

DOI: 10.11779/CJGE201902011

# 加轴压卸围压条件下北山花岗岩破坏特征

王超圣<sup>1</sup>, 周宏伟<sup>1\*</sup>, 王睿<sup>1</sup>, 王子辉<sup>1</sup>, 何树生<sup>1</sup>, 刘建峰<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为了研究开挖扰动对花岗岩的破坏机理, 对北山花岗岩进行了加轴压卸围压的三轴试验, 试验中设置 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa/min 五种卸围压速率, 轴压加载速率是卸载速率的 10 倍, 每一种卸载速率设置 5, 10, 15, 20, 30 MPa 五个围压, 并在试验过程中记录声发射事件。分析了声发射事件数随卸载速率的变化规律, 使用层次聚类的方法将声发射事件分为张拉破坏和剪切破坏, 研究了卸载速率、围压和卸载时间对张剪比(张拉破坏与剪切破坏的比值)的影响, 研究表明: ①随着卸载速率的增加, 声发射事件数呈幂函数下降, 且围压越高, 声发射事件数下降越明显; ②裂纹的张剪比随着卸载速率的增加而增加, 随着围压的增加减小, 随着卸载时间增加降低; ③围压卸载速率增加, 岩石声发射  $b$  值降低, 初始围压升高, 对应的  $b$  值增加, 且卸载速率和围压对张拉  $b$  值的影响比对剪切  $b$  值影响更明显; ④基于 Maxwell 模型分析岩石内局部应力状态, 并进一步研究了岩石破坏过程中张剪比变化的力学机理。

**关键词:** 北山花岗岩; 加卸载速率; 声发射; 拉破坏; 剪破坏;  $b$  值

中图分类号: TU458.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)02-0329-08

**作者简介:** 王超圣(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事地下工程动力灾害预测与防治研究工作。E-mail: wchsh163@163.com。

## Failure characteristics of Beishan granite under unloading confining pressures

WANG Chao-sheng<sup>1</sup>, ZHOU Hong-wei<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, WANG Zi-hui<sup>1</sup>, HE Shu-sheng<sup>1</sup>, LIU Jian-feng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** To better understand the effects of unloading confining pressure on failure mechanism, several trial tests on loading axial stresses and unloading confining pressures with different unloading rates are performed, and acoustic emission events are recorded at the same time. In the experiment, five unloading confining pressure rates are set at 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 MPa/min and 2.0 MPa/min, and the axial stress loading rate is 10 times the unloading confining pressure rate. Five confining pressures are set at 5, 10, 15, 20 and 30 MPa under every unloading rate. The variation laws of the acoustic emission events with the unloading rates are analyzed, the hierarchical clustering is used to divide the acoustic emission events into tensile failure and shear failure, and the effects of unloading rate, confining pressure, unloading time on the tensile and shear failures are investigated. The results show: (1) The acoustic emission decreases in the form of power function with the increase of the unloading rate, and the effects of the unloading rate on the acoustic emission are more obvious when the confining pressure increases; (2) The ratio of tensile to shear fractures increases with the increasing unloading rate, but it decreases with the increasing confining and unloading time; (3)  $b$ -values decrease with the increase of the confining pressure unloading rate and increase when the confining pressure increases, and the influences of the unloading rate and confining pressure on the  $b$ -values of the tension fractures are more obvious than those on  $b$  values of shear fractures; (4) The local stress state is analyzed by using the Maxwell model, and the mechanism of variation of tensile and shear fractures is further studied.

**Key words:** Beishan granite; loading and unloading rate; acoustic emission; tensile failure; shear failure;  $b$ -value

## 0 引言

地下工程开挖过程中围岩处于切向力增加, 径向力减小的应力调整过程中, 且开挖速度越快, 应力调整越剧烈, 对围岩性质的影响越大。在试验室通过控制卸围压加轴压的速率可以模拟现场的开挖速度, 因

此, 研究不同卸载速率下岩石的性质对确定开挖方法、

基金项目: 十三五国家重点研发计划(2016YFC0600704); 国家自然科学基金项目(51674266)

收稿日期: 2017-12-18

\*通讯作者(E-mail: zhw@cumtb.edu.cn)

分析围岩稳定性以及选择支护方式都有重要的意义。国内外学者通过室内试验对卸荷条件下岩石的强度、变形、破坏等特征进行了大量的研究<sup>[1-4]</sup>。

卸载速率不仅影响岩石的强度，而且影响岩石破坏过程和最终的破坏形式，由于试验过程中无法获得内部裂纹产生和扩展过程，因此研究卸载破坏的特征主要集中在试件的整体的破坏上，而较少研究卸载对岩石内部裂纹演化过程的影响。如陈卫忠等<sup>[5]</sup>研究发现岩石在卸荷下主要发生脆性破裂，破坏形式表现张剪复合破坏的特征，邱世利等<sup>[6]</sup>研究了不同卸围压速率对大理岩试件宏观破坏形式的影响，张黎明等<sup>[7]</sup>研究发现保持轴向应变不变卸围压，在低围压时表现为明显的张拉破坏，在高围压时表现延性破坏，而保持轴力不变卸围压均表现为张性破坏，刘立鹏等<sup>[8]</sup>研究发现，大理岩卸围压破坏时当无侧限时发生张拉破坏，侧限小于 15 MPa 时发生剪切破坏，但局部存在张拉破坏，围压高于 15 MPa 时主要发生 X 和 Y 剪切破坏。虽然对试件宏观破坏形式进行了大量研究，但对岩石内部破坏特征的研究较少，研究卸载速率对岩石内部破坏影响的文献更少，也没有相应的数据证明卸载速率改变了岩石内部破坏的形式。

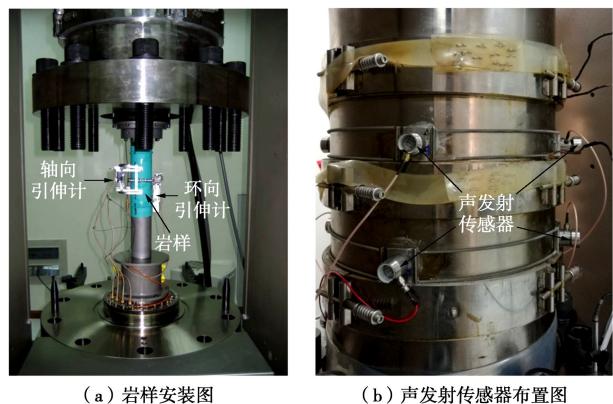
声发射是伴随岩石内部裂隙萌生和扩展产生的弹性波，岩石内不同的破裂形式产生的声发射具有不同的特征，因此根据声发射特征可以研究岩石破坏过程中裂纹扩展形式的变化。国内外学者根据声发射特征对岩石内部裂纹形式和扩展过程进行大量的研究，如 Behnia 等<sup>[9]</sup>介绍了根据声发射将破裂分类的常用方法及其优缺点，Liu 等<sup>[10]</sup>使用矩阵量分析的方法研究了花岗岩破坏过程中张拉破坏和剪切破坏时空演化特征，Kentaro 等<sup>[11]</sup>使用声发射特征参数和矩张量的方法对混凝土破坏过程中张拉和剪切破坏变化特征进行研究，两种方法具有较一致的结果，肖福坤等<sup>[12]</sup>利用声发射 RA 值与平均频率关系能较好反映裂纹类型，拉伸破坏和剪切破坏均符合客观实际，刘培洵等<sup>[13]</sup>研究发现，对于纯剪切破裂模式，声发射矩张量反演可得断层面；对于非纯剪切破裂模式，如纵向挤压导致的横向张性劈裂，由于存在多解性不能得到断层面，但可通过矩张量的迹区分破裂模式。

本文使用北山花岗岩进行不同围压不同卸载速率的三轴试验模拟不同应力状态下不同开挖扰动强度，同时记录声发射事件，并使用层次聚类的方法对岩石内部破坏形式进行分类，研究了不同围压和不同卸载速率条件下岩石破坏过程中声发射特征及内部破坏过程，基于  $b$  值研究卸载速率和围压对岩石破坏的影响。

## 1 试验方法与过程

### 1.1 试验条件和方法

试验试样取自甘肃北山花岗岩，密度为 2.6 g/cm<sup>3</sup>，参照《工程岩体试验方法标准》，将试件加工成标准尺寸（直径 50 mm×高 100 mm），直径允许偏差小于 0.2 mm，两端面的不平整度允许偏差小于 0.05 mm，端面与轴线的垂直偏差不超过 ±0.25°。采用美国生产的 MTS 815 Flex Test GT 岩石力学试验系统进行三轴压缩试验，该试验系统是目前岩石力学试验中功能最齐备、技术水平最高的设备之一。全部试验过程均由计算机编程控制，试验过程中使用轴向引伸计和环向引伸计记录轴向和环向变形，如图 1 (a) 所示。



(a) 岩样安装图 (b) 声发射传感器布置图

图 1 MTS 815 Flex Test GT 岩石力学试验机

Fig. 1 Installation of MTS 815 Flex Test GT

加载的同时使用美国声物理公司生产的 PCI-II 声发射仪器记录声发射事件，该设备具有实时监测、显示、储存的功能，并能保存原始的波形，声发射传感器的采集频率为 200 kHz，以凡士林为耦合剂将声发射探头固定在三轴室壁外，声发射传感器的布置如图 1 (b) 所示，共布置 8 个传感器，上下各 4 个，每 90° 布置一个（图 1 中显示的为其中 4 个传感器），试件底面正中心为坐标原点，向上为  $y$  轴方向，各传感器的坐标如表 1 所示。声发射采样的门槛值设置为 27 dB，试验开始时，将声发射检测系统与加载设备同时开启，保证两个设备以统一时间开始记录相应的声发射和力学参数。

表 1 声发射传感器坐标

Table 1 Coordinates of acoustic emission sensors (mm)

坐标	1	2	3	4	5	6	7	8
$x$	0	180	0	-180	0	180	0	-180
$y$	140	140	140	140	0	0	0	0
$z$	180	0	-180	0	180	0	-180	0

### 1.2 试验方案

卸围压路径有多种多样，根据轴压变化情况可分

为轴压固定, 轴压升高和轴压降低3种情况。其中轴压固定可分为峰前卸围压和峰后卸围压, 轴压固定和轴压增大这两种方案偏压均增大。轴压减小又可分为偏压增大和偏压不变两种卸围压方式。现场开挖过程中围岩切向压力增大, 径向压力较小, 因此本文使用轴压增大的卸围压方式。

本次试验设置0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa/min五个卸围压速率, 轴压加载速率为围压卸载速率的10倍, 即1, 5, 10, 15, 20 MPa/min, 使用力控制加载。为了研究不同应力状态下岩石对卸载的响应, 根据北山地区应力状况设置5, 10, 15, 20, 30 MPa 5种围压(如表2)。试验中先以3 MPa/min速度施加围压至预定值, 稳定初始围压后以15 MPa/min施加轴压, 观测应力应变曲线, 当体积应变出现回转时停止加载, 按设计方案进行加轴压卸围压试验, 直至试件破坏。

表2 试件编号

Table 2 Number of test specimens

卸载速率 /(MPa·min <sup>-1</sup> )	围压 /MPa	试件 编号	卸载速率 /(MPa·min <sup>-1</sup> )	围压 /MPa	试件 编号
0.1	5	3-2	1.5	5	2-3
	10	3-3		10	2-4
	15	3-5		15	2-5
	20	3-6		20	2-6
	30	3-7		30	2-7
0.5	5	4-1	2.0	5	5-4
	10	4-2		10	5-5
	15	4-3		15	5-6
	20	4-4		20	5-7
	30	4-5		30	6-1
1.0	5	4-6			
	10	4-7			
	15	5-1			
	20	5-2			
	30	5-3			

## 2 试验结果与分析

### 2.1 声发射事件数

声发射事件是指在一次材料的局部变化, 由一个或几个撞击鉴别所得。岩石材料中一个声发射事件代表着一次局部的破坏, 声发射事件越多, 岩石内部破坏越多。为了研究加轴压卸围压对试件破坏的影响, 统计卸围压到岩石破坏过程中声发射事件, 声发射事件数随卸载速率的变化如图2(a)所示, 卸载速率对声发射事件数具有显著的影响, 随着卸载速率的增加, 声发射事件数呈幂函数减小, 不同围压下声发射事件

数和卸载速率的关系为

$$N = aR^b \quad , \quad (1)$$

式中,  $N$  为声发射事件数,  $a$ ,  $b$  为拟合系数,  $R$  为卸载速率。拟合结果见表3。

图2(b)为声发射事件数的下降率随卸载速率的变化, 围压不变, 随着卸载速率增加, 声发射事件数的影响减小, 说明卸载速率增高, 对声发射事件数的影响减小。卸载速率不变, 围压增大, 声发射事件数的下降率增大, 卸载速率在10 MPa/min内, 围压对声发射事件的下降率影响很明显, 卸载速率高于10 MPa/min时卸载速率和围压对声发射事件数下降率的影响不明显。

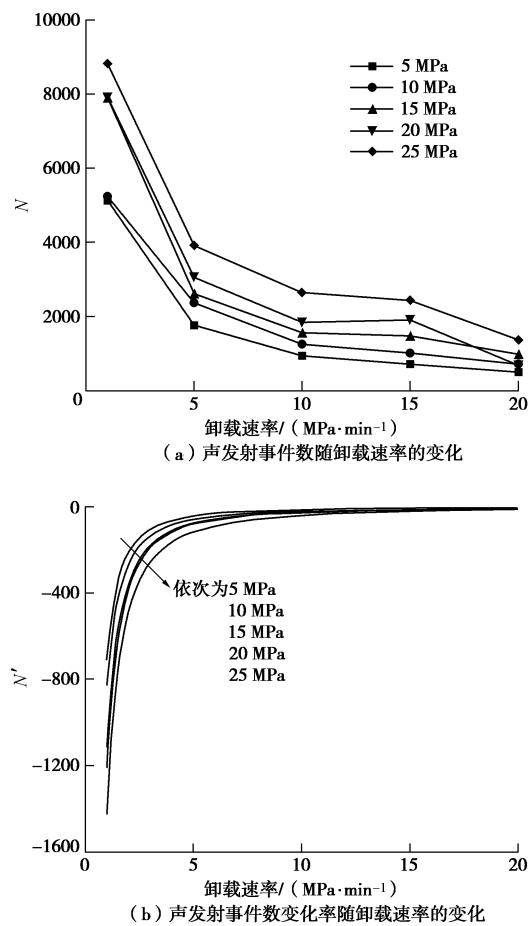


图2 卸载速率对声发射事件数影响

Fig. 2 Effects of unloading rate on acoustic emission events

表3 不同围压  $a$ ,  $b$  拟合系数Table 3 Fitting coefficients of  $a$ ,  $b$  under different confining pressures

围压/MPa	$a$	$b$	相关系数
5	943	-0.759	0.9927
10	1275	-0.649	0.9783
15	1682	-0.665	0.9885
20	1746	-0.695	0.8886
30	2451	-0.561	0.9509

如图 3 所示, 试件 3-2 声发射事件数量多, 空间分布分布范围更广, 形成倾斜的剪切面, 而试件 5-4 声发射事件主要集中在事件的劈裂面上, 因此推测卸载速率增加造成声发射事件数减少, 主要是由于加卸载速率小, 裂隙具有充足的时间扩展, 并且内部高应力集中区裂隙扩展后在周围进行重分布, 从而使裂隙在整个试件内均匀扩展, 在达到破坏时才聚集在主破裂面; 加卸载速率较大时, 裂隙扩展时间不充分, 裂隙主要集中在岩石内部应力集中比较高或者存在原始缺陷的区域扩展, 局部破坏后应力还未进行重分布, 岩石已经进入下一级荷载, 并最终形成破裂面。

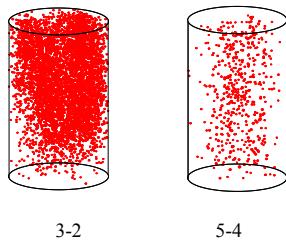


图 3 声发射事件空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of acoustic emission events

## 2.2 声发射聚类分析

岩石材料在外力作用下, 内部原始裂纹扩展, 同时产生新裂纹, 按照裂纹产生机理可将裂纹分为张拉裂纹和剪切裂纹, 不同形式的裂纹产生声发射的特征不同, 张拉裂纹产生的声发射具有上升时间短, 持续时间短, 计数小, 振幅小, 平均频率高, 能量低等特征, 而剪切裂纹具有上升时间长, 持续时间长, 计数大, 振幅大, 平均频率低, 能量高等特征。因此可以根据声发射的特征反推产生机理, 并进一步研究岩石破坏过程。

基于声发射推测岩石内部破裂形式主要有矩张量法和聚类法, 矩张量法对监测设备精度要求高, 操作比较复杂, 因此对大量声发射数据研究效率较低, 而聚类法操作简单, 速度快, 在室内试验和现场监测数据分析中都比较适用。

层次聚类是聚类中常用的一种方法, 该方法生成一系列嵌套的聚类树, 单点聚类处在树的最低层, 在树的顶层有一个根节点聚类, 根节点聚类覆盖了全部的所有数据点。根据算法不同层次聚类可以分为很多种。本文选择层次聚类的 ward 算法进行聚类, 该方法的基本思想来源于方差分析, 认为如果分类正确, 同类样品的离差平法和应当较小, 类与类的离差平法和最大, 基本步骤如下。

(1) 设将  $n$  个样品分成  $k$  类  $G_1, G_2, \dots, G_k$ , 用  $X_{it}$  表示  $G_t$  中的第  $i$  个样品,  $n_t$  表示  $G_t$  中样品的个数,  $\bar{X}_t$  是  $G_t$  的重心, 则  $G_t$  的样品离差平方和为

$$S_t = \sum_{i=1}^{n_t} (X_{it} - \bar{X}_t)'(X_{it} - \bar{X}_t) \quad . \quad (2)$$

(2) 如果  $G_p$  和  $G_q$  合并为新类  $G_r$ , 则类内离差平方和分别为

$$S_p = \sum_{i=1}^{n_p} (X_{ip} - \bar{X}_p)'(X_{ip} - \bar{X}_p) \quad , \quad (3)$$

$$S_q = \sum_{i=1}^{n_q} (X_{iq} - \bar{X}_q)'(X_{iq} - \bar{X}_q) \quad , \quad (4)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^{n_r} (X_{ir} - \bar{X}_r)'(X_{ir} - \bar{X}_r) \quad . \quad (5)$$

(3) 定义  $G_p$  和  $G_q$  之间的平方距离为

$$D_{pq}^2 = S_r - S_p - S_q \quad . \quad (6)$$

$D_{pq}^2$  反映了各自类内样品的分散程度, 如果  $G_p$  和  $G_q$  这两类相距较近, 则合并后所增加的离散平方和  $S_r - S_p - S_q$  应较小; 否则, 应较大。

选择常用的声发射特征参数上升时间、持续时间、计数、振幅、平均平率、能量, 基于层次聚类的 ward 算法把声发射事件分成两类, 分类过程通过 SPSS Statistics 软件聚类功能实现, 再根据剪切裂隙和张拉裂隙特征, 确定聚类得到的两类声发射分属的类型, 由于选择了 6 个声发射参数, 无法直观的显示 6 个参数的分类结果, 因此选择计数和平均频率并以试件 6-1 展示分类的结果。由图 4 可知, 层次聚类的 ward 算法可以有效的将声发射分成张拉和剪切两类。

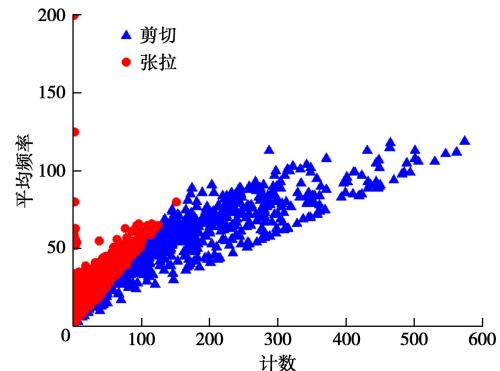


图 4 6-1 聚类效果图

Fig. 4 Clustering of specimen 6-1

## 2.3 岩石内部裂纹特征

根据层次聚类方法将不同围压和不同卸载速率的试件声发射进行聚类, 定义张拉破坏和剪切破坏的比值为张剪比, 并研究张剪比的变化规律, 选择 3-2、5-4、6-1 三个典型的试件进行分析 (如图 5)。

由图 5 可知, 随着加卸载进行, 张剪比不断减小, 说明试件中张拉破坏所占比例减小, 内部由张拉破坏向剪切破坏转变。围压相同时, 卸载速率增加则破坏过程中张剪比的最大值和破坏时张剪比增大, 如围压为 5 MPa 时卸载速率从 0.1 MPa/min 增加到 2.0

MPa/min, 张剪比的最大值从 4.2 增加到 5.1, 破坏时的张剪比从 2.4 增加到 3.7, 说明卸载速率促进了岩石内部张拉破坏的发展。卸载速率相同时, 围压增加则破坏过程中张剪比最大值和破坏时张剪比减小。如卸载速率均为 2.0 MPa/min, 围压从 5 MPa 升高到 30 MPa 时, 张剪比的最大值从 5.1 减少到 2.3, 破坏时张剪比从 3.7 减少到 1.4, 说明围压限制了内部张拉破坏的发展。

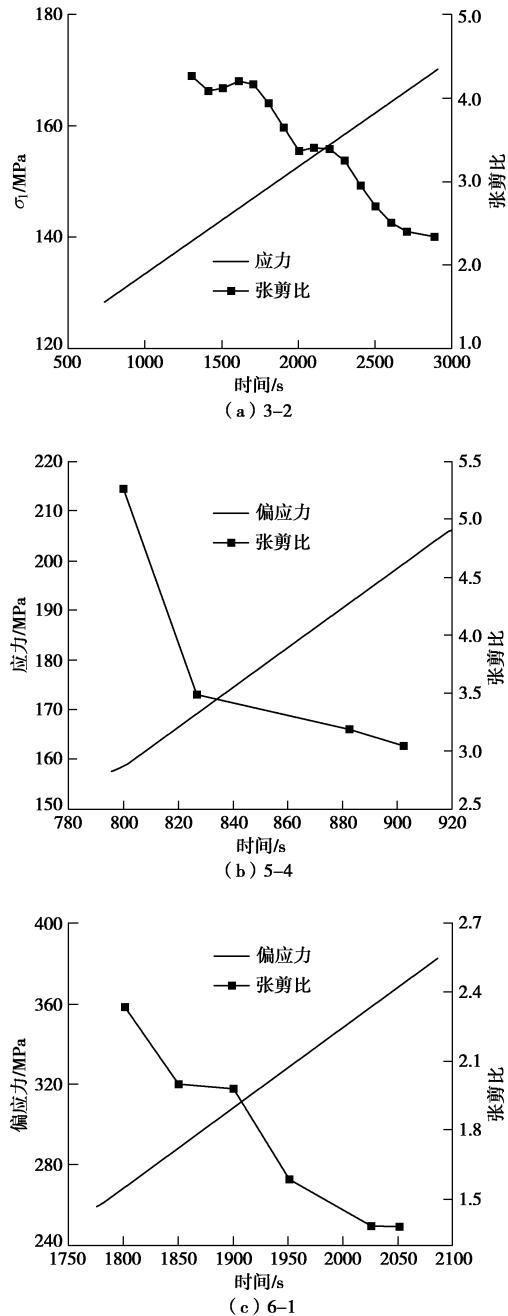


图 5 张剪比随时间的变化

Fig. 5 Relationship between ratio of tensile to share and time

### 3 关于声发射 $b$ 值的研究

#### 3.1 $b$ 值的物理意义

为了进一步揭示加卸载速率对岩石破坏的影响, 借鉴地震研究中常用的 G-R 模型<sup>[14]</sup>, 基于振幅研究声发射事件的  $b$  值, 该公式如下:

$$\lg N = a - bA \quad , \quad (7)$$

式中,  $A$  为声发射事件振幅,  $N$  为振幅大于  $A$  的声发射事件数量,  $a, b$  为拟合系数, 其中  $b$  值为声发射事件相对振幅分布的函数。

从统计意义上讲,  $b$  值增大, 则声发射在相对小振幅事件分布增多,  $b$  值减小, 则声发射在相对大振幅事件分布增多。虽然声发射  $b$  值的物理意义没有严格的推导, 但是可以借鉴地震学中对  $b$  值物理意义的推导对声发射  $b$  值进行定性解释<sup>[15]</sup>, 如图 6 所示, 图中横坐标  $\sigma$  为应力, 纵坐标  $f(\sigma, \bar{\sigma})$  为应力分布概率密度函数,  $S$  为区域内岩石的平均强度,  $\bar{\sigma}$  为该区域平均应力, 当局部应力  $\sigma \leq S$  时, 岩石处于安全状态。当局部应力  $\sigma \geq S$  时, 岩石发生破坏, 定义这部分破坏区域为危险区域, 其大小用面积  $F$  表示,  $F$  越大, 该区域发生破坏的概率越高, 岩体稳定性越差,  $F$  越小, 该区域发生破坏的概率越低, 岩体越稳定。图中  $1-F$  代表安全区域面积。 $b$  与  $F$  的关系为

$$b = C(1-F) \quad , \quad (8)$$

式中,  $C$  为与岩石性质相关的常数。因此  $b$  值代表了安全区域的大小, 即围岩的稳定性。

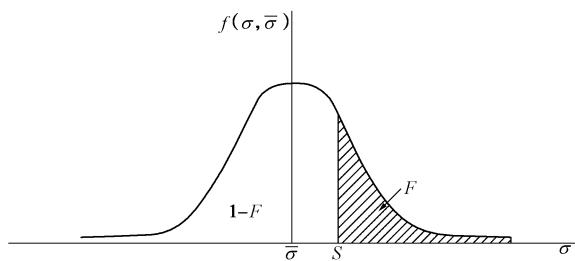


图 6 安全区域与应力和强度关系

Fig. 6 Relationship among safety zone, stress and strength

#### 3.2 卸载速率对 $b$ 值的影响

根据式 (7) 计算各试件  $b$  值, 分别计算试件所有声发射  $b$  值 (即整体  $b$  值), 张拉破坏声发射  $b$  值 (即张拉区  $b$  值), 剪切破坏声发射  $b$  值 (即剪切区  $b$  值)。图 7 为试件 3-2 声发射整体  $b$  值拟合曲线, 表 4 为试件 3-2、5-4、6-1 的  $b$  值。

由表 3 可知, 围压均为 5 MPa, 围压卸载速率从 0.1 MPa/min (试件 3-2) 增加到 2.0 MPa/min (试件 5-4), 整体  $b$  值从 0.0835 降低到 0.0692, 张拉区  $b$  值从 0.1219 降低到 0.1079, 剪切区  $b$  值从 0.0746 降低到 0.0674, 说明随着卸载速率增加, 试件的危险区域增加, 且剪切区域  $b$  值明显小于张拉区域  $b$  值, 因此

剪切区域危险性明显大于张拉区域, 这也造成试件最终呈现压剪破坏, 从 0.1 MPa/min 增加到 2.0 MPa/min, 张拉破坏  $b$  值降低了 11.5%, 剪切破坏  $b$  值降低了 9.7%, 张拉区域  $b$  值降低更明显, 因此卸载速率对张拉区域破坏的影响更明显。

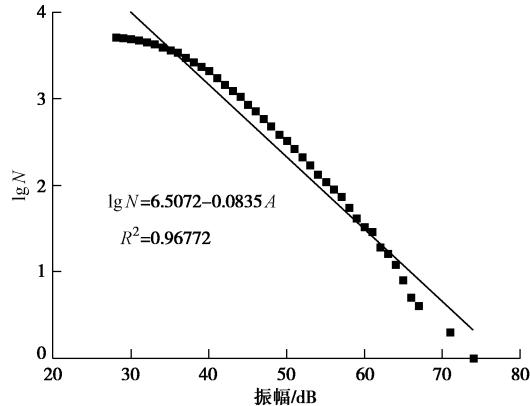


图 7 试件 3-2 整体  $b$  值拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of  $b$ -values of whole AE events at specimen 3-2

表 4 不同试件的  $b$  值

Table 4  $b$ -values of different specimens

事件编号	整体	张拉区	剪切区
3-2	0.0835	0.1219	0.0746
5-4	0.0692	0.1079	0.0674
6-1	0.0846	0.1493	0.0748

围压卸载速率 2.0 MPa/min 相同, 初始围压从 5 MPa 升高到 30 MPa, 整体  $b$  值从 0.0692 升高到 0.0846, 张拉区  $b$  值从 0.1079 升高到 0.1493, 剪切破坏区  $b$  值从 0.0674 升高到 0.0748, 因此随着围压的增加, 岩石安全区域增加, 岩石破坏的稳定性增加。张拉破坏的  $b$  值增加了 38.4%, 剪切破坏的  $b$  值增加了 11.0%, 造成随围压的增加, 张拉破坏区对岩石整体破坏的影响降低。

## 4 卸载速率影响机理分析

### 4.1 岩石局部应力状态

岩石内部有许多不同尺寸单元组成, Rodionov 等<sup>[16]</sup>基于各种尺寸的构造具有自相似的假设, 得到组成尺寸满足分布形式:

$$\frac{l^3 dn}{d \ln l} = \text{const} , \quad (9)$$

式中,  $l$  为单元的尺度,  $n$  为单位体积中尺度为  $l$  的组成个数。组成单元造成岩石内部应力的分布不均匀, 假设组成单元上的应力  $\sigma_{ij}^{\text{loc}}$  由两部分组成 (如图 8): ①不考虑岩石内部单元, 外界施加的力在岩石内部均匀分布  $\sigma_{ij}$ ; ②组成单元造成的应力在局部的变化

$\Delta\sigma_{ij}$ 。

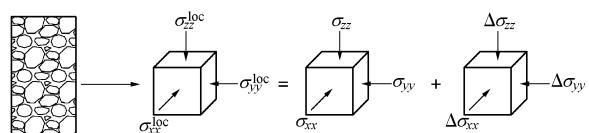


图 8 岩石局部应力状态示意图

Fig. 8 Schematic of local stress state

根据 Maxwell 模型, 局部单元处的附加应力如下<sup>[16-18]</sup>:

$$\frac{d\Delta\sigma_{ij}}{dt} = K\rho c_s^2 e'_{ij} - \eta \frac{\Delta\sigma_{ij}}{l} , \quad (10)$$

$$\rho c_s^2 = \frac{E}{2(1+\mu)} . \quad (11)$$

式中  $K$  为单元上的应力集中系数;  $\rho$  为岩石密度;  $c_s$  为岩石纵波波速;  $e'_{ij}$  为偏应变;  $\eta$  为应力松弛速率;  $E$ ,  $\mu$  为弹性模量和泊松比。根据卸载试验中应力加载路径及式 (10), 求得局部应力如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz}^{\text{loc}} &= \sigma_{zz0} + 10vt + \frac{11Kvl}{3\eta}(1 - e^{-\eta t/l}) , \\ \sigma_{xx}^{\text{loc}} = \sigma_{yy}^{\text{loc}} &= \sigma_{xx0} - vt - \frac{11Kvl}{6\eta}(1 - e^{-\eta t/l}) . \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中,  $\sigma_{xx0}$ ,  $\sigma_{zz0}$  为卸载起始点对应的环向力和轴向力,  $v$  为围压卸载速率。由式 (12) 可以看出卸载速率、集中系数、松弛系数、单元尺寸以及卸载时应力状态都会影响岩石内部应力分布。

假设内部不同尺寸的单元强度仍符合莫尔库仑准则, 且内部单元和岩石试件满足相同的强度准则。莫尔库仑公式如下:

$$\sigma_{11} = K\sigma_{33} + C , \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 2 \arctan \sqrt{K} - \frac{\pi}{2} , \\ c &= \frac{C \cos \varphi}{2(1 + \sin \varphi)} , \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中,  $c$ ,  $\varphi$  分别为试件的黏聚力和力摩擦角, 根据常规三轴试验得到  $c=27.3$  MPa,  $\varphi=55.7^\circ$ 。

一般认为, 当  $\sigma_3 < 0$ , 岩石发生张拉破坏, 当  $\sigma_3 > 0$ , 岩石发生剪切破坏。而在许多试验中发现, 对于许多高强度岩石 (如花岗岩、大理岩), 在低围压状态下主要以脆性劈裂破坏为主, 但也会发生少量的剪切破坏, 在高围压下的破坏主要以延性的剪切破坏为主, 但也会出现脆性的劈裂破坏。因此围压和岩石破坏形式没有明确的对应关系, 但整体上  $\sigma_3$  越高, 岩石出现张拉破坏的机率越低,  $\sigma_3$  越低, 岩石出现张拉破坏的机率越高。因此, 定义围压为  $\sigma_3$  发生张拉破坏的概率为  $P(\sigma_3)$ , 则  $P(\sigma_3)$  与  $\sigma_3$  呈负相关。

#### 4.2 卸载速率对岩石破坏的影响

由式(12)计算岩石内部应力还需知道单元尺寸、集中系数、单元尺寸等参数, 参照文献[16~18]中的取值, 本文假设单元尺寸为 $10^{-5}$  m, 应力松弛系数为 $10^{-8}$  m/s, 应力集中系数为5, 研究卸载速率对岩石内部破坏的影响, 假设当轴压达到150 MPa时开始卸载, 按照式(12)计算试件内部的应力, 图中 $\sigma_{11}^{\text{loc}}$ 和 $\sigma_{33}^{\text{loc}}$ 对应式(12)中的 $\sigma_{zz}^{\text{loc}}$ 和 $\sigma_{xx}^{\text{loc}}$ (下同), 图9为围压5 MPa卸载速率0.1 MPa/min和2 MPa/min轴向和环向内部应力随外界加载应力的变化, 图中 $\sigma_{11}$ 为施加的轴向应力,  $\sigma_{11}^{\text{local}}$ ,  $\sigma_{33}^{\text{local}}$ 为局部单元的轴向应力和环向应力(下同)。

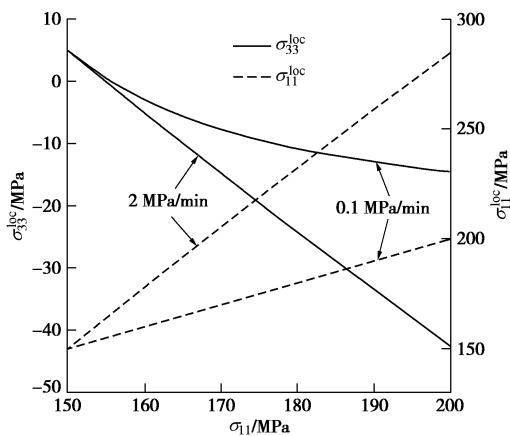


图9 卸载过程局部应力变化图

Fig. 9 Variation of local stress state

由图9可知, 随着施加轴向力的增加, 环向力的减小, 试件内部轴向应力增大, 环向应力减小, 且轴向力增加的速度大于外界轴向力增加的速度, 环向力减小的速度大于外界环向力减小的速度, 当外界施加的应力状态相同时, 2 MPa/min的卸载速率比0.1 MPa/min的卸载速率的轴向力增加的多, 环向力减少的多。

假设单元尺寸 $10^{-5}$  m, 应力松弛系数 $10^{-8}$  m/s, 应力集中系数5, 轴压加载到150 MPa, 围压加载到5 MPa开始卸轴压加围压, 图10为卸载速率0.1, 2 MPa/min卸载破坏过程, 按照式(12)计算该单元应力变化过程。图10中张拉破坏单元表示该处发生张拉破坏的概率高, 剪切破坏单元表示发生张拉破坏的概率低(下同)。

由图10可知, 在卸载过程中, 相同的局部围压, 2.0 MPa/min卸载速率对应的轴向力低, 破坏对应的围压也比较低, 发生张拉破坏的概率也比卸载速率0.1 MPa/min高。因此, 在其他条件相同时, 卸载速率越高, 破坏对应的围压越低, 发生张拉破坏的概率越高, 最终导致卸载速率增高, 张拉破坏增多, 张剪比增

大。因此可以推测随着卸载速率由小到大不断增加, 试件破坏形式将由压剪破坏形式向张剪联合破坏形式转变, 在极高的卸载速率下也有可能出现张拉造成的劈裂破坏。

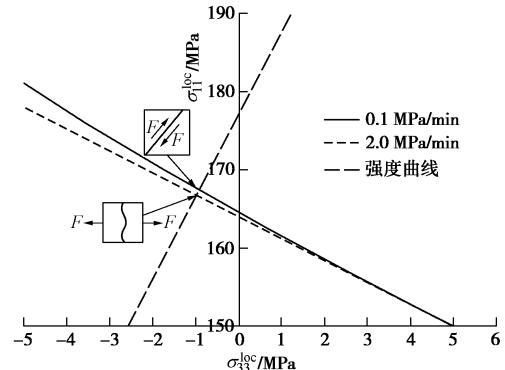


图10 不同卸载速率局部破坏过程图

Fig. 10 Local damage process under different unloading rates

#### 4.3 围压对岩石破坏的影响

图11为不同围压加卸载过程局部破坏图, 单元尺寸为 $10^{-5}$  m, 应力松弛系数为 $10^{-8}$  m/s, 应力集中系数为5, 卸载速率为2.0 MPa/min。由图11可知, 局部围压相同时, 卸载围压为30 MPa时的轴压大于卸载围压5 MPa时的轴压, 破坏时对应的围压也较高, 即其他条件相同时, 30 MPa卸围压发生张拉破坏的概率比5 MPa卸围压低。因此, 卸载时围压越高, 对应的局部轴压越大, 破坏时对应的局部围压越高, 发生张拉破坏的概率低, 造成整体上围压升高, 张拉破坏概率降低。

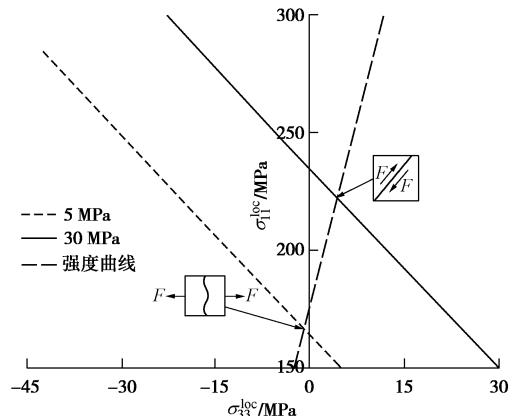


图11 不同围压局部破坏过程图

Fig. 11 Local damage process under different confining pressures

#### 4.4 卸载时间对岩石破坏的影响

图12(a)为不同尺寸单元破坏过程,  $l_1$ 单元尺寸为 $10^{-5}$  m,  $l_2$ 单元尺寸为 $10^{-7}$  m, 松弛系数 $10^{-8}$  m/s, 应力集中系数5, 卸载速率为2 MPa/min, 围压为5 MPa, 其他条件相同。由图12(a)可知, 局部围压相同时,  $l_2$ 对应的轴压大于 $l_1$ , 破坏时对应的围压 $l_2$ 大于 $l_1$ ,  $l_2$

发生张拉破坏的概率比  $l_1$  低。因此, 其他条件相同时, 单元尺寸越大, 发生张拉破坏的概率越高。

图 12 (b) 为不同尺寸的单元破坏但对应的卸载时间和围压, 松弛系数为  $10^{-8}$  m/s, 应力集中系数为 5, 卸载速率为 2 MPa/min, 围压为 5 MPa 其他条件相同。单元尺寸越大破坏的时间越靠前, 破坏时对应的围压越小, 发生张拉破坏的概率越大, 单元尺寸越小破坏的时间越靠后, 破坏时对应的围压越大, 发生张拉破坏的概率越小。

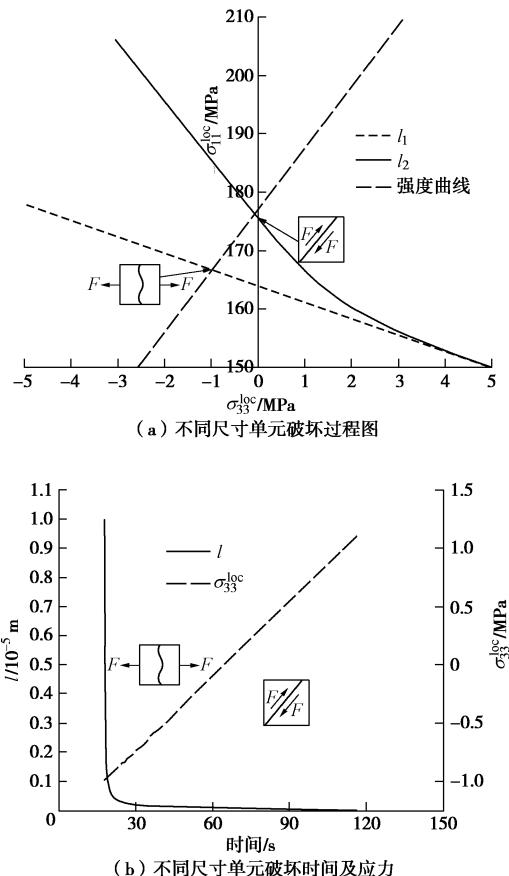


图 12 不同尺寸单元破坏过程图

Fig. 12 Local damage process of different size units

综上分析, 尺寸大的单元先破坏, 尺寸小的单元后破坏。虽然在卸载的过程后, 外界施加的轴向力一直增加, 环向力一直减小, 但是局部单元破坏时对应的轴压和围压都随卸载时间增加。导致卸载破坏过程中张剪比降低。

## 5 结 论

通过北山花岗岩加轴压卸围压的三轴试验, 研究了声发射事件数随卸载速率的变化规律, 使用层次聚类的方法将声发射事件分为张拉破坏和剪切破坏, 研究了张剪比随卸载速率、围压和卸载时间的变化规律, 基于声发射  $b$  值研究了卸载速率对岩石破坏的影响, 取得以下 4 点结论。

(1) 随着卸载速率的增加, 声发射事件数呈幂函数下降, 且围压越高, 声发射事件数下降越明显。

(2) 破坏的张剪比随着卸载速率的增加而增加, 随着围压的增加而减小, 随着卸载时间增加而降低。

(3) 随着围压卸载速率增加, 岩石声发射  $b$  值降低, 随着围压升高, 对应的  $b$  值增加, 且卸载速率和围压对张拉  $b$  值的影响比剪切  $b$  值影响明显。

(4) 基于 Maxwell 模型分析岩石内局部应力状态, 并进一步分析了岩石破坏张剪比变化的力学机理。

## 参 考 文 献:

- [1] LI J, WANG L, WANG X, et al. Research on unloading nonlinear mechanical characteristics of jointed rock masses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(4): 357 - 364.
- [2] GAO F, ZHOU K P, LUO X W, et al. Effect of induction unloading on weakening of rock mechanics properties[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 419 - 424.
- [3] 殷志强, 李夕兵, 金解放, 等. 围压卸载速度对岩石动力强度与破碎特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1296 - 1301. (YIN Zhi-qiang, LI Xi-bing, JIN Jie-fang, et al. Effects of unloading rates of confining pressure on dynamic strength and fragmentation characteristics of rock under impact loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1296 - 1301. (in Chinese))
- [4] 卢志堂, 王志亮. 中高应变率下花岗岩动力特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1087 - 1094. (LU Zhi-tang, WANG Zhi-liang. Triaxial tests on dynamic properties of granite under intermediate and high strain rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1087 - 1094. (in Chinese))
- [5] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压实验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530 - 1540. (CHEN Wei-zhong, LU Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1530 - 1540. (in Chinese))
- [6] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理石卸荷力学特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807 - 1817. (QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1807 - 1817. (in Chinese))

- Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1807 – 1817. (in Chinese))
- [7] 朱泽奇, 盛 谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊1): 2675 – 2681. (ZHU Ze-qi, SHENG Qian, XIAO Pei-wei, et al. Analysis of energy dissipation in process of unloading confining pressure failure of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 2675 – 2681. (in Chinese))
- [8] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 锦屏二级水电站大理岩复杂加卸载应力路径力学特性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8): 2287 – 2294. (LIU Li-peng, WANG Xiao-gang, JIA Zhi-xin, et al. Experiment study of marble mechanical properties of Jinping II hydropower station under complex loading and unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(8): 2287 – 2294. (in Chinese))
- [9] BEHNIA A, CHAI H K, SHIOTANI T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2014, **65**: 282 – 302.
- [10] LIU J, LI Y, XU S, et al. Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in rock with a pre-cut circular hole under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, **135**: 206 – 218.
- [11] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2010, **24**(12): 2339 – 2346.
- [12] 肖福坤, 刘 刚, 秦 涛, 等. 拉–压–剪应力下细砂岩和粗砂岩破裂过程声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊2): 3458 – 3472. (XIAO Fu-kun, LIU Gang, QIN Tao, et al. Acoustic emission(AE) characteristics of fine sandstone and coarse sandstone fracture process under tension-compression-shear stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S2): 3458 – 3472. (in Chinese))
- [13] 刘培洵, 陈顺云, 郭彦双, 等. 声发射矩张量反演[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(3): 858 – 866. (LIU Pei-xun, CHEN Shun-yun, GUO Yan-shuang, et al. Moment tensor inversion of acoustic emission[J]. Chinese Journal of Geophys, 2014, **57**(3): 858 – 866. (in Chinese))
- [14] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Bulletin of The Seismological Society of America, 1944, **34**(4): 185 – 188.
- [15] 李全林, 于 涛, 郝柏林, 等. 地震频度—震级关系的时空扫描[M]. 北京: 地震出版社, 1979. (LI Quan-lin, YU Tao, HAO Bai-lin, et al. Time and space scanning of frequency and magnitude of earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1979. (in Chinese))
- [16] RODIONOV V N, SIZOV I A. Model of a rigid body with dissipative structure for geomechanics[J]. Journal of Mining Science, 1988, **24**(6): 491 – 501.
- [17] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 234 – 241. (WANG Ming-yang, FAN Peng-xian, LI Wen-pei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 234 – 241. (in Chinese))
- [18] 范鹏贤, 王明洋, 钱七虎. 深部非均匀岩体卸载拉裂的时间效应和主要影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(7): 1389 – 1396. (FAN Peng-xian, WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. Time effect and main influence factors of unloading splitting of deep-seated rock with nonuniformities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(7): 1389 – 1396. (in Chinese))