DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0611-06

基于 FLUENT-EDEM 耦合的爆炸抛掷特性研究*

顾 强,张世豪,安晓红,张 亚
(中北大学机电工程学院,山西 太原 030051)

摘要: 为了研究弹丸起爆后岩土碎屑的抛掷特性,针对爆炸后侵彻通道内复杂的气固两相流动问题,提出了一种 FLUENT 软件与 EDEM 软件联合的数值模拟方案,分析了不同深径比条件下钻地通道内介质碎屑的抛掷过程。进一步研究了介质碎屑运移特性的影响因素。结果表明:介质碎屑的运移能力与爆炸荷载峰值成正比,与钻地通道深径比及碎屑粒径成反比。

关键词: 爆炸力学;抛掷特性;FLUENT-EDEM;碎屑粒径;爆炸荷载;深径比
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

随着军事科技的发展,现代战争已从地面、海上和空中的较量向太空、地下和深海方向发展。为了防御大规模杀伤性武器的袭击,针对高价值重要军事目标,世界各国的地下掩体日益坚固化[1-2]。钻地弹侵彻目标介质时,随着深度的不断增加,堆积在钻地通道底部的破碎介质势必会阻碍钻地类武器的继续侵彻。基于此,研究侵彻弹丸起爆碎屑的抛掷特性,对于研发新型钻地武器,提高钻地弹毁伤目标的能力,具有重要的意义。

由分析可知,该物理模型的本质为爆炸荷载作用下侵彻通道内的气固两相流动问题。因此,本文中首先运用气固两相流理论[3],提出流体动力学软件 FLUENT 与离散元软件 EDEM 联合的数值模拟方案,对深径比分别为 2/3、8/3 的侵彻通道内介质碎屑受爆炸荷载作用下的流动运移特性进行分析,并进一步讨论碎屑运移特性的影响因素。文中涉及的模拟数据结果均由 FLUENT 软件及 EDEM 软件联合计算所得,两者缺一不可。在分析碎屑颗粒体积分数时运用了 FLUENT 软件中的颗粒体积分数云图,其余的数据均是在 EDEM 软件中提取。

1 EDEM 软件与 FLUENT 软件耦合

当前针对侵彻通道内气体流动的 CFD 模拟,虽然得到了模拟区域内的体积分数的分布,但对于处于离散状态的固体颗粒与颗粒(物料)间,以及颗粒与通道壁间力的作用无法精确计算,从而大大降低对碎屑的运动精度[4]。所以,经过深入研究,联合 FLUENT 软件与 EDEM 软件耦合模拟。

1.1 气固耦合控制方程

颗粒相与气体相的耦合模型中主要包括 Eulerian-Lagrangian 法和 Eulerian-Eulerian 法[5-6]。由于 Eulerian-Eulerian 法是基于多相流框架的耦合方法,更加适用于密相两相流问题,因为它可以加入颗粒相对气体相的作用力,可包含质量、动量和能量的交换。因此本文中选用 Eulerian-Eulerian 法对侵彻通道内爆炸荷载作用下的碎屑运移进行模拟。Eulerian-Eulerian 法耦合控制连续性方程和 N-S 方程为:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\varepsilon_g\rho_g)}{\partial t}+\nabla(\varepsilon_g\rho_g u_g)=0\\ \dfrac{\partial(\varepsilon_g\rho_g u_g)}{\partial t}+\nabla(\varepsilon_g\rho_g u_g u_g)=-\nabla p+\nabla(\mu_g\varepsilon_g\nabla u_g)-\varepsilon_g\rho_g g-S\end{cases}\tag{1}$$

式中:ρ_g为气体密度,t 为时间,u_g为气体速度,ε_g为气体空隙率,p 为气体压力,μ_g为气体动力黏度,g 为重力,S 为动量交换源相。

* **收稿日期**: 2015-03-20; **修回日期**: 2016-01-20
第一作者: 顾 强(1961—),男,硕士,教授,hg14gu@163.com。

在气固两相流中，颗粒 i 的运动规律遵循牛顿第二定律：

$$m_i \frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t} = m_i g + (F_\mathrm{d})_i - (V_\mathrm{p})_i \nabla p_i \tag{2}$$

式中：m_i、v_i、$(V_\mathrm{p})_i$分别表示颗粒 i 的质量、速度和体积；$(F_\mathrm{d})_i$、∇p_i表示颗粒 i 的曳力和压力梯度。

将岩土碎屑和侵彻通道材料定义为岩土，弹体材料定义为钢，其中，碎屑-碎屑，碎屑-弹体，碎屑-壁面受力计算采用 Hertz 模型，具体参数如表 1 所示。其中岩土与钢的密度取实验测量的平均值，泊松比通过查阅文献[7]得到，剪切模量通过相关计算公式得到。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	ν	G/Pa	ρ/(g·cm^{-3})
碎屑颗粒	0.2	5×10^7	2.6
钻地通道	0.2	5×10^7	2.6
弹体	0.3	7×10^{10}	7.8

1.2 计算模型

为了更好地分析不同钻地通道深度下的碎屑运移特性，取深径比 γ 作为衡量侵彻通道深度的指标。当深径比 $\gamma=2/3$、$8/3$ 时，侵彻过程形成的通道近似可表示为圆柱直筒型通道，外界空气近似看作圆筒型，并且两圆筒相连。图 1 为深径比 $\gamma=8/3$ 的侵彻通道的物理模型及几何模型图。其中，侵彻通道直径为 0.15 m，高度为 0.4 m。外界空气圆柱直径为 6 m，高度为 2 m。将入口边界定义为速度入口，将出口边界条件定义为压力出口，其出口气体压力为 1 个标准大气压(1.01×10^5 Pa)，并均匀分布。另外，将侵彻通道壁面定义为无滑移的气相速度边界条件。

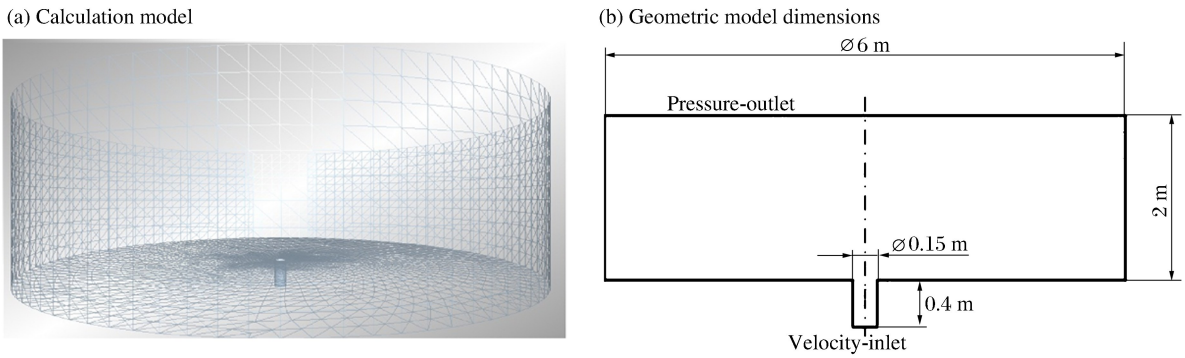

图 1 深径比 $\gamma=8/3$ 时计算模型

Fig. 1 Calculation model for a depth-diameter ratio γ as 8/3

1.3 模型验证

为验证耦合模拟模型及材料参数的合理性，将数值模拟结果与理论计算结果进行比较。文献[8]认为碎屑最大抛距为：

$$L_{\max} = v^2/g \tag{3}$$

式中：$L_{\max}$为碎屑颗粒最大抛掷距离，v 为碎屑初速度，$g=9.81$ m/s^2。

将上式进行量纲一分析，则式(3)可变为

$$n = \tan\alpha = v^2/(gH) \tag{4}$$

式中：n 为抛掷指数，H 为爆坑深度，如图 2 所示。

图 3 为侵彻通道深度 H 与抛掷指数 n 的关系曲线图。由图 3 可知，理论结果拟合曲线与数值模拟结果拟合曲线走势大致相同。当通道深度低于 0.4 m 时，曲线斜率较大；当坑深大于 0.4 m 时，两者曲线平缓，斜率变小。由岩土中爆炸相似定律可知，本文中所建物理模型和各参数设置较为合理。

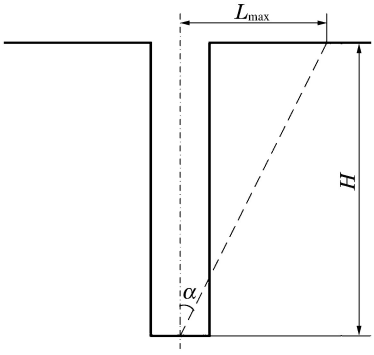

图 2　抛掷爆炸示意图

Fig. 2　Schematic of throw explosion

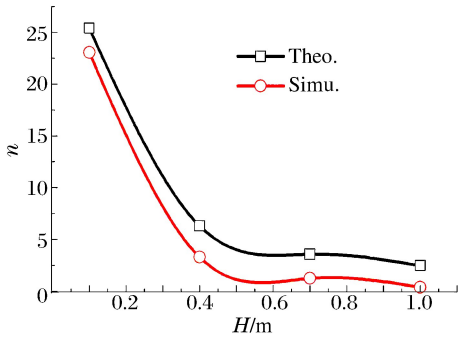

图 3　侵彻通道深度与抛掷指数关系曲线

Fig. 3　Curves of channel depth vs. throw exponential

2　模拟结果分析

2.1　抛掷特性分析

图 4 给出了侵彻通道深径比 $\gamma=2/3$（即通道尺寸为∅0.15 m×0.1 m）、$\gamma=8/3$（即通道尺寸为∅0.15 m×0.4 m）时对称轴上碎屑体积的分布曲线。从图 4(a)可以看出，当深径比 $\gamma=2/3$ 时，0.1 s 时刻碎屑受爆炸荷载的驱动被抛出通道，在轴向 0.5 m 处碎屑体积分数达到峰值，约为 0.006。约在 0.4 s时达到最高点，体积分数在 1.0 m 时达到峰值 0.001 5。此后开始下落，1.0 s 时少数岩土碎屑落回至通道底部，大部分碎屑散落在水平面，碎屑整体开始向径向扩散，体积分数逐渐下降，在 0.4 s 时刻后，岩土碎屑整体下降，最后在 1.0 s 时刻体积分数变为 0。当深径比 $\gamma=8/3$ 时，结合图 4(b)可知，0.1 s时刻碎屑运移至爆坑上端口，但受到侵彻通道壁面的约束，体积分数较高，约为 0.075。随着时间的推移，碎屑整体持续向上运动，并且开始径向扩散，在 0.4 s 时刻运移至最高处 1 m 左右，但碎屑体积分数峰值降低为 0.01。此后，碎屑开始下降，最后降落至水平面，其相应的体积分数也变为 0。

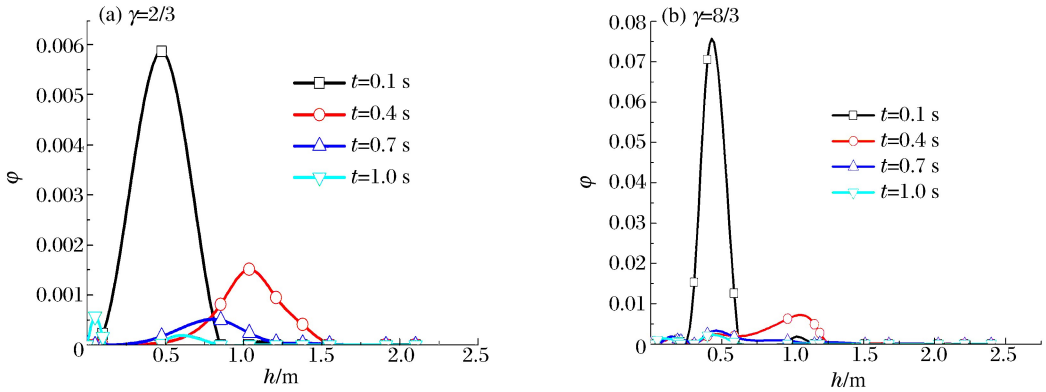

图 4　不同深径比下对称轴上碎屑体积分布

Fig. 4　Debris volume distribution on symmetrical axis with different γ

2.2　影响因素分析

2.2.1　爆坑深度

图 5 为侵彻通道深径比与抛掷距离 x 的关系。由图 5 可知，随着通道深径比的增加，抛掷距离逐渐减小，在 $\gamma=2/3$ 时抛掷距离最大，约为 2.5 m；而在 $\gamma=20/3$ 时抛掷距离最小，约为 0.4 m。究其原因，当侵彻通道变深，碎屑与壁面发生碰撞次数变多，消耗能量较大，故作用在抛掷方面的能量相应减小，相应的抛掷距离也变小。

综上所述，抛掷距离与侵彻通道深径比成反比关系，即钻地通道越浅，其碎屑抛掷距离越大，运移能力越强。

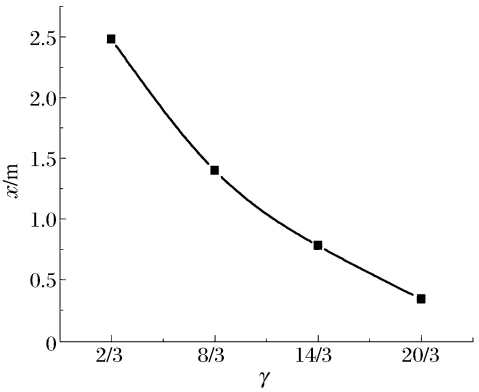

图 5 钻地通道深径比对抛掷距离的影响

Fig. 5 Variation of throw distance with γ

2.2.2 爆炸荷载峰值

针对爆炸载荷特征参数，本文中重点讨论荷载峰值对碎屑运移特性的影响规律。取钻地通道深径比 $\gamma=2/3$进行研究，其中气流速度荷载峰值分别取为 30、50、70 m/s。

图 6～7 分别给出了不同荷载峰值条件下，0.4 s 时刻深径比 $\gamma=2/3$ 的通道内爆炸碎屑体积分数云图及对称轴上碎屑体积分布。结合图 6～7 可以看出，随着载荷峰值的逐渐增加，对称轴上碎屑体积分数峰值由 0.001 8 降低为 0.001 3。由此可知，载荷峰值对碎屑运移影响较大，即随着载荷峰值的增加，同一高度下碎屑颗粒数目减小，相应的体积分数较低。

图 8 给出了不同荷载峰值条件下碎屑抛掷高度与抛掷距离。从图 8 可知，随着荷载峰值的增加，相应的抛掷高度 y 与抛掷距离 x 均逐渐变大，但是抛掷距离的斜率明显大于抛掷高度的斜率。由于气流的荷载峰值增大，其携带的碎屑初速度变大，故抛掷高度逐渐变大。综上可知，不同荷载峰值对深径比 $\gamma=2/3$ 时碎屑运移特性影响较大，随着荷载峰值的增大，碎屑抛掷距离与抛掷高度变大，但是对抛掷距离的影响更大。所以，荷载峰值与运移特性成正比，即荷载峰值越大运移能力越好。

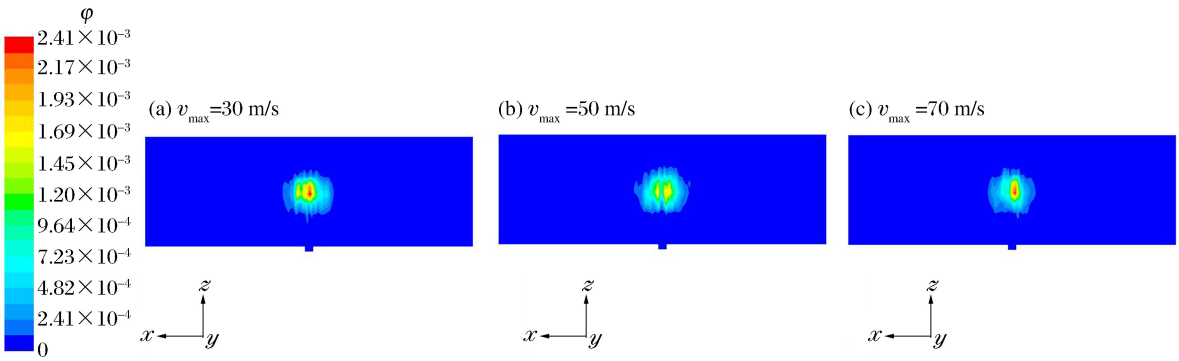

图 6 不同载荷下碎屑体积分数云图

Fig. 6 Debris volume fraction contour under different loading

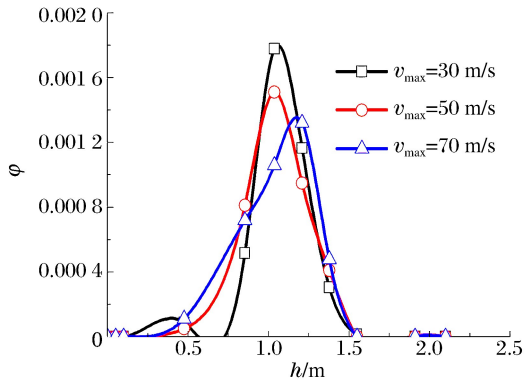

图 7 不同荷载峰值条件下碎屑体积分数分布曲线

Fig. 7 Curves of volume fraction under different loading

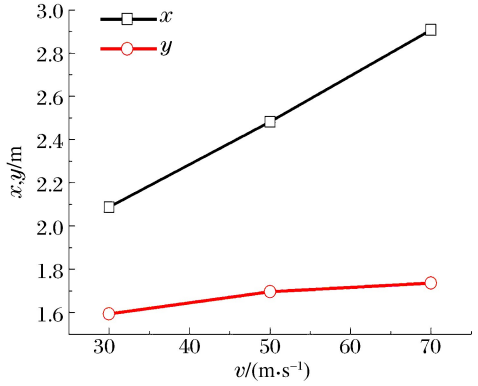

图 8 抛距 x、抛高 y 随着荷载的变化

Fig. 8 Variation of throw distance x and throw height y with loading

2.2.3　碎屑粒径

在软件模拟计算过程中，碎屑颗粒半径遵循正态分布，平均半径为 1 mm，标准差为 0.1 mm。故针对碎屑的特征参数，本文中重点讨论碎屑颗粒平均直径对其运移特性的影响规律。取钻地通道深径比 $\gamma=2/3$ 进行研究，其中碎屑平均直径分别取为 1、2、3 mm。

图 9～10 分别给出了不同碎屑直径条件下，钻地通道深径比 $\gamma=2/3$ 在 0.4 s 时刻碎屑体积分数云图及对称轴上碎屑体积分布。结合图 9～10 可以看出，随着碎屑直径的增加，3 种工况下碎屑体积分数云图范围逐渐减小，其中，碎屑直径为 3 mm 时云图范围最小，但其碎屑体积分数峰值最大，约为 0.001 3。由此可知，碎屑直径对碎屑运移影响较大，即随着直径的增加，同一高度下碎屑颗粒数增多，碎屑运移能力越差。

图 11 给出了不同碎屑直径对碎屑抛掷高度与抛掷距离的影响。由图可知，随着碎屑直径的增加，相应的抛掷距离逐渐变小，抛掷高度先增大后减小。究其原因，由于碎屑直径增大，相同空间内的碎屑间隙必然变小，发生碰撞的几率增多，能量损失较大；另一方面，碎屑的质量与碎屑直径成正比，即重力变大。综上可知，不同碎屑直径对近地表条件下碎屑运移特性影响较大，随着平均直径的增大，其运移能力逐渐变差。

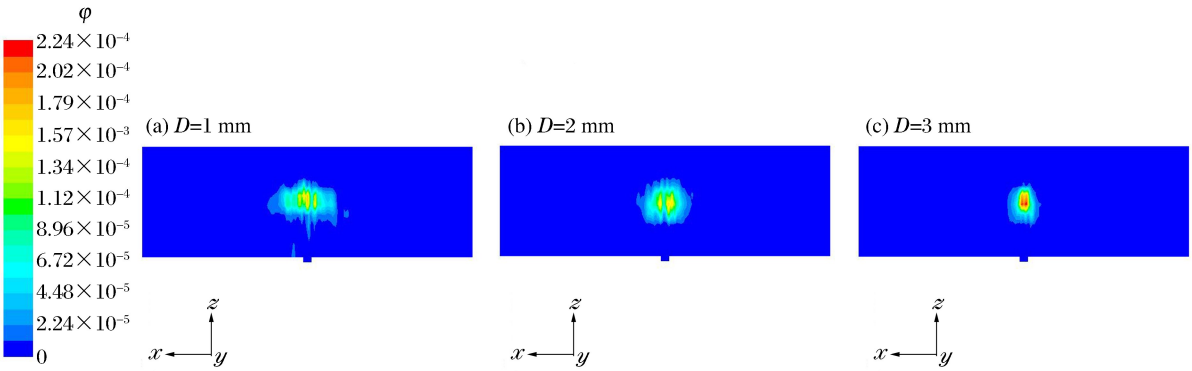

图 9　不同碎屑直径下通道内碎屑体积分数云图

Fig. 9　Debris volume fraction contours for different debris particle sizes

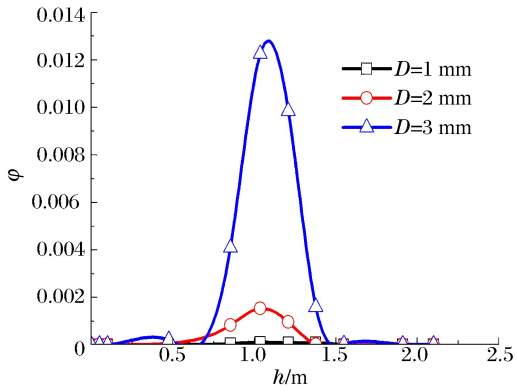

图 10　不同碎屑粒径下碎屑体积分数分布曲线

Fig. 10　Curves of volume fraction under different debris particle sizes

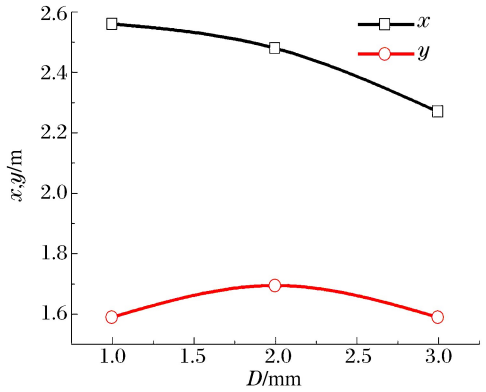

图 11　抛距 x、抛高 y 随着碎屑粒径的变化

Fig. 11　Variation of throw distance x and throw height y with debris particle size

3　结　论

(1)针对侵彻通道内起爆后复杂的气体流动问题，提出一种新型的 CFD 模拟方法，即联合 FLUENT 软件与 EDEM 软件耦合模拟。通过采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型来模拟颗粒-颗粒和颗

粒-边界的接触碰撞,以及采用具有相间耦合作用的 Eulerian-Lagrangian 耦合算法,来近似模拟了钻地通道内起爆后介质碎屑的运移特性。由模型的验证可知,本文中所运用的模拟方法、物理模型和各参数设置较为合理。(2)当钻地通道深径比 $\gamma=2/3$、8/3 时,介质碎屑开始时刻由于受到爆炸荷载作用整体向上运动,某时刻碎屑整体开始向径向扩散,最后降落到水平面。另外,碎屑数量随着与钻地通道轴线距离的增大而逐渐变少。(3)研究了钻地通道深径比、爆炸荷载峰值、碎屑平均粒径 3 个因素对介质碎屑抛掷特性的影响。结合模拟结果可知,荷载峰值与碎屑抛掷特性成正比,荷载峰值越大,碎屑运移能力越好;而钻地通道深径比、碎屑平均粒径与碎屑抛掷特性成反比,随着数值变大,运移能力逐渐变差。

参考文献:

[1] 王涛,余文力,王少龙,等. 国外钻地武器的现状与发展趋势[J]. 导弹与航天运载技术,2005(5):51-56.
Wang Tao, Yu Wenli, Wang Shaolong, et al. Present status and tendency of foreign earth-penetrting weapons[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(5):51-56.

[2] 汪斌,曹仁义,谭多望. 大质量高速动能弹侵彻钢筋混凝土的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2013,33(1):98-102.
Wang Bin, Cao renyi, Tan Duowang. Experimental study on penetration of reinforced concrete by a high-speed penetrator with large mass[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(1):98-102.

[3] 袁竹林,朱立平,耿凡,等. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京:东南大学出版社,2013.

[4] 潘振海,王昊,王习东,等. 油砂干馏系统的 DEM-CFD 耦合模拟[J]. 天然气工业,2008,28(12):124-126.
Pan Zhenhai, Wang Hao, Wang Xidong, et al. DEM－CFD coupled simulation of oil sands retorting in a rotary kiln [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(12):124-126.

[5] 戚华彪,周光正,于福海. 颗粒物质混合行为的离散单元法研究[J]. 化学进展,2015,27(1):113-124.
Qi Huabiao, Zhou Guangzheng, Yu Fuhai. Researches on mixing of granular materials with discrete element method[J]. Progress in Chemistry, 2015,27(1):113-124.

[6] 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2013.

[7] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

[8] 张奇. 球形装药岩石抛掷爆破初速度的数值模拟[J]. 煤炭学报,1993,18(5):27-32.
Zhang Qi. Numerical modelling of initial speed of throw blasting using spherical charge[J]. Journal of China Coal Society, 1993,18(5):27-32.

Research on throw characteristics of rock debris explosion based on coupled FLUENT-EDEM

Gu Qiang, Zhang Shihao, An Xiaohong, Zhang Ya

(*College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*)

Abstract: In order to study the throw characteristics of rock debris after explosion, with a view of solving complicated problems involved in the two-phase gas-solid flow in a penetration channel, we propose a simulation scheme combining the use of FLUENT and EDEM softwares. Based on this scheme, we analyzed the medium debris's blasting process for different depth-diameter ratios and studied the factors that bear on the debris's transporting characteristics. The results show that debris transporting capability is directly proportional to the peak value of the explosion load, and is inversely proportional to the ratio of the channel depth to the channel diameter and the debris particle size.

Key words: mechanics of explosion; throw characteristics; FLUENT-EDEM; debris particle size; explosion load; depth to diameter ratio

(责任编辑 曾月蓉)