

单轴压缩下煤体声发射特征及损伤演化过程分析

赵玉成^{1,2}, 林 斌^{1,2}, 唐兴宜², 龚耀华², 刘 嘉², 高亚楠^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 声发射是煤等脆性材料破坏过程中经常伴随的现象, 是脆性材料因外力受损在其内部以弹性波快速释放出来的应变能, 因应力分布不均匀所导致的由不稳定高能态向稳定的低能态过渡时产生的松弛过程, 其活动性反映了煤微观破坏的活动性。通过声发射振铃计数率和能量计数率的特征研究了煤岩在各阶段的损伤演化过程, 确定了煤损伤各个阶段的损伤临界值。

关键词: 单轴压缩; 声发射; 煤体; 损伤

中图分类号: TU45; TD315

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)05-0001-07

Coal Acoustic Emission Characteristics and Damage Evolution under Uniaxial Compression

Zhao Yucheng^{1,2}, Lin Bin^{1,2}, Tang Xingyi², Gong Yaohua², Liu Jia², Gao Yanan^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining &

Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Accompanied often by the failure process of brittle materials such as coal, acoustic emission phenomenon is the rapid release of strain energy in the internal elastic wave when the brittle material is damaged due to external forces with the uneven distribution of stress caused by the unstable high-energy state to a stable relaxation process in the low energy state transition, whose activity reflects that of coal microscopic damage. In this paper, according to the characteristics of acoustic emission ringing count rate and energy count rate, the damage evolution of coal and rock in various stages of the process was studied, and the damage threshold of the various stages of the coal damage was determined.

Key words: uniaxial compression; acoustic emission; coal; damage

掌握煤体的物理力学特性是进行后续煤体工程变形和损伤分析的重要基础^[1]。声发射技术的快速发展,使其在土木、采矿、交通建设等工程中的应用越来越广泛。唐春安等^[2]根据统计细观损伤力学原理和声发射原理,提出了岩石声发射与岩石损伤具有一致性的假设。来兴平等^[3]通过煤样试件损伤、变形与破坏的声发射特征试验,获得丰富的损伤演化信息,利用统计物理学对连续场进行描述的态矢量原理定量地描述煤介质破坏的进程及破坏程度,定义了损伤程度百分比,将其作为定量指标反映煤样局部损伤与破裂密集程度;韩放等^[4]设计了岩石试块的单轴压缩卸荷试验,利用声发射观测动态损伤的扩展,通过超声波检测来定量评价岩石试块的损伤程度;刘保县^[5]分析单轴压缩煤岩的声发射特性,提出基于“归一化”累积声发射振铃计数的损伤变量,建立基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型,得出煤岩的损伤演化曲线和方程。将小波分析理论、信号奇异性检测原理应用于声发射信号的处理中,能进一步有效地运用声发射信号,加深对材料损伤演化过程的认识。王明^[6]以预应力混凝土梁的破坏过程中的声发射信号能量变化特征为依据,对提取的

收稿日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50834004); 国家大学生科研创新训练计划项目(201210290011)

作者简介: 赵玉成(1972—), 男, 山西芮城人, 教授, 博士, 主要从事岩体力学与工程研究. E-mail: zhaoyc1972@163.com

破坏过程中的声发射特征信号进行了小波分析,研究了提取的特征信号与结构损伤位置和损伤程度之间的关系。

本研究在单轴压缩试验的基础上,借助如图 1 所示的声发射测试系统,分析了煤体受压过程的声发射信号演化特征,进而讨论了煤体的损伤演化规律。

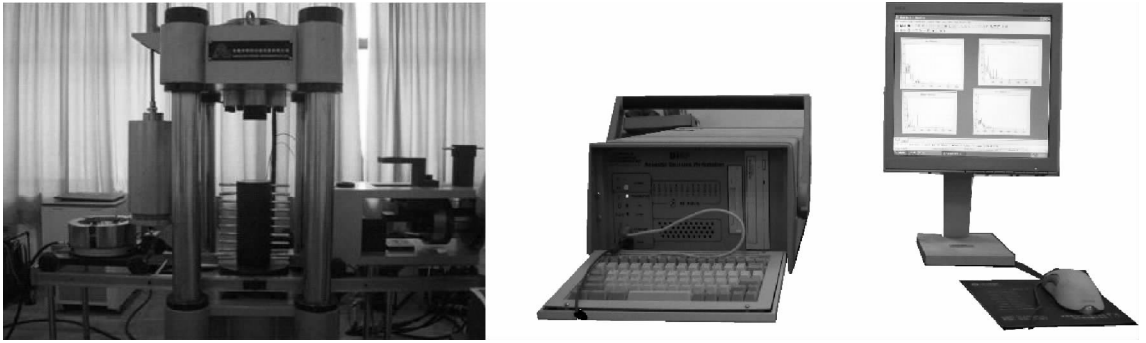


图 1 试验测试系统图
Fig. 1 Test systems

1 煤样单轴压缩试验的声发射信号特性分析

分别对两个煤样试件(1# 和 2#)进行了单轴压缩的声发射试验,煤样的单轴压缩声发射振铃计数率、应力-时间曲线如图 2 所示,能量计数率、应力-时间曲线如图 3 所示。由图 2 和图 3 可以看出不同阶段声发射信号的特征以及煤的损伤演化过程。

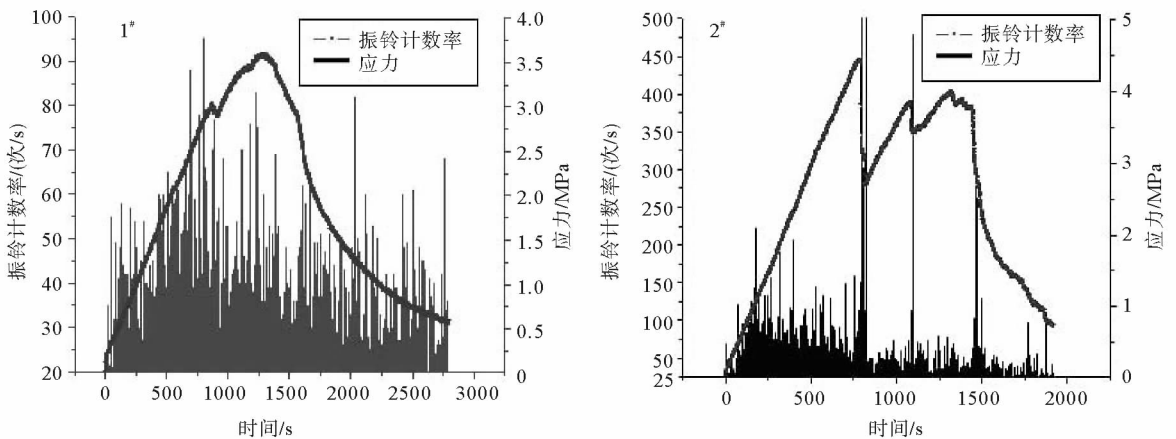


图 2 煤单轴压缩声发射振铃计数率、应力-时间曲线

Fig. 2 Coal uniaxial compression acoustic emission ringing count rate & stress curve with time

试验刚开始时,由于试验过程中试验机从力控模式转向位移控制模式时试验力发生振荡,所以将发生振荡的试验力作为预应力处理,然而此时预应力过大,导致压密阶段没有在图 2 和图 3 中表现出来。图 4 为压密阶段煤的声发射振铃计数率-时间关系曲线,图 5 为声发射能量计数率-时间关系曲线。从图中可以看出,压密阶段前期,载荷较小的情况下,有较多的声发射信号,产生的声发射信号是由裂隙闭合、岩石各向异性及非均匀性等引起的,由于煤内部初始损伤严重,通过肉眼就能观察到试件表面的细小裂纹,因此在压密时声发射信号较多;压密阶段后期,煤样试件经过一段时间持续加载后,声发射进入一个相对平静的阶段,在此过程中,声发射活动维持在很低的水平,只有少量的声发射信号产生。

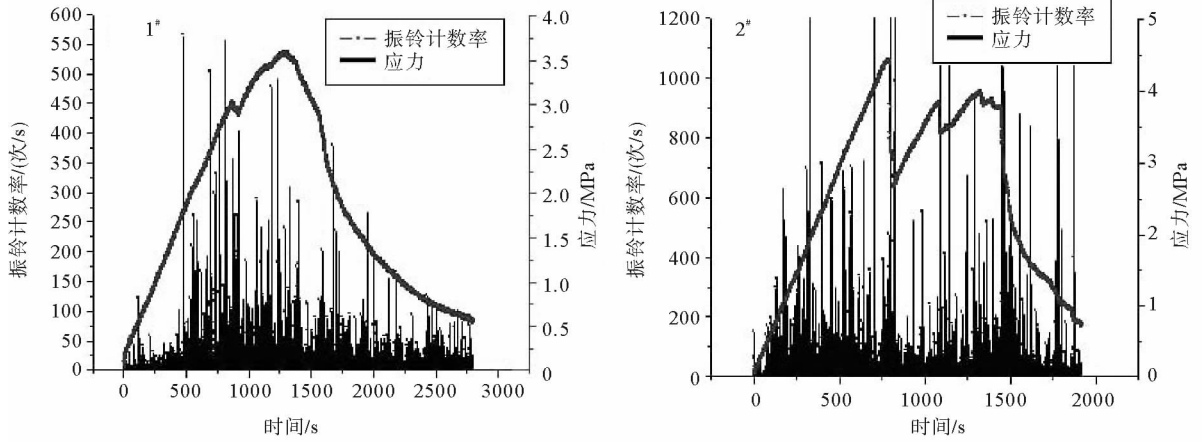


图3 煤单轴压缩声发射能量计数率、应力-时间曲线

Fig.3 Coal uniaxial compression of acoustic emission energy count rate & stress curve with time

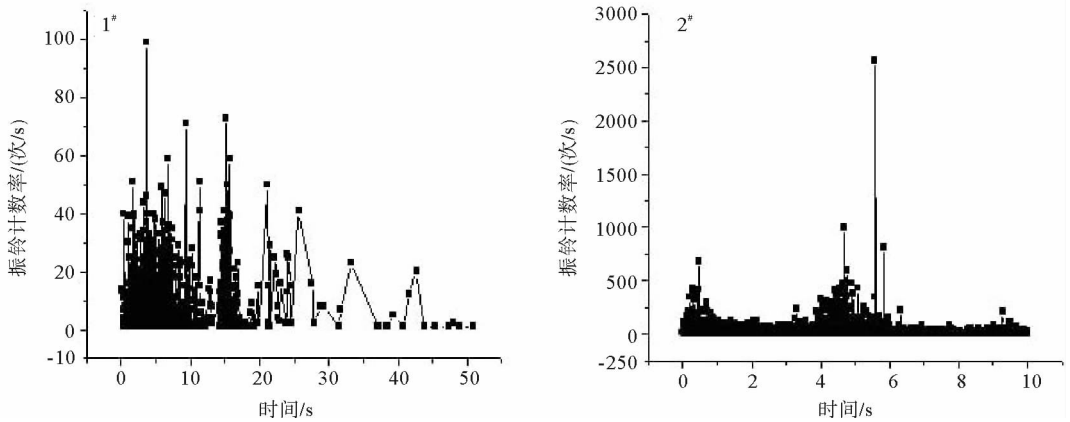


图4 煤压密阶段的声发射振铃计数率-时间曲线

Fig.4 The coal compaction phase of acoustic emission ringing count rate curve with time

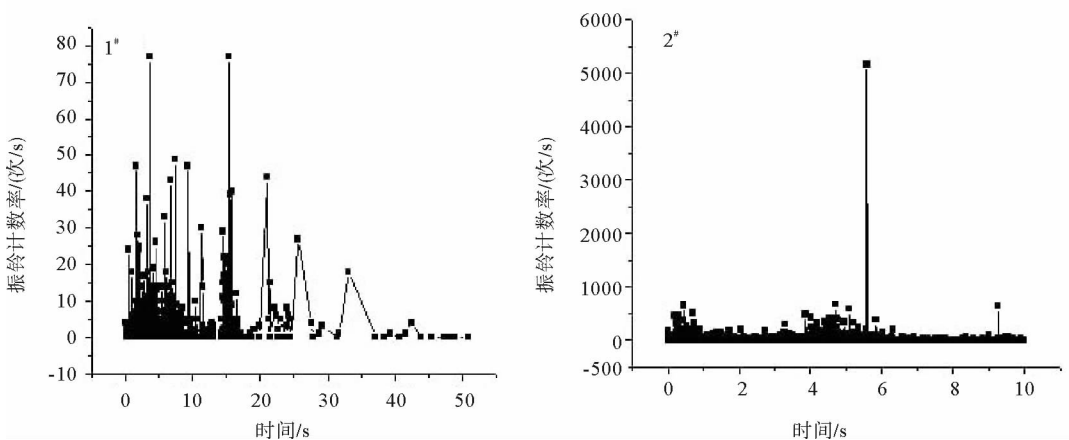


图5 煤压密阶段的声发射能量计数率-时间曲线

Fig.5 The coal compaction stage acoustic emission energy count rate curve with time

在经历声发射平静阶段后,煤样试件 1[#] 和 2[#] 分别在 0~116.24 s, 0~173.17 s 时声发射振铃计数率和能量计数率呈现增长趋势。从理论出发,弹性阶段意味着外载荷撤去后,其变形能恢复,也就是在这一阶段煤不会有新的损伤产生,也就意味着不会有声发射信号的产生。但是试验结果显示,这一阶段声发射振铃计数率呈现增强的趋势,这是因为煤损伤过程中的弹性变形阶段并不是真正意义上的弹性阶段,煤并不是完全的弹性体。此阶段声发射振铃计数率没有太大波动,此时还没有明显的裂纹扩展,只是微孔隙、微裂纹等进一步被压密。

随着载荷的增加,煤样试件 1[#] 和 2[#] 分别在 116.24~542 s, 173.17~305 s 时声发射振铃计数率和能量计数率继续增大,此阶段出现多次声发射信号较高峰值,但与峰值应力处的声发射振铃计数率和能量计数率相比还是较小,说明煤内部微裂隙、微孔隙等开始萌生,此时处于连续损伤阶段。

当煤样试件 1[#] 和 2[#] 分别在 542~1067 s, 305~1090 s 时声发射振铃计数率和能量计数率显著增大,且声发射能量计数率比前一阶段增大了数倍,表明此时煤内部有比前一阶段较多的微裂纹开始扩展,并伴随着较大的弹性能耗散,但裂纹在稳定发展,当应力保持不变时,裂纹也停止扩展。

当煤样试件 1[#] 和 2[#] 分别在 1067 s, 1090 s 以后时,声发射振铃计数率和能量计数率开始急剧增大,说明裂纹已经开始急剧扩展并相互贯通,而当应力达到峰值应力的 85%~95% 时,振铃计数率反而降低,进入相对的平静期,这是因为初始裂纹形成之后,裂纹并不是随着应力或应变的增加直接扩展,而是需要吸收一部分能量,当能量积蓄到一定程度时才能进行扩展,即煤样发生小破裂后,在下一个破裂前,其内部应力场寻求新的平衡,新的平衡之后裂纹才会扩展,因而该时刻可以作为煤破坏失稳前兆信息,在实践中具有重要意义。在达到峰值应力时,声发射信号又比较大,说明此时煤内部有大量裂纹产生。继续加载时,声发射信号有所下降,但声发射活动依然剧烈,且持续时间较长,有时仍有较大峰值,说明此阶段煤内微裂纹在充分发育,并且大量贯穿形成较大的裂纹,破裂面之间相互摩擦,因而煤的声发射活动剧烈,承载能力不断下降,应变急剧增大。最后,煤中分叉的裂纹已经完全贯通,形成大的主裂纹,声发射振铃计数率和能量计数率总体趋势继续下降,但声发射活动依然剧烈,有时仍有较大峰值。

总的来看,声发射振铃计数率反映了煤的损伤演化过程中各个阶段微裂纹破坏的次数,而声发射能量计数率却更好地反映了各阶段微裂纹破坏的强度。将两者结合起来分析,能够更加清楚地了解煤的损伤演化过程。

同时,还可以看到,煤是一个非均匀的材料,力学性质差异往往很大,即使是从同一煤层中的同一块煤取下来的试件,其受压表现出来的声发射特性也有很大差别。有的煤样试件受压开始,其声发射信号保持在一个很低的水平,只有少量的、甚至没有声发射信号产生,压密阶段并不明显,有的煤样试件在加压开始就出现了大量的声发射活动。在试验过程中会出现应力的突然下降,而应力的每次突然变化都会使得声发射信号在对应时间发生剧烈的变化。而应力的急剧下降表明煤内部裂隙的急剧扩展,也说明声发射信号与煤内部的损伤演化有着对应的关系。

2 基于声发射信号对煤样损伤演化过程临界值的分析

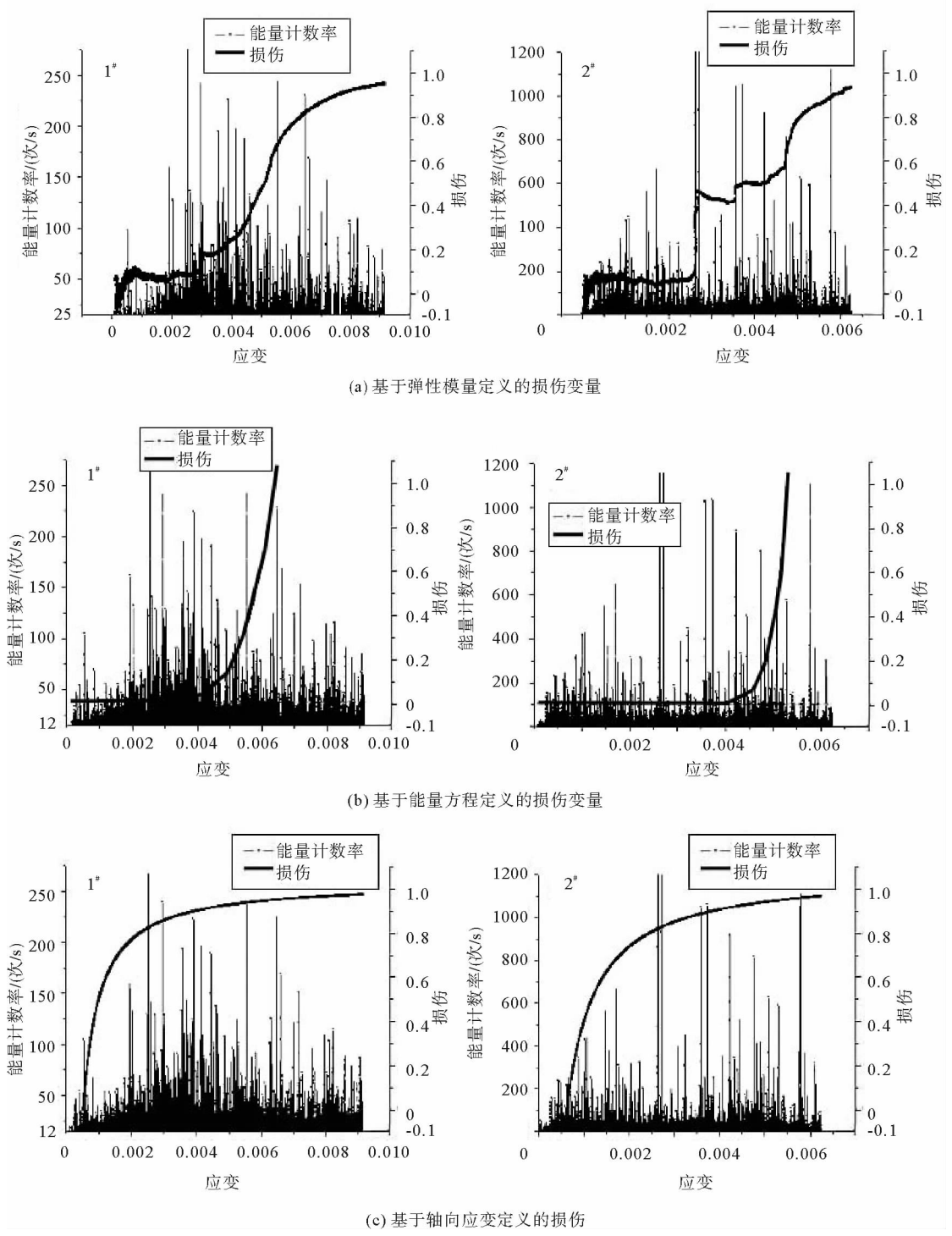
基于前面声发射振铃计数率和能量计数率对煤损伤过程的分析,确定出损伤临界值的各个时刻以及所对应的轴向应变,如表 1 所示。

表 1 损伤临界值的各个时刻以及所对应的轴向应变表

Tab. 1 The corresponding axial strain and various times corresponding to the damage threshold value

	1 [#] 煤样		2 [#] 煤样	
	时间/s	轴向应变	时间/s	轴向应变
开始出现损伤的门槛值	116.24	0.00051	173.17	0.000627
损伤至宏观裂隙扩展的损伤临界值	542.00	0.00190	305.00	0.001020
宏观裂隙贯通至煤破碎损伤临界值	1067.00	0.00358	1090.00	0.003220

由于声发射能量计数率更能体现煤损伤各个阶段的差异,因此将不同损伤定义的损伤、声发射能量计数率与应变的关系图绘于图 6 中,再通过表 1 中损伤临界值所对应的轴向应变确定出不同损伤定义的临界值。



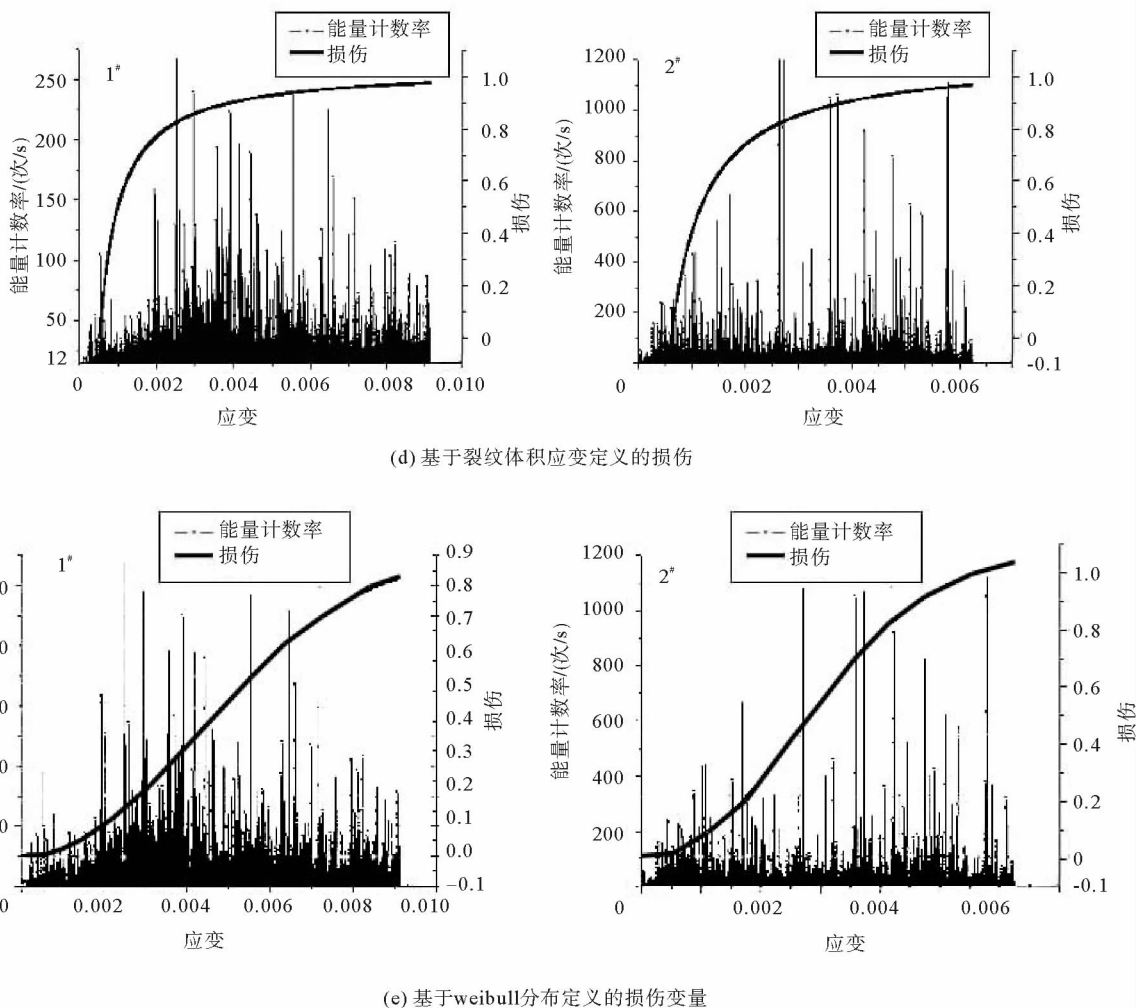


图 6 不同损伤定义的损伤、声发射能量计数率与应变的关系图

Fig. 6 Relationship between injury, acoustic emission energy count rate with strain under different injury definition

由图 6 和表 1 得到的不同损伤变量的损伤临界值,如表 2 所示。

表 2 不同损伤变量的损伤临界值表

Tab. 2 Damage threshold with different damage variable

	基于弹性模量		基于能量方程		基于轴向应变		基于裂纹体积应变		基于 Weibull 分布	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#	1#	2#	1#	2#
开始出现损伤的门槛值	0.072	0.084	0.072	0.084	0	0	0	0	0.007	0.027
损伤至宏观裂隙扩展的损伤临界值	0.074	0.074	0.074	0.074	0.778	0.443	0.009	0.001	0.090	0.069
宏观裂隙贯通至煤破碎损伤临界值	0.187	0.425	0.187	0.425	0.908	0.894	0.090	0.250	0.312	0.555

通过图 6 和表 2 可以看出,损伤变量定义的不同导致同一煤样不同阶段的临界值差异很大。基于弹性模量定义的损伤可以直观地反映煤损伤演化过程,且与声发射信号对应的相当好,每当声发射能量计数率有较大幅度时,裂纹发生急剧扩展,损伤度也会突然增加,因而其损伤规律不便于统一表达,容易受煤内部结构性差异的影响。煤样试件 2 的损伤发生门槛值比损伤向裂隙阶段过渡的临界值还要大,这是因为此阶段煤还在进一步被压密,应力-应变曲线有微小的上翘趋势。基于能量定义的损伤不能够很好地反映煤损伤演化过程,其主要原因是将煤样试件看作热力系统拟合应力-应变曲线,然后通过积分得到单位体积煤内储存的弹性能,最后还要通过拟合应力-应变曲线来得到损伤本构方程中的材料参数,这容易受到拟合好坏的影响,

若通过增加多项式的项数来提高拟合精度,这又会使损伤变量的定义过于复杂,不便于工程应用。

基于轴向应变定义的损伤重点突出了煤破坏前其损伤的发展情况,可以很明显地观察到确定的损伤向裂隙阶段过渡的临界值和裂隙扩展向煤体破碎过渡的临界值远大于其他方法定义的损伤变量的临界值,在工程上可以很好地预测煤结构的稳定性。但从数学模型中可以看出,变化主要受到损伤演化门槛值应变和极限应变的影响,所以不能具体地反映煤损伤演化过程,因而与声发射信号没有直观上的联系。

基于裂纹体积应变定义的损伤变量与基于弹性模量定义的损伤变量相似,也可以直观地反映煤损伤演化过程,且与声发射信号对应得相当好。但可以看到,确定的损伤门槛值远小于其他方式定义的损伤门槛值,且裂隙扩展向煤体破碎过渡的临界值比损伤向裂隙阶段过渡临界值大了许多倍,因此虽能精确地反映损伤演化过程,却不便于工程上的应用。

基于 Weibull 分布定义的损伤变量虽能够较好地反映煤损伤演化过程,且确定的临界值也凸显出了阶段性的差异。但从建模及拟合过程也应该看到这种方法的缺点:①虽然煤从开始加载到最后破坏的整个过程中,声发射都是随机产生的,但从已有的声发射定位研究中发现,煤在单轴压缩初期,声发射无论在空间分布还是在时间上都是随机分布的,而当载荷达到一定值时,煤内部产生裂纹,声发射在空间上的分布由随机无序的状态开始向宏观裂纹处丛集,在接近破坏时,绝大多数声发射都发生在某一宏观裂纹的周围,而煤恰好是沿着该裂纹发生宏观裂纹破坏的,由此可以看出,在煤接近破坏时产生的声发射,严格来说并不是随机的。②上述煤损伤演化方程中,煤破坏时损伤为 1,即认为煤的有效承载面积为 0;事实上,煤破坏时,有效承载面积是大于零的,也就是说煤损伤存在着一个临界值的问题,达到破坏时,损伤是远小于 1 的,而按 Weibull 模型计算就产生了较大的系统正误差,得到的损伤也就偏大。③从拟合过程来看,是将煤的声发射的振铃累积数归一化后的变化规律,这里隐含地认为煤的声发射停止时损伤等于 1,即煤在声发射活动停止时煤就完全破坏,承载力为零,这也使得模型产生系统正误差。

3 结论

本研究首先通过煤压缩过程中的声发射信号分析了整个损伤演化过程,并根据煤中裂纹发展的情况将整个过程划分为四个部分,其次对煤的声发射进行了分类,最后结合不同的损伤定义的损伤-应变关系图和损伤演化过程中声发射能量计数率特征,确定出不同损伤定义的损伤临界值,即开始出现损伤的门槛值、损伤至宏观裂隙扩展的损伤临界值、宏观裂隙贯通至煤破碎的损伤临界值,并分析了不同损伤定义的合理性。

参考文献:

- [1]陈绍杰,孙熙震,郭惟嘉,等.软煤塑性流动状态下渗透特性的试验研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2012,31(5):15-21.
Chen Shaojie, Sun Xizhen, Guo Weijia, et al. Experimental study on permeability characteristics of soft coal at plastic-flow state[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(5): 15-21.
- [2]唐春安.岩石声发射规律数值模拟初探[J].岩石力学与工程学报,1997,16(4):368-374.
Tang Chunan. Numerical simulation of AE on rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(4): 368-374.
- [3]来兴平,吕兆海.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 Zhao Hai. 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(S2): 3521-3527.
- [4]韩放,纪洪广.单轴加卸荷过程中岩石声学特性及其与损伤因子关系[J].北京科技大学学报,2007,29(5):452-455.
Han Fang, Ji Hongguang. Relationship between the acoustic characteristics and damage variable in the process of uniaxial loading and unloading[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(5): 452-455.
- [5]刘保县.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. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3234-3238.
- [6]王明.基于小波分析的声发射信号处理在损伤诊断中的应用[D].镇江:江苏大学,2009:1-18.