

DOI: 10.11779/CJGE201607005

# 不同应力路径大理岩声发射破坏前兆的试验研究

丛 宇<sup>1, 2</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 郑颖人<sup>3</sup>, 王在泉<sup>2</sup>, 张黎明<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266033; 3. 后勤工程学院建筑工程系, 重庆 400041)

**摘要:** 应力路径不同, 岩石变形和破坏过程中伴随的声发射特征也不同, 通过不同路径大理岩加、卸荷试验, 结合分形维数原理, 探讨声发射破坏前兆随应力路径的变化规律。试验结果表明: ①岩样破坏处的声发射计数率和破坏前的累计计数率增长率由大变小的应力路径为加轴压卸围压、恒轴压卸围压、单轴、常规三轴路径。②常规三轴路径下岩样临近破坏时, 声发射事件计数率存在明显的“低声发射期”, 围压越大, 声发射前兆“低声发射期”越明显; 同时累计振铃计数率增长速率降低的拐点出现后很短时间, 岩样也会发生破坏。③低围压下恒轴压、卸围压路径岩样破坏时累计振铃计数率的增长速率近似为切线。加轴压、卸围压岩样破坏前一段相近计数率后存在声发射计数率的“平静期”, 围压增加, “平静期”持续时间增加, 岩样破坏产生的计数率越高。④在低围压应力环境下应力比 $>0.8$ 、高围压应力环境下时间比 $>0.4$ 时声发射分维数降低的特征可以作为岩样的破坏前兆分析。

**关键词:** 声发射; 应力路径; 围压; 破坏前兆; 分维数

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)07-1193-09

作者简介: 丛 宇(1984-), 男, 山东荣成人, 博士后, 主要从事岩石力学及地下工程稳定性方面的研究工作。E-mail: cuncin@163.com。

## Experimental study on acoustic emission failure precursors of marble under different stress paths

CONG Yu<sup>1, 2</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>, ZHENG Ying-ren<sup>3</sup>, WANG Zai-quan<sup>2</sup>, ZHANG Li-ming<sup>2</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Science, Qingdao

Technological University, Qingdao 266033, China; 3. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing  
400041, China)

**Abstract:** There are diverse acoustic emissions during the process of rock deformation and breakage in various stress paths. To explore the relationship between emission failure precursors and stress paths, loading and unloading tests on marble under different stress paths are carried out. The results show that: (1) According to the growth rate of accumulated ring count rate before failure and the emission count rate at failure point, the sequence of stress paths from the largest to the smallest is loading axial stress and unloading confining pressure, constant axial stress and unloading confining pressure, uniaxial compression, and conventional triaxial compression. (2) Before failure under conventional triaxial compression, there exists an obvious low emission period of acoustic emission count rate. The larger the confining pressure, the more obvious the low emission period as the failure precursor. Rock samples fail within a very short time after the inflection point of growth rate of accumulated count rate appears. (3) The growth rate of accumulated count rate of constant axial stress and unloading confining pressure tests at failure point is approximately tangent with the low confining pressure. There is a quiet period of acoustic emission count rate after close count rate before failure of loading axial stress and unloading confining pressure samples. The duration of the quiet period increases with the confining pressure, and rock failure leads to a higher count rate. (4) When the stress ratio is more than 0.8 under low confining pressure or the time ratio is more than 0.4 under high confining pressure, the decreasing characteristics of fractal dimension of acoustic emission can be regarded as the failure precursor of rock.

**Key words:** acoustic emission; stress path; confining pressure; failure precursor; fractal dimension

## 0 引言

岩石材料的自身性质、不同的破坏路径以及围岩条件的复杂性严重制约材料的破坏前兆研究。岩石变

基金项目: 国家自然科学基金项目(11232024, 41372298, 41320104005, 41472270); 中国博士后科学基金项目(2015M572232)  
收稿日期: 2015-06-17

形破坏的过程是岩石内部微裂隙萌生、扩展和断裂的过程, 在这个过程中以弹性波形式释放出瞬时应变能的现象即为声发射<sup>[1]</sup>。研究岩石材料破坏过程中的声发射现象, 声发射参数与岩石破裂间的关系, 有助于进一步认识岩石材料的破坏机理。

Mansurov<sup>[2]</sup>根据破坏过程的声发射现象预测岩体的破坏类型; 李庶林等<sup>[3]</sup>研究花岗岩、辉绿岩、灰岩、矿石、片岩等不同岩石单轴压缩下的声发射特征; 付小敏<sup>[4]</sup>则开展矽卡岩、闪长岩、粉砂岩等岩石的单轴压缩声发射特性研究; 苏承东等<sup>[5]</sup>开展煤样三轴加、卸围压试验声发射特征研究; 张晖辉等<sup>[6]</sup>对片麻岩进行三轴循环载荷作用寻找其破坏前兆的声发射特征; 同时相关研究<sup>[7-8]</sup>表明, 岩石材料的声发射信号参数在时间域与空间域上的分布都具有分形特征: 尹贤刚<sup>[9]</sup>等建立单轴压缩破坏的声发射强度分维模型, 结果表明加载中后期声发射强度分维值由大逐渐变小, 破坏前值最小; 尹贤刚等<sup>[10]</sup>也分析不同加载应力比岩样的声发射分形维数, 认为峰值应力的 40% 时, 分形维数下降, 峰值时, 分形维数降到最低; 梁忠雨等<sup>[11]</sup>认为红砂岩单轴压缩过程中, 不同的应力水平, 关联分维数不同, 声发射过程具有不同的自相似和分形程度; 裴建良等<sup>[12]</sup>研究花岗岩单轴压缩损伤破坏过程中声发射时间空间分布的分形特征, 认为空间分布随应力增加是一个降维过程, 空间分维在 3~2 之间; 赵奎等<sup>[13]</sup>、丛宇等<sup>[14]</sup>分析砂岩单轴加载破坏过程中, Kaiser 点声发射信号关联分维数小于其相邻点。

现有声发射研究多集中于受压、张拉、剪切等单一应力路径条件下应力、应变与声发射参数间的关系, 对同源地同批次同岩石破坏过程中应力路径变化对声发射时间特征的影响仍需要进一步研究。因此本文开展不同路径大理岩加卸荷试验, 讨论不同加、卸荷路径以及不同围压下大理岩声发射特征的差异, 尤其是相对时间尺度上的变化特征, 并且采用分形理论量化路径对破坏过程中声发射特征的影响, 以此探讨岩石的破坏前兆, 为进一步研究岩石破坏机理提供依据。

## 1 试验概况

室内试验在 MTS815.02 型电液伺服岩石力学试验机上完成。试验用岩样同批次取自河南驻马店侵入岩体接触变质带上的大理岩, 主要化学成分为  $\text{CaCO}_3$ , 质地细腻光滑, 呈浅红色, 颗粒细小均匀, 粒径一般在 0.05~0.20 mm。按照工程岩体试验方法标准, 在实验室内将大理岩岩样加工成直径 50 mm, 高 100 mm 的圆柱体, 并对试样两端面仔细研磨, 不平行度在土 0.3%。试验前为进一步消除试样自身宏观结构对试验

结果的影响, 对加工后试样进行处理: ①肉眼观察, 剔除可能含有节理、软弱面的试样; ②波速测试, 剔除波速离散较大(保持波速在 4000 m/s 附近)的试样。

不同应力路径室内试验的详细方案如下:

### (1) 单轴加荷试验

以位移速度 0.003 mm/s 施加轴向应力至岩样破坏。

### (2) 常规三轴加荷试验

按静水压力条件施加围压至设定值 (10, 20, 30, 40 MPa); 保持围压不变, 以位移速度 0.003 mm/s 施加轴向应力至岩样破坏。

通过常规三轴路径试验得到相应围压下岩样的峰值承载力, 为后续的卸围压试验确定卸荷点提供依据。围绕工程开挖卸荷过程中, 切向应力降低, 而径向应力增加或者不变的应力调整过程, 设计卸围压试验方案。

### (3) 恒轴压、卸围压试验

按静水压力条件施加围压 (10, 20, 30, 40 MPa); 围压不变的同时, 提高轴向应力至岩样峰值承载力前 80% 处; 保持轴向应力不变的同时, 以速度 0.4 MPa/s 卸围压直到岩样破坏。

### (4) 加轴压、卸围压试验

按静水压力条件施加围压 (10, 20, 30, 40 MPa); 围压不变的同时, 提高轴向应力至岩样峰值承载力前 80% 处; 以位移速度 0.003 mm/s 施加轴向应力的同时, 以速度 0.4 MPa/s 卸围压直到岩样破坏。

在试验过程中利用 AE21C 声发射测试设备, 按照设定的间隔时间同步监测整个破坏过程中的声发射事件, 设定声发射的撞击时间为 100  $\mu\text{s}$ , 事件间隔时间为 10000  $\mu\text{s}$ ; 为尽可能减少噪音的干扰, 设定声发射增益为 26 dB, 门槛为 48 dB。

## 2 不同应力路径下的声发射特征

不同应力路径岩样的试验结果如表 1 所示。围压增加, 加荷路径试验岩样轴向应力差增加; 但围压由 10 MPa 增加到 40 MPa, 恒轴压、卸围压路径岩样的轴向应力差由 126.4 MPa 降低为 117.3 MPa。图 1 给出不同路径试验岩样的破坏照片。加、卸荷破坏试验后岩样均呈剪切破坏形态, 岩样破坏角由大到小路径分别为加轴压、卸围压路径, 恒轴压、卸围压路径, 单轴路径, 常规三轴路径。岩样破坏面粉末由多到少路径分别为常规三轴路径, 恒轴压、卸围压路径, 单轴路径, 加轴压、卸围压路径。

声发射 - 时间曲线要比声发射 - 应变曲线<sup>[4]</sup>更能反映出岩样在破坏过程中声发射演化规律, 因此也将应力 - 应变曲线转化为应力 - 时间曲线对比分析。

表 1 不同应力路径岩样振铃计数率

Table 1 Ring count rates of samples under different stress paths

应力路径	围压 /MPa	峰值应力差 /MPa	卸荷处时间 /s	卸荷处计数率 /(次·s <sup>-1</sup> )	峰值处时间 /s	峰值处计数率 /(次·s <sup>-1</sup> )	破坏处时间 /s	破坏处计数率 /(次·s <sup>-1</sup> )	峰值与破坏时间差 /s	平静期时间/s
单轴	0	79.9	—	—	103.2	1266	105.2	10033	2	2
常规三轴	10	100.9	—	—	104.1	141	118.5	214	14.4	8.1
	20	113.0	—	—	105.1	258	148.4	117	43.3	15.3
	30	119.9	—	—	113.1	87	158.6	111	45.5	18.5
	40	129.7	—	—	121.1	46	178	111	56.7	25.6
	10	126.4	110.5	145	175.1	280	178.2	11232	3.1	3.1
恒轴压、卸围压	20	122.3	141.2	128	187.3	310	188.1	13042	0.8	0.8
	30	119.1	171.3	52	195.8	6743	195.9	13546	0.1	0.1
	40	117.3	199.1	13	302.2	14490	302.2	14490	0	0
	10	96.0	99.2	12	128.0	14	130.8	198	2.8	2.1
加轴压、卸围压	20	98.3	109.2	15	138.4	15	167.3	38	28.9	6.3
	30	97.6	120.2	311	144.9	302	188.7	1007	43.8	7.5
	40	111.1	125.2	117	154.8	140	215.7	753	60.9	8.4

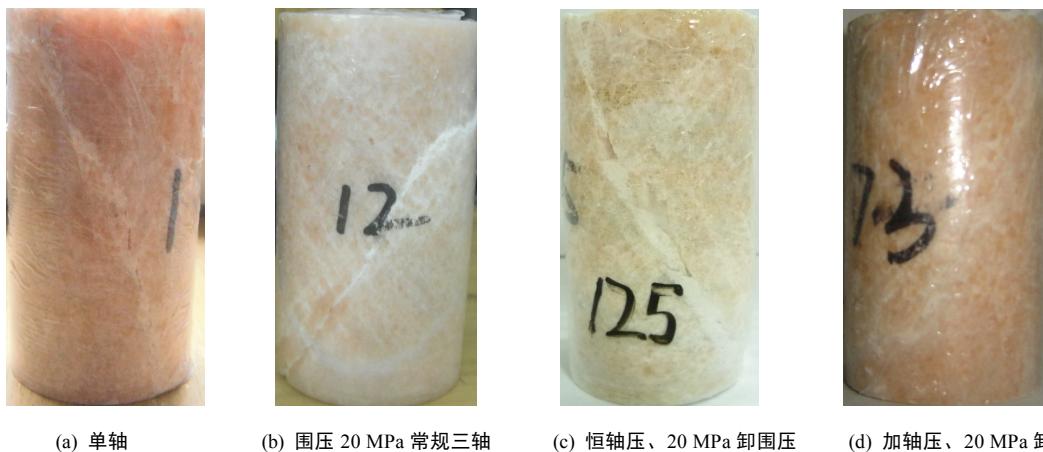


图 1 岩样不同路径试验试样破坏图

Fig. 1 Photos of rock failure under different stress paths

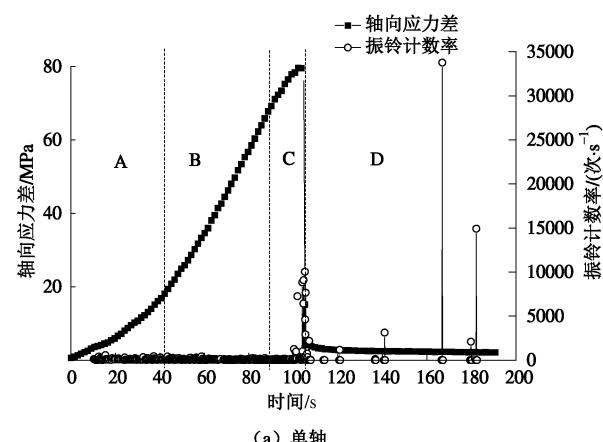
## 2.1 加荷破坏路径

图 2 分别为单轴加荷路径与围压 20 MPa 时常规三轴路径时岩样的轴向应力差 - 时间 - 振铃计数率曲线, 而图 3 则为对应的累计振铃计数率。

图 2,3 中的轴向应力差 - 时间演化曲线大致经历初始压密阶段 (区域 A)、弹性阶段 (区域 B)、屈服阶段 (区域 C)、残余阶段 (区域 D), 据此详细分析对应的声发射事件特征。

区域 A, 声发射事件来自于原生闭合过程或闭合后粗糙面的咬合, 但能量相对较低, 单轴应力路径下 (图 2 (a)) 岩样在峰值轴向应力的 6.8% 处, 时间 15.5 s 左右, 声发射事件计数率个别达 564 次/s; 并且闭合完成后事件计数率数会有一定程度的减少, 声发射事件

计数率在 200 次/s 左右。常规三轴路径下 (图 2 (b)) 岩样处于静水压力状态, 由 27.3 s 的 97 次/s 降低为 30 次/s 左右。



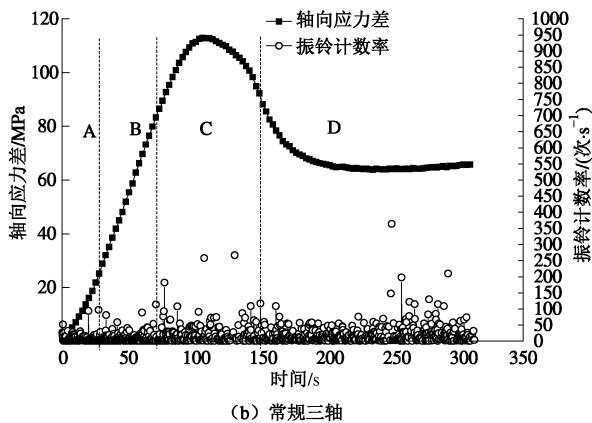


图 2 岩样加载路径下轴向应力差 - 时间 - 振铃计数率

Fig. 2 Axial stress deviation-time-ring count rate of samples under loading paths

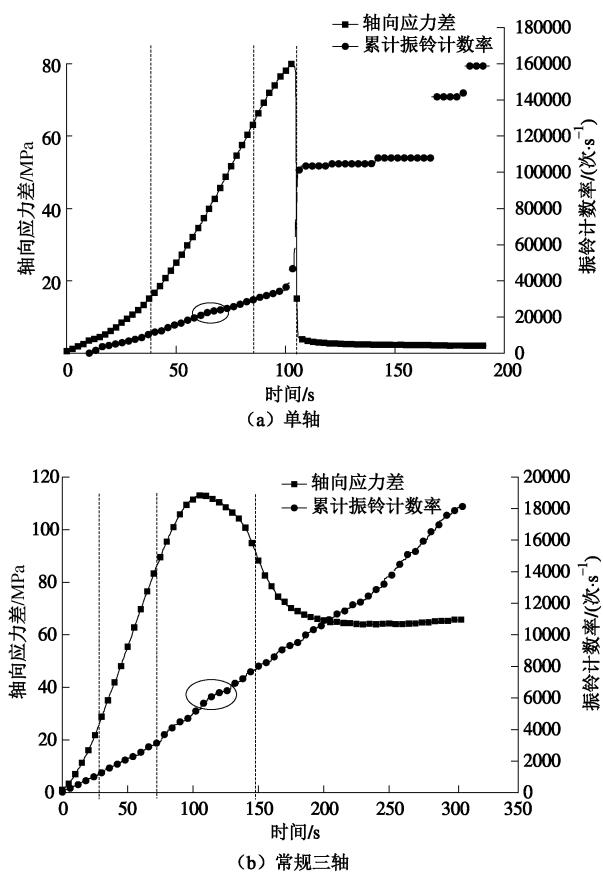


图 3 岩样加载路径下轴向应力差 - 时间 - 累计振铃计数率

Fig. 3 Axial stress deviation-time-cumulative ring count rate of samples under loading paths

单轴应力路径下(图 3 (a))岩样的压密阶段累计振铃计数率增长率为 16.9 s 附近由高转低。常规三轴路径下(图 3 (b))岩样的累计振铃计数率基本线性增长。

区域 B, 单轴应力路径下(图 2 (a))岩样处于相对稳定的变形过程, 内部没有明显的微裂隙产生, 产生的声发射事件与压密阶段相比微微降低, 峰值应

力的 46.8%, 时间 62.3 s 后, 计数率基本维持在 70 次/s 附近; 常规三轴路径下(图 2 (b))岩样此阶段保持在 40 次/s 左右, 略高于压密阶段, 表明岩样内部微裂隙在围压作用下变形更加缓慢。

单轴应力路径下(图 3 (a))岩样的弹性阶段累计振铃计数率增长率基本呈线性, 但高于压密阶段后期; 而常规三轴路径下(图 3 (b))岩样的累计振铃计数率基本保持与压密阶段相同的增长速率。

区域 C, 单轴应力路径下(图 2 (a))岩样产生新的裂隙, 声发射事件开始逐渐活跃, 直至岩样贯通性破坏时出现计数率最大值。计数率由 89.7 s 处的 75 次/s 逐渐增加, 对应承载力峰值时为 1266 次/s, 至 105.2 s 岩样破坏时的最大值为 10033 次/s, 承载力峰值后振铃计数增大持续 3 s 左右。而常规三轴路径下(图 2 (b))岩样屈服阶段在围压作用下内部新裂隙的产生更加缓慢, 承载力峰值后声发射事件反而趋于平静, 直至岩样破坏。声发射事件计数率由 70.2 s 的 114 次/s 保持活跃至 111.4 s 时承载力峰值的 73 次/s, 逐渐降低为峰后的 27 次/s, 破坏时 148.4 s 出现计数率相对较大值 117 次/s。

累计振铃计数率在单轴应力路径下(图 3 (a))增长速率会有轻微的降低, 直至岩样破坏才会出现突发性的增长; 而图 3 (b) 中岩样的累计振铃计数率在承载力峰值前增长率增加, 在岩样破坏前同样会有轻微的降低。

区域 D, 岩样宏观滑移产生较多的声发射事件, 单轴路径岩样的极值高于常规三轴路径岩样, 但后者的整体声发射事件计数率高于前者。单轴路径岩样的累计振铃计数率基本呈梯级增长, 但常规三轴路径岩样近似呈线性增长。

## 2.2 加载破坏路径下围压的影响

结合表 1 可以得出: 单轴应力路径与常规三轴应力路径岩样临近破坏时区别明显: 围压增加了岩样的屈服应变的时间, 单轴路径为 2 s, 而常规三轴为 37 s 左右; 常规三轴路径岩样破坏时声发射计数率与单轴路径不同, 破坏前后计数率差别不大于 110 次/s, 临近破坏时, 事件计数率有明显的低声发射期, 不同于声发射平静期, 前者声发射计数率比较接近, 而后者则有明显平静期<sup>[3]</sup>区分, 这可以认为是常规三轴路径下岩样破坏的先兆: 围压改变岩样的受力状态, 延长裂隙的发展过程, 延迟岩样的破坏瞬间出现, 降低声发射事件振铃计数率, 从而为判断岩样破坏提供依据。围压由 10 MPa 增加到 40 MPa, 岩样常规三轴路径试验的声发射前兆“低声发射期”越明显, 由 8.1 s 增加为 25.6 s。

从累计振铃计数率来看, 单轴路径与常规三轴路径均基本呈线性增长, 而且均存在一个累计振铃计数率增长速率降低的拐点(不是转折式的拐点, 但增长速率的确降低), 如图3中所示的椭圆形标记区域, 拐点出现后计数率线性增长很短时间, 岩样即会发生破坏。累计振铃计数率曲线的拐点可以作为单轴与常规三轴路径试验的破坏前兆判据。

### 2.3 卸荷破坏路径

图4分别为围压20 MPa时恒轴压、卸围压路径与加轴压、卸围压路径时岩样的轴向应力差-时间-振铃计数率曲线, 而图5则为对应的累计振铃计数率。

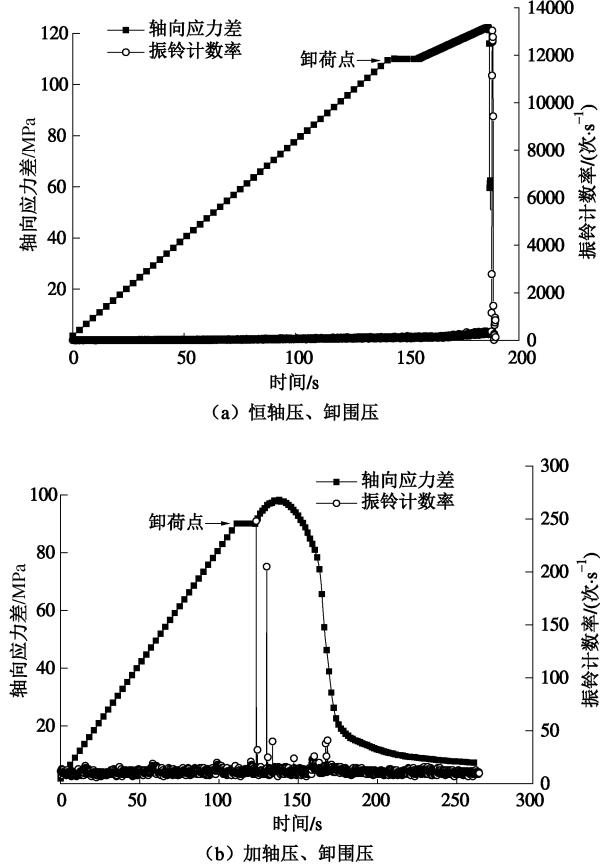


图4 岩样卸荷路径下轴向应力差-时间-振铃计数率

Fig. 4 Axial stress deviation-time-ring count rate of samples under unloading paths

恒轴压、卸围压路径下, 如图4(a), 卸荷点前振铃计数率逐渐增加, 而卸荷点处应力-时间曲线出现明显的转折, 计数率为128次/s左右, 岩样破坏前没有出现特别的前兆特征, 如单轴、常规三轴路径破坏前的“平静期”, 而是卸荷后持续14 s, 达到岩样极限承载时突然破坏, 187.3 s出现声发射事件计数率最大值13042次/s, 岩样的峰值应力差为122.3 MPa。

加轴压、卸围压路径下岩样(如图4(b))出现一段应力“平静期”持续12 s左右, 123.5 s附近应力差逐渐增大时, 岩样内部产生明显裂隙, 声发射事件突

然增加, 由“平静期”的17次/s左右增加为248次/s; 138.4 s达到岩样承载力峰值应力差98.3 MPa, 岩样声发射事件降低为15次/s, 岩样破坏时出现相对较大的声发射计数率38次/s, 并且破坏前出现短暂约6.3 s的声发射“平静期”。

恒轴压、卸围压应力路径下(图5(a))岩样的累计振铃计数率呈抛物型增长, 破坏时声发射计数率基本与抛物线平行式迅速增加; 而加轴压、卸围压路径下(图5(b))岩样仅在应力差“平静期”后增长率轻微增加, 总体来看累计振铃计数率基本呈线性增长。

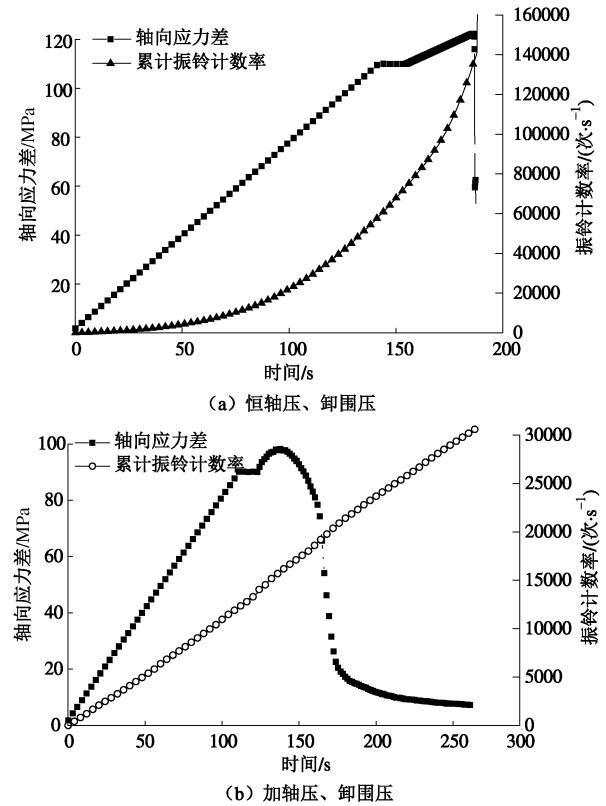


图5 岩样卸荷路径下轴向应力差-时间-累计振铃计数率

Fig. 5 Axial stress deviation-time-cumulative ring count rate of samples under unloading paths

### 2.4 卸荷破坏路径下围压的影响

结合表1, 从计数率曲线来看, 恒轴压、卸围压路径岩样在声发射计数率增长过程中突然破坏, 基本没有明显的破坏先兆; 围压增加, 破坏更加突然、剧烈, 对应的计数率由13042次/s增加为14490次/s。累计振铃计数率基本呈抛物线型增加, 破坏时增长速率接近抛物线的切线, 此可以作为低围压下岩样恒轴压、卸围压路径试验的破坏前兆判断, 而高围压下累计计数率则呈突发性增长, 规律性不明显。

从加轴压、卸围压岩样声发射计数率来看, 与常规三轴路径相同的地方在于均存在计数率“平静期”, 区别在于前者的“平静期”存在于计数率极值后的降

低区域, 而后者的“平静期”则在一段相近计数率后。围压由 20 MPa 增加为 40 MPa, “平静期”持续时间由 6.3 s 增加为 8.4 s, 峰值与破坏间的时间由 28.9 s 增加为 60.9 s, 破坏时的计数率由 38 次/s 增加为 753 次/s。

## 2.5 应力路径对声发射破坏前兆的影响

对比加载与卸荷应力路径: 常规三轴路径岩样破坏前后有明显声发射事件发生, 而恒轴压、卸围压路径会改变岩样的应力-时间曲线以及声发射演化规律。

不同应力路径特殊点的计数率统计见表 1, 定量研究应力路径对岩样声发射破坏前兆的影响。从表中可以看出, 岩样破坏峰后破坏由快到慢的路径顺序为恒轴压、卸围压, 加轴压、卸围压, 单轴, 常规三轴 (如表 1 中不同路径下岩样峰值与破坏间的时间差)。

不同的应力路径, 岩样的受力状态不同, 岩样内部裂隙产生、扩展规律也发生变化, 必然会引起破坏过程中的声发射计数率规律变化。试验过程中声发射计数率最大值并不一定出现在破坏处, 如图 2 的残余阶段与图 4 (b) 中的卸围压初始阶段。卸围压路径时围压对岩样破坏时的声发射计数率的增加程度影响更加明显, 如表 1 中破坏时的声发射计数率, 表明围压高时岩样卸围压破坏更加剧烈。

平均来看, 岩样破坏处的声发射计数率由大变小的应力路径为加轴压卸围压、恒轴压卸围压、单轴、常规三轴路径。而从表 1 中的平静期时间来看, 恒轴压、卸围压路径试验岩样不能采用“平静期”作为破坏前兆判据; 常规三轴与加轴压、卸围压路径可以采用, 并且围压增加, “平静期”的持续时间会有所增加。累计声发射计数率可以得到不同路径下计数率的增长速率, 加荷过程中增长曲线基本呈线性, 常规三轴路径的增长率要高于单轴压缩; 而卸荷后曲线增长速率明显增加。岩样峰值后至破坏段的计数率增长率由大变小路径分别为加轴压卸围压、恒轴压卸围压、单轴、常规三轴路径。

## 3 声发射强度分形维数计算与分析

### 3.1 分形维数计算过程

为进一步量化声发射破坏前兆, 对不同路径破坏过程中声发射特征量化, 而在时间序列分析中, 声发射计数率具有分形特征<sup>[7]</sup>。延迟坐标状态空间重构法可以充分显露时间序列中蕴藏的信息, 假定延迟坐标的维数  $m \geq 2d+1$ ,  $d$  是序列维数, 基于 G-P 算法进行计算<sup>[15]</sup>: 将试验过程中单个岩样的声发射强度序列作为研究对象, 对应为一个容量为  $n$  的序列集,

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad \text{。} \quad (1)$$

取序列中并列的  $m$  个数作为  $m$  维空间的第一个向量,

$$Y_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad \text{。} \quad (2)$$

将并列的  $m$  个数据后移一个数据, 再取  $m$  个数构成第二个向量,

$$Y_2 = \{x_2, x_3, \dots, x_{m+1}\} \quad \text{。} \quad (3)$$

同理, 构成  $N = n - m + 1$  个向量, 依据 Takens 原理, 从序列空间相互关联的角度计算序列的关联维数, 即空间中两点间距离小于  $r$  的概率的累积分布函数  $W(r)$ :

$$W(r) = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i,j}^N u(r - |Y_i - Y_j|) \quad , \quad (4)$$

式中,  $u$  为 Heaviside 函数,

$$u(r - |Y_i - Y_j|) = \begin{cases} 1 & (u(r - |Y_i - Y_j|) \geq 0) \\ 0 & (u(r - |Y_i - Y_j|) < 0) \end{cases} \quad (5)$$

而  $|Y_i - Y_j|$  为空间相点  $Y_i$  与  $Y_j$  间的距离,  $r$  为量测尺度, 通过对数据点  $(\lg W(r), \lg r)$  直线拟合, 得到斜率:

$$D(m) = \lg W(r) / \lg r \quad , \quad (6)$$

即为声发射强度序列在量测尺度范围内的分形特征。嵌入维数  $m$  增加, 直线斜率  $D$  应逐渐收敛为一个稳定值, 否则序列集为随机序列。当声发射强度序列一定时, 分形维数越小, 序列内强度分布范围越窄, 强度值比较接近。

### 3.2 分形维数随应力比变化分析

编制程序计算大理岩岩样破坏过程中的声发射分形维数, 岩样通常在承载力峰值附近即发生破坏, 因而以峰值应力差为基准, 设应力比 (轴向应力差与峰值应力差的比值) 为 1, 见表 2。

表 2 给出不同应力路径下岩样随应力比变化的分维值, 而图 6 则对表 2 中的结果曲线化。对比表 2 与图 6 (a)、与图 6 (b),  $0.2 < \text{应力比} < 0.4$  时, 岩样由压密阶段向弹性阶段转换, 单轴应力路径下岩样分维数有明显的增高趋势, 表明岩样内部原有裂隙闭合且处于新裂纹扩展的阶段; 而常规三轴、卸围压路径等岩样受到围压的影响, 分维数增加速率明显减小, 甚至出现降低的趋势。 $0.4 < \text{应力比} < 0.8$  时, 常规三轴路径岩样内部岩样裂纹发展缓慢, 分维数先增加后减小, 而其余路径岩样由弹性阶段进入塑性阶段, 裂纹集聚扩展明显, 分维数先降低后增加。 $0.8 < \text{应力比} < 1.0$  时, 岩样承载力接近峰值, 岩样内部部分裂纹贯通逐渐形成剪切带, 破裂面初步形成引发岩样脆性破坏, 不同路径岩样分维数均迅速降低, 此阶段可作为不同路径下岩样声发射的破坏前兆。岩样分维数则出现降低的

表2 岩样不同应力比声发射分形维数

Table 2 Fractal values of AE of samples under different stress ratios

应力比	单轴路径					常规三轴路径				恒轴压、卸围压路径				加轴压、卸围压路径			
	0 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa
0.2	0.32	1.46	0.88	1.38	1.27	0.60	0.89	0.67	0.53	1.15	0.67	0.67	1.21				
0.4	0.97	1.30	0.94	1.18	1.17	0.62	0.60	0.67	0.93	1.18	0.67	0.67	0.87				
0.6	0.80	1.18	0.97	1.27	1.29	0.54	0.45	0.63	1.06	0.96	0.63	0.63	1.13				
0.8	0.99	1.09	0.76	1.22	1.26	0.68	0.51	0.83	1.00	1.15	0.83	0.83	1.13				
1.0	0.28	1.35	0.65	1.49	1.36	0.29	0.32	0.25	0.95	1.21	0.25	0.25	1.17				

表3 岩样不同时间比声发射分形维数

Table 3 Fractal values of AE of samples under different time ratios

时间比	单轴路径					常规三轴路径				恒轴压、卸围压路径				加轴压、卸围压路径			
	0 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa
0.2	0.17	1.31	0.90	1.31	1.31	0.76	0.67	0.67	0.54	1.18	0.69	0.67	1.04				
0.4	0.77	1.25	1.03	1.33	1.27	0.52	0.46	0.67	1.09	1.21	0.63	0.67	1.18				
0.6	1.10	1.29	0.63	1.35	1.38	0.49	0.40	0.63	0.98	1.11	0.14	0.63	1.03				
0.8	0.75	1.15	0.63	1.30	1.38	0.61	0.60	0.83	0.90	1.30	0.24	0.83	0.70				
1.0	0.18	1.24	0.49	1.32	1.38	0.63	0.05	0.25	0.00	1.08	0.61	0.25	0.28				

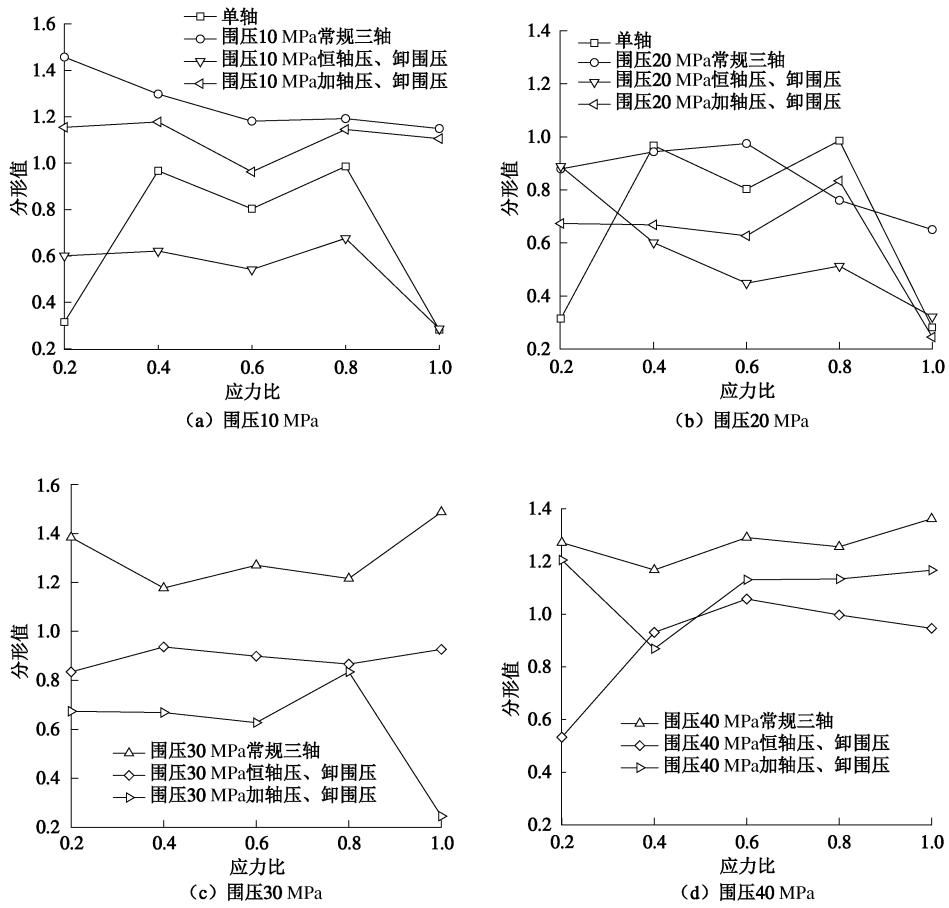


图6 不同路径岩样声发射分形维数(应力比)

Fig. 6 Fractal values of AE under different stress paths (stress ratio)

趋势, 单轴路径下岩样降低速率最高, 加轴压、卸围压路径次之, 而常规三轴路径最小。

围压增加, 如图6(c)与图6(d), 0.4<应力比

<0.8, 岩样内部裂隙产生、扩展与贯通缓慢, 卸围压路径岩样趋于常规三轴路径岩样演化趋势, 分维数先增加后减小。0.8<应力比<1.0时, 围压增加会降低不

同应力比间声发射特征的差异,同样也会改变岩样破坏前分维数降低的规律。围压较高时(30, 40 MPa)岩样声发射特征与应力比的关系并不明显。

### 3.3 分形维数随时间比变化分析

时间贯穿整个加卸荷过程,尝试以岩样破坏时的时间为基准,设时间比(加载时间与破坏点时间的比值)为1,见表3。

表3给出不同应力路径下岩样随时间比变化的分维值,而图7则对表3中的结果曲线化。结合表3与图7(a)、(b),相比分形维数随应力比的变化,时间比<0.6时,单轴路径岩样分维数呈增大趋势,而时间比>0.6时分维数迅速降低。0.4<时间比<0.8时,常规三轴、卸围压路径岩样分维数先减小后增加。时间比>0.8,常规三轴与恒轴压、卸围压路径岩样分维数呈降低趋势,而加轴压、卸围压路径岩样则增加。

对比图7(a)、(b)与图7(c)、(d),不同时间比下常规三轴路径岩样分维数基本接近;而时间比>0.4,卸围压路径岩样分维数迅速下降,也就是说高围压(30, 40 MPa)采用时间比有利于得到岩样声发射的破坏前兆信息。高、低围压的分界量值为下一步研究的重点。

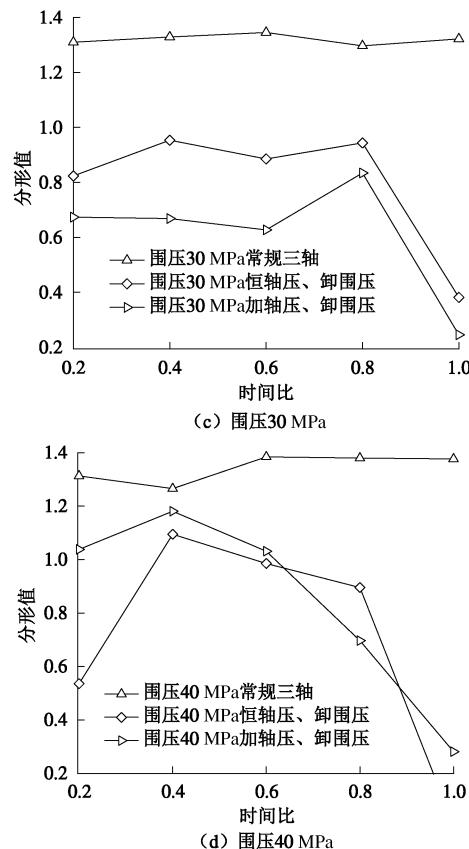
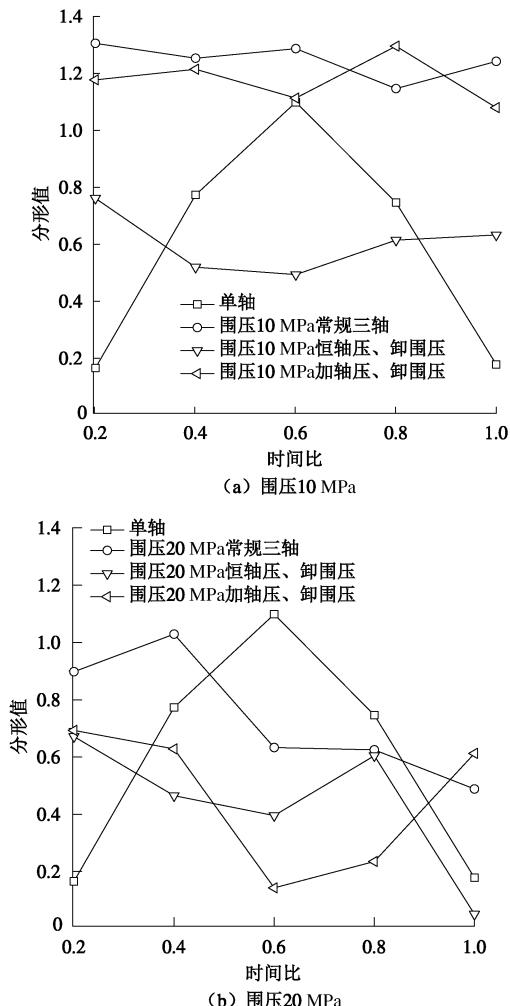


图7 不同路径岩样声发射分形维数(时间比)

Fig. 7 Fractal values of AE under different stress paths (time ratio)

## 4 结 论

(1)试验过程中声发射计数率最大值不一定出现在岩样破坏处,岩样卸荷点处也可能出现最大值。岩样破坏处的声发射计数率由大变小的应力路径为加轴压卸围压、恒轴压卸围压、单轴、常规三轴路径。岩样峰值后至破坏段的累计计数率增长率由大变小路径分别为加轴压卸围压、恒轴压卸围压、单轴、常规三轴路径。

(2)常规三轴路径下岩样临近破坏时,声发射事件计数率存在明显的“低声发射期”,围压越大,声发射前兆“低声发射期”越明显。常规三轴路径累计振铃计数率呈线性增长,存在一个增长速率降低的拐点,拐点出现后计数率线性增长很短时间,岩样即会发生破坏。

(3)恒轴压、卸围压路径岩样在声发射计数率增长过程中突然破坏,不能采用“平静期”作为破坏前兆判据,围压对“平静期”无明显影响;而低围压下累计振铃计数率基本呈抛物线型增加,破坏时增长速率近似为抛物线的切线。加轴压、卸围压岩样破坏前一段相近计数率后存在声发射计数率的“平静期”,围压增加,“平静期”持续时间增加,岩样破坏产生的计数率越高。

(4)岩样临近破坏前声发射分维数降低的特征可

以作为岩样的破坏前兆分析, 在低围压应力(10, 20 MPa)环境下应力比 $>0.8$  岩样声发射分维数会降低, 而高围压应力(30, 40 MPa)环境下时间比 $<0.4$  时分维数即会降低。

### 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. (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. (in Chinese))
- [2] MANSUROV V A. Acoustic emission from failing rock behaviour[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1994, 27(3): 173 - 182.
- [3] 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 Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies of acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499 - 2503. (in Chinese))
- [4] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 17 - 21. (FU Xiao-min. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology), 2005, 32(1): 17 - 21. (in Chinese))
- [5] 苏承东, 高保彬, 南华, 等. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 757 - 766. (SU Cheng-dong, GAO Bao-bin, NAN Hua, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics during deformation and failure processes of coal samples under stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 757 - 766. (in Chinese))
- [6] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环载荷下大试件岩石破坏声发射试验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3621 - 3628. (ZHANG Hui-hui, YAN Yu-ding, YU Huai-zhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load—fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3621 - 3628. (in Chinese))
- [7] 谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (XIE He-ping. Introduction to fractal rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [8] 朱传镇, 安镇文, 王林瑛, 等. 地震分形特征及其在地震预测中的意义[J]. 地震研究, 1991, 14(1): 73 - 88. (ZHU Chuan-zhen, AN Zhen-wen, WANG Lin-ying, et al. Fractal features of earthquakes and its significance in earthquakes prediction[J]. Journal of Seismological Research, 1991, 14(1): 73 - 88. (in Chinese))
- [9] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕. 岩石破坏声发射强度分析特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3512 - 3516. (YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan. Study on strength fractal features of acoustic emission in process of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3512 - 3516. (in Chinese))
- [10] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分析特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3383 - 3390. (YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3383 - 3390. (in Chinese))
- [11] 梁忠雨, 高峰, 蔺金太, 等. 单轴下岩石声发射参数的分析特征[J]. 力学与实践, 2009, 31(1): 43 - 46. (LIANG Zhong-yu, GAO Feng, LIN Jin-tai, et al. Fractal analysis of the process parameter of rock's acoustic emission under uniaxial compression[J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(1): 43 - 46. (in Chinese))
- [12] 裴建良, 刘建峰, 张茹, 等. 单轴压缩条件下花岗岩声发射事件空间分布的分维特征研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(6): 51 - 55. (PEI Jian-liang, LIU Jian-feng, ZHANG Ru, et al. Fractal study on spatial distribution of acoustic emission events of granite specimens under uniaxial compression[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(6): 51 - 55. (in Chinese))
- [13] 赵奎, 王更峰, 王晓军, 等. 岩石声发射 Kaiser 点信号频带能量分布和分形特征研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3082 - 3088. (ZHAO Kui, WANG Gen-feng, WANG Xia-jun, et al. Research on energy distributions and fractal characteristics of Kaiser signal of acoustic emission in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3082 - 3088. (in Chinese))
- [14] 丛宇, 王在泉, 郑颖人, 等. 卸围压路径下大理岩破坏过程的声发射特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(1): 97 - 104. (CONG Yu, WANG Zai-quan, ZHENG Ying-ren, et al. Experimental study on acoustic emission features of marbles during unloading failure process[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(1): 97 - 104. (in Chinese))
- [15] 吕金虎. 混沌时间序列分析及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (LÜ Jin-hu. Chaos time series analysis and application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese))