

文章编号:0253-9993(2007)12-1264-05

突出煤体单轴压缩和蠕变状态下的声发射对比试验

曹树刚, 刘延保, 张立强, 姜永东

(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: 采用 MTS815 液压伺服岩石试验系统和 DISP-2 声发射监测系统, 对突出煤体和砂岩进行单轴压缩全应力-应变和分级加载蠕变状态下的声发射试验。研究表明, 由于试样初始损伤程度的差异, 单轴压缩作用下煤样的声发射现象贯穿整个试验过程, 而砂岩在弹性阶段声发射信号较少。分级加载蠕变试验过程中, 前3级应力水平处于典型的第1, 2蠕变阶段, 期间声发射振铃事件比快速递减, 其均值和递减时间随应力水平升高而增加。声发射累计振铃数变化曲线能较好地体现原煤试样蠕变特性的变化趋势。第4级荷载水平时, 前期声发射曲线基本保持稳定, 但数值明显高于前3个应力水平。在破坏前的极短时间内, 声发射曲线急剧上升, 预示试样即将完全破坏。

关键词: 突出煤体; 单轴压缩; 蠕变; 应力状态; 声发射

中图分类号: TU459.3 **文献标识码:** A

Experimental on acoustic emission of outburst-hazardous coal under uniaxial compression and creep

CAO Shu-gang, LIU Yan-bao, ZHANG Li-qiang, JIANG Yong-dong

(The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resource & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Acoustic emission (AE) tests were carried out with outburst-hazardous coal and sandstone under uniaxial compression and creep by MTS 815 servo-controlled rock mechanical test system and DISP-2 based AE system. The results show that the AE detected from coal and sandstone samples is dissimilar. The AE of coal samples can be detected through the whole process of test because of the difference of damage-dependent initially of the samples, but the AE signals of sandstone in elastic phase are few. In uniaxial multi-step loading creep test of coal, the attitude of the time-stress of samples under the stage of first three-levels is similar to primary and secondary stages of the typical creep-curve, the AE ringdown-event's ratio decreased sharply in lower levels. Both the average value of AE ringdown-event's ratio and the duration of time increase with the raising of stress level. In spite of the difference of experimental procedures, the characters of the creep-deformation and AE cumulative counts in coal are almost similar. The AE curve maintains changing stably and the value of AE ringdown-event's ratio is higher than those of the other stress levels until the failure of the sample under stress forth-level. Moreover, AE cumulative counts rapidly increase only when the strain increased sharply in a short time.

Key words: outburst-hazardous coal; uniaxial compression; creep; stress state; acoustic emission

煤岩作为一种内部存在大量裂隙等原始损伤的岩体, 在受力过程中其声发射 (Acoustic Emission,

收稿日期: 2007-01-30 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50674111); 重庆大学 2005 年大学生创新基金资助项目

作者简介: 曹树刚 (1955-), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师. Tel: 023-65111706, E-mail: caosgdgc@yahoo.com.cn

AE) 现象十分显著. 在煤岩动力灾害预测研究中, 已将声发射作为一种新的探测途径^[1~6]. 国内外许多学者在这方面做了大量的研究工作^[7~16]. 但由于目前在采深条件下易于突出的煤层强度很低, 层理紊乱, 原煤试样制作难度很大, 对具突出危险煤受力过程中的声发射特征的研究主要通过成型煤样试验或数值模拟的方法来实现, 且试验内容比较单一, 限制了研究成果在现场的推广应用. 本文将对具突出危险的原始煤样单轴受压下的全应力-应变、蠕变破坏过程中的声发射特征进行研究, 以及与相同试验条件下砂岩声发射试验规律的比较, 探索具突出危险煤样的破坏机理、力学表现与声发射特征参数之间的关系, 为声发射技术预测矿山煤岩动力灾害的工程应用提供基础性研究成果.

1 实验方法及过程

1.1 试验装置

采用美国生产的 MTS815 型液压伺服岩石力学试验系统. 该设备最大轴向载荷 2.8 MN, 根据实验内容需要可采用荷载、位移、轴向应变等多种加载控制方式. 声发射装置采用美国物理声学公司生产的 DISP 系列 PCI-2 全数字化声发射监测系统 (图 1).

1.2 实验内容及过程

实验煤样取自重庆市某矿区二叠系上统龙潭组 7 号煤层回采工作面. 该煤层具有瓦斯突出危险, 属海陆过渡沉积相. 取样煤层厚 1.1 m, 埋深 430 m. 煤样的煤质分析见表 1^[17]. 采用刻槽法在现场刻取较大的块状煤体, 蜡封后运回实验室加工成 $\phi 55 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 试件. 砂岩样取自重庆某一建筑工地, 试件加工尺寸与原煤试样相同. 试验煤样处于天然含水状态, 含水率为 1.373%, 平均容重 14.773 kN/m^3 .



图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental equipments

表 1 煤样分析结果

Table 1 The analysis results of coal sample

煤样	M_{sd}	A_d	V_{daj}	$w(S_{11d})$	$Q_{\text{qt, dsf}}$	密度		元素分析(daf)/%					R_{max}	H_v	抗碎	煤类
						(TRD)d	ARD	$w(\text{C})$	$w(\text{H})$	$w(\text{N})$	$w(\text{S})$	$w(\text{O})$				
浮沉	/%	/%	/%	/%	/MJ · kg ⁻¹								/%	/kg · mm ⁻²	强度	
-1.45	0.76	9.89	9.14	1.84	35.40	1.46	1.36	90.45	4.16	1.57	2.05	1.77	1.968	32.2	69.72	WY3

单轴压缩试验采用位移控制方式加载, 煤样加载速率为 0.02 mm/min, 砂岩加载速率为 0.1 mm/min, 岩石试验机和声发射装置的采样间隔均为 50 μs . 蠕变试验采用 4 级等速加载方式, 每级载荷在 3 min 内递增 2 kN, 岩石试验机的采样频率间隔为 1 min, 声发射装置的采样间隔保持不变.

为减小端面效应的影响, 试样两端面均涂固体硬脂酸. 在煤样侧面磨 2 个边长为 8 mm×8 mm 的对称平面, 安装声发射传感器. 传感器与煤样之间用黄油进行耦合, 并用胶带固定. 为尽可能减少外界噪音的干扰, 设定声发射采样阈值为 45 ~ 500 kHz. 单轴压缩试验时间相对较短, 室内温度保持在 (18.5 ± 1.5) °C, 相对湿度 (80±2)%.

2 实验结果及分析

2.1 单轴压缩条件下突出煤体的声发射特征

煤体是一类含有原始损伤缺陷的非连续介质体. 微观结构分析表明, 煤体内部存在大量的微孔隙、微裂隙、颗粒胶结面以及节理、层理和夹层等软弱结构面. 为了表征突出煤体固有的损伤力学特性及其在受力状态下的声发射特征, 选取比较均质、各向同性的砂岩做类似条件下的声发射特征对比试验.

在声发射监测中, 超过阈值并使某一通道获取数据的任何信号称之为一个撞击. 一个或几个撞击对应

一个声发射事件. 图 2 为突出煤体和砂岩典型试件单轴压缩过程中 AE 撞击数、轴向应力、能量与时间的关系. 取时间为参考系, 根据声发射特征曲线变化规律, 把煤样的破坏过程分为初始加载阶段 (OA)、弹性阶段 (AB)、弹塑性阶段 (BC)、峰后破坏阶段 (CD) 和残余破坏阶段 (DE). 同样, 将砂岩的破坏过程分为 4 个阶段 ($O'A'$, $A'B'$, $B'C'$, $C'D'$). 由于砂岩最后发生瞬间崩裂破坏, 因此, 没有残余应力阶段.

砂岩在初始加载阶段 ($O'A'$) 的前期出现少量的 AE 活动, 随着载荷的增加, AE 活动逐渐减弱, 试样中原有张性结构面或微裂隙逐渐闭合, 试样被压密. 该阶段煤样的声发射特征与砂岩试样相似, 声发射撞击数较少, 仅有零星的几个计数, AE 能量呈现增长趋势 (图 2 (c)), 反映了试样中裂隙闭合的影响. 继续加载, 砂岩进入弹性变形阶段 ($A'B'$), 其前期为试样压密后的弹性变形, 声发射十分不活跃, 只采集到极少数的 AE 撞击, 从 AE 能量变化曲线上可以更清楚地认识这一点 (图 2 (d)); 后期, 微裂隙稳定发展, 声发射活动逐渐活跃, AE 信号增多, 能量与前一阶段相持平. 由于煤体内部存在的大量微孔隙、微裂隙、颗粒胶结面, 以及节理、层理和夹层等软弱结构面, 煤样在这一阶段 (AB) 的声发射表现与砂岩有很大不同, 在超过峰值应力的 15% 以后, 应力进入一个近似线性的变化过程, AE 撞击数增高, 并出现了两处突增, AE 能量与 AE 撞击数曲线的变化相对应 (图 2 (b)).

砂岩在弹塑性阶段 ($B'C'$) 主要是裂纹的非稳定扩展直至破坏. 临近破坏时, AE 活动急剧增加, AE 撞击数和能量都达到最大值, 声发射的产生是由于裂隙不断扩展形成滑移面. 应力达到峰值强度, 岩样并未发生宏观破坏, 进入峰后破坏阶段, AE 撞击数和能量急剧增大. 在经历极短的时间后, 岩样发生瞬间崩裂破坏, 破坏形态几乎呈“x”型, 此时 AE 撞击数和能量均呈迅速下降趋势至试样完全破坏. 煤体在应力达到其峰值强度的 86% ~ 90% 之后, 表现出弹塑性特点, AE 撞击数达到最高值, 在 AE 曲线达到峰值后的短时间内, 煤样达到临界破坏应力, 发生破坏; 超过峰值应力后, 随着位移的增加, 煤的强度迅速降低, 即煤样的峰后破坏阶段 (CD), 而 AE 曲线处于较低水平, 变化相对平缓; 在应力下降到某一临界值后进入残余破坏阶段 (DE), 该值可确定为煤体的残余应力. 本次试验得到的煤样最终残余应力是峰值强度的 17% 左右. 对比砂岩破坏后形态, 发现煤样破坏以脆性破坏为主, 属于黏塑性破坏. 宏观裂纹平行于压力作用方向. 微缺陷交界附近结构的不均匀性造成应力局部集中, 产生明显的微裂隙损伤, 且损伤延伸近似于煤受压方向, 具有明显的方向性.

2.2 蠕变状态下突出煤体的声发射特征

矿山煤岩受力变形都在一定的时间和空间中进行, 其力学参数必然表现为时间和空间的函数. 在某些条件下, 时间因素对煤岩材料受力变形影响很小, 可以忽略. 但在研究相对较软或具有突出危险煤岩体力学行为时, 则必须考虑时间因素对其力学性能变化的影响. 在地应力作用下, 有突出倾向的煤体往往处于

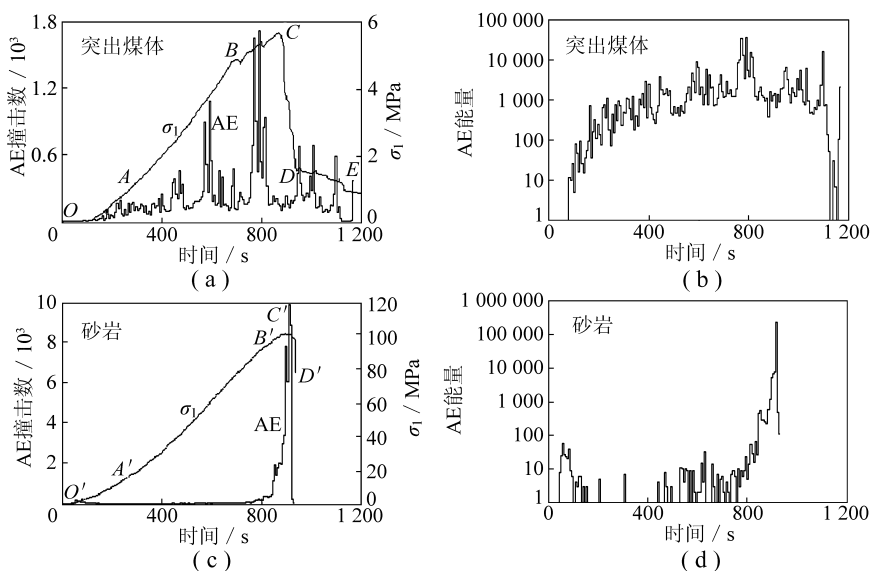


图 2 突出煤体与砂岩单轴压缩状态下的时间-AE 撞击数-轴向应力曲线和时间-AE 能量关系曲线

Fig. 2 Relation curves of time-hits-axial stress, time-energy of outburst-hazardous coal and sandstone under uniaxial compression

蠕变状态,条件具备时发生煤与瓦斯突出。因此,认识突出煤体蠕变状态下的声发射特征,对探讨煤与瓦斯突出机理,进行有效的预测预防是非常重要的。

单个声发射事件的振铃数称为振铃事件比(Ringdown-event's Ratio),其能全面反映声发射特征,对材料的变形与断裂更为敏感^[18]。因此,选取 AE 振铃事件比作为特征参数,研究不同应力水平的蠕变声发射特性。不同应力水平下,煤岩的蠕变特性、声发射特征均有差异。依据单轴压缩试验获得的强度值确定蠕变试验的4个加载等级。前3级加载后煤样处于典型的第1,2蠕变阶段,其加载路径和声发射特征如图3所示。

如图3(a)所示,加载之初便有声发射现象,每一级载荷的加载过程对应一个声发射密集区,而声发射频率和能量随着加载水平的提高而增大。载荷恒定以后,声发射活动并未停止,各应力水平下 AE 振铃事件比都呈快速递减趋势,直至一个较低值,但不同应力水平的声发射递减过程存在差异。随着载荷水平的升高,

AE 振铃事件比均值呈递增的趋势。对试样的体应变取绝对值,则有 $\varepsilon_v = |\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2|$, 其中, ε_1 为试样的轴向应变; ε_2 为试样的径向应变。第1级加载的应变总量明显小于后两级,这是由于突出煤体比较松软,在低应力水平下裂隙受力闭合, ε_2 变化幅度很小, ε_v 主要表现为 ε_1 的减小。后两级加载时,煤样已经出现了明显的细观裂纹, ε_2 变化幅度较大,造成 ε_v 的快速增加。从图3(b)可看出, AE 累计振铃数曲线能够与蠕变曲线较好地吻合,能够很好地体现蠕变的变化趋势。

当应力水平到8 kN时,煤样短时间内(5 min)发生破坏,试验终止,如图3(c),(d)所示。该应力水平下 AE 振铃事件比曲线、AE 累计振铃数曲线明显和前面3个相对较低应力水平试验曲线不同, AE 振铃事件比基本保持稳定,但数值上明显大于前3个阶段。AE 累计振铃数曲线同期出现较大增幅,其后表现出加速蠕变趋势。无论是 AE 振铃事件比曲线还是 AE 累计振铃数曲线都预示试件有完全破坏的征兆。

3 结 论

(1) 由于突出煤体内部存在大量的微孔隙、微裂隙、颗粒胶结面以及节理、层理和夹层等软弱结构面,加载过程中原始裂纹闭合和新裂纹形成扩展都会有声发射信号产生。相对于单轴压缩试验5个明显的应力应变阶段(初始加载、弹性、弹塑性、峰后破坏和残余塑性阶段),声发射特征阶段性变化也比较明显。加载之初,声发射撞击数较少, AE 能量呈现增长趋势;应力进入一个近似线性的变化过程, AE 撞击数增高,并出现了两处突增, AE 能量变化与 AE 撞击数曲线的变化相似;煤体应力达到峰值强度的86%~90%之后, AE 撞击数达到最高值;煤样的峰后破坏阶段, AE 曲线处于较低水平,变化相对平缓,即进入残余破坏阶段。

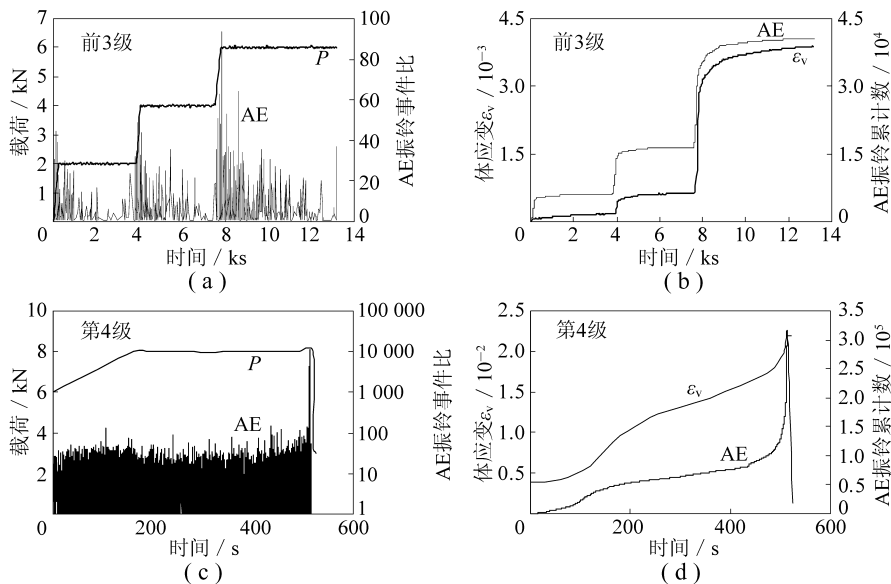


图3 突出煤体4级应力水平蠕变状态下的时间-载荷-AE振铃事件比和时间-体应变、AE累计振铃数关系曲线

Fig. 3 Relation curves of time-stress-ringdown-event's ratio, time- ε_v -cumulative counts of outburst-hazardous coal under four levels of the stress

(2) 突出煤体受力过程中声发射特征与砂岩等均质的岩石材料有很大区别。对比典型砂岩和煤样的破坏形态,发现煤样破坏属典型黏塑性破坏,宏观裂纹平行于压力作用方向。裂纹交界面附近结构的不均匀性造成应力局部集中,产生明显的微裂隙损伤,且损伤延伸近似于煤受压方向,具有明显的方向性。

(3) 分级加载蠕变试验结果表明,前 3 级应力水平煤样处于衰减蠕变过程,AE 振铃事件比呈快速递减趋势,至较低水平后趋于稳定。递减趋势在不同应力水平下也存在差异,高应力水平下声发射频率、能量明显高于低应力水平,AE 振铃事件比呈递增的趋势。破坏阶段 AE 振铃事件比曲线和 AE 累计振铃数曲线明显和前面 3 个相对较低应力水平试验曲线不同,AE 振铃事件比基本保持稳定,但 AE 累计振铃数同期增幅比前 3 阶段大,并且在试件即将破坏前,出现急剧上升趋势。

(4) AE 累计振铃数曲线与突出煤样蠕变状态下体应变曲线相似。因此,无论是 AE 振铃事件比还是 AE 累计振铃数都能很好的反映煤岩变形破坏规律。对不同地区、不同煤层受力变形过程中 AE 振铃事件比和 AE 累计振铃数的全面、深入的研究,有助于矿山煤岩动力灾害的预测预报。

参考文献:

- [1] Itakura K, Nakajima I, Watanabe Y. AE activity in cross-measure drivages against outburst-prone coal seams-study on AE activity prior to gas outburst (1st report)[J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1988, 104 (1 206): 495 ~ 503.
- [2] Nakajima I, Itakura K, Deguchi G. AE activity in entry drilage against outburst-prone coal seam; Study on AE activity prior to gas outburst (2nd report) [J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1988, 104 (1 210): 877 ~ 882.
- [3] 吴自立. AE 信号参数预测预报煤(岩)与瓦斯突出危险性的进展及展望 [J]. 矿业安全与环保, 2005, 32 (1): 27 ~ 29.
- [4] 石显鑫,蔡栓荣,冯 宏,等. 利用声发射技术预测预报煤与瓦斯突出[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(3): 60 ~ 65.
- [5] 郭德勇,韩德馨. 煤与瓦斯突出黏滑机理研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (6): 598 ~ 602.
- [6] 陆菜平,窦林名. 隧道围岩的损伤与声电监测 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (1): 41 ~ 44.
- [7] Zagorskii L N, Shkuratnik V L, Pustovoitova N A. Increase information content of the resonance acoustic method for determination of the rock mass properties [J]. Journal of Mining Science, 2004, 40 (4): 350 ~ 354.
- [8] 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.
- [9] 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, 104 (1 201): 163 ~ 168.
- [10] Satoshi F, Watanabe, Yoshiteru. Relation between bit diameter and AE activities during boring in coal seam; Study on acoustic activity due to advance boring in coal seam [J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1988, 104 (1 210): 871 ~ 875.
- [11] 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.
- [12] 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): 1 097 ~ 1 110.
- [13] 王恩元,何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究 [J]. 地球物理学报, 2000, 43 (1): 131 ~ 137.
- [14] 王恩元,何学秋,刘贞堂. 煤岩破裂声发射实验研究及 R/S 统计分析 [J]. 煤炭学报, 1999, 24 (3): 270 ~ 273.
- [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): 1 560 ~ 1 574.
- [16] 邹银辉. 煤岩声发射机理初探 [J]. 矿业安全与环保, 2004, 31 (1): 31 ~ 34.
- [17] 陈 鹏. 中国煤炭性质、分类和利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [18] 王祖荫. 声发射技术基础 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1990.