

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0048

循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的 声发射特征试验研究

杨小彬^{1,2}, 韩心星^{1,2}, 刘恩来^{1,2}, 张子鹏^{1,2}, 王逍遙^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京) 共伴生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为了研究岩石材料在循环加卸载过程中的声发射特征与非均匀变形的对应关系, 开展了花岗岩试件单轴循环加卸载试验。利用声发射系统和 CCD 相机分别对试样变形破坏过程中的声发射信号和试件表面的变形图像进行采集, 结合数字散斑相关方法, 对试件非均匀变形演化过程中的声发射特性进行研究。研究结果发现: 每次循环加载过程中, 非均匀变形的最小点皆与应力卸载的最低点相对应。而自局部化带启动后, 每次循环加载过程中的非均匀变形的最大点滞后于循环加载应力的顶点。非均匀变形演化与声发射信号存在较好的对应关系, 循环加载过程中非均匀变形的首次转折增大点对应声发射信号增加的起点, 非均匀变形的最大点对应声发射信号平静期的起点。随循环次数增加, 非均匀变形程度与 Felicity 比呈负相关关系, 即非均匀变形越大, 损伤程度越大, Felicity 比越小。

关 键 词: 循环加卸载; 非均匀变形; 声发射信号; 局部化带; Felicity 比

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)08-2732-08

Experimental study on the acoustic emission characteristics of non-uniform deformation evolution of granite under cyclic loading and unloading test

YANG Xiao-bin^{1,2}, HAN Xin-xing^{1,2}, LIU En-lai^{1,2},
ZHANG Zi-peng^{1,2}, WANG Xiao-yao^{1,2}

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources,
China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In this study, uniaxial cyclic loading tests were carried out on granite specimens to study the relationship between acoustic emission (AE) characteristics and non-uniform deformation of rock materials during the cyclic loading process. The AE signals and the deformation images of the specimen surfaces were collected by using the AE system and CCD camera in the deformation and failure process, respectively. Combined with the digital speckle correlation method, the AE characteristics of specimens were investigated during the evolution process of non-uniform deformation. The research results showed that the minimum point of non-uniform deformation corresponded to the lowest point of unloading stress during each cyclic loading process. However, after the startup of the localisation band, the maximum point of non-uniform deformation lagged behind the vertex of loading stress in each cyclic loading process. There was a good correspondence between the non-uniform deformation evolution and the AE signal. During the cyclic loading process, the first turning and increasing point of non-uniform deformation is the starting point of the increase of AE signal, whereas the maximum point of non-uniform deformation is the starting point of the quiet period of the AE signal. With the increase of cyclic number, the degree of non-uniform deformation is negatively correlated with the Felicity ratio, that is, the greater the non-uniform deformation is, the greater the damage degree is, and the smaller the Felicity ratio is.

Keywords: cyclic loading and unloading; non-uniform deformation; acoustic emission signal; localisation band; Felicity ratio

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(No.51274207, No.50904071)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51274207, 50904071).

第一作者简介: 杨小彬, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事矿山动力灾害防治、数值模拟方面的研究工作。E-mail: yangxiaobin02@126.com

通讯作者: 韩心星, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事安全技术及工程方面的理论及实验研究。E-mail: hanxxydy123@126.com

1 引言

在矿山硐室开挖与支护、桥梁隧道往复车辆通行、大坝的蓄放水等岩土工程中，岩石类材料常常处于一种往复的加卸载状态中，往复加卸载会引起岩石类材料变形程度、强度大小及破坏形式的变化，有必要对岩石试件在循环加卸载作用下的响应过程作深入地研究和细致地分析^[1]。

岩石类材料的变形破坏演化过程中会伴随产生声、光、电、热和磁等信号^[2-4]，其中声发射作为一种重要的监测岩石变形破坏的技术手段，有助于理解循环加卸载过程中岩石的损伤情况，并获得岩石失稳破坏的重要前兆信息^[5-6]。Meng 等^[7]探讨了 6 种不同加载速率下 30 个砂岩试样在单轴循环加卸载条件下的能量积累、演化和耗散特征，分析了岩石变形破坏过程的应力-应变关系和声发射特征。Xu 等^[8]利用 MTS 设备和 PAC AE 采集系统研究了砂岩单轴循环加卸载试验的强度变化和声发射特性。付斌等^[9]以大理岩为研究对象，设置了两种不同的循环应力路径，研究了大理岩在循环加卸载下的声发射特征。夏冬等^[10]对闪长岩分别进行干燥、饱和两种条件下循环加卸载过程的声发射试验，探讨了这两种含水条件下岩石的力学特性、声发射特征、加卸载响应比的变化情况。张宁博等^[11]对大理岩在等幅循环加卸载和分级循环加卸载条件下损伤破坏全过程的声发射特性进行了研究，并用快速傅里叶转换（FFT）对循环加卸载过程中 Kaiser 点和 Felicity 点的声发射信号频谱特性进行了分析。刘建坡等^[12]应用声发射技术对循环载荷下岩石损伤过程进行了试验研究。基于加卸载响应比理论和损伤力学理论建立了循环载荷下岩石破坏过程中的内部损伤和声发射关系的数学模型。

从文献研究可以看出，大多文献开展了循环荷载作用下声发射参数与材料强度、力学参数等方面的研究工作，但岩石材料为非均匀材料，在不同的物理力学条件下其强度和力学响应不尽相同。考虑岩石材料的非均匀性，同时考虑声发射在特定环境中（如噪声环境）的适用性和光测方法的优点，论文开展光测联合声发射技术进行岩石变形演化测试研究，探讨岩石在循环加卸载过程中的声发射特性与岩石的非均匀变形演化之间的关系，为循环加卸载条件下岩石材料或岩石工程的试验测试结果提供更准确合理的力学解释。

本文采用花岗岩试件进行单轴循环加卸载试验，利用 CCD 相机对试验过程中试件表面的变形

图像进行采集，利用声发射系统采集岩石循环加卸载过程中的声发射信号，结合数字散斑相关方法，对岩石非均匀变形演化过程中的声发射特征进行研究。

2 单轴循环加卸载试验

2.1 试验系统

试验选用花岗岩制作 50 mm×50 mm×100 mm 的方形试件，试件表面采用喷漆制作人工散斑场。试验过程中利用伺服压力试验机对试样进行单轴循环加卸载试验，运用 CCD 相机、计算机、压力机和声发射采集装置组成试验系统（试验系统示意图如图 1 所示，试验系统实物如图 2 所示）。

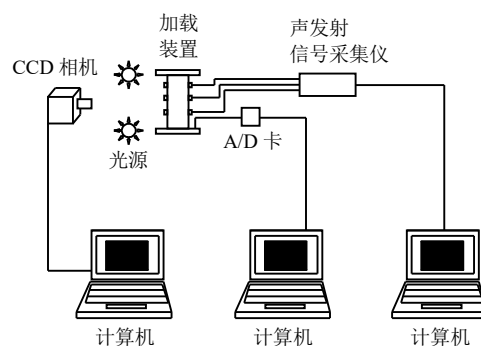


图 1 试验系统示意图

Fig.1 Schematic of test system

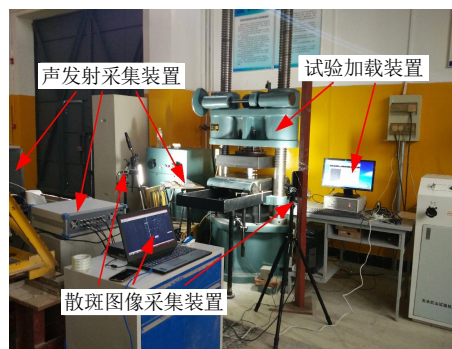


图 2 试验系统实物图

Fig.2 Photo of the test system

试验过程中，压力机能自动记载荷载、位移、时间等数据。加卸载全过程中的声发射信号采用声发射采集装置采集，在试件其中两相邻侧面各布置 3 个声发射探头来采集声发射信号（声发射信号采集探头布置如图 3 所示），前置放大器增益设为 40 dB，门槛值设为 50 dB，采样率为 3 MHz。试验过程中试件表面的变形图像采用 CCD 相机进行连续采集，采集速率为 2 帧/s，图像分辨率为 1 600 像素×1 200 像素，其物面分辨率为 0.1 mm/像素。

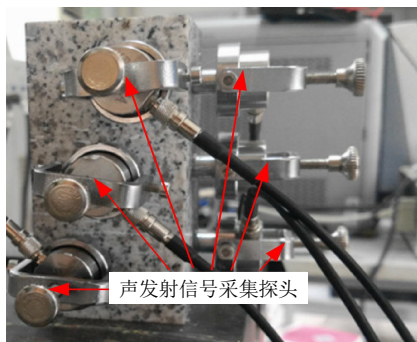


图3 声发射信号采集探头布置图

Fig.3 Arrangement diagram of acoustic emission signal acquisition probes

2.2 试验过程及结果

试验时,压力机、CCD 相机、声发射采集装置同时启动。采用荷载控制的方式进行加卸载,加卸载速率为 0.1 kN/s。基于已经测得的试件单轴抗压强度并考虑测试数据的存储问题,在试验中共设计 6 次循环加卸载,第 7 次直接加载到试样破坏。每次循环加载其应力依次递增 15 MPa,每次加载最大荷载分别为 15、30、45、60、75、90 MPa,然后开始卸载,每次卸载到 10 MPa 为止后重新加载。试件加卸载全过程的应力与时间关系曲线如图 4 所示。

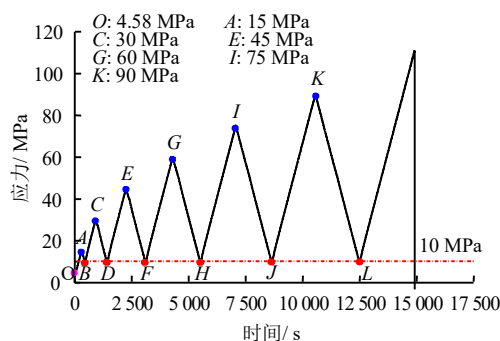


图4 应力与时间曲线

Fig.4 Curve of stress and time

为了分析试验过程中特定点的声发射现象及非均匀变形演化规律,在图 4 上对循环加卸载过程中的典型时刻进行标识,其中 A、C、E、G、I、K 为每次循环卸载的起始点(也即加载的顶点)。B、D、F、H、J、L 为每次循环卸载的最低点(也即加载的起始点)。

3 试验结果分析

3.1 非均匀变形演化特征分析

岩石的非均匀变形会产生局部化变形场,与均匀变形场相比存在如下区别^[3, 13]:一是变形场中少

数(局部化带内)点的变形量远远大于其他(局部化带外)点的变形量,这些点可以称为变形局部化的数值特征;二是变形量大的少数点集中在一个(或少数几个)连通的带内,这可以称为变形局部化的空间特征。故为了分析岩石非均匀变形演化规律,考虑非均匀变形数值和空间上的两种特征,现引入一个统计指标 S_w ^[3, 13]。该统计指标公式为

$$S_w = w_s S \quad (1)$$

式中: S 为某一时刻试件表面变形场的方差; w_s 为考虑变形局部化空间特征的一种加权,其表达式分别为

$$S = S(X_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \quad (2)$$

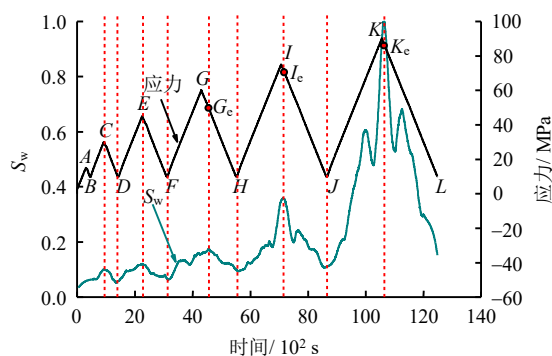
$$w_s = S(X_k^*) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k^* - \bar{X}^*)^2} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (4)$$

$$X^* = X \otimes B \quad (5)$$

式中: X_k 为变形场中每个点的变形量; \bar{X} 为 X_k 的平均值; X^* 为经过空间化处理的变形场,是 X (变形场数据矩阵)与一个元素全为 1 且大小为 $m \times m$ 的矩阵 B (卷积核)的卷积。

通过计算得到试验过程中的 S_w 值,将统计指标 S_w 进行归一化处理,得到循环加卸载过程中 S_w 随时间的变化曲线如图 5 所示。

图5 循环加卸载过程中 S_w 演化曲线Fig.5 Evolution curve of S_w during cyclic loading and unloading

由图 5 可知, S_w 曲线在循环加卸载过程中随加卸载应力呈现波动变化, S_w 数值整体随着加载应力的增大而增大,随着卸载应力的减小而减小。将每次循环过程中的 S_w 曲线与对应的应力曲线进行详

细对比可知, 每次循环加卸载过程中, S_w 曲线的最低点皆与应力卸载的最低点相对应; 但 S_w 曲线的最高点与加载应力曲线的最高点并非完全对应, 从第 4 次循环开始, 每次循环 S_w 曲线的最高点在时间上滞后于应力加载顶点。如第 4 次循环过程中, 加载顶点 (G 点) 对应时刻为 4 298 s, S_w 最大值点 (G_e) 对应时刻为 4 536 s, 时间滞后 238 s; 第 5 次循环过程中, 加载顶点 (I 点) 对应时刻为 7 065 s, S_w 最大值点 (I_e) 对应时刻为 7 150 s, 时间滞后 85 s; 第 6 次循环过程中, 加载顶点 (K 点) 对应时刻为 10 555 s, S_w 最大值点 (K_e) 对应时刻为 10 642 s, 时间滞后 87 s。

根据图 5 中的 S_w 演化曲线与加卸载应力的对应关系, 以图 4 中的标识点 O 作为参考点, 以此点对应的散斑图像作为参考图像, 采用白光数字散斑相关方法计算出每次循环加载顶点即 A 、 C 、 E 、 G 、 I 、 K 点的最大张拉应变场云图如图 6 所示。

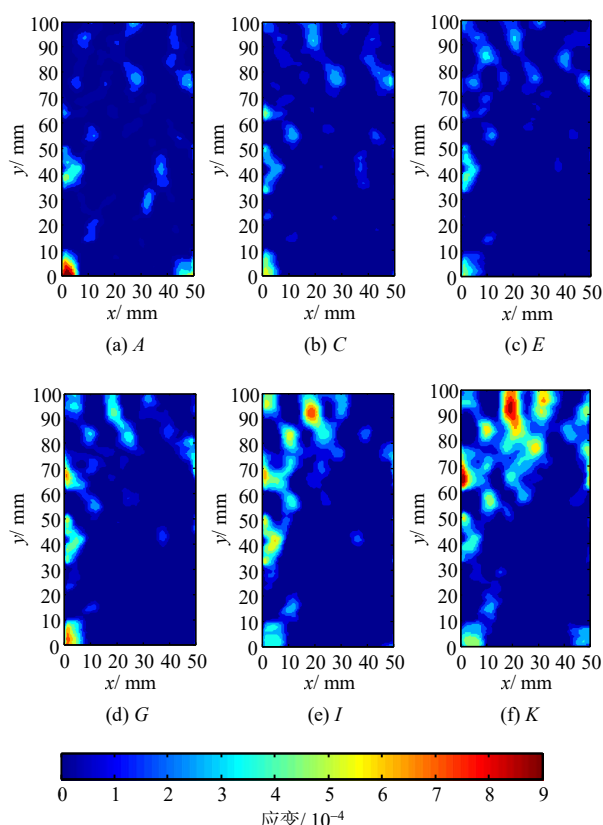


图 6 变形场演化云图

Fig.6 Evolution nephograms of deformation field

由图 6 可知, 试件在每次循环加载过程中, 试件基本在某同一特定区域出现变形集中, 如试件上端 $x = 5$ mm, $x = 20$ mm, $x = 30$ mm 附近, 试件左端 $y = 3$ mm, $y = 40$ mm, $y = 68$ mm 附近。对比点 A 到点 E 的变形场云图可知, 在前 3 次循环加卸载

过程中, 并未出现明显的非均匀变形集中带 (即局部化带)。从第 4 次循环开始, 开始在试件上端 $x = 20$ mm 附近形成比较明显的局部化带, 且随着循环加载顶点应力值的增加, 变形局部化带愈加明显, 如第 4 次循环加载到 G 点即 60 MPa 时, 变形局部化带长度约为 14 mm, 宽度约为 4 mm, 变形量值约为 4.5×10^{-4} ; 第 5 次循环加载到 I 点即 75 MPa 时, 变形局部化带长度约为 18 mm, 宽度约为 7 mm, 变形量值约为 7×10^{-4} ; 第 6 次循环加载到 K 点即 90 MPa 时, 变形局部化带长度约为 20 mm, 宽度约为 12 mm, 变形量值约为 9×10^{-4} 。峰值后试件沿着该局部化带产生宏观裂纹, 发生破坏。

由于从第 4 次循环开始, 每次循环加载过程中都会形成明显的局部化带, 且由于岩石为非均质、非连续、各向异性材料, 其内部存在孔洞、裂隙及夹杂等微结构, 在加载及卸载过程中, 岩石内部矿物颗粒、微结构的接触黏合和黏滑摩擦会造成自第 4 次循环开始每次循环过程其非均匀变形指标 S_w 的最大点都会滞后于加载应力的顶点。后面还将结合非均匀变形与声发射特征之间的对应关系对其进行分析。

3.2 声发射特征分析

通过对花岗岩单轴循环加卸载过程中的声发射信息进行分析处理, 得到循环加卸载过程中振铃计数与声发射能量的演化曲线分别如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可知, 在前 3 次循环加卸载过程中, 随着加卸载的进行, 声发射振铃计数呈波动变化, 整体量值较小。第 4 次循环过程中, 在加载时间为 3 658~4 236 s 阶段, 随着应力加载, 声发射振铃

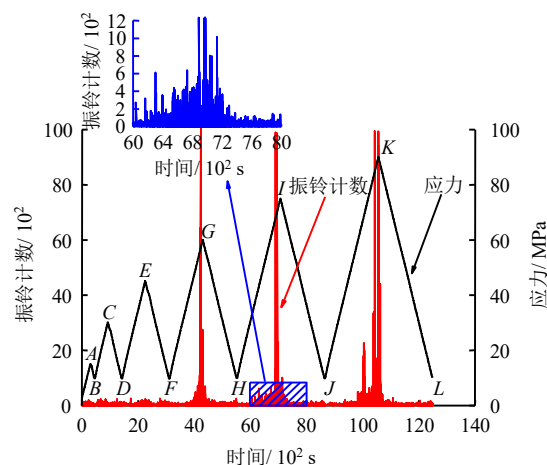


图 7 循环加卸载过程声发射振铃计数演化

Fig.7 Evolution of acoustic emission ringing counts during cyclic loading and unloading

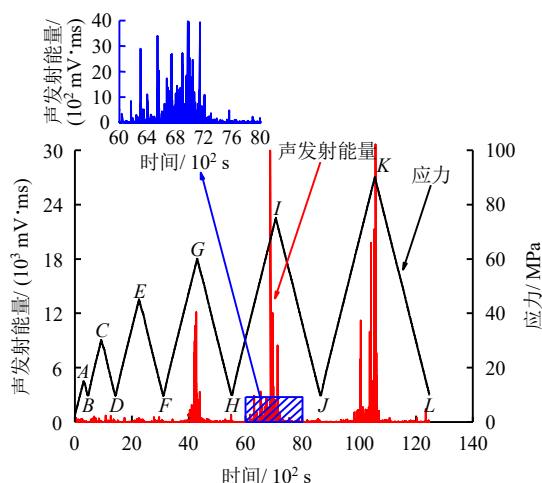


图8 循环加卸载过程声发射能量演化

Fig.8 Evolution of acoustic emission energy during cyclic loading and unloading

计数逐渐增加,数值增幅较大;在加载时间为4 236 s时,振铃计数出现激增;在加载时间为4 236 s到卸载时间为4 536 s阶段,声发射振铃计数开始减小;从第4次循环卸载至4 536 s至第5次循环加载到5 957 s阶段,声发射振铃计数变得不活跃,出现声发射信号平静期。第5次循环过程中,在加载时间为5 957~6 889 s阶段,随着应力加载,声发射振铃计数逐渐增加,数值增幅较大;在加载时间为6 889 s和6 959 s时,振铃计数出现激增;从加载时间为6 959 s至卸载时间为7 150 s阶段,声发射振铃计数开始减小;从第5次循环卸载至7 150 s至第6次循环加载至9 236 s阶段,声发射振铃计数变得不活跃,出现声发射信号平静期。第6次循环过程中,在加载时间为9 236~10 030、10 030~10 433、10 433~10 590 s阶段,声发射振铃计数逐渐增大,并在时间为10 030、10 433、10 590 s时,振铃计数发生激增。在卸载时间10 590~10 642 s阶段,声发射振铃计数逐渐减小,随后也会出现一段声发射信号平静期。

对比图8与图7可知,声发射能量在循环加卸载过程中与声发射振铃计数呈现相同的规律,在前3次循环加卸载过程中,皆呈现小幅波动变化。自第4次循环开始,在加载初期及卸载末期会出现一段声发射信号平静期。在每次循环加卸载的中间阶段会经历声发射信号增强到减弱的过程,在此过程的某些时刻会出现声发射信号的激增点。

图9为循环加卸载过程中应力、声发射振铃累计计数、声发射累积能量随时间的变化曲线。在前3次循环过程中,声发射振铃累计计数与声发射累积能量呈非线性小幅增加。在第4次循环中时间

为3 658~4 236 s阶段,第5次循环中时间为5 957~6 889 s阶段,第6次循环中时间为9 236~10 030、10 030~10 433、10 433~10 590 s阶段,声发射振铃累计计数和声发射累积能量皆有大幅增加,且增长速率逐渐增大;在第4次循环中时间为4 236 s时,第5次循环中时间为6 889 s和6 959 s时,第6次循环中时间分别为10 030、10 433、10 590 s时,声发射振铃累计计数与累积能量数值皆发生激增;在第4次循环中时间为4 236~4 536 s阶段,第5次循环中时间为6 959~7 150 s阶段,第6次循环中时间为10 590~10 642 s阶段,声发射振铃累计计数与声发射累积能量仍然呈增长趋势,但增长速率逐渐减小;第4次循环中时间为4 536 s至第5次循环中时间为5 957 s阶段,第5次循环中时间为7 150 s至第6次循环中时间为9 236 s阶段等,声发射振铃累计计数与声发射能量数值变化较小,出现声发射信号平静期。

根据上述分析可知,在前3次循环加卸载过程中,声发射信号较少,声发射振铃计数、声发射能量、振铃累计计数、累积能量数值皆较小。随着循环次数及加载顶点应力的逐渐增大,从第4次循环开始,声发射信号在循环过程中都会经历平静期、活跃期、衰减期、平静期4个阶段,声发射信号与加卸载应力存在规律性关系,下面结合岩石的非均匀变形演化对声发射特征进行分析。

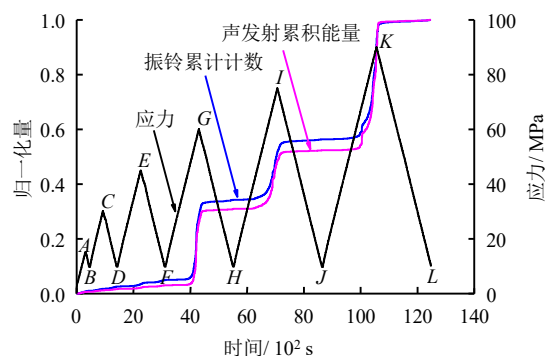


图9 循环加卸载过程声发射振铃累计计数、累积能量演化

Fig.9 Evolution of accumulative ringing counts and accumulative energy of acoustic emission during cyclic loading and unloading

3.3 非均匀变形演化与声发射特征关系分析

岩石在循环加卸载过程中会发生非均匀变形演化,同时伴随声发射振铃计数和声发射能量的演变,下面在前述分析非均匀变形演化特征、声发射特征的基础上,研究非均匀变形演化与声发射特征之间的关系。

3.3.1 非均匀变形演化与声发射特征对应关系

绘制应力、非均匀变形指标 S_w 、声发射振铃累积计数、声发射累积能量随时间的变化曲线如图 10 所示。

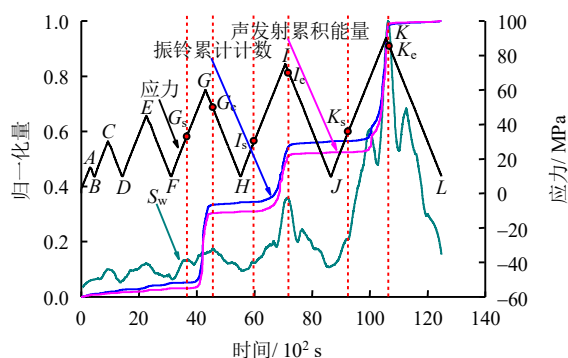


图 10 S_w 、振铃累计计数、声发射累积能量随加载应力的变化曲线

Fig.10 Change curves of S_w , accumulative ringing counts and accumulative energy of acoustic emission with loading stress

从图 10 可知,在前 3 次循环加卸载过程中, S_w 曲线随应力变化较为平缓,对应的声发射信号并不明显,声发射振铃累积计数和声发射累积能量数值只呈现小幅非线性增加。这是因为在较低的应力水平下,花岗岩内部的原生裂隙被压密,此时新产生的裂隙较少,试件非均匀变形很小,故声发射信号也较少。随着循环次数的增加及循环加载顶点压力的增大,从第 4 次循环开始,在每次循环的加载阶段都会形成明显的局部化带。 S_w 曲线在加载过程中出现转折上升点说明在该点处出现非均匀变形的突变,此时试件中开始出现新裂纹的增加或旧裂纹的加剧演化拓展,并导致声发射信号增加,其中第 4 次循环加载中的首次转折上升点对应非均匀变形的启动。另外从第 4 次循环开始,非均匀变形指标 S_w 的最高点滞后于循环加载应力的顶点,且声发射振铃累计计数与累积能量数值在经过加载应力最高点后仍有较大增加,说明经过循环加载最高点开始卸载时,试件中的微结构损伤演化并没有随着应力的降低立即停止,而是继续伴随着新的微结构产生及原有微结构的进一步演化,试样的非均匀变形仍在加剧。以第 4 次循环为例,选取 S_w 曲线的首次转折上升点 G_s 、加载应力最高点 G 以及 S_w 曲线的最高点 G_e 对应时刻的应变场云图(见图 11)进行分析。

从图 11 的变形场演化云图可知, G_s 点时试件上部 $x = 20$ mm 处局部化带开始启动,变形局部化

带长度约为 13 mm,宽度约为 3 mm,变形量值约为 2×10^{-4} ; G 点变形局部化带长度约为 14 mm,宽度约为 4 mm,变形量值约为 4.5×10^{-4} ; G_e 点变形局部化带长度约为 16 mm,宽度约为 5 mm,变形量值约为 5.6×10^{-4} 。从 G_s 点到 G_e 点,应力先增加后减小,但局部化带不断演化拓展,试件非均匀变形不断加剧,对应的声发射振铃累积计数与累积能量不断增加。对于岩石在非均匀变形演化过程中的声发射信号出现激增的问题,文献[3]中已有明确结论,声发射振铃计数和声发射能量发生激增受变形局部化带拉伸速率及滑动速率影响,对应的 S_w 曲线也会发生波动,这里不再赘述。

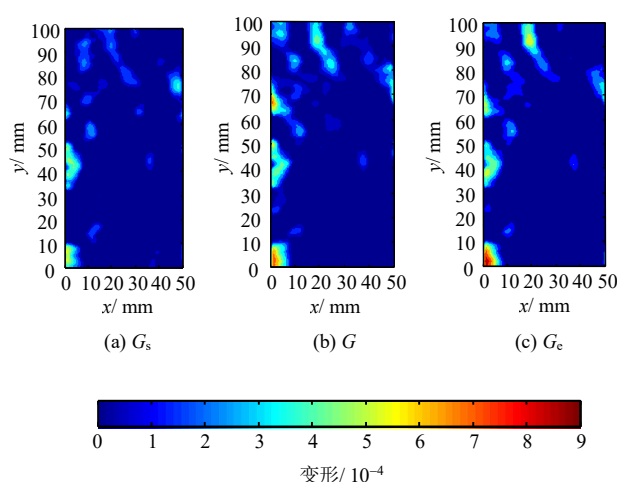


图 11 变形场演化云图

Fig.11 Evolution nephograms of deformation field

综上所述可知,非均匀变形指标 S_w 与声发射信号存在较好的对应关系,循环加载过程中的 S_w 曲线的首次转折上升点即非均匀变形的首次转折增大点对应声发射信号增加的起点, S_w 曲线的最高点即非均匀变形的最大点对应声发射信号平静期的起点,但 S_w 曲线的最高点即非均匀变形的最大点滞后于循环加载应力的最高点。

3.3.2 非均匀变形演化与 Felicity 比的关系分析

岩石在循环加卸载过程中,会造成裂隙的萌生、扩展或者回弹张开,同时伴随声发射现象发生,这是岩石损伤演化的外在表现。而岩石在循环加卸载过程中声发射信息具有记忆功能,称为 Kaiser 效应[14],即当下一次循环加载的应力达到上一次加载的最大应力时,才有声发射信息出现。Kaiser 效应记忆是否准确采用 Felicity 比来衡量。

$$F = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} \quad (6)$$

式中: F 为 Felicity 比; σ_i 为第 i 次加载过程中出现明显声发射现象时的应力; σ_{i-1} 为第 $i-1$ 次循环加卸载的最高应力。

在 Felicity 效应中, 对声发射明显增多的界定并无统一的标准。陈宇龙等^[15]研究指出, 只要声发射“明显增多”的尺度范围设定合理, 则对 Felicity 比的演化趋势没有影响。本文在处理数据时仍然选用美国 CARP 推荐的指导性准则: 当负载增加 10% 时, 声发射振铃计数多于 20 且持续出现声发射信号作为声发射“明显增多”的尺度, 绘制每次循环的 Felicity 比演化曲线并与每次循环卸载最低点 (即 10 MPa) 的非均匀变形指标 S_w (S_w 数值进行归一化处理) 进行对比分析, 如图 12 所示。

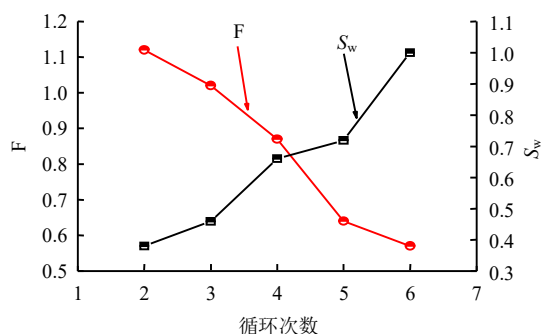


图 12 F 与循环卸载最低点 S_w 关系图

Fig.12 Relation diagram of Felicity ratio and S_w at the lowest point of cyclic unloading

由图可知, 第 2 次循环时 Felicity 比为 1.12, 第 3 次循环时 Felicity 比为 1.02, 其数值皆大于 1, Kaiser 效应成立, 说明声发射恢复滞后即记忆滞后, 这是因为初始应力较小, 还处于裂隙压密阶段, 损伤很小, 声发射记忆效应明显。从第 4 次循环开始, 随着循环次数增多, 应力越来越大, Felicity 比数值越来越小。在第 4 次循环加卸载过程中, Felicity 比由 1.02 下降到 0.87, 说明在该过程中已经有新裂隙不断萌生演化。第 5 次循环加卸载和第 6 次循环加卸载过程的 Felicity 比分别为 0.64 和 0.57, 说明随循环次数增多, Felicity 比数值逐渐减小。其原因是在循环加载过程中, 随循环次数的增加, 岩石不断产生不可逆变形, 损伤不断累积。每次循环的卸荷过程并不能使变形恢复, 在下一次循环加载过程中, 达到上次变形的最大值所需要的荷载小于上次循环的最大荷载, 岩石发生了弱化^[15]。所以岩石试件在循环加载过程中其内部裂隙不断萌生、演化、扩展, 损伤不断累积, 导致记忆逐渐超前, Felicity 效应愈加明显。

另由图 12 可知, 随循环次数的增加, 在卸载最低点的 S_w 值逐渐增大。说明随循环次数的增加, 卸载到同一应力时, 岩石试件内部已经产生非均匀变形积聚, 其非均匀变形程度越来越大。从损伤角度说明随循环次数增加, 损伤也越来越大, 这即从试验角度直观解释了 Felicity 比越来越小的原因。综合上述分析说明非均匀变形程度与 Felicity 比成负相关关系, 即非均匀变形越大, 损伤越大, Felicity 比越小。

4 结 论

(1) 在循环加卸载试验过程中, 非均匀变形的最小点与卸载应力的最低点存在良好的对应关系; 但自局部化带启动后, 非均匀变形的最大点滞后于循环加载应力的顶点。

(2) 非均匀变形演化与声发射信号存在较好的对应关系, 循环加载过程中的非均匀变形的首次转折增大点对应声发射信号增加的起点, 非均匀变形的最大点对应声发射信号平静期的起点。

(3) 随循环次数增加, 非均匀变形程度与 Felicity 比成负相关关系, 即非均匀变形越大, 损伤程度越大, Felicity 比越小。局部化现象的出现使声发射记忆提前, 且随着非均匀变形程度的加剧, 声发射记忆提前量值增加。

参 考 文 献

- [1] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 矽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): 2929—2934.
XU Su-chao, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 2929—2934.
- [2] 马胜利, 雷兴林, 刘力强. 标本非均匀性对岩石变形声发射时空分布的影响及其地震学意义[J]. 地球物理学报, 2004, 47(1): 127—131.
MA Sheng-li, LEI Xing-lin, LIU Li-qiang. Effects of heterogeneity in rock samples on spatial and temporal distribution of acoustic emission and their significance in seismology[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(1): 127—131.
- [3] 宋义敏, 邢同振, 赵同彬, 等. 岩石单轴压缩变形场演化的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 534—542.
SONG Yi-min, XING Tong-zhen, ZHAO Tong-bin, et al.

- Acoustic emission characteristics of deformation field development of rock under uniaxial loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(3): 534—542.
- [4] 王云海, 何学秋, 窦林名. 煤样变形破坏声电效应的演化规律及机理研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1569—1575.
- WANG Yun-hai, HE Xue-qiu, DOU Lin-ming. Study on regularity and mechanism of acoustic emission and electromagnetic emission during fracture process of coal samples[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2007, 50(5): 1569—1575.
- [5] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- KATSUYAMA K. Application of AE techniques[M]. Translated by FENG Xia-ting. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [6] 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.
- QIN Si-qing, LI Zao-ding, ZHANG Zhuo-yuan, et al. An introduction to acoustic emission techniques in rocks[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.
- [7] MENG Qing-bin, ZHANG Ming-wei, HAN Li-jun, et al. Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(10): 3873—3886.
- [8] XU Su-chao, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui. Acoustic emission characteristics and mechanical behavior of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading[C]// Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines(Volume 1). Paramus: Rinton Press, 2009.
- [9] 付斌, 周宗红, 王海泉, 等. 大理岩单轴循环加卸载破坏声发射先兆信息研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1946—1953.
- FU Bin, ZHOU Zong-hong, WANG Hai-quan, et al. Precursor information study on acoustic emission characteristics of marble under uniaxial cyclic loading-unloading[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(8): 1946—1953.
- [10] 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): 1243—1247.
- XIA Dong, YANG Tian-hong, WANG Pei-tao, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of dry and saturated rocks during cyclic loading and unloading process[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1243—1247.
- [11] 张宁博, 齐庆新, 欧阳振华, 等. 不同应力路径下大理岩声发射特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 389—394.
- ZHANG Ning-bo, QI Qing-xin, OUYANG Zhen-hua, et al. Experimental on acoustic emission characteristics of marble with different stress paths[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(2): 389—394.
- [12] 刘建坡, 李元辉, 杨宇江. 基于声发射监测循环载荷下岩石损伤过程[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10): 1476—1479.
- LIU Jian-po, LI Yuan-hui, YANG Yu-jiang. Rock damage process based on acoustic emission monitoring under cyclic loading[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2011, 32(10): 1476—1479.
- [13] 宋义敏, 邢同振, 邓琳琳, 等. 不同加载速率下岩石变形场演化试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2773—2779.
- SONG Yi-min, XING Tong-zhen, DENG Lin-lin, et al. Experimental study of evolution characteristics of rock deformation field at different loading rates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2773—2779.
- [14] 何俊, 潘结南, 王安虎. 三轴循环加卸载作用下煤样的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 84—90.
- HE Jun, PAN Jie-nan, WANG An-hu. Acoustic emission characteristics of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(1): 84—90.
- [15] 陈宇龙, 魏作安, 张千贵. 等幅循环加载与分级循环加载下砂岩声发射 Felicity 效应试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 226—230.
- CHEN Yu-long, WEI Zuo-an, ZHANG Qian-gui. Experimental study on Felicity effect of acoustic emission in rock under cyclic loading and tiered cyclic loading[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(2): 226—230.