

不同围压作用下岩石损伤破坏的数值模拟

Numerical simulation of damage and failure of rocks under different confining pressures

陈忠辉¹, 谭国焕², 杨文柱²

(1. 中国矿业大学(北京校区) 资源开发系, 北京 100083; 2. 香港大学 土木工程系, 香港)

摘要: 利用 RFPA^{2D}对岩石在不同围压下损伤破坏演化过程进行了数值模拟, 基于岩石损伤定义分形维数以描述试样在各种加载条件下微破裂的演化过程。计算结果表明: 分形维数和损伤变量随着荷载的增加逐渐增大, 岩石的起始损伤随着围压增加而被延迟, 试样强度随着围压的增加而增加, 其宏观破坏符合 Mohr-Coulomb 破坏准则。

关键词: 岩石破坏; 围压; 数值模拟

中图分类号: TU 452; TD 315

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)05-0576-05

作者简介: 陈忠辉, 男, 1968年生, 副教授, 从事岩石破裂、岩石工程防灾机理及应用研究。

CHEN Zhong-hui¹, L. G. Tham², M. R. Yeung²

(1. China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong)

Abstract: A numerical analysis has been conducted to evaluate the damage evolution and the fracture process of brittle rock under different confining pressures by using RFPA^{2D}. A fractal dimension D associated with material damage is defined to describe the damage process of the specimen subjected to tensile or compressive load. It is found that the fractal dimension D and the damage variable ω increase progressively with loading. The initial damage is delayed by the increase of confining pressure. The results show that the specimen is strengthened by the confinement and fails according to Mohr-Coulomb failure criterion.

Key words: rock failure; confining pressure; numerical simulation

1 引言^y

岩石破坏是岩石力学研究领域中的一个经典课题。在宏观方面, 研究者对各种应力作用下岩石的应力应变关系进行了详尽的测定和分析, 并提出了诸如 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 等著名的经验破坏准则^[1]。在微观方面, 通过观测试样内部微裂纹成核、扩展及贯通过程, 研究微裂纹演化的统计规律^[2~4]。尽管这些研究成果对理解岩石变形和破坏有很大的参考价值, 但仍难于得到岩石脆性破坏机制的本质。其原因可能有以下两个: ①岩石内部微裂纹间的相互作用十分复杂, 很难提出一个简单的力学模型来描述裂纹相互作用; ②岩石的非均匀性特性没有完全和适当地考虑。

破坏准则都注重临近材料破坏时的应力状态, 其实岩石破坏是一个累积损伤过程。一些研究者把岩石破坏作为一个损伤过程来考虑, 用损伤变量表示岩石破坏程度。最近兴起的分形几何是描述不规则现象和规律的数学工具, 它不仅描述了复杂的几何形状, 而且可以表示统计意义上的损伤现象^[5,6]。谢和平利用连续损伤力学和统计强度理论定义了一个分形维数来描述岩石试样中裂纹分布及损伤密度^[6]。

近年来, 数值模拟作为研究岩石材料破坏过程的有效手段日益被接受^[7,8]。由唐春安教授领导开发的

RFPA^{2D}(rock failure process analysis)是一个专门模拟岩石损伤破坏过程的数值模拟软件^[9~15]。笔者利用 RFPA^{2D}软件对不同围压条件下岩石细观破裂演化至宏观破裂全过程进行数值模拟, 利用损伤变量和分形维数两个参数来定量描述岩石破坏的损伤过程。

2 模型简介

RFPA^{2D}是基于有限元应力分析原理开发的岩石材料破坏过程数值模拟软件, 它由应力应变分析和破坏分析两部分构成。应力应变分析的原理和普通的有限元方法一样, 破坏分析是根据破坏准则判断单元破坏与否, 破坏后的单元采用强度和刚度弱化处理, 调整模型的刚度矩阵, 然后再进行应力分析, 直至材料完全破坏^[15]。

由于岩石材料形成环境的复杂性和长期的地质作用, 岩石材料内部不可避免地存在大量的缺陷和损伤, 因此可以把岩石划分成大量的网络单元。在模型中引入统计学理论假定这些细观单元强度符合某种统计分布, 一般 Weibull 统计分布可以作为岩石材料强度一种分布^[11], 即

^y 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19902019, 59734090)

收稿日期: 2001-03-26

$$\varphi = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中 σ_c 为单元单轴抗压强度; σ_0 为模型所有单元的平均强度; m 为 Weibull 统计分布的形态参数, 从某种意义上讲, m 也为岩石均质度参数, m 越大, 岩石越均匀; φ 为单元强度的概率密度。

图1为模型受力简图, P , Q 分别为模型所受轴压和围压, 灰度表示单元强度, 灰度越亮, 单元强度越高; 反之, 灰度越暗, 单元强度越低。模型由 180×100 个单元组成, 尺寸为 $180 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。为了模拟实验室里试样和加载板之间的摩擦效应, 在试样两个端部加了加载板, 加载板的尺寸为 $20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。尽管细观尺度上单元非常均匀, 只有一种材料参数, 但宏观尺度上试样具有非均匀性。单元强度的门槛值在宏观上是一种统计分布, 但对于确定单元而言是固定不变的。RFPA^{2D}采用位移加载方法, 当试样端部位移一步步增加时, 一些单元将逐渐破裂, 同时模型中应力和变形将重新分布以达到模型的应力平衡, 破裂单元强度只有先前单元强度的 10%。随着破裂单元的增多, 模型经历了一个连续破坏过程。从某种意义上讲, 破裂单元同时可以作为微破裂源, 这样 RFPA^{2D}可以模拟岩石细观破裂演化直至宏观破裂过程。表1列举了5个计算模型的力学参数和边界条件。

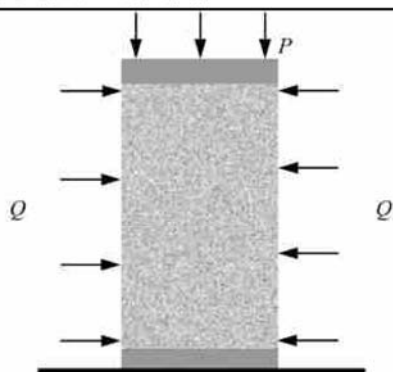


图1 模型受力简图

Fig. 1 A schematic model

表1 计算模型中材料参数和边界条件

Table 1 Material parameters and boundary conditions of the model

试样号	加载方式	m	σ_0 / MPa	E_0 / MPa	σ_3 / MPa	φ / (°)
1	压缩	2	200	60000	0	30
2	压缩	2	200	60000	10	30
3	压缩	2	200	60000	20	30
4	压缩	2	200	60000	40	30
5	拉伸	2	200	60000	0	30

3 数值模拟结果及分析

分别对试样在4个不同围压下的损伤破坏进行了数值模拟。图2为试样2在10 MPa围压作用下各加载步中细观单元破坏分布, 同时也表示试样在加载过程中微破裂空间分布的演化情况。图中一个圆圈代表一个微破裂, 其直径代表微破裂释放能量的大小, 圆圈越大, 微破裂释放的能量越多。深色圆圈表示当前步产生的微破裂, 而浅色圆圈则为所有先前产生的微破裂。模拟结果发现, 微破裂的演化可以分成三个阶段: ①初始阶段(图2(a), (b)), 微破裂随机孤立地分布于整个试样中, 试样均匀变形, 微破裂之间的相互作用并不明显, 反映了材料性能随机性特征; ②第二阶段(图2(c)~(e)), 微破裂开始聚集在某些区域, 这种微破裂的丛集现象随着变形增加越来越强烈, 其本质原因就是微破裂间的相互作用; ③当荷载达到试样的峰值强度时, 就进入第三阶段(图2(f)), 此时微破裂集中出现在一个断面上, 试样发生宏观破裂。

3.1 分形维数

尽管损伤变量 ω 可以描述微破裂演化的数量关系, 但它不能反映微破裂空间分布, 而微破裂的空间关系与试样宏观破裂直接相关。下面定义一个能刻画微破裂损伤演化的分形维数。如图3(a), 用边长为 L_0 的正方形网络覆盖整个损伤区, 正方形网络中有9个小正方形, 边长为 $L_0/3$ 。数出小方格中微破裂的个数(如图3(b)), 绘出表征损伤区内微破裂分布的三维立方图(如图3(c)), 其中 Z 坐标反映该区域的损伤密度,

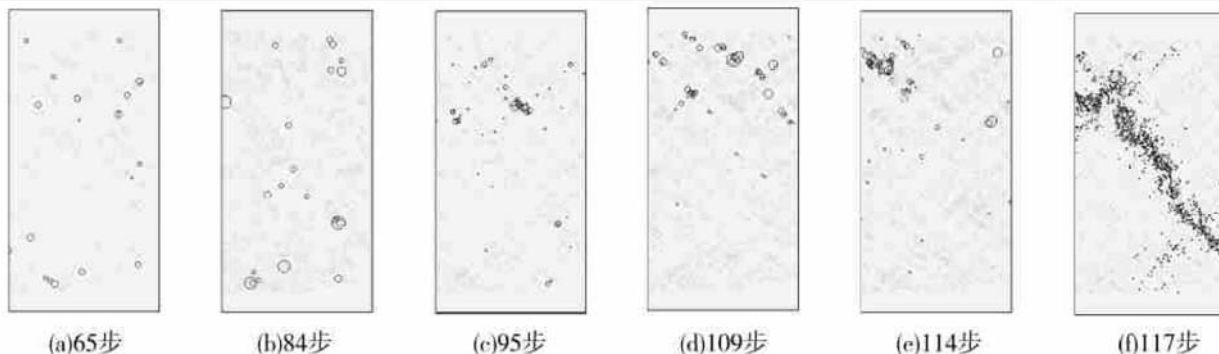


图2 试样2破坏过程中微破裂的演化

Fig. 2 The evolution of microfractures in specimen No. 2

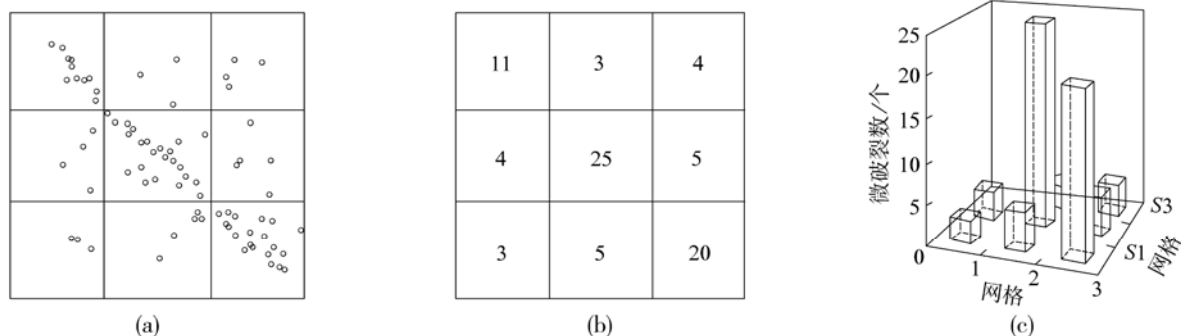


图3 分形维数计算示意图

Fig. 3 The method for calculating the fractal dimension

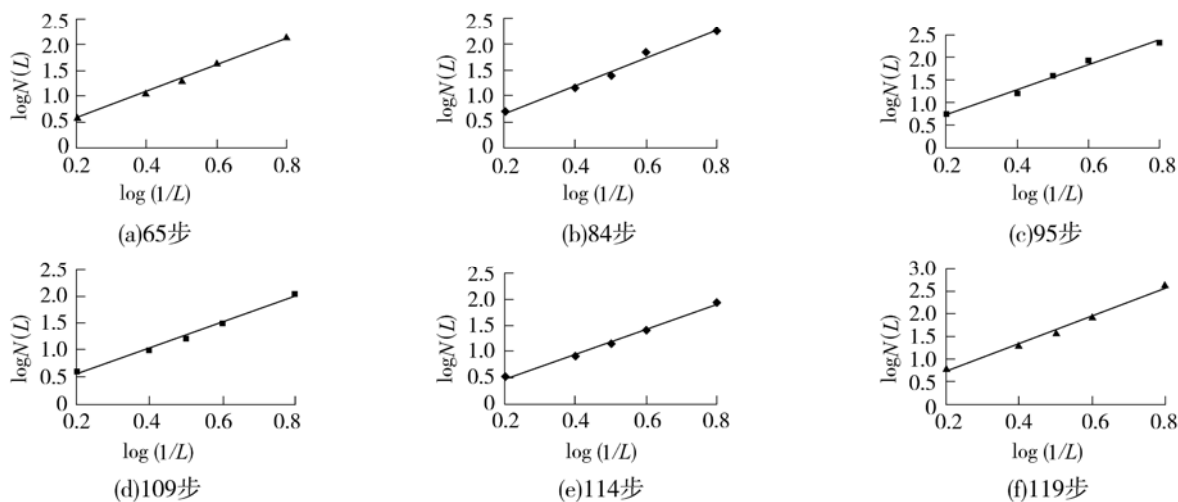


图4 不同加载步中微破裂分布分形维数计算结果

Fig. 4 Computed results of uniaxial compression of the specimen under different loadings

在计算过程中 Z 坐标需要数学上的正规化。从立方图中可以记录下边长为 L 的微破裂数 $N(L)$, 利用不同的尺度 L 覆盖同样的损伤区, 可以得到一组 $N(L)$ 和 L 的数据。根据分形维数的定义, 由下式计算可以表征微破裂损伤演化的分形维数 $D^{[6]}$:

$$D = \frac{\log N(L)}{\log(1/L)} \quad (2)$$

显然式(2)定义的分形维数不仅反映岩石试样在加载过程中的损伤演化, 而且还反映损伤区域内微破裂空间分布的丛集情况, 分形维数 D 可以直接从 $N(L) - 1/L$ 的双对数坐标图中的直线斜率得到。

图4为试样在加载过程中利用图3表示的覆盖法求得的 $N(L) - 1/L$ 的双对数图, 从直线的斜率可以估算出微破裂的分形维数 $D_1 = 2.37$, $D_2 = 2.41$, $D_3 = 2.44$, $D_4 = 2.52$, $D_5 = 2.58$, $D_6 = 2.84$ 。图中显示 $N(L) - 1/L$ 双对数图大多具有很好的线性关系, 说明了微破裂分布具有很好的自相似性, 是一个分形分布。分形维数随着荷载的增加而逐渐增大, 显然试样的损伤也在不断增加, 因此分形维数和损伤的变化具有同步性。

图5为试样在不同围压加载过程中分形维数的变化图。图中显示分形维数都在 2.0~3.0 之间, 并随着试样变形的增加, 微破裂的分形维数也在逐渐增大。试样宏观破裂时分形维数都有一个突跳, 突跳值随着围压的增加而逐渐减小。分形维数的突跳表明了试样脆性破坏程度, 从侧面说明了围压增加使岩石脆性破裂程度降低, 而试样破裂时微破裂的最终分形维数越来越小。

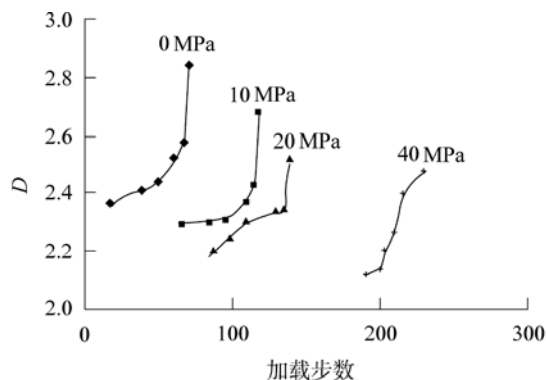


图5 不同围压下微破裂分形维数变化

Fig. 5 The variation of D with loading

3.2 破坏方式

大量实验表明: 岩石的围压效应非常明显, 岩石强度随着围压的增加而增加, 塑性变形性能也在增强, 同时试样破坏方式发生改变。

图6为试样在压缩和拉伸荷载作用下应力应变曲线的数值模拟结果。图6(a)和文献[16]的实验结果非常吻合; 图6(b)所示的单轴拉伸作用下应力应变曲线几乎完全线性, 试样表现为标准的脆性断裂。模拟结果表明: 试样强度随围压的增大而增大, 在单轴或10 MPa围压作用下试样表现为典型的脆性破坏, 在20 MPa和40 MPa围压作用下表现为塑性破坏, 而且残余强度不断升高; 单轴压缩强度和单轴拉伸强度之比为9.2, 和大多岩石的实验结果极为接近。尽管20 MPa围压不是岩石脆性破坏和塑性破坏确定的临界点, 但至少表明围压在岩石破坏过程所起的作用。

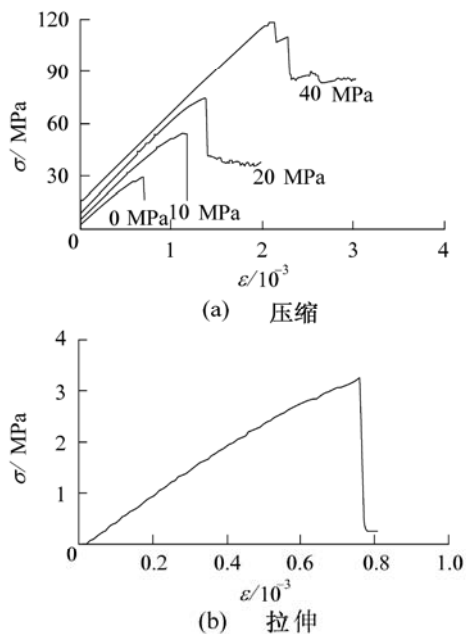


图6 试样应力应变曲线的数值模拟结果

Fig. 6 The stress-strain curves of the specimen under loading

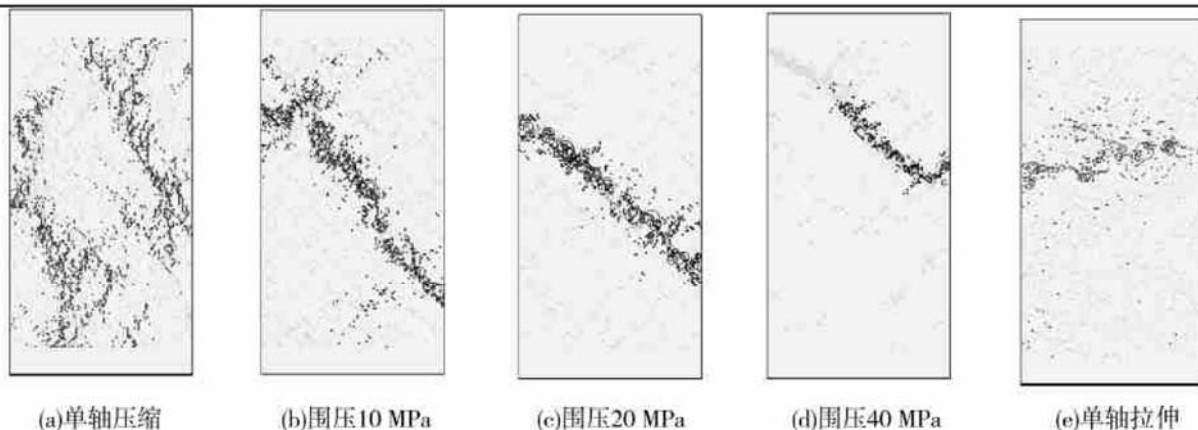


图8 5个试样宏观破裂时微破裂分布

Fig. 8 The distribution of microfracture for five specimens at failure

Mohr 准则是岩石材料破坏的一个经典准则, 从5个试样的数值模拟结果可以构造 Mohr 破坏曲线, 图7为由一组 Mohr 圆构造的岩石破坏曲线。发现数值模拟试样破坏也遵循 Mohr 破坏准则, 而且 Mohr 破坏曲线具有典型的非线性。

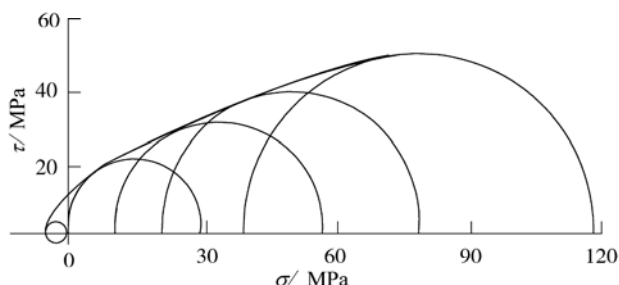


图7 试样数值强度的 Mohr 圆

Fig. 7 The Mohr circles and envelope of computed results

图8为5种模型宏观破裂时微破裂分布, 微破裂集中区域就是试样最终的断裂面。图中显示: 单轴压缩试样最终表现为劈裂破坏, 而在围压作用下试样表现为典型的剪切破坏, 单轴拉伸使得试样断裂面近乎水平。

3.3 损伤演化

岩石是一种典型的损伤材料, 其损伤过程就是内部微破裂产生的综合表现。由于数值模型中单元尺寸一样, 损伤变量一般可以定义为

$$\omega = n/N \quad (3)$$

式中 n 是破坏单元个数; N 是模型中单元总个数。显然这种定义只强调材料损伤的几何特性, 不能反映岩石的破坏行为。本文对损伤变量 ω 作如下定义:

$$\omega = n/N_f \quad (4)$$

式中 N_f 为材料破坏时破坏单元总个数。由于着重讨论的是岩石破坏的全过程, 虽然 N_f 在破坏前是未知的, 但在岩石破坏时是一个可被测定的数值。 $\omega = 0$ 和 $\omega = 1$ 分别代表材料初始无损状态和最终破坏状态。

图 9 为试样 2 应力与损伤变量的变化曲线。损伤变量在加载初期稳定增长, 当外载达到峰值强度时损伤变量有一个明显的突跳, 它和应力降同步产生, 与此同时伴随着大量微破裂产生。

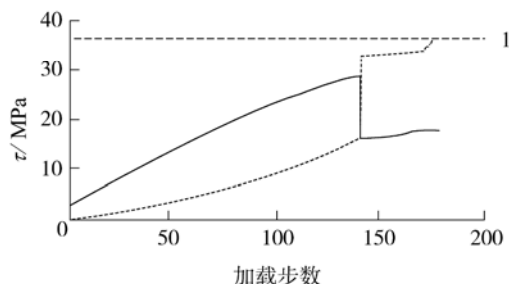


图 9 试样 2 的应力和损伤变化曲线

Fig. 9 The stress curve and the evolution of damage in specimen No. 2

图 10 为压缩荷载作用下 4 个试样损伤变量的演化情况。这里有一个有趣的现象: 试样的起始损伤随着围压的增加逐渐延迟, 也就是说, 在高围压下需要更大的轴压才能使试样产生初始损伤。图中发现: 试样破坏时损伤变量都有一个突跳, 而且突跳值随着围压的增大越来越小, 而损伤变量越来越大。文献[16]从实验的角度也提出过这一论点。数值结果还表明, 损伤变量的临界值 ω_c 都在[0.4, 0.8] 区间内。而对于真实岩石材料的临界损伤值 ω_c 一般也在[0.3, 0.8] 区间内^[7]。

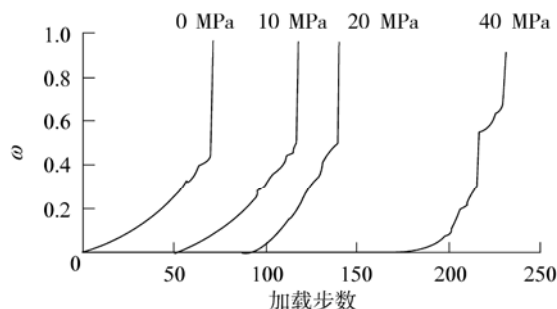


图 10 损伤变量的演化曲线

Fig. 10 The variation of the damage variable ω with loading step

4 结 论

(1) 分形维数随着荷载的增加而逐渐增大, 随着围压的增大, 试样破坏时最终的分形维数却逐渐减小。

(2) 数值模拟结果验证了岩石峰值强度和残余强度的围压效应, 岩石峰值强度和残余强度随着围压的增加而逐渐增大。

(3) 岩石的起始损伤随着围压的增大具有滞后现象, 而且围压越高, 岩石宏观破坏时的临界损伤变量越大, 临界损伤变量 ω_c 大多在[0.4, 0.8] 区间。

参考文献:

- [1] Wawersik W R, Fairhurst C A. A study of brittle rock failure in laboratory compression experiments[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1970, 7(4): 561~ 575.
- [2] Brace W F, Paulding B, Schultz C H. Dilatancy in the fracture of crystalline rock[J]. J Geophys Res, 1966, 71(12): 3939~ 3954.
- [3] Horii H, Nemat-Nasser S. Compression induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure[J]. J Geophys Res, 1985, 90(10): 3105~ 3125.
- [4] Horii H, Nemat-Nasser S. Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition[J]. Philos Trans R Soc London, 1986, 319: 337~ 374.
- [5] Cowie P A, Sornette D, Vanneste C. Multifractal scaling properties of a growing fault population[J]. Geophys J Int, 1995, 122: 457~ 469.
- [6] Xie H. Fractals in Rock Mechanics[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1993.
- [7] Blair S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques (I): a non-linear rule-based model[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(7): 837~ 848.
- [8] Blair S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques(II): effect of microscale heterogeneity on macroscopic deformation[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(7): 849~ 861.
- [9] Tang C A, Kaiser P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure(I): fundamentals[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(2): 113~ 121.
- [10] Tang C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34(2): 249~ 261.
- [11] Chen Z, Tang C, Huang R. A double rock sample model for rock-bursts[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34(6): 991~ 1000.
- [12] Tang C A, Liu H, Lee P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression (I): effect of heterogeneity[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(7): 555~ 569.
- [13] Tang C A, Tham L G, Lee P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression(II): constraint, slenderness and size effect[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(7): 571~ 583.
- [14] Tang C A. A new approach to numerical method of modeling geological processes and rock engineering problems[J]. Engineering Geology, 1998, 49(5): 207~ 214.
- [15] 陈忠辉, 唐春安, 傅宇方. 岩石微破裂演化诱致突变的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 710~ 716.
- [16] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of rock mechanics. 2nd ed[M]. London: Chapman & Hall, 1976.