

文章编号:1674-2869(2017)06-0616-06

# 磷块岩三轴压缩破坏特性与声发射规律的研究

涂力<sup>1</sup>,张电吉<sup>1\*</sup>,潘登<sup>1</sup>,吝曼卿<sup>1</sup>,邓天赐<sup>1</sup>,杨丹丹<sup>1</sup>,韩瑞庭<sup>1</sup>,姚金蕊<sup>2</sup>,何忠国<sup>2</sup>

1. 武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 贵州开磷有限责任公司,贵州 贵阳 550000

**摘要:**采用应力加载系统和声发射测试系统,研究了三轴压缩试验中磷块岩裂纹破坏特性及声发射活动规律.试验及分析研究表明:磷块岩三轴声发射加载全过程可分为裂隙压密阶段、弹性压缩阶段、裂纹初级扩展阶段、裂纹剧烈扩展阶段、宏观破坏阶段;磷块岩声发射事件在其强度最大阶段和宏观破坏阶段均有产生;磷块岩声发射事件数随着围压从2 MPa增加到4 MPa而减少.

**关键词:**磷块岩;三轴压缩试验;声发射;裂纹;破坏特性

**中图分类号:**TU452 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2017.06.016

## Failure Characteristics and Laws of Acoustic Emission for Phosphorite Under Triaxial Loading

TU Li<sup>1</sup>, ZHANG Dianji<sup>1\*</sup>, PAN Deng<sup>1</sup>, LIN Manqing<sup>1</sup>, DENG Tianci<sup>1</sup>, YANG Dandan<sup>1</sup>, HAN Ruiting<sup>1</sup>, YAO Jinrui<sup>2</sup>, HE Zhongguo<sup>2</sup>

1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Guizhou Kailin Co., LTD, Guiyang 550000, China

**Abstract:** Failure characteristics of crack and laws of acoustic emission activity of phosphorite were investigated by the strain loading system and the acoustic emission testing system. The experimental results show that the process of acoustic emission for phosphorite under triaxial loading includes five stages, the fissure compaction, the elastic compression, the primary crack propagation, the dramatical crack propagation, and the macroscopic failure. Acoustic emission events hexisted at the maximum intensity and the macroscopic failure of phosphorite. The acoustic emission events decrease with the confining pressure of phosphorite increasing from 2 MPa to 4 MPa.

**Keywords:** phosphorite; triaxial loading test; acoustic emission; crack; failure characteristics

我国磷矿大多存在于磷块岩矿床上,长期处于荷载作用下地下开采的磷块岩较易出现不同程度和形式的破坏和变形<sup>[1]</sup>.研究磷块岩裂纹产生及扩展贯通破坏机理,找出磷块岩的开裂破坏规律,

既可对磷块岩的安全开采提供理论依据,同时也能科学预防地质灾害,此外,研究出磷块岩的破坏机理,对于磷块岩矿开采时的爆破优化等矿体的破碎处理也具有指导作用<sup>[2-3]</sup>.

收稿日期:2017-07-04

基金项目:国家自然科学基金(51474159,51504167);武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2016046)

作者简介:涂力,硕士研究生. E-mail:844789909@qq.com

\*通讯作者:张电吉,博士,教授. E-mail:dianjizhang@wit.edu.cn

引文格式:涂力,张电吉,潘登,等. 磷块岩三轴压缩破坏特性与声发射规律的研究[J]. 武汉工程大学学报,2017,39(6):616-621.

TU L, ZHANG D J, PAN D, et al. Experimental studies of failure characteristics and laws of acoustic emission for phosphorite under triaxial loading[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(6):616-621.

自然状态下的磷块岩有条带状、碎屑状、致密状三种,其中由白云石和胶磷矿胶结成条带的磷块岩最多.本次试验选取的则是此种磷块岩,磷块岩胶结构造如图1所示.

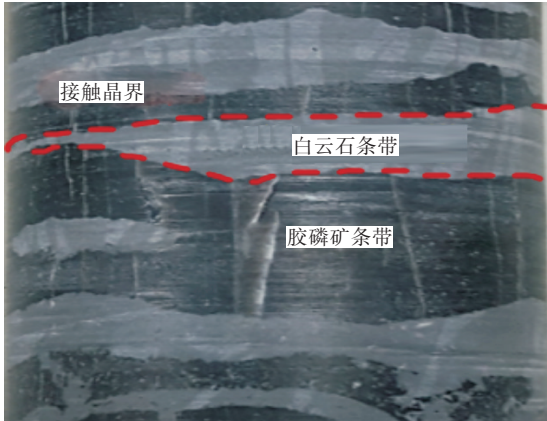


图1 磷块岩胶结构造图  
Fig. 1 Cemented structure of phosphorite

岩石声发射(acoustic emission, AE)是由岩石受力时的裂纹扩展行为所引起的.声发射的应力水平与岩石的微结构特征有关,不同类型的岩石的表现不同<sup>[4-5]</sup>.岩石加载过程中裂隙发展情况和岩石破坏特征是岩石声发射主要反应的两个方面.矿产资源的探测是岩石声发射的最早起源<sup>[6]</sup>.Mansurov V A系统研究了不同岩石的声发射特征.左建平<sup>[6]</sup>等研究了煤岩、泥岩等变形破坏过程中渗透率随荷载的变化规律.我国学者在20世纪70年代开始声发射的研究,他们对岩石进行加载并记录声发射事件,以此来分析不同岩石破坏过程的声发射特征<sup>[7-8]</sup>.

学者们先前的研究让人们更加了解了岩石声发射特性,而且推动了岩石多样性研究的进程,但存在一定的局限性<sup>[9-11]</sup>,岩石声波或声发射试验研究大都局限于单轴压缩试验中,而矿井地下岩石绝大多数情况下均处于三向应力状态,所以开展三轴压缩条件下声发射岩石损伤特征试验研究与工程实际贴合更紧密.由于试验设备的限制,在以前的大多数三轴加载试验中,岩石的声发射接收传感器布置于三轴室之外,这种布置法在试验中会产生较大的误差.

1 试验仪器及方案

1.1 试验设备及试验试样

三轴试验采用美国GCTS公司RXT-1000高温高压岩石三轴试验仪.此试验仪器满足国际岩石

力学学会岩石三轴测试要求<sup>[12]</sup>.  
声发射则是在岩石三轴仪上连接前置放大器,并设置阈值值和滤波值,滤除系统噪声.在岩样上设置6个声发射探头,以此进行声发射定位,观测岩样破碎活动,如图2所示.同时利用AEwin软件对岩样进行监测,得出矿样声发射变化过程图<sup>[13-14]</sup>.

本次试验所选用的岩样取自开阳磷矿,本次三轴及声发射试验做了马路坪矿的3块试样,包括磷块岩3块(磷块岩1,磷块岩2,磷块岩3).选择地质状态良好的磷块岩加工成圆柱体,试样参数如表1所示.

表1 磷块岩试样尺寸  
Tab. 1 Size of phosphorite samples

样品编号 number	直径	高度	质量	密度	围压
	diameter	height	mass	density /	confining
	D / mm	H / mm	m / g	(g/cm <sup>3</sup> )	pressure / MPa
磷块岩1	55.3	101.2	670.6	2.8	2
磷块岩2	55.3	101.3	682.4	2.8	3
磷块岩3	55.5	97.9	655.2	2.8	4

1.2 试验原理与方案

声发射事件定位技术本质是时差定位,即对各个声发射通道信号到波速和探头间距等参数的测量及一定的算法运算来确定声源的坐标或位置.时差定位是一种精确而又复杂的定位方式,广泛用于试样和构件的检测.

本文研究了同一类岩石在不同围压下的三轴压缩试验中的力学与声学特征,对磷块岩开裂破坏实验前和实验后状态做了比较.

试验开始前,为了保证传感器与试样的充分接触,在岩样端面及侧面涂抹耦合剂,然后将磷块岩试样放置在压力室的底座上,使用热风枪将岩石密封在热缩管内,以防止三轴室液压油浸入岩体.等到热缩管与岩样贴合完全,再将轴向应变器与径向应变器安装到合适的位置,在仪器规定的位置装上固定声发射传感器.轴向应变器与径向应变器可实时将岩样变形参数传输到计算机上.声发射传感器如图2所示,将压力盖降下来后探头在压力室内部,此声发射传感器的布置方案如图3所示.

自然状态下的磷块岩有条带状、碎屑状、致密状三种,其中由白云石和胶磷矿胶结成条带的磷块岩最多.本次试验选取的则是此种磷块岩,磷块岩胶结构造如图1所示.

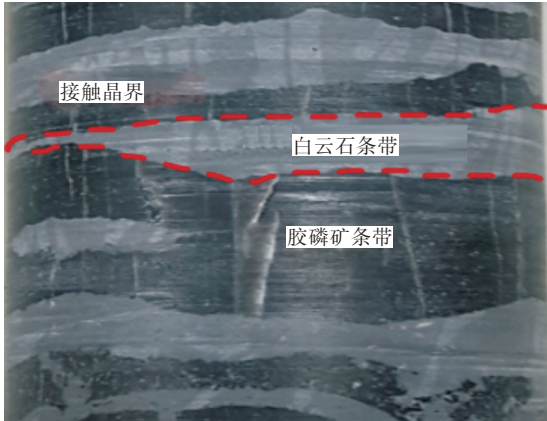


图1 磷块岩胶结构造图  
Fig. 1 Cemented structure of phosphorite

岩石声发射(acoustic emission, AE)是由岩石受力时的裂纹扩展行为所引起的.声发射的应力水平与岩石的微结构特征有关,不同类型的岩石的表现不同<sup>[4-5]</sup>.岩石加载过程中裂隙发展情况和岩石破坏特征是岩石声发射主要反应的两个方面.矿产资源的探测是岩石声发射的最早起源<sup>[6]</sup>.Mansurov V A系统研究了不同岩石的声发射特征.左建平<sup>[6]</sup>等研究了煤岩、泥岩等变形破坏过程中渗透率随荷载的变化规律.我国学者在20世纪70年代开始声发射的研究,他们对岩石进行加载并记录声发射事件,以此来分析不同岩石破坏过程的声发射特征<sup>[7-8]</sup>.

学者们先前的研究让人们更加了解了岩石声发射特性,而且推动了岩石多样性研究的进程,但存在一定的局限性<sup>[9-11]</sup>,岩石声波或声发射试验研究大都局限于单轴压缩试验中,而矿井地下岩石绝大多数情况下均处于三向应力状态,所以开展三轴压缩条件下声发射岩石损伤特征试验研究与工程实际贴合更紧密.由于试验设备的限制,在以前的大多数三轴加载试验中,岩石的声发射接收传感器布置于三轴室之外,这种布置法在试验中会产生较大的误差.

1 试验仪器及方案

1.1 试验设备及试验试样

三轴试验采用美国GCTS公司RXT-1000高温高压岩石三轴试验仪.此试验仪器满足国际岩石

力学学会岩石三轴测试要求<sup>[12]</sup>.

声发射则是在岩石三轴仪上连接前置放大器,并设置阈值值和滤波值,滤除系统噪声.在岩样上设置6个声发射探头,以此进行声发射定位,观测岩样破碎活动,如图2所示.同时利用AEwin软件对岩样进行监测,得出矿样声发射变化过程图<sup>[13-14]</sup>.

本次试验所选用的岩样取自开阳磷矿,本次三轴及声发射试验做了马路坪矿的3块试样,包括磷块岩3块(磷块岩1,磷块岩2,磷块岩3).选择地质状态良好的磷块岩加工成圆柱体,试样参数如表1所示.

表1 磷块岩试样尺寸  
Tab. 1 Size of phosphorite samples

样品编号 number	直径	高度	质量	密度	围压
	diameter	height	mass	density /	confining
	D / mm	H / mm	m / g	(g/cm <sup>3</sup> )	pressure / MPa
磷块岩1	55.3	101.2	670.6	2.8	2
磷块岩2	55.3	101.3	682.4	2.8	3
磷块岩3	55.5	97.9	655.2	2.8	4

1.2 试验原理与方案

声发射事件定位技术本质是时差定位,即对各个声发射通道信号到波速和探头间距等参数的测量及一定的算法运算来确定声源的坐标或位置.时差定位是一种精确而又复杂的定位方式,广泛用于试样和构件的检测.

本文研究了同一类岩石在不同围压下的三轴压缩试验中的力学与声学特征,对磷块岩开裂破坏实验前和实验后状态做了比较.

试验开始前,为了保证传感器与试样的充分接触,在岩样端面及侧面涂抹耦合剂,然后将磷块岩试样放置在压力室的底座上,使用热风枪将岩石密封在热缩管内,以防止三轴室液压油浸入岩体.等到热缩管与岩样贴合完全,再将轴向应变器与径向应变器安装到合适的位置,在仪器规定的位置装上固定声发射传感器.轴向应变器与径向应变器可实时将岩样变形参数传输到计算机上.声发射传感器如图2所示,将压力盖降下来后探头在压力室内部,此声发射传感器的布置方案如图3所示.



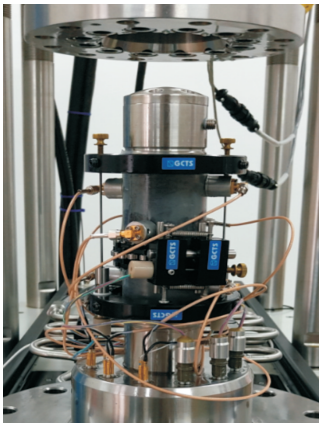


图 2 声发射传感器  
Fig. 2 Picture of acoustic emission sensor

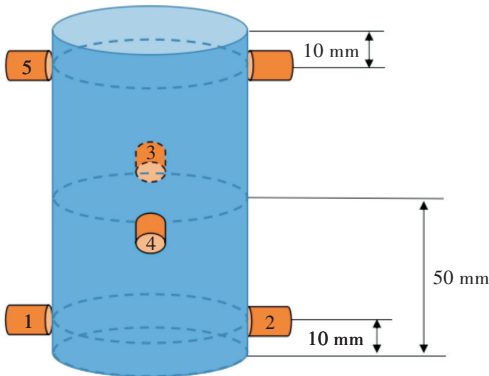


图 3 声发射传感器布置图  
Fig. 3 Arrangement diagram of acoustic emission sensor

2 试验结果

2.1 磷块岩变形与破坏特征

磷块岩在持续不断地轴向压力下产生变形,通过探头返测得的数据,得到磷块岩应力-应变曲线(见图 4 曲线 1),侧向应变-轴向应变曲线(见图 4 曲线 2). 由于磷块岩破坏规律有共性,特此选取磷块岩 1 号试样来具体说明.

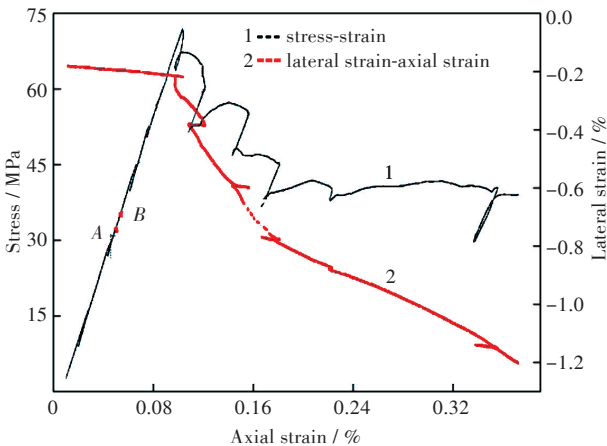


图 4 岩样应力-应变曲线(曲线 1)侧向应变-轴向应变曲线(曲线 2)  
Fig. 4 Curves of stress-strain (1) and lateral strain-axial strain (2) of phosphorite

如图 4 所示,在应力-应变曲线(曲线 1)直线段取两点 A、B,点 A 应力 31.369 7 MPa,应变 0.039 3%;点 B 应力 35.766 7 MPa,应变 0.077 4%,程序计算得弹性模量为 71.178 47 GPa.

如图 4 所示,在侧向应变-轴向应变曲线(曲线 2)中取两点,程序计算出泊松比为 0.428 2.

如图 5 所示,在磷块岩岩样应力时间曲线(曲线 1)上可知岩样所受应力持续增加,在第 1 800 s 时达到第一个峰值,小幅回落后达到第二个峰值;轴向应变(曲线 2)随着时间的增加而增加,在应变为 0.2% 时达到应力的第一个峰值,在应变为 0.26% 时达到第二个峰值.

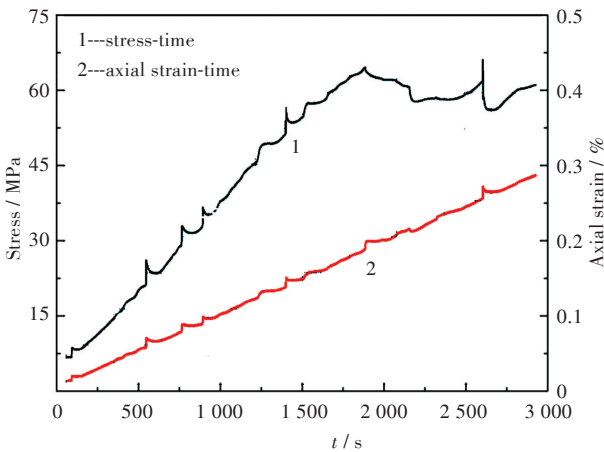


图 5 岩样应力-时间曲线(曲线 1)轴向应变-时间曲线(曲线 2)  
Fig. 5 Curve of stress-time (curve 1) and curve of axial strain-time (curve 2) of phosphorite

同时对声发射数据进行处理后得出磷块岩破裂过程应力-应变声发射曲线(见图 6 曲线 1、曲线 4). 用相同的方法,作出围压 3 MPa, 4 MPa 时磷块岩的应力-应变声发射曲线(见图 6 曲线 2、曲线 3、曲线 5、曲线 6).

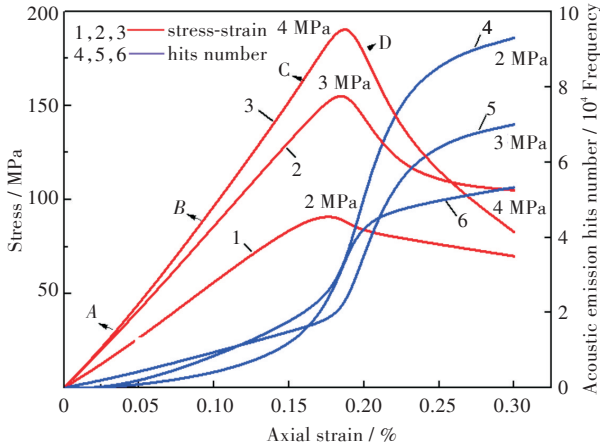


图 6 磷块岩应力-应变曲线和声发射事件曲线  
Fig. 6 Curves of stress-strain and acoustic emission events of phosphorite

结合图6所有曲线,虽然略有不同但仍然可以将磷块岩三轴声发射加载全过程分为裂隙压密阶段,弹性变形阶段,裂纹初级扩展阶段,裂纹剧烈扩展阶段,裂纹贯通破坏阶段5个阶段.

1)裂隙压密阶段(*OA*),由于磷块岩属于脆性岩石,开挖时对磷块岩的破坏产生了很多裂隙,这些裂隙被压密的过程中基本上没有声发射事件产生.

2)弹性压缩阶段(*AB*),基本没有声发射现象产生.

3)裂纹初级扩展阶段(*BC*),声发射事件开始增多,磷块岩应力-应变曲线开始产生非线性增加,磷块岩内部出现新的裂隙,随着应变的增加而增加.

4)裂纹剧烈扩展阶段(*CD*),声发射事件急剧增多,与此同时磷块岩内部产生的裂纹萌生后扩展,且在此阶段释放的能量比较大,产生的声发射振幅波动明显.磷块岩应变率迅速增大,且侧向应变率高于轴向应变率,岩样剪胀变形.

5)裂纹贯通破坏阶段(*D*点之后),声发射事件增加到最大,磷块岩内部裂纹产生贯通,岩石出现宏观破坏如图7所示.

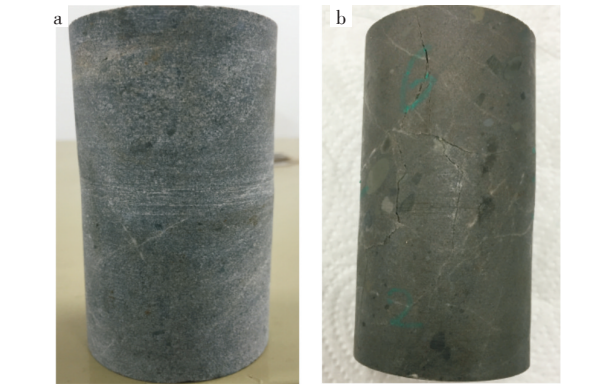


图7 磷块岩破坏图 (a) 试验前 (b) 试验后  
Fig. 7 Pictures of (a) before and (b) after the failure test of phosphorite

从不同轴向应变下的声发射图像可以看到:图8中(a)和(b)声发射图像清晰地表明了破碎点出现在试样上半部分,主要出现在岩样内部,密集分布,随着时间的增加破碎点变多.图8中(c)和(d)声发射图像显示出磷块岩破碎裂隙在岩样中部密集出现,岩样表面出现些许破碎,岩样承载能力持续增加,裂隙和破裂面逐渐贯通.图8中(e)和

(f)岩样内部出现大面积的破裂面,岩样承载能力达到最大值,裂隙和破裂面贯通,岩样破坏.

通过声发射三维定位图(见图8)能比较直观地观察到磷块岩试样三轴破坏时裂纹的起始位置、裂纹扩展方向、裂纹宽度变化.这些不仅给研究不同加载阶段裂纹扩展状态提供思考空间,也为今后深入研究磷块岩破坏空间形态打下基础.

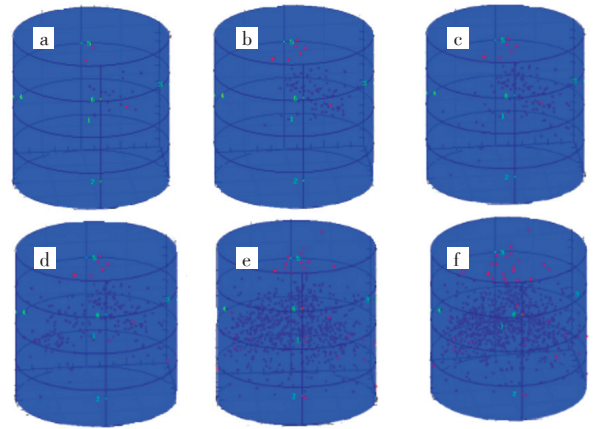


图8 不同轴向应变下的声发射图像:(a) 0.1%; (b) 0.15%; (c) 0.2%; (d) 0.25%; (e) 0.3%; (f) 0.35%  
Fig. 8 Pictures of acoustic emission events in different axial strains: (a) 0.1%; (b) 0.15%; (c) 0.2%; (d) 0.25%; (e) 0.3%; (f) 0.35%

2.2 围压对磷块岩声发射的影响

对比3种应力条件下磷块岩的声发射时间数量可得,在不同围压下,磷块岩的声发射活跃程度不同,围压为2 MPa、3 MPa、4 MPa时,声发射数量是有所下降的,得出磷块岩所受围压越高,磷块岩内部声发射活动越被抑制,图9为不同围压状态下试样的定位图,可以比较清楚看出此现象.

抑制原因可以用以下公式来解释:

$$\tau_{\text{eff}} = \sigma_s - (c_0 + \sigma_N \tan \phi)$$
 (1)

式(1)中: $\sigma_s$ 是切应力分量; $\sigma_N$ 是正应力分量; $\tau_{\text{eff}}$ 是效应力; $c_0$ 是黏聚力; $\phi$ 是内摩擦角<sup>[9]</sup>.

据磷块岩断裂几何图(见图10)可知:

$$\sigma_s = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 \beta + \sigma_3 \sin^2 \beta$$
 (2)

$$\sigma_N = (\sigma_1 - 2\sigma_3) \cos \beta \sin \beta$$
 (3)

式(2)~(3)中: $\sigma_1$ 为轴向应力; $\sigma_3$ 为侧向应力; $\beta$ 为裂隙水平倾角.通过公式计算可以知道,当轴压一定时,磷块岩围压增加,则其内部每个点所受剪切应力减小,裂隙更加难扩展,导致声发射数量变少.

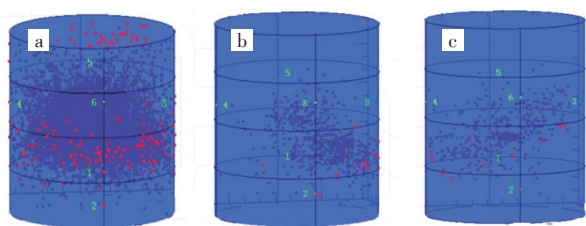


图9 不同围压下声发射事件图

(a) 2 MPa (b) 3 MPa (c) 4 MPa

Fig. 9 Pictures of acoustic emission events at confining pressures of (a) 2 MPa, (b) 3 MPa and (c) 4 MPa

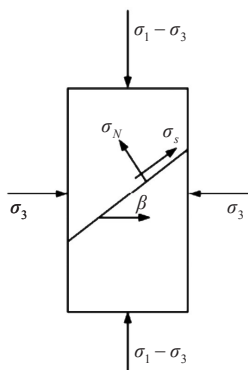


图10 磷块岩断裂几何图

Fig. 10 Fracture geometry diagram of phosphorite

### 3 结 语

综上所述,得出以下结论:

1)在本次三轴加载试验中,磷块岩三轴声发射加载全过程分为裂隙压密阶段,弹性压缩阶段,裂纹初级扩展阶段,裂纹剧烈扩展阶段,裂纹贯通破坏阶段,每一个阶段都有各自的特点。

在加载初期,由于开挖时对磷块岩的破坏产生了很多裂隙,这些裂隙首先被压密,未出现声发射事件;随着继续加载,声发射开始增多,磷块岩应力-应变曲线开始产生非线性上升,磷块岩内部出现新的裂隙;磷块岩强度达到最大时,声发射事件急剧增多,与此同时磷块岩内部产生的裂纹萌生后扩展,在此阶段释放的能量比较大。磷块岩的应变率迅速增大,且侧向应变率高于轴向应变率,磷块岩试样剪胀变形;最终裂隙和破裂面贯通,岩样破坏。

2)磷块岩声发射事件不仅仅发生在其强度最大阶段,在其宏观破坏后也有声发射事件产生。

3)分析了不同围压下,磷块岩的声发射活跃程度明显不同。对比3种不同围压下磷块岩的声发射数量,围压为2 MPa、3 MPa、4 MPa时,声发射数量是有所下降的,得出磷块岩所受围压越高,磷块

岩内部声发射活动越被抑制。通过公式计算可知,当轴压一定时,磷块岩围压增加,则其内部每个点所受切应力减小,裂隙更加难扩展,导致声发射数量变少。

#### 参考文献:

- [1] 张电吉,周春梅,梅婷婷. 磷块岩地下开采受力破坏机理分析研究[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(3): 69-71.  
ZHANG D J, ZHOU C M, MEI T T. Analysis and research on the failure mechanism of underground mining of phosphorite[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(3): 69-71.
- [2] MANSUROV V A. acoustic emission from failing rock behavior[J]. Rock engng, 1994, 27(3): 173-182.
- [3] 张伟,杨瑞东,毛铁. 瓮安埃迪卡拉灯影组叠层石磷块岩形成环境及成矿机制[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 186-195.  
ZHANG W, YANG R D, MAO D. Weng'an ediacaran system group of stromatolite phosphorite formation of the environment and the metallogenic mechanism [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 186-195.
- [4] 邓克勇,吴波,罗明学. 贵州开阳双山坪陡山沱组磷块岩地球化学特征及成因意义[J]. 地质与勘探, 2015, 51(1): 123-132.  
DENG K Y, WU B, LUO M X. The geochemical characteristics and genetic significance of phosphorus block rocks in the doushantuo formation of Shuangshan plateau in Kaiyang, Guizhou province[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(1): 123-132.
- [5] 孙英翔,沈述保,彭剑平. 不同荷载作用下岩石的声发射特征[J]. 黄金, 2017, 38(8): 32-36.  
SUN Y X, SHEN S B, PENG J P. The acoustic emission characteristics of rocks under different loads[J]. Gold, 2017, 38(8): 32-36.
- [6] 左建平,裴建良,刘建锋. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1564-1570.  
ZHUO J P, PEI J L, LIU J F. The acoustic emission behavior and spatio-temporal evolution mechanism of coal rock mass fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1564-1570.
- [7] 李浩然,杨春和,赵维刚,等. 盐岩三轴压缩破坏与声波声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37, (9): 2458-2466, 2476.  
LI H R, YANG C H, ZHAO W G, et al. The study of three axial loading and acoustic emission characteristics of saline rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,

37(9):2458-2466,2476.

[8] 赵兴东,唐春安,李元辉,等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2):3673-3678.

ZHAO X D, TANG C A, LI Y H, et al. Study on acoustic emission characteristics of the whole process of granite fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Suppl. 2):3673-3678.

[9] 张黎明,王在泉,石磊. 不同应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6):1230-1236.

ZHANG L M, WANG Z Q, SHI L. The acoustic emission characteristics of the marble process under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6):1230-1236.

[10] 李庶林,唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1):147-152.

LI S L, TANG H Y. Study on acoustic emission characteristics of rock material fracture under different loading conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1):147-152.

[11] 杨健,王连俊. 岩爆机理声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20):198-204.

YANG J, WANG L J. Study on acoustic emission test of rock burst mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20):198-204.

[12] 艾婷,张茹,刘建锋. 三轴压缩煤岩破裂过程中声发射时空演化规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12):2048-2057.

AI T, ZHANG R, LIU J F. The spatial and temporal evolution of acoustic emission during the fracturing of triaxial loading coal society [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12):2048-2057.

[13] 符军. 浅析磷矿地下工程变形破坏与岩体结构关系[J]. 陕西煤炭, 2011, 30(5):15-17.

FU J. Analysis of relationship between rock deformation and rock mass structure in underground Phosphate Mine[J]. Shanxi coal, 2011, 30(5):15-17.

[14] 刘希灵,潘梦成,李夕兵. 动静加载条件下花岗岩声发射 *b* 值特征的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1):3148-3155.

LIU X L, PAN M C, LI X B. Study on the characteristics of the *b* value of granite acoustic emission under static loading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Suppl. 1):3148-3155.

[15] 陈卫忠,李术才,邱祥波,等. 岩石裂纹扩展的实验与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1):18-23.

CHEN W Z, LI S C, QIU X B, et al. Experimental and numerical analysis of rock crack propagation [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2003, 22(1):18-23.

本文编辑:陈小平