

# 不同加载速率下类煤岩力学特性及损伤演化规律研究

赵振龙<sup>1,2</sup>, 赵 坤<sup>3</sup>, 王 晓<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**为研究加载速率对试件强度、变形以及破坏形式的影响,利用刚性试验机对类煤岩试件进行了不同加载速率的单轴压缩试验。借助于颗粒离散元程序 PFC 建立了煤岩平行黏结颗粒模型,并对不同加载速率下试件内部损伤破裂的声发射信息进行了实时记录;基于数值模型的声发射信息建立了煤岩损伤演化方程。结果表明:随着加载速率的增大,试件单轴抗压强度增大,并且试件破坏形态从多宏观断裂面的 X 形、V 形、Y 形向单一宏观断裂面转变,整体破碎程度降低;随着加载速率的增大,试件变形破裂过程中,应力峰值附近的声发射率明显升高,表现出声发射活动更为剧烈;试件损伤演化过程基本上分为初始损伤阶段、损伤稳定发展阶段和损伤迅速发展阶段,加载速率对损伤演化的影响主要集中于损伤稳定发展阶段,即加载速率越大,试件越早进入损伤稳定发展阶段。

**关键词:**煤岩破坏;煤岩变形;声发射;煤岩力学特征

**中图分类号:**TD313 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)10-0041-07

## Study on mechanical characteristics and damage evolution law of coal-rock-like under different loading rates

ZHAO Zhenlong<sup>1,2</sup>, ZHAO Kun<sup>3</sup>, WANG Xiao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;  
2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;  
3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study the influence of loading rate on the strength, deformation and failure modes of specimens, the uniaxial compression tests of coal-rock-like specimens at different loading rates are carried out by stiff testing machine. A parallel bonding particle model of coal and rock is established by means of the particle discrete element program (PFC) and acoustic emission information of specimens damage under different loading rates is recorded in real time. Based on the acoustic emission information of numerical model, the evolution equation of coal and rock damage is established. The results showed that uniaxial compressive strength continually increases with the increase of loading rate; with the increase of loading rate, specimen failure mode transforms from X、V、Y types to a single macro fracture; with the increase of loading rate, the acoustic emission rate is obviously higher near the peak stress; damage evolution process is basically divided into the initial damage phase, damage stable development phase and damage rapid development phase; the influence of loading rate on the damage evolution is mainly focused on the stable development phase.

**Key words:** coal and rock destruction; coal and rock deformation; acoustic emission; coal and rock damage mechanical characteristics

## 0 引 言

随着浅部煤炭资源的开采殆尽,以及向深部要

资源的“深部采矿”战略的实施,对各种复杂条件下煤岩体力学特性的研究越来越引起人们的高度重视<sup>[1-3]</sup>。煤岩体的力学性质,包括力学响应机制、

收稿日期:2017-06-05;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.10.007

作者简介:赵振龙(1992—),男,山东日照人,硕士研究生。Tel:13864848090,E-mail:zl\_zhao\_cn@163.com

引用格式:赵振龙,赵 坤,王 晓.不同加载速率条件下类煤岩试件力学特性及损伤演化规律研究[J].煤炭科学技术,2017,45(10):41-47.

ZHAO Zhenlong, ZHAO Kun, WANG Xiao. Study on mechanical characteristics and damage evolution law of coal-rock-like under different loading rates[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 41-47.

本构方程等,是采矿工程设计与施工的重要基础。煤炭开采过程中,由于煤层赋存条件及开采技术条件的不同,受采动应力、构造应力、施工扰动等的影响,煤体或岩体常处于不同荷载速率的影响下。因此,通过探讨煤岩体在不同加载速率下的力学特性及损伤演化规律,对采矿工程的设计与施工及围岩的稳定性评价与预测都具有非常重要的实际意义。

学术界和工程界对煤体或岩体在不同加载速率下的力学性质进行了大量研究。潘一山等<sup>[4]</sup>利用自主研制的煤岩电荷感应单轴压缩试验系统,研究了煤、花岗岩、砂岩在不同加载速率下的电荷感应规律。张宏伟等<sup>[5]</sup>通过试验分析加载速率对煤样力学特性影响,确定了具体煤层赋存条件下孤岛工作面合理的推进速度。Alam等<sup>[6]</sup>研究了砂岩在静态和动态压缩应变速率下的力学行为。李海涛等<sup>[7]</sup>通过对煤样进行多加载速率力学试验,研究了冲击倾向性评价指标随加载速率的变化规律。曹安业等<sup>[8]</sup>研究了不同加载速率下砂质泥岩的损伤演化规律与声发射参量特征。

鉴于以上研究,笔者从宏观与细观相结合分析的角度入手,设计了多组不同加载速率下的单轴压缩试验。首先,应用电液伺服刚性试验机对多组类煤岩试件进行不同速率的力学加载,分析不同加载速率对试件强度、变形及破坏形式的影响;在室内试验的基础上,通过颗粒离散元程序 PFC (particle flow code) 建立二维颗粒黏结模型 BPM (bonded particle model), 进行加载速率对模型声发射信息的数值分析;基于声发射信息建立煤岩损伤演化方程,分析不同加载速率对损伤演化过程的影响,旨在从宏细观相结合的角度,为研究加载速率效应影响下的煤岩变形破裂机制提供新的思路。

## 1 试 验

### 1.1 试件制备

由于自然条件下的煤体和岩体形成过程非常复杂,地质现场制取的原岩试件离散性较大,因此,在实验室利用钢制模具,人工配制标准类煤岩试件。在查阅相关文献的基础上<sup>[9-11]</sup>,采用白水泥、细沙、石膏、水、硅藻泥,按照 0.5 : 1 : 0.2 : 0.4 : 0.003 的质量比进行类煤岩材料试件的配制。试件制备过程中,为减少试件中的气泡,保证试件的均质度,将材料搅拌均匀后,水平浇注到 100 mm × 100 mm × 200

mm 尺寸的方形钢制模具中,并在振动台上震动 1 min 左右,24 h 后拆模,在 25 ℃ 恒温恒湿养护箱中养护 21 d。养护结束后,选取两端面的不平行度和不垂直度均小于 0.002 mm,且表面光滑没有明显的可见缺陷的试件进行接下来的试验研究,如图 1 所示。



图1 试件照片

Fig. 1 Specimens photo

### 1.2 试验设备及方案

利用电液伺服刚性试验机进行力学加载。该试验机的最大垂向荷载达 4 500 kN,变形控制采取多支位移传感器平均值,测量控制精度达到示值的  $\pm 0.1\%$ 。力控制模式下,加载速率最小和最大值分别为 0.01、100.00 kN/s;位移控制模式下,位移加载速率最小和最大值分别为 0.1、100.0 mm/min。该试验机的加载范围和精度足以满足本次试验的要求。

通常情况下,应变速率小于  $10^{-4}/s$  属于低应变速率;  $(10^{-4} \sim 10^2)/s$  属于中等应变速率;大于  $10^2/s$  属于高应变速率,即动态加载。笔者在低应变速率和中等应变速率范围内设计位移加载速率分别为  $\nu_a = 0.01$  mm/s,  $\nu_b = 0.02$  mm/s,  $\nu_c = 0.05$  mm/s,  $\nu_d = 0.10$  mm/s 的 4 组试验。试验方案及步骤如下:

1) 将试件随机分为 4 组 (A、B、C、D 组),每组 4 个试件,分别编号为 A-1、A-2、A-3、A-4 ( $\nu_a = 0.01$  mm/s), B-1、B-2、B-3、B-4 ( $\nu_b = 0.02$  mm/s), C-1、C-2、C-3、C-4 ( $\nu_c = 0.05$  mm/s), D-1、D-2、D-3、D-4 ( $\nu_d = 0.10$  mm/s)。

2) 先以 0.5 kN/s 的力,给试件施加预应力到 5 kN,再分别以  $\nu_a$ 、 $\nu_b$ 、 $\nu_c$ 、 $\nu_d$  对各组试件进行位移加载,直到试件破坏,停止试验。

3) 重复上述步骤,完成 4 组不同加载速率的单轴压缩试验,并拍照记录试件的破坏形态。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 加载速率对试件力学特性的影响分析

在考虑试验的真实性及假定试验数据的可靠性的基础上,利用统计平均值法,对获得的 4 组试验数据进行了整理,见表 1。

表 1 试件峰值强度及峰值点应变  
Table 1 Strength and strain values of specimens

试件 编号	A 组				B 组				C 组				D 组			
	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4	C-1	C-2	C-3	C-4	D-1	D-2	D-3	D-4
峰值强 度/MPa	9.50	9.36	9.40	9.26	9.72	9.80	9.70	9.74	11.70	11.90	11.61	11.79	15.40	15.58	15.60	15.42
峰值点 应变/ $10^{-2}$	0.810	0.776	0.790	0.744	0.740	0.760	0.720	0.740	0.720	0.760	0.660	0.740	0.680	0.740	0.740	0.640

动态加载应变速率一般高于  $10^2/s$ ,而本次试验的加载速率在中低等应变速率范围内,所以不考虑动载效应。A 组试件的平均单轴抗压强度为9.38 MPa,峰值点平均应变为 0.78%;B 组试件的平均单轴抗压强度为 9.74 MPa,峰值点平均应变为0.74%;C 组试件的平均单轴抗压强度为 11.75 MPa,峰值点平均应变为 0.72%;D 组试件的平均单轴抗压强度为 15.50 MPa,峰值点平均应变为0.70%。试件 A-2、B-1、C-4、D-2 的峰值强度及峰值点应变与各组试件的平均值较接近,因此,选取该 4 个试件的试验数据进行分析。

当加载速率为 0.01 mm/s 时,试件达到峰值应力的时间为 80 s 左右;当加载速率为 0.10 mm/s 时,试件达到峰值应力的时间只有 6 s 左右。试件 A-2、B-1、C-4、D-2 的应力-应变曲线如图 2 所示,试件在不同加载速率下的应力-应变曲线的走势基本一致,不论加载时间的长短,试件的破坏过程都可以归纳为压实阶段、弹性变形阶段、非线性变形阶段及峰后应变软化阶段 4 个阶段,反映了煤岩体变形破坏的一般性规律。

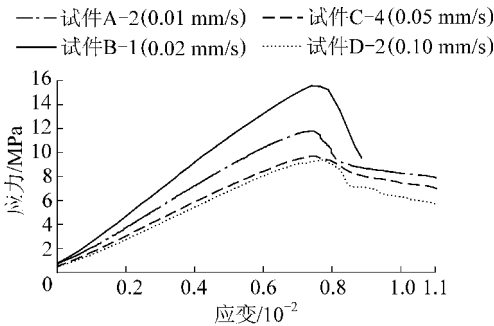


图 2 试件的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of specimens

由图 2 可知,随着加载速率的增加,试件单轴抗压强度增加,峰值点应变值减小。分析其原因,加载速率较低时,微小裂隙不断发育、扩展,峰值破坏前试件内部已发生较大的损伤,致使试件整体的单轴抗压强度降低。加载速率较大时,试件内部的微小

裂隙未能充分发育、扩展,使得试件内部具有更好的完整性,从而表现出试件的单轴抗压强度随加载速率增加而增大的现象。

2.2 加载速率对试件破坏形态的影响分析

不同加载速率下试件峰值破坏形态如图 3 所示。由图 3 可知,加载速率为 0.02 mm/s 时,宏观断裂面呈现 V 形;加载速率为 0.05 mm/s,宏观断裂面呈现 Y 形,即锥形破坏的形态;加载速率为 0.10 mm/s 时,试件沿对角线破坏,呈现出剪切破坏特点,并且沿宏观断裂面有轴向微小裂纹的生成。加载速率越大,破坏越集中于某一宏观断裂面,破坏形态从多宏观断裂面向单一宏观断裂面转变,整体破碎程度降低。主要原因,加载速率较小时,模型中的微小裂纹不断生成、扩展和贯通,导致破碎程度较大;加载速率较大时,试件中的力来不及充分传递、微裂纹来不及扩展,当弹性应变能积聚到一定程度,能量便迅速沿某一最薄弱的方向释放,从而形成单一的宏观断裂面,在一定程上能引发岩爆现象。



图 3 不同加载速率下试件峰值破坏形态

Fig. 3 Peak failure pattern of specimens under different loading rates

3 数值模拟分析

3.1 PFC 简介

颗粒流程序 PFC 是 Itasca 公司在颗粒离散元理论基础开发的一种数值软件,它通过微小单元体(颗粒)细观参数的改变去实现模型的宏观力学行为。

为了模拟不同岩土介质之间的性质,定义了 3 种颗粒之间的接触:点接触、线接触和平行黏结接触。其中,平行黏结是颗粒之间面的黏结,既可以传递力,



也可以传递力矩,并且接触刚度和黏结刚度共同组成宏观刚度,适合模拟煤岩类材料,如图 4 所示。其中, $L$  为颗粒的圆心距; $\bar{L}$  为颗粒间平行黏结的厚度; $\bar{R}$  为平行黏结的作用半径; $l$  为平行黏结的长度; $T$  为作用于平行黏结上的法向应力; $V$  为作用于平行黏结上的切向应力; $M$  为作用于平行黏结上的力矩。

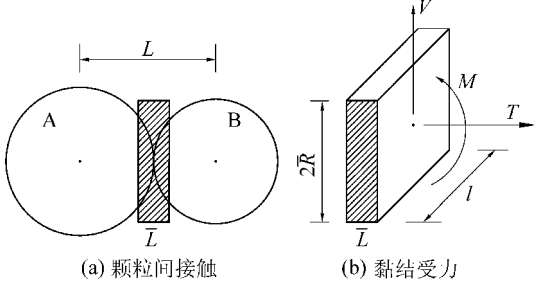


图 4 二维平行黏结模型颗粒间受力示意  
Fig. 4 Diagram of two-dimensional parallel bond model between particles

3.2 模型建立及细观物理力学参数确定

为了更深入地研究加载速率对试件破坏机制的影响,借助于颗粒离散元程序 PFC 建立二维的煤岩黏结颗粒模型 BPM (bonded particle model), 研究分析不同加载速率下的细观裂纹扩展规律。

参考以往的研究<sup>[12-14]</sup>,所建模型的尺寸为 100 mm (宽)×200 mm (高),通过“试错法”反复调整,使数值模型的力学响应接近室内试验的力学响应。不同加载速率下的应力-应变曲线如图 5 所示,不同加载速率下的数值模型破坏形态如图 6 所示,与图 3 对应较好。通过应力-应变和破坏形态对模型进行数值调参后,最终确定的模型参数为最小粒径 0.30 mm,粒径比 1.67,粒径范围 0.3~0.5 mm,颗粒数 8 753 个,密度为 1 800 kg/m<sup>3</sup>,摩擦系数 0.46,颗粒接触模量 1.0 GPa,颗粒平行黏结模量 12 GPa。

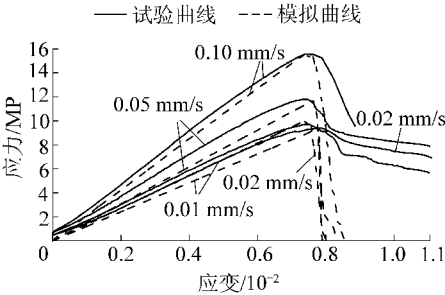


图 5 不同加载速率下的应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curves under different loading rates

PFC 中通过时步控制墙的运动来实现加载过程。为了与室内试验对应,本次模拟控制上下墙的

运动速率为 0.01、0.02、0.05、0.10 mm/s。在数值模型建立并达到平衡状态后,通过 FISH 语言删除模型左右两侧的墙,保留上下方向的墙,通过调整上下墙的运动给模型施加轴向荷载,完成单轴压缩试验,并实时记录模型内的裂纹生成及扩展情况。

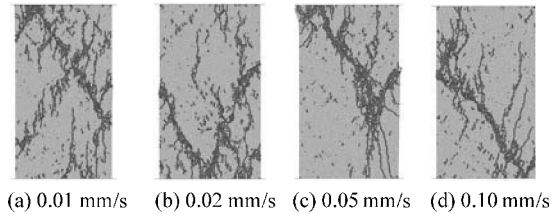


图 6 不同加载速率下试件峰值破坏形态  
Fig. 6 Peak failure pattern of specimens under different loading rates

3.3 数值试验结果及分析

3.3.1 加载速率对声发射特性的影响分析

试件 A-2、B-1、C-4、D-2 轴向应力及声发射率随应变变化的曲线如图 7 所示。

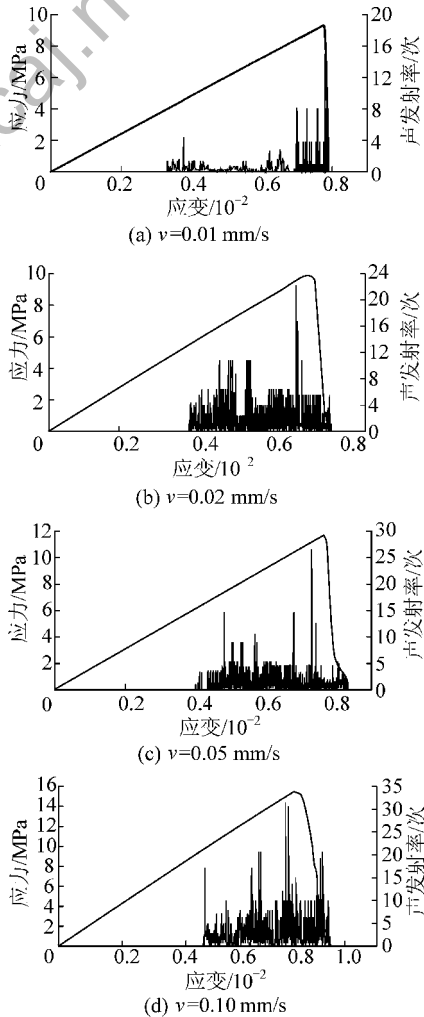


图 7 不同加载速率下的应力-声发射率-应变曲线  
Fig. 7 Stress-AE rate-strain curves under different loading rates

声发射是与煤岩材料内部损伤密切相关的能量释放现象,对加载过程中声发射信息的研究有助于揭示外力作用下煤岩试件内部微裂隙萌生、扩展的损伤演化过程<sup>[15-17]</sup>。

不同加载速率下试件的声发射率变化规律大致相同:在压密阶段和线弹性阶段的前期声发射率较低,表明在该阶段内试件内部有少量微裂隙的产生;在弹性变形的后期,声发射率整体水平增加,突增点增多;随着加载的继续,试件裂纹迅速扩展,声发射信号越来越剧烈,在峰值点附近,声发射信号迅速增加,产生的瞬时声发射率最多;峰值破坏后,声发射率迅速下降,但是由于个破碎块体之间的滑移、摩擦,仍然有少量声发射信号的产生。

比较不同加载速率下的声发射率,随着加载速率的增大,声发射率明显升高,表现出声发射活动更为剧烈,主要是由于在低应变率下,试件内微小裂隙缓慢发育和扩展,而较快的加载速率使本应当在低应变率下就能够诱发的微裂隙来不及发展,能量不断积聚,在应力峰值点附近导致突然释放,产生较大的瞬时声发射率。由此可得,加载速率对煤岩材料声发射信号的影响是显著的,不同加载速率下的声发射信号生成量具有明显的不同。因此,在煤炭开采过程中,可通过声发射信号的强弱以及剧烈变化的程度来预测煤岩体的受力情况和稳定性。

### 3.3.2 煤岩损伤演化关系模型

就细观角度而言,损伤就是指材料在外部荷载作用下,原生缺陷不断扩展、新生裂纹不断生成,最终导致材料表现为整体破坏的现象<sup>[18]</sup>。针对不同的问题,利用先进的技术设备,国内外学者就煤体和岩体细观损伤进行了大量研究。如,谢和平等<sup>[19]</sup>和 Dragon 等<sup>[20]</sup>将损伤力学应用于煤岩和混凝土类材料,并建立了相应的连续介质模型;彭瑞东等<sup>[21]</sup>从能量转化的角度研究三轴循环加卸载模式下煤岩损伤演化过程;柴红保等<sup>[22]</sup>进行了煤岩损伤演化本构模型的构建。煤岩体的宏观变形破坏是内部微细观裂纹损伤演化的结果,内部微裂纹的生成会以弹性能的形式释放,称这种现象为煤岩的声发射现象。因此,笔者选用声发射信息进行损伤本构关系的研究。

设试件初始横截面积为  $A_0$ ,荷载作用下某一时刻横截面上出现损伤的面积为  $A_D$ ,材料的初始损伤(或原始损伤)为  $D_0$ 。将材料在某一时刻的损伤因子定义为

$$D = A_D/A_0 + D_0 \quad (1)$$

假设试件在原始状态下没有损伤,即

$$D_0 = 0$$

则

$$D = A_D/A_0 \quad (2)$$

因为  $A_D \leq A_0$ ,所以损伤变量  $D$  为 0~1,并且材料损伤程度越大,该值越大。

设试件横截面积  $A_0$  完全损伤时声发射累积计数为  $S_d$ ,则单位面积损伤的声发射累积计数  $S_0$  为

$$S_0 = S_d/A_0 \quad (3)$$

所以,当损伤面积达到  $S_D$  时,声发射累积次数  $S_D$  为

$$S_D = S_0 A_D = \frac{S_d}{A_0} A_D = S_d D \quad (5)$$

因此,通过声发射信息表示的任意时刻的损伤变量  $D$  为

$$D = S_D/S_d \quad (6)$$

选取峰后轴向应力为峰值应力的 0.7 倍为试件完全损伤点。通过式(6)及声发射累积计数得到数值模型的损伤变量  $D$  随应变的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,试件的损伤演化过程可分为初始损伤阶段( $a-b$  段),损伤稳定发展阶段( $b-c$  段)和损伤加速发展阶段( $c-d$  段)。

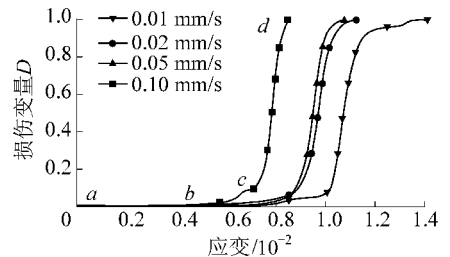


图 8 不同加载速率下损伤变量-应变关系曲线

Fig. 8 Damage variable-strain curves under different loading rates

初始损伤阶段基本对应于应力-应变曲线的初始压密阶段和弹性变形阶段的前期和中期,该阶段内损伤变量基本为 0。损伤稳定发展阶段,对应试件应力-应变曲线的弹性阶段后期和非线性变形阶段,该阶段内损伤变量基本上呈线性发展。峰值点之后损伤进入快速发展阶段,该阶段内损伤变量的变化程度最为剧烈。损伤与应变的关系曲线进一步说明了煤岩体损伤破坏的渐进式过程:由初始压密、弹性变形,到损伤开始稳定发展,再到峰值破坏,直至峰后损伤迅速发展的全过程。

加载速率对损伤发展的影响主要表现在  $b-c$

段,即损伤稳定发展阶段。加载速率越大,试件开始进入损伤稳定发展阶段的 $b$ 点的应变值越小,且 $b$ - $c$ 段的应变范围越小。分析其原因,加载速率越大,试件在初始损伤阶段储存能量的时间越快,导致试件来不及变形就进入损伤稳定发展阶段;进入损伤稳定发展阶段后,能量进入释放阶段,加载速率越大,能量释放速率越快,导致试件越快进入损伤迅速发展阶段。

## 4 结 论

1)加载速率能够影响类煤岩试件的力学特性。随着加载速率的增加,试件应力峰值点的应变值减小,弹性模量及单轴抗压强度增大。

2)加载速率能够影响类煤岩试件的破坏形态。随着加载速率越大,损伤破坏越集中于某一宏观断裂面,破坏形态从多宏观断裂面向单一宏观断裂面转变,试件整体破碎度程度降低。

3)加载速率对煤岩材料声发射信号的影响是显著的,不同加载速率下的声发射信号生成量具有明显的不同,即,随着加载速率的提高,声发射率明显升高,峰值点附近声发射活动活动更为剧烈。

4)基于声发射累积计数建立的损伤方程可较好地反映不同加载速率影响下的煤岩损伤演化过程,即煤岩的损伤演化过程可分为初始损伤、损伤稳定发展、损伤加速发展3个阶段,并且加载速率对损伤过程的影响主要表现在损伤稳定发展阶段。

## 参考文献(References):

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.  
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, *et al.* Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, *et al.* Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.
- [3] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.  
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [4] 潘一山,唐治,李忠华,等.不同加载速率下煤岩单轴压缩电荷载感规律研究[J].地球物理学报,2013,56(3):1043-1048.  
PAN Yishan, TANG Zhi, LI Huazhong, *et al.* Research on the

charge inducing regularity of coal rock at different loading rate in uniaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 1043-1048.

- [5] 张宏伟,李云鹏,陈莹,等.三硬条件下孤岛工作面安全推进速度研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):6-11.  
ZHANG Hongwei, LI Yunpeng, CHEN Ying, *et al.* Study on safety pushing forward speed of island coal mining face under hard roof and hard seam and hard floor conditions[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 6-11.
- [6] ALAM M S, CHAKRABORTY T, MATSAGAR V, *et al.* Characterization of kota sandstone under different strain rates in uniaxial loading[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(1): 1-10.
- [7] 李海涛,宋力,周宏伟,等.率效应影响下煤的冲击特性评价方法及应用[J].煤炭学报,2015,40(12):2763-2771.  
LI Haitao, SONG Li, ZHOU Hongwei, *et al.* Evaluation method and application of coal burst performance under the effect of loading rate[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2763-2771.
- [8] 曹安业,井广成,窦林名,等.不同加载速率下岩样损伤演化的声发射特征研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):923-928.  
CAO Anye, JING Guangcheng, DOU Linming, *et al.* Evolution law based on acoustic emission of sandy mudstone under different uniaxial loading rate[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(6): 923-928.
- [9] 杨磊,李术才,郭彦双,等.三维裂隙间距对砂浆材料力学特性的影响[J].岩土力学,2010,31(1):32-38.  
YANG Lei, LI Shucai, GUO Yanshuang, *et al.* Influence of space between 3D-cracks on mechanical feature of mortar material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 32-38.
- [10] 蔺海晓,杜春志.煤岩拟三轴水力压裂实验研究[J].煤炭学报,2011,36(11):1801-1805.  
LIN Haixiao, DU Chunzhi. Experimental research on the quasi three-axis hydraulic fracturing of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1801-1805.
- [11] 赵程,田加深,松田浩,等.单轴压缩下基于全局应变场分析的煤岩裂纹扩展及其损伤演化特性研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):763-769.  
ZHAO Cheng, TIAN Jiashen, MATSUDA Hiroshi, *et al.* Crack propagation and damage of rock under uniaxial compression based on global strain field analysis[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 763-769.
- [12] 王云飞,黄正均,崔芳.煤岩破坏过程的细观力学损伤演化机制[J].煤炭学报,2014,39(12):2390-2396.  
WANG Yunfei, HUANG Zhengjun, CUN Fang. Damage evolution mechanism in the failure process of coal rock based on mesomechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2390-2396.
- [13] 张学朋,王刚,蒋宇静,等.基于颗粒离散元模型的花岗岩压缩试验模拟研究[J].岩土力学,2014(S1):99-105.  
ZHANG Xuepeng, WANG Gang, JIANG Yujing, *et al.* Simulation

- research on granite compression test based on particle discrete element model[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35:99-105.
- [14] 刘洪磊,王培涛,杨天鸿,等.基于离散元方法的花岗岩单轴压缩破裂过程的声发射特性[J].煤炭学报,2015,40(8):1790-1795.
- LIU Honglei, WANG Peitao, YANG Tianhong, *et al.* Mechanical characteristics of granite under uniaxial compressive and AE monitoring test using particle flow code[J].Journal of the China Coal Society,2015,40(8):1790-1795.
- [15] 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(1):3234-3238.
- LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, *et al.* Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(1):3234-3238.
- [16] 李核归,张茹,高明忠,等.岩石声发射技术研究进展[J].地下空间与工程学报,2013,9(S1):1794-1804.
- LI Hegui, ZHANG Ru, GAO Mingzhong, *et al.* Advances in technology of acoustic emission of rock[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013,9(S1):1794-1804.
- [17] 贾炳,倪小明,苏承东.煤样加载过程声发射响应特征试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(7):33-36.
- JIA Bing, NI Xiaoming, SU Chengdong. Experimental study on response features of acoustic emission to coal samples during loading process[J].Coal Science and Technology,2014,42(7):33-36.
- [18] 谢和平.岩石混凝土损伤力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990.
- [19] 谢和平,陈志达.岩石的连续损伤力学模型探讨[J].煤炭学报,1988,13(1):32-42.
- XIE Heping, CHEN Zhida. Study of a rock model with continuous damage mechanics[J].Journal of China Coal Society,1988,13(1):32-42.
- [20] DRAGON A, MROZ Z. A continuum model for plastic brittle behavior of rock and concrete[J].International Journal of Engineering Science,1979,17(2):121-137.
- [21] 彭瑞东,鞠杨,高峰,等.三轴循环加卸载下煤岩损伤的能量机制分析[J].煤炭学报,2014,39(2):245-252.
- PENG Ruidong, JU Yang, GAO Feng, *et al.* Energy analysis on damage of coal under cyclical triaxial loading and unloading conditions[J].Journal of China Coal Society,2014,39(2):245-252.
- [22] 柴红保,曹平,赵延林,等.裂隙岩体损伤演化本构模型的实现及应用[J].岩土工程学报,2010,32(7):1047-1053.
- CHAI Hongbao, CAO Ping, ZHAO Yanlin, *et al.* Implementation and application of constitutive model for damage evolution of fractured rock mass[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(7):1047-1053.
- 处理研究方法[J].煤炭学报,2013,38(9):1646-1650.
- CHENG Jiulong, QIU Hao, YE Yuntao, *et al.* Research on wave-field transformation and data processing of the mine transient electromagnetic method[J].Journal of China Coal Society (in Chinese),2013,38(9):1646-1650.
- [29] 程久龙,陈丁,薛国强,等.矿井瞬变电磁法超前探测合成孔径成像研究[J].地球物理学报,2016,59(2):731-738.
- CHENG Jiulong, CHEN Ding, XUE Guoqiang, *et al.* Synthetic aperture imaging in advanced detection of roadway using the mine transient electromagnetic method[J].Chinese Journal of Geophys,2016,59(2):731-738.
- [30] TARANTOLA A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation[J].Geophysics,1984,49(8):1259-1266.
- [31] 孙怀凤,李貅,李术才,等.考虑关断时间的回线源激发TEM三维时域有限差分正演[J].地球物理学报,2013,56(3):1049-1064.
- SUN Haifeng, LI Xiu, LI Shucai, *et al.* Three dimensional FDTD modeling of TEM excited by a loop source considering ramp time[J].Chinese Journal of Geophys,2013,56(3):1049-1064.

(上接第15页)