

# 含瓦斯煤破裂过程声发射时空演化规律

刘星光, 高峰, 张志镇, 邢燕, 李玺茹

中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室; 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏徐州 221116

**摘要** 利用 MTS815 岩石力学试验系统和气体渗透试验系统, 开展不同瓦斯压力下含瓦斯原煤煤样的 3 轴压缩声发射试验, 研究含瓦斯煤破裂过程中声发射时空演化规律。试验结果表明, 煤样内的声发射定位点随载荷增加逐渐密集且主要分布在主裂纹面附近; 随着载荷的增加, 单位载荷区间的声发射振铃数经历了初期的沉寂期、中期的低水平稳定期、峰值前的快速发展期和峰后的高水平稳定期, 与煤样累计声发射振铃数变化特征类似; 瓦斯压力增加增强了损伤前煤样的声发射活动, 减小了煤样的初始损伤应力, 促进了煤样的损伤发展。

**关键词** 含瓦斯煤; 声发射; 时空演化; 初始损伤

**中图分类号** TD315

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.005

## Temporospatial Evolution Rules of Acoustic Emission Caused by the Failure Process of Gas-saturated Coal

LIU Xingguang, GAO Feng, ZHANG Zhizheng, XING Yan, LI Xiru

State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering; School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China

**Abstract** To study the temporospatial evolution rules of Acoustic Emission (AE) caused by the failure process of gas-saturated coal, a series of triaxial compression AE tests were carried out by using MTS815 rock mechanics test system and gas seepage test system on raw coal samples with the different gas pressures. The experimental results indicate that the cumulative number of AE locating points gradually increases with load increasing, and the AE locating points mainly distribute in the vicinal area of main crack surface. With load increasing, the AE counts in unit load interval experience initial quiet period, low-level stabilization period in the medium-term, rapid development period before the peak, and high-level stabilization period in the post peak; it is similar to the variation of the cumulative AE counts of coal samples. The increase of gas pressure enhances the AE activity of coal samples before the initial damage, reduces the initial damage stress, and promotes the damage development of coal samples.

**Keywords** gas-saturated coal; acoustic emission; temporospatial evolution; initial damage

### 0 引言

煤岩破裂过程中的声发射信号反映了煤岩微观破坏活动, 与煤岩损伤演化密切相关。通过对含瓦斯煤声发射信号的分析, 可以推断含瓦斯煤内部微结构变化, 有助于揭示含瓦斯煤的损伤演化规律。

20 世纪 60 年代, Konstantinova<sup>[1]</sup>开展了煤样加载过程中声发射的研究, 但由于煤样含有大量原生缺陷, 声发射信号十分复杂, 再加上技术手段和试验设备的限制, 相对于其他岩石, 煤样破裂过程中声发射特性研究较少。Shkuratnik 等<sup>[2-4]</sup>研究了单轴压缩和常规 3 轴压缩下无烟煤煤样的声发射规

收稿日期: 2013-01-04; 修回日期: 2013-03-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201205; 2010CB226804); 《科技导报》博士生创新研究计划资助项目(kjdb2011010)

作者简介: 刘星光, 博士研究生, 研究方向为采动岩体力学和煤与瓦斯共采, 电子信箱: lxcumt@126.com; 高峰(通信作者), 教授, 研究方向为岩石断裂力学, 电子信箱: fgao@cumt.edu.cn

律,得到了声发射参数与煤样力学性质和应力状态的关系;曹树刚等<sup>[5,9]</sup>采用多种声发射参数综合分析了突出煤样单轴压缩下的声发射特性;刘保县等<sup>[7,8]</sup>研究了型煤煤样单轴压缩下声发射特征;来兴平等<sup>[9]</sup>研究了平行和垂直层理加载下大尺寸立方体煤样的声发射特征;苏承东等<sup>[10]</sup>研究了单轴、3轴和3轴卸围压条件下冲击倾向性煤样的声发射特性;刘向峰等<sup>[11]</sup>研究了单轴压缩下煤样的声发射能量特征;王恩元等<sup>[12]</sup>研究了单轴压缩下煤样声发射信号频谱特征;曹树刚等<sup>[13]</sup>研究了不同围压下煤样3轴压缩声发射振幅和频率特征。这些研究大都集中于煤样的声发射时域和频域特征,很少涉及声发射3维空间分布特征,而声发射事件的空间演化规律对于揭示煤样内裂纹扩展和损伤分布具有重要意义。左建平<sup>[14]</sup>研究了单轴压缩下单体岩样、单体煤样和煤岩组合体的声发射行为和空间分布规律,分析了3种试样的破坏机制;艾婷等<sup>[15]</sup>研究了3轴压缩下煤样的声发射时序参数、能量释放和空间分布规律,分析了围压对煤样声发射时空演化的影响。这些研究主要以普通煤样为对象,对于载荷作用下含瓦斯煤样的声发射特征研究较少。文光才等<sup>[16]</sup>进行了含瓦斯煤体中声发射应力波传播理论分析,得到了含瓦斯煤体中应力波的波动方程。赵洪宝等<sup>[17]</sup>开展了含瓦斯煤破坏过程中声发射特性试验研究,分析了3轴压缩下含瓦斯煤的声发射特性。但由于原煤煤样制作困难和试验设备限制,试验多采用型煤煤样,且主要集中在中低围压下煤样的声发射特性研究,对高围压下含瓦斯原煤煤样破裂过程的声发射特性研究较少。

煤炭是中国的主体能源,随着经济的发展,煤炭资源逐渐向深部化转变。深部煤炭资源所具有的高地应力、高瓦斯和低渗透率等特点严重影响了煤炭安全开采,制约了经济发展。因此,开展含瓦斯煤岩体在复杂应力下特别是较高围压和高瓦斯压力下的声发射特性研究,对揭示不同应力环境下深部高瓦斯煤岩体微破裂事件的时空分布特征、保障深部高瓦斯煤层安全开采具有重要意义。本文利用具有3维声发射定位功能的MTS815岩石力学试验系统,开展不同瓦斯压力下含瓦斯原煤煤样3轴压缩声发射定位试验,得到了声发射空间分布规律,分析了含瓦斯煤破裂过程中声发射时空演化规律,探讨了瓦斯压力对声发射特征的影响。

## 1 试验方法

试验煤样全部取自平煤八矿己15煤层14120工作面,在井下工作面煤壁处选取完整性较好、未风化的代表性煤块。煤块尺寸要求长、宽大于250mm,高大于200mm。煤块升井后用塑料膜包裹,锯末隔离装箱,运输至实验室加工成标准原煤煤样。本次共采集到符合标准的块煤5块,成功制备标准原煤煤样10块,成功率不到20%。煤样制备过程中降低机器转速、减少机器晃动能够有效提高制样成功率和减少机械扰动对原煤力学性质的影响。试验设备采用四川大学MTS815 Flex Test GT岩石力学试验系统和气体渗透试验系

统,声发射定位测试采用美国PAC公司PCI-2声发射试验系统。试验气体采用99.9%甲烷气体,试验围压10MPa,气体压力 $p$ 分别为1,2,3,5MPa。通过波速测试,选取波速相近的4个原煤煤样进行试验,每个试验水平进行1组试验。声发射阈值值设为30dB,8个声发射传感器对称分布在压力室外壁。煤样装配后,按3MPa/min施加3向静水压力至10MPa。保持静水压力不变,充入甲烷气体,待煤样内瓦斯压力均衡并吸附饱和后,保持围压和气体压力不变,按10kN/min增加轴压。峰后采用环向位移控制,按0.04mm/min加载。为保证应力-应变数据和声发射数据同步,试验开始后MTS系统和声发射系统同时进行记录。试验采用基于最小二乘法的盖格尔算法<sup>[18]</sup>,根据不同位置传感器接收到P波的时间差反演得到声发射源的空间位置。

## 2 试验结果分析

### 2.1 含瓦斯原煤煤样的声发射时空演化规律

通过含瓦斯原煤煤样3轴压缩声发射定位试验,获得3轴压缩下含瓦斯煤样的声发射参数,如图1所示。在峰值偏应力的80%以前,煤样内声发射定位点较少且随机分布;从峰值偏应力的80%后,煤样内的声发射定位点逐渐增多;峰值偏应力的90%和峰值偏应力处,煤样内出现大量声发射定位点且密集分布在破坏主裂纹面附近;与峰值处相比,峰后80%和65%的峰值偏应力处,煤样内的累计声发射定位点在数量和分布范围上均大幅增加。

累计声发射参数表现了煤样破裂过程中的整体声发射特征,不能体现煤样破裂不同阶段声发射参数的变化规律,掩盖了煤样破坏的一些内在特征。以10%的峰值偏应力为增量,分段统计各载荷区间内的声发射振铃计数,如图2所示。图中横坐标一些数值前的“—”代表煤样处于峰后阶段。由图2可以看出,轴压加载初期为沉寂期,单位载荷区间的声发射振铃数较少或为零;偏应力增加到一定程度后进入低水平稳定期,该阶段内单位载荷区间的声发射振铃数较少但基本不变;峰值偏应力70%后为快速发展期,单位载荷区间的声发射振铃数快速增加,至峰值阶段达到最大值;峰后阶段进入高水平稳定期,各单位载荷区间的声发射振铃数保持在较高水平且基本不变。

3轴压缩下含瓦斯原煤煤样的声发射时空演化规律与单轴压缩下原煤煤样的声发射时空演化规律<sup>[19]</sup>及3轴压缩下含瓦斯型煤煤样的声发射特征<sup>[10]</sup>均存在较大差异。单轴压缩条件下煤样内大量原生裂纹未被压密,而型煤煤样松软、强度较低,所以两种试验条件下煤样在加载初期就监测到一定数量的声发射事件,且随载荷的增加在时间和空间上都均匀增加。试验原煤煤样较为坚硬,且轴压加载之前经历了较长时间的静水压力作用,煤样中的原生裂纹已被压密,煤样整体性增强,所以试验中煤样的声发射时空演化呈现阶段性特征,与岩石的声发射特征类似。

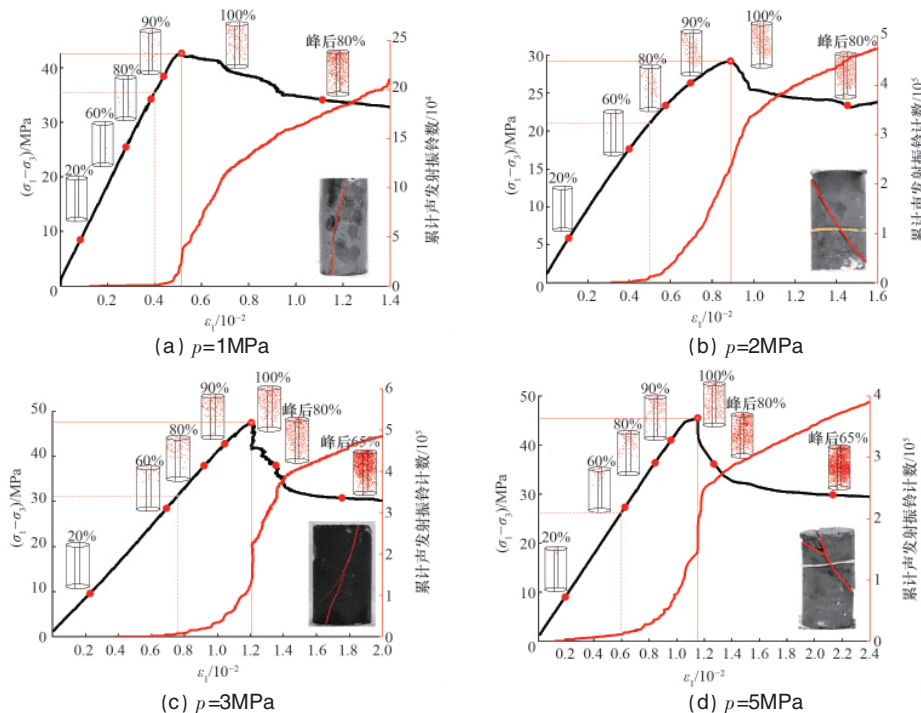


图 1 不同瓦斯压力下含瓦斯煤样的偏应力-轴向应变及声发射时空演化规律

Fig. 1 Curves of deviatoric stress-axial strain and AE temporospatial evolution rules of gas-saturated coal samples with different gas pressures

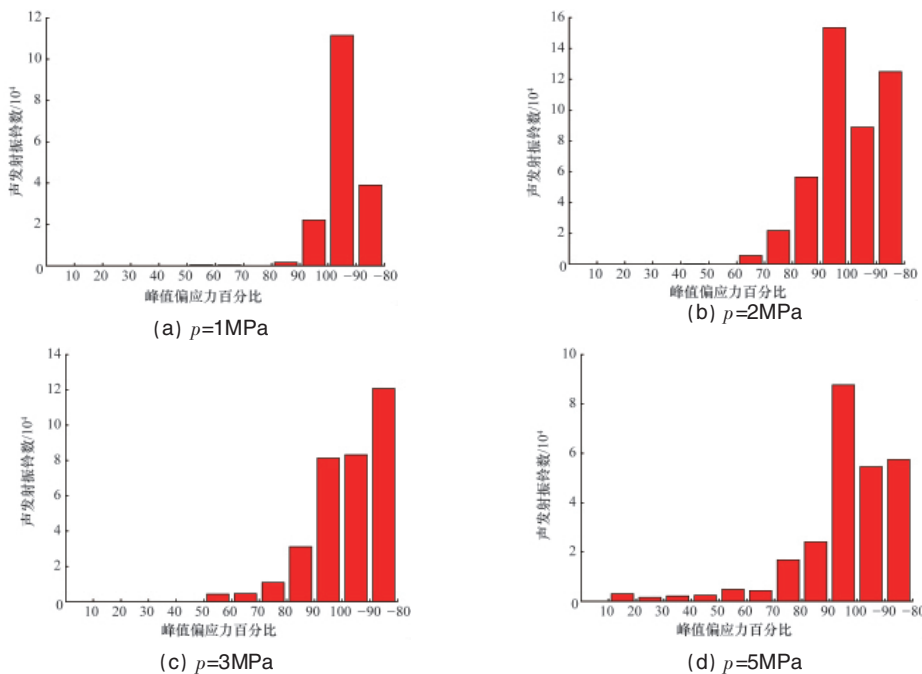


图 2 不同瓦斯压力下含瓦斯煤样各载荷区间声发射振铃数柱状图

Fig. 2 Histograms of AE counts in unit load interval of gas-saturated coal samples at different gas pressures

### 2.2 瓦斯作用对煤样声发射特征的影响

瓦斯作用影响了煤样的力学性质,煤样的声发射特征也随之变化。由图 1 和图 2 可以看出,瓦斯压力 1MPa 条件下的煤样在 50%的峰值偏应力前各单位载荷区间的声发射振铃数为 0,煤样内未监测到任何声发射定位点,而瓦斯压力 5MPa 条件下的煤样在 10%的峰值偏应力后就可以监测到相

当数量的声发射信号。煤样加载初期的声发射活动随瓦斯压力的增加逐渐增多。

图 1 中,声发射定位点和累计振铃数曲线斜率的第一次明显增加代表煤样进入损伤发展阶段,图中虚线对应煤样的初始损伤点。由于煤样的离散性较大,掩盖了瓦斯压力对煤样破裂过程中损伤发展和声发射特征的影响。利用峰值偏应

力和峰值累计振铃数,分别对初始损伤偏应力和累计振铃数进行归一化处理,可以分析瓦斯压力对煤样初始损伤及对应声发射特征的影响。不同瓦斯压力下煤样的归一化初始损伤偏应力及累计振铃数如图3所示。图3表明,随着瓦斯压力的增加,煤样的归一化初始损伤偏应力指数减小,而归一化的初始损伤累计振铃数近似线性增大。由此可以看出,瓦斯气体增强了损伤前煤样的声发射活跃度,减小了煤样的初始损伤应力,促进了煤样的损伤发展。

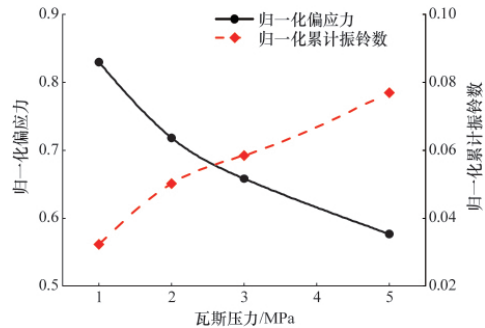


图3 初始损伤点相关参数随瓦斯压力的变化曲线  
 Fig. 3 Curves of relevant parameters changing with gas pressure for the initial damage point

### 3 结论

通过不同瓦斯压力下含瓦斯原煤煤样3轴压缩声发射试验,研究了含瓦斯煤破裂过程中声发射时空演化规律。主要结论如下。

(1) 随着含瓦斯煤样的变形破坏发展,煤样内的声发射定位点及声发射振铃数逐渐增加。80%的峰值偏应力前声发射定位点较少且随机分布,峰值偏应力前后及峰后阶段声发射定位点显著增加且主要分布在主裂纹面附近。

(2) 3轴压缩含瓦斯原煤煤样内的单位载荷区间声发射振铃数随加载进行逐渐增加,经历了加载初期的沉寂期、中期的低水平稳定期、峰值前的快速发展期和峰后的高水平稳定期,与单轴压缩原煤煤样及3轴压缩含瓦斯型煤煤样的单位载荷区间声发射特征存在较大差异。

(3) 随着瓦斯压力的增加,损伤前煤样的声发射活动强度增大,损伤门槛值减小,促进了煤样的损伤发展。

#### 参考文献 (References)

- [1] Konstantinova A G. Seismoacoustic observations on failure of the Kizelovsk coal sample [C]//Ore Aerodynamics and Safety of Mining. Moscow: Nauka, 1964: 155-162.
- [2] Shkuratnik V L, Filimonov Y L, Kuchurin S V. Experimental investigations into acoustic emission coal samples under uniaxial loading [J]. Journal of Mining Science, 2004, 40(5): 458-464.
- [3] 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.
- [4] Shkuratnik V L, Kuchurin S V. Relationship of acoustic emission

- parameters with deformation stages and mechanical properties of coal samples [C]//XIX Session of the Russian Acoustical Society. Nizhny Novgorod: Russian Acoustical Society, 2007: 227-230.
- [5] 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 Shugang, Liu Yanbao, Zhang Liqiang. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2794-2799.
- [6] 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 Shugang, Liu Yanbao, Zhang Liqiang, et al. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1264-1268.
- [7] 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 Baoxian, Zhao Baoyun, Jiang Yongdong. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 647-650.
- [8] 刘保县,黄敬林,王泽云,等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3234-3238.  
Liu Baoxian, Huang Jinglin, Wang Zeyun, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3234-3238.
- [9] 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(S2): 3521-3527.  
Lai Xingping, Lü Zhaohai, Zhang Yong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3521-3527.
- [10] 苏承东,高保彬,南华,等. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 757-766.  
Su Chengdong, Gao Baobin, Nan Hua, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 757-766.
- [11] 刘向峰,汪有刚. 声发射能量累积与煤岩损伤演化关系初探[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(1): 1-4.  
Liu Xiangfeng, Wang Yougang. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2011, 30(1): 1-4.
- [12] 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 Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang, et al. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 289-292.
- [13] 曹树刚,刘延保,李勇,等. 不同围压下煤岩声发射特征实验[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(11): 1321-1327.  
Cao Shugang, Liu Yanbao, Li Yong, et al. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1321-1327.
- [14] 左建平,裴建良,刘建锋,等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1564-1570.  
Zuo Jianping, Pei Jianliang, Liu Jianfeng, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1564-1570.
- [15] 艾婷,张茹,刘建锋,等. 三轴压缩煤岩破裂过程中声发射时空演化规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2048-2057.  
Ai Ting, Zhang Ru, Liu Jianfeng, et al. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2048-2057.
- [16] 文光才,杨慧明,邹银辉. 含瓦斯煤体声发射应力波传播规律理论研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 295-298.  
Wen Guangcai, Yang Huiming, Zou Yinhui. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 295-298.
- [17] 赵洪宝,尹光志. 含瓦斯煤声发射特性试验及损伤方程研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 667-671.  
Zhao Hongbao, Yin Guangzhi. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 667-671.

(责任编辑 马宇红,朱宇)