

单轴压缩下岩石声发射定位实验的影响因素分析

许江, 李树春, 唐晓军, 陶云奇, 姜永东

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 应用声发射及其定位技术, 在单轴压缩载荷作用下, 采用实验方法观察重庆细砂岩试样破裂失稳过程中其内部微裂纹孕育、发展的三维空间演化模式, 研究岩石声发射定位实验的影响因素。实验结果表明: (1) 端部摩擦对岩石破裂过程中的声发射特征影响显著, 采用 1:1(质量比)硬脂酸和凡士林的混合物作为减摩剂进行 AE 定位实验, 在试样初始压密阶段基本没有 AE 事件, 取得较好的效果。(2) 重庆细砂岩的 AE 定位事件主要分布在中部, 呈散漫分布, 两端没有明显的条带丛集现象, 中部没有得到声发射定位事件的“空白区”, 通过与相关成果的对比, 说明岩石的种类、构造和均匀程度是 AE 定位实验的主要影响因素之一。(3) 加载方式和加载的控制方式会直接影响岩石试样破坏的进程和程度, 从而影响 AE 事件。(4) 通过重庆细砂岩试样疲劳荷载 AE 定位实验说明加载历史对 AE 时间序列及 AE 事件均有影响。以上实验和分析结果可以为岩石声发射定位实验的方案设计提供参考。

关键词: 岩石力学; 声发射; 岩石破裂; 裂纹; 单轴荷载

中图分类号: TU 458^{+.3}

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)04 - 0765 - 08

INFLUENTIAL FACTORS OF ACOUSTIC EMISSION LOCATION EXPERIMENT OF ROCK UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

XU Jiang, LI Shuchun, TANG Xiaojun, TAO Yunqi, JIANG Yongdong

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Acoustic emission(AE) technique can be used to monitor the microcracks development in the rock test samples continuously in real-time; it is better than other methods. AE location technique is employed to study crack initiation and propagation process of Chongqing sandstone. Also, the crack spatial evolution mode with loading time has been observed and the influential factors of AE location experiment of the sandstone have been discussed. The experimental results are displayed as follows. (1) The attrition of the tip of the sample has remarkable influence on AE characteristic in the rock failure process; and the mixture of the stearic acid and the vaseline(weight ratio 1 : 1) is used as attrition-reduced agent to the AE location experiment. No AE event is found when the initial crack is closed; it will obtain a better effect. (2) The AE location of the Chongqing sandstone test sample mostly is distributed in central-section and assumes dispersion. No void space is shown in the central-section of the sample. Contrasted with the relevant studies, it is shown that the rock type, the structure and the level of uniformity are the major influential factors. (3) The load mode and the load control mode can directly affect the rock failure process so as to affect the AE events. (4) AE location experiment of the Chongqing sandstone test sample under fatigue load shows that the load history affects the AE time series and the AE events. The experimental and analytical results can afford useful help for the program design of AE location experiment of

收稿日期: 2007 - 10 - 16; **修回日期:** 2007 - 11 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574108); 国家自然科学基金重点项目(50534080); 教育部博士点基金资助项目(20060611006)

作者简介: 许江(1960 -), 男, 博士, 1982年毕业于重庆大学采矿系矿山工程物理专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

rocks.

Key words: rock mechanics; acoustic emission(AE); rock failure; crack; uniaxial load

1 引言

岩石材料受外力或内力作用时,由于其自身的形变和裂纹扩展而造成的脆性材料内局部因能量的快速释放而发出的瞬态弹性波现象,称为声发射(acoustic emission, AE)。声发射的研究有助于揭示材料内部微破裂萌生、扩展和断裂的演化规律,可广泛应用于岩石类材料的微破裂机制、地震序列、原岩地应力以及岩体稳定性等领域的研究^[1]。

目前对岩石声发射的理论研究主要集中在岩石受载破坏过程中的声发射规律、Kaiser效应及声发射损伤理论等方面。李庶林等^[2]和蒋宇等^[3]分别对单轴受压岩石破坏全过程和疲劳荷载过程进行了声发射实验,分析了岩石破坏过程中的力学特性和声发射特征。C. Li和E. Nordlund^[4]通过8种岩石实验发现除了铁矿石以外大部分岩石具有Kaiser效应。李元辉等^[5]通过实验提出岩石材料在受压变形过程中产生的塑性变形是出现Felicity效应的主要原因。张明等^[1]利用累积声发射数与损伤变量一致的观点,建立了准脆性材料声发射的损伤模型,得到了声发射率和Kaiser效应的一般表达式。

在岩石声发射的应用研究方面,张立杰等^[6]基于声发射的煤岩动力失稳行为实验与现场相关测试的比较,综合分析了复杂变化环境下煤岩的失稳声发射定量规律。姜永东等^[7]应用弹性力学理论推导出地下岩体测点处的地应力表示和地应力椭球基本方程,研究了声发射Kaiser效应测定岩体地应力的原理、方法和测试技术。赵奎等^[8]将小波分析技术应用到岩石声发射测量地应力信号处理分析中,为研究岩石声发射测量地应力机制提供了新的研究思路和方法。

尽管对岩石声发射理论与应用的研究已经取得了不少成果,但这些研究成果不能完全反映岩石在整个加载过程中其内部微裂纹孕育、萌生、扩展、成核和贯通的三维空间演化过程。赵兴东等^[9]在前人研究成果的基础上,应用声发射及其定位技术研究了单向加载条件下含不同预制裂纹以及完整的花岗试样破裂失稳过程中其内部裂纹孕育、萌生、扩

展、成核和贯通的三维空间演化过程,并分析了随应力-应变变化岩石的声发射活动特性。这一形象化的研究成果增加了对岩石破裂过程中声发射特征的新认识。

在单轴单调加载和疲劳荷载条件下对重庆细砂岩完整试样的声发射定位实验过程中,笔者并未得到赵兴东等^[9]中的完整试样的实验结果。例如:赵兴东等^[9]所得到的结果表明,试样两端有较明显的声发射定位事件丛集,中部有较大的“空白区”。而本文的实验结果表明,重庆细砂岩的AE定位事件主要分布在中部,呈散漫分布,两端没有明显的条带丛集现象,且其中部没有得到声发射定位事件的“空白区”。结果的差异并不能说明哪种现象更典型,不过,这一现象引发了作者对声发射定位实验影响因素的思考。为此,本文拟通过不同实验结果的对比,对端面减摩措施、加载方式和加载控制方式、探头数量、加载历史、岩石构造和均匀程度等几个在声发射定位实验中需要重点关注的问题进行了分析。

2 实验概述

2.1 试样的采集与制作

实验用试样选用重庆细砂岩,为尽可能降低因天然岩石试样个体差异造成的实验结果的离散性,在大块完整无节理的砂岩体上采取密钻取样提取岩芯,且以自然位置最为临近的试样进行分组。采用湿式加工法在实验室内将所采集的细砂岩加工成50 mm×50 mm×100 mm(长×宽×高)的长方体试样,试样加工成型后,打磨端面,使其端面平整度控制在0.02 mm以内,试样加工好后置于室内通风条件较好的位置自然风干2周以上。

2.2 加载装置与方式

实验用动力装置采用美国MTS815岩石力学测试系统,该试验机主要用于测试高强度固体材料在单轴、三轴、单调、循环、蠕变等各种条件下的力学实验,设备具有轴向刚度大、测试精度高、性能稳定以及可靠的特点,采用力、位移、轴向或横向应变等多种控制方式,可实现数据的高、低速采集,

并通过轴向和横向各种力、位移传感器自动绘制材料的应力、应变、位移及时间曲线。

实验按加载方式分为单轴单调加载和单轴疲劳荷载两大类, 其中, 疲劳荷载实验的上限应力取相应单轴抗压强度的 90%, 下限应力则取相应单轴抗压强度的 45%, 疲劳荷载实验采用力控制, 加载波形选择三角波。

2.3 声发射测试分析系统

声发射测试分析系统采用美国物理声学公司 PAC(Physical Acoustic Corporation)生产的 PCI-2 声发射测试分析系统, 该系统是该公司推出的最新产品, 采用了 PCI-2 板卡, 最大限度地降低了采集噪声, 该系统是一种全数字化、多通道、计算机化系统, 由于采用了 18 位 A/D 转换技术, 可以实现对声发射信号实时采集的同时, 对波形信号进行实时采集和存储。PCI-2 系统具有超快处理速度, 低噪声, 低阈值和可靠的稳定性。本实验中设定声发射测试分析系统的主放为 40 dB, 阈值值为 45 dB, 探头谐振频率为 20~400 kHz, 采样频率为 1 M 次/s。为保障实验效果, 实验采用 8 个探头进行检测, 其分布位置按 PCI-2 声发射测试分析系统说明书进行布置, 声发射探头的检测面抹上一层偶合剂并紧贴在试样表面, 并排净空气, 然后采用胶带固定。图 1 给出了 AE 传感器安装图。

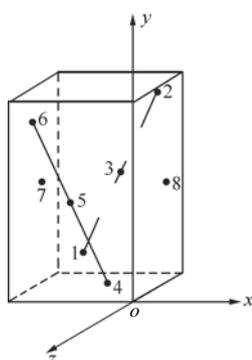


图 1 AE 传感器安装图

Fig.1 Schematic diagram of allocation of AE sensors

2.4 减摩剂

端部摩擦(承压板与试样上下端面间的摩擦)在其表面产生了一个剪应力, 而该剪应力起到了一个沿着试样径向向内的“箍”的作用, 使得试样内产生了三轴应力状态^[10], 使单轴压缩变成了局部三轴压缩。同时由于摩擦噪声影响改变了 AE 实验结果。

Z. T. Bieniawski 和 J. C. Bernede 提出把试样两端用硫或胶泥涂封以达到一定的光滑度, 但这 2 种方式都会过大地强化试样, 而采用聚四氟乙烯填料以减小试样两端和加载端面的摩擦会引起向外挤出的力, 促使其过早出现劈裂破坏。P. L. Boyd 和 R. C. Robertson 则使用一种扭剪装置进行了测试各种减摩剂摩擦因数的实验, 结果表明, 一种不被测试界广为人知的物质——硬脂酸, 具有最低的摩擦因数: 0.022^[11]。

J. F. Labuz 和 J. M. Bridell^[12]进行了系列实验测试 4 种减摩剂——硬脂酸、聚四氟乙烯、石墨和二硫化钼在岩石类材料压缩实验中的润滑效果。实验结果表明, 1:1(质量比)硬脂酸和凡士林的混合物具有最低的摩擦因数。因此, 在本文实验中决定使用该减摩剂, 其效果为: 一是最大限度地减少端部摩擦效应, 以有效消除试样端部表面过早产生裂纹甚至有剥落现象的发生; 二是充分降低端部噪声。实验结果表明, 使用该减摩剂后, 在岩石初始压密过程中几乎没有声发射信号产生。

3 声发射定位实验结果及分析

岩石声发射定位实验的影响因素多种多样, 本文只选择其中几种因素进行实验并分析。

3.1 实验结果

为考察端部摩擦对声发射定位实验的影响, 进行了使用减摩剂的单调加载实验(图 2, 图中 1~8 位置见图 1, 下同)和不使用减摩剂的单调加载实验(图 3), 两类实验均采用位移控制(位移控制速率为 0.1 mm/min)。

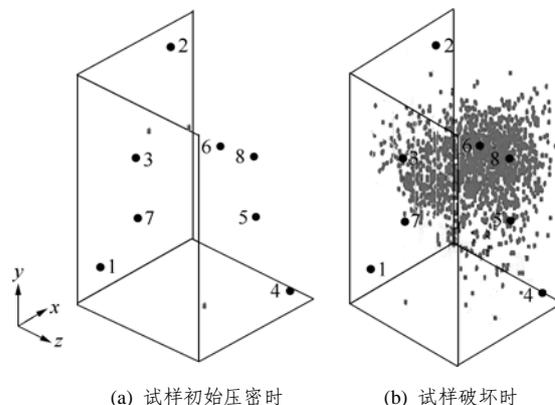


图 2 有端部减摩措施的 AE 定位结果(位移控制)

Fig.2 Testing results of AE events location of the attrition-reduced measures of the tip(displacement control)

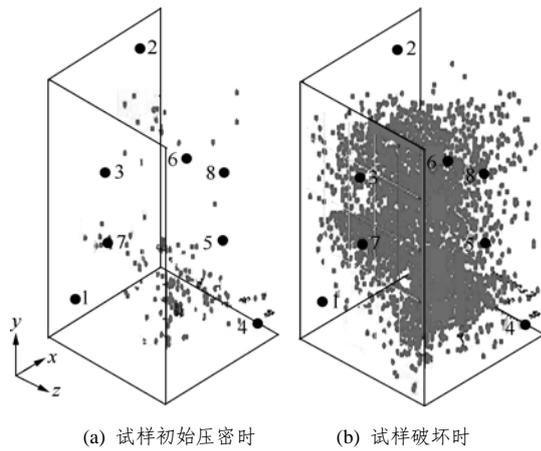


图3 无端部减摩措施的 AE 定位结果(位移控制)
 Fig.3 Testing results of AE events location of the attrition-unreduced measures of the tip(displacement control)

为观察不同加载控制方式对岩石破坏特征和声发射特征的影响,在使用减摩剂的同时,采用了位移控制(位移控制速率为0.1 mm/min, 图2)和力控制(力控制速率为24.2 kN/min, 图4) 2 种不同的控制方式进行单调加载实验, 2 种速率在弹性变形阶段相一致。

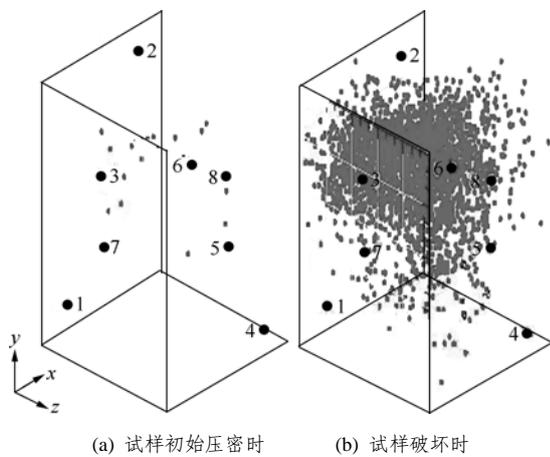


图4 有端部减摩措施的 AE 定位结果(力控制)
 Fig.4 Testing results of AE events location of the attrition-reduced of the tip(force control)

为观察不同加载方式对岩石破坏特征和声发射定位实验的影响,在使用减摩剂的同时,采用了单调加载(位移控制速率为 0.1 mm/min, 图 2)和循环加载(力控制速率为 24.2 kN/min, 图 5) 2 种不同的加载方式分别进行实验, 2 种速率在弹性变形阶段相一致。

此外,为考察探头数量对声发射定位实验的影响,加做了采用 5 个探头进行检测的单调加载实验进行对比。

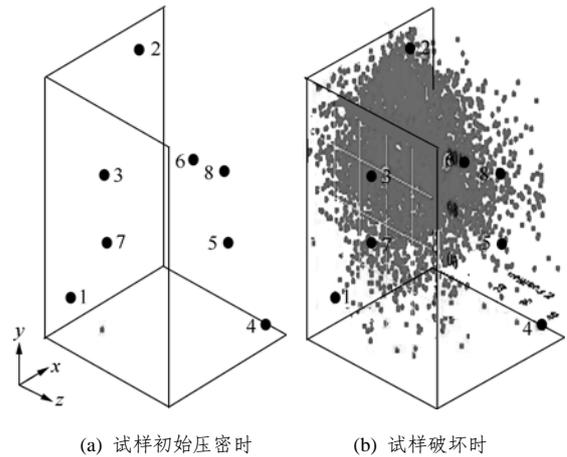


图5 疲劳荷载的 AE 定位结果(减摩、力控制)
 Fig.5 Testing results of AE events location of the fatigue load(attrition-reduced tip, force control)

3.2 实验结果分析

(1) 减摩措施对AE定位实验的影响

在岩石力学实验中,端面的处理是非常重要的,由于端面摩擦会导致岩石力学数据失真,尤其对于脆性材料更是如此,而端部噪声则会对AE实验造成极大的影响。从实验情况看,降低端部噪声的方式对岩石破裂过程中的声发射特征影响显著。在前期实验中,也曾经做过端部加垫实验,加垫后减少端部摩擦效果远不如使用减摩剂明显。

如图 2(a)所示,以位移控制方式的试样施用减摩剂后在初始压密阶段几乎没有 AE 定位事件,而图 3(a)所示的无端部减摩措施的试样在初始压密阶段出现了大量 AE 定位事件,而且端部较多,说明端部摩擦噪声影响显著。

如图4(a)所示,以力控制方式的试样在初始压密阶段有少量AE事件,但都集中在轴向中部,试样两端没有AE事件,说明端部减摩措施有效。初始压密阶段出现少量AE事件的原因如下:砂岩属于塑-弹性材料,在其应力-应变曲线中,初始压密阶段曲线斜率低于弹性阶段,同样弹性变形速率下,力控制方式在试样初始压密阶段的速率要高于位移或应变控制,由于速率较高,而岩石在向弹性阶段过渡的自组织调整过程相对滞后,所以在试样中部出现少量裂纹和AE定位事件。

(2) 加载方式和加载控制方式对AE定位实验的影响

如前所述,实验中以力和位移控制的2种速率在弹性变形阶段相一致,但前者比后者在初始压密阶段的时间要短,同样岩石屈服点到试样破坏过程

时间也短很多, 所以前者的加载破坏全过程时间要明显短于后者, 裂纹扩展和损伤演化相对剧烈, 破坏程度相对要大, 观测得到的 AE 定位事件数要多些, 且整个加载过程的平均定位事件计数率高于后者(表 1)。从试样最终破坏形态看, 前者主裂纹贯通性更好, 贯通性裂纹数目要多于后者, 且贯通性裂纹宽度明显较大。

表 1 AE 事件数与 AE 事件计数率
Table 1 AE events numbers and AE events rates

实验项目	初始压密时 AE事件数	破坏时AE 事件数	全过程 时间/s	全过程AE事件计 数率/(次·s ⁻¹)
8个探头、有端部减摩 措施(位移控制)	3	1 478	719	2.06
8个探头、无端部减摩 措施(位移控制)	144	3 691	609	6.06
8个探头、有端部减摩 措施(力控制)	19	2 767	343	8.07
8个探头、疲劳荷载 (有端部减摩措施)	1	4 680	10 380	0.45
5个探头、有端部减摩 措施(位移控制)	0	60	714	0.08

循环荷载下, 整个疲劳破坏过程时间较长, 给了细小裂纹充分发育的空间, 同时, 由于采用力控制方式, 裂纹形成和发展过程相对剧烈, 观测得到的 AE 定位事件数明显高于单调加载(表 1), 但由于循环加载过程有大量时间消耗在试样的弹性变形上, 所以整个疲劳破坏全过程的 AE 定位事件计数率相对较低。从试样最终破坏形态看, 疲劳破坏裂纹在岩石表面分布最多, 裂纹贯通性最充分, 主裂纹间隙也最大。

蒋宇^[13]认为, 疲劳荷载作用下的破坏, 裂纹的发展更加充分和细碎, 表面有大量的平行于加载方向的裂纹产生。这一现象作者已经通过大量实验证明是正确的, 但同时作者认为, 造成此现象的主要原因, 并不一定是因为单调静态加载或疲劳荷载作用方式的不同, 而主要与加载的控制方式有关, 以力控制的匀速加载比相同速率(弹性变形阶段换算成相同速率)的应变或位移控制方式裂纹的发展更加充分、裂纹间隙更大。

(3) 探头数量对 AE 定位实验的影响

首先, 探头数量直接决定了声发射事件数量, 5 个探头试样破坏时的 AE 事件定位结果, 在破坏时只观测到 60 个 AE 定位事件, 而 8 个探头时则能观

测到上千个 AE 定位事件(表 1); 其次, 探头数量的多少对 AE 事件定位的精度也有较大影响, 由于岩石试样在加载过程中存在变形, 会改变 AE 波传输和接收路径, 从而引起定位计算的误差, 所以探头数量并不是越多越好, 如何合理地选择探头数量和其分布位置是需要进一步研究的问题。

(4) 岩石种类、构造和均匀程度对 AE 事件定位的影响

从图 2(b)中可以看出, 重庆细砂岩破坏时的 AE 定位事件主要分布在中部, 两端没有明显的丛集现象, 中部没有得到 AE 定位事件的“空白区”。

从图 3 中可以看出, 由于没有实施端部减摩措施, 从加载初期试样下端部就开始出现丛集, 试样破裂时下端部有 AE 定位事件的丛集现象, 这主要与端部效应有关。

从图 4(b), 5(b)中可以看出, 试样破坏时的 AE 定位事件主要分布在中部, 端部有少量的 AE 定位事件, 中部没有得到 AE 定位事件的“空白区”。

综合以上各实验结果, 重庆细砂岩 AE 源大多呈散漫分布, 试样中部均没有得到 AE 定位事件的“空白区”。由于赵兴东等^[9]中的试样其岩性是花岗岩, 物质构成与重庆细砂岩有本质不同, 所以得出的 AE 定位实验结果有所差异不足为奇。

D. Lockner 对 Westly 花岗岩的实验结果表明, AE 源沿未来的主破裂面丛集出现, 而在日本地质调查所进行的 Inada 花岗岩 AE 源在标本中散漫分布^[14]。刘立强等^[14]对日本 Inada 细晶花岗岩和法国 Mayet 粗晶花岗岩的对比实验同样证明了这一差异。这些结论说明即使同一种岩石由于岩石晶粒粗细的差异也会造成 AE 空间分布图像的不同。

重庆细砂岩属于晶粒较细、结构较均匀的岩石, 其 AE 定位实验结果表明, 对于此类岩石, AE 源大多呈散漫分布, 微破裂的空间分布对主破裂的空间位置并无明显的指示意义, 只有对具有先存缺陷或构造非均匀的岩石, 微破裂的空间分布对主破裂的空间位置才有明显的指示意义。

由于岩石 AE 实验中 AE 频率较高、波长较短, 因而试样中微裂纹及晶粒大小等对波速有强烈的影响, 在加载过程中, 试样内部裂纹数目及其分布等亦会发生明显变化, 这同样会对波速产生不容忽视的影响, 因而可以认为岩石的种类、构造和均匀程度是 AE 定位实验的主要影响因素之一。

(5) 加载历史对 AE 事件定位的影响

从图 6 中可以看出，重庆细砂岩试样疲劳加载过程中，AE 事件主要发生在最初和最后几个循环，其应力 - 应变曲线的塑性滞回环较大，在岩石的疲劳破坏进程中，70%的时间都在中间稳定变形阶段，此阶段 AE 事件数很少，AE 事件计数率很低，其应力 - 应变曲线的塑性滞回环较小且塑性滞回环间距也较小。在循环加、卸载过程中，AE 事件数也有实质性差异，大多数 AE 事件出现在加载过程中，而在卸载时 AE 事件相对较少并且不像加载过程那样与应力具有系统性的相关。在等幅循环加、卸载前期，若应力不超过以前加载的最大应力，AE 信号较少，但在等幅循环加载后期则出现了大量的 AE 信号，图 7 所示为试样失稳前一个半循环疲劳荷载的应力、AE 振铃计数 - 时间曲线，可以看出，在下次循环还未达到上次加载的上限应力处，已经有明显的 AE 信号，在应力从 45.5 MPa 增加 10% 时，AE 振铃计数增加了 2 170 个，远远大于 20 个振铃计数，Felicity 效应显著，而且在卸载过程中也产生明显的 AE 信号，这可能与岩石试样损伤后造成岩石记忆混乱有关。这些现象充分说明加载历史对 AE 时间序列和 AE 事件定位均有影响。此外，岩石的破坏往往受到变形的控制，应力水平的改变仅仅会影响疲劳的进程而不会影响疲劳的极限，反映了疲劳破坏极限变形对应力路径的非依赖性^[13]。因此，应用 Kaiser 效应计算岩石先存历史最大应力的方法，对于在地质历史中长期承受疲劳荷载的地区是无效的，比如地震频发区、火山活动区、其他构造异常活跃区等。

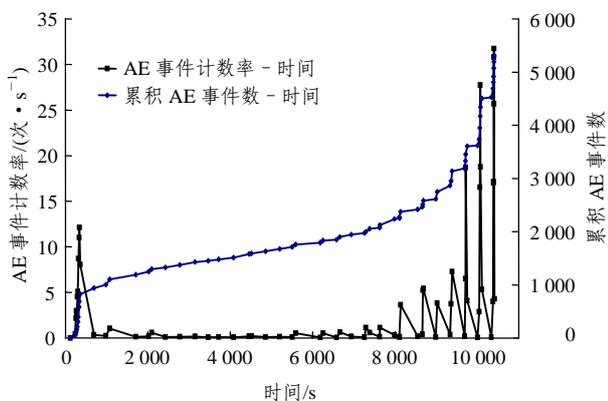


图 6 疲劳荷载的 AE 事件计数率、累积 AE 事件数 - 时间曲线

Fig.6 Curves of AE events rate and AE cumulative events number and time under fatigue loading

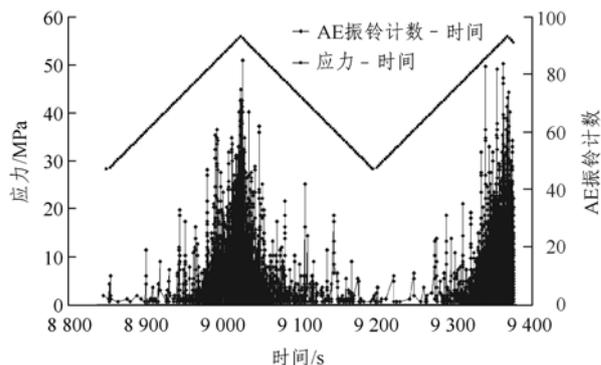


图 7 疲劳荷载的应力、AE 振铃计数 - 时间曲线
Fig.7 Stress and AE counts number-time curves under fatigue loading

(6) 加载测试设备的影响

加载测试设备对 AE 实验结果也会产生影响，如加载设备的刚度和噪音等，尤其在疲劳实验时，试样处于交变荷载作用下，背景噪音比较大^[3]。

(7) AE 测试仪器性能的影响

AE 定位仪器性能直接影响 AE 定位效果，此外，仪器软件采用的定位算法以及为消除环境噪声而设定的门槛值也会对 AE 实验结果产生影响。

D. Lockner 等^[15, 16]通过对花岗岩的 AE 实验研究认为，实验所检测到的 AE 数目不到花岗试样品中微裂隙破裂后数目的 1%，暗示 AE 测量并未能完全表征破坏的全部过程，该工作被认为是美国该研究领域 1991~1994 年期间最重要的进展之一^[17]。事实上，大片空白区的出现反映了目前实验观测到的 AE 事件的缺失，当然在岩石失稳破裂的瞬间，依当前的 AE 测试仪器和手段，要想观测到更多的 AE 事件是难以完成的。

由于 AE 测试仪器的发展，在“死时间”方面技术的改善，为重新认识各种实验条件下的 AE 特征提供了依据。由于 AE 技术对仪器本身的依赖性，因此对 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。

4 讨论

通过对重庆细砂岩这种均质岩石的 AE 定位实验及分析可以得出，均质岩石在均匀载荷作用下，在尽可能降低端部效应情况下，AE 源(微破裂)呈分散分布于岩石内部，随着应力增大，中间过程的 AE

孔隙往往被后来的 AE 源充满。此时, 岩石内部微裂纹相互贯通, 并有新的微裂纹产生, 在均质岩石整个破坏过程中, 岩石中部没有出现空白区。对于非均质岩石, 其内部应力分布是非均匀的, 应力集中区域容易发生微破裂, 形成 AE 丛集区, 在应力水平较低区域易形成 AE 空白区。

AE 事件三维定位结果直观反映了试样裂纹初始位置、各 AE 源位置、岩石损伤状况、不同加载阶段裂纹的发展程度, 为深入研究裂纹扩展过程及空间形态奠定了基础。但是, 试样裂纹扩展方位、裂纹宽度变化、裂纹演化过程以及裂纹扩展的曲面形态, 还需要结合试样的真实裂纹状况, 通过深入分析才能得到。从本次实验结果看, 细砂岩试样 AE 源的出现顺序大量都是随机的, 而相邻近 AE 源的出现时间上不是连续的, 无法从直观上把哪个 AE 源同另外一个 AE 源相连从而确定局部微裂纹扩展方向, 因而还不能真实地通过 AE 定位看到岩石破裂的发展过程。但 AE 源的出现也是有序的, 岩石裂纹扩展的方向从宏观上是有其自身规律的, 只是依据 AE 源从直观上确定裂纹扩展存在一定难度, 从某种意义上讲, AE 源是随机中的有序, 是混沌的, 这从另一方面反映了岩石力学的非线性特征。

5 结 论

通过以上对岩石声发射特征的实验测试和分析讨论, 可以得到以下初步结论:

(1) 端部摩擦对岩石破裂过程中的声发射特征影响显著, 采用 1:1(质量比)硬脂酸和凡士林的混合物作为减摩剂进行 AE 定位实验, 在试样初始压密阶段基本没有 AE 事件, 取得了较好效果。

(2) 实验过程中, 单调或循环(疲劳)等不同加载方式, 以及以力和位移控制等不同加载控制方式直接影响岩石试样破坏的进程和程度, 从而影响 AE 定位事件。从试样最终破坏的形态看, 以力控制方式比以位移控制方式形成的主裂纹贯通性更好, 贯通性裂纹数目要多于后者, 且贯通性裂纹宽度明显较大。而疲劳破坏裂纹在岩石表面分布最多, 裂纹贯通性最充分, 主裂纹间隙也最大。

(3) 岩石的种类、构造和均匀程度是 AE 定位实验的主要影响因素之一。重庆细砂岩属于晶粒较细、结构较均匀岩石, 其 AE 定位实验结果显示, AE 源

呈散漫分布于试样中部, 两端没有明显的条带丛集现象, 中部没有得到声发射定位事件的“空白区”。对于此类岩石, 微破裂的空间分布对主破裂的空间位置并无明显的指示意义。

(4) 重庆细砂岩试样等幅循环加载后期出现了明显的 Felicity 效应, 而且在卸载过程中也产生了明显的 AE 信号, 说明加载历史对 AE 时间序列及 AE 事件均有影响。岩石疲劳过程中卸载时应力下降的 AE 信号多少可以判断岩石所处的疲劳阶段, 同时, 可以根据疲劳过程中 Felicity 效应显著程度了解岩石损伤状况。

(5) 本文对端面减摩措施、加载方式和加载控制方式、探头数量、加载历史等方面的实验结果及分析, 以及在加载测试设备、AE 测试仪器性能、岩石构造和均匀程度等方面所提出的观点, 对于大多数准脆性岩石材料来说具有普适性, 对在单轴压缩条件下岩石声发射定位实验具有很好的参考价值。

AE 定位的影响因素较多, 如未充分考虑这些因素的影响, 也许会得出错误的结论, 本文未对这些影响因素一一进行实验分析, 建议增加不同条件实验以正确认识和分析 AE 定位的影响因素, 用于指导岩石的 AE 定位实验。

参考文献(References):

- [1] 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 493 - 2 501. (ZHANG Ming, LI Zhongkui, YANG Qiang, et al. A damage model and statistical analysis of acoustic emission for quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 493 - 2 501. (in Chinese))
- [2] 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): 2 499 - 2 503. (LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503. (in Chinese))
- [3] 蒋宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 810 - 1 818. (JIANG Yu, GE Xiurun, REN Jianxi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11):

- 1 810 - 1 818.(in Chinese))
- [4] LI C, NORDLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1993, 26(4): 333 - 351.
- [5] 李元辉, 袁瑞甫, 赵兴东. 岩石受载记忆的声发射实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(4): 518 - 520.(LI Yuanhui, YUAN Ruifu, ZHAO Xingdong. Research on ability of memorizing previous load by AE testing in rock[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(4): 518 - 520.(in Chinese))
- [6] 张立杰, 蔡美峰, 来兴平, 等. 基于 AE 的深部复变环境下急斜特厚煤层开采动力失稳分析[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(1): 1 - 4.(ZHANG Lijie, CAI Meifeng, LAI Xingping, et al. Dynamical destabilization analysis of steep and heavy thick coal seam in a deep-mine under the complex-variable environment based on AE[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [7] 姜永东, 鲜学福, 许江. 岩石声发射 Kaiser 效应应用于地应力测试的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 946 - 950.(JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, XU Jiang. Research on application of Kaiser effect of acoustic emission to measuring initial stress in rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(6): 946 - 950.(in Chinese))
- [8] 赵奎, 邓飞, 金解放, 等. 岩石声发射 Kaiser 点信号的小波分析及其应用初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 854 - 3 858.(ZHAO Kui, DENG Fei, JIN Jiefang, et al. Wavelet analysis of Kaiser signal of rock acoustic emission and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup. 2): 3 854 - 3 858.(in Chinese))
- [9] 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 - 950.(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 - 950.(in Chinese))
- [10] 刘继国, 曾亚武. 岩石试样端面摩擦效应及参数敏感性研究[J]. 建筑技术开发, 2005, 32(3): 69 - 71.(LIU Jiguo, ZENG Yawu. Research on the end frictional effect of rock specimen and parameter sensitivity[J]. *Building Technique Development*, 2005, 32(3): 69 - 71.(in Chinese))
- [11] 黄滚. 岩石断裂失稳破坏与冲击地压的分叉和混沌特征研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2007.(HUANG Gun. Study on chaos and bifurcation characteristics of instability and fracture of rock and rock-bursts[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.(in Chinese))
- [12] LABUZ J F, BRIDELL J M. Reducing frictional constrain in compression testing through lubrication[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(4): 451 - 455.
- [13] 蒋宇. 周期荷载作用下岩石疲劳破坏及变形发展规律[硕士学位论文][D]. 上海: 上海交通大学, 2003.(JIANG Yu. Fatigue failure and deformation development law of rock under cyclic load[M. S. Thesis][D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003.(in Chinese))
- [14] 刘立强, 马胜利, 马瑾, 等. 岩石构造对声发射统计特征的影响[J]. 地震地质, 1999, 21(4): 377 - 386.(LIU Liqiang, MA Shengli, MA Jin, et al. Effect of rock structure on statistic characteristics of acoustic emission[J]. *Seismology and Geology*, 1999, 21(4): 377 - 386.(in Chinese))
- [15] LOCKNER D, BYERLEE J. Fault growth and acoustic emissions in confined granite[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1992, 45(3/2): 165 - 173.
- [16] LOCKNER D. 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 - 889.
- [17] 蒋海昆, 张流. 岩石微破裂时空强分布特征及其动态演化过程的声发射研究进展[J]. 世界地震译丛, 1998, (5): 1 - 10.(JIANG Haikun, ZHANG Liu. Study progress of acoustic emissions of rocks micro-cracks spatial and temporal distribution and dynamic propagation process[J]. *Translated World Seismology*, 1998, (5): 1 - 10.(in Chinese))