

DOI: 10.11779/CJGE201410020

花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究

李浩然¹, 杨春和^{1,2}, 刘玉刚³, 陈 锋¹, 马洪岭¹, 王兵武¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 重庆大学西南资源开发与环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 3. 中国石油西气东输管道公司, 上海 200000)

摘要: 采用声波、声发射一体化监测装置研究了单轴加载及循环荷载作用下花岗岩波速和声发射变化特征。研究结果表明: ①加载初期, 岩石内部微裂纹受力闭合, 纵波、横波波速显著增加, 而声发射事件数量极少; 加载中期, 岩石处于线弹性变形阶段, 纵波、横波波速缓慢增加后保持稳定, 声发射事件少量产生, 约占声发射事件总量的 9.44%; 加载后期, 岩石处于破裂损伤阶段, 裂纹开始萌生, 拓展, 岩石纵波波速呈现略微下降趋势, 而横波波速明显降低, 声发射活动剧烈, 约占声发射事件总量的 50.63%。峰值应力之后, 花岗岩横波波速开始急剧下降, 而纵波波速缓慢降低, 声发射活动依然活跃。②由于岩石的内部损伤需要积蓄一定能量才会形成, 因此声发射活动呈现“相对平静、间隔突发”的规律, “相对平静期”最明显的时段位于峰值应力之前。③循环加载条件下, 岩石的波速和声发射变化特征与应力状态表现出良好的一致性。统计分析声发射事件数量随应力的变化规律, 论证了岩石的 Felicity 效应; 比较分析加载过程中的 Felicity 比变化, 证明了岩体的累积损伤。

关键词: 声波; 损伤; Kaiser 效应; Felicity 效应

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)10-1915-09

作者简介: 李浩然(1987-), 男, 辽宁兴城人, 博士研究生, 主要从事地下工程稳定性分析与灾害防治方面的研究工作。E-mail: hrl87@126.com。

Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process

LI Hao-ran¹, YANG Chun-he^{1,2}, LIU Yu-gang³, CHEN Feng¹, MA Hong-ling¹, WANG Bing-wu¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Petro China West East Gas Pipeline Company, Shanghai 200000, China)

Abstract: The experiments on granite under uniaxial compression and cyclic stress loading are carried out, and changes in velocity and the activities of acoustic emission are recorded by the ultrasonic velocity and acoustic emission synchronous monitoring devices. The results show that: (1) In the beginning of the loading tests, the shear-wave velocity and longitudinal-wave velocity have a significant ascension due to the closure of rock micro-cracks, while the AE events are rare; the granite is in the linear elastic deformation stage in the middle of compression experiments, the ultrasonic velocity increases firstly and then keeps stable for a while, and a small amount of AE events, about 8.77% of all the AE events, will occur; because of generating and expanding of cracks in the rock samples, the granite will suffer serious damage in the later period of compression tests, the longitudinal-wave velocity decreases slightly and the shear-wave one reduces significantly, and AE has positive activities, about 50.96% of all the AE number. After the stress peak, the shear-wave velocity begins to reduce sharply and the longitudinal-wave one decreases slowly, while the AE remains active. (2) Because the rock damage needs enough energy accumulated, the AE exhibits a law of “quiet relatively and bursting at intervals”, and the most evident “relatively quiet period” happens before the peak stress. (3) In the tests of cyclic stress loading, the ultrasonic velocity and AE activities of the rock have a good consistency with stress condition. Change of AE events at peak stress can reflect accumulated damage of the rock, and the Felicity effect can be demonstrated by comparing the AE events at the same stress stage.

Key words: ultrasonic velocity; acoustic emission; Kaiser effect; Felicity effect

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272391); 国家自然科学基金青年基金项目(51304187)

收稿日期: 2014-01-15

0 引言

岩体失稳一直是矿山、水利等地下工程所面临的重大安全威胁,了解岩石的损伤演化机理和裂纹拓展规律对判定岩体损伤状态、工程灾害预警具有重要的现实意义。岩石是一种带有先天性缺陷的介质,内部蕴含着丰富的孔隙、裂隙、夹杂和节理结构,在外力的作用下,伴随着新生裂隙的产生,固有的裂隙逐渐扩展、贯通,最终导致岩体的整体失稳。在岩体的损伤和断裂过程中,由于内部细微结构的变化,岩石的超声波波速将发生改变,同时释放出大量的弹性波,即所谓的声发射现象,岩石的这些变化可以借助于灵敏的电子元件来监测,成为预防岩土工程失稳破坏的重要措施。

岩石的波速特征是其物理性质的综合反应,声波测试已经在岩体质量评价、岩体力学参数确定等方面得到了广泛应用。影响岩石弹性波波速的因素有很多,例如含水率、孔隙率、弹性模量、应力状态等,其中,应力状态一直作为波速的主要影响因素而备受关注^[1]。早在 1990 年,陈颙等^[2]研究了单轴加载条件下岩石的纵波变化规律;1992 年,罗津辉等^[3]利用岩石的纵波、横波波速和振幅的变化确定岩体所处的破坏阶段,这些成果奠定了岩石波速研究的基础。郑贵平等^[4]通过对不同种类的岩石进行单轴力学试验,分别得到了沉积岩和岩浆岩的纵波随应力的变化规律。由于岩石是一种强衰减物质,很多情况下弹性波检测精度不高,宋丽莉等^[5]利用尾波波形干涉测量的手段对弹性波在岩体中的散射波进行分析,极大地提高了声波变化的检测精度。

岩石受到外力作用后,伴随着内部裂纹的萌生、拓展、贯通,能量将会以声发射形式得到释放。20 世纪 50 年代,德国学者 Kaiser 发现了金属材料变形过程中声发射的不可逆性,即 Kaiser 效应,但是并不是所有岩石的声发射特征都符合典型的 Kaiser 效应,复合材料在所受荷载小于之前最高应力水平时声发射数量就开始显著增长,即所谓的 Felicity 效应^[6-8]。目前,声发射技术已经成为研究岩体损伤的重要手段,并广泛应用于岩体稳定性监测工作中。Chmel 等^[9]研究了冲击荷载作用下花岗岩的声发射特性和能量释放规律。Alkan 等^[10]通过对盐岩三轴压缩试验中不同应变阶段的声发射特性研究,确定了岩石的膨胀扩容边界。任松等^[11]研究了多种应力状态下盐岩的声发射特性,并分析了加载速率对盐岩损伤破坏的影响。李庶林等^[12]通过大量的岩石加载、卸载试验,发现岩石在峰后破坏过程中会产生大量的声发射事件,而个别中

压突增型声发射特性的岩样,峰值应力前的声发射会出现“平静期”。赵兴东等^[13-14]对 5 种不同岩石进行声发射活动规律研究,并应用 Geiger 定位算法与实验定位结果进行了对比验证。

以上关于岩石波速、声发射的试验研究和理论研究,延伸了岩石波速的应用领域,促进了声发射技术的发展,为研究岩石的损伤机理奠定了基础。但是,目前的研究工作依然存在明显的不足,由于受到试验条件的制约,大部分学者将岩石的波速变化规律、声发射特征二者分开研究,鲜有同一试验过程中的声波、声发射规律分析,且波速研究中仅关注了纵波波速的变化,忽略了横波波速的监测。有鉴于此,本文应用声波、声发射一体化监测系统,研究花岗岩在单轴压缩状态下一次性加载、反复加卸载过程中的波速变化规律和声发射特征,并应用所得试验参数对岩体的损伤演化规律进行分析;结合声发射事件数量与应力状态的关系,论证了岩石的 Felicity 效应,利用 Felicity 比证明了岩体的损伤累计,为定量地评价岩体损伤奠定基础。

1 试验方法与内容

1.1 试件加工与选取

为了降低由于试件个体差异而造成的结果离散,本次试验所选用的试件钻取自同一块无节理的大块花岗岩。将试件打磨加工成 $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的圆柱体,见图 1 所示,两端保证光滑平整,平行度满足岩石力学试验要求 ($\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内),加工完成后保持自然干燥状态。分别测定加工得到的 4 个样品的重量、体积,计算得到花岗岩试样的平均密度为 2.669 g/cm^3 。



图 1 加工完成的岩石试样

Fig. 1 Rock samples

1.2 试验原理

实验室测定岩石弹性波波速主要有脉冲法、共振法及超声波干涉法等,本次试验装置是应用脉冲法对加载过程中花岗岩纵波、横波波速进行测量,该方法所得的波形稳定,适用广泛。由于岩石样品的尺寸远

远大于超声波波长, 因而可以将其看作无限大介质, 利用岩石尺寸除以发射、接收脉冲的时间差来求得岩石的波速大小, 见下式:

$$V = L / (t - t_0) \quad (1)$$

式中 V 为岩石的波速, 它包括纵波速度 V_p 和横波速度 V_s ; L 为一对声波探头距离; t 和 t_0 分别表示声波脉冲信号的激发和接收时间。

岩石在承受外力作用时, 内部将会发生损伤破坏, 利用 AE 探头可以对这一过程进行监测, 4 个 AE 探头就可以对声发射位置进行定位。声发射的定位算法很多, 本文采用 Geiger 定位算法, 该方法适用于小区域地震事件, 原理见文献[13]。为了保证声发射定位的精度, 在实验前采用断铅试验对系统进行测试, 具体方法如下: 在岩石试样的某一位置压断 0.5 mm 的自动笔铅芯, 此时, 系统将会对这一位置进行定位, 比较试验系统的定位点与真实试验点的距离, 若二者相距位置较大, 适度调节介质波速度、事件定义值、事件闭锁值及过定位值, 再次进行断铅试验, 直至将二者精度控制在 2 mm 范围内。

1.3 试验条件与方案

本次试验需要采用应力加载控制系统和声波、声发射监测系统两套装置。其中应力加载系统采用 MTS815 型液压伺服岩石力学试验机, 声波和声发射测试系统采用中国科学院武汉岩土力学研究所研发的岩石声波、声发射一体化测试装置, 该装置共有通道数 12 个; 模拟滤波器的下限为 1 kHz, 上限为 3 MHz; 采样率范围为 2 k~40 MSPS; 可以对试验过程中的声波、声发射信息进行同步采集监测, 并实现声波、声发射信息的识别、分离。试验过程中, 岩样两端布置密封的声波压头测量加载过程中岩石的纵波、横波波速变化规律, 侧面固定声发射传感器接收岩石破裂的声发射信号, 试验装置示意图见图 2, 声波压头及声发射接收探头实物图见图 3。设置噪音门槛值为 45 dB, 信号的放大倍数为 40 dB。

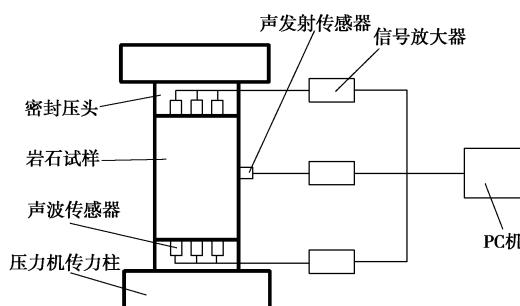


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of testing devices



图 3 声波压头和 AE 探头实物图

Fig. 3 Pictures of ultrasonic probe and AE sensor

在试验过程中, 同时启动加载压力机和声发射测试装置, 保持应力加载过程与声发射监测同步进行, 即采集整个试验过程的声发射信号。设置声波探头的激发时间周期为 T , 间隔采集岩石的纵波、横波信息。设置压力机的加载速率为 2 kN/s, 分别对试样 S1、S2 和 S3 进行单轴压缩试验, 直到试件破坏。

2 试验结果与分析

2.1 声波测试结果

岩石的性质由组成矿物性质、所处的热力学环境、内部微构造 3 种因素决定, 弹性波波速是其整体性质的综合反映^[15]。在承受应力荷载的状态下, 岩石的内部结构发生损伤, 岩体的波速也会随之而变化。图 4 可以看出, 岩石试样在单轴加载过程中, 纵波、横波波速表现出一致的变化特征, 均呈现先增大、再稳定、后减小的趋势; 下文以岩样 S1 为例, 对各个应力阶段的波速特征进行说明。

OA 阶段, 岩石处于压密阶段, 在这一阶段中, 岩石内部原始的微裂隙在外力作用下发生闭合, 此外由于开采活动造成的人为结构扰动得到一定程度的补偿, 在宏观上表现为岩石纵波、横波波速显著上升。

AB 阶段, 岩石处于线弹性应变阶段, 应力应变曲线呈现线性关系, 撤去外力后岩体产生的弹性变形可以恢复。在此阶段, 岩石内部虽然产生了微小裂纹和形变, 但纵波、横波波速依然小幅度上升, 造成这种现象的原因是多方面的。首先, 花岗岩是典型的脆性硬岩, 孔隙率较低, 其本身对波速的变化不敏感, 弹性阶段时岩体所处的应力水平不高, 岩体内部尚未产生大量裂纹。其次, 岩石的破裂方向是各向异性的, 试验测量的是应力方向上的纵波、横波波速, 这也是波速不减反增的重要原因。

BC 阶段, 岩石处于破裂损伤阶段, 应力应变关系曲线偏离原来的直线关系, 随着应力的增大, 应变的增长速率逐渐加快, 岩石表现出“软化特性”, 由于花

岗岩特殊的物理性质, 岩石软化特性并不十分典型。在这个阶段, 岩石内部的微裂纹大量萌生、拓展、贯通, 非线性体积增大, 岩石出现膨胀现象; 弹性波衰减明显增大, 岩石纵波波速呈现略微下降趋势, 而横波波速明显降低。

CD 阶段反映的是岩石破裂后的应力应变关系。当岩石承载力达到峰值强度之后, 其内部结构已经遭到严重破坏, 岩体虽然有一定的承载能力, 但内部的裂隙系统发展迅速, 形成了宏观的破裂面, 岩石的横波波速开始急剧下降, 而纵波波速缓慢降低。

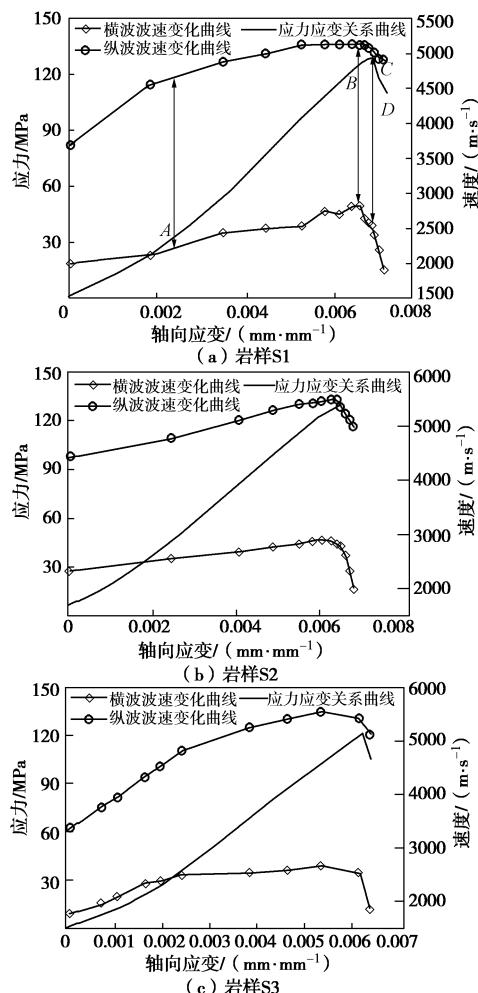


图 4 加载过程中岩石纵波、横波波速变化曲线

Fig. 4 Variation curves of shear wave and longitudinal wave velocities under uniaxial loading

从图 4 中可以看出, 花岗岩试样的波速变化与应力应变规律具有良好的对应关系, 岩石的纵波、横波波速最大值出现在线弹性阶段后期, 而后开始下降, 当应力达到峰值强度之后, 纵波、横波波速显著下降, 岩石即将失稳破坏; 横波波速变化敏感于纵波波速。岩石的超声波波速可以作为预测岩石破坏失稳的重要指标。值得注意的是在单轴加载过程中, 岩体的破裂损伤是有方向性的, 不同的方向上测得的岩石波速具

有一定差异性。本文研究的是加载方向上的岩体波速, 而以往学者大都从应力垂直方向上对岩体波速进行分析的, 二者虽然表现出相似的变化趋势(先增大、后减小), 但是不同应力阶段的波速变化规律、纵波、横波波速比却是不同的。

2.2 声发射测试结果

在单轴加载试验过程中, 花岗岩内部裂纹拓展演化和损伤破裂, 蕴含在岩体中的能量将会以弹性波的形式释放, 这些微弱的信号可以被声发射传感器所监测、记录, 声发射技术已经成为研究岩体损伤演化机理的重要手段; 本次试验选用 4 个 AE 探头对这一过程进行监测, 图 5 为加载过程中试样 S1 的声发射事件数量变化图。

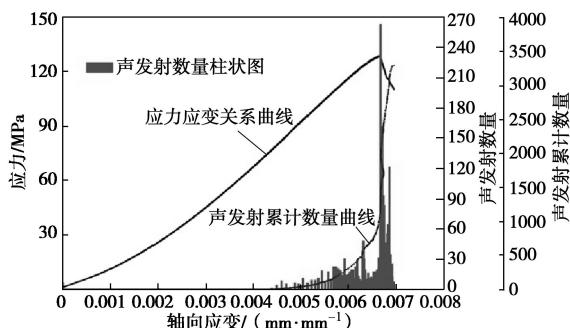


图 5 加载过程中声发射事件数量变化图

Fig. 5 Variation of AE number under uniaxial loading

从图 5 可以看出, 在压密阶段和线弹性变形阶段初期, 花岗岩的声发射数量极少, 形成这种现象的主要原因是岩石的 Kaiser 效应。随着应力的增大, 岩体内部将产生细微裂纹, 声发射事件数量开始增大。当岩石进入破裂损伤阶段之后, 岩体内部的裂纹将进一步拓展, 声发射事件急剧上升, 并在峰值应力时达到最大值; 统计得出, 峰值应力时刻花岗岩的声发射事件数量占当时声发射事件累计数量的 13.4%。岩石处于峰值应力水平之后, 内部裂纹拓展、贯通, 直至完全发生破坏, 这一过程中, 单位事件内的声发射数量虽有下降, 但仍然很活跃, 这是由于岩石内部的应力需要经过一段时间才能达到平衡。

单轴加载过程中花岗岩的声发射事件并不是单调连续递增的, 而是显现出“间隔突发”的规律, 见图 6。文献[12, 16]也发现了类似的规律, 这种“相对平静”的现象并不只是出现在峰值应力之前, 每次声发射事件突发之后, 接着的一段时间内的声发射事件数量都很少。这种“间隔突发”和“相对平静”的现象可以从能量学的角度进行解释, 当岩石受到外力作用产生微小破裂时, 内部蕴含的能量会得到释放, 声发射事件数量急剧上升, 能量释放后的岩体处于“泄压”状态, 声发射事件骤降, 表现“平静”; 随着应力的增

大, 岩石内部的能量由“泄压”状态向“平衡”状态过渡, 当应力进一步增大时, “平衡”状态的岩石会再次释放能量, 声发射事件激增, 裂纹进一步拓展。需要说明的是文中阐释的声发射状态“平静”, 不是绝对意义上的声发射事件为零, 而是一个相对的概念。当某一时刻声发射事件数量超过最高声发射事件的1/10, 即认为该时刻声发射活动较“激烈”, 两个相邻的、“激烈”的时间点构成的时间段即为声发射活动的“相对平静期”。以试样S1为例, 单轴加载过程中, 单位时间内声发射事件最大数量为270个, 将声发射事件数量27作为声发射活跃程度的判断标准, 当声发射事件数量低于该标准时, 认为声发射活动较为平静, 从图6中可以看出, “相对平静期”最明显的时段出现在峰值应力到达之前。

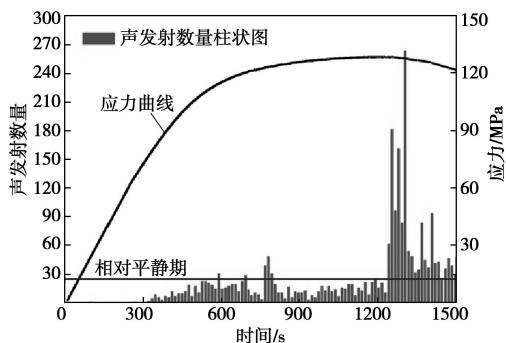


图6 加载过程中声发射数量变化图

Fig. 6 Variation of AE number under uniaxial loading

为了进一步分析单轴加载过程中花岗岩的声发射规律, 统计得出3组试验中不同应力阶段的岩石声发射数量, 见表1; 图7为试样S1在不同应力阶段的声发射事件定位图。结合表1、图7可以看出, 在压密阶段, 花岗岩的声发射现象几乎没有; 岩石处于线弹性变形阶段时, 微裂纹开始产生, 声发射数量略有增加, 占全过程声发射数量的9.44%; 当岩石处于破裂损伤阶段时, 岩石裂纹扩展最剧烈, 声发射数量达到最大值, 该阶段声发射事件数量占声发射总量的50.63%; 当应力水平到达峰值应力之后, 岩体缺陷进一步发展, 内部的能量依然没有达到平衡, 声发射现象依然活跃。

表1 不同应力阶段的声发射事件数量

Table 1 AE number under different stress stages

应力状态	声发射数量/%			平均值
	S1	S2	S3	
压密阶段	0.03	0.09	0.06	0.06
线弹性应变阶段	8.77	11.33	8.22	9.44
破裂损伤阶段	50.96	49.91	51.01	50.63
峰值应力后	40.24	38.67	40.71	39.87

通过对岩石的声发射位置进行定位, 可以清晰地显示岩石的破裂损伤状态, 图8为试验后的岩石试样S1和声发射事件定位图, 对比分析可以看出, 在岩石的下端部位, 花岗岩产生纵向的劈裂裂纹, 而在声发射事件定位图中, 相应位置的声发射事件数据点也更为集中, 贯通形成类似的破裂面; 声发射事件定位图能够清晰地表达出岩石的受损区域及严重程度, 可以为定量地研究岩体损伤奠定基础。

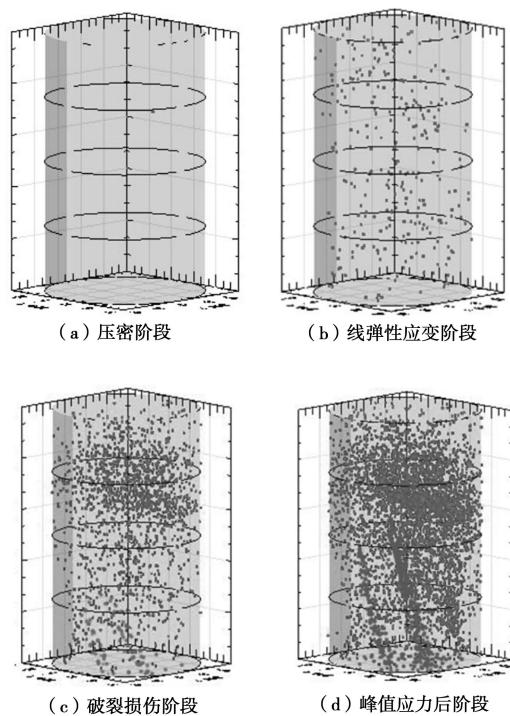


图7 不同应力阶段的声发射事件定位图

Fig. 7 Location of AE events under different stress stages

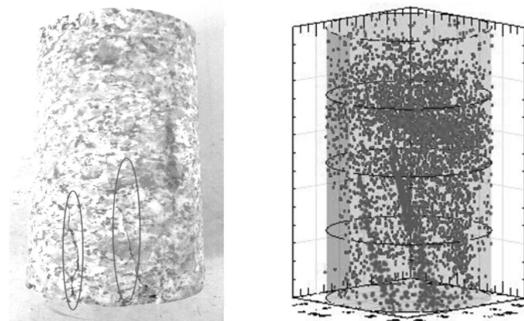


图8 试验后的岩石样本与声发射事件定位图

Fig. 8 Pictures of rock after testing and location of AE events

3 岩体损伤分析

花岗岩在承受单轴荷载的过程中, 岩石内部裂纹萌生、拓展演化, 为了分析该过程的损伤演化规律, 本文选取动弹性模量和动泊松比两个指标展开研究。假设岩体为均质、连续、各向同性的介质, 根据波动

理论传播于弹性介质中的纵波速度 V_p 和横波速度 V_s 可以表示为

$$V_p = \sqrt{E_d(1-\mu_d)/\rho(1+\mu_d)(1-2\mu_d)} , \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{E_d/2\rho(1+\mu_d)} , \quad (3)$$

式中, V_p 为岩石的纵波波速, V_s 为岩石的横波波速, E_d 为岩石的动弹性模量, μ_d 为岩石的动泊松比, ρ 为岩石密度。根据式 (2)、(3), 可以得到

$$E_d = \rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2) , \quad (4)$$

$$\mu_d = (V_p^2 - 2V_s^2) / (2V_p^2 - 2V_s^2) 。 \quad (5)$$

已知花岗岩的密度和加载过程中纵波、横波波速, 通过式 (4)、(5) 计算得到加载过程中的动弹性模量、动泊松比变化规律, 分别见图 9。

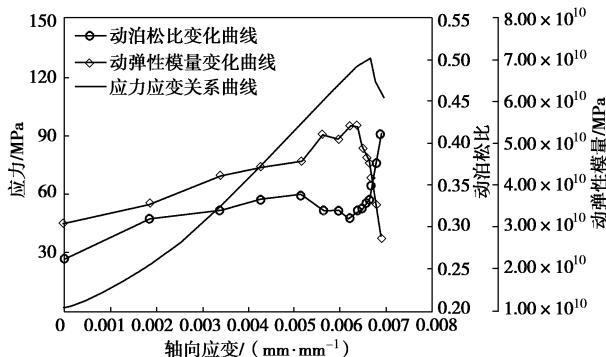


图 9 加载过程中动弹性模量与动泊松比变化图

Fig. 9 Variation of dynamic elastic modulus and Poisson's ratio under uniaxial loading

从图 9 中可以看出, 动弹性模量变化曲线与岩石波速变化曲线波动趋势相似, 在压密阶段和线弹性变形阶段, 岩石的动弹性模量呈现显著上升趋势; 当试件处于破裂损伤阶段时, 动弹性模量稳定一段时间后开始下降; 峰值应力水平之后, 动弹性模量开始急剧下降。加载过程中岩石的泊松比变化曲线整体上呈现上升趋势, 在初始加载阶段, μ_d 迅速增大; 在线弹性应变阶段时, μ_d 的增速趋于平缓; 当岩石处于破裂损伤阶段之后, 动泊松比开始迅速上升, 岩样开始扩容。值得注意的是在加载中后期的一段时间内, 岩石的动泊松比呈现了下降趋势, 这主要是由于花岗岩为脆性硬岩导致的, 且这段时间恰好对应声发射活动的“平静期”。加载过程中岩石的动泊松比变化反映着岩石的损伤演化与膨胀扩容规律。

4 循环荷载下岩石的声波声发射特征

前面部分研究了单轴加载过程中花岗岩的超声波波速、声发射数量变化特征, 为了更加系统地揭示岩石内部的损伤演化过程, 本节通过改变应力路径来对花岗岩的声波速度和声发射特征进行试验研究。设

置加、卸载速率为 2 kN/s, 首先, 设置压力从 0 kN 上升至 800 kN (线弹性变形后期), 而后开始卸载, 降至 500 kN (线弹性变形初期) 后再次加载至 900 kN (破裂损伤阶段), 然后再将压力卸载至 500 kN, 再次施加压力至试件破坏。在整个试验过程中实时采集岩石的声发射信息, 间隔 40 s 采集一次超声波波速信息直至试验结束。整理试验数据, 分别得到应力施加过程中岩石的纵波、横波波速和声发射数量变化规律。

4.1 波速特征

图 10 为岩石纵波、横波波速随应力的变化曲线。从图中可以看出, 岩石的纵波、横波波速与应力的变化具有良好的对应关系。在初始的应力加载阶段, 岩石的纵波、横波波速显著增加, 而后随着应力的波动变化, 纵波、横波波速表现出相似的下降、上升趋势。在最后的应力加载阶段, 当岩石处于破裂损伤阶段后期时, 岩石的纵波、横波波速开始显著下降。对分析整个应力过程的波速变化发现, 岩石横波波速变动比纵波波速变动更剧烈、对应力的响应更为敏感, 横波波速可以更清晰地反应岩石的损伤状态。

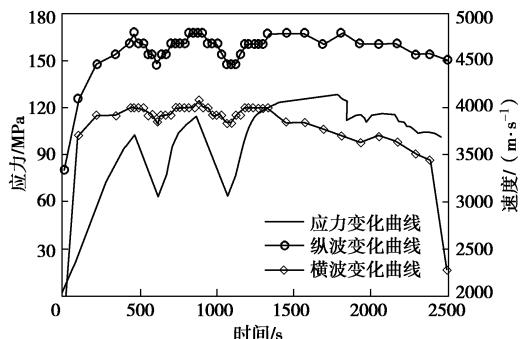


图 10 波速随应力变化曲线图

Fig. 10 Curves of rock velocity and stress conditions

4.2 声发射特征

声发射现象来自岩石的变形和损伤机制, 其影响因素众多, 包括材料的组织成分、试件的尺寸形状、应力状态和环境等, 其中材料的受载历史对声发射特征影响最为显著。Kaiser 认为材料在重复加载过程中, 未到达历史最高应力之前不发生明显声发射, 即声发射效应的不可逆性; 而 Felicity 认为材料在重复加载时, 应力荷载未到达历史最大荷载之前就会产生明显的声发射现象, 称为反 Kaiser 效应。

图 11 为岩石声发射数量随应力的变化关系图。可以看出, 在应力加载阶段, 岩体裂纹产生、拓展, 声发射数量增加, 而应力卸载时, 几乎没有声发射发生, 声发射活动步入“间歇期”。循环加载过程中, 岩石的声发射现象表现出相似的规律, 但声发射的活

跃程度却大有不同。

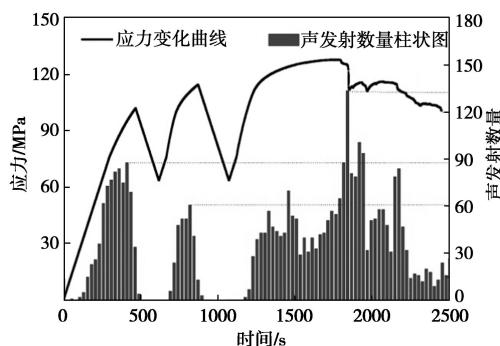


图 11 声发射数量随应力变化柱状图

Fig. 11 Histogram of AE number with stress fluctuations

为了研究应力历史对声发射活动的影响, 统计分析不同峰值应力时刻的声发射事件数量, 见表 2, 结合图 11, 对比分析 3 次加载中峰值应力时刻的声发射事件数量, 可以看出, 第一次加载过程中, 峰值应力为 800 kN 时声发射事件数量为 88 个; 再次加载过程的峰值应力为 900 kN, 相应时刻的声发射事件数量却下降为 61 个, 声发射数量降低的主要原因是加载过程中的岩石积累损伤; 第三次加载过程的峰值应力水平最高, 岩石裂纹拓展程度最为剧烈, 峰值应力时刻的声发射数量也最大。

表 2 不同峰值应力时刻的声发射事件数量

Table 2 Number of AE events at different peak stresses

应力状态	峰值时刻声发射事件数量
第一次加载	88
第二次加载	61
第三次加载	134

图 12 为岩石声发射事件累计数量与应力变化关系图, 可以看出, 在重复加载过程中, 应力在未到达上一次所受最高应力以前, 声发射活动就已经产生了。在第一次循环过程中, 当应力上升至 800 kN (上次最高应力) 时, 声发射事件数量增加了 78 个; 在第二次循环过程中, 当应力上升至 900 kN (上次最高应力) 时, 声发射事件数量增加了 76 个; 造成这种现象的原因是重复加载时, 应力将在试件内部重新分布, 某些位置将会发生新的变形和裂纹拓展, 从而产生声发射现象, 这就是材料的 Felicity 效应。Felicity 效应的程度可以用 Felicity 比来表达, 其定义如下:

$$F_\sigma = \sigma_{AE} / \sigma_{max} \quad (6)$$

式中 F_σ 为岩石的 Felicity 比; σ_{AE} 为再次声发射的起始应力; σ_{max} 为上次加载的最大应力。Felicity 比的实质就是材料对损伤程度的记忆, 它是声发射活动不可逆程度的具体描述, F_σ 越小, 表明材料的损伤越严重。从表 3 中可以看出, 第一次加载时, 花岗岩的 Felicity 比为 0.87, 此时岩石内部已经产生了微破裂,

损伤状态较为严重; 第二次加载过程中, 花岗岩的 Felicity 比下降到 0.84, 表明岩石的声发射不可逆程度增加, 岩体破坏损伤程度加重。Felicity 比可以作为评价岩体损伤程度的定量化指标, 具有重要的理论意义。

表 3 Felicity 比变化表

Table 3 Variation of Felicity ratio

应力状态	上次最高应力/kN	声发射起始应力/kN	Felicity 比
第一组	800	695	0.87
第二组	900	760	0.84

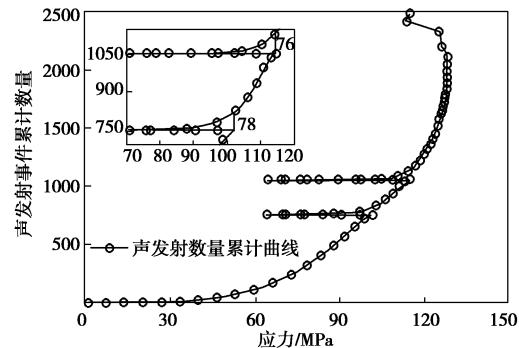


图 12 声发射事件累计数量与应力关系图

Fig. 12 Variation of AE number with loading stress

5 讨 论

(1) 应用声波、声发射一体化监测装置对岩石加载破坏过程中的声波、声发射信息进行监测, 不仅仅是方法上的结合, 它可以对一个破坏过程进行多角度的分析, 可以全面地揭示岩石材料的破坏过程, 为多参数、定量地评价岩体损伤奠定基础, 该装置由笔者所在单位自主研发, 具有首创性。

(2) 岩石的声发射活动有主震型、震群型和孤立型, 其中主震型又分为“主震余震型”和“前震主震余震”型两类。岩石的岩性及加载方式会影响岩石声发射的活跃程度, 但是并不会改变其在加载过程中各个应力阶段的声发射事件分布规律。本文通过对同一块花岗岩的多个样本的声发射规律进行统计分析, 得出单轴横幅加载过程中, 花岗岩的声发射活动主要集中在破坏损伤阶段和峰值应力之后, 文献[16]中也显示出相似的分布规律。

(3) 文中的声发射相对平静期是指岩石的声发射活跃程度相对较低, 不仅仅是声发射事件为零, 本文将声发射平静期的门槛值定义为低于最高声发射事件数量的 1/10, 不同的定义标准会有不同的平静期时段, 尚未有统一的标准; 强调声发射平静期的目的主要是为了说明岩石的声发射呈现“间隔突发”和能量积蓄的特征。

(4) 在循环荷载试验中,选取的加载峰值应力和卸载应力是具有代表性的,通过岩石的单轴加载试验得出,500 kN 时岩石处于线弹性变形初期,800 kN 时花岗岩处于线弹性变形后期,900 kN 时花岗岩处于破裂损伤阶段,选取的应力阶段即可以反应出循环荷载作用下岩石的声波与声发射规律,揭示出岩体的损伤积累,又可以缩短试验时间,节约计算机存储容量,方便各类波形数据的筛分和后处理。

6 结 论

本文以室内单轴压缩试验为手段,研究了单轴加载及循环荷载状态下花岗岩的声波、声发射特性,并首次从声波、声发射两方面分析研究岩石的损伤特性,取得如下结论:

(1) 在整个试验过程中,花岗岩的纵波、横波波速均呈现先增大、再稳定、后降低的变化趋势。处于压密阶段和线弹性阶段时,岩石波速增大主要是由于岩石密度的增大和原始裂纹的闭合;破裂损伤阶段初期,岩石的波速保持稳定,一段时间后,波速显著下降,内部裂隙损伤快速发展。岩石横波波速比纵波波速变化敏感。

(2) 花岗岩的声发射事件数量与应力应变曲线具有良好的对应关系。由于 Kaiser 效应的影响,处于压密阶段和线弹性阶段的花岗岩声发射数量很少,占整个试验过程声发射总量的 9.44%;随着应力的增大,岩石内部裂纹拓展剧烈,声发射数量开始显著增加,峰值应力时刻的声发射数量达到最大,破裂损伤阶段过程的声发射数量占全部总量的 50.63%;峰值应力过后,岩体缺陷进一步扩展,声发射活动依然很活跃。

(3) 岩石的声发射现象不是单调递增的,而是呈现“相对平静、间隔突发”的规律。一次声发射活动越“激烈”,接着的声发射状态“越平静”,“相对平静期”最明显的时段出现在岩石的峰值应力之前,这种声发射变化规律可以从能量学的角度进行解释。

(4) 应用试验测得的岩石波速,计算出岩石的动弹性模量 E_d ,岩石的动泊松比 μ_d 。结果认为,岩石的动泊松比和动弹性模量变化可以较好地反应岩石的损伤演化过程, E_d 与岩石波速变化曲线波动一致,呈现增加、平稳、下降的趋势,动泊松比 μ_d 可以反应岩石的扩容膨胀。

(5) 文章研究了循环荷载状态下花岗岩声波速度和声发射特征。花岗岩的纵波、横波波速与应力状态具有良好的对应关系,二者表现出一致的波动趋势;此外,应力状态对声发射活动也具有显著影响,加载阶段,岩体裂纹产生、拓展,声发射数量增加,

卸载阶段,声发射活动步入“间歇期”。统计分析应力与声发射事件的数量变化,显示出岩石的 Felicity 效应,比较分析两次加载过程中岩石的 Felicity 比变化,论证了岩石的损伤积累。

参 考 文 献:

- [1] 李元辉,赵兴东,赵有国,等.不同条件下花岗岩中声波传播速度的规律[J].东北大学学报(自然科学版),2006,27(9): 1030 - 1033. (LI Yuan-hui, ZHAO Xing-dong, ZHAO You-guo, et al. Propagation law of wave velocity in granite sample under different conditions[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(9): 1030 - 1033. (in Chinese))
- [2] 陈 颛,杨咸武,韩 彪.变形过程中岩石 P 波速度场的空间变化[J].地震学报,1990,12(1): 54 - 62. (CHEN Yong, YANG Xian-wu, HAN Biao. Spatial velocity variations of P waves during rock deformations[J]. ACTA Geophysica Sinica, 1990, 12(1): 54 - 62. (in Chinese))
- [3] 罗津辉,蔡忠理,刘 克,等.用声波参数确定岩石加载破坏过程的不同阶段[J].岩土力学,1992,13(1): 51 - 56. (LUO Jin-hui, CAI Zhong-li, LIU Ke, et al. Determination of the various stages in the process if rock failure under loading by the acoustic parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13(1): 51 - 56. (in Chinese))
- [4] 郑贵平,赵兴东,刘建坡,等.岩石加载过程声波波速变化规律实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(8): 1197 - 1200. (ZHENG Gui-ping, ZHAO Xing-dong, LIU Jian-po, et al. Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(8): 1197 - 1200. (in Chinese))
- [5] 宋丽莉,葛洪魁,郭志伟,等.利用多次散射波监测介质性质变化的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4): 713 - 722. (SONG Li-li, GE Hong-kui, GUO Zhi-wei, et al. Experimental study of variation of media properties monitoring using multiple scattering waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 713 - 722. (in Chinese))
- [6] KAISER E J. A study of acoustic phenomena in tensile test[D]. Munchen: Technische Hochschule Munchen, 1950,
- [7] 李 林.岩石声发射特性的研究[J].化工矿山技术,1995,24(2): 37 - 40. (LI Lin. Characteristics of acoustic emission of rocks[J]. Industrial Minerals & Processing, 1995, 24(2): 37 - 40. (in Chinese))
- [8] 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. (JI Hong-guang. Research and application of acoustic emission performance in concrete materials[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2004. (in chinese))
- [9] CHMEL A, SHCHERBAKOV I. A comparative acoustic emission study of compression and impact fracture in granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **64**(10): 56 - 59.
- [10] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(1): 108 - 119.
- [11] REN S, BAI Y M, ZHANG J P, et al. Experimental investigation of the fatigue properties of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **64**(10): 68 - 72.
- [12] 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 Shu-lin, TANG Hai-yan. 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))
- [13] 赵兴东, 刘建坡, 李元辉, 等. 岩石声发射定位技术及其实验验证[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1472 - 1476. (ZHAO Xing-dong, LIU Jian-po, LI Yuan-hui, et al. Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1472 - 1476. (in Chinese))
- [14] 赵兴东, 李元辉, 刘建坡, 等. 基于声发射及其定位技术的岩石破裂过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 990 - 995. (ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hui, LIU Jian-po, et al. Study on rock failure process based on acoustic emission and its location technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 990 - 995. (in Chinese))
- [15] 陈 颛, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. (CHEN Yong, HUANG Ting-fang, LIU En-ru. Rock physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. (in Chinese))
- [16] 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(增刊 2): 3673 - 3678. (ZHAO Xing-dong, TANG Chun-an, LI Yuan-hui, et al. Study on AE activity characteristics under unaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S2): 3673 - 3678. (in Chinese))

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司(原冶金勘察研究总院)主办的学术—技术类双月刊, 是中国科技论文统计源期刊, 中国地质文摘引用期刊, 中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊, 多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富, 理论结合实际, 适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行, 双月刊, 大16开本, 双月20日出版。每期定价10.0元, 全年60元。邮发代号18-153。全国各地邮局均可订阅, 也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告, 价格适中, 印制精良, 注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址: 河北省保定市东风中路1285号《勘察科学技术》编辑部; 邮编: 071069; Tel: 0312-3020887, 3094054; Fax: 0312-3034561; E-mail: kckxjs@163.com, kckxjs@126.com。

(《勘察科学技术》编辑部 供稿)