

# 预制孔岩石破坏过程中的声发射时空演化特征研究

刘建坡, 徐世达, 李元辉, 东龙宾, 魏 炯

(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 选取粗粒花岗岩和细粒砂岩, 通过预制方孔和圆孔, 开展单轴加载条件下岩石破坏声发射试验。采用单纯形定位算法, 对岩石破裂过程中的声发射时空演化规律进行研究, 并对声发射活动特征、能量释放率和空间相关长度进行分析。研究表明: 对于预制孔间距与预制孔尺寸相同的试件, 声发射事件主要在岩石中部群集, 试件以中部剪切破坏为主, 声发射三维定位事件直观反映裂纹初始、扩展直至贯通的动态演化过程; 在整个加载过程中, 颗粒较粗且大小不均的花岗岩试件声发射活动性较强, 颗粒较细且均匀的砂岩试件声发射活动性在加载后期才开始增强; 岩石破坏前, 小尺度裂纹合并贯通形成大尺度裂纹, 声发射率下降, 能量释放率增强, 出现声发射信号“平静”而能量释放“不平静”的现象; 岩石在受载过程中, 应力场通过迁移和重新分布逐步建立起长程相关性; 岩石破坏前, 空间相关长度显著增加, 且在岩石破坏时达到最大值。

**关键词:** 岩石力学; 岩石破坏; 预制孔; 声发射; 三维定位; 空间相关长度

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)12 - 2538 - 10

## STUDIES OF AE TIME-SPACE EVOLUTION CHARACTERISTICS DURING FAILURE PROCESS OF ROCK SPECIMENS WITH PREFABRICATED HOLES

LIU Jianpo, XU Shida, LI Yuanhui, DONG Longbin, WEI Jiong

(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

**Abstract:** Acoustic emission(AE) technique was employed to measure the AE signals of coarse-grained granite and fine-grained sandstone with prefabricated square holes or circular holes under uniaxial compression test. AE time-space evolution characteristics during failure process were studied based on simplex locating algorithm. AE activities characteristics, AE energy release rate and spatial correlation length were also analyzed. The results show that the three-dimensional location of AE events directly reflects the process of initiation, propagation and evolution of microcracks and the stress redistribution within the specimens. For specimens that the distance of prefabricated holes is same with the prefabricated hole size, located AE event are clustered in the central of specimens; and shear failure occurs in the center area of specimens. The AE activities of granite with coarse and heterogeneous grains isn't much stronger during the whole loading phase; while the AE activates of sandstone with thin and homogeneous grains isn't enhanced until the later period of loading. Before the failure of rock, microcracks coalescence into large scale cracks, which result in AE activates weaken and AE energy release rate increases; during this phase, many AE signals are superimposing, which induces the AE quiet period and blank

**收稿日期:** 2012 - 05 - 07; **修回日期:** 2012 - 08 - 31

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51204030); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110301006, N110501001)

**作者简介:** 刘建坡(1982 - ), 男, 博士, 2006年毕业于东北大学采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石声发射与矿山地压微震监测技术方面的教学与研究工作。E-mail: liujianpo@mail.neu.edu.cn

area of located AE events occurred. During rock fracture process, long-range correlations are established by redistribution of stress field, which cause the spatial correlation length obviously increasing before rock failure and reach its maximum value when rock failure.

**Key words:** rock mechanics; rock failure; prefabricated hole; acoustic emission(AE); 3D location; spatial correlation length

## 1 引言

声发射(acoustic emission, AE)是材料在变形破坏过程中伴随着局部微破裂的出现而产生的应力波<sup>[1]</sup>,它包含了岩石在破裂过程中微裂纹时空活动的丰富信息。采用声发射定位技术,能连续、实时地监测材料内部微裂纹的产生和扩展,揭示材料的变形和破坏过程,得到了国内外岩石力学工作者的普遍重视,在岩石力学基础试验研究和现场监测应用领域得到了广泛应用。矿山的采场冒落、片帮、岩爆等地压灾害的发生,本质上是岩体内部裂纹扩展贯通直至发生宏观破坏的过程。因此,开展岩石声发射试验研究,观测岩石内部微裂纹时空演化规律,对于岩石失稳破坏机制、矿山地压灾害微震监测技术的应用和地震预测预报研究无疑是十分有意义的工作。

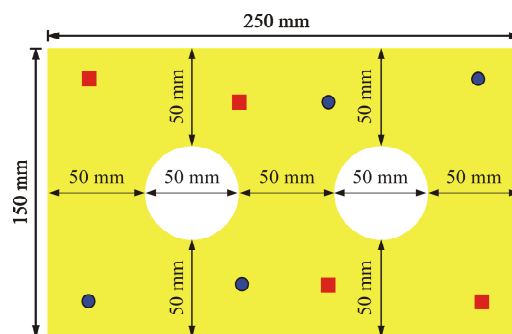
岩石声发射定位的研究始于 20 世纪 60 年代后期, C. H. Scholz<sup>[2]</sup>利用声发射 S 波的初动到时差,采用最小二乘法对 22 个较大 AE 事件进行了定位,开创了多通道拟合声发射源定位算法。随后,国内外学者针对声发射定位开展了广泛的研究。Geiger 算法<sup>[3]</sup>通过迭代计算使时间残值最小化,单纯形法<sup>[4]</sup>无需计算走时导数,均得到了广泛应用; X. L. Lei 等<sup>[5]</sup>采用地震学中的联合反演法,对岩石三维波速场进行了反演,进而实现了声发射事件定位;胡新亮等<sup>[6]</sup>通过含复杂结构试样的试验研究,提出了声发射相对定位算法,该方法对于非完整试样声发射定位具有重要意义;陈炳瑞等<sup>[7]</sup>在粒子群算法搜索技术的基础上提出了岩石微震源分层定位法;许江等<sup>[8]</sup>对声发射定位的影响因素进行了分析,包括端面减摩措施、加载方式和加载控制方式、探头数量、加载历史等。在声发射定位的基础上,对于岩石微裂纹时空演化机制的研究也取得许多有益成果。X. L. Lei 和 S. Takashi<sup>[9]</sup>通过对声发射  $b$  值、分维数、相关长度的研究,对岩石破坏前兆特征进行了探讨; S. H. Chang 和 C. I. Lee<sup>[10]</sup>采用矩张量理论分析了岩石加载过程中微裂纹破坏模式的演化规律,指出三轴加载条件下岩石内部微裂纹逐渐由张开型向剪切

型演变;赵兴东等<sup>[11-13]</sup>对不同加载条件下微裂纹的时空演化规律、 $b$  值分形特征和相关长度进行了较深入的研究;左建平<sup>[14]</sup>采用声发射定位技术,对煤岩组合体破坏机制进行了研究;在声发射技术的工程应用方面, M. Cai 等<sup>[15]</sup>将声发射技术应用于地下硐室岩体稳定性监测,陈炳瑞等<sup>[16]</sup>将声发射技术应用于深埋地下隧道监测,均取得了良好的效果。

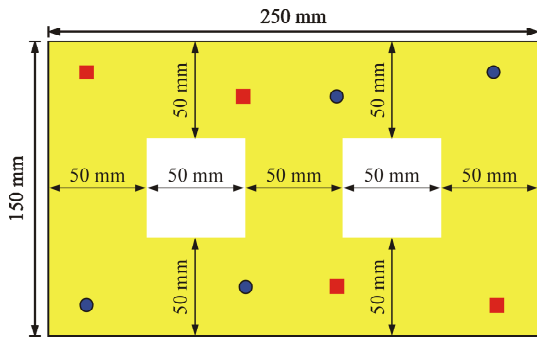
前人采用声发射定位技术研究岩石破坏机制多集中于完整试件或预制裂纹试件。在实际矿山生产中,矿房的回采会对矿柱的稳定性造成较大程度的开采扰动;另外,在公路、隧道工程中隧道的施工也会对岩体的稳定性造成影响。鉴于此,本文采用单纯形定位算法,选取粗粒花岗岩和细粒砂岩,对预制孔试件破坏过程中的声发射时空演化规律和破裂机制进行研究,并对声发射活动特征、能量释放率和空间相关长度进行了分析,为工程岩体稳定性监测提供依据。

## 2 试件制备及试验过程

本文采用粗粒花岗岩和细粒砂岩 2 种脆性岩石开展研究。由于声发射定位是采用 P 波到时残差进行定位计算, P 波到达的时间差越大,在定位迭代计算中产生的误差越小。因此将岩样加工成 250 mm×50 mm×150 mm(长×宽×高)的长方体试件,并在试件中切割 2 个  $\phi 50$  mm 的圆孔或 50 mm×50 mm 的方孔(见图 1)。试验前,每个试件在其完整区域进行 6 次 P 波波速测试,并取平均值进行声发射定位计算,波速测试结果见表 1。



(a) 预制方孔试件



(b) 预制圆孔试件

● 正面传感器      ■ 背面传感器

图1 预制孔试件传感器布置方式

Fig.1 Sensor layout of specimens with prefabricated holes

表1 试件波速测试结果

Table 1 Test results of wave velocity of specimens

岩性	试件编号	波速/(km · s <sup>-1</sup> )					
粗粒花岗岩 (方孔)	GF1	3.71	3.70	3.72	3.70	3.75	3.75
	GF2	3.82	3.82	3.80	3.72	3.75	3.78
细粒砂岩 (方孔)	SF1	2.72	2.74	2.73	2.73	2.72	2.68
	SF2	2.61	2.60	2.60	2.63	2.64	2.63
细粒砂岩 (圆孔)	SY1	2.78	2.78	2.77	2.71	2.72	2.70
	SY2	2.67	2.68	2.66	2.66	2.69	2.69

本试验采用 8 个 Nano30 型传感器进行声发射信号的采集, 该传感器的频率响应范围为 125~750 kHz; 每个传感器均配置一个前置放大器, 型号为 1220A - AST。试验过程中, 采用橡胶带把传感器固定在岩石侧面。为保证声发射信号能被传感器良好接收, 在传感器与试件的接触部位涂抹凡士林进行耦合。同时, 为减弱噪音干扰, 在试件和压头之间用塑料片隔开。传感器的布置方式见图 1。

本试验所用的加载系统为伺服控制岩石刚度试验机(最大试验力 3 000 kN), 压力机能实时采集载荷和位移数据, 加载方式采用单轴加载, 加载速率 20 kN/min。试验采用的声发射监测系统为美国物理声学公司(physical acoustic corporation, PAC)生产的 Sensor highway - II(SH - II)型声发射系统, 该系统采用 18 位 A/D 转换技术, 能够实时采集声发射瞬态波形、同步提取声发射信号特征, 既可用于声发射试验研究, 也可以用于现场岩体稳定性监测, 并能实时远程控制与数据传输。本试验中设定声发射测试分析系统的主放为 40 dB, 门槛值为 45 dB, 采样频率为 2.5 MHz, 采样长度 8 k, 以期获得高精度声发射到达时间, 试验系统如图 2 所示。

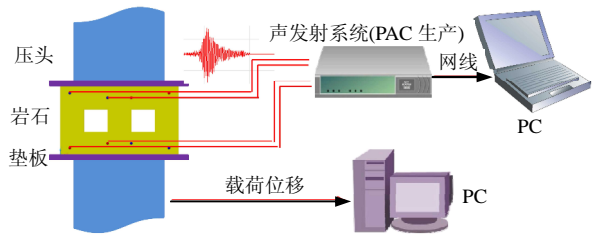


图2 声发射试验系统示意图

Fig.2 Arrangement of AE experimental instruments

### 3 声发射定位算法及空间相关长度

#### 3.1 单纯形定位算法

本文采用笔者编写的单纯形法计算程序进行声发射事件定位计算。声发射算法的定位精度较高, 但对事件的定位条件相对比较严格。对于  $n$  维方程组, 需要建立不在同一超平面上的具有  $n+1$  个顶点的单纯形, 例如求解二维方程的单纯形为三角形, 求解三维方程的单纯形为四面体。采用单纯形算法计算声发射位置的原理如下: 假设声发射源中心坐标为  $Z(x_0, y_0, z_0)$ , 首先, 给定 4 个初始迭代点  $A, B, C, W$ , 构成三棱锥的 4 个顶点(见图 3)。对每个顶点进行误差计算, 假设误差最小的点为点  $B$ , 误差最大的点为点  $W$ , 然后计算点  $W$  关于点  $A, B, C$  三点构成平面(或以三棱锥重心为对称中心)的对称点  $R$ 、扩展点  $E$  和收缩点  $D$ , 并计算  $W, R, E, D$  的误差进行比较判断, 保留满足误差要求的点与点  $A, B, C$  构成新的三棱锥; 当  $W, R, E, D$  的误差都不满足要求时, 将点  $W, A, C$  以一定步长向点  $B$  收缩(点  $S$ ), 构成新的三棱锥。重复这个过程, 单纯形能改变搜寻方向, 并逐步缩小, 最终“塌”向包含  $Z(x_0, y_0, z_0)$  的区域。当单纯形的尺寸达到预定最小值或误差小于一定值时, 单纯形迭代停止。

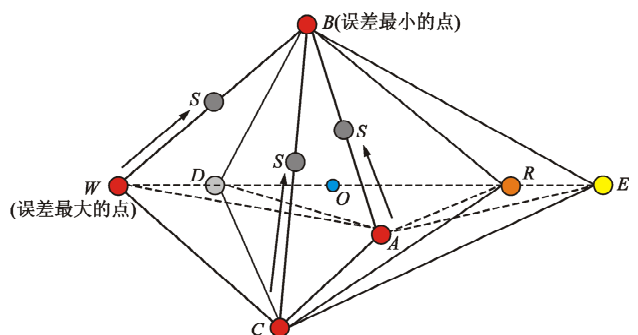


图3 单纯形定位法原理示意图

Fig.3 Sketch of simplex location principle

声发射定位过程中的终止准则是使计算所得到的声发射信号到达时间与传感器实际接收到信号时间的时差最小。对于每次迭代结果，都可以得到信号到达传感器的一组计算时间，将这组计算时间与系统实际检测到的信号时间进行对比，就可以得到一个误差值，据此可以判断定位结果是否满足精度要求。本文采用绝对值偏差法来估算声发射事件的定位精度，如下式所示：

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|T_{oi} - T_{ci}\| \quad (1)$$

式中： $N$  为接收到信号的传感器个数， $T_{oi}$  为第  $i$  个传感器检测到的信号到达时间， $T_{ci}$  为由迭代点计算出的信号到达第  $i$  个传感器的时间。

由于预制孔的存在，弹性波在预制孔周围会发生折射和反射等现象，传感器接收到信号的时间会发生变化，进而影响定位精度。经过波速测试发现，含预制孔区域的波速比完整区域的波速约小 5%。因此，在进行声发射定位计算时，删除较晚到达的信号，采用最先接收到信号的 4 个传感器参与计算，可以较好地减小预制孔的存在对于声发射定位精度的影响。本文采用人工定点敲击信号试验分析了上述算法的定位精度，将钢钉沿导管自由下落撞击岩石表面，在图 4(a)所示的 3 个位置各撞击 30 次。通过定位结果与实际撞击位置对比分析，发现绝大多数撞击的定位误差都在 10 mm 以内，说明本文所采用的定位算法可以满足声发射定位研究的需要。

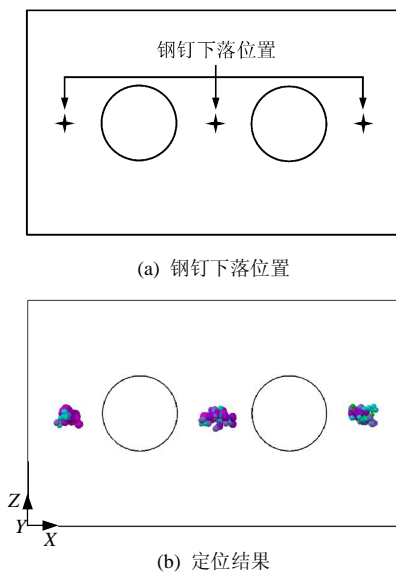


图 4 钢钉信号试验及定位结果  
Fig.4 Location result of steel nail test

### 3.2 空间相关长度

相关长度是定量描述岩石内部应力场和微裂纹相互作用范围的一种指标<sup>[17]</sup>。如果系统接近临界状态，那么应力场将会呈现以幂次律为特征的长程相关性。空间相关长度越大，说明应力场的相互作用越强。G. Zöller 等<sup>[17]</sup>通过对美国加利福尼亚州 32°~40°N 范围内的 9 次  $M \geq 6.5$  级地震研究发现，相关长度的加速增长现象可作为一个地区中强地震的预测指标。Y. H. Li 等<sup>[13, 18-19]</sup>通过地震实例分析和室内试验研究，也验证了这一结论。

相关长度采用  $\xi$  表示，定义<sup>[20]</sup>如下：

$$\xi(t) \sim a + b(t_f - t)^{-k} \quad (2)$$

式中： $t_f$  为岩石发生失稳破坏的破坏时间； $a, b, k$  均为拟合参数。

本文采用 G. Zöller 等<sup>[17, 21-22]</sup>所介绍的单键群算法(single-link cluster, SLC)计算相关长度。单键群算法的本质是使得每个声发射事件与其最近的事件相连，形成单键群构架，通过分析该构架中键长的分布情况得到相关长度的大小。马延路和周惠兰<sup>[23]</sup>通过研究中国地震时空分布特征发现，单键群构架中的累积键长符合 Weibull 分布，即

$$\omega(l) = \frac{L}{L_0} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{l}{l_0}\right)^d\right] \quad (3)$$

式中： $L$  为键长小于  $l$  的键的累积长度和， $L_0$  为所有键的长度总和。

本文在相关长度  $\xi$  的选取时，采用 G. Zöller 等<sup>[17]</sup>的方法( $\omega(\xi) = 0.5$ )来定义空间相关长度  $\xi$ 。为研究相关长度随加载过程的变化规律，选取一定时间内的声发射事件计算相关长度，并以固定的时间间隔  $\Delta t$  作为滑动窗口，重复进行计算，如图 5 所示。

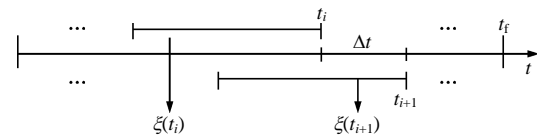


图 5 空间相关长度计算滑动窗口示意图  
Fig.5 Sketch of sliding windows for calculating spatial correlation length

## 4 岩石破裂声发射空间演化规律

研究声发射空间演化规律首先要实现定位事件的三维显示。本文在声发射事件定位计算后，通过声发射信号的能量累加估算出事件的相对能级，并采用 AutoLisp 语言编写程序，按照声发射事件能级大小和发生时间进行三维显示，其中声发射事件能



级的大小由圆球的尺寸和颜色区分, 声发射能级越大, 圆球的尺寸越大, 颜色越深, 反之亦然。

图 6, 7 分别为花岗岩方孔试件 GF1, GF2 在单轴加载条件下声发射事件随应力水平的累计叠加空间分布图。对于 GF1 试件, 在加载初期(峰值应力 40% 以下, 见图 6(a), (b)), 产生的声发射事件很少, 且空间分布状态较为分散; 随着加载的进行, 当应力达到峰值应力的 60% 时(见图 6(c)), 声发射事件开始在试件上部中间区域群集, 表明试件该区域应力集中程度较高, 微裂纹萌生和扩展所产生的声发射事件较多; 当应力达到峰值应力的 80% 时(见图 6(d)), 试件中部下侧区域也出现了声发射群集现象; 此后, 声发射事件继续在试件中部区域(方孔之间)群集, 直至岩石发生最终失稳破坏。岩石最终破裂为多个小块, 声发射事件以试件中部区域最为集

中, 该区域最终发生剪切破坏, 其他区域的声发射事件分布较为分散(见图 6(e)~(h))。对于试件 GF2, 在加载初期(峰值应力 20% 以下, 见图 7(a)), 声发射事件在试件中部区域群集(两方孔中间); 随着加载的进行, 声发射事件逐步在试件的中间上侧、中间下侧开始群集(见图 7(b), (c)); 当应力达到峰值应力的 80% 时(见图 7(d)), 试件左下角也出现声发射群集现象。岩石最终失稳破坏时, A, B, D 三个区域发生剪切型破坏, C 区域岩石发生剥落式破坏。图 8, 9 分别为砂岩方孔试件 SF1, SF2 在单轴加载条件下声发射事件随应力水平的累计叠加空间分布图。对于试件 SF1, 在峰值应力 70% 以下时, 声发射事件较少且分散分布; 直到应力超过峰值应力的 80% 后, 声发射事件才开始在岩石中部集中。最终的岩石破坏以岩石中部剪切破坏为主。试件 SF2 与 SF1 情况

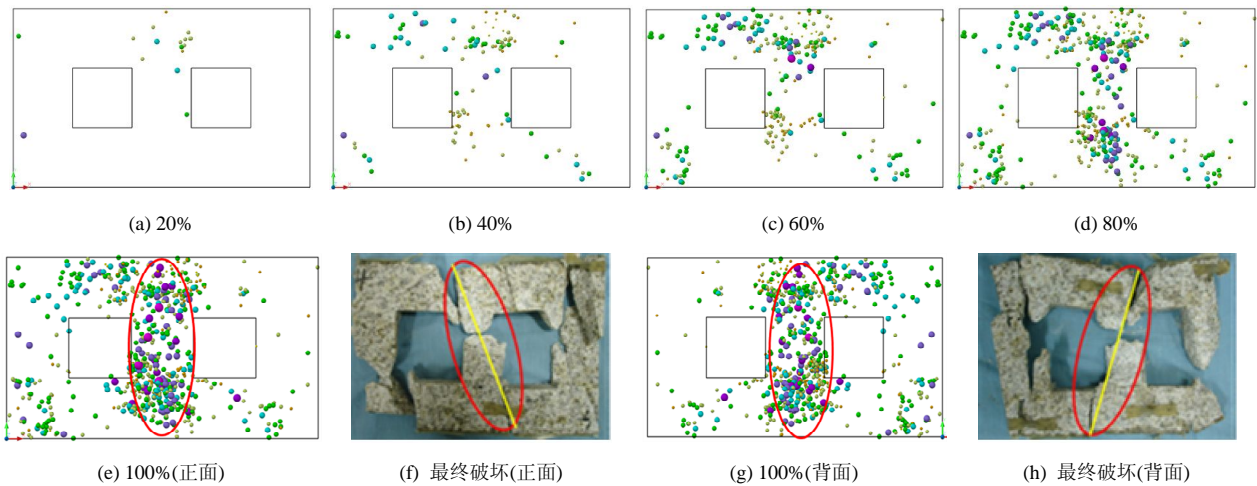


图 6 花岗岩方孔试件 GF1 不同应力水平声发射时空演化规律

Fig.6 AE time-space evolution characteristics at different stress levels of granite specimen GF1 with square hole

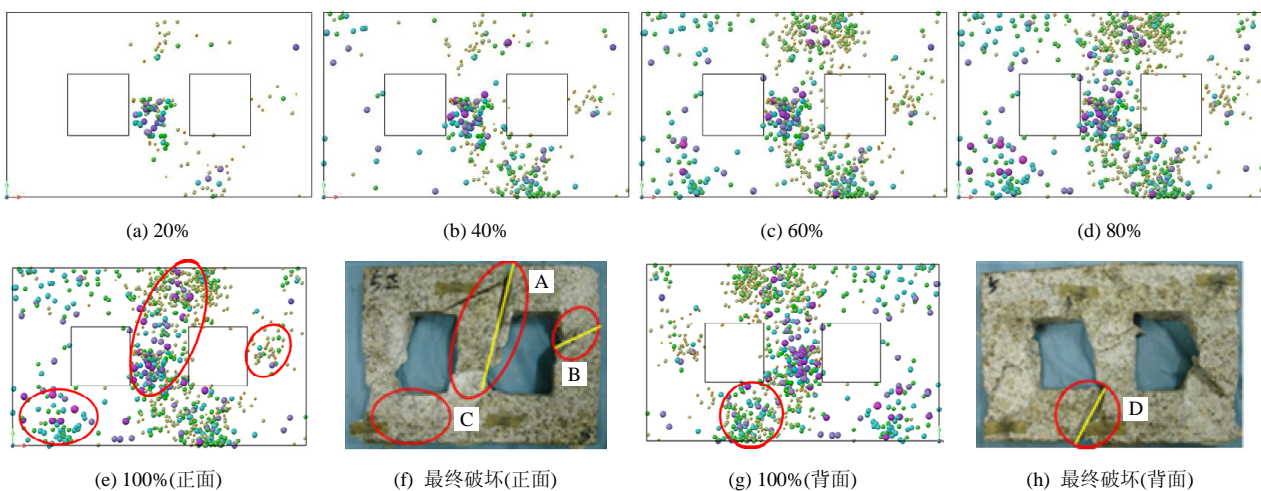


图 7 花岗岩方孔试件 GF2 不同应力水平声发射时空演化规律

Fig.7 AE time-space evolution characteristics at different stress levels of granite specimen GF2 with square hole

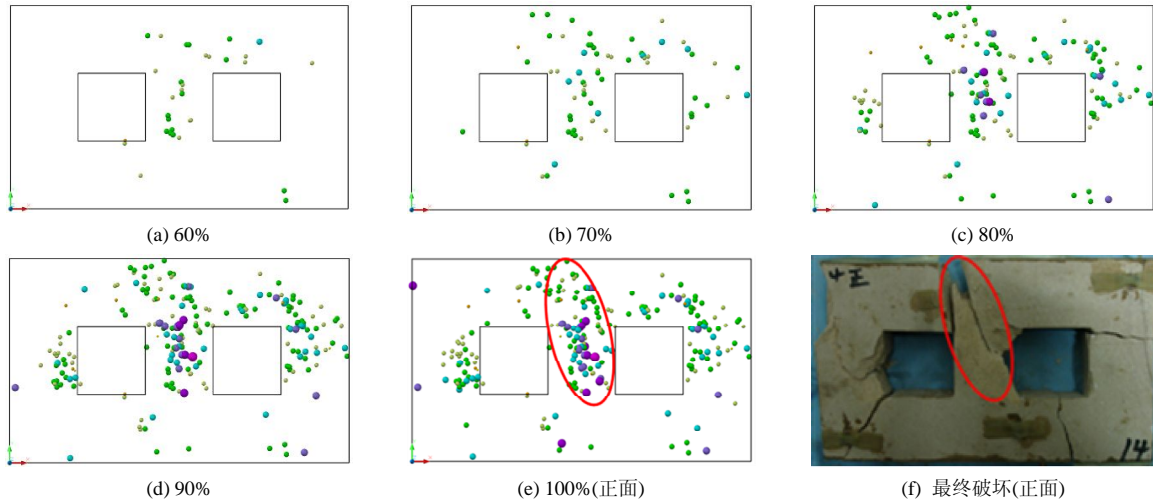


图 8 砂岩方孔试件 SF1 不同应力水平声发射时空演化规律

Fig.8 AE time-space evolution characteristics at different stress levels of sandstone specimen SF1 with square hole

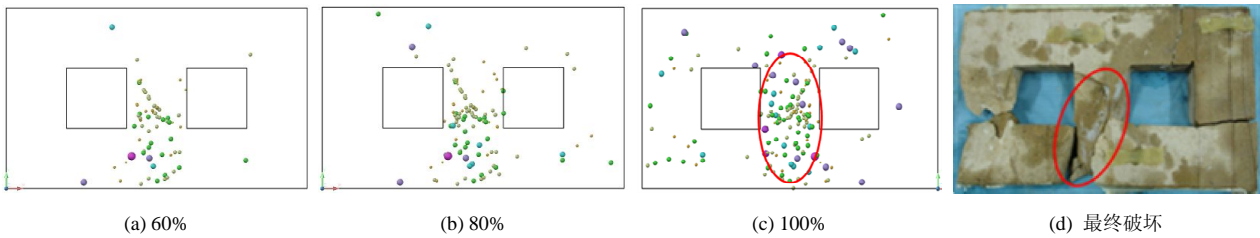


图 9 砂岩方孔试件 SF2 不同应力水平声发射时空演化规律

Fig.9 AE time-space evolution characteristics at different stress levels of sandstone specimen SF2 with square hole

类似，声发射事件在岩石中部集中，最终岩石在中部发生剪切破坏。相对于花岗岩试件，砂岩试件在加载过程中的声发射定位事件较少，笔者认为这与岩石的颗粒组成有关。花岗岩颗粒较粗且大小不均，加载过程中，颗粒之间的滑移、摩擦较多，从而产生较多的声发射事件；砂岩颗粒较细且相对均匀，在加载过程中的滑移、摩擦相对较弱。

图10, 11分别为砂岩圆孔试件SY1, SY2在单轴加载条件下声发射事件随应力水平的累计叠加空间分布图。花岗岩圆孔试件的破坏模式和声发射定位结果与方孔试件类似，在整个加载过程中，声发射事件较少且在试件中部集中，岩石最终也主要以中部剪切破坏为主。

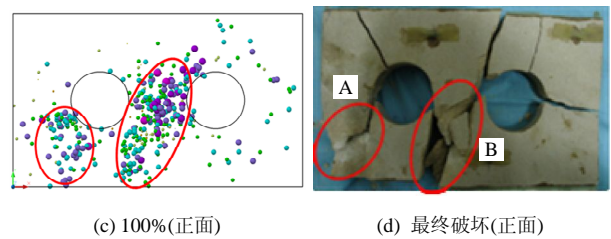
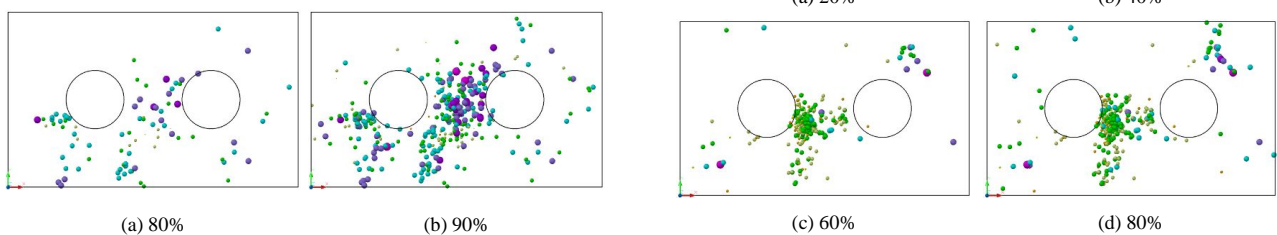


图 10 砂岩圆孔试件 SY1 不同应力水平声发射时空演化规律

Fig.10 AE time-space evolution characteristics at different stress levels of sandstone specimen SY1 with circular hole



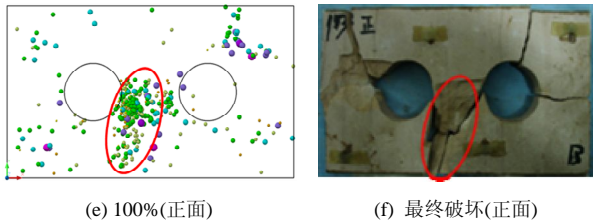


图 11 砂岩圆孔试件 SY2 不同应力水平声发射时空演化规律  
Fig.11 AE time-space evolution characteristics at different stress levels of sandstone specimen SY2 with circular hole

对于上述 6 块岩石试件，声发射事件主要集中在中间区域，其他区域出现的声发射事件较少，且分布较为分散。在加载过程中，由于预制孔的相互作用，其中部区域会产生较为明显的应力集中。该区域的破坏是微裂纹逐渐萌生、扩展直至贯通的过程，是损伤逐渐累积形成宏观破裂的过程，监测到的声发射信号形态良好，到时提取准确，定位结果较好地反映了这个累积渐进破坏过程。预制孔上部及两侧区域的破坏是当岩石达到峰值强度时，由中部区域破坏所诱发的整体瞬间破坏。在这个破坏瞬间，产生大量的声发射信号，多个信号“叠加”成为一个信号，前一个信号还没有衰减完毕，后一个信号已经到达，从而造成声发射信号到达时间拾取困难，不能满足定位要求，声发射定位事件减少。

D. A. Lockner 等<sup>[1, 24]</sup>通过对花岗岩的 AE 试验研究认为，试验所检测到的 AE 数目不到花岗试件中微破裂数目的 1%，暗示 AE 测试并未能完全表征破坏的全部过程。最近十几年，伴随着计算机技术的发展，声发射监测技术也得到了较大的进步，但是对于瞬间大量声发射信号的监测依然存在较大的困难。许江等<sup>[8]</sup>指出：由于 AE 技术对仪器本身的依赖性，对 AE 技术在岩石力学与工程中的应用也是认识和再认识的过程。预制孔上部及两侧区域定位事件较少的另外一个原因可能是由于本试验传感器布置方式所造成的。由于本试验采用 8 个传感器，且以预制孔中部为主要监测区域，所以将 4 个传感器布置在试件中部，两侧各布置 2 个传感器。试件两侧传感器数量较少也可能造成定位事件的缺失。未来的研究将增加传感器数量，以满足试件整体区域监测的需要。

本文中预制孔的间距与预制孔尺寸相同，岩石在中部产生较高的应力集中并发生剪切型破坏，这与完整试件的破坏模式和声发射事件群集特征明显不同<sup>[8, 11]</sup>，说明预制孔的存在对于岩石整体稳定性造成较大的影响。张永兴等<sup>[25-26]</sup>通过对隧道开挖研

究，获得了两隧道岩体厚度不宜小于 2 倍开挖洞径的结论。因此，开展不同间距和尺寸预制孔试件的声发射定位研究，是一项有意义的工作。

### 5 岩石破裂过程中声发射率、能量释放率及空间相关长度

图 12 为 6 块试件应力 - 应变曲线，从图中可以看到，GF1, GF2, SF1, SF2, SY1 和 SY2 试件的峰值应力强度分别为 60.1, 70.0, 52.7, 51.4, 64.1 和 58.9 MPa。砂岩圆孔试件 SY1 和 SY2 的抗压强度明显高于砂岩方孔试件 SF1 和 SF2，这与岩石力学理论一致。

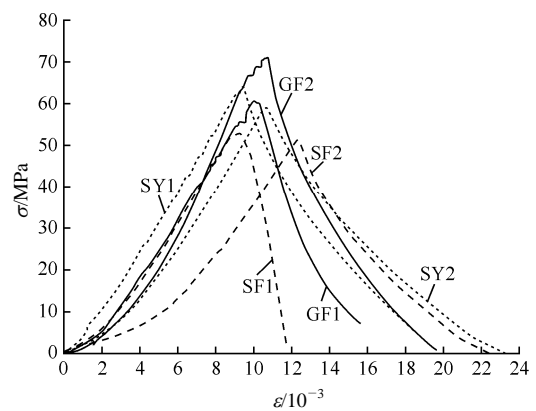
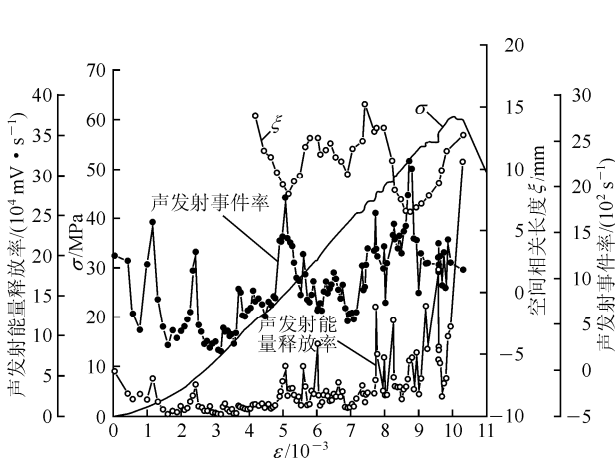


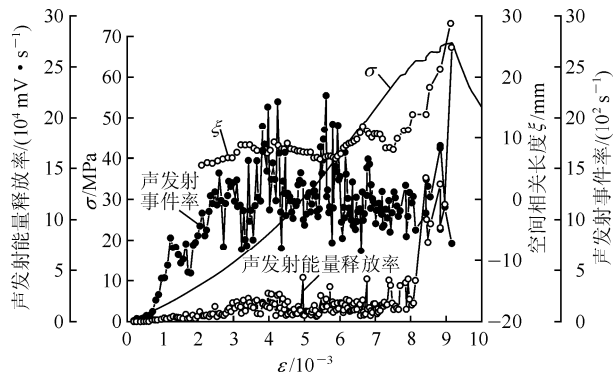
图 12 6 块试件应力 - 应变曲线  
Fig.12 Strain-stress curves of six rock specimens

图 13 为不同试件声发射事件率、能量释放率、空间相关长度变化曲线，其中， $\sigma-\epsilon$ 为应力 - 应变曲线，置于图 13 以示说明。其中声发射事件率、能量释放率采用 10 s 间隔计数，空间相关长度采用节 3.2 中的方法进行计算。从图 13 中可以看出，花岗岩试件 GF1 和 GF2 在加载初期声发射信号就开始大量产生，并一直持续到岩石最终失稳破坏，说明在整个加载过程中，岩石内部颗粒之间的摩擦、晶体颗粒断裂、裂纹萌生扩展较为活跃。砂岩试件 SF1, SF2, SY1 和 SY2 在加载初期，声发射活动性较弱。直到加载过程的中后期声发射活动性才开始增强，表明颗粒较细且均匀的岩石在初期加载阶段颗粒之间的摩擦、裂纹萌生扩展较弱，只有达到一定的应力集中程度，岩石内部微裂纹的萌生扩展才会加剧。6 块试件在破坏前声发射活动性均出现不同程度的减弱，以砂岩试件 SF1 和 SY1 最为明显，即所谓的声发射“平静期”。值得注意的是，在该阶段，声发射能量释放率却显著增强。笔者认为在岩石失稳破坏前，小尺度裂纹合并贯通形成大尺度裂纹，直至形成导致岩石破坏的宏观裂纹，导致单位时间内的

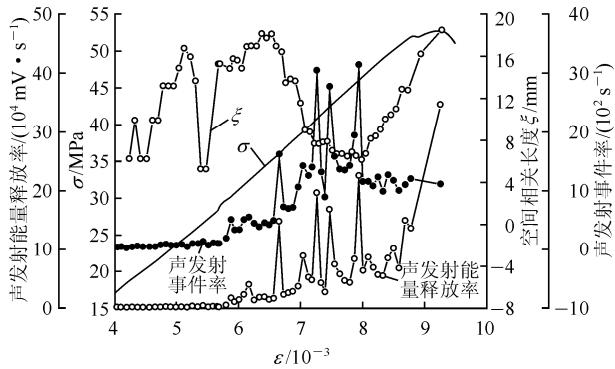




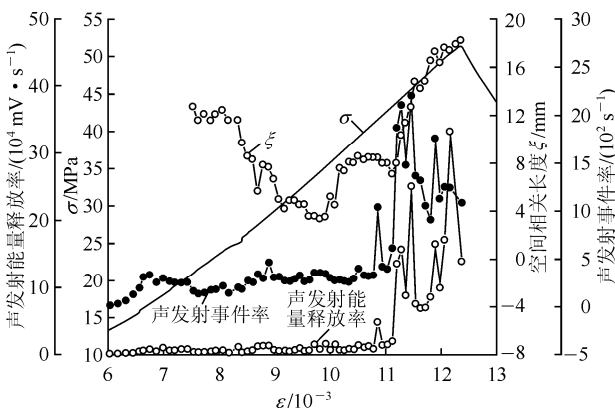
(a) 花岗岩方孔试件 GF1



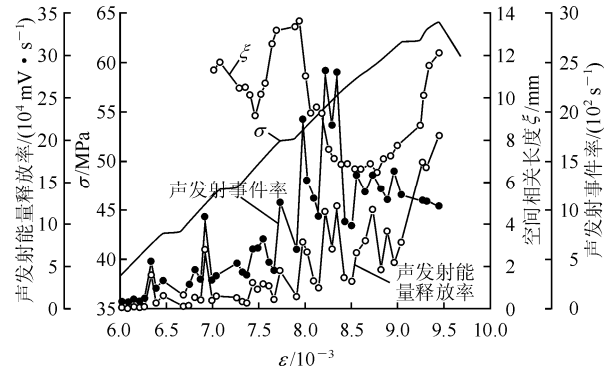
(b) 花岗岩方孔试件 GF2



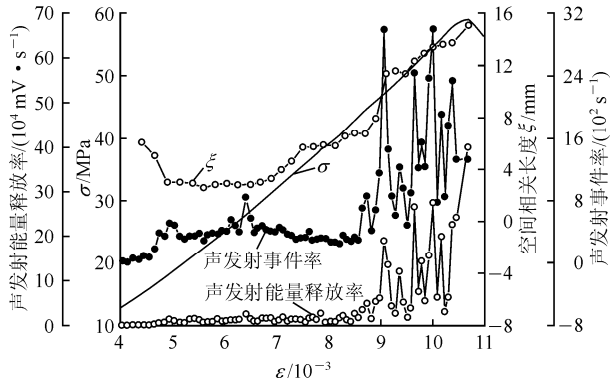
(c) 砂岩方孔试件 SF1



(d) 砂岩方孔试件 SF2



(e) 砂岩圆孔试件 SY1



(f) 砂岩圆孔试件 SY2

图 13 不同岩石试件声发射事件率、能量释放率、空间相关长度变化曲线

Fig.13 Change curves of AE rate, AE energy releasing rate and spatial correlation length of different rock specimens

声发射数量下降，但声发射的能量释放率增强，出现声发射率“平静”而声发射能量“不平静”的现象。另外，如前文所述，当宏观破裂出现时，大量的声发射信号产生，多个信号叠加，也可能造成声发射观测数量的减少。因此，声发射能量的加速释放对于岩石(体)的失稳破坏预测更具意义。

在岩石破坏前，声发射事件空间相关长度均出现增长现象，说明当应力达到一定程度时，岩石各区域之间的相关性逐渐增强。岩石在受载过程中，应力场通过迁移和重新分布逐步建立起长程相关性，并且这种相关性随着应力水平的增加逐步增大。在相关性较小的应力场中，岩石的破裂过程停止得较早，当岩石不同区域的应力场高度相关时，小尺度的破裂可以跨越障碍物发展成为大规模破裂甚至是宏观破坏。这时候，微小的应力变化都可能导致岩石内部为裂纹的大面积贯通。Y. H. Li 等<sup>[13]</sup>通过对声发射相关长度变化规律研究发现应力场的转移和岩石的局部破裂会对相关长度的变化造成较大的影响。本文中试件 GF1, SF1, SF2 和 SY1 的相关长度均经历了较高水平→下降到最小值→重新增长



到最大值的趋势,原因可能是在加载过程中岩石内部出现了局部破裂导致相关长度的下降;随着应力增加,应力场的长程相关又开始逐步增强。试件 GF2 和 SY2 在整个加载过程中相关长度持续增加。6 块试件的相关长度均在岩石破坏前达到最大值,可以作为岩石失稳破坏的前兆特征。

## 6 结论及讨论

本文对预制孔试件破坏过程中的声发射时空演化规律进行研究,得到以下结论:

(1) 预制圆孔试件单轴抗压强度明显高于预制方孔试件,对于预制孔的间距与预制孔尺寸相同的试件,声发射事件主要在岩石中部群集,试件以中部剪切破坏为主。声发射定位技术对于微破裂逐渐累积形成宏观破裂过程的监测效果较好,对于岩石突发性瞬间破坏过程监测效果较差。

(2) 花岗岩颗粒较粗且大小不均,加载过程中,颗粒之间的滑移、摩擦较多,在整个加载过程中,声发射活动性较强;颗粒较细且均匀的砂岩试件在加载初期,声发射事件较少,直到加载过程的中后期声发射活动性才开始增强。

(3) 岩石破坏前,小尺度裂纹合并贯通形成大尺度裂纹,声发射率下降,但能量释放率增强,出现声发射率“平静”而声发射能量“不平静”的现象。因此,声发射能量的加速释放对于岩石(体)的失稳破坏预测更具意义。

(4) 岩石在受载过程中,应力场通过迁移和重新分布逐步建立起长程相关性。在相关性较小的应力场中,岩石的破裂过程停止得较早,当岩石不同区域的应力场高度相关时,小尺度的破裂可以跨越障碍物发展成为大规模破裂甚至是宏观破坏。

本文试件中预制孔的间距与预制孔尺寸相同,对于预制孔的间距与预制孔尺寸不同试件的声发射时空演化规律研究还需要做进一步的工作。

### 参考文献(References):

[1] LOCKNER D A. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 883 - 899.

[2] SCHOLZ C H. Experimental study of the fracturing process in brittle rock[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(4): 1 447 - 1 454.

[3] 林 峰,李庶林,薛云亮,等. 基于不同初值的微震源定位方法[J].

岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 996 - 1 002.(LIN Feng, LI Shulin, XUE Yunliang, et al. Microseismic sources location methods based on different initial values[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 996 - 1 002.(in Chinese))

[4] RABINOWITZ N, KULHANEK O. Application of a nonlinear algorithm to teleseismic locations using P-wave readings from the Swedish seismographic network[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1988, 50(2): 111 - 115.

[5] LEI X L, KUSUNOSE K, RAO M V M S, et al. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B3): 6 127 - 6 139.

[6] 胡新亮,马胜利,高景春,等. 相对定位方法在非完整岩体声发射定位中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 277 - 283. (HU Xinliang, MA Shengli, GAO Jingchun, et al. Location of acoustic emission in non-integral rock using relative location method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(2): 277 - 283.(in Chinese))

[7] 陈炳瑞,冯夏庭,李庶林,等. 基于粒子群算法的岩体微震源分层定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 740 - 749.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, LI Shulin, et al. Microseismic sources location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 740 - 749.(in Chinese))

[8] 许 江,李树春,唐晓军,等. 单轴压缩条件下岩石声发射定位实验的影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 765 - 772.(XU Jiang, LI Shuchun, TANG Xiaojun, et al. Influential factors of acoustic emission location experiment of rick under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(4): 765 - 772.(in Chinese))

[9] LEI X L, TAKASHI S. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage[J]. *Tectonophysics*, 2007, 431(1/2/3/4): 97 - 111.

[10] 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(7): 1 069 - 1 086.

[11] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫,等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 944 - 949. (ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruifu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 944 - 949.(in Chinese))

[12] 李元辉,刘建坡,赵兴东,等. 岩石破裂过程中的声发射 $b$ 值及分

- 形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2 559 - 2 563.(LI Yuanhui, LIU Jianpo, ZHAO Xingdong, et al. Study on *b*-value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2 559 - 2 563.(in Chinese))
- [13] LI Y H, LIU J P, ZHAO X D, et al. Experimental studies of the change of spatial correlation length of acoustic emission events during rock fracture process[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(8): 1 254 - 1 262.
- [14] 左建平, 裴建良, 刘建峰, 等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1 564 - 1 570. (ZUO Jianping, PEI Jianliang, LIU Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1 564 - 1 570.(in Chinese))
- [15] CAI M, MORIKA 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.
- [16] 陈炳瑞, 冯夏庭, 肖亚勋, 等. 深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1 562 - 1 569. (CHEN Bingrui, FENG Xiating, XIAO Yaxun, et al. Acoustic emission test on damage evolution of surrounding rock in deep tunnel during TBM excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1 562 - 1 569.(in Chinese))
- [17] ZÖLLER G, HAINZL S, KURTHS J. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(B2): 2 167 - 2 175.
- [18] 荣代璐, 李亚荣, 刘旭宙. 甘肃及邻近地区几次中强地震前地震空间相关长度增长的研究[J]. 地震学报, 2004, 26(5): 509 - 515. (RONG Dailu, LI Yarong, LIU Xuzhou. Study of growing correlation length prior to the earthquakes occurred in Gansu province and its nearby area[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(5): 509 - 515.(in Chinese))
- [19] TYUPKIN Y S, GIOVAMBATTISTA R D. Correlation length as an indicator of critical point behavior prior to a large earthquake[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 230(1/2): 85 - 96.
- [20] BRUCE A, WALLACE D. Critical point phenomena: universal physics at large length scales[C]// The New Physics. New York: Cambridge University Press, 1989: 236 - 267.
- [21] FROHLICH C, DAVIS S D. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues[J]. Geophysical Journal International, 1990, 100(1): 19 - 32.
- [22] 刘 振, 周蕙兰. 单键群方法的算法研究和程序实现[J]. 中国科学院研究生院学报, 1997, 14(1): 57 - 65.(LIU Zhen, ZHOU Huilan. Study on single-link cluster algorithm and its implementation[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 1997, 14(1): 57 - 65.(in Chinese))
- [23] 马延路, 周蕙兰. 用单键群方法研究中国地震时空分布的统计特征[J]. 地球物理学报, 2000, 43(2): 175 - 183.(MA Yanlu, ZHOU Huilan. Temporal and spatial statistical characteristics of earthquakes in China by single-link cluster method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(2): 175 - 183.(in Chinese))
- [24] LOCKNER D A, BYERLEE J D. Fault growth and acoustic emissions in confined granite[J]. Applied Mechanics Reviews, 1992, 45(3): 165 - 173.
- [25] 张永兴, 胡居义, 何青云, 等. 基于强度折减法小净距隧道合理净距的研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, (3): 64 - 67.(ZHANG Yongxing, HU Juyi, HE Qingyun, et al. On rational clear spacing of tunnel with small clear spacing based on strength reduction technique[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (3): 64 - 67.(in Chinese))
- [26] 江 权, 冯夏庭, 周 辉. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞群允许最小间距研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 656 - 662.(JIANG Quan, FENG Xiating, ZHOU Hui. Study on acceptable minimum interval of long deeply burial hydropower tunnels in Jinping II hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 656 - 662.(in Chinese))