

应力扰动对断层摩擦声发射活动影响的实验研究

马胜利¹, 缪阿丽¹, 黄元敏^{1,2}

(1. 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;

2. 广东省地震局, 广东 广州 510070)

摘要:利用中尺度岩石摩擦实验开展了应力扰动对断层摩擦滑动过程中声发射活动影响的实验研究, 据此讨论同震应力变化引起的小震活动特征及其预测意义。实验结果表明方波状应力扰动对粘滑失稳前的声发射活动有明显影响, 即触发了一些声发射事件, 使得粘滑发生前声发射活动增强并使出现的时间提前。这种影响随平均正应力的提高和扰动振幅的增大而增强, 其中剪应力扰动(增加)比正应力扰动(减小)对声发射活动的影响更明显。从统计角度, 未叠加应力扰动时声发射事件一般开始在临近粘滑前应力积累达~90%以上时; 叠加应力扰动后声发射事件提前至应力积累达到~70%时, 甚至更早。结果意味着同震应力变化能否对区域内的强震活动产生显著影响主要取决于断层的绝对应力是否已临近失稳强度。而小震活动的变化能够在一定程度上反映断层的应力状态, 因此综合考虑同震应力变化和小震活动分析强震危险性更为合理。同时也需充分考虑其中的不确定性。

关键词: 摩擦实验; 粘滑; 应力扰动; 声发射; 地震活动

中图分类号: P315.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)01-0001-08

Effect of Stress Perturbation on Acoustic Emission during Fault Friction: An Experimental Study

MA Sheng-li¹, MIAO A-li¹, HUANG Yuan-min^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 2. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Effects of stress perturbation on acoustic emission (AE) during fault friction are studied by using medium-scale experiments of rock friction, and the characteristics of seismicity caused by coseismic stress change and its implication in earthquake forecasting are discussed based on the experimental results. The experiments indicate that stress perturbation of square wave can obviously affect AE activity, it can trigger some AE events so that AE activity before stick-slip becomes stronger and occurs earlier. The effect increases with increasing average normal stress and perturbation amplitude, and perturbation effect from shear stress (increase) is more evident than that from normal stress (decrease). In statistics, when stress perturbation is not applied, AE events usually occur just before stick-slip even if there are AE events, i. e. occurring when stress accumulation reaches above ~90%. When stress perturbation is applied, AE events occur earlier before stick-slip, i. e. occurring when stress accumulation reaches ~70% and even much earlier. The experimental results mean that whether the coseismic stress change caused by a strong earthquake can obviously affect strong seismic activity in its neighbour area, it is mainly

收稿日期: 2009-12-14

基金项目: 国家科技支撑项目(2006BAC01B03), 国际合作重点项目(2006DFA21660); 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418405)

作者简介: 马胜利(1960-), 男(汉族), 陕西人, 研究员, 主要从事构造物理实验研究。

dependent on if the absolute stress of faults comes close to instability strength. Small earthquakes can reflect stress state of fault at certain extend, therefore, it is more reasonable to analyze earthquake potential by combing coseismic stress change and activity of small events. However, the uncertainty existing in the process should also be considered.

Key words: Frictional experiment; Stick-slip; Stress perturbation; Acoustic emission; Seismicity

0 引言

一次强震的发生会引起区域内断层应力的变化,从而影响余震的分布乃至未来的地震活动趋势。因此同震应力变化已成为强震发生后地震活动趋势分析的重要依据。尽管在根据同震应力预测后续强震活动地点方面确有成功的例子^[1-3],一些研究也表明 0.01 MPa 量级的微小应力变化即可明显地影响地震活动^[5-6],但同震应力变化能否对区域内的地震活动产生显著影响主要取决于断层的绝对应力是否已临近失稳强度。震源深度上断层的绝对应力难以直接测量,虽然根据大震前后应力轴偏转和应力降能够获得应力量值^[7-8],但大震前断层应力水平的估计仍是一个难题。考虑到小震活动的变化能够在一定程度上反映断层的应力状态,因此可在同震库仑应力计算的基础上进一步考虑小震活动的变化来预测后续强震危险区^[9]。2008年汶川地震发生后,一些学者计算了其引起的同震库仑应力变化及其对周边断层地震危险性的可能影响^[10-14]。其中 Toda 等^[11]根据同震库仑应力计算结果和过去 10 年来的背景地震活动,预测了未来 10 年的地震活动性和强震发生的可能地点,并指出未来小震活动速率的增强可为其预测提供证据。此外也有一些学者根据余震的分布和小震活动的分布对区域地震危险性进行了预测。显然,根据同震应力变化引起的小震活动变化预测区域地震危险性已成为震后趋势分析的重要手段。然而这种方法是否具有充分的依据,一方面需要通过实际震例进行分析论证,也需要从理论和实验方面进行论证。

声发射是实验室中与地震事件最类似的信号,在实验室研究断层滑动失稳不同阶段经受应力扰动时的声发射活动,分析扰动响应与断层应力状态的关系,可为根据同震应力变化及小震活动特征预测区域地震危险性提供参考。因此我们开展中尺度标本的摩擦滑动实验,研究应力扰动对断层滑动失稳的影响,重点分析应力扰动对应的声发射活动,并讨论实验结果在地震危险性预测中的意义。

1 实验方法

实验所用标本结构为三块岩石标本组成的含有两个滑动面的直剪结构;岩石标本为花岗闪长岩;每个滑动面的面积为 300 mm×50 mm。实验在一套卧式双向加载装置上进行,载荷和位移通过一套分辨率为 16 bit 的数据采集系统记录,采样频率为 10 Hz。在标本表面布设了声发射传感器,记录标本在实验过程中的微破裂活动。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),声发射事件的能量通过对声发射波形的线长积分来确定^[15]。实验的基本条件为正应力 5~25 MPa,剪切方向加载速率 0.5 μm/s。实验标本结构及传感器布局如图 1(a)所示。

关于应力扰动,我们首先采用了实验室中常用的加载方法,即通过叠加正弦波状载荷研究周期性载荷对断层滑动行为的影响^[16-18]。除此之外,考虑到地震引起的同震应力变化的特点,我们也考虑了方波状载荷扰动的影响。鉴于库仑应力的变化包括剪应力和正应力的变化,我们进行了剪应力扰动和正应力扰动两类实验。根据我们采用的标本结构,通过在剪切方向平均加载速率上叠加正弦波状或台阶状的位移扰动研究剪应力扰动的影响;通过在平均正应力上叠加正弦波状或台阶状的应力扰动研究正应力扰动的影响。实验中首先使平均正应力达到预定的应力值,并保持不变,剪切方向上以预定的位移速率加载。在标本进入规则粘滑阶段之后在剪切方向的平均位移速率或平均正应力上叠加相应的扰动。叠加的位移、应力扰动的形式和参数如图 1(b)所示。根据已有岩石摩擦实验结果^[19],声发射活动主要出现在较高正应力条件下,且丛集于粘滑事件前,因此我们主要关注较高正应力下的实验,并在实验中采用了较高的声发射触发门槛(即只记录能级较大的声发射事件),使得无应力扰动条件下粘滑前基本上不出现声发射,以便更好地分析应力扰动引起的声发射。

2 实验结果

2.1 正弦波状应力扰动的影响

图 2(a)给出了平均正应力 $\sigma_n = 20$ MPa、剪切方向加载点速率 $V = 0.5 \mu\text{m/s}$ 的条件下叠加正弦波状剪应力扰动的实验结果。由剪应力—时间曲线可见,实验过程中标本表现为典型的粘滑特征。当标本在未叠加扰动的条件下(即扰动振幅 $A = 0$)基本达到规则粘滑(即粘滑应力降大小和时间间隔相差不大)后,在剪切方向平均加载点速率上依次叠加了振幅 $A = 3.5, 7, 14 \mu\text{m}$ 的正弦波状位移扰动(根据标定结果,其对应的剪应力扰动振幅分别为 $0.05, 0.1, 0.2$ MPa),随着扰动幅度的增加规则粘滑被打乱,即粘滑应力降大小和时间间隔变化较大。由声发射 $M-T$ 图可见,在未叠加扰动的条件下,每次粘滑事件均对应一次大的声发射事件,而粘滑事件之间只有极个别声发射事件,表明所选声发射触发阈值有效抑制了较小声发射事件的触发。叠加扰动之后,在扰动幅度较大的情况下,一些粘滑事件前出

现了声发射活动,且主要发生在临近粘滑发生前。图 2(b)给出了平均正应力 $\sigma_n = 14$ MPa、剪切方向加载点速率 $V = 0.5 \mu\text{m/s}$ 的条件下,在平均正应力上叠加正弦波状应力扰动的实验结果。可见其力学性状及声发射特征的变化与前述实验结果相似,即随着扰动幅度的增加,规则粘滑被打乱,临近粘滑事件前的声发射活动略有增强。宏观分析粘滑事件前声发射活动的增加应与应力扰动的叠加有关。这些声发射事件的发生时间基本上都在叠加的剪应力增加或正应力下降的相位上,表明临近粘滑事件前声发射活动的增加的确与叠加的应力扰动相关。不过,叠加扰动后也只是一小部分粘滑事件在临近发生前出现了声发射事件,说明正弦波状应力扰动对摩擦滑动过程中的声发射影响并不是很明显,因此这里不再进行详细分析。

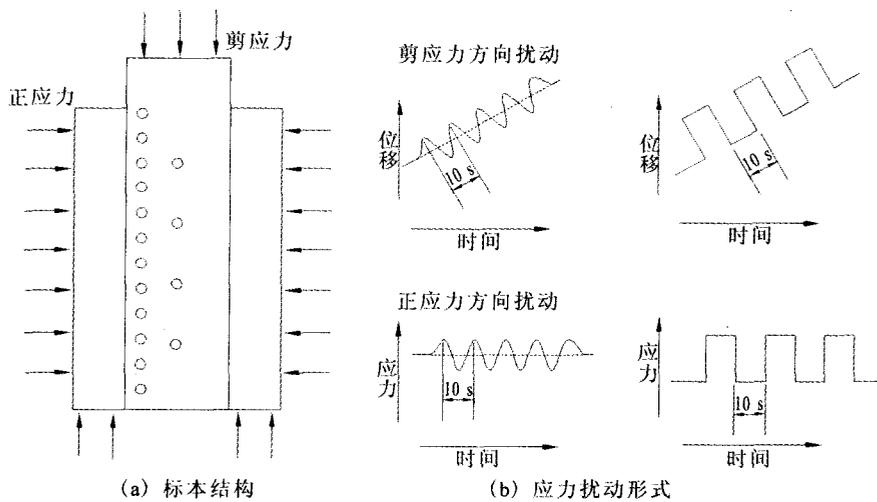


图 1 实验标本结构和应力扰动形式(标本表面的圆圈表示声发射传感器)

Fig. 1 Sample configuration and modes of stress perturbation (Circles on the sample surface indicate AE transducers).

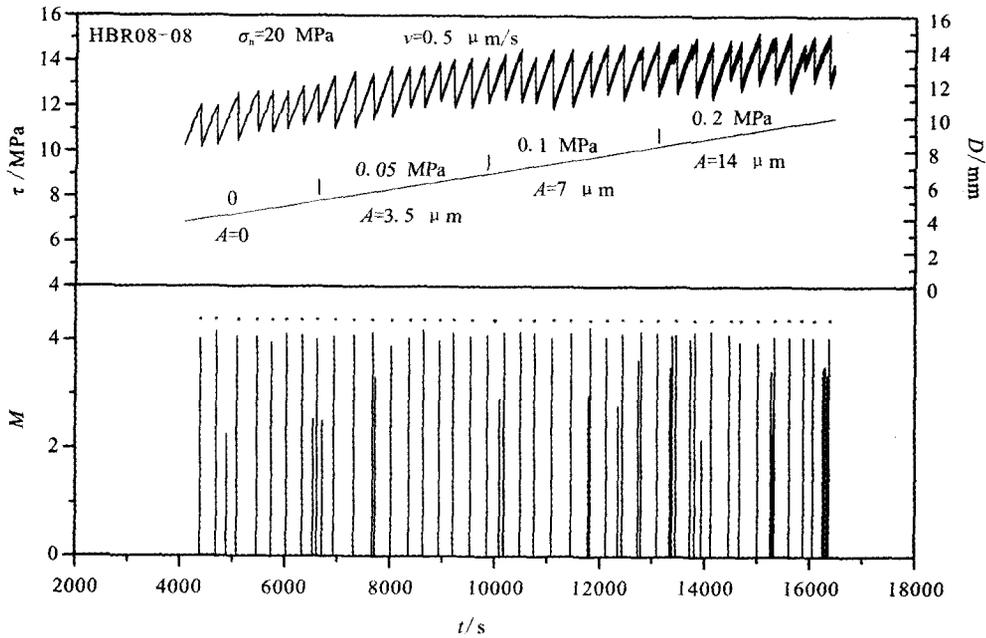
2.2 方波状剪应力扰动的影响

图 3(a)给出了平均正应力 $\sigma_n = 14$ MPa、剪切方向加载点速率 $V = 0.5 \mu\text{m/s}$ 的条件下叠加了方波状剪应力扰动的摩擦实验的剪应力—时间曲线及声发射 $M-T$ 图。可见,在叠加剪应力扰动之前标本表现出很规则的粘滑,每次粘滑对应的声发射事件能量也很接近,粘滑事件之间的声发射事件很少。叠加了方波状剪应力扰动后标本的规则粘滑被打乱,粘滑应力降和周期差异且随扰动振幅而增加;很多粘滑事件前出现了多个声发射事件,这一趋势也随扰动振幅的增加而更为明显。这说明方波状应力扰动对摩擦滑动过程中的声发射影响是很明显的。

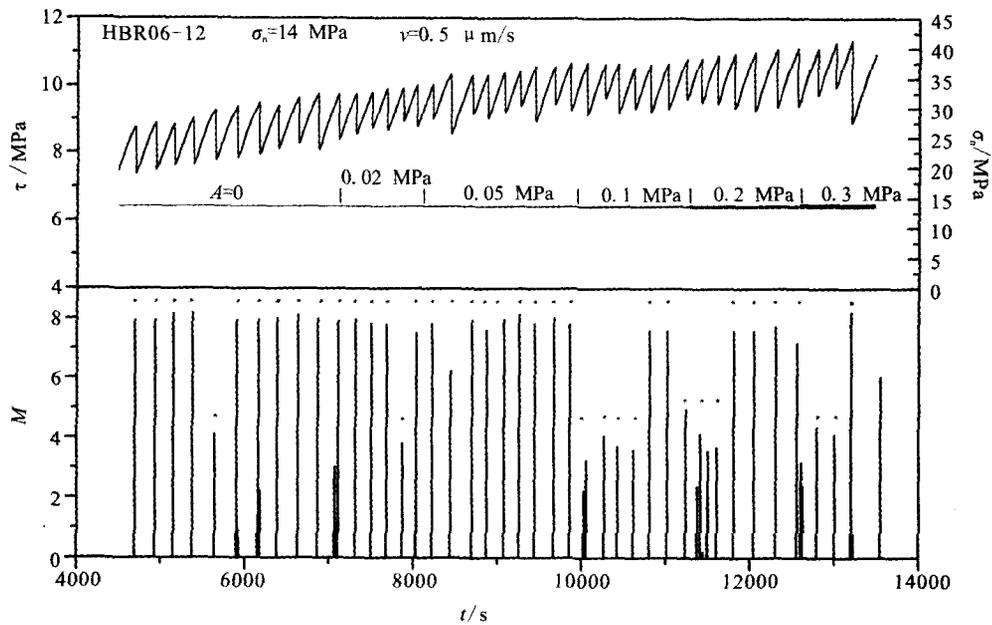
鉴于地震发生在正应力相当高的断层深部,考察平均正应力对上述实验结果的影响是非常必要的。为此在不同的平均正应力条件下进行了实验。图 3(b)给出了平均正应力 $\sigma_n = 23$ MPa、剪切方向加载点速率 $V = 0.5 \mu\text{m/s}$ 的条件下的实验结果。可见,平均正应力的增加使得应力扰动对摩擦行为的影响增强,粘滑应力降和周期的差异增加;由于平均正应力的增加,未叠加扰动时粘滑前声发射事件即有增加的趋势,但叠加扰动后许多粘滑事件发生前声发射事件明显增多,特别是在扰动振幅较大时所有粘滑事件发生前均可见声发射事件明显丛集。如果把一次粘滑发生后的应力与下次粘滑发生时的

应力之差定义为粘滑发生所需积累的应力,从统计角度来看,未叠加扰动时声发射事件多发生在临近粘滑前,即发生在应力积累达~90%以上;叠加扰动后虽然大多数声发射事件仍丛集于临近粘滑失稳

前,但出现声发射事件的时间明显提前,在应力积累达到~70%时便可能发生声发射,有些粘滑失稳前声发射事件出现的时间更早。



(a) 叠加剪应力扰动



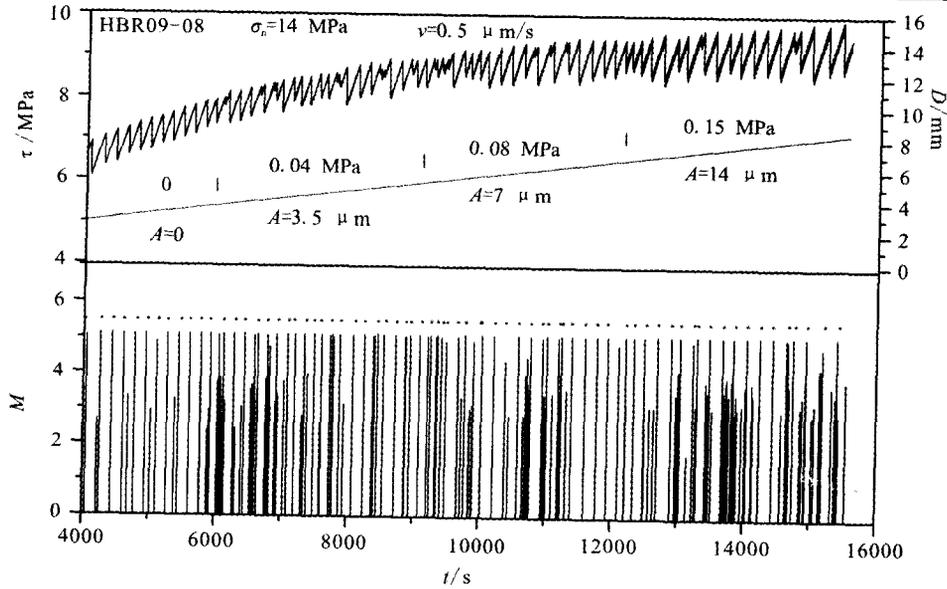
(b) 叠加正应力扰动

图 2 叠加正弦波状应力扰动的剪应力—时间曲线及声发射 M—T 图 (上部带圆点的声发射事件为与粘滑对应的事件)

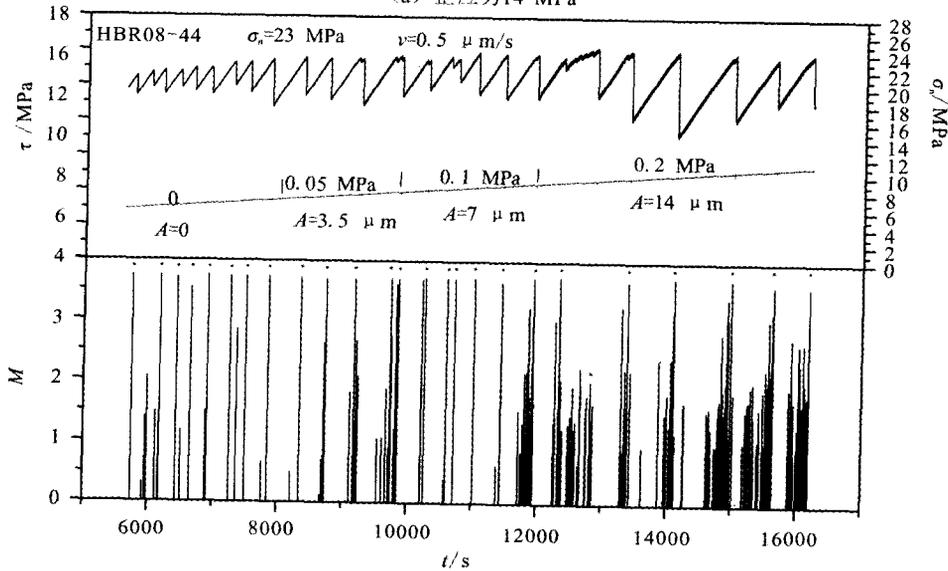
Fig. 2 Shear stress and magnitude of AE event versus time for frictional experiments modulated by stress perturbation of sine wave (AE events marked by dots are corresponding to stick-slip events).

为了考察声发射事件与应力扰动的关系,分析了声发射事件与应力扰动的关系,图 4 给出

了平均正应力为 18 MPa、位移扰动振幅 14 μm(相当于剪应力扰动振幅 0.17 MPa)时 4 次粘滑失稳对



(a) 正应力 14 MPa



(b) 正应力 23 MPa

图 3 叠加方波状剪应力扰动的剪应力—时间曲线及声发射 $M-T$ 图
(上部带圆点的声发射事件为与粘滑对应的事件)

Fig. 3 Shear stress and magnitude of AE event versus time for frictional experiments modulated by shear stress perturbation of square wave (AE events marked by dots are corresponding to stick-slip events).

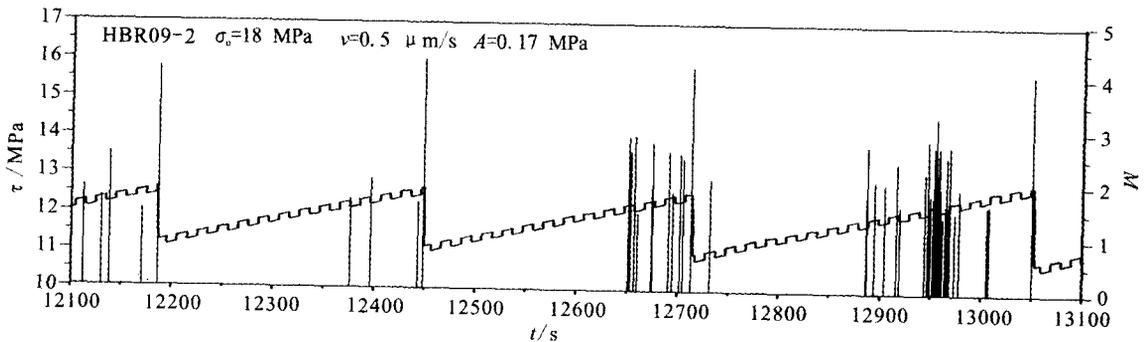


图 4 方波状剪应力扰动与声发射事件的时间关系

Fig. 4 Relationship between shear stress perturbation of square wave and AE events.

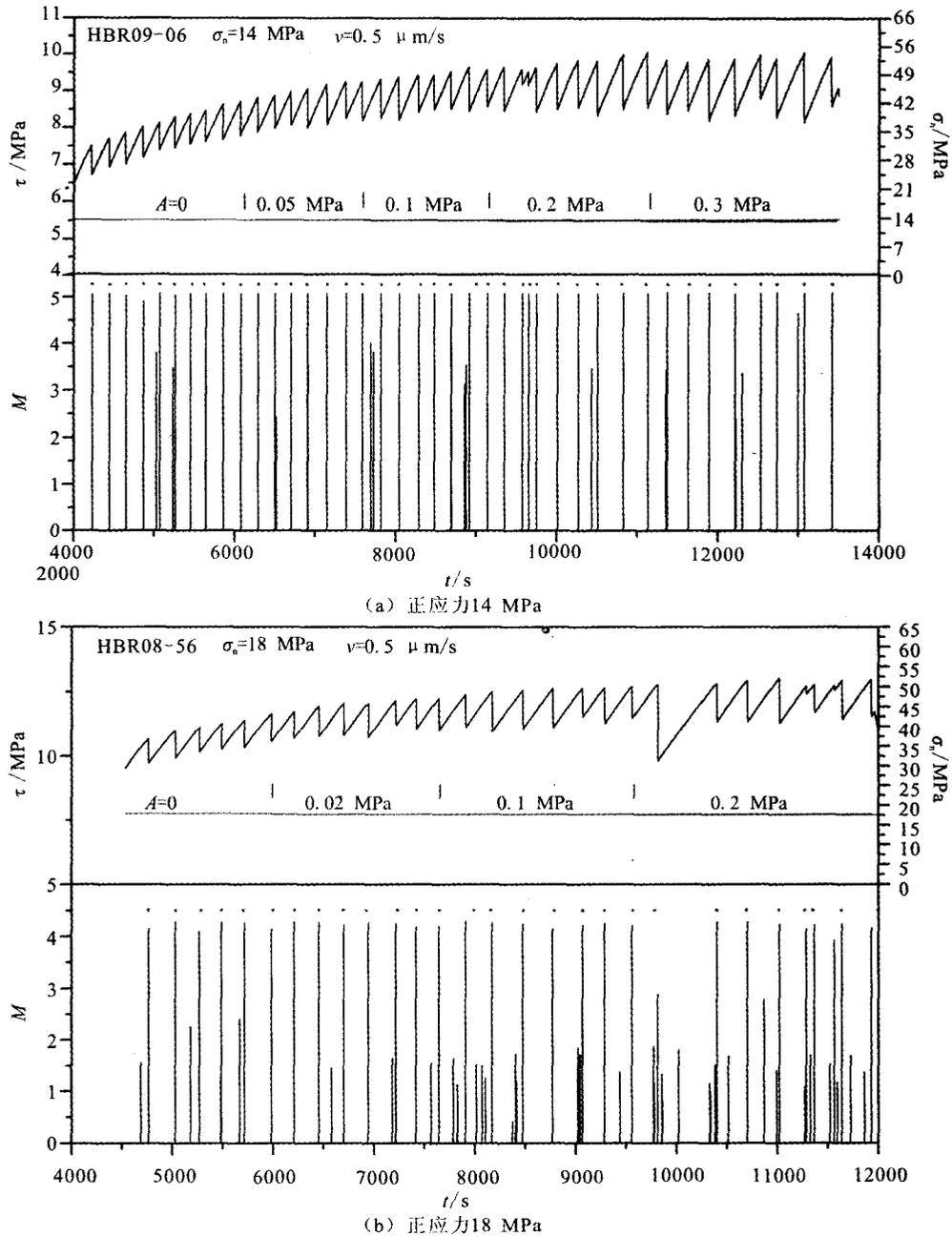


图 5 叠加方波状正应力扰动的剪应力—时间曲线及声发射 $M-T$ 图
(上部带圆点的声发射事件为与粘滑对应的事件)

Fig. 5 Shear stress and magnitude of AE event versus time for frictional experiments modulated by normal stress perturbation of square wave (AE events marked by dots are corresponding to stick-slip events).

应的剪应力—时间曲线及声发射 $M-T$ 图。由图可见,位移扰动造成了剪应力积累过程中的方波状波动,粘滑失稳发生时间全部对应于剪应力扰动(上升)段,表明失稳时间受应力触发作用的控制。图中,第一次粘滑前共有 4 个声发射事件,除第 3 个事件外,其它事件的发生时间均对应于剪应力扰动(上升)段;第二次粘滑前共有 3 个声发射事件,除第 3

个事件外,其它事件的发生时间均对应于剪应力扰动(上升)段;第三次和第四次粘滑前的声发射事件较多,其中大多数事件的发生时间对应于剪应力扰动(上升)段,特别是能量较大的事件和事件丛基本上受控于剪应力扰动。根据计算,对于前 3 次粘滑失稳,当应力积累分别达到 67%、72%、74%时声发射活动开始出现;而对于第 4 次粘滑失稳,应力积累

至51%时便有声发射活动出现。这表明粘滑失稳前声发射活动的增强、发生时间的提前的确与剪应力扰动(上升)有关。但该图也表明,声发射活动在时间分布上也很不均匀,即使在较高的应力水平下也并非每次应力扰动都能触发声发射活动。

2.3 方波状正应力扰动的影响

图5给出了两种正应力条件下叠加了方波状正应力扰动的摩擦实验的剪应力、正应力-时间曲线及声发射 $M-T$ 图。由图5(a)可见,在平均正应力为14 MPa的条件下,叠加正应力扰动之前标本基本表现为规则粘滑,每次粘滑均对应一个声发射事件,只有两次粘滑事件发生前各有1个声发射事件。叠加了方波状正应力扰动(正应力减小)后,标本的摩擦行为发生了变化,特别是当扰动幅度较大时规则粘滑被打乱,粘滑应力降和周期明显离散;但粘滑发生前出现的声发射事件并没有明显增加。在平均正应力为18 MPa的条件下(图5(b)),未叠加扰动时一些粘滑发生前便有声发射事件发生,而叠加扰动后大多数粘滑发生前声发射事件增多,特别是在扰动振幅较大时更为明显。同样,从统计角度来看,

未叠加扰动时少量声发射事件发生在临近粘滑前,即发生在应力积累达~90%以上;叠加扰动后出现声发射事件的时间提前,在应力积累达到~70%时便可发生声发射,有些粘滑失稳前声发射事件出现的时间更早。与同样条件下剪应力扰动实验结果比较,可知正应力扰动对粘滑失稳前声发射活动的影响小于剪应力扰动的影响,但影响的趋势是一致的。

同样分析了声发射事件与应力扰动的时间相关性。图6给出了平均正应力为18 MPa、正应力扰动振幅分别为0.05和0.1 MPa时4次粘滑失稳对应的剪应力、正应力-时间曲线及声发射 $M-T$ 图。由图可见,粘滑失稳发生时间全部对应于正应力扰动(下降)段,表明失稳时间受应力触发作用的控制。每次粘滑前的声发射事件的发生时间也基本上对应于正应力扰动(下降)段。由图也看见,4次粘滑事件发生前声发射出现的时间不尽相同,对于第1次和第4次粘滑,当应力积累分别至72%和69%时声发射活动开始出现;而对于第2和第3次粘滑事件,应力积累分别至54%和48%时便有声发射活动出现。同样,声发射活动在时间分布上也很不均匀。

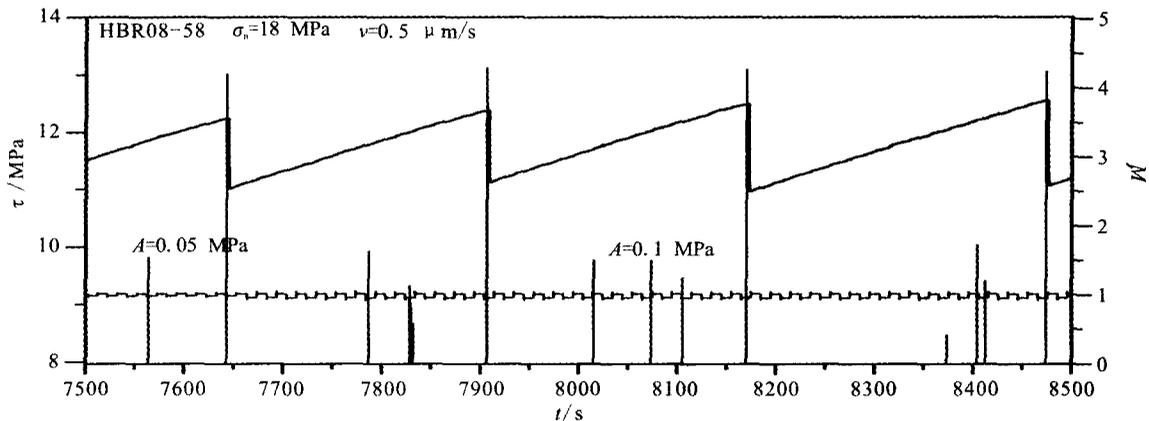


图6 方波状正应力扰动与声发射事件的时间关系

Fig. 6 Relationship between normal stress perturbation of square wave and AE events.

3 讨论和结论

(1) 中尺度岩石摩擦实验结果表明,正弦波状剪应力扰动和正应力扰动对断层的摩擦行为有显著的影响,随着扰动振幅的增加规则粘滑被打乱,粘滑应力降和周期离散。这与以前的实验结果^[18]是一致的。应力扰动对粘滑失稳前的声发射活动也有一定的影响,即剪应力的增加或正应力的减小可能会触发一些声发射事件,使得一些粘滑发生前声发射活动有所增强。但失稳前声发射活动增强的粘滑事件数量是很有限的,说明这种应力扰动的影响并不

是很显著。

(2) 实验表明,方波状剪应力扰动(剪应力增加)和正应力扰动(正应力减少)对断层的摩擦行为有更显著的影响,粘滑发生的时间与应力扰动有很强的相关性,表现出明显的触发特征。与此相对应,粘滑应力降和周期明显离散。应力扰动对粘滑失稳前的声发射活动也有明显影响,即触发了一些声发射事件,使得粘滑发生前声发射活动增强,且使其出现时间提前。上述影响随平均正应力的提高和扰动振幅的增大而增强,其中剪应力扰动(增加)比正应

力扰动(减小)对声发射活动的影响更明显。从统计角度来看,未叠加应力扰动时粘滑失稳前即使有声发射事件发生,一般发生在临近粘滑前,即发生在应力积累达~90%以上;叠加应力扰动后,粘滑失稳前声发射事件的出现时间提前,在应力积累达到~70%时便可能出现声发射,有些粘滑失稳前声发射事件出现的时间更早(应力积累达~50%时)。不过,即使在较高的应力水平下,并非每次应力扰动都能触发声发射。

(3) 实验中正弦波状应力扰动和方波状应力扰动的主要区别在于应力变化的速率后者明显快于前者。而两者对断层粘滑应力降和周期的影响作用并无明显区别,表明断层粘滑应力降和周期主要受应力变化幅度的影响,与应力变化的速率关系不大。方波状应力扰动对断层粘滑前声发射活动的影响明显强于正弦波状应力扰动,说明声发射活动与应力变化速率明显相关,即较快的应力变化速率有利于声发射事件的发生。鉴于强震引起的同震应力变化速度较快,方波状应力扰动的实验结果可为根据强震引起的同震应力变化和小震活动分析强震活动趋势和地震危险性提供一些启示。

(4) 一次强震的发生会引起周边一些断层库仑应力的增加(包括剪应力的增加或正应力的减少),这无疑会促进这些断层上强震的发生,特别是同震库仑应力增加幅度较大的断层。但同震应力变化能否对区域内的强震活动产生显著影响,主要取决于断层的绝对应力是否已临近失稳强度。由于小震活动的变化能够在一定程度上反映断层的应力状态,因此综合考虑同震应力变化和小震活动分析强震活动趋势更具合理性。即使一条断层(或断层段)被明显加载,即同震库仑应力显著增加,但同震或震后一段时间内小震活动、特别是震级较大的地震并未增加,说明断层仍处于较低的应力水平,尚未达到所需积累应力的~70%,因此近期并无发生强震的危险性。如果一条断层(或断层段)的同震库仑应力显著增加,同震或震后一段时间内小震活动、特别是震级较大的地震也有明显响应,说明断层处于较高的应力水平,已超过所需积累应力的~70%,至少是~50%以上,判断其近期是否具有发生强震的危险性,则需要考虑其在强震前的小震活动背景。如果在强震前断层带小震活动较强,特别是发生过震级较大的地震,那么断层可能处于临近失稳的应力水平(已达到所需积累应力的~90%),因而发生强震

的可能性较大;如果在强震前断层带小震活动很弱,则近期发生强震的可能性较小。对于这两种情况尚需密切关注震后小震活动的趋势。此外在较高应力水平下有时应力扰动并未触发声发射的现象表明,根据同震应力变化和小震活动分析强震活动趋势也存在着不确定性,这一点在实际工作中应充分考虑。

实验工作得到地震动力学国家重点实验室刘力强、刘培洵、陈国强、陈顺云等人的协助,谨致谢意。

[参考文献]

- [1] McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S. Earthquake risk from co-seismic stress[J]. *Nature*, 2005,434: 291.
- [2] Nalbant S S, Hubert A, King G C P. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998,103: 24469-24486.
- [3] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. *Geophys. J. Int.*, 1997,128:594-604.
- [4] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1994,84: 935-953.
- [5] Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. The static stress change triggering model: constraints from two southern California aftershock sequences[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998,103: 24427-24437.
- [6] Stein R S. The role of stress transfer in earthquake occurrence [J]. *Nature*, 1999,402: 605-609.
- [7] 王永革,沈正康,兰从欣. 根据走滑大地震前后应力轴偏转和应力降求取偏应力量值的研究[J]. *地球物理学报*, 2006,49(3): 838-844.
- [8] 王永革. 根据大地震前后应力轴偏转和应力降求取应力量值的研究[J]. *地震学报*, 2006,28(5): 472-477.
- [9] Nishimura N, Toda S, Stein R S, et al. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- [10] Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. *J. Geophys. Res.*, 35, 2008, L17305, doi: 10.1029/2008GL034903.
- [11] Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. *Nature*, 2008,454: 509-510.
- [12] 张国宏,单新建,李卫东. 汶川 $M_s 8.0$ 地震库仑破裂应力变化及断层危险性初步研究[J]. *地震地质*, 2008,30(4): 935-944.

- 震学报,1996,18(2):170-178.
- [4] 张培震,许锡伟,闻学泽,等. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报,2008,51(4):1066-1073.
- [5] 袁道阳,何文贵,刘小凤,等. 10余年来甘肃省中强地震发震构造特征[J]. 西北地震学报,2006,28(3):235-241.
- [6] 郑文俊,刘小凤,赵广,等. 2003年11月13日甘肃岷县 M_s 5.2地震基本特征[J]. 西北地震学报,2005,27(1):61-65.
- [7] 高曙德,杜学彬,苏永刚,等. 甘川交界地区近年地震活动与武都地震台前兆资料变化特征[J]. 西北地震学报,2009,167-173.
- [8] 祝意青,梁伟锋,许云马. 流动重力资料对汶川 M_s 8.0地震的中期预测[J]. 国际地震动态,2008,28(11):118.
- [9] 巩守文. 门源、江口地震的断层形变前兆分析[J]. 地震,1992,22(1):34-40.
- [10] 江在森,祝意青,王庆良,等. 永登5.8级地震孕育发生过程中的断层形变与重力场动态图像特征[J]. 地震学报,1998,20(3):264-271.
- [11] 王双绪,江在森,陈文胜,等. 景泰5.9级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 地震学报,2001,23(2):151-158.
- [12] 张四新,王双绪,张希,等. 民乐-山丹6.1级地震前后的地壳垂直形变[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):42-48.

(上接8页)

- [13] 万永革,沈正康,盛书中,等. 2008年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报,2009,31(2):128-139.
- [14] 单斌,熊熊,郑勇,等. 2008年5月12日 M_w 7.9汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学 D 辑,2009,39(5):537-545.
- [15] 刘力强,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.
- [16] Locker D A, Beeler N M. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes[J]. J. Geophys. Res., 1999,104: 20133-20151.
- [17] 崔永权,马胜利,刘力强. 应力扰动对断层摩擦影响的实验研究[J]. 地震地质,2005,27(4):645-652.
- [18] 黄元敏,马胜利,缪阿丽,等. 剪切载荷扰动对断层摩擦影响的实验研究[J]. 地震地质,2008,31(2):276-286.
- [19] 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[J]. 地震地质,2001,23(4):481-492.