

# 岩-煤组合体试样变形场与能量演化特征试验研究

孔 凯<sup>1,2</sup>, 尹大伟<sup>1,3</sup>, 张 虎<sup>3,4</sup>, 朱海峰<sup>5</sup>, 李法鑫<sup>1</sup>, 孙德全<sup>3,4</sup>, 张士川<sup>1</sup>, 王 沉<sup>6</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. 山东能源西北矿业永明煤矿, 陕西 延安 717300; 3. 山东省深部冲击地压灾害评估工程实验室, 山东 济南 250104;

4. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104; 5. 枣庄王晁煤矿有限责任公司, 山东 枣庄 277518;

6. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**采用数字散斑应变测量系统进行灰岩-煤组合体试样单轴压缩变形破坏演化试验,分析组合体试样变形局部化带和能量演化特征,揭示其渐进破坏机制。组合体试样变形局部化带演化主要与其内部原生裂纹起裂、扩展有关,变形局部化带首先出现在原生裂纹区域,沿最大主应力方向发育扩展,煤样内变形局部化带发育扩展相对较快,变形局部化带交汇、贯通导致组合体试样整体破坏失稳。变形局部化带位移错动量演化主要经历微变化、线性缓慢增长、非线性加速增长 3 个阶段,与轴向应力变化基本相对应,峰后变形局部化带快速扩展贯通,位移错动量非线性加速增长。外界输入能量主要被煤样变形破坏所消耗,煤样首先发生渐进破坏而释放能量,交界面处灰岩、煤样由协同变形转为非协同变形;煤样破坏诱发灰岩回弹变形并释放弹性能,部分弹性能作用于煤样而加剧其破坏,煤样发生拉-剪混合破坏;煤样内裂纹扩展传播至灰岩内,并与灰岩内裂纹贯通,导致其拉伸破坏。

**关键词:**岩-煤组合体;数字散斑;变形场;变形局部化带;弹性变形能

中图分类号:TD315

文献标志码:A

## Experimental study on deformation field and energy evolution characteristics of rock-coal composite samples

KONG Kai<sup>1,2</sup>, YIN Dawei<sup>1,3</sup>, ZHANG Hu<sup>3,4</sup>, ZHU Haifeng<sup>5</sup>,  
LI Faxin<sup>1</sup>, SUN Dequan<sup>3,4</sup>, ZHANG Shichuan<sup>1</sup>, WANG Chen<sup>6</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, Shandong 266590, China;

2. Shandong Energy Northwest Mining Yongming Coal Mine, Yan'an, Shannxi 717300, China;

3. Shandong Deep Rockburst Disaster Assessment Engineering Laboratory, Jinan, Shandong 250104, China;

4. Shandong Institute of Coalfield Geological Planning and Survey, Jinan, Shandong 250104, China;

5. Zaozhuang Wangchao Coal Mine Company of Limited Liability, Zaozhuang, Shandong 277518, China;

6. Mining College, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** The digital speckle strain measurement system was adopted to conduct uniaxial compression deformation and failure evolution tests on limestone-coal composite samples. The evolution characteristics of the deformation localization zone and energy of the composite samples were analyzed and the progressive failure mechanism was revealed. Mainly related to the internal initiation and propagation of primary cracks in the limestone-coal composite,

收稿日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51904167,52074169);山东省深部冲击地压灾害评估工程实验室开放课题(鲁煤研开(2020)003号)

作者简介:孔 凯(1988—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事矿山安全开采技术工作。

尹大伟(1989—),男,山东莱芜人,副教授,博士,主要从事矿山岩石力学与塌陷地建设利用的研究,本文通信作者。

E-mail:yindawei@sdust.edu.cn

the deformation localization zones first appeared around the primary cracks and then developed and expanded along the maximum principal stress direction. The deformation localization zones within the coal samples developed and expanded relatively rapidly. The intersection and penetration of deformation localization zones led to the overall failure and instability of the composite samples. The displacement dislocations of deformation localization zones mainly experienced three stages: Micro-change stage, linear slow growth stage, and nonlinear accelerated growth stage, roughly corresponding to the variations of axial stress. After the peak stress point, the deformation localization zones expanded and penetrated rapidly and the displacement dislocations increased nonlinearly. The external input energy was mainly consumed by the deformation and failure of coal samples, which released energy due to the progressive failure. At the same time, the limestone and coal samples at the interface changed from cooperative deformation to non-cooperative deformation. The failure of coal samples induced the rebound deformation of limestone and the release of elastic properties within it, part of which acted on the coal samples to aggravate their failure, resulting in the tensile-shear failure. The cracks in the coal samples propagated into the limestone and penetrated with the cracks in it, leading to the tensile failure of the limestone.

**Key words:** rock-coal composite sample; digital speckle; deformation field; deformation localization zone; elastic deformation energy

煤炭是我国主体能源,是国家能源安全的“压舱石”。随着我国煤矿开采深度逐年递增,冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害发生强度和频率增强,严重威胁煤矿安全高效生产。深部开采动力灾害大多是在采动影响下“煤层-围岩”组合结构体整体破坏失稳的结果<sup>[1-3]</sup>,组合结构体破坏失稳伴随着变形与能量演化。因此,研究“煤层-围岩”组合结构体破坏失稳过程中变形与能量演化对深部开采动力灾害防控具有重要意义。

国内外学者针对单一煤、岩试样破坏过程中变形与能量演化开展了大量研究工作。王学怀等<sup>[4]</sup>研究了含预制裂纹花岗岩试样的破坏过程,获得了试样变形场演化特征;王晓雷等<sup>[5]</sup>研究了不同层理倾角片麻岩试样单轴压缩变形场演化特征,揭示了层理倾角对变形场演化的影响规律;彭守建等<sup>[6]</sup>研究了不同加载速率下砂岩变形局部化特征,揭示了变形局部化演化的加载速率效应;杨小彬等<sup>[7]</sup>分析了等幅循环加载过程中岩石变形局部化带位移演化特征;范海军等<sup>[8]</sup>探讨了岩样变形局部化的客观存在性,认为变形局部化带演化可表征试样破坏过程;潘一山等<sup>[9]</sup>研究了煤岩变形局部化带起始时间、演化过程和局部化带宽度,奠定了岩石非均匀变形演化基础;宋义敏等<sup>[10]</sup>研究了整个加载过程中岩石试样变形场演化特征,获得了能量积聚释放与局部化带演化之间的关系;曾韦等<sup>[11]</sup>研究了卸荷条件下页岩破坏行为,揭示了试验不同阶段页岩能量演化特征;李波波等<sup>[12]</sup>研究了三轴压缩下煤岩损伤力学行为,揭示了煤样能量演化特征;武旭等<sup>[13]</sup>研究了裂隙花岗岩试样单轴加载能量演化特征,认为裂隙花岗岩试样总能量、弹性应变能和耗散能相对较低;刘鹏飞等<sup>[14]</sup>研究了不同围压对花岗岩试样能量释放影响规律。

以上研究结果对认识单一煤、岩试样破坏过程中变形与能量演化等具有重要意义,但是针对“煤层-围岩”组合结构体破坏过程中变形与能量演化方面的研究相对较少。目前,“煤层-围岩”组合结构体力学行为的研究主要通过岩-煤、煤-岩以及岩-煤-岩组合体试样室内试验或数值模拟<sup>[15]</sup>。本研究制备了灰岩-煤组合体试样,结合数字散斑应变测量系统,进行组合体试样单轴压缩变形破坏演化试验,获得其变形场和弹性变形能密度,定量分析了变形场局部化带和能量演化特征。

## 1 试样制备与试验方案

### 1.1 试样制备

岩-煤组合体试样中岩石为灰岩,为了减小岩、煤样离散性对试验结果的影响,所有岩、煤样分别取自同一块岩、煤块。首先采用岩石切磨一体机将煤、岩块进行切割、打磨,加工成 50 mm×50 mm×50 mm 的正方体试样,然后采用 AB 强力胶将岩、煤样黏合成 50 mm×50 mm×100 mm 的组合体。共制备了 3 个组合体试样,分别编号 A-1、A-2 和 A-3,其基本物理参数如表 1 所示。

表 1 灰岩-煤组合体试样基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of limestone-coal composite samples

试样编号	类别	试样尺寸	质量/g	单一煤、灰岩密度/(kg/m <sup>3</sup> )	组合体试样密度/(kg/m <sup>3</sup> )
A-1	灰岩	50 mm×50 mm×50 mm	341.23	2 729.84	2 056.24
	煤样		172.83	1 382.64	
A-2	灰岩		339.15	2 713.20	2 043.20
	煤样		171.65	1 373.20	
A-3	灰岩		340.46	2 723.68	2 046.76
	煤样		171.23	1 369.84	

### 1.2 试验方案

灰岩-煤组合体试样单轴压缩变形破坏演化试验系统如图 1 所示,包括加载系统和数字散斑应变测量系统。试验时,加载系统和数字散斑应变测量系统同步进行,确保两系统具有相同时间参数,以便进行数据处理分析。

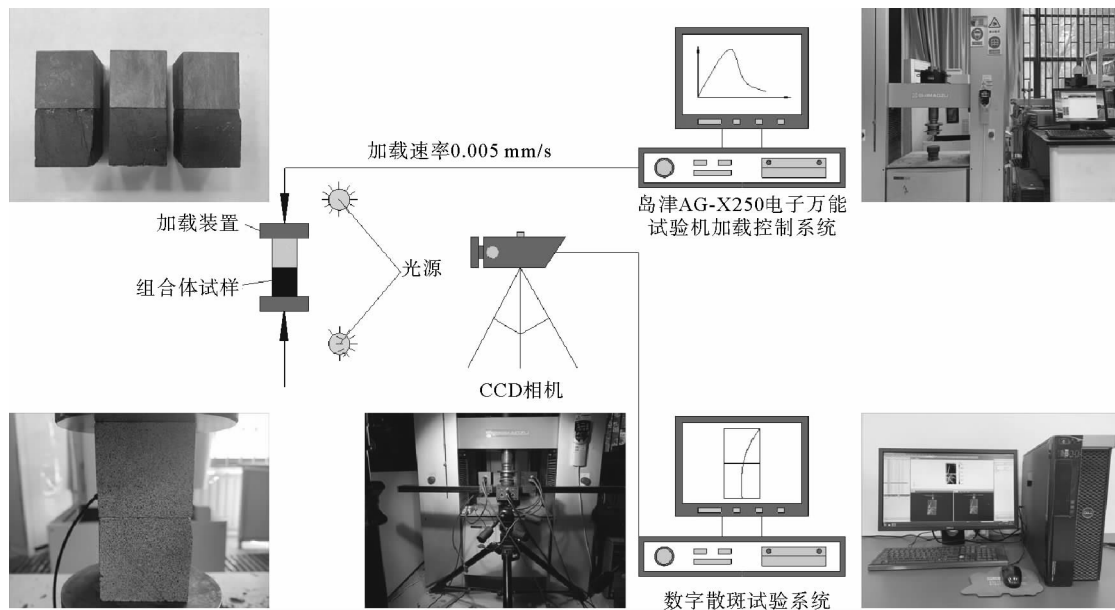


图 1 试验系统

Fig. 1 Testing system

采用岛津 AG-X250 电子万能试验机对灰岩-煤组合体试样进行单轴压缩试验,采用位移加载控制,加载速率为 0.005 mm/s<sup>[16]</sup>。利用人工喷漆的方式制作散斑场,首先在组合体试样表面均匀喷洒白色哑光漆;然后喷黑色哑光漆,使其随机下落形成黑色散斑<sup>[17]</sup>;最后形成组合体试样白底黑斑散斑场。通过数字散斑应变测量系统的工业相机(像素 500 万)采集组合体试样散斑图,采集频率为 3 帧/s。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 变形场演化分析

共进行 3 组灰岩-煤组合体试样单轴压缩变形破坏演化试验,其应力-应变曲线如图 2(a)所示。选取 A-3 组合体试样应力-应变曲线 7 个特征点(a~g 点,见图 2(b)),分析组合体试样单轴压缩变形场演化特征。以 a 点为参考点,对 b~g 点的变形图像进行识别,分别获得各点对应的最大主应变场,如图 3 所示,其中白色实线条表示原生裂纹,白色虚线条表示新生裂纹,σ 为特征点对应的轴向应力。

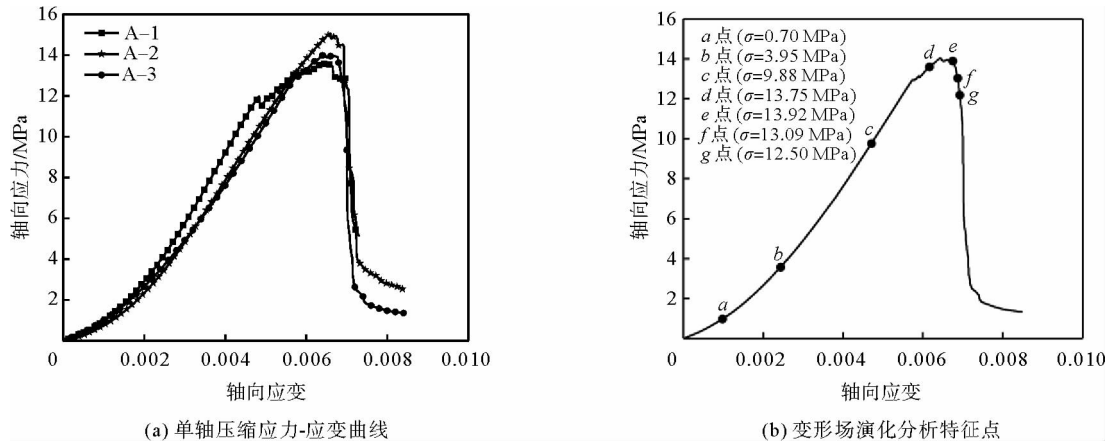


图 2 灰岩-煤组合体试样单轴压缩应力-应变曲线和变形场演化分析特征点

Fig. 2 Uniaxial compressive stress-strain curves and characteristic points of deformation field evolution analysis for limestone-coal composite sample

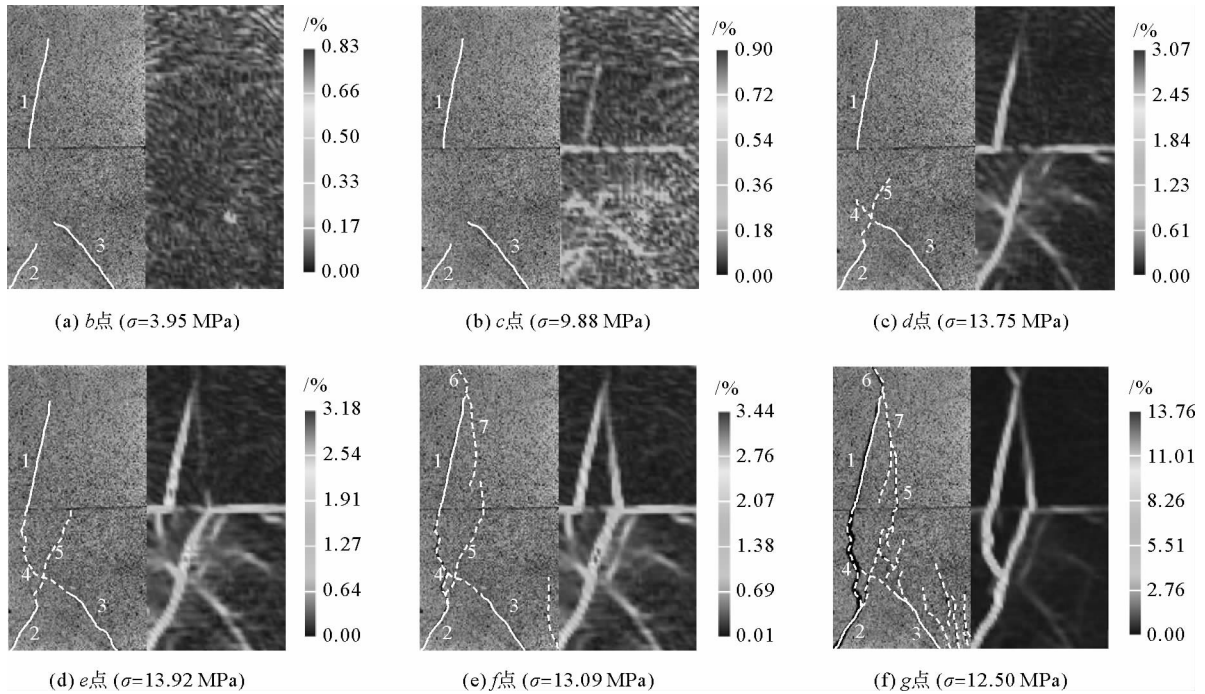


图 3 单轴加载下灰岩-煤组合体试样最大主应变场演化特征

Fig. 3 Evolution of maximum principal strain field for limestone-coal composite sample under uniaxial loading

图 3(a)~3(c)表示灰岩-煤组合体试样加载应力峰值点前最大主应变场演化特征。*b* 点处于应力-应变曲线弹性阶段,组合体试样整个应变场分布相对均匀,未出现变形局部化带。随着轴向应力的增大,*c* 点组合体试样原生裂纹 1、2、3 区域首先出现变形局部化带,对应的最大主应变为 0.009 0。*d* 点位于应力-应变曲线塑性屈服阶段,接近峰值点,此时最大主应变场分布呈明显非均匀性特征,组合体试样原生裂纹 1、2 区域变形局部化带开始发育、扩展,最大主应变增加,最大值为 0.030 7;同时,在轴向应力作用下,煤样内原生裂纹 2、3 上尖端起裂扩展,形成宏观拉伸裂纹 4、5。灰岩内变形局部化带由交界面处向上发展,煤样内变形局部化带由下向交界面处发展,均沿最大主应力方向,且煤样内变形局部化带发展较快。

图 3(d)~3(f)表示灰岩-煤组合体试样加载应力峰值点后最大主应变场演化特征。*e*~*g* 点位于应力-

应变曲线塑性软化阶段。*e* 点组合体试样变形局部化带继续发育扩展,最大主应变值为 0.031 8,且煤样内变形局部化带扩展至交界面处,原生裂纹 3 区域发育扩展的变形局部化带与灰岩内原生裂纹 1 区域变形局部化带贯通;同时,煤样内新生拉伸裂纹 4、5 发育扩展至交界面处,新生裂纹 4 与灰岩内原生裂纹 1 贯通。*f* 点组合体试样变形局部化带进一步发育扩展,最大应变值为 0.034 4,煤样内原生裂纹 2 区域发育扩展的变形局部化带扩展至灰岩内,并与灰岩内原生裂纹 1 区域变形局部化带贯通;同时,灰岩内原生裂纹 1 上尖端处形成拉伸裂纹 6 和反翼拉伸裂纹 7。*g* 点组合体试样变形局部化带伸长、交汇和连接,伴随着煤样、灰岩内原生与新生裂纹起裂、扩展和贯通,尤其是煤样内,这导致组合体试样最终破坏失稳。煤样呈拉-剪混合式破坏,而灰岩发生拉伸破坏。

综上所述,灰岩-煤组合体试样变形局部化带演化与其原生裂纹起裂、扩展有关,灰岩、煤样内变形局部化带交汇、贯通导致组合体试样的整体破坏失稳。同时,煤样内宏观裂纹扩展至灰岩内,并与灰岩内宏观裂纹贯通而导致其破坏。

### 2.2 局部化带位移演化分析

在分析灰岩-煤组合体试样变形场演化基础上,采用局部化带位移演化分析方法,定量研究组合体试样变形局部化带位移演化特征。根据文献[18]中变形局部化带定义,对灰岩-煤组合体试样最终破坏前的主应变云图变形局部化带进行标识(如图 4(a))。根据文献[19]提出的变形局部化带两侧位移错动分析方法(如图 4(b),其中 *a* 为变形局部化带标识线两侧距离 2 mm;  $M_1$  和  $M_2$  点为选取的像素点的中心点; *u*、*v* 为选取的像素点的位移分量),对组合体试样变形局部化带位移错动量进行了计算,结果如图 5 所示,沿逆时针方向位移错动为正。

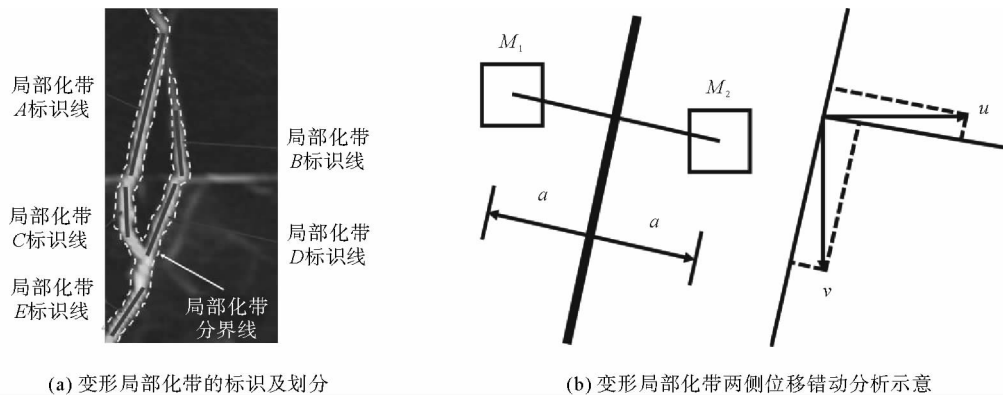


图 4 变形局部化带位移演化分析方法<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Analytical method of displacement evolution of deformation localization band

由图 5 可知,灰岩-煤组合体试样变形局部化带位移错动演化过程可分为微变化、线性缓慢增长与非线性加速增长 3 个阶段,主要受变形局部化带形成、扩展与贯通等影响。在单轴加载初期,组合体试样内未出现变形局部化带,变形局部化带 A~E 的位移错动量几乎为 0,处于微变化阶段。随着轴向应力的增大,组合体试样变形局部化带首先在原生裂纹区域形成,并沿着最大主应力方向发育扩展,变形局部化带 A~E 的位移错动量进入线性缓慢增长阶段,但受到变形局部化带形成时间、发育扩展等影响,变形局部化带进入线性增长阶段时间

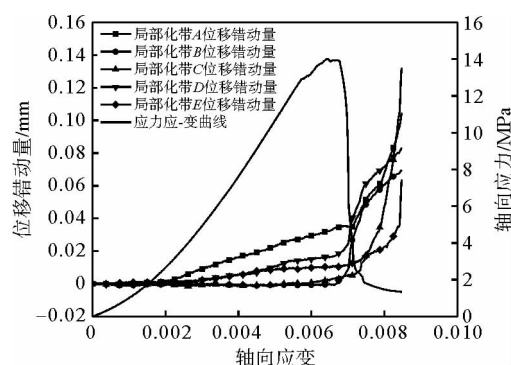


图 5 变形局部化带位移错动量演化曲线

Fig. 5 Evolution curves of displacement dislocation for deformation localization zones

与线性增长速率不同。其中,变形局部化带 A、D、E 的位移错动量首先进入线性增长阶段,持续时间长,位移错动量增长率相对较大,变形局部化带 A 位移错动量增长率最大,这主要是因为轴向应力直接作用于灰岩上,而灰岩压缩变形降低了煤样损伤积聚<sup>[15]</sup>;变形局部化带 B、C 的位移错动量在靠近峰值点时进入线性增长阶段,持续时间较短,位移错动量增长率相对较小;变形局部化带 A~E 的位移错动量均沿逆时针方向。在线性增长初期阶段,变形局部化带 D、E 的位移错动量增长趋势保持一致,但在线性增长后期阶段,变形局部化带 D 的位移错动量增长率大于变形局部化带 E,这主要因为煤样原生裂纹②上尖端在轴向应力作用下起裂、扩展,在变形局部化带 D 区域形成宏观裂纹⑤(图 3),加剧了其位移错动。加载至应力峰值点后,组合体试样内部进行了调整以适应轴向应力,应力-应变曲线不是立即跌落,而是出现了一个短暂的“应力稳定波动”阶段,该阶段的变形局部化带位移错动量仍以线性增长为主。在峰后应力跌落阶段,变形局部化带 B、D 位移错动量首先进入非线性加速增长阶段,这说明变形局部化带 B、D 是影响组合体试样破坏的主控变形局部变化带,组合体试样最终破坏形态也说明了这一点;由于变形局部化带 A、C、E 继续发育扩展,各变形局部化带之间相互贯通,变形局部化带 A、C、E 的位移错动量相继开始非线性加速增长;同时在该阶段灰岩、煤样内原生与新生裂纹扩展和贯通而形成宏观破坏面,且煤样内裂纹扩展传播至灰岩内与其内部裂纹贯通,最终导致组合体试样破坏失稳。变形局部化带(尤其是煤样内)位移错动量的非线性加速增长加剧了组合体试样变形破坏,导致组合体试样承载能力降低,对应的轴向应力递减。因此,变形局部化带的非线性加速增长可作为组合体试样变形破坏预测的重要指标。此外,变形局部化带最大位移错动量与其位置、错动方向有关。通常情况下,变形局部化带位于试样两端部或两侧时最大位移错动量相对较大,如变形局部化带 A、C 的最大位移错动量分别为 0.104 4 和 0.132 1 mm;变形局部化带位于试样中部时最大位移错动量相对较小,如变形局部化带 B、D 最大位移错动量分别为 0.069 5 和 0.083 2 mm。然而,由于变形局部化带位移错动均沿逆时针方向,变形局部化带 E 位于组合体试样的最左侧,限制了其位移错动,最大位移错动量最小(0.063 7 mm)。

### 2.3 交界面处岩、煤样位移变化量演化分析

为了分析灰岩-煤交界面对组合体变形破坏的影响,在交界面处上下两侧共设置 4 个监测点,分别监测交界面处灰岩、煤样位移变化量,其中监测点 1 位于交界面上侧 5 mm、试样中心线左侧 23 mm 处;监测点 2 位于交界面下侧 5 mm、试样中心线左侧 23 mm 处;监测点 3、4 均位于试样中心线上,分别在交界面上、下侧 5 mm 处,如图 6 所示。图 7 给出了交界面处监测点 1~4 的绝对位移变化量演化曲线。

在灰岩-煤组合体试样中,由于岩、煤力学性质的差异,交界面处灰岩、煤样变形不一致,但为了维持组合体试样整体稳定,界面处将产生派生应力以限制或促进交界面处灰岩、煤样变形,实现交界面处灰岩、煤样协同变形,称为“界面效应”<sup>[15]</sup>。本次试验中,灰岩弹性模量大于煤样,但泊松比小于煤样,因此,交界处灰岩区域派生应力为拉应力,促进其变形;而交界面处煤样区域派生应力为压应力,限制其变形。由图 7(a)和 7(b)可知,在加载前 120 s,交界面处监测点 1、2 的绝对位移变化量演化特征保持一致;而监测点 3、4 绝对位移变化量演化特征在加载前 60 s 保持一致。加载 120 s 后,监测点 2 绝对位移变化量先出现“突增”,后波动式下降,然后短暂的剧烈波动,最后保持稳定;加载 60 s 后,监测点 4 绝对位移变化量开始波动式缓慢增长,在加载 140 s 时出现“突增”,最后保持稳定。在整个加载阶段,监测点 1 和 3 的绝对位移变化量相对稳定,呈周期性稳定波动。监测点 2、4 和监测点 1、3 绝对位移变化量差异主要受到组合体试样内变形局部化带扩展、贯通及位移错动等影响,尤其是

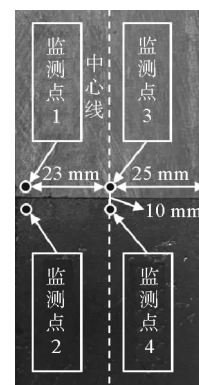


图 6 交界面处灰岩、煤样位移变化量监测点布置示意

Fig. 6 Layout of monitoring points for displacement variations of limestone and coal near the interface

煤样内变形局部化带 C、D。如,变形局部化带 D 位移错动量(图 5)在加载 60 s 时刚进入线性增长阶段,受其影响的监测点 4 绝对位移变化量开始波动式缓慢增长;加载至 140 s 时,变形局部化带 D 位移错动量进入非线性加速增长阶段,对应的监测点 4 绝对位移变化量出现“突增”现象。变形局部化带 C 位移错动量在加载至 120 s 时初步进入线性增长阶段,变形局部化带 C 内部微裂纹的形成、延伸、交汇、贯通以及裂纹之间产生滑动,受其影响的监测点 2 绝对位移变化量出现“突增”现象;同时,由于变形局部化带 C 逆时针方向位移错动影响,监测点 2 绝对位移变化量波动式下降;变形局部化带 C 位移错动量在加载至 148 s 时进入非线性加速增长阶段,监测点 2 绝对位移变形量出现剧烈短暂波动。监测点 1 和 3 受变形局部变化带 A、B 的影响相对较小,同时由于监测点 1、3 靠近组合体试样最左侧,其变形也受到边界效应的影响。

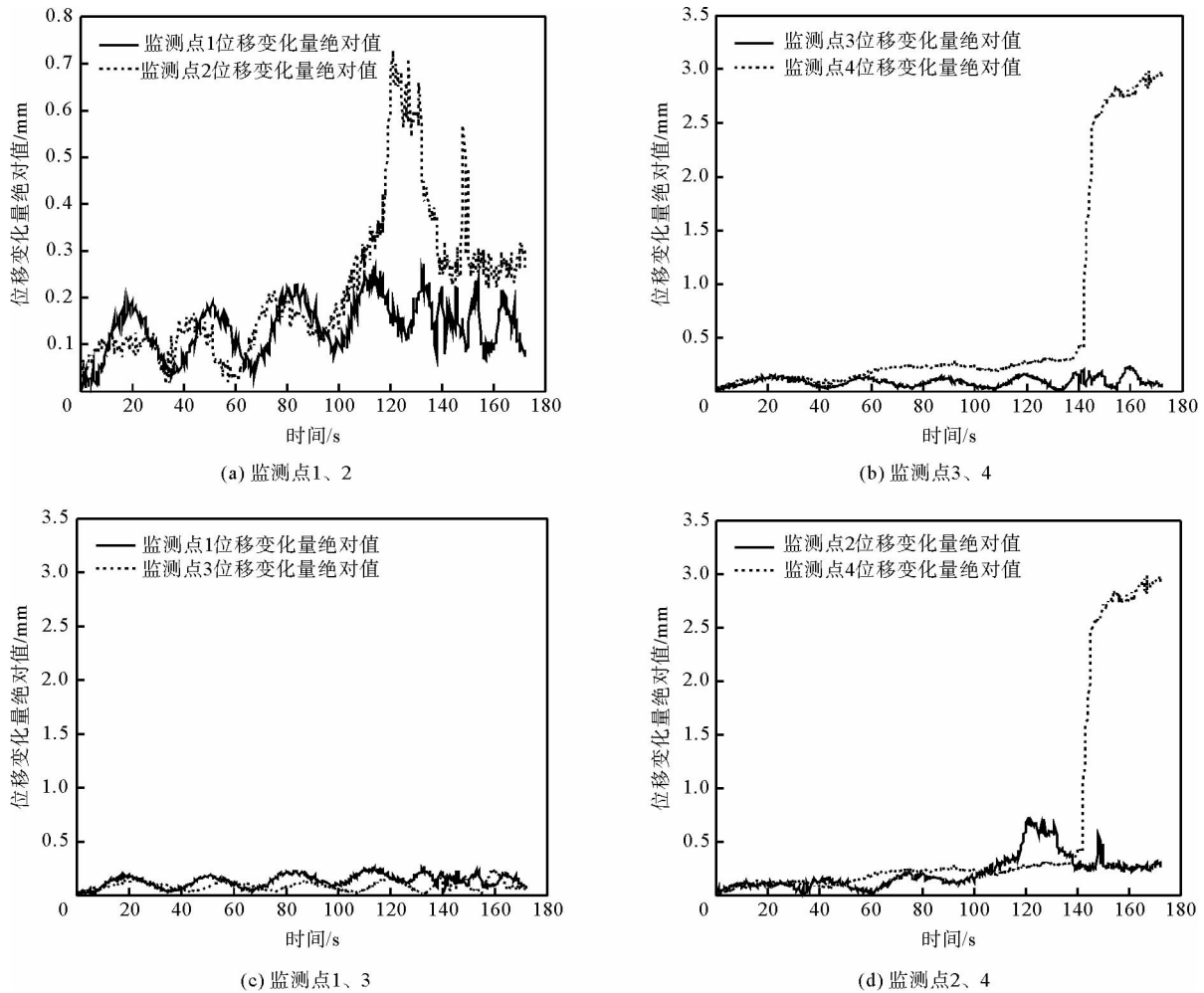


图 7 界面处灰岩、煤样绝对位移变化量曲线

Fig. 7 Displacement variation curves of limestone and coal near the interface

综上所述,在界面效应的作用下,界面处灰岩、煤样首先保持协同变形,但由于煤样强度低,在轴向应力作用下煤样首先产生破坏,其内部变形局部化带快速发育、扩展与贯通,促进了界面处煤样变形,界面处灰岩、煤样转为非协同变形。

### 2.4 变形能量演化特征分析

结合灰岩-煤组合体试样最终破坏模式以及破坏前的应变场,将组合体试样变形场分为变形局部化带内区域(塑性区域)、外区域(弹性区域)两部分;通过计算灰岩、煤样弹性区域弹性变形能密度  $U_r$ 、 $U_c$  来分析灰岩、煤样能量演化特征。基于组合体试样应变场监测数据,将灰岩、煤样弹性区域内各个点的应变分量平均

值作为应变分量值,通过式(1)分别计算  $U_r$  和  $U_c$  [20]。

$$U = \frac{E}{2}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 - 2\mu\epsilon_1\epsilon_2) \quad (1)$$

式中: $E$ 、 $\mu$  分别为弹性模量和泊松比,灰岩  $E$ 、 $\mu$  分别为 7.96 GPa 和 0.212,煤样  $E$ 、 $\mu$  分别为 2.82 GPa 和 0.321; $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别为试样表面的第一主应变和第二主应变; $U$  为弹性变形能密度。

同时,为进一步揭示灰岩、煤样之间的相互作用,在灰岩、煤样中部上下端面区域设置监测点,分别监测灰岩、煤样上下端面的垂直距离  $H_r$  和  $H_c$  变化情况,如图 8 所示。

图 9 给出了组合体试样轴向应力、 $H_r$ 、 $H_c$ 、 $U_r$  和  $U_c$  随时间变化曲线。根据灰岩、煤样弹性区域弹性变性能密度演化特征,将弹性变性能密度-时间曲线划分为 4 个阶段,分别为初始波动增长阶段(I 阶段)、相对稳定增长阶段(II 阶段)、快速增长阶段(III 阶段)以及降低-波动稳定阶段(IV 阶段)。

1) 初始波动增长阶段

该阶段与组合体试样应力-时间曲线压密阶段基本对应,外界输入能量主要用于灰岩、煤样内原生缺陷和交界面的压缩压实, $U_r$ 、 $U_c$  波动式增长,数值相对较小;而  $H_r$ 、 $H_c$  整体波动缓慢递减。

2) 相对稳定增长阶段

该阶段与组合体试样应力-时间曲线弹性阶段基本对应,外界输入的能量主要以弹性能形式储存在灰岩、煤样内,对应的弹性变性能密度相对稳定增长。由于煤样弹性模量大于灰岩,因此其弹性变性能密度增长速率(4.69 MPa/s)大于灰岩(0.58 MPa/s),说明外界输入的能量主要储存在煤样内; $H_r$ 、 $H_c$  整体波动稳定递减, $H_c$  递减速率(0.001 2 mm/s)大于  $H_r$  递减速率(0.000 3 mm/s)。

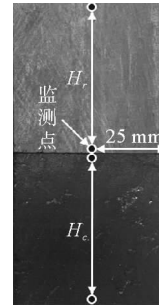


图 8 灰岩、煤样上下两端面垂直距离监测点布置示意图

Fig. 8 Layout of monitoring points for displacement between upper and lower ends of limestone and coal sample

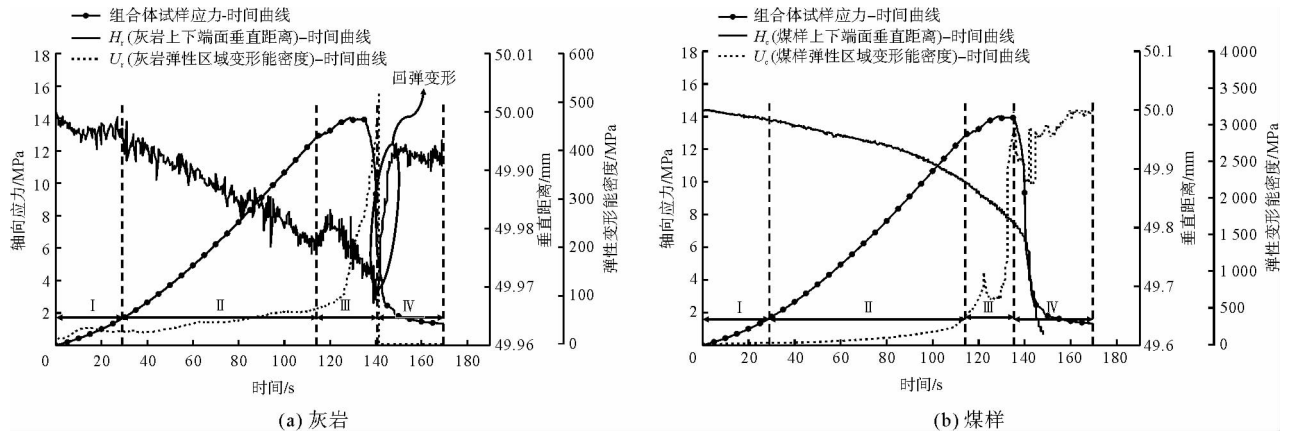


图 9 组合体试样轴向应力、 $H_r$ 、 $H_c$ 、 $U_r$  和  $U_c$  随时间变化曲线

Fig. 9 Variation curves of axial stress of composite sample,  $H_r$ ,  $H_c$ ,  $U_r$  and  $U_c$  with time

3) 快速增长阶段

该阶段与组合体试样应力-时间曲线塑性屈服和峰后前期阶段基本对应, $U_c$  快速增长阶段时长小于  $U_r$ ,这主要是由于煤样强度小于灰岩,在轴向应力的作用下煤样首先发生破坏,进而释放能量,弹性变性能密度-时间曲线开始递减。 $U_c$  快速增长阶段为塑性屈服点到峰值点后应力稳定波动点。在弹性变性能密度快速增长阶段,一方面组合试样内微裂纹非稳定扩展形成宏观裂纹,另一方面原生裂纹在轴向应力的作用下起裂扩展而形成宏观裂纹,宏观裂纹扩展、交汇贯通导致组合体试样出现局部破坏,尤其是煤样内(图 3),但是这



破坏无法造成组合体试样整体破坏失稳。因此,在该阶段是能量储存与消耗共存,但储存大于消耗,整体上 $U_r$ 、 $U_c$ 呈整体快速增长趋势,而 $H_r$ 、 $H_c$ 整体波动快速递减。 $U_c$ 最大值为3 182 MPa, $U_r$ 最大值为520 MPa;同时由于微裂纹非稳定扩展或原生裂纹起裂扩展, $U_r$ 、 $U_c$ 、 $H_r$ 、 $H_c$ 出现局部波动。

#### 4) 降低-波动稳定阶段

$U_c$ 首先进入降低-波动稳定阶段,对应的煤样内形成宏观破坏面,开始发生渐进破坏, $U_c$ 逐渐降低,释放能量。煤样渐进破坏影响灰岩变形破坏和能量释放,一方面,煤样内裂纹发育扩展至灰岩内,并与灰岩内原生裂纹贯通(图5),进而导致其破坏;另一方面煤样渐进破坏诱发灰岩回弹变形,且回弹变形发生在煤样主控宏观破坏面形成之前,导致 $U_r$ 线性快速降低, $H_r$ 突增。同时,灰岩回弹变形释放的部分弹性能作用于煤样上,进一步加剧煤样破坏,导致 $U_c$ 出现上下剧烈波动, $H_r$ 快速降低。最终,煤样破坏导致组合体试样整体破坏失稳,在应力-时间曲线残余变形阶段, $U_r$ 、 $U_c$ 、 $H_r$ 保持稳定,其中 $U_r$ 为0;而没有监测到 $H_c$ 相关数据,这主要是由于散斑点缺失造成的。

### 3 结论

1) 灰岩-煤组合体试样变形局部化带演化主要与其内部原生裂纹起裂、扩展有关,变形局部化带首先出现在原生裂纹区域,沿最大主应力方向发育扩展,煤样内变形局部化带发育扩展相对较快,变形局部化带交汇、贯通导致组合体试样整体破坏失稳;同时,煤样内裂纹扩展传播至灰岩内,并与灰岩内裂纹贯通而导致其拉伸破坏,煤样最终发生拉-剪混合式破坏。

2) 灰岩-煤组合体试样变形局部化带位移错动量演化受变形局部化带形成、扩展与贯通影响,主要经历微变化、线性缓慢增长、非线性加速增长三个阶段,与组合体试样应力变化基本对应;峰后变形局部化带快速扩展贯通,位移错动量非线性加速增长,对应的轴向应力递减。变形局部化带位移错动量非线性加速增长可作为组合体试样变形破坏预测的重要指标。

3) 灰岩-煤组合体试样中灰岩、煤样弹性变形能密度演化可分为初始波动增长阶段、相对稳定增长阶段、快速增长阶段以及降低-波动稳定阶段,外界输入的能量主要被煤样所消耗,煤样首先发生渐进破坏而释放能量,交界面处灰岩、煤样由协同变形转为非协同变形;煤样破坏诱发灰岩回弹变形,导致灰岩释放弹性能,部分弹性能作用于煤样上而加剧了其破坏。

#### 参考文献:

- [1] 李建功. 深部矿井应力主导型煤岩瓦斯动力灾害声发射监测预警方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 20-27.  
LI Jianguo. Acoustic emission monitoring and early warning method for stress dominated coal-gas dynamic disaster in deep mines[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(4): 20-27.
- [2] 魏明尧, 张守文. 动力灾害过程中锚杆支护的极限承载能力数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 37-45.  
WEI Mingyao, ZHANG Shouwen. Simulation study of maximum bolt supporting capacity during dynamic disaster[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(4): 37-45.
- [3] 吕艳伟, 孙传平, 沈宝堂. 复合应力状态下砂岩损伤演化与裂纹扩展特征试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 37-45.  
LÜ Yanwei, SUN Chuanping, SHEN Baotang. Experimental study on damage evolution and crack propagation characteristics of sandstone under composite stress state[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(1): 37-45.
- [4] 王学怀, 武晋文, 高经武, 等. 基于数字散斑方法的花岗岩断裂力学特性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 483-488.  
WANG Xuehuai, WU Jinwen, GAO Jingwu, et al. Study on fracture mechanics characteristics of granite based on DIC technique[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2018, 39(5): 483-488.
- [5] 王晓雷, 蒋鹏程, 闫顺奎, 等. 层状片麻岩力学性质与变形场演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1255-1262.

- WANG Xiaolei, JIANG Pengcheng, YAN Shunxi, et al. Mechanical properties and deformation field evolution of layered gneiss[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(6): 1255-1262.
- [6] 彭守建, 冉晓梦, 许江, 等. 基于3D-DIC技术的砂岩变形局部化荷载速率效应试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3591-3603.
- PENG Shoujian, RAN Xiaomeng, XU Jiang, et al. Experimental study on load rate effect of sandstone deformation localization based on 3D-DIC technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3591-3603.
- [7] 杨小彬, 韩心星, 王逍遥, 等. 等幅循环加载岩石变形局部化带位移演化规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1041-1048.
- YANG Xiaobin, HAN Xinxing, WANG Xiaoyao, et al. Displacements evolution laws of deformation localization bands of rock under constant amplitude cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1041-1048.
- [8] 范海军, 肖盛燮, 彭凯. 基于应变局部化的岩样单轴压缩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2634-2641.
- FAN Haijun, XIAO Shengxie, PENG Kai. Study on constitutive model of rock sample in uniaxial compression based on strain localization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2634-2641.
- [9] 潘一山, 王凯兴. 岩体间超低摩擦发生机理的摆型波理论[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 833-844.
- PAN Yishan, WANG Kaixing. Pendulum waves theory on the mechanism of anomalously low friction between rock masses[J]. Seismology and Geology, 2014, 36(3): 833-844.
- [10] 宋义敏, 邓琳琳, 吕祥锋, 等. 岩石摩擦滑动变形演化及声发射特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2899-2906.
- SONG Yimin, DENG Linlin, LÜ Xiangfeng, et al. Study of acoustic emission characteristics and deformation evolution during rock frictional sliding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2899-2906.
- [11] 曾韦, 刘向君, 梁利喜, 等. 页岩卸荷能量演化特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 719-726.
- ZENG Wei, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Experimental study on the energy evolution of shale unloading failure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 719-726.
- [12] 李波波, 张尧, 任崇鸿, 等. 三轴应力下煤岩损伤-能量演化特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 98-104.
- LI Bobo, ZHANG Yao, REN Chonghong, et al. Study on damage-energy evolution characteristics of coal under triaxial stress[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 98-104.
- [13] 武旭, 张丽媛, 孙景来, 等. 单轴压缩下交叉裂隙花岗岩变形与能量演化分析[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(3): 77-83.
- WU Xu, ZHANG Liyuan, SUN Jinglai, et al. Deformation and energy evolution analysis of granite with cross-cracks under uniaxial compression[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(3): 77-83.
- [14] 刘鹏飞, 范俊奇, 郭佳奇, 等. 三轴应力下花岗岩加载破坏的能量演化和损伤特征[J]. 高压物理学报, 2021, 35(2): 44-53.
- LIU Pengfei, FAN Junqi, GUO Jiaqi, et al. Damage and energy evolution characteristics of granite under triaxial stress[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(2): 44-53.
- [15] YIN D W, CHEN S J, GE Y, et al. Mechanical properties of rock-coal bi-material samples with different lithologies under uniaxial loading[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 322-338.
- [16] LI F X, YIN D W, ZHU C, et al. Effects of kaolin addition on mechanical properties for cemented coal gangue-fly ash backfill under uniaxial loading[J]. Energies, 2021, 14: 3693.
- [17] 万国庆, 黄锋, 刘星辰, 等. 数字散斑技术在混凝土单轴压缩试验中的应用[J]. 光学技术, 2020, 46(2): 152-157.
- WAN Guoqing, HUANG Feng, LIU Xingchen, et al. Application of digital speckle technique in concrete uniaxial compression test[J]. Optical Technique, 2020, 46(2): 152-157.
- [18] 郑捷, 姚孝新, 陈颢. 岩石变形局部化的实验研究[J]. 地球物理学报, 1983, 26(6): 554-563.
- ZHENG Jie, YAO Xiaoxin, CHEN Yong. A experimental study on localization of deformation of rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1983, 26(6): 554-563.
- [19] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1352-1356.
- SONG Yimin, JIANG Yaodong, MA Shaopeng, et al. Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1352-1356.
- [20] 孙金斗. 基于层间摩擦滑动的冲击地压实验研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- SUN Jindou. Experimental study on rockburst based on interlayer friction and sliding[D]. Beijing: North China University of Technology, 2020.