

饱水对花岗岩声发射平静期影响的实验研究*

张艳博^{1,2}, 梁鹏^{1,2}, 刘祥鑫^{1,2}, 田宝柱^{1,2}

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省矿业开发与安全技术
重点实验室, 河北 唐山 063210)

摘要:通过对干燥和饱水花岗岩进行单轴加载声发射实验和扫描电镜实验,研究饱水对花岗岩破坏前声发射平静期的影响。结果表明:干燥和饱水花岗岩破裂前声发射事件率均出现平静期,干燥花岗岩在峰值载荷的54.89%时进入声发射平静期,饱水花岗岩约为峰值载荷的89.87%;干燥花岗岩平静期内AE事件率小且恒定,AE能率较高,饱水后平静期内AE事件率增大,AE能率减小;干燥花岗岩平静期内声发射波形信号的熵值为1.5~2.5,饱水花岗岩为0.5~1.5;饱水改变了花岗岩的微观破裂模式,这为水是如何影响岩石的声发射特征提供了理论依据。实验结果丰富了对岩石声发射平静期的认识,这对岩石破裂声发射监测中前兆现象的识别具有重要意义。

关键词: 饱水; 花岗岩; 声发射平静期; 熵值; 微观结构

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)03-0598-08

Experimental Study on the Effect of Acoustic Emission Quiet Period of Granite with Water-Saturated

Zhang Yanbo^{1,2}, Liang Peng^{1,2}, Liu Xiangxin^{1,2}, Tian Baozhu^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, P.R. China; 2. Hebei Province Mining Industry Develops with Safe Technology Priority Laboratory, Tangshan, Hebei 063210, P.R. China)

Abstract: Through uniaxial loading acoustic emission test of dry and water saturated granite, combined with the experimental analysis of scanning electron microscope, effect of water on the acoustic emission quiet period before the destruction of granite was study. The results show that dry and water saturated granite has AE quiet period before rock rupture, the load level is 54.89% when dry granite appear AE calm period, and the saturated granite is 89.87%. The AE event of dry granite is small and constant, and energy rate is high in AE calm period, but AE events rate increases and energy rate decreases after saturated. The AE signal waveform entropy of dry granite ranges from 1.5 to 2.5 in calm period, but the range of full water granite is 0.5~1.5. Water-saturated can change granite microscopic fracture mode, which provides theoretical basis how the water affects the rock acoustic emission characteristics. Experimental results enrich the understanding of acoustic emission calm, which is important for identification precursory phenomena of acoustic emission calm.

Keywords: water-saturated; granite; AE quiet period; entropy; microscopic structure

* 收稿日期: 2016-10-24(修改稿)

作者简介: 张艳博(1973-), 男, 河北徐水人, 博士, 教授, 主要从事采矿工程和岩土工程方面的教学与科研工作。

E-mail: fzdn44444@163.com

通讯作者: 梁鹏(1987-), 男, 河南南阳人, 硕士, 助教, 主要从事声发射监测和岩土工程稳定性分析、预警及控制方面的研究工作。E-mail: hnlp87@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51374088, 51174071); 河北省自然科学基金(E2012209047)

0 引言

岩石在外载荷的作用下产生微破裂时,一部分应变能将以弹性波的形式释放出来,称为岩石的声发射(acoustic emission,简称 AE)^[1]。文献[2]定义声发射平静期是指岩石材料在加载过程中的某段时间内特别是峰值应力前声发射现象很少或者难以观察到的现象,这一时段内声发射事件率较低。

关于声发射平静这一现象,不少学者进行过这一方面的研究:尹贤刚等^[2]发现塑性阶段明显的岩石存在声发射平静现象,且声发射分形维数在平静期降到最低;刘建坡等^[3]发现粗粒花岗岩和细粒砂岩在岩石破裂前存在声发射平静现象;赵兴东等^[4]在对花岗岩破裂过程研究中观察到声发射平静现象;徐东强等^[5]在研究大姚铜矿砂岩声发射特征时发现,主破裂前声发射保持相对平静;曹树刚等^[6]在研究煤岩破裂时指出,接近峰值强度时声发射平静。在这些研究中,学者们指出了岩石声发射实验中有声发射平静期这一客观现象,认为这一现象可以作为岩石破坏的前兆,然而学者们的研究主要是针对干燥岩石受压、张拉、剪切和断裂试验条件下的声发射特性。对于饱水岩石声发射特性及声发射平静期特征,量化声发射平静期参数,以及水是如何影响声发射平静期特征则少有研究。而实际地壳中的岩石多含有水,许多矿山灾害(如矿井突水、矿柱失稳、巷道变形、边坡滑移等)也多与水有关。因此,研究水对岩石破裂的影响规律,用于指导监测预警实际矿山岩石灾害具有十分重要的意义。

本文通过对干燥和饱水花岗岩进行单轴加载声发射实验,在定性分析声发射平静期的力学特征和参数特征的基础上,对平静期的声发射参数进行了定量分析,研究了声发射平静期熵值的变化。讨论两种状态下岩石声发射平静现象的差异,结合岩石的断口微观形貌特征,分析饱水对岩石声发射平静期这一前兆特征的影响,以此来探讨不同含水条件下岩石破坏的前兆,便于现场监测运用。

1 实验过程

1.1 实验设备

实验设备主要有加载设备、声发射监测系统和场发射扫描电镜。实验中采用的加载设备是TAW-3000型伺服岩石力学试验系统(图1),声发

射采用美国物理声学公司PAC生产的PCI-2型多通道声发射监测系统(图2),场发射扫描电镜采用日本日立公司生产的S-4800型系统(图3)。



图1 TAW-3000型伺服试验机

Fig. 1 TAW-3000 servo testing machine



图2 PCI-2型声发射检测系统

Fig. 2 PCI-2 acoustic emission detector



图3 S-4800型扫描装置

Fig. 3 S-4800 scanning device

1.2 试件制备

在我国金属矿开采、水电站建设中都有在花岗岩岩体中进行开挖的实例。花岗岩是典型的硬岩,在高应力作用下,会产生突然猛烈的破坏,因此选用花岗岩为实验样品。将花岗岩块制成50 mm×50 mm×100 mm的标准长方体岩样,岩样两端面不平整度误差小于0.05 mm,沿岩样高度两对边长度误差小于0.3 mm。实验设计干燥和饱水两种状态,分别记为G组和B组,每组5个试样。根据相关试验规范要求,试件的具体处理方法如下:

(1)干燥状态:干燥箱中以105℃干燥48 h;

(2)饱水状态:将试件放入水槽中,先注水至试件高度的1/4处,以后每隔2 h分别注水至试件高度1/2和3/4处,6 h后全部浸没试件,定时进行称重,试件在水中吸水48 h制成饱水试样。实验测定试样饱和含水率为0.149%~0.167%。

1.3 实验方案

本文单轴加载实验采用位移控制方式加载,为

保证试件与加载面完全接触,避免接触时所产生的接触噪声影响声发射监测结果,先预加载至 1.5 kN,随后以 0.2 mm/min 加载至破坏,同步记录力学和声发射数据。实验结束后,选择破裂面处因加载破裂时脱落的碎片,进行场发射扫描电镜实验。

2 花岗岩声发射平静期特征

2.1 花岗岩声发射平静期的时序特征

花岗岩载荷、声发射事件率和声发射累计事件数与时间关系曲线如图 4 所示(图中三角符号表示声发射平静期起始点,圆点符号表示岩石破裂点)。从图中可以看出,干燥花岗岩在加载初期压密阶段就有大量的声发射产生,这是由于干燥花岗岩失水,裂隙之间的距离变大,压密闭合产生大量的声发射。进入弹性阶段,AE 事件率达到最大值,AE 累计事件数达到最大值。继续加载,AE 事件率突然减少,岩石进入声发射平静期,AE 累计事件数稳定在一定水平,持续到岩石破裂。

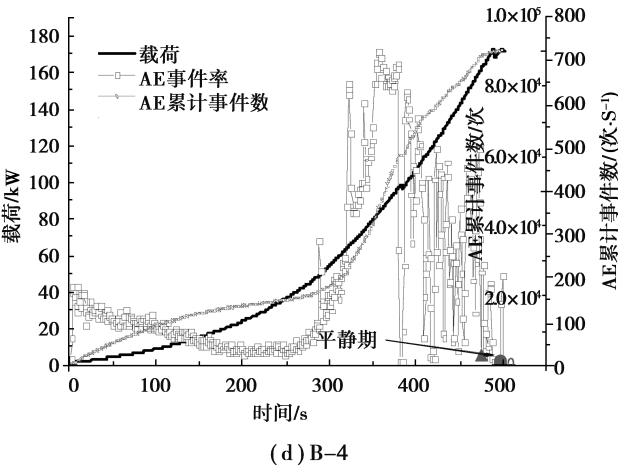
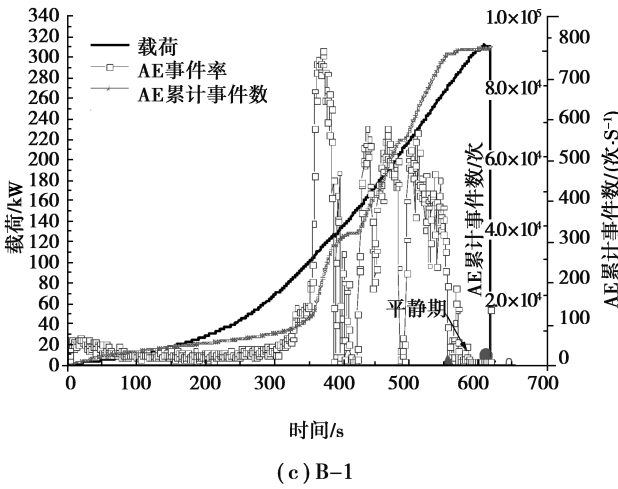
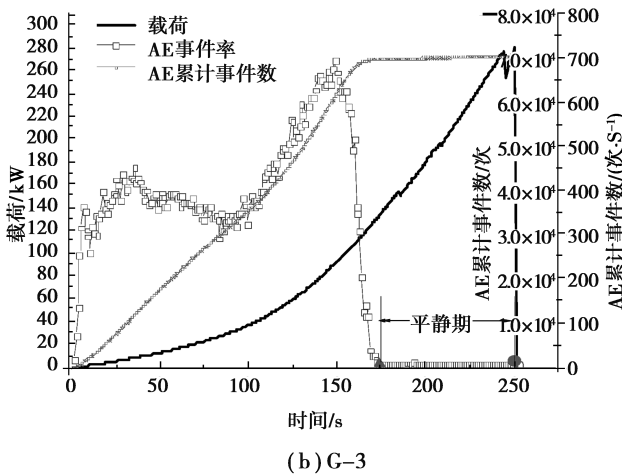
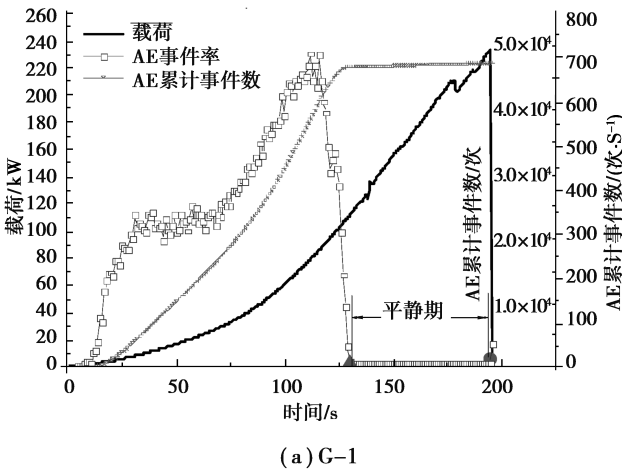


图 4 花岗岩载荷、AE 事件率、AE 累计事件数-时间关系曲线

Fig.4 Relationship between load, AE events rate, AE cumulative number of events vs. time for granite

饱水花岗岩在压密阶段有少量的声发射产生,这是由于花岗岩饱水后,内部颗粒之间的水岩作用,花岗岩内聚力降低,声发射信号也相应减弱。进入弹性阶段,AE 事件率突然增加,达到最大值。继续加载,AE 事件率出现多个峰值,其值却逐渐减小,到岩石破裂前,AE 事件率降到最低,AE 累计事件数近似水平,进入声发射平静期。

从 AE 事件率和 AE 累计事件数整个进程来看,干燥和饱水花岗岩在破裂前均出现声发射平静现象。从 AE 事件率的最大值及随时间的变化趋势来看,饱水可以改变花岗岩出现声发射平静期的前兆特征,干燥花岗岩进入声发射平静期属于“突发型”,饱水花岗岩是“缓降型”,这利于花岗岩破裂声发射监测中平静期前兆现象的识别。

根据图 4 的结果,统计干燥和饱水花岗岩开始出现 AE 平静期时的载荷占峰值载荷的百分比和

AE 平静期持续时间占岩石破裂时间百分比,如表 1 所示。由表 1 可以看出,干燥花岗岩在加载至峰值载荷的 54.89%时进入声发射平静期,且持续时间占岩石破裂时间的 1/4,约为 26.22%;饱水花岗岩在接近峰值载荷(约为峰值载荷的 89.87%)时才进入声发射平静期,且持续的时间较短,持续时间约占加载至破裂时间的 6.60%。

对比分析可以发现,干燥花岗岩声发射平静期呈现“出现平静期时载荷水平低,持续时间长”的特点,而饱水花岗岩呈现“出现平静期时载荷水平高,持续时间短”的特点。表明干燥花岗岩在相对峰值载荷较低水平就发生微细观破坏,进入声发射平静期较早,饱水花岗岩在相对峰值载荷较高水平发生微细观破坏,进入声发射平静期较晚。

表 1 花岗岩声发射平静期载荷和时间统计

Table 1 Statistics of load and time of granite in acoustic emission quiet period

状态	岩石 编号	出现 AE 平静期时 载荷占峰值 载荷的百分比/%		AE 平静期持续时间 占岩石破裂 时间百分比/%	
		实测值	平均值	实测值	平均值
干燥	G-1	47.23		33.12	
	G-3	47.66	54.89	30.40	26.22
	G-5	69.77		15.13	
饱水	B-1	85.17		9.86	
	B-2	90.39	89.87	5.12	6.60
	B-4	94.06		4.81	

2.2 花岗岩声发射平静期能率特征

用关联分析方法对声发射信号进行分析。本文选择声发射事件率和声发射绝对能率两个参量,做出花岗岩声发射平静期这段时间内二者的关联图,如图 5(a)和(b)所示。从图 5 可以看出,干燥花岗岩在声发射平静期内,AE 事件率维持在一定值,AE 能率在 $0\sim7\times10^{10}\text{ aJ}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内。饱水花岗岩在声发射平静期内,AE 能量率维持在一个相对较低的水平,AE 事件率在 $0\sim250\text{ 次}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内。说明干燥花岗岩声发射平静期表现出“AE 事件率恒定,AE 能率不定”的特征,饱水花岗岩声发射平静期则表现出“AE 能率恒定,AE 事件率不定”的特征。

将两种状态下花岗岩声发射平静期内的平均事件率和平均能率进行统计,如表 2 所示。从声发射平静期内平均 AE 事件率来看,干燥花岗岩岩样

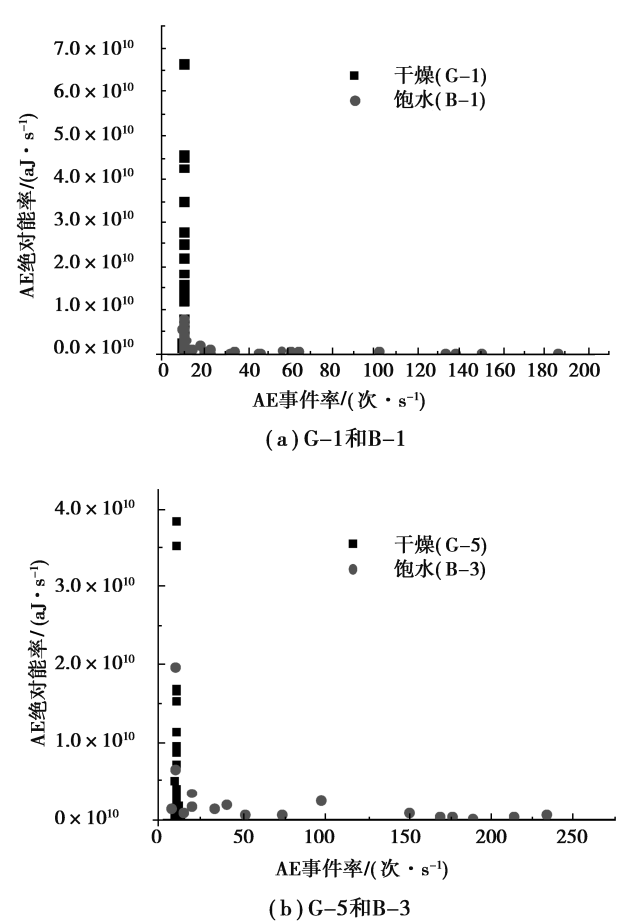


图 5 花岗岩声发射平静期内 AE 事件率和能率关联图

Fig.5 Correlation of AE event rate and energy rate of granite in AE quiet period

的值均低于饱水花岗岩岩样;从声发射平静期内平均 AE 能率来看,干燥花岗岩岩样的值均大于饱水花岗岩岩样。说明干燥花岗岩声发射平静期事件率较低,能率较高,饱水后平静期内 AE 事件率增大,AE 能率减小。

表 2 声发射参数统计

Table 2 Statistics of AE parameters

状态	岩石 编号	平静期平均 AE 事件率/(次·s ⁻¹)		平静期平均 AE 能率/($\times10^9\text{ aJ}\cdot\text{s}^{-1}$)	
		实测值	平均值	实测值	平均值
干燥	G-1	10		9.31	
	G-3	10	10	4.38	6.4
	G-5	10		5.64	
饱水	B-1	29		1.10	
	B-2	30	49	0.54	1.42
	B-4	88		2.62	

2.3 花岗岩声发射平静期熵值特征

1948 年,Shannon 提出了信息熵的概念^[7],表

达式为:

$$S = -\phi \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中: ϕ 为正的常数; P_i 是信息源中第 i 种信号出现的概率, $\ln P_i$ 是它带来的信息量; S 表征了信息量的大小, 是一个系统状态不确定性的度量。

下面沿用信息论中的概念, 研究岩石破裂过程中声发射信号不确定度评价问题。设 $X = \{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 为一个有 n 个状态的信源, 各状态出现的概率表示为 $P_i = P(x_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, 且

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (2)$$

本文分析时, 取 $\phi = 1^{[8]}$, 则该信源的信息熵可以由下式表述:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (3)$$

熵值是一个系统被确定处于混沌状态后混沌程度的度量, 是系统稳定性程度定量评价的关键指标。根据文献[9]研究表明, 对于混沌系统, 熵变化的过程是系统无序度变化的过程: 熵小则系统混乱度低, 熵大则系统混乱度高, 即熵值增加表示系统从几率小的状态向几率大的状态演变, 也就是从比较有规则、有秩序的状态向更无规则、更无秩序的状态演变。具体计算过程如下:

一个声发射信号是 $x(n)$, $n = 1 \sim N$ (声发射波形采样点的个数)

(1) 先用 Hist(绘制直方图函数) 函数对 $x(n)$ 的赋值范围进行分块。

(2) 统计每一块的数据个数, 并求出相应的概率。

(3) 用信息熵公式求解。

根据熵值理论和上述计算方法, 由监测中得到的声发射波形数据, 挑选出声发射平静期内的声发射波形信号, 编制程序分别计算干燥和饱水花岗岩试件在破裂前声发射平静期这段时间内的熵值。计算结果如图6所示。

由图6对比分析可知, 干燥花岗岩岩样 G-1、G-3、G-5 在声发射平静期内的熵值在 1.5~2.5 的范围内, 而饱水花岗岩岩样 B-1、B-2、B-4 在声发射平静期内的熵值在 0.5~1.5 的范围内, 可以看出在岩石破裂前的声发射平静期内, 干燥花岗岩的熵值大于饱水花岗岩的熵值。说明同样是在声发射平静期内, 干燥花岗岩的混乱程度高, 饱水花岗岩的混乱程度低。表现在岩石内部就是裂纹的扩展有序性不同, 在岩石的变形破坏过程中, 当进入不稳

定的破裂发展阶段之后, 系统不断调整结构抵抗外力的扰动, 相比干燥花岗岩, 饱水花岗岩裂纹向局部集中的有序方向发展, 使其系统熵值降低。

通过对实验结果进行线性拟合, 得到干燥和饱水岩样熵值随时间变化的趋势线, 如图6中的红线直线所示。对比分析可以看出, 在岩石破裂前的声发射平静期内, 干燥和饱水花岗岩的熵值变化趋势不同, 干燥花岗岩的熵值降低, 而饱水花岗岩的熵值升高。这说明干燥花岗岩系统的混乱程度降低, 而饱水花岗岩系统的混乱程度增强。表现在岩石内部, 从裂纹扩展的角度分析, 干燥花岗岩在声发射平静期岩石内部的破裂机制是微裂纹贯通形成大破裂, 而饱水花岗岩内部破裂机制是微裂纹的产生、贯通同时发生。

3 花岗岩微观破裂机理

3.1 花岗岩微观破裂机理分析

岩土微观结构与其力学特点和工程性质具有必然的相关关系。一方面, 不同的力学过程和水力学过程对岩土类材料的微观结构产生重要影响; 一方面, 岩土微观结构又决定了其力学过程和水力学过程特点^[10]。因此, 必须从微观结构来研究岩石的破裂过程, 分析岩石的破裂机理, 同时, 从岩石断口分析得到饱水对岩石微观形貌特征的影响。岩石微观断裂机理主要有拉断和剪切两种形式^[11]。拉断断口微观形貌有河流状花样、台阶状花样、舌状花样等花样, 其微破裂形式是穿晶断裂和沿晶断裂以及它们的耦合形式。剪切断口微观形貌花样主要有线状排列小颗粒状花样、条纹花样等花样, 剪切破坏微破裂形式表现为切晶擦花与沿晶面擦花。

通过在扫描电镜下反复观察, 岩石破裂碎片中小于 0.5 μm 的裂纹不多见。放大倍数为 500 和 1 000 时的有效分辨率分别为 0.6 μm 和 0.3 μm , 此倍数下可以观察岩石碎片中绝大部分的裂纹。因此, 选择 500 和 1 000 两种放大倍数下花岗岩断口代表性的显微照片, 分析干燥和饱水花岗岩的微观破坏形貌特征、微观破裂形式和微观破坏机理。

图7(a)和(b)分别为干燥花岗岩放大 500 倍与 1 000 倍下的显微照片。从颗粒形态上看, 干燥花岗岩颗粒与颗粒之间排列较为规则和致密, 分布也较为均匀, 少有堆积聚集。从断口形态上看, 干燥花岗岩断口形态有解理平面, 微观形貌特征为台阶状花样, 这属于典型的解理断口微观形貌特征。这说明干燥花岗岩的微观破坏形式是解理分离的

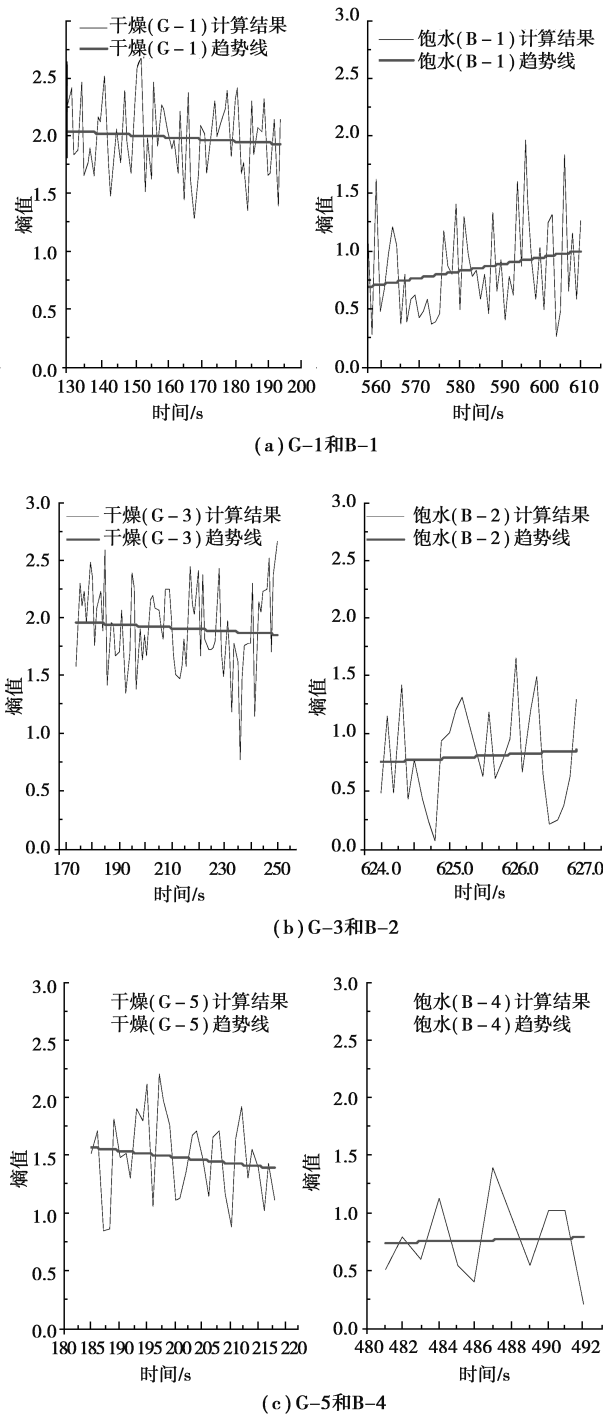


图6 花岗岩声发射平静期的熵值

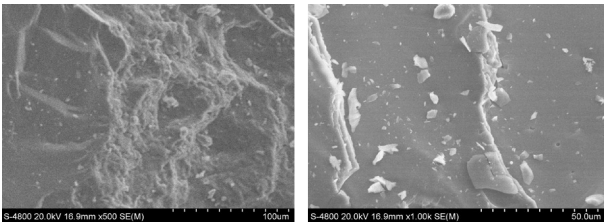
Fig.6 Entropy of granite in AE quiet period
穿晶断裂,是典型的拉断脆性断裂。

图7(c)和(d)分别是饱水花岗岩放大500倍与1000倍下的显微照片。从颗粒形态上看,饱水花岗岩颗粒也较为规则和致密,但颗粒表面上分布许多松散状的碎片。从断口形态上看,饱水花岗岩也有较大的解理面,微观形貌特征为台阶状花样,这属于典型的解理断口微观形貌特征,但解理面上

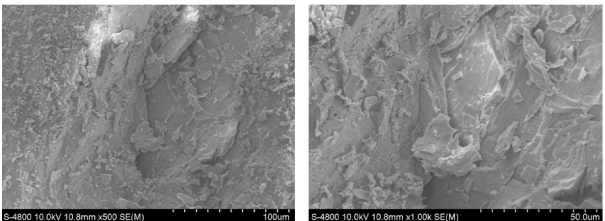
有较多的岩粉散布,是沿片理面的岩屑堆积剪切作用的结果,多为沿晶面擦花形式。这说明饱水花岗岩的微观破坏形式是解理分离的穿晶断裂和沿晶面擦花二者耦合的方式,是拉断和剪切共存的脆性断裂。花岗岩断口扫描电镜实验结果如表3所示。

表3 花岗岩断口扫描电镜实验结果及分析

Table 3 Test results and analysis of granite fractures scanning electron microscopy			
岩石状态	断口微观破坏形貌	微观破裂形式	破裂机理
干燥花岗岩	台阶状花样	解理断裂	拉破裂
饱水花岗岩	台阶状花样 小颗粒状花样	解理断裂 沿晶面擦花	拉、剪破裂并存



(a) 干燥花岗岩 (×500) (b) 干燥花岗岩 (×1000)



(c) 饱水花岗岩 (×500) (d) 饱水花岗岩 (×1000)

图7 花岗岩电镜显微照片(×倍数)

Fig. 7 Micrograph of granite (multiplied by magnification)

3.2 饱水对花岗岩声发射平静期影响原因分析

干燥和饱水花岗岩在破裂前均存在声发射平静期,说明声发射的相对平静期现象在岩石破坏过程中是客观存在的,且声发射平静期是岩石临近破坏的一个重要前兆特征。关于岩石声发射平静期,经过分析发现,岩石破裂前的声发射平静是AE事件率的平静,而AE能率并不平静,这是由于岩石在破坏前的亚临界状态下,是微裂纹贯穿形成大裂纹的过程,导致单位时间内声发射事件数变小,表现为声发射统计参数AE事件率降低,进入声发射

平静期,这和文献[3]的分析一致。

关于饱水对岩石声发射平静期特征的影响,干燥和饱水花岗岩声发射平静期表现出不同的特征。由表 3 分析可知,这是由于干燥花岗岩是解理分离的穿晶断裂模式,是典型的拉断脆性断裂,而解理断裂是一种低能断裂^[12],所以干燥花岗岩在较低的载荷水平下岩石变形较大,有大量微裂纹产生,岩石内部损伤严重,到岩石失稳破坏前,小尺度裂纹合并贯通形成大尺度裂纹,直至形成导致岩石破坏的宏观裂纹,较早地进入声发射平静期。饱水花岗岩是解理分离的穿晶断裂和沿晶面擦花二者耦合的模式,是拉断和剪切共存的脆性断裂。两种断裂模式的存在需要消耗更多的能量,只有在较高的载荷下才能完成两种断裂形式,所以饱水花岗岩进入声发射平静期时的载荷水平高,持续的时间较短。进入声发射平静期内,干燥花岗岩内部的破裂机制是微裂纹贯通形成大破裂,产生高能量,而饱水花岗岩内部微裂纹的产生和贯通同时存在,产生裂纹需要耗散能量,可释放的能量少。由此可知,饱水可以影响岩石的微观结构,改变岩石的微观破裂模式,使岩石破裂过程表现出不同的声发射平静期特征。

4 结论

通过对干燥和饱水花岗岩破裂过程的力学及声发射平静期特性进行分析,结合对花岗岩微观破裂机理的讨论,得到以下主要结论:

- (1)干燥和饱水花岗岩在破裂前均出现声发射平静期,但含水性不同,声发射平静期特征不同。在对岩石含水性认识的基础上,同时结合声发射平静这一前兆特征,对于矿山岩石(体)的失稳破坏声发射监测预警更具意义。
- (2)饱水可以改变花岗岩出现声发射平静期的前兆特征,从声发射事件率来看,干燥花岗岩属于“突降型”,饱水花岗岩属于“缓降型”,这对于花岗岩破裂声发射监测中平静期前兆现象的识别具有重要意义。
- (3)饱水可以提高花岗岩进入声发射平静期的载荷水平,干燥花岗岩出现平静期时载荷占峰值载荷的百分比约为 54.89%,饱水花岗岩为

89.87%。在相对峰值载荷同样水平的应力扰动的情况下,干燥花岗岩比饱水花岗岩更易产生较大的内部微细观破裂,干燥花岗岩发生失稳灾害的可能性更大。

(4)饱水可以降低岩石储存能量的能力,使岩石破裂时的能量减小,干燥花岗岩平静期内事件率小且恒定,能量率较高,饱水后花岗岩事件率增大,能量率降低。

(5)饱水能够改变平静期内声发射波形信号熵值的大小和变化趋势。干燥花岗岩在 1.5~2.5 的范围内,呈现下降的趋势;饱水花岗岩在 0.5~1.5 的范围内,呈现上升的趋势。相比饱水花岗岩,干燥花岗岩在声发射平静期内岩石系统的混沌程度更高。

(6)饱水可以改变花岗岩的微观破裂模式,干燥花岗岩是解理穿晶断裂模式,是拉断脆性断裂。饱水花岗岩是解理分离的穿晶断裂和沿晶面擦花二者耦合的模式,是拉断和剪切共存的脆性断裂。这为水是如何影响岩石的声发射特征提供理论依据。

上述实验结果丰富了对岩石声发射平静期的认识,干燥和饱水花岗岩在破裂前均存在声发射平静期的前兆现象,干燥花岗岩平静期持续时间比饱水花岗岩长,干燥花岗岩声发射平静期更易识别。这对岩石破裂声发射监测中前兆现象的识别具有重要意义。

参考文献(References)

[1] 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京:科学出版社,2003. (Tang Chunan, Wang Shuhong, Fu Yufang. Numerical experimentation in rock failure process [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))

[2] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3383-3390. (Yin Xiangang, Li Shulin, Tang Haiyan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp. 2): 3383-3390. (in Chinese))

- [3] 刘建坡,徐世达,李元辉,等. 预制孔岩石破坏过程中的声发射时空演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2538-2547. (Liu Jianpo, Xu Shida, Li Yuanhui, et al. Study on acoustic emission characteristics of temporal and spatial evolution of prefabricated hole rock in process of failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2538-2547. (in Chinese))
- [4] 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2): 3673-3678. (Zhao Xingdong, Tang Chunan, Li Yuanhui, et al. Study on the AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3673-3678. (in Chinese))
- [5] 徐东强,周昌达,许昭永. 岩石试件刚度及压力机刚度对岩石主破裂前声发射相对平静的影响[J]. 地震研究, 1994, 17(8): 802-807. (Xu Dongqiang, Zhou Changda, Xu Zhaoyong. Influence of rigidity of rock sample and pressure machine on relative quiet of acoustic emission prior to main rupture in rock[J]. Journal of Seismological Research, 1994, 17(8): 802-807. (in Chinese))
- [6] 曹树刚,刘延保,张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2794-2799. (Cao Shugang, Liu Yanbao, Zhang Liqiang. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2794-2799. (in Chinese))
- [7] Shannon C E. A Mathematical Theory of Communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [8] 黄耀英,郑宏,田斌. 信息熵理论在岩体结构加速流变破坏分析中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(8): 50-54. (Huang Yaoying, Zheng Hong, Tian Bin. Application of information entropy theory to the failure analysis of accelerated rheology of rock structure [J]. Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(8): 50-54. (in Chinese))
- [9] 冯端,冯步云. 熵[M]. 北京: 科学出版社, 1992. (Feng Duan, Feng Buyun. The entropy [M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese))
- [10] 李顺群,冯望,王英红. 一种微结构颗粒体分布特征的分析方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 731-736. (Li Shunqun, Feng Wang, Wang Yinghong. A method for analyzing distribution characteristics of microstructural particle congeries [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 731-736. (in Chinese))
- [11] 李先炜,兰勇瑞,邹浚兴. 岩石断口分析[J]. 中国矿业大学学报, 1983(1): 15-21. (Li Xianwei, Lan Yongrui, Zou Junxing. A study of rock fractures [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1983(1): 15-21. (in Chinese))
- [12] 钟群鹏,赵子华,张峥. 断口学的发展及微观断裂机理研究[J]. 机械强度, 2005, 27(3): 358-370. (Zhong Qunpeng, Zhao Zihua, Zhang Zheng. Development of fractography and research of fracture micromechanism [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(3): 358-370. (in Chinese))
- [13] 李世愚,和泰名,尹祥础,等. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010. (Li Shiyu, He Taiming, Yin Xiangchu, et al. Introduction of rock fracture mechanics [M]. Hefei: University of Science & Technology, 2010. (in Chinese))
- [14] 丛培江,顾冲时,王建. 熵理论在分析混凝土裂缝扩展过程中的应用探讨[J]. 应用基础与工程科学研究, 2008, 16(1): 50-56. (Cong Peijiang, Gu Chongshi, Wang Jian. Application of entropy theory in the analysis of concrete crack propagation process [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(1): 50-56. (in Chinese))
- [15] 周翠英,张乐民. 岩石变形破坏的熵突变过程与破坏判据[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2506-2510. (Zhou Cuiying, Zhang Yuemin. Research on entropy catastrophic regularity and failure criterion in the deformation and failure process of rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2506-2510. (in Chinese))