

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.05.011

# 考虑岩石应变率效应的 DDA 程序\*

余德运<sup>①</sup> 刘殿书<sup>①</sup> 何成龙<sup>②</sup><sup>①</sup>中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院(北京,100083)<sup>②</sup>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] 针对原经典 DDA 程序在研究岩石动力学问题时不考虑岩石的应变率效应,在 DDA 程序中引入与岩石应变率相关的动态强度表达式,将块体间接触弹簧破坏准则发展为动态破坏准则,进而完善 DDA 程序对岩石动力学破坏问题的处理能力。用原 DDA 程序和改进 DDA 程序对动载作用下岩石单轴拉、压破坏实验进行模拟,两者的模拟结果对比分析表明:在不同的加载速率作用下,原 DDA 程序得到的失效力和破坏形式基本没有变化,这与实验结果不相符。但是,在不同的加载速率作用下,改进的 DDA 程序得到破坏形式能与实验结果相符,且能体现动载作用下岩石动态强度随加载速率的提高而增大的强度特性。

[关键词] 非连续变形分析;应变率;数值模拟

[分类号] TD235;O342

## 引言

DDA(discontinuous deformation analysis)方法是 1984 年由石根华<sup>[1]</sup>提出的一种对诸如岩石等不连续块体系统的力学响应问题进行数值计算的方法。该方法以块体的位移为未知数,基于最小势能原理建立平衡方程,计算效果高,并且能充分考虑研究对象的不连续特性,可模拟不连续块体的非连续变形和大位移运动情况,已成为研究岩石这种典型的不连续介质的力学响应问题的重要方法。

岩石在动载与准静载条件下的力学响应的区别在于:动载荷下的力学问题需要考虑两种动态效应,即惯性效应和与材料本构相关的应变率效应<sup>[2]</sup>。原经典 DDA 程序研究岩石动态力学问题时,岩石的强度固定不变,仅通过添加动态系数来考虑惯性效应<sup>[3]</sup>,不考虑应变率效应,因此精确度不高。一直以来,从事 DDA 程序学习和研究的专家、学者用 DDA 程序模拟研究岩石动力学问题时,都没有考虑岩石在动载条件下的应变率效应<sup>[4-9]</sup>。

为了完善 DDA 程序对岩石动力学破坏问题的处理能力,以期能够将 DDA 程序更好地应用到岩石爆破等动态破坏问题的数值模拟当中,本文在原经典 DDA 程序的基础之上,引入与岩石应变率相关的动态强度计算子程序,将块体间接触弹簧破坏准则发展为动态破坏准则,并通过模拟计算和相关的实验数据进行验证。

## 1 原 DDA 程序中的岩石断裂处理方法及存在问题

### 1.1 原 DDA 程序中的岩石断裂处理方法

DDA 程序研究岩石力学问题时,将岩石节理分为真实节理和虚拟节理,如图 1 所示。

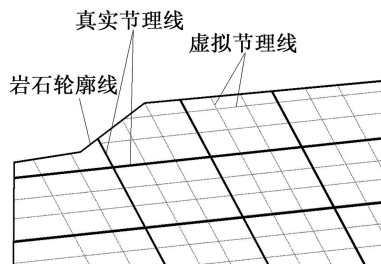


图 1 DDA 程序中的岩石节理划分

Fig. 1 Division of rock joint in DDA program

真实节理即为岩体中客观存在的节理,并假设其节理面的抗拉强度为零。虚拟节理是为了划分块体单元而虚构的节理,其客观上是不存在的,被虚拟节理分开的块体实际上是连续的,并假设虚拟节理面强度参数等于岩石的强度参数,从而实现块体之间的黏结,反映其连续特性。如果接触弹簧力超过了节理强度,则把接触弹簧去掉,即块体单元发生断裂。虚拟节理破坏准则分为拉伸破坏和压剪破坏,分别采用最大拉应力准则[式(1)]和莫尔-库仑准则[式(2)]。

\* 收稿日期:2015-03-20

基金项目:重复爆破荷载作用下岩石动态疲劳损伤特性研究(51374038)

作者简介:余德运(1981~),男,博士后,主要从事爆破安全技术及数值仿真计算研究。E-mail: yudeyun2000@163.com

$$f_n = -\sigma_l l. \quad (1)$$

$$f_\tau = cl + f_n \tan \varphi; \quad (2)$$

$$c = \sigma_c \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi}.$$

式(1)和式(2)中: $f_n, f_\tau$  分别为法向、切向接触力; $\sigma_l, \sigma_c$  为静载条件下岩石单轴抗拉、抗压强度; $l$  为接触的长度; $c, \varphi$  分别为岩石黏聚力和摩擦角。

## 1.2 原 DDA 程序处理岩石断裂中存在的问题

原 DDA 程序中,通过假设虚拟节理面强度参数等于岩石的强度参数而实现块体之间的黏结,反映其连续特性。岩石强度  $\sigma_c$  和  $\sigma_l$ 、黏聚力  $c$ 、摩擦角  $\varphi$  的值在计算过程中始终保持不变,这对于静载条件下是成立的;而在动载条件下,岩石强度、黏聚力会随加载速率的增加而增大,且岩石材料内摩擦角也会随加载训练场的变化而变化。因此,将原 DDA 程序中针对岩石静载问题的处理方法应用于岩石动力学问题时,显然是不成立的。

为完善 DDA 程序对岩石动力学破坏问题的处理能力,需在原 DDA 程序的基础上考虑岩石的动态强度特性,即考虑岩石在动载条件下的应变率效应。

## 2 岩石动态强度

对岩石动态强度特性的早期的研究就已表明:岩石动态强度随加载速率的增加而增大<sup>[10]</sup>。1999 年, Lankford 等<sup>[11]</sup> 综合了大量试验结果后,把岩石动态破坏强度随应变率的影响归纳为:

$$\sigma_d \propto \begin{cases} \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{n+1}}, & \dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}^*; \\ \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{3}}, & \dot{\varepsilon} \geq \dot{\varepsilon}^*. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\sigma_d$  为岩石动态破坏强度; $\dot{\varepsilon}$  为应变率; $\dot{\varepsilon}^*$  为应变率临界值; $n$  为断裂力学关系式的指数。

2010 年,宫凤强<sup>[12]</sup> 对均质砂岩不同应变率下的动态单轴压缩试验和间接拉伸试验进行了研究,结果表明:动态压缩和间接拉伸状态下,在低于应变率临界值 ( $10^2 \text{ s}^{-1}$ ) 时,岩石的强度增加均比较缓慢,强度增加跟应变率的对数值呈线性关系;在高于应变率临界值 ( $10^2 \text{ s}^{-1}$ ) 时,强度迅速增加,强度增加跟应变率的  $1/3$  次方呈线性关系。把岩石的动态强度表示为:

单轴拉伸状态下

$$\sigma_{ld} = \begin{cases} A \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{ld}}{\dot{\varepsilon}_l}\right) + \sigma_l, & (\dot{\varepsilon}_{ld} \leq \dot{\varepsilon}^*); \\ B \dot{\varepsilon}_{ld}^{1/3}, & (\dot{\varepsilon}_{ld} > \dot{\varepsilon}^*). \end{cases} \quad (4)$$

单轴压缩状态下

$$\sigma_{cd} = \begin{cases} C \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{cd}}{\dot{\varepsilon}_c}\right) + \sigma_c, & (\dot{\varepsilon}_{cd} \leq \dot{\varepsilon}^*); \\ D \dot{\varepsilon}_{cd}^{1/3}, & (\dot{\varepsilon}_{cd} > \dot{\varepsilon}^*). \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: $\sigma_{ld}$  为岩石动态抗拉强度, MPa; $\sigma_{cd}$  为岩石动态抗压强度, MPa; $\dot{\varepsilon}_{ld}$  为动态拉伸状态下的应变率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\dot{\varepsilon}_{cd}$  为动态压缩状态下的应变率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\dot{\varepsilon}^*$  为岩石材料应变率的临界值, 约为  $10^2 \text{ s}^{-1}$ ;  $\dot{\varepsilon}_c$  为静载状态下的应变率, 约为  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ;  $\sigma_l$  和  $\sigma_c$  分别为静载条件下岩石的单轴抗拉强度和单轴抗压强度, MPa;  $A, B$  为岩石拉伸状态下的材料参数;  $C, D$  为岩石压缩状态下的材料参数。

## 3 改进 DDA 程序中的岩石断裂处理方法

DDA 程序描述块体单元的变形是通过块体内任意一点来表示,块体单元或者块体系统的大位移和大变形是诸多小位移和小变形的时步累加<sup>[1]</sup>。DDA 程序根据最小势能原理建立平衡方程式,以块体单元的位移为联立方程式的未知数,把刚度、质量和载荷等子矩阵加到联立方程的系数矩阵中去。块体内任一点  $Q(x, y)$  的位移  $(u, v)$  可用 6 个位移不变量  $\mathbf{D}_i = (u_0 \ v_0 \ r_0 \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy})^T$  表示。其中  $(u_0, v_0)$  是块体内的点  $P(x_0, y_0)$  的刚体位移; $r_0$  是块体绕点  $(x_0, y_0)$  的转动角度; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  是块体的法向和切向应变。DDA 程序求解过程中,每一计算时步对平衡方程进行求解,得到每一步每个单元 6 个位移不变量  $\mathbf{D}_i$ 。

在每一计算时步,可通过对应变求时间的导数得到应变率;步应变对时间步长求导可得到该时间步的步应变率,定义累计应变对累计时间求导可得平均应变率,二者的数量级是相同的。计算出步应变率后,可根据式(4)和式(5)得到岩石动态强度。将其引入到原 DDA 程序计算中,即可实现在 DDA 程序中考虑岩石的动态强度。具体计算流程如图 2 所示。

将原 DDA 程序中法向和切向弹簧破坏准则,即式(1)和式(2)中的静态参数用动态参数代替,即  $\sigma_l$  用  $\sigma_{ld}$  代替,  $c$  用  $c_d$  代替,  $\varphi$  用  $\varphi_d$  代替,可构成接触弹簧的动态最大拉应力准则[式(6)]和动态莫尔-库仑准则[式(7)]。

$$f_n = -\sigma_{ld} l. \quad (6)$$

$$f_\tau = c_d l + f_n \tan \varphi_d; \quad (7)$$

$$c_d = \sigma_{cd} \frac{1 - \sin \varphi_d}{2 \cos \varphi_d}.$$

式(6)和式(7)中: $\sigma_{ld}$  为动态拉伸强度; $c_d$  为岩石动态黏聚力; $\varphi_d$  为岩石的动态摩擦角;其他参数同式(1)、式(2)。

根据宫凤强<sup>[12]</sup> 和 Li<sup>[13]</sup> 的研究结论:岩石材料内摩擦角在不同应变率下变化不大,强度变化主要

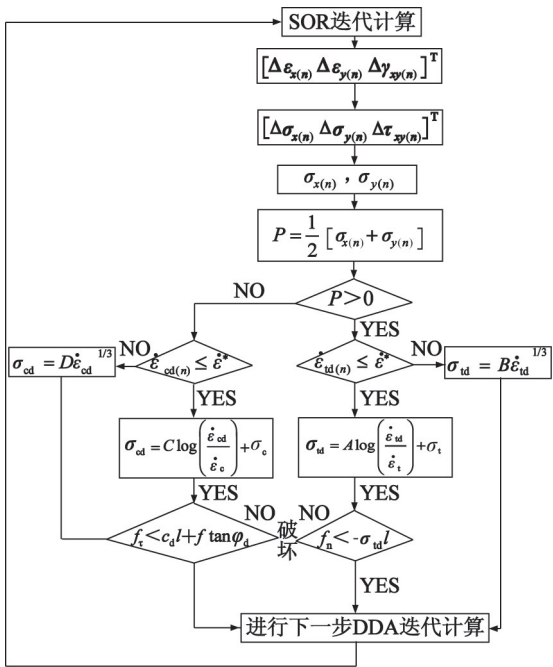


图2 动态开裂判断子程序计算流程

Fig. 2 Calculation process of dynamic cracking subroutine

是由黏聚力的变化引起的。因此,可认为  $\varphi_d = \varphi$ 。

4 数值算例

为了验证考虑岩石应变率效应的改进 DDA 程序的可行性和有效性,通过对不同加载速率下的岩石动态单轴拉伸和压缩破坏进行模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比。

4.1 模型

岩石试件模型如图 3 所示,试件宽  $w = 50\text{ mm}$ 、高  $h = 100\text{ mm}$ ,为使点载荷  $P$  能均匀地作用到试件表面上,在试件的上、下表面各加设一薄板,薄板厚度为  $10\text{ mm}$ ,并在薄板与试件表面间采用较大的节理强度。

数值模拟计算中子块体间节理材料参数见

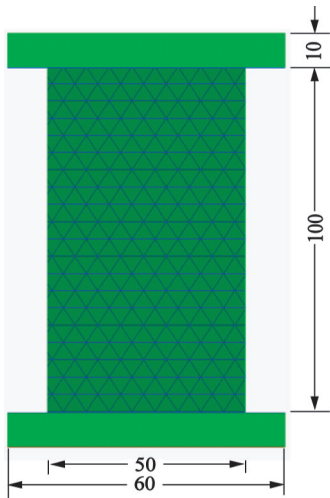


图3 单轴试验模型

Fig. 3 Uniaxial test model

表 1,块体材料参数见表 2。

表 1 试件节理材料参数

Tab. 1 Joint parameters of the numerical model

节理类型	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
虚拟节理	35	20	3.5

表 2 试件块体材料参数

Tab. 2 Material parameters of the numerical model

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	抗压强度 $\sigma_c/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
2 650	45	0.24	60	3.5
临界应变率		拉伸状态参数		压缩状态参数
$\dot{\varepsilon}^*/\text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}_c/\text{s}^{-1}$	$A$ $B$		$C$ $D$
$1 \times 10^2$	$1 \times 10^{-5}$	1.0	30	12   3.5

4.2 岩石单轴动态拉伸破坏模拟结果分析

图 4 为原 DDA 程序和改进 DDA 程序计算得到的不同加载速率拉伸作用下,试件拉伸断裂破坏应力云图。

从图 4 中可以看出,原 DDA 程序模拟岩石单轴动态拉伸破坏时,在加载速率分别为  $5 \times 10^3$ 、 $5 \times 10^4$  MPa/s 和  $5 \times 10^5$  MPa/s 时,试件拉伸断裂位置都相同,且总是位于靠近加载端端部,不受加载速率的影响。显然,这与实际情况不相符。改进 DDA 程序在不同的加载速率时,试件拉伸断裂位置并不完全相同: $5 \times 10^3$  MPa/s 时,试件拉伸断裂的位置位于靠近加载端的中上部; $5 \times 10^4$  MPa/s 时,断裂的位置位于靠近加载端端部,并且试件中下部有裂纹,只是没有贯通; $5 \times 10^5$  MPa/s 时,断裂的位置位于靠近加载端端部。也就是说,加载速率不同,试件位伸断裂的位置并非固定不变,会随着加载速率变化而不同,且除在断裂面有贯通裂纹以外,试件其他位置也有裂纹。这与文献[14-15]的试验研究结果相符(见图 5)。

图 6 为 DDA 程序计算得到的试件拉伸断裂线下方块体单元在不同加载速率作用下的轴向应力-时间曲线。从图 6(a)中可看出,对于原 DDA 程序而言,在不同的加载速率加载状态下,试件破坏拉应力值几乎都相等,约等于材料的静态抗拉强度 3.5 MPa。也就是说,岩石的抗拉强度不受加载速率的影响,这显然与实际情况不符;从图 6(b)中可看出,对于改进的 DDA 程序,在加载率为  $5 \times 10^3$ 、 $5 \times 10^4$  MPa/s 和  $5 \times 10^5$  MPa/s 时,试件发生拉伸断裂时的拉应力分别为 7.42、8.43、9.46 MPa,即试件最大拉应力值随着加载速率的提高而增大,且远大于其静态抗拉强度 3.5 MPa。这符合岩石在动载条件下的



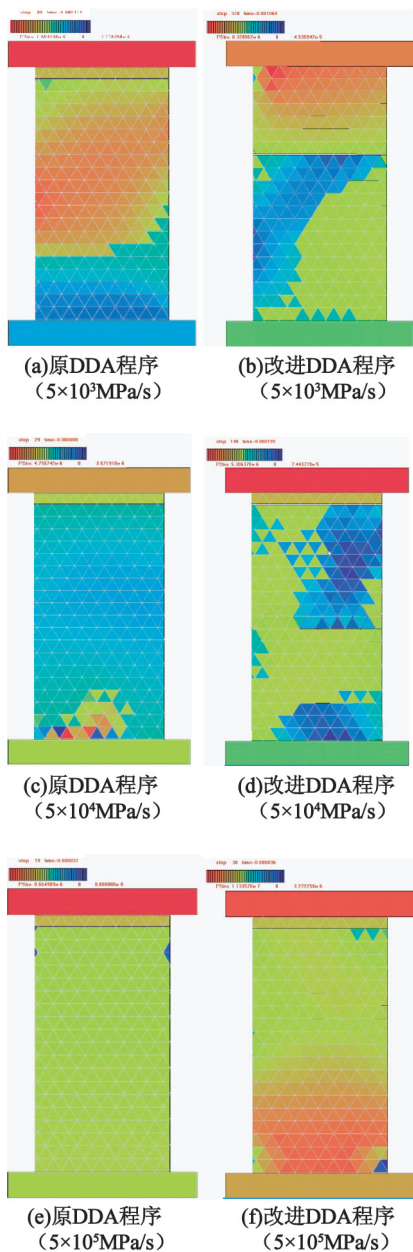


图 4 不同加载速率下的拉应力云图  
Fig. 4 Tensile stress nephogram under different loading rates

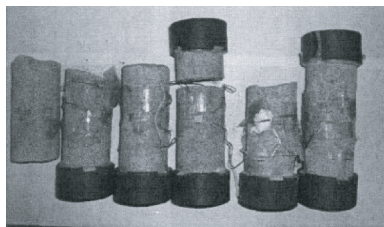
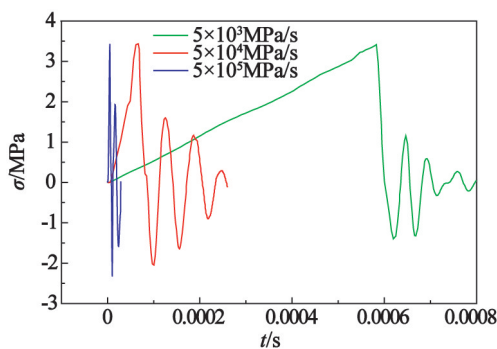


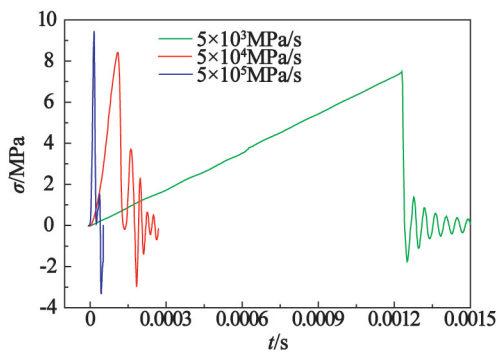
图 5 动态单轴直接拉伸试验结果

Fig. 5 Results of dynamic uniaxial tensile experiment  
强度特性。

对岩石单轴动态拉伸破坏试验的模拟结果对比分析表明:用原DDA程序模拟,试件在动载条件下的拉伸断裂位置和抗拉强度不受加载速率的影响,



(a) 原 DDA 程序



(b) 改进 DDA 程序

图 6 DDA 程序计算的轴向拉应力-时间曲线

Fig. 6 Axial tensile stress-time curves  
calculated by DDA program

这与广大学者的研究结论不一致,也与实际情况不符;而改进 DDA 程序能反映抗拉强度随加载速率的提高而增大这一动态特性,且断裂位置能与实际情况相符。

### 4.3 岩石单轴动态压缩破坏模拟结果分析

图 7 为原 DDA 程序和考虑岩石应变率效应的改进 DDA 程序计算得到的不同加载速率作用下,模拟试件压缩破坏的应力云图。

从图 7 可以看出,原 DDA 程序模拟岩石单轴动态压缩破坏时,在加载速率分别为  $5 \times 10^3$ 、 $5 \times 10^4$  MPa/s 和  $5 \times 10^5$  MPa/s 时,试件破坏形式基本相同,都是“人”字形整体性破坏,试件破裂成为几个比较大的碎块,这与文献[12,16]中给出的静载条件下岩石单轴压缩破坏常见形式相似,如图 8(a)。考虑岩石应变率效应的改进 DDA 程序模拟岩石单轴动态压缩破坏时,不同加载速率时,试件的破坏形式总体上表现为粉碎性破坏,且随着应变率的提高,碎块大块度逐渐减小,小颗粒破碎块度逐渐增多,加载速率为  $5 \times 10^5$  MPa,试件破坏比较充分,基本已没有大的碎块,这与文献[12,16]中给出的冲击动载条件下岩石单轴压缩破坏常见形式相似,如图 8(b)。

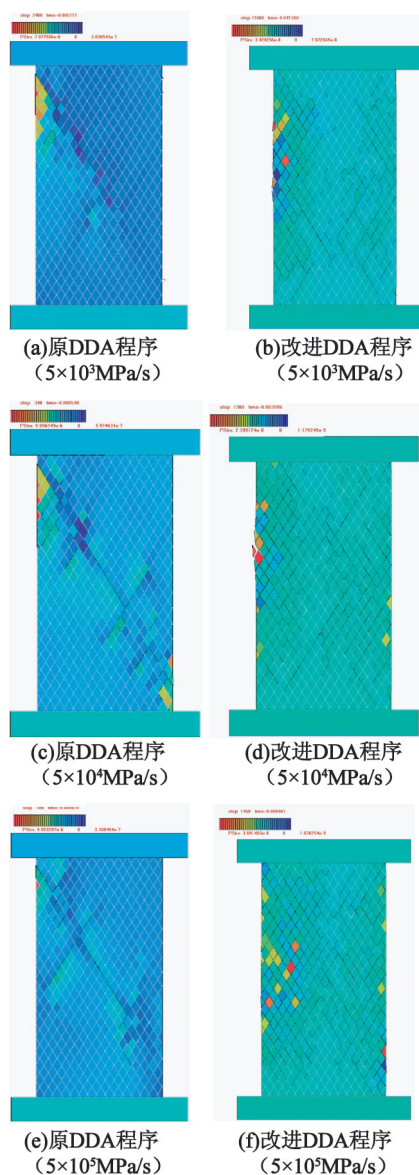


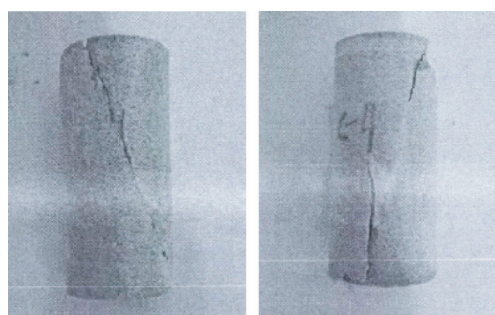
图 7 不同加载速率下的压应力云图

Fig. 7 Compressive stress nephogram under different loading rates

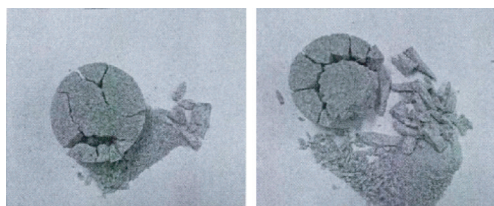
图 9 为 DDA 程序计算得到的试件破坏面上块体单元在不同加载速率压缩作用的轴向应力-时间曲线。从图 9(a)中可以看出,原 DDA 程序,在不同加载速率时,岩石失效压应力值大小几乎相等,约等于材料的静抗压强度值 60 MPa。也就是说,岩石试件的抗压强度不受加载速率的影响,这显然与实际情况不符。

而图 9(b)中,改进 DDA 程序在不同加载速率时,试件发生压剪破坏时的压应力分别为 99.87、109.26、118.97 MPa,即试件压缩失效的压应力值都比其抗压强度 60 MPa 要大,且随加载速率的提高而增大。这符合岩石在动载条件下的强度特性。

对岩石单轴动态压缩破坏试验的模拟结果对比分析表明:与原 DDA 程序相比,考虑岩石应变率效



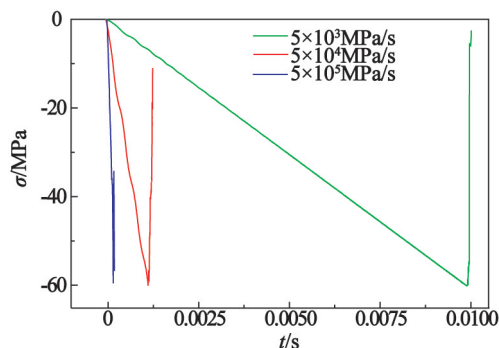
(a) 静载条件下



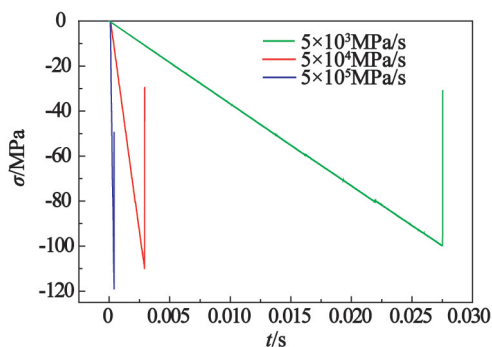
(b) 动载条件下

图 8 岩石单轴压缩试验结果

Fig. 8 Results of uniaxial compressive experiment



(a) 原 DDA 程序



(b) 改进 DDA 程序

图 9 DDA 程序计算的轴向压应力-时间曲线

Fig. 9 Axial compressive stress-time curves calculated by DDA program

应的改进 DDA 程序能够较真实模拟动载作用下岩石的破坏形式,能客观地反映岩石在动载条件下抗压强度随加载速率的提高而增大的强度特性。

## 5 结论

1) 原 DDA 程序不考虑动态荷载对岩石强度的影响,岩石抗拉、抗压强度在计算过程中始终为一恒

定值,不受加载速率的影响。用原 DDA 程序模拟岩石试件动单轴试验,其伸破坏位置、压剪破坏形式和失效力与静载作用下的结果相同,不能体现静载与动载作用下岩石的力学响应的区别。

2)引入岩石动态强度进而考虑岩石应变率效应的改进 DDA 程序,能够反映岩石动态强度随加载速率的提高而增大这一动态特性,用改进 DDA 程序模拟岩石试件动态单轴试验,其拉伸破坏位置、压剪破坏形式和失效力与其他学者的试验结果相一致。改进 DDA 程序与原 DDA 程序相比,其能体现静载与动载作用下岩石的力学响应的区别,可用于动载作用下岩石的力学响应问题的模拟研究。

### 参 考 文 献

- [1] Shi Genhua, Goodman R E. Discontinuous deformation analysis [R]. Lawrence Berkeley Lab., CA (USA), 1984.
- [2] 李夕兵,古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1994.  
Li Xibing, Gu Desheng. Rock impact dynamics [M]. Changsha: Press of Central South University of Technology, 1994.
- [3] 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 (NMM) and discontinuous deformation analysis (DDA) [M]. Pei Juemin, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [4] 姜清辉,朱传云. 动力学问题的 DDA 方法及其在爆破抛掷过程中的应用[J]. 工程爆破, 2004, 10(3): 5-8.  
Jiang Qinghui, Zhu Chuanyun. Discontinuous deformation analysis for dynamics and its application in modeling of blasting throwing process [J]. Engineering Blasting, 2004, 10(3): 5-8.
- [5] 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 Xiuli, Jiao Yuyong, Liu Quansheng, 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.
- [6] 甯尤军,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. Numerical simulation of rock blasting in jointed rock mass by DDA method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2259-2263.

- [7] 刘永茜,杨军,余德运. 爆破冲击边坡稳定性非连续变形分析模拟研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(增刊1): 74-78.  
Liu Yongqian, Yang Jun, Yu Deyun. Study on simulation of discontinuous deformation analysis for slope stability under blast impact [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31 (Suppl. 1): 74-78.
- [8] 施文俊,袁宝远. DDA 模拟 TBM 破岩机理[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(20): 5101-5104, 5106.  
Shi Wenjun, Yuan Baoyuan. TBM failure rock mechanism with DDA simulation [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(20): 5101-5104, 5106
- [9] 付晓东,盛谦,张勇慧. 开挖及动荷载作用下边坡响应的 DDA 方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 2612-2618.  
Fu Xiaodong, Sheng Qian, Zhang Yonghui. Research on DDA method for response of slopes under excavation and dynamic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl. 1): 2612-2618.
- [10] Attewell P B. Dynamic fracturing of rocks [J]. Colliery Engineering, 1963, 40(376): 203-210.
- [11] Lankford J, Predebon W W, Staehler J M, et al. The role of plasticity as a limiting factor in the compressive failure of high strength ceramics [J]. Mechanics of Materials, 1998, 29(3): 205-218.
- [12] 宫凤强. 动静组合加载下岩石力学特性和动态强度准则的试验研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.  
Gong Fengqiang. Experimental study of rock mechanical properties under coupled static-dynamic loads and dynamic strength criterion [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [13] Li H B, Zhao J, Li T J. Micromechanical modeling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6): 923-935.
- [14] 刘再华,解德,王元汉,等. 工程断裂动力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1996.
- [15] 陈忠. 岩石直接拉伸与压缩循环加载试验与变形特性的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2011.
- [16] 吴永胜. 岩石劈裂试验、单轴压缩和直接拉伸变形特性的实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2009.

(下转第 55 页)



- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [5] 齐世福. 军事爆破工程技术[M]. 北京:解放军出版社,2010.
- Qi Shifu. Military blasting engineering[M]. Beijing: The People's Liberation Army Press, 2010.
- [6] 李孝林,王少雄,高怀树. 爆破振动频率影响因素分析[J]. 辽宁工程技术大学学报,2006,25(2):204-206.
- Li Xiaolin, Wang Shaoxiong, Gao Huaishu. Analysis of factors affecting blasting vibration frequency[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006,25(2):204-206.
- [7] 钱七虎,陈士海. 爆破地震效应[J]. 爆破,2004,21(2):1-5.
- Qian Qihu, Chen Shihai. Blasting vibration effect[J]. Blasting, 2004, 21(2):1-5.
- [8] 郭涛,毛益明,杨力,等. 减振沟对爆破振动加速度峰值减振效应的试验研究[J]. 工程爆破,2010,16(2):76-78,90.
- Guo Tao, Mao Yiming, Yang Li, et al. Experimental study on damping effect of damping ditch on peak value of blasting vibration acceleration[J]. Engineering Blasting, 2010,16(2):76-78,90.

## Research on the Equivalent Conversion of Blasting Vibration Velocity and Acceleration

XIE Xingbo<sup>①</sup>, ZHONG Mingshou<sup>①</sup>, CHEN Yong<sup>①②</sup>, GUO Tao<sup>①</sup>

<sup>①</sup>School of Field Engineering, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

<sup>②</sup>School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] For the inconsistency problem of adopting blasting vibration acceleration for the building structures seismic design and vibration velocity in the safety control standard of blasting, the equivalent conversion and the influence factors of blasting vibration peak velocity and acceleration were studied by theoretical analysis and field test. Results show that a equivalent conversion between blasting vibration peak velocity and acceleration peak can be achieved by the formula. The conversion factor associates with the maximum explosive charge, absolute distance, detonation and other related factors.

[KEY WORDS] blasting vibration; vibration velocity; acceleration; equivalent conversion

(上接第 50 页)

## An Improved DDA Method Considering the Strain Rate of Rock

YU Deyun<sup>①</sup>, LIU Dianshu<sup>①</sup>, HE Chenglong<sup>②</sup>

<sup>①</sup>School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing (Beijing, 100083)

<sup>②</sup>State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] In view of the problem without considering the strain rate effect in the study when the original classic DDA method analyzing the rock dynamics, the formula of rock dynamic strength associated with the strain rate was introduced into the DDA program, and the dynamic failure criteria, instead of the static contact spring failure criteria, was developed to improve the DDA program. Uniaxial tensile and uniaxial compressive experiments of rock were simulated by the original and improved DDA program, and the results were compared and analyzed. It shows that the failure stress and damage form of rock calculated by the original DDA program doesn't change with different loading rates, which is inconsistent with the experimental results. While damage form of rock calculated by the improved DDA program is consistent with the experimental results, and it could reflect the strength characteristics of rock in that the dynamic strength increases with the increase of loading rate.

[KEY WORDS] discontinuous deformation analysis; strain rate; numerical simulation