

节理岩体爆破的 DDA 方法模拟

甯尤军, 杨 军, 陈鹏万

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 在非连续变形分析 (DDA) 方法中, 通过跟踪炮孔扩张和炮孔周边裂隙的发展贯通求得爆腔的即时体积, 进而根据爆生压力状态方程计算爆腔即时压力, 并将爆生压力载荷作用到主炮孔内壁和贯通裂隙面上, 实现了爆生产物作用下节理岩体爆破的 DDA 方法模拟。采用 DDA 方法模拟了节理岩体中的水平柱状炮孔抛掷爆破问题, 得到了爆腔的体积扩张和压力衰减时间曲线, 模拟很好的再现了岩石爆破过程中的炮孔扩张、岩体破坏、块体抛掷和爆堆形成过程。

关 键 词: DDA; 爆生产物压力; 节理岩体; 岩石爆破; 数值模拟

中图分类号: TD 235

文献标识码: A

Numerical simulation of rock blasting in jointed rock mass by DDA method

NING You-jun, YANG Jun, CHEN Peng-wan

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: By tracking borehole expansion and the propagation and coalescence of cracks in surrounding rock medium, calculating instant blasting chamber pressure based on the detonation pressure equation of state, and loading this pressure on the wall of the borehole and the surface of connected cracks, discontinuous deformation analysis (DDA) method to simulate the blasting process only considering the effect of explosion product in jointed rock mass is developed. A horizontal column borehole cast blasting case in jointed rock mass is simulated with this method. In the simulation, the chamber volume expanding and pressure attenuating histories are obtained. The process of borehole expansion, rock medium failure and movement, and blasting pile formation in rock blasting is well duplicated by the simulation.

Key words: DDA; detonation pressure; jointed rock mass; rock blasting; numerical simulation

1 引 言

岩石爆破是一个复杂的动力学破坏过程, 岩体在爆炸冲击波和爆生产物压力的共同作用下发生破碎和飞散^[1]。在节理岩体中, 不连续节理面对应力波的反射作用使得应力波幅值迅速衰减, 爆生产物压力对岩体的破碎和飞散起到主要作用。在岩石爆破的数值模拟中, 连续数值计算方法主要适用于对岩体在爆炸冲击载荷作用下的损伤演化进行计算^[2-5], 从而对岩石爆破中的炮孔扩张和岩石爆破块度等问题进行研究; 对于岩石爆破过程中的岩体破裂、块体飞散以及爆堆形成过程, 采用不连续数值计算方法则更为合适^[2]。

非连续变形分析 (discontinuous deformation analysis, DDA) 方法是对块体系统的静力和动力学行为进行计算的离散型数值方法^[6], 自其问世以来已经在岩土工程中得到了广泛的研究和应用。对于岩石爆破问题的 DDA 方法模拟, 到目前为止研究还并不多^[7-10], 研究结果也并不理想。文献[7]仅对漏斗爆破过程中初期的岩体破坏与鼓包效应进行了模拟, 文献[8-10]模拟得到的台阶爆破岩体抛掷过程与最终爆堆形态与工程实际存在很大差距。DDA 方法对岩石爆破这一动力学破坏问题的处理能力还没有能够得到充分发掘, 为此本文对爆生产物作用下节理岩体爆破数值模拟的 DDA 方法进行研究, 并对节理岩体中的水平柱状炮孔抛掷爆破问题进行了模拟。

2 节理岩体爆破模拟的 DDA 方法

2.1 基本原理

由于应力波在块体系统中传播时幅值将迅速衰减, 所以采用动力学 DDA 方法求解的对象只能是节理岩体, 而不是连续介质。所谓节理岩体, 在岩石爆破问题中, 它既可以指节理发育较好的天然节理岩体 (在其爆破过程中爆炸冲击波将对节理起到疏松作用), 也可以指完整性较好的岩石介质在爆炸冲击波作用下产生大量节理和裂隙后的受损岩体。因此, 岩石爆破 DDA 模型中定义的节理可以是天然节理, 也可以是爆炸冲击波作用下的新生节理, 或是两者兼之, 其强度值将根据实际情况进行选取。

对于模型中的所有节理, 在没有达到断裂破坏准则时都将其定义为虚拟节理, 其强度在计算过程中达到断裂破坏准则后则转化为真实节理, 形成裂隙, 并对其赋以真实的节理强度参数。强度本身就在断裂准则以下的节理则直接定义为真实节理, 并赋以真实的节理强度。虚拟节理的破坏分为拉伸破坏和剪切破坏两种^[1], 拉伸破坏采用最大拉应力准则, 剪切破坏采用摩尔-库仑准则。

$$\text{最大拉应力准则: } \sigma = \sigma_t \quad (1)$$

$$\text{摩尔-库仑准则: } \tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: σ 、 τ 为节理面上的正应力和剪应力; σ_t 为节理面抗拉强度; c 、 φ 分别为节理面的黏聚力和内摩擦角。

在岩石爆破的数值模拟中, 假定爆生产物在裂隙形成后才能够沿节理面扩散, 并且爆生产物具有一定的扩散速度 (设为 V_p), 通过对主炮孔的扩张及与主炮孔贯通的裂隙进行跟踪, 则爆腔的体积就等于主炮孔的体积加上爆生产物扩散范围内与主炮孔贯通的裂隙的体积。进而根据爆生压力状态方程计算爆腔即时压力, 并将这一压力作用到主炮孔内壁和与主炮孔贯通的裂隙面上, 就实现了节理岩体爆破中爆生产物加载的 DDA 方法模拟。

2.2 爆生产物压力的施加

图 1 为岩石爆破过程中柱状炮孔爆腔扩张的剖面示意图。图中 R_0 为炮孔初始半径, R_p 为 t 时刻爆生产物在裂隙中的扩散半径, 爆腔的体积等于主炮孔扩张后的体积加上炮孔周边 R_p 范围内贯通裂隙的体积。

在 DDA 计算中的每一时步初, 以主炮孔壁的所有块体边界端点为起点对裂隙进行搜索, 当遇见裂隙分叉时, 选择任意一条裂隙继续搜索, 并将分

叉点记为下一轮搜索的起点, 如此循环下去, 便能搜索出与主炮孔相贯通的所有裂隙。由于炮孔在垂直于纸面的方向上具有单位厚度, 因此, 炮孔的体积在数值上与平面内爆腔的面积相等。爆腔在平面内的面积可以采用单纯形积分^[6]进行精确求解。

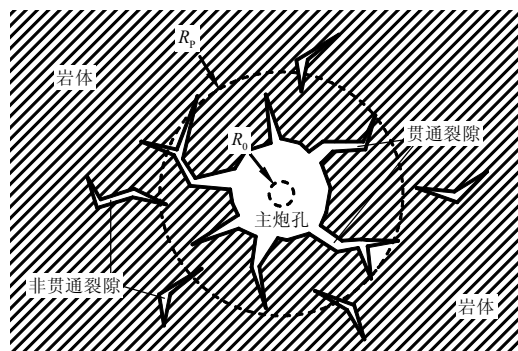


图 1 爆腔扩张示意图

Fig.1 Sketch of chamber expanding

爆生产物压力可以根据爆生压力状态方程由爆腔体积近似求出, 本文采用如下指数形式爆生压力状态方程求解爆腔的即时压力^[12]:

$$P = P_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad (3)$$

式中: P_0 、 V_0 分别为炮孔的初始体积和初始压力; P 、 V 分别为 t 时刻的爆腔体积和爆腔压力; γ 为与炸药及岩石性质相关的常数。爆腔的即时压力将作为面 (平面问题中为线) 载荷^[6]作用到主炮孔内壁和爆生产物扩散范围内与主炮孔贯通的裂隙面上, 当爆生产物扩散至临空面, 即发生爆生产物泄漏时停止加载。

2.3 边界条件

模拟岩石爆破, 需要采用有限域模型求解无限域或半无限域内的动力学问题, 为减小人工截取边界反射应力波对模拟结果的影响, 在 DDA 方法中实现了黏性无反射边界条件。黏性边界是通过在无反射边界上施加阻尼器吸收系统向边界外辐射的能量来实现的。在块体边的两个端点分别施加两对独立的法向和切向阻尼器^[13-14], 这些边组合在一起就形成了无反射边界。假设块体 i 上点 (x, y) 处有一对阻尼器, 则法向与切向阻力分别为

$$f_n = -\rho C_p v_n, \quad f_s = -\rho C_s v_s \quad (4)$$

式中: ρ 为块体密度; v_n 、 v_s 分别为点 (x, y) 的法向和切向速度; C_p 、 C_s 为质点的纵波和横波波速。根据最小势能原理, 阻尼器应变能对块体位移矩阵

求导, 并将得到的子矩阵添加到系统平衡方程式的系数矩阵当中^[13-14]。

3 水平柱状炮孔抛掷爆破模拟

3.1 计算模型

建立如图 2 所示的岩石爆破模型。模型长为 15 m, 高为 5 m, 模型左右两侧及下侧边界为无反射人工边界, 上侧边界为临空面。炮孔半径 $R_0 = 0.1$ m, 最小抵抗线 $w = 3$ m。对岩体进行了三角形块体划分, 并对炮孔附近块体进行了细分(可以理解为爆炸冲击波作用下孔周岩体的破坏)。计算中考虑岩体重力, 因此, 可以将此模型看作是水平柱状炮孔的抛掷爆破。

假设炮孔初始压力 $P_0 = 1$ GPa, 取 $V_p = 100$ m/s, $\gamma = 1.4$ 。计算中采用的块体材料参数为: 密度 $\rho = 2\,600$ kg/m³, 弹性模量 $E = 55$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.3$; 节理材料参数如表 1 所示。

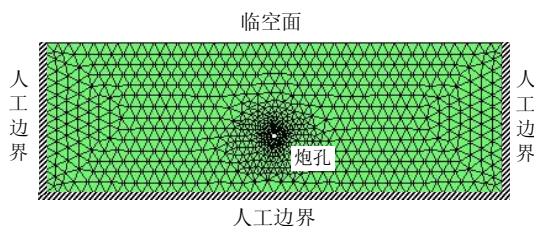


图2 抛掷爆破模型

Fig.2 Model of cast blasting

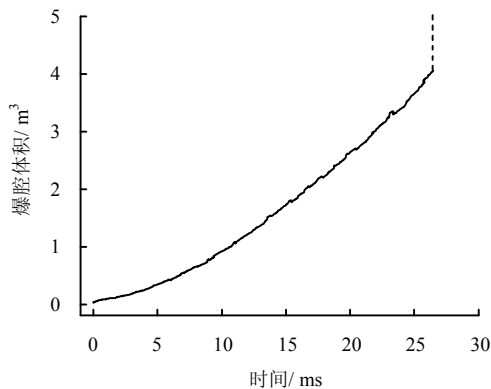
表1 节理材料参数

Table 1 Mechanical parameters of joints

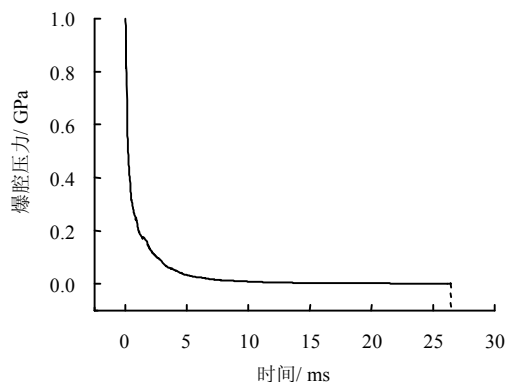
节理类型	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
虚拟节理	45	2.00	0.5
真实节理	45	0.05	0

3.2 模拟结果

图 3 为模拟得到的爆腔体积扩张和爆腔压力衰减时间曲线。爆腔在爆生产物压力的作用下发生扩张, 孔周岩体的逐步破坏失稳减小了爆腔发生进一步扩张的难度, 因此, 爆腔体积的扩张速度具有逐渐加快的趋势。爆腔压力先随爆腔体积的扩张而迅速衰减, 在大约 5 ms 后, 爆腔压力衰减变得极为缓慢。爆生产物在 26.57 ms 时扩散至模型上部临空面而发生泄漏, 爆生压力作用停止, 此时爆腔体积为 4.073 m³, 是初始爆腔体积 (0.031 m³) 的 131.4 倍, 爆腔压力则由最初的 1 GPa 衰减到了 1.04 MPa。



(a) 爆腔体积



(b) 爆腔压力

图3 爆腔体积和爆腔压力时间曲线

Fig.3 Chamber volume and pressure histories

图 4 为炮孔正上方靠近自由面块体在前 0.3 s 内的垂直方向速度变化过程。在爆生产物压力的作用下, 块体被迅速向上抛掷, 于 26.99 ms 时达到最大速度 31.23 m/s, 随后速度逐渐衰减。受到块体间相互碰撞的作用, 块体上升阶段出现了速度振荡。图 5 为炮孔正上方靠近自由面块体在整个过程中的垂直方向抛掷速度和位移时间曲线。块体在 0.740 s 时达到最大抛掷高度 5.21 m 后开始回落, 在 2.065 s 时与下部岩体发生接触并最终静止下来。

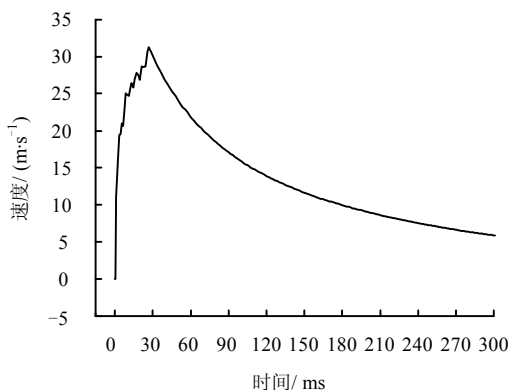


图4 块体初期抛掷速度时间曲线

Fig.4 Block early cast velocity history

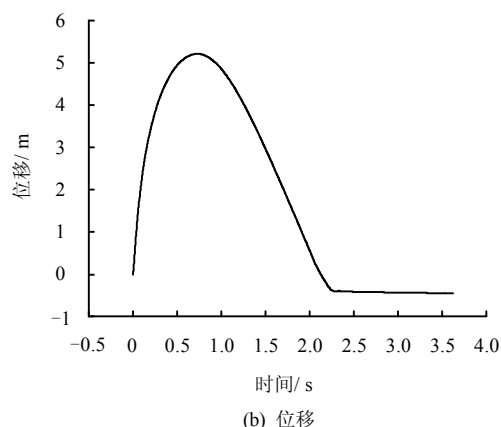
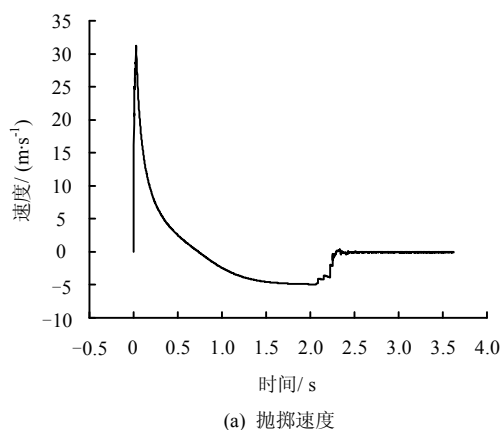


图5 块体抛掷速度与位移时间曲线

Fig.5 Block cast velocities and displacement histories

图6为模拟得到的抛掷爆破过程。炮孔周边岩体首先在爆生产物压力的作用下产生裂隙,爆生产物沿裂隙的扩散则导致了岩体的进一步破坏。图6(a)为0.021 s时爆生产物的扩散情况(图中红色节理为爆生产物作用节理面,块体颜色代表块体的最大主应力,模型两端的大块用于承接爆堆),此时岩体中已产生了大量裂隙,并能在模型上部临空面上看到明显的鼓包现象。爆生产物发生泄漏,即爆生压力作用结束后,岩体在惯性作用下进一步发生破坏和抛掷,图6(c)为块体达到最大抛掷高度时的岩体破坏和块体飞散状态。随后块体在重力的作用下开始回落,并于3.618 s完全静止下来而形成爆堆,爆堆高1.51 m,堆积范围为16.71 m。在爆堆中可以看到明显的爆破漏斗形状,其半径为 $r=5.48$ m,深 $H=4.08$ m,可见深度 $h=1.63$ m,爆破作用指数:

$$n = \frac{r}{w} = 1.827 > 1 \quad (5)$$

根据岩石爆破漏斗的分类^[1],该爆破属于强抛掷爆破。

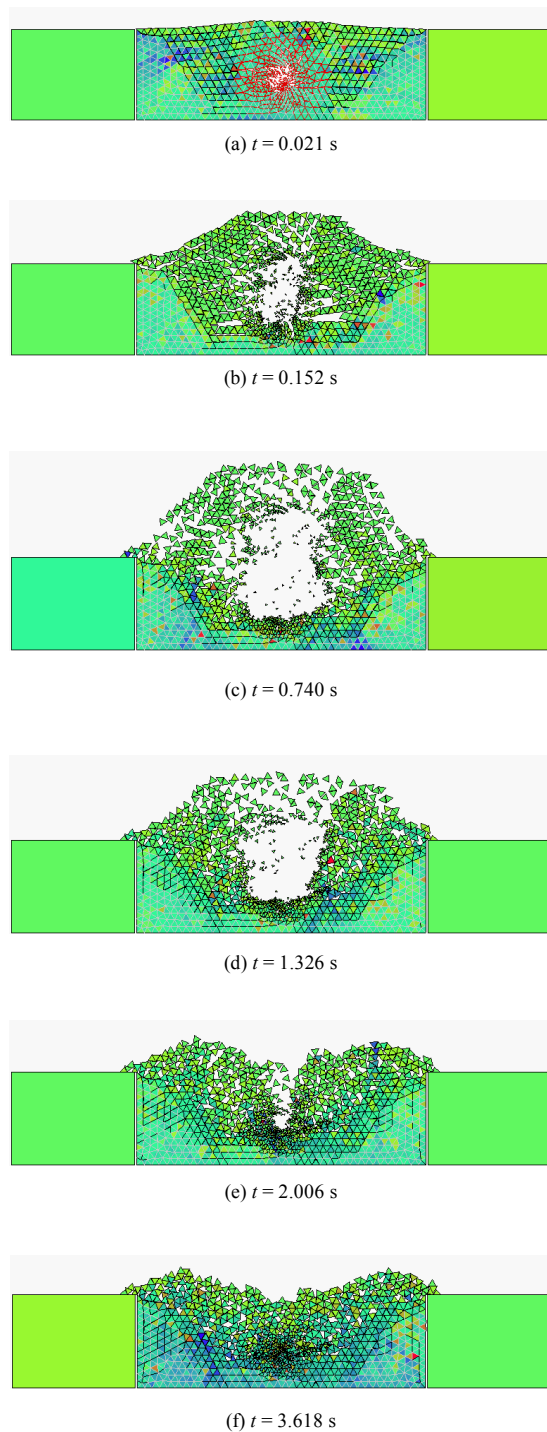


图6 模拟抛掷爆破过程

Fig.6 Simulated cast blasting process

4 结 语

本文通过跟踪炮孔的扩张和炮孔周边裂隙的发展贯通、采用爆生压力状态方程计算爆腔的即时压力,并将这一压力作用到主炮孔内壁和贯通裂隙面上,实现了节理岩体爆破的DDA方法模拟。水平柱状炮孔抛掷爆破算例的模拟,很好地再现了节理岩体爆破中的炮孔扩张、岩体破坏、块体抛掷和爆堆形成过程。研究验证了采用DDA方法模拟岩石

爆破问题的可行性, 发掘并展示了 DDA 方法对动力学破坏问题的处理能力。抛掷爆破的模拟在反映岩石爆破宏观物理过程的同时, 也在一定程度上揭示了岩石爆破的内在机理。

参 考 文 献

- [1] 杨军, 陈鹏万, 胡刚. 现代爆破技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [2] 熊代余, 顾毅成. 岩石爆破理论与技术新进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [3] WU Cheng-qing, HAO Hong. Numerical prediction of rock mass damage due to accidental explosions in an underground ammunition storage chamber[J]. **Shock Waves**, 2006, 15(1): 43—54.
- [4] ZHU Zhe-ming, XIE He-ping, MOHANTY B. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 10: 4—12.
- [5] 王志亮, 郑明新. 基于 TCK 损伤本构的岩石爆破效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 230—234.
- WANG Zhi-liang, ZHENG Ming-xin. Numerical simulation of effect of rock blasting based on TCK damage constitutive model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 230—234.
- [6] SHI Gen-hua. Discontinuous deformation analysis: A new numerical model for the statics and dynamics of block systems[D]. Berkeley: University of California, 1988.
- [7] 刘红岩, 杨军, 陈鹏万. 爆破漏斗形成过程的 DDA 模拟分析[J]. 工程爆破, 2004, 10(2): 17—20.
- LIU Hong-yan, YANG Jun, CHEN Peng-wan. Simulation of the process of explosion funnel formation by means of discontinuous deformation analysis[J]. **Engineering Blasting**, 2004, 10(2): 1—20.
- [8] MORTAZAVI A, KATSABANIS P D. Modelling burden size and strata dip effects on the surface blasting process[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, (38): 481—498.
- [9] 朱传云, 戴晨, 姜清辉. DDA 方法在台阶爆破仿真模拟中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2461—2464.
- ZHU Chuan-yun, DAI Chen, JIANG Qing-hui. Numerical simulation of bench blasting by discontinuous deformation analysis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp. 2): 2461—2464.
- [10] NING You-jun, YANG Jun. Numerical simulation of block throw and fragment size forecast of rock blasting by DDA method[C]//WANG Xu-guang: Proceedings of New Development on Engineering Blasting. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 80—84.
- [11] 焦玉勇, 张秀丽, 刘泉声, 等. 用非连续变形分析方法模拟岩石裂纹扩展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 682—691.
- JIAO Yu-yong, ZHANG Xiu-li, LIU Quan-sheng, et al. Simulation of rock crack propagation using discontinuous deformation analysis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 682—691.
- [12] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [13] JIAO J J, ZHANG X L, ZHAO J, et al. Viscous boundary of DDA for modeling stress wave propagation in jointed rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 47: 1070—1076.
- [14] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声, 等. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 717—721.
- ZHANG Xiu-li, JIAO Yu-yong, LIU Quan-sheng, et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 717—721.