

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.004

加载速率影响的煤体破裂过程声-电荷试验研究

肖晓春^{1,2}, 丁 鑫^{1,2}, 赵 鑫¹, 潘一山³, 王爱文¹, 王 磊¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030;
3. 辽宁大学 物理学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 为建立加载速率影响下煤体不同失稳形式的声发射-电荷判据, 以阜新五龙矿某工作面为研究对象, 采用物理试验研究方法, 开展了不同加载速率下煤体破裂过程声-电荷监测试验, 深入研究了加载速率影响的煤体力学性质、破裂规律和煤体破裂过程能量耗散与声发射-电荷信号的对应关系。研究表明: 加载速率越高, 应力调整越提前, 煤样单轴抗压强度增加, 累积变形能消耗加剧, 煤体失稳形式由静载失稳过渡到类动载扰动失稳, 煤体失稳破坏的动力特征明显, 压缩型冲击地压动力灾害发生几率增大; 不同加载速率下煤岩破裂过程产生的声-电荷信号变化与煤岩受载的应力突变具有较好的一致性; 对所用煤样的声发射-电荷信号进行量化分析, 初步提出了判定煤体失稳形式的声-电荷复合判定依据, 在不同矿区、不同工作面上, 可依据监测获得的声-电荷现场数据辅以采动应力场的变化情况, 对采动过速诱发的煤体压缩型冲击地压的发生几率进行预测和预警。

关 键 词: 加载速率; 煤体失稳形式; 能量耗散; 声-电荷复合判据; 煤体压缩型冲击地压

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 12-3419-08

Experimental study on acoustic emission and charge signals during coal failure process at different loading rates

XIAO Xiao-chun^{1,2}, DING Xin^{1,2}, ZHAO Xin¹, PAN Yi-shan³, WANG Ai-wen¹, WANG Lei¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. School of Physical, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110136, China)

Abstract: This study aims to establish a criterion of acoustic emission (AE) and charge signal for different failure forms of coal at various loading rates. Physical experiments were conducted on coal from a work-face of Wulong mine, and the AE and charge signals were monitored during the failure process of coal at different loading rates. Then we thoroughly investigated the relationships among AE-charge signals and mechanical properties, cracking, energy release at various loading rates. The results showed that with higher rates and earlier stress adjustment, uniaxial compressive strength improved, the release of accumulated deformation energy aggravated, failure modes changed from static load-induced instability to similarity-dynamic-load induced instability, more dynamic characteristics were present, and the risk of compressible rock burst of coal increased. At different loading rates, the AE-charge signal variations were consistent with stress mutation, which were further analysed quantitatively. Hence, based on the obtained AE-charge signals, we proposed a criterion for different coal failure modes. In different mines and work-faces, we could forecast or make an early warning to the risk of compressible rock-burst induced by mining, according to the monitored AE-charge signals in combination with variations of the mining pressure field.

Keywords: loading rates; failure forms of coal; energy release; AE-Charge composite criterion; rock-burst of coal compressible type

1 引 言

回采速度增加会导致单位时间内顶板下沉量变

大, 其作用等同于顶板煤岩层对煤体的加载速率增大, 可成为冲击地压发生的关键诱因。由岩石力学理论可知, 顶板煤岩层对煤体加载速率的变大对煤

收稿日期: 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.51374123, No.51774164); 国家自然科学基金青年项目 (No.51504029, No.51504122); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研究资助项目 (No.2011DA105287-FW 201605)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51374123, 51774164), the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (51504029, 51504122), the Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (2011DA105287-FW 201605).

第一作者简介: 肖晓春, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要在矿业工程领域从事煤矿动力灾害机制及预警、预测和低渗储层煤层气运移规律相关增采方法方面的研究工作。E-mail: xxc7902@163.com

体力学性质、冲击倾向性和破坏规律有显著影响,其影响不仅反映在煤岩系统的应力场和位移场变化上,也反映在受载煤体存储和耗散的能量变化上,特别是煤体受载过程释放的声发射、电荷等物理信号也会随着加载速率的变化而变化。因此,有必要开展不同加载速率下煤体力学性质及破裂过程声-电荷信号变化的研究工作,深入分析受加载速率影响的煤体变形破裂过程能量储存和耗散机制,研究煤体破裂形式、能量储存和耗散过程对应的声发射-电荷信号对应关系。可以为过速推采诱发的煤体冲击地压灾害的预警和防治提供试验基础和理论指导。

目前,在考虑加载速率影响的煤岩力学性质和破裂规律研究方面,姜耀东等^[1]研究了加载速率对岩石内能量积聚与耗散的影响规律;谢广祥^[2]和王金安^[3]等都对综放面开采速率对围岩应力环境影响进行了探讨;王磊等^[4]对综采面推进速度对煤岩动力灾害的影响进行了研究;尹光志等^[5-6]对不同卸压速度及不同加载方式下含瓦斯煤岩的力学和渗流特性进行了研究;李海涛等^[7-8]对不同加载速率下煤样的力学行为影响进行了试验研究。

在煤体破裂过程物理信号变化规律研究领域,潘一山等^[9-13]系统地煤岩变形破裂过程的电荷机制进行了研究;肖晓春等^[14-16]建立了基于颗粒物质力链失稳的煤岩体破裂判据,揭示了声发射-电荷信号幅值参数突变的剧烈程度是采动煤体失稳的重要前兆物理信息;Ma 等^[17]通过对比信号奇异值与加载参数的关系来探究单轴压缩状态下的煤岩声发射特征规律;Byun 等^[18]利用声发射监测技术来预测岩体的滑动破坏;苏承东等^[19]开展了不同应力路径下煤样变形破坏过程中的声发射特征试验;童敏明等^[20]对不同应力速率下含水煤岩声发射频谱特性进行了试验和分析;李宏艳等^[21]采用声发射探测手段对不同冲击倾向性煤体失稳破坏声发射前兆信息进行了分析;梁昌玉等^[22]对中低应变率加载条件下花岗岩尺寸效应的能量变化规律研究进行了研究;王恩元等^[23-24]对受载煤岩体变形破裂过程的声发射频谱特征及电磁辐射规律进行了深入的分析。综上所述,国内外许多学者在加载速率影响的煤体力学性质和破裂规律及其煤体破裂过程物理信号变化方面开展了较深入的研究工作,但不同加载速率作用下煤体的能量存储和耗散与其破裂过程声-电荷物理信号的对应关系方面的研究不够深入。基于此

现状,本文拟采用试验研究方法,从煤体变形破裂过程的能量积累-释放和对应的声-电荷信号的量化分析角度,对不同加载速率下煤体力学性质、破裂规律及其声-电荷信号变化进行系统研究。以期深入分析加载速率影响的煤体破裂发生机制,寻找因加载速率所致的冲击动力灾害发生的声-电荷信号判定依据。

2 试验方案与测试系统

2.1 试样制备和试验系统

试样选自冲击地压矿井五龙矿某工作面,为减少试验误差,满足统计数据的有效性,选取层理与加载方向垂直,表面光滑且无明显裂纹的同一煤块上取芯的煤样作为试验对象,按照国际岩石力学标准,将煤岩试样加工成 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱形煤样,如图1所示。



图1 部分煤岩试样

Fig.1 Prepared coal samples

试验设备分为岩石力学测试、声发射监测及电荷监测系统,设备装配如图2所示。



图2 试验系统

Fig.2 Testing system

2.2 试验方案

采用位移加载方式,将试样分为L(低速加载)、M(中速加载)和H(高速加载)^[1,7-8]3种不同速率进行试验,共进行了5个加载速率下的测试,每个速率测试6个试样,总计测定了30个煤试样的力

学性质、破坏规律及其变形破裂过程的声-电荷信号变化特征,选取有代表性的 10 个煤样试验结果进行分析,试验方案如表 1 所示。

表 1 试验加载参数设置
Table 1 Setting of loading parameter

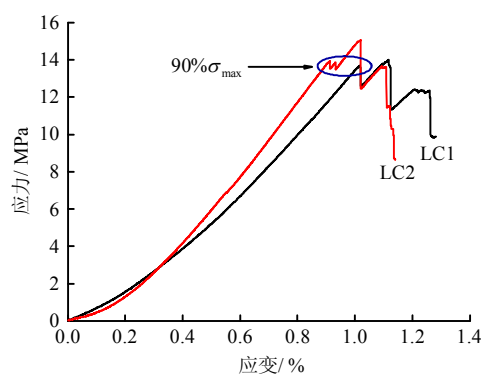
组别	试样编号	加载速率 mm/min
L 组	LC1	0.06
	LC2	0.06
	MC1	0.15
	MC2	0.15
M 组	MC3	0.20
	MC4	0.20
	MC5	0.25
	MC6	0.25
H 组	HC1	0.60
	HC2	0.60

3 加载速率影响的煤体破裂力学性质及能量耗散规律

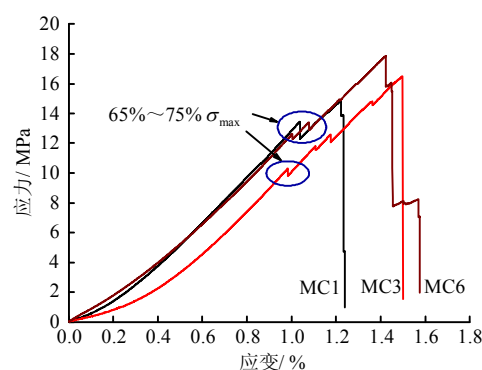
3.1 加载速率影响的煤体破裂力学性质

为深入分析加载速率影响的煤体破裂力学性质,寻找煤体破裂的能量释放规律,试验以加载速率为变量,对试样进行不同速率单轴加载,试验结果如图 3、4 所示。

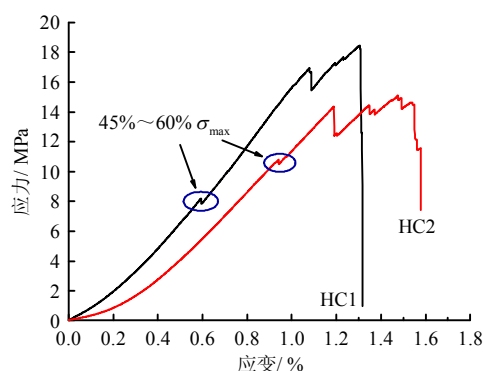
图 3 为不同加载速率下煤样应力-应变曲线。从曲线可得出:L 组低速加载煤样应力到达峰值 90% 附近出现应力调整且应力降变化较小,峰后应力经过多次跌落,其峰后应力软化明显;M 组中速加载煤样应力到达峰值 65%~75% 附近开始出现应力调整,相比低速加载,调整应力降略有增大且多集中于损伤开始阶段,中速加载的煤样达到应力峰值后,表现为直接破坏失稳,其应力峰后应变软化现象减弱;H 组高速加载煤样应力到达峰值 45%~60% 附近开始出现应力调整且损伤初期应力调整较小,约在应力峰值的 85% 附近出现了较大降幅的应力调整。在低速加载条件下,试件轴向应力调整值接近于峰值应力,且调整的突降量较小,因加载缓慢,加载过程积累的能量释放速率较小,其应力峰后的破坏多表现为应变软化;提高加载速率后,高速加载导致煤体变形能积累加快,煤中原生裂隙起裂初期,能量耗散加剧,在应力-应变变化上表现为应力调整提前,达到应力峰值后,因加载速率变快,其加载过程积累的能量释放速率明显增大,导致其破坏形式表现出显著的脆性破坏特征。



(a) L 组低速加载(轴向调整应力为 90% $\sigma_{\max}$)

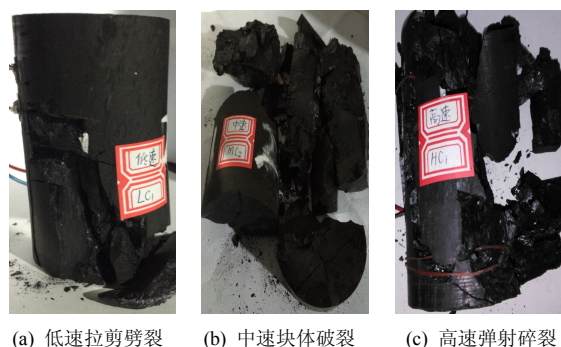


(b) M 组中速加载(轴向调整应力为 65%~75% $\sigma_{\max}$)



(c) H 组高速加载(轴向调整应力为 45%~60% $\sigma_{\max}$)

图 3 不同加载速率煤样应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of coal samples at different loading rates



(a) 低速拉剪劈裂 (b) 中速块体破裂 (c) 高速弹射碎裂

图 4 不同加载速率下煤样破坏结果

Fig.4 Failure results of coal samples with different loading rates

从图 4 破坏形式分析知,试件的破裂形状由低

速的张剪劈裂破坏向高速的弹射粉碎破坏过渡。低速加载所致的变形能释放多源于原生裂隙扩展和新生裂隙的起裂,且受加载速率缓慢的影响,能量耗散时间较长,释放强度低,故表现为静态的裂纹扩展劈裂破坏。高速加载时,因加载速率高,峰前应力调整加剧,应力降幅较大,耗散的变形能不仅已经导致了裂隙网络的贯通,而且对煤体承载结构产生了较大的破坏,当应力达到峰值时,更多的变形能迅速释放,煤体破裂的表现形式为弹射形式。

3.2 加载速率影响的煤体破裂过程能量耗散规律

为进一步分析煤体受加载速率影响的能量释放规律,将低、中和高速 3 种加载速率下的 10 块煤样的力学性质和累积变形能及残余变形能进行统计,统计结果如表 2 所示。其中抗压强度为加载过程记录的应力峰值,峰前累积变形能为应力-应变曲线中峰值应力之前的曲线下包络的曲线面积,残余能为应力-应变曲线中峰值应力之后的曲线下包络面积,利用 origin 软件的面计算功能,可以将峰前累积变形能和峰后残余应变能计算得出。

表 2 不同加载速率下煤样的力学和能量指标
Table 2 Indexes of mechanics and energy with different loading rates

加载速率 (mm/min)	弹性模量 均值 $\bar{E}$ / GPa	抗压强度 均值 $\bar{\sigma}$ / MPa	应力峰前 累积变形能 M_1 /J	应力峰后 残余能 M_2 /J	累积-残余 能比值 M_1/M_2
0.06	1.21	14.54	7.03	1.70	4.14
0.15~0.25	1.16	16.16	9.82	1.21	8.12
0.60	1.19	16.77	11.53	0.78	14.87

由量化指标表 2 分析可知,加载速率的改变对试件弹性模量影响较小,试件单轴抗压强度 $\bar{\sigma}$ 与加载速率 v 的关系为

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + b e^{c v} \quad (1)$$

其中: $\sigma_0 = 15.81$ MPa; $b = -2.56$ N/(s·m³); $c = -7.69$; 相关系数 $R^2 = 0.997$ 。

式中: σ_0 为未考虑加载速率影响的煤体初始强度; b 为加载速率影响因子,其物理含义是单位体积煤体加载速率变化率; c 为拟合常数。

由式(1)可知,随着加载速率 v 的增加,其单轴抗压强度在增大;煤样累积变形能与加载速率成正相关,残余变形能与加载速率成负相关。加载速率处于较低水平时,变形能耗散缓慢,裂隙充分发育,试件表现出强度较低及累积变形能较小的特点;加载速率升高后,裂隙发育时间相对缩短,能量主要以变形能的形式储存在煤体承载结构中,承载结

构储存较多变形能而不发生破坏,使得试件表现出强度升高及累积变形能较大的特征。加载越快,变形能积累越多,在接近应力峰值时,变形能释放加剧,破坏更剧烈,破坏形式由静态破裂过渡到弹射碎裂。

在实际的开采过程中,过快地推采速率改变了煤体变形的破坏速率,从而改变了煤体的力学性质及变形能的储耗过程。低速加载时煤体内部的裂隙充分发育并耗散能量,内部储能较小,对外释放能量较少,累积变形能处于稳定状态。高速加载时,裂隙发育较差,耗散能量少,煤体系统存储大量的变形能,此时的煤岩系统受到过快的外载扰动易发生变形能的加剧释放,发生冲击地压灾害。

4 加载速率影响的煤体声-电荷变化试验研究

4.1 代表性煤样破裂时声发射-电荷试验结果分析

图 5 给出了 3 种速率下具有代表性煤样 LC1、MC2 和 HC1 的应力-声发射能量-电荷量对应时间的曲线。在试验过程中,声发射波形门限和参数门限设为 45 dB,前放增益设为 40 dB,采样频率设为 1 000 kHz,主要用来监测煤试样破裂时产生的高频声发射信号,电荷信号接收频率为 1 000 Hz,主要用来监测煤试样破裂时产生的低频电荷信号。采用高精度动态数模信号收集设备对信号进行同步采集。

由图 5 不同加载速率的代表性煤样应力-声发射-电荷-时间关系曲线知,随着加载速率的增大,首次声发射高值和电荷高值出现的时刻均提前,无论是低加载还是高加载速率,声发射首次高值信号均出现在煤体弹性阶段初期,声发射信号的变化表明,煤体经过压密过程后在进入弹性阶段初期已经开始有裂纹起裂扩展的趋势;而电荷首次突变的高值信号通常出现在应力首次突降时刻,从应力-时间曲线看,煤体通常处于强化阶段,受加载速率影响,在低加载速率情况下,电荷首次突变信号出现在强化阶段后期,且突变应力接近峰值应力,如图 5(a)所示,提高加载速率后,电荷首次突变信号前移,多集中于强化损伤阶段初期,如图 5(b)和图 5(c)所示;受声发射高采样频率影响,不同加载速率下的声发射首次高值信号均出现在压密到弹性阶段过渡区域,因此,在声发射-电荷信号分析时主要分析电荷首次高值信号后的应力阶段,特别是应力强化后期到峰后残余阶段更具有实际意义。

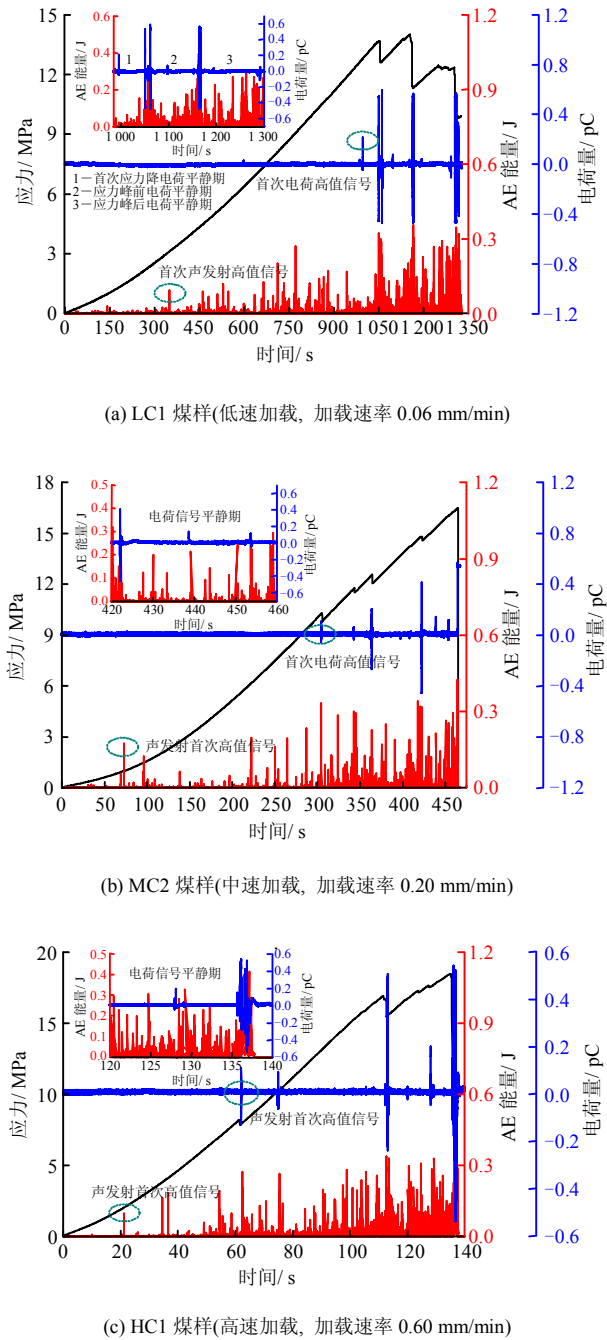


图 5 不同速率煤样应力-声发射能量-电荷量变化试验结果

Fig.5 The results of stress-AE energy and induction charge with different loading rates

由图 5 可知,在强化损伤阶段,电荷信号存在明显的平静期,低速率加载时,电荷平静期持续时间较长,可分为 3 个阶段,首次应力降电荷平静期持续约 60 s,应力峰前电荷平静期持续约 100 s,应力峰后电荷平静期持续约 150 s,3 个电荷平静期内的声发射信号由能量幅值较低的离散突变型向能量幅值较高的连续密集型过渡。平静期边界的高值电荷信号分布形式表现为强化损伤时的稀疏离散突变

分布、应力峰值附近的短时密集突变分布和煤体破坏时刻的连续密集跳跃突变分布如图 5(a)所示。当加载速率增大后,应力峰后表现为显著的脆性破坏特征,残余应力阶段消失,其应力峰前电荷平静期持续时间变短,在加载速率为 0.2 mm/min 的中速加载过程中,电荷平静期约有 60 s,当加载速率增大到 0.6 mm/min 时,其应力峰前电荷平静期持续时间缩短到约 25 s,平静期边界的高值电荷信号分布形式与低速加载时相同,如图 5(b)和 5(c)中小图所示。应力峰后电荷平静期的消失和应力峰前强化损伤阶段电荷平静期持续时间的缩短表明:加载速率升高后,煤体损伤加剧,煤体存储的变形能尚未以自身裂纹扩展形式耗散掉,就以结构碎裂弹射的形式释放,加载速率的增大相当于突然对煤体施加了应力扰动或动载作用,煤体破坏体现出动力失稳的特征。

4.2 加载速率影响的煤体失稳声发射-电荷判据初探

在实际的煤矿开采过程中,受开采扰动,工作面附近多为破碎区和塑性区并逐渐向工作面前方的弹性区和原岩应力区过渡,因此,可以对试验室煤体受载过程的强化损伤阶段到破坏残余阶段的声发射-电荷信号进行量化分析,为提出加载速率影响的煤体失稳声发射-电荷判定依据提供试验基础。

由前文研究结果可知,低速加载时(加载速率为 0.06 mm/min),煤体的变形破坏具有明显的静载破坏特征,煤体受载荷作用储存的变形能主要耗散在煤中原生裂纹的扩展和新裂纹的萌生扩展过程中,破坏时程较长,能量耗散缓慢,而中高速加载时(加载速率为 0.2~0.6 mm/min),煤体受载荷作用储存的变形能主要耗散在煤体结构的破坏上,碎裂形式表现为块体碎裂和弹射碎裂,其破坏特征具有显著的动力扰动特征;特别是 3 种加载速率下监测获得的声发射-电荷信号与应力变化具有一致性,以此为据,可提出基于声发射-电荷信号量化分析的煤体失稳判定依据。引入 η 作为煤体失稳的声-电荷判别指标,定义 η_{AE} 为应力峰前声发射总能量与应力峰后声发射总量的比值;定义 η_{CI} 为应力峰前电荷总量与应力峰后电荷总量的比值。其表达式为

$$\eta = K_{AE}\eta_{AE} + K_{CI}\eta_{CI} \quad (2)$$

式中: K_{AE} 为声发射能量比指标比例系数; K_{CI} 为电荷总量比指标比例系数,上述两个比例系数的取值依据表 3 中高于声-电荷平均比值条件进行选取。

表 3 不同加载速率下 K_{AE} 和 K_{CI} 选择依据
Table 3 Selection basis of K_{AE} and K_{CI} at different loading rates

煤样	$\bar{A}_{\text{峰前}} / \text{J}$	$\bar{A}_{\text{峰后}} / \text{J}$	$\bar{A}_t$	$\bar{D}_{\text{峰前}} / \text{pC}$	$\bar{D}_{\text{峰后}} / \text{pC}$	$ \bar{I} $	声能量比例系数 K_{AE}	电荷量比例系数 K_{CI}
LC1	0.22	0.22	1.00	0.42	0.40	1.05	0.49	0.51
MC2	0.24	0.30	0.80	0.29	0.55	0.53	0.60	0.40
HC1	0.30	0.34	0.88	0.21	0.24	0.88	0.50	0.50

为得到煤体失稳的声-电荷判别指标 η 的声-电荷比例系数 K_{AE} 和 K_{CI} , 定义 $|\bar{I}|$ 为不同加载速率下, 煤试样首次电荷高值的平均值, $\bar{A}$ 为煤试样首次电荷高值对应的声发射高值平均值。

由图 5 中放大的小图可知, 在强化损伤到应力峰值应力范围的电荷平静期内, 声发射信号仍有连续型的高值突变。其原因在于声发射监测反映了煤体的微破裂活动, 因其监测的采样频率高, 试验中设定为 1 000 kHz, 强化损伤过程的微破裂增多, 所以在对应的声发射信号中仍有声发射的能量释放, 而电荷监测获取的信号为低频信号, 其信号门槛值大, 必然会漏掉部分微破裂产生的电荷信号, 辅以表 3 中的 $\bar{A}_t$ 和 $|\bar{I}|$ 的比值系数可为合理的声发射-电荷综合判定指标 η 的建立提供基础数据。

对试验数据统计分析知, 3 种速率下的 $|\bar{I}| = 0.15 \text{ pC}$, $\bar{A} = 0.20 \text{ J}$, 对代表性煤样 LC1、MC2 和 HC1 大于 $|\bar{I}|$ 和 $\bar{A}$ 的声发射-电荷数据进行统计, 引入以

下公式:

$$|\bar{I}|_r = \frac{\bar{D}_{\text{峰前}}}{\bar{D}_{\text{峰后}}} \quad (3)$$

式中: $|\bar{I}|$ 为应力峰前超首次电荷高值的电荷均值与应力峰后超首次电荷高值的电荷均值比值; $\bar{D}_{\text{峰前}}$ 为应力峰前超过 $|\bar{I}|$ 的电荷均值; $\bar{D}_{\text{峰后}}$ 为应力峰后超过 $|\bar{I}|$ 的电荷均值。

$$\bar{A}_t = \frac{\bar{A}_{\text{峰前}}}{\bar{A}_{\text{峰后}}} \quad (4)$$

式中: $\bar{A}_t$ 为应力峰前超过声发射能量高值 (与电荷首次高值对应的声发射能量) 的声发射能量均值与峰后声发射超高值的声发射能量均值的比值; $\bar{A}_{\text{峰前}}$ 为应力峰前超过 $\bar{A}_t$ 的声发射能量均值; $\bar{A}_{\text{峰后}}$ 为应力峰后超过 $\bar{A}_t$ 的声发射能量均值。量化结果如表 4 中所示。

表 4 煤样的量化数据
Table 4 Quantitative data of coal samples

速率	应力峰前累积 变形能 M_1/J	应力峰后残余 变形能 M_2/J	累积-残余能 比值 M_1/M_2	应力峰前声发 射能量 A_1/J	应力峰后声发 射能量 A_2/J	声发射能量 比指标 η_{AE}	应力峰前电 荷量 I_1/pC	应力峰后电 荷量 I_2/pC	电荷总量比 指标 η_{CI}	声-电复合判 据 η
低速	7.03	1.70	4.14	20.67	54.66	0.38	1 101.93	2 957.13	0.37	0.37
中速	9.08	0.95	9.56	28.64	5.73	5.00	1 355.24	1 681.17	0.81	3.32
高速	11.53	0.78	14.78	62.86	10.72	5.86	678.51	279.67	2.43	4.15

利用式(2)和表 3 给出的声-电荷比例系数 K_{AE} 和 K_{CI} 的选择依据, 以阜新五龙矿某工作面煤样为例, 对 3 组加载速率下所有煤样的累积变形能、残余变形能和声发射-电荷信号进行量化分析。由量化结果分析可知 (如表 4 所示), 煤样从低速加载 (加载速率为 0.06 mm/min) 到中速和高速加载 (加载速率为 0.2~0.6 mm/min) 的变化过程中, 累积-残余能比值逐渐增大, 对应的声-电荷复合判据 η 值也在逐渐增大, 二者具有正相关的对应关系。由前文中讨论的煤体失稳形式可以建立煤体失稳声-电荷复合判据, 如表 5 所示。

在实际的煤炭开采过程中, 可依据开采现场的区域应力场和声-电荷监测对煤体失稳情况进行综合判定。但仍需开展大量的室内试验提供数据支持。

表 5 声-电荷复合判据的煤体失稳划分
Table 5 Division of coal mass instability by AE-charge united criterion

声-电荷复合判据 η	煤体系统失稳形式
$0 < \eta < 0.37$	静态失稳
$0.37 < \eta < 3.32$	应力扰动失稳
$3.32 < \eta < 4.15$	类动载扰动失稳

5 结 论

(1) 受加载速率影响, 煤体应力调整发生显著变化, 加载速率越高, 应力调整越提前, 煤样单轴抗压强度增加, 煤样累积变形能耗散加剧; 煤体失稳形式由静载失稳过渡到类动载扰动失稳, 煤体失稳破坏的动力特征明显, 冲击地压动力灾害发生几率增大。

(2) 受加载速率变化影响的煤体系统失稳规律与试验监测获得的声发射-电荷信号变化具有一致性。其一致性特征可为提出判定煤体失稳形式的声发射-电荷复合判定依据提供试验基础和理论依据。从声发射-电荷信号分析角度,可深入探讨煤体压缩型冲击地压发生的主要影响因素和发生机制。

(3) 以阜新五龙矿某工作面煤样为具体研究对象,利用室内监测获得的声发射-电荷信号量化分析结果,初步提出了判定煤体失稳形式的声-电荷复合判定依据 η ,在不同矿区、不同的工作面上,可依据监测获得的声-电荷现场数据辅以采动应力场的变化情况,对采动过速诱发的煤体压缩型冲击地压的发生几率进行预测和预警。

(4) 受煤矿开采复杂的地质条件和不可预知的影响因素影响,仍需深入开展煤体失稳形式的声发射-电荷复合判据的试验研究工作,有必要开展开采现场的工业试验研究工作。

参考文献

- [1] 姜耀东, 李海涛, 赵毅鑫, 等. 加载速率对能量积聚与耗散的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 369—373.
JIANG Yao-dong, LI Hai-tao, ZHAO Yi-xin, et al. Effect of loading rates on energy accumulation and dissipation in rocks[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(3): 369—373.
- [2] 谢广祥, 常聚才, 华心祝. 开采速度对综放面围岩力学特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 963—967.
XIE Guang-xiang, CHANG Ju-cai, HUA Xin-zhu. Influence of mining velocity on mechanical characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(7): 963—967.
- [3] 王金安, 焦申华, 谢广祥. 综放工作面开采速率对围岩应力环境影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1118—1124.
WANG Jin-an, JIAO Shen-hua, XIE Guang-xiang. Study on influence of mining rates on stress environment in supounding rock of mechanized top caving mining face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1118—1124.
- [4] 王磊, 谢广祥. 综采面推进速度对煤岩动力灾害的影响研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 70—74.
WANG Lei, XIE Guang-xiang. Influence of mining velocity on dynamic disasters in the coal and rock mass at a fully mechanized mining face[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(1): 70—74.
- [5] 尹光志, 蒋长宝, 王维忠, 等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 68—77.
YIN Guang-zhi, JIANG Chang-bao, WANG Wei-zhong, et al. Experimental study of influence of confining pressure unloading speed on mechanical properties and gas permeability of containing- gas coal rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(1): 68—77.
- [6] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 891—901.
YIN Guang-zhi, LI Wen-pu, LI Ming-hui, et al. Experimental study of mechanical properties of coal containing methane under different loading-unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 891—901.
- [7] 李海涛, 蒋春祥, 姜耀东, 等. 加载速率对煤样力学行为影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 430—436.
LI Hai-tao, JIANG Chun-xiang, JIANG Yao-dong et al. Mechanical behavior and mechanism analysis of coal samples based on loading rates effect[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 430—436.
- [8] 李海涛. 加载速率效应影响下煤的冲击特性评价方法及应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
LI Hai-tao. Evaluation method and application of coal burst performance under the effect of loading rates[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2014.
- [9] 赵扬锋, 潘一山, 刘玉春, 等. 单轴压缩条件下煤样电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 306—312.
ZHAO Yang-feng, PAN Yi-shan, LIU Yu-chun, et al. Experimental study of charge induction of coal samples under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 306—312.
- [10] 唐治, 潘一山, 李忠华, 等. 煤岩破裂过程中电荷感应机制分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1156—1160.
TANG Zhi, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, et al. Charge induction mechanism in the process of fracture of coal-rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1156—1160.
- [11] 潘一山, 罗浩, 唐治, 等. 煤岩体拉伸失稳破坏电荷感

- 应规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1297—1303.
- PAN Yi-shan, LUO Hao, TANG Zhi, et al. Study of charge induction law of coal and rock mass during tensile instability and failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1297—1303.
- [12] 潘一山, 罗浩, 李忠华, 等. 含瓦斯煤岩围压卸荷瓦斯渗流及电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 713—719.
- PAN Yi-shan, LUO Hao, LI Zhong-hua, et al. Experimental study on gas permeability and charge induction of gaseous coal rock under confining pressure unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(4): 713—719.
- [13] 潘一山, 唐治, 李忠华, 等. 不同加载速率下煤岩单轴压缩电荷感应规律研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1043—1048.
- PAN Yi-shan, TANG Zhi, LI Zhong-hua, et al. Research on the charge inducing regularity of coal rock at different loading rates in uniaxial compression tests[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2013, 56(3): 1043—1048.
- [14] 肖晓春, 丁鑫, 潘一山, 等. 颗粒煤岩破裂过程声发射与电荷感应试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1796—1804.
- XIAO Xiao-chun, DING Xin, PAN Yi-shan, et al. Experiment of acoustic emission and charge induction in granular coal rock failure[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(8): 1796—1804.
- [15] 肖晓春, 金晨, 赵鑫, 等. 组合煤岩冲击倾向电荷判据试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1620—1628.
- XIAO Xiao-chun, JIN Chen, ZHAO Xin, et al. Experimental study on the charge criterion of coal-rock bodies burst tendency[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1620—1628.
- [16] 肖晓春, 罗浩, 潘一山, 等. 深井动力灾害电荷监测系统开发与应用[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(3): 97—102.
- XIAO Xiao-chun, LUO Hao, PAN Yi-shan, et al. Development and application of charge monitoring system of deep mine dynamic disaster[J]. **China Safety Science Journal**, 2014, 24(3): 97—102.
- [17] MA RUI, QIAO BAO-MING, ZHANG TIAN-JUN, et al. Application of discrete wavelet operations in the detection of acoustic emission of coal and rock rupture[J]. **Journal of Coal Science and Engineering(China)**, 2013, 19(2): 160—166.
- [18] BYUN YO-SEPH, SAGONG MYUNG, CHUN SUK-CHUN, et al. A study on using acoustic emission in rock slope with difficult ground — focused on rainfall[J]. **Geosciences Journal**, 2012, 16(4): 435—445.
- [19] 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 Cheng-dong, GAO Bao-bin, NAN Hua, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics during deformation and failure processes of coal samples under different stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 757—766.
- [20] 童敏明, 胡俊立, 唐守峰, 等. 不同应力速率下含水煤岩声发射信号特性[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 97—100.
- TONG Min-ming, HU Jun-li, TANG Shou-feng, et al. Study of acoustic emission signal characteristic of water-containing coal and rock under different stress rates[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2009, 26(1): 97—100.
- [21] 李宏艳, 康立军, 徐子杰, 等. 不同冲击倾向煤体失稳破坏声发射先兆信息分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 384—388.
- LI Hong-yan, KANG Li-jun, XU Zi-jie, et al. Precursor information analysis on acoustic emission of coal with different outburst proneness[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(2): 384—388.
- [22] 梁昌玉, 李晓, 吴树仁. 中低应变率加载条件下花岗岩尺寸效应的能量特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3472—3480.
- LIANG Chang-yu, LI Xiao, WU Shu-ren. Research on energy characteristics of size effect of granite under low/intermediate strain rates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3472—3480.
- [23] 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 En-yuan, HE Xue-qiu, LIU Zhen-tang, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture[J]. **Journal of China Coal Society**, 2004, 29(3): 289—292.
- [24] 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. Experimental study of electromagnetic radiation in deformation and fracture of coal and rock[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2000, 43(1): 131—137.