

含孔花岗岩破裂过程不同区域声发射特征

高 祥, 刘善军, 黄建伟

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 利用孔洞对声发射(AE)传播的阻隔作用,对 AE 探头监测区域进行分区.通过含孔花岗岩双轴加载破坏过程的 AE 多通道监测实验,研究了岩石变形破坏过程不同区域 AE 特征及其与破坏模式之间的关系.结果表明:试件的 AE 探头监测区域分为独测区、共测区、盲测区;试件共有两种破坏形式,“V”型和贯穿型;对于“V”型破坏的试件,主破裂发生在独测区,各通道的 AE 特征明显不同;对于贯穿型破坏试件,主破裂发生于共测区,各通道的 AE 特征较为相近.

关 键 词: 含孔花岗岩;双轴加载;声发射;多通道;破坏形式

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)11-1653-05

Acoustic Emission Characteristics of Different Areas in the Fracture Process of Perforated Granite

GAO Xiang, LIU Shan-jun, HUANG Jian-wei

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Shan-jun, E-mail: liusjdr@126.com)

Abstract: The monitoring area of acoustic emission(AE)probes was partitioned by means of the blocking effect of hole on AE propagation. Based on the multi-channel AE monitoring experiment on perforated granite specimen under biaxial loading, the AE characteristics of different areas of specimens in failure process and its relationship with the failure mode were studied. The results show that AE sensors monitoring area of the specimens can be divided into three kinds, the single monitoring zone, the joint monitoring zone, and the blind monitoring zone. There are two kinds of fracture forms, the "V" type and the penetration type. For the specimens with V-type fracture, the main ruptures occur in the single monitoring zone and the AE characteristics of each channel are significantly different. For the specimens with penetration type fracture, the main ruptures happen in the joint monitoring zone and the AE characteristics of each channel are similar.

Key words: perforated granite; biaxial loading; acoustic emission(AE); multi-channel; fracture form

声发射(acoustic emission, AE)现象与岩石的变形、损伤孕育过程关系密切^[1], AE 技术是研究岩石变形、破裂发育与演化规律的有效手段.目前,国内外学者基于室内试验,已对岩石受力破裂过程中的 AE 特征进行了大量的基础性研究,包括:声发射源定位^[2]、声发射参数特征^[3]、声发射频谱特征^[4],以及声发射对变形^[5]、不同性质破裂^[6-7]的响应特征, Kaiser 效应^[8]等.然而,以往研究虽普遍采用声发射多通道监测,但通常多借

助单个声发射探头的监测数据来说明声发射特征,而忽略了不同探头声发射特征之间的关系问题.过去多采用完整性较好的岩石进行实验,完整岩石各个声发射探头监测区域相同,监测到的声发射信号特征较为接近.因此,本文特意选用含孔花岗岩试件,孔洞的存在会对声发射的传播起到阻隔作用,出现声发射探头无法直接监测到的区域(盲测区),导致不同通道声发射探头出现显著差异,进而利用声发射多通道监测,研究该岩石结

构不同区域的损伤演化特征,以及各区域声发射特征与破裂形式之间的关系问题,进一步揭示岩体结构破坏机理,为矿山、水利、交通等地下岩土工程失稳破坏问题奠定研究基础.

1 实 验

1.1 试件制备

以某矿山花岗岩,制备 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 规格的长方体试件(见图 1)3 块,分别编号为 S_1, S_2, S_3 . 然后,对其四角进行切割,所切去的直角三棱柱底面直角边边长为 25 mm ,沿着与试件正方形面垂直的中轴线,以孔径 20 mm 钻取圆孔. 仔细研磨四个端面,使上下表面平行度符合试验要求.

1.2 实验仪器

压力机型号为 RLW-3000,最大轴向试验力 3 MN ,测量精度 $\pm 1\%$. 红外热像仪为美国 SC3000 型热成像系统,空间分辨率为 $320\text{ 像素} \times$

240 像素 ,光谱范围为 $8 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$,温度灵敏度 $0.03\text{ }^\circ\text{C}$,成像速率 50 Hz . 声发射采用 8CHs PCI-2 声发射测试系统,采样频率 1 MHz ,采样长度为 1 k ,闭锁时间为 $300\text{ }\mu\text{s}$,波形触发模式为预触发模式,阈值 45 dB ,前置增益 40 dB ,主放增益 0 ,声发射探头谐振频率为 $35 \sim 100\text{ kHz}$.

1.3 实验方法

先用橡胶带将 2 个声发射探头固定在试样背面中心圆孔的上下两侧(见图 1),并涂抹凡士林保证其与岩石保持良好耦合效果. 然后,在试件测试面正前方 1.5 m 处安设热像仪,并校对各仪器时间,使得压力机、红外热像仪、声发射同步采集.

实验采用双轴加载、应力控制方式,其中垂向轴为主轴. 实验开始,先将水平载荷预加载至 100 kN 保持恒定,以提供稳定的围压荷载,随后垂向轴以 1.2 kN/s 匀速加载,各仪器同步监测,直至试件破坏. 实验中关闭门窗并拉上窗帘,保持安静,禁止人员走动. 实验系统及仪器布置示意图如图 1 所示.

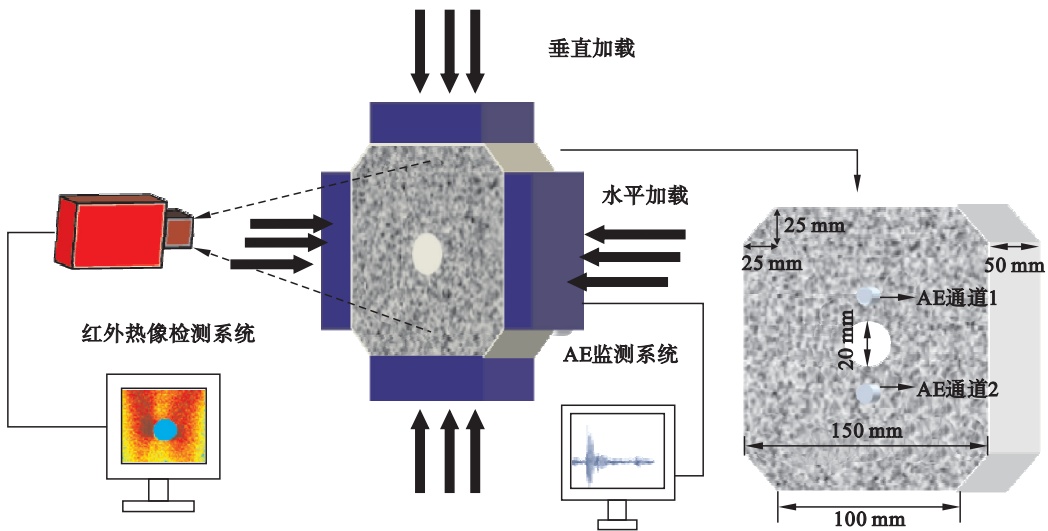


图 1 实验系统和声发射传感器布设示意图
Fig. 1 Schematic diagram of AE sensors place and experimental system

2 实验结果与分析

2.1 各通道声发射特征

声发射率(acoustic emission rate, AER)与材料中位错运动、断裂及裂纹扩展所释放的应变能成比例,是能够较好地反映材料性能变化的特征参量之一^[9]. 本文以 AER 为特征参量,对试件加载破坏过程的声发射特征进行描述. 图 2,图 3 分别为试件 S_1, S_2 加载过程各通道的 AER 变化曲线. 由图 2 可以看出,该试件通道 1,2 的 AER 变化曲线明显不同. 综合此两通道的 AER 特征,可

将试件 S_1 变形破裂过程的 AER 变化曲线分为 4 个阶段:通道 1 升降期、稳定期、通道 1 较活跃期、通道 2 较活跃期.

1) 通道 1 升降期. 对应于压密阶段,通道 1 的 AER 为先上升后下降的变化趋势,而通道 2 的 AER 保持稳定.

2) 稳定期. 对应于弹性阶段中前期,通道 1 和通道 2 的 AER 均较为稳定.

3) 通道 1 较活跃期. 对应于弹性阶段中后期,都表现出一定的递增趋势和较强的跳跃性突变,通道 1 的 AER 比通道 2 活跃.

4) 通道 2 较活跃期. 对应于塑性阶段中后

期,通道 2 的 AER 比通道 1 的 AER 活跃.

由图 3 可以看出,通道 1 和通道 2 的 AER 变化曲线较为类似,但并非完全相同. 图 3、图 2a 具

有相似之处,在压密阶段都存在升降的趋势性变化.

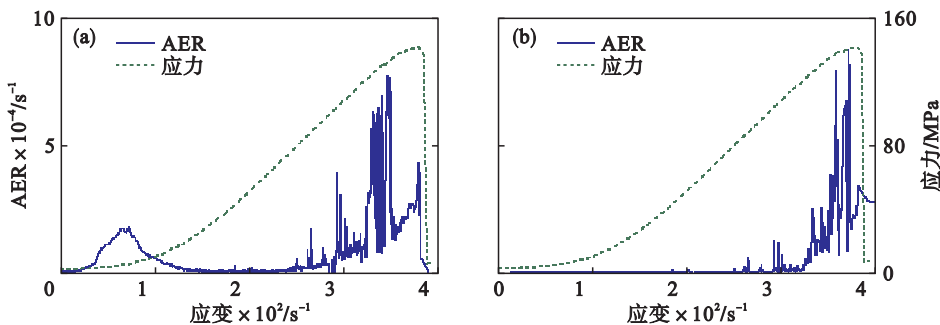


图 2 试件 S_1 加载过程各通道 AER 变化曲线
Fig. 2 AER of each channel of specimen S_1 in specimens loading
(a)—通道 1; (b)—通道 2.

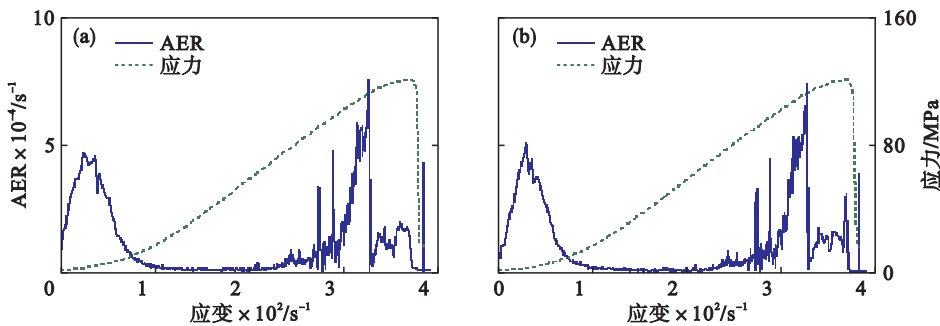


图 3 试件 S_2 加载过程各通道 AER 变化曲线
Fig. 3 AER of each channel of specimen S_2 in specimens loading
(a)—通道 1; (b)—通道 2.

2.2 各通道声发射特征与破坏形式之间的关系

2.2.1 试件破坏形式

岩石破裂瞬间会发生剧烈的温度变化,红外热像图能够更鲜明(相比可见光照片)地表现破裂区域和非破裂区域的位置特征. 本次实验所有试件破坏形式可以分为两类,其中,试件 S_2, S_3 的破坏形式较为相似,限于篇幅,仅仅给出了代表试件 S_1, S_2 破坏瞬间的红外热像图(见图 4),图中亮色条带为破裂区域. 由图 4 可以看出,试件的破坏形式明显分为两种,即“V”型破坏(S_1)、贯穿型破坏(S_2).

由图 2,图 4a 可知,试件发生“V”型破坏,通道 1,2 的声发射表现为不同的变化特征;由图 3 与图 4b 可知,试件发生贯穿型破坏,通道 1,2 的声发射表现为基本相同的变化特征.

2.2.2 声发射各通道监测区域

由以上分析可知:①同一试件不同声发射通道的声发射特征可能不同;②不同声发射通道的声发射特征相似与否与破裂模式存在紧密的联

系. 对此现象应该从试件的特殊结构、声发射的传播路径、探头的布设方式及监测区域等角度来解释.

当 AE 传感器到声发射源的距离与声源的直径相差很大时,可把声发射源看作一个从点源发出的声发射波以球面波向四周传播^[10],经过传感器时被探头接收. 实验所用试件结构(含有孔洞)与完整岩石试件相比,较为特殊. 从一点源发出的声发射波在以球面波向四周传播的过程中受到孔洞的阻隔作用,而出现声发射探头无法直接探测到的区域,AE 探头虽然也可接收到多次反射之后的信号,由于传播过程的衰减作用,反射波信号的强度会被大大削弱,导致不同声发射探头接收到的 AE 信号存在较为明显的差异. 声发射在材料内部要经过反复的折射、反射、衰减等过程,传播路径非常复杂^[11-12],这里暂不作详细讨论.

根据声发射的传播特点和试件结构特征,可以对各个 AE 探头监测区域进行划分. 图 5 为试件 AE 探头监测区域示意图. 有几点需要说明:

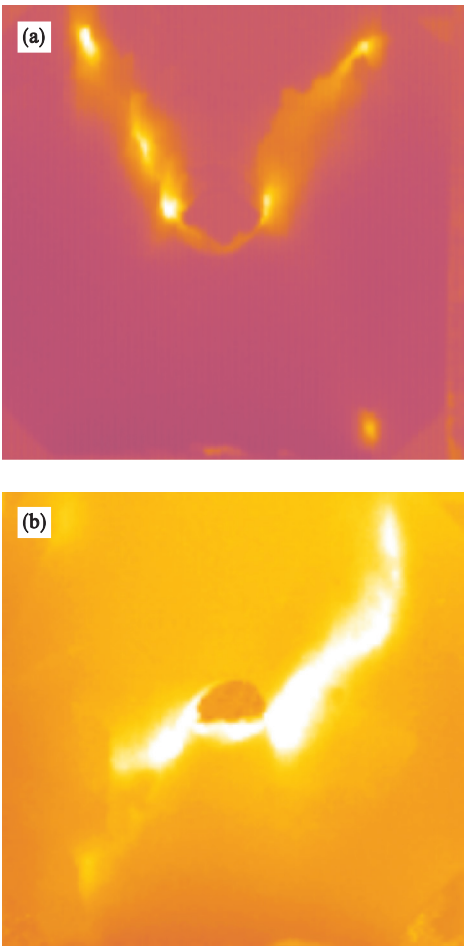


图 4 代表试件破坏瞬间的红外热图像
Fig. 4 Infrared thermal images of typical specimens at the failure moment
(a)— S_1 ; (b)— S_2 .

①图中蓝色的实线和弧线圈定的钝角区域(包括 A, D, C)为探头 1 的监测区域;②红色的实线和弧线圈定的钝角区域(包括 A, B, C)为探头 2 的监测区域;③蓝色实线和红色弧线圈定的锐角区域为 B 区,是探头 2 单独监测区域(独测区),同时也是通道 1 监测不到的区域(盲测区);④红色实线和蓝色弧线圈定的锐角区域为 D 区,是探头 1 的独测区,同时也是通道 2 的盲测区;⑤红色弧线和蓝色弧线圈定的区域为 E 区,是探头 1,2 都测不到的盲测区. 表 1 为各声发射探头监测区域表,用以辅助说明. 由图 5 可知,监测区域对探头的位置较为敏感,探头相对于孔距离大小会对声发射监测区域、结果造成较大的影响.

对比图 4a,图 5 可知,试件 S_1 的破裂区域主要落于 D 区域,属于通道 1 的独测区,该区域的损伤演化信息通道 2 无法直接监测,这是试件 1 各通道声发射特征不同的主要原因. 对比图 4b,图 5,可知试件 S_2 的破裂区域主要落于 A, C 区,属于通道 1,2 的共测区,该区域的损伤演化信息

都能被通道 1,2 直接测到,故试件 2 各通道声发射特征较为相近.

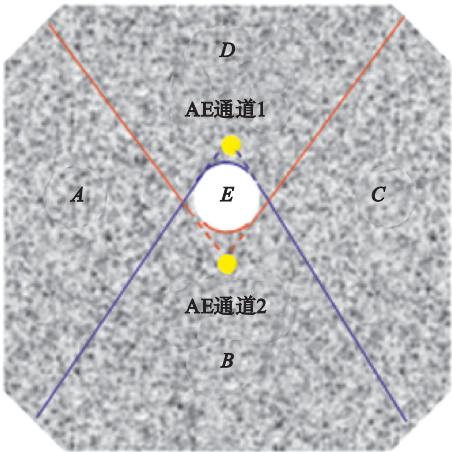


图 5 各声发射探头监测区域示意图
Fig. 5 Schematic diagram of AE sensors monitoring area

表 1 各声发射探头监测区域表				
Table 1 Monitoring area table of each AE sensor				
声发射探头	监测区		盲测区	
	独测区	共测区		
通道 1	D	A, C	B	E
通道 2	B	A, C	D	

本研究对现场监测和室内实验中声发射的布设具有参考意义. 现场监测方面通过声发射探头的不同布设方式,对现场围岩进行分区监测,对巷道的冒顶、鼓底、片帮等危险进行识别、预警和评估. 室内实验方面通过声发射多通道布设,研究不同区域的声发射特征,分析不同区域内部损伤演化特征、主破裂发生的先后顺序,揭示特定岩体结构破坏失稳的内在机理. 另外,基于破坏形式与各通道的声发射特征之间的关系,可以根据变形阶段各通道声发射特征之间的关系对破坏形式进行预测.

3 结 论

- 1) 对于含孔岩石,由于孔洞对声波的阻隔作用而存在声发射探头无法直接测到的区域,采用多声发射通道监测,根据能否被直接监测到、能否被单个 AE 探头测到、能否被多个 AE 探头测到,可以将监测区域分为盲测区、独测区和共测区.
- 2) 不同通道 AE 探头监测区域不一定相同,对应的声发射特征也可能不同,相同与否跟试件的破坏形式相关.
- 3) 试件的破坏形式分为两种,即“V”型和贯穿型破坏.“V”型破坏试件各通道的声发射特征

明显不同,贯穿型破坏试件各通道的声发射特征基本相似。

4)“V”型破坏试件的破裂区域主要集中于独测区,是各通道声发射特征不同的原因;贯穿型破坏试件各通道的声发射特征之所以相似,是因为贯穿型破坏试件的破裂区域发生于共测区。

参考文献：

[1] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30 (7) : 883 – 899.

[2] Dong L J, Li X B, Zhou Z L, et al. Three-dimensional analytical solution of acoustic emission or microseismic source location under cube monitoring network [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22 (12) : 3087 – 3094.

[3] 魏嘉磊,刘善军,吴立新,等. 含孔岩石双轴加载过程声发射多参数特征对比分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(6) : 1017 – 1025.

(Wei Jia-lei, Liu Shan-jun, Wu Li-xin, et al. Comparative analysis on different AE parameters in biaxial loading of hole rock[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2015, 32 (6) : 1017 – 1025.)

[4] Li L R, Deng J H, Zheng L, et al. Dominant frequency characteristics of acoustic emissions in white marble during direct tensile tests [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(5) : 1337 – 1346.

[5] Mansurov V A. Acoustic emission from failing rock behavior [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1994, 27 (3) : 173 – 180.



(上接第 1652 页)

参考文献：

[1] 张蓓,张桂民,张凯,等. 钻孔导致突水溃沙事故机理及防治对策研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(2) : 219 – 225.

(Zhang Bei, Zhang Gui-min, Zhang Kai, et al. Water and sands bursting mechanism induced by geological borehole and control measures[J]. *Journal of Mine & Safety Engineering*, 2015, 32(2) : 219 – 225.)

[2] Shirvanian P A, Calo J M, Hradil G. Numerical simulation of fluid-particle hydrodynamics in a rectangular spouted vessel [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32(6) : 739 – 753.

[3] Ookawara S, Street D, Ogawa K. Numerical study on development of particle concentration profiles in a curved microchannel [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61 (11) : 3714 – 3724.

[4] Wang G Q, Ni J R. The kinetic theory for dilute solid-liquid two-phase flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1991, 17(2) : 273 – 281.

[6] Chang S H, Lee C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41 : 1069 – 1086.

[7] Aker E, Kühn D, Vavryuk V, et al. Experimental investigation of acoustic emissions and their moment tensors in rock during failure [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70 : 286 – 295.

[8] Fu X, Xie Q, Liang L. Comparison of the Kaiser effect in marble under tensile stresses between the Brazilian and bending tests[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(2) : 535 – 543.

[9] 杨永杰,王德超,郭明福,等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (1) : 98 – 104.

(Yang Yong-jie, Wang De-chao, Guo Ming-fu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1) : 98 – 104.)

[10] 袁振民. 声发射检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981 : 13 – 14.

(Yuan Zhen-min. Acoustic emission detection[M]. Beijing : National Defense Industry Press, 1981 : 13 – 14.)

[11] King M S. Elastic wave propagation in and permeability for rocks with multiple parallel fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39 (8) : 1033 – 1043.

[12] Petruzalek M, Vilhelm J, Rudajev V, et al. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60 : 208 – 216.

[5] Wang G Q, Ni J R. Kinetic theory for particle concentration distribution in two-phase flows[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116(12) : 2738 – 2748.

[6] Ni J R, Wang G Q, Borthwick A G L. The kinetic theory for vertical profile of particle concentration in dilute and dense solid-liquid flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(12) : 893 – 903.

[7] Yang B, Yang T H, Xu Z H, et al. Numerical simulation of the free surface and water inflow of a slope, considering the nonlinear flow properties of gravel layers; a case study [J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(2) : 172109.

[8] Hidalgo R C, Lozano C, Zuriguel I, et al. Force analysis of clogging arches in a silo[J]. *Granular Matter*, 2013, 15(6) : 1 – 8.

[9] 陆坤权,刘寄星. 颗粒物质(上) [J]. *物理*, 2004, 33(9) : 629 – 634.

(Lu Kun-quan, Liu Ji-xing. Static and dynamic properties of granular matter(I) [J]. *Physics*, 2004, 33(9) : 629 – 634.)

[10] Washino K, Chan E L, Matsumoto T, et al. Normal viscous force of pendular liquid bridge between two relatively moving particles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 494 : 255 – 265.