

# 双轴加载下大尺寸岩石裂隙演化规律试验

陈军涛<sup>1,2,3</sup>, 杨飞<sup>1</sup>, 张呈祥<sup>4</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. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

3. 河南理工大学 河南省矿产资源绿色高效开采与综合利用重点实验室, 河南 焦作 454000;

4. 山东能源集团 淄博矿业集团有限责任公司, 山东 淄博 255100)

**摘要:**为准确掌握深部岩体的破裂过程中失稳机制,对大尺寸试样进行了不同加载速率下的双轴加载试验,分析了试件破裂过程中裂隙演化规律和声发射行为特征.在大量试验的基础上,选取了由 425 硅酸盐水泥、砂子(粒径 $\leq 2$  mm)、石膏、高效减水剂和水组成的砂浆材料,确定了各组分的最优配比.借助岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统和 PCI-2 声发射监测系统,分析了不同加载速率对大尺寸试样裂隙演化的影响规律和破裂的声发射行为特征.结果表明:加载速率越大,大尺寸试样越容易产生反翼裂隙,发生突变性剪切破坏,而不同加载速率下试样破裂的声发射行为特征基本相似,当加载到 90%  $\sigma_c$  时,声发射事件累计数瞬时增多,表现为裂隙的瞬时扩展贯通,导致试样最终破裂.

**关键词:**双轴加载;加载速率;大尺寸;裂隙演化

**中图分类号:**TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)04-0016-07

## Experimental research on rock cracks propagation evolution under different biaxial loading

Chen Juntao<sup>1,2,3</sup>, Yang Fei<sup>1</sup>, Zhang Chengxiang<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Henan Key Laboratory for Green and Efficient Mining and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

4. Shandong Energy Zibo Mining Group Co., Ltd, Zibo 255100, China)

**Abstract:** To accurately grasp the failure mechanism of deep rock mass, the large size specimens made by rock-like material were compressed under different biaxial loading rates, and the AE (Acoustic Emission) behavior characteristics of specimens crack propagation were analyzed. Based on plenty of experimental data from previous research, the 425 portland cement, sand with particle size less than 2 mm, gypsum, water-reducer and water were chosen as rock-like material, and optimal proportion of various components was obtained by orthogonal test. Then, the influence law of different biaxial loading rates on crack evolution to large size specimens was analyzed together with its AE behavior characteristics, applying the true triaxial rock test system of coupled stress-seepage and PCI-2 real-time monitoring system of AE. The results showed that the larger loading rate, the much easier anti-wing cracks appeared so that sudden shear failure happened in specimens. However,

**收稿日期:**2015-12-27

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51604167);中国博士后科学基金资助项目(2016M601171);矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放课题基金资助项目(MDPC2016ZR01);河南省矿产资源绿色高效开采与综合利用重点实验室开放基金资助项目(S201610);山东科技大学人才引进科研启动基金资助项目(2015RCJJ043)

**通信作者:**陈军涛(1985-),男,山东临朐人,博士,讲师,主要从事矿山岩石力学与矿井突水灾害预防控制方面的研究工作. E-mail: polariscjt@126.com

the AE behavior characteristics of specimen failure under different biaxial loading rates are similar. The cumulative AE events abruptly increase when the load is to 90%  $\sigma_c$ , showing the cracks transfixionat due to propagation which resulte in specimens fracture.

**Keywords:** biaxial loading; loading rate; large size; crack evolution

深部煤层开采后,采空区底板由三向受力状态变为双向受力状态,这种应力状态的变化必然引起底板岩体向上弯曲,且在拉剪和压-拉-压反复作用下产生剪切裂隙、张拉裂隙和离层裂隙,这些裂隙在高应力和开采扰动作用下将相互连通形成导水通道.由矿井煤层的实际开采规律可知,煤层推进速度对顶底板岩体的破裂失稳有较大的影响.因此,深入分析双向应力状态下不同加载速率对底板岩体裂隙演化的影响规律,对准确掌握底板岩体的破裂模式及其失稳机制具有重要意义.

国内外学者对双向应力状态下岩石的破裂失稳特征进行了大量研究,获得了丰富的科研成果,如李佳<sup>[1]</sup>采用尺寸为 30 mm×60 mm×120 mm 的流纹岩,研究了岩石在双轴压缩下的变形破坏规律与声发射特征;王敏<sup>[2]</sup>研究了双轴加载下尺寸为 280 mm×185 mm×40 mm 的类岩石试件裂隙破坏机制与裂隙贯通模式;张社荣等<sup>[3]</sup>利用数值计算的方法研究了尺寸为 60 mm×120 mm×30 mm 的双裂隙花岗岩试件在双轴压缩试验下的破坏机制;孙熙震<sup>[4]</sup>对尺寸为 100 mm×100 mm×200 mm 含有预制三维裂纹的类岩石材料进行单轴加载实验,研究了三维裂纹声发射特征及传播破裂规律.目前,关于岩石双向应力状态下裂隙演化的研究对象大多是中、小尺寸试样,而作为非均质性的岩石,其力学性质具有明显的尺寸效应:随着尺寸的增加,岩样力学性质的变化幅度会逐渐减小,直至力学参数趋于一个固定值<sup>[5-6]</sup>.吕兆兴等<sup>[7]</sup>通过数值试验得出,当试样尺寸大于 70 mm×210 mm 时,岩石材料的强度变化逐渐趋于稳定.由此看出,大尺寸岩石的加载破裂试验更能准确的反映真实岩体的破裂失稳机制.

基于济北矿区深部岩体的复杂环境,本文利用实验室自主研发的岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统和美国物理声学公司 PAC 生产的 MISTRAS 系列 PCI-2 声发射系统,深入研究双轴加载条件下大尺寸类岩石试样(400 mm×200 mm×200 mm)的破裂失稳过程,分析不同加载速率对岩石内部裂隙扩展演化和贯通的影响规律,揭示深部煤层开采后底板岩体的破裂失稳机制和声发射行为特征.

## 1 声发射裂隙定位原理

岩石声发射的定位研究始于 20 世纪 60 年代后期,Scholz 用一组声发射探头组成探头阵,利用声发射 S 波的初到时差,采用最小二乘法对 22 个较大的 AE 事件进行了定位,开启了多通道拟合声发射源的定位算法.声发射事件定位主要是通过不同位置的传感器监测到的弹性波到达时间差来反演声发射事件的源位置,通过时间差应用单纯形算法或 Geiger 定位法计算岩石裂隙扩展和破裂的事件位置.岩石裂隙扩展和破裂将产生突变型信号<sup>[8]</sup>,相对于 Geiger 定位法,单纯形定位法更能准确地定位岩石的破裂位置<sup>[9]</sup>.因此,本次试验的声发射事件定位选用单纯形算法,定位原理见文献[10].

## 2 大尺寸类岩石试样的制备

目前研究岩石裂隙扩展演化的试验主要有 2 种:类岩石材料的裂隙扩展演化和真实岩石的裂隙扩展演化.利用真实岩石预制裂隙加工难度大,技术要求高,观测难度大.所以对真实岩石材料中裂隙的扩展、贯通和破坏机制的研究成果较少<sup>[11]</sup>,大多数学者采用类岩石试样的裂隙演化结果反演真实岩石的破裂规律.

### 2.1 类岩石材料的选取与配比选择

选取合适的试验材料是成功制备与真实岩石力学性质相似的类岩石试样的关键.参考大量的类岩石材料的相关文献,配制的类岩石试样要与真实岩石在脆性、剪胀和摩擦特性等方面基本相似<sup>[12]</sup>.根据材料性能的对比分析<sup>[13]</sup>,最终选用 425 硅酸盐水泥、砂子(粒径 $\leq 2$  mm)、石膏、高效减水剂和水组成的砂浆混合材料进行类岩石试样的制备,砂浆混合材料主要成分的性能如表 1 所示.

表1 砂浆材料中主要成分的性能

材料名称	优点	缺点
425 硅酸盐水泥	增加强度	脆性不明显
砂子	增加剪胀性	无
石膏	增加脆性 胶结作用	剪胀性不足
高效减水剂	增强流动性	无

为确定 400 mm×200 mm×200 mm 大尺寸试样中砂浆材料各组分的含量,基于已有的类岩石材料性能的研究成果,采用正交表 L25(54) 确定 25 组砂浆材料的各组分含量,每组配制 5 个标准试样(利用规格为  $\Phi 50$  mm×100 mm 的 PVC 管制作),共制作 125 个试样,然后对试样进行单轴压缩试验(每组的前 4 个试样,25 组共计 100 个标准试样)和单轴拉伸试验(每组的第 5 个试样,每个试样切割成 3 个  $\Phi 50$  mm×25 mm,25 组共计 75 个试样),测试试样的单轴抗压强度  $\sigma_c$ , 单轴抗拉强度  $\sigma_t$ , 弹性模量  $E$ , 泊松比  $\mu$  和密度  $\rho$  和断裂韧度  $K_{IC}$  等参数.结合济北矿区下组煤底板砂岩的力学性质和破坏形态,最终确定第 22 组类岩石试样与深部底板岩石的力学性质基本相近,其砂浆材料中各组分的配比为水泥:砂子:石膏:水:高效减水剂=31:53:2:14:0.31,试样的破坏形态如图 1 所示,类岩石材料和深部真实岩石的物理力学参数的比较如表 2 所示.



图1 第22组试样的破坏形态

表2 类岩石及真实岩石物理力学参数的比较

样品	$\sigma_c$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa	$E$ /MPa	$\mu$	$\rho$ /(g/cm <sup>3</sup> )	$K_{IC}$ /(MPa·m <sup>0.5</sup> )
砂浆	20.08	2.44	3 220.6	0.12	2.14	--
砂岩	16.00~68.00	2.10~10.00	1 323.0~19 709.0	0.02~0.24	2.10~2.30	0.18~2.32

## 2.2 大尺寸类岩石试样的制备

利用选取的最优配比的砂浆材料制备 400 mm×200 mm×200 mm 大尺寸试样.作者自主研制了大尺寸试样的配制模具,如图 2 所示,采用厚度为 0.3 mm 的薄钢片预制裂隙,制备成型的大尺寸试样如图 3 所示,N-1 和 N-2 表示无裂隙的大尺寸试样,用于试验前试样力学参数的测定;SF-1~SF-5 为预制单裂隙试样,裂隙倾角为 45°,用于研究不同加载速率下试样裂隙的扩展演化及声发射行为特征,具体制备过程见文献[14].



图2 大尺寸试样制备模具



图3 制取的大尺寸试样

## 2.3 试验设备及仪器

本试验采用实验室自主研发的岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统<sup>[15-17]</sup>(可以实现三维应力  $\sigma_1, \sigma_2$  和  $\sigma_3$  的独立伺服控制)和美国 PAC 公司生产的 PCI-2 声发射监测系统,对大尺寸类岩石试样进行双轴加

载下的裂隙演化规律研究,试验时保持真三轴试验加载与声发射监测过程在时间上的同步。

### 3 双轴加载速率对类岩石裂隙演化影响规律

#### 3.1 试验准备

本次试验的声发射测试分析系统设置如下:主放为 40 dB, 阈值为 45 dB, 探头谐振频率为 20~400 kHz, 采样频率为 10 MHz, 试样 2 个侧面共放置 6 个声发射传感器, 如图 4 所示. 实现对试样裂隙扩展的三维动态定位。

试验前, 对试样两端进行磨光处理, 消除初始加载时产生的干扰信号. 为保证传感器与试样之间的良好耦合效果, 在传感器与试样间涂抹 1 层硬脂酸, 同时在试样和上、下压头之间涂抹 1:1 (质量比) 的硬脂酸和凡士林的熔融混合物<sup>[18]</sup>, 这样不仅可以最大限度地减少端部摩擦效应, 有效消除试样端部表面过早产生裂隙甚至剥落的发生, 而且还可以充分降低端部噪声。

声发射定位前采用直径 0.5 mm 的 HB 铅笔对模拟源进行传感器响应的校准, 保证传感器的响应幅度均超过 95 dB 之后再继续进行加载试验。

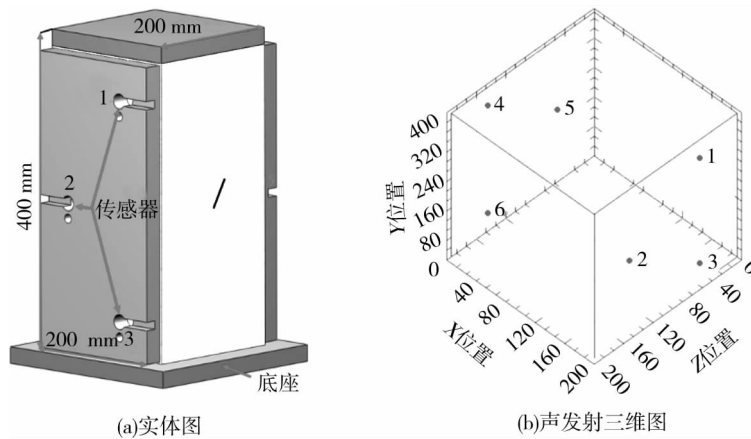


图4 传感器分布

#### 3.2 试样力学参数的确定

为获得大尺寸类岩石试样的力学参数, 首先对具有相同砂浆材料各组分分配比的同尺寸无预制裂隙类岩石试样进行单轴加载试验, 获得试样加载过程中应力、声发射事件率随应变变化的曲线, 如图 5 所示. 大尺寸试样即将达到峰值强度时出现了较小的应力降, 说明试样局部裂隙产生了瞬时连通, 加速了试样的最终破裂。

从图 5 的单轴加载试验中可以看出, 大尺寸试样的单轴压缩强度为 18 MPa, 弹性模量为 80 GPa, 轴向最大应变为  $3.6 \times 10^{-4}$ , 为含预置裂隙的大尺寸试样进行双轴加载试验提供了非常有用的力学参数。

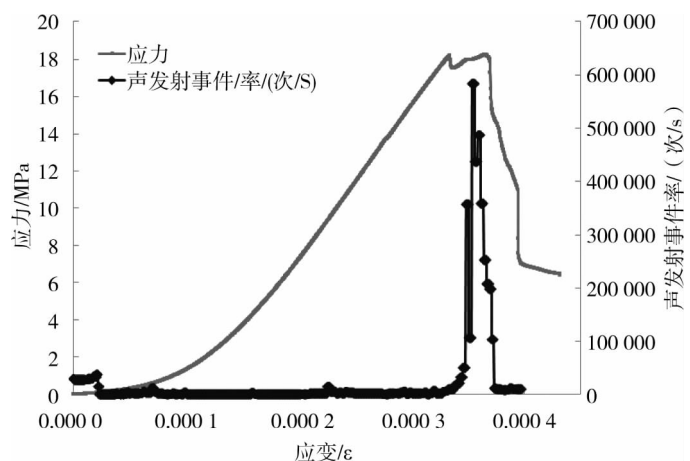


图5 单轴压缩试验的声发射分布曲线(试样 N-2)

#### 3.3 加载速率对类岩石裂隙演化影响规律分析

试验最大的特点为大尺寸、双轴加载和裂隙扩展的实时跟踪和定位. 大尺寸类岩石双轴加载试验的加载速率分别为 1.5 kN/s (SF-3 试样), 1 kN/s (SF-4 试样), 0.5 kN/s (SF-5 试样). 为分析双轴不同加载速

率对预制单裂隙试样扩展演化的影响,试验采用一次性加载方式:试验开始前,调整试验机压头与试样端部接触良好;然后,以相同的速率对试样同时施加轴向和侧向加载,当侧向载荷  $\sigma_3$  施加到最大值 12 MPa 后,保持侧向载荷不变,继续增加轴向载荷  $\sigma_1$ ,直至轴向载荷加载到最大值 40 MPa 或试样达到破裂为止。(因 SF-1 和 SF-2 试样在试验加载过程中受损,在此只对大尺寸试样 SF-3, SF-4 和 SF-5 进行分析)

大尺寸类岩石试样在进行双轴加载试验时,预制单裂隙的试样破裂经历了与单轴加载大尺寸试样破裂相似的过程, SF-3~SF-5 试样的最终破裂形态如图 6 所示.从图 6 中可以看出,加载速率对双轴作用下试样的裂隙扩展模式及最终破裂形态有直接的关系.当试样加载速率为 1.5 kN/s 时,试样表面只出现了反翼裂隙;当试样加载速率为 1 kN/s 时,试样裂隙首先起裂产生翼裂隙,随着加载载荷的增大,预制裂隙的尖端产生了反翼裂隙;当试样加载速率为 0.5 kN/s 时,试样同时产生了翼裂隙和次生共面裂隙,说明加载速率过大将产生较大的剪切应力,预制裂隙在剪切作用下起裂形成反翼裂隙,裂隙尖端还没来得及起裂形成翼裂隙,试样便在较大的加载速率下发生了剪切破坏.这与文献[19]得到的试验结果一致,反映为现场工作面推进速度过快导致底板岩体短时间内受力较大,底板岩体破裂是采动应力超过岩体极限强度发生剪切的结果,而非裂隙尖端应力集中发生扩展演化导致的岩体破裂.大尺寸类岩石试样的双轴加载试验结果表明,煤层开采速率较大时,底板岩体内部的裂隙对其破裂失稳产生的影响较小,岩体在剪应力下的破裂具有突变性和不可预见性,不利于底板破坏的预控和突水的预防.

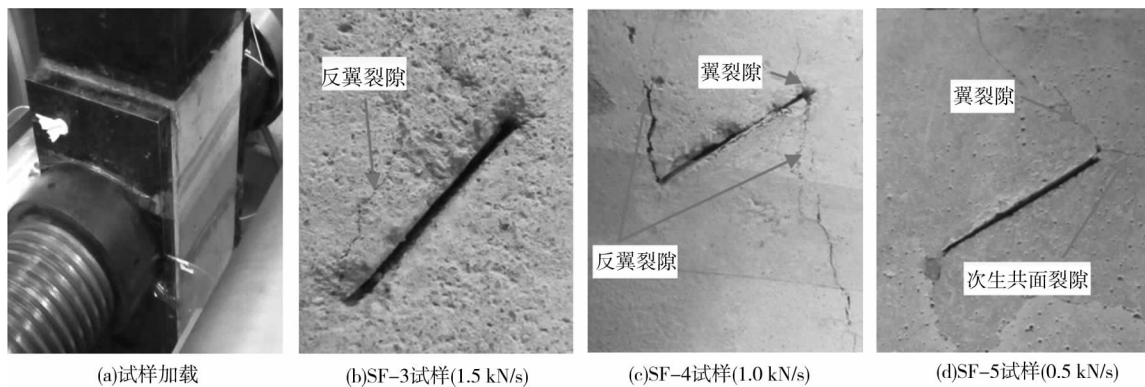


图 6 试样双轴加载及裂隙演化形态

### 3.4 双轴加载类岩石裂隙扩展的声发射行为特征

由大尺寸类岩石试样的双轴加载试验可以得出,不同加载速率下试样破裂过程中出现的声发射行为特征基本相似,裂隙扩展主要分为裂隙压密阶段、弹性变形阶段、裂隙稳步扩展阶段和裂隙不稳定扩展 4 个阶段.图 7 为加载过程中试样 SF-5 处于不同应力水平时的累计声发射事件空间分布图,图 8 为加载过程中试样 SF-5 产生的声发射事件累计数与能量率的变化图.

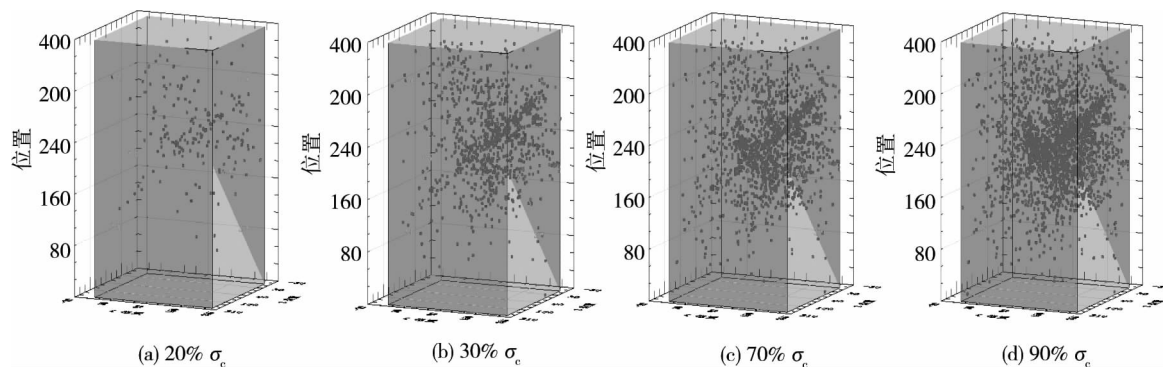


图 7 不同应力水平时累计 AE 事件的空间分布(试件 SF-5)

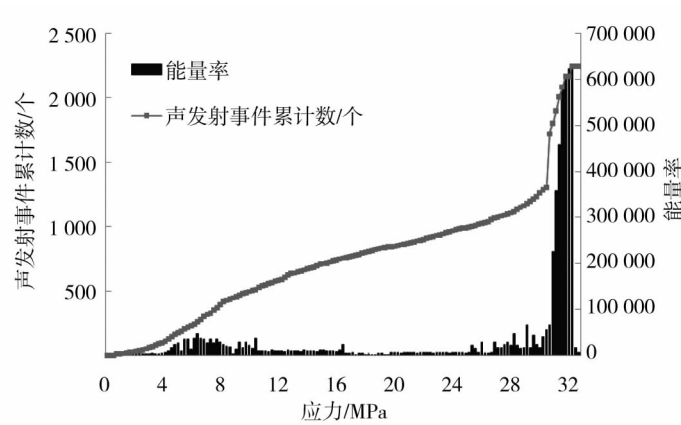


图8 试样加载过程中的声发射事件累计数与能量率(试样 SF-5)

下面以试样 SF-5 为例,说明双轴加载过程中单裂隙试样扩展的声发射行为特征.

1) 裂隙压密阶段.双轴加载初期,试样的声发射事件数较少,多数集中在试样的中间部位(预制裂隙位置),这是试样预制裂隙压密时释放的能量信号.

2) 弹性变形阶段.随着加载试验的进行,试样预制裂隙发生起裂扩展,声发射事件总数逐渐增多,能量率逐步增大,但声发射事件累计数仍然较低.

3) 裂隙的稳步扩展阶段.当外部载荷加载到  $30\% \sigma_c$  时,预制裂隙扩展产生的能量率出现小幅增加,声发射事件累计数迅速增大,翼裂隙扩展路径周围产生较多的声发射事件;随着加载的继续进行,裂隙扩展的声发射信号进入相对平稳期,裂隙处于平缓的增多阶段,能量率无明显的幅度变化.

4) 裂隙不稳定扩展阶段.当试验加载到  $90\% \sigma_c$  时,声发射事件累计数出现了明显的增多,曲线斜率增大,能量率也在短时间内急剧增大,标志着加载试样的裂隙进入了不稳定的扩展阶段,声发射活动剧烈,裂隙扩展贯通形成滑动面,导致了试样的最终破裂.从图 7 中还可以看出,类岩石的翼裂隙扩展路径清晰可见,同时反翼裂隙附近也出现了一些声发射事件,表明反翼裂隙起裂时受到了较大的剪应力作用.大尺寸类岩石双轴加载试验说明声发射能较好地实现对试样裂隙扩展过程的实时追踪和定位.

## 4 结论

1) 砂浆材料中各组分的最优配比:水泥(425 硅酸盐水泥):砂子(粒径 $\leq 2$  mm):石膏:水:高效减水剂为 31:53:2:14:0.31.

2) 大尺寸试样双轴加载过程中,试样裂隙扩展经历了裂隙压密阶段、弹性变形阶段、裂隙的稳步扩展与扩容阶段、裂隙不稳定扩展阶段 4 个阶段.

3) 加载速率越大,试样越容易产生反翼裂隙,发生剪切破坏,说明较大开采速率的底板岩体破裂具有突变性和不可预见性.

4) 不同加载速率下试样破裂的声发射行为特征基本相似,当载荷加载到单轴抗压强度的 90% 时,声发射事件累计数瞬时增多,导致试样最终破裂,说明声发射能较好的实现对试样裂隙扩展演化的实时追踪和监测.

## 参考文献:

- [1] 李佳.单轴和双轴压缩下裂隙性岩石力学特性试验研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [2] 王敏.双轴压缩下预制裂隙类岩石材料破坏实验研究与数值分析[D].湘潭:湖南科技大学,2014.
- [3] 张社荣,孙博,王超,等.双轴压缩试验下岩石裂纹扩展的离散元分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(s2):

3083-3091.

- [4] 孙熙震,李杨杨,江宁,等.类岩石材料三维裂纹传播规律试验研究[J].岩土力学,2009,37(4):965-972.
- [5] 倪红梅,朱运华.单轴压缩下岩石材料体积效应的数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1):45-47.
- [6] 梁正召,王述红,唐春安,等.非均匀性岩石破裂的网格效应[J].岩石力学与工程学报,2005,24(s1):5108-5112.
- [7] 吕兆兴,冯增朝,赵阳升.岩石的非均质性对其材料强度尺寸效应的影响[J].煤炭学报,2007,32(9):917-920.
- [8] 杨明伟.声发射检测[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 刘建坡,王洪勇,杨宇江,等.不同岩石声发射定位算法及其实验研究[J].东北大学学报,2009,30(8):1193-1196.
- [10] 裴建良,刘建锋,左建平,等.基于声发射定位的自然裂隙动态演化过程研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):696-704.
- [11] 杨圣奇,刘相如,李玉寿.单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(s2):3539-3546.
- [12] 郭彦双.脆性材料中三维裂隙断裂试验、理论与数值模拟研究[D].济南:山东大学,2007.
- [13] 孙文斌,张士川,李杨杨,等.固流耦合相似模拟材料研制及深部突水模拟试验[J].岩石力学与工程学报,2015,34(s1):2665-2670.
- [14] 陈军涛.深部开采底板破裂与裂隙扩展演化基础试验研究[D].青岛:山东科技大学,2014.
- [15] 尹立明,郭惟嘉,陈军涛.岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统的研制与应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(s1):2820-2826.
- [16] 陈军涛,尹立明,孙文斌,等.深部新型固流耦合相似材料的研制与应用[J].岩石力学与工程学报,2015,34(s2):3956-3964.
- [17] 尹立明.深部煤层开采底板突水机理基础实验研究[D].青岛:山东科技大学,2011.
- [18] 许江,李树春,唐晓军,等.单轴压缩下岩石声发射定位实验的影响因素分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):765-772.
- [19] 卢爱红,张连英.水平构造应力对煤层底板突水的影响分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3):395-398.