

# 静态和动态载荷作用下岩石劈裂破坏模式的数值模拟

朱万成, 唐春安, 黄志平, 逢铭璋

(东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 简单介绍了岩石破裂过程分析程序模拟岩石在动载荷作用下破裂过程的原理和功能, 并用该程序研究岩石试样在静态和动态载荷作用下的劈裂破坏过程。数值模拟再现了岩石在静态和动态应力作用下破裂模式的差异, 给出了在不同冲击应力波幅值条件下岩石试样的 3 种典型的破裂模式。数值模拟表明, 在动态加载时, 应力波幅值较低时试样表现出与静态加载时类似的破裂模式, 随着应力波幅值的增加, 其他 2 种典型破裂模式就表现出来。

**关键词:** 岩石力学; 数值模拟; 破裂过程; 动态载荷

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)01-0001-07

## NUMERICAL SIMULATION ON SPLITTING FAILURE MODE OF ROCK UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADINGS

ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, HUANG Zhi-ping, PANG Ming-zhang

(Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The program, rock failure process analysis (RFPA), is developed and the principle of RFPA to simulate the static and dynamic failures of rock are briefly summarized. RFPA is used to study the failure process of rock specimens under static and dynamic loadings. The numerical simulation reproduces the different failure characteristics of rock under static and dynamic loadings, and three typical failure patterns are found under the action of stress wave with different amplitudes. Numerical results indicate that the failure pattern is similar to those under static loading when the amplitude of stress wave is relatively low. With increment of amplitude of stress wave, the other two different failure patterns are also achieved. By contrast to static loading condition, more cracks initiate and propagate under dynamic loading, which cause the damage and fracture of whole rock specimen.

**Key words:** rock mechanics; numerical simulation; failure process; dynamic loading

### 1 引言

岩石在动态载荷作用下的变形与破坏过程对于岩石破碎等与工程密切相关问题的研究具有重要的作用。随着实验手段和测试方法的进步, 人们对此进行了大量的实验研究<sup>[1-9]</sup>, 探讨了岩石在动态载

荷作用下弹性模量、强度等参数与变形速率之间的关系, 并总结出了岩石在动态载荷作用下的强度准则和本构关系<sup>[7-9]</sup>, 这为进一步了解岩石的动力学特性及建立相应的力学模型奠定了基础。然而过去的实验多注重于研究岩石在动态载荷作用下弹性模量、强度等力学参数与加载速率(应变速率)的关系。由于实验的设备(例如气动压缩加载机和霍布金逊

**收稿日期:** 2003-06-23; **修回日期:** 2003-09-29

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(50490274); 国家自然科学基金资助项目(50174013, 50204003, 50134040); 东北大学留学归国人员启动基金资助项目(851043)

**作者简介:** 朱万成(1974-), 男, 博士, 1995年毕业于东北大学采矿系采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石和混凝土断裂过程方面的教学与研究工作。E-mail: wczhu@mail.edu.cn.

杆)和边界条件的不同,得到的结果往往差异较大。此外,在岩石的动态冲击实验中,考虑的因素往往非常有限,难以满足工程问题研究的需要。与此同时,一些学者也提出了基于断裂力学或损伤力学的模型<sup>[10, 11]</sup>,在这些模型中,岩石被假定为含有裂纹的均匀体,其断裂与损伤一般都假设与裂纹密度等参量相关,但这些参量一般难以确定<sup>[10]</sup>,所以模型一般难以具体实施。

相比而言,数值方法可以考虑岩石的非均匀特性和所处的复杂受力条件,具有较强的适用性。目前,关于这个方面的数值模拟也多限于有限元等数值方法求解动态载荷作用下岩石中的应力分布,并能给出塑性区或者损伤区<sup>[12]</sup>。自 1995 年东北大学岩石破裂与失稳中心研究开发了岩石破裂过程分析 RFPA(rock failure process analysis)程序以来,该程序已经被广泛地应用到岩石破裂机制以及岩石力学与工程问题的研究,取得了许多可喜的研究成果<sup>[13-15]</sup>。自 2001 年起,本中心与香港理工大学土木与结构工程系合作,在程序中增加了动态载荷作用下岩石破裂过程分析的功能<sup>[16]</sup>。此后,作者又对该程序进行了进一步的完善,以考虑更多的边界条件。在本文中,作者给出了用 RFPA 进行岩石试样在静态和动态载荷作用下变形与破坏过程的一些数值模拟结果,并对结果进行了分析。

## 2 RFPA 程序基本原理简介

岩石破裂过程分析 RFPA 是 1 个能够模拟岩石渐进破坏的数值模拟程序。为了反映岩石材料性质的细观非均匀性,在该程序中首先把岩石材料看作是由大小相同的四边形单元组成,假定其材料性质满足 Weibull 分布。同时,这些组成材料的单元也作为有限元分析的单元,当其应力状态满足最大拉应力准则和莫尔-库仑准则时单元开始损伤,损伤演化过程满足弹性损伤的本构关系<sup>[14]</sup>。在考虑材料力学性质非均匀性的前提下,用细观上简单的本构模型研究材料在宏观层次上复杂的破坏过程。在准静态加载过程中,外部载荷是分步施加的,在某个加载步,借助有限元进行应力分析,可以得到整个分析对象的应力和应变分布。然后,用莫尔-库仑准则和最大拉应力准则来判断单元是否发生损伤,对于发生损伤的单元,按照弹性损伤力学本构关系进行单元的破坏处理,然后进入下一加载步的分析,直到整个分析过程结束。文<sup>[13 ~ 15]</sup>对材料性质的

Weibull 分布赋值以及单元的本构关系作了详细的介绍。在动态分析中,以 1 个应力波作为输入,在给定合理时间步长的条件下,按照时间步长进行逐步分析,这里仍然采用与静态分析时相同的本构关系。有关 RFPA 动态分析部分更为详细的描述和验证工作,请参见文<sup>[16]</sup>。

## 3 数值模型

本文以巴西圆盘试样作为研究对象,探讨该试样在静态和动态载荷作用下的破裂模式。该试样的几何尺寸以及加载的边界条件如图 1 所示。岩石试样的直径为 150 mm,在试样的上、下部分别有 1 个加载板,同时,在每个加载板与试样之间有 1 个垫层,以保证试样与加载板之间有足够的接触宽度,以减轻接触部位的应力集中,使得静态载荷作用下裂纹的扩展从试样的中部开始。垫层的宽度为试样直径的 0.12 倍(即  $b/D = 0.12$ ),厚度为 1 mm。这里加载板和垫层的材料性质是均匀并且弹性的,它们的弹性模量分别为 200 和 10 GPa,泊松比均为 0.25。该岩石试样的弹性模量为 47 GPa,单轴抗压强度为 41 MPa,劈裂抗拉强度为 3.1 MPa。当组成该岩石试样单元的材料力学性质按照表 1 所列的 Weibull 分布参数赋值时,该数值试样能够具有实际岩石的力学性质。这个问题被简化为平面应力问题进行研究。

对于静态的加载条件,指定的位移分步施加在试样上部的加载板上,每步的加载量为 0.002 mm。

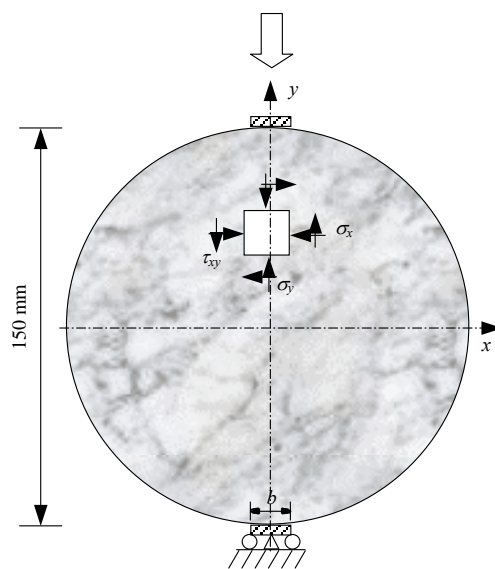


图 1 岩石的巴西圆盘试样

Fig.1 Brazilian specimen of rock

表1 巴西圆盘的材料参数

Table 1 Material parameters of Brazilian disk

材料	弹性模量的 平均值/GPa	单轴抗压强度的 平均值/MPa	均质度	抗压强度与抗 拉强度的比值
岩石	37.5	205	3	13

动态加载时,在试样上部的加载板上施加1个随时间变化的应力波,施加的冲击应力波形按照图2给出的3种情况(分别用I,II和III来表示)变化,以研究不同的动态应力幅值对于该岩石试样破坏模式的影响。在这3种加载条件下,施加的动态应力幅值分别为20,40和60 MPa。当然,这种加载条件在动态冲击实验(例如霍布金森杆实验)中是很难实现的,而在数值模拟中则可以把给定的应力波直接施加在试样上,以研究更为复杂的应力状态。

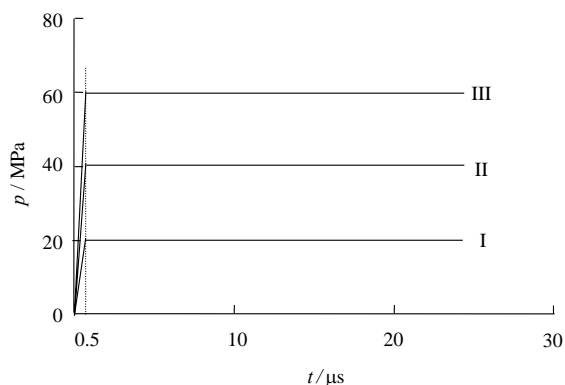


图2 施加在试样上部加载板上的动态应力

Fig.2 Dynamic stress applied at the top surface of loading platen

## 4 数值模拟结果

### 4.1 静态载荷作用

静态载荷下,数值模拟得到的加载板上施加的位移与载荷之间的关系曲线如图3所示,在不同加载位移时,试样中的破坏单元、弹性模量和最大剪应力的分布如图4所示。在RFPA的数值模拟结果图中,单元的损伤必然导致单元弹性模量的降低,因此,通过弹性模量图可以看出整个试样的破裂形态。在该图中,颜色灰度表示单元弹性模量的相对大小,亮的部位具有较大的弹性模量。类似地,在最大剪应力分布图中,颜色灰度反映了单元剪应力的相对大小。

在加载初期,只是在试样的中间部位出现一些

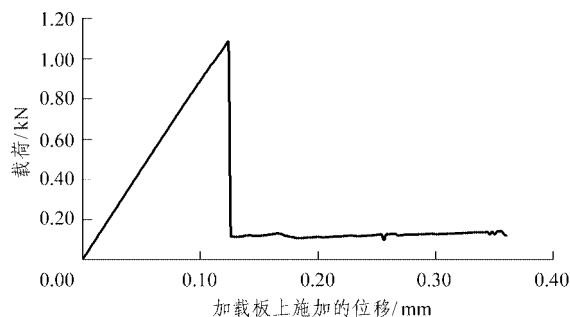


图3 试样在静态载荷作用下的加载板上的载荷-位移曲线

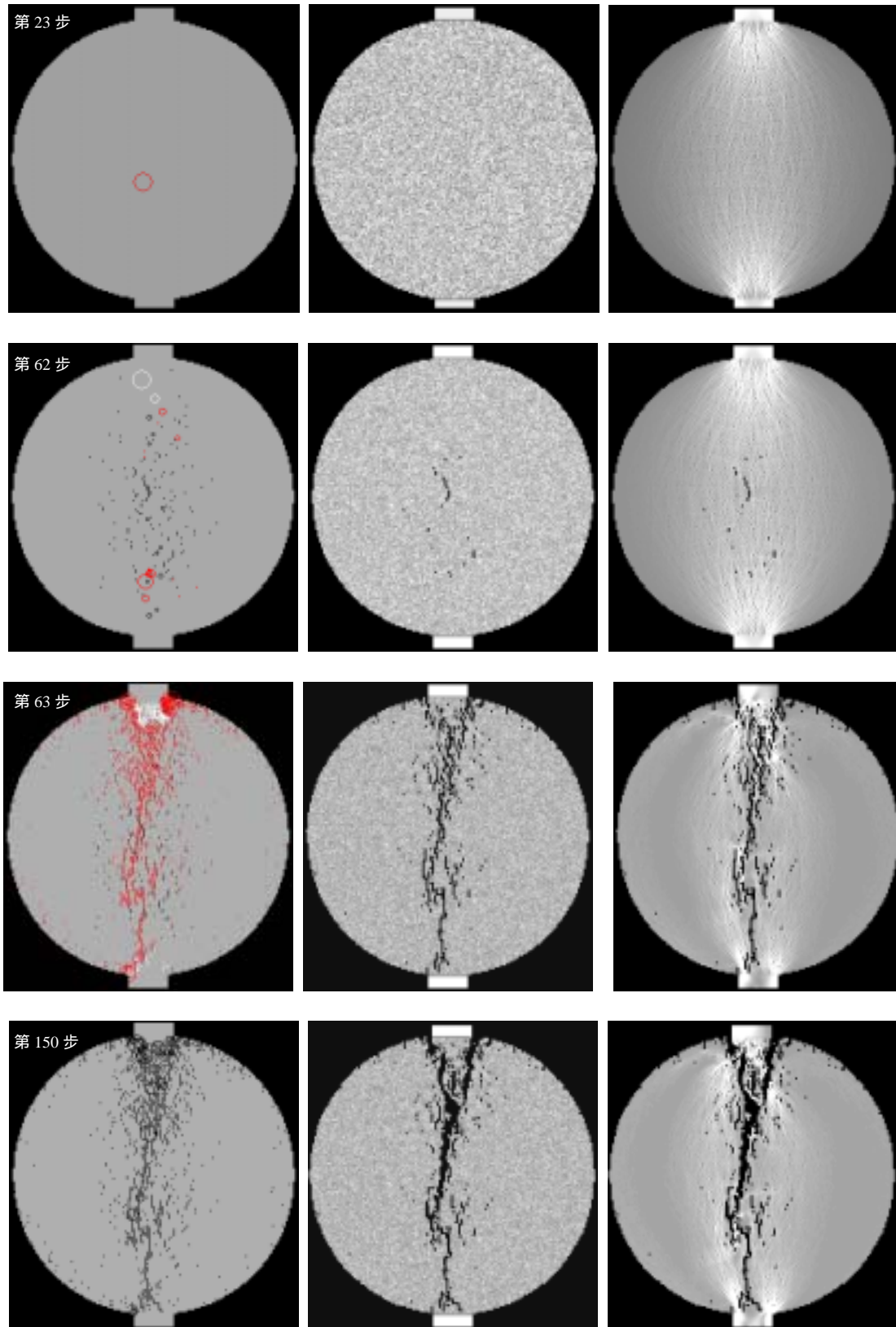
Fig.3 Load-displacement curve at loading platen above the rock specimen under static loading

发生拉伸损伤的单元,由于材料的非均匀性,这些单元分布在试样中部一定宽度的区域内。由于这些单元损伤释放的能量较少,所以整个试样的载荷-位移曲线仍然基本保持线性关系。随着外部载荷的增加,这些损伤的单元发展成为拉裂纹并互相贯通(这在文[17]中被称为主裂纹),导致整个试样的劈裂破坏,具体见图4的第63步。与此同时,在试样与加载板附近伴随着部分单元发生剪切损伤,导致二次裂纹的产生,在试样与加载板接触的位置产生楔形破坏体。数值模拟得到的破裂模式与文[17]的实验结果表现出较好的一致性。

### 4.2 动态载荷作用

图5给出了加载情况I时试样的破坏过程,由于篇幅所限,这里只给出最大剪应力的分布图。从该图可以看出,应力波在试样中的传播过程,伴随着试样中单元的损伤,应力场分布也随之发生变化。从该图可以看出,应力波到达试样中心位置的时间大约为20 μs,该结果与根据弹性波理论计算的结果(一维纵波速度可粗略地按照 $c = \sqrt{E/\rho}$ 计算,其中 $c$ 为一维纵波速度, $E$ 为试样的等效弹性模量, $\rho$ 为密度)一致。这说明该程序的应力分析是正确的。有关RFPA在动态分析方面更为详尽的验证,已经在文[16]中给出。

当应力波传播到试样下部的加载板( $t = 60 \mu\text{s}$ )之前,只有个别位于试样上部的单元发生损伤。当 $t = 80 \mu\text{s}$ 时,由于应力波的多次反射与折射作用,在试样的下部有许多单元发生了拉伸损伤,并发展成为几个裂纹。随着时间的推移,应力波向试样的上部传播,这些裂纹也向上扩展。最终,在试样中部垂直方向形成1个裂纹带。这种最终形成的破坏模式与静态加载时的情形(见图4)有些相似,但是,动态情况下试样中生成更多的裂纹,而且它



(a) 损伤破坏单元分布                      (b) 弹性模量分布                      (c) 最大剪应力分布

图 4 岩石试样在静态载荷作用下的破坏过程(数值模拟结果)

Fig.4 Failure processes of rock specimen under static loading by numerical simulation

们的扩展方向也不是单一的。  
 加载情况 II 时, 试样破裂过程的数值模拟结果

如图 6 所示。在  $t = 40 \mu s$  之前, 试样的应力分布与加载情况 I 时的情形类似, 只是在试样上部的个别

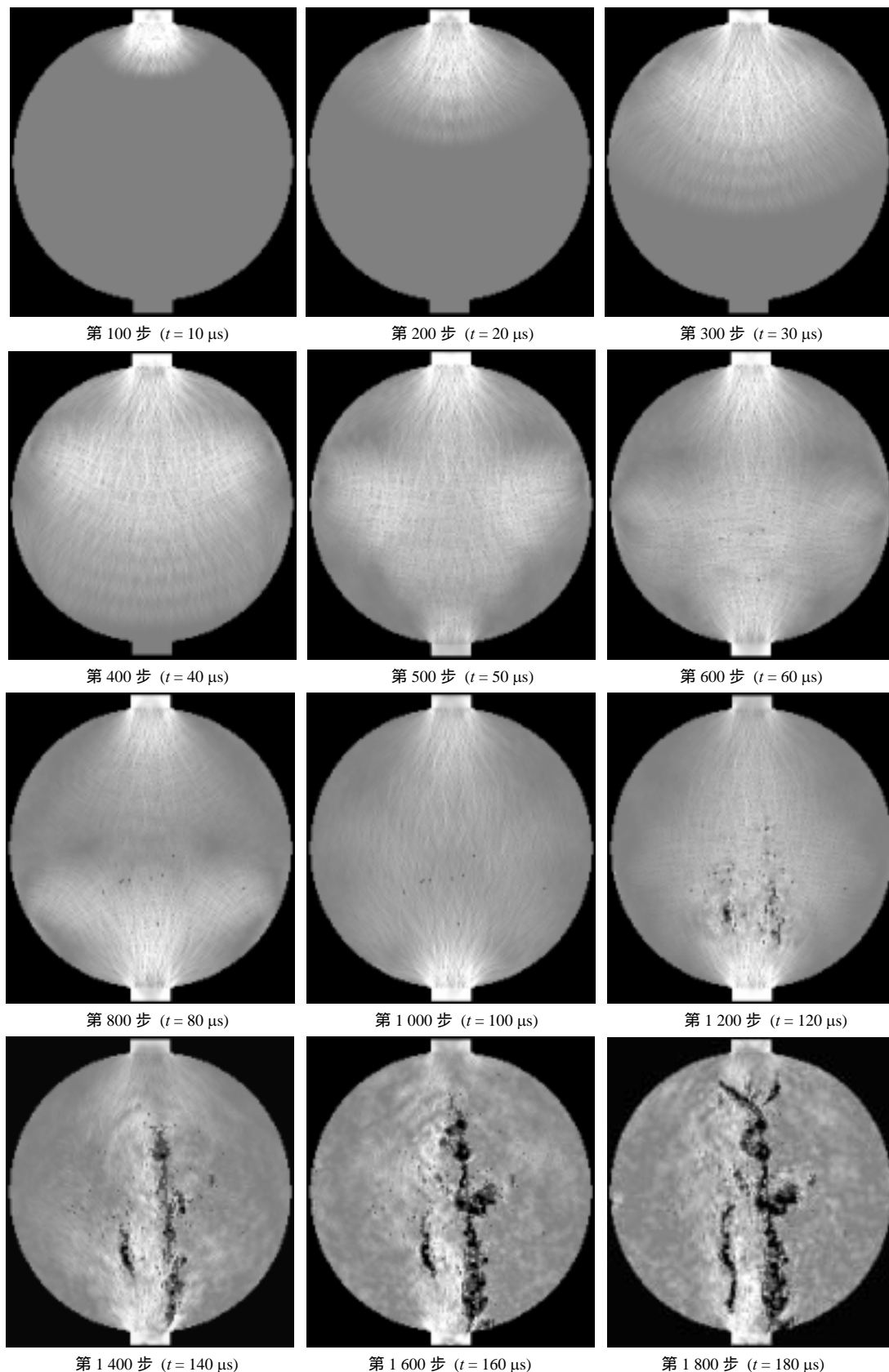


图5 岩石试样在动态载荷(加载情况 I)作用下的破坏过程(数值模拟结果)

Fig.5 Failure processes of rock specimen under dynamic loading by numerical simulation for loading case I

单元发生了损伤。当  $t = 60 \mu s$  时，在中心左右两侧出现了裂纹区。随着时间的推移，当  $t = 80 \mu s$  时，

以上形成的裂纹继续扩展并相互贯通，形成 1 个“Y”型的多条裂纹带。

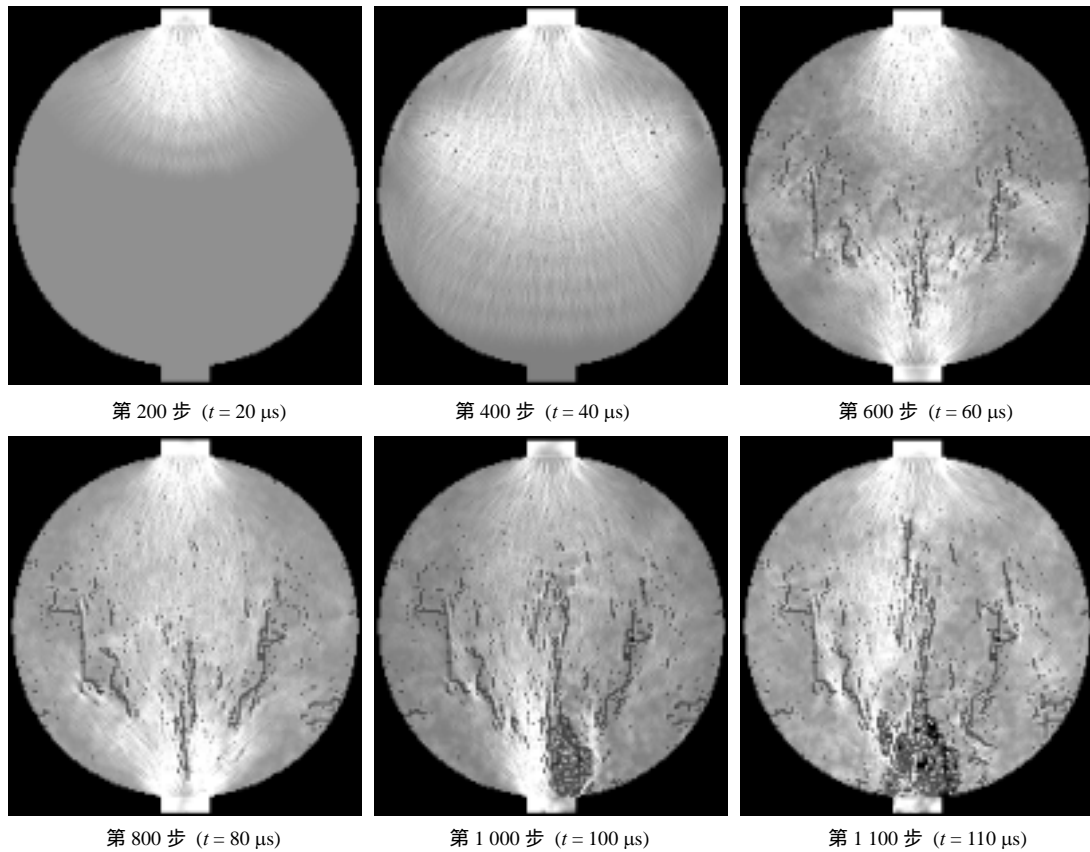


图 6 岩石试样在动态载荷(加载条件 II)作用下的破坏过程(数值模拟结果)

Fig.6 Failure processes of rock specimen under dynamic loading by numerical simulation for loading case II

在加载情况 III 时, 试样中出现损伤单元的时间大大提前了, 如图 7 所示。当  $t = 20 \mu s$  时在试样的上部加载板附近就萌生了裂纹, 该裂纹是直接由于施加的压缩应力造成的, 随着应力的增加, 该裂纹向试样的下部扩展, 并发展成为多条, 最终导致试样的破坏。

由此可见, 在动态载荷作用下, 岩石试样的破裂模式是不同的, 当所施加的应力峰值较低时, 应力波在试样中往返多次后, 导致试样的破裂, 此时试样的破裂形态与静态破坏时的结果(见图 4)类似。随着应力波幅值的增加, 试样的破裂模式也发生变

化, 可以看到另外 2 种不同的破裂模式(如图 6 和 7 所示)。从总体上来看, 在动态载荷作用下, 试样中会萌生更多的裂纹, 这些裂纹会对试样的破坏产生不同程度的影响, 这与静态载荷作用下只形成 1 条主裂纹的情形是不同的。本文数值模拟所得到的 3 种典型的破裂模式在文[17]中也有报道。

### 5 结论与讨论

本文用 RFPA 程序进行岩石在静态和不同加载条件的动态载荷作用下变形与破裂过程的数值模

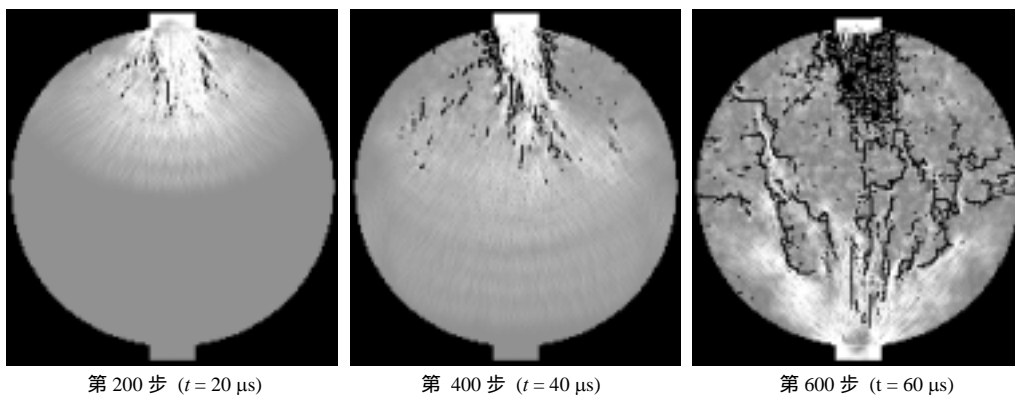


图 7 岩石试样在动态载荷(加载条件 III)作用下的破坏过程(数值模拟结果)

Fig.7 Failure processes of rock specimen under dynamic loading by numerical simulation for loading case III



拟,研究了它们所表现出的不同破裂特征,得到如下结论:

(1) 在静态载荷作用下,主裂纹在试样的中心位置附近萌生,并沿着垂直直径方向扩展,在该裂纹贯穿整个试样高度的同时,在加载板附近萌生二次裂纹并形成楔形破裂体。

(2) 在动态载荷作用下,对试样施加不同应力峰值的应力波,裂纹的萌生及扩展过程是不同的,最终的破裂模式也不同。当应力峰值比较低时,试样最终的破裂模式与静态破坏时的结果较为相似。

(3) 在动态载荷作用下,试样中总是有更多的裂纹萌生并扩展,从而与试样的整个破裂过程有关,这与静态载荷作用下只形成1条主裂纹的情形是不同的。

由于岩石动态破裂过程的复杂性,实验结果受到边界条件等因素的影响比较大,数值模拟方法在这方面表现出突出的优越性。但是,目前仍然有些问题尚待研究,例如单元强度与单元应力率的关系、垫板对于岩石试样破裂模式的影响等,这些在本文模型中还没有予以考虑。鉴于这类问题对于岩石在动态载荷作用下的强度分析是非常重要的,所以还有待作更为详细的研究。

## 参考文献(References):

- [1] 李夕兵,古德生. 岩石在不同加载波条件下能量耗散的理论探讨[J]. 爆炸与冲击,1994,14(2):129-139.(Li Xibing, Gu Desheng. Energy dissipation of rock under impulsive loading with different waveforms[J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(2): 129-139. (in Chinese))
- [2] 胡柳青,李夕兵,赵伏军. 冲击载荷作用下岩石破裂损伤的耗能规律[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(增2):2304-2308.(Hu Liuqing, Li Xibing, Zhao Fujun. Study on energy consumption in fracture and damage of rock induced by impact loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2304-2308. (in Chinese))
- [3] Zhao J, Li H B, Wu M B, et al. Dynamic uniaxial compression test on granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(2): 273-277.
- [4] Zhang Z X, Kou S Q, Yu J, et al. Effects of loading rate on rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(5): 597-611.
- [5] Shan R L, Jiang Y S, Li B Q. Obtaining dynamic complete stress-strain curves for rock using the split hopkinson pressure bar technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(2): 983-992.
- [6] 杨军,高文学,金乾坤. 岩石动态损伤特性实验及爆破模型[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(3):320-323.(Yang Jun, Gao Wenxue, Jin Qiankun. Experiment on dynamic damage property of rock and new damage model for rock fragmentation by blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 320-323. (in Chinese))
- [7] Zhao J. Application of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamic strength of brittle rock[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2000, 37(7): 1115-1121.
- [8] 高文学,杨军,黄风雷. 强冲击载荷下岩石本构关系研究[J]. 北京理工大学学报,2000,20(2):165-170.(Gao Wenxue, Yang Jun, Huang Fenglei. The constitutive relation of rock under strong impact loading[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(2): 165-170. (in Chinese))
- [9] 于滨,刘殿书,乔河等. 爆炸载荷下花岗岩动态本构关系的实验研究[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(6):552-555.(Yu Bin, Liu Dianshu, Qiao He, et al. Experimental study on granite constitutive relation under blasting load[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(6): 552-555. (in Chinese))
- [10] Taylor L M, Chen E P, Kuzmaul J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 55(3): 301-320.
- [11] 李海波,赵坚,李廷芥等. 花岗岩动三轴抗压强度的裂纹模型研究(II):应用[J]. 岩土力学,2002,23(3):329-333.(Li Haibo, Zhao Jian, Li Tingjie, et al. Study on dynamic triaxial compressive strength of a granite using sliding crack model(II): application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 329-333. (in Chinese))
- [12] 高文学,刘运通. 岩石动态损伤的数值模拟[J]. 北京工业大学学报,2000,26(2):5-9.(Gao Wenxue, Liu Yuntong. Numerical simulations on dynamic damage in brittle rocks[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000, 26(2): 5-9. (in Chinese))
- [13] Tang C A, Liu H, Lee P K K, et al. Numerical tests on micro-macro relationship of rock failure under uniaxial compression, part I: effect of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 555-569. (in Chinese))
- [14] 朱万成,唐春安,杨天鸿等. 岩石破裂过程分析(RFPA<sup>2D</sup>)系统的细观单元本构关系及验证[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(1):24-29.(Zhu Wancheng, Tang Chun'an, Yang Tianhong, et al. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA<sup>2D</sup> and its validations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 24-29. (in Chinese))
- [15] Zhu W C, Tang C A. Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model[J]. Constructions and Building Materials, 2002, 16(8): 453-463.
- [16] Chau K T, Zhu W C, Tang C A, et al. Numerical simulations of failure of brittle solids under dynamic impact using a new computer program-DIFAR[J]. Key Engineering Materials, 2004, 265(1): 1517-1522.
- [17] Hughes M L, Tedesco J W, Ross C A. Numerical analysis of high strain rate splitting-tensile tests[J]. Computers and Structures, 1993, 47(4/5): 653-671.