

单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究

刘保县^{1,2}, 黄敬林¹, 王泽云¹, 刘立¹

(1. 西华大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为建立声发射参数与岩石(煤岩)力学破坏机制的关系, 更好地了解受载煤岩体的损伤演化规律, 进一步揭示煤岩动力灾害演化过程及灾害时间效应产生机制, 利用 MTS815 岩石力学测试电液伺服试验系统和 8CHS PCI-2 声发射检测系统, 对单轴压缩煤岩的损伤演化及声发射特性进行试验研究, 分析单轴压缩煤岩的声发射特性, 提出基于“归一化”累积声发射振铃计数的损伤变量, 建立基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型, 得出煤岩的损伤演化曲线和方程。研究表明, 声发射信息反映煤岩内部的损伤破坏情况, 与其内部原生裂隙的压密及新裂隙的产生、扩展、贯通等演化过程密切相关, 煤岩的声发射特征能较好地描述其变形和损伤演化特性。基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型是合理的。单轴压缩煤岩损伤演化过程可分为 3 个阶段: 初始损伤阶段、损伤稳定演化和发展阶段、损伤加速发展阶段。煤岩由变形至破坏可视为一逐渐发展过程: 由变形、损伤的萌生和演化, 直至出现宏观裂纹, 再由裂纹扩展到破坏的全过程。

关键词: 岩石力学; 煤岩; 损伤演化; 声发射; 损伤变量

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)增 1-3234-05

STUDY ON DAMAGE EVOLUTION AND ACOUSTIC EMISSION CHARACTER OF COAL-ROCK UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

LIU Baoxian^{1,2}, HUANG Jinglin¹, WANG Zeyun¹, LIU Li¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China;

2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the deformation and damage character under load and to further reveal the evolutionary process and the time effect mechanism of coal-rock, damage evolution and acoustic emission(AE) character of coal-rock under uniaxial compression are studied using MTS815 servo-controlled rock mechanical test system and 8CHS PCI-2 AE system. AE character of coal-rock under uniaxial compression is analyzed. A new damage variable, which is defined based on normalized cumulative ring-down count of AE, is proposed; and the damage model of coal-rock under uniaxial compression is established. Damage evolution curve and equation of coal-rock are obtained. The results show that AE information can reflect internal damage of coal-rock and is closely related with primary crack compression and evolutionary course of new crack generation, growth, and connectivity. AE can describe the deformation and damage evolution character of coal-rock. The new damage model of coal-rock under uniaxial compression is reasonable; the deformation and damage evolution process can be divided into three phases including the stage of initial damage, the stage of damage stable evolution and development, and the stage of damage accelerating development. The development of coal-rock deformation and damage can be regarded to be gradual, which is the whole process from deformation and damage initiation and evolution to the appearance of

收稿日期: 2008-04-23; **修回日期:** 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50504011); 高等学校重点实验室访问学者基金资助项目

作者简介: 刘保县(1972-), 男, 博士, 1995年毕业于重庆大学资源及环境科学学院采矿工程专业, 现任教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jzytmlbx@mail.xhu.edu.cn

macroscopic cracks, from macroscopic propagation to damage.

Key words: rock mechanics; coal-rock; damage evolution; acoustic emission(AE); damage variable

1 引言

煤与瓦斯突出和冲击地压等煤岩动力灾害是煤矿生产中的严重自然灾害。随着煤炭开采深度和集约化生产程度的迅速提高,煤与瓦斯突出及冲击地压等煤岩动力灾害也变得日趋严重,对其进行准确的预测、预报已显得极为迫切。越来越多的工程实测和模拟试验表明,煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力灾害具有时间效应,即煤岩动力灾害往往在加载(或放炮)完成后,经过一段滞后时间才发生,这无疑增加了煤岩动力灾害的隐蔽性和破坏性,增大了对其预测、预报及防治的难度。煤岩动力灾害的形成具有时间效应,煤岩由变形至破坏可视为一逐渐发展过程:由变形、损伤的萌生和演化,直至出现宏观裂纹,再由裂纹扩展到破坏的全过程。

在外荷载作用下,煤岩内部微缺陷的成核、扩展以及相互之间的作用决定了煤岩的宏观变形、破裂特性。国内外许多学者^[1~14]在岩石和煤岩受力破坏过程中的声发射特征方面进行了大量基础性研究工作,研究表明,通过对煤岩声发射信号的分析,可推断煤岩内部的性态变化,反演煤岩的破坏机制。但大多数学者只是定性地对岩石(煤岩)的力学破坏过程中声发射特性进行研究,如何建立声发射参数与岩石(煤岩)力学破坏机制的关系还有待进一步的研究。

为了建立声发射参数与岩石(煤岩)力学破坏机制的关系,更好地了解受载煤岩体的损伤演化规律,进一步揭示煤岩动力灾害演化过程及灾害时间效应产生机制,本文对单轴压缩荷载作用下煤岩变形损伤及声发射特性进行了研究。

2 单轴压缩煤岩声发射特性试验研究

试验加载系统是 MTS815 岩石力学测试电液伺服试验系统,声发射测定则采用 8CHS PCI-2 声发射检测系统进行。在单轴压缩状态下对煤岩损伤变形和声发射特性进行了试验,并对煤岩在变形破坏全过程中的声发射信号、荷载、变形及时间等参数进行了监测。

单轴压缩荷载作用下典型煤岩变形及声发射特性如图 1~4 所示。从图 1 可看出,单轴压缩煤岩的应力-应变全过程曲线可分为 4 个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、应变强化阶段、应变软化阶段。由图 2~4 可看出,加载初期,声发射活动较少,甚至没有,煤岩内初始裂纹开始闭合,闭合过程、闭合后部分粗糙面的破坏及闭合裂纹表面之间的滑移产生少量的声发射,但能量较低;随着荷载的缓慢增加,裂纹开始发生扩展,新的裂纹开始产生,声发射振铃计数及累积振铃计数和能率都逐渐趋于活跃;继续加载,裂纹之间的相互作用开始加剧,微裂纹发生聚合、贯通,并逐渐形成宏观裂纹。在临近应力峰值处,声发射活动异常活跃,并且声发射振铃计数在应力峰值处达到最大值。从该煤岩试件

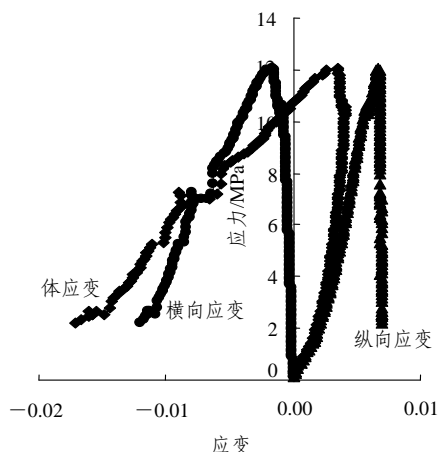


图 1 单轴压缩荷载下典型煤岩应力-应变关系曲线

Fig.1 Relation curves between stress and strain of typical coal-rock under uniaxial compressive load

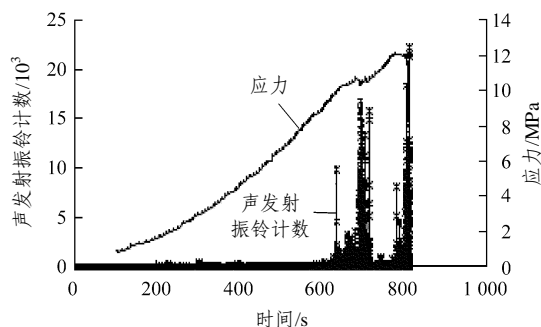


图 2 单轴压缩荷载下典型煤岩声发射振铃计数、应力与时间关系曲线

Fig.2 AE ring-down counts-time curve and stress-time curve of typical coal-rock under uniaxial compressive load

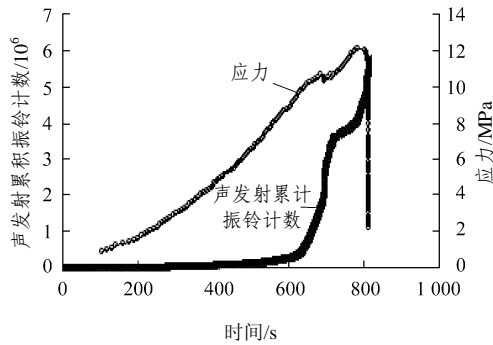


图3 单轴压缩荷载下典型煤岩声发射累积振铃计数、应力与时间关系曲线

Fig.3 AE cumulative ring-down counts-time curve and stress-time curve of typical coal-rock under uniaxial compressive load

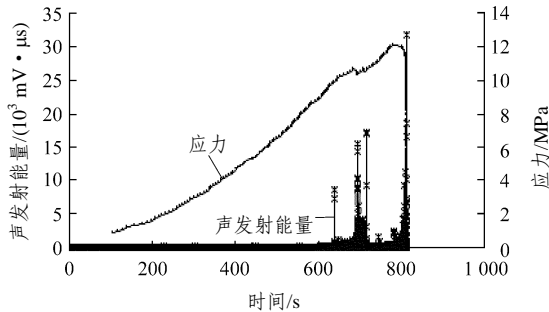


图4 单轴压缩荷载下典型煤岩声发射能量、应力与时间关系曲线

Fig.4 AE energy-time curve and stress-time curve of typical coal-rock under uniaxial compressive load

的试验曲线还可看出，在加载至 10 MPa 后，试件发生局部破坏，声发射振铃计数和能量异常放大。

3 基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型

C. R. Heiple 等应用声发射技术对材料损伤及断裂过程进行长期研究后，认为振铃计数是描述声发射信号特征的多个参数中能够较好地反映材料性能变化的特征参量之一，因为它与材料中位错的运动、夹杂物及第二相粒子的剥离和断裂及裂纹扩展所释放的应变能成比例^[15]。因此，本研究主要选用振铃计数和累积振铃计数来对煤岩损伤特性进行描述。

Kachanov 将损伤变量定义为

$$D = \frac{A_d}{A} \quad (1)$$

式中： A_d 为承载断面上微缺陷的所有面积， A 为初

始无损时的断面积。

若无损材料整个截面 A 完全破坏的累积声发射振铃计数为 C_0 ，则单位面积微元破坏时的声发射振铃计数 C_w 为

$$C_w = \frac{C_0}{A} \quad (2)$$

当断面损伤面积达 A_d 时累积声发射振铃计数 C_d 为

$$C_d = C_w A_d = \frac{C_0}{A} A_d \quad (3)$$

所以有

$$D = \frac{C_d}{C_0} \quad (4)$$

在试验过程中，由于试验机刚度不够或设定煤岩破坏条件的不同，往往煤岩还没完全破坏(即煤岩的损伤还没达到 1)时，试验机就停机。因此损伤变量可修正为

$$D = D_U \frac{C_d}{C_0} \quad (5)$$

式中： D_U 为损伤临界值。

式(5)中 C_0 的取值为损伤变量达 D_U 时的累积声发射振铃计数。为了计算的简便，损伤临界值 D_U 取值为

$$D_U = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p} \quad (6)$$

式中： σ_p 为峰值强度， σ_c 为残余强度。

所以基于声发射特性的单轴压缩煤岩的损伤模型为

$$\sigma = (1 - D) E \varepsilon = \left(1 - D_U \frac{C_d}{C_0} \right) E \varepsilon \quad (7)$$

4 单轴压缩煤岩损伤演化分析

根据式(5)基于“归一化”累积声发射振铃计数的损伤变量，利用式(6)得出典型煤岩应变 - 损伤关系曲线如图 5 所示($\sigma_c = 2.22$ MPa, $\sigma_p = 12.09$ MPa)。根据式(7)，利用“归一化”累积声发射振铃计数的损伤变量值，求得理论应力 - 应变曲线与试验曲线(如图 6 所示)基本吻合，说明式(5)所定义的基于“归一化”累积声发射振铃计数的损伤变量是比较合理的。

从图 5 可看出，煤岩在单轴压缩状态下的损伤演化大致可分为以下 3 个阶段：第一阶段为初期加压至应变达 0.003 8，损伤变量趋近于 0，为初始

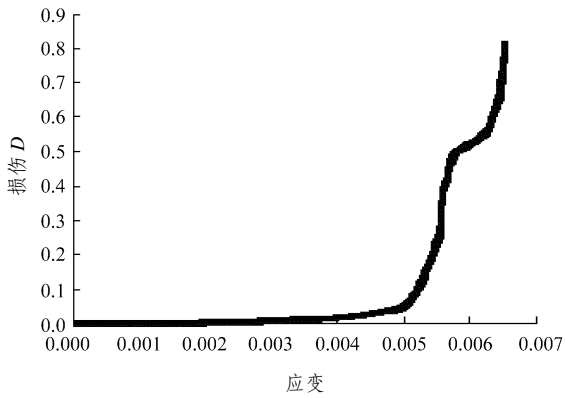


图 5 单轴压缩荷载下典型煤岩应变 - 损伤关系曲线

Fig.5 Strain-damage curve of typical coal-rock under uniaxial compressive load

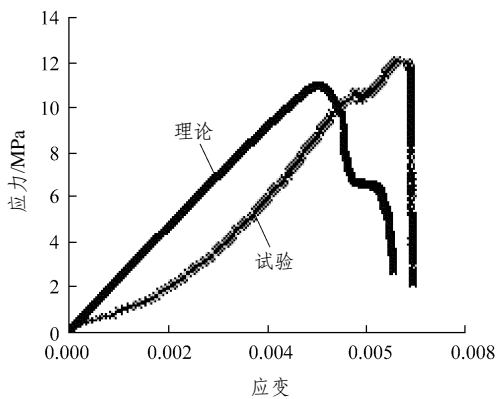


图 6 单轴压缩荷载下典型煤岩理论应力 - 应变曲线与试验曲线对比

Fig.6 Comparison of theoretical stress-strain curve with experimental one of typical coal-rock under uniaxial compressive load

损伤阶段。这主要是由于煤岩在此阶段处于弹性变形阶段, 初始的微裂纹和微孔洞的几何尺寸没有改变, 也没有产生新的微裂纹和微孔洞。第二阶段为应变 0.003 8~0.005 0, 损伤变量稳定增大, 为损伤稳定演化和发展阶段。从应变 0.003 8 开始外荷载越过煤岩的弹性极限, 开始进入塑性变形阶段, 试件中微裂纹或微孔洞开始扩展或新的微裂纹或微孔洞开始产生, 损伤的变化连续稳定。第三阶段为损伤加速发展阶段, 损伤变量上升直至等于损伤临界值。试件中的微裂纹和微孔洞迅速扩展、汇合、贯通, 试件出现宏观破坏。此阶段损伤的发展是不稳定的, 局部承载能力迅速下降。这也更进一步说明煤岩由变形至破坏可视为一逐渐发展过程: 由变形、损伤的萌生和演化, 直至出现了宏观裂纹, 再由裂纹扩展到破坏的全过程, 煤岩动力灾害的形成具有时间效应。

根据图 5 典型煤岩应变 - 损伤关系曲线拟合得单轴压缩荷载作用下典型煤岩损伤演化方程为

$$D = \begin{cases} 0.001\ 50 + \frac{3.867 \times 10^{-8}}{(\varepsilon - 0.005\ 79)^2 + 7.29 \times 10^{-8}} & (0.000\ 00 \leq \varepsilon \leq 0.005\ 71) \\ 0.470\ 82 + \frac{2.793 \times 10^{-8}}{(\varepsilon - 0.006\ 82)^2 + 6.25 \times 10^{-8}} & (0.005\ 71 < \varepsilon \leq 0.006\ 53) \end{cases} \quad (8)$$

所以单轴压缩荷载作用下典型煤岩一维损伤本构模型为

$$\sigma = \begin{cases} 2\ 371.8\varepsilon \left[0.998\ 50 - \frac{3.867 \times 10^{-8}}{(\varepsilon - 0.005\ 79)^2 + 7.29 \times 10^{-8}} \right] & (0.000\ 00 \leq \varepsilon \leq 0.005\ 71) \\ 2\ 371.8\varepsilon \left[0.529\ 18 - \frac{2.793 \times 10^{-8}}{(\varepsilon - 0.006\ 82)^2 + 6.25 \times 10^{-8}} \right] & (0.005\ 71 < \varepsilon \leq 0.006\ 53) \end{cases} \quad (9)$$

5 结 论

本文利用 MTS815 岩石力学测试电液伺服试验系统和 8CHS PCI-2 声发射检测系统, 对单轴压缩煤岩的损伤演化及声发射特性进行了试验研究, 得出以下结论:

(1) 提出了基于“归一化”累积声发射振铃计数的损伤变量, 建立了声发射参数与岩石(煤岩)力学破坏机制的关系, 并验证了其合理性。

(2) 建立了基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型, 得出了煤岩的损伤演化曲线和方程, 为更好地了解受载煤岩体的损伤演化规律, 进一步揭示煤岩动力灾害演化过程及灾害时间效应产生机制打下基础。

(3) 声发射信息反映了煤岩内部的损伤破坏情况, 与其内部原生裂隙的压密、新裂隙的产生、扩展、贯通等演化过程密切相关。加载初期, 声发射活动较少, 甚至没有; 随着荷载的缓慢增加, 裂纹开始发生扩展, 新的裂纹开始产生, 声发射振铃计数及累积振铃计数和能率都逐渐趋于活跃; 继续加载, 裂纹之间的相互作用开始加剧, 微裂纹发生聚合、贯通, 并逐渐形成宏观裂纹。在临近应力峰值处, 声发射活动异常活跃, 并且声发射振铃计数在应力峰值处达到最大值。研究表明, 煤岩的声发射特征能较好地描述其变形和损伤演化特性。

(4) 单轴压缩煤岩损伤演化过程可分为 3 个阶段: 初始损伤阶段、损伤稳定演化和发展阶段、损伤加速发展阶段。煤岩由变形至破坏可视为一逐渐发展过程: 由变形、损伤的萌生和演化, 直至出现了宏观裂纹, 再由裂纹扩展到破坏的全过程。

参考文献(References):

- [1] 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 493 - 2 501. (ZHANG Ming, LI Zhongkui, YANG Qiang, et al. A damage model and statistical analysis of acoustic emission for quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 493 - 2 501.(in Chinese))
- [2] 谢强, 张永兴, 余贤斌. 石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(1): 19 - 22, 58.(XIE Qiang, ZHANG Yongxing, YU Xianbin. Study on acoustic emission of limestone in uniaxial compression test[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(1): 19 - 22, 58.(in Chinese))
- [3] 赵兴东, 田军, 李元辉, 等. 花岗岩破裂过程中的声发射活动性研究[J]. 中国矿业, 2006, 15(7): 74 - 76.(ZHAO Xingdong, TIAN Jun, LI Yuanhui, et al. Study on the AE activity during the failure process of granite samples[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(7): 74 - 76.(in Chinese))
- [4] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 2 794 - 2 799.(CAO Shugang, LIU Yanbao, ZHANG Liqiang. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2 794 - 2 799.(in Chinese))
- [5] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [6] 袁子清, 唐礼忠. 岩爆倾向岩石的声发射特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 94 - 98.(YUAN Ziqing, TANG Lizhong. Experimental research on acoustic emission characteristics of burst-prone rocks[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 94 - 98.(in Chinese))
- [7] 许江, 唐晓军, 李树春, 等. 循环载荷作用下岩石声发射时空演化规律[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2008, 31(6): 672 - 676.(XU Jiang, TANG Xiaojun, LI Shuchun, et al. Space-time evolution rules study of acoustic emission locations in rock under cyclic loading[J]. Journal of Chongqing University(Natural Sciences), 2008, 31(6): 672 - 676.(in Chinese))
- [8] 曹树刚, 刘延保, 张立强, 等. 突出煤体单轴压缩和蠕变状态下的声发射对比试验[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1 264 - 1 268.(CAO Shugang, LIU Yanbao, ZHANG Liqiang, et al. Experiment on acoustic emission of outburst-hazardous coal under uniaxial compression and creep[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1 264 - 1 268.(in Chinese))
- [9] 陈景涛. 岩石变形特征和声发射特征的三轴试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(2): 94 - 96, 118.(CHEN Jingtao. Experimental study on triaxial compression deformation and acoustic emission property of rock[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(2): 94 - 96, 118.(in Chinese))
- [10] 谢强, DA GAMA C D, 余贤斌. 细晶花岗岩的声发射特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 745 - 749.(XIE Qiang, DA GAMA C D, YU Xianbin. Acoustic emission behaviors of aplite granite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 745 - 749.(in Chinese))
- [11] 杨健, 王连俊. 岩爆机制声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 796 - 3 802.(YANG Jian, WANG Lianjun. Study on mechanism of rock burst by acoustic emission testing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 796 - 3 802.(in Chinese))
- [12] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕. 岩石破坏声发射强度分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 512 - 3 516.(YIN Xiangang, LI Shulin, TANG Haiyan. Study on strength fractal features of acoustic emission in process of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3 512 - 3 516.(in Chinese))
- [13] 高峰, 李建军, 李肖音, 等. 岩石声发射特征的分形分析[J]. 武汉理工大学学报(自然科学版), 2005, 27(7): 67 - 69.(GAO Feng, LI Jianjun, LI Xiaoyin, et al. Fractal analysis of the characteristics of acoustic emission of rock[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Natural Sciences), 2005, 27(7): 67 - 69.(in Chinese))
- [14] 张茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(ZHANG Ru, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(in Chinese))
- [15] 刘学文, 林吉中, 袁祖贻. 应用声发射技术评价材料疲劳损伤的研究[J]. 中国铁道科学, 1997, 18(4): 74 - 81.(LIU Xuewen, LIN Jizhong, YUAN Zuyi. Research on evaluation of material fatigue damage by acoustic emission technology[J]. China Railway Science, 1997, 18(4): 74 - 81.(in Chinese))