

增量循环加卸载下岩石峰值强度前 声发射特性试验研究

李庶林¹, 周梦婧¹, 高真平¹, 陈东霞¹, 张建霖¹, 胡静云²

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 为了研究岩石峰值强度前声发射前兆特性、加卸载过程的声发射特性, 以指导声发射技术在岩体工程监测和灾害预警中的应用, 采用花岗闪长岩、角闪岩、矽卡岩、铜矿、钨钼矿和铅锌矿共 6 种岩石分别开展单轴压缩、增量循环加卸载和增量稳压循环加卸载 3 种不同加载方式的试验, 主要对岩样峰值强度前声发射相对平静期、卸载过程的声发射特性、对 2 种不同循环加卸载方式下的 Felicity 比以及加卸载响应比的变化情况进行研究。试验结果表明, 3 种加载方式下部分岩样始终存在“相对平静期”现象, 多种岩样的 AE 事件峰值频率在破坏前总是低频成分显著增加, 且越接近破坏, 大振幅 AE 事件就越多。在 2 种不同循环加卸载方式下, 当应力水平达到峰值强度的 50%~60%时, Kaiser 效应逐渐消失, Felicity 效应出现。Felicity 比和加卸载响应比在低应力水平阶段均大于 1, 进入中等应力水平阶段后在 1 附近波动, 但相对比较稳定; 进入较高应力水平以后, 岩石内部裂纹不稳定扩展, Felicity 比逐渐减小, 到 0.64~0.89 时, 试样破坏。试验表明, 相对平静期、Felicity 比和加卸载响应比等可作为预测或判断岩石失稳破坏的参考依据。

关键词: 岩石力学; 循环加卸载; 声发射; 相对平静期; Felicity 比; 加卸载响应比

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)04 - 0724 - 12

Experimental study on acoustic emission characteristics before the peak strength of rocks under incrementally cyclic loading-unloading methods

LI Shulin¹, ZHOU Mengjing¹, GAO Zhenping¹, CHEN Dongxia¹, ZHANG Jianlin¹, HU Jingyun²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In order to study the precursory characteristics of acoustic emission before the peak strength and the acoustic emission characteristics of the loading-unloading process for guiding the application of AE technology in rock mass engineering monitoring and disaster warning, six kinds of rocks including granodiorite, hornfels, skarn, copper ore, wolfram-molybdenum ore and lead-zinc ore were tested respectively under uniaxial compression, incremental cyclic loading-unloading and incremental isobaric cyclic loading-unloading, and the relative tranquil period of acoustic emission before the peak strength, the AE characteristics of unloading process, the Felicity ratio under two different cyclic loading-unloading modes and changes of the load-unload response ratio were studied.

收稿日期: 2018 - 11 - 30; **修回日期:** 2019 - 01 - 12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51674218); 国家“十三五”重点研发计划项目子项(2016YFC0600702 - 04)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51674218) and National Key R&D Projects in 13th Five-year(Grant No. 2016YFC0600702 - 04)

作者简介: 李庶林(1963 -), 男, 2000 年于东北大学工程力学专业获博士学位, 现任教授, 主要从事微地震与声发射监测、岩石力学和岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: shulin.li@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1410

The results show that some rocks always present the “relatively tranquil period” phenomenon under three different loading modes. The low frequency components of the AE events of a variety of rock samples increase significantly before failure, and the closer to the failure, the more the large amplitudes AE events. Under two different cyclic loading and unloading ways, Felicity effect occurs with Kaiser effect disappearing when the stress level reaches 50% to 60% of the peak intensity. Both Felicity ratio and load-unload response ratio are greater than 1 in the low stress level and fluctuate around 1 in the middle stress level. In the high stress level stage, the internal cracks of the rocks expand unstably with the Felicity ratio reducing and the load-unload response ratio increasing, and the samples destroy when the Felicity ratio reduces to 0.64 - 0.89. The Felicity ratio and the load-unload response ratio of the relatively tranquil period may be used as the parameters of rock failure prediction.

Key words: rock mechanics; cyclic loading-unloading; acoustic emission; relatively tranquil period; Felicity ratio; load-unload response ratio

1 引言

岩石声发射是岩石材料在受力作用时其内部原生裂纹或缺陷的扩展以及新的微破裂孕育、萌生、演化、扩展和断裂所释放的能量以弹性波形式释放出来的现象^[1]。声发射技术已被广泛应用于岩石工程灾害监测以及类岩石材料的破裂过程和失稳机制研究中, 并成为研究岩石等脆性材料细观损伤和破坏过程的一种有效方法^[2-4]。由于岩石材料自身结构组成的复杂性, 到目前为止对岩石细观破裂机制的声发射特性还研究得很不充分, 如岩石峰值强度前的声发射前兆特征、声发射源的力学机制、卸载过程的声发射特性和力学机制等, 还没有形成有规律的、共性的特点, 特别是在国内对卸载过程的声发射特性研究不是很多。这影响了声发射技术在工程监测及灾害预警等方面的应用效果。因此, 继续开展岩石声发射特性研究仍然具有很重要的试验理论意义和实用价值。

在岩石简单加载过程的声发射特性方面, D. A. Lockner^[3]研究了岩石破坏过程的声发射特性, 且根据试验结果论及了该技术在揭示岩石细观破裂过程、预测岩石破坏等方面的问题。V. Rudajev 等^[5]通过室内声发射试验研究了岩石在单轴压缩破坏全过程的声发射特性, 得到了应力 - 应变与不同声发射参数之间的关系。吴刚和赵震洋^[6]通过单轴和三轴加载卸荷破坏试验, 探讨了岩石类材料破坏过程中的声发射现象。刘新平等^[7]对单轴压缩条件下岩石变形过程中的声发射信号进行了频谱分析, 比较了不同种类岩石的频谱特征, 并给出了频谱分布范围。李庶林等^[8]通过对单轴受压岩石破坏全过程声发射试验研究, 讨论了峰前相对平静期现象及应用

于工程监测的可能性。孙强和薛雷^[9]通过单轴加载声发射试验研究了岩石裂纹扩展的临界点应力、应变与峰值应力、应变之比。黄玉仁等^[10]对岩石单轴加载条件下的声发射试验, 研究了峰值强度前能率、事件率和撞击率三者的特性等。

在岩石循环加卸载过程声发射特性研究方面, K. Mogi^[11]对岩石在增量循环加卸载和恒压加卸载条件下的声发射特性进行了研究, 得到许多有价值的结果。M. V. M. S. Rao 和 Y. V. Ramana^[12]通过循环加卸载试验中的声发射事件与振幅研究了循环应力以及循环周期间的时间间隔对微裂纹的发展和岩石破坏的影响。C. H. Sondergeld 和 L. H. Estey^[13]研究了花岗岩循环加卸载过程中微破裂的发展与声发射特性, 发现在早期应力循环中就出现声发射现象。李庶林和唐海燕^[14]对岩石加卸载声发射特性、Kaiser 效应与 Felicity 效应之间的关系进行了研究, 并对两者的关系进行了讨论。夏冬等^[15]分别对干燥、饱和岩样进行了循环加卸载试验研究, 探讨了岩石的力学与声发射特性以及加卸载响应比的变化情况。李楠和王恩元^[16]对循环分级加载条件下岩石损伤破坏过程的声发射频谱特性进行了研究, 指出在不同应力阶段岩石声发射主频、主频带宽度会随着应力变化呈现出一定的规律。周家文等^[17]通过单轴循环加卸载试验、结合细观力学分析, 对脆性岩石的峰值强度和断裂损伤力学特性等进行了研究, 并与声发射特性进行了对比分析。李庶林等^[18]通过单轴循环加载试验对岩石声发射的分形特性进行了研究, 得出以源空间分布关联维数随应力的变化趋势能很好地反映岩石内部损伤破坏的发展趋势。徐速超等^[19]在单轴循环加卸载试验中研究了岩石的声发射特性。纪洪广等^[20]对岩石加载 - 卸荷声发射特征进行了试验研究, 指出在不同应力水平的声发射

信号不同，且反映了材料不同的本构特征。李世愚^[21]通过岩石单轴加卸载试验研究对试验过程中 Kaiser 效应和 Felicity 效应的出现及其机制进行了分析，并针对卸载时的声发射特性进行讨论。

本文对取自多个矿山的多种岩样分别进行单轴加载、增量循环加卸载和增量稳压循环加卸载试验，综合地对比分析各种岩石在不同加载方式下全过程的声发射特性、以及加卸载响应比，探索岩石破坏的前兆特性等，以期更为有效地为岩体工程灾害的声发射和微震监测预警技术提供参考依据。

2 试验方案

2.1 岩样描述与制备

本试验所用岩样为取自松江铜矿的花岗闪长斑岩、矽卡岩、角闪岩、铜矿石和钨钼矿石，以及万城铅锌矿的铅锌矿石共 6 种岩石试样。根据国际岩石力学学会的试验标准，将岩石加工成 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 圆柱体试样，部分岩样如图 1 所示。



图 1 典型岩石试样图

Fig.1 Typical rock specimens

2.2 试验设备与方法

试验采用 YNS-Y600 电液伺服压力试验机和美国物理声学公司生产的 MICRO-II - 32 声发射系统相互协调工作，如图 2 所示。本试验过程一律采用位移控制方式进行加载和加卸载，采用全数字板卡测控系统，并自动采集处理试验数据，显示应力 - 位移曲线、应力 - 时间曲线、位移 - 时间曲线等。

声发射监测系统的采集仪采样频率为 1~400 kHz 的带宽，最大信号增益幅度为 100 dB。试验过程中时刻保持声发射监测系统与加载系统在时间上



图 2 岩石力学试验机和 MICRO-II - 32 声发射系统

Fig.2 Rock mechanical test machine and acoustic emission monitoring system MICRO-II - 32

同步，声发射监测系统对试件进行过程监测，采集并分析声发射事件等参数。

本次声发射监测试验采用 6 个传感器并对称布置在试样上下端左右两侧及中部的先后位置，其空间布置形式如图 3 所示。传感器与试件之间涂抹了适量黄油，以增加耦合效果，并用橡胶带将探头牢牢固定在试件上。



图 3 传感器安置图

Fig.3 Layout of sensors

2.3 试验加载方式

针对工程中围岩体、矿柱等在多次开挖过程中可能受到反复加卸载、增量加卸载等应力重分布的影响，本试验研究中的加载方式分为 3 种：(1) 单轴加载试验；(2) 以 10 kN 增量循环加卸载试验，直到试样破坏为止；(3) 以 10 kN 开始进行增量循环加载 - 稳压 - 卸载试验，使应力在每次的稳压处

保持 60 s 后再行卸载，直至试样破坏。2 种循环加卸载方式的应力 - 时间曲线图如图 4 所示。

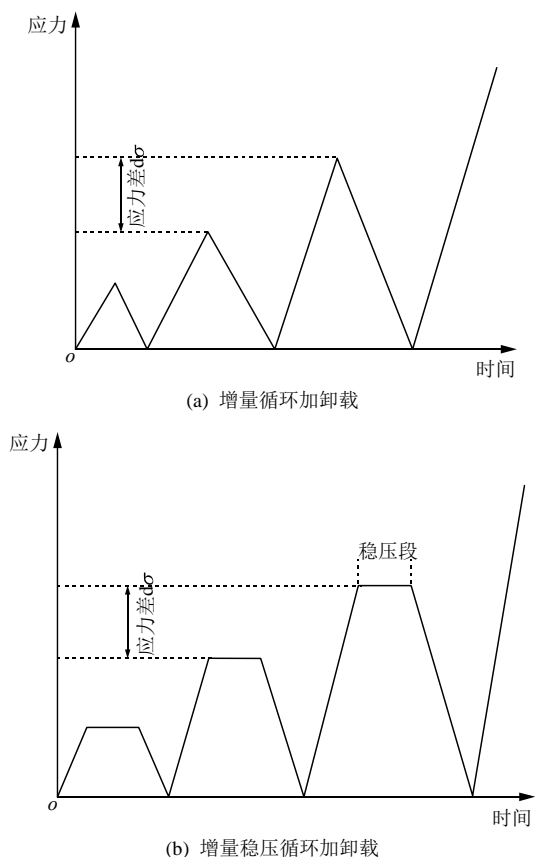


图 4 循环加卸载方式曲线

Fig.4 Incrementally cyclic loading-unloading curves

3 试验结果与分析

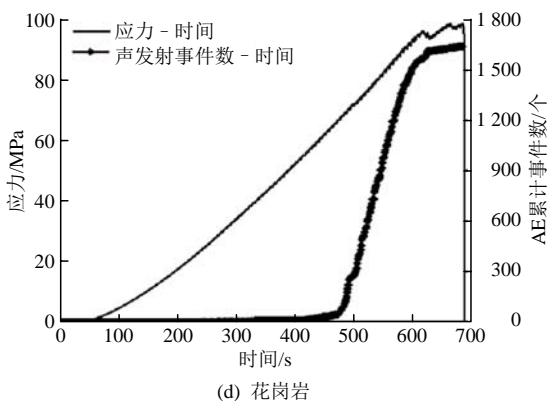
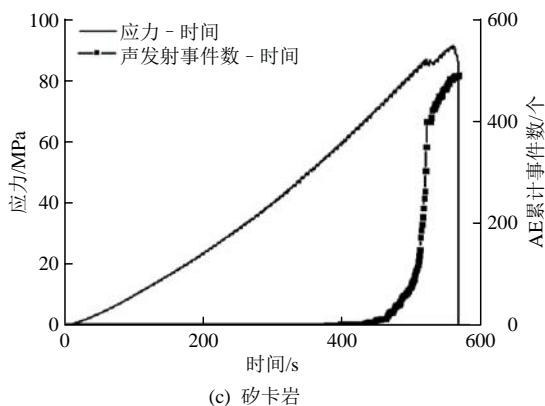
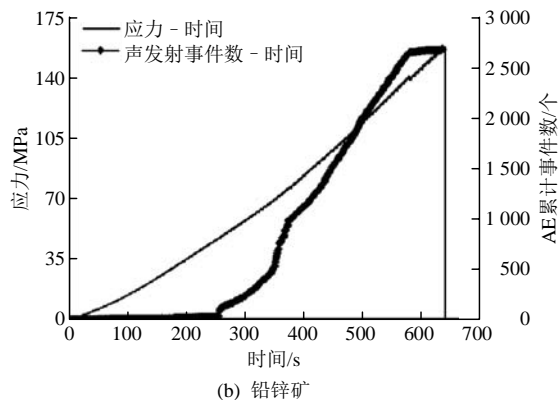
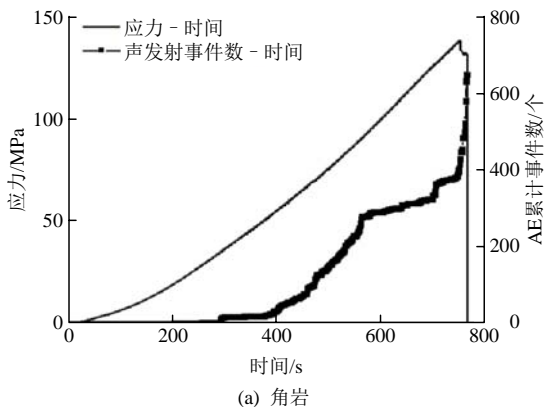
3.1 简单加载声发射特征分析

(1) 试验结果和“相对平静期”现象

针对 6 种不同岩石进行简单加载试验，根据峰值强度前是否出现声发射“相对平静期”进行分类，可将得到的结果分为 2 类典型的声发射特性曲线。

第 1 种类型为出现相对平静期的岩样，有角岩、铅锌矿、矽卡岩、花岗闪长岩。对于角岩和铅锌矿，在初始压实阶段的声发射事件数很少，事件率和能量很低，在线弹性阶段和弹塑性开始阶段，声发射事件大量产生，声发射率显著增加，如图 5(a), (b) 所示，这应该是在该阶段发生了细观微破裂从而产生了大量新鲜的微裂纹所致。而矽卡岩和花岗闪长岩在弹塑性阶段之前一直没有明显声发射，从弹塑性阶段开始，声发射事件先是逐渐增加，然后剧增，后又平缓下来，如图 5(c), (d) 所示。这 4 种岩石一致的是峰值前的塑性阶段，声发射率骤然降低，形成一段“相对平静期”。

第 2 种类型为不出现相对平静期的岩样，有铜矿和钨钼矿。这 2 种岩石在弹性阶段中前期事件数很少或几乎没有，事件率和能量很低；从弹性阶段后期弹塑性阶段前期开始，声发射事件开始增加，



(c) 矽卡岩

(d) 花岗岩

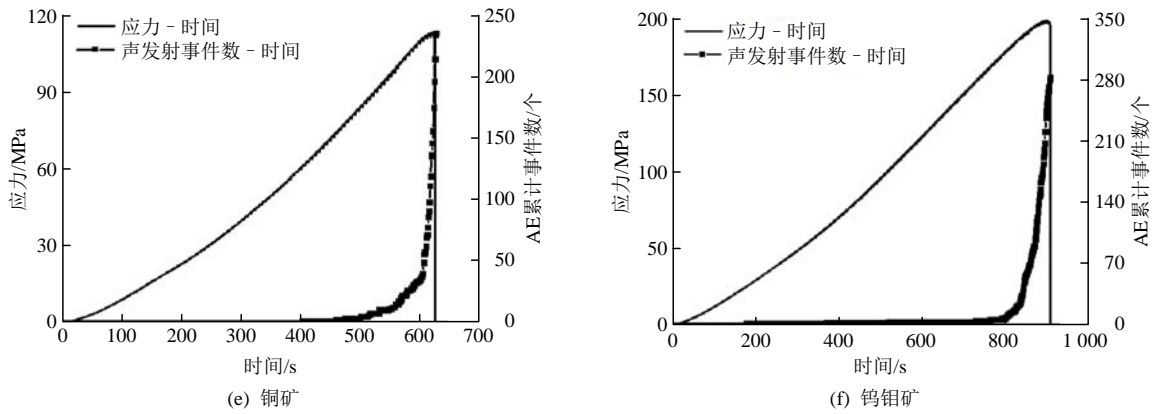


图5 岩石应力 - 时间 - 声发射累计事件关系曲线

Fig.5 Relationship curves of stress, time and accumulative AE events

但事件率较低；在接近峰值强度前，声发射事件率明显增大，到试样破坏时声发射累计事件数达到最大值，并没有出现明显的“相对平静期”现象，如图 5(e)和(f)所示。

(2) AE 事件峰值频率和振幅频度分布特征

针对声发射事件数较多且全过程均有事件发生的角岩、钨钼矿和铅锌矿，本研究对试样声发射事件的峰值频率和不同应力阶段的声发射事件的振幅

频度分布进行了分析。分析发现岩石试样破坏过程中 AE 发生频度的变化有 2 种模式，其一是与岩石同样在应力水平上升的过程中 AE 发生的频度增加；另一种模式则与应力水平的增加无关，从低应力水平开始活动，典型的结果如图 6(a)和(b)所示。然而，不论哪种模式都出现随着应力水平的增加低频成分有所增加的共同趋势，如图 7 所示，图 7(a)和(b)分别对应图 6(a)和(b)。

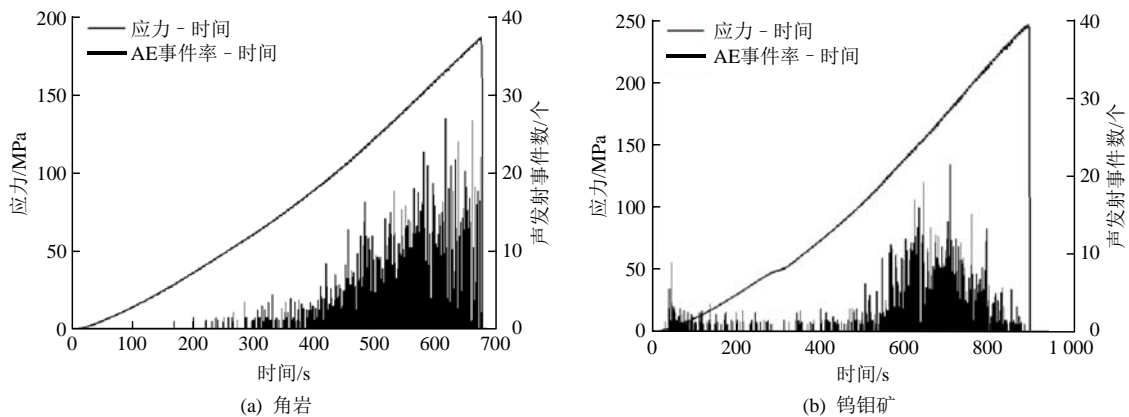


图6 岩石应力 - 时间 - 声发射事件率关系

Fig.6 Relationships of stress, time and AE event rate of rocks

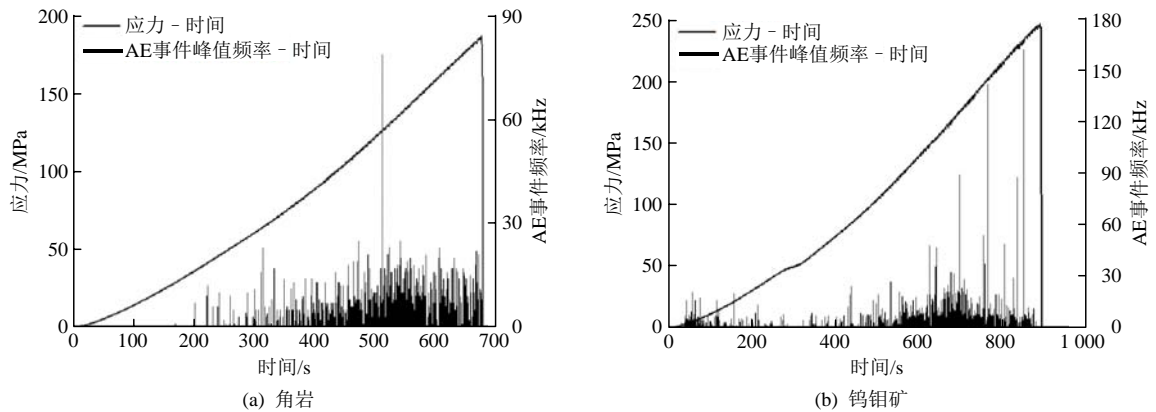


图7 岩石应力 - 时间 - 声发射事件峰值频率关系

Fig.7 Relationships of stress, time and AE peak frequency of rocks

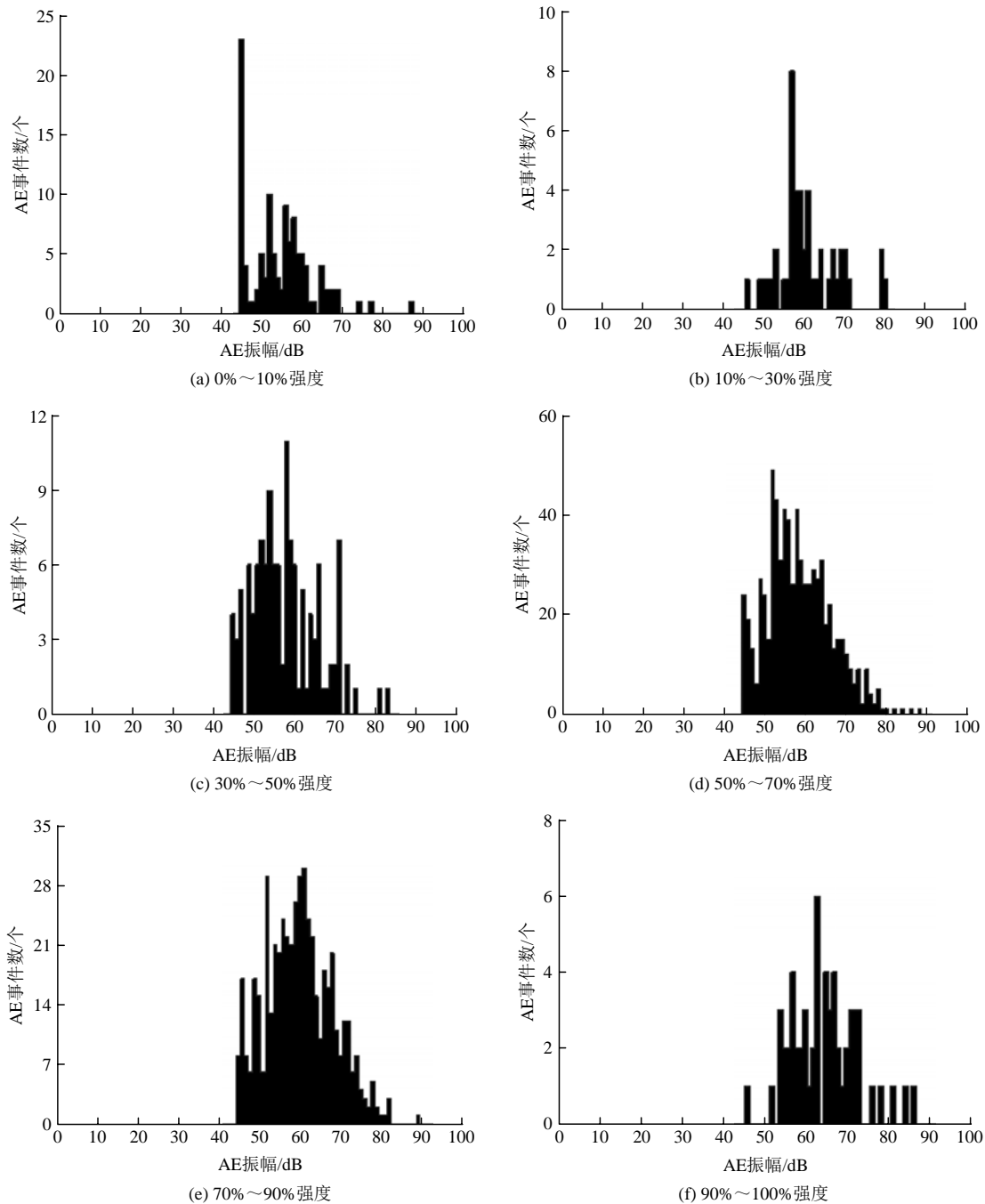


图 8 铅锌矿破坏过程中的 AE 振幅频度分布的变化

Fig.8 Variation of AE amplitude distribution in failure process of rocks

本研究将每个试样按峰值强度的百分比分别以 10%，30%，50%，70%，90%峰值强度为界绘出了各应力阶段的振幅分布，典型的铅锌矿岩样的结果如图 8 所示。从图 8(b)到(c)时，60~70 dB 振幅的 AE 发生数增加，并出现 80 dB 以上的声发射事件。再到图 8(d)和(e)阶段时，60~70 dB 振幅的 AE 较为显著，且出现接近 90 dB 的声发射事件。在图 8(f)阶段，60~70 dB 振幅的 AE 最为显著。分析表明各试样 AE 振幅频度均存在这种变化趋势，这种现象

说明 AE 振幅频度分布随应力水平发生显著的变化，较高振幅的 AE 事件逐渐成为主导，且越来越多高振幅的 AE 事件出现，特别是在约 80%峰值强度以上时，AE 事件的发生数也显著增加。

3.2 增量循环加卸载声发射特征分析

对钨钼矿和铅锌矿试样增量循环加卸载试验的声发射特性如图 9 所示，分别为应力、时间与 AE 事件率和 AE 事件累计数以及 AE 事件峰值频率关系。从图 9 可见，2 种岩石的声发射率变化情况和

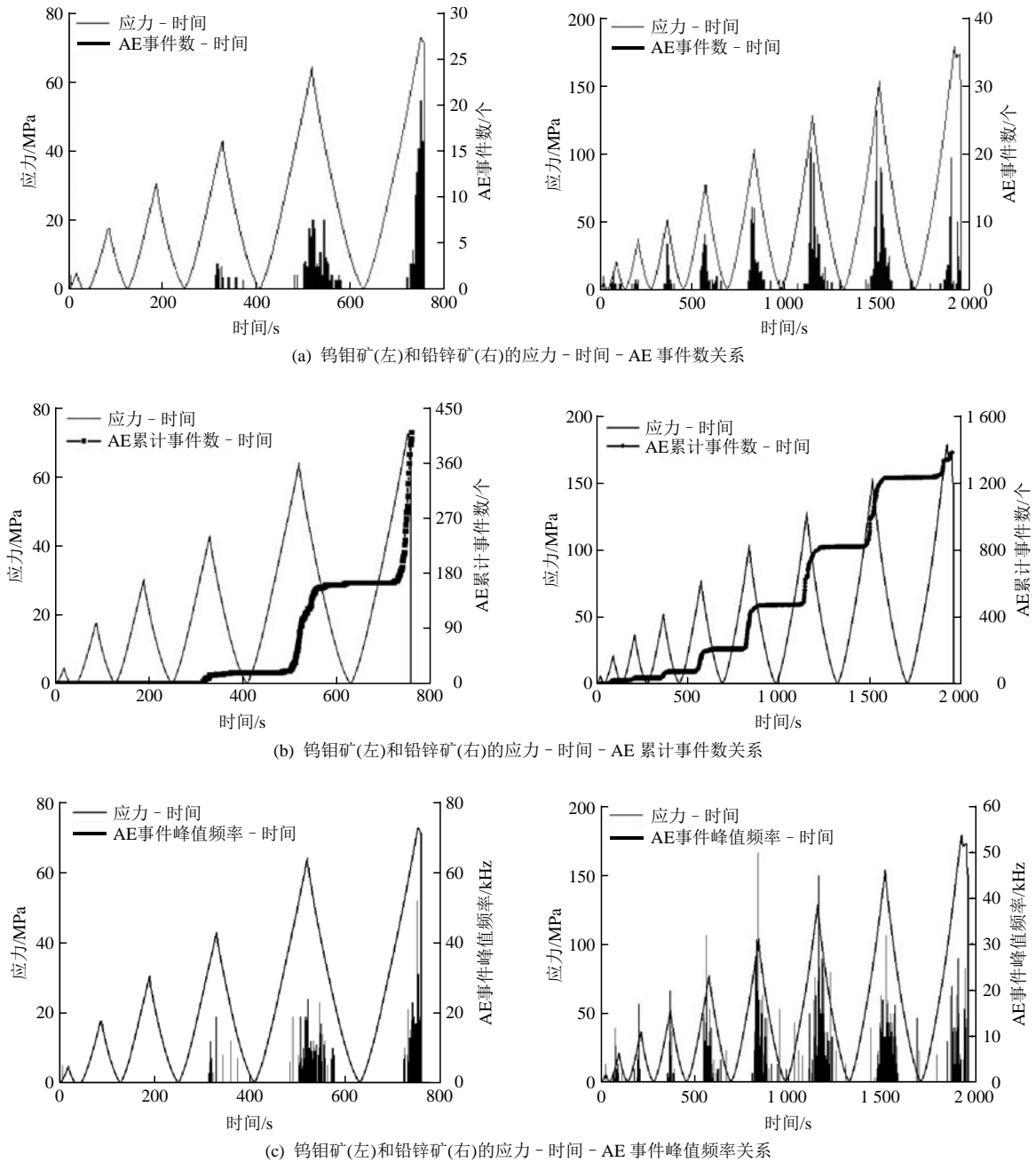


图9 增量循环加卸载时应力和 AE 事件率、累计事件数、峰值频率与时间关系

Fig.9 Relationships between stress and time with AE event rate, accumulative events and peak frequency of rocks under cyclic loading and unloading

简单加载的结果基本一致。钨钼矿在中等应力水平以前均无明显声发射，到较高应力水平时 AE 事件才开始出现并增加，破坏前剧增，并在破坏时达到最大值，而无平静期现象；铅锌矿从低应力水平开始产生声发射活动，声发射率随着应力的增大而逐渐增大，在峰值应力前期，声发射率骤然下降，在 AE 累计事件数的曲线图上可以明显地看到一段平静期。除此之外，二者的 AE 事件峰值频率的变化情况也和简单加载的一样，随着应力的增大低频率

成分有所增加、大振幅 AE 事件也有增加的趋势。

卸载过程中的声发射特性：

(1) 钨钼矿在低应力阶段卸载过程中几乎没有 AE 事件发生；铅锌矿卸载时在低应力水平几乎没有或有很少 AE 产生，进入中等应力水平后出现显著 AE 事件，且随着循环的次数的增多而不断增加。

(2) 卸载期间的声发射与再次加载时的声发射不相对应，在同一应力水平，卸载期间出现了声发射而在加载期间并不一定会出现。这说明卸载时的

声发射与再次加载时的声发射并没有直接关系。

3.3 增量循环加卸载过程的 Felicity 效应

当材料在反复加卸载过程中，所受的应力水平超过前期所受过的最高应力水平时，声发射活动会显著增加的现象被称为 Kaiser 效应。当材料受反复加卸载作用，在所受荷载小于之前最高应力水平时声发射就开始显著增加，这种现象即所谓的 Felicity 效应^[22]。

Felicity 比是对材料声发射过程记忆程度的更直观的表达， F_i 越小表明材料损伤就越严重。Felicity 比定义为

$$F_i = \sigma_i^{AE} / \sigma_{i-1}^m \quad (1)$$

式中： F_i 为第 i 次循环中的 Felicity 比， σ_i^{AE} 为第 i 次加载过程中恢复有效声发射时的应力水平， σ_{i-1}^m 为第 $i-1$ 次加载所达到的最大应力。

图 10 为 4 种岩石循环加卸载过程的 Felicity 比与循环次数的典型关系图。由图可见，铅锌矿、砂卡岩和花岗闪长岩在较低应力水平从出现声发射开始，Felicity 比值均大于 1，出现明显的 Kaiser 效应；到中等应力水平阶段，在 50% 峰值强度之前，仍表现为 Kaiser 效应，Felicity 比在 1~1.2 范围波动，说明在该阶段岩石内部没有出现太大损伤，裂纹发展与应力水平直接相关；钨钼矿从中等应力水平后开始产生声发射，Felicity 比也大于 1，体现为 Kaiser 效应。从进入较高应力水平开始，观察 4 种岩石的 Felicity 比曲线可发现，整体均呈现下降的趋势。当应力水平超过 60% 峰值强度时，Felicity 效应明显，而相应地 Kaiser 效应消失。这表明岩石损伤已经较为严重，裂纹扩展逐渐向不稳定发展，到岩石破坏时 Felicity 比均小于 1，即在 0.64~0.89 范围。因此，随着 Felicity 比值的减小表明岩石的声发射不可逆程度增加，预示着岩石材料即逐步接近破坏。

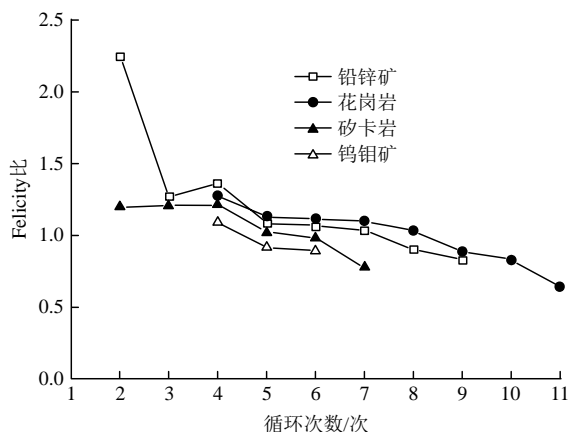


图 10 典型循环加卸载过程的 Felicity 比变化曲线

Fig.10 Typical curves of Felicity ratio under cyclic loading and unloading

3.4 增量循环加卸载过程的加卸载响应比特性

加卸载响应比最早是依据材料应力-应变本构关系曲线提出的，在材料本构曲线中其可以反映材料的损伤程度，可用于研究非线性系统失稳前兆和失稳预报的理论^[23-24]。加、卸载响应比 Y 定义为^[21]

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \frac{d\varepsilon_+}{d\sigma_+} / \frac{d\varepsilon_-}{d\sigma_-} = \frac{E_-}{E_+} \quad (2)$$

式中： X 为声发射响应率；下标“+”，“-”分别代表加、卸载阶段； ε 为应变； σ 为应力； E 为弹性模量。

S. Suresh^[25]研究表明，在循环加卸载条件下材料均会产生损伤破坏，而岩石损伤破坏与声发射密切相关。因此，可以用岩石在加卸载过程中的声发射情况来反映岩石在循环荷载下的损伤演化，则有

$$\Delta D_+ = N_+ / N_m \quad (3)$$

$$\Delta D_- = N_- / N_m \quad (4)$$

$$\Delta D_+ / \Delta D_- = N_+ / N_- \quad (5)$$

式中： ΔD 为损伤变量的变化率， N 为声发射数， N_m 为材料完全损伤时的累计声发射数。

根据地震学可以定义 Y 的表达式如下：

$$Y = N_+ / N_- \quad (6)$$

由式(2)，(5)和(6)综合可得

$$Y = E_- / E_+ = \Delta D_+ / \Delta D_- = N_+ / N_- \quad (7)$$

根据以上理论，得到花岗闪长岩、钨钼矿和铅锌矿 3 种岩石在循环加卸载下的加卸载响应比随循环次数的变化曲线，如图 11 所示。由图可见，铅锌矿和花岗闪长岩在初期循环阶段的加卸载响应比值较大，特别是铅锌矿，比值大得很明显，这个阶段 E_+ 明显小于 E_- ，使得加卸载响应比较大。当进入中等应力水平到较高应力水平阶段的微弹性裂纹稳定发展期间，岩石加卸载响应比下降至 1 左右并逐渐趋于稳定，这个阶段 E_+ 逐渐增大趋近于 E_- 。当岩样进入到更高应力水平并接近破坏时，岩石在加载和卸载过程中裂纹的扩展已不稳定，加载过程中的损伤大于卸载过程中的损伤。此时， E_+ 和 E_- 均会减小，但 E_+ 减小的幅度大于 E_- ，加卸载响应比出现波动。由铅锌矿和花岗闪长岩的加卸载响应比曲线皆可看出，在破坏前一次循环中加卸载响应比均接近于 1 或稍微小于 1，在破坏时加卸载响应比均再次大于 1。而钨钼矿在加载至超过中等应力水平后才开始出现声发射，其起始加卸载响应比数值也较大，接着在破坏前一次循环中下降至小于 1，然后再次大于 1 时岩石破坏。

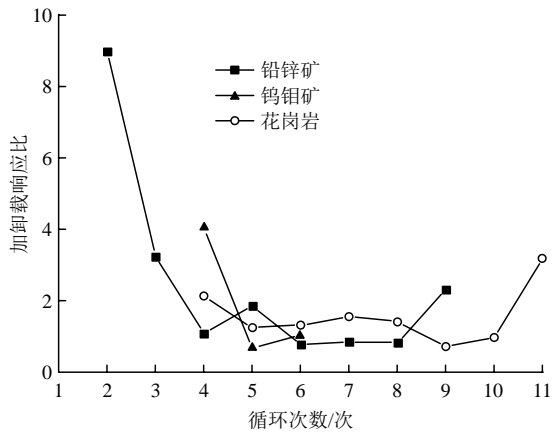
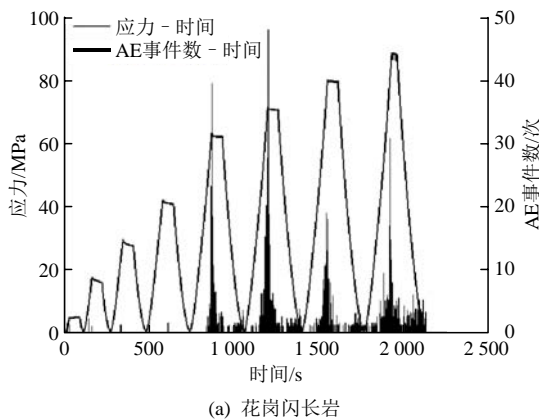


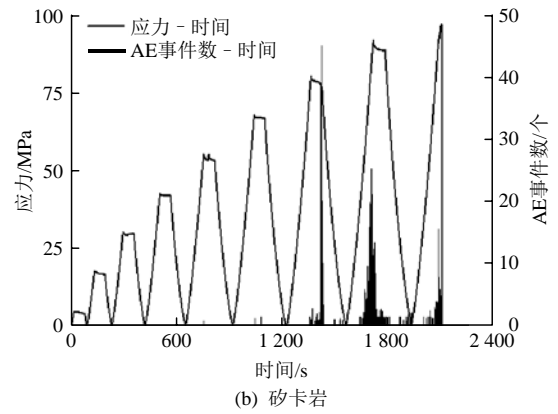
图 11 典型增量稳压循环加卸载之加卸载响应比变化曲线
Fig.11 Typical curves of load-unload response ratio under incremental isobaric cyclic loading and unloading

3.5 增量稳压循环加卸载过程的声发射特性

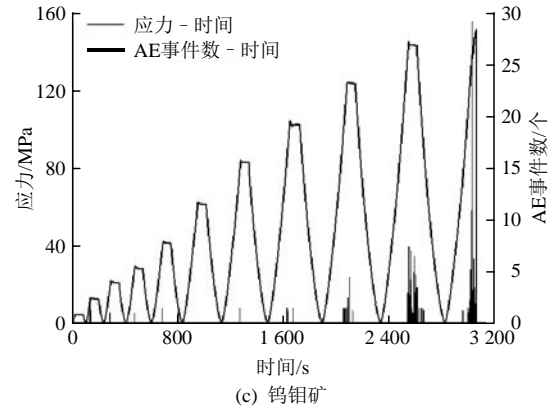
图 12 为 4 种岩石在“增量加载 - 稳压 - 卸载”循环加卸载条件下的应力 - 时间 - 声发射率关系图。从图 12(a)中可以看出, 花岗闪长岩从中等应力水平开始声发射大量产生, 且都在每次循环应力达到最高值声发射率最大。在每次稳压期间, 声发射率迅速降低, 最后接近为 0; 而在每次卸载时, 总是在卸载到低应力水平时声发射事件又开始大量产生。从图 12(a)和(b)中可以明显地看出, 花岗闪长岩和矽卡岩随着循环次数和应力水平的增大, 越靠近岩石破坏阶段, 每次卸载到低应力产生的声发射事件也越来越多。这表明随着应力水平的提高, 卸载过程中所体现的损伤越来越严重, 其声发射率也逐渐提高。从图 12(c)可见, 钨钼矿岩样在较低应力水平几乎没有 AE 事件; 当应力水平较高时, 在稳压期间 AE 事件数才有所增加, 破坏时达到最大, 钨钼矿的 AE 事件绝大多数都发生在稳压期间, 在卸载时 AE 事件几乎没有。图 12(d)的铅锌矿的 AE 事件绝大多数发生在荷载保持不变时, 随着应力水平的增大, 铅锌矿稳压期间的 AE 事件数越来越多, 但是在每次卸载到低应力时总会有零星的 AE 事件



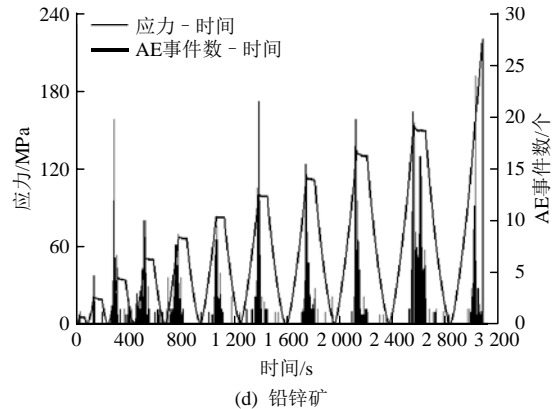
(a) 花岗闪长岩



(b) 矽卡岩



(c) 钨钼矿



(d) 铅锌矿

图 12 典型岩石应力 - 时间 - 声发射率关系

Fig.12 Typical relationship curves of stress, time and AE rate of rocks

发生。就稳压阶段的声发射现象来看, K. Mogi^[11]认为, 在稳压阶段岩石试样也会产生声发射现象是因为岩石产生了微破裂, 且这种现象被称为“静态疲劳”现象, 可见在稳压时岩石内部裂纹仍在不断扩展。在后期应力集中现象消失后, 通过 Felicity 比的计算仍可发现在应力水平低于 50%峰值强度前存在明显 Kaiser 效应, 当应力水平超过 60%峰值强度之后, Kaiser 效应消失, Felicity 效应出现。

4 几个问题的讨论和解释

4.1 岩石峰前声发射相对平静期现象

岩石材料在加载接近峰值强度时会出现声发射

活动相对平静期现象已经得到了试验的证实^[8, 21, 26]。本次试验研究表明一些岩石会出现明显的相对平静期, 而另一些岩石不出现明显相对平静期现象, 这可能是几种岩石结构组成的差异所导致的。相对平静期现象的物理本质比较复杂, 迄今为止也没有得到很好的解释。李世愚^[21]认为岩石试样在接近峰值点前, 岩样产生了较多的贯通微破裂裂纹, 这些微破裂阻止 AE 波的传播; 传感器受到脱离试样母体的影响, 阻碍了传感对声发射信号的有效接收。这种解释有其道理, 但为何在峰值强度后的岩石弱化阶段(宏观裂纹扩展阶段)还能接收到大量声发射活动的现象, 如何解释这个现象是值得思考的问题。出现相对平静期现象反映了岩石进入深度塑性受力状态, 或岩石接近材料的宏观破坏。利用这个特性, 应该可以作为岩体灾害声发射监测预警的一种前兆特性。

4.2 Kaiser 效应与 Felicity 效应之关系

已有的研究表明, Kaiser 效应出现在岩石受力较低的情况下, 也说明岩石材料对应力或变形具有记忆性, 或声发射的不可逆性。而 Felicity 效应一般出现在较高的应力水平, 可以反映岩石可能出现的细观破裂现象和程度, 工程中已经有将 Felicity 比用来作为材料破损程度的度量。对于这 2 个效应之间的分界应力水平多高, 目前还没有规律可寻, 还需做更精细的小应力增量的多循环加卸载试验研究, 以期掌握两者之间的关联性。本文的研究对 Kaiser 效应和 Felicity 效应的探讨是初步的, 所得结论也只能作为进一步试验研究时参考。

4.3 卸载过程的声发射现象

本研究表明卸载时产生声发射现象与岩石破坏程度相关, 破坏程度越严重卸载过程中声发射活动越明显。对于卸载过程中岩石会产生声发射现象, 李世愚^[21]根据有机玻璃材料的裂缝试验证实材料产生弹塑性变形后, 在卸载过程中材料的弹性部分恢复, 导致弹塑性交界处产生与原加载裂纹几乎垂直的张性破坏从而产生声发射现象的。对于像岩石这样的粒状脆性材料, J. Fortin 等^[27]采用概念化模型分析了压缩条件下产生张性、剪切和混合破裂的机制。该模型揭示出岩石产生弹塑性变形后, 在卸载过程中由于处于弹性状态的单元体的弹性恢复, 必然在弹塑性部分(单元或颗粒)之间产生摩擦效应, 这种摩擦也应该是卸载时产生声发射的物理机制之一。

卸载过程中产生声发射现象是一个很复杂的物

理现象, 目前对它的认识 and 解释也不是很多、很成熟。峰前卸载过程产生声发射现象, 能否预示岩石破裂程度、与峰值强度破坏点有无必然的联系, 是一个值得深入研究的问题。从工程应用意义上讲, 峰前卸载声发射信息可能比峰后岩石弱化阶段的声发射信息的重要性会更大。本文仅仅做了初步的探索, 在今后的工作中将开展深入的研究。

4.4 3 种循环加卸载过程的声发射特性对比

与简单加载进行对比, 本研究结果表明增量稳压循环加卸载整个过程的声发射数变化情况、AE 事件峰值频率和事件振幅频度分布情况和简单加载是一致的, 随着应力水平的增高, 声发射逐渐增加, 多种岩样 AE 事件峰值频率的低频成分逐渐增加, 大振幅事件越来越多。直观地可以看到钨钼矿在 2 种加载方式下均是在破坏时声发射剧增达到最大, 矽卡岩和铅锌矿在 2 种加载方式下均是在破坏前声发射骤然降低, 出现一段“相对平静期”。可见, 对于有这种特性的岩体来讲, 相对平静期现象可作为预测岩体失稳破坏的有效依据。

与增量循环加卸载对比, 增量稳压循环加卸载时加载过程中的声发射存在相似规律。本研究表明当应力水平在 50% 峰值强度之前, 有明显 Kaiser 效应; 当应力水平超过 60% 峰值强度后, Kaiser 效应消失, Felicity 效应开始出现。可见, 在 2 种不同加载方式下用 Felicity 比的变化特性对岩石失稳破坏进行预测均是可行的。合理地应用加卸载响应比, 也可作为监测和判断工程中岩体结构失稳破坏提供一个定量的参考依据。但是, 本研究所针对的岩样种类有限, 这方面的工作还需要更多的试验研究去验证。

5 结 论

(1) 单轴加载条件下岩石声发射特性可出现“相对平静期”现象, 该现象可作为预测岩石破坏和工程岩体破坏的参考依据。

(2) 卸载过程中岩石产生声发射现象, 也是岩石声发射的一个重要特性, 它揭示了岩石受力的状态和破坏程度。虽然对它的产生的机制上不是特别的清楚, 但它对应工程中应力重分布的卸载过程, 对工程监测和灾害预警有很好的参考价值。

(3) 针对加卸载过程中声发射特性, 可通过 Felicity 比和加卸载响应比来评价岩石的损伤; Felicity 比和加卸载响应比皆可定量地反映岩石的损

伤演化情况, 可为预测岩石失稳破坏提供参考依据。

(4) 在实际工程中, 对于未知的复杂受力情况, 可在出现“相对平静期”、AE峰值频率低频成分显著增加、AE大振幅事件频度增加、Felicity比值下降到 <1 即在0.64~0.89范围以及加卸载响应比接近1之间等进行综合考虑, 根据实际情况选择恰当的临界值判据来监测预警岩体的失稳破坏, 达到改善或提高对灾害监测预警的效果。

参考文献(References):

- [1] BLAKE W. Micro seismic applications for mining: a practical guide[R]. Washington: Bureau of Mines, 1982.
- [2] 勝山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 3 - 7.(KATSUYAMA K. Application of AE techniques[M]. Translated by FENG Xiating. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1996: 3 - 7.(in Chinese))
- [3] LOCKNER D A. The role of acoustic emission in the study of rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, 1993, 30(7): 883 - 899.
- [4] 陈 颢. 声发射技术在岩石力学中的应用[J]. 地球物理学报, 1977, 20(4): 312 - 322.(CHEN Yong. Application of AE techniques to rock mechanics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1977, 20(4): 312 - 322.(in Chinese))
- [5] RUDAJEV V, VILHELM J, LOKAJICEK T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 699 - 704.
- [6] 吴 刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82 - 85.(WU Gang, ZHAO Zhenyang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 82 - 85.(in Chinese))
- [7] 刘新平, 刘 英, 陈 颢. 单轴压缩条件下岩石样品声发射信号的频谱分析[J]. 声学学报, 1986, 11(2): 80 - 87.(LIU Xinping, LIU Ying, CHEN Yong. Spectral analysis of acoustic emissions of rock specimen during uniaxial compression[J]. Acta Acustica, 1986, 11(2): 80 - 87.(in Chinese))
- [8] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [9] 孙 强, 薛 雷. 砂岩脆性破坏过程中声发射信息试验研究[J]. 固体力学学报, 2012, 33(5): 541 - 547.(SUN Qiang, XUE Lei. Research on AE variation of sandstone brittle failure with along loading by uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2012, 33(5): 541 - 547.(in Chinese))
- [10] 黄玉仁, 林朝阳, 毛建喜, 等. 武夷山隧道围岩破坏过程中的声发射特性研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2015, 54(2): 292 - 296.(HUANG Yuren, LIN Chaoyang, MAO Jianxi, et al. Studies on acoustic emission characteristics of tunnel surrounding rock of Wuyi Mountain[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2015, 54(2): 292 - 296.(in Chinese))
- [11] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. London: Taylor and Francis Group, 2007: 277 - 302.
- [12] RAO M V M S, RAMANA Y V. A study of progressive failure of rock under cyclic loading by ultrasonic and AE monitoring techniques[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992, 25(4): 237 - 251.
- [13] SONDERGELD C H, ESTEY L H. Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of Westerly granite[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B4): 2 915 - 2 924.
- [14] 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 Shulin, TANG Haiyan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 147 - 152.(in Chinese))
- [15] 夏 冬, 杨天鸿, 王培涛, 等. 干燥及饱和岩石循环加卸载过程中声发射特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1 243 - 1 247.(XIA Dong, YANG Tianhong, WANG Peitao, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of dry saturated rocks during cyclic loading and unloading process[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1 243 - 1 247.(in Chinese))
- [16] 李 楠, 王恩元. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1 099 - 1 103.(LI Nan, WANG Enyuan. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1 099 - 1 103.(in Chinese))
- [17] 周家文, 杨兴国, 符文熹, 等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1 172 - 1 183.(ZHOU Jiawen, YANG Xingguo, FU Wenxi, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1 172 - 1 183.(in Chinese))

- [18] 李庶林, 林朝阳, 毛建喜, 等. 单轴多级循环加载岩石声发射分形特性试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 92 - 99.(LI Shulin, LIN Chaoyang, MAO Jianxi, et al. Experimental study on fractal dimension characteristics of acoustic emission of rock under multilevel uniaxial cyclic loading[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 92 - 99.(in Chinese))
- [19] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 砂卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2 929 - 2 934.(XU Suchao, FENG Xiating, CHEN Bingrui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2 929 - 2 934.(in Chinese))
- [20] 纪洪广, 侯昭飞, 张 磊, 等. 载荷岩石材料在加载 - 卸荷扰动作用下声发射特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(1): 1 - 5.(JI Hongguang, HOU Zhaofei, ZHANG Lei, et al. Acoustic emission character of loaded rock under load-unload disturbance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(1): 1 - 5.(in Chinese))
- [21] 李世愚. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010: 288 - 297.(LI Shiyu. Introduction of rock fracture mechanics[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010: 288 - 297.(in Chinese))
- [22] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 134 - 158.(JI Hongguang. Research and application of acoustic emission performance in concrete materials[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2004: 134 - 158.(in Chinese))
- [23] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, 1994, 37(6): 767 - 775.(YIN Xiangchu, CHEN Xuezhong, SONG Zhiping, et al. The load-unload response ratio theory: A new approach to earth quake prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(6): 767 - 775.(in Chinese))
- [24] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究[J]. 中国地震, 2003, 19(1): 58 - 66.(YU Huaizhong, YIN Xiangchu, XIA Mengfen, et al. Experimental research on the theory of Load/Unload Response Ration(LURR)[J]. Earthquake Research in China, 2003, 19(1): 58 - 66.(in Chinese))
- [25] SURESH S. Crack initiation in cyclic compression and its application[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(3): 453 - 463.
- [26] 马胜利, 蒋海昆, 扈小燕, 等. 基于声发射实验结果讨论大震前地震活动平静现象的机制[J]. 地震地质, 2004, 26(3): 426 - 435.(MA Shengli, JIANG Haikun, HU Xiaoyan, et al. A discussion on mechanism for seismic quiescence before large earthquakes based on experimental results of acoustic emission[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(3): 426 - 435.(in Chinese))
- [27] FORTIN J, STANCHITS S, DRESEN G, et al. Acoustic emission monitoring during inelastic deformation of porous sandstone: comparison of three modes of deformation[J]. Rock Physics and Natural Hazards, 2009, 166: 823 - 841.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 冻融循环对花岗岩声发射特性影响的试验研究;
- (2) 煤岩组合体跨界面压裂及声发射响应特征试验研究;
- (3) 利用 TWSRC 试件进行砂岩与 PMMA 脆性材料裂纹断裂特性研究;
- (4) 含脉状缺陷结构岩石循环加卸载损伤及强度特性试验研究;
- (5) 基于不同 Bootstrap 方法和 KELM-BPNN 模型的滑坡位移区间预测;
- (6) 实时温度与循环载荷作用下花岗岩单轴力学特性实验研究;
- (7) 巷道含水软岩顶板锚索树脂锚固增效方法;
- (8) 基于八叉树的储层改造体积计算方法及工程应用。

土工基础