

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.016

含瓦斯突出煤声发射特性及其围压效应分析

赵洪宝^{1,2}, 尹光志³, 李华华¹, 王中伟¹

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 3. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘要:以突出煤制备的型煤试件为研究对象,利用自行研制开发的装置配合岛津伺服试验机及 PC-I 型声发射监测系统,对含瓦斯突出煤三轴压缩过程中的声发射特性及其围压效应进行试验,并对 AE 事件各参数规律进行了分析。结果表明:三轴压缩过程中,含瓦斯突出煤 AE 事件没有特别稠密或稀疏的事件区域出现,仅在压密阶段、线弹性阶段中间点附近、临近峰值阶段 3 处出现相对稠密区而呈“三峰”分布特点,但多数 AE 事件振幅较小,且 AE 事件能量变化与振幅变化趋势具有较好的一致性;外加应力场变化导致微结构变化、煤样内颗粒断裂、煤样内颗粒碎裂、煤样内颗粒相对错动和瓦斯气体逸散导致的微结构变化为 AE 事件的主要“源”;随着围压的增加,AE 事件数呈减小趋势,而围压对 AE 事件总数的影响呈非线性,可用二次曲线表示;随着围压的增加,AE 大振幅事件数呈减小趋势,大于某一设定值的 AE 事件数与围压的关系可用二次曲线表示。

关键词:含瓦斯突出煤;AE 特性;AE 参数;围压效应

中图分类号:

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)11-101-07

Analysis on AE characteristic and its confining pressure effect of outburst coal containing gas

ZHAO Hongbao¹, YIN Guangzhi³, LI Huahua¹, WANG Zhongwei¹

(1. College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Briquette samples made of outburst coal are taken as study objects to study AE characteristic and its confining pressure effect by using self-developed equipment, Shimazu servo test machine and AE monitor system, and the characteristic of AE parameters are analyzed, too. The results show that in the process of outburst coal containing gas triaxial compression, there is no serious dense or sparse area of AE events, but three relative dense appear in compression phase, middle area of linear elastic stage and near peaking phase area so that the characteristic of AE events look like three peaks. But the amplitude of AE events is small and the good consistency between energy change and amplitude change is showed. Microstructure change caused by external stress field change, fracture and fragmentation of particle of samples, movement besides particle of samples and microstructure change caused by dissipation of gas are

收稿日期:2013-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51004110);国家自然科学基金重点资助项目(50834005);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题资助项目(SKLCRSM13KFB11);中央高校基本科研业务费资助项目(2009QZ03)

作者简介:赵洪宝(1980-),男,博士,中国矿业大学(北京)副教授,主要从事岩石力学与瓦斯灾害防治方面的研究与教学工作,(E-mail)hongbaozhao@126.com。

the sources of AE events. The number of AE events is reduced as the confining pressure is increased, but the influence on total number of AE events caused by confining pressure show nonlinear, expressed by quadratic function. The number of larger amplitude of AE events show decreasing tendency as the confining pressure is increased, the relation between numbers of AE events whose amplitude is more than certain value and confining pressure is expressed by quadratic function.

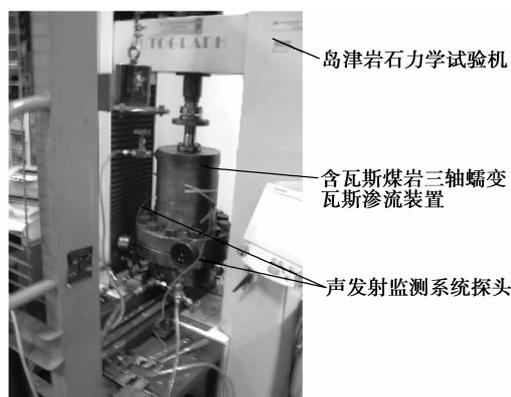
Key words: outburst coal containing gas; AE characteristic; AE parameters; confining pressure effect

煤体是处于一定的应力场中的。当外界条件发生变化后,其所处的应力场也将发生变化,这将会导致煤岩体的力学性质、内部结构发生变化。煤岩内含有瓦斯后,瓦斯将在煤岩体内的孔隙裂隙结构内形成孔隙压力作用,如其所处应力状态发生变化,则其内部结构变化将更加剧烈,甚至可能导致煤岩的失稳与破坏。而含瓦斯煤岩的失稳破坏又与煤与瓦斯突出、井下采掘空间的安全维护、煤与瓦斯共采的实现等工作密切相关,因此找到能够动态监测含瓦斯煤岩失稳破坏的测试手段,意义显得非常重要。

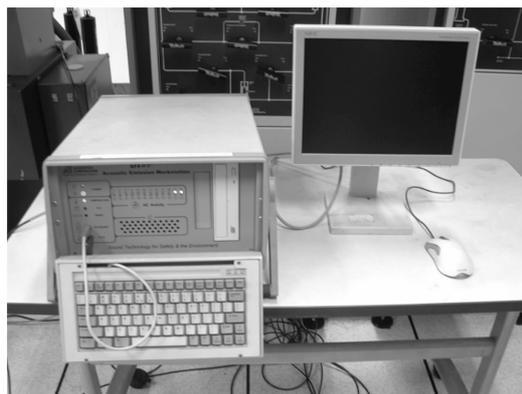
声发射(AE)是煤岩类材料受力时内部结构变化过程中释放出的弹性波,声发射监测技术是一种有效监测岩石类材料变形、失稳破坏过程的技术手段,自上世纪中期已经广泛应用于隧道、边坡和水电工程及矿山地压与安全监测中^[1-3]。如杨永杰等研究了基于离散小波分析的灰岩压缩破坏声发射预测^[4];黄跃明等基于数值软件 RFPA 进行了基于声发射的含瓦斯煤试件失稳破坏预测研究^[5];陈炳瑞等研究了岩石隧洞 TBM 施工过程中的声发射特性^[6];许江等研究了基于声发射的岩石疲劳损伤演化规律^[7]。通过对声发射监测结果的分析,建立岩石类材料的损伤模型方面的研究也开展较多。如林峰等研究了混凝土材料声发射参数与力学参数及其损伤程度的关系^[8];刘保县等研究了煤岩卸荷变形损伤及声发射特性^[9];来兴平等进行了不同加载模型下煤样损伤与变形声发射特征对比研究^[10];张明等研究了准脆性材料声发射的损伤模型并进行了统计分析^[11];纪洪广等进行了混凝土材料损伤的声发射动态监测试验研究^[12];Majewska 等进行了吸附解吸过程中煤体内部结构变化时声发射特性的试验研究^[13];Masahiro 等对单轴压缩情况下煤体内 AE 事件源进行了试验研究^[14];Satoshi 等对钻头钻进过程中,钻头直径与煤体内 AE 事件之间的关系进行了试验研究^[15],但对于含瓦斯突出煤的声发射特性及其围压效应的研究尚需进一步深入开展。因此,笔者以突出煤二次成型制备的型煤试件为研究对象,对含瓦斯突出煤试件的声发射特性及其围压效应进行了研究。

1 试验设备及方案

本文试验均在重庆大学西南资源开发及环境灾害控制教育部重点实验室进行。采用的设备为实验室自行研制开发的“含瓦斯煤岩三轴蠕变瓦斯渗流装置”配合岛津-250 型岩石力学试验系统和美国物理声学公司生产的 PC-I 型声发射监测系统。如图 1 所示。



(a)



(b)

图 1 含瓦斯煤力学特性及声发射监测试验系统

煤岩体为非均质体,其各向异性和试件个体差异性区别较大;突出煤多具有内部结构破碎、强度较低等典型特性,故以其为研究对象的试验研究多采用二次成型煤样。为了获得较准确的含瓦斯煤的声发射特性并建立损伤模型,实验前就必须对试验用

试件的均一性进行检测,剔除个体差异较大的试件。采用计算平均密度的办法进行试件均一性检测,即:首先精确测量试件的质量,然后再精确测量试件的外形尺寸,计算获得试件的平均密度,对差异性较大的试件进行剔除。根据国际岩石力学学会规定的试验试件要求数(3~5块)规定,共选择9块试件进行含瓦斯煤的声发射特性试验研究,试件物理特性如表1所示。试验时瓦斯压力控制为0.50 MPa、围压2.00、4.00、6.00 MPa,加载采用位移控制,速率0.02 mm/min;煤样饱和吸附瓦斯后进行试验研究。根据经验,声发射信号监测阈值设定为40 dB。

表 1 试验用样物理参数

编号	长度/ mm	直径/ mm	质量/g	平均密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	试验围压/ MPa
1#	100.2	50.0	238.60	1.213	2.00
2#	99.4	49.8	234.54	1.212	2.00
3#	101.0	49.7	237.56	1.213	2.00
4#	100.4	50.2	240.72	1.212	4.00
5#	98.8	49.5	230.13	1.211	4.00
6#	100.0	49.6	234.51	1.214	4.00
7#	101.0	50.0	239.87	1.210	6.00
8#	100.4	50.4	242.64	1.212	6.00
9#	99.8	49.6	233.79	1.213	6.00

2 含瓦斯煤岩声发射特性

根据设计的实验方案,进行含瓦斯煤的声发射特性试验研究,获得了典型的含瓦斯煤声发射特性与轴向应力的关系,如图2所示。

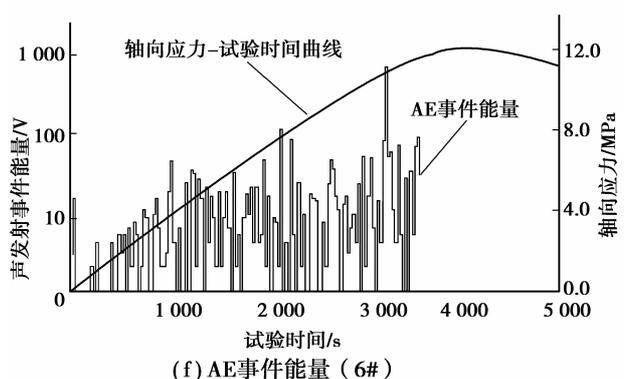
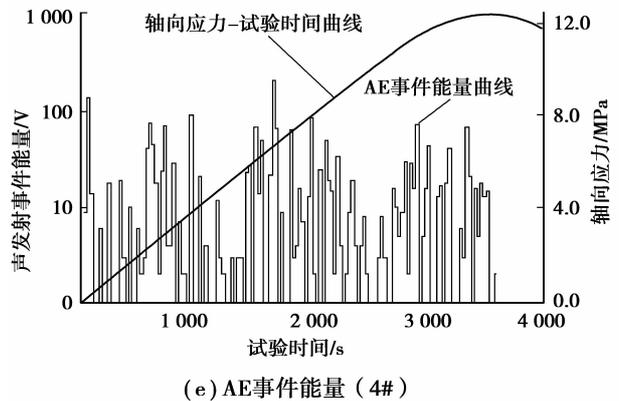
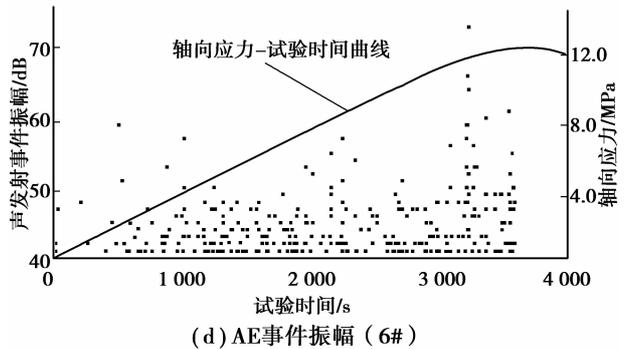
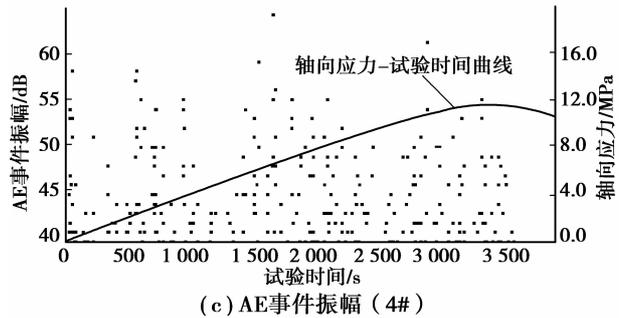
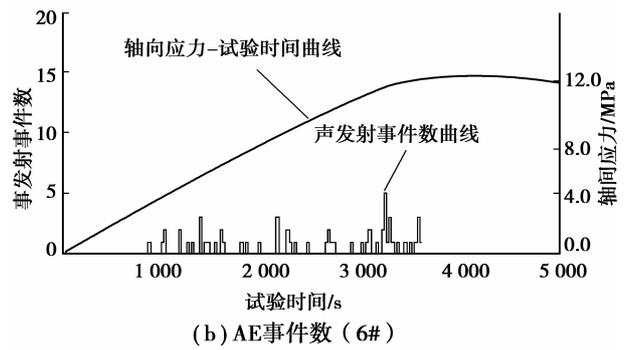
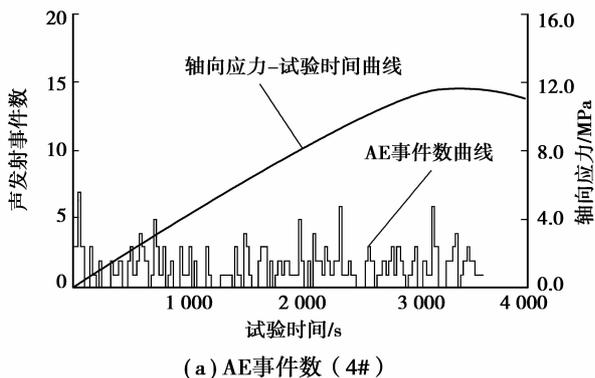


图 2 含瓦斯煤声发射特性曲线
(瓦斯压力 0.50 MPa、围压 4.00 MPa)

分析图2可知:

1) 含瓦斯型煤试件在三轴压缩试验过程中的AE事件出现频率相对均一,没有特别稠密或稀疏的声发射事件区域出现,这一点明显区别于岩石试件。这可能是试验采用的是二次成型的型煤试件,制作时未添加任何粘结剂,故其内颗粒仅靠相互摩擦力粘结而导致强度较小,故在三轴条件下煤样变形将相对较舒缓且整个过程中不存在急剧的变形阶段所致。

2) 含瓦斯型煤试件在三轴压缩试验过程中的AE事件振幅变化比较复杂,呈“三峰”特点,即在煤样压密阶段、线弹性阶段中间点附近、临近峰值阶段3处出现AE事件振幅值明显增大特性。这可能是在压密阶段中因煤样原生孔隙、裂隙被压密闭合导致煤样内部结构发生明显变化而产生较强AE事件;而在线弹性阶段中间点附近,煤样内原生孔隙开始向破坏发展并开始形成新的孔隙裂隙结构,导致煤样内原生孔隙内的瓦斯气体溢出,失去孔隙压力作用的孔隙将被压密并将促使正在形成的孔隙结构加速发展,致使较强AE事件产生;接近峰值强度时,煤样内部结构变化最剧烈,已经形成但尚未贯通的宏观结构将发生贯通,导致较强AE事件产生。

3) 含瓦斯型煤试件在三轴压缩试验过程中的AE事件能量变化也呈现“三峰”特点,但整个过程基本维持在一个相对稳定的水平,仅在个别区域出现较大变化;声发射事件的AE能量变化“三峰”出现区域与较大振幅出现区域具有较强的一致性。这可能是二次成型的型煤试件内煤粉颗粒仅靠摩擦力相互粘结而容易发生变形,变形过程中能量积聚不显著;而振幅能够在一定程度上反映声发射事件的能量大小,故在较大振幅事件相对密集出现的区域,事件能量也将较大。

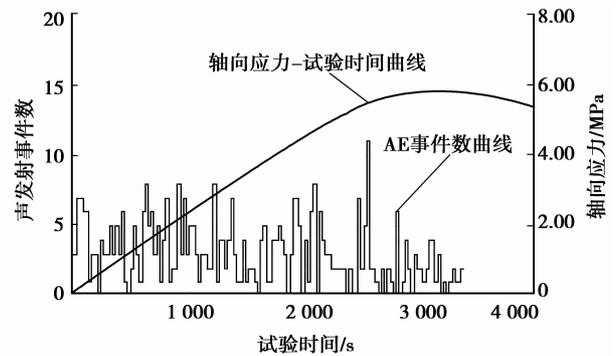
4) 尽管该批试件相对均一,但其力学特性及声发射特性也存在一定的差异。力学特性差异主要表现在强度、弹性模量、峰值变形量等方面;声发射特性差异主要表现在AE事件总数、最大振幅、大振幅事件数和事件能量方面。

5) 对含瓦斯煤声发射试验用后煤样的扫描电镜研究结果分析表明,含瓦斯煤声发射事件的“源”可能为:外加应力场变化导致微结构变化、煤样内颗粒断裂、煤样内颗粒碎裂、煤样内颗粒相对错动、瓦斯气体逸散导致的微结构变化。

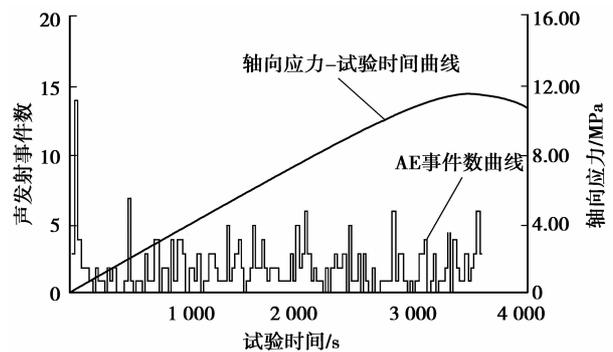
3 含瓦斯煤声发射特性的围压效应

煤样所处的围压环境,对于其变形特点和内部

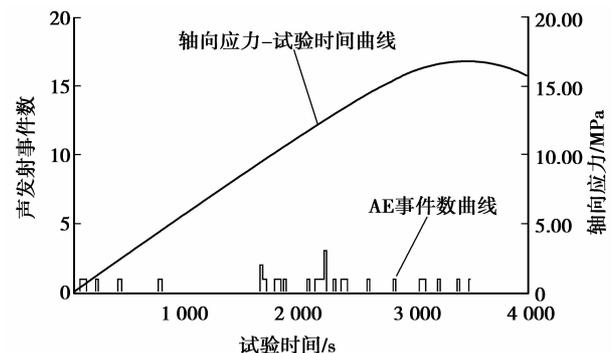
结构演化特点具有重要的影响。因此,为了研究含瓦斯煤声发射特性的围压效应,根据设计的实验方案,分别进行了围压2.00、4.00、6.00 MPa、瓦斯压力0.50 MPa条件下的含瓦斯煤的声发射试验研究,获得了不同围压下含瓦斯煤变形过程中的声发射特性曲线,如图3所示。



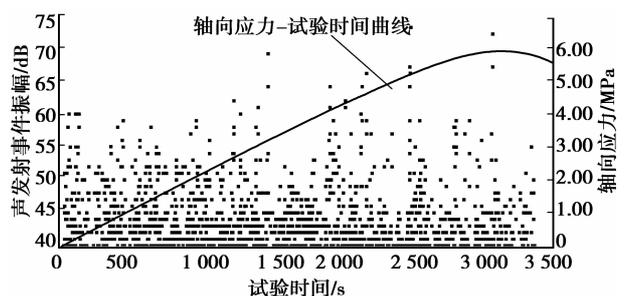
(a) AE事件数 (2.00MPa)



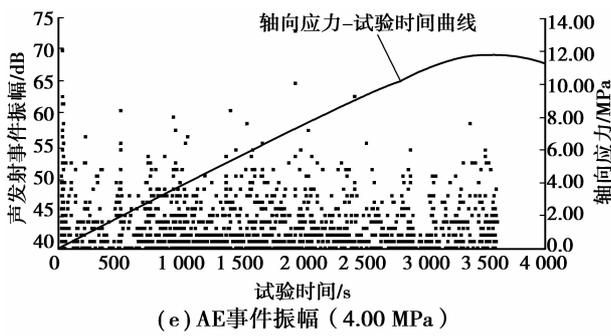
(b) AE事件数 (4.00 MPa)



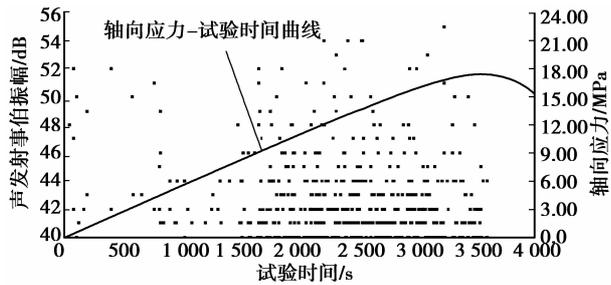
(c) AE事件数 (6.00 MPa)



(d) AE事件振幅 (2.00 MPa)



(e) AE事件振幅 (4.00 MPa)



(f) AE事件振幅 (4.00 MPa)

图 3 含瓦斯煤声发射围压效应

分析上图可知:

1) 不同围压作用下的含瓦斯煤样三轴压缩时, 每一变形步出现的声发射事件数均维持在一个较低水平, 平均为 10 个/步, 仅在煤样压密阶段、线弹性阶段中间点附近、临近峰值阶段 3 处出现大于 10 个/变形步区域。这可能是围压的存在使含瓦斯煤样在受载过程中发生变形的剧烈程度较小, 围压和瓦斯压力的存在均在一定程度上阻碍了煤样的剧烈变形, 仅在煤样上述 3 个阶段出现相对较剧烈变形所致。

2) 随着围压的增加, 煤样产生相同应变时出现的声发射事件数呈递减趋势, 且围压对含瓦斯煤样破坏过程中的声发射数影响呈非线性。这可能是围压增大时导致含瓦斯煤样在横向上的变形受到更大的约束, 导致发生剧烈变形和颗粒调整更加缓慢而使声发射事件数明显降低; 当围压增加相同幅度时, 含瓦斯煤样的横向变形受到的增加约束更大, 当发生少许的应变增量时产生的声发射事件数减小的幅度也不同所致。不同围压下含瓦斯煤三轴压缩产生的声发射事件总数与围压关系曲线如图 4 所示。

3) 不同围压作用下的含瓦斯煤样三轴压缩时, AE 事件小振幅事件较多, 约占总 AE 事件数的 80% 以上, 且贯穿试件整个破坏过程中。这可能是由于二次成型的型煤试件本身强度较小, 且在围压作用下发生局部脆性微结构破坏的可能较小, 又根据对含瓦斯煤声发射“源”的分析可知, 在整个煤样

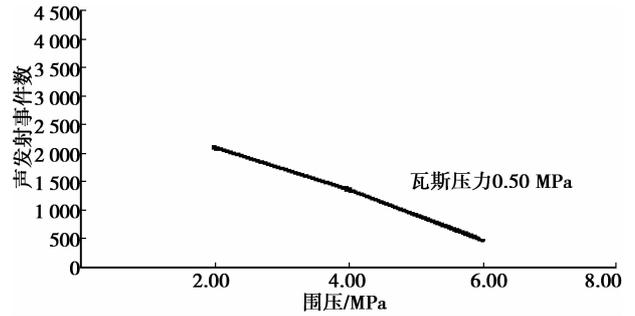


图 4 声发射事件总数与围压关系曲线

的变形过程中将均可能伴随着煤样内颗粒间位置的相互错动, 故而导致较小振幅声发射事件贯穿试件变形的整个过程。

4) 随着围压的增加, 大振幅 AE 事件呈现明显的减少趋势。AE 事件的振幅大多数小于 75 dB, 大于 55 dB 的声发射事件数较少。这可能是随着围压的增加, 产生相同纵向应变时受到的横向约束更大, 导致煤样内孔隙、裂隙闭合、颗粒开裂或断裂更加缓慢, 因而造成的剧烈变形较小所致; 而由于实验设备所限导致的 AE 事件传播过程发生的衰减也是其中原因之一。不同围压下含瓦斯煤样 AE 事件振幅大于 55 dB 的事件数与围压的关系如图 5 所示。

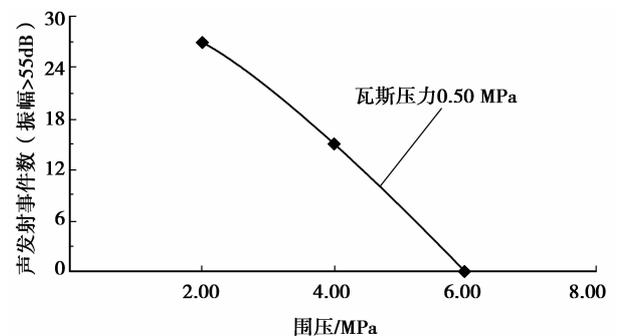


图 5 振幅大于 55 dB 的 AE 事件数

5) AE 事件的事件数与其振幅两个参数综合即可以反映出含瓦斯煤样变形过程释放出的弹性波的总能量大小。从实验结果看来, 随着围压的增加含瓦斯煤变形过程中释放出的弹性波总能量呈降低趋势, 但这只是由于实验手段限制而导致的一个假象。为了过滤外界噪声对 AE 事件监测的干扰, 设置了 AE 事件接收阈值 40 dB, 认为小于 40 dB 的信号均为噪声信号, 但通过实验研究可知, 含瓦斯煤的 AE 事件振幅普遍较低, 因而阈值设置为 40 dB 将在过滤掉绝大多数噪声干扰的情况下也过滤掉一部分小振幅的 AE 事件, 造成接收到的 AE 事件不能

完全反映含瓦斯煤变形过程释放的全部弹性波,也就导致通过实验所得的含瓦斯煤变形过程中 AE 事件能量变化不够准确。但其结果仍可以部分反映大振幅 AE 事件能量变化规律。

6) 含瓦斯煤三轴压缩过程中的 AE 事件总数、振幅大于 55 dB 的 AE 事件数与围压的关系可以用二次函数进行表征,即:

$$S = a\sigma_3^2 + b\sigma_3 + c, \quad (1)$$

$$\Delta S = \alpha\sigma_3^2 + \beta\sigma_3 + \gamma. \quad (2)$$

式中: S 为含瓦斯煤三轴压缩过程中的 AE 事件总数; ΔS 为含瓦斯煤三轴压缩过程中的振幅大于某一值的 AE 事件总数; a, b, c 为拟合系数,与煤样的围压、瓦斯压力有关; α, β, γ 为拟合系数,与煤样的围压、瓦斯压力和设定振幅大小有关。

根据试验结果,分别拟合可得上述各参数的值,如表 2 所示。

表 2 拟合参数值

参数名称	参数值
a	-52
b	27.5
c	2 170
α	1.9
β	-31.2
γ	124

4 结 论

1) 试验表明含瓦斯煤样在三轴压缩试验过程中的 AE 事件出现频率相对均一,没有特别稠密或者稀疏的声发射事件区域出现,仅在煤样压密阶段、线弹性阶段中间点附近、临近峰值阶段 3 处出现 AE 事件相对密集区域而呈“三峰”分布特点。

2) 含瓦斯煤样三轴压缩过程大于设定阈值范围的 AE 事件能量变化规律与事件振幅分布规律具有较好的一致性,即也呈“三峰”分布特点。而 AE 事件的“源”可能为:外加应力场变化导致微结构变化、煤样内颗粒断裂、煤样内颗粒碎裂、煤样内颗粒相对错动、瓦斯气体逸散导致的微结构变化。

3) 不同围压作用下的含瓦斯煤样三轴压缩时,每一变形步出现的声发射事件数维持在一个较低水平,且随着围压的增加煤样相同应变时产生的 AE 事件数呈递减趋势,围压对含瓦斯煤样破坏过程中的声发射数影响呈非线性。

4) 不同围压作用下的含瓦斯煤样三轴压缩时, AE 事件小振幅事件较多,约占总 AE 事件数的 80% 以上,且伴随试件整个破坏过程中;随着围压的增加,大振幅事件呈现明显的减少趋势。AE 事件总数、振幅大于 55 dB 的 AE 事件数与围压的关系可以用二次曲线进行表征。

5) 不同围压作用下的含瓦斯煤样三轴压缩时, AE 事件总能量变化比较复杂,有待进一步改进实验手段进行深入研究。

参考文献:

- [1] 文光才, 李建功, 邹银辉, 等. 矿井煤岩动力灾害声发射监测适用条件初探[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 278-282.
WEN Guangcai, LI Jiangong, ZOU Yin-hui, et al. Preliminary study on the application condition of acoustic emission monitoring dynamic disasters in coal and rock[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 278-282.
- [2] 袁振明. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [3] 胜山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [4] 杨永杰, 王德超, 陈绍杰, 等. 基于离散小波分析的灰岩压缩破坏声发射预测研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 213-217.
YANG Yongjie, WANG Dechao, CHEN Shaojie, et al. AE predicting study on compression and fracture of limestone sample based on discrete wavelet analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 213-217.
- [5] 黄跃明, 段东. 基于声发射的含瓦斯煤试件失稳破坏预测研究[J]. 山西煤炭, 2010, 30(1): 51-54.
HUANG Yueming, DUAN Dong. Prediction of instability and failure of gassy coal specimens based on acoustic emission[J]. Shanxi Coal, 2010, 30(1): 51-54.
- [6] 陈炳瑞, 冯夏庭, 肖亚勋, 等. 深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1562-1569.
CHEN Bingrui, FENG Xiating, XIAO Yaxun, et al. Acoustic emission test on damage evolution of surrounding rock in deep = buried tunnel during TBM excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1562-1569.
- [7] 许江, 李树春, 唐小军, 等. 基于声发射的岩石疲劳损伤演化[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 19-24.
XU Jiang, LI Shuchun, TANG Xiaojun, et al. Rock fatigue damage evolution based on acoustic emission[J].

- Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 19-24.
- [8] 林峰, 李庶林, 薛云亮. 混凝土材料声发射参数与力学参数及其损伤程度的关系[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2010, 49(4): 526-530.
LIN Feng, LI Shulin, XUE Yunliang. Relation between acoustic emission parameter and mechanics parameters damage degree of concrete material[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2010, 49(4): 526-530.
- [9] 刘保县, 李东凯, 赵宝云. 煤岩卸荷变形损伤及声发射特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 57-61.
LIU Baoxian, LI Dongkai, ZHAO Baoyun. Damage evolution and acoustic emission character of coal rock under unloading condition [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 57-61.
- [10] 来兴平, 吕兆海, 张勇, 等. 不同加载模式下煤样损伤与变形声发射特征对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Sup2): 3521-3527.
LAI Xingping, Lü Zhaohai, ZHANG Yong, et al. Comparative analysis of acoustics emission characteristics on damage and deformation of coal samples under different loading modes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup2): 3521-3527.
- [11] 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): 2493-2801.
ZHANG Ming, LI Zhongkui, YANG qiang, et al. A damage model and statistical analysis of acoustic for quasi-brittle materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2493-2801.
- [12] 纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 165-168.
JI Hongguang, ZHANG Tiansen, CAI Meifeng, et al. Experimental study on concrete damage by dynamic measurement of acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 165-168.
- [13] Majewska Z, Mortimer Z. Chaotic behaviour of acoustic emission induced in hard coal by gas sorption-desorption[J]. Acta Geophysica, 2006, 54(1): 50-59.
- [14] Masahiro S, Hidekazu S, Masaru S, et al. Hypocenter distributions of AE in coal under uniaxial compression[J]. Nihon Kogyokaishi, 1988, 104(3): 163-168.
- [15] Satoshi F, Watanabe Y. Relation between bit diameter and AE activities during boring in coal seam: Study on acoustic activity due to advance boring in coal seam[J]. Nihon Kogyokaishi, 2003, 119(8): 662-374.

(编辑 郑洁)