

不同加载条件下陕西华山花岗岩破坏过程的声发射特性

梁 乐¹, 王志亮^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对陕西华山花岗岩试样进行单轴和常规三轴破坏过程的声发射参数测试, 研究单轴和三轴两种应力条件下花岗岩破坏过程的声发射特性差异。结果表明, 两种加载条件下, 声发射特征均基本符合岩石加载破坏过程中的4个阶段, 单轴下峰值应力前声发射平台现象明显, 三轴下未出现明显声发射平台。弹性阶段内声发射信号均比较少, 进入塑性阶段后声发射信号开始密集出现; 破坏过程中声发射幅值主要范围都集中在40~100dB; 在岩样破坏之前, 都会出现事件计数、振铃计数率和累计释放能量逐渐升高的过程; 达到峰值强度时, 均出现振铃计数率和累计释放能量跳跃性的增长, 因此可以将振铃计数率和累计释放能量的突增作为岩样破坏的前兆。此外, 研究发现此花岗岩的声发射特征与其承载的路径密切相关, 从而进一步验证了岩石材料声发射中的Kaiser效应。

关键词: 花岗岩; 单轴压缩; 三轴压缩; 破坏过程; 声发射

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)02-0085-06

岩石在受荷破坏过程中内部将产生微裂纹, 微裂纹的产生与扩展造成应力松弛, 贮存的部分能量以应力波的形式突然释放出来, 产生声发射(AE)现象^[1]。目前, 声发射技术广泛应用于岩石破坏特征的研究中, 通过对岩体声发射特性分析, 可以判断岩体内部结构状态的变化, 反演破坏机制, 预测岩体工程的稳定性状态^[2~7]。李庶林等^[8]研究了岩石单轴受压条件下破坏全过程的声发射特征; 余贤斌等^[9]研究了直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性。在岩石的三轴压缩试验方面, 张黎明等^[10]研究了不同应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性; 纪洪广等^[11]研究了二长花岗岩三轴压缩下声发射特征的围压效应, 以及Kaiser效应和Felicity效应与围压大小的关系。

本文基于单轴、常规三轴压缩试验和声发射测试技术, 对陕西华山花岗岩在单、三轴压缩试验不同应变率、不同围压下破坏全过程的声发射特征进行了对比分析。

1 试验方案设计

采用美国MTS公司的MTS815型和816型岩石三轴伺服刚性试验机进行华山花岗岩岩样的三轴压缩试验。室内声发射试验系统示意图如图1所示。在岩样压缩过程中, 声发射测试由美国PAC公司DISP型声发射仪采集, 记录下对应通道的声发射count数、声发射能量、幅值等。

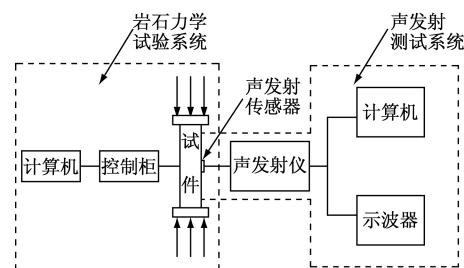


图1 声发射系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the AE test system

此次试验岩样基本性质见表1, 岩样规格为(50mm×100mm圆柱体, 在5种围压(0、20MPa、40MPa、60MPa和80MPa)、2种应变率($3 \times 10^{-5}/s$ 和 $5 \times 10^{-4}/s$)下, 每3个1组重复相同条件下的压缩试验, 共30个试样, 岩样编号如表2所示, 同时对每块岩样进行声发射信号采集。试样误差在允许范围内, 其平行度、平整度和垂直度都符合试验规程。

岩样放置好后, 连接刚性机开始试验, 当压力机接触岩样即岩样正式受压的同时, 开始记录时间、压力、

收稿日期: 2013-05-27; 修订日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174145, 51379147); 教育部博士点专项资金项目(20120072110024); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

作者简介: 梁乐(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩体工程地质。

通讯作者: 王志亮, E-mail: cvewzL@tongji.edu.cn

变形、幅值、声发射振铃计数率以及累计释放能量等数据。试验时,对加载系统采用轴向应变控制,应变率为 3×10^{-5} 或 5×10^{-4} /s,对声发射监测系统,设定声发射监测的采样间隔为 $1 \mu\text{s}$,频率为 $10^2 \sim 10^4$ Hz^[4],声发射检测门槛设定为 40dB,直至岩样破坏试验结束。

表 1 岩样基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of rock sample

体积密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	压缩强度 (MPa)	弯曲强度 (MPa)	
			干燥	水饱和
2.60	0.57	156.7	8.5	8.0

表 2 花岗岩岩样编号

Table 2 Number of granite samples

围压 (MPa)		0		20		40		60		80	
应变率 (/s)	3×10^{-5}	S10	S11	S20	S21	S30	S31	S40	S41	S50	S51
		S12		S22		S32		S42		S52	
		T10	T11	T20	T21	T30	T31	T40	T41	T50	T51
		T12		T22		T32		T42		T52	

2 试验结果及分析

2.1 基本力学特性分析

图 2 为岩样破坏前后照片,常规三轴试验结果列于表 3。由表 3 可知,在相同的应变率下,峰值应力随着围压的增加而增加,且增加速度越来越慢,如应变率 3×10^{-5} /s 时,随着围压增加,峰值应力从 139、397、544、620 到 681MPa 逐渐增大。根据岩石力学经验可知,围压每增加 1MPa,岩石强度增加 4~5MPa,即围压效应,试验结果也很好地验证了这一结论(图 3)。在相同围压时,高应变率下岩样的峰值强度高于低应变率下的相应值,且随着围压增大,这种规律越来越明显。例如 σ_3 按 0、20、40、60 和 80MPa 增加时,高应变率比低应变率下峰值应力差的增值百分比为 6.58%、22.66%、4.28%、9.64% 和 14.11%,这是由于高应变

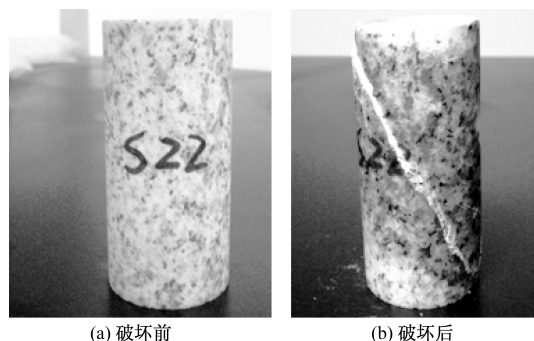


图 2 岩样试验前后对比

Fig. 2 Comparison of rock sample before and after test

表 3 常规三轴试验结果

Table 3 Test data of conventional triaxial test

应变率 (/s)	岩样 编号	围压 (MPa)	平均峰值应 力差 (MPa)	振铃峰值 (次·s ⁻¹)
3×10^{-5}	S1	0	139	44774
	S2	20	397	35839
	S3	40	544	38108
	S4	60	620	38652
	S5	80	681	45532
5×10^{-4}	T1	0	148	62286
	T2	20	407	20631
	T3	40	567	38845
	T4	60	680	50932
	T5	80	777	54414

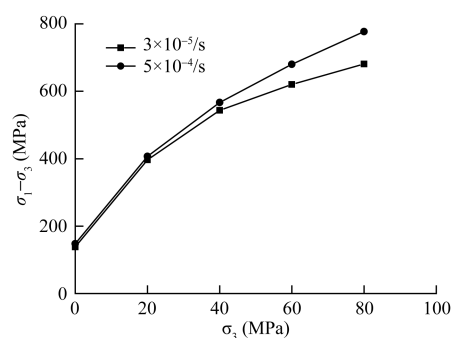


图 3 花岗岩强度-围压曲线

Fig. 3 Curves of peak stress versus confining pressure

率加载下裂纹未充分变形,从而提高了岩样抗外荷载的能力^[12]。

2.2 声发射特征分析

2.2.1 单轴试验声发射特征分析

岩石在单轴压缩过程中有明显的声发射现象。根据试验获得的力学参数和声发射数据绘制岩样力学参数与声发射参数关系图(图 4),分别为岩样 S11 在加载过程中的应力差-时间-声发射事件数,应力差-时间-幅值,应力差-时间-振铃计数率数和应力差-时间-累计释放能量曲线图。

(1)事件计数、应力与时间的规律从图 4a 可以看出。事件计数-时间曲线与应力-时间曲线吻合很好,S11 岩样整体破坏之前经历了局部破坏过程(CD)。声发射信号很好地体现了岩石变形的四个阶段性规律,即初始压密阶段(OA)、弹性变形阶段(AB)、塑性变形阶段(BE)和峰后破坏阶段(EF),包括微破裂形成之后的应力再上升阶段都有比较明显的体现。应力达到极大值前,事件计数-时间曲线会出现一段平台,声发射现象出现平静期,该结论与以往学者观察所得结论相一致。

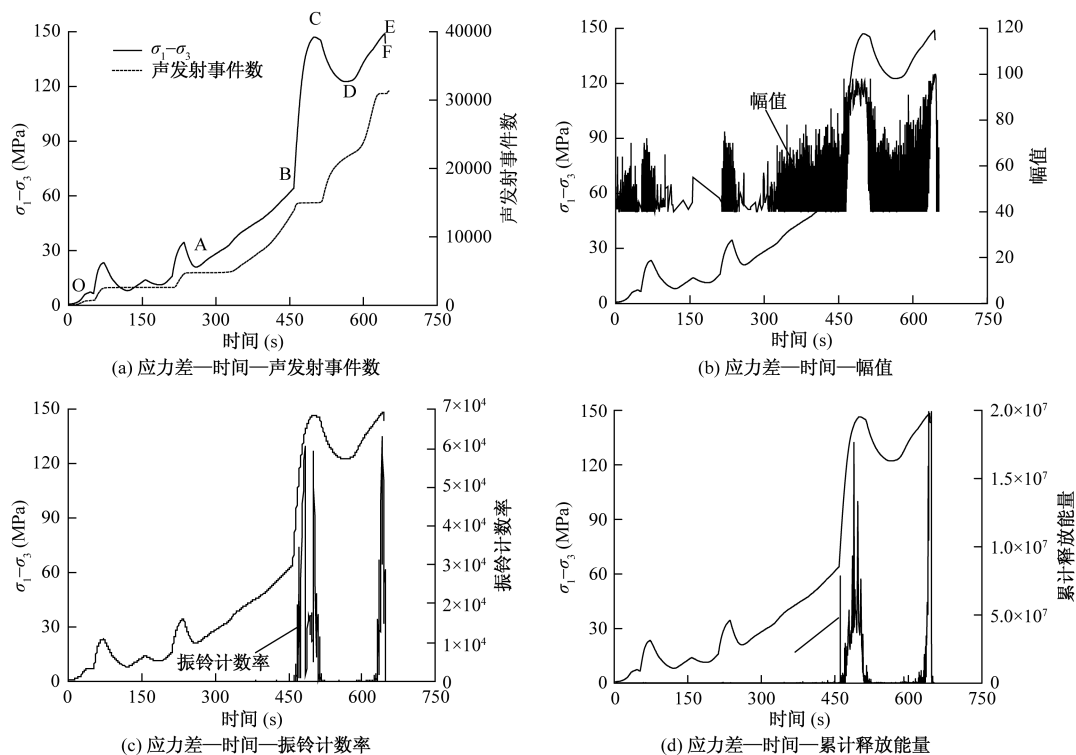


图4 单轴下 S11 声发射试验结果

Fig. 4 AE test results of S11 under uniaxial compression

在初始压密阶段,应力-应变曲线斜率缓慢增大,反映岩样内部微裂纹逐渐压密,岩样体积缩小,此时声发射事件计数增加缓慢,斜率变化的时间很短说明花岗岩岩样的压密阶段比较不明显。应力-应变曲线斜率接近常数时,可以视为岩样进入弹性变形阶段,此时声发射事件计数也呈线性增长。随着载荷的增大,岩样进入塑性变形阶段,应力-应变曲线斜率逐渐变小,声发射事件计数快速增长,说明岩样内部微裂隙的快速产生和发展,岩样体积这时发生变化。当应力发生突降时,进入岩样的破坏阶段,伴随着声发射事件计数的急剧增加,主破裂面形成,岩样发生破坏。岩样彻底破坏之前,声发射事件规律可以看做是材料的卸载再压缩过程,满足塑性变形阶段的规律特点。

(2) 振幅、振铃计数率、累计释放能量及应力与时间的关系如图 4b、c 和 d 所示,可以得知在单轴压缩实验岩样变形破坏过程中相应参数的声发射特征有以下规律:单轴常规压缩在初始压密阶段裂隙的闭合会产生一定程度的声发射信号;到弹性阶段,由于花岗岩岩样处于弹性压缩阶段可以看作是纯弹性介质考虑,没有微裂隙的产生或发展,故声发射现象不明显;由于微裂隙的闭合和贯通主要是发生在岩样的塑性变形阶段,振幅-时间曲线可以看出此时的声发射信号密集

而频繁;临近局部破坏时,振铃计数和累计释放能量急剧增加,声发射信号振幅也有所增大;第一次峰值到第二次峰值之间,声发射信号频繁且幅值较大,随后振铃计数和岩样释放的累计能量急剧上升,岩样最终产生整体破坏。

由此,可以把声发射事件计数的平台终点,振铃计数和累计释放能量的突增点和作为单轴压缩实验脆性材料破坏的主要前兆。

2.2.2 常规三轴试验声发射特征分析

花岗岩常规三轴实验的声发射特征选用岩样 S52 的力学参数和声发射参数关系来表示。图 5 为在常规三轴压缩试验中的应力差-时间-声发射事件数、应力差-时间-幅值、应力差-时间-振铃计数率数和应力差-时间-累计释放能量曲线图。

由图 5 可以看到,岩样变形直接进入弹性阶段,这是由于 S52 的围压已经达到 80MPa,在高围压条件下,岩石本身的性质发生改变,内部的宏观裂纹在加载初期就已经闭合,因此岩石典型四阶段的第一阶段很难明显地体现出来。在岩石变形弹性阶段,声发射信号一直十分稀少,直到进入塑性阶段后声发射信号开始频繁密集,事件计数、振铃计数率和累计释放能量逐渐升高,这是由于伴随着应力的升高,岩石内部塑性变形

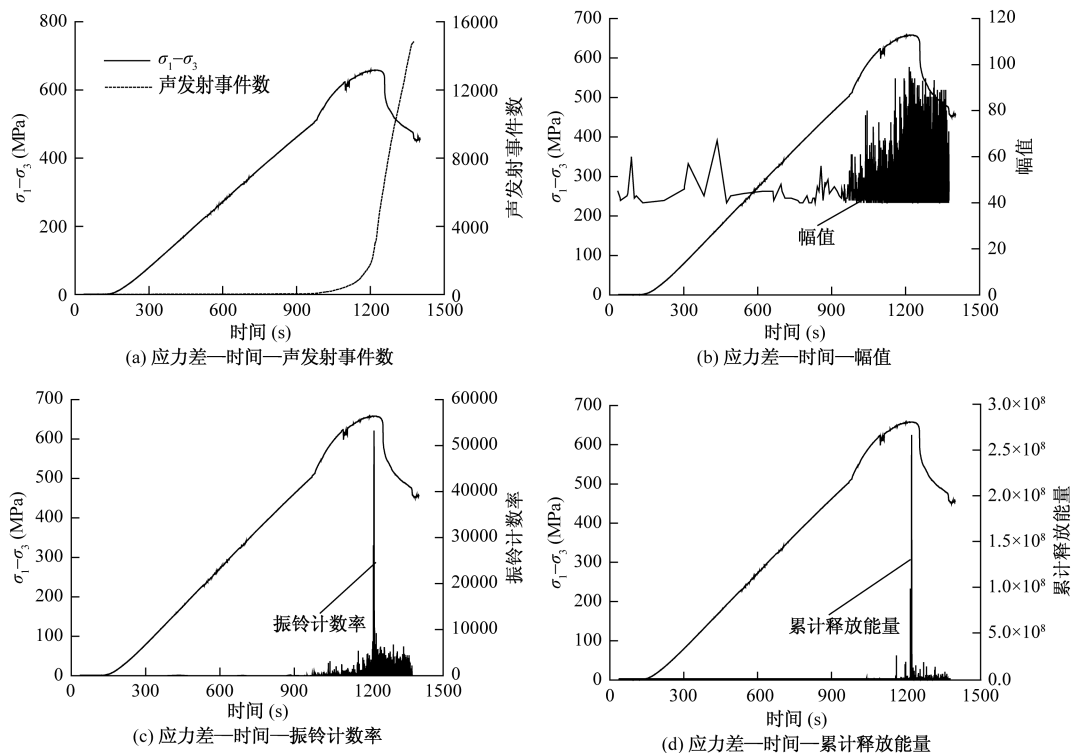


图 5 常规三轴下 S52 声发射试验结果

Fig. 5 AE test results of S52 under triaxial compression

逐步增大。进入峰后破坏阶段后,声发射计数呈现线性增加,声发射幅值岩样破坏前后没有明显变化,声发射的振铃计数率和累计释放能量则急剧降低。

由此,可以把声发射事件计数线性增长的起点,振铃计数和累计释放能量的突增点和作为常规三轴压缩实验脆性材料破坏的主要前兆。

2.2.3 不同加载条件下声发射特性差异分析

结合图 4,5 以及上述分析可知,单轴与常规三轴压缩下花岗岩破坏过程的声发射特征主要有以下异同点:

(1) 两种加载条件下,弹性阶段内声发射信号均比较少,进入塑性阶段后声发射信号开始密集出现;破坏过程中声发射幅值主要范围都集中在 40 ~ 100dB;在岩样破坏之前,都会出现事件计数、振铃计数率和累计释放能量逐渐升高的过程;达到峰值强度时,均出现振铃计数率和累计释放能量跳跃性的增长,因此可以将振铃计数率和累计释放能量的突增作为岩样破坏的前兆。

(2) 与单轴相比,常规三轴试验更难以测得初始阶段和弹性阶段比较弱的声发射信号,这是由于声发射探头并不是直接固定在需要检测的岩样上而是固定在 MTS 传力杆上使得干扰较大,声发射有效信号不容

易被检测。

(3) 与单轴试验相比,应力将达到峰值时,常规三轴试验的声发射计数-时间曲线未出现明显的平台。

(4) 常规三轴试验时,由于岩样承受较大的围压,所以当岩样 S52 破坏时,测得的最大振铃计数率和累计释放能量值没有单轴压缩试样 S11 高,最大累计释放能量甚至相差一个数量级之多(单轴与常规三轴下的最大值分别为 3.69×10^9 和 2.66×10^8)。

(5) 在残余变形阶段,单轴试样已经完全破碎因此完全不存在声发射现象,而三轴试件仍有比较强烈的声发射信号,这是因为由于围压的作用,常规三轴岩样破坏之后仍具有较高的残余强度,残余变形破坏及主体断裂面之间的相互摩擦作用是这类声发射现象产生的主要原因。

2.2.4 声发射的 Kaiser 效应

声发射的 Kaiser 效应是指声发射活动对材料荷载历史的最大载荷值具有记忆能力,即材料加载试验中表现出的这种弹性波效应。当再次加载到先前经受过应力水平后,其声发射活动将突然增加的现象。它是声发射的重要特征,显示材料的应力记忆能力,常被看作是岩石声发射应力测量的物理基础,是不可逆损伤累计的结果。

由图6岩样S51的应力-应变曲线可知:花岗岩岩样S51经历了再次明显的破坏过程,出现了卸荷过程以及再压缩阶段,可以视为岩样的循环荷载作用。如图6a和b为S51的应力差-时间-振铃计数率关系曲线,应力差-时间-振幅关系曲线,可明显看出当岩样荷载制裁后再次加载当荷载超过历史最大荷载水平时,再次出现了剧烈的声发射活动,与第一次加载破坏比较,第二次加载时振铃计数和振幅值急剧增大,再次破坏时的振铃计数呈现指数增长,振幅值更是超过100dB。可知,比较第一次加载过程,在此加载到原有历史应力时声发射现象也更为激烈。

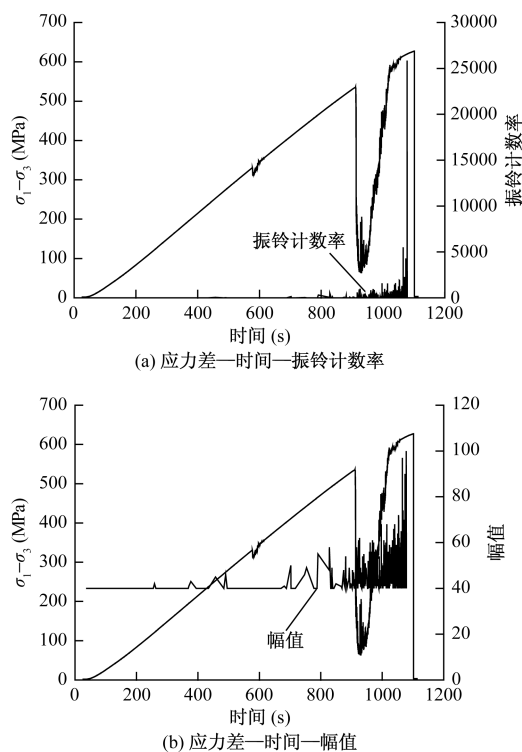


图6 常规三轴下S51声发射试验结果

Fig.6 AE test results of S51 under triaxial compression

3 结论

(1)在相同应变率下,岩石峰值应力随着围压的增加而增加,且增加速度越来越慢;在相同围压时,高应变率下岩石的峰值强度高于低应变率下的相应值。

(2)单轴试验时,声发射特征基本符合岩石加载破坏过程的四个阶段,峰值应力前的变形和屈服阶段都存在一个相对平静的台阶,声发射事件主要集中在材料的强度极限附近;三轴试验时,声发射特征亦基本符合四阶段规律,但压密阶段几乎观察不到,声发射计数-时间曲线未出现明显的平台,但岩样在破坏之后,

其声发射现象仍在持续。

(3)两种加载条件下,弹性阶段内声发射信号比较少,进入塑性阶段后声发射信号开始密集出现;破坏过程中声发射幅值主要范围都集中在40~100dB;在岩样破坏之前,都会出现事件计数、振铃计数率和累计释放能量逐渐升高的过程;可以将振铃计数率和累计释放能量的突增作为岩样破坏的前兆。

(4)花岗岩的声发射特征与其承载的路径密切相关,验证了岩石材料声发射的Kaiser效应,可明显看出再次加载当荷载超过历史最大荷载水平后,再次出现的声发射活动更为剧烈。

参考文献:

- [1] 秦四清,李造鼎,张倬元,等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1993:1-2. [QIN S Q, LI Z D ZHANG Z Y, et al. Technology of Rock Acoustic Emission[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993: 1-2. (in Chinese)]
- [2] CAI M, MORIOKA H, KAISER P K, et al. Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 538-549.
- [3] Mansurov V A. Acoustic emission from failing rock behaviour. Rock Engng, 1994, 27(3): 173-182.
- [4] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社, 2002. [CAI M F. Rock Mechanics and Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)]
- [5] 邓小鹏,相建华. 宝塔山特长隧道地应力场研究及岩爆预测[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 83-88. [DENG X P, XIANG J H. A study of the geostress field of the surrounding rocks of the Baota mountain tunnel and rock burst forecast[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 83-88. (in Chinese)]
- [6] 王坛华,陈剑平,李杨,等. 深埋低水平地应力硬质岩隧道稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 98-103. [WANG T H, CHEN J P, LI Y, et al. A study of the stability of a deep-buried hardrock tunnel with low horizontal ground stress[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(2): 98-103. (in Chinese)]
- [7] 陈景涛. 岩石变形特征和声发射特征的三轴试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(2): 94-96. [CHEN J T. Experimental Study on Triaxial

- Compression Deformation and Acoustic Emission Property of Rock[J]. Journal of Wuhan University of Technolog, 2008, 30(2): 94-96. (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): 2499-2503. [LI S L, YIN X G, WANG Y J, *et al.* Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503. (in Chinese)]
- [9] 余贤斌,谢强,李心一,等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137-142. [YU X B, XIE Q, LI X Y, *et al.* Acoustic emission of rocks under direct tension Brazilian and uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 137-142. (in Chinese)]
- [10] 张黎明,王在泉,石磊,等. 不同应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1230-1236. [ZHANG L M, WANG Z Q, SHI L, *et al.* Acoustic emission characteristics of marble during failure process under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1230-1236. (in Chinese)]
- [11] 纪洪广,张月征,金延,等. 二长花岗岩三轴压缩下声发射特征围压效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1162-1168. [JI H G, ZHANG Y Z, JIN Y, *et al.* Experimental study of confining pressure effect on acoustic emission characteristics of monzonite granite under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1162-1168. (in Chinese)]
- [12] 沈明荣,陈建峰. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社, 1999: 15. [SHEN M R, CHEN J F. Rock Mass Mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999: 15. (in Chinese)]

Acoustic emission characteristics of the granite in Huashan, Shaanxi during the failure process under different loading conditions

LIANG Le¹, WANG Zhi-liang^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The acoustic emission (AE) parameter tests of the Huashan granite are carried out under uniaxial and triaxial compression. The results show that the acoustic emission characteristics change with different stress conditions. Under two kinds of stress conditions, the AE characteristics of granite basically comply with the four stages of rock failure process. There exists a quiet period of AE before the peak stress under uniaxial compression while it hardly appears under triaxial compression. AE signals are rare in the elastic stage, while they increase dramatically after entering the elastic stage. AE amplitude ranges from 40 to 100 dB during the whole process. AE hits, count and absolute energy increase gradually before rock failure. AE count and absolute energy jump when near the peak strength, which can be regarded as precursor of rock failure. Besides, it is found that the AE characteristics of the granite are closely related with its stress path. Thus the Kaiser effect of AE is further verified.

Key words: granite; uniaxial compression; triaxial compression; failure process; acoustic emission

责任编辑:张明霞