

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):712~719

## 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

许昭永<sup>1</sup>,王 彬<sup>1,2</sup>,胡毅力<sup>3</sup>,杨润海<sup>1</sup>

1 云南省地震局,昆明 650041

2 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026

3 云南大学地球科学系,昆明 650091

**摘 要** 本文分析讨论了实验地震学研究中很少论及的岩石破裂和破坏的很大差异,指出仅以岩石破坏实验模拟地震特别是前兆研究存在诸多不足. 建议以岩石破裂来模拟地震特别是前兆研究,由此可给出较为完整的地震活动图像. 岩石破坏前兆已研究的相当多,但大破裂前则未必出现如破坏那样的前兆. 大破裂前兆特征比破坏前兆更能反映地震前兆的复杂性,其识别更难,更符合实际. 同时以及以岩样的整体黏滑模拟地震研究特别是前兆研究的不足. 建议加强对局部现象——大破裂(或黏滑)的前兆特征、预测方法的深入仔细研究.

**关键词** 岩石破裂和破坏,破裂和破坏前兆,模拟地震及其前兆研究

文章编号 0001-5733(2009)03-0712-08

中图分类号 P315

收稿日期 2008-01-28,2008-11-26 收修定稿

### A discussion on the influence of the difference between the rock fracture and failure to the earthquake simulation and the precursor studies

XU Zhao-Yong<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1,2</sup>, HU Yi-Li<sup>3</sup>, YANG Run-Hai<sup>1</sup>

1 Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041

2 School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

3 Earth Science Department of Yunnan University, Kunming 650091

**Abstract** First the difference between the rock fracture and failure was analyzed and discussed from the definition and distinguishing criteria. Further we compared the sequences of rock fracture and earthquake, waveform recordings of fracture and earthquake, focal mechanism, stress drops of rock failure and fracture and stress drops of earthquake, rock breaking and the scaling ratio between the maximum dislocation and rupture length. It is affirmed that only taking the rock failure experiment to simulate the earthquake, especially the precursor study, is not enough, and with many shortcomings. Therefore it is suggested that taking the rock fracture to simulate the earthquake, especially for the precursor study. Thus fairly integrated seismicity patterns would be obtained. The precursor of the rock failure has been studied a lot. However the precursor of failure does not necessarily appear before a great fracture. Comparing with the failure, the precursor feature of the great fracture and its distinguishing can better reflect the

**基金项目** 地震科学联合基金(D08019)资助.

**作者简介** 许昭永,男,研究员,1943年生,1969年毕业于北京大学地球物理系.主要从事实验地震学及工程物探研究.

E-mail: zhaoyongx@126.com

complexity of the earthquake precursor and difficulty of the precursor distinguishing and are more suitable to the practicality. Meanwhile the shortcomings of taking the whole stick slip of the rock sample to simulate the earthquake, especially for the precursor study, are discussed. It is suggested that the local phenomenon, the precursor study of the great fracture (or stick slip) and the study of the forecast method should be strengthened.

**Keywords** Fracture and failure of the rock, Precursor of the fracture and failure, Simulation earthquake and its precursor study

## 1 引言

一直以来,实验地震学都将岩石破坏实验作为地震模拟研究,很少有人提出疑问。地震虽然影响范围很大,但对于整个地球或大的地质块体来说,它只是局部断裂或断层的局部黏滑。一次地震只是形成一个断裂面,在地表形成一条破裂带。而岩石的最后破坏,断裂往往贯穿整个岩样,岩样整体毁坏、四分五裂、甚至于支离破碎。因此,仅以岩样破坏来模拟地震研究与构造地震存在很大缺陷。断裂力学所定义的破裂,为一个断裂面,也只出现一条裂缝。因此,以这种意义的岩样破裂来研究地震才更与实际相符,对地震前兆的研究更具现实意义。马胜利等<sup>[1]</sup>曾基于实验结果讨论断层破裂与强震物理过程的若干问题,本文依岩石破坏和破裂的基本概念及其前兆的差异,反思地震前兆实验研究的一些根本问题,首先着重分析岩石破裂和破坏的差异,进而对地震研究的影响进行分析讨论,并简略分析以岩样的整体黏滑模拟地震研究特别是前兆研究的不足。

## 2 岩石破坏及破裂

破坏与破裂的差异在材料力学试验中是两个不同的概念。在地震模拟研究中,岩石破坏与破裂的差异很少提及,而这种差异可能对地震及其前兆模拟研究产生重大影响。

### 2.1 岩石破坏

从已有的资料和文献看,岩石(体)结构改组和结构连接的丧失现象可定义为岩石(体)破坏。岩样破坏有多种形式,现有文献一般确定与地震直接相关的是剪切破坏和结构体沿软弱面滑动的破坏。破坏判据一般用库仑准则,这也适用于塑性破坏。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi, \quad (1)$$

$C$ 、 $\phi$  分别为内聚力和内摩擦角, $\sigma$ 、 $\tau$  为正应力和剪应力。对于结构体沿软弱面滑动破坏,判据(1)式也

成立。

### 2.2 断裂力学所定义的破裂

断裂力学将裂纹的失稳扩展定义为破裂。对于复合型裂纹,主要有三种破裂判据:最大周向拉应力准则、应变能密度因子判据和最大能量释放率判据<sup>[2]</sup>。与地震学密切相关的主要为后两者。

**应变能密度因子判据** 对于复合型裂纹,端部各点的应变能密度为:

$$W = S/r = (\alpha_{11} K_I^2 + 2\alpha_{12} K_I K_{II} + \alpha_{22} K_{II}^2 + \alpha_{33} K_{III}^2)/r, \quad (2)$$

其中  $S$  称为应变能密度因子; $S = S(\theta)$ ,  $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$  分别为 I、II、III 型裂纹应力强度因子;它们分别由无穷远处应力  $\sigma^\infty$ 、 $\tau_{xy}^\infty$ 、 $\tau^\infty$  及裂缝半长度  $a$  计算, $r$  为到达裂缝端点的距离, $\theta$  为  $r$  与裂缝延长线的夹角。对于三轴应力作用, $\sigma^\infty$ 、 $\tau_{xy}^\infty$ 、 $\tau^\infty$  及(1)式的  $\sigma$ 、 $\tau$  可由  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  导出,但  $\sigma_2$  往往被忽略。

此准则认为,裂纹沿  $S = S_{\min}$  的方向扩展,即沿满足条件:

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0 \quad (3)$$

的方向扩展;当  $S_{\min}$  达到一定的临界值时,裂纹开始失稳扩展。即

$$S_{\min} = S(\theta_0) = S_c. \quad (4)$$

**最大能量释放率准则** 裂纹沿产生最大能量释放率的方向扩展;当最大能量释放率  $G_{\max}$  达到一定的临界值时,裂纹开始失稳扩展。

$$G_{\max} \geq G_c, G = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + \frac{(1+\nu)K_{III}^2}{E}. \quad (5)$$

其中  $E$  为杨氏模量, $\nu$  为泊松比。

### 2.3 岩石破坏与破裂的比较

从判据看,破坏和破裂都与应力场有关。它们的最大差异是:破坏是当应力达到或超过岩石破坏强度时发生,而破裂只需应力升高到满足裂纹失稳扩展的条件即可发生,此时的应力可能远未达到破坏强度。大量实验结果表明,岩样破坏有多种形式,有时几种形式共存(如 Scholz C H 所描述)<sup>[3]</sup>。破坏时

往往产生多条裂缝并贯穿整个岩样,是整个岩样的破坏.而破裂只有一个裂纹的失稳扩张.破裂是局部(破坏)现象,破坏是整体现象,是多个破裂扩张的最终结果.材料破坏和破裂的最大差异是:材料破坏其强度损失很大,而破裂对强度影响较小,即破坏应力降很大,破裂应力降很小,两者可能有几个数量级的差别.在地震研究中,应力降是以断裂力学为基础定义的,它与破裂应力降的定义相似,而实验中的岩石应力降为破坏应力降,因此,地震应力降与岩石破坏应力降相差极大.虽然对此有多种解释<sup>[4]</sup>,但却很少提及从定义上这二者所描述的物理过程的差异.

#### 2.4 破裂、破坏判据差异的一个实验例子

利用破坏判据研究岩石破坏的实验非常多,利用破裂判据研究岩石破裂特征的实验则非常少.图1(a、b)为有机玻璃试样在双轴加载过程中、以激光实时干涉计量技术得到的受力后的条纹图<sup>[5、6]</sup>;图1a 应力较低,图1b 应力较高.本试验在达到约 70%

破坏应力时卸载.图1d 为卸载后的试样照片.由图1(a、b)看出,图上条纹有密集区,也有稀疏区.暗影称为焦散阴影区,其条纹密度更大.条纹越密应力越大,应变也大,由式(2)可知应变能密度因子越大.实验显示当焦散阴影区大到一定程度时,裂纹从条纹密集区向稀疏区失稳扩展.即证实应变能密度因子判别准则——裂纹向应变能密度因子的低值方向扩展,结果如图1d 所示.

图2 为6个切缝尖端 II 型应力强度因子在破坏孕育过程中的变化<sup>[7、8]</sup>.结果显示,在  $K_{II}$  达到一定大小时,它只在一定范围内波动:超过某一定值( $K_{IIc}$ )时破裂发生, $K_{II}$  变小;随着应力场的增强  $K_{II}$  再变大,当又超过  $K_{IIc}$ ,破裂再发生,如此往复.这是对直接应用应力强度因子与断裂韧性的关系判定裂纹是否失稳扩展的实例,也是对最大能量释放率准则的验证及应用(式(5)).实验结果表明:应力远未达到破坏应力时,就有可见的大破裂发生(图1(c、d)).

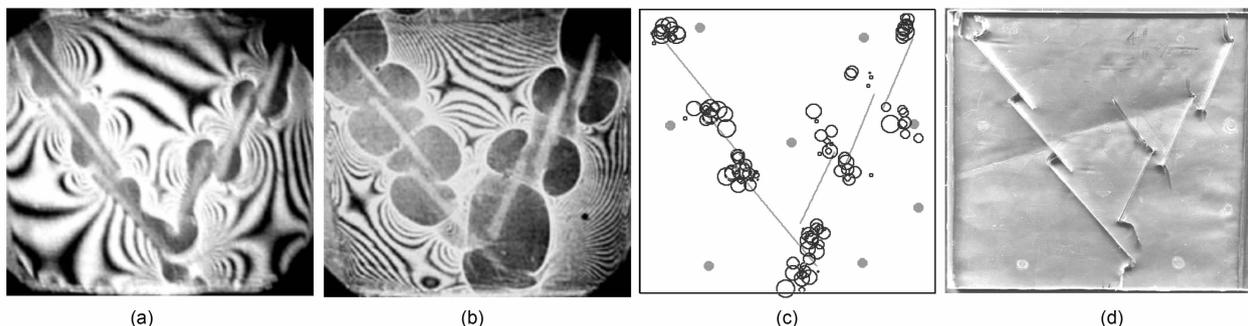


图1 有机玻璃试样在加载过程中、以激光实时干涉计量技术得到的条纹图及破裂空间分布  
(a)应力较低;(b)应力较高;(c)破裂空间分布;(d)卸载后的有机玻璃试样照片.

Fig. 1 The variation of shadow areas of caustics during the failure preparation process of the plexiglass sample  
(a)Low stress;(b)High stress;(c)Distribution of fractures;(d)Photograph after unloading.

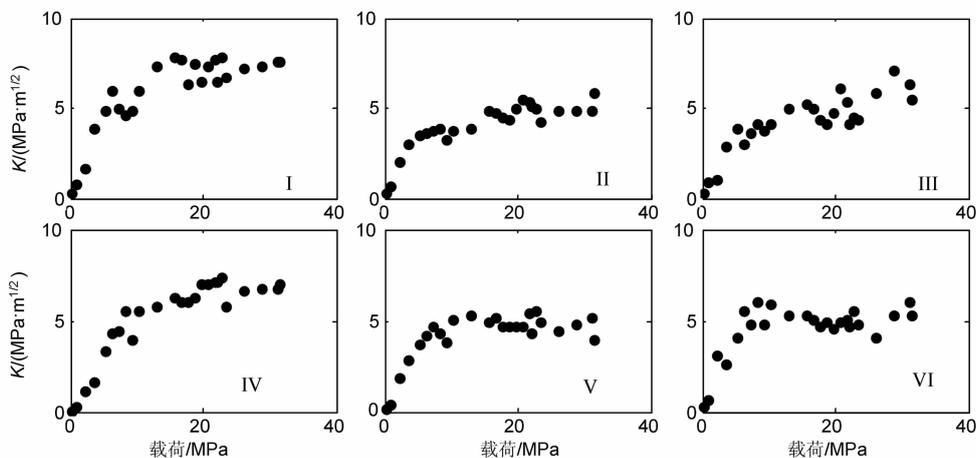


图2 6个切缝尖端 II 型应力强度因子  $K$  在破坏孕育过程中的变化

Fig. 2 The variation of stress intensity factors (SIFs) of the six cracks during the failure preparation process of the plexiglass sample

同时,对图中的几个应变能密度因子高值区和低值区,可依据应变能密度因子判别准则对破裂的发生分别进行判断.而破坏判别准则只能对试样整体是否破坏进行判断,不能对单个裂纹是否失稳扩展进行判断.这充分显示了破裂和破坏的差异.

### 3 在地震模拟实验中的应用

地震模拟实验研究复杂而困难.本文仅就地震破裂本身进行讨论.随着力学的发展,地震学也有很大发展.20世纪70~80年代断裂力学在地震学上的应用达到了高峰.地震矩、地震应力降及(地震)剪切破裂能等等的研究成果非常多.这儿强调的是,震源机制解显示,断裂面只有一个,另有一个辅助面.地震断裂面仅是地质块体内的一部分,并未贯穿整个块体,地震的发生仅是断裂沿一个裂缝失稳扩展的结果.但破坏则可能有几个破裂面.因此,相应于地震学,实验更应该加强对岩石破裂模拟的观测与

研究.

#### 3.1 一次特大破裂前后破裂强度随时间的变化——破裂序列

图3显示岩石破坏孕育过程中一次特大破裂前后序列事件强度 $M$ 随时间的变化<sup>[9]</sup>.事件强度依破裂(声发射)的波列最大振幅及持续时间长短确定.在特大破裂(如图中下部最高竖线者)前一段时间内,事件多而强度低;随后,事件少而强度高.当声发射事件再次增多时,特大破裂来临.这是一个完整的破裂序列;是一个典型广义的前-主-余破裂类型;它不同于图4所示的直接相连的前-主-余破裂<sup>[10]</sup>.它与一地区地震序列的 $M-t$ 图非常相似.实际上,在图3上部还有两个相对最大事件,在第一个事件之前一段时间内,声发射事件多而强度低;随后,事件少而强度高.接着,大破裂来临,还有余破裂.对于第二个事件,其特征类似,但频度偏低.这三个事件的特征并不相同.同时,如图3上部两个大事件之间的较大者是前一事件的余破裂还是后一事件的前破

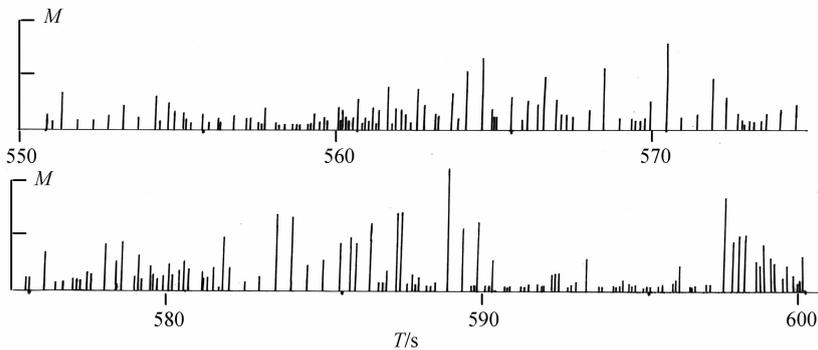


图3 第一次特大破裂前后破裂(声发射)强度随时间的变化<sup>[9]</sup>

Fig. 3 The magnitude variation of AE events with time before and after the first extra large fracture

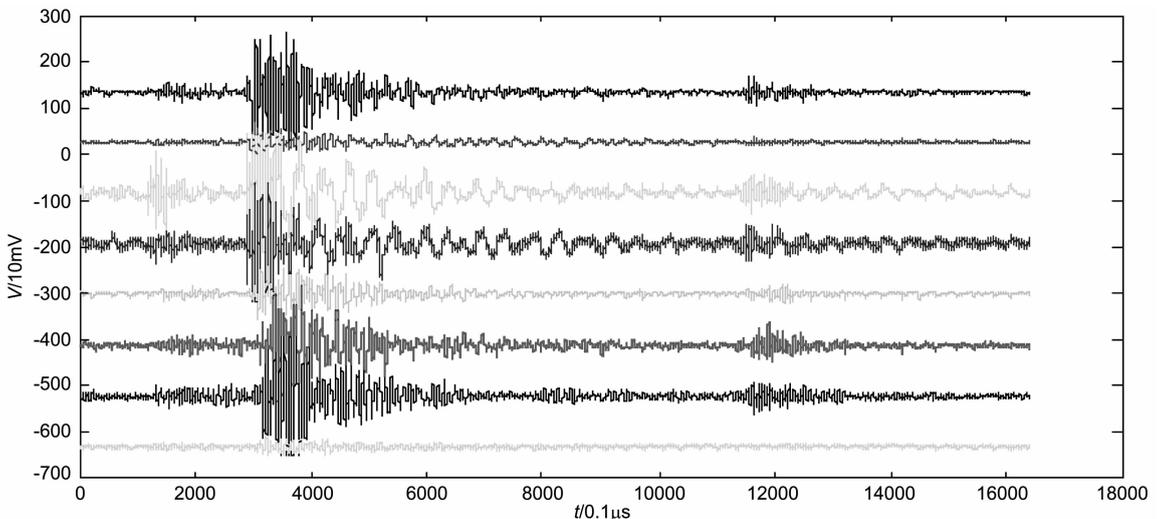


图4 前破-主破-余破型破裂典型的超声波波形图

Fig. 4 Waveform records of some fractures before, after and main the large fracture in rocks sample

裂,却很难确定.它们正好显示了地震序列  $M-t$  图的多样性及真实特征.这种特征在仅以最后破坏模拟大地震的破裂序列图上却很难出现.由此建议用破裂模拟地震,以破裂的大小相应于地震的大小.

### 3.2 破裂波和地震波

与地震产生地震波一样,破裂也激发弹性波.图4为紧密相连的前-主-余破裂型的超声波波形记录图.与地震波一样,有纵波、横波和面波等.对于一次大破裂的波形记录,其振幅大部分被限幅,波列持续时间也长.但作为岩样整体破坏,波形记录振幅限幅更多,波列持续时间更长,特别是初至波无时差.这也是不宜用破坏模拟地震的原因.因此,对于地震波谱的研究也应以破裂产生的波为宜.

### 3.3 地震机制

对于地震机制,似已公认,就是从实验结果导出的两种:一为破裂,另一为黏滑<sup>[11,12]</sup>.从上述分析,破裂和破坏相比,破裂更能满足震源机制解研究条件,而岩石破坏则很难.对照实际的地震现象,自然是以破裂机制为合理.地震学家常提到大地震前地震围空现象是一种有效前兆,大震即发生在空区边缘,这也说明地震是一种局部破裂.由此推论,以岩石破裂模拟地震比用岩石破坏来模拟更为合理.至于黏滑,在断层上的锁住段发生的地震,似用黏滑机制为合理.当然,以愈合断层重新错断也可解释.总之,地震是断层的局部失稳运动或岩体的局部破坏,因此,地震试验也应以岩石局部破裂或局部运动(黏滑)来模拟.

## 4 在地震前兆实验研究中的应用

如前所述,既然破坏和破裂是完全不同的两个概念,那么,其前兆特征自然会有很大差异.首先,岩石破坏前兆是指岩样整体破坏之前所出现的多种物理量的特征变化.而破裂前兆是指岩样裂纹失稳扩展前局部区域所出现的多种物理量的特征变化.即破坏前兆是大范围的统计平均效果,而破裂前兆突出的是小范围局部事件的特殊结果.虽然破裂前兆也有与破坏相类似的现象,但其细节可能差异更大.有些现象可能为各自特有.下文将分别予以论述.

### 4.1 破坏前兆

茂木清夫等曾研究岩石破裂孕育过程中的各个阶段<sup>[13,14]</sup>.有学者将塑性(应变)硬化阶段称为中长期前兆段、延性(应变弱化)阶段为短临前兆段<sup>[15]</sup>.笔者以为这是破坏孕育过程,其实 Scholz C. H 也如

此定义<sup>[3]</sup>,只是他还是将破坏前兆当作地震前兆研究.关于岩石破坏前兆的研究结果很多,如著名的体积膨胀、波速(比)下降、 $b$ 值(绝对值)下降以及声发射的各种时空特征及波谱变化,它们都对地震前兆研究起重要作用.这儿不再重复.

### 4.2 破裂前兆

与强震相对应我们更关注大破裂的前兆特征.然而,这种研究却甚少.下文对已有的结果和存在问题予以讨论.

#### 4.2.1 关于声发射(破裂事件)、波速的变化

在破裂之前关于声发射的特征变化有许多与破坏相似.首先,大破裂之前可能出现声发射率升高的特征变化.在测定金属材料的断裂韧性时即依据声发射事件的出现和增多来确定裂纹开始失稳扩展的时间.上文也提到,当裂缝端部的焦散阴影区大到一定程度时在其内会有破裂发生.其次,声发射在空间上相对集中,如图1b和1c所示,声发射事件都集中在裂缝端部区域的焦散阴影区内.此外,裂缝端部区的破裂的 $b$ 值在大破裂前可能出现特征变化;裂缝端部区的大破裂前的中小破裂的波谱低频成分可能增多.因此,声发射的时间变化、空间特征、 $b$ 值和波谱特征变化等都可能是岩石破裂的前兆.有人把失稳扩展前的亚临界扩展——即声发射的时空活动称为成核作用,笔者甚为赞同.这自然是岩石破裂前兆.

问题是声发射率在破坏前可能有多种特征变化形态,但在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.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. $b$ 值原本就是大范围统计结果,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、叠加;这就使研究变得复杂艰难.岩石破坏前一般都存在波速下降,但破坏前,岩样上不仅存在低波速异常区,也存在高波速异常区<sup>[16]</sup>.而大破裂未必就发生在低波速异常区.在大破裂前裂缝尖端区波速是否也会下降?大破裂何时发生?这却未予研究.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.

### 4.2.2 应力或应变

从图 1 和图 2 可知,大破裂前裂纹尖端区域应力或应变也会出现特征变化,但很难说会有体积膨胀,而且这种应力或应变变化可能在远小于破坏应力时即已出现. 图 5 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. 由图可看出,应变突变(下降)先在 3、4 点发生,接着是 1~6 点和 12~7 点发生,这表明破裂由靠近 3、4 点的岩样边缘开始,逐步向 1~6 点、12~7 点延伸. 而

每次突变(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. 这些与临近破坏前的一些实验结果颇为相似. 但这也不能说破裂前的应变变化特征与破坏前的完全相同. 如图 5 所示,一则测点不够密、不够多,不能充分了解裂缝端部区域和其外部区的各种变化;再者它仅显示了几个特大破裂前的清晰的应变特征变化,而如图 3 上部大破裂所相应的应变变化特征如何则看出来.

再者,如图 1 和图 6a 所示,当裂缝端部的焦散阴影区大到一定程度时在其内会有破裂发生. 因此,焦散阴影区的变化特征可以作为岩石破裂的一种前

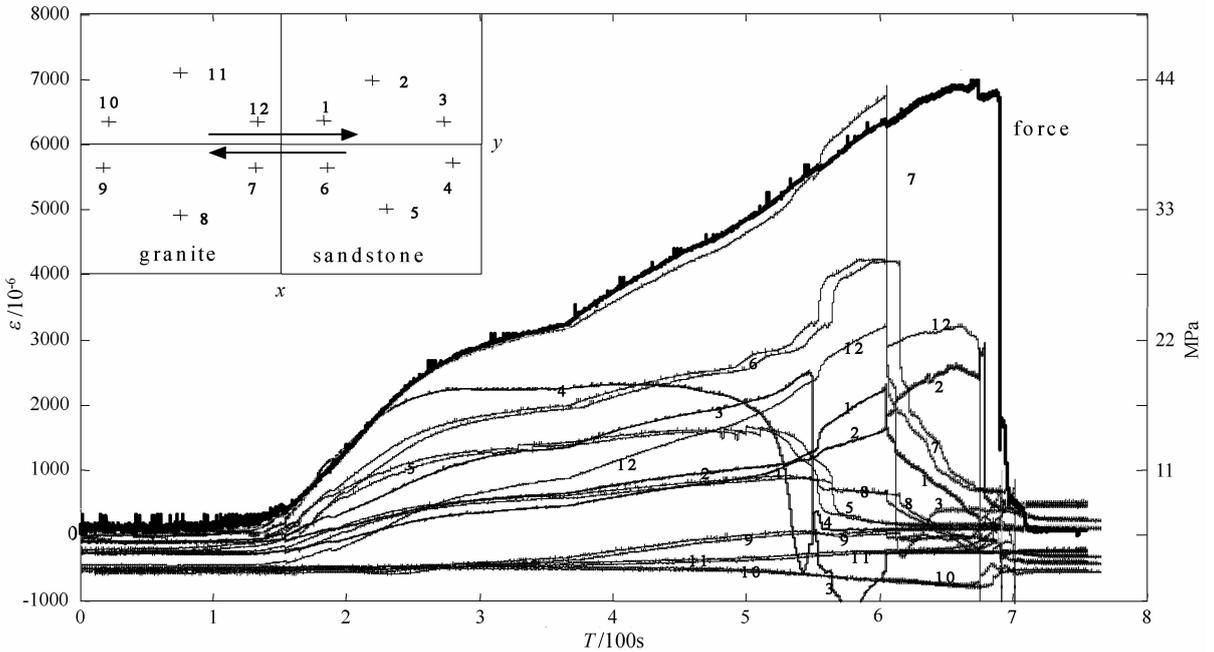


图 5 大破裂前不同测点应变  $\epsilon$  随时间的变化特征

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. 5 The stress-strain variations of rock sample with time during the failure preparation process

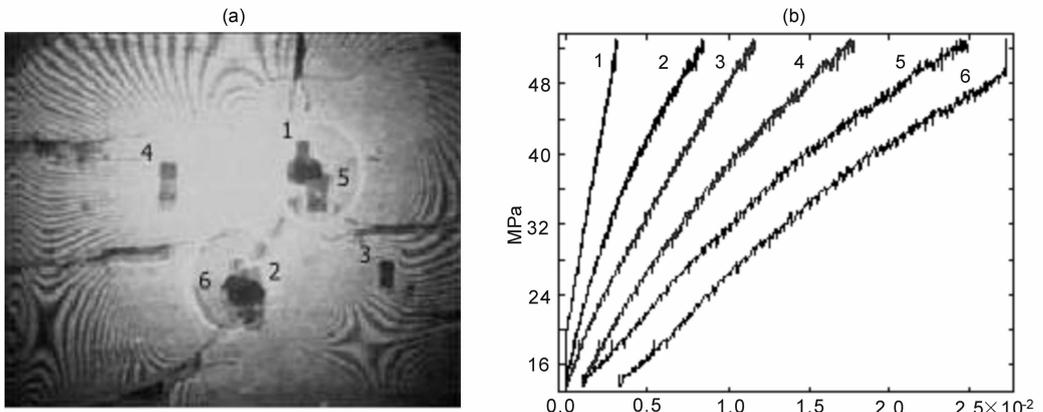


图 6 单切缝试样的测点位置及条纹图(a)所示各测点轴向应变(横坐标)随应力(纵坐标)的变化(b)

图(b)中横坐标为应变,纵坐标为应力.

Fig. 6 The locations of gauges (a) and variation of axial strain with loading(b)

兆. 它本质上反映的是裂纹尖端区域应力或应变的变化. 但焦散阴影区在岩样上则很难观测到, 用应变片观测, 则为平均效果 (图 6). 图 6b 为图 6a 所示各测点轴向应变随轴向应力的变化<sup>[17]</sup>. 由图看出, 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. 此外, 裂缝端部焦散阴影区内已有破裂发生, 肯定也有 (相对) 大破裂, 但图 6 却显不出如破坏孕育过程的应力应变曲线特征. 至于裂纹尖端区域应力或应变多种前兆变化形态及详情, 也未深入研究.

凡此种种都显示, 强 (大) 破裂前未必出现如破坏那样的前兆, 其特征未必那样明显, 可能还有破坏所没有的前兆, 也就是说, 局部破裂 (或黏滑) 的前兆更复杂, 识别更艰难.

## 5 岩石断裂 (破坏) 和地震时的位移与贯通尺度

地震破裂总有一定尺度, 是某一断层或块体的一部分; 而岩石最后的破坏却为整个岩样毁坏. 显然, 用贯通整个岩样的破坏与地震的局部破裂相类比是不合适的. 有关报道显示<sup>[4]</sup>, 地震的最大位错量与断层长度之比大致在  $(0.8 \sim 8.6) \times 10^{-5}$  之间, 而有关三轴实验表明, 岩石破坏时位错量与断裂面长度之比为  $(0.1 \sim 2) \times 10^{-2}$ , 有些甚至更大. 折合成应变, 破坏时的应变突变大致为  $0.1\% \sim 2\%$ <sup>[4, 11, 12]</sup>, 即岩石破坏时位错与断裂面长度之比远大于地震时的最大位错与断层长度之比. 然而在破坏孕育过程中的大破裂时的位移与断裂面之比却小得多, 其应变突变大致为几百个微应变 ( $10^{-6}$ ), 即几个  $10^{-4}$ , 它与地震时的最大位错与断层长度之比相当. 先前很少观测到岩样滑动面上的局部黏滑, 但近些年, 这种结果很多. 这就再次支持了论断: 仅以岩石破坏实验模拟地震研究是不合适的, 还应以局部破裂模拟地震研究. 对于黏滑, 不能仅研究岩样整体, 更应注重局部特征现象.

## 6 讨论和结论

把岩样和压机加载钢块看成一个系统, 岩样则是系统中最薄弱部分, 此时破坏就是系统中的局部现象, 这与“以岩石局部破坏 (破裂) 模拟地震研究”是一致的, 由此而得到的结果对于地震模拟研究是有效的, 特别是岩样仅为一条剪切裂缝破坏时更是

如此. 即破坏对地震研究有不可磨灭的贡献. 然而, 这种系统的局部破坏区的力学性质与周围的钢块的力学性质相差甚远, 即它不是与周围力学性质相近的材料上的局部破坏, 而这两者的特征及其前兆反映将可能有很大的差别, 这正是原有实验地震学存在的最大不足, 因此, 也不易开展“部分破坏区域与周围非破坏区域的相互作用”研究. 再者, 岩石破坏有显著前兆特征易于识别. 而已有的地震前兆震例远不如破坏典型突出, 还有许多似为前兆而无地震, 更有地震而无前兆者. 仅用岩石破坏模拟地震研究不能充分反映地震前兆的复杂性及其识别的艰难.

用尺度小于试样的破裂模拟地震, 其强度大小能差几个数量级. 这些能弥补以破坏模拟地震研究的不足. 用破裂模拟地震及其前兆, 因其难度相当大, 若能准确地识别大破裂前兆并预测其发生时间、位置及强度, 无疑对地震预测研究更重要、更有意义.

此问题之所以到现在才提出, 也受实验技术条件的限制, 如 20 年前就很难有实时、高精度岩石破裂实验检测记录的电子设备. 实验技术的飞速发展, 能不断揭示出新的现象. 因此需要我们不断总结、不断创新, 以推动科学研究的深入发展.

综上所述, 仅以岩石破坏实验模拟地震研究是不完全、不准确的, 还应以局部破裂模拟地震研究. 至于地震前兆的模拟实验, 就更应加强破裂前兆的研究. 总之, 笔者强调, 除对破坏的整体现象的研究, 还要加强对岩石破裂的局部现象的研究. 对于黏滑现象也是如此.

## 参考文献 (References)

- [1] 马胜利, 刘力强, 马 瑾. 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 (特刊): 225~232  
Ma S L, Liu L Q, Ma J. A discussion on related issues of physical process of faulting and strong earthquake based on experimental results. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, 10 (Special): 225~232
- [2] 尹祥础. 固体力学. 北京: 地震出版社, 1985  
Yin X C. *Solid Mechanics* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1985
- [3] Scholz C H 著. 地震和断层力学. 马胜利, 曾正文, 刘力强等译. 北京: 地震出版社, 1996  
Scholz C H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Ma S L, Zeng Z W, Liu L Q Translated. Beijing: Seismological Press, 1996
- [4] 臧绍先. 地震应力降和岩石破裂应力降. 地震学报, 1984, 6 (2): 182~194  
Zang S X. Earthquake stress drop and the stress drop of rock fracture. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1984, 6 (2):

- 182~194
- [5] 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 occurred on Y-shaped boundary of the block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45 (Suppl.):214~224
- [6] 许昭永,杨润海,赵晋明等. 实验研究加载、卸载破裂中焦散阴影区的动态变化特征. 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, 15(2):198~209
- [7] 陈顺云,许昭永,杨润海等. 一种确定压剪全息干涉条纹级数的理论与实验研究. 固体力学学报,2004,25(3):83~88  
Chen S Y, Xu Z Y, Yang R H, et al. Theoretical and experimental studies of the determination of order values of the holograph fringe in the compressive shear. *Chinese J. Solid Mechanics* (in Chinese), 2004, 25(3):83~88
- [8] 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
- [9] Wang B, Xu Z Y, Yin X C, et al. Experimental study of the earthquake recurrence period and the trend of post-seismic development. *Pageogh*, 2006, 163(11-12):2545~2560
- [10] 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
- [11] Brace W F, Byerlee J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 1966, 153:990~992
- [12] Brace W F, Byerlee J D. Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes. *Tectonophysics*, 1972, 14:189~200
- [13] Mogi K. Fracture and flow of rock. *Tectonophysics*, 1972, 23(1-4):541~568
- [14] Jaeger T L, Cook N G W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 2nd edition. London: Chapman and Hall, 1976
- [15] 马瑾,马胜利,刘力强等. 断层几何结构与物理场的演化及失稳特征. 地震学报,1996,18(2):200~207  
Ma J, Ma S L, Liu L Q, et al. Geometrical texture of faults, evolution of physical field and instability characteristics. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1996, 18(2):200~207
- [16] 韩彪,冯锐,陈颀. 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 R. Experimental detecting including structure in the rock sample by CT technology. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1989, 32(4):490~416
- [17] 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. *Pageogh*, 2002, 159(9):1591~1966

(本文编辑 胡素芳)