

# 瓦斯煤岩变形破裂过程声发射预警信号 变化规律研究\*

肖晓春<sup>1</sup> 副教授 朱洪伟<sup>1</sup> 潘一山<sup>1</sup> 教授 徐 军<sup>1</sup> 罗 浩<sup>1</sup> 吕祥锋<sup>2</sup> 讲师

(1 辽宁工程技术大学 力学与工程学院 辽宁 阜新 123000

2 中国科学院 力学研究所 北京 100190)

学科分类与代码:6203099(安全工程技术科学其他学科)

中图分类号:X936

文献标志码:A

基金项目:国家自然科学基金青年项目资助(51004061);2011年辽宁省教育厅科学研究一般项目资助(L2011049);

国家大学生创新创业训练计划项目(201210147011)。

**【摘 要】** 为提高矿井瓦斯突出灾害预测准确率,基于力学、声学理论,采用实验室试验方法,以标准煤试样为研究对象,对含瓦斯煤岩变形破裂过程声发射(AE)预警声信号变化规律进行研究。试验结果表明:围岩应力增大,煤岩破裂由低围岩应力的脆性破坏逐渐过渡到高围岩应力状态的塑性破坏,可根据声发射高幅信号提前预测煤岩破裂时刻。瓦斯的力学和非力学作用对煤岩体力学性质和变形特性的影响均随瓦斯压力的增加而变大。瓦斯压力越大,则煤岩破裂进程加快,积累的声发射能量迅速释放,高值振铃计数声发射信号覆盖时间区段变长,声发射信号能及时反映含瓦斯煤岩的不稳定性。

**【关键词】** 瓦斯煤岩; 变形破裂; 声发射(AE); 振铃计数; 预警信号

## Acoustic Emission Warning Signals Change Law Research during Deformation and Failure of Gassy Coal Rock

XIAO Xiao-chun<sup>1</sup> ZHU Hong-wei<sup>1</sup> PAN Yi-shan<sup>1</sup> XU Jun<sup>1</sup> LUO Hao LÜ Xiang-feng<sup>2</sup>

(1 School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China

2 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to improve the mine gas outburst prediction accuracy, AE warning signal variation in the process of gas-coal deformation and fracture was studied using laboratory experimental methods and standard coal samples. The study results show that after the confining pressure of coal increases, coal crack changes gradually from brittle failure under low confining pressure to ductile failure under high surrounding stress, that by the AE signal can predict the time of coal failure in advance, that the mechanical and non-mechanical effect of gas on the coal mechanical properties and deformation characteristics increase with the gas pressure increasing, that when gas pressure increases, coal cracks more rapidly, AE energy accumulated releases rapidly, time coverage period of AE signal high ring count value becomes longer, and that the AE warning signal can reflect gas-coal instability timely.

**Key words:** gas-coal; deformation and failure; acoustic emission(AE); ring-down count; warning signals

\* 文章编号:1003-3033(2013)06-0122-06; 收稿日期:2013-04-10; 修稿日期:2013-05-30

## 0 引言

煤矿瓦斯导致的煤矿安全问题已经成为制约我国煤炭工业走新型工业化道路、实现可持续发展的主要问题之一。煤与瓦斯突出矿山动力灾害孕育发生过程是一个伴随有含瓦斯煤岩体变形破裂、能量积聚、转移与释放的过程,由含瓦斯煤岩破坏而导致的煤与瓦斯突出,是煤炭开采过程中一种复杂的工程诱发灾害<sup>[1-8]</sup>。作为煤矿瓦斯突出机理研究的理论基础,研究含瓦斯煤岩破裂过程中瓦斯与煤岩固体的耦合作用机理,瓦斯煤岩破裂过程中产生的声发射(AE, Acoustic Emission)前兆预警信号产生、聚集和突变规律,对进一步深入认识含瓦斯煤岩的突出机理,进而采取相应的防治措施等具有重要的科学意义和工程实用价值。

近年来,众多学者对煤岩变形破裂过程的声发射研究特性进行了深入研究:徐涛等<sup>[9]</sup>采用数值试验方法对煤岩力学特性影响的声发射特性进行了系统研究;曹树刚等<sup>[10]</sup>进行了单轴受压下突出煤样破坏全过程声发射试验;邹银辉等<sup>[11]</sup>探讨了声发射预测煤与瓦斯突出的滤噪工艺和预测工艺技术;黄跃明等<sup>[12]</sup>对含瓦斯煤试件在破裂过程中声发射的分布特征进行了研究;赵洪宝等<sup>[13]</sup>对具有突出倾向煤体制作的型煤试件单轴压缩和循环加载过程中的声发射特征进行了试验研究;左建平<sup>[14]</sup>对单体岩石、单体煤和煤岩组合体进行单轴试验下的声发射测试。分析上述研究成果发现,数值模拟试验是含瓦斯煤岩变形破裂声发射特性的主要研究手段,采用实验室试验进行含瓦斯煤岩的变形破裂声发射特性研究尚属起步阶段,只有文献<sup>[13]</sup>试制了含瓦斯煤岩变形破裂的三轴声发射监测装置,进行了初步的试验研究。目前,针对含瓦斯煤样破坏过程中声发射特征进行预判瓦斯煤岩破坏及瓦斯突出试验研究尚未开展,利用含瓦斯煤岩变形破坏过程中的声发射信号对煤与瓦斯突出动力灾害进行预测研究未曾涉及。基于上述现状,笔者将采用试验方法将深入探究含瓦斯煤岩声发射信号变化规律,揭示声发射特征和煤岩变形破裂力学性质之间的关系,为探索含瓦斯煤岩变形破裂机理,提高煤与瓦斯突出预测准确率提供试验指导。

## 1 瓦斯煤岩三轴压缩过程力学特性试验研究

### 1.1 试验系统图介绍

试验系统如图 1 所示。

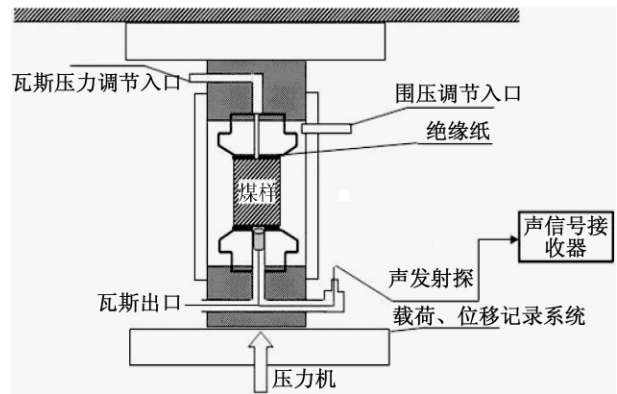


图 1 AE 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AE experiment system

### 1.2 试验方案

#### 1.2.1 煤岩三轴压缩破裂力学特性研究

为了探究瓦斯煤岩破裂过程声发射信号变化规律,需要进行煤岩三轴压缩条件下其力学特性的研究。试验方案见表 1 和表 2。

表 1 力学特性试验方案

Table 1 Mechanical properties experiment scheme

方案	围压/MPa	轴向加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )
1	1	0.2
2	3	
3	5	
4	8	

#### 1.2.2 含瓦斯煤岩三轴压缩破裂力学特性研究

为了深入分析围岩压力和瓦斯压力共同影响下的煤岩变形破裂规律,设定了试验方案,见表 2。研究煤样在轴压、围压和孔隙压 3 个压力下的破裂规律。

表 2 瓦斯煤岩三轴压缩破裂力学特性试验方案

Table 2 Gassy coal rock triaxial compression fracture mechanical properties experiment scheme

方案	围压/MPa	孔隙压力/MPa
1	3	0.5
	4	0.5
2	4	0.6
	4	1.3

### 1.3 试验结果及分析

#### 1.3.1 煤岩三轴压缩破裂力学特性研究结果分析

图 2、图 3 给出了煤岩三轴压缩作用下,应力-应变变化规律及破坏形式。

试验结果表明,煤岩弹性模量随围压增大而增大,围压增大后,煤岩强度极限提高,煤岩塑性增强。

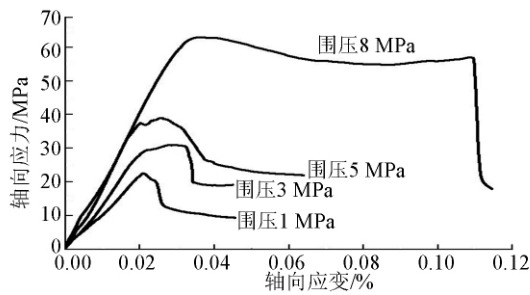


图2 煤样三轴压缩过程应力-应变曲线  
Fig.2 Coal sample triaxial compression stress-strain process curves

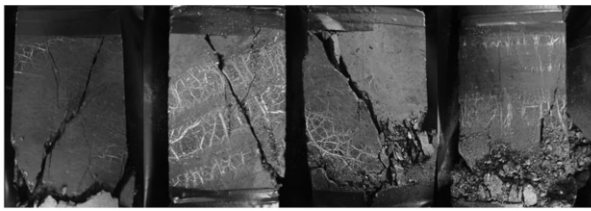


图3 三轴压缩煤样破坏形式

Fig.3 Damaged coal samples after triaxial compression

由煤岩破裂图片(图3)所示,随着围压的增大,煤岩试样的破坏形式由脆性破坏向塑性破坏转变,其原因在于围压效应增大了裂隙面上的摩擦力,破坏形式体现为塑性破坏。

### 1.3.2 含瓦斯煤岩三轴压缩破裂力学特性研究结果分析

图4、图5给出了相同孔隙压力下不同围压的煤样应力-应变变化规律。

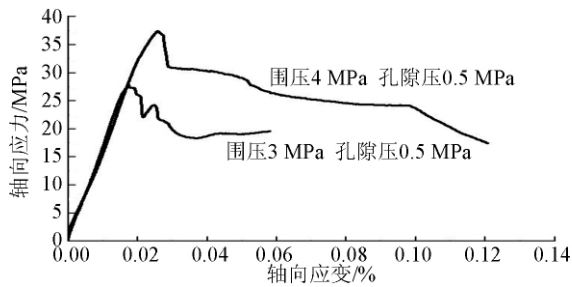


图4 围岩应力影响的煤岩变形破裂曲线  
Fig.4 Coal rock deformation curves considering surrounding rock stress

由图4可知,在相同瓦斯压力作用下,围压越大,煤岩的弹性模量、抗压强度显著提高,煤岩体现的塑性越好;由图5可知,经过吸附瓦斯饱和后的煤样,在相同围压作用下,瓦斯压力对其力学和变形特性影响显著。随着瓦斯压力的增加,煤岩的弹性模量和峰值强度有所下降,峰值应力后的残余变形体现出更多的脆性特征。其原因在于:瓦斯压力的存在,促进了煤岩中原生裂隙的发生、发展,降低了煤岩的承载能力;另外瓦斯的非力学的吸附解吸作用

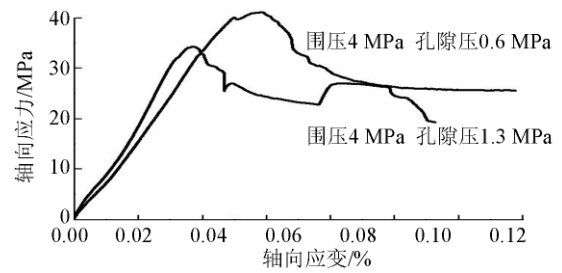


图5 孔隙压力影响的煤岩变形破裂曲线  
Fig.5 Coal rock deformation curves considering pore pressure

也是煤岩发生脆性破坏的影响因素之一,煤体颗粒吸附瓦斯气体分子后,瓦斯分子附着于煤体颗粒表面,降低了煤固体之间的联结力,吸附的瓦斯分子将被煤岩基质吸引并挤入2个接触很近的颗粒之间,使煤岩固体颗粒间距增大,黏结力减小,宏观上表现为煤岩体抵抗变形和破坏的能力降低。瓦斯的力学和非力学作用对煤岩体力学性质和变形特性的影响均随瓦斯压力的增加而变大。

## 2 瓦斯煤岩三轴压缩破裂声发射特征研究

### 2.1 声发射试验围岩应力设定和煤样参数

煤岩固体材料破坏时会产生声发射现象,煤岩体破裂过程表现出的声发射现象与煤岩体物理学特性关系会受到孔隙率、孔隙分布情况、载荷、位移、强度及加载加速度等众多因素影响。现有研究已表明<sup>[15-16]</sup>,大多数煤层在非破坏性应力出现以前,都能产生声发射信号变化,可以利用煤岩体受载时的声发射特征区分煤岩体的变形破裂阶段。由于含瓦斯煤岩变形破裂过程是煤岩体在地应力和瓦斯动力共同作用下发生变形和破坏的过程,其声发射变化不但反映了煤岩体的破裂过程,也能反映煤岩体变形破裂时瓦斯动态运移的过程,因此,主要研究不同围岩应力和瓦斯压力作用下煤岩变形破裂过程及对应的声发射变化规律。

选用高瓦斯突出矿井原煤制备成标准煤样,煤样尺寸为50 mm×50 mm×100 mm,基本参数见表3。

表3 煤样基本参数

Table 3 Coal samples basic parameters

围压/MPa	边高/mm	截面积/mm <sup>2</sup>	弹模/GPa	强度/MPa
1	98	2 572	1.27	23
5	98	2 730	1.91	40
8	99	2 525	2.56	64

### 2.2 围压影响的无瓦斯煤岩破裂声发射试验

按照设定的围岩应力,对原煤试样进行无瓦斯

条件下三轴压缩变形破裂过程声发射规律试验。声发射信号的强弱通过振铃计数的大小决定,振铃计数越大,煤岩破裂越剧烈,接收到的声发射信号越强。通过对试验所得的声发射信号和煤岩应力应变曲线对照图分析,如图 6 所示,可以得到围岩应力变化过程的煤岩破裂与声发射特征的对应关系。

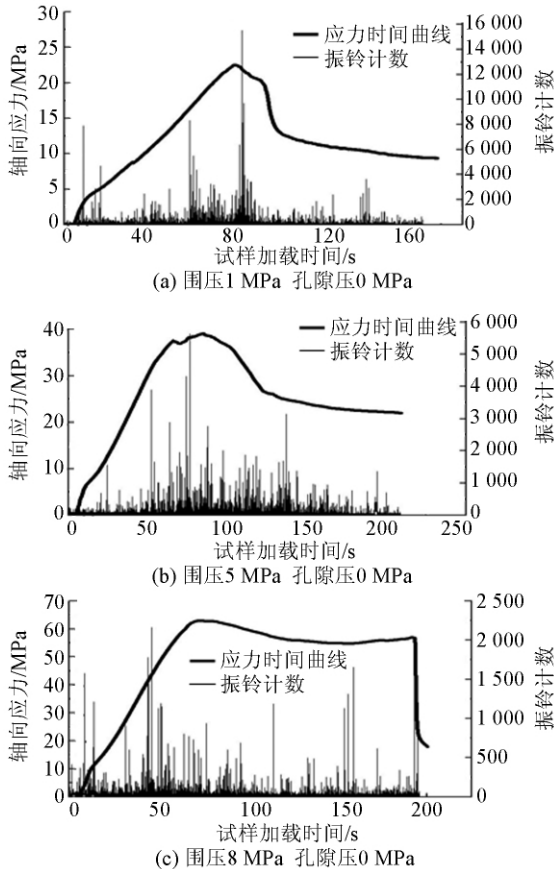


图 6 不同围岩应力影响下的煤岩轴向应力和声发射特征

Fig. 6 Coal rock acoustic emission results with different confining pressure

如图 6 所示知,随着围压的增加,煤样逐渐被压实,煤岩体首先进入初始压实阶段,煤块内部的原生裂缝逐渐闭合,导致声发射信号微弱,围压越大,煤岩的抗压强度越高,煤岩抵抗弹性变形的能力加强,煤岩体内部的损伤量越小,声发射信号越弱。围压增大后,增强了煤岩固体宏观裂缝面间的摩擦因数,煤岩体固体颗粒之间的摩擦作用在弹性压实阶段就非常显著,导致其声发射能量积累释放较快,声发射首次振铃计数高幅值信号出现在弹性阶段前期,由于受围压影响,煤岩固体颗粒摩擦作用长期存在,因此,在变形破裂的强化阶段和峰值前均有较长时段的声发射高幅值信号出现。结果表明:围压越大,声发射信号曲线波动越强烈,声发射振铃计数的首次高值信号出现提前,高值信号出现的覆盖时段变长,

可以提前预测围岩应力影响的煤岩破裂时刻。

### 2.3 围岩应力和瓦斯压力共同作用下的煤岩破裂过程声发射试验

设计围岩压力和瓦斯压力共同作用下煤岩变形破裂声发射试验,围岩压力为 3 和 4 MPa,孔隙压力设定为 0.5 和 1.3 MPa,结果如图 7 所示。

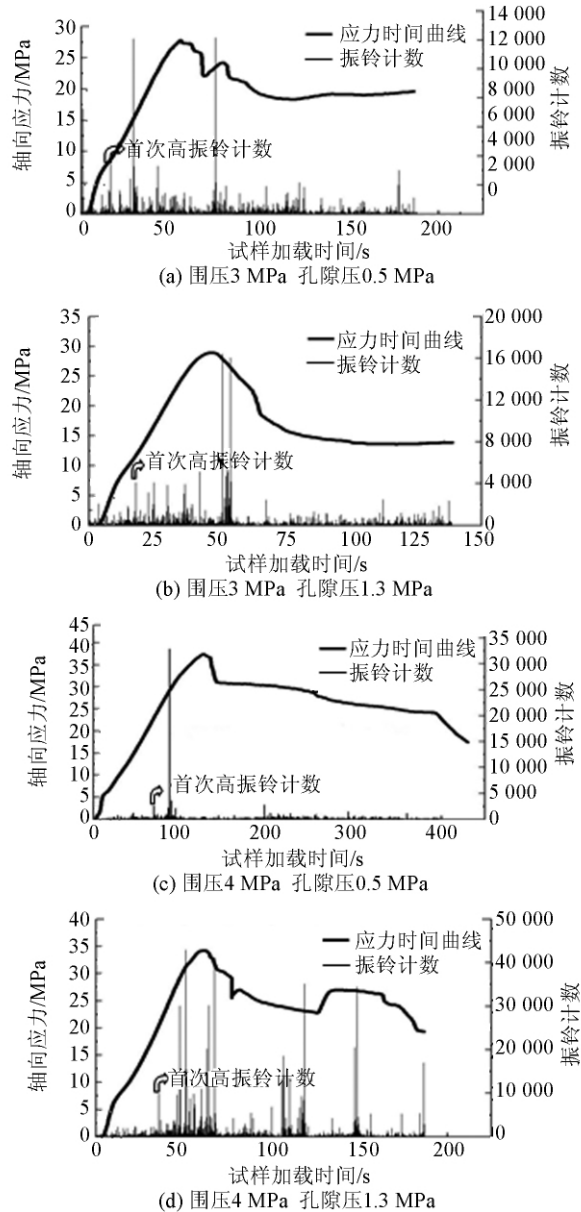


图 7 不同孔隙压力影响下的煤岩轴向应力和声发射特征

Fig. 7 Coal rock axial stress and acoustic emission characteristics considering pore pressure under different surrounding rock stress

当瓦斯气体通过煤岩体后,在瓦斯气体动态吸附、解吸、扩散、渗流过程影响下,煤岩体的强度下降,声发射首次高振铃计数高值变大,瓦斯压力越大,其声发射首次高值通常出现在弹性压实后期或强化初期,其声发射振铃计数的变化受瓦斯流动的

影响显著,而围压的影响则相对减弱,这种现象在高瓦斯压力条件下更加显著,在强化阶段出现的声发射高幅值振铃计数覆盖时间段变长,有利于含瓦斯煤岩的破裂失稳情况预测,如图7a和图7b所示。

其原因在于:在较高围岩应力作用下,煤岩弹性模量和峰值强度均有所提高,当瓦斯压力较低时,瓦斯压力不足以让煤岩快速破裂,其破裂过程中积累的声发射能量小,体现在其声发射振铃计数高值较少,在岩石破裂的整个过程中,无太多异常的声发射振铃计数高值出现,声发射预警煤岩破裂前兆信号不明显,如图7c所示;当升高瓦斯压力后,瓦斯压力的作用加速了煤岩破裂进程,其破裂过程中积累的声发射能量释放迅速,在煤岩体弹性阶段中期就开始有较高的声发射振铃计数出现,而且从弹性阶段开始到强化阶段,包括峰值应力后都出现了较大时间区段的声发射高值振铃计数信号,其声发射预警煤岩破裂过程十分明显,如图7d所示。试验结果表明:声发射信号能更早、更及时地预警含瓦斯煤岩破裂失稳。

### 3 结 论

采用试验研究手段,利用自行研制的三轴应力状态含瓦斯煤岩变形破裂夹持装置,对瓦斯煤岩力学特性、围岩应力影响的煤岩变形破裂过程声发射特征和围岩应力及瓦斯压力共同作用下煤岩变形破

裂过程声发射特征进行了深入的研究,得到如下结论:

1) 围岩应力增大后,煤岩弹性模量和峰值强度明显提高,破坏形式由低围岩应力的脆性破坏逐渐过渡到高围岩应力状态的塑性破坏。

2) 在相同围压条件下,瓦斯压力增加,煤岩弹性模量、和峰值强度下降,煤岩破坏多体现出脆性特征。瓦斯压力促进了煤岩中原生裂隙的发生、发展,降低了煤岩的承载能力;同时,瓦斯分子的非力学作用,致使煤岩颗粒间距增大,黏结力减小;瓦斯的力学和非力学作用对煤体力学和变形特性的改变均随瓦斯压力的增加而变大。

3) 围压增大,声发射信号曲线波动越强烈,声发射振铃计数的首次高值信号出现提前,高值信号出现的覆盖时段变长,可以提前预测围岩应力影响的煤岩破裂时刻。

4) 瓦斯压力增大后,其声发射振铃计数的变化受瓦斯流动的影响显著,而围压的影响则相对减弱,高瓦斯压力加速了煤岩破裂进程,其破裂过程中积累的声发射能量释放迅速,声发射首次高振铃计数高值变大,在强化阶段出现的声发射高幅值振铃计数覆盖时间段变长,有利于含瓦斯煤岩的破裂失稳情况预测。试验结果表明:声发射信号能更早、更及时地预测含瓦斯煤岩的破裂失稳过程。

### 参 考 文 献

[1] 安明燕,杜泽生,张连军. 2007—2010年我国煤矿瓦斯事故统计分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(5):177-179.  
AN Ming-yan, DU Ze-sheng, ZHANG Lian-jun. Coal mine gas accident in China in 2007-2010 statistical analysis[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(5):177-179.

[2] 林柏泉,常建华,翟成. 我国煤矿安全现状及应当采取的对策分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(5):42-46.  
LIN Bai-quan, CHANG Jian-hua, ZHAI Cheng. Analysis on coal mine safety situation in China and its countermeasures[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(5):42-46.

[3] 聂百胜,何学秋,王恩元,等. 煤与瓦斯突出预测技术研究现状及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(6):40-43.  
NIE Bai-sheng, HE Xue-qiu, WANG En-yuan et. al. Present situation and progress trend of prediction technology of coal and gas outburst[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6):40-43.

[4] 李润求,施式亮,彭新. 矿井通风系统安全评价方法及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(1):112-118.  
LI Run-qiu, SHI Shi-liang, PENG Xin. Summarization of safety assessment methods for mine ventilation system[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(1):112-118.

[5] 李运强,黄海辉. 世界主要产煤国家煤矿安全生产现状及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(6):158-165.  
LI Yun-qiang, HUANG Hai-hui. Current status and trend of coal mine safety in worlds' main coal mining countries[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(6):158-165.

[6] 贾智伟,景国勋,张强. 瓦斯爆炸事故有毒气体扩散及危险区域分析[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1):91-94.

- JIA Zhi-wei , JING Guo-xun , ZHANG Qiang. Analysis on the diffusion of toxic gases from gas explosion and the determination of risk area [J]. China Safety Science Journal , 2007 , 17 (1) : 91 - 94.
- [7] Shkuratnik V L , Filmonov 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.
- [8] 孙猛 吴宗之 张宏元. 煤矿重大危险源辨识评价若干问题的研究与探讨 [J]. 中国安全科学学报 , 2003 , 13 (5) : 35 - 37.  
SUN Meng , WU Zong-zhi , ZHANG Hong-yuan. Probe into some questions about identification and evaluation of major hazard in coal mine [J]. China Safety Science Journal , 2003 , 13 (5) : 35 - 37.
- [9] 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 - 1 564.  
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) : 1 560 - 1 564.
- [10] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤岩体变形破坏声发射特征的综合分析 [J]. 石力学与工程学报 , 2007 , 26 (增1) : 2 794 - 2 799.  
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) : 2 794 - 2 799.
- [11] 邹银辉 赵旭生 刘胜. 声发射连续预测煤与瓦斯突出技术研究 [J]. 煤炭科学技术 , 2005 , 33 (6) : 61 - 64.  
ZOU Yin-hui , ZHAO Xu-sheng , LIU Sheng. Research on sound transmitted continued prediction technology for coal and gas outburst [J]. Coal Science and Technology , 2005 , 33 (6) : 61 - 64.
- [12] 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 Yue-ming , DUAN Dong. Prediction of instability and failure of gassy coal specimens based on acoustic emission [J]. Shanxi Coal , 2010 , 30 (1) : 51 - 54.
- [13] 赵洪宝, 杨胜利, 仲淑娟. 突出煤样声发射特性及发射源试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报 , 2010 , 27 (4) : 543 - 547.  
ZHAO Hong-bao , YANG Sheng-li , ZHONG Shu-heng. Analysis on the AE characteristics of outburst-hazardous coal under different loading mode [J]. 2010 , 27 (4) : 543 - 547.
- [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) : 1 564 - 1 570.  
ZUO Jian-ping , PEI Jian-liang , LIU Jian-feng , et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30 (8) : 1 564 - 1 570.
- [15] 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.  
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) : 1 097 - 1 110.
- [16] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的试验研究 [J]. 地球物理学报 , 2000 , 43 (1) : 131 - 137.  
WANG En-yuan , HE Xue-qiu. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock [J]. Chinese Journal of Geophysics , 2000 , 43 (1) : 131 - 137.



作者简介: 肖晓春 (1979 -) 男, 内蒙古化德人, 博士, 副教授, 主要从事煤层甲烷渗流及增采机理研究。E-mail: xxc7902@163.com.