ANSYS/LS-DYNA numerical simulation method. And the model crack was also studied by the block processing system to analyze fragmentation and study the effect of radial decoupling charge on the control of fine ore. The results show that when the diameter of the blast hole is 110 mm, as the diameter of the charge increases from 60 mm to 110 mm, the proportion of the total failure volume rises from 27.83% to 46.73%, and the degree of fine ore gradually increases. When the diameter of the charge is 80 mm, the fine ore ratio is low, and the large block rate meets the requirements. The field experiments showed that under the optimized charge diameter, the produced fine ore is obviously reduced, and the fragmentation is moderate.

**Key words:** fine ore; radial decoupling charge; block size; crack

粉矿产出率太高不仅对生产造成影响还浪费资

源, 因此粉矿的控制对矿山生产中十分重要。粉矿问题归根结底还是块度问题, 粉矿主要来源于爆破破岩过程中。在爆破中块度的可控影响因素主要有: 装药结构<sup>[1]</sup>、孔网参数<sup>[2]</sup>、起爆顺序<sup>[3]</sup>、起爆位置<sup>[4]</sup>、炸药单耗<sup>[5]</sup>、最小抵抗线等<sup>[6]</sup>, 其中装药结构对爆破块度的影响最为明显<sup>[7]</sup>。对装药结构进行

收稿日期: 2020-04-21

作者简介: 罗志华(1994-), 男, 硕士研究生, 从事采矿与爆破方面的研究工作, (E-mail) 1172445900@qq.com。

通讯作者: 史秀志(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 从事采矿与安全方面的研究与教学工作, (E-mail) baopo@csu.edu.cn。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2017YFC0602902)

优化主要集中在对径向耦合系数优化这个方面<sup>[8-13]</sup>,在装药结构对粉矿控制的研究中,由于现场爆破实验局限性较大,多数学者采用数值模拟的方法从有效应力峰值、孔壁压力分布、爆破能量传递的角度优化装药结构,从而达到降粉的目的<sup>[10-13]</sup>。刘玲平等通过不耦合和耦合的对比模拟实验发现在不耦合条件下炮孔压碎圈半径明显减少,全孔不耦合装药结构可以有效降低爆破粉矿<sup>[10]</sup>;刘优平等通过各种不同装药结构爆破后关键单元的有效应力峰值曲线确定最优装药结构<sup>[11]</sup>;郭连军等通过不同耦合系数径向不耦合装药结构的炮孔壁处的应力响应值小与石灰岩的抗压强度,从而确定径向不耦合装药的有效性<sup>[12]</sup>;顾文彬等从爆破能量传递与装药结构的关系,得出以水作为不耦合介质的不耦合装药能有效降低爆破震动能量,且使块度均匀等<sup>[13]</sup>。由上可知,在装药结构对粉矿控制影响的研究中,学者们大多通过分析有效应力、爆破能量等间接反映爆破块度,其结果往往不够准确、全面。基于此,采用数值模拟软件建立以空气为间隔介质的径向不耦合装药单孔爆破模型,通过对模型进行单元失效分析和统计分析模型的裂纹分布获得装药药包直径与粉矿之间的关系,优选合理的装药药包,使得在降低粉矿产出率的同时又能将爆破块度控制在合理的范围内。

## 1 数值模拟

### 1.1 工程概况

某地下金属矿山,年产量18万吨铅锌矿,该矿山采用大直径深孔爆破的方式开采(图1),其爆破工艺是从上部硐室向下打贯穿矿体至下部硐室的直孔(炮孔直径为110 mm,采场布置4排炮孔,孔网参数为 $(1.8 \sim 2.2) \text{ m} \times (2 \sim 2.2) \text{ m}$ );爆破顺序为先在

采场进行拉槽爆破,为后续侧崩爆破提供足够的自由面和补偿空间,待拉槽区破顶结束后进行侧崩直至采场矿体采完结束,采场采用遥控铲运机在下部硐室进行铲装出矿作业。该方法具有安全高效,采切工作量小,低成本等优点。但在开采过程中,由于单次爆破药量多、崩矿量大,容易出现大量粉矿,给矿山生产造成不必要的损失。因此合理优化爆破设计以减少粉矿量是生产过程中必须解决的问题。

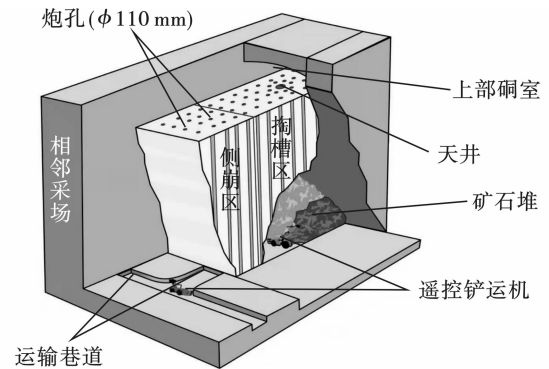


图1 采矿工艺示意图

Fig. 1 Mining process schematic diagram

### 1.2 径向不耦合装药模型建立

生产实践和理论研究表明,间隔材料为空气可以延长爆生气体作用时间,改善岩石破碎块度<sup>[14]</sup>,炮孔直径为110 mm时,钻孔效率高且经济适用。本文从改变药包直径的角度出发,在确保大块率符合要求前提下,考虑降低粉矿产出率,保持孔距、排距、轴向装药结构等爆破参数不变,控制药包直径单一变量,研究径向不耦合装药对粉矿控制的影响。选取药包直径60 mm、70 mm、80 mm、90 mm、100 mm、110 mm(径向全耦合),共设置(I-VI)六组径向空气不耦合模型对比模拟实验(表1)。

表1 装药方式表

Table 1 Charge method table

	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV	模型 V	模型 VI
炮孔直径/mm	110	110	110	110	110	110
单层药包数量	一条	一条	一条	一条	一条	一条
相邻两层药包间隔长度/m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
间隔材料	空气	空气	空气	空气	空气	空气
炸药类型	乳化炸药	乳化炸药	乳化炸药	乳化炸药	乳化炸药	乳化炸药
药包直径/mm	60	70	80	90	100	110

模型(图2)模型厚度为1 mm,炮孔左侧4 m,炮孔右侧2 m,其抵抗线长度为2 m,为降低上下边界对药包的影响,建立4条药包,药包长度0.7 m,药包间空气间隔0.8 m,炮孔直径110 mm。模型的上下及左侧添加无反射边界条件,用以削弱冲击波对

研究区域的影响作用<sup>[11]</sup>,模型右侧为自由面。

### 1.3 材料参数选取

#### (1) 炸药材料及模型

在LS-DYNA软件中,炸药采用“\*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN”定义,炸药的状态方程为

“\*EOS\_JWL”, 采用 JWL 状态方程, 此方程忽略炸药的化学反应方式而只考虑爆轰, 并经过大量实验数据修正, 因此使用最为广泛。JWL 状态方程的一般形式如下<sup>[15,16]</sup>

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  均为表征炸药物理特性的常数;  $P$  为爆轰压力;  $E_0$  为单元最大面积;  $V$  为爆轰产物相对体积;  $\omega$  为格林爱森参数。

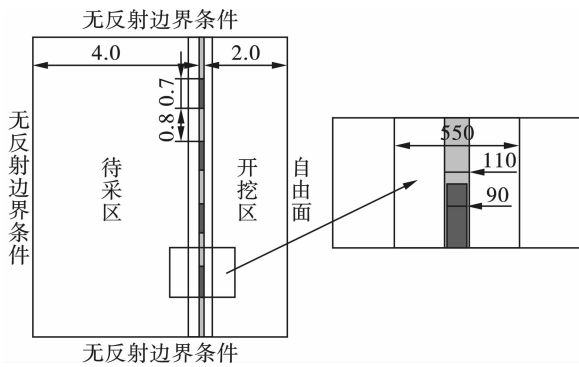


图 2 径向不耦合装药模型示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of the radial uncoupled charge model(unit:mm)

采用的 2 号岩石乳化炸药及其状态方程参数如表 2、表 3 所示<sup>[15,16]</sup>。

表 2 炸药参数

Table 2 Explosive of parameters

密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	爆速/(m · s <sup>-1</sup> )	爆轰压力/GPa
1.2	4000	7.4

表 3 炸药状态方程参数

Table 3 Explosive state equation parameters

$A$	$B$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$	$V_0$
2.144E+11	1.82E+8	4.2	0.9	0.15	4.193E+9	1
2.144E+11	1.82E+8	4.2	0.9	0.15	4.193E+9	1

表 5 岩石 HJC 材料状态方程参数表

Table 5 Rock HJC material state equation parameter table

参数	$RO$	$G$	$A$	$B$	$C$	$N$	$FC$
数值	2440	1.486E10	0.79	1.6	0.007	0.61	11.4E7
参数	$T$	$EPS0$	$EFMIN$	$SFMAX$	$PC$	$UC$	$PL$
数值	9E6	1E-6	0.01	7	1.6E7	0.001	8E8
参数	$UL$	$D1$	$D2$	$K1$	$K2$	$K3$	$FS$
数值	0.1	0.04	1	8.8E7	-1.71E8	2.08E8	-1

表中各项参数物理意义如下:  $RO$  为质量密度;  $G$  为剪切模量;  $A$  为粘性常数;  $B$  为压力强化系数;  $C$

### (2) 空气材料模型

在 LS-DYNA 软件中, 空气模型采用 \* MAT\_NULL 定义, 空气密度是 1.293 kg/m<sup>3</sup>。空气的状态方程采用 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 定义, 其状态公式如下<sup>[15,16]</sup>

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (2)$$

式中:  $C_0 \sim C_6$  为常数;  $E$  为内能与初始体积之比;  $\mu$  为比体积。见表 4。

表 4 空气状态方程参数

Table 4 Air state equation parameters

$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E$	$V_0$
0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5E5	1.0

### (3) 岩石 HJC 材料模型

在模拟岩体爆破时候, 岩体的拉格朗日单元受到的主应力超过岩石材料的抗拉强度或者抗剪强度, 此岩体单元就会因失效而删除, 进而可以描述岩体爆破过程中的裂纹扩展以及侧面反映出分配到对应部分岩体的炸药能量<sup>[17,18]</sup>。即

$$\sigma_1 \leq \sigma_T; \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \sigma_c \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为最大主应力和最小主应力;  $\tau_{\max}$  为最大剪应力;  $\sigma_c$  为岩石抗剪强度;  $\sigma_T$  为岩石抗拉强度。

本文中模拟采用的岩体模型为 HJC 模型, 该模型综合考虑了应变率效应和围压效应, 其最突出的特点就是可以反映出岩体的损伤演化效应, 可较好的描述岩体在高应变和高压力状态下的物理力学特性<sup>[15,16]</sup>。

HJC 模型定义为 \* MAT\_JOHNSON\_HOLMQU IST\_CONCRETE, 根据现场实际情况, 表 5 为文中采用的岩石 HJC 模型本构参数。

为应变率系数;  $N$  为压力硬化指数;  $FC$  为准静态单轴抗压强度(同  $f_c$ );  $T$  为最大拉应力;  $EPS0$  为参考

应变率;  $EFMIN$  为损伤常数(同  $\varepsilon_{fmin}$ );  $SFMAX$  为归一化最大强度(同  $S_{max}$ );  $PC$  为压碎体压力(同  $P_{crush}$ );  $UC$  为压碎体应变(同  $\mu_{crush}$ );  $PL$  为压实压力(同  $P_{lock}$ );  $UL$  为压实应变(同  $\mu_{lock}$ );  $D1$  为损伤常数;  $D2$  为损伤常数;  $K1$  为材料压力常数;  $K2$  为材料压力常数;  $K3$  为材料压力常数;  $FS$  为失效形式。

在模拟岩体爆破时候。为了更好地表现出岩体的失效,在关键字文件中添加拉伸失效的命令 \*MAT\_ADD\_EROSION,来定义矿体受到拉伸应力的失效条件,其中矿岩静态抗压强度为 114 MPa,静态抗拉强度为 9 MPa。在工程爆破中,岩石在加载速率很大的爆破动载下发生破坏,故模拟中采用相应的动态荷载强度作为单元失效判据,其与加载应变率  $\varepsilon$  有关<sup>[8]</sup>,根据式(4)确定岩石动态抗压强度,由式(5)确定动态抗拉强度<sup>[19-21]</sup>。

$$\sigma_{cd} = \sigma_c \varepsilon_c^{1/3} \quad (4)$$

$$\sigma_{td} = \sigma_t \varepsilon_t^{1/3} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_c$  为岩石静态抗压强度;  $\sigma_{cd}$  为岩石动态抗压强度;  $\varepsilon_c$  为粉碎区加载应变率,取  $10^4 s^{-1}$ ;  $\sigma_t$  为岩石静态抗拉强度;  $\sigma_{td}$  为岩石动态抗拉强度;  $\varepsilon_t$  为裂隙区加载应变率,取  $10^2 s^{-1}$ 。

#### 1.4 失效计算结果分析

为方便观察失效扩展的情况,特给出其中一个模拟(模型IV:药包直径为 90 mm)的数值模拟失效应力云图演化过程。观察图 3,随着时间推移,失效裂纹和外围的高应力同时向外扩张。在 0.6 ms 时候,冲击波传递到最右侧的自由面附近,接着会发生应力波反射现象,自由面附近开始出现拉伸失效。纵使在模型的上下两侧及左侧添加了无反射边界条件,但是实际计算过程中,仍然会有产生反射应力波,为避免来自炮孔左侧的反射应力波的干扰,故研究计算时间最大是 1.2 ms。而在实际计算过程中,最大可能降低无关因素的影响,选取炮孔右边的开挖区为研究对象,且最上边一条药和最下边的药所对应的范围会受到模型边界的影响,因此也不在研究范围内。

如图 4 所示的各种装药方式的范围即为本文数值模拟的研究范围,现给出上文中表 1 中的六种模型的最终失效图。图中  $B$  区域代表空气间隔所对应的研究爆破失效范围,  $A$  和  $C$  区域代表炸药所对应的研究爆破失效范围。研究思路如下:求出  $A$ 、 $B$ 、 $C$  这三个区域各自的失效比例,以及  $ABC$  整体区域的失效比例(如图 4 中模型 II 框内区域分别为指代  $A$ 、 $B$ 、 $C$  区域)。划定一个失效比例最小值,若小于这个比例值,说明该对应区域的破碎效果不好,尤

其是最中间的空气间隔的失效比例。对比各个区域以及整体的失效比例,若失效比例之间差别不明显,就说明了其对应的装药方式会使得储藏在炸药中的能量能够较均匀的分配在待爆破岩体中,也就代表了该种装药方式较同组的装药方式更为合理。

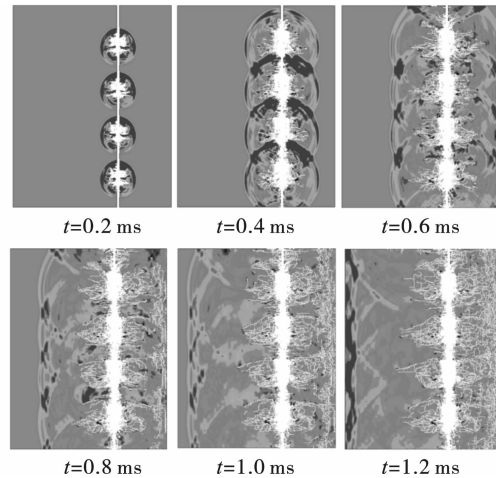


图 3 模型应力与失效演化图

Fig. 3 Model stress and failure evolution diagram

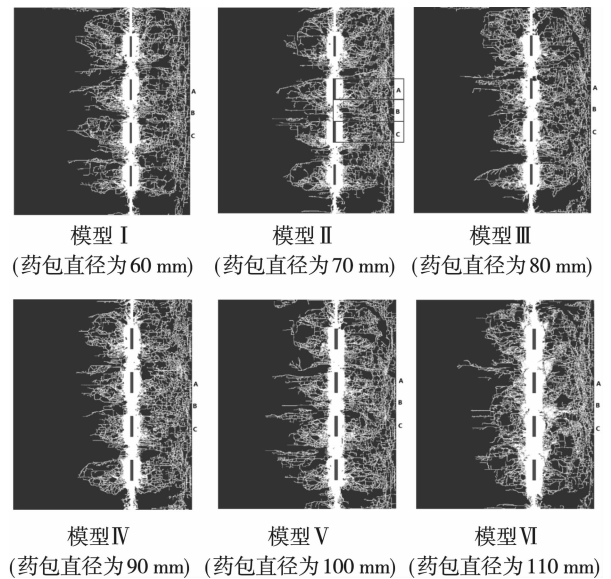


图 4 六种模型的最终失效图

Fig. 4 Final failure diagram of the six models

在后处理中,可统计得到研究区域的体积变化情况,其中体积减少量就是因失效而删除的单元总体积。失效体积与研究区域总体积的比值就是失效比例。设置显示了最大值与最小值,可得到损伤体积的变化。最大值是选中模型研究区域的初始体积,即模拟运算开始之前的体积,最小值是经过 1.2 ms 失效运算后对应区域的体积,二者相减就可以得到失效的体积,其单位是立方米。将六组模型依次操作,可得到表 6。

表 6 径向模型失效表(单位: $\text{m}^3$ )  
Table 6 Radial model failure table( unit: $\text{m}^3$ )

组编号		模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV	模型 V	模型 VI
整体区域	原有	4.400E-2	4.400E-2	4.400E-2	4.400E-2	4.400E-2	4.400E-2
	剩余	3.176E-2	2.983E-2	2.783E-2	2.738E-2	2.681E-2	2.344E-2
	失效	1.225E-2	1.418E-2	1.618E-2	1.662E-2	1.719E-2	2.056E-2
	比例/%	27.83	32.22	36.76	37.78	39.06	46.73
A 区域	原有	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2
	剩余	9.999E-3	9.025E-3	8.847E-3	8.483E-3	8.489E-3	7.942E-3
	失效	4.001E-3	4.975E-3	5.513E-3	5.517E-3	5.511E-3	6.059E-3
	比例/%	28.58	35.53	36.81	39.41	39.36	43.28
B 区域	原有	1.600E-2	1.600E-2	1.600E-2	1.600E-2	1.600E-2	1.600E-2
	剩余	1.187E-2	1.113E-2	1.034E-2	1.003E-2	9.951E-3	8.168E-3
	失效	4.129E-3	4.867E-3	5.660E-3	5.970E-3	6.049E-3	7.832E-3
	比例/%	25.81	30.42	35.38	37.31	37.80	48.95
C 区域	原有	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2	1.400E-2
	剩余	1.012E-2	8.993E-3	8.925E-3	8.466E-3	8.701E-3	7.326E-3
	失效	3.882E03	5.007E-3	5.075E-3	5.535E-3	5.299E-3	6.674E-3
	比例/%	27.73	35.76	36.25	39.53	37.85	47.67

通过数学运算求出三个小区域的方差  $S_1$  与三个区域和整体区域之间差值的方差  $S_2$  可得到表 7。

表 7 方差表  
Table 7 Variance table

组编号	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV	模型 V	模型 VI
$S_1$	1.342	6.076	0.346	1.039	0.558	5.895
$S_2$	0.636	0.596	0.304	0.333	0.160	0.105

由表 6 看出,在模型 I 中 B 区域的失效比例最小,只有 25.81%,A、C 和整体区域不到 29%,而整个表格的失效比例几乎都集中在 32% 以上,通过分析把 32% 这个数据当作一个标准,当失效比例小于 32% 时候,就代表该区域破碎程度不足,即爆破效果较差。失效比例小于 32% 的有模型 I 径和模型 II 的 B 区域。同时,表 7 的计算结果表明,模型 I、II 直径药包的不同区域的失效比例差别较大,也就是侧面反映出该种直径下的药包在能量分配上效果较差,中间空气间隔部分的岩体破碎不彻底,甚至造成大块,因此在径向上首先排除了模型 I、II 三种方案。至于模型 IV、VI,三个小区域方差  $S_1$  与整体区域  $S_2$  数值差距较大,说明炸药层和空气层分布的能量不均匀,炸药层能量过于集中,这就会增加粉矿的产生,在空气层能量有不足反而产生大块。

### 1.5 裂纹交错块度及粉矿分析

模型失效演化图 4 中,随着时间推移,单元逐渐失效并有类似裂纹“扩张”的特点,因此可以把失效单元区域近似地认为是岩石在爆破作用下形成的“爆破裂纹”,这些“爆破裂纹”相互交错,就会形成

一块一块的独立区域,这些由数值模拟结果产生的独立区域与实际工程装药爆破产生的爆破块度有密切的联系并具有高度相似性。因此,在文中利用这些独立区域来“代替”实际爆破块度。选取各个模型的 ABC 整体区域作为研究区域,导出研究区域的高清最终失效图。失效图再导入块度处理系统中<sup>[20]</sup>,通过块度处理系统的自动识别和人工手动修正,即可得到如图 5 所示的可以计算统计的图片。再利用块度处理系统的统计分析功能就可以得到对应研究区域的块度分布统计数据,且数据可以导出。模型单元大小为 1 mm,将六组模型的最终失效图分别导入块度处理系统,将一个单元格标定为一个像素点,可得到块度分布数据如下。

由表 8 可知,随着药包直径的增加,X20 逐渐减小,反映出药包直径增加,会使爆破块度更加细化破碎;X50 逐渐减小但到了 110 mm 直径模型又略微反弹;X80 以及 Max 最大块先是逐渐减小,到了 100 mm 模型和 110 mm 直径模型时急剧增大,说明随着药包直径变大,岩石爆破破碎程度增加,但是在 100 mm 药包直径和 110 mm 药包直径(全耦合)装

药情况下的破碎块度分布极为不合理,且最大块度尺寸达 755 mm,对于该系列模拟实验认定为超大块。为方便观察,将表中数据绘制块度累积尺寸分布曲线如下。

图 6 中模型 V 和模型 VI 的曲线, X20 小而 X80 大,表明其块度主要集中在小尺寸和大尺寸的块度上,均匀性较差。炸药爆炸后由于不耦合的空气不足甚至没有,致使在炸药近区消耗过多能量用于破碎形成小尺寸块度(粉矿),而在炸药远区能量不足形成较多的大尺寸块度(大块)。模型 I 的块度整体都比较大,虽说降低了小尺寸块度(粉矿),但是

易产生较大尺寸块度。

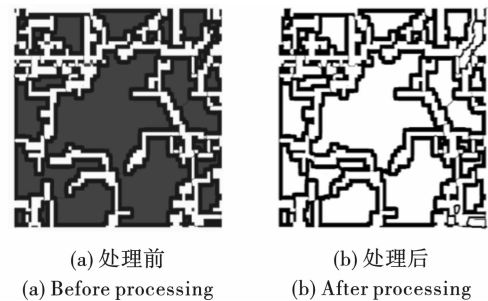


图 5 块度分析图

Fig. 5 Block analysis chart

表 8 块度尺寸分布表  
Table 8 Block size distribution table

尺寸/ mm	比例/%					
	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV	模型 V	模型 VI
30	0.13	0.53	0.50	0.64	0.67	0.67
50	0.55	2.00	1.96	2.08	2.86	3.44
70	1.31	4.12	4.06	6.46	7.18	9.13
100	3.15	7.87	8.24	14.94	17.89	20.58
150	8.85	16.19	21.45	27.27	38.06	37.89
200	17.41	26.51	35.74	42.05	53.20	49.35
250	27.47	36.74	50.11	58.67	64.03	56.11
300	38.01	48.13	66.29	74.57	73.06	60.17
350	48.44	60.23	78.58	87.97	81.39	64.07
400	58.75	70.32	88.55	95.20	88.03	68.03
450	68.61	75.59	95.16	98.83	93.00	72.19
475	73.10	79.99	97.41	99.83	94.80	74.51
500	77.48	83.89	98.41	100.00	96.02	76.92
525	81.46	87.13	99.12	100.00	97.17	79.39
550	85.14	89.82	99.84	100.00	98.25	81.85
575	88.10	92.37	100.00	100.00	99.25	84.30
600	90.94	94.46	100.00	100.00	100.00	86.70
650	95.34	96.63	100.00	100.00	100.00	91.25
700	98.29	100.00	100.00	100.00	100.00	95.42
X20/mm	213.11	175.48	143.52	126.07	105.02	98.56
X50/mm	357.61	319.17	250.68	224.95	187.84	203.61
X80/mm	515.76	452.74	358.29	320.54	341.20	531.22
Max/mm	724.57	648.91	552.68	478.83	581.45	755.17

由于不同情况下粉矿和大块的界定标准不一样,因此只有同一情况下的系列试验才具有可比性。据此本文采用卢文波等提出的关于块度处理的“两边法则”<sup>[20]</sup>,该法则具体操作步骤是:在图 6 中分别做过点(0,20)与点(0,80)垂直于 y 轴的射线,取过点(0,20)的射线与图 6 中曲线的第一个交点为粉矿上界,取过点(0,80)的射线与图 6 中曲线的最后一个交点为大块下界,如图 6 所示,据此得出六个模型的块度和分布比例,如表 9 所示,此结果虽然不能

真是代表实际爆破的结果,但在反映趋势与揭示规律方面为定量评价爆破破碎块度效果提供了一定的参考依据并具有高度合理性。

观察表 9 可知,表中模型 I 虽然粉矿率较低,但是大块率高达 17.60%;相反地,模型 V 的大块率较低但是粉矿率又太高;以及模型 VI 的粉矿率和大块率都是同类型最高的。此三种药包直径首先便可排除。型 III 与模型 II 的粉矿率最大相差 1% 左右,但大块率相差在 9% 以上,也可排除模型 II。模型 III

的粉矿数量少于与模型Ⅳ的粉矿数量, 两者大块率都在合理范围内。结合上文单元失效综合考虑可得出, 模型Ⅲ为最优方案。

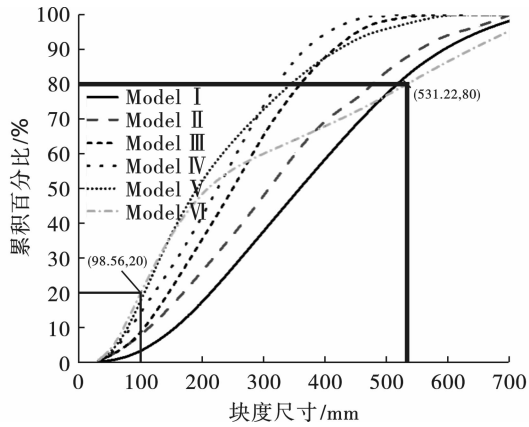


图 6 块度尺寸累计分布曲线

Fig. 6 Cumulative distribution curve of block size

表 9 粉矿、大块尺寸分布比例表

Table 9 Magnesium ore, large size distribution ratio table

组编号	粉矿		大块	
	粉矿上界尺寸/mm	比例/%	大块下界尺寸/mm	比例/%
模型 I	98.56	3.04	531.22	17.60
模型 II	98.56	7.63	531.22	9.22
模型 III	98.56	7.97	531.22	0.68
模型 IV	98.56	8.54	531.22	0
模型 V	98.56	17.30	531.22	2.55
模型 VI	98.56	20.01	531.22	20.01

## 2 工程实例

通过现场实地调查研究发现, 爆破块度尺寸小于 3 cm 不利于铲装, 易造成损失, 且对于含硫矿石极易发生板结现象, 因此将块度尺寸为 3 cm 定义为粉矿上界。将本文研究成果运用于矿山实验采场进行爆破试验, 图 7 为采场爆破效果图, 图中参考物为矿泉水瓶(水瓶尺寸: 瓶盖直径为 3 cm; 瓶底直径为 5.5 cm; 高为 18 cm)。从图 7(a) 为改善前采场爆破效果图, 采场采用直径为 90 mm 药包进行装药, 炸药单耗 0.22 kg/t 爆破后块度小于 3 cm 的较多, 矿石爆破后较为破碎, 粉矿数量较多。图 7(b) 为改善后采场爆破效果图, 采场爆破使用直径为 80 mm 药包, 炸药单耗 0.18 kg/t, 改善后的爆破块度 3 cm 以下的数量明显减少, 块度多数处于 5.5 ~ 18 cm 且大块率少, 块度大小分布较为均匀, 很好的满足矿山生产需求, 减少开采损失。

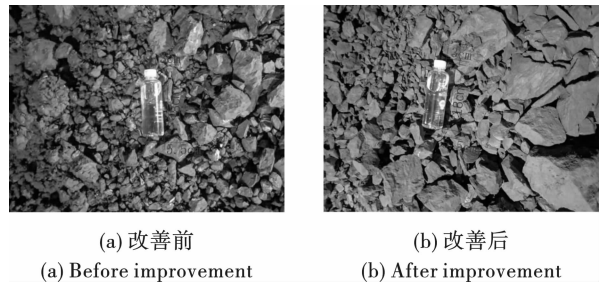


图 7 爆破效果图

Fig. 7 Blasting effect diagram

## 3 结论

(1) 采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件, 对 6 组模型( I ~ VI) 进行数值模拟, 通过对选定区域的单元失效比例分析发现, 随着装药药包直径从 90 mm 增大到 110 mm, 其整体区域单元失效比例增大, 岩体破碎程度逐渐提高。药包直径为 80 mm 时, 三个小区域方差  $S_1$  与整体区域  $S_2$  数值差值小, 炸药层和空气层分布的能量较为均匀。

(2) 运用块度处理系统对 6 组( I ~ VI) 模型数值模拟的裂纹进行处理以进一步块度分析, 研究结果表明: 随着装药药包直径从 90 mm 增大到 110 mm, 其粉矿率占比逐渐提高, 大块率占比先降低再提高。药包直径为 80 mm, 90 mm 时, 粉矿率比例小, 大块率在合理范围内, 且块度分布均匀。文章从粉矿角度出发, 综合全文考虑优选直径为 80 mm 药包为最佳装药方案。

(3) 将确定的最佳装药药包直径应用于实际采场爆破, 得到较好的爆破效果, 矿山爆破过程中产生的粉矿数量明显降低且大块少, 块度分布较为均匀, 表明调整装药药包直径来控制粉矿产出率有十分明显的优势, 可为解决类似矿山问题提供一定的参考依据。

## 参考文献 (References)

[1] 李新平, 陈萍萍, 罗 忆, 等. 非对称不耦合装药结构对预裂爆破效果的影响[J]. 爆破, 2017, 34(3): 25-30.  
 [1] LI Xin-ping, CHEN Ping-ping, LUO Yi, et al. Effect of asymmetric uncoupled charge structure on pre-splitting blasting effect[J]. Blasting, 2017, 34(3): 25-30. (in Chinese)  
 [2] 成雪纯, 李泽华, 张昌锁. 岩体爆破块度控制与工程应用研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(9): 3-5.  
 [2] CHENG Xue-chun, LI Ze-hua, ZHANG Chang-suo. Study on block control and engineering application of rock mass blasting[J]. Coal Technology, 2015, 34(9): 3-5. (in Chinese)

- nese)
- [3] 王 铁. 降低碎石粉矿率的爆破技术改进方法探讨[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2017, 15(4): 61-63.
- [3] WANG Tie. Discussion on improvement method of blasting technology for reducing crushed stone powder mine rate [J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2017, 15(4): 61-63. (in Chinese)
- [4] 刘 慧, 冯叔瑜. 炸药单耗对爆破块度分布影响的理论探讨[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4): 359-362.
- [4] LIU Hui, FENG Shu-yu. Theoretical study on the influence of explosive unit consumption on the distribution of blasting block degree [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(4): 359-362. (in Chinese)
- [5] ZHU Z. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(6): 1088-1096.
- [6] 林爱民, 马增光, 徐全军, 等. 台阶爆破抵抗线对块度影响试验研究[J]. 工程爆破, 2006, 12(2): 36-39.
- [6] LIN Ai-min, MA Zeng-guang, XU Quan-jun, et al. Experimental study on the influence of step blasting resistance line on blockiness [J]. Engineering Blasting, 2006, 12(2): 36-39. (in Chinese)
- [7] 邢光武, 郑炳旭. 特大型采石场粉矿率控制研究[J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(3): 77-79.
- [7] XING Guang-wu, ZHENG Bing-xu. Research on the control of fine ore rate in extra large quarry [J]. Mining Research and Development, 2009, 29(3): 77-79. (in Chinese)
- [8] 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): 21-28.
- [8] HUO Xiao-feng, SHI Xiu-zhi, GOU Yong-gang. Simulation and parameter optimization of blasting crack propagation in edge control [J]. Blasting, 2019, 36(1): 21-28. (in Chinese)
- [9] 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.
- [9] LIANG Wei-min, LIU Hong-yuan, ZHOU Feng-jun. Influence of uncoupled charge structure on rock blasting [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(12): 1215-1218, 1228. (in Chinese)
- [10] 刘玲平, 唐 涛, 李萍丰. 装药结构对台阶爆破粉矿率的影响研究[J]. 采矿技术, 2010, 10(1): 67-70.
- [10] LIU Ling-ping, TANG Tao, LI Ping-feng. Study on the effect of charging structure on the rate of powder blasting in step blasting [J]. Mining Technology, 2010, 10(1): 67-70. (in Chinese)
- [11] 刘优平, 龚 敏, 黄刚海. 深孔爆破装药结构优选数值分析方法及其应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1883-1888.
- [11] LIU You-ping, GONG Min, HUANG Gang-hai. Optimal numerical analysis method and application of deep hole blasting charge structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1883-1888. (in Chinese)
- [12] 郭连军, 董丰德, 张大宁, 等. 大连石灰石新矿爆破优化试验研究[J]. 爆破, 2012, 29(3): 45-49.
- [12] GUO Lian-jun, DONG Feng-de, ZHANG Da-ning, et al. Experimental study on blasting optimization of Dalian limestone new mine [J]. Blasting, 2012, 29(3): 45-49. (in Chinese)
- [13] 顾文彬, 王振雄, 陈江海, 等. 装药结构对爆破震动能量传递及爆破效果影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 207-211.
- [13] GU Wen-bin, WANG Zhen-xiong, CHEN Jiang-hai, et al. Study on the effect of charge structure on blasting vibration energy transfer and blasting effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 207-211. (in Chinese)
- [14] 宗 琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(4): 641-645.
- [14] ZONG Qi, MENG De-jun. Theoretical discussion on the influence of different charge structures of blast hole on blasting energy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(4): 641-645. (in Chinese)
- [15] 孙从煌, 曲艳东, 孔祥清, 等. 岩石介质中双孔爆破效应的数值模拟研究[J]. 爆破, 2017, 34(3): 37-45, 130.
- [15] SUN Cong-huang, QU Yan-dong, KONG Xiang-qing, et al. Numerical simulation of double-hole blasting effect in rock media [J]. Blasting, 2017, 34(3): 37-45, 130. (in Chinese)
- [16] 曲艳东, 吴 敏, 孔祥清, 等. 深孔连续与间隔装药爆破数值模拟研究[J]. 爆破, 2014, 31(4): 16-21, 81.
- [16] QU Yan-dong, WU Min, KONG Xiang-qing, et al. Numerical simulation of continuous and interval charge blasting in deep holes [J]. Blasting, 2014, 31(4): 16-21, 81. (in Chinese)
- [17] Century Dynamics Inc. Autodyn theory manual [J]. Concord, CA; 2003.
- [18] WANG Z L, LI Y C, SHEN R F. Numerical simulation of tensile damage and blast crater in brittle rock due to underground explosion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(5): 730-738.
- [19] 吕 林, 尹 君, 胡振襄. 基于图像处理岩体块度分析系统[J]. 金属矿山, 2011(2): 118-121.

- [19] LV Lin, YIN Jun, HU Zhen-xiang. Rock mass analysis system based on image processing [J]. *Metal Mine*, 2011(2):118-121 (in Chinese)
- [20] 卢文波. 岩石爆破中应力波的传播及其效应研究 [D]. 武汉:武汉水利电力大学, 1994.
- [20] LU Wen-bo. Study on the propagation of stress wave and its effect in rock blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1994. (in Chinese)
- [21] 霍晓锋, 苟永刚, 成涌, 等. 铜绿山矿中深孔掏槽爆破参数优化研究 [J]. *矿冶工程*, 2019, 39(5):17-21.
- [21] HUO Xiao-feng, GOU Yong-gang, CHENG Yong, et al. Study on optimization of blasting parameters for medium and deep hole trenching in Tonglushan Mine [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(5):17-21. (in Chinese)

英文编辑:何松

(上接第33页)

- [13] 陈坤鑫, 韩雪靖, 杨嘉颖, 等. 一定深度水下爆破冲击波衰减规律的研究 [J]. *矿业工程*, 2018, 16(4):52-55.
- [13] CHEN Kun-xin, HAN Xue-jing, Yang Jia-ying, et al. Study of attenuation law of surge wave of blasting in certain depth underwater [J]. *Mining Engineering*, 2018, 16(4):52-55. (in Chinese)
- [14] 叶海旺, 袁尔君, 雷涛, 等. 基于量纲分析的爆破振动质点峰值速度预测公式 [J]. *金属矿山*, 2019(5):56-61.
- [14] YE Hai-wang, YUAN Er-jun, LEI Tao, et al. Blasting vibration peak particle velocity prediction formula based on dimensional analysis method [J]. *Metal Mine*, 2019(5):56-61. (in Chinese)
- [15] 刘达, 卢文波, 陈明, 等. 隧洞钻爆开挖爆破振动主频衰减公式研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(9):28-39.
- [15] LIU Da, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Attenuation formula of the dominant frequency of blasting vibration during tunnel excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(9):28-39. (in Chinese)
- [16] 蒋楠, 周传波, 平雯, 等. 岩质边坡爆破振动速度高程效应 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014(1):237-243.
- [16] JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, PING Wen, et al. Altitude effect of blasting vibration velocity in rock slopes [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014(1):237-243. (in Chinese)
- [17] 彭亚雄, 吴立, 苏莹, 等. 考虑高程效应的水下爆破振动衰减拟合模型研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(13):173-178.
- [17] PENG Ya-xiong, WU Li, SU Ying, et al. Fitting models of underwater blasting vibration attenuation considering effects of elevation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(13):173-178. (in Chinese)
- [18] 汪旭光. 爆破手册 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- [19] 朱传统, 刘宏根, 梅锦煜. 地震波参数沿边坡坡面传播规律公式的选择 [J]. *爆破*, 1988(2):33-34.
- [19] ZHU Chuan-tong, LIU Hong-gen, MEI Jin-yu. Selection of formula on propagation of the parameters of explosive seismic wave along slope [J]. *Blasting*, 1988(2):33-34. (in Chinese)
- [20] 周文海, 梁瑞, 余建平, 等. 边坡抛掷爆破峰值质点振动速度的无量纲分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5):76-83.
- [20] ZHOU Wen-hai, LIANG Rui, YU Jian-ping, et al. Dimensionless analysis on peak particle vibration velocity induced by slope casting blast [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5):76-83. (in Chinese)
- [21] 程康, 章昌顺. 相似理论在深孔梯段爆破飞石距离计算中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2000(2):182-185.
- [21] CHENG Kang, ZHANG Chang-shun. Application of similarity theory in distance estimation of flyrock from deep-hole blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000(2):182-185. (in Chinese)
- [22] BUCKINGHAM E. On physically similar system; illustration of the use of dimensional analysis [J]. *Physical Review*, 1914, 4(4):345-376.
- [23] 谈庆明. 量纲分析 [M]. 北京:中国科学技术大学出版社, 2005:1-18.
- [24] 刘殿中. 工程爆破手册 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1999:217-233.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB6722—2003 爆破安全规程 [S]. 北京:中国标准出版社, 2004:23.

英文编辑:柯波