

不同加载模式下煤样损伤与变形声发射特征对比分析

来兴平^{1, 2}, 吕兆海¹, 张 勇¹, 李立波¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井安全开采及灾害控制重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 煤样损伤、变形与动态失稳之间具有内在的相关性, 大尺寸煤样破坏试验成为分析采空区围岩动力失稳孕育过程的基础手段。西部的华亭煤矿曾发生过严重矿震, 通过深入调查并精心选取不同尺寸煤样品, 在圆柱体小煤样单轴压缩试验基础上, 完成 2 个大尺寸(195 mm×110 mm×206 mm, 195.0 mm×195.0 mm×11.5 mm)且结构与均匀程度不同(平行与垂直层理)的立方体煤样试件损伤、变形与破坏的声发射(acoustic emission, AE)特征试验, 获得丰富的损伤演化信息, 利用统计物理学且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其破坏程度, 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, 对不同加载模式下煤介质损伤变形应力-应变与 AE 特征进行对比分析, 为理论分析、数值模拟及提高动力失稳及采矿安全预报的时、空、强精度提供必要的条件。

关键词: 岩石力学; 加载模式; 大尺寸煤样; 损伤与变形; 态矢量; AE 特征; 损伤程度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)增 2-3521-07

COMPARATIVE ANALYSIS OF ACOUSTICS EMISSION CHARACTERISTICS ON DAMAGE AND DEFORMATION OF COAL SAMPLES UNDER DIFFERENT LOADING MODES

LAI Xingping^{1, 2}, LU Zhaohai¹, ZHANG Yong¹, LI Libo¹

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. China Educational Ministry Key Lab of Western Safe Mining and Hazard Control, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Deformations and damages of coal have intrinsic relativity with dynamic destabilization. The experiment on large size coal progressive fracture is a fundamental way to analyze the crack and evolution process of surrounding rock in the mined-out area. By in-situ comprehensive investigation and the well-chosen coal specimens of different sizes from the Western Huating Coal Mine where serious mining-induced seismicity occurs, based on the uniaxial test of some columnar and simple coal specimens, the acoustic emission(AE) characteristic experiments of two cube specimens of large size with different structures and heterogeneity(parallel and vertical lamination, the dimensions are 195.0 mm×110.0 mm×206 mm, 195.0 mm×195.0 mm×11.5 mm respectively), are conducted under different loading models, and abundant information and parameters upon deformation and their evolution are acquired. The corresponding statistical physical parameter(state vector), which characterizes the continuous rough particle and spatial field is adopted in order to describe cracks and damages process of the coal media and their damage degree quantitatively. Furthermore, the damage degree percent is proposed as a quantitative index to characterize local damage and concentration of fractures. Finally, the comparative analysis between stress-strain and AE progressive characteristics are obtained. An essential

收稿日期: 2007-01-05; **修回日期:** 2007-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10402033, 10772144)

作者简介: 来兴平(1971-), 男, 博士, 1993年毕业于西安矿业学院采矿工程系, 现任教授, 主要从事岩石力学及工程、采矿工程、采空区衍生灾害预报与工程治理方面的教学与研究。E-mail: Lxptest@yahoo.com.cn

qualification is provided to theoretical analysis, numerical simulation so as to enhance the accuracy of temporal-spatial-relationship and intensity of dynamical unstable and safe mining prediction.

Key words: rock mechanics; loading modes; large size coal specimen; damage and deformation; state vector; AE characteristics; damage degree

1 引言

西部华亭、宁东和石嘴山矿区属于强震区,在开采过程中均发生过大范围动力失稳,这对西部矿区煤炭安全开采提出了严峻挑战。非均匀介质的损伤与破坏是力学中极具挑战性的难题,如在邻近破坏及灾变阶段,损伤演化不遵循稳态累积规律,传统的均匀连续介质力学理论难以处理^[1]。煤岩等脆性材料在受力变形过程中产生微破裂时伴有声发射(acoustic emission, AE)现象,因此AE技术可用来对材料在受载情况下,内部损伤进行监测^[2, 3]。由于煤样损伤与变形以及动态失稳之间具有内在的相关性,其损伤和变形过程声发射特征分析在动力灾害预报中倍受重视。另外,分析煤样介质失稳时空分布规律及机制的方法大多采用在均匀介质假设基础上进行数值模拟、理论分析以及小尺寸的煤样单轴压缩试验^[4, 5],并取得了先驱性进展。同时增大试样尺寸可提高AE相对定位精度。杨栋等^[6]和陆菜平等^[7]分别采用大尺寸的正方体煤样试件(500 mm×500 mm×500 mm和150 mm×150 mm×150 mm)进行渗透特性和三轴条件下的钻孔冲击性试验从而分析损伤演化过程中电磁辐射特征和AE规律。因此大尺寸煤样破坏试验成为分析煤介质损伤及动力失稳孕育与演化过程的基础手段之一。研究过程中,试验煤样均取自甘肃华亭矿603工作面,在完成18块小尺寸煤样(直径为36 mm,高度为47 mm)单轴试验基础上^[8, 9],完成了2个大尺寸(和圆柱体试件的尺寸比较而言)煤样试件(195 mm×110 mm×206 mm, 195.0 mm×195.0 mm×11.5 mm)损伤、变形与破坏的AE特征试验,获得了丰富的损伤演化数据并进行了综合比较与分析,揭示了煤介质损伤变形的微观与宏观演化的力学机制,为理论分析、数值模拟及提高动力失稳预报的时、空、强精度提供了必要的条件。

2 试验方法

2.1 AE参数

岩体AE特性参数主要包括,总事件,单位时间AE事件累计总数(次/s),它能反映声发射频率,是材料出现破坏的重要标志;能率(energy rate)是单位时间内AE能量(加速)释放的相对累计值($\text{mV} \cdot \text{vs} \cdot \text{s}^{-1}$),是煤介质破坏速度和大小变化程度的重要标志。但如何将瞬时的AE信号用仪器记录下来并从这些信号中提取有用的参数,是研究AE技术的关键。

2.2 小尺寸煤样试件

小煤样试件形状为圆柱体,直径为36 mm,高度为47 mm。将声发射1[#]和2[#]传感器对称贴在煤样试件表面,在不同加载模式中实时监测煤样损伤及变形信息,为后面的大尺寸煤样试验结果分析提供量化与比较性参数奠定基础。

2.3 大尺寸煤样试件

大尺寸煤样的尺寸分别为195 mm×110 mm×206 mm和195 mm×195 mm×115 mm。试样形状为立方体,如图1(a), (b)所示。前者采用平行层理加载,后者采用垂直层理加载。将AE传感器贴在煤样表面裂纹附近的自由面,如图1(c)所示。AE信号接收装置显示出不同受力模式下的AE次数和幅度,每个AE信息都和试件内部微裂纹的损伤和演化相对应,图1(d)~(f)分别描述试验测试过程与AE信号获取原理等,有关试验详细过程参见相关研究^[8]。



(a) 大尺寸煤试样



(b) 平行层理加载(195 mm×110 mm×206 mm)



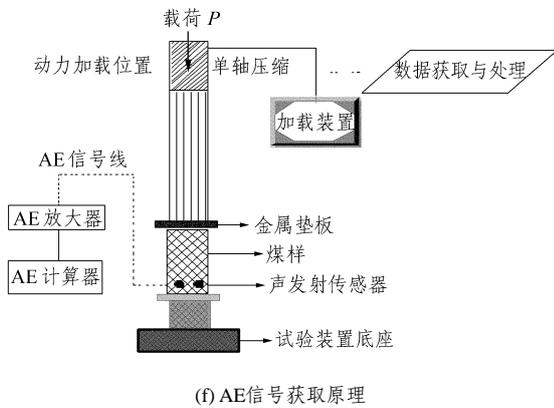
(c) 垂直层理加载(195 mm×195 mm×115 mm)



(d) AE试验装置系统



(e) 破裂过程描述



(f) AE信号获取原理

图 1 AE 测试装置原理及试验过程描述

Fig.1 Description of experiment of AE process and its testing principle

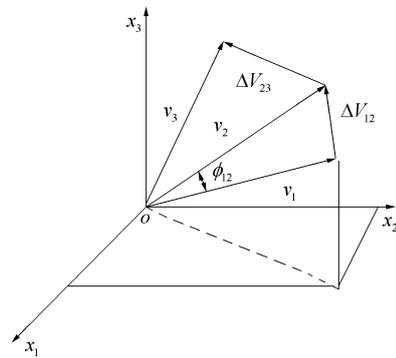
3 基于态矢量 AE 特征分析

3.1 态矢量基本原理

态矢量(state sector)源于统计物理学对连续场进行粗粒化描述的概念^[10]。以二维问题为例, 假设一个物理量 $V(x, y, t)$ 的连续场分布成 N 个子区域(图 2(a)):

1	2	3	...						
			...	$i-1$	i	$i+1$...		
						...	$n-2$	$n-1$	n

(a) 将连续场分成 n 个子区域



(b) 三维情形下的态矢量

图 2 态矢量分析原理

Fig.2 Principle of state vector

$$\vec{V}_t = (V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n) \quad (1)$$

式中: \vec{V}_t 为 N 维矢量——态矢量, 它表示在 t 时刻, 将子区域 i 内物理量 V 的平均值 V_i 作为矢量的第 i 个分量。

态矢量 $\vec{V}(t)$ 是 t 时刻对连续场 $V(x, y, t)$ 的粗粒化描述, 矢量 $\vec{V}(t)$ 描述了物理量 V 在 t 时刻的状态(时间 - 空间分布)。若知道时间 t 的态矢量 $\vec{V}(t)$, 就可能刻画该物理场的时空演化。

态矢量的增量是相邻两时刻 $t - \Delta t$ 及 t 的态矢量之差, 也是一个 n 维矢量。它反映了两相邻时刻态矢量的变化。三维情形下态矢量的空间关系(见图 2(b)):

$$\Delta \vec{V}_{t-\Delta t, t} = \vec{V}_t - \vec{V}_{t-\Delta t} \quad (2)$$

为了利用态矢量的变化定量地描述物理场 $\vec{V}(t)$ 的演化, 可定义一系列标量值:

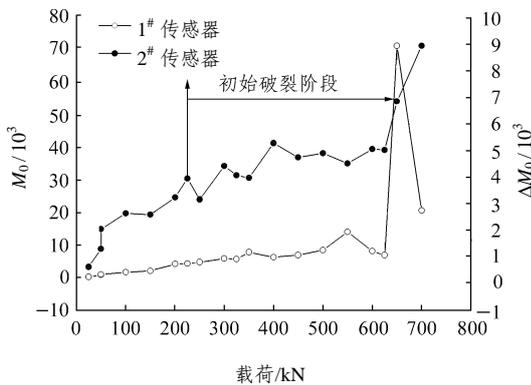
(1) 态矢量的模 $|\vec{V}(t)|$ (以下均以 M_0 表示), 它表征整个物理场的总体水平:

$$M_0 = |\vec{V}(t)| \quad (3)$$

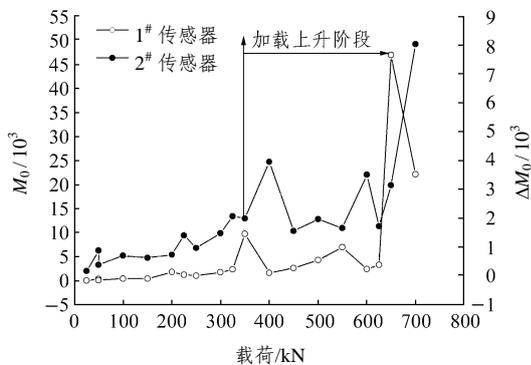
(2) 态矢量 $\vec{V}_{t-\Delta t}$ ， \vec{V}_t 之间夹角 ϕ 的变化，表征相邻两时刻物理场态的变化，该参数的模 $|\vec{V}_{t-\Delta t}, t|$ 随时间变化 (ΔM_0)，从另一角度反映了态的变化。

3.2 基于态矢量的AE分析

如果 V 是反映煤岩损伤的物理量，当内部损伤增多时， M_0 的值就会明显增大，可利用声发射的总事件来刻画；而当煤岩内部的损伤开始出现集中时 ΔM_0 值则会显著增加，可用声发射的大事件和能率来描述。当这些参量都发生异常变化时意味着材料将临近灾变破坏。在余怀忠等^[11]的研究中，采用片麻岩，分大、小 2 种试件，其尺寸分别为 105 cm×40 cm×10 cm 和 14 cm×7 cm×7 cm，通过 AE 试验对态矢量方法做了进一步研究。研究表明，态矢量能较为定量地描述煤岩介质材料破坏的进程及其破坏程度，能够对灾变破坏做出预测。图 3, 4 分别利用态矢量描述了不同载荷作用下单轴压缩时圆柱体煤样损伤与变形过程中(初始破裂阶段、加载上升阶段



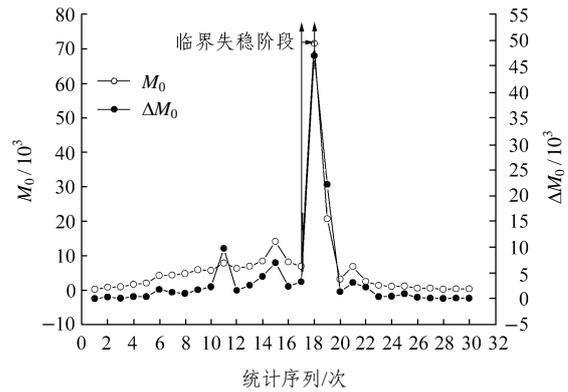
(a) 初始破裂



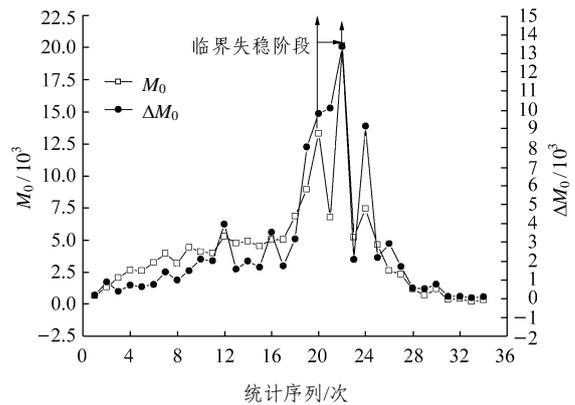
(b) 加载上升

图 3 动载作用下单轴压缩态矢量特征

Fig.3 Characteristics upon state sector under dynamical uniaxial compressive



(a) 1# 传感器



(b) 2# 传感器

图 4 相同载荷作用下单轴压缩态矢量特征(临界失稳阶段)

Fig.4 Critical characteristics upon state sector under same loading uniaxial compressive

与临界失稳阶段)AE 特征。统计分析表明，由于加载模式不同，煤样初始损伤与破裂的 AE 密集程度也不同，反映其连续场的态矢量随持续时间呈现波动并存在一定的统计关系，其特征规律基本符合围岩损伤及破坏的本构关系。表 1 列出了试验过程中，在压缩条件下，不同加载模式造成大尺寸煤样损伤变形统计值。

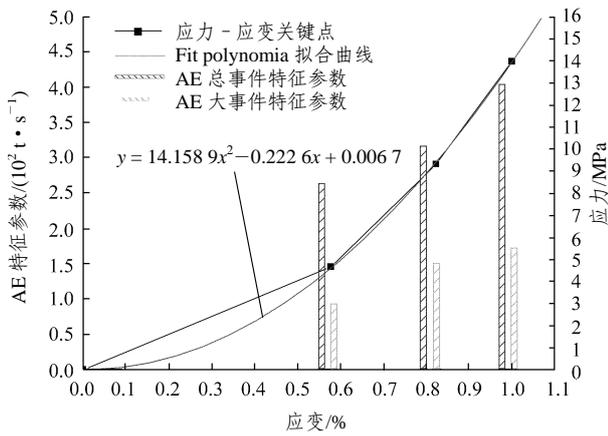
图 5 详细地描述了在不同加载模式下，大尺寸煤样应力 - 应变 - AE 特征参量(大事件、小事件、总事件与能率)之间的内在规律，在应力 - 应变本构关系曲线中，图 5(a), (c)描述平行层理加载模式下的本构特征，图 5(b), (d)描述垂直层理加载模式损伤特征，为了更加准确地反映大尺寸煤样损伤变形与 AE 特征参数之间的规律和特征，采取多项式拟合(fit polynomial)分析，得出如下定量规律：

(1) 平行层理加载模式：

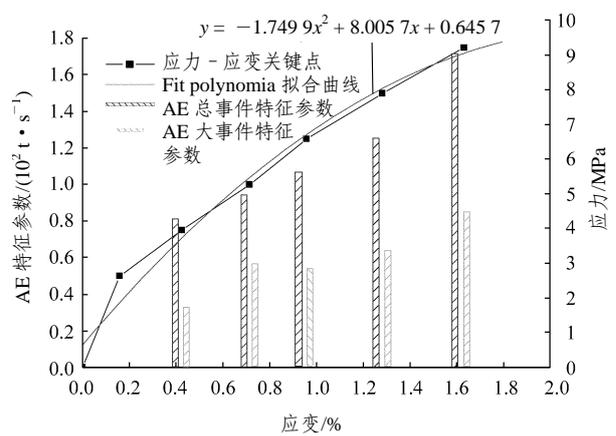
$$y = 14.158 \ 9x^2 - 0.222 \ 6x + 0.006 \ 7$$

表 1 压缩状况下不同加载模式造成大尺寸煤样损伤变形统计
Table 1 Damage and crack statistics of large coal specimen under different compressive models

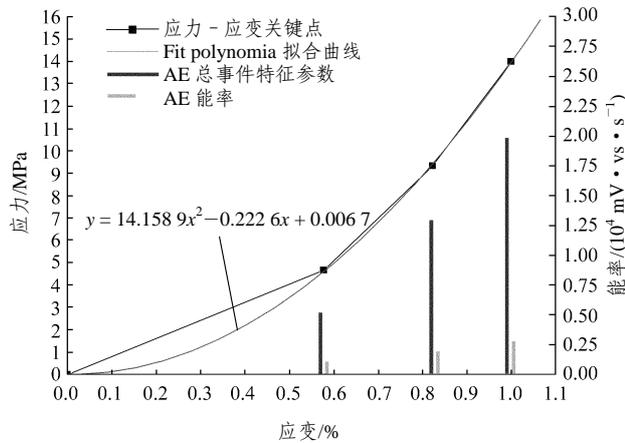
加载模式	平行层理加载						垂直层理加载								
	参数序列	应力 /MPa	应变 /%	总事件 /(10^2 个/s)	能率/ (10^4 mV·vs·s $^{-1}$)	小事件数量 /(10^2 个/s)	大事件数量 /(10^2 个/s)	n /%	应力 /MPa	应变 /%	总事件 /(10^2 个/s)	能率/ (10^4 mV·vs·s $^{-1}$)	小事件数量 /(10^2 个/s)	大事件数量 /(10^2 个/s)	n /%
1		0.000	0	-	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-
2		4.662	0.578	2.66	0.39	1.75	0.91	36.4	2.629	0.158	0.50	0.18	0.35	0.15	30.0
3		9.324	0.823	3.22	0.98	1.47	1.75	54.3	3.945	0.424	0.83	0.23	0.50	0.33	39.8
4		13.986	0.992	4.07	1.30	2.52	1.55	38.0	5.259	0.714	0.95	0.97	0.39	0.56	58.9
5		-	-	-	-	-	-	-	6.574	0.958	1.09	0.69	0.54	0.55	50.4
6		-	-	-	-	-	-	-	7.889	1.282	1.28	2.21	0.65	0.63	49.2
7		-	-	-	-	-	-	-	9.204	1.632	1.82	4.70	0.95	0.87	47.8



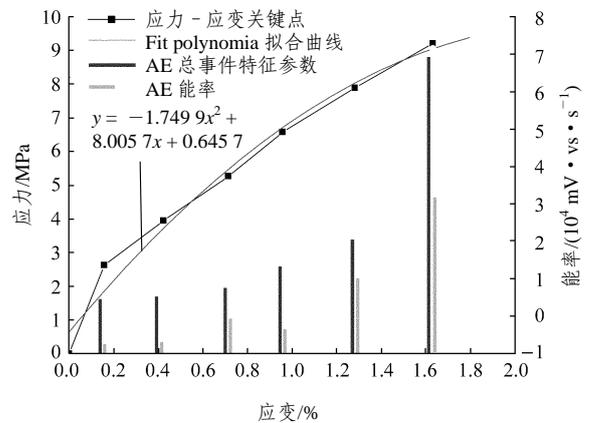
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 大尺寸煤样应力 - 应变本构与声发射特征参数关系特征

Fig.5 Relationship between stress-strain constitutive and AE characteristics parameters of large size coal samples

式中: y 为应力(σ), x 为应变(ε)。

(2) 垂直层理加载模式下:

$$y = -1.749 9x^2 + 8.005 7x + 0.654 7$$

从以上分析表明, 由于加载模式不同, 煤样初始损伤与破裂的 AE 密集程度也不同, 在同一加载模式下, 不同尺寸、结构或组分煤样损伤特征以及定量化指标参数(时间、空间和强度)具有明显差异性, 对于小尺寸圆柱体试验, 其压缩强度比大尺寸煤样试件要高, 起裂时间晚, 损伤及破裂的 AE 数目少, 能率要高于大尺寸事件。AE 大事件、总事件和能率异常带就是微裂纹萌生带, 其与应力关系曲线上的拐点就是煤岩介质局部破坏的起始点, 表现在宏观上就是(采空区)煤体结构失稳起点。

4 煤介质损伤程度分析

材料损伤过程中微小体积变化可以看作密度变化($\Delta\rho$, 该参量很小), 从岩石损伤细观角度分析, Z. Bazant 和 E. P. Chen^[12]对不同尺寸(D)的几何相似结构分析得出一个带有未知常数指数 m 的幂函数率。S. C. Blair 等^[13, 14]采用统计学方法研究材料的非线性行为以及由于颗粒尺寸和形状的变化引起的应力场微观均匀性。作彦卿^[15]根据 CT 物理原理定义了岩石密度损伤增量(ΔD), 提出了 CT 数与岩石密度损伤增量的定量关系式。丁卫华等^[16, 17]基于 X 射线密度损伤增量公式, 推导出岩石体应变公式, 得到岩石内部裂纹宽度的普适性计算公式。陈忠辉等^[18]利用数值模拟分析了岩石二维网络系统损伤演化过程, 发现随着损伤累积、微破裂不可逆地向临界状态演化, 损伤局部化现象明显, 且可与声发射的时间序列和空间序列进行对比。但以上研究对不同层理结构条件下的大尺寸煤样压缩过程中局部化损伤程度状况均没有涉及。M. Cai 等^[19, 20]基于现场测试, 对脆性岩石初始破裂 AE 临界参数(A)和应力-应变进行了综合定量分析。岩石损伤、变形与破裂普遍经历压密和扩容阶段, 损伤部位具有明显的差异性。为了直观地反映大尺寸煤样局部化损伤程度, 定义了损伤程度百分比 $n(\%)$, 其定量地反映煤体介质局部损伤与破裂密集程度, 图 6 反映了不同加载模式下损伤程度对比。

$$n = \frac{\sum(Large_AE)}{\sum(Total_AE)} \times 100 \quad (4)$$

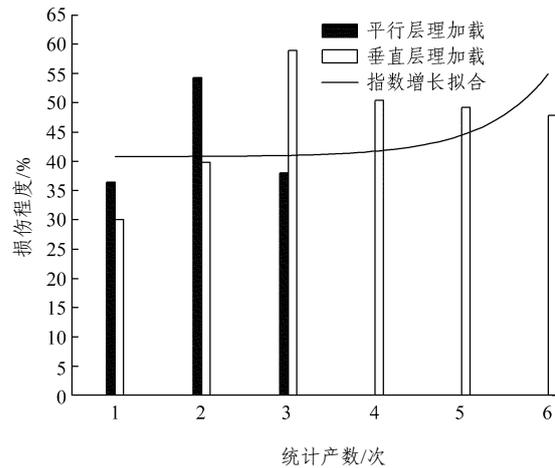


图 6 不同加载模式下煤损伤程度统计对比
Fig.6 Comparison of coal damage degree in various loading models

通过不同加载模式下、结构和尺寸煤样 AE 特征试验, 证实在大破裂或失稳前(临界状态)损伤演化的一系列复杂现象, 如样本个性、临界敏感性等。试验过程中反映出临界失稳前夕声发射信号与外载信号间调制关系的紊乱, 这与材料在进入自驱动阶段后对外载的敏感性变弱以及动力失稳前的加卸载响应比下降具有相同机制, 这有可能引发采空区煤体介质动力失稳预报的新思路。

5 结 论

通过不同加载模式下大尺寸煤岩介质损伤、变形与破坏的 AE 特征对比分析, 得出以下结论:

(1) 由于煤岩微观损伤、变形、破裂与宏观动态失稳之间具有内在的必然联系, 在小煤样单轴试验基础上, 完成大尺寸立方体试件损伤变形与破坏的 AE 特征试验及规律分析, 为理论分析、数值模拟及提高动力失稳预报的时、空、强精度提供了必要的条件。

(2) 态矢量能较为定量地描述煤岩介质材料破坏的进程及其破坏程度, 态矢量与非均匀性煤岩损伤本构特征以破裂时能量加速释放等演化过程具有一致性, 从而能够对灾变破坏做出预测。

(3) 为直观反映大尺寸煤样局部化损伤程度, 基于态矢量相关指标分析, 定义了损伤程度百分比 $n(\%)$, 其定量地反映岩体局部损伤与破裂密集程度。

(4) 大尺寸煤岩损伤变形及破裂过程中的 AE 规律, 对于预测预报强震区大尺度采空区动力失稳及衍生灾害具有一定的理论指导和工程实践意义。

参考文献(References):

- [1] 白以龙, 汪海英, 夏蒙芬, 等. 固体的统计细观力学—连接多个耦合的时空尺度[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 286 - 304.(BAI Yilong, WANG Haiying, XIA Mengfen, et al. Statistical meso-mechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(2): 286 - 304.(in Chinese))
- [2] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151 - 171.
- [3] RUDAJEV V, VILHELM J, LOKAJÍK T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 699 - 704.
- [4] 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 - 1 565.(XU Tao, YANG Tianhong, 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 - 1 565.(in Chinese))
- [5] 王学滨, 潘一山, 杨小彬. 准脆性材料试件应变软化尺度效应理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 188 - 191.(WANG Xuebin, PAN Yishan, YANG Xiaobin. Size effect analysis on strain softening of quasi-brittle materials considering strain gradient effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 188 - 191.(in Chinese))
- [6] 杨栋, 冯增朝, 赵阳升. 大煤样瓦斯抽放试验研究及尺寸效应现象[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 4 912 - 4 915.(YANG Dong, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Testing study of gas outburst in big coal sample and phenomenon of dimensional effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 4 912 - 4 915.(in Chinese))
- [7] 陆菜平, 窦林名, 谢耀社, 等. 煤样三轴围压钻孔损伤演化冲击试验模拟[J]. 煤炭学报, 2004, 29(6): 659 - 662.(LU Caiping, DOU Linming, XIE Yaoshe, et al. Experimental simulation of drilling impact of coal sample in three-axle enclosed pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(6): 659 - 662.(in Chinese))
- [8] 来兴平. 华亭煤矿开采动力灾害预测及安全防御技术研究[R]. 西安: 西安科技大学教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 2006.(LAI Xingping. Research on dynamical hazard prediction and its prevention due to mining at Huating Coal Mine[R]. Xi'an: China Educational Ministry Key Laboratory of Western Safe Mining and Hazard Control, Xi'an University of Science and Technology, 2006.(in Chinese))
- [9] 张立杰, 蔡美峰, 来兴平, 等. 基于 AE 的深部复变环境下急倾斜特厚煤层开采动力失稳分析[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(1): 1 - 4.(ZHANG Lijie, CAI Meifeng, LAI Xingping, et al. Dynamical destabilization analysis of steep and heavy thick coal seam in a deep-mining under the complex-variable environment based on AE[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [10] 尹祥础, 余怀忠, 张永仙, 等. 态矢量——分析地震活动性的一种新方法[J]. 中国地震, 2004, 20(1): 73 - 79.(YIN Xiangchu, YU Huaizhong, ZHANG Yongxian, et al. State Vector—A new method to analysis seismicity[J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(1): 73 - 79.(in Chinese))
- [11] 余怀忠, 尹祥础, 张永仙, 等. 态矢量方法的试验研究[J]. 地震, 2004, 24(3): 1 - 7.(YU Huaizhong, YIN Xiangchu, ZHANG Yongxian, et al. Experimental study of state vector[J]. Earthquake, 2004, 24(3): 1 - 7.(in Chinese))
- [12] BAZANT Z, CHEN E P. 结构破坏的尺度律[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 383 - 433.(BAZANT Z, CHEN E P. Scaling of structural failure[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(3): 383 - 433.(in Chinese))
- [13] BLAIR S C, COOK N G. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques—part I: a nonlinear rule-based model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 837 - 848.
- [14] BLAIR S C, COOK N G. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques—part II: effect of microscale heterogeneity on macroscopic deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 849 - 861.
- [15] 仵彦卿, 丁卫华, 蒲毅彬, 等. 压缩条件下岩石密度损伤增量的 CT 动态观测[J]. 自然科学进展, 2000, 10(9): 830 - 835.(WU Yanqing, DING Weihua, PU Yibin, et al. CT dynamic measurements of density damaged increment of rock under triaxial compression[J]. Nature Science Progress, 2000, 10(9): 830 - 835.(in Chinese))
- [16] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. 基于 X 射线 CT 的岩石内部裂纹宽度测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1 421 - 1 425.(DING Weihua, WU Yanqing, PU Yibin, et al. Measurement of crack width in rock interior based on X-ray CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1 421 - 1 425.(in Chinese))
- [17] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. 低应变率下岩石内部裂纹演化的 X 射线 CT 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 793 - 1 797.(DING Weihua, WU Yanqing, PU Yibin, et al. X-ray CT approach on rock-interior crack evolution under low strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 793 - 1 797.(in Chinese))
- [18] 陈忠辉, 唐春安, 傅宇方. 岩石破裂演化诱致突变的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 9 - 15.(CHEN Zhonghui, TANG Chun'an, FU Yufang. Infinite element simulation of catastrophe induced by evolution of rock micro-fracturing damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 9 - 15.(in Chinese))
- [19] CAI M, KASIER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 833 - 847.
- [20] CAI M, KAISER P K, MARTIN C D. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(8): 1 135 - 1 145.

收稿日期: 2007 - 01 - 05; **修回日期:** 2007 - 03 - 29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10402033, 10772144)

作者简介: 来兴平(1971 -), 男, 博士, 1993 年毕业于西安矿业学院采矿工程系, 现任教授, 主要从事岩石力学及工程、采矿工程、采空区衍生灾害预报与工程治理方面的教学与研究工作。E-mail: Lxptest@yahoo.com.cn