

岩石破裂过程围压效应的数值试验

徐涛^{1, 2}, 唐春安^{1, 2}, 王述红², 张永彬²

(1. 大连大学 材料破坏力学数值试验研究中心, 辽宁 大连, 116622;
2. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳, 110004)

摘要: 运用岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D}模拟了岩石在变形破裂过程中围压对岩石变形、强度及声发射特性的影响。研究表明:数值试验结果与实验室观察得到的岩石变形、强度(弹性模量、抗压强度等)以及岩石破裂过程声发射的围压效应相吻合;同时,数值试验对在实验室中难以准确监测的声发射现象也进行了准确的模拟,所得结果对于地震预报、岩爆等冲击地压的预测具有一定的指导意义。

关键词: RFPA 系统; 围压效应; 变形强度; 声发射; 数值试验

中图分类号: TU459 文献标识码: A 文章编号: 1672-7207(2004)05-0840-05

Numerical Tests on Confining Pressure Effect in Rock Failure Process

XU Tao^{1, 2}, TANG Chun-an^{1, 2}, WANG Shu-hong², ZHANG Yong-bin²

(1. Research Center for Numerical Tests on Material Failure, Dalian University, Dalian 116622, China;
2. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Using rock failure process analysis(RFPA^{2D}) code, the confining pressure effects of deformation, strength and AE of model rock specimens during failure process are studied. The numerically obtained results duplicate the deformation, strength (such as Young's modulus, compressive strength, etc) and AE characteristics observed in laboratory. Meanwhile, the characteristics of AE of rock specimens under various pressures, which is difficult to be monitored in laboratory, is also well simulated and the numerically testing results are instructive and indicative for investigating and predicting the induced seismicity and rock bursts.

Key words: RFPA code; confining pressure effect; deformation and strength; acoustic emission; numerical tests

地下岩石在没有受到开挖扰动之前,其所处应力状态一般为三向受载的应力状态,然而,由于开挖,岩石原有的应力状态被打破,应力状态由三维转变为二维状态甚至一维状态,这时给开挖工程带来的最大问题就是岩石变得不稳定,发生片帮、冒顶、底鼓等岩体工程破坏现象;而当开挖工程的表面喷涂混凝土砂浆后,不稳定的开挖工程变得稳定。这 2 种改变岩石应力状态的方法所产生的效果截然不

同,一方面可以有效地破碎岩石,另一方面则可以有效地防止岩石破裂。这说明改变岩石的应力状态能够有效地影响岩石的强度,进而影响岩体的稳定性。T. N. GOWD 等研究了围压对岩石宏观力学行为的影响^[1-6];陈忠辉等基于统计细观损伤的观点,推导了三维应力状态下岩石本构关系,并研究了岩石破裂过程中加、卸围压对岩石宏观力学性质的影响^[7]。C. FAIHURST 等基于细观力学的观点,系统研究

收稿日期: 2004-02-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50134040; 50174013; 50374020)

作者简介: 徐涛(1975-),男,湖北随州人,博士研究生,从事岩石破裂与失稳、岩体渗流力学方面的研究

论文联系人: 徐涛(1975-),男,博士研究生;电话: 0411-87403700(O);E-mail: neuxutao@126.com

了大理岩在不同围压条件下的应力-应变曲线^[8]。

岩石大多是处于二维或三维应力状态, 也就是说岩石的破坏规律同应力状态是密不可分的。因此, 仅仅以单轴试验结果难以全面真实地反映岩石的变形和破坏规律, 必须研究不同围压条件下岩石试件的变形与破坏规律。然而, 由于实验过程中试验岩样以及试验手段的差异性, 会对实验结果的整理分析带来较大误差。在此, 作者利用 RFPA^{2D} 系统对在不同围压条件下岩石的变形、强度特征、宏观破坏模式以声发射特性进行模拟研究。

1 模型建立及参数选择

数值试验采用 RFPA^{2D} 进行, RFPA 的原理见文献 [9-12]。采用平面应变模型(见图 1), 试样模型尺寸(高×宽)为 100 mm×50 mm, 网格划分为 200×100 个基元。在整个加载过程中采用位移控制的加载方式, 加载位移量 $\Delta s = 0.002$ mm, 数值模型的具体力学及控制参数见表 1。在试验过程中, 采用修正的带拉伸截断(tensile cut-off)的库仑准则作为破坏的判别准则。

表 1 数值模型参数

Table 1 Parameters of numerical model

力学及控制参数	参数值
均质度 m	1.5
弹性模量均值 E_0 /GPa	30
抗压强度均值 σ_0 /MPa	200
摩擦角 φ (°)	30
压拉比 C/T	10
泊松比 μ	0.25
残余强度系数 ξ	0.1
最大拉应变系数	1.5
最大压应变系数	200
围压 σ_3 /MPa	0, 2, 4, 8, 16

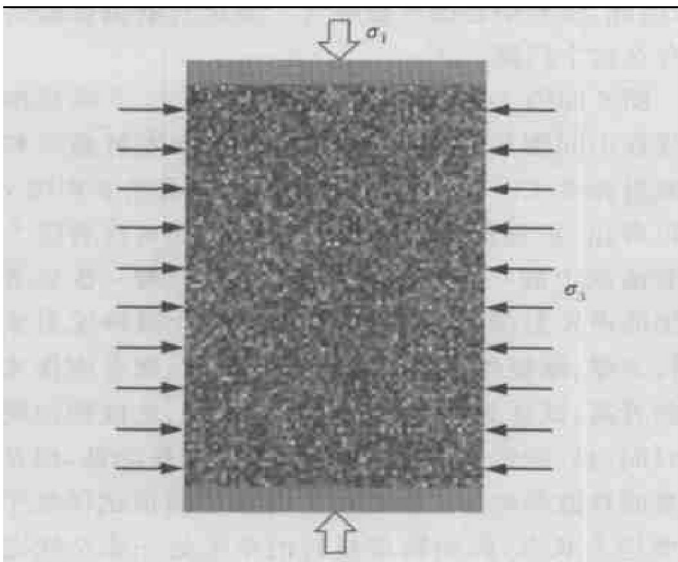


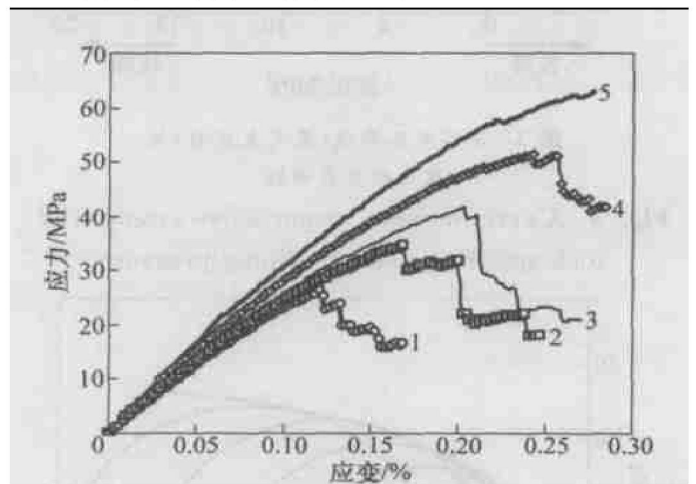
图 1 数值模型

Fig. 1 Numerical model

2 岩石变形及强度的围压效应

2.1 围压对变形的影响

实际上, 岩石所处的应力条件相差很大, 在实验室不可能得出所有破坏时的应力状态组合方式, 但是, 可以通过不同围压下岩石破坏时的极限强度来研究应力状态对破坏的影响。为了消除因不同模拟试件间的差别对模拟试验所造成的影响, 对同一模拟试样在不同围压下进行压缩加载试验。图 2 所示为模拟试样在不同围压下的应力应变曲线。由图 2 可以看出, 随着围压的增高, 模拟试样的杨氏模量也随之增大, 这与实验结果相一致。



p /MPa; 1-0; 2-2; 3-4; 4-8; 5-16

图 2 不同围压下岩石的应力应变曲线

Fig. 2 Complete stress-strain curves of rock specimens under various confining pressure

2.2 围压对强度的影响

由图 2 还可看出, 随着围压的增大, 模拟岩样的极限破坏强度也随之增大。根据图 2 以及单轴拉伸下岩石试样的破坏强度, 可以作出围压(或最小主应力)与模拟试样的极限抗压强度的关系曲线, 如图 3 所示。由图 3 可以看出, 尽管细观单元的破坏准则采用线弹性的 Coulomb 准则, 但数值试验结果表明围压(或最小主应力)与岩石试样的极限抗压强度之间并非呈线性关系, 而是呈非线性关系。

根据不同围压下模拟岩样的极限抗压强度, 可以作出各种应力条件下的莫尔(Mohr)圆及极限强度包络线, 如图 4 所示。可见, 数值模拟的结果同物理试验结果所反映的规律一致, 是一条向下弯曲的曲线。尽管采用线性的库仑准则模拟岩样细观单元的破坏准则, 但其破坏强度的宏观表现却是呈非线性

关系。在 RFPA^{2D} 模拟中,对于构成材料的每一个单元,它的破坏准则非常简单,即带有拉伸截断的修正后的库仑(Coulomb)准则,但是,宏观模拟结果表明破坏规律很复杂^[13]。

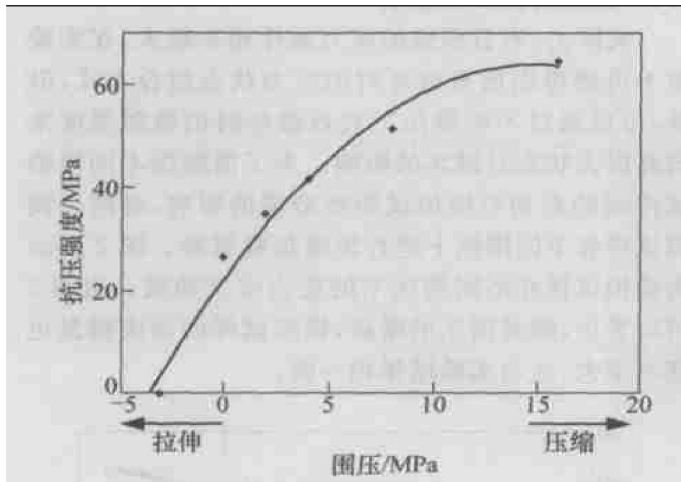
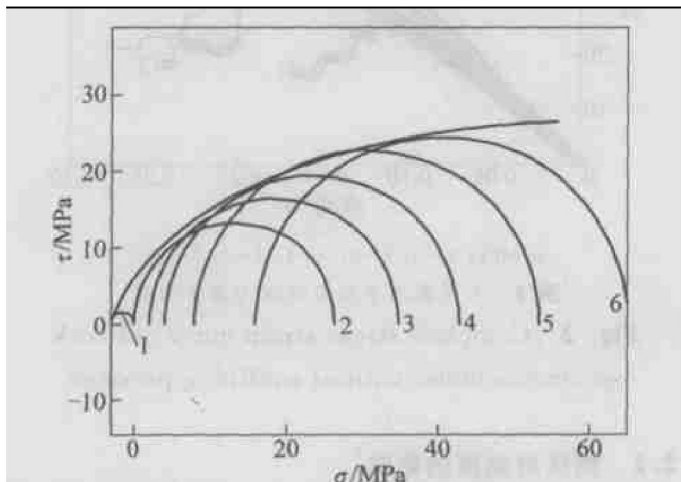


图 3 岩石抗压强度(最大主应力)与围压的关系曲线

Fig. 3 Curve between compressive strength of rock specimens and confining pressure



p / MPa : 1—单轴拉伸, 0; 2—单轴压缩, 0; 3—2; 4—4; 5—8; 6—16

图 4 模拟岩样的强度包络线

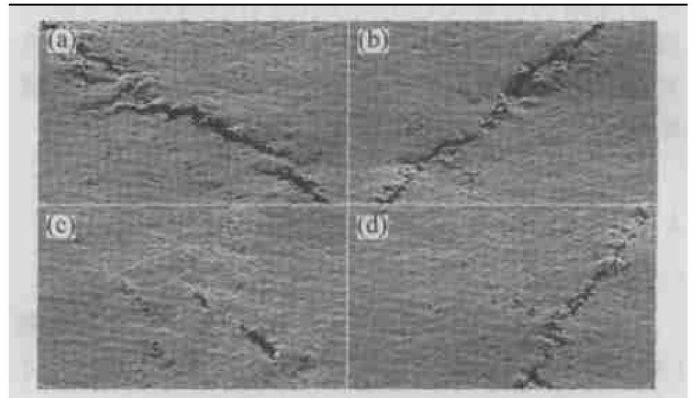
Fig. 4 Simulated failure envelope of model rock specimens

2.3 围压对破裂模式的影响

完整岩石破坏机制同围压条件密切相关。在工程实际中,岩石或岩体常常处在二维或三维应力状态下,不同的围压条件对岩石的破裂类型也有显著影响。

图 5 显示了不同围压条件下岩石的宏观破裂模式的 RFPA^{2D} 模拟结果。可见,随着围压应力水平的提高,岩石试样宏观破裂面的角度逐渐变化。在围压为 0 时,岩石试样宏观破裂面与最大主应力方向

的夹角大致为 30°,而围压增加后,宏观破裂面与最大主应力方向的夹角也逐渐增大,同时岩石的破坏由拉伸破坏向剪切破坏逐渐过渡、发展;在高围压下,最终破裂面与压缩轴的角度大致呈 45°角,同时岩石的宏观性质也呈现出延性行为^[4]。



p / MPa : (a) —0; (b) —4; (c) —8; (d) —16

图 5 模拟试样在不同围压条件下岩石试样的宏观破裂模式

Fig. 5 Macroscopic failure patterns of model specimens under various confining pressures

3 岩石声发射的围压效应

围压作用下岩石破裂过程实验是一种近似地下应力状态下的模拟实验,它在岩体开挖、地震预报等领域具有重要作用,通过测量破裂时的声发射可以为岩爆预测、地震预报、冲击地压的防治等提供有用的信息。在实验中由于实验仪器噪音很容易混入信号,因此,实验中必须屏蔽噪音。而进行数值试验时不存在这个问题。

图 6 和图 7 分别显示了均质度 $m = 1.5$ 时模拟试样在不同围压条件下的应力应变-声发射曲线和声发射频度-归一化声发射能量曲线。由图 6 和图 7 可以看出,声发射频度的每一次突增都对应着应力应变曲线上的一个应力降,同时也对应着一次显著增加的声发射能量。由此,可以通过检测声发射来进行岩爆、地震的预测预报工作。同时,随着围压水平的升高,试样的声发射频度逐渐下降,主破裂出现的时间向后延迟,主破裂前的声发射数量降低,但是能量的释放率增加。这是由于围压使模拟试样处于二维应力状态,因而构成材料的单元处于安全状态下,只有在较高的轴向应力出现时才能发生破坏,使得在围压增高后声发射发生后移现象。

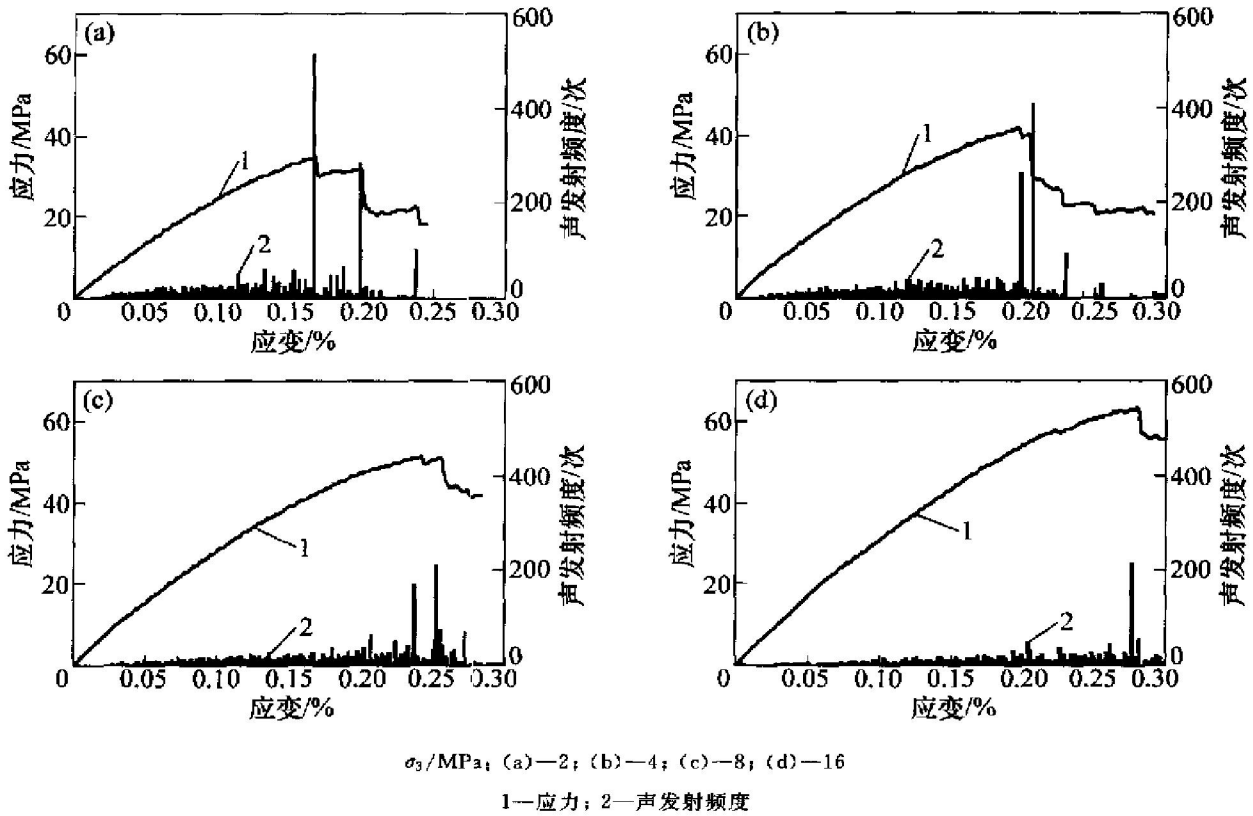


图 6 模拟试样的应力应变及声发射特性曲线

Fig. 6 Complete stress-strain curves and AE characteristic curves of model specimens

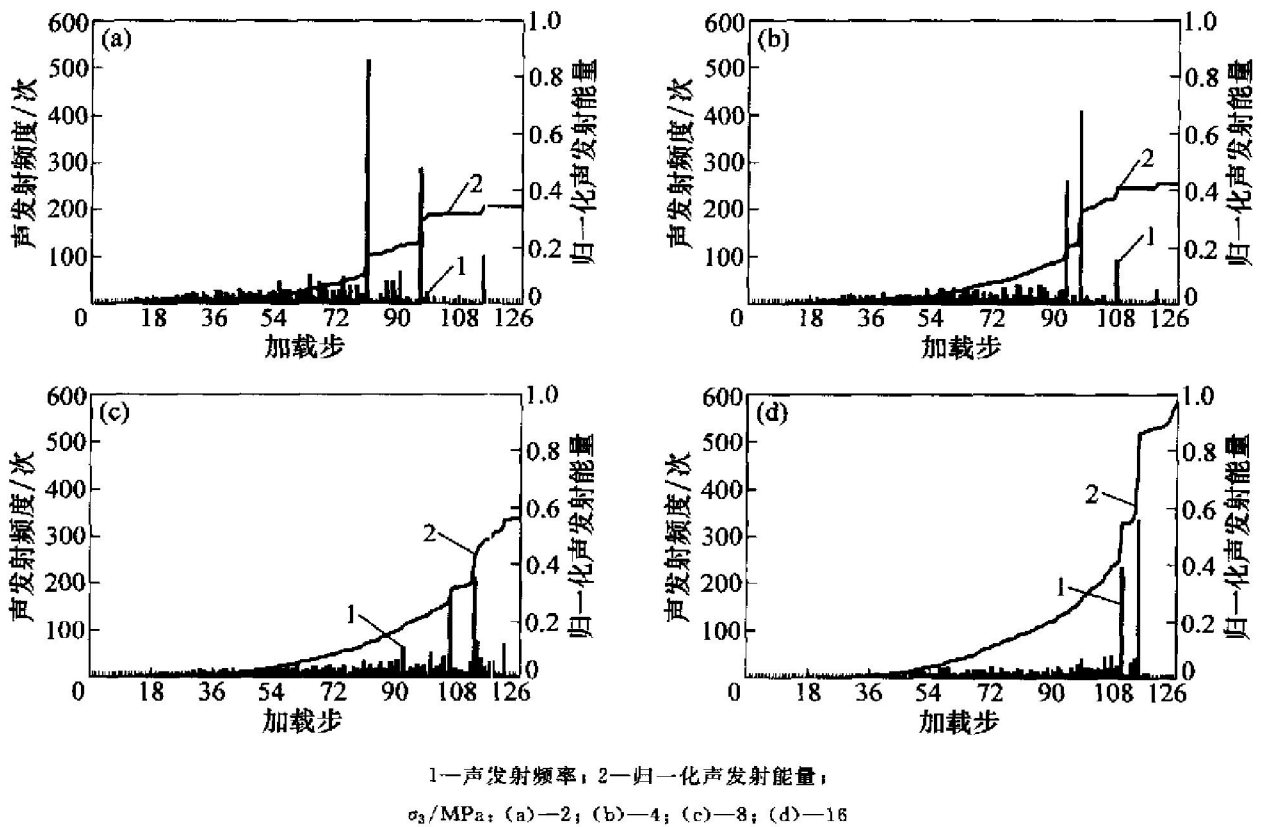


图 7 模拟试样在不同围压下的声发射频度和归一化能量累积曲线

Fig. 7 AE curves and normalized AE energy curves of model specimens under various confining pressure

4 结 论

a. 在 RFPA^{2D} 中, 尽管细观单元采用了弹脆性本构关系, 但随着围压的增加, 模拟试样的宏观变形仍然表现出非线性、宏观强度增强的趋势。这种与实验现象相似的模拟结果表明, RFPA^{2D} 系统采用的细观单元性质演化规则能够适用于岩石破坏这一复杂、非线性演化问题。

b. 岩石试件在不同围压下的变形破坏规律包括围压对岩石试件宏观破裂模式的影响、强度包络线特征以及岩石破裂过程中声发射的围压效应等, 在实验室中能通过数值试验再现, 数值试验结果对工程地质灾害现象如岩爆预测、地震机理研究具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] GOWD T N, RUMMEL F. Effect of Confining Pressure on the Fracture Behaviour of a Porous Rock [J]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1980, 17: 225 - 229.
- [2] ASHBY M F, SAMMIS C G. The Damage Mechanics of Brittle Solids in Compression [J]. *Pure & Appl Geophys*, 1990, 133: 489 - 521.
- [3] HAMAMI M. Simultaneous Effect of Loading Rate and Confining Pressure on the Deviator Evolution in Rock Salt [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1999, 36: 827 - 831.
- [4] 张 流, 薛丽霞, 施良骐. 高围压下岩石破坏和摩擦滑动过程中的声发射活动性[J]. *岩石力学与工程学报*, 1990, 9(1): 38 - 47.
ZHANG Liu, XUE Li-xia, SHI Liang-qi. AE Activities in Rock Failure and Sliding under High Confining Pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1990, 9(1): 38 - 47.
- [5] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(1): 24 - 29.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Unloading Tests on Rock Samples under Triaxial Compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(1): 24 - 29.
- [6] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5): 497 - 502.
GE Xiurun, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. A real-time Triaxial CT Testing Study of Mesoscale damage Evolution Law of Coal [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(5): 497 - 502.
- [7] 陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 岩石破裂声发射过程的围压效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(1): 65 - 70.
CHEN Zhong-hui, FU Yu-fang, TANG Chun-an. Confining Pressure Effect on Acoustic Emissions During Rock Failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(1): 65 - 70.
- [8] FAIHURST C. Geomaterial and Recent Development in Micro-mechanical Numerical Models [J]. *News Journal*, 1997, 4(2): 11 - 14.
- [9] TANG C A. Numerical Simulation of Progressive Rock Failure and Associated Seismicity [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34(2): 249 - 261.
- [10] TANG C A. A New Approach to Numerical Method of Modeling Geological Processes and Rock Engineering Problems [J]. *Engineering Geology*, 1998, 49: 207 - 214.
- [11] TANG CA, KAISER P K. Numerical Simulation of Cumulative Damage and Seismic Energy Release during Brittle Rock Failure—Part I. Fundamentals [J]. *Int J Rock Mech & Min Sci*, 1998, 35(2): 113 - 121.
- [12] 徐 涛, 唐春安, 张 哲, 等. 单轴压缩下脆性岩石变形破坏的理论、试验与数值模拟[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(1): 87 - 90.
XU Tao, TANG Chun-an, ZHANG Zhe, et al. Theoretical, Experimental and Numerical Studies on Deformation and Failure of Brittle Rock in Uniaxial Compression [J]. *Journal of Northeastern University*, 2003, 24(1): 87 - 90.
- [13] 夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变 II [J]. *力学进展*, 1995, 25(2): 145 - 173.
XIA Meng-fen, HAN Wen-sheng, KE Fu-jiu, et al. Statistical Microdamage Mechanics and Evolution-induced Catastrophe II [J]. *Advances in Mechanics*, 1995, 25(2): 145 - 173.