

文章编号: 1001 - 487X(2008)03 - 0001 - 06

岩石爆炸增渗模型实验及 DEM 数值模拟研究*

陈保君¹, 欧阳振华¹, 王观石², 李 羽³, 练振中³, 李世海¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 江西理工大学, 赣州 341000;

3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘 要: 岩体中爆炸提高矿石的渗透性可以极大地提高采矿效率, 是碎裂岩型矿床预裂浸出法的关键技术。混凝土与岩体都具有脆性材料的特性, 因此用浇筑于铁桶中的混凝土试件进行模型实验研究岩体的爆炸增渗效果。铁桶可以提高实验效率, 使边界条件更为简单和易于操作, 但是, 实验和原型的差异需要论证。用自主开发的基于连续介质力学模型的离散元方法, 模拟了有铁桶边界的模型实验, 验证了数值模拟方法的可行性及有效性, 给出了有弹性侧限边界约束的混凝土和较大尺度无反射边界条件的岩石中的爆炸差别。在此基础上, 分析了岩石中爆炸造成的岩石破坏规律。计算结果表明: 岩石破坏面总面积和破坏区的最大裂缝宽度受药量和岩石的抗拉强度影响, 破坏面总面积和裂缝宽度随药量增加而增大, 随抗拉强度增大而减小; 在药量相同的条件下, 实际岩石环境下的岩块破坏程度比铁桶约束的大。模型实验和数值模拟相结合的办法可以对混凝土和岩石的爆炸破坏给出较为合理的结果。

关键词: 混凝土; 强度; 边界条件; 离散元法; 爆破

中图分类号: ID 235.1 **文献标识码:** A

Experimental Study and Discrete Element Method Simulation of Explosions Increase Permeability of Rock

CHEN Bao-jun¹, OUYANG Zhen-hua¹, WANG Guan-shi², LI Yu³, LIAN Zhen-zhong³, LI Shi-hai¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China)

Abstract: Explosion in the rock can improve the permeability of ore greatly, which improve the efficiency of mining. This process is considered to be the key technology of PRESPLITTING METHOD. The concrete specimen poured in the iron drums as model experiment is used to study the rock permeability by explosion effect, because both concrete and rock has the characteristics of brittle materials. Iron drums raise the efficiency of experiments, and the boundary conditions are more simple and easy to operate, however, the differences between experimental and prototype need demonstration. In this paper, a discrete element method based on continuum mechanics (DEM) is developed independently to simulate the model with the drums border, with which the numerical simulation is test feasible and effective, moreover, the differences of explosion between the concrete limited by flexible side of the border bounds and the rock in non-reflective, more large-scale boundary conditions is given. On this basis, the regulations of rock damages caused by the explosion are summarized. The results show that the total area of damaged rock and the maximum width of the crack area are influenced by the explosive amount and the tensile strength of rock. With the increase of explosive amount, the total area of damaged rock and the maximum width of the crack area are increase.

收稿日期: 2008 - 06 - 04.

作者简介: 陈保君 (1984 -), 男; 北京: 中国科学院力学研究所硕士生.

基金项目: 国家“973”资助项目 (2002CB412700).

With the increase of the tensile strength of rock, the total area of damaged rock and the maximum width of the crack area are decrease. In the same amount of explosive, there are more damaged to the actual circumstances of the rock block than the concrete specimen poured in the iron drums. More reasonable results of concrete and rock explosion can be given by the ways of combining model experiments and numerical simulation.

Key words: Concrete; strength; boundary condition; discrete element method; blasting

引言

利用炸药产生的激波和爆生气体的作用,在炸药周围的岩石产生大量的微裂纹,可以增加浸出液和矿石的接触面积,从而有效地提高矿石中有效成分的浸出率。因此,有效提高爆炸效果成为追求的目标。但岩石中的爆炸问题影响因素复杂,其实验研究需要大量的经费、时间和精力。而数值模拟技术可以提供可重复的动力学过程,获取更全面的时间和空间上的物理信息,模拟模型实验技术无法或很难达到的复杂条件问题。但数值模拟必须首先用模型实验定性证明其正确性。

用数值模拟的方法研究爆炸问题,人们已经做了很多工作。由于岩石爆破过程是复杂的材料由连续到非连续到大变形的破坏过程,传统的有限元法不能方便对之进行模拟,而离散元法于1971年由Cundall提出后^[1],逐渐发展成为分析离散问题的有效手段。Sawamoto^[2]用离散元研究了带原始缺陷的混凝土在冲击荷载作用下的破坏,侯艳丽^[3]用离散单元法研究混凝土、岩石类材料的拉剪混合型断裂,郭易圆^[4]用三维离散元程序研究了岩体中爆炸波的传播过程,徐艳杰^[5]分析了高边坡的稳定性,王建宙^[6]用离散元法研究了拆除爆破,田振农^[7]用块体离散元模拟爆破近区岩体内的应力场、位移场、鼓包和爆破漏斗现象。这些研究结果表明,离散元法能够有效模拟不连续动力学问题,是研究爆破问题的有效手段。

用离散元法模拟岩石中的爆破涉及到爆源模型、边界条件、计算规模、材料原始缺陷、裂缝发展等问题。目前国内自主开发的计算软件主要集中在计算方法、爆源模型和本构关系等基础研究上^[8-10]。在混凝土试件和岩石内部爆炸造成其破坏的模型实验和数值模拟,人们研究得还非常少。基于目前的研究现状,在自主开发的三维可变形块体离散元的基础上,根据模型实验的试件受力特征预设足够数量的节理面,用强度随机的方法模拟材料强度不均匀的特征,并改进材料破坏准则,选取合适的爆源形式,成功模拟了浇筑于铁桶中的混凝土在爆破荷载作用下的破坏形态特征。在此基础之上,改变爆炸

药量和混凝土抗拉强度,得到混凝土破坏面积和表面最大裂缝宽度的变化规律;改变约束条件,得到铁桶约束中的混凝土与实际岩石环境下岩块在相同药量下的破坏效果差异。

1 现场实验概述

1.1 实验装置及材料参数

根据爆炸造缝增大岩体渗透率的需要,用425号普通硅酸盐水泥和石英砂配制而成制作了一批混凝土试样,浇筑在预制的铁制模具中。试样中心预设炮孔,在炮孔内一定深度分别装入不同长度的铵油炸药,用湿土密实地填充炮孔后起爆。实验装置与材料参数见图1、表1。

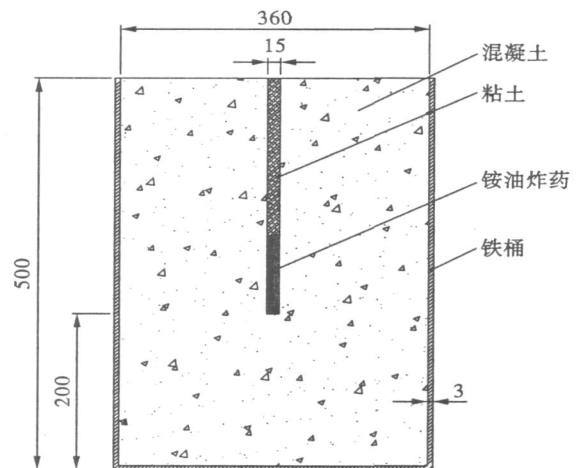


图1 爆炸提高混凝土渗透率实验装置(单位:mm)

Fig 1 Explosion increase permeability of concrete device (unit mm)

表1 混凝土及铵油炸药主要材料参数

Table 1 Material parameters of concrete and ammonium油炸药

混凝土	E/Pa	μ	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	t_1/Pa	c/Pa	ϕ
	3.8E10	0.3	2140	3.0E6	3.0E6	16.70
炸药	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_w/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$				
	1150	5200	4.5E6			

1.2 实验结果

爆炸后,混凝土试样破坏形态如图2所示。

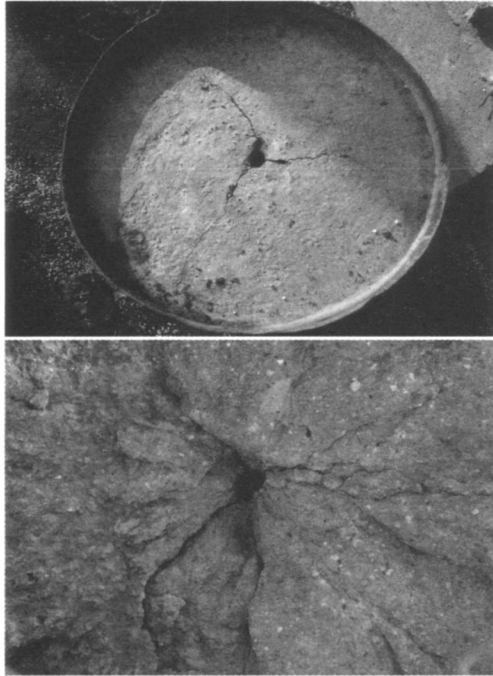


图 2 爆炸后混凝土试样破坏形态

Fig 2 Damaged concrete sample form after explosion

由图 2 可知,爆破后的混凝土试样以炮孔为中心呈辐射状的破坏。试样表面可见 3 条明显裂缝,内部存在大量微小裂缝。表面最大裂缝宽度在毫米量级。

炸药的药量是影响混凝土试件爆破后渗透系数的一个重要参数,采用径向辐合渗流试验原理进行现场渗透试验,得出药量和渗透系数之间满足较好的对数增长关系。

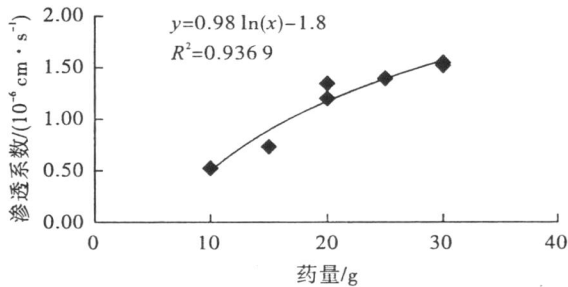


图 3 炸药药量与渗透系数关系

Fig 3 Relationship between explosive amount and permeability coefficient

2 计算模型及参数选取

2.1 面面接触可变形块体离散元

面面接触可变形块体离散元是在刚性块体离散元模型的基础上发展起来的。它将计算的模型分

为材料单元和接触弹簧。材料单元被看作是弹性体,在其内部根据力边界条件用有限元求各点的位移;接触弹簧分为法向和切向弹簧,根据位移和相对速度求力,破坏前是弹性解,破坏后能够反应地质体的非连续性质。其基本假设为:

- 1) 单元视为弹性块体,块体单元之间引入法向和切向弹簧传递弹性块体之间的力;
- 2) 同种材料破坏之前按连续介质计算;破坏之后按非连续介质计算;
- 3) 破坏、滑移都发生在接触弹簧上,但要满足摩尔-库仑强度条件或抗张拉破坏条件。

2.2 单元接触面上的破坏准则和计算处理

假设单元之间弹簧的破坏服从摩尔-库仑强度准则或抗拉强度准则。各单元经过动态松弛法迭代求解稳定后,接触面上的法向和切向力分别为 $F_n = -K_n u_n$, $F_s = -K_s u_s$ 。当 $F_n > \sigma_{con}$, 材料拉伸破坏; $F_s > \sigma_{con} + F_n \tan \phi$, 材料剪切破坏。破坏后,若 $u_n > 0$ 或 $u_n = 0, F_n = 0, F_s = 0$; 若 $u_n < 0$, 则 $F_n = -K_n u_n, F_s = F_n \tan \phi$, 方向与接触面相对运动方向相反。式中, σ_{con} 为材料的抗拉强度; σ, ϕ 为材料上的粘结强度和内摩擦角; ϕ 为破坏面上的摩擦角; A_{con} 为接触面积。

2.3 接触面上的强度随机

强度随机的方法能够在一定程度上模拟材料的不均匀特性。所用的面面接触可变形块体离散元中,材料强度体现在接触面弹簧的抗拉强度 σ_{con} 、粘结强度 σ 和内摩擦角 ϕ 上。在对接触面弹簧的材料强度赋值时, σ_{con}, σ 和 ϕ 在一个合理范围内随机波动。针对同一研究条件,不同随机过程稳定性较好^[11]。

2.4 爆源形式选取

更多关心爆轰波速度和压力的模拟精度的爆源模型需要计算单元尺度为微米量级,如 Tarver^[12], Reaugh^[13] 文章中推采用计算单元尺度为反应区宽度(一般只有 500 μm 左右)的 1/10—1/5。这样小的计算单元,模拟实际问题时,必须建立百万量级以上的单元数目,这对普通的计算机内存来说是不可忍受的。着重研究爆炸荷载作用下不同边界混凝土和岩石的爆破效果,不必要在爆源模型的精细程度上要求太高。因此在满足实验模拟要求的前提下,根据炸药爆炸的特点,做以下假设^[14]:

- 1) 爆炸后的瞬间爆生气体立刻充满药包的体积区域;
- 2) 爆生气体与周围介质之间不存在热交换,即该过程可以视为是绝热的;

3)不考虑逸散气体对块体的作用。

爆生气体满足多方气体状态方程,如式(1)所示,计算爆腔内的压力^[15]。

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

式中, $\gamma=3$, $\gamma=4/3$; P 和 V 分别为高压气球的瞬态压力和体积, P_0 和 V_0 分别为高压气球初始时刻的压力和药包的体积; P_k 和 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,其中 P_k 由式(2)给出:

$$P_k = P_0 \left[\frac{-1}{-} \left(\frac{-1}{P_0 V_0} Q_w - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

式中, Q_w 为爆热,单位 J/kg, W 为药包质量,单位 kg, 初始时刻气体压力为:

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

式中, w 为炸药的密度,单位 kg/m^3 ; D 为炸药的爆轰速度,单位 m/s 。

2.5 计算网格划分

岩土中的爆炸效应涉及到爆源近区与远区的岩土介质的不同尺度问题^[14]。在爆源近区,较小的块体单元使得爆腔体积和爆腔压力的计算更为准确;在爆源远区,较大的块体单元能够减少总体单元数目,从而提高计算效率。计算网格采用同心圆辐射线(见图4)的划分方式,总单元数7200个,总节点数57600个,不仅能满足这个要求,而且能够很好地模拟圆柱形混凝土试件的受力特征及破坏特征,不同尺度的断裂更能客观地反映药包远近的材料破坏特点。

2.6 计算方案

1)按照实验的情况建立数值模型,对比模型实验的破坏形态,验证程序正确性。

2)改变模型边界条件,统计岩石面积破坏率,研究模型试验与岩石在真实环境中的爆破效果差异。

3)改变爆破药量,计算试件药量与岩石面积破坏率和表面最大裂缝宽度的关系。

4)改变岩石抗拉强度,计算岩石抗拉强度和面积破坏率和表面最大裂缝宽度的关系。

3 计算结果分析

3.1 数值模拟有效性分析

用自主编写的计算程序计算,计算结果导入商用软件 Patran显示,如图4。因为混凝土试件半径仅长0.18m,故铁桶的约束对其整体影响较大,混凝土的破坏从表面上看不明显,没有破坏的小块体飞出。对比模型实验和数值模拟的混凝土破坏形

态,可以看到两者十分相似,上表面都有几条较为明显的裂缝。初步证明数值模拟的正确性。

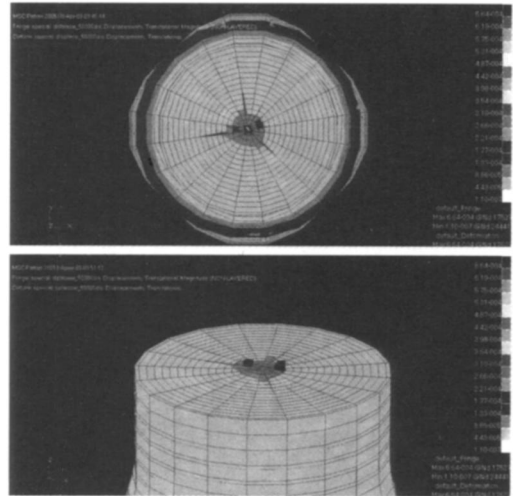


图4 铁桶约束条件下混凝土破坏形态

Fig 4 Concrete damage pattern under iron drums restrictive conditions

模型实验很难对混凝土试件的破坏程度量化,数值模拟可以很方便地做到这一点。选取面积破坏率(破坏面积与预设节理面总面积的比值)和表面最大裂缝宽度作为量化试件破坏程度的参数,观察其关系曲线关系可知,药量越大,面积破坏率越大。两者成对数增长的关系。药量越大,表面最大裂缝宽度越大,两者成线性增长关系。对比模型实验,相同的药量下,两者的表面裂缝宽度都在mm量级,进一步验证了数值模拟的有效性。

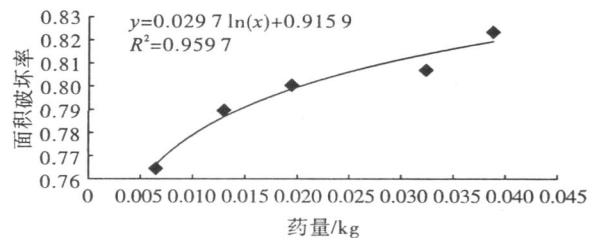


图5 铁桶约束条件下破坏面积率与药量关系

Fig 5 Relationship between area of damaged concrete and amount of explosive under iron drums restrictive conditions

程序可以记录下不同时刻试件内部质点的位移。可以看到在 $10 \mu s$ 时,药包附近质点位移成辐射状散开;在 $40 \mu s$ 时,冲击波进一步扩散,铁桶边界反射波还没有反射回来,炮孔和开始一样,还是圆柱状;在 $300 \mu s$ 时,从铁桶边界上反射回来的反射波已经作用于混凝土,质点大多朝上运动,混凝土上

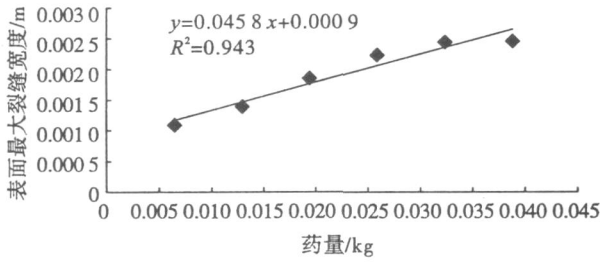


图 6 铁桶约束条件下表面最大裂缝宽度与药量关系
Fig 6 Relationship between maximum crack and amount of explosive under iron drums restrictive conditions

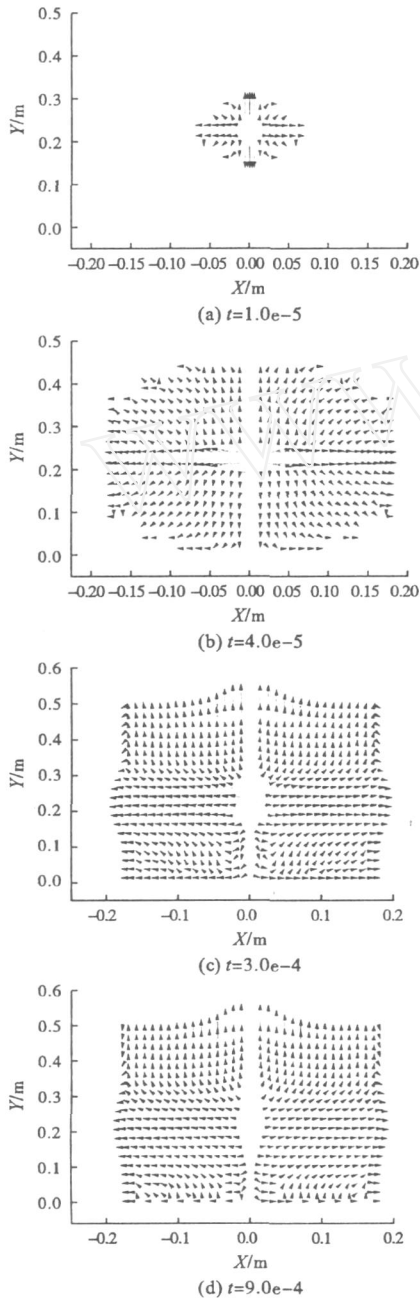


图 7 不同时刻混凝土剖面位矢图

Fig 7 Displacement vector of concrete sections at different moments

表面有鼓包隆起,炮孔已经不再是圆柱形,而是在炸药放置处 ($0.2\text{ m} < h < 0.25\text{ m}$) 鼓起,形成中间大两头小的形状。在 $900\text{ }\mu\text{ s}$ 时,质点位移比起 $300\text{ }\mu\text{ s}$ 时更有规律,各种现象也更为明显。从剖面的位矢图可以看出,数值模拟的结果符合爆破的一般规律,可以认为数值模拟能够有效地模拟模型实验。

3.2 真实环境下岩石爆破规律

在验证数值模拟有效性的基础上,程序可以方便地改变边界条件,比较铁桶中混凝土和真实环境下岩石的爆破效果差异。对比图 8 图 4 可看出,相同药量和材料强度下,实际环境中的岩石比浇筑与铁桶中的混凝土呈现出更为明显、更为破碎的破坏形态。从表面上就可以看到大块的岩石被炸裂并顶起。这是因为边界约束条件的不同,虽然混凝土也是脆性材料,但其整体的破坏却因铁桶的约束而表现出一定的延性。

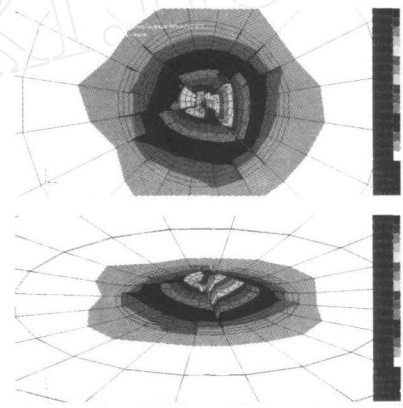


图 8 实际环境下岩石破坏形态

Fig 8 Damage pattern of rock under actual circumstances

改变材料强度和炸药药量,研究真实环境下岩石的爆破效果规律。由图 9 可看出,同样条件下,岩

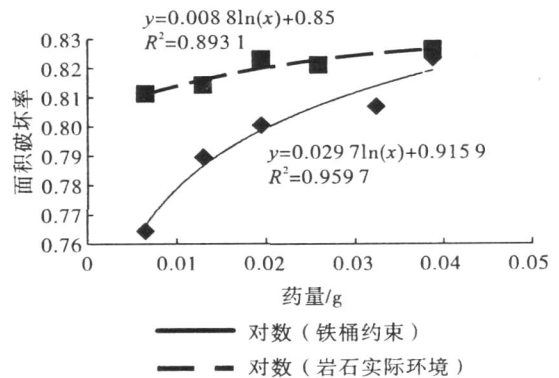


图 9 不同情况下面积破坏率与药量关系

Fig 9 Relationship between destruction area and amount of explosive under different conditions

石在实际环境中的面积破坏率比铁桶约束的大。在药量较小时,爆破效果差异较明显,药量增大时,爆破效果差异趋于相同。原因是铁桶对附近混凝土有约束的作用,相当于提高了混凝土的强度。药量较小时,铁桶附近混凝土破坏的较少。当药量较大时,两者在同一区域的破坏程度差异缩小。图 10、图 11 指出真实环境下不同抗拉强度的岩石在相同药量下的爆破效果规律。岩石抗拉强度越高,面积破坏率和表面裂缝宽度越小,基本成线性的关系。

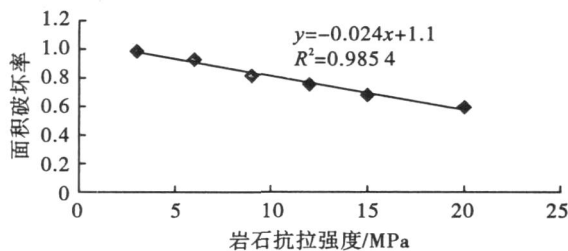


图 10 面积破坏率与岩石抗拉强度关系

Fig 10 Relationship between destruction area and tensile strength of rock

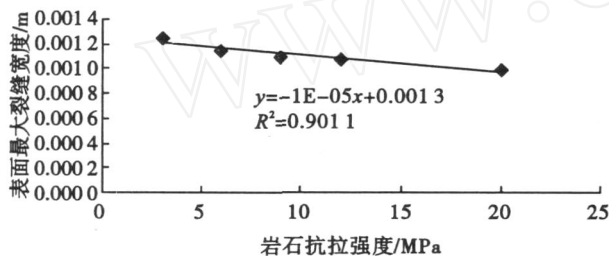


图 11 表面最大裂缝宽度与岩石抗拉强度关系

Fig 11 Relationship between maximum crack and tensile strength of rock

4 结论

采用块体离散元法来模拟混凝土的爆破破坏过程,根据试件受力特征预设足够数量的节理面,用强度随机的方法模拟材料强度不均匀性,用改进材料破坏准则来判断材料的破坏情况。结合模型试验得到以下几点结论:

1)改进的块体离散元法能够较好地模拟混凝土试样的破坏过程,数值模拟的结果和试验结果基本吻合;

2)在药量相同的条件下,实际岩块环境下的岩块破坏程度比铁桶约束的大;

3)岩石破坏区的最大裂缝宽度受药量和岩石的抗拉强度影响,裂缝宽度随药量增加而增大,随抗拉强度增大而减小。

参考文献

- [1] Cundall P A. A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems [A]. Proceedings of the International Symposium Rock Fracture[C]. Nancy: ISRM, 1971.
- [2] Sawamoto Y, Tsubota H, Kasai Y, et al Analytical Studies on Local Damage to Reinforced Concrete Structures under Impact Loading by Discrete Element Method[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 179: 157-177.
- [3] 侯艳丽,周元德,张楚汉.用离散单元法研究混凝土、岩石类材料的拉剪混合型断裂[J].计算力学学报, 2007, 24(6): 773-778, 784.
- [3] HOU Yanli, ZHOU Yuande, ZHANG Chuhan Tensile-shear Mixed Mode Fracture Analysis of Concrete-rock Material by Distinct Element Method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(6): 773-778, 784.
- [4] 郭易圆,李世海.离散元法在节理岩体爆破振动分析中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2408-2412.
- [4] GUO Yiyuan, LI Shihai Application of DEM in Vibration Analysis of Jointed Rock Mass under Blasting Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Sup 2): 2408-2412.
- [5] 徐艳杰,张楚汉,王光纶,等.三峡高边坡的爆破荷载确定及动力稳定分析[J].水利水电技术, 1999, 30(5): 29-31.
- [5] XU Yanjie, ZHANG Chuhan, WANG Guanglun, et al Identify the Dynamic Stability of the High Slope of the Three Gorges by Bursting Loading [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(5): 29-31.
- [6] 王建宙,于亚伦,唐春海.拆除爆破研究中数值分析方法的比较与选择[J].工程爆破, 2002, 8(1): 8-11.
- [6] WANG Jianzhou, YU Yalun, TANG Chunhai Numerical Methods Analysis and Selection in Demolition Blasting Study [J]. Engineering Blasting, 2002, 8(1): 8-11.
- [7] 田振农,李世海.三维离散元不同尺度结构面计算方法及其在岩土爆破中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3009-3016.
- [7] TAN Zhenong, LI Shihai Calculation Method of Structural Surfaces with Different Scales by DEM and Its Application to Blasting in Geotechnical Engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup 1): 3009-3016.
- [8] 唐志平,胥建龙.离散元法与壳体有限元结合的多尺度方法及其应用[J].计算力学学报, 2007, 24(5): 591-596.

(下转第 16 页)

- [3] 魏善斌. 巷道光面爆破主要爆破参数设计分析 [J]. 煤矿爆破, 2004(4): 4-7.
- [4] 吕 渊, 张登龙. 光面爆破施工中关于周边眼参数的探讨 [J]. 煤矿爆破, 2002(1): 7-9.
- [5] 郭义奎, 张登龙. 软岩中巷道掘进光面爆破参数的计算分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(1): 102-103, 105.
- [6] 赵祉君, 张成勇, 郝子强, 等. 中深孔爆破楔形掏槽装药参数研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(1): 97-98, 101.
- [7] 魏连春. 大孔距小排距的孔网参数在中深孔爆破中的应用 [J]. 天津冶金, 2003(4): 18-19, 58.
- [8] 董群柱. 中深孔爆破效果的改善 [J]. 有色矿山, 2003, 32(4): 14-15, 23.
- [9] 孟宪亮, 邵学峰. 中深孔爆破技术的应用 [J]. 煤炭技术, 2004, 23(6): 11-12.
- [10] 刘 峰, 张家权, 段代刚. 提高中深孔爆破质量的技术措施 [J]. 露天采矿技术, 2007(3): 36-37, 52.
- [11] 常东升, 李延林, 成光武. 优化爆破参数对提高岩石巷道掘进效率的探讨与实践 [J]. 煤炭技术, 2007, 26(2): 135-137.
- [12] 史太禄, 李保珍. 爆破延期时间等主要参数对爆破震动的影响 [J]. 采矿技术, 2003, 3(4): 33-35.
- [13] 黄 霖. 光面爆破主要参数的优选及校核 [J]. 爆破, 2002, 19(3): 20-21.
- [14] 杨永琦, 戴 俊, 单仁亮, 等. 岩石定向断裂控制爆破原理与参数研究 [J]. 爆破器材, 2000, 29(6): 24-28.
- [15] 张建中. 确保巷道成型的爆破参数与支护方式合理选取 [J]. 煤矿爆破, 2003(2): 15-16.
- [16] 单仁亮, 高龙江, 高文蛟, 等. 大雁矿区软岩巷道定向断裂爆破技术试验研究 [A]. 中国 CSRM 软岩工程专业委员会第二届学术大会论文集 [C]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 243-249.
- [17] 王文龙. 钻眼爆破 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [18] 徐 颖, 方江华. 光面爆破合理炮孔密集系数的研究 [J]. 工程爆破, 1998, 4(1): 25-29.
- [19] 张登龙, 张安临. 井巷掘进软岩光面爆破有关参数的合理选取 [J]. 煤矿爆破, 2002(1): 1-4.

(上接第 6 页)

- [8] TANG Zhiping, XU Jianlong. A Combined Discrete/Cylindrical Shell Finite Element Multi-scale Method and Its Application [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(5): 591-596.
- [9] 孙海权, 张文宏. 散心爆轰数值模拟中人为粘性与空间步长的匹配关系 [J]. 含能材料, 2006, 14(1): 16-20.
- [9] SUN Haiquan, ZHANG Wenhong. Matched Relationship between Artificial Viscosity and Mesh Size in Numerical Modeling of Divergent Detonation Wave [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(1): 16-20.
- [10] 王景焘, 张德良, 刘凯欣. 基于 CE/SE 方法的二维 Euler 型多物质流体弹塑性问题计算 [J]. 计算物理, 2007, 24(4): 395-401.
- [10] WANG Jingtao, ZHANG Deliang, LIU Kaixin. A Eulerian Approach Based on CE/SE Method for 2D Multimaterial Elastic-plastic Flows [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2007, 24(4): 395-401.
- [11] 李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 172-177.
- [11] LI Shihai, WANG Yuannian. Stochastic Model and Numerical Simulation of Uniaxial Loading Test for Rock and Soil Blending by 3D-DEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 172-177.
- [12] Tarver C M, McGuire E M. Reactive Flow Modeling of the Interaction of TATB Detonation Waves with Inert Materials [R]. UCRL-JC-145013, [S 1]: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.
- [13] Reaugh J E, Lee E L. Isochoric Burn An Internally Consistent Method for the Reactant to Product Transformation in Reactive Flow [R]. UCRL-JC-145292, [S 1]: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.
- [14] 田振农. 节理岩体中爆炸效应的离散元数值模拟及实验研究 [D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007.
- [14] TIAN Zhenong. Discrete Element Method Simulation and Experimental Study of Blasting Effect on Rock Mass [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [15] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 63-64.
- [15] Henrych Josef. The Dynamics of Explosion and Its Use [M]. Translated by XIONG Jianguo. 1987: 63-64.