

张黎明, 高 速, 任明远, 等. 岩石加荷破坏弹性能和耗散能演化特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1238–1242. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1318

Zhang Liming, Gao Su, Ren Mingyuan, et al. Rock elastic strain energy and dissipation strain energy evolution characteristics under conventional triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1238–1242. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1318

岩石加荷破坏弹性能和耗散能演化特性

张黎明^{1,2,3}, 高 速¹, 任明远¹, 王在泉¹, 马绍琼¹

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛理工大学 蓝色经济区工程建设与安全山东省协同创新中心, 山东 青岛 266033; 3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 开展大理岩、灰岩和砂岩的常规三轴试验, 研究岩石变形过程的能量非线性演化特征。结果表明: 岩样屈服前外力功大部分转化为弹性应变能存储于岩样内部, 耗散能增加的很少, 屈服点后耗散能快速增加, 弹性能增速变缓。岩石的极限存储能具有围压效应, 随着围压增加, 岩石破坏时的极限存储能逐渐增加。极限存储能还与岩石本身的性质有关, 岩石的强度越高, 脆性越强, 极限存储能愈大。灰岩极限存储能最大, 大理岩极限存储能次之, 砂岩极限存储能最小。根据弹性能和耗散能的演化规律, 构建了岩石变形破坏过程中弹性应变能的非线性演化模型, 理论模型与3种岩石的试验结果吻合较好。

关键词: 岩石破坏; 弹性应变能; 耗散应变能; 能量演化

中图分类号: TD313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2014)07-1238-05

Rock elastic strain energy and dissipation strain energy evolution characteristics under conventional triaxial compression

ZHANG Li-ming^{1,2,3}, GAO Su¹, REN Ming-yuan¹, WANG Zai-quan¹, MA Shao-qiong¹

(1. College of Science, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Co-operative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Peninsula Blue Economic Zone, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 3. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to get features of energy nonlinear evolution during rock failure process, conventional triaxial compression tests of marble, limestone and sandstone were carried out. Results show that most of external work is converted into rock elastic strain energy before rock yielding. Dissipation strain energy increase rapidly after rock yielding. However, elastic strain energy increases slowly. Rock limit storage energy increases with the confining pressure increasing. Rock limit storage energy is also related to the rock nature. The higher strength and stronger brittleness of rock, its limit storage energy is larger. The maximum limit storage energy of limestone is biggest in three kinds of rock. The maximum limit energy storage of marble is bigger than that of sandstone. According to the interaction mechanism between energy accumulation and energy dissipation, rock energy nonlinear evolution model was established. The model agrees well with three kinds of rock experimental results.

Key words: rock failure; elastic strain energy; dissipation strain energy; energy evolution

准确描述岩体变形破坏规律是进行工程安全稳定性评价的前提。一般先通过室内试验获得岩体的

变形和力学性质参数, 然后利用岩石的强度准则或者应变准则对岩体工程进行安全评估。鉴于建立在经

收稿日期: 2013-09-11 责任编辑: 常 琛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372298); 山东省高等学校科技计划资助项目(J10LE01); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGDEK1106)

作者简介: 张黎明(1977—), 男, 山东威海人, 副教授, 博士。Tel: 0532-85071570, E-mail: dryad_274@163.com

典弹塑性理论基础上的各类破坏准则有诸多不足之处^[1],从能量角度开展岩石变形破坏规律研究,得到越来越多学者的认可^[2-9]。

谢和平等^[1]认为,岩石破坏是其内部能量突然释放的结果;Z. X. Zhang等^[2]研究了冲击加载速度对大理岩能量耗散与释放规律的影响;E. Gaziev等^[3]认为岩石类材料的破坏能和应力状态密切相关;X. P. Zhou等^[4]开展的岩石三点弯曲试验表明,临界应变能随加载速率呈指数关系增加;A. Z. Hua等^[5]指出岩石受荷变形过程中积聚的弹性应变能释放足以使其自身发生破坏;周洪飞等^[6]对岩石单轴压缩能量变化过程的数值研究表明,随着岩石均质度提高,可释放弹性应变能的空间分布逐渐集中;张向阳等^[7]对岩石开展的循环加卸载试验表明,耗散能与应力呈线性关系,后次循环试验的耗散能不等于前几次耗散能的累加值;张志镇等^[8]分析了岩石单轴破坏的弹性能和耗散能演化特征。Z. S. Zheng^[9]分析了岩石动力破坏过程中各种能量之间的相互作用。

上述研究仅对能量变化特征进行规律性分析,部分学者给出的能量模型也极为抽象,如何在具体岩石中应用缺少进一步的验证。本文试图对这些问题进行有益的探索,结合3种岩石变形破坏的能量演化特征,构建岩石破坏过程的能量非线性演化模型,与3种岩石的试验曲线吻合较好。

1 试验方案与能量计算原理

1.1 试验方案

试验在MTS电液伺服岩石力学试验机上完成,分别采用大理岩、石灰岩、砂岩3种岩石进行试验。岩块在试验室加工成高度100 mm、直径50 mm左右的圆柱试样,精度满足岩石力学试验要求。试验岩样经过认真筛选,完整性和均匀性较好。

分别对3种岩石试样进行单轴压缩和常规三轴压缩试验,图1为岩石破坏后的试验照片。不同围压下岩石宏观破坏特征存在差异,单轴压缩为劈裂破坏,而常规三轴压缩岩石均为剪切破坏,且低围压下岩石端部附近局部有张性裂纹。破坏特征的差异与围压大小有关,低围压下有利于形成张性裂纹,单轴压缩几乎完全是张性裂纹导致的劈裂破坏,而高围压下张性裂纹不易扩展,岩样剪切破坏是裂纹摩擦滑移导致的。

1.2 能量计算原理

根据热力学定律,试验机对岩样做功输入岩样的总能量 U (岩石吸收的总能量)^[1]为

$$U = U^e + U^d = U_1 + U_3 \quad (1)$$

式中, U^e 为弹性能; U^d 为耗散能; U_1 、 U_3 分别为轴向应变能和环向应变能,具体计算公式见文献[1],此处不再赘述。

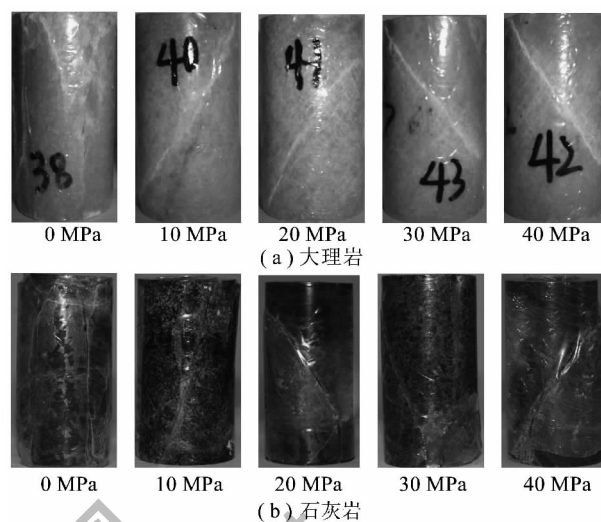


图1 岩石破坏形式

Fig. 1 Failure modes of rock

2 岩石变形破坏过程的能量演化特征

2.1 能量演化过程分析

图2为大理岩、石灰岩和砂岩破坏过程能量变化曲线。与岩石类别无关,3种岩石破坏过程都可统一划分为4段:①压密段(OA):岩样吸收的总能量、弹性应变能和耗散应变能都缓慢增加,外力功大部分转化为弹性应变能被存储于岩样内部,耗散能增加的很少;②弹性段(AB):吸收的总能量和弹性能随变形的增大而增大,弹性能增加的很快,而耗散能几乎没有增加;③裂纹扩展段(BC):耗散能急剧增加,而弹性能增速变缓,并在峰值强度处达到最大值;④峰后破坏段(CD):峰值点过后岩样存储的弹性应变能快速释放,岩石发生破坏,宏观破坏面贯通。

从岩石受荷初期能量开始积聚,到达峰值强度后积聚的能量又快速释放,这个过程可以认为是一个连续过程,必然存在弹性能存储的极大值,即峰值点处所积聚的弹性应变能,定义为极限弹性能。峰值点过后,试验机仍然对岩样做功,岩样吸收的总能量仍增大,但是弹性能会逐渐释放,因此极限弹性能也可以称为极限存储能。常规三轴压缩条件下,岩样的极限存储能具有明显的围压效应。随着围压从0, 10, 20, 30, 40 MPa增加,大理岩岩样的极限存储能从0.13, 0.23, 0.31, 0.46, 0.51 MJ/m³逐渐增加;石灰岩岩样的极限存储能从0.16, 0.37, 0.55, 0.72, 0.89 MJ/m³逐渐增加;砂岩岩样的极限存储能从0.12, 0.14, 0.17, 0.24, 0.29 MJ/m³逐渐增加。

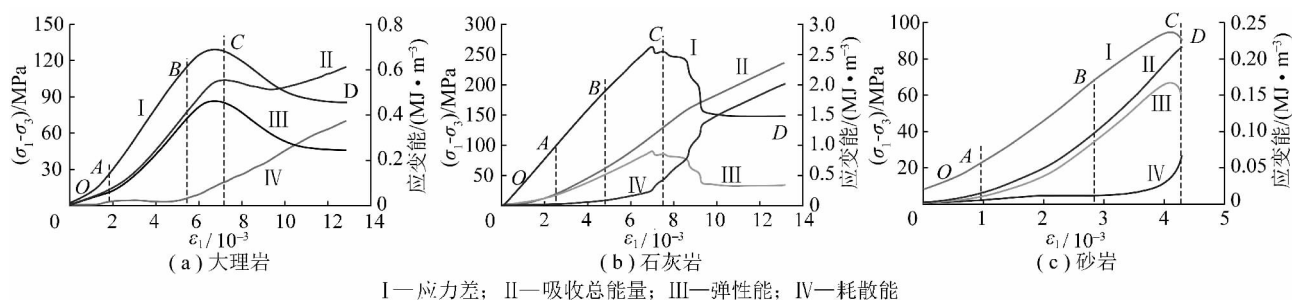


图2 岩石三轴破坏过程能量演化曲线

Fig. 2 Energy evolution curves of rock triaxial compression

极限储能能不仅受围压影响,还与岩石本身的性质有关。岩石强度越高,脆性越强,储能极限就愈高。试验灰岩单轴抗压强度最高,为87 MPa,大理岩为75 MPa,砂岩为67 MPa。在单轴压缩和常规三轴压缩条件下,石灰岩、大理岩、砂岩的极限储能能依次降低,单轴压缩极限储能能分别为0.16, 0.13, 0.12 MJ/m³;围压20 MPa时极限储能能分别为0.55, 0.31, 0.17 MJ/m³。

2.2 能量曲线特征

无论是单轴压缩试验还是常规三轴试验,其能量演化曲线都具有如下特点:在压密阶段,其能量曲线斜率随着应变增大逐渐增加,压密阶段过后曲线斜率又逐渐减小,并在峰值点位置达到极值。所以,能量方程应该能够描述上述试验能量曲线斜率的变化规律。而目前多数能量模型非常复杂,参数繁多,无法在实际中得到应用。近年来为了解决实际工程问题,部分学者提出了一些简洁形式的能量模型,但大多数模型都是将能量曲线分成多个阶段进行分析,并认为不同的阶段能量破坏机制不尽相同,按照不同变化阶段分别给出相应的能量本构模型。上述能量本构方程与实际岩体的能量变化曲线相差较大,不能反映岩石实际能量曲线斜率随着变形增加不断变化的现象,拟合效果往往不能令人满意。对于室内试验的岩样而言,只要控制方式恰当,比如本文采用的位移控制方式,无论是应力-应变曲线,还是能量演化曲线,都是一条连续的曲线,并没有出现“突变”现象。即使采用应力控制方式,岩样在破坏前其能量演化曲线亦是连续曲线。可以认为,描述岩石变形破坏过程的能量本构模型应该可以用一个方程来表示,而不必采用分段的形式,并且这个方程应该能反映岩石受荷过程不同阶段的能量演化特征。

3 岩石破坏过程的能量演化模型

弹性能演化呈现复杂的非线性关系。随着变形增大,在压密段弹性能缓慢增加,在弹性段快速增加,

在裂纹扩展段增速变缓,最终到达岩石的极限储能能,岩石破坏。在变形初期,试验机做功大部分以弹性能存储于岩样内部,能量耗散机制被抑制,表现为弹性能增加较快,耗散能增加缓慢。当弹性能增加到某一值时,能量反而不容易积聚,弹性能增加速度减慢。此时,能量耗散机制起到主要作用,外力功大部分被裂纹扩展、内部摩擦等作用迅速耗散,耗散能急剧增大。

对于某一应变水平 ε ,弹性能 U^e 的积聚变化率表示为 $\frac{1}{U^e} \frac{dU^e}{d\varepsilon}$,它不仅与试验机做功被岩石吸收的总能量 U_0 有关,还与能量转化为积聚弹性应变能 U^e 的量值和驱动岩石向能量积聚机制转移的最低能量 U^{e0} 有关。当岩石吸收的总能量达到某一值时,能量才会积聚,弹性应变能不断增大,即满足^[8]

$$U_0 - U^{e0} > 0 \quad (2)$$

式中, U_0 为岩石吸收的总能量。

试验机对岩石做的功愈多,岩石吸收的能量也越多,越有利于能量的存储,即有

$$\frac{1}{U^e} \frac{dU^e}{d\varepsilon_1} \propto (U_0 - U^{e0}) \quad (3)$$

弹性能的存储过程中,已经积聚的弹性能会对后期能量的继续积聚起到一定的抑制作用,并且这种抑制作用会随着积聚能量的增加得到加强。从能量曲线可以看出,这种抑制关系是非线性增长的,而不是线性增加。存储能量越接近极限储能能,能量就越不容易积聚,即能量的积聚速度会逐渐减小。在外界条件不改变的前提下(本文采用位移控制,轴向变形保持为0.003 mm/s),该抑制作用只有积聚的能量达到一定量值后才会发生,即能量的积聚速度与积聚能量占极限储能能的比例有关。所以有

$$\frac{1}{U^e} \frac{dU^e}{d\varepsilon_1} \propto \left[- (U_0 - U^{e0}) \left(\frac{U^e}{U^{e_{\max}}} \right)^{\beta} \right] \quad (4)$$

式中, $U^{e_{\max}}$ 为极限储能能,表征岩石所能储存的最大能量极限值; β 为能量演化曲线形状因子,可以理解为对函数曲线形式的修正系数。

结合式(3)和(4), 最终建立的能量演化方程式^[8-9]为

$$\frac{1}{U^e} \frac{dU^e}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{\beta} \left[k(U_0 - U^e) - k(U_0 - U^e) \left(\frac{U^e}{U^e_{\max}} \right)^{\beta} \right] \quad (5)$$

令 $\alpha = k(U_0 - U^e)$, 则式(5) 改写为

$$\frac{dU^e}{U^e d\varepsilon_1} = \frac{\alpha}{\beta} \left[1 - \left(\frac{U^e}{U^e_{\max}} \right)^{\beta} \right] \quad (6)$$

式中 k 为比例系数, 表征能量积聚或者抑制作用的速度; α 为能量积聚速度增长因子, 表征岩石内部能量积聚过程中促进作用或抑制作用的程度, 对于不同岩样, 或者不同的能量演化过程中分别取不同的值, 对于具体岩石的某一能量演化过程为实常数。

对式(6)的微分方程先分离变量, 然后采用变量代换方法进行积分可得

$$U^e = \frac{U^e_{\max}}{\{1 + [(U^e_0/U^e_{\max})^{-\beta} - 1]e^{-\alpha\varepsilon}\}^{1/\beta}} \quad (7)$$

令 $c = (U^e_0/U^e_{\max})^{-\beta} - 1$, 对式(7) 化简得

$$U^e = \frac{U^e_{\max}}{(1 + ce^{-\alpha\varepsilon_1})^{1/\beta}} \quad (8)$$

4 模型试验验证

分别根据大理岩、石灰岩、砂岩3种岩石的单轴压缩和常规三轴试验获得的能量变化曲线, 利用非线性最小二乘法, 采用 Matlab 拟合工具对试验数据进行回归。最小二乘法中初始值都设为1, 通过程序设置多次迭代, 求得拟合参数的最优值。大理岩、石灰岩、砂岩3种岩石单轴压缩和常规三轴试验中弹性应变能与轴向应变的关系如图3所示, 3种岩石能量方程的拟合相关系数高于0.96, 试验曲线与拟合曲线吻合较好。

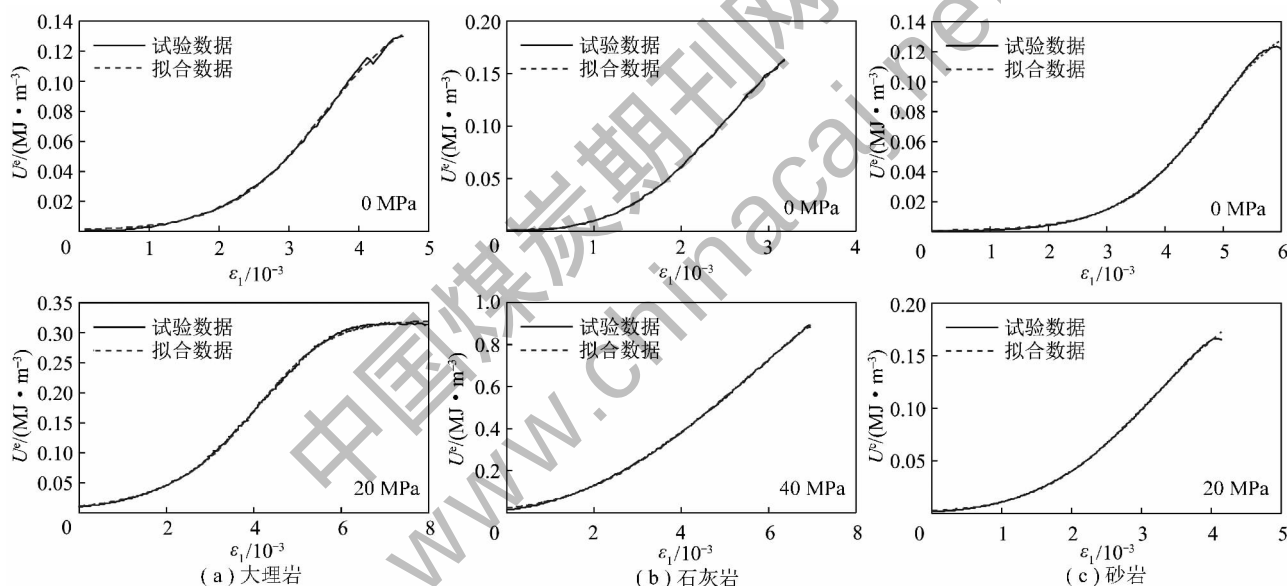


图3 大理岩、石灰岩、砂岩变形过程能量曲线拟合

Fig. 3 Fitting curves of energy evolution for marble, limestone and sandstone

5 讨 论

(1) 式(8)即为由美国学者 J. R. Usher 在对生态资源进行预测时建立的, 描述自然界中事物发生、发展直至到达极限状态的 Usher 模型, 被广泛应用于种群、人口、经济等领域的发展趋势预测。经典的 Usher 模型描述的是自然界中事物随时间变化的增长趋势, 其表达式为

$$y = \frac{y_{\max}}{(1 + ce^{-\alpha t})^{1/\beta}} \quad (9)$$

本文试验内容不考虑蠕变问题, 因此从时间角度分析并无意义。试验过程中 MTS 测试系统可以直接

测试应力和应变数据, 因此分析岩石变形破坏过程时, 采用应力或者应变作为自变量更具有操作性。对实际地下工程的监测而言, 应力监测的准确性相对较低, 测试硬脆性岩体应力状态的钻孔应力计价格较高, 采用有限数量的钻孔应力计往往很难准确获得围岩的实际应力状态, 因此, 采用应力数据作为自变量并不合适。而变形监测在现场比较容易实施, 测试数据也相对准确。综上所述, 采用变形(或者应变)作为自变量, 研究破坏过程中的能量演化与变形之间的对应关系更符合工程实际需要。

(2) 当 $\beta = 1$ 时, 式(8)即为 Pearl 模型

$$U^e = \frac{U_{\max}^e}{1 + ce^{-\alpha \varepsilon_1}} \quad (10)$$

当 $\beta \rightarrow 0$ 时, 对式(8) 根据洛必达法则求导, 然后积分可得 Gompertz 模型

$$U^e = U_{\max}^e e^{-ce^{-\alpha \varepsilon_1}} \quad (11)$$

Pearl 模型和 Gompertz 模型是一种典型的 S 型曲线, 在生产、商业等领域有广泛的应用。但这 2 种模型的拐点只取决于模型的极值, 不能反映拐点位置对曲线形状的影响。Usher 模型克服了这一弊端, 具有更为广泛的适用性, Pearl 模型和 Gompertz 模型都为其特殊情况下的简化形式^[10]。

(3) 本文模型是针对弹性应变能的变化规律建立的, 对耗散能是否适用还需要进一步探讨。对弹性能而言, 其计算公式的原理明确, 属于直接计算量。而耗散能数据是采用总能量减去弹性能获得, 属于间接计算量。岩石试验过程中, 耗散能包括了声、热、辐射、摩擦等各种因素的作用, 而分别测试其中的每一项都非常困难(如测试声发射如何去噪现在还没有很好地解决), 所以耗散能实际上是各种释放能量的统称, 是各种因素的综合作用结果。如能准确测试耗散能中的某一项参数, 针对某一项耗散能建立的模型更具有实际意义。目前, 关于电磁辐射、声发射的研究已经初步开展, 但具体应用还需要深入研究。

6 结 论

(1) 对试验 3 种岩石而言, 常规三轴压缩破坏岩样吸收总能量都高于单轴压缩破坏岩样吸收总能量, 屈服前试样吸收的能量大都以弹性能形式存储到岩样中, 屈服后到峰值前阶段, 弹性能增加速度减小, 耗散能增加速度变大; 到达峰值强度时, 岩样内部存储的弹性能达到极限存储能, 弹性能于瞬间释放, 耗散能快速升高, 岩样破坏。

(2) 岩石的极限存储能具有围压效应。随着围压增加, 岩石破坏时积聚的弹性应变能(储能极限)逐渐增加。极限存储能还与岩石本身的性质有关, 岩石的强度越高, 脆性越强, 极限存储能就愈高。相同围压条件下, 灰岩极限存储能最高, 大理岩极限存储能次之, 砂岩极限存储能最小。

(3) 结合大理岩、灰岩和砂岩 3 种岩石的能量演化特征, 提出岩石破坏过程的能量非线性演化模型,

给出了 3 种岩石单轴压缩和常规三轴压缩条件下能量与轴向应变的具体表达式, 理论模型与试验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石破坏分析的能量初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603–2608.
Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2603–2608.
- [2] Zhang Z X, Kou S Q, Jiang L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(5): 745–762.
- [3] Gaziev E. Rupture energy evaluation for brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(42–43): 7681–7690.
- [4] Zhou X P, Yang H Q, Zhang Y X. Rate dependent critical strain energy density factor of Huanglong limestone[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 51(1): 57–61.
- [5] Hua A Z, You M Q. Rock failure due to energy release during unloading and application to underground rock burst control[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 241–246.
- [6] 周洪飞, 苏国韶. 岩石破裂与能量释放过程的 FLAC^{3D} 数值模拟[J]. 人民长江, 2012, 43(17): 74–78.
Zhou Hongfei, Su Guoshao. Numerical simulation for process of failure and energy release of rock by FLAC^{3D} [J]. Yangtze River, 2012, 43(17): 74–78.
- [7] 张向阳, 成建, 康永红, 等. 循环加卸载下岩石变形破坏的损伤、能量分析[J]. 有色金属, 2011, 63(5): 41–45.
Zhang Xiangyang, Cheng Jian, Kang Yonghong, et al. Analysis on damage and energy during rock deformation under cyclic loading and unloading conditions[J]. Nonferrous Metals, 2011, 63(5): 41–45.
- [8] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1198–1207.
Zhang Zhizhen, Gao Feng. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1198–1207.
- [9] Zheng Z S. Energy transfer process and dynamic analysis during rock deformation[J]. Science in China (Series B), 1991, 34(1): 104–117.
- [10] 蒋明, 宋福霞. Usher 模型的特征分析及应用[J]. 天然气工业, 1998, 18(4): 69–73.
Jiang Ming, Song Fuxia. Characteristics analysis of Usher model and its application[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(4): 69–73.