

断层阶区对滑动行为影响的实验研究

马胜利*, 陈顺云, 刘培洵, 扈小燕, 王凯英, 黄元敏

中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

* E-mail: masl@ies.ac.cn

收稿日期: 2007-08-30; 接受日期: 2008-01-11

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2004CB418405)和国家科技支撑项目(编号: 2006BAC01B03)资助

摘要 研究断层带几何非规则体对断层活动的力学影响, 对于理解断层带上的地震活动具有重要的理论和实际意义. 通过中尺度标本岩石力学实验, 研究了走滑断层带最常见的一种非规则体-断层阶区对滑动行为的影响. 研究表明, 拉张断层阶区由于强度较低而很容易发生破裂, 破裂后的阶区对断层的滑动无明显阻碍作用, 但阶区的微破裂对断层滑动失稳具有指示作用; 含拉张阶区的断层带具有速度弱化特征, 可用速率-状态摩擦定律表述. 挤压阶区由于破坏强度很高, 使得断层滑动较为困难, 但随着应力水平的增加, 阶区外断层端部拉张区的微破裂为断层在阶区未破裂之前发生粘滑失稳提供了变位条件, 并因此可作为断层失稳的前兆; 挤压阶区可作为断层分段的稳定标志, 直到阶区完全破裂使两条断层完全连通.

关键词

雁列式断层
拉张阶区
挤压阶区
微破裂粘滑

走滑断层在几何结构上的显著特点是断层面不连续, 非规则体(断层阶区、阶步、拐折等)出现在各种尺度上^[1,2]. 高精度微震定位表明, 断层迹线在地表的不规则性可穿过发震层延伸至 10 km 或更深的深度^[3,4]. 因此研究断层非规则体对断层活动的力学影响, 对于理解断层带上的地震活动具有重要的意义.

作为最常见的断层组合形式, 雁列式断层中的阶区对断层带力学行为的影响一直很受关注, 开展了大量的研究, 取得了一些有价值的成果. 例如, 对断层阶区的静力学分析表明, 由于阶区内平均正应力高、摩擦强度大, 挤压阶区对断层活动的影响远比拉张阶区大^[5-9]. 对地震动态破裂与断层阶区的相互作用进行了分析, 认为两类阶区均会阻止或终止地震破裂^[10-12], 而实际断层带的地震破裂过程也证实了这一点^[13]. 围绕雁列式断层的变形和破坏开展过许多实验研究^[14-19], 揭示了阶区对断层变形和失稳过程的影响.

现有的研究侧重于阶区对断层带应力分布、地震

动态破裂的影响, 关于阶区对断层带地震复发的影响则较少涉及. 尽管实验研究可模拟含阶区断层带变形失稳的全过程, 但由于大多数实验中选用的断层带填充物质很弱, 难以观察到重复出现的断层失稳现象. 在断层带地震活动的研究中这一问题具有实际意义. 例如, 由图 1 所示的鲜水河断裂带及公元 1700 年以来的地震破裂分布情况^[20]可见, 断裂带在朱倭附近存在一个拉张阶区, 在老乾宁到康定之间存在一个挤压阶区, 拉张阶区内可见次级断裂并发生过两次地震, 而挤压阶区内并未见次级断裂, 但沿阶区两侧的断层曾发生过多次强震破裂. 由此提出了一些问题: 在挤压阶区未发生破裂、断层未连通的情况下, 断层何以发生错动而引发地震? 在构建模拟断层地震活动的模型时, 如何考虑断层阶区的作用? 针对这些问题, 我们开展了中尺度标本的岩石力学实验, 研究了拉张阶区和挤压阶区对断层滑动行为的影响.

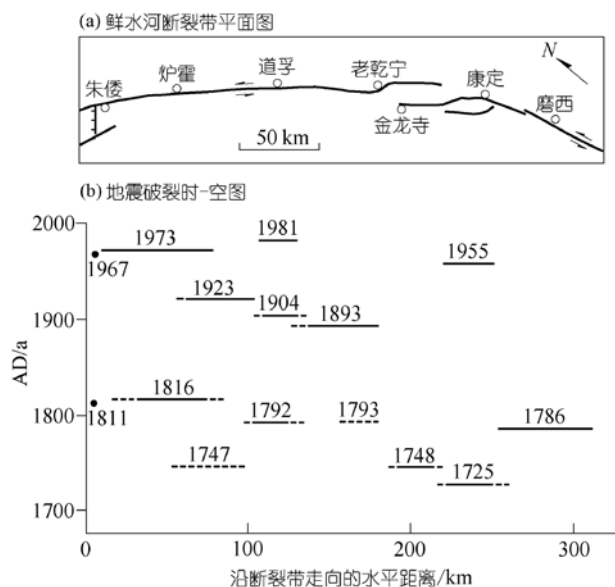


图 1 鲜水河断裂带平面图及地震破裂分布图^[20]

(a) 断裂带平面图; (b) 地震破裂分布图

1 实验方法

实验标本为花岗岩, 尺寸为 $500\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 每个标本上预制有两条雁列式断层, 阶区尺寸为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ (即两条断层的距离和重叠尺寸均为 25 mm), 断层带用高强度石膏 (树脂石膏) 充填, 宽度 3 mm . 通过改变两条断层的排列方式, 可构成分别模拟拉张阶区和挤压阶区的实验标本 (图 2). 实验在一套伺服控制双向加载装置上进行, 实验过程中首先以相同的应力速率使 σ_1 和 σ_2 同步加载至 5 MPa , 之后 σ_2 保持恒定, σ_1 方向则以 $0.5\text{ }\mu\text{m/s}$ 的位移速率加载直至实验结束. 实验中除测量 σ_1 , σ_2 和位移外, 在标本表面布设了声发射传感器、应变片及断层位移计, 分别记录标本在实验过程中的微破裂活动、应变和断层位移变化. 其中声发射记录系统为一套 16 信道、分辨率 12 bit、最高采样频率 40 MHz 的数字化记录系统 (实验中的采样频率为 10 MHz), 应变和断层位移通过一套分辨率 16 bit、采样频率 $0\sim 100\text{ Hz}$ 的多信道数字化记录系统来记录 (实验中的采样频率为 10 Hz). 在声发射数据处理中, 声发射事件的能级 (M_{AE}) 通过对声发射波形的线长积分来确定^[21], 而声发射定位采用本实验室最近开发的一种定位方法^[22].

每类标本至少进行了 3 次实验, 由于实验的重复性较好, 我们将不一一描述, 而仅选择其中的部分标

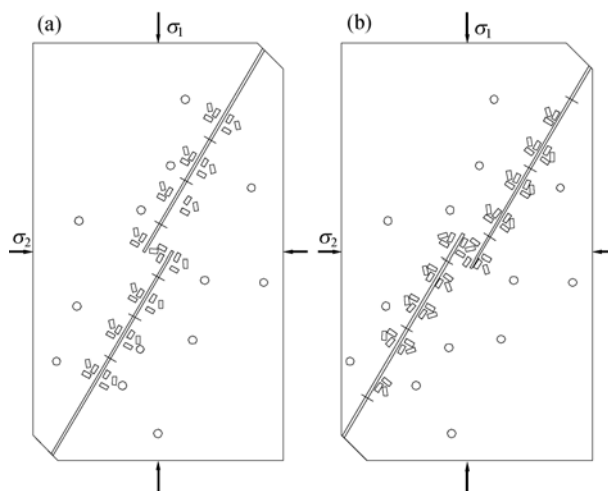


图 2 实验标本结构及传感器布局

(a) 含拉张断层阶区的标本; (b) 含挤压断层阶区的标本. 其中, 圆圈表示声发射探头, 方框表示应变片, 跨预制断层的短线表示断层位移计

本介绍实验结果.

2 实验结果

2.1 含拉张阶区的断层

图 3(a) 给出了一个含拉张断层阶区的标本的差应力-时间曲线. 完整的实验曲线 (图 3(a) 中上图) 可划分为 4 个阶段: 第 I 阶段, 差应力随时间线性增加, 其间可见幅度很小的应力下降过程; 第 II 阶段, 差应力仍随时间明显增加, 但应力下降幅度明显增加且很不规则; 第 III 阶段, 差应力随时间增加的速度明显减缓, 并表现出较规则的应力下降过程; 第 IV 阶段与第 III 阶段大体相同, 只是差应力随时间增加更为缓慢. 测量结果表明, 对应于第 III, IV 阶段的每次应力下降, 断层位移均有一个台阶式的上升, 说明应力下降由断层的粘滑引起.

声发射能级-时间分布 (图 3(b)) 表明, 第 I 阶段声发射活动频度不高, 第 II 阶段声发射活动明显增强, 而第 III 和第 IV 阶段, 粘滑失稳对应有一个能级较大或一簇声发射事件. 在第 IV 阶段测量了加载点速率变化的影响 (图 3(a) 中下图), 在 4 种速率下标本均表现为粘滑, 但粘滑应力降以及强度均随速率增加而减小, 表明含拉张阶区的断层带具有速度弱化性质.

对标本变形过程中的声发射事件进行了定位,

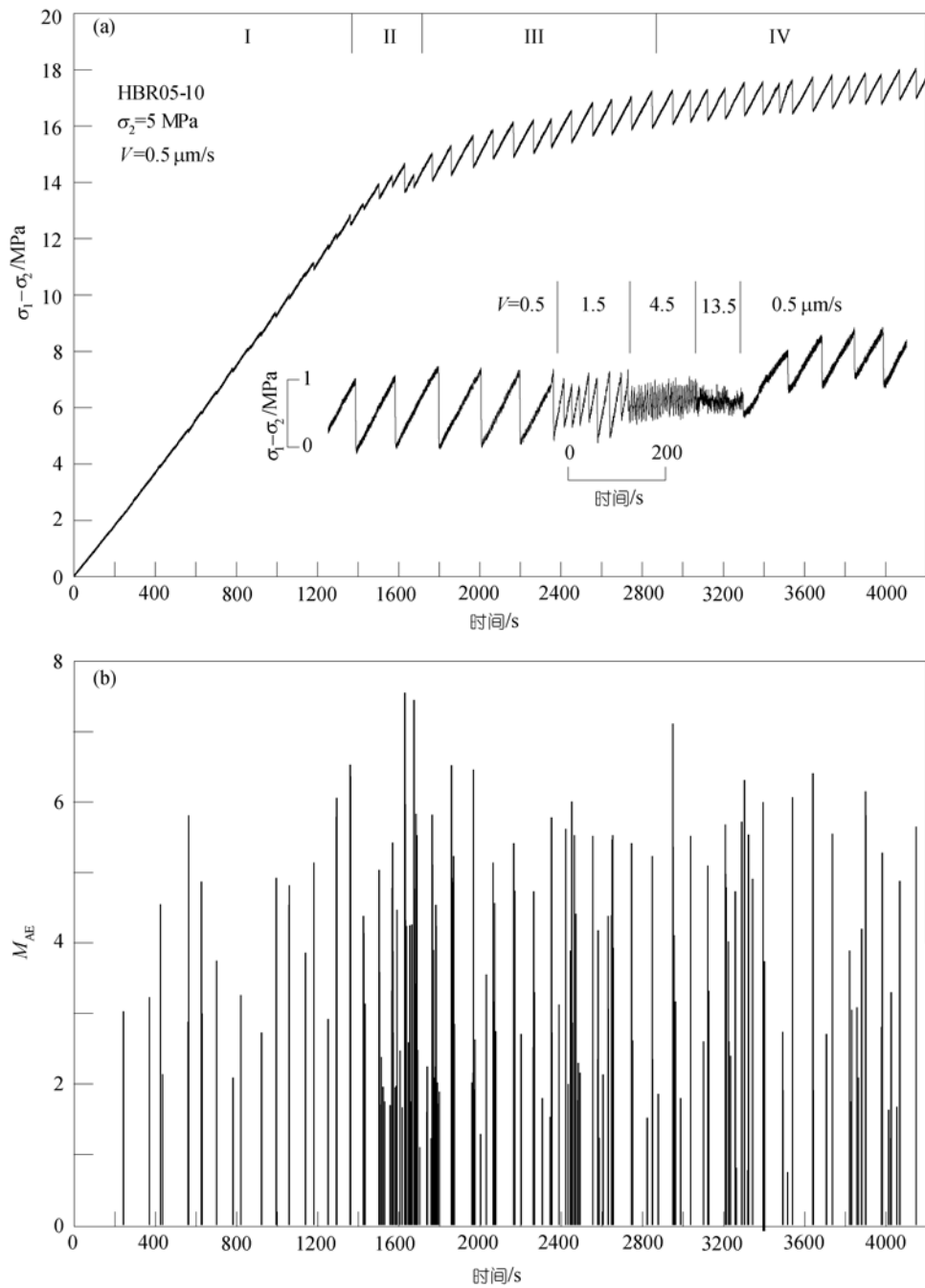


图3 含拉张断层阶区标本(HBR05-10)的实验结果
(a) 差应力-时间曲线; (b) 声发射事件的能级-时间分布图

以揭示微破裂的空间分布. 实验中在断层阶区形成了一条宏观张破裂将两条断层连接起来(图 4(a)), 而声发射揭示的微破裂也从集于此条破裂附近(图 4(b)). 对应于前述 4 个阶段, 第 I 阶段的微破裂主要沿预制断层带分布(图 4(c)), 表明此阶段以断层带内部的

变形为主要方式. 第 II 阶段的微破裂除沿预制断层带分布外, 更多地从集于阶区中(图 4(c)), 表明阶区的宏观破裂已基本形成. 第 III 阶段微破裂依然从集于阶区附近, 分布范围扩大, 而第 IV 阶段微破裂分布与第 III 阶段差别不大. 这表明, 拉张阶区的持续变形

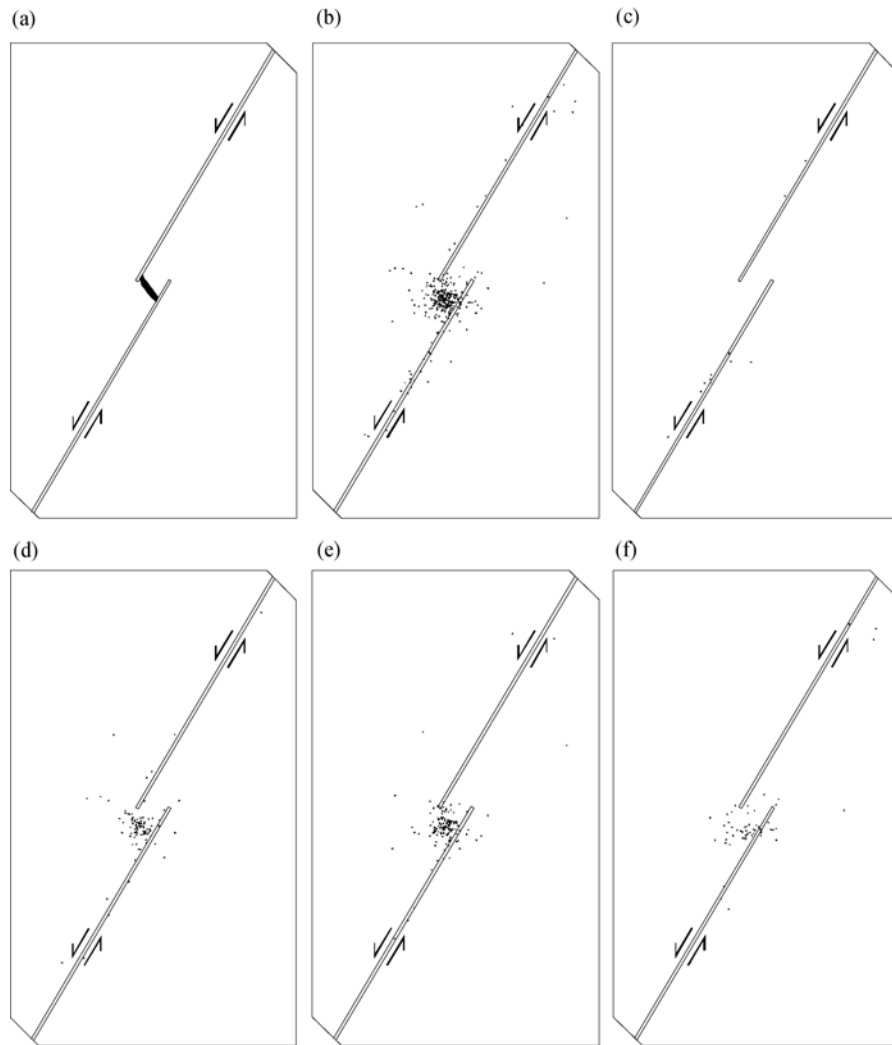


图 4 含拉张断层阶区标本(HBR05-10)变形过程中产生的宏观和微观破裂

(a) 宏观破裂; (b) 微破裂分布(0~4200 s); (c) 第 I 阶段(0~1370 s)的微破裂分布; (d) 第 II 阶段(1370~1720 s)的微破裂分布; (e) 第 III 阶段(1720~2870 s)的微破裂分布; (f) 第 IV 阶段(2870~4200 s)的微破裂分布

在断层的滑动阶段仍有重要作用, 阶区微破裂的发生为断层粘滑提供了变位条件, 并对断层的滑动具有指示作用。

对标本表面的应变测量结果进行了分析, 以进一步了解断层带的变形特征。图 5 给出了断层附近平行断层滑动方向应变测量结果。为便于描述, 我们把每条断层靠阶区的一侧称为内侧, 而把另一侧称为外侧。对比图 5 与图 3(a)可见, 在第 I 和第 II 阶段, 断层外侧各点应变均随时间线性增加, 而断层内侧各点应变在随时间缓慢增加的背景上伴有准周期性的台阶式下降, 并引起断层外侧应变的台阶式上升,

其中靠近阶区(如 8 号测点)应变释放极为明显, 而 1650s 左右阶区附近(特别是 8, 21 和 19 号等测点)应变的明显变化标志着宏观裂纹的产生; 在第 III 和第 IV 阶段, 断层内、外侧应变变化趋于一致, 即: 与粘滑事件相对应, 准周期性地释放应变。

2.2 含挤压阶区的断层

图 6(a)给出了一个含挤压断层阶区的标本的差应力-时间曲线, 它可划分为 6 个阶段: 第 I 阶段, 差应力随时间线性增加, 其间未见应力下降过程; 第 II 阶段, 在差应力随时间线性增加的过程中出现了不

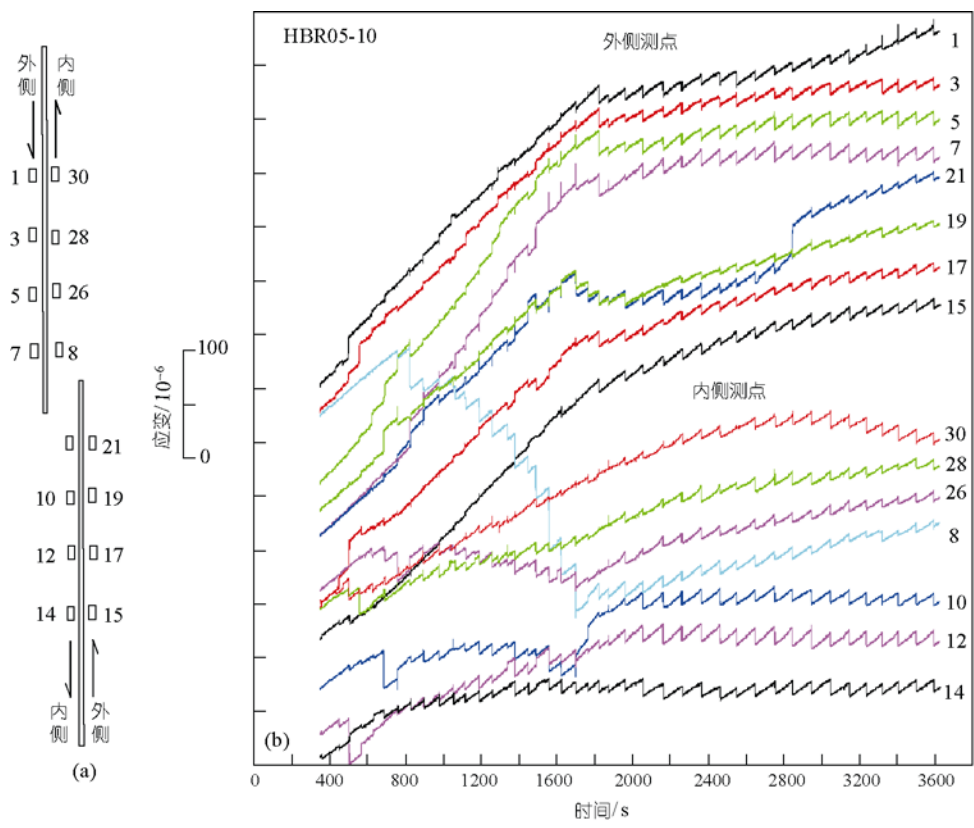


图 5 含拉张断层阶区标本(HBR05-10)断层带附近的应变片分布(a)和应变-时间曲线(b)

规则的应力下降;第Ⅲ阶段,差应力仍随时间明显增加,但伴有准周期性的应力下降过程;第Ⅳ阶段,标本出现屈服,差应力随时间增加速率明显减缓,应力降变化较大;第Ⅴ阶段为弱化失稳阶段,其间标本整体失稳,产生了很大的应力降;第Ⅵ阶段为标本失稳后的滑动阶段。测量结果表明,对应于第Ⅲ和Ⅳ阶段的每次应力下降,断层位移均有一个台阶式的上升,而第Ⅴ阶段则伴随很大的断层位移。

声发射事件的能级-时间分布(图 6(b))表明,第Ⅰ阶段的微破裂很少,第Ⅱ阶段微破裂活动明显增强;第Ⅲ阶段与准周期的应力降相对应,微破裂事件成丛分布;从第Ⅳ阶段开始,微破裂活动频度极高,强度明显增加,到第Ⅴ阶段时达到顶峰。

实验中在断层阶区走滑前端形成了一条宏观破裂将两条断层连接起来,同时在断层端部和阶区附近还形成了一些切割深度不大的表面裂纹(图 7(a)),在实验后期(在第Ⅴ和第Ⅵ阶段)沿这些破裂阶区被挤出,形成贝壳状破裂。声发射揭示的微破裂分布丛集

于阶区附近,与这些破裂有较好的对应关系(图 7(b)).其中,第Ⅰ阶段微破裂很少;第Ⅱ阶段微破裂主要沿预断断层带分布(图 7(c)),表明此阶段的应力降由断层带内部的破裂所引起;第Ⅲ阶段的微破裂丛集于阶区断层端部的拉张区,其中一个断层端部微破裂更为发育(图 7(d)),这可能与标本的微观非均匀性有关;第Ⅳ阶段微破裂丛集于阶区附近,表明此阶段以阶区的破裂为主,宏观破裂已经形成。第Ⅴ阶段微破裂依然丛集于阶区附近,但分布范围扩大,表明断层整体失稳引起大范围的变形。

为了了解第Ⅲ阶段断层发生准周期性粘滑的机制,分析了 3 次粘滑事件(图 6(a)中的 E1, E2 和 E3)前的微破裂活动(图 8)。可见,3 次粘滑事件前的微破裂分布具有相似的特征,即丛集于断层端部的外侧区域,而这样的区域是强烈的张应力集中区。这表明,在较高应力水平下,挤压阶区外断层端部拉张区的微破裂活动为断层粘滑失稳提供了必要的变位条件,并可作为断层滑动失稳的前兆。

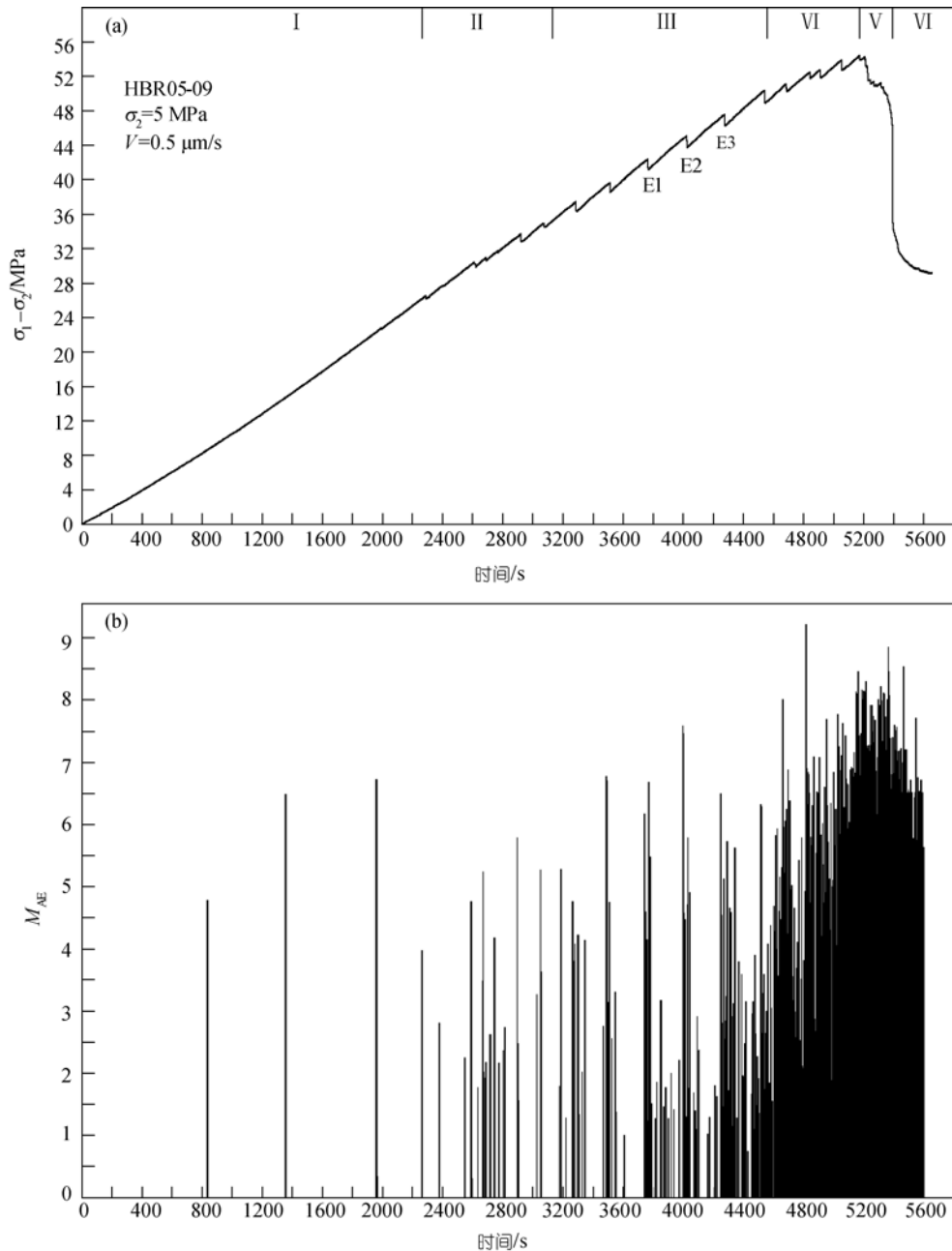


图 6 含挤压断层阶区标本(HBR05-09)的实验结果

(a) 差应力-时间曲线; (b) 声发射事件的能级-时间分布图

我们以标本 HBR05-11 为例, 分析含挤压阶区断层带的应变演化特征. 标本 HBR05-11 的应力-时间曲线与标本 HBR05-09 大体相同, 也可分为 6 个阶段, 只是第 IV 阶段持续的时间略长. 由于第 I 阶段断层带附近应变表现为简单的上升, 而第 II 和第 III 阶段的应变变化基本相同, 因此图 9 仅给出了第 III 阶段及

其后的应力-时间曲线和断层附近平行滑动方向的应变测量结果. 可见, 在第 III 阶段, 断层内侧各点应变均随时间显著增加, 而断层外侧各点应变在随时间缓慢增加的背景上伴有准周期性的台阶式下降, 并引起断层内侧应变的台阶式上升; 第 IV 阶段的总体特征与第 III 阶段类似, 但 21 和 7 号测点的应变变化

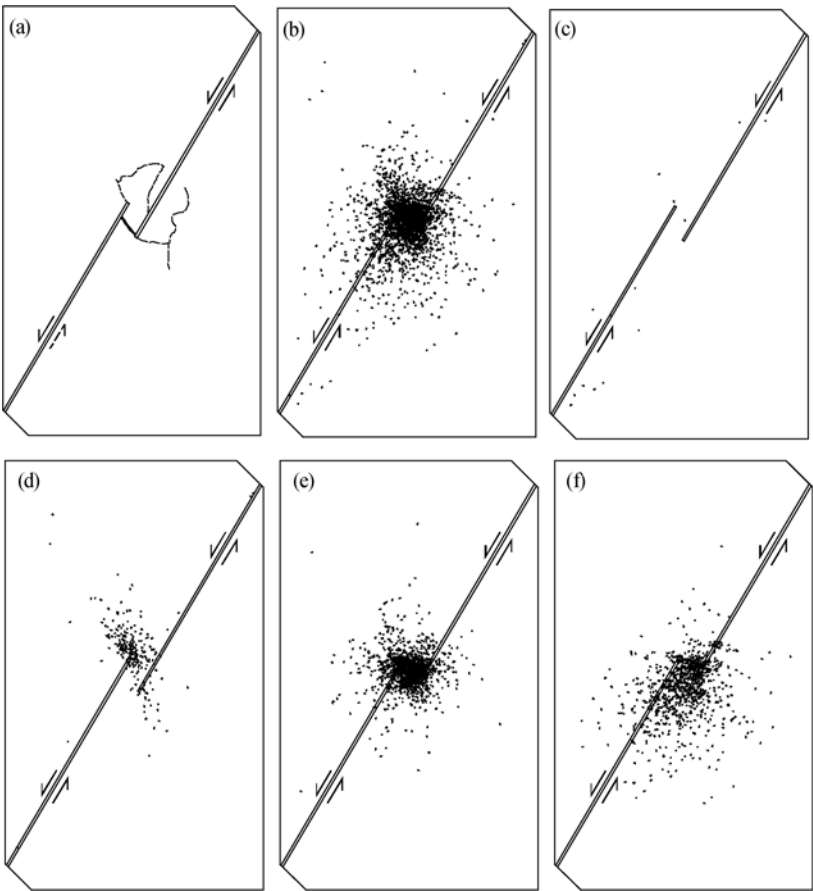


图 7 含挤压断层阶区标本(HBR05-09)变形过程中产生的宏观和微观破裂

(a) 宏观破裂, 实线表示切穿标本的破裂, 虚线表示表面裂纹; (b) 微破裂分布(0~5393 s); (c) 第 I, II 阶段(0~3130 s)的微破裂分布; (d) 第III阶段(3130~4560 s)的微破裂分布; (e) 第IV阶段(4560~5175 s)的微破裂分布; (f) 第 V 阶段(5175~5393 s)的微破裂分布

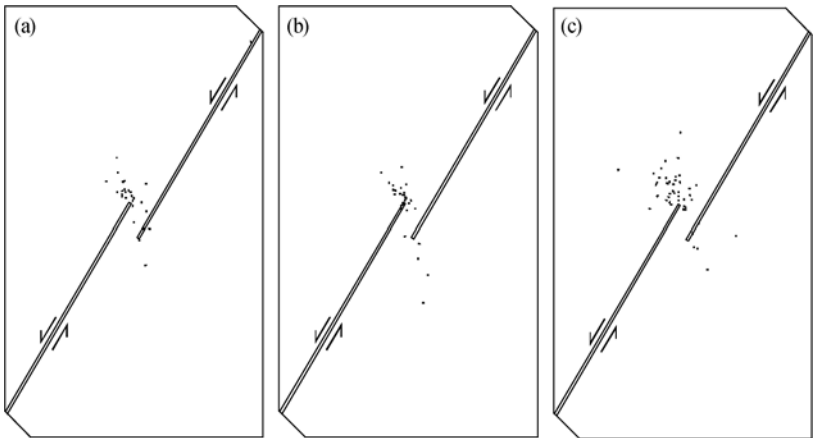


图 8 含挤压断层阶区标本(HBR05-09)粘滑事件前微破裂的空间分布

(a) E1 事件; (b) E2 事件; (c) E3 事件

表明阶区出现弱化和宏观破裂, 并引起断层内侧应变积累速率的明显降低; 第 V 阶段, 沿整个断层带、特别是断层内侧发生了强烈的应变释放; 此后断层内、外侧的应变变化逐渐趋于一致。

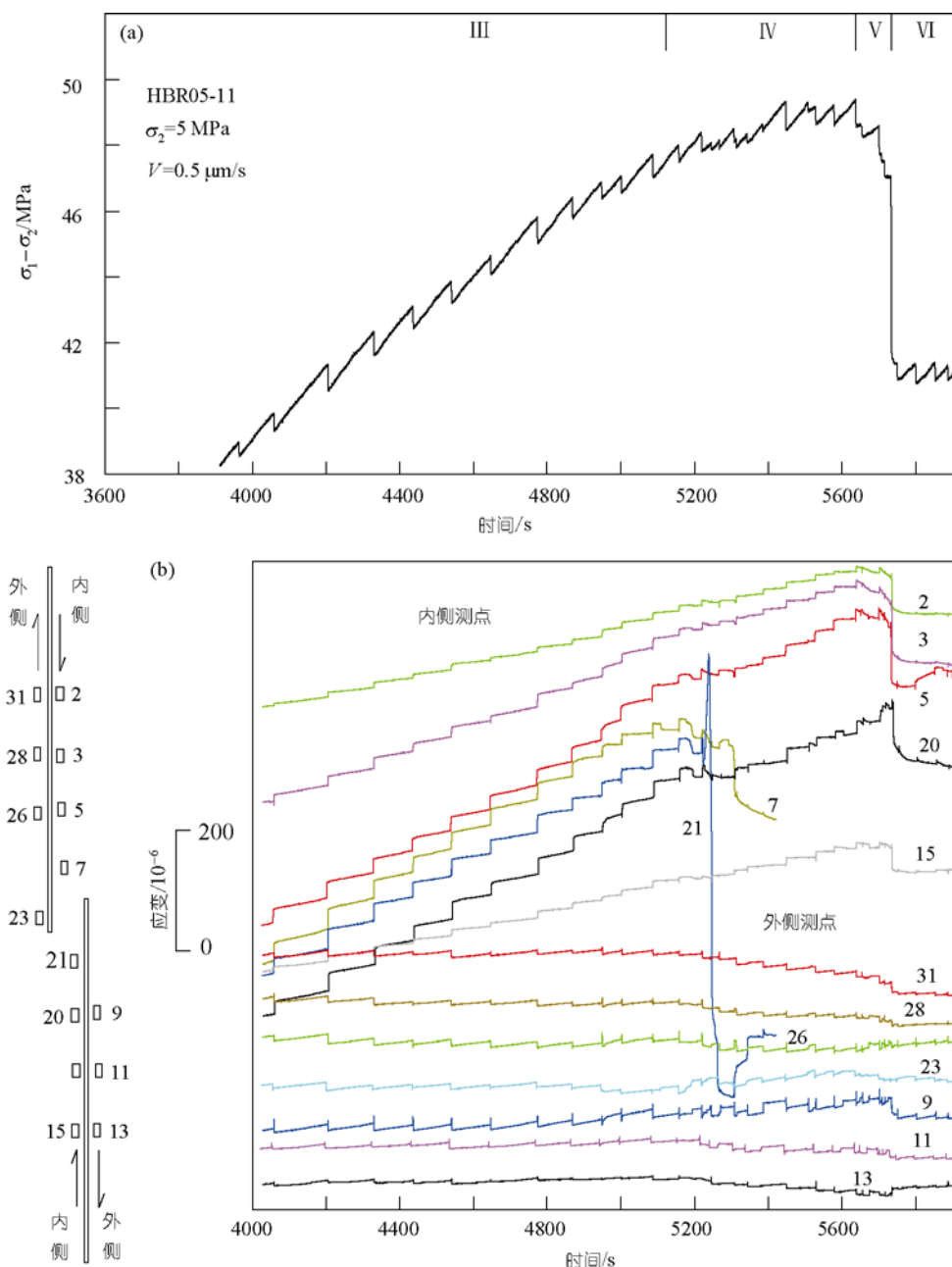


图9 含挤压断层阶区标本(HBR05-11)的差应力-时间曲线和断层带附近的应变测量结果

(a) 差应力-时间曲线; (b) 应变片分布位置和应变-时间曲线

3 讨论与结论

(1) 含拉张阶区的断层带的变形包括应力积累、阶区破坏、断层滑动等3个阶段. 在应力积累和阶区破坏阶段, 断层外侧区域应变持续上升, 控制着断层的总体应力水平, 而断层内侧是应变释放区域, 其中阶区是应变强烈释放、微破裂丛集区域; 在断层滑动

阶段, 伴随周期性的粘滑, 断层带内、外侧均表现为准周期性的应变释放, 并对应一个能级较大的声发射或一簇声发射事件, 这与均匀平直断层的变形行为^[23]极为类似. 拉张阶区由于强度低而很容易破裂, 因此对断层的滑动无明显的阻碍作用, 但阶区的变形和破裂为断层的滑动提供了条件; 大多数粘滑事

件前伴有发生在阶区附近的声发射事件, 表明阶区的破裂对断层的滑动具有指示作用. 断层带具有明显的速度弱化性质, 可用速率-状态摩擦定律^[24,25]来表述.

(2) 含挤压阶区的断层带的变形过程较为复杂, 大体上可分为应力积累、断层带准周期性粘滑、标本屈服、弱化和破坏等阶段. 从应力积累直到屈服阶段, 断层内侧应变持续上升, 控制着断层的总体应力水平, 而断层外侧是粘滑时的应变释放区域, 阶区外断层端部拉张区的微破裂活动则为断层粘滑提供了必要的变位条件并可作为断层失稳的前兆. 标本屈服阶段以阶区的破裂为特征, 其间微破裂活动频度和强度显著增强, 与完整岩石的破裂过程^[23,26]极为类似. 在弱化和破坏阶段, 阶区完全破裂, 两条断层贯通并发生滑动, 断层带、特别是断层内侧应变大幅度释放, 伴有从集于阶区附近的强烈的微破裂活动. 在此阶段之后, 断层带的滑动行为趋于简单. 显然, 在挤压阶区完全破裂前, 两条断层需要单独表述; 在挤压阶区完全破裂、两条断层被贯通后, 则可统一用速率-状态摩擦定律来表述.

(3) 由实验结果可推论, 拉张断层阶区由于强度较低而很容易发生破裂, 阶区的破裂可导致强震的发生, 而破坏后的阶区对断层的滑动无明显阻碍作用, 因而断层带的强震活动受控于两侧断层的粘滑失稳; 拉张断层阶区难以作为一个稳定的断层分段点, 在构建断层带的地震活动模型时, 断层带可作为一个整体来处理. 挤压断层阶区由于破裂强度很高而使断层滑动较为困难, 但在较高的应力水平下, 阶区外断层端部拉张区的微震活动可为断层带上粘滑(即强震)的重复发生提供必要的变位条件; 挤压阶区的完全破坏将使两侧断层连通, 导致断层系统发生整体滑动, 并将打破断层带上强震活动的复发规律; 但对尺度较大的挤压阶区, 这可能需要很长的时间, 因此, 挤压断层阶区可作为一个稳定的断层分段点, 在构建断层带的地震活动模型时, 阶区和两条断层需要单独处理. 断层带上强烈的拉张区, 如拉张阶区内、挤压阶区外断层端部拉张区等, 是观察强震前兆的有利部位, 这些区域的微震活动对断层带上的强震活动具有指示意义.

致谢 刘力强、吴秀泉、刘天昌和陈国强等参与了实验工作, 日本产业技术研究所雷兴林参与了实验结果讨论, 在此一并致谢.

参考文献

- Wallace R E. Surface fracture patterns along the San Andreas Fault. In: Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System. California: Stanford Press, 1973. 248—250
- Deng Q, Zhang P. Research on the geometry of shear fracture zones. J Geophys Res, 1984, 89: 5699—5710^[DOI]
- Bakun W H, Stewart R M, Bufe C G, et al. Implication of seismicity for failure of a section of the San Andreas fault. Bull Seism Soc Am, 1980, 70: 185—201
- Reasenber P A, Ellsworth W L. Aftershocks of the Coyote Lake, California, earthquake of August 6, 1979: a detailed study. J Geophys Res, 1982, 87: 10637—10655^[DOI]
- Segall P, Pollard D. Mechanics of discontinuous faults. J Geophys Res, 1980, 85: 4337—4350^[DOI]
- Ma J, Du Y, Liu L. The instability of en-echelon cracks and its precursors. J Phys Earth, 1986, 34 (Suppl): 141—157
- 杜异军, 马瑾, 李建国. 雁列式裂纹的相互作用及其稳定性. 地球物理学报, 1989, 32 (专辑 I): 218—231
- Aydin A, Schultz R A. Effect of mechanical interaction on the development of strike-slip faults with echelon patterns. J Struct Geol, 1990, 12: 123—129^[DOI]
- Harris R A, Day S M. Dynamics of fault interaction: parallel strike-slip faults. J Geophys Res, 1993, 98: 4461—4472^[DOI]
- Sibson R H. Stopping of earthquake ruptures at dilatational jogs. Nature, 1983, 316: 248—251^[DOI]
- Sibson R H. Rupture interaction with fault jogs. Am Geophys Un Geophys Mon, 1986, 37: 157—368
- Scholz C H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. New York: Cambridge University Press, 1990

- 13 Barka A, Kadinsky-Cade K. Strick-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 1988, 7: 663—684
[\[DOI\]](#)
- 14 刘力强, 马瑾, 吴秀泉. 雁列式断层变形与失稳过程的实验研究. *地震学报*, 1986, 8(4): 393—403
- 15 李建国, 石柱梅, 马瑾. 雁列裂纹交接区破坏特征与失稳型式研究. *现代地壳运动研究*(4). 北京: 地震出版社, 1989. 149—155
- 16 张之立, 李强. 断裂系扩展过程与地球物理场变化特征的实验研究. *地球物理学进展*, 1993, 8 (4): 225—231
- 17 马胜利, 邓志辉, 马文涛, 等. 雁列式断层变形过程中物理场演化的实验研究(一). *地震地质*, 1995, 17 (4): 327—335
- 18 马文涛, 马瑾, 刘力强, 等. 雁列构造的声发射特征. *地震地质*, 1995, 17 (4): 342—348
- 19 蒋海昆, 马胜利, 张流, 等. 雁列式断层组合变形过程中的声发射特征. *地震学报*, 2002, 24 (4): 385—396
- 20 闻学泽. 鲜水河断裂带未来三十年内地震复发的条件概率. *中国地震*, 1990, 6(4): 8—16
- 21 刘力强, 马胜利, 马瑾, 等. 岩石构造对声发射统计特征的影响. *地震地质*, 1999, 21(4): 377—386
- 22 刘培洵, 刘力强, 陈顺云, 等. 实验室声发射三维定位软件. *地震地质*, 2007, 29(3): 674—679
- 23 刘力强, 马胜利, 马瑾, 等. 不同结构岩石标本声发射 b 值和频谱的时间扫描及其物理意义. *地震地质*, 2001, 23(4): 481—492
- 24 Diterich J H. Modeling of rock friction. 1. Experimental results and constitutive equations. *J Geophys Res*, 1979, 84: 2161—2168[\[DOI\]](#)
- 25 Ruina A L. Slip instabilities and state variable friction laws. *J Geophys Res*, 1983, 88: 10359—10370[\[DOI\]](#)
- 26 Lei X, Kusunose K, Nishizawa O, et al. On the spatio-temporal distribution of acoustic emissions in two granitic rocks under triaxial compression: the role of pre-existing cracks. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(13): 1997—2000[\[DOI\]](#)