

文章编号:1000-582X(2009)11-1321-07

不同围压下煤岩声发射特征试验

曹树刚¹,刘延保^{1,2},李 勇¹,张立强¹

(1. 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;

2. 煤炭科学研究总院 重庆研究院,重庆 400037)

摘 要:利用 MTS815 岩石力学试验系统对煤岩试样进行常规单轴和三轴围压下的声发射(AE)试验。对声发射信号特征进行综合分析,结果表明:常规单轴压缩和围压作用下试样的 AE 参数变化均具有明显的趋势性;围压的作用下,弹性阶段的声发射信号显著减少,破坏前无明显 AE 相对平静期现象,随时间分布的 AE 振幅及其包络线可以间接反映应力的变化趋势。随着振幅的增加,声发射事件数呈递减的趋势,反映累积幅度分布的 m 值随着围压的增加而增大。AE 频率均分布在 3 个频域范围内,试样破坏时 AE 主频成分所占比例显著增加。

关键词:岩石力学;煤岩;声发射;振幅;频率分布

中图分类号:TU 459. 3

文献标志码:A

Experimental study on acoustic emission characteristics of coal rock at different confining pressure

CAO Shu-gang¹, LIU Yan-bao^{1,2}, LI Yong¹, ZHANG Li-qiang¹

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Chongqing Research Institute, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, P. R. China)

Abstract: This paper conducts experimental investigation on acoustic emission(AE) characteristics of coal rock at uniaxial and triaxial compression by MTS815 rock mechanics test system. The results show that the variation of AE has tendency effect at uniaxial compression and confining pressure experiments. We indicate that AE signal decreases significantly in the elastic stage, and the relatively quiet period of AE before the specimens failure is not obvious under confining pressure. The AE amplitude distribution with time and its envelope line can indirectly reflect the trend of stress. The AE events peak stress and elastic modulus decrease with the temperature increase, and the value of m which reflects the cumulative distribution of amplitude increases as the confining pressure rises. The results also show that the AE frequency distributes in three frequency domains, and the proportions of dominant frequency significantly increase while the specimens are broken.

Key words: rock mechanics; coal rock; acoustic emission; amplitude; frequency distribution

收稿日期:2009-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674111)

作者简介:曹树刚(1955-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事采矿工程、安全技术及工程方向的研究,
(E-mail)caosg@cqu.edu.cn.

软岩是一种在工程环境因素下呈现软弱或松散破碎等自然性状,含有原始损伤缺陷的非连续介质。由于其复杂的力学性质,对工程中软岩材料的变形及破坏做出合理的解释,具有重要的工程实际意义^[1]。通过对荷载作用下软岩试件的声发射(Acoustic Emission,简称 AE)信号进行分析,可以推断出试样内部的性态变化,反演破坏机制及破坏程度。目前,这方面的研究主要通过室内单轴压缩试验^[2-14]和数值模拟来实现^[15],三轴压缩等复杂应力条件下的声发射试验研究报道较少^[16,17],还有待进一步探讨。因此,针对煤岩这一典型的工程软岩材料进行常规单轴和围压下的三轴试验,综合对比分析不同围压下试样变形破坏过程中的 AE 特征,揭示其动态损伤演化过程。

1 试验方法及过程

1.1 试样制备

试验岩样取自重庆市松藻煤电集团打通一矿 7#煤层回采工作面。7#煤层为突出煤层,属二叠系上统龙潭组。采用刻槽法在回采工作面刻取块状煤体,按制样要求^[18]沿垂直层理方向加工 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的试件。对所取试样进行基本物理参数测试,测得容重 14.77 kN/m^3 、含水率 1.37% 。

1.2 试验设备

试验加载设备采用美国 MTS815 型液压伺服岩石力学系统。该设备最大轴向加载载荷 $2\ 800\text{ kN}$,全数字计算机自动控制,采用力、位移、轴向应变等多种加载方式以及高速数据采集,具有测试精度高、性能稳定等优点。声发射监测设备采用美国物理声学公司生产的 DISP 系列 2 通道/卡 PCI-2 全数字化声发射监测系统,具有 AE 特征参数与波形同时采集,抗干扰能力和排除噪音能力强等技术特点。

1.3 试验方法

试验中均采用轴向位移控制方式加载,加载速率为 0.02 mm/min 。三轴试验围压分为 2.0 、 4.0 和 6.0 MPa 3 个等级,先给试件加到预定的围压,再进行轴向加载。声发射装置的采样间隔均设定为 $50\ \mu\text{s}$ 。在单轴压缩试验中,声发射传感器安装在试样对称的两侧面;三轴试验时,AE 传感器设置在油压缸的外表面。传感器安装时采用黄油进行耦合,并用胶带固

定。试验过程中尽量减小环境噪音的影响。

2 应力-应变与 AE 参数耦合关系

采用 AE 信号经历分析方法,对试验得到的 AE 事件率、累计振铃数、能量等信号参数随时间变化进行分析。以时间为参照变量,得到不同围压下的应力-应变和 AE 参数耦合关系,见图 1。根据应力-应变和 AE 特征,将破坏过程分为(I)弹性阶段、(II)弹塑性阶段、(III)峰后破坏阶段和(IV)残余塑性阶段。其中,弹性阶段包含压实阶段(初始加载阶段)。

单轴加载时 AE 事件贯穿受力全过程,由于声发射传感器与试样直接接触,受到的干扰较小,得到较多的声发射计数,见图 1(a)。初始加载后很快进入一个线弹性变形过程,AE 现象逐渐活跃,AE 事件率出现了多处突增,且具有较高的能量。而应力-应变曲线和 AE 累计振铃数曲线均表现出较好的线性形态,这是由于试样的固体颗粒及结构具有非常高的非均质性,且原始损伤严重,致使局部区域在较低应力水平时发生破坏,但对整体不造成影响。在弹塑性阶段,弹性模量发生变化,前期 AE 事件率处于递增趋势,AE 能量相对较高,后期 AE 事件率处于一个较低水平,出现了 AE 相对平静期,应力值增加缓慢,并出现了 2 次较小的波动。在这一阶段,裂纹开始汇集、贯通,形成较大的裂纹,径向变形增大,最终形成主裂纹。期间 AE 传播受到一定影响。随着应力增加,AE 事件率与应力同时达到峰值,试样处于临界破坏应力,发生破坏。在残余塑性阶段,随着裂纹的进一步扩大,AE 信号的监测受到影响,信号数减小。AE 曲线处于较低水平,变化相对平缓。

见图 1(b)-(d),围压作用下试样的 AE 特征与单轴受载时整体相似,均具有明显的趋势性。AE 事件率和能量的突增出现在应力峰值的前后。在弹性阶段,随着轴向应变的增加,AE 信号整体呈递增的趋势。不同处在于:围压的作用下,弹性阶段的 AE 信号显著减少,并且随着围压的增加,有相对较少的趋势。这是因为在试验过程中,首先施加围压,迫使试件内部原生的裂纹发生闭合,增加了试件的整体性。弹塑性阶段,在围压作用下裂纹两侧沿裂纹方向发生相对错动,AE 信号传播受影响较小,没有明显的 AE 相对平静期。

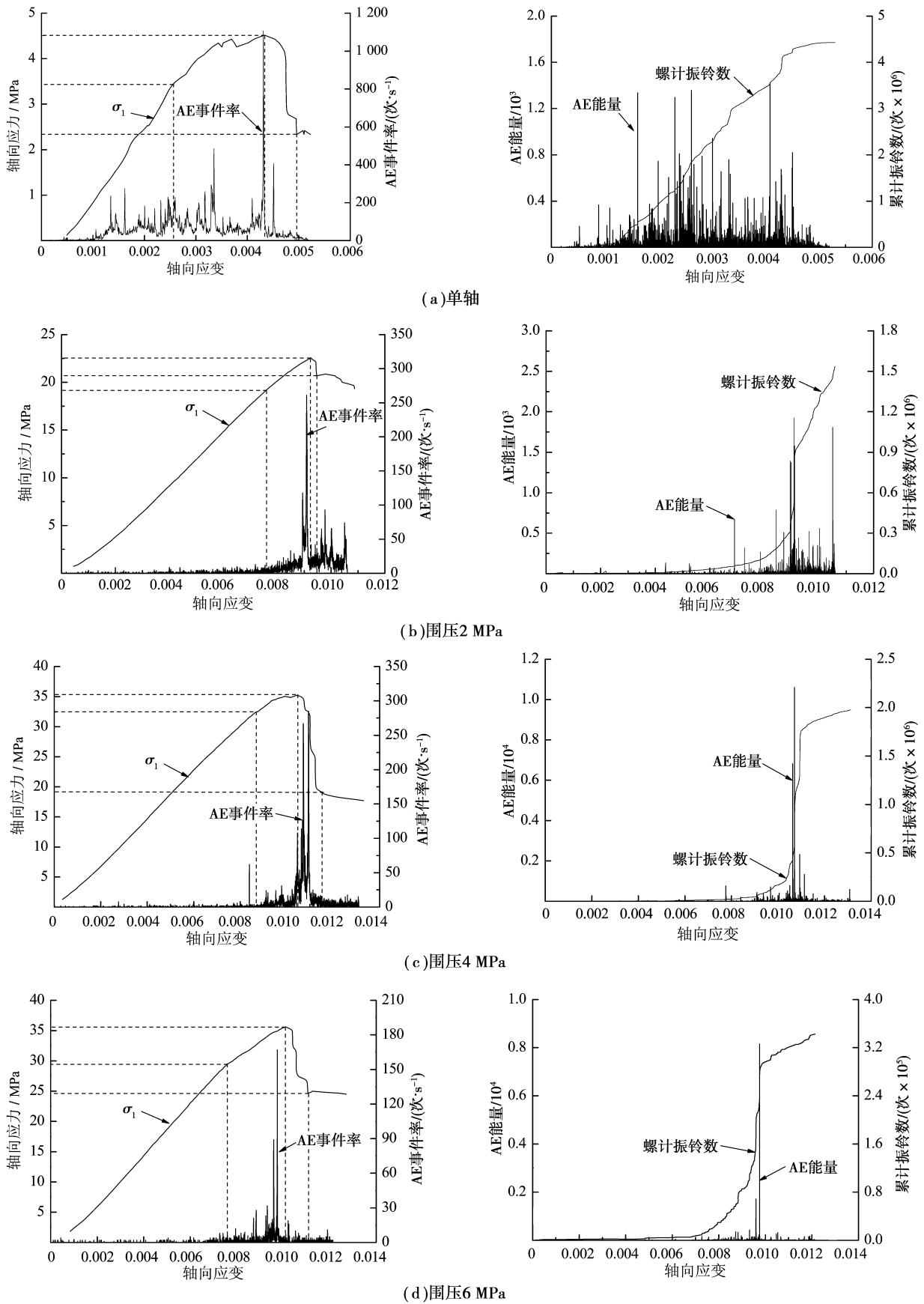


图 1 不同围压下试样的应力-应变和声发射特征

将破坏后的试样进行对比,发现单轴压缩下的宏观裂纹多平行于压力作用方向,具有明显的方向性。而围压作用下宏观裂纹与轴向加载方向呈一定的夹角,损伤延伸方向与裂纹交界附近结构的不均匀性相关,这一夹角并无明显的规律性。破坏后的试样如图 2 所示。



图 2 试样破坏形态

3 AE 振幅与频率特征

3.1 AE 振幅分布特征

采用 AE 信号分布分析方法^[19],将 AE 事件计数按振幅的大小进行统计分析,分别得到随时间变化的振幅分布和累积振幅分布,见图 3。这里的振幅值采用持续时间中的最大振幅,由包络线检波求得。从时间分布上看,振幅分布随着应力水平发生变化,特别是在进入弹塑性阶段后,振幅值较大的 AE 的发生显著增加。

如图 3(a)所示单轴加载时,在 AE 相对平静期振幅并没有相对减弱的迹象,与前述 AE 事件率、能量在此期间的变化有一定差异。围压作用下,随时间分布的 AE 振幅与应力曲线具有类似的变化趋势,见图 3(b)-(d)。如围压为 2 MPa 时,在弹性阶段,振幅值分布在 [45, 82] dB 之间,随着时间振幅值呈递增趋势;弹塑性阶段,振幅范围值继续扩大,达到了 [45, 91] dB,振幅值在 [82, 100] dB 之间的 AE 上构成了这一阶段的峰值变化过程;峰后破坏阶段,振幅值分布在 [45, 72] dB 之间,振幅值降低;残余应力阶段,振幅值范围为 [45, 82] dB,出现了一系列累积值连续分布的 AE 振幅峰值。因此,振幅

随时间分布的包络线和应力曲线能够较好地吻合,但随着围压的增加,其偏离度增大。

从图 3 中可以得出振幅值总体分布在 [45, 100] dB 之间,随着振幅值的增加,AE 事件数均呈递减的趋势。其中,振幅值在 [46, 55] dB 之间的 AE 事件较为显著,占总数的 50% 以上;大于 70 dB 的 AE 事件非常少。将不同规模的振幅与其发生频度的关系,采用石本一坂田公式表示

$$n(a) = ka^{-m} da, \quad (1)$$

式中, a 为 AE 事件的最大振幅; $n(a)$ 为最大振幅从 a 到 $a + da$ 区间内 AE 的发生频度; k, m 为常数。将式(1)积分可得大于或等于振幅 a 的声发射事件总数 $N(a)$ 为

$$N(a) = \int_a^{\infty} ka^{-m} da = ca^{-(m-1)} \quad (2)$$

将图 3 中的累积振幅分布值代入(2)式,得到不同围压下的 m 值变化,见图 4。随着围压的增加, m 值呈近似线性的单调递增趋势。茂木清夫指出 m 值的物理意义相当于障碍物阻止破坏的概率^[20]。当围压增加时,障碍物的分布密度变高,则阻止破坏增长的概率就越大, m 值就越大。

3.2 AE 频率分布特征

AE 信号的频率可以反映不同状态、不同变形或开裂的过程。因此,对试验过程中 AE 信号进行实时的 FFT 变换,经计算和处理得到 AE 频率特征。选取峰值频率,按时间参量进行统计,得到不同围压下试样变形过程中的 AE 频率分布,见图 5。

对于单轴加载状态,AE 频率呈条带状区域分布,主要分布在 3 个频域范围内,见图 5(a)。其中,频率在 [20, 75] kHz 之间的 AE 占大多数,相对频率较高在 [100, 180] kHz 之间的 AE 数最少。在弹塑性阶段,前述 AE 相对平静期内,频率在 [230, 300] kHz 之间的 AE 数明显减少,使这一阶段 AE 低频率成分所占比例显著增加。峰后破坏阶段和残余塑性阶段的 AE 频率多数在较低的 [20, 75] kHz 内。围压下载荷时,AE 频率也可划分为 3 个频域范围,见图 5(b)-(d)。但是 AE 频率主频范围增加,大多分布在 [150, 300] kHz 之间。试样失稳破坏前,主频范围内的 AE 事件数显著增加。

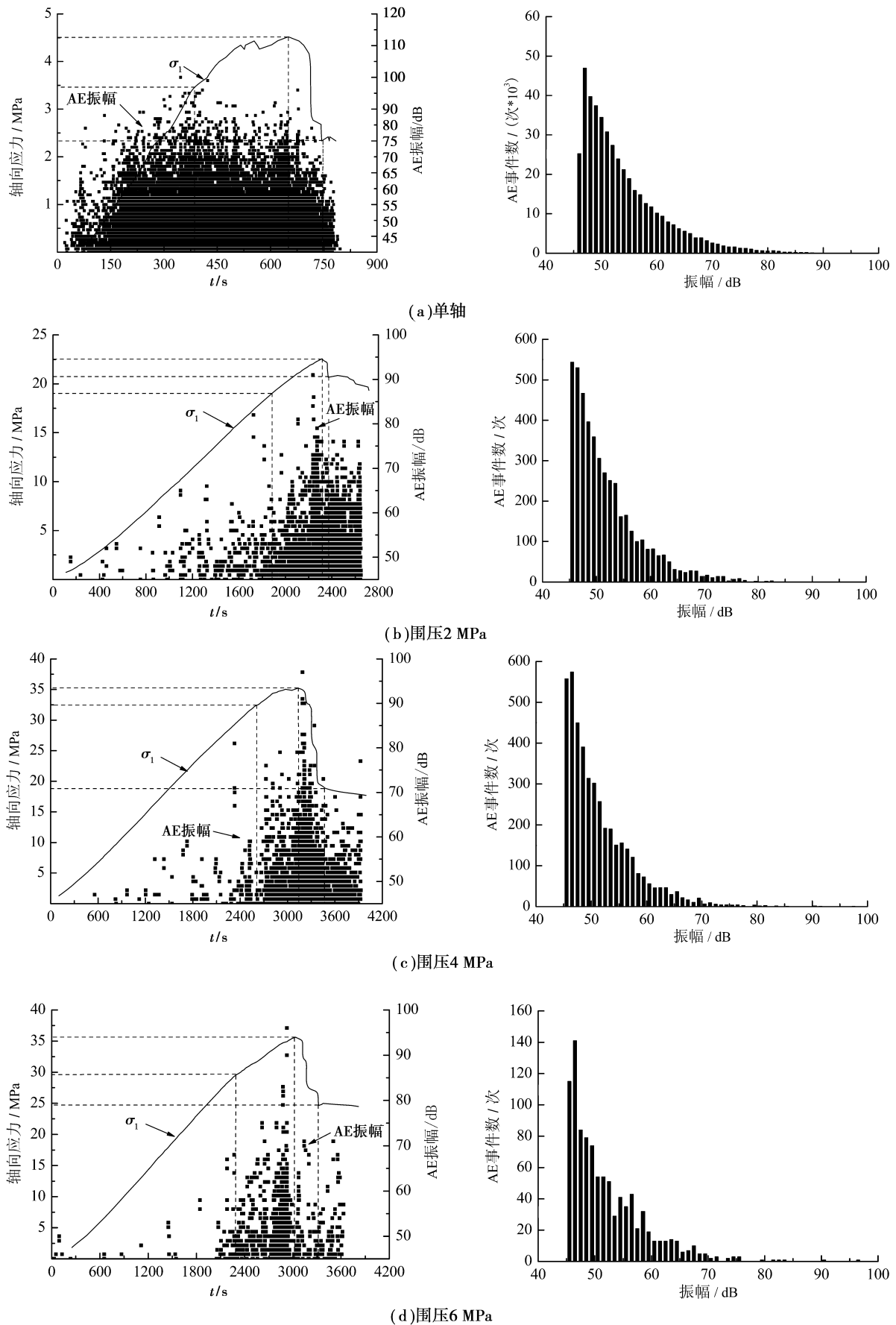
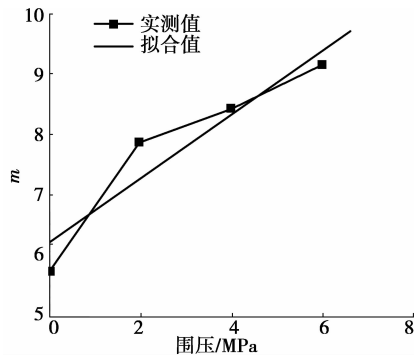
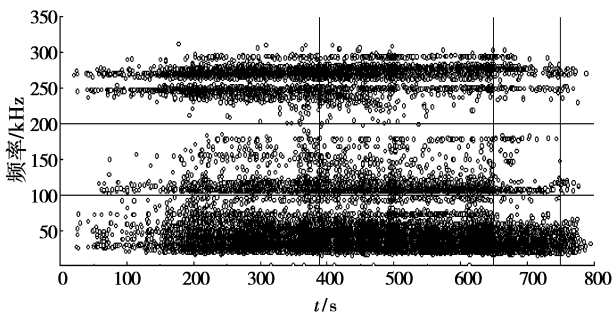
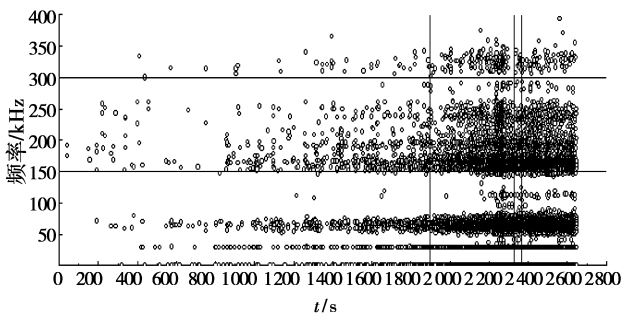


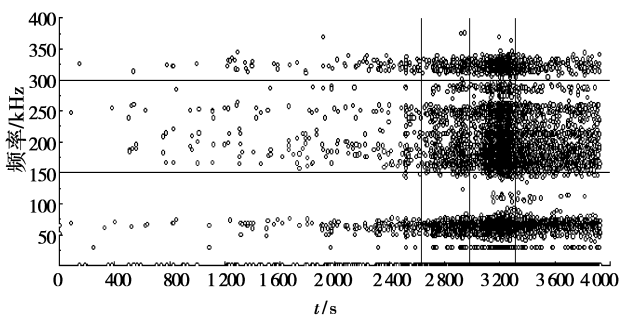
图 3 不同围压下的振幅分布

图 4 不同围压下的 m 值

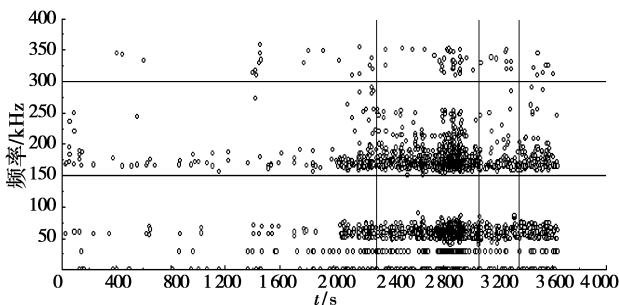
(a) 单轴



(b) 围压 2 MPa



(c) 围压 4 MPa



(b) 围压 6 MPa

图 5 不同围压下的频率分布

4 结 论

利用 MTS815 岩石力学试验系统对煤岩试样进行常规单轴和围压下的三轴试验,研究试样破坏过程中的声发射特征,得出以下几点初步结论:

1) 常规单轴压缩和围压作用下试样的 AE 特征均具有明显的趋势性。不同之处在于:围压的作用下,弹性阶段的声发射信号显著减少,并且随着围压的增加,这一阶段的声发射信号也有相对减少的趋势;弹塑性阶段无明显 AE 相对平静期现象;两者破坏后宏观裂纹形态也有差别。

2) AE 振幅的总体分布在 $[45, 100]$ dB 之间,随着振幅的增加,声发射事件数呈递减的趋势。反映累积幅度分布的 m 值随着围压的增加而增大。围压作用下,随时间分布的 AE 振幅及其包络线可以较好地反映应力的变化趋势。

3) 不同受力条件下,试样的 AE 频率成分有显著差异。单轴加载时主频范围以 $[20, 75]$ kHz 之间相对较低的低频声发射事件为主,围压作用下,声发射事件主频范围增加,大多分布在 $[150, 300]$ kHz 之间。破坏前,AE 主频率成分所占比例显著增加。

4) 试样破坏过程中的 AE 参数变化各有差异,选取单一的 AE 特征参数不能反映试件内部的真实损伤情况。实际应用中,需要对 AE 信号进行综合对比分析。

参考文献:

- [1] 刘特洪,林天健. 软岩工程设计理论与施工实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [2] 何学秋,王恩元,聂百胜,等. 煤岩流变电磁动力学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [3] SHKURATNIK V L, FILIMONOV Y L, KUCHURIN S V. Experimental investigations into acoustic emission in coal samples under uniaxial loading[J]. Journal of Mining Science, 2004, 40(5): 458-464.
- [4] MASAHIRO S, HIDEKAZU S, MASARU S, et al. Hypocenter distributions of AE in coal under uniaxial compression [J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1988, 1201 (104): 163-168.
- [5] SHKURATNIK V L, KUCHURIN S V, FILIMONOV Y L. Regularities of acoustic emission and thermoemission memory effect in coal specimens under varying thermal conditions [J]. Journal of Mining Science, 2007, 43(4): 394-403.

- [6] KUCHURIN S V, SHKURATNIK V L, VINNIKOV V A. Regularities of influence of disturbances on thermal emission memory in coal specimens [J]. *Journal of Mining Science*, 2008, 44(2): 131-137.
- [7] MEHIC M, RANJITH P G, CHOI S K, et al. The geomechanical behavior of Australian black coal under the effects of CO₂ injection; Uniaxial testing [C] // *Proceedings of the GeoShanghai Conference*, June 6-8, 2006, Shanghai, China. [S. 1]: American Society of Civil Engineers, 2006: 290-297.
- [8] 窦林名, 何学秋. 煤岩冲击破坏模型及声电前兆判据研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(5): 504-508.
DOU LIN-MING, HE XUE-QIU. Model for rock burst failure and its critical values of acoustic and electromagnetic emission [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2004, 33(5): 504-508.
- [9] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤体破裂声发射的频谱特征研究[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(3): 289-292.
WANG EN-YUAN, HE XUE-QIU, LIU ZHEN-TANG, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2004, 29(3): 289-292.
- [10] 肖红飞, 何学秋, 王恩元. 受压煤岩破裂过程电磁辐射与能量转化规律研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(7): 1097-1110.
XIAO HONG-FEI, HE XUE-QIU, WANG EN-YUAN. Research on transition law between EME and energy during deformation and fracture of coal or rock under compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1097-1110.
- [11] 杨永杰, 陈绍杰, 韩国栋. 煤样压缩破坏过程的声发射试验[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(5): 362-365.
YANG YONG-JIE, CHEN SHAO-JIE, HAN GUO-DONG. Experimental on acoustic emission during compression rupture procedure of coal sample [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2006, 31(5): 362-365.
- [12] 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): 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(Supp1): 2794-2799.
- [13] 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): 1264-1268.
CAO SHU-GANG, LIU YAN-BAO, ZHANG LI-QIANG, et al. Experimental investigations on acoustic emission of outburst-hazardous coal under uniaxial compression and creep [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(12): 1264-1268.
- [14] 刘保县, 赵宝云, 姜永东. 单轴压缩煤岩变形损伤及声发射特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(4): 647-650.
LIU BAO-XIAN, ZHAO BAO-YUN, JIANG YONG-DONG. Study of deformation-damage and acoustic emission character of coal rock under Uniaxial Compression [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(4): 647-650.
- [15] 徐涛, 杨天鸿, 唐春安, 等. 孔隙压力作用下煤岩破裂及声发射特性的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2004, 25(10): 1560-1574.
XU TAO, YANG TIAN-HONG, TANG CHUN-AN, et al. Numerical simulation of failure and induced acoustic emission characteristics of coal/rock under pore pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(10): 1560-1564.
- [16] SHKURATNIK V L, FILIMONOV Y L, KUCHURIN S V. Regularities of acoustic emission in coal samples under triaxial compression [J]. *Journal of Mining Science*, 2005, 41(1): 44-52.
- [17] SHKURATNIK V L, FILIMONOV Y L, KUCHURIN S V. Acoustic-emissive memory effect in coal samples under triaxial axial-symmetric compression[J]. *Journal of Mining Science*, 2006, 42(3): 203-209
- [18] 中华人民共和国煤炭工业部. 煤与岩石物理力学性质测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [19] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [20] 勝山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.

(编辑 赵 静)