

doi: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.03.011

## 炸药单耗对赤铁矿爆破块度的影响 规律数值模拟研究\*

郑炳旭<sup>1</sup> 冯 春<sup>2</sup> 宋锦泉<sup>1</sup> 郭汝坤<sup>2</sup> 李世海<sup>2</sup>

(1. 广东宏大爆破股份有限公司, 广州 510623;

2. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

**摘 要:** 通过在连续-非连续单元方法(CDEM)中引入朗道点火爆炸模型及岩体塑性-损伤-断裂模型, 实现了赤铁矿爆破破碎过程的模拟。提出了 5 个评价爆破后块度分布特征的指标, 分别为平均破碎尺寸( $d_{50}$ )、极限破碎尺寸( $d_{90}$ )、块体不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ )、系统破裂度( $F_r$ )及大块率( $B_r$ )。基于 CDEM 方法及上述 5 个评价指标, 分析了改变炮孔直径、改变间排距等两种改变炸药单耗的方式对赤铁矿爆破块度的影响规律。数值计算结果表明: 随着炸药单耗的增大, 赤铁矿的破碎尺寸逐渐减小; 相同炸药单耗情况下, 改变炮孔直径的破碎效果略优于改变间排距的破碎效果。在双对数坐标下, 随着炸药单耗的增大, 平均破碎尺寸( $d_{50}$ )及极限破碎尺寸( $d_{90}$ )均线性减小; 采用衰减型幂函数进行了拟合, 给出了平均破碎尺寸( $d_{50}$ )及极限破碎尺寸( $d_{90}$ )与炸药单耗间的函数关系。随着炸药单耗的增加, 块体不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ )及系统破裂度( $F_r$ )均逐渐增大, 而大块率( $B_r$ )则迅速减小。当炸药单耗大于 0.25 kg/t 时, 大块率( $B_r$ )已经小于 0.5%; 当炸药单耗超过 0.6 kg/t 时, 大块率( $B_r$ )为 0.0%。

**关键词:** 爆破开采; 数值模拟; 炸药单耗; 块度分布; 大块率

**中图分类号:** O625 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2015)03-0062-08

## Numerical Study on Relationship between Specific Charge and Fragmentation Distribution of Hematite

ZHENG Bing-xu<sup>1</sup>, FENG Chun<sup>2</sup>, SONG Jin-quan<sup>1</sup>, GUO Ru-kun<sup>2</sup>, LI Shi-hai<sup>2</sup>

(1. Guangdong Hongda Blasting Co Ltd, Guangzhou 510623, China;

2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems,  
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** By introducing Landau blasting model and rock plastic-damage-fracture model into Continuum Discontinuum Element Method(CDEM), the simulation of hematite fragmentation process under blasting load was realized. Five indicators to evaluate the block distribution feature after blasting were proposed, including the average fragmentation size( $d_{50}$ ), ultimate fragmentation size( $d_{90}$ ), block nonuniform coefficient( $d_{90}/d_{50}$ ), system fracture degree( $F_r$ ) and large block ratio( $B_r$ ). Based on CDEM and the five evaluation indicators, the relationship between specific charge and fragmentation distribution characteristic was studied. Two ways to change the specific charge was discussed on changing bore hole diameter and changing row & column distance. Numerical results show that, with the increase of specific charge, the hematite fragmentation size decreased gradually; with the same specific charge, the fragmentation quality obtained from changing bore hole diameter was better than which from changing row & column distance. In double logarithmic coordinates, with the increase of specific charge, average fragmentation size( $d_{50}$ ) and ultimate fragmentation size( $d_{90}$ ) all decreased linearly, and decaying power function was used to fit the relationship between  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  and specific charge. With the increase of specific charge, the block nonuniform coefficient( $d_{90}/d_{50}$ ) and system fracture degree( $F_r$ ) all increased gradually, while the large block ratio( $B_r$ ) decreased sharply. When the specific

charge was larger than 0.25 kg/t, the large block ratio ( $B_r$ ) was less than 0.5%; while the specific charge exceeded 0.6 kg/t, the large block ratio ( $B_r$ ) turned to be zero.

**Key words:** blasting mining; numerical simulation; specific charge; block distribution; large block ratio

爆破开采因其开采速度快、开采成本低等特点,已成为我国露天铁矿开采的主要模式。爆破后铁矿石的块度分布是定量评价爆破质量的重要指标,他影响到矿山各后续生产工序的效率和采矿生产的总成本。因此,需要深入研究炸药单耗、装药结构、孔网参数及起爆顺序等爆破参数对爆破块度的影响规律,并提出可用于爆破设计的爆破块度预测模型。目前,爆破块度分布规律的预测模型主要包括理论模型、经验模型及人工智能模型等三个方面。

在理论模型方面, Margolin 等人提出了一种基于 Griffith 能量原理的层状裂缝模型(BCM 模型),可对岩体中的应力波传播、破坏及破碎进行分析<sup>[1]</sup>;该模型将爆区划分为若干单元,并假定单位体积内的裂缝数目服从指数分布。邹定祥根据应力波理论及岩石的断裂能,给出了均质连续弹性台阶岩体的爆破块度分布计算模型,即 BMMC 模型<sup>[2]</sup>。陈运轩通过对岩石爆破破碎过程的分析,推出了炸药单耗与各种爆破块度之间的定量关系式<sup>[3]</sup>。刘慧等基于爆破块度分布的分形特征,从理论上推导了炸药单耗与爆破块度分布均匀性指数的关系<sup>[4]</sup>。

在经验模型方面, C Cunningham 提出了 KUZ-RAM 模型,该模型以 Kuznetsov 公式为基础,认为爆破后的块度服从 R-R 分布,其分布参数(均匀性指数和特征块度)可由爆破参数计算确定<sup>[5]</sup>。Mario 等将蒙特卡洛方法与 KUZ-RAM 模型相结合,并开发了相应的计算程序,用于爆破效果的分析计算<sup>[6]</sup>。Faramarzi 等提出了一种基于岩石工程系统的爆破块度预测新模型,该模型共包含 16 个输入参数,通过 30 多次实际爆破结果的对比分析,证明了该模型的预测精度<sup>[7]</sup>。近年来,广东宏大爆破股份有限公司将 Kuz-Ram 模型运用于国内多处露天矿爆破开采工地,积累了大量的经验,并提出利用岩石强度、岩石种类、裂隙平均间距、炸药单耗、爆破漏斗参数和爆破块度分布指数等六项指标进行采石场爆

破块度分区的方法<sup>[8,9]</sup>。

在人工智能模型方面, Monjezi 等基于模糊推理系统及人工神经网络,先后提出了两个可用于爆破块度预测及飞石预测的模型<sup>[10,11]</sup>。段宝福等建立了爆破块度预测的神经网络模型,并通过与 R-R 分布式和 G-G-S 经验模型比较,验证了利用神经网络模型预测爆破块度的可靠性<sup>[12]</sup>。

总体而言,国内外的专家学者利用理论公式、经验公式、人工智能等对露天铁矿爆破块度的分布特征进行了深入研究,但利用数值模拟直接获得爆破块度分布规律的研究较少。因此,利用连续-非连续单元方法(CDEM),重点探讨了炸药单耗对赤铁矿爆破块度的影响规律,并详细探讨了平均破碎尺寸( $d_{50}$ )、极限破碎尺寸( $d_{90}$ )、块体不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ )、系统破裂度( $F_r$ )及大块率( $B_r$ )等 5 个指标与炸药单耗间的内在联系<sup>[13,14]</sup>。

## 1 数值方法及力学模型

### 1.1 CDEM 简介

数值模拟主要采用连续-非连续单元方法(CDEM)进行。CDEM 方法是一种将有限元与离散元进行耦合计算,通过块体边界及块体内部的断裂来分析材料渐进破坏过程的数值模拟方法。CDEM 中包含块体及界面两个基本概念,块体由一个或多个有限元单元组成,用于表征材料的连续变形特征;界面由块体边界组成,通过在块体边界上引入可断裂的一维弹簧实现材料中裂纹扩展过程的模拟。

CDEM 方法的控制方程为质点运动方程,并采用基于增量方式的显式欧拉前差法进行动力问题的求解,在每一时步包含有限元的求解及离散元的求解等两个步骤,整个计算过程中通过不平衡率表征系统受力的平衡程度。

### 1.2 爆源模型

爆源模型主要采用朗道点火爆炸模型,该模型的输入参数包括装药密度、炸药爆速、爆热及点火点位置。该模型主要基于朗道-斯坦纽科维奇公式( $\gamma$  率方程),为

$$\left. \begin{aligned} PV^\gamma &= P_0 V_0^\gamma, P \geq P_k \\ PV^{\gamma_1} &= P_k V_k^{\gamma_1}, P < P_k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\gamma = 3$ ;  $\gamma_1 = 4/3$ ;  $P$ 、 $V$  分别为高压气球的瞬态压力和体积;  $P_0$ 、 $V_0$  分别为高压气球初始时刻的压力和

收稿日期: 2015-07-15

作者简介: 郑炳旭(1959-),男,教授、博士生导师、董事长,主要从事采矿和爆破方面的研究工作,(E-mail) zhengbx@vip.163.com。

通讯作者: 冯春(1982-),男,助理研究员、博士研究生,主要从事岩土力学领域数值计算方法的研究,(E-mail) fengchun@imech.ac.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(11302230)资助;广东宏大爆破股份有限公司“基于数字模拟的露天爆破设计软件”研发项目资助

药包的体积  $P_k$ 、 $V_k$  分别为高压气球在两段绝热过程边界上的压力和体积。 $P_k$  的表达式为

$$P_k = P_0 \left\{ \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma - \gamma_1} \left[ \frac{(\gamma - 1) Q_w \rho_w}{P_0} - 1 \right] \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2)$$

式中:  $Q_w$  为炸药爆热 J/kg;  $\rho_w$  为装药密度 kg/m<sup>3</sup>。

$P_0$  的表达式为

$$P_0 = \frac{\rho_w D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (3)$$

式中  $D$  为爆轰速度 m/s。

采用到时起爆的方式模拟点火过程及爆轰波在炸药内的传播过程。设某一炸药单元到点火点的距离为  $d$  ,炸药的爆速为  $D$  ,则点火时间为  $t_1 = d/D$  。当爆炸时间  $t > t_1$  时 ,该单元才根据式 (1) 进行爆炸压力的计算。

程序实现时 ,首先根据式 (1) 计算单元爆炸压力 ,而后将该压力转换为单元节点力 ,累加各炸药单元贡献的节点力形成节点合力 ,根据牛顿定律计算节点的加速度、速度、位移 ,根据节点位移计算单元的当前体积 ,根据当前体积及式 (1) 计算下一时步的爆炸压力。

与围岩耦合计算时 ,如果围岩单元与炸药单元共节点 ,则炸药单元产生的爆炸压力通过公用节点自动作用到围岩体上;如果炸药单元与围岩节点独立 ,则需设定接触单元进行爆炸压力的传递 ,采用半弹簧接触模型实现相应的压力传递过程<sup>[15]</sup> ,计算过程中令切向耦合刚度为 0。

### 1.3 塑性-损伤-断裂模型

采用塑性-损伤-断裂模型来表征爆炸载荷下岩体的渐进破坏过程 ,该模型将岩体离散为单元及虚拟界面两部分 ,其中虚拟界面为两个单元的边界。单元的受力变形采用有限元进行计算 ,并在单元中引入 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型(含最大拉应力模型)表征爆炸载荷下岩体出现的塑性变形特征;虚拟界面的受力变形通过离散元(数值弹簧)实现 ,并在虚拟界面上引入考虑局部化过程的 Mohr-Coulomb 模型(含最大拉应力模型)实现岩体的损伤断裂过程。该模型的示意图如图 1 所示。

该模型的输入参数包括用于单元塑性变形计算的块体密度、弹性模量、泊松比、粘聚力、内摩擦角、抗拉强度、剪胀角 ,用于虚拟界面损伤断裂计算的法向刚度、切向刚度、粘聚力、内摩擦角、抗拉强度、拉伸极限应变、剪切极限应变。一般情况下 ,单元上的粘聚力、内摩擦角及抗拉强度取值与虚拟界面上的取值是一致的。

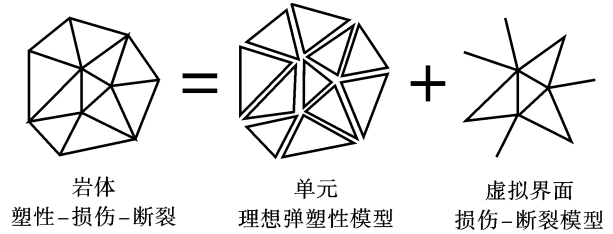


图 1 塑性-损伤-断裂模型

Fig. 1 Plastic-damage-fracture model

## 2 数值模拟

### 2.1 计算方案

炸药单耗是指每爆破一吨(t)矿岩石所消耗的炸药量(kg)。改变炸药单耗的方法有很多 ,主要探讨单纯改变炮孔直径或单纯改变间排距的情况下 ,引起的炸药单耗改变对爆破块度的影响规律。由于爆破的块度在分米量级 ,因此要求数值计算所用的网格尺寸在厘米量级 ,若建立全三维爆破数值模型 ,需要划分百万甚至千万量级的网格 ,如此巨大的网格量是目前计算机无法承受的。因此 ,采用二维平切面模型进行分析探讨 ,建立如图 2 所示的双临空面 4 炮孔数值模型。图 2 中炮孔的间排距、首排炮孔到临空面的距离均为  $L$  ,炮孔的直径为  $d$  ,模型的左侧及上侧为临空面 ,右侧及下侧为无反射边界。为了便于观察爆区内岩体的破碎情况 ,对爆区划分了 A、B、C、D 四个研究域。

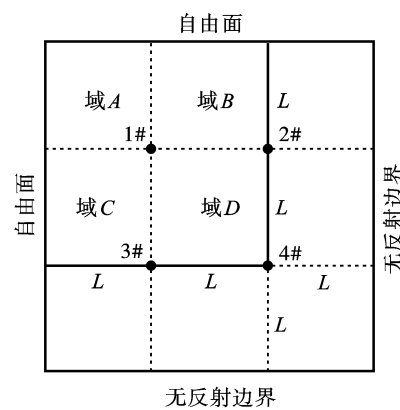


图 2 双自由面数值模型

Fig. 2 Two free surfaces numerical model

进行单纯改变炮孔直径的分析时 ,固定  $L$  为 6.5 m ,共研究 6 种炮孔直径 ,分别为 10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm 及 35 cm。采用 Gmsh 软件进行网格剖分 ,共剖分了约 19.2 万的三角形网格 ,其中炮孔附近网格尺寸约为 4 cm ,四周网格尺寸约为 10 cm。

进行单纯改变间排距的分析时,固定炮孔直径  $d$  为 25 cm,共研究 6 种间排距,分别为 3 m、5 m、6.5 m、8 m、10 m 及 12 m。采用 Gmsh 对上述六个计算模型进行网格剖分,6 种间距对应的三角形网格数分别为 4.1 万、11.4 万、19.2 万、28.9 万、45.3 万、64.7 万。

## 2.2 计算参数

炸药选用乳化炸药,采用朗道点火爆炸模型进行模拟。装药密度为  $1150 \text{ kg/m}^3$ ,爆轰速度为  $4250 \text{ m/s}$ ,爆热为  $3.4 \text{ MJ/kg}$ 。采用毫秒延时起爆技术,孔间延时 25 ms;起爆顺序为,1#炮孔先起爆,25 ms 后 2#、3#同时起爆,50 ms 以后 4#炮孔开始起爆。

岩石类型为赤铁矿,普氏系数为 15.4,采用塑性损伤-断裂模型进行模拟。单元的密度为  $3200 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 60 GPa,泊松比为 0.25,粘聚力为 36 MPa,抗拉强度为 12 MPa,内摩擦角为  $40^\circ$ ,剪胀角为  $10^\circ$ ;虚拟界面的单位面积法向及切向刚度均为 5000 GPa/m,粘聚力为 36 MPa,抗拉强度为 12 MPa,内摩擦角为  $40^\circ$ ,拉伸极限应变为 0.1%,剪切极限应变为 0.3%。

## 2.3 评价指标

为了对爆破后的块度分布特征进行全面地统计分析,提出了 5 个评价指标,分别为平均破碎尺寸( $d_{50}$ )、极限破碎尺寸( $d_{90}$ )、块体不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ )、系统破裂度( $F_r$ )及大块率( $B_r$ )。各指标的含义及获取方式如下:

(1) 平均破碎尺寸( $d_{50}$ ):块度分布曲线中通过率为 50%时对应的尺寸;该值越大,爆区内块体尺寸的平均值越大。

(2) 极限破碎尺寸( $d_{90}$ ):块度分布曲线中通过率为 90%时对应的尺寸;该值越大,爆区内的大块尺寸越大。

(3) 块体不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ ):极限破碎尺寸与平均破碎尺寸的比值;该值越小,块度分布越均匀;当该值为 1 时,表明通过率 50%到 90%之间的块体尺寸完全一致。

(4) 系统破裂度( $F_r$ ):已经发生破裂的虚拟界面面积与总虚拟界面面积的比值;该值越大,数值模型越破碎。

(5) 大块率( $B_r$ ):特征尺寸超过 0.9 m 的岩块体积与岩块总体积的比值。

## 3 计算结果分析

### 3.1 改变炮孔直径的影响

不同炮孔直径下,爆区内岩体的最终破碎效果如图 3 所示。由图可得,随着炮孔直径的增大,岩体破碎程度逐渐增加,在炮孔附近出现压剪型密集破碎带,在自由面附近出现张拉型密集破碎带。在炮孔与自由面之间,破碎程度较低,裂缝将该区域切割为大小不一的块体。直观分析, D 区域较其他区域破坏更为严重,这是由于四个炮孔先后起爆导致该区域反复挤压破碎的结果, B、C 区域由于对称关系,破坏程度基本一致, A 区域破坏程度最轻。

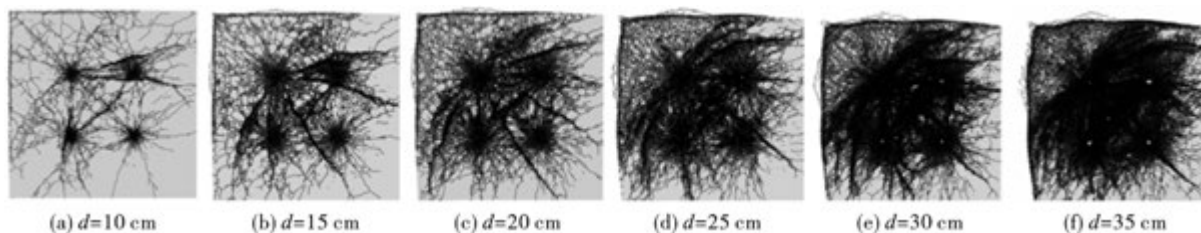


图 3 不同炮孔直径下爆破 75 ms 时的破碎效果

Fig. 3 Fragmentation status at 75 ms with different bore hole diameters

对区域 A 至区域 D 的爆破块度进行统计,获得不同炮孔直径下爆破块度的分布曲线如图 4 所示。由图可得,随着特征尺寸的增加,通过率逐渐增加;炮孔直径越大,通过率为 100%时的特征尺寸值越小。由图还可以看出,在对数坐标系下,随着炮孔直径的增加,分布曲线逐渐由下凹型转为上凸型;其中,直径为 10 cm、15 cm 时表现为下凹型,直径为 20 cm 时基本为线性,直径为 25 cm、30 cm 及 35 cm 时表现为上凸型。

数值模型的系统破裂度随爆炸时间的演化如图 5 所示。由图可得,随着爆炸时间的增加,破裂度逐渐增大;炮孔直径越大,终态时候的破裂度值也越大;当炮孔直径为 10 cm 时,终态的破裂度为 14.7%,当炮孔直径为 35 cm 时,终态的破裂度为 64.7%。从图中还可以清晰看出,存在三个时间段的集中爆炸,分别为 0 ms、25 ms 及 50 ms;每次爆破一开始,破裂度迅速增加,约 5 ms 以后,破裂度的增加趋势才逐渐变缓;由此可以推断,爆破对岩体的破

裂作用主要集中在爆破后 5 ms 时间内。

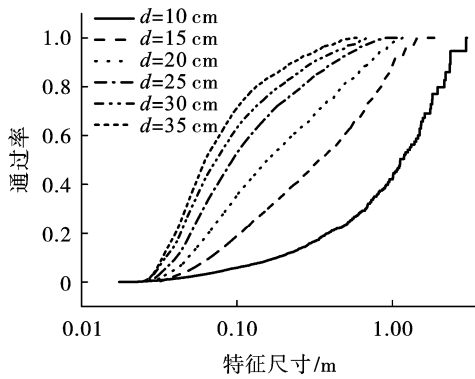


图 4 不同炮孔直径下爆破块度分布曲线  
Fig. 4 Fragmentation distribution curve with different bore hole diameters

破裂块度逐渐增大。当间排距为 3 m 时,爆区内岩体已经完全破碎,并出现了抛掷现象。当间排距为 12 m 时,仅在炮孔附近及自由面附近出现了较为密集的破碎带,两区中间的破裂块度较大。

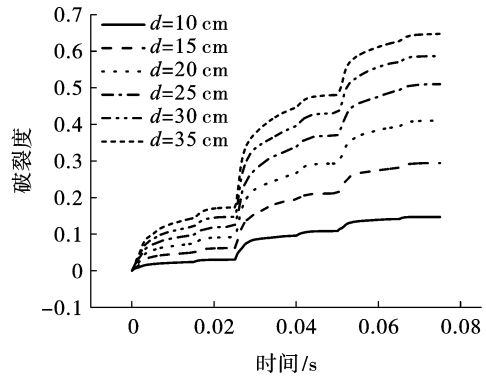


图 5 不同炮孔直径下破裂度时程曲线  
Fig. 5 Fracture degree history with different bore hole diameters

### 3.2 改变炮孔间排距的影响

爆破后 6 种间排距下的破碎状态如图 6 所示。由图可得,随着间排距的增加,破坏效应逐渐减弱,

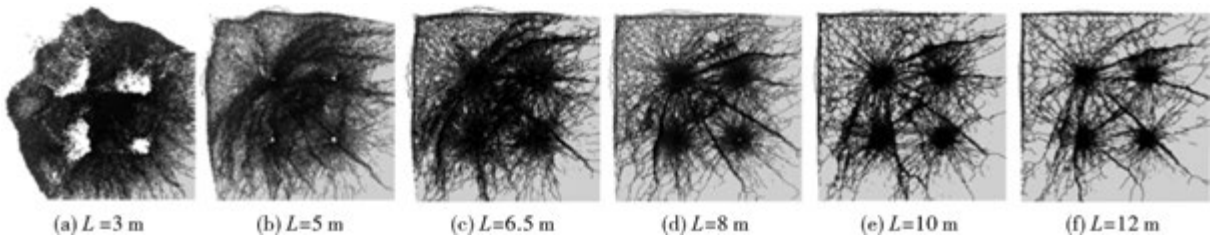


图 6 不同炮孔间排距在爆破 75 ms 时的破碎效果  
Fig. 6 Fragmentation status at 75 ms with different row & column distances

对区域 A 至区域 D 的爆破块度进行统计,获得不同间排距下的爆破块度分布曲线(如图 7 所示)。由图可得,随着特征尺寸的增加,通过率逐渐增加至 100%;间排距较大时( $L=10\text{ m}$ 、 $L=12\text{ m}$ ),分布曲线在对数坐标系下呈下凹型;间排距较小时( $L=3\text{ m}$ 、 $L=5\text{ m}$ 、 $L=6.5\text{ m}$ ),分布曲线在对数坐标系下呈上凸型;当间排距适中时( $L=8\text{ m}$ ),分布曲线在对数坐标系下呈直线型。由图还可以看出,间排距越小,爆破块度越均匀,总体尺寸越小;当间排距为 3 m 时,单块最大尺寸为 0.22 m;当间排距为 12 m 时,单块最大尺寸为 3.85 m。

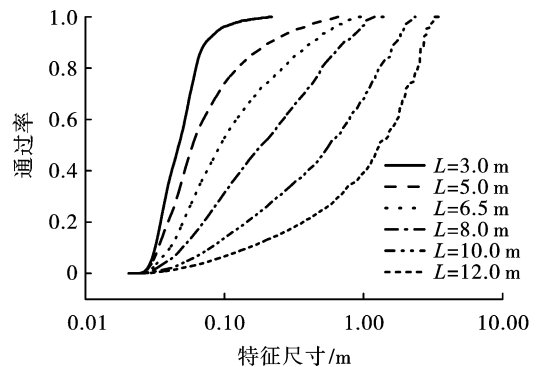


图 7 不同间排距下爆破块度分布曲线  
Fig. 7 Fragmentation distribution curve with different row & column distances

不同间排距下系统破裂度的时程曲线如图 8 所示。由图可得,随着爆破时间的增大,破裂度逐渐增大;存在三次破裂度的突变,分别发生在起爆后 0 ms、25 ms 及 50 ms,对应着三次孔内爆破;随着间排距的增加,终态的破裂度逐渐减小,间排距为 3 m 时的终态破裂度为 86.6%,间排距为 12 m 时对应的终态破裂度为 16.2%。

### 3.3 爆破块度分布规律对比分析

对炮孔直径引起的炸药单耗改变及间排距引起的炸药单耗改变进行对比分析,对比指标包括平均破碎尺寸( $d_{50}$ )、极限破碎尺寸( $d_{90}$ )、块体不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ )、系统破裂度( $F_r$ )、大块率( $B_r$ )等。由

于数值模型的最小单元尺寸为 4 cm,这意味着块体的最小破裂尺寸为 4 cm。因此,在实际统计过程中,当  $d_{50}$  或  $d_{90}$  的值小于 9 cm 时,该值将不进入统计范围。

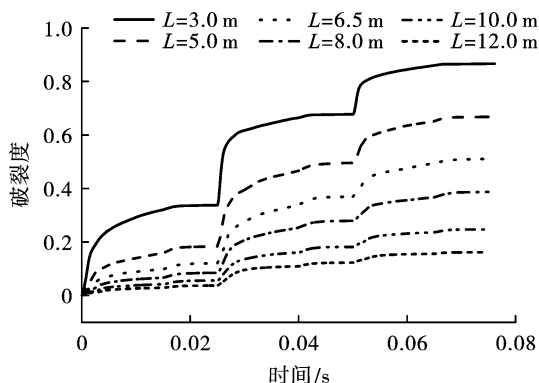


图 8 不同间排距下破裂度时程曲线  
Fig. 8 Fracture degree history with different row & column distances

两种情况下块体平均破碎尺寸随炸药单耗的变化如图 9 所示。由图可得,在双对数坐标下,爆破后的平均破碎尺寸随着炸药单耗基本呈线性变化;此外,为了实现某一特定的炸药单耗,改变炮孔直径可以获得更好的破碎效果。

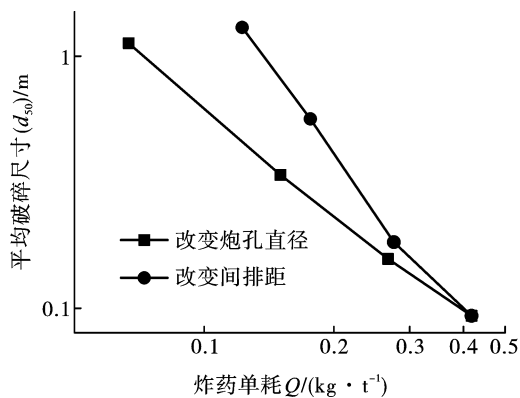


图 9 炸药单耗对平均破碎尺寸的影响  
Fig. 9 Relationship between average fragmentation size and unit explosive consumption

采用式(4)进行拟合,为

$$\log(y) = a \log(x) + b \quad (4)$$

式中:  $x$  为自变量(炸药单耗);  $y$  为因变量(平均破碎尺寸);  $a$ 、 $b$  为拟合系数。

改变孔径引起的单耗改变对平均破碎尺寸的影响如式(5)所示,改变间排距引起的炸药单耗改变对平均破碎尺寸的影响如式(6)所示。

$$d_{50} = 0.0269Q^{-1.36} \quad (5)$$

$$d_{50} = 0.0126Q^{-2.19} \quad (6)$$

式中,  $Q$  为炸药单耗  $\text{kg/t}$ 。

两种情况下的极限破碎尺寸随炸药单耗的变化如图 10 所示。由图可得,与平均破碎尺寸的规律一致,在双对数坐标下,极限破碎尺寸与炸药单耗也基本呈线性关系。在单耗较低时,改变炮孔直径获得的极限破碎尺寸优于改变间排距获得的尺寸;当单耗较高时,两种改变炸药单耗的方式获得的极限破碎尺寸基本一致。

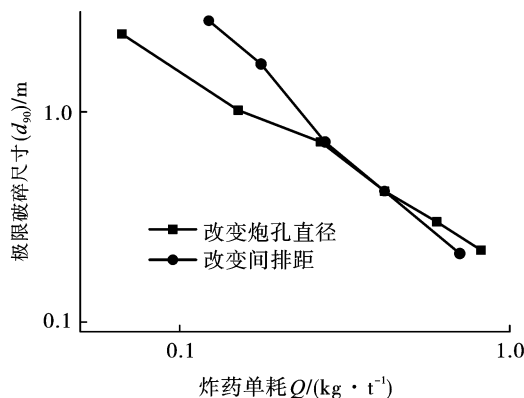


图 10 炸药单耗对极限破碎尺寸的影响  
Fig. 10 Relationship between ultimate fragmentation size and unit explosive consumption

同样采用式(4)进行拟合,得到极限破碎尺寸的计算公式为

$$d_{90} = 0.197Q^{-0.187}Q^{-0.933} \quad (7)$$

$$d_{90} = 0.119Q^{-1.486} \quad (8)$$

其中,式(7)反映了改变炮孔直径引起的炸药单耗改变对极限破碎尺寸的影响,式(8)反映了改变间排距引起的炸药单耗改变对极限破碎尺寸的影响。

由式(5)~式(8),可以计算出两种情况下块体的不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ )随炸药单耗的改变,分别为

$$d_{50}/d_{90} = 6.95Q^{0.427} \quad (9)$$

$$d_{90}/d_{50} = 9.44Q^{0.704} \quad (10)$$

其中,式(9)反映了炮孔直径的影响,式(10)反映了间排距的影响。

将式(9)及式(10)取离散点绘制成图,如图 11 所示。由图可得,随着炸药单耗的增大,块体的不均匀系数逐渐增大,单耗从 0.05  $\text{kg/t}$  增加至 0.8  $\text{kg/t}$  时,改变炮孔直径对应的不均匀系数从 1.9 增大至了 6.3,改变间排距对应的不均匀系数从 1.1 增大至了 8.1。

两种方式下系统破裂度随炸药单耗的变化如图 12 所示。由图可得,两种改变炸药单耗的方式所获得的规律基本一致,随着炸药单耗的增大,系统破裂

度逐渐增大,但增大趋势逐渐变缓。当炸药单耗从 0.07 kg/t 增大至 2 kg/t 时,系统破裂度从 15% 增加至 87%。

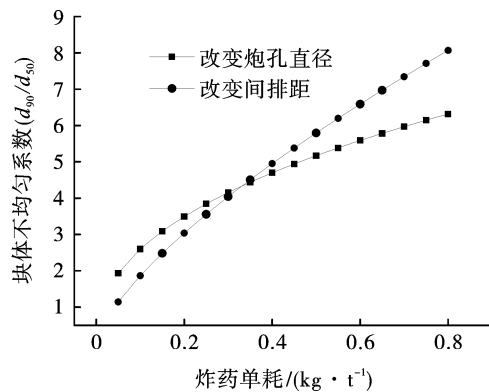


图 11 炸药单耗对块体不均匀系数的影响

Fig. 11 Relationship between block nonuniform coefficient and unit explosive consumption

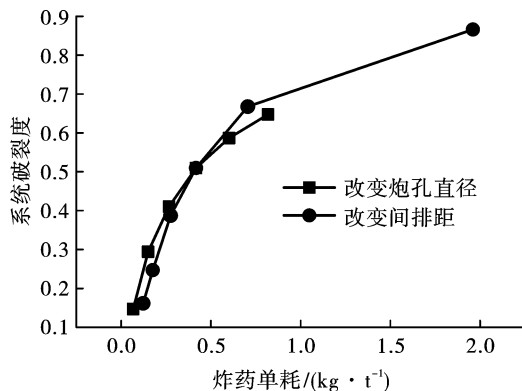


图 12 系统破裂度随炸药单耗的变化规律

Fig. 12 Relationship between system fracture degree and unit explosive consumption

两种方式下大块率随炸药单耗的变化规律如图 13 所示。由图可得,随着炸药单耗的增大,大块率迅速减小;当炸药单耗大于 0.25 kg/t 时,大块率已经小于 0.5%;当炸药单耗超过 0.6 kg/t 时,大块率为 0.0%。

## 4 结语

通过在 CDEM 计算软件中引入朗道点火爆炸模型及岩体塑性-损伤-断裂模型,实现了露天铁矿深孔爆破过程的模拟,提出了平均破碎尺寸( $d_{50}$ )、极限破碎尺寸( $d_{90}$ )、块体不均匀系数( $d_{90}/d_{50}$ )、系统破裂度( $F_r$ )及大块率( $B_r$ )等 5 种评价爆破块度分布的指标,分析了改变炮孔直径、改变间排距等两种改变炸药单耗的方式对爆破块度的影响规律。计算结果表明:

(1) 随着炸药单耗的增大,赤铁矿的破碎尺寸逐渐减小;相同炸药单耗情况下,改变炮孔直径的破碎效果略优于改变间排距的破碎效果。

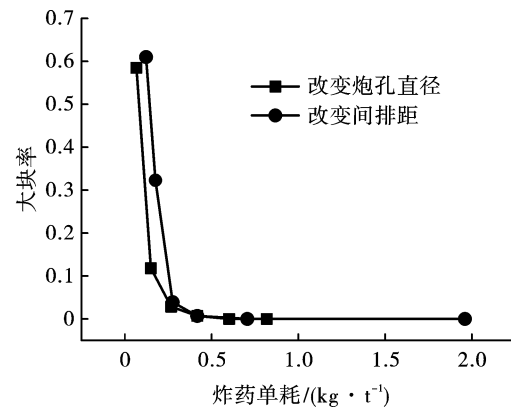


图 13 大块率随炸药单耗的变化规律

Fig. 13 Relationship between large block ratio and unit explosive consumption

(2) 在双对数坐标系下,随着炸药单耗的增大,平均破碎尺寸( $d_{50}$ )及极限破碎尺寸( $d_{90}$ )均线性减小,并利用衰减型幂函数拟合了平均破碎尺寸、极限破碎尺寸与炸药单耗的对应关系。

(3) 给出了块体不均匀系数与炸药单耗间的函数关系;根据该函数关系,随着炸药单耗的增大,块体的不均匀性逐渐增大,但增大趋势逐渐变缓;单耗从 0.05 kg/t 增加至 0.8 kg/t 时,块体系统的不均匀系数从 1.1 变化至 8.1。

(4) 随着炸药单耗的增大,系统破裂度逐渐增大,但增大趋势逐渐变缓;当炸药单耗从 0.07 kg/t 增大至 2 kg/t 时,系统破裂度从 15% 增加至 87%。

(5) 随着炸药单耗的增大,大块率迅速减小;当炸药单耗大于 0.25 kg/t 时,大块率已经小于 0.5%;当炸药单耗超过 0.6 kg/t 时,大块率为 0.0%。

## 参考文献(References)

- [1] 张继春. 岩体爆破的块度理论及其应用[M]. 成都: 西南交通大学出版, 2001.
- [1] ZHANG Ji-chun. Fragment-size theory of blasting in rock mass and its application [M]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 邹定祥. 计算露天矿台阶爆破块度分布的三维数学模型[J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(3): 48-59.
- [2] ZOU Ding-xiang. A three dimensional mathematical model in calculating the rock fragmentation distribution of bench blasting in the open pit [J]. Explosion and Shock Waves, 1984, 4(3): 48-59. (in Chinese)

- [3] 陈运轩. 爆破块度效应对炸药单耗的影响[J]. 爆破, 1996, 13(3): 19-22.
- [3] CHEN Yun-xuan. The influence of blasting fragmentation effect to the unit explosive consumption [J]. Blasting, 1996, 13(3): 19-22. (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 research of the effect on the blasting fragmentation distribution from the explosive specific charge [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(4): 359-362. (in Chinese)
- [5] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [6] MARIO A Morin, FRANCESCO Ficarazzo. Monte Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the Kuz-Ram model [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(3): 352-359.
- [7] F Faramarzi, H Mansouri, M A Ebrahimi Farsangi. A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60: 82-94.
- [8] 邢光武,郑炳旭. 采石场爆破块度分区及块度预测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1258-1261.
- [8] XING Guang-wu, ZHENG Bing-xu. Study on prediction of block zoning and block size in quarry blasting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1258-1261. (in Chinese)
- [9] 李战军,温健强,郑炳旭. 露天铁矿爆破开采炸药单耗预测[J]. 金属矿山, 2009, 7(397): 33-35, 38.
- [9] LI Zhan-jun, WEN Jian-qiang, ZHENG Bing-xu. Forecast of the unit explosive consumption for blasting in open-pit iron mine [J]. Metal Mine, 2009, 7(397): 33-35, 38. (in Chinese)
- [10] M Monjezi, M Rezaei, A Yazdian Varjani. Prediction of rock fragmentation due to blasting in Gol-E-Gohar iron mine using fuzzy logic [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(8): 1273-1280.
- [11] M Monjezi, A Bahrami, A Yazdian Varjani. Simultaneous prediction of fragmentation and flyrock in blasting operation using artificial neural networks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47: 476-480.
- [12] 段宝福,费鸿禄. 神经网络模型在台阶爆破块度预测中的应用[J]. 工程爆破, 1999, 5(4): 25-29.
- [12] DUAN Bao-fu, FEI Hong-lu. Application of neural of rock fragmentation of bench blasting [J]. Engineering Blasting, 1999, 5(4): 25-29. (in Chinese)
- [13] LI S H, WANG J G, LIU B S, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a face-to-face discrete element method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(4): 331-348.
- [14] FENG C, LI SH, LIU XY, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(1): 26-35.
- [15] 冯春,李世海,刘晓宇. 半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用[J]. 力学学报, 2011, 43(1): 184-192.
- [15] FENG C, LI S H, LIU X Y. Semi-spring contact model and its application to failure simulation of slope [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(1): 184-192. (in Chinese)

(上接第44页)

- [9] 顾保虎,刘志刚. 基于数字化矿山的物联网爆破技术的分析研究[J]. 工程施工, 2012, 11(1): 64-65.
- [9] GU Bao-hu, LIU Zhi-gang. The analysis of the digital mine blasting based on the networking technology [J]. Engineering Construction, 2012, 11(1): 64-65. (in Chinese)
- [10] 张申,丁恩杰,徐钊,等. 感知矿山物联网的特征与关键技术[J]. 工业自动化, 2010(12): 117-121.
- [10] ZHANG Shen, DING En-jie, XU Zhao, et al. Characteristics and key technologies of sensor mine internet of things [J]. Industry and Mine Automation, 2010(12): 117-121. (in Chinese)
- [11] 吴立新,汪云甲,丁恩杰,等. 三论数字矿山—借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357-365.
- [11] WU Li-xin, WANG Yun-jia, DING En-jie, et al. Thirdly study on digital mine: serve for mine safety and intelligence with support from IoT [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357-365. (in Chinese)