

许 峻, 杨润海, 张建国等. 脆性材料强破裂前兆的初步研究. 地球物理学报, 2011, **54**(9): 2283~2292, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.011

Xu J, Yang R H, Zhang J G, et al. A preliminary study on precursors of strong fracture in brittle material specimens. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(9): 2283~2292, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.011

## 脆性材料强破裂前兆的初步研究

许 峻<sup>1,2</sup>, 杨润海<sup>1</sup>, 张建国<sup>1</sup>, 许昭永<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 云南省地震局, 昆明 650224

<sup>2</sup> 昆明伟业工程技术有限责任公司, 昆明 650091

**摘 要** 本文依据现有的实验结果初步研究脆性材料在破坏孕育过程中发生的强破裂的前兆特征. 以应变(形变)突变、破裂弹性波限幅等物理变化特征确定强破裂; 研究总结了不同试样、两种加载方式的破坏试验中的多个强破裂的前兆特征变化: 一类为包括定点和场的应变变化特征, 另一类为包括声发射率(破裂频度)、 $b$  值、波谱及微破裂时空分布等的声发射变化. 此外, 还有突发电磁扰动和应变扰动. 然而, 所有这些前兆特征变化并非在所有材料试样、所有强破裂之前同时都出现, 也不是所有测点、任何方位都能观测到. 同时指出, 至今未见到对一次破坏实验中的系列强破裂(至少 3~5 个)前兆特征的系统对比研究, 这正显示了这类研究的艰难, 深入开展强破裂前兆研究对地震预测可能有重要意义.

**关键词** 强破裂, 应变, 声发射, 微破裂, 前兆变化

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.011

中图分类号 P584

收稿日期 2010-11-09, 2011-07-11 收修定稿

### A preliminary study on precursors of strong fracture in brittle material specimens

XU Jun<sup>1,2</sup>, YANG Run-Hai<sup>1</sup>, ZHANG Jian-Guo<sup>1</sup>, XU Zhao-Yong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

<sup>2</sup> Kunming WEIYE Engineer Technology Co., Ltd, Kunming 650091, China

**Abstract** This paper conducts a preliminary study on the characteristic precursors of strong fractures occurred in the process before failure of brittle material specimens based on experimental results. First, strong fracture is defined by sudden variation of strain at some points and limited amplitude of wave recorded at some stations, and then the precursory characteristics are summarized before several strong fractures for various samples during two ways of loading, one kind of precursors is related to strain variation at specific points and the character of strain field, and another is the variation of acoustic emission features including AEs rate,  $b$ -value, spectrum and the variation of distribution of microcracks with time and space. In addition there are sudden strain and electromagnetic disturbances. However these precursors do not necessarily all emerge or at the same time, and nor they could be observed at all points and in any direction before a strong fracture for various samples of different materials. It should also be pointed out that there are no systematic studies on the precursors of many strong fractures in the process before failure. These show the difficulties of studying the precursor of fracture. Nevertheless it could be more meaningful for earthquake prediction. We appeal to further study the precursor characteristics of strong fractures.

**基金项目** 中国地震局地震行业科研专项《宁洱 6.4 级地震现场综合考察研究》(200808061)和地震科学联合基金项目(D08019)资助.

**作者简介** 许 峻, 男, 1974 年生, 工程检测工程师. 主要从事工程质量检测并作部分检测技术研究, 兼作地质灾害如滑坡、塌方等监测、预测研究. E-mail: zhaoyongx@126.com

**Keywords** Strong fracture, Strain, Acoustic emission, Microcrack, Precursor variation

## 1 引言

许昭永近年依据大量资料,详细论述了岩石破坏和破裂及其前兆的差别,并论及岩石局部黏滑和整体黏滑及其前兆的差别<sup>[1]</sup>。前人称谓的主破裂(最后强破裂、断裂)其实质含义与破坏相同,也已经确认最后断裂与前边的强破裂的不同。以岩石为例,可简单归结为:破坏和破裂是不同的,破裂是局部现象,破坏是整体现象;破坏的损伤程度远大于破裂,破坏一定有破裂,但破裂并不等于破坏。岩石破裂和破坏的判据也不相同;使裂纹失稳扩展的应力远比使岩石破坏的应力低,破裂应力降则远小于破坏应力降。既然这二者有如此大的差异,其前兆也应有很大不同。然而,纵观实验地震学的历史,从未有人将此加以详细区别。因此,也从未有人考究以往研究的岩石破裂前兆究竟是破坏前兆还是破裂前兆。而且,至今未见到对一次破坏实验中的系列强破裂(至少3~5个)前兆特征的系统对比研究结果。经过对多年实验研究结果的反思,马胜利等基于实验结果讨论断层破裂与强震物理过程的若干问题<sup>[2,3]</sup>,我们则从岩石破裂和破坏的差异来研究模拟地震的影响及效果。我们认为仅以破坏模拟地震还有许多不足,而应以破裂(或局部黏滑)模拟地震,即以岩石破坏孕育过程中的破裂模拟地震,大破裂相应于大(强)地震,小破裂相应于小地震,特大破裂相应于特大(强)地震。本文将依据现有的公开发表的实验结果初步研究脆性材料在破坏孕育过程中发生的强破裂前兆特征,并论证其研究的可行性、艰难性及研究的意义。

## 2 监测岩石破裂或局部黏滑的实验技术、试验设备及仪器

关于监测、检测脆性材料强破裂及其前兆实验研究的设备、仪器及技术基本上沿用破坏实验用的即可。从马胜利等、许昭永等的实验研究看,检测记录仪器主要分为两类<sup>[4~8]</sup>:一是形变包括应力、应变观测,其中再分为定点观测和场观测。前者在试样上多点布设应变计用多道智能应变仪观测;后者用激光干涉实时计量技术。二是声发射类观测,包括波速、波形记录等。但由于强破裂比破坏多的多,而且

相邻两次强破裂时间间隔可能很短,因此要观测研究一次强破裂的前兆物理量的变化,则需要将时间、空间尺度分得很细,这样就需很多测点的连续大量信息。如果说二十年前尚且为岩石破坏试验记录仪器的记录数量、速度和存储量等问题担心的话,那么现在的记录仪器是只要能提出技术指标,就有公司、厂家能够制造出来。因此,技术问题不大,只要有足够的经费支持即可。下文所讨论的问题,也只是从现行的几种主要仪器、设备,已有的试验结果进行分析而已。

## 3 实验数据处理、资料分析

通过在脆性材料(如有机玻璃、花岗岩等岩石)试样上布设多个声发射和应变测点,观测记录破裂产生的波形及一系列地震学特征变化和定点形变变化;并同时以激光干涉技术和焦散阴影法观测条纹图(应变场或应力场),变化测定应力强度因子或定性估测应变能密度因子,从而研究预测大破裂的发生<sup>[6,7,9~12]</sup>。既然是探寻局部大破裂或局部大黏滑的前兆特征,那么,就应该监测局部区域的一些物理量的时空变化特征。比如激光实时计量技术可以发现异常区,同时由条纹的密集程度确定异常程度。再配以应变定点观测更好。增多声发射监测点,确定划分异常区,并按区研究各类特征,如频度、波谱、波速等。这些方法和手段都是现有的,但要求更高,它是对可能多于两个以上的区域,对多个特大破裂进行前兆识别。当然,能只在一个区域对多个特大破裂进行前兆识别更好。尽管此难度更大,但比野外观测易于重复。这种研究对地震预报的应用和理论可能更有意义。本文主要对砂岩和花岗岩拼合试样单剪试验、云南大理粗粒花岗岩石板试样双轴加载试验结果综合分析讨论,引用部分有机玻璃试样双轴加载试验结果和他人的结果对我们的分析结果予以佐证。

### 3.1 强破裂的确定

一次岩石破坏试验产生的破裂成千上万,单是能定位、并有相当强度的破裂数量就相当可观。对于地震预测来讲,更关心中、强震。因此相应的模拟实验也将以强破裂前兆研究更好。但由于破裂数量太多,只能选择有限的强破裂,比如选择10个以内就不算少。但也不能仅以最后一次破坏为例。这样在相同的组构岩样上却在不同的应力条件下对多个强破

裂观测其前兆特征变化会更有意义. 于是我们首先研究确定强破裂的方法. 主要依据两条——应变突变和波形限幅, 同时出现确定强破裂, 这样选择后, 在一次岩石破坏的试验过程中符合条件的强破裂也就只有几个, 最多也就只有十几个.

### 3.1.1 定点形变

在试样上布设一定数量的应变测点, 在载荷试验时采用多道同时连续记录. 以某一道或多道应变出现突变判定强破裂. 如图 2a 所示, 在砂岩和花岗岩拼合试样前表面布设 8 个声发射检波器, 后表面布设 12 组应变片(见图 1 左上角), 上下两面加上一定的正压力, 左右两侧加载作单面直接剪切试验<sup>[13,14]</sup>. 图 1 为拼合岩样直接剪切时破坏孕育过程中特大破裂前图示各测点的应变变化<sup>[1,14]</sup>. 由图看出, 在最后破坏之前, 多个应变突变(下降)先后在 3、4 点, 1、6 点和 12、7 点发生, 然而这些突变并未在力曲线上引起明显下降. 这些突变即可作为强破裂. 类似记录很多, 如图 3(b,c). 马胜利等在含有凹凸体的断层的变形实验中在岩样整体黏滑之前凹凸体先行断裂, 即出现类似记录图, 如图 3d 中的 26 道也出现应变突降<sup>[2]</sup>.

### 3.1.2 波形记录

图 2b 为砂岩和花岗岩拼合岩样直接剪切时破坏孕育过程中一次特大破裂的波形记录图. 其特点

是所记各道大部分限幅、波列持续时间特长<sup>[13]</sup>. 与其相应的应变突变见图 1 第 3 道.

## 3.2 强破裂前兆

### 3.2.1 强破裂形变前兆

#### (1) 定点形变前兆

如图 1 所示, 每次应变突变(下降)前, 似乎都是先在原趋势上变化速率增加, 而后减缓, 甚至反向变化<sup>[1,14]</sup>. 就是说, 在突降前都有明显的特征变化——加速上升、下降或减缓、反向等. 这在其他试验中也多次出现. 如图 3a 所示, 在多切缝岩石试样上布设多组应变片和多个声发射记录检波器, 图 3b 显示 A 区测点 2(2 道)应变出现突变. 类似地, 试样 B、C 区随后也出现了强破裂(如图 3c), 其应变突变(突降)极为显著<sup>[11,12]</sup>. 而在突变前, 其前兆特征变化与图 1 所示一样明显. 这在马胜利<sup>[2]</sup>(图 3d)等的实验中也有显著反应. 它们与岩样破坏前多点形变特征变化相同.

#### (2) 形变场

图 4 为相应于图 3b 强破裂前的应变场变化<sup>[12]</sup>. 由图看出, 图 4a 在较低应力时, 条纹较稀, 图 4b 应力较高, 条纹较密, 并且 A 区出现应变空区(下部两切缝交汇处)和高应变梯度区(下部切缝下端). 应变场出现明显的空间特征变化. 图 5 为相应于图 3a 中 B 区强破裂(图 3c)前的应变场变化<sup>[12]</sup>. 同样

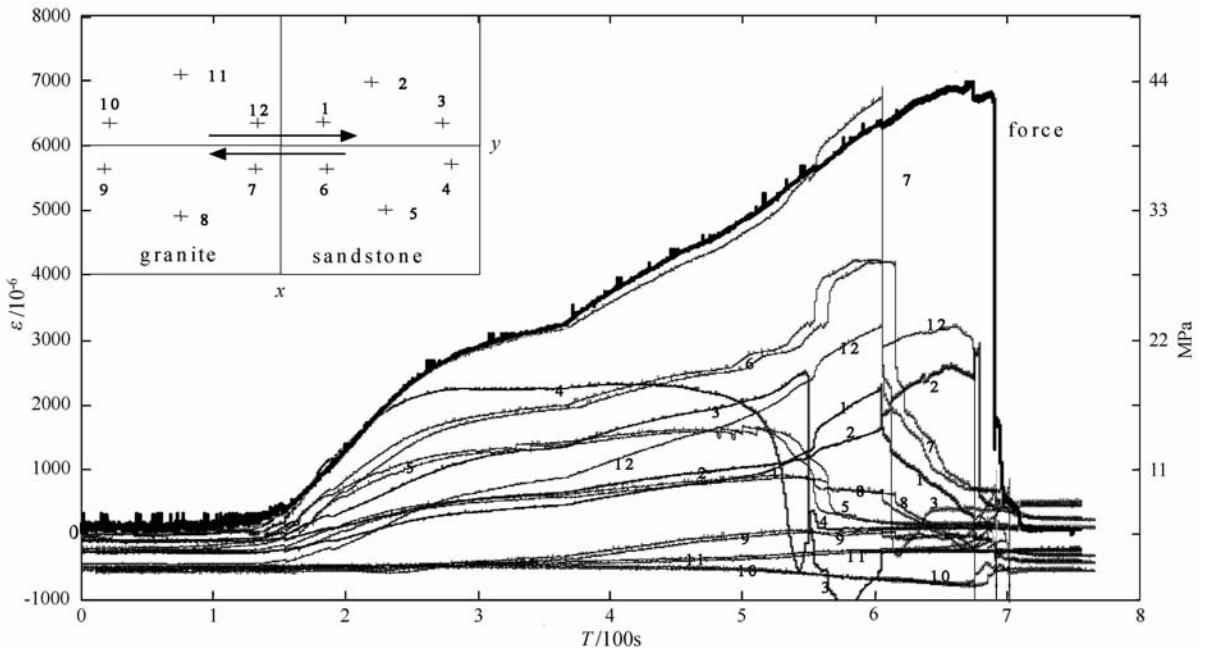


图 1 大破裂前不同测点应变  $\epsilon$  随时间的变化特征

图中左侧纵坐标为应变; 右侧纵坐标为应力, 与力(force)曲线对应.

Fig. 1 Variation features of strain  $\epsilon$  with time at different points before the strong fracture

The ordinate on the left shows the strain, and indicates the stress on the right, corresponding to the force curve.

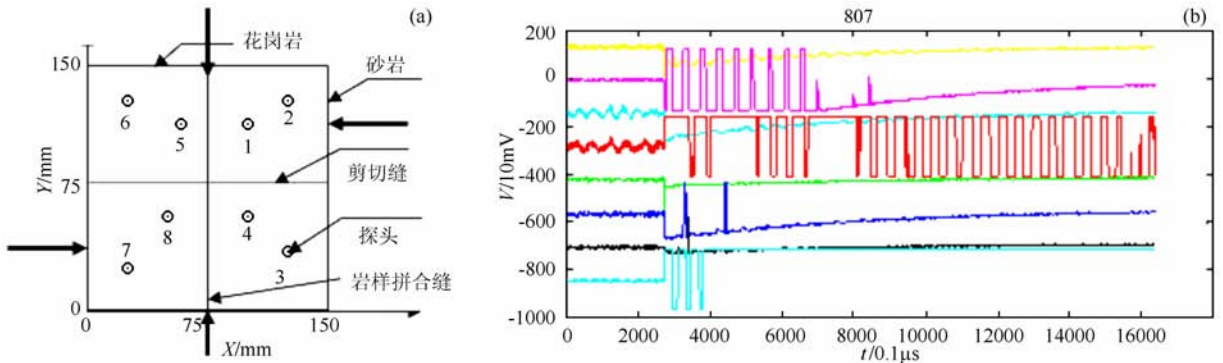


图 2 (a) 岩样组合、加力方式及超声检波器位置(圆圈加边上数字表示超声检波器(共 8 个));(b) 一次特大破裂的波形记录

Fig. 2 (a) Sample combined, load and the detectors (Circle and number shows detectors);

(b) Waves recording for a strong fracture

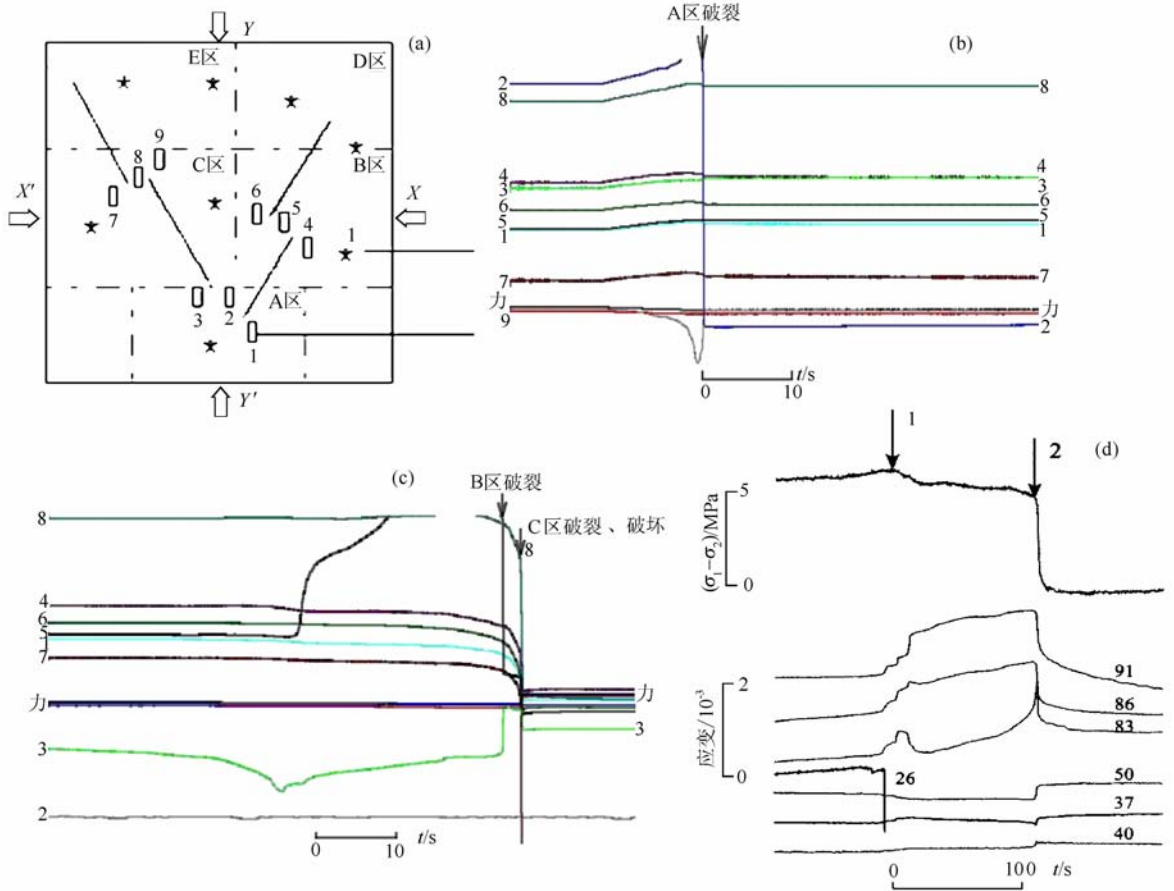


图 3 强破裂前各测点应变的特征变化

(a) 多切缝岩样上构造、加力方式; A、B、C、D、E 分别代表五个构造区; 其为激光反射面的背面; 试样上小方框内数字为应变测点编号; \* 压电晶体传感器; (b)~(c) 多切缝岩样上各测点应变随时间的变化, (b) 应力 32~39 MPa, (c) 大于 39 MPa; (d) 含有凹凸体的单断层的岩样上各测点应变随时间的变化。

Fig. 3 (a) Scheme of the sample structure, way of loading, strains points and detectors; (b) The variations of strain at points with time from 32 MPa to 39 MPa; (c) The variations of strain at points with time when stress > 39 MPa; (d) The variations of strain at points with time on the sample containing asperity.

显示图 5a 在较低应力时, B 区(左侧两切缝交汇处) 条纹较稀. 随应力升高, 条纹变密(图 5b). 应力再升高, 条纹转向(大约旋转 90°), 如图 5c 左侧两切缝交

汇处所示. 即应变场也出现明显的空间特征变化. 类似的还有有机玻璃试样上记录的裂纹端部焦散阴影区的特征变化: 焦散阴影区增大到一定程度满足破

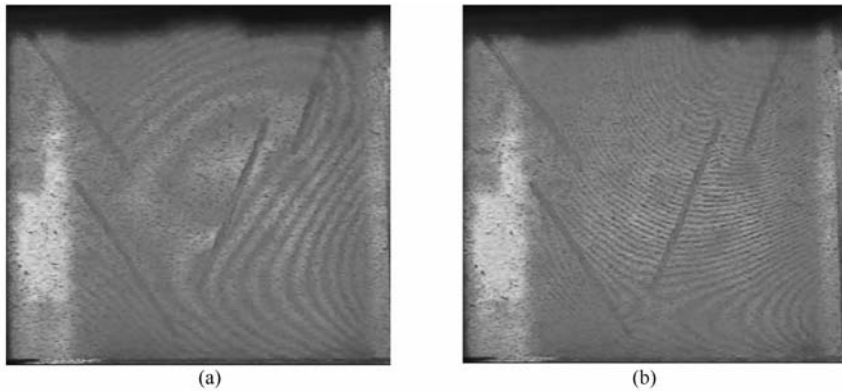


图 4 相应于图 3a 中 A 区强破裂前的应变场变化

(a) 较低应力时;(b)较高应力时.

Fig. 4 Variation of strains field before strong fracture at A area

(a) At lower stress;(b) At higher stress.

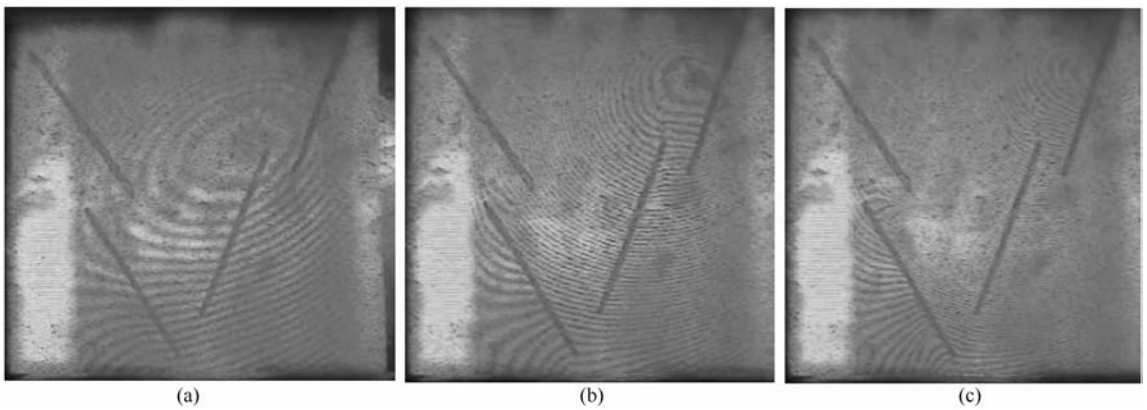


图 5 相应于图 3a 中 B 区强破裂前的应变场变化

(a) 较低应力时;(b) 较高应力时;(c) 逼近强破裂时.

Fig. 5 Variation of strains field before strong fracture at B area

(a) At lower stress;(b) At higher stress;(c) At appraoching strong fracture.

裂条件时发生强破裂;而后,焦散阴影区变小;应力再增大,再破裂.如此往复进行.总之,强破裂的应变场前兆变化是明显的.详见文献[1,6,7].

### 3.2.2 强破裂声发射前兆

强破裂前可能出现声发射率、 $b$  值、序列 ( $M-t$  图)、波谱等特征变化.

#### (1) 微破裂的时间、空间分布

图 3a 所示岩样的定位结果如图 6 所示.对声发射事件按其序号进行分解,分别研究 AE 事件发生时空特征<sup>[11]</sup>.除图上所显示的事件迁移及交替发生特征外,三个区域(A 区、B 区和 C 区)都有的共同特征为强破裂前的小破裂丛集现象:如图 6(a、b)的 A 区、图 6(b、d)的 B 区和图 6e 的 C 区所示.这种破裂丛集区可能发生强破裂,因此,可以将这种活动特征作为强破裂前兆.此外,前人所得的小破裂条带分布和围空现象也是强破裂前兆<sup>[15,16]</sup>,此处不再赘述.

#### (2) 声发射的 $b$ 值变化

为了确定强破裂前  $b$  值的前兆变化,本实验在岩样上切割多条宏观裂缝,制造多个不同断层结构的构造区<sup>[11]</sup>.在研究岩样整体  $b$  值的同时,也根据不同的区域分析了相应的声发射  $b$  值.图 7 展示了试件不同区域声发射频度与震级的关系.其中,图 7(a、b、c)分别统计到 A、B、C 区的强破裂发生,图 7d 统计到岩样最后断裂.它清晰地显示出,单个区域 A、B、C 的  $b$  值都比整个试样的  $b$  值偏低(图 7),其中 C 区更为明显(图 7d).结合微破裂定位及强度分析,可知在各个断层结构区强破裂发生前, $b$  值都会有明显减小现象.

#### (3) 声发射的频度变化

从已有的实验结果及图 6 综合分析,在小破裂丛集区发生强破裂前(微)破裂频度升高现象明显,这肯定是一种前兆反应.图 8 为花岗岩砂岩拼合试

样沿中部水平剪切断裂时声发射率和剪切力随时间的变化<sup>[14]</sup>。箭头表示几次特大破裂。由图看出,每次特大破裂前声发射率都升高。此类结果较多,这儿不

再赘述。

(4)波谱特征变化

在砂岩和花岗岩拼合试样水平剪切试验中,在

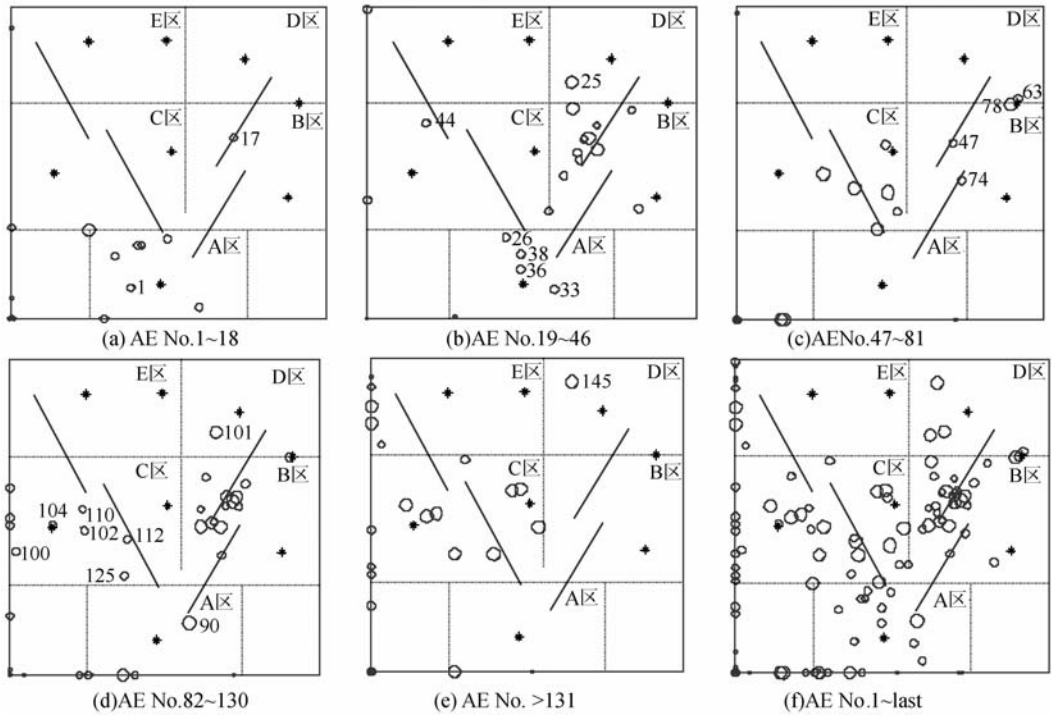


图 6 定位结果图(圈:AE 事件,圈越大事件越大;\* PZT 探头;圈边数字表示此 AE 发生的序号)

(a)应力在 32~39 MPa;(b) 39~45 MPa;(c),(d),(e) >45 MPa

Fig. 6 The variation of microcracks (AE events) location with time

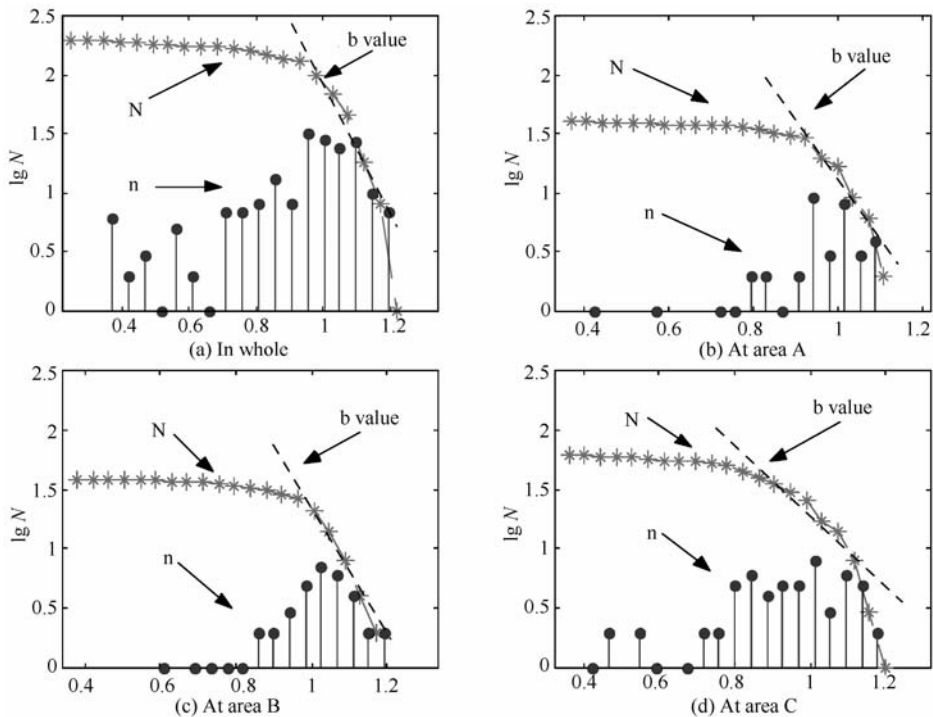


图 7 试件不同区域声发射频度与强度的关系

Fig. 7 The relation between the AE frequency and AE intensity in different zones of the sample

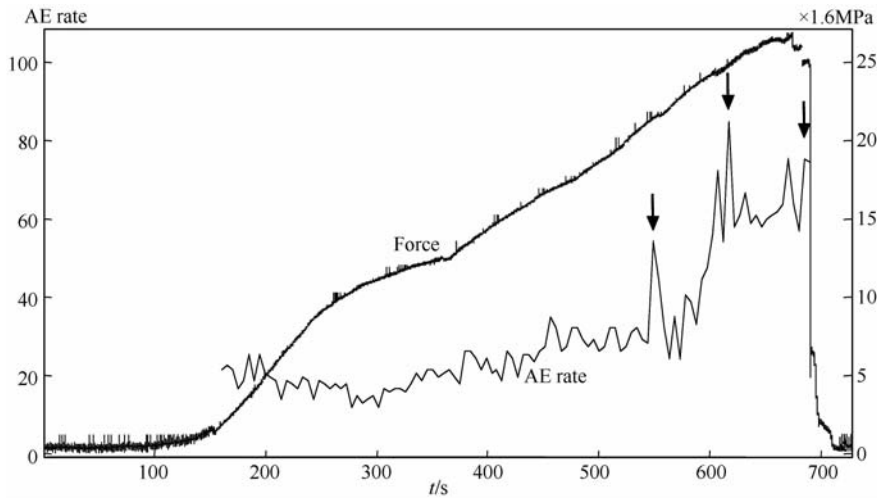


图 8 声发射率和剪切力随时间的变化

Fig. 8 Variation of AEs rate and shear stress with time

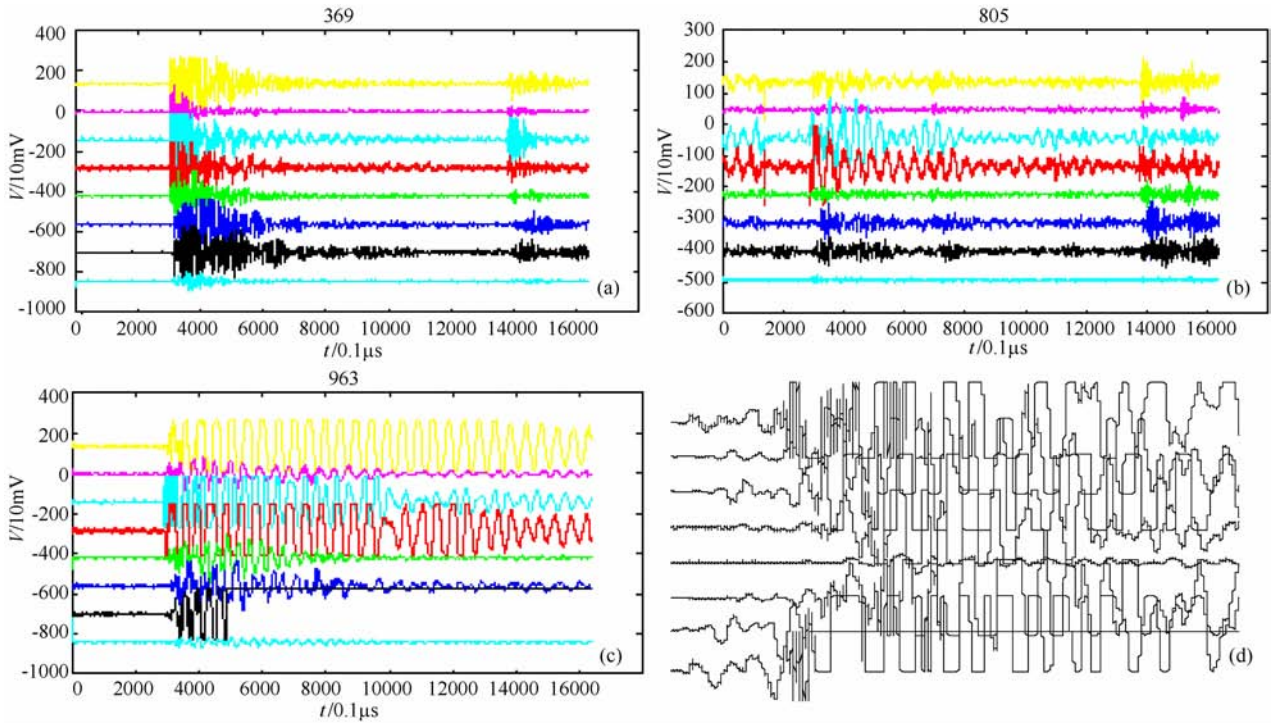


图 9 强破裂前的低频前破裂波形记录

拼合岩样上的小破裂高频(a)、前破裂低频(b、c)波形图,(d)有机玻璃上的强破裂及前破裂波形图.

Fig. 9 Waves recording before strong fracture on the samples

(a) High frequency wave;(b), (c) Low frequency wave on the rock;(d) The wave on the plexiglass.

第一次强破裂(图 2b)前记录到频率明显变低的波形图<sup>[13]</sup>.图 9a 为比第一次强破裂(记录图序号 807)前较早期记录到的波形图(记录图序号 369),图 9b 为临近第一次强破裂记录到的波形图(记录图序号 805).由图看出,图 9b 的 3、4 道的低频成分明显多于图 9a 的 3、4 道.在以后的强破裂之前,同样记录到低频波形图(图 9c,记录图序号 963),其低频特征更明显,而且 8 道都有显示.图 9b 显示在砂岩上临

近强破裂前的破裂在砂岩的测点上出现低频波,图 9c 则显示在花岗岩上临近强破裂前的破裂在砂岩和花岗岩的测点上都出现了低频波.本试验中这种记录很多.类似的,在有机玻璃试样上也观测到强破裂前有低频波形图记录事件<sup>[17]</sup>.其典型图见图 9d.它清晰地显示,强破裂波幅大部分被削波(限幅).而此前紧邻的是小振幅大周期事件.再前边的小破裂的波形图,从直观上看也为高频成分甚多,与图 9a

相近(图从略). 因此, 这种低频特征变化可以作为强破裂前兆进行监测、研究.

### 3.2.3 其他变化特征

关于序列事件的强度变化记录也有不少, 文献[1]也讨论了一个强破裂前后序列事件的强度变化特征, 但如何依据单个事件的强度变化特征判断更强破裂的发生则较少. 而穿过微破裂丛集区波速肯定降低, 只是局部监测较难, 实例从略. 此外, 强破裂前可能还有一些突发扰动, 如电磁扰动和形变扰动<sup>[13,18]</sup>, 本文也不细述.

从上述分析结果看, 在拼合岩样同一剪切带的不同位置—砂岩和花岗岩上先后都发生过强破裂, 在具有多种结构断层的岩样上的不同区域也先后都发生过强破裂, 并且都不少于 3 次. 而且不论在何种岩样上的哪个强破裂之前, 都出现了形变和声发射两大方面的前兆变化. 再加上有机玻璃试样的试验结果, 证明对脆性材料强破裂前兆的研究是可行的. 但也如上文显示, 有些研究还很不够, 如未对拼合岩样的微破裂空间分布、 $b$  值等, 多切缝岩样的弹性波特征等进行同步研究. 因此对脆性材料强破裂的前兆特征还需深入研究. 然而, 要准确识别、判断强破裂前兆也并非易事.

## 4 讨论与结论

关于脆性材料破坏的前兆实验研究相当多, 但明确为强破裂前兆的研究甚少. 一次破坏实验所发生的强破裂多达几次、几十次不足为奇, 但时至今日, 并未见到关于一次试验中的多个强破裂的前兆现象进行逐个对比研究. 而且, 更严重的是, 前述两大类前兆未必都在每个强破裂之前出现, 即强破裂前兆的确定性研究也很不够. 下文即以实例予以说明.

### 4.1 形变特征

Brace 等最早依据对岩样破坏前的整体形变提出著名的膨胀学说<sup>[19,20]</sup>. 后来, 由于测点的增多, 发现在岩样的不同部位, 岩样破坏前的形变特征变化并不相同<sup>[21~23]</sup>. 而如前述, 强破裂前的特征变化并非在任一点都能观测到. 如图 1 和图 3 所示, 只在破裂丛集(带)区或其附近的测点观测到强破裂前的应变特征变化, 但也不是所有这些点都这样<sup>[14]</sup>, 即它可能与到破裂区的距离或方位有关. 再如在单斜切缝有机玻璃双轴加载试验中<sup>[1,24]</sup>, 观测到各应变测点与裂缝端部焦散阴影区的相对位置不同, 不仅焦

散阴影区内外、即使区内不同测点应变随应力的变化也不相同. 焦散阴影区大到一定程度时在其内会有破裂发生. 也有强破裂发生, 但并未见到如图 1 和图 3 那样的特征变化. 此外, 在岩样上很难观测到焦散阴影区, 如图 4 和图 5 那样的记录也较少, 这是因为岩样表面很难非常平整, 而在岩样上的反射式变化比透射式变化强几倍, 它随应力增加, 变化剧烈, 很快即达到白光, 即不再有干涉条纹. 此时需重新制作干板, 即新设参考光源, 重新开始记录, 重新分析. 再者, 从图 4 和图 5 也可看出, 其形变空间特征变化形态也并不相同, 其特征形态有几种, 是否每种形态都对应强破裂发生, 这些都还未予研究. 而用应变片观测, 则为平均效果<sup>[24]</sup>. 至于裂纹尖端区域应力或应变多种前兆变化形态及详情, 也远未深入研究.

### 4.2 声发射特征

**声发射活动** 如图 8 所示, 在第一次特大破裂前, 虽也出现声发射率峰值, 但显然没有其后对最后断裂前的这种特征更明显. 脆性材料在破坏前声发射可能有多种特征变化形态, 但在强破裂前是否同样有这几种特征却不得而知, 特别是大破裂前是否有平静现象对地震前兆研究十分重要. 如图 8 所示, 它是否会在声发射率下降时发生强破裂? 其实, 还不止这些. 地震学家都知道, 在强震前地震频度往往出现特征变化, 然而, 这种变化却与统计区域及其大小有关. 图 8 也为对整个岩样的统计结果, 对局部大破裂其前兆特征是否也如此? 恐怕未必. 许昭永等<sup>[23,25]</sup>曾对完整岩样和大部切开、小部连接的模拟愈合断层岩样作破坏孕育过程中的声发射观测, 结果发现其特征变化有很大差异.  $b$  值原本就是大范围统计结果, 它同样也有统计区域及其大小的影响. 具体到裂缝端部区域, 是否还能如破坏前的特征变化则很难肯定. 关于波谱低频成分增多的事件是否在不同材料的试样上都能观测到, 而且这种低频事件是否就在本裂纹尖端区域, 也研究得很不够. 声发射序列的  $M-t$  图, 它可能是一个完整的典型的前-主-余破裂类型序列; 也可能是一串典型破裂类型序列的复合、迭加; 这就使研究变得复杂艰难. 总之, 关于声发射的许多时空变化特征可能是破裂前兆, 但要确定它是某个确定区域的某个确定大破裂的前兆却很困难. 尤其是多个破裂孕育区的相互影响更需深入研究.

**微破裂的时空活动特征** 至于大破裂前微破裂时空分布特征如围空、条带等现象是否也能如大地震前中小地震的时空分布特征, 还是另有特点也不



得而知。地震围空、条带、丛生现象的前兆特征往往是分时段、分区域得到的,而实验研究,往往都在整个岩样上进行,并且很少仔细划分时段。许昭永等<sup>[26,27]</sup>曾对岩样破坏孕育过程中的微破裂空间活动特征按时间仔细分析,结果发现,时段划分不同,其特征变化也不相同,但不同区域的变化特征是否相同却未研究。从地震前兆现象推想,大破裂前的微破裂围空、条带、丛生现象可能都有,只是可能因区域不同、时段不同而不同。南赖勤一郎<sup>[16]</sup>曾对岩样整体破坏前的局部大破裂前的围空现象作了一点研究,但并未深入涉猎。

**其他特征变化** 在岩石破坏试验中,一般都存在岩石破坏前的波速下降,但韩彪等<sup>[28]</sup>却发现,在岩石破坏前,岩样上不仅存在低波速(下降)异常区,也存在高波速(上升)异常区。而大破裂是发生在低波速异常区还是在高波速异常区?何时发生?这却未予研究。此外,强破裂前的突发扰动如形变扰动和电磁扰动<sup>[13,18]</sup>并非每个强破裂都有,使得这类前兆也甚为困难。

综合上述,脆性材料强破裂前可能出现形变和声发射两类前兆特征变化,然而,又不是每个强破裂前都出现相同的特征变化,并且这种前兆识别也往往非常艰难。但这种情况更接近实际,因此这种研究才更有意义。建议对局部大破裂或黏滑、特别是对一次破坏实验中的系列强破裂进行系统的前兆特征研究。

## 参考文献(References)

[1] 许昭永,王彬,胡毅力等. 试论岩石破裂和破坏的差异对地震模拟及前兆研究的影响. 地球物理学报, 2009, **52**(3): 712~719  
Xu Z Y, Wang B, Hu Y L, et al. A discussion on the influence of the difference between the rock fracture and failure to the earthquake simulation and the precursor studies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(3): 662~671

[2] 马胜利,刘力强,马瑾等. 基于实验结果讨论断层破裂与强震物理过程的若干问题. 地学前缘, 2003, **10**(S1): 225~232  
Ma S L, Liu L Q, Ma J, et al. A discussion on related issues of physical process of faulting and strong earthquake based on experimental results. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, **10**(S1): 225~232

[3] 马胜利,马瑾. 我国实验岩石力学与构造物理学研究的若干新进展. 地震学报, 2003, **25**(5): 453~464  
Ma S L, Ma J. Recent progress in studies of experimental rock mechanics and tectonophysics in China. *Acta*

*Seismologica Sinica*, 2003, **25**(5): 453~464

[4] 马胜利,刘力强,马瑾等. 均匀和非均匀断层滑动失稳成核过程的实验研究. 中国科学(D), 2003, **33**(增刊): 45~52  
Ma S L, Liu L Q, Ma J, et al. Experimental study on nucleation process of stick-slip instability on homogeneous and non-homogeneous faults. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**(Suppl.): 45~52

[5] 蒋海昆,马胜利,张流等. 含障碍体平直断层标本变形过程中群体微破裂事件的时空演化特征. 地球物理学报, 2003, **46**(2): 209~216  
Jiang H K, Ma S L, Zhang L, et al. Spatial-temporal characteristics of acoustic emission of rock sample with regular fault and a columnar barrier during deformation. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2003, **46**(2): 209~216

[6] 许昭永,杨润海,赵晋明等. Y形块体交界处多点大破裂的模拟实验研究. 地球物理学报, 2002, **45**(增刊): 214~224  
Xu Z Y, Yang R H, Zhao J M, et al. Experimental study of multiple fractures on a Y-shape boundary of blocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(Suppl.): 214~224

[7] 许昭永,杨润海,赵晋明等. 加载破裂和卸载破裂的焦散阴影区动态特征的实验研究. 地震学报, 2002, **24**(2): 186~195  
Xu Z Y, Yang R H, Zhao J M, et al. An experimental study of the dynamic features of shadow areas of caustics in response to loading/unloading fracture. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, **24**(2): 186~195

[8] 蒋海昆,张流,周永胜. 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. 地球物理学报, 2000, **43**(6): 812~826  
Jiang H K, Zhang L, Zhou Y S. Behavior of acoustic emission time sequence of granite in deformation and failure process under different confining pressures. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **43**(6): 812~826

[9] 陈顺云,许昭永,杨润海等. 含多组雁列构造试样的特征位移场与声发射的关系—应变空区的实验与理论探讨. 地震学报, 2002, **24**(6): 627~637  
Chen S Y, Xu Z Y, Yang R H, et al. A study on relation between acoustic emission and characteristic displacement field on the sample with multi en echelon structures—The theoretic and experimental explorations of strain gap. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, **24**(6): 627~637

[10] 陈顺云,许昭永,杨润海等. 焦散线法在压剪裂纹应力强度因子测量中的应用. 地震学报, 2005, **27**(4): 452~458  
Chen S Y, Xu Z Y, Yang R H, et al. Application of caustic method to determining stress intensity factor of compressive shear crack. *Acta Seismologica Sinica*, 2005, **27**(4): 452~458

[11] 陈顺云,许昭永,杨润海等. 含V形构造花岗岩块体破坏过程中的声发射特征. 地震地质, 2003, **25**(2): 317~326  
Chen S Y, Xu Z Y, Yang R H, et al. Features of acoustic emission during fracturing process of granite block with V-shaped structure under biaxial compression. *Seismology and*

- Geology* (in Chinese), 2003, **25**(2):317~326
- [12] 胡毅力, 许峻, 许昭永等. 具有多种断层结构岩样的形变和破裂特征的试验研究. *地震研究*, 2010, **33**(3):320~328  
Hu Y L, Xu J, Xu Z Y, et al. Experimental study of the characteristics of deformation and fracture of rock block with various structure of the fault. *J. Seismological Research* (in Chinese), 2010, **33**(3):320~328
- [13] 李正光, 杨润海, 赵晋明等. 地震序列类型的岩石破裂实验研究. *地震研究*, 2005, **28**(4):388~392  
Li Z G, Yang R H, Zhao J M, et al. Rock-breaking test research on earthquake sequence type. *J. Seismological Research* (in Chinese), 2005, **28**(4):388~392
- [14] 杨润海, 许昭永, 胡毅力等. 组合岩样破裂孕育过程中应变场的动态变化特征. *地震研究*, 2006, **29**(4):360~365  
Yang R H, Xu Z Y, Hu Y L, et al. Dynamic variation characteristics of the strain field during the process of combined rock developing fracture. *J. Seismological Research* (in Chinese), 2006, **29**(4):360~365
- [15] Byerlee J D. Acoustic emission in rock during fluid injection. In: Proceeding of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics. Washington D C: National Academy of Sciences, 1974, **2**: 633~637
- [16] 楠濑勤一郎, 西沢修, 小内熏. 一軸壓縮下の岩石中に観測され空白域. *地震*, 1982, **35**(2): 91~102  
Kusunose K, Nishizawa O. et al. Observing gap in rock sample while uniaial compress. *Earthquake (zisen)* (in Japanese) 1982, **35**(2):91~102
- [17] 许昭永, 杨润海, 胡毅力等. 慢地震、慢前兆的机制研究. *地震*, 2003, **23**(2):12~20  
Xu Z Y, Yang R H, Hu Y L, et al. A study of mechanism for slow earthquakes and precursors. *Earthquake* (in Chinese), 2003, **23**(2):12~20
- [18] 许昭永, 王彬, 杨润海等. 组合坚固体应变扰动及波速异常的破裂前兆特征研究. *地震*, 1999, **19**(4):331~337  
Xu Z Y, Wang B, Yang R H, et al. Strain shaking and wave velocity anomaly and studies on fracturing precursory features of combined strong body. *Earthquake* (in Chinese), 1999, **19**(4):331~337
- [19] Brace W F, Paulding B W Jr, Scholz C H. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**: 3959~3963
- [20] Hadley K. Azimuthal variation of dilatancy. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**(B35): 4845~4850
- [21] Ohnaka M. Measurements of strains and displacement near a cut surface in a stick-slip experiment as a model one of earthquake faults, Abstracts. *Seismol. Soc. Japan*, 1979, (2): 150
- [22] 茂木清夫. 地震预报的基础研究. 见: 国家地震局科技监测司编. 大陆地震活动和地震预报国际学术讨论会论文集 (1982年9月, 北京). 北京: 地震出版社, 1984. 375~402  
Mogi K. Basic studies on earthquake prediction. In: Compiled by Scientific and Technological Bureau of CSB. Proceedings on Continental Seismic Activities and Earthquake Prediction for International Conference (Sept. 1982, Beijing) (in Chinese). Beijing: Seismological Publishing House, 1984. 375~402
- [23] 许昭永, 舒燕华, 包一峰. 单轴压缩下填充物胶灌切口岩样的破裂特征. *地球物理学报*, 1989, **32**(专辑 I): 269~274  
Xu Z Y, Shu Y H, Bao Y F. The rupture characteristics of rock sample with cut crack filled by epoxy resin under uniaxial compression. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1989, **32**(Supplement 1):269~274
- [24] Xu Z Y, Yang R H, Xiong B H, et al. Experimental study of the process zone, nucleation zone and plastic area of earthquakes by the shadow optical method of caustics. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, **159**(9):1951~1966
- [25] 梅世蓉, 许昭永, 庄灿涛等. 孕震岩体性质对地震频度异常的影响. *地球物理学报*, 1992, **35**(增刊): 391~396  
Mei S R, Xu Z Y, Zhuang C T, et al. The effect of property of crock - mass on the frequency of earthquake. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1992, **35**(Suppl. I):391~396
- [26] 许昭永, 梅世蓉, 庄灿涛等. 真三轴压缩时几种岩样微破裂定位的初步结果. *地震学报*, 1992, **14**(增刊): 703~709  
Xu Z Y, Mei S R, Zhuang C T, et al. The location of microcracks of several kinds of rock under true triaxial stress. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1992, **5**(Suppl.): 703~709
- [27] 许昭永, 王彬, 赵晋明等. 含硬包体试样微破裂图象演变过程的实验研究. *地震学报*, 1997, **19**(3):317~322  
Xu Z Y, Wang B, Zhao J M, et al. Experimental studies on the evolution process of microcrack patterns in concrete samples containing hard inclusions. *Acta Seismologica Sinica*, 1997, **10**(3):397~403
- [28] 韩彪, 冯锐, 陈颢. 岩样中包体构造的 CT 实验探测. *地球物理学报*, 1989, **32**(4):490~416  
Han B, Feng R, Chen Y. Tomographical experiment for the enclosure structure in a rock sample. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1989, **32**(4):410~416

(本文编辑 胡素芳)