

# 煤岩卸荷变形损伤及声发射特性

刘保县<sup>1,2</sup>, 李东凯<sup>1</sup>, 赵宝云<sup>1</sup>

(1. 西华大学 建筑与土木工程学院, 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 400030)

**摘要:**深部开采引起的煤岩卸荷损伤破坏的机理与连续加载机理不同,从卸荷的角度研究煤岩动力灾害成为研究煤岩动力灾害问题的一个新的发展方向。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,对煤岩卸荷变形损伤及声发射特性进行了研究。研究表明,煤岩卸荷破坏表现为强烈的脆性破坏,且具有突发性,多呈张剪复合型破坏形式;煤岩卸荷的累积声发射振铃计数演化曲线可反映煤岩卸荷损伤的演化过程;煤岩卸荷破坏过程可分为 3 个阶段:损伤弱化阶段、损伤稳定发展阶段、损伤加速发展阶段;在煤岩开采过程中,围压被卸除,煤岩体迅速进入到煤岩卸荷损伤破坏的第 3 阶段,损伤迅速累积并发生突发性断裂破坏,煤岩动力灾害随即发生。

**关键词:**煤岩动力灾害;卸荷;声发射;损伤

中图分类号:TD315

文献标识码:A

文章编号:1674-4764(2009)02-0057-05

## Damage Evolution and Acoustic Emission Character of Coalrock under Unloading Condition

LIU Bao-xian<sup>1,2</sup>, LI Dong-kai<sup>1</sup>, ZHAO Bao-yun<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering Under the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The damage failure mechanisms of coalrock under unloading condition during deep mining is different from those under traditional loading condition, starting from the unloading condition position to study the dynamic disaster of coalrock has become a new direction in the disaster study. The rock mechanics electrohydraulic servo test system (MTS815) and acoustic emission system (8CHS PCI-2) are used to study the coalrock deformation damage and acoustic emission (AE) characteristics. The results show that the failure of coalrock under unloading condition exhibits strong brittleness and happens in sudden and is mostly of tensile-shear failure type. The evolution curve of cumulative ring-down count of acoustic emission can better reflect the coalrock unloading damage evolution process, and the whole unloading failure process can be divided into three stages: the stage of damage weakening, damage stably development stage and the stage of accelerated damage development. During the mining process the confining pressure of the coalrock is unloaded, the coalrock rapidly arrives at the third stage of the whole unloading failure process, and the damage is accumulated rapidly and the fracture failure of coalrock occurred suddenly, then follows the coalrock dynamic disaster.

**Keywords:** coalrock dynamic disaster; unloading condition; acoustic emission; damage

收稿日期:2008-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50504011)

作者简介:刘保县(1972-),男,西华大学教授,博士,主要从事岩石力学与工程研究方面的研究,(E-mail)jzytmlbx@mail.xhu.edu.cn.

随着国民经济的迅速发展,煤炭资源的开采强度和深度与日俱增。众所周知,煤岩动力灾害,诸如煤与瓦斯突出和冲击地压等,是煤矿生产中的严重自然灾害。而煤岩动力灾害的时间效应更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。深部煤矿开采一般是在卸围压状态下进行的,传统研究方法只适用于加载力学条件,卸载条件下岩体力学特性与加载条件下是有区别的,其对应的变形破坏特征与力学参数有所不同,所以在实际工程中才会出现较大差异。深部开采引起的煤岩卸荷损伤破坏的机理与连续加载机理明显不同,这一问题已引起岩石力学领域的广泛关注,从卸荷的角度研究煤岩动力灾害成为研究煤岩动力灾害问题的一个新的发展方向。由于开挖卸载而导致的岩体破坏现象普遍存在,如水平层状岩石的裂开,沿已有结构面的错动,地下洞室的岩爆等现象。近年来,一些学者针对加载条件下的岩石试验无法满足卸载条件时岩石工程的需要,因此进行了许多侧向卸围压条件的岩石试样的破坏试验<sup>[1-5]</sup>。但由于煤岩试件难于加工等原因,目前对煤岩在卸荷状态下力学特性的研究相对较少。

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。研究表明<sup>[6-17]</sup>,通过对煤岩的声发射信号的分析,可推断煤岩内部的性态变化,反演煤岩的破坏机制。国内外许多学者在岩石和煤岩受力破坏过程中的声发射特征方面做了大量基础性研究工作<sup>[6-17]</sup>,但大多数学者只是定性地对岩石(煤岩)的力学破坏机制与声发射特征进行研究,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,更好地了解煤岩卸荷损伤演化规律,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理,该文对煤岩卸荷变形损伤及声发射特性进行了研究。

## 1 煤岩三轴卸荷试验

煤岩样取自南桐东林煤矿的突出煤岩,加工成 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 标准原煤岩样。试验加卸载系统是 MTS815 岩石力学测试电液伺服试验系统,声发射监测采用 8CHS PCI-2 声发射检测系统进行,试验装置如图 1 所示。试验采用应力控制方式,根据常规三轴试验确定煤岩的抗压强度,试验中保证轴压不超过煤岩的三轴抗压强度,应力路径为将围压和轴压分别增加,加围压和轴压到预定值后,保持轴压不变,以  $0.5\text{ MPa}/\text{min}$  的速率逐渐卸除围压直至试样破坏。

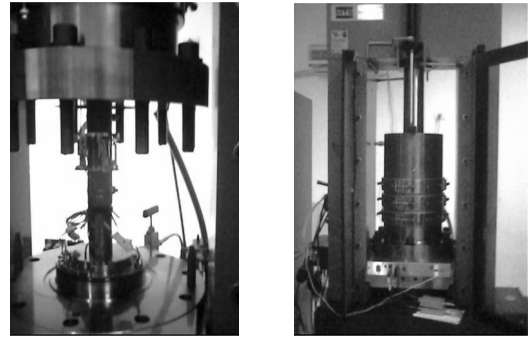


图 1 煤岩卸荷实验装置

## 2 实验结果及分析

### 2.1 煤岩卸荷破坏特征分析

实验表明,煤岩卸荷破坏均表现为比较强烈的脆性破坏,且具有突发性。煤岩样除主剪切面之外还存在少量的局部剪切破坏面,沿轴向存在相当数量的平行于轴向应力方向的劈裂面,并且试样表面附近有卸荷剥落的张性落片。这说明轴向应力  $\sigma_1$  恒定条件下卸围压( $\sigma_2 = \sigma_3$ )煤岩常常呈现张剪复合型的破坏特征。从破坏机理来看,轴向应力恒定条件下卸围压,随着围压的减小,应力莫尔圆急速增大,与库仑曲线很快相切,剪应力  $\tau$  快速增至破坏强度  $\tau_{\max}$ ,岩石发生突发性破坏。同时,卸围压相当于煤岩在初始应力状态下沿  $\sigma_2 = \sigma_3$  方向叠加了反向的拉应力,致使煤岩在侧向产生拉伸变形,裂纹沿平行于  $\sigma_1$  的方向扩展,产生侧向膨胀变形及劈裂现象。所以对于煤岩来说,卸围压破坏多呈张剪复合型破坏形式。

### 2.2 煤岩卸荷的变形及声发射特征分析

图 2 为煤岩卸荷应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与轴向应变的关系曲线,图 3 为煤岩声发射振铃计数、应力差与时间的关系曲线,图 4 为声发射能量、应力差与时间的关系曲线。从图中可看出,煤岩卸荷变形经历 3 个阶段:弹性变形阶段、塑性变形阶段和破坏阶段。轴向应力保持不变,应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )是随围压减小而增大的。随着应力差的增大,开始阶段轴向应变较小,煤岩处于弹性变形阶段。在此阶段,声发射数很少,声发射能量较小,试样被压密及有一定的线弹性变形,但对其内部结构并没有产生多大的影响,故产生的声发射次数少、能量也较小。当应力差继续增大到一定值时(图 2(a)中达  $8\text{ MPa}$ ,图 2(b)中达  $12\text{ MPa}$ )轴向应变开始增大,煤岩变形进入到塑性变形阶段,声发射数和声发射能量较第一阶段有较大的提高。随应力差的进一步增大到  $14\text{ MPa}$  时,轴向应变迅速增大直至试件破坏,声发射数和声发射能量急剧增长,说明此时试件内部的裂纹开始扩展、贯通,最后形成宏观裂纹并破坏。随着围压的卸除,试样内部微裂纹数迅速汇合、伸长、贯通,宏观裂纹形成,损伤迅速累积,导致煤岩发生突发性断裂破坏。

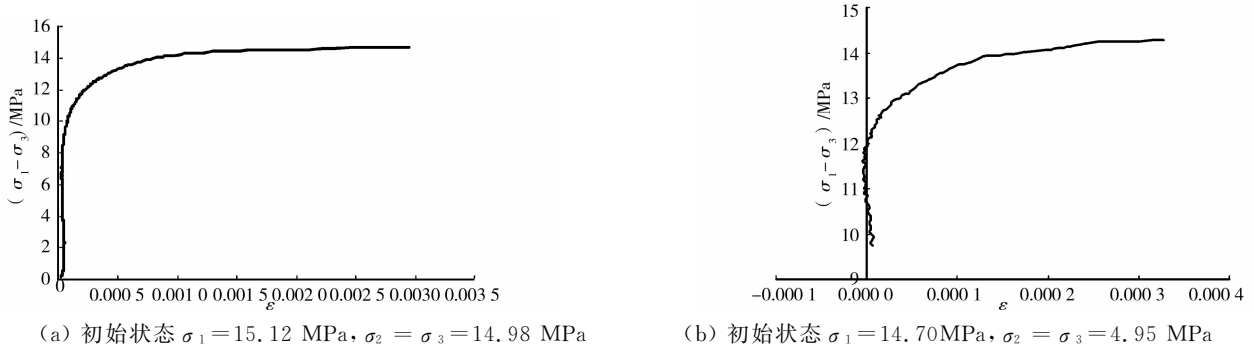


图 2 煤岩卸荷应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与轴向应变  $\epsilon$  关系

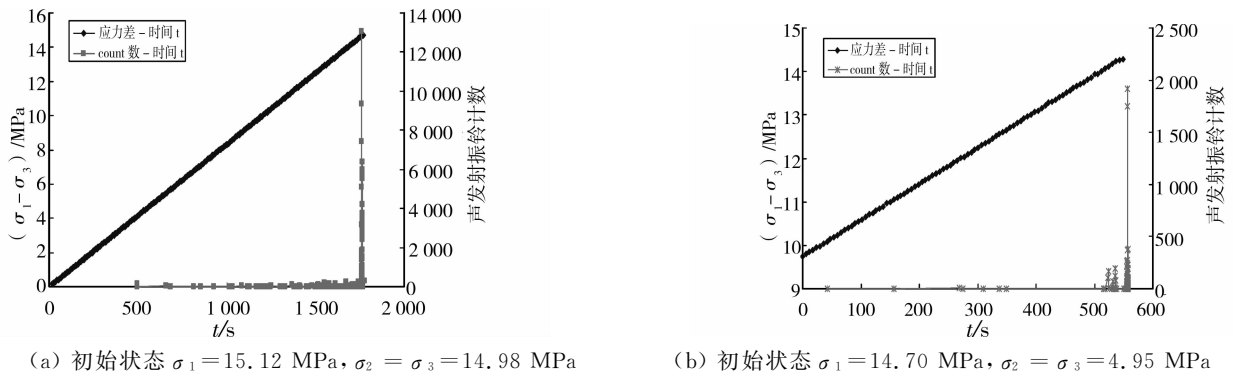


图 3 煤岩卸荷声发射振铃计数、应力差与时间关系曲线

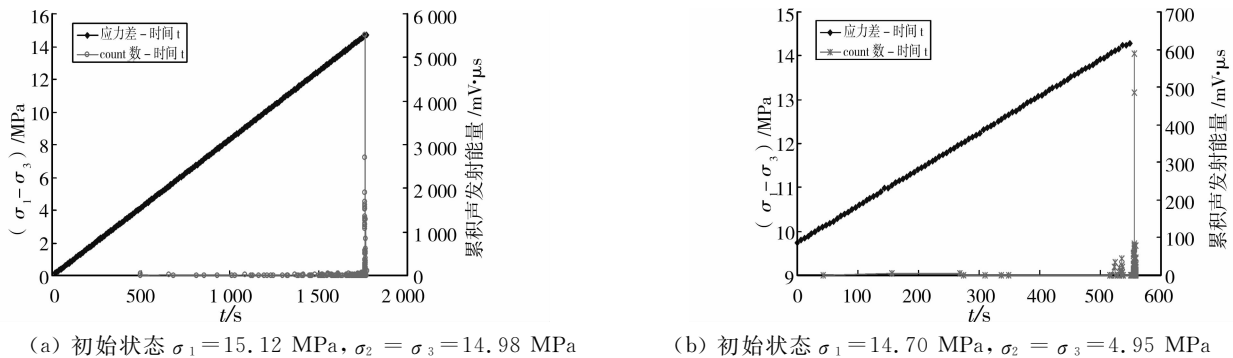


图 4 煤岩卸荷累积声发射能量、应力差与时间关系曲线

### 2.3 煤岩卸荷损伤分析

Heiple C. R, Carpenter S. H 及 Wadley H. N. G 等人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<sup>[18]</sup>。因此,本研究主要选用振铃计数和累积振铃计数来对煤岩卸荷损伤特性进行描述。

2.3.1 基于声发射的煤岩损伤描述 Kachanov 将损伤变量定义为:

$$D = A_d / A \quad (1)$$

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  $A$  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

$$C_w = C_0 / A \quad (2)$$

当断面损伤面积达  $A_d$  时累积声发射振铃计数  $C_d$  为

$$C_d = C_w A_d = C_0 \cdot A_d / A \quad (3)$$

所以

$$D = C_d / C_0 \quad (4)$$

在实验过程中,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:

$$D = D_U \cdot C_d / C_0 \quad (5)$$

式中,  $D_U$  为损伤临界值。在此式中  $C_0$  的取值为损伤变量达  $D_U$  时的累积声发射振铃计数。

由式(5)可看出,声发射试验中的累积振铃计数反映试件损伤的发展,图 5 中累积振铃计数的演化曲线即可反映损伤的演化过程。

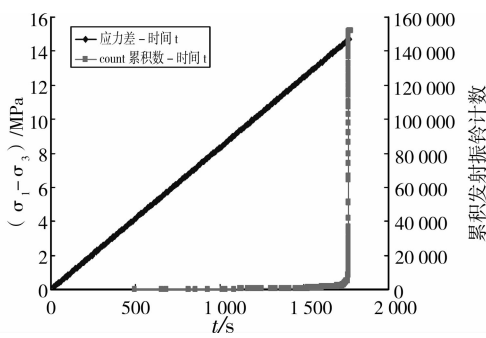
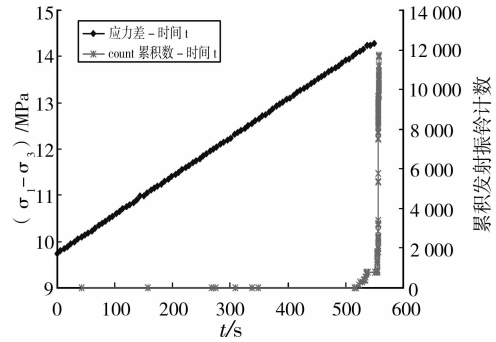
(a) 初始状态  $\sigma_1 = 15.12$  MPa,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 14.98$  MPa(b) 初始状态  $\sigma_1 = 14.70$  MPa,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 4.95$  MPa

图 5 煤岩卸荷累积声发射振铃计数、应力差与时间关系曲线

2.3.2 煤岩卸荷损伤分析 图 5(a)、(b)分别为围压为 14.98 MPa 和 4.95 MPa 的应力差—时间、累积振铃计数—时间曲线图。根据累积振铃计数的演化曲线可反映损伤的演化过程,从图中可得出以下结论,煤岩卸荷破坏过程可分为 3 个阶段:第 1 阶段,损伤弱化阶段,声发射数很少,在此阶段,试样被压密及线弹性变形虽较大,但对其内部结构并没有产生多大的影响,故产生的声发射次数少,认为此阶段损伤产生较少或认为并没有损伤发生;第 2 阶段,损伤稳定发展阶段,声发射数较第 1 阶段有较大的提高,在此阶段,煤岩内部微裂纹开始萌生并逐步稳定扩展;第 3 阶段,损伤加速发展阶段,声发射数急剧增长,此阶段,随着围压的卸除,试样内部微裂纹数迅速汇合、伸长、贯通,宏观裂纹形成,损伤迅速累积,导致岩石发生突发性断裂破坏。从曲线形态及演化趋势来看,煤岩的卸荷破坏表现出明显的脆性破坏,并且具有突发性。

### 3 煤岩卸荷与煤岩动力灾害产生机理

在煤岩开采过程中,当工作面放炮瞬时进尺后,工作面前方的煤体的围压被迅速卸除,煤体迅速进入到煤岩卸荷损伤的第 3 阶段损伤加速发展阶段,煤体中的微裂纹迅速汇合、伸长、贯通,宏观裂纹形成,损伤迅速累积,煤岩发生突发性断裂破坏,煤岩动力灾害随即发生。若爆破不彻底,留下的部分硬煤或硬岩使围岩卸荷持续一定的时间,工作面的煤岩体会首先进入到煤岩卸荷破坏的第 1、2 阶段,煤岩内部的微裂纹开始萌生并逐步稳定扩展,损伤稳定发展,当内部聚积的应变能足以使留下的硬煤或硬岩破坏时,煤岩体迅速进入煤岩卸荷破坏的第 3 阶段,并发生突发性断裂破坏,引发具有明显时间效应的煤岩动力灾害。

### 4 结论

1) 煤岩卸荷破坏表现为强烈的脆性破坏,且具有突发性,多呈张剪复合型破坏形式。

2) 煤岩卸荷变形经历 3 个阶段:第 1 阶段,弹性

变形阶段,轴向应变较小,声发射数很少,声发射能量较小;当应力差继续增大到一定值时,轴向应变开始增大,煤岩变形进入到塑性变形阶段,声发射数和声发射能量较第 1 阶段有较大的提高;随应力差的进一步增大,轴向应变迅速增大直至试件破坏,声发射数和声发射能量急剧增长,试样内部微裂纹数迅速汇合、伸长、贯通,宏观裂纹形成,损伤迅速累积,导致煤岩发生突发性断裂破坏。

3) 声发射试验中的累积振铃计数反映煤岩卸荷损伤的发展,累积振铃计数的演化曲线即可反映损伤的演化过程。煤岩卸荷损伤演化过程可分为 3 个阶段:损伤弱化阶段、损伤稳定发展阶段、损伤加速发展阶段。

4) 在煤岩开采过程中,围压被迅速卸除,煤体迅速进入到煤岩卸荷损伤的第 3 阶段,损伤迅速累积并发生突发性断裂破坏,煤岩动力灾害随即发生。若爆破不彻底,留下的部分硬煤或硬岩使围岩卸荷持续一定的时间,煤岩体会首先进入到煤岩卸荷破坏的第 1、2 阶段,再进入第 3 阶段,从而引发具有明显时间效应的煤岩动力灾害。

#### 参考文献:

- [1] 徐林生,王兰生,李天斌. 卸荷状态下岩爆岩石变形破裂机制的试验岩石力学研究[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 102-107.  
XU LIN-SHENG, WANG LAN-SHENG, LI TIAN-BIN. Experimental rock mechanics study on the rockburst rock deformation-failure mechanism under unloading condition[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(4): 102-107.
- [2] 张黎明,王在泉,贺俊征. 岩石卸荷破坏与岩爆效应[J]. 西安建筑科技大学学报, 2007, 39(1): 110-114.  
ZHANG LI-MING, WANG ZAI-QUAN, HE JUN-ZHENG. Analysis of failure characteristics of rock under unloading conditions and their effects on rock burst[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2007, 39(1): 110-114.
- [3] 张宏博,宋修广,黄茂松,等. 不同卸荷应力路径下岩体破坏特征试验研究[J]. 山东大学学报, 2007, 37(6): 83-86.

- ZHANG HONG-BO, SONG XIU-GUANG, HUANG MAO-SONG, et al. Research on failure features of rocks under different stress unloading path[J]. Journal of Shandong University, 2007, 37(6): 83-86.
- [4] 周小平, 哈秋聆, 张永兴, 等. 峰前围压卸荷条件下岩石的应力-应变全过程分析和变形局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3236-3244.
- ZHOU XIAO-PING, HA QIU-LING, ZHANG YONG-XING, et al. Analysis of localization of deformation and complete stress-strain relation for mesoscopic heterogenous brittle rock materials when axial stress is held constant while lateral confinement is reduced[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3236-3244.
- [5] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬, 等. 岩石卸荷损伤演化机理CT实时分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 697-701.
- REN JIAN-XI, GE XIU-RUN, PU YI-BIN, et al. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 697-701.
- [6] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151-171.
- [7] RUDAJEV V, VILHELM J, LOKAJIK T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 699-704.
- [8] 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): 2493-2501.
- ZHANG MING, LI ZHONG-KUI, 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): 2493-2501.
- [9] 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 YONG-XING, YU XIAN-BIN. Study on acoustic emission of limestone in uniaxial compression test[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(1): 19-22, 58.
- [10] 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 XING-DONG, TIAN JUN, LI YUAN-HUI, et al. Study on the AE activity during the failure process of granite samples[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(7): 74-76.
- [11] 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(S1): 2794-2799.
- CAO SHU-GANG, LIU YAN-BAO, ZHANG LI-QIANG. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2794-2799.
- [12] 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): 2499-2503.
- LI SHU-LIN, YIN XIANG-GANG, WANG YONG-JIA, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503.
- [13] 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, 2008, 31(6): 672-676.
- XU JIANG, TANG XIAO-JUN, LI SHU-CHUN, et al. Spacetime evolution rules study of acoustic emission locations in rock under cyclic loading[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(6): 672-676.
- [14] 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 JING-TAO. 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.
- [15] 谢强, CARLOS DINIS DA GAMA, 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, CARLOS DINIS DA GAMA, YU XIAN-BIN. Acoustic emission behaviors of aplite granite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 745-749.
- [16] 杨健, 王连俊. 岩爆机理声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3796-3802.
- YANG JIAN, WANG LIAN-JUN. Study on mechanism of rock burst by acoustic emission testing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3796-3802.
- [17] 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): 2584-2588.
- ZHANG RU, XIE HE-PING, LIU JIAN-FENG, 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): 2584-2588.
- [18] 刘学文, 林吉中, 袁祖贻. 应用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 XUE-WEN, LIN JI-ZHONG, YUAN ZU-YI. Research on evaluation of material fatigue damage by acoustic emission technology[J]. China Railway Science, 1997, 18(4): 74-81.

(编辑 胡英奎)