

不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究

李庶林¹, 唐海燕²

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 长沙矿山研究院, 湖南 长沙 410012)

摘要: 在刚性压力机上对岩石进行单轴全过程加载和加卸载试验, 测试岩石材料在不同加载条件下受力变形过程的应力 - 应变、应力 - 时间 - 声发射事件累计值、应力 - 时间 - 声发射事件率关系曲线。在试验结果的基础上, 分析了加载时岩石全过程声发射特性、加卸载时岩石在卸载和重复加载时的声发射特性。试验表明: 在不同的应力水平进行人为卸载时在卸载过程中岩石都会产生明显的声发射; 在应力水平低于峰值强度的 50% 时卸载后的重复加载过程中, 在未达到前次加载应力水平之前时岩样的声发射事件数很少(事件率很小)或不产生声发射, 即出现典型的 Kaiser 效应现象; 而在超过 60% 峰值强度的应力水平卸载后的重复加载过程中则出现明显的声发射现象, 即出现所谓的 Felicity 现象; 在加载和加卸载试验中, 岩石峰后破坏过程中都产生大量的声发射事件。试验还表明, 对于具有中压突增型声发射特性的岩样, 都有峰值前出现声发射相对平静期现象的特点。

关键词: 岩石声发射; 加卸载; 相对平静期; Kaiser 效应; Felicity 现象

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)01-0147-06

作者简介: 李庶林(1963-), 男, 江西永修人, 博士, 教授, 主要从事岩石力学、岩土工程、声发射与微地震监测技术方面的教学和研究工作。E-mail: shulin.li@163.com

Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads

LI Shu-lin¹, TANG Hai-yan²

(1. Architectural and Civil Engineering College of Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, China)

Abstract: Experiments on acoustic emission (AE) characteristics of full-regime rock failure are carried out with stiffness test machine (MTS) under uniaxial loading, cyclic loading-unloading conditions to obtain the relations of stress-strain, stress-time-accumulative counts of AE, stress-time-AE rates. Based on the test results, the AE characteristics of loading process, unloading and reloading of loading-unloading process are analyzed. The results show that AE phenomena can apparently appear during the process of unloading. When being reloaded under the stress level not more than 50% of the peak stress, there are less or little AE counts occurring as long as the stress level is not more than the previous loading stress level, that means the Kaiser effect occurs. While reloading is made again on the stress-level of over 60% of the peak stress, there occurs obviously AE events, that is so-called the Felicity phenomenon. Rock samples show a large amount of AE events in the post-peak region for both loading and loading-unloading processes. And the results also show that there exists a relatively tranquil period phenomenon of AE for all samples of the style of AE abruptly increasing during middle stress stage.

Key words: acoustic emission of rock; loading-unloading; relatively tranquil period; Kaiser effect; Felicity phenomenon

0 前言

岩石声发射是岩石材料受力过程中其内部原生裂纹和缺陷的扩展以及新的微破裂的孕育、萌生、演化、扩展和断裂过程所释放的弹性波。自 20 世纪中期以来, 岩石声发射技术已广泛应用于隧道、边坡、水电等地下工程和矿山地压与安全监测中^[1]。在岩石受力破坏过程的声发射特性方面, 国内外一些学者进行过广泛的室内实验研究, 包括岩石受压、张拉、剪切和

断裂试验条件下的声发射特性研究等。50 年代前苏联研究了岩石的声发射特性并用于矿山地压的监测中; 60 年代初期, Mogi 对岩石进行了大量的声发射实验研究, 探讨了受压岩石破裂过程的声发射特性^[1]; 70

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572122); 国家 863 计划项目(2006AA06Z117); 国家科技部社会公益项目(2004DIB3J137)

收稿日期: 2008-12-19

年代, Hardy 对岩石材料的声发射特性进行了大量的研究, 涉及拉压试验、声发射事件频率和能量等的研究; 80 年代, 日本的一些学者对岩石的声发射特性、岩石的 Kaiser 效应等进行过广泛的室内试验研究; Holcomb 等采用声发射技术来研究岩石类脆性材料的破坏情况^[1-3]。90 年代, Rao 等采用声发射技术来研究岩石在循环加载过程中的渐进破坏性质^[4]; Lockner 探讨了声发射技术在研究岩石破坏机理方面的作用, Cox 等研究了岩石微破裂、软化过程中的声发射现象, Rudajev 等也通过单轴压缩试验研究了岩石破裂过程中的声发射特性^[5-8]。Pestman 等对砂岩三轴应力状态下的破坏特性和声发射特性之关系、应力记忆现象进行了研究^[9]。20 世纪末, Dai 对岩石类材料损伤与声发射特性之间的关系、对不同孔隙度的类岩石材料的声发射特性进行了研究, 并认为其研究结果可用于对此类材料破坏的实时监测和预报^[10]。近年来, Tham 等采用多通道声发射系统监测研究了板状岩石试样在拉伸时的声发射特性, 并采用二维有限元软件对声发射进行了模拟分析^[11]; Ganne 等利用声发射技术对岩石峰值前的脆性破坏进行了研究, 给出了整个过程中累积声发射能量的 4 个过程^[12]。

20 世纪 70 年代, 声发射技术在我国的岩土工程和矿山生产中开始得到应用。在国内, 陈颤较早地开展了岩石声发射特性的室内试验研究^[13]; 彭守拙, 吴刚等针对岩石声发射特性开展了室内试验研究工作^[14-15]。万志军等通过试验研究了岩石在不同加载速率时的声发射特性, 并对加载速率与裂纹之间的量化关系进行了研究^[16]。蒋海昆等对高围压条件下的花岗岩变形破坏过程的声发射特性进行了试验研究, 并根据试验结果分析了声发射的时序特性^[17]。笔者曾在单轴压缩试验中, 研究了应力 - 声发射事件数(率) - 时间之间的关系, 对岩石峰值前的声发射事件出现相对平静期现象进行了研究和探讨^[18]; 张茹等在单轴多级加载试验中进一步研究和证实了岩石峰前声发射事件相对平静期现象^[19]。尹贤刚等还在室内试验研究的基础上, 在理论上研究了岩石声发射的分形维值的变化特征等^[20]。近年来, 付小敏对岩石单轴受力变形过程中的声发射特性开展试验研究^[21]; 余贤斌等还研究了直接单拉、劈裂和单轴压缩时的岩石的声发射特性, 对不同加载方式时的声发射特性进行了对比分析^[22]。

上述的岩石声发射试验研究和理论研究, 不断增强了人们认识岩石声发射特性的认识, 促进了声发射技术应用的进步。但是, 正如一些学者所指出的声发射技术是一门理论落后于应用的技术^[2]。这主要体现在对岩石材料的声发射破裂机理认识不足, 迄今为止主要集中在定性方面的研究, 且所获得的共性的、具

有普遍意义的结果不多, 特别是测试岩石反复加卸载过程的声发射特性的试验研究在国内还不多见。有鉴于此, 本文在以往研究的基础上进一步通过室内试验研究岩石单轴压缩条件下一次性加载、加卸载和反复加卸载时的声发射特性, 包括声发射与应力应变、声发射与时间等参数之间的关系, 以便了解岩石在不同加卸载条件下的声发射特性, 探讨声发射技术应用中存在的问题。

1 试验加载控制与测试方式

试验采用加载控制系统和声发射监测系统两套装置。试验加载设备是 MTS851 型液压伺服岩石力学试验机, DYF-2 型智能声发射测试仪, 具体试验装置参见文献[18]。对加载系统采用轴向位移控制加载, 加载速度为 1×10^{-3} mm/s。对声发射监测系统, 设定声发射监测的采样间隔为 50 us, 低通截止频率为 100 Hz, 高通截止频率为 1000 Hz; 为尽可能减少噪音的干扰, 选择高的声信号触发电平为 3.6~4.5 mv; 传感器自身有前置放大电路且放大倍数为 700 倍。试验时, 保持系统加载过程与声发射监测过程同步, 按照一定的时间间隔或应力间隔读取声发射事件的累计值。

2 试验结果及分析

2.1 典型的声发射事件

本次室内试验分别对灰岩、黄铁矿、辉绿岩、锌矿石、白云岩等多种岩样进行声发射特性测试, 分别测试岩石受力变形过程中的声发射特性。测试过程中, 声发射仪与分析计算机实现信号通讯, 实现对声发射事件的实时监测、波形显示和事件的存储。试验记录的典型声发射事件的典型波形图见图 1(a)。经过 FFT 频谱分析得到的对应的频率谱见图 1(b), 该事件的主频率为 960 Hz, 图中的纵坐标做了归一化处理, 横轴为频率, 每一小格为 20 Hz。

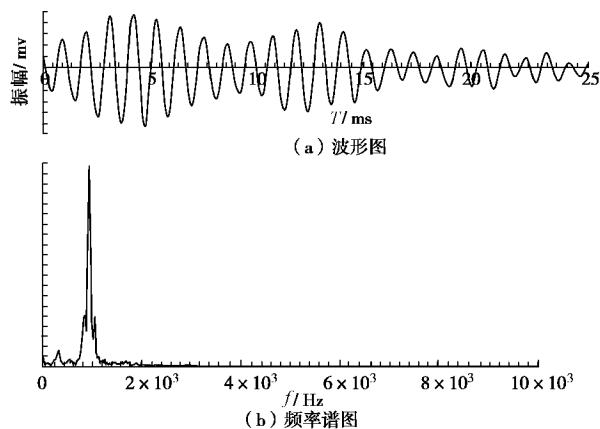


图 1 试验测得的声发射信号图

Fig. 1 Acoustic emission signal from experimental tests

2.2 岩石声发射特性分析

(1) 加载过程的声发射特征

岩石是一种含原生裂纹、孔隙的天然粒状材料。由于其非均质和组成结构的复杂性, 在受力变形过程中呈现复杂的声发射特征。试验结果表明, 同类岩样间和不同种类岩样间所表现的声发射特性都不尽相同。通过本次对 20 多个岩样的声发射试验研究, 可以总结得到峰值强度前的中压突增型、中高压突增型两类典型的声发射特性曲线。对于中压突增型, 声发射主要集中在中压阶段, 即在初期压密阶段没有声发射或声发射事件数少、事件率很低。由于初始压密阶段的应力值不高, 不产生声发射的主要原因应该是 Kaiser 效应现象。在岩石的线弹性阶段和弹塑性初始阶段的声发射事件大量出现, 声发射事件率也增大, 这可能是因为这个阶段是产生大量细观弹塑性破裂、形成大量新鲜细观微裂纹的阶段。在进入塑性阶段的中后期即峰值前塑性阶段, 岩石声发射事件率明显减小, 这种现象迄今为止没有得到很好的理论解释。具有这种峰前声发射特性时, 就是产生所谓的峰值前的“相对平静期”现象, 见图 2。对于中高压突增型, 大量声发射事件出现在弹性阶段的中期之后, 并且在峰值之前声发射事件数剧增而不出现“相对平静期”现象, 而在压密阶段和线弹性阶段初期, 即对应岩石应力应变曲线的上凹阶段, 基本没有或有少量的声发射产生。

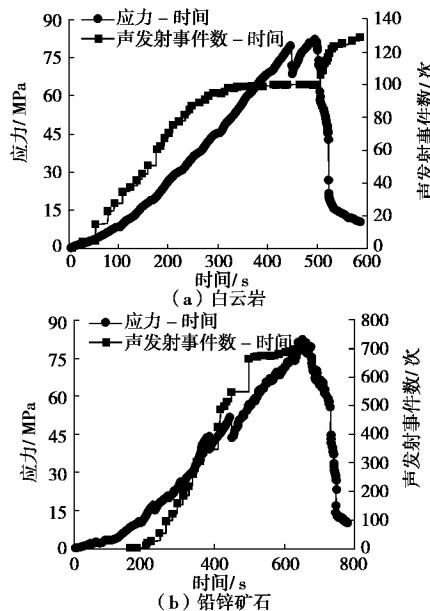


图 2 中压突增型岩样声发射特性图

Fig. 2 Abrupt increasing of AE counts with middle stress stage

对于这两种声发射类型岩样, 一个共同的特点是在峰值强度之后声发射都呈现几乎相同的特点, 即峰值后声发射大事件数快速增多, 见图 3。这反映岩石在峰值强度之后大量微裂纹的扩展、宏观裂纹之间的沟通、裂纹之间岩桥快速破坏, 这种宏观破坏释放的声

发射事件能量大, 在试验中人耳都能听见大量的宏观可听声音。

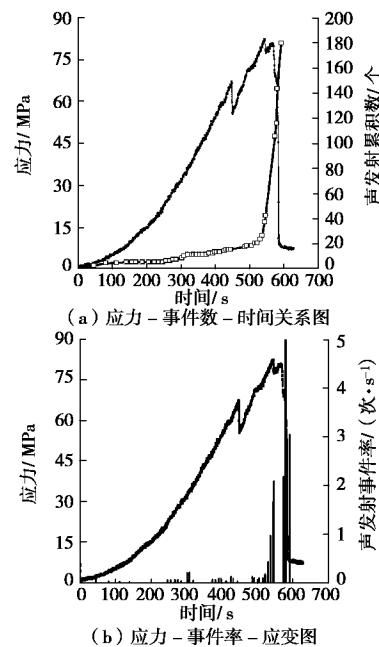


图 3 峰值强度后声发射事件数/率快速增加

Fig. 3 Abrupt increasing of AE counts after peak-stress stage

(2) 岩石加卸载过程中的声发射特性

本研究对灰岩、白云岩等岩样进行了加卸载试验研究, 测试了岩石加卸载的应力 - 应变曲线和声发射现象。试验前根据预计的岩样的峰值强度, 设置在 60, 90 MPa 两个不同的应力水平进行加卸载。图 4~6 是典型的岩样试验所测得的加卸载应力 - 应变、应力 - 时间 - 声发射事件率的结果图。尽管不同岩样试验结果不完全一致, 但试验结果显示的共同的特点:

a) 初次加载初期时, 一些岩样几乎没有或很少有声发射产生, 而有一些岩样则有明显的声发射事件产生, 这可能与岩样的端部效应、岩样自身的原生缺陷产生闭合等有直接关系。

b) 岩石在不同的应力水平进行人为卸载过程中均产生明显的声发射现象, 大量的声发射事件可能出现在卸载初期, 也可能出现在卸载的中期, 直至卸载到较低应力水平时声发射事件率才明显降低。在卸载过程中表现的声发射特性, 无明显的规律可寻。人为卸载过程中的这一声发射特点, 对各岩样来说是共有的。

c) 在一定的应力水平之内, 重复加载过程中均出现声发射 Kaiser 效应, 即重复加载应力在未达到前一次最大加载应力之前, 声发射现象不明显或很少产生声发射, 声发射事件率处于较低值。

d) 岩样在加载过程中产生局部破坏时导致应力突降卸载时, 一般不产生声发射或者声发射事件率降低现象, 这一点在应力 - 时间 - 声发射事件率图中清楚看出, 且与单一加载试验所出现的特点是基本吻合的。

e) 反复加卸载的岩样在峰值强度后, 仍然产生大量的声发射事件, 即声发射事件率高, 这也与单一加载试验所得的结果相似。

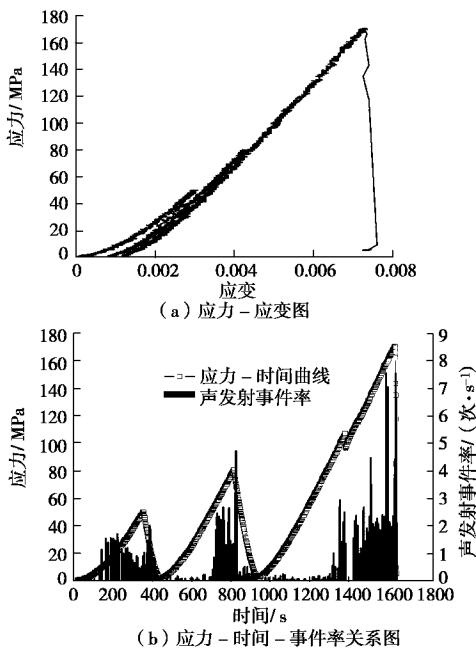


图 4 灰岩加卸载试验结果图

Fig. 4 Loading-unloading test results of limestone

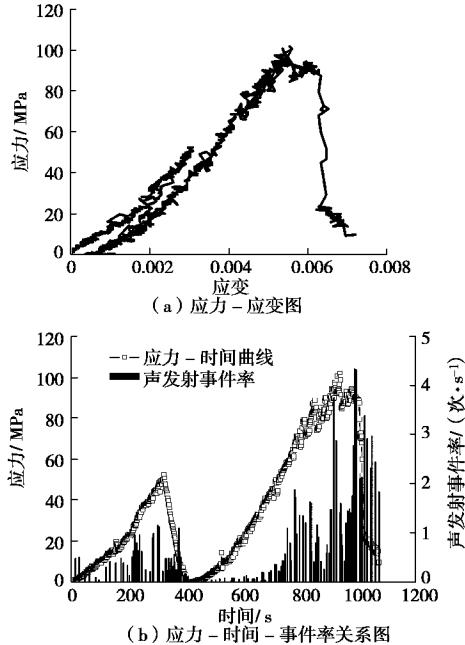
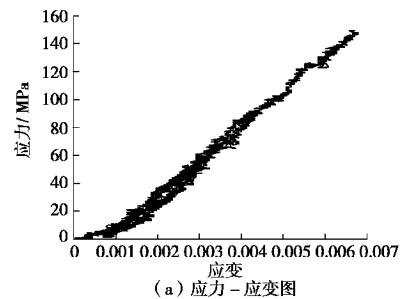


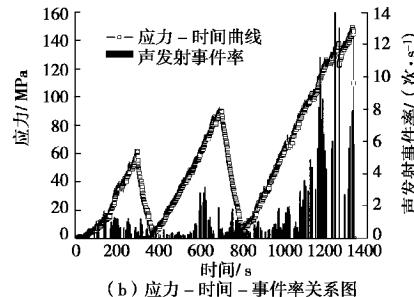
图 5 白云岩加卸载试验结果图

Fig. 5 Loading-unloading test results of dolomite

f) 当卸载应力水平超过峰值荷载的 60% 后, 重新加载时就出现 Felicity 现象, 即此时不出现 Kaiser 效应现象。在图 6(b) 中明显可以看出在 90 MPa 卸载后重新加载时, 在很低的应力水平就有一定的声发射事件率值出现, 在超过 30 MPa 之后 90 MPa 之前声发射事件数显著增加、声发射事件率值达到较高的水平。



(a) 应力-应变图



(b) 应力-时间-事件率关系图

图 6 灰岩加卸载试验结果图

Fig. 6 Loading-unloading test results of limestone

3 讨 论

3.1 声发射试验影响因素

在岩石声发射特性试验研究中, 往往得到一些同类型岩样的声发射特性不同, 出现难以解释和总结共性的现象。因此, 必须对岩石类材料的声发射试验研究的影响因素做出必要的分析。岩石类材料是天然形成的一种粒状材料, 加上声发射测试本身是一种高灵敏度的测试, 试验测试中受到各种因素的影响。根据试验中的体会, 总结得到影响岩石类材料声发射特性下列几个主要的影响因素。

(1) 岩石材料的组成及结构。岩石材料是典型的颗粒(含结晶)状材料, 材料颗粒的大小、非均质与各向异性、结晶程度、原生缺陷、第二相等都是影响岩石声发射特性的因素, 且这些是内在的主要因素。

(2) 岩样取样与加工。现场岩样的钻取地点、方位, 室内岩样的钻取或切取方向的不同, 是导致甚至同类型岩样存在很大差异的原因; 另外各个试样加工的过程不同, 试样端部平整度的精度差异等也是影响声发射特性的因素之一。

(3) 加载控制方式。加载控制方式, 如荷载控制、位移控制、应力控制、应变(纵、横向)加载, 加载速度和速率等是影响声发射特性的重要因素。在加卸载试验中, 加载历史也是影响因素之一。

(4) 环境因素。试验测试环境是影响声发射监测的一个重要因素。由于声发射监测是一种使用较高灵敏性的仪器进行的监测, 它必然对环境及其噪音的敏感性高。如实验室内的环境温度的变化、加载系统(MTS 液压伺服系统)的伺服阀的流量大小、电源载荷波动导致的系统不稳定、加载系统的振动等。

这些因素的影响, 导致了岩石声发射特性研究的复杂性, 在实验和理论研究方面进展缓慢。这也说明岩石声发射研究方面还有大量的工作要做, 应该是一个研究岩石材料破裂机理的方向, 可以通过细观力学方法开展进一步的研究。

3.2 关于前兆特性问题

岩石峰值强度之前声发射的相对平静期现象是岩石破坏前的一个重要的前兆特性, 它对于实际工程中的监测预报有一定的指导意义。从实际监测应用中所得到的经验来看, 与声发射突增前兆相比, 采用声发射突降作为预报的前兆信息来预报更接近岩体的破坏, 但到目前为止这种方法没有得到很好的理论解释, 仍然处于经验应用阶段。由于岩石在卸载和重复加载

(低于前次加载应力水平)过程中也产生明显的声发射事件数和事件率减小现象, 因此在实际工程监测中可能因为动态施工等因素在岩体中产生应力重分布, 导致高应力岩体卸载, 使得监测的声发射事件产生突然减少, 即产生一种声发射事件的“伪相对平静期”现象, 显然在这种情况下不可能会有岩石破坏现象的发生, 进而造成预报的不准确性。如果 Felicity 现象存在且有普遍意义, 则处在高应力状态的岩石在卸载过程中不应该有 Kaiser 效应产生, 也就不会有“伪相对平静期产生”, 则在接近岩石峰值强度前的声发射“相对平静期”现象作为实际监测中的预报前兆信息的可靠性就会更大。需要指出的是对于岩石峰值强度之前声发射的相对平静期现象或称声发射突降现象以及岩石加卸载过程中的声发射特性, 目前的研究很少、很不充分, 还需要大量的研究来探讨和研究。

3.3 展望

国内开展的岩石声发射室内试验研究大多是单通道监测仪器或是多通道非定位监测仪器, 这在很大程度上制约了声发射试验技术研究和理论分析的发展。随着近年来国内室内材料试验系统和声发射试验装备的引进、开发, 目前在国内实现对声发射事件源进行高精度定位、自动记录与存储成为可能, 克服了现有试验条件的限制, 如赵兴东等就成功地在室内对岩石试样开展了多通道声发射定位试验研究^[23]。由此可见, 多通道声发射定位系统的应用, 使得人们既可以根据声发射事件累计数、事件率等, 也可以根据记录的声发射的能量(率)、声发射空间位置变化, 结合材料的细观力学研究如细观损伤力学、非线性力学如分形理论等来研究材料的破坏机理。可以预见, 它对于研究类岩石材料的破裂机理将起到重要的作用。

4 结 论

(1) 试验表明在不同的应力水平进行人为卸载时在卸载过程中岩石都会产生明显的声发射。

(2) 在应力水平低于峰值强度的 50%时卸载后的重复加载过程中, 在未达到前次加载应力水平之前时岩样的声发射事件数很少或不产生声发射, 即出现典型的 Kaiser 效应现象; 而在超过 60% 峰值强度的应力水平卸载后的重复加载过程中则出现明显的声发射现象, 即出现所谓的 Felicity 现象。

(3) 无论是在加载和加卸载试验中, 岩石峰强度后的宏观破坏过程中都产生大量的声发射事件。

(4) 试验还表明, 对于具有中压突增型声发射特性的岩样, 都有峰值前出现声发射相对平静期现象的特点。

岩石的破裂机理是一个复杂的研究内容, 声发射技术对于研究岩石材料破裂机理是一个有力的手段, 可以预见随着声发射监测仪器性能、信号存储、辨识和处理功能的改善, 以及结合细观力学方法的应用, 采用声发射监测技术来揭示岩石材料破裂机理和破裂、破坏过程等将会起到良好的效果。

参考文献:

- [1] 勝山邦久. 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]. FENG Xia-ting, translator. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1996. (in Chinese))
- [2] 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.)
- [3] HOLCOMB D J, COSTIN L S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions[J]. J Appl Mech, 1986, **53** (3): 536 - 554.
- [4] RAO M V M S, RAMANA Y V. A study of progressive failure of rock under cyclic loading by ultrasonic and AE monitoring techniques[J]. Rock Mech Rock Engng, 1992, **25**(2): 237 - 251.
- [5] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. Int J rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, **30**(7): 893 - 899.
- [6] COX S J D, MEREDITH P G. Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emissions[J]. Int J rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, **30**(1): 11 - 24.
- [7] RUDAJEV V, VILHELM J, LOKAJICEK T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2000, **37**(4): 699

- 704.
- [8] MANSUROV V A. Acoustic emission from failing rock behaviour[J]. Rock Mech Rock Engng, 1994, **27**(3): 173 - 182.
- [9] PESTMAN B J, VAN MUNSTER J G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1996, **33**(6): 585 - 593.
- [10] DAI S T, LABUZ J F. Damage and failure analysis of brittle materials by acoustic emission[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 1997, **9**(4): 200 - 205.
- [11] THAM L G, LIU H, TANG C A, et al. On tension failure of 2-D rock specimens and associated acoustic emission[J]. Rock Mech Rock Engng, 2005, **38**(1): 1 - 19.
- [12] GANNE P, VERVOORT A, WEVESS M. Quantification of pre-break brittle damage correlation between acoustic emission and observed micro-fracture[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2007, **44**(5): 720 - 729.
- [13] 陈 颤. 声发射技术在岩石力学中的应用[J]. 地球物理学报, 1977, **20**(4): 312 - 322. (CHEN Yong. Application of AE techniques in rock mechanics[J]. Geophysics Journal, 1977, **20**(4): 312 - 322. (in Chinese))
- [14] 彭守拙, 谷兆祺. 花岗岩声发射特性和破坏机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, **10**(3): 281 - 290. (PENG Shou-zhuo, GU Zhao-qi. Experimental research of the AE characteristics and failure mechanics of a granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, **10**(3): 281 - 290. (in Chinese))
- [15] 吴 刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(2): 82 - 85. (WU Gang, ZHAO Zhen-yang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(2): 82 - 85. (in Chinese))
- [16] 万志军, 李学华. 加载速率对岩石声发射活动的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, **20**(4): 469 - 471. (WAN Zhi-jun, LI Xue-hua. Influence of loading velocity on the rock's acoustic emission activity[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001, **20**(4): 469 - 471. (in Chinese))
- [17] 周永胜, 张 流, 蒋海昆. 不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征[J]. 地球物理学报, 2000, **43**(6): 812 - 826. (ZHOU Yong-sheng, ZHANG Liu, JIANG Hai-kun. Behavior of acoustic emission time sequence of granite in deformation and failure process under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, **43**(6): 812 - 826. (in Chinese))
- [18] 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 on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 2499 - 2503. (in Chinese))
- [19] 张 茹, 谢和平, 刘建峰, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(12): 2584 - 2588. (ZHANG Ru, XIE He-ping, LIU Jian-feng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(12): 2584 - 2588. (in Chinese))
- [20] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕. 岩石破坏声发射强度分形特征研究[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))
- [21] 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 & Technology Edition), 2005, **32**(1): 17 - 21. (in Chinese))
- [22] 余贤斌, 谢 强, 李心一, 等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 137 - 142. (YU Xian-bin, XIE Qiang, LI Xin-yi, et al. Acoustic emission of rocks under direct tension, brazilian and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 137 - 142. (in Chinese))
- [23] 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 Xing-dong, LI Yuan-hui, YUAN Rui-bu, 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))