

# 节理岩体爆破破坏过程数值模拟

刘红岩<sup>1,2</sup>, 张吉宏<sup>3,4</sup>

1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083
2. 西藏大学工学院, 拉萨 850000
3. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710064
4. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院, 西安 710064

**摘要** 针对目前常用的有限元和离散元等数值方法难以客观反映岩体中存在的大量断续节理和在外力作用下岩体破碎及块体运动的不足, 提出采用最近新出现的数值方法——数值流形方法以解决目前岩体爆破中存在的上述问题。数值流形方法采用数学网格与物理网格以形成求解流形单元, 很容易反映岩体中存在的众多初始节理, 本文采用断裂力学准则模拟岩石节理和裂纹扩展, 采用 DDA 中的块体运动学理论模拟块体运动, 并通过算例对比分析了完整岩体和节理岩体爆破破坏模式的差异。模拟结果表明, 节理存在对岩体爆破破坏模式有着重要影响, 且其影响程度与节理的几何分布和物理力学性质有着密切关系。

**关键词** 节理岩体; 爆破; 破坏模式; 数值流形方法; 初始节理

**中图分类号** TD235.4<sup>+</sup>.7

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.36.008

## Numerical Simulation of Blasting Failure Mode of Jointed Rock Mass

LIU Hongyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jihong<sup>3,4</sup>

1. College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
2. School of Engineering, Tibet University, Lasa 850000, China
3. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China
4. Xi'an Engineering Investigation and Design Research Institute, China National Non-ferrous Metals Industry, Xi'an 710064, China

**Abstract** The finite element method and the discrete element method widely used in practice can not adequately deal with lots of intermittent joints, the fragmentation of rock mass and the rock block movement. Therefore, a new numerical method, the numerical manifold method, is developed for that purpose. In the numerical manifold method, the mathematical mesh and the physical mesh are used to form a manifold element, which can very easily be used to deal with the lots of original joints in the rock mass. Meanwhile, the fracture mechanics principle is used to simulate the propagation of the joint and the crack, and the block movement theory in DDA is used to simulate the block movement. Finally, a calculation example is taken to analyze the difference of failure modes between the intact and jointed rock masses, and the results show that the existence of joints would greatly affect the rock mass blasting failure mode, and its effect is closely related to the joint's geometry distribution and physical and mechanical properties.

**Keywords** jointed rock mass; blasting; failure mode; numerical manifold method; original joint

### 0 引言

岩体是包含着断层、断裂带、软弱夹层、节理、层面等天然不连续面的地质体, 这些不连续面的存在严重影响岩体的物理力学性质及其破坏模式<sup>[1]</sup>。目前爆破方法仍然是岩石破

碎的主要方式之一, 在隧道、边坡、地下厂房、坝基开挖等众多岩体工程中仍有着广泛应用。节理等不连续面的存在必然影响到岩体的爆破效果, 对此已有较为深入的研究。李建军等<sup>[2]</sup>通过试验方法研究节理对岩体爆破效果的影响, 认为节

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2012-10-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010ZY45); 国家自然科学基金项目(41002113, 41162009); 教育部科学技术研究重点项目(2111175)

作者简介: 刘红岩, 博士, 研究方向为岩土工程数值计算, 电子信箱: lhyan1204@126.com

理的存在对岩体中爆破应力波的传播、岩石破碎及爆破漏斗的形成均有较大影响。叶海旺等<sup>[9]</sup>采用有限元数值方法对节理岩体爆破应力场进行模拟分析,结果表明,节理对爆炸应力波的反射程度随着节理数目增加而增强,且炸药爆炸产生的动能在节理岩体中衰减快,透过闭节理时能量的衰减比透过充填节理要慢,爆炸能量透过倾斜节理时衰减较慢,而透过垂直节理时衰减较快。肖定军等<sup>[10]</sup>采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对岩体中存在顺倾软弱夹层在爆破作用下的变形规律进行研究,探讨了抵抗线、夹层厚度和倾角对软弱夹层变形的影响规律。甯尤军等<sup>[11]</sup>采用 DDA 方法对节理岩体爆破全过程进行数值模拟。谢冰等<sup>[12]</sup>采用 AutoDyn2D 与 UDEC 相结合的方法研究了节理几何特征对预裂爆破效果的影响,说明节理角度、间距对爆破效果有着重要影响。江巍等<sup>[13]</sup>采用 DDA 方法对不同岩体在爆破荷载作用下的动力响应进行分析,认为岩石的坚硬程度愈高,完整程度愈好,岩体对爆破荷载的动力响应愈迅速,能量损耗愈小,振速峰值愈大,完整程度对于爆破荷载传递时间的影响更为明显。总之,众多研究者从试验、理论和数值计算等方面对节理存在对岩体爆破效果的影响进行了较深入的研究,并取得了丰硕成果。

由于岩体爆破是一个瞬态、超动态的过程,目前试验及理论等方法不但具有费用高、可重复性差及困难大等缺点,而且还难以反映不规则节理、裂隙等对岩体爆破效果的影响,因此,多种连续型数值方法(如有限元、有限差分)和非连续型数值方法(如离散元、DDA 等)都在岩体爆破模拟中得到了广泛应用,并取得了良好的效果。但是由于实际岩体的复杂性导致上述数值方法仍不能客观地模拟岩体的爆破过程,如有限元不能很好地反映岩体中存在的大量节理、裂隙等初始缺陷,而且限于连续性假定,该方法也不能很好地反映岩体在爆破荷载作用下的破坏过程,而离散型数值方法虽然能够较好地反映岩体中存在的初始缺陷及岩体在爆破荷载作用下的破坏过程,但却无法反映岩体中存在的非贯通节理、裂隙,并且也无法反映爆破荷载作用下因新裂纹的产生而导致的块体再次破坏。因此,20 世纪 90 年代初,由石根华<sup>[14]</sup>提出的数值流形方法就引起了爆破工作者的关注,刘红岩等<sup>[15]</sup>就对该方法用于岩石爆破数值模拟的可行性进行了初步探讨,后来又利用该方法分别研究了爆炸荷载作用下完整岩体和节理岩体的破坏过程,实现了利用该方法对岩体爆破破坏过程的模拟<sup>[10-11]</sup>。相比有限元和离散元等数值方法,数值流形方法用于岩体爆破数值模拟具有不可比拟的优势,它不仅很好地反映岩体中数量众多的贯通与非贯通的初始节理,而且还可以很好地反映完整岩块的再次破碎及破碎后的块体运动情况,实现对岩体爆破全过程的模拟。

综观目前岩体爆破数值模拟的研究现状,还很少见到对含断续节理岩体爆破效果的模拟研究,因此本文就利用数值流形方法对该问题进行模拟研究,探讨节理性质对岩体爆破破坏模式的影响规律。

## 1 岩体爆破模拟的关键问题

### 1.1 初始节理模拟

岩体中都存在着节理、裂隙等天然缺陷,如何在模拟计算中反映它们是关系到岩体爆破模拟合理与否的一个重要问题。采用节理单元的有限单元法显然无法反映岩体中众多的节理、裂隙,离散单元法对非贯通节理也无能为力,而数值流形方法则是采用两套网格——物理网格和数学网格相互切割形成求解单元,而物理网格由模型边界、内部不连续面等组成,因而可以很好地反映岩体内存在的各种节理等初始缺陷,克服了有限元和离散元方法在这方面的不足。

### 1.2 裂纹产生和扩展判据

在爆炸等冲击荷载作用下,岩体的破坏不可能仅仅沿着原有节理面产生,而且可能出现大量新的裂纹,如何模拟新裂纹的产生与扩展是岩体爆破模拟中的另一关键问题。同样有限元法由于是基于连续介质力学的数值方法,显然也无法很好地模拟这一过程,而离散元法是把被节理切割的块体作为最小单元,也无法很好地模拟新裂纹的产生与扩展。为此,本程序在石根华开发的数值流形方法程序的基础上加入了裂纹产生及扩展子程序,实现了对裂纹产生与扩展的模拟,即根据岩体中通常出现的拉伸破坏和剪切破坏,提出了如下的裂纹产生与扩展判据。

对于新裂纹的起裂,一般考虑采用以应力为判据,采用摩尔-库仑准则作为裂纹起裂的判据,其判断方法是<sup>[2]</sup>:(1) 当第一主应力大于材料的抗拉强度时,材料被拉伸破坏,产生新裂纹;(2) 当某点的最大剪应力大于材料的抗剪强度时,材料被剪切破坏,产生新裂纹。

对于已有裂纹的扩展应遵循断裂力学应力强度因子准则,即当应力强度因子达到断裂韧性时,裂纹开始扩展。判断裂纹是否扩展的第一步是计算裂纹尖端的应力强度因子。首先,根据二阶流形元求出位移场,进一步用带有裂纹尖端奇异解的奇异边界元法求解应力强度因子<sup>[16]</sup>;然后,根据最大周向应力准则判断裂纹是否扩展及扩展方向。裂纹的扩展方向和扩展判据分别满足:

$$K_1 \sin \theta + K_2 (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (1)$$

$$\cos \frac{\theta}{2} \left( K_1 \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_2 \sin \theta \right) = K_{IC} \quad (2)$$

其中,  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_{IC}$  分别为第一、第二应力强度因子及材料断裂韧性,  $N/m^{3/2}$ ;  $\theta$  为裂纹扩展角,  $^\circ$ 。

### 1.3 接触问题处理

在爆破荷载作用下,岩体会破碎成小的块体,进而产生飞散等运动。在块体运动过程中,不同块体之间将会产生接触、碰撞等物理现象,如何更好地模拟块体之间的接触是数值模拟研究的重点,更是难点。数值流形方法在这方面完全借鉴了 DDA 中块体运动学的理论<sup>[9]</sup>,即在块体运动过程中,保证任意两个块体之间无嵌入、无拉伸,而这一过程是通过反复的开-合迭代,即在可能的接触边界之间通过施加和移去弹

簧实现。在边界处块体之间有张开、锁定和滑动3种状态。当边界从张开发展到锁定时加切向和法向弹簧,当边界从滑动到锁定时加切向弹簧,当边界之间滑动时在边界两侧加摩擦力,从而对刚度矩阵做出修正,并计算接触力叠加于本次计算的平衡力列阵中,参加下次迭代计算。

## 2 算例分析

### 2.1 冲击荷载简化

为了能够和实际情况进行对比分析,本算例取爆炸载荷作为施加的冲击荷载。相应的实际问题对应于二维平面问题的圆形装药在有限域内爆炸后形成爆破漏斗的过程。

由于实际的爆破过程十分复杂,因此,在满足工程要求的条件下,可以对岩石爆破破坏的过程进行简化处理,通过在炮孔内壁上施加均匀分布的冲击三角波载荷来模拟爆炸荷载,冲击载荷的升压时间为80ms,降压时间为220ms,整个荷载作用时间为300ms,载荷的最大峰值压力为5GPa。

### 2.2 计算模型

取计算模型长和宽分别为4m和1.5m,炮孔直径为0.5m,这里因忽略炮孔附近的粉碎区,所取直径较大。假定岩石为各向同性均质,其动态计算参数分别为:动弹性模量

80GPa;动泊松比0.10;密度 $2.4\text{g/cm}^3$ ;动态断裂韧性 $0.5\text{MN/m}^{3/2}$ ;岩石内摩擦角、凝聚力与动抗拉强度分别为 $45^\circ$ 、8MPa和30MPa;取节理面的摩擦角 $15^\circ$ ,凝聚力和动抗拉强度均为零。当在冲击荷载作用下岩石内部有新裂纹产生时,该裂纹面将作为岩石内部新的节理面,其强度值等同于原有节理面。计算模型边界条件为:上边界为自由边界,其余3个边界均为固定边界。

取 $30^\circ$ 倾斜断续节理长度均为0.2m,水平、竖直间距分别为0.4m和0.2m,并和初始完整无缺陷的岩石在冲击荷载作用下进行破坏过程模拟。由于过多的初始节理将导致计算速度过慢,因此为了加快计算速度,同时考虑到炮孔上部节理对岩石冲击破坏模式影响较大,所以这里的初始节理仅取炮孔上部的两排,而认为其余部分没有节理,这样可以大大提高计算速度。

### 2.3 计算结果分析

计算过程中的7个瞬时状态如图1所示。由图1所示的计算结果可知:

(1) 由图1(a1)可以看出,数值流形方法可以很好地反应岩体中众多的非贯通节理,这是其他两类数值方法,即连续型数值方法和离散型数值方法很难做到的。这主要是由于数

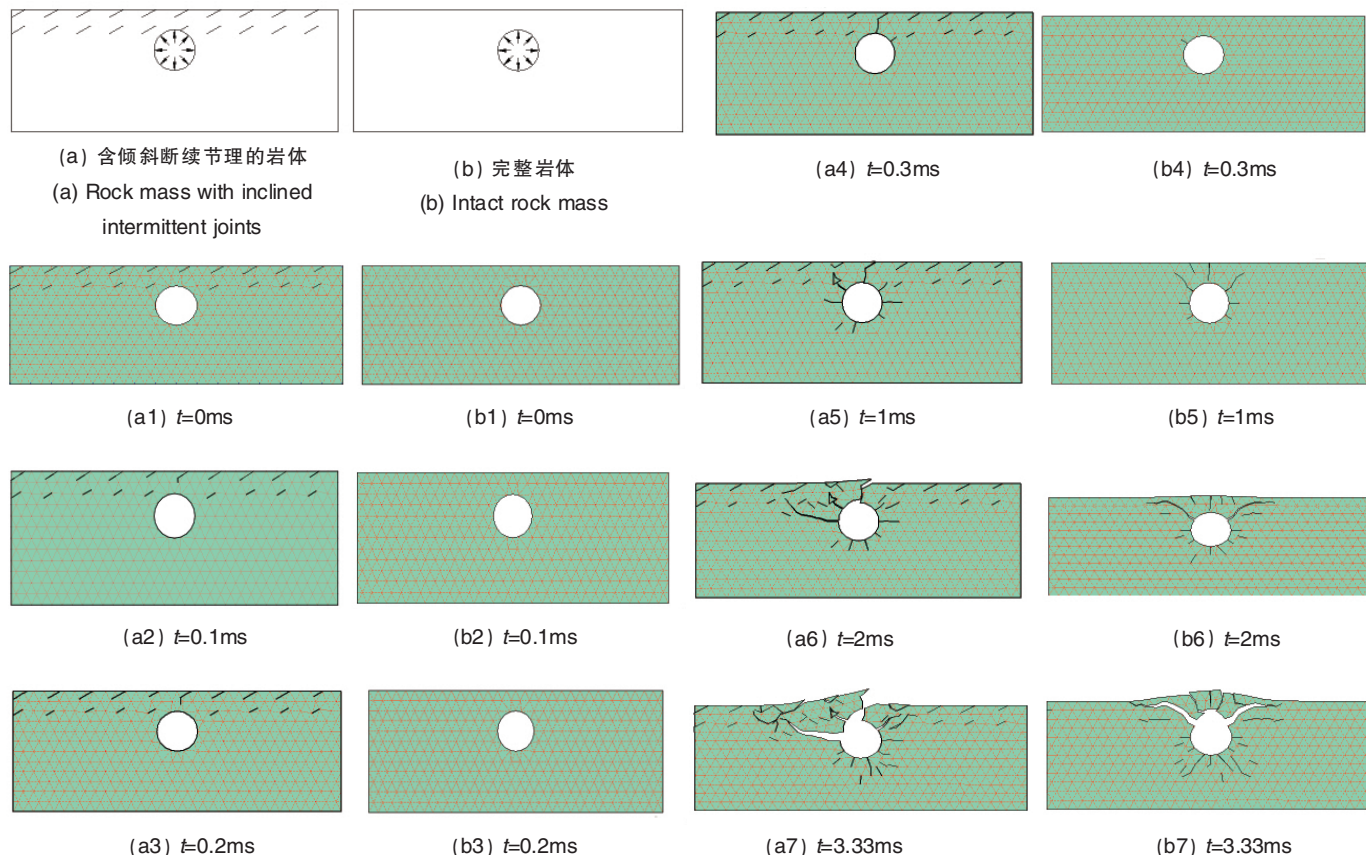


图1 两类岩体爆破破坏过程模拟结果

Fig. 1 Simulation results of two kinds of rock mass blasting failure process

值流形方法采用两套独立的网格——数学网格和物理网格,因而从根本上解决了节理岩体中初始缺陷的模拟问题。由图 1(a1)还可以看出,它与图 1(a)中的初始节理并不是完全一致的,它所有初始节理都贯通其所在的每个网格,这说明实际节理在模拟时是受网格划分影响的,如果节理实际尺寸不能贯穿其所在网格将被删节,因而图 1(a1)中所示的节理尺寸和位置与图 1(a)是有所差别的。

(2) 当  $t=0.1\text{ms}$  时,完整岩体内没有新的裂纹产生,而节理岩体则在靠近炮孔处的一个节理端部产生了新的裂纹,说明原有的节理在冲击荷载作用下发生了扩展,也说明节理岩体的强度一般低于完整岩体。同时,在节理端部容易产生应力集中,其扩展遵循断裂力学原理,因而容易在已有缺陷处产生破坏。在试算中还发现,如果节理尖端处的断裂韧性足够大,节理岩体的破坏也将和完整岩体一样在炮孔周围产生剪切破坏,即产生如图 1(b4)所示的破坏。因此在研究节理岩体的破坏时,准确测定岩体的断裂韧性也是非常必要的。

(3) 当  $t=1\text{ms}$  时,完整岩体中的裂纹产生与扩展基本关于炮孔垂线对称,而节理岩体则不然,裂纹的产生很大程度上受到已有节理的影响和控制。新裂纹产生后在可能的条件下将优先沿着已有裂纹的方向发展,而且当新裂纹扩展到已有节理处时,其扩展路径还将受到严重影响,如当新裂纹近似垂直发展到已有节理处后,将几乎不再沿着其原始方向发展,而是归并到原有节理。

(4) 当  $t=1\text{ms}$  和  $3.33\text{ms}$  时,完整岩体的破坏情况还是基本对称的,而节理岩体则不然,在节理分布有利于新裂纹扩展的一侧,破坏比较严重,因此破坏极不均匀。在实际岩体爆破工程中,当岩体被节理切割较严重时,爆破效果很差,而且爆破块度分布也不均匀。

(5) 节理对岩体爆破模式的影响具有双重作用,一方面节理的存在弱化了岩体的力学性质,并且在外载作用下岩体很容易沿节理端部产生破坏,这是有利于岩体破碎的一面;另一方面,节理的存在阻碍了新生裂纹的扩展,改变了其扩展方向,这一点可由图 1(a5)看出,当新生裂纹到达原有节理时,其扩展方向与完整岩体明显不同。同时节理还对应力波起到衰减作用,降低了爆炸能量的利用率。这两方面的作用强弱主要取决于节理的分布形式及其物理力学性质,因此在节理岩体爆破工程设计与施工前,必须要对其内部节理情况有详细的了解,才有可能达到预期的爆破目的。

### 3 结论

数值流形方法是一种新出现的数值计算方法,由于其采用数学网格与物理网格共同形成求解单元——流形单元,因而能够很方便地反映岩体中存在的数量较多、几何分布形式多样及物理力学参数各异的节理及其在外力作用下的扩展乃至块体运动,在很大程度上克服了有限元与离散元方法在

这方面的不足,是一种较有潜力的数值方法。本文通过算例说明了该方法在节理岩体爆破数值模拟中的应用,同时也表明节理存在及其几何、物理力学性质对岩体爆破效果的影响是明显的。因此,在实际岩体爆破工程设计与施工中,必须先准确掌握节理在岩体内的分布规律及其物理力学特征,以期达到预期爆破效果。

### 参考文献 (References)

- [1] 孙广忠, 孙毅. 岩体力学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Sun Guangzhong, Sun Yi. Principle of rock mass mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 李建军, 段祝平. 节理裂隙岩体爆破试验研究 [J]. 爆破, 2005, 22(3): 12-16.  
Li Jianjun, Duan Zhuping. *Blasting*, 2005, 22(3): 12-16.
- [3] 叶海旺, 王进. 节理岩体爆破数值模拟[J]. 爆破, 2009, 26(4): 13-16, 37.  
Ye Haiwang, Wang Jin. *Blasting*, 2009, 26(4): 13-16, 37.
- [4] 肖定军, 张继春, 蒲传金, 等. 爆破作用下岩体倾顺软弱夹层的变形规律研究[J]. 爆破, 2010, 27(4): 1-5.  
Xiao Dingjun, Zhang Jichun, Pu Chuangjin, et al. *Blasting*, 2010, 27(4): 1-5.
- [5] 甯允军, 杨军, 陈鹏万. 节理岩体爆破的 DDA 方法模拟 [J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2259-2263.  
Ning Youjun, Yang Jun, Chen Pengwan. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2259-2263.
- [6] 谢冰, 李海波, 王长柏, 等. 节理几何特征对预裂爆破效果影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3812-3821.  
Xie Bing, Li Haibo, Wang Changbai, et al. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3812-3821.
- [7] 江巍, 程圣国, 冯强. 基于非连续变形分析方法的爆破荷载下不同类别岩体的动力响应[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(2): 28-31, 41.  
Jiang Wei, Cheng Shengguo, Feng Qiang. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(2): 28-31, 41.
- [8] 刘红岩, 张川, 杨军, 等. 数值流形方法用于岩石爆破数值计算的可行性浅析[J]. 爆破, 2004, 21(2): 17-20.  
Liu Hongyan, Zhang Chuan, Yang Jun, et al. *Blasting*, 2004, 21(2): 17-20.
- [9] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民, 译. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
Shi Genhua. Numerical manifold method and discontinuous deformation analysis[M]. Pei Juemin, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [10] 刘红岩, 秦四清, 杨军. 爆炸荷载下岩石破坏的数值流形方法模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(1): 50-56.  
Liu Hongyan, Qin Siqing, Yang Jun. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(1): 50-56.
- [11] 刘红岩, 王贵和. 节理岩体冲击破坏的数值流形方法模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3523-3527.  
Liu Hongyan, Wang Guihe. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3523-3527.
- [12] Zhang G, Yasuhito S, Hiroo H, et al. The second order manifold method with six-node triangle mesh[J]. *Structural Engineering/Earthquake Engineering JSCE*, 2002, 19(1): 1-9.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)