

DOI: 10.11779/CJGE201708023

# 不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征

邓朝福<sup>1</sup>, 刘建锋<sup>1</sup>, 陈 亮<sup>2</sup>, 李 莹<sup>2</sup>, 向 高<sup>1</sup>

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 核工业北京地质研究院环境工程研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 利用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统及声发射 (AE) 三维定位实时监测系统, 对两种不同含水状态的深部细粒英云闪长岩进行了三点弯曲试验, 得到烘干状态及饱水状态下花岗岩的载荷 - LPD 曲线、声发射振铃计数率、AE 撞击数曲线。试验结果表明, 在水的影响下花岗岩的断裂力学特性和声发射特征都有较大变化。饱水状态岩样的平均断裂韧度为干燥状态下的 87.5%, 且在试验过程中整体的变形变大, 其刚度变小, 脆性减弱, 强度变低。在岩样三点弯曲的各个阶段, 饱水岩样的声发射振铃计数率远小于干燥状态岩样; 在试验过程中出现了明显的 Kaiser 效应。岩样以 V 型截面拉断破坏为主; 饱和岩样声发射事件数远大于干燥岩样。研究结果对于受含水层影响的深部花岗岩岩土工程设计及施工具有重要的理论及实际指导意义。

**关键词:** 三点弯曲; 北山花岗岩; 振铃计数率; 加卸载; 饱和

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 4548(2017)08 - 1538 - 07

**作者简介:** 邓朝福(1993 - ), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的试验研究。E-mail: 577005617@qq.com。

## Mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of fracture of granite under different moisture conditions

DENG Chao-fu<sup>1</sup>, LIU Jian-feng<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, XIANG Gao<sup>1</sup>

(1. College of Water Resource Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Beijing Research Institute of Uranium

Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The three-point bending tests on Beishan granite under different moisture conditions are carried out by using the MTS815 Flex Test GT and acoustic emission (AE) three-dimensional positioning monitoring system to obtain the load-LPD curves, AE ringing count rates and curves of AE hitting number. The results show that there is significant influence of water on the fracture mechanics and AE features. The average fracture toughness of the water-saturated samples is 87.5% of the dry ones, and the stiffness and strength decrease apparently. The water-saturated granite shows greater deformation and weaker stiffness. At different stages of the tests, the AE ringing count rate of the water-saturated samples is far less than that of the dry ones, and the water-saturated samples show obvious Kaiser effect. The main failure of the samples is the tensile failure with v-shaped cross-section features. The AE events of the water-saturated samples are more than those of the dry ones. The results of this study are of important theoretical and practical significance for the design and construction of the deep granite geotechnical engineering influenced by aquifers.

**Key words:** three-point bending; Beishan granite; ringing count rate; loading and unloading; saturation

## 0 引 言

据统计, 花岗岩岩体分布面积占中国国土面积的 9%, 达 80 多万平方公里。随着矿山工程、水利水电工程、交通隧道工程以及建筑装饰工程等行业快速发展, 同时, 国际上普遍认为花岗岩也是高放物质处置库建设的理想介质之一, 是中国高放废物地质处置工程的候选围岩<sup>[1-3]</sup>。因此, 深入了解花岗岩的断裂力学行为对上述工程建设的安全施工建设和长期稳定性运行具有非常重要的作用。岩石断裂韧度是岩石断裂力学中最为重要的参数和指标, 它表征岩石材料抵抗

裂纹扩展的能力或产生新裂纹表面所需克服的阻力。特别是当模拟岩体少量主裂纹的作用时, 断裂韧度比其它强度参数更合适。因此, 在预测实际工程岩体的力学性质时, 岩石的断裂韧度是目前的主要参数。

在探讨岩石的断裂韧度时, 水是一个不可或缺的因素。自然存在的岩石内部大都含一定水分, 并且在施工、运营过程中, 水、施工及运行载荷经常会共同

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51374148, 51641405); 四川省青年基金项目 (2017JQ0003)

**收稿日期:** 2016 - 04 - 29

作用于岩土工程中, 在水的物理化学及力学作用下, 岩体组分和结构将发生微细观上的改变, 进而对其宏观力学性质产生影响, 水-力联合作用下的岩体力学性能是岩土工程稳定性的重要影响因素。

贾学明等<sup>[4]</sup>针对新型岩石断裂韧度试样人字形切槽巴西圆盘试样的重要参数(即无量纲应力强度因子的标定)进行了宽范围的标定, 以便适用不同参数的CCNBD试样。Funatsu等<sup>[5]</sup>通过单边缺口圆棒三点弯曲试验(SENRBB)和半圆棒三点弯曲弯曲(SCB)试验研究了室温到200℃的Kimachi砂岩的断裂韧性。近年来, 左建平<sup>[6-8]</sup>、赵小平<sup>[9]</sup>研究了砂岩、玄武岩和大理岩等微细观尺度的断裂行为。左建平<sup>[10-12]</sup>对北山花岗岩进行了实时热开裂、拉伸断裂研究, 通过带加载SEM高温试验系统对不同温度下热处理后的花岗岩进行三点弯曲破坏试验, 发现在25℃~100℃范围内, 北山花岗岩以脆性破坏为主, 100℃范围内, 温度对花岗岩的断裂行为影响不大。

目前国内外很少有通过含水状态来对岩石三点弯曲断裂韧度进行研究, 并且探讨破坏过程的声发射特征。为此, 本研究采取了北山预选区深部花岗岩, 进行三点弯曲试验, 旨在探讨水对花岗岩断裂韧度的影响规律。通过研究, 获得了干燥与饱和状态下北山花岗岩断裂韧度水平以及变形强度特征。同时, 借助三维声发射监测系统, 揭示了弯曲试验全过程不同含水状态花岗岩内部裂隙扩展和损伤演化规律, 对处置库工程稳定性分析提供了重要基础数据。

## 1 北山花岗岩三点弯曲声发射试验

### 1.1 试样制备

试样岩芯取自于甘肃北山, 为细粒英云闪长岩, 其矿物组成为: 石英20%、斜长石43%、钾长石9%、其他矿物(黏土类、云母等)9%; 粒径大小为: 石英(填隙状)0.3~0.8 mm、斜长石0.7~1.19 mm、钾长石0.6~0.8 mm、黑云母0.05~0.3 mm, 属于粒径较细的花岗岩。参照标准及规程中的规定, 对岩芯进行切割打磨和加工V形切口: 保证切口与试件轴线垂直, 偏差角度小于1°; 切口宽度均值为1.2 mm; 尖端深度介于岩样直径0.1~0.2倍之间(如图1)。干燥样3块置于150℃烘干机中持续烘干60 h; 为确保岩样充分饱和, 3块饱和试样在试验前2个月便浸泡于蒸馏水中, 直至试验时方才取出。为了保证试验过程中水分不发生变化, 采取紧凑式试验方式, 从烘干机中依次取尽干燥试样完成试验后, 继续进行饱和样的试验。由于饱和试样提前于水中取出会导致水分蒸发, 试验时饱和试样一直浸泡于水中, 试验时陆续取出。

### 1.2 试验方法

如图1所示CMOD传感器内嵌于试样切缝两旁的夹片之中, 用于测量切口张开位移(CMOD), 荷载点竖向位移(LPD)通过LVDT传感器和2个线性位移引伸计测量。试验中采用8个Micro30型声发射传感器实时监测岩样断裂过程, 于切口两边各均匀布置4个, 并通过两个圆形金属环固定在试样上, 如图2所示。传感器的工作频率为100~600 kHz, 前置放大器增益及触发阈值设为40 dB<sup>[13]</sup>。

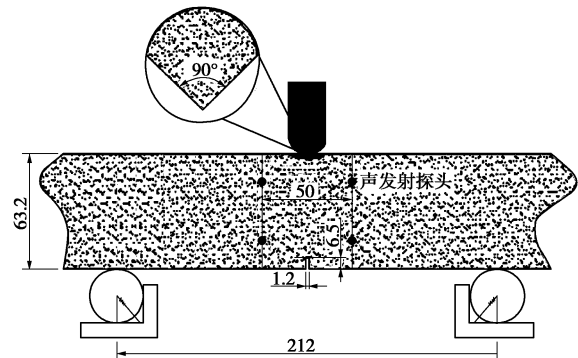


图1 装样示意图

Fig. 1 Loading diagram of sample



图2 三点弯曲试样加载照片

Fig. 2 Loading of three-point bending samples

试验中, 保持加、卸载过程与声发射监测同步。首先在控制台通过软件设置加、卸载程序, 设定峰前于0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 kN各自动卸载一次, 峰后加、卸载循环过程改为手动操作, 每次卸载到最大荷载的10%~20%时再加载。试验全程由CMOD切口张开位移控制, 加、卸载速率均为 $5 \times 10^{-4}$  mm/s, 试验直至试样荷载-位移曲线趋近水平即终止<sup>[13]</sup>。

## 2 试验结果分析

### 2.1 变形强度特征

根据上述三点弯曲循环加、卸载试验方法, 测得不同含水状态花岗岩的荷载-LPD曲线如图3, 4所示。

并根据中华人民共和国水利部《水利水电工程岩石试验规程》，按式(1)、(2)计算出各试样断裂韧度值<sup>[13]</sup>，并统计于表 1。

$$K_{IC} = \frac{A_{min} P_{max}}{D^{1.5}}, \quad (1)$$

$$A_{min} = \frac{S_d}{D} \left( 1.84 + 7.15 \left( \frac{a}{D} \right) + 9.85 \left( \frac{a}{D} \right)^2 \right). \quad (2)$$

表 1 试验基本参数

Table 1 Basic parameters of tests

类别	编号	峰值荷载/kN	屈服荷载/kN	断裂韧度/(N·cm <sup>-1.5</sup> )	均值/(N·cm <sup>-1.5</sup> )
烘干状态	#1	3.66	2.83	2139.1	2047.8
	#2	3.62	2.72	2053.9	
	#3	3.41	2.58	1950.2	
饱和状态	#4	3.07	2.13	1693.6	1792.2
	#5	3.17	2.10	1834.9	
	#6	3.23	2.02	1847.9	

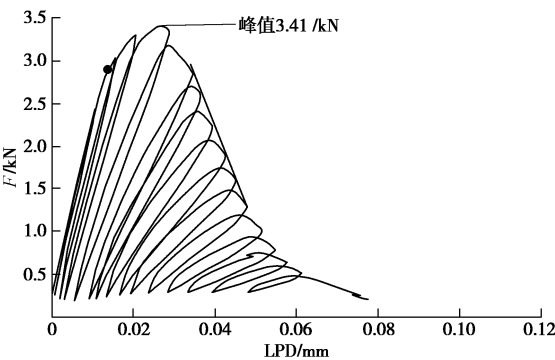


图 3 三点弯曲载荷-LPD 图 (烘干#3)

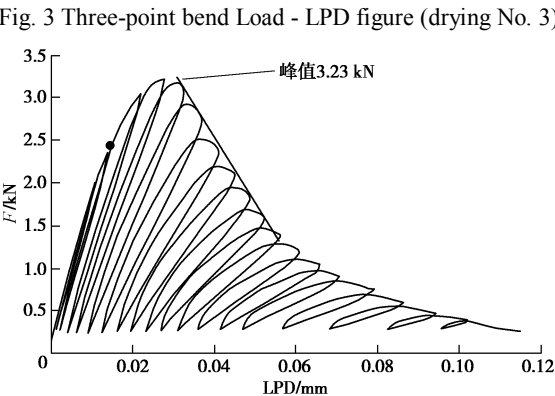


图 4 三点弯曲载荷-LPD 图 (饱和#6)

Fig. 4 Three-point bending load - LPD figure (saturated sample No. 6)

水饱和和处理对花岗岩的力学性质产生了弱化作用，与干燥试样相比，饱和试样在试验曲线中出现明显软化特征。取#3，#6 花岗岩试验曲线为例作典型分析。

干燥与饱和试样加载卸载曲线在加载前期都处于线

弹性阶段，加载曲线与卸载曲线基本重合，产生的不可逆变形都很小。但是两种试样线弹性阶段斜率存在明显差异，饱和试样较于干燥试样刚度明显降低。之后，饱和试样总是先出现屈服现象（见图 3，4 中黄色点），图中干燥试样屈服荷载为 2.91 kN，而饱和试样仅为 2.47 kN 左右。说明水的存在降低了花岗岩的刚度，导致其屈服荷载降低。

屈服过后干燥与饱和试样都进入一个非线性阶段，微裂纹开始发展并扩张，产生的不可逆变形逐渐增大，直至峰值。但是这一阶段两种状态的岩样在强度和变形上有明显的差异。饱和试样产生的变形量要大于干燥试样，饱和试样该阶段变形量为 0.02 mm，而干燥试样仅为 0.012 mm；同时，饱和试样的峰值荷载要低于干燥试样，饱和式样峰值荷载为 3.23 kN，干燥试样为 3.41 kN。说明水的存在导致非线性过程加剧，导致塑性变形增大，峰值荷载降低。

峰值过后，两种状态的岩样并没有马上断裂开，仍然具有一定的承载能力。峰后两种状态岩样的承载能力皆出现一个线性下降（如图 3，4 所示），这一阶段裂纹大量地且稳定地扩张与发展，导致岩样被拉断。但是这种下降的过程两种状态岩样存在明显差异，饱和状态的岩样的下降直线斜率明显低于干燥试样，说明在峰值以后，饱和试样的断裂过程明显变缓。水的存在导致断裂过程变缓慢，导致岩样的脆性被减弱。此阶段线性下降直线的斜率决定了岩石断裂的脆性程度。

线性下降阶段结束后，进入最后的残余阶段。两种状态下岩样的残余阶段截然不同。干燥岩样残余阶段变形量很小，基本上呈现脆性断裂；而饱和试样要经历一个很长的残余变形过程。因而导致饱和试样整个试验过程的总变形量明显大于干燥试样。

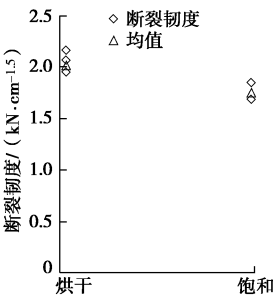


图 5 断裂韧度比较

Fig. 5 Comparison of fracture toughnesses

比较分析两组不同含水状态的断裂韧度<sup>[14-15]</sup>干燥状态，饱和状态的断裂韧度为干燥状态的 87.5%(图 5)。可见在饱水状态下，水对花岗岩力学行为的弱化效应明显。

## 2.2 声发射振铃计数特征

试验中有多个参数可反映声发射活动,其中振铃计数率可反映声发射的频度及信号强度<sup>[16-17]</sup>,因此对不同含水状态的振铃计数特征进行分析。

由于峰值以后每个加卸载循环的峰值载荷并不对应每次加卸载 CMOD 的最大值(见图6),这是由于峰后的每个加卸载循环的卸载点位于该循环峰值荷载之后,所以导致峰值以后每次加卸载过程中振铃计数相对于载荷来说出现了“滞后”的现象(见图6)。而 CMOD 反应了岩石内部裂纹发展、扩张程度,与振铃计数存在同增同降的对应关系。所以在探究三点弯曲试验过程中的声发射振铃计数规律的时候,不用载荷与其进行比较研究,而采用 CMOD 与其进行对比研究。

图6为不同含水状态花岗岩的声发射振铃计数率试验结果。在试验过程中,两种含水状态花岗岩的振铃计数曲线变化明显,线弹性阶段非线性阶段、裂纹稳定发展阶段中表现出不同的规律。

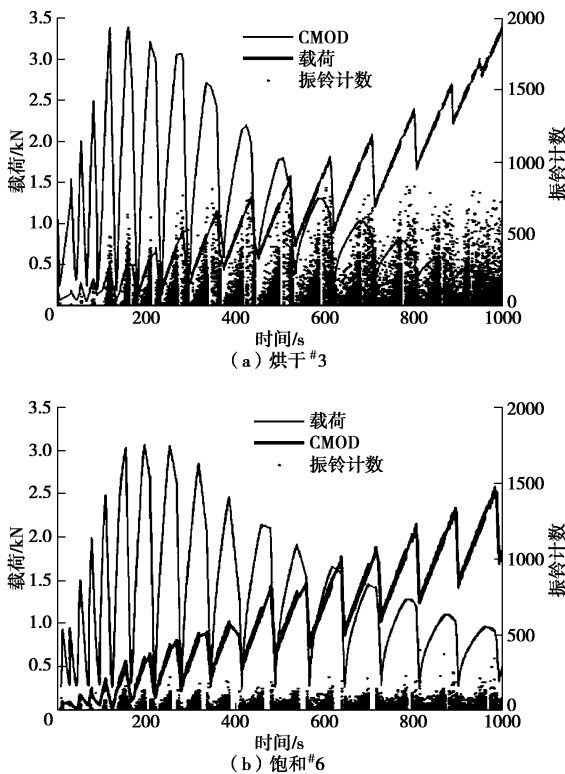


图6 声发射振铃计数试验结果

Fig. 6 Results of AE ringing count tests

声发射振铃计数率大幅出现于每循环的加载阶段,卸载阶段振铃计数率明显降低或消失。干燥花岗岩每个循环出现振铃计数的时间间隔非常短,但是饱和岩样的这种时间间隔很长。出现这种现象的原因与每循环卸载过程中 CMOD 不同的下降方式有关。干燥岩样在卸载过程中,CMOD 的恢复速度很快,而饱和

岩样 CMOD 的恢复速度明显缓慢。

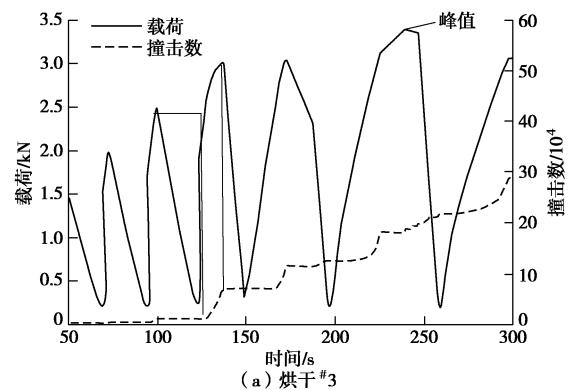
弹性阶段,两种状态下花岗岩声发射振铃计数率出现都较少。这是由于细粒径花岗岩其内部结构致密、均匀,加上北山花岗岩矿物颗粒硬度大,此时的变形为岩样结构变形和岩样上部受尖端点荷载受压变形,岩石内部基本没有裂纹的产生,所以在此过程中只会有较弱的声发射信号形成。

随载荷增加,试样开始屈服,变形进入非线性阶段。此时岩样内部的微裂纹开始扩展,产生了一定的塑性变形,声发射振铃计数开始明显增加,但不同含水状态岩样增加的幅度相差很大,干燥岩样的振铃计数整体数值的增幅明显高于饱和岩样。水的存在导致岩石弱化,声发射振铃计数也被消弱明显。

峰值过后,岩样进入裂纹稳定发展阶段(线性下降阶段),这一阶段两种含水状态的岩样内部均有大量微裂纹进一步扩展,CMOD 稳定增长,声发射信号非常明显,振铃计数率都保持在相对较高且平均的水平。但此时干燥岩样的声发射振铃计数率明显高于饱和岩样,数值上是饱和岩样的5倍。高振铃计数率导致这一阶段干燥岩样快速断裂失稳,而饱和岩样因为水的软化作用,使得其脆性被减弱,发生了低振铃计数率的缓慢断裂。

最后的残余破坏阶段,岩样内部裂纹扩展、贯通,出现宏观的破裂面,岩样都在这段时间内破裂失稳,声发射振铃计数的增幅始终都保持在一个较高的水平。因为试样进入残余变形阶段后,位移出现急速增大,试样内部原生裂纹急速扩张,还有许多次生裂纹的急速产生和急速扩展,所以岩样的声发射信号都保持在一个较高的水平,但是,同样由于水的软化作用,干燥岩样数值上明显高于饱和岩样。

从上述振铃计数的数值、密集程度、以及每循环出现振铃计数的时间间隔可以得出,在整个试验过程中,干燥岩样其振铃计数率表现更剧烈。相对而言,干燥岩样是一个短时间,高振铃计数率快速且剧烈断裂的过程;而饱和岩样断裂过程是一个长时间,低振铃计数率缓慢断开的过程。





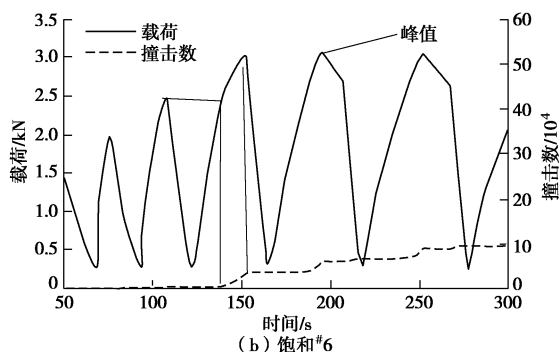


图7 峰值以前载荷、撞击数对时间关系图

Fig. 7 Relationship among load, hitting number and time before peak

由于峰值以前的每个循环过程中, 载荷的最大值对应 CMOD 的最大值 (见图 6), 所以峰值以前用载荷对撞击数之间的关系来研究其声发射发展规律。

在峰值之前 3 次加、卸载循环中 (弹性阶段), 累计 AE 撞击数相对较少, 而在裂隙非稳定发展阶段 (非线性阶段) 的 4 次加、卸载循环过程中, AE 撞击数呈显著增长趋势, 在循环周次之间所对应的载荷增幅逐步增大的条件下, 每次循环较上一次循环触发更多的 AE 撞击数, 揭示了岩石内部损伤程度的非线性加剧过程。随着循环周次的增加, AE 撞击数增幅表现出增加的趋势, 反映出循环加、卸载对微裂隙行为的影响逐渐加强。但是不同含水状态累计撞击数存在明显的差异, 干燥岩样峰值时刻累计撞击数是饱和岩样的 2 倍多, 说明干燥岩样非线性过程裂纹的发生与扩张要比饱和岩样剧烈的多。

三点弯曲试验条件下, 北山花岗岩在峰值前期表现出较为明显的 Kaiser 效应<sup>[18-19]</sup> (图 7)。

对于非线性变形阶段, 裂隙非稳定发展的每个滞回环而言, 卸载阶段的声发射行为非常微弱, 撞击数曲线几乎保持水平状态, 卸载至最小值 0.2 kN 过后, 而随后的加载过程, 前期产生的声发射信号也十分微弱, 此时的撞击数曲线几乎与上一次卸载时的曲线在同一水平线。此特征表明, 在裂隙非稳定发展阶段, 在卸载和随后加载的初始阶段, 裂隙几乎暂停扩展并临时保持稳定状态。当施加的荷载尚未到达上一次卸载点所对应的荷载水平, 此临时稳定状态仍可保持。然而, 一旦荷载超过上一次循环的最大荷载后, AE 撞击数剧烈增加, 裂隙的非稳定发展行为将再一次被调动, 直至达到峰值。

### 2.3 时空演化规律

两种状态岩样断裂过程声发射事件时空演化规律具有一定相似的特征。从图中可以看出, 总体上声发射信号呈三角形形状, 与截面实际切割情况相符。

岩样在屈服以前, 基本没有声发射事件产生。从非线性增长阶段开始产生声发射事件, 此时 AE 事件相对分散地分布在所受拉应力最大的切口尖端下端部, 但尚未出现明显聚集, 但有少量的事件紧密连接, 表明部分微裂隙间已存在相互贯通的趋势。峰值以后, 进入了裂纹稳定扩张的阶段 (线性下降阶段), 这一阶段声发射事件持续增加, 并不断向上部延伸, 大量的微裂纹在这一阶段产生、扩张并贯通, 并在线性下降的末期出现了宏观的断裂面。

由于水的软化作用, 饱和岩样在线性下降阶段结束后, 还有一段很长的残余阶段, 虽然载荷已经变得很小, 但是饱和岩样这一阶段仍然产生大量的声发射事件。而干燥岩样在线性下降阶段结束后, 很快就断裂开来, 基本不再产生声发射事件。从声发射事件总数上来看, 饱和岩样要比干燥岩样大得多, 饱和岩样为 29598, 而干燥岩样仅为 15158。从分布上看, 干燥岩样三角形以上弧顶区域基本没有分布; 而饱和岩样三角形以上弧顶区域分布较多, 这是由最后残余阶段产生。

通过声发射时空分布图 8, 9 可以看出, 试验中岩样以 V 型截面拉断破坏为主。但是由于水的存在, 使得软化后的饱和岩样在受点荷载压力的上端小部分区域受压变形乃至破坏, 从而产生少量的声发射事件。

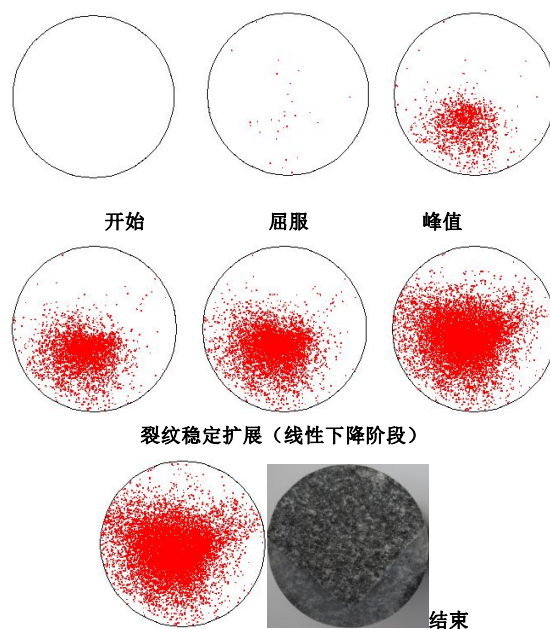
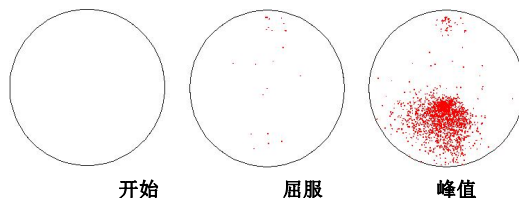


图8 干燥状态岩样 (#3) 声发射事件时空演化图

Fig. 8 Space-time evolution of AE events of dry sample (No. 3)



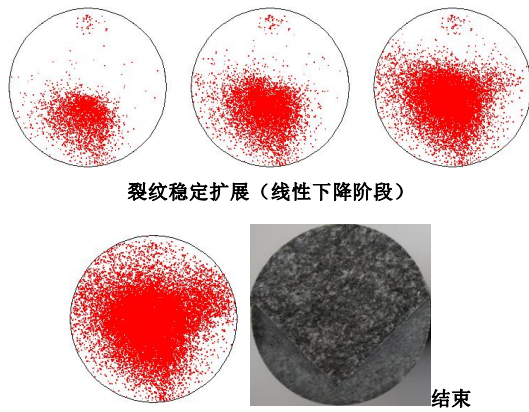


图9 饱和状态岩样(6)声发射事件时空演化图

Fig. 9 Space-time evolution of AE events of saturated sample (No. 6)

### 3 结 论

(1) 水的存在导致花岗岩软化, 使其刚度减小, 屈服荷载变低; 非线性过程加剧, 峰值荷载降低。使其平均断裂韧度降为干燥状态下的 87.5%。

(2) 裂纹稳定发展阶段的线性下降直线的斜率决定了岩石断裂脆性程度。饱和岩样由于水的软化作用, 使得斜率减小, 脆性减弱, 总变形量增加。

(3) 在岩样三点弯曲的各个阶段, CMOD 与振铃计数率存在同增同降的对应关系。饱水岩样的声发射振铃计数率远小于干燥状态岩样; 在试验过程中产生了明显的 Kaiser 效应。

(4) 通过声发射时空分布图可以看出, 试验中岩样以 V 型截面拉断破坏为主, 由下往上延伸, 并于线性下降末期出现宏观的断裂面。饱和岩样声发射事件数远大于干燥岩样。

#### 参考文献:

[1] WANG J. High-level radioactive waste disposal in China: update 2010[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, **2**(1): 1 - 11.

[2] 王 驹, 陈伟明, 苏 锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(4): 801 - 812. (WANG Ju, CHEN Wei-ming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste in and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 801 - 812. (in Chinese))

[3] 中国岩石力学与工程学会废物地下处置专业委员会[M]// 第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 兰州, 2008. (Chinese Underground Waste Disposal Committee of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering[M]/ Proceedings of the 2nd Academic Exchange Conference on Underground

Waste Disposal. Lanzhou, 2008. (in Chinese))

[4] 贾学明, 王启智. 标定 ISRM 岩石断裂韧度新型试样 CCNBD 的应力强度因[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1227 - 1233. (JIA Xue-ming, WANG Qi-zhi. Calibration of stress intensity factor for new type of fracture toughness specimen suggested by ISRM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1227 - 1233. (in Chinese))

[5] FUNATSU T, SHIMIZU N. Numerical simulation of crack propagation in rock by clumped particle model[C]// Engineering Geology Singapore. 2011.

[6] ZUO J P, XIE H P, ZHOU H W, et al. SEM in-situ investigation on thermal cracking behavior of Pingdingshan sandstone at elevated temperatures[J]. Geophysical Journal International, 2010, **181**(2): 593 - 603.

[7] 左建平, 周宏伟, 谢和平, 等. 温度和应力耦合作用下砂岩破坏的细观实验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(6): 1477 - 1482. (ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, et al. Meso-experimental research on the sandstone failure behavior under thermal mechanical coupling effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(6): 1477 - 1482. (in Chinese))

[8] 左建平, 周宏伟, 谢和平. 不同温度影响下砂岩的断裂特性研究[J]. 工程力学, 2008, **25**(5): 124 - 130. (ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, XIE He-ping. Fracture characteristics of sandstone under thermal effects[J]. Engineering Mechanics, 2008, **25**(5): 124 - 130. (in Chinese))

[9] 赵小平, 左建平, 裴建良. 锦屏层状大理岩断裂机制的细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(3): 534 - 542. (ZHAO Xiao-ping, ZUO Jian-ping, PEI Jian-liang. Meso-experimental study of fracture mechanism of bedded marble in Jinping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 534 - 542. (in Chinese))

[10] 左建平, 周宏伟, 方 园, 等. 含双缺口北山花岗岩的热力耦合断裂特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(4): 738 - 745. (ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, FANG Yuan, et al. Experimental research on fracture characteristics of double-notched Beishan granite under thermal-mechanical coupling effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 738 - 745. (in Chinese))

[11] 左建平, 周宏伟, 胡 本. 基于单元质心对应法的热力耦合下花岗岩的热开裂及变形破坏研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, **41**(6): 878 - 884. (ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, HU Ben. Mesostructure- based numerical

- simulations of deformation and failure of granite under thermal-mechanical coupling[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, **41**(6): 878 - 884. (in Chinese))
- [12] 左建平, 周宏伟, 方园, 等. 甘肃北山地区深部花岗岩的热开裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(6): 1107 - 1115. (ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, FANG Yuan, et al. Experimental research on thermal cracking of deep granite in Beishan region, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(6): 1107 - 1115. (in Chinese))
- [13] SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 2001. (SL264—2001 Rock test rules of water conservancy and Hydropower Engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [14] 杨卫. 宏微观断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 6 - 10. (YANG Wei. Macro-micro fracture mechanics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 6 - 10. (in Chinese))
- [15] BEARMAN R A. The use of the Doint 10ad test for the rapid estimation of Mode I fracture toughness[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1999, **36**: 257 - 263.
- [16] 陈亮, 刘建锋, 王春萍. 北山深部花岗岩不同应力状态下声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 2): 3618 - 3624. (CHEN Liang, LIU Jian-feng, WANG Chun-ping, et al. Study of acoustic emission characteristics of beishan deep granite under different stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3618 - 3624. (in Chinese))
- [17] 刘建锋, 徐进, 杨春和, 等. 岩拉伸破坏力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 580 - 586. (LIU Jian-feng, XU Jin, YANG Chun-he, et al. Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 580 - 586. (in Chinese))
- [18] 李曼, 秦四清, 马平, 等. 利用岩石声发射凯塞效应岩体地应力[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 833 - 838. (LI Man, QIN Si-qing, MA Ping, et al. In-situ stress measurement with Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 833 - 838. (in Chinese))
- [19] 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 Xing-dong, TANG Chun-an, LI Yuan-hui, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3673 - 3678. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
 封 3 北京理正软件股份有限公司  
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
 后插 1 重庆地质仪器厂  
 后插 2 济南普业机电技术有限公司