

遥感-岩石力学(III)—— 交汇断层粘滑的热红外辐射与声发射规律及其构 造地震前兆意义*

吴立新¹ 刘善军^{1,2} 许向红³ 吴育华¹ 李永强¹

(¹中国矿业大学(北京校区)3S与沉陷工程研究所 北京 100083) (²河北理工学院资源系 唐山 063009)

(³中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 北京 100080)

摘要 以构造地震孕震机制之三即交汇断层粘滑发震为模拟对象,利用双轴加载实验系统和红外热像仪对自然界经常出现的断层组合模式——不同交汇角度的组合断层的物理模型进行了室内加载实验,利用红外热像仪和声发射仪分别测定了加载过程中试样表面的红外辐射及断层活动的声发射时间序列。结果表明:(1)声发射及红外辐射的时间序列特征受加载过程中试样的力学行为所控制,并表现出阶段性变化特点;(2)声发射与红外辐射特征与断层几何结构有密切关系,当主应力与主断层成 45° 角时,红外辐射异常区主要沿主断层发育;(3)垂直交汇的断层与斜交断层的声发射及红外辐射特征有明显差异,交汇角度($1^\circ \sim 90^\circ$)越大,交汇点处的红外辐射异常越明显。

关键词 遥感-岩石力学, 构造地震, 地震遥感, 热红外异常, 声发射, 交汇断层

分类号 TP 79, TU 452

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)03-0401-07

REMOTE SENSING-ROCK MECHANICS——LAWS OF THERMAL INFRARED RADIATION AND ACOUSTIC EMISSION FROM FRICTION SLIDING INTERSECTED FAULTS AND ITS MEANINGS FOR TECTONIC EARTHQUAKE OMENS

Wu Lixin¹, Liu Shanjun^{1,2}, Xu Xianghong³, Wu Yuhua¹, Li Yongqiang¹

(¹Institute of RS/GPS/GIS & Subsidence Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083 China)

(²Resource Department, Hebei Institute of Science and Technology, Tangshan 063009 China)

(³State Key Laboratory of Non-Linear Mechanics, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract The friction sliding of intersected faults is the third mechanism of tectonic earthquake. By use of biaxial loading system, thermal infrared (TIR) imaging system and acoustic emission (AE) devices, the TIR radiation and AE features of three kinds of intersected faults at different intersection angle were experimentally studied in the process of bi-sheared friction sliding. It is revealed that (1) the temporal sequential features of the AE and TIR radiation in the process of loading are controlled by fault behavior, and they show staged characteristics, (2) the features of AE and TIR radiation are tightly related to the geometrical structure of the intersected faults, and the abnormal TIR spots usually occur along the chief fault in condition that the principal stress is 45° in angle to the direction of the chief fault, and (3) the features of AE and TIR radiation from vertically intersected and slanting intersected faults are different, and the higher the intersection angle is, the

2003年6月2日收到初稿,2003年7月25日收到修改稿。

*全国优秀博士学位论文专项基金(200046)和北京市自然科学基金重点项目(8001003)联合资助项目。

作者 吴立新 简介:男,1966年生,博士,现为中国矿业大学北京校区3S与沉陷工程研究所所长、教授、博士生导师,主要从事开采沉陷理论与控制技术、GIS理论与算法、3S集成与应用、数字矿山理论与关键技术、地震遥感及遥感-岩石力学教学与研究。E-mail:wlx@cumtb.edu.cn.

stronger the TIR radiation is at the location of intersection point.

Keywords remote sensing-rock mechanics , tectonic earthquake , earthquake remote sense , thermal infrared abnormality , acoustic emission , intersected faults

1 引言

地震研究的目的是了解和掌握地震孕育、发展及发生的规律，并提高地震预报的成功率。因此，地震前的各种异常、前兆就成为研究的一个重要方面。1988 年前苏联学者 Gorny 等人(Gorny, 1988)报道了中亚及东地中海地区许多中强地震发生前出现大面积卫星遥感红外(10.5 ~ 12.5 μm)异常^[1]，引起我国地震学界的极大关注，并相继在我国和临近地区发现了类似的现象^[2-6]，证实在许多强震前确实存在有卫星热红外异常。为认识其成因机理，一些地震学家进行了震前热红外异常的实验模拟研究^[7-9]，并提出了“地球放气说”^[10]、地下水溢出效应^[11]和岩石摩擦致热效应^[12]等机理假说。由于构造地震的发生与岩石破裂有密切关系，所以许多学者(耿乃光等, 1998; 崔承禹等, 1993; 邓明德等, 1993; 吴立新, 1998, 2002; 刘善军, 2002)进行了岩石破裂过程的红外监测实验研究，发现有相当数量的岩石存在破裂的红外前兆^[9, 12-16]。

上述研究从一定程度上对震前的热红外异常解释提供了实验依据，并为后续的进一步研究奠定了基础。但由于实验模型简单，且加载方式单一(主要为单轴压缩)，不能准确地模拟相对复杂的构造地震，致使许多震前出现的热红外异常现象得不到合理、科学的解释。

自然界中的断层大多是以交汇形式出现的，同时构造地震的发生也多与交汇断层的活动有关。1966 年邢台地震序列发生在走向 NNE 和 NWW 的两组交叉断层上^[17]。1970 年通海地震、1973 年炉霍地震、1974 年大关-永善地震、1975 年海城地震、

1976 年宁蒗-盐源地震都有两个方向的余震带，但有明显的主次之分^[18, 19]。华北地区近期的地震与交汇的 NNE 向和 NWW 向断层的活动有关^[20]。上述事实表明，交汇断层的活动对于构造地震的发生有重要的作用。马瑾曾对交叉断层的活动形式进行了实验模拟研究，得出许多重要结论^[21]。

本文针对自然界常见的断层组合形式即交汇断层设计了相应的物理模型，利用双轴加载系统和红外热像仪进行了模型在双轴加载过程中断层相互滑动的声发射及红外辐射特征的观测研究。

2 实验设计

实验加载装置为 INSTRON 8506 真三轴四立柱液压伺服系统，轴向最大载荷 3 000 kN，水平最大载荷 2 000 kN。本次实验为双轴加载，只使用垂直和水平的两个轴。红外辐射探测装置采用 TVS-8100 MK 型红外热像仪，温度灵敏度为 0.025 ，图像分辨率为 320×240，图像采集速率可达 60 帧/s。声发射探测装置采用型号为 AE21C-02 的声发射仪，使用 2 个通道，传感器的中心频率均为 140 kHz。

实验模型为 3 种不同交角的断层组合，交角分别为 90°、75°和 60°，其加载的物理模型及声发射探头的布置如图 1 所示，加载中的有关参数见表 1 所示。

实验方法：首先将水平侧压加到预定值并维持恒定，然后以等位移速率加载纵向压力，使各岩块做相对滑动(错动)；利用红外热像仪观测加载过程中岩石表面的红外辐射情况，重点观测断层区域的红外辐射变化情况；利用声发射仪探测加载过程中声发射事件的时间序列发展特征。为便于对不同设

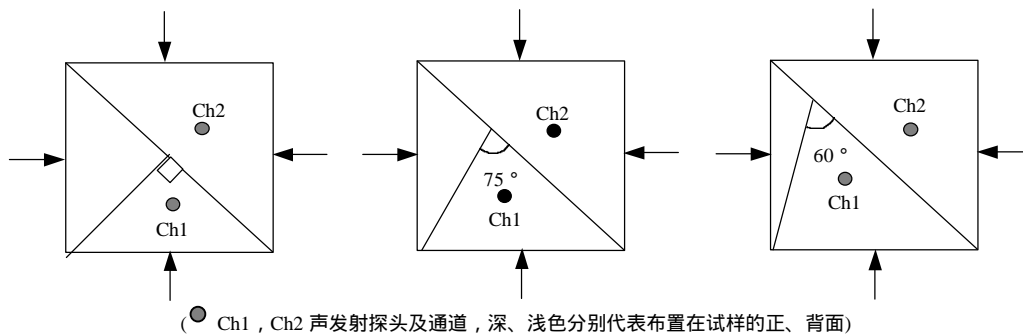


图 1 不同角度的交汇型组合断层模型

Fig.1 Model diagram of intersected faults at different intersection angles

表 1 标本结构、实验条件一览表

Table 1 The structure and experimental condition of samples

断层类型	试件特征	实验条件	实验组数
垂直交汇型断层组合	花岗岩, 尺寸 $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$, 摩擦面未经研磨	侧压 200 kN, 加载速率 0.02 mm/s	3
75 角交汇型断层组合	同上	侧压 150 kN, 加载速率 0.02 mm/s	1
60 角交汇型断层组合	同上	侧压 100 kN, 加载速率 0.02 mm/s	1

备获得的实验数据进行对比, 加载试验机、热像仪的记录速度设置应相等, 都为每秒采样 1 次, 而且 3 种设备同时开始记录。实验中为避免对岩石表面红外辐射的干扰, 采取了一些必要措施, 如禁止人员在实验现场走动、关好门窗等。

3 实验结果分析

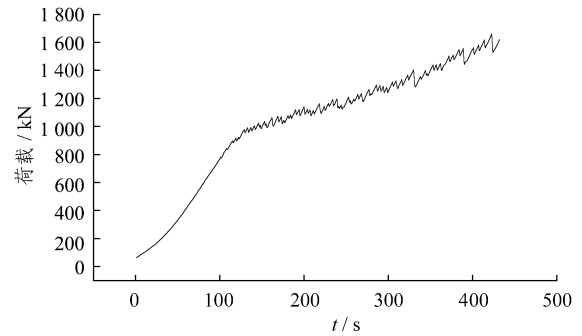
3.1 加载过程中的载荷-时间曲线特征

由于加载过程为等位移速率控制, 所以载荷-位移曲线与载荷-时间曲线的形式相同。图 2 为不同交汇角度的组合断层在加载过程中的载荷-时间曲线。对比这 3 条曲线, 并分析每条曲线的特征, 可总结出以下规律:

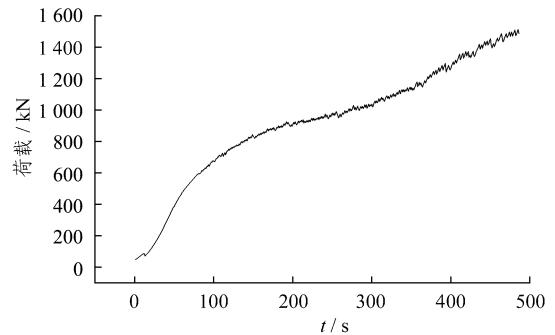
(1) 3 条曲线变化的形式基本相同, 都经过了 2 个阶段, 即加载开始的应力上升阶段和重复粘滑阶段。在应力上升阶段, 试件中各岩块间的间隙(断层宽度)随着载荷的增加逐渐减小、压实, 应力不断上升。在此阶段, 断层只发生微小、调整性的滑动, 而不存在粘滑。此阶段的曲线比较光滑, 且上升较快。当载荷继续增加, 断层的摩擦强度不足以抵抗增加的剪应力时, 断层发生粘滑, 并随之发生应力降。之后, 便是一次次的应力积累 粘滑 应力降的重复过程。重复粘滑阶段曲线的特点是呈锯齿状, 每个锯齿代表一次粘滑过程, 且曲线的整体上升趋势较为平缓。实验发现, 粘滑主要发生在主断层上。

(2) 垂直交汇的组合断层应力上升阶段和重复粘滑阶段的分界比较明显, 而斜交的组合断层则不明显, 即由应力上升阶段向重复粘滑阶段的转化是渐变性的, 表明垂直交汇的组合断层更易于发生突然粘滑, 这样的断层组合表现在构造地震上则是更易于发生地震。图 2(a)显示, 曲线在 130 s 左右由陡立上升转为平缓性上升, 2 个阶段的分界较为明显。而图 2(b)和图 2(c)曲线没有这种特点。曲线由陡立向平缓的转化是渐变的。

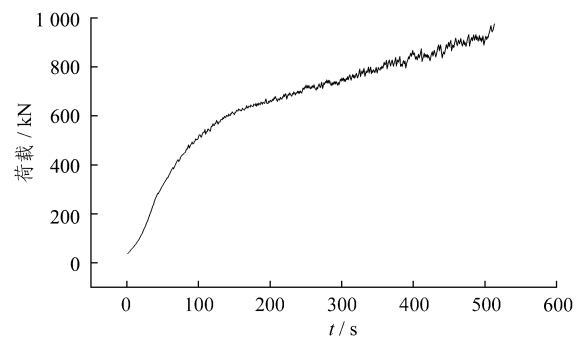
(3) 3 种不同交汇角度试件的载荷-时间曲线都呈上仰趋势, 即载荷除局部因粘滑发生降低外, 总



(a) 交汇角为 90°、编号为 z5-2 的试件



(b) 交汇角为 75°、编号为 z5-4 的试件



(c) 交汇角为 60°、编号为 z5-7 的试件

图 2 交汇组合断层加载过程中的载荷-时间曲线

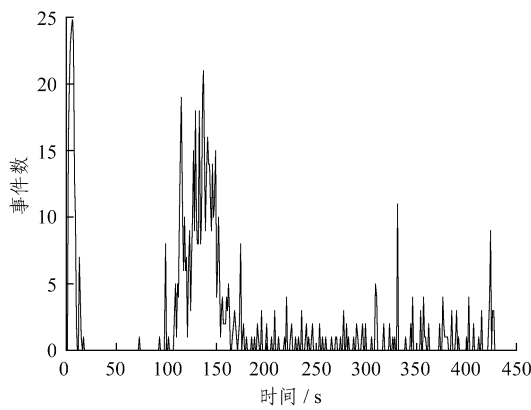
Fig.2 The load-time curves of intersected fault samples at different intersection angles

体仍呈上升趋势。曲线的这种特点表明 3 组断层都存在位移强化现象, 即在重复粘滑过程中摩擦强度逐渐增强。

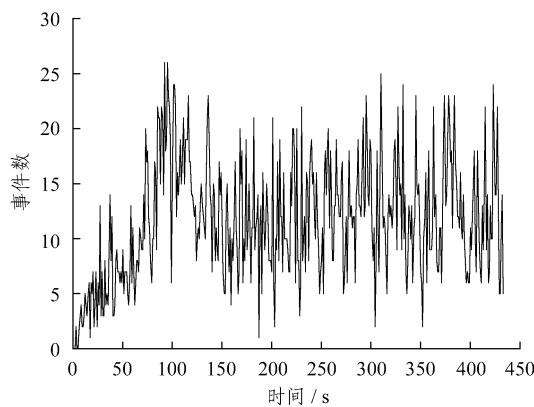
3.2 声发射时间序列特征

从声发射的测定结果来看, 可以发现有以下特征:

(1) 同一试件, 2 个通道的声发射除因探头安放位置的不同造成局部稍有不同外, 在时间序列的发展特征上基本是相同的。图 3 为 Z5-2 试件 2 个声发射通道的时间序列发展图。从图中可以看出, 2 个通道的声发射的时间发展变化特征基本相同, 都经过了加载开始的声发射逐渐增强、高峰期、然后降低至平静这 3 个发展阶段。但第 1 通道在 130 s 左右达到峰值, 而第 2 通道在 100 s 左右达到峰值。此外, 个别试样在加载开始时就出现较多的声发射事件(如图 3 Z5-2 的第 1 通道), 分析出现上述差异的原因可能是试样在载荷的挤压作用下出现试块组合的姿态调整和局部非同步所引起。



(a) Z5-2(CH1)



(b) Z5-2(CH2)

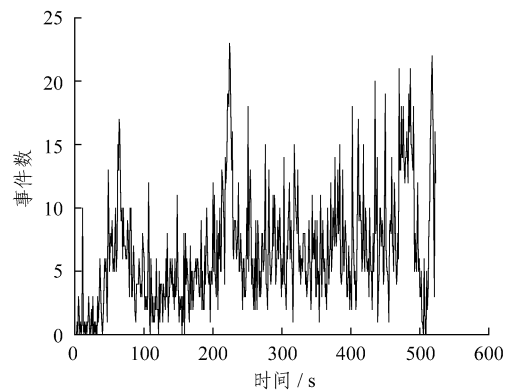
图 3 Z5-2 试样的 2 个通道声发射时间序列特征

Fig.3 The AE events-time curves of two channels of sample Z5-2

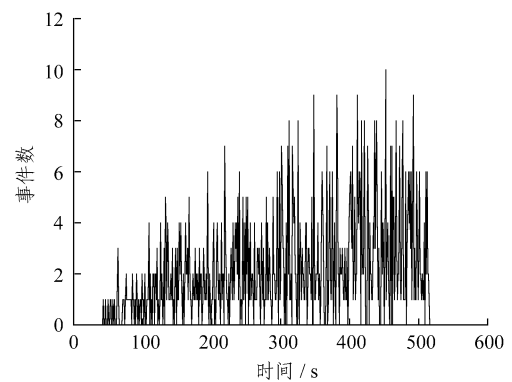
(2) 声发射具有阶段性发展的特征。这种阶段性的发展特征可以很好地对应到试样的载荷-时间的关系曲线上。即在加载开始的应力上升阶段, 声发射数量相对较少(有的通道在加载开始的一段时间内甚至无声发射事件), 而随着加载的进行逐渐增多; 在重复粘滑阶段, 声发射数量一般相对较多。

声发射的这种阶段性变化特征是由断层的阶段性力学变化特征所决定的, 即不同的力学发展阶段存在不同的声发射特征。从图 3 看出, Z5-2 试样的 2 个通道都经历了加载开始的声发射逐渐增多、声发射高峰期及之后的恒定发展期这 3 个阶段。这 3 个阶段以高峰期作为分界划分的前后 2 个阶段, 且分别与载荷-时间曲线的应力上升阶段和重复粘滑阶段相对应。从图 3 看出, 第 2, 1 通道的声发射事件峰值对应的加载时间分别为 100 和 130 s 左右, 而这个时间正是断层即将发生和发生第 1 次粘滑的时间(见图 2(a))。

(3) 不同交汇角度的断层组合声发射序列发展特征有所不同。从声发射序列测定结果来看, 垂直交汇的断层组合试样的声发射在 2 个阶段的分界处出现明显的声发射高峰期, 且这个高峰对应整个加载期中声发射最强的时段; 随着断层交角减小(从 90 到 60 °), 这种全局性的高峰逐渐演变为局部性的高峰(见图 4), 而最终发展为高峰的消失。此时整个声发射序列表现为单一的逐渐增强的态势, 2 个应力发展阶段的分界趋于消失。图 4 为 Z5-4 和 Z5-7



(a) Z5-4(CH1)



(b) Z5-7(CH2)

图 4 Z5-4 和 Z5-7 一个通道的声发射时间序列曲线

Fig.4 The AE events-time curves of sample Z5-4 and sample Z5-7

试样的一个通道的声发射事件序列图。结合图 3 看

出,当断层的交汇角度为垂直时,2个应力发展阶段的分界处的声发射在整个声发射序列中最强;当断层的交汇角度为 75° 时,Z5-4试样在60s左右仍存在一个局部性的声发射高峰,但强度在整个声发射序列中已不具优势;当断层的交汇角度为 60° 时,2个应力发展阶段的分界已不能分开,整个声发射序列表现为从加载开始到结束的单一逐渐增强态势。声发射的这种因断层交汇角度不同而表现出不同的序列发展特征,与载荷-时间曲线所表现出的类似特征相对应。

3.3 加载过程中的热像特征

图3为通过热像仪获得的3种不同交汇角度的组合断层试件在加载过程中的红外热像,它反映了加载过程中试件表面红外辐射的变化情况。分析热像的时间序列表明:

(1) 试件在应力上升阶段,由于断层上无明显的滑动,因而摩擦热效应很弱,试件各岩块因应力上升只发生热弹效应,试件表面的红外辐射强度呈整体均匀的上升趋势,无明显局部性的辐射差异。从图2(a)可以看出,试件Z5-2的应力上升阶段与重复粘滑阶段的分界在130s左右,即130s左右以前为应力上升阶段。对比图5(a)Z5-2试件的热像可见,130s之前,试件的红外辐射温度呈整体上升趋势,无明显的局部辐射异常。

(2) 进入重复粘滑阶段之后,试件表面的红外辐射开始出现分异,即局部区域开始出现高温辐射,且高温辐射的部位位于主断层带上。从图5(a)可见,Z5-2试件在130s之后,逐渐在主断层带上出现3个高温辐射区域。随着加载的进行,高温区域越来越明显,并逐渐扩大,辐射温度也越来越高。图5(b)和图5(c)所示其他试块也存在同样现象。

(3) 在3个垂直交汇断层组合的试件中,凡主次断层交汇的部位都出现高温辐射,高温辐射区域的形状呈圆形(见图5(a)中箭头所指处)。在斜交的断层组合试件中,随着斜交角度的减小,这种现象逐渐减弱。

4 地震前兆意义讨论

从试件加载过程中的载荷-时间曲线看出,加载过程可分为2个阶段:一为应力上升阶段,另一为重复粘滑阶段。应力上升阶段各岩块之间基本不发生滑动,而进入重复粘滑阶段后,试件会因摩擦阻力的突破而发生滑动。滑动的形式是一次次的重复

粘滑,且主要集中在主断层上。以上表明:由主次交汇断层组成的地壳区块,当受到来自与主断层成 45° 角的主压应力作用时,断层的滑动将主要沿主断层进行。

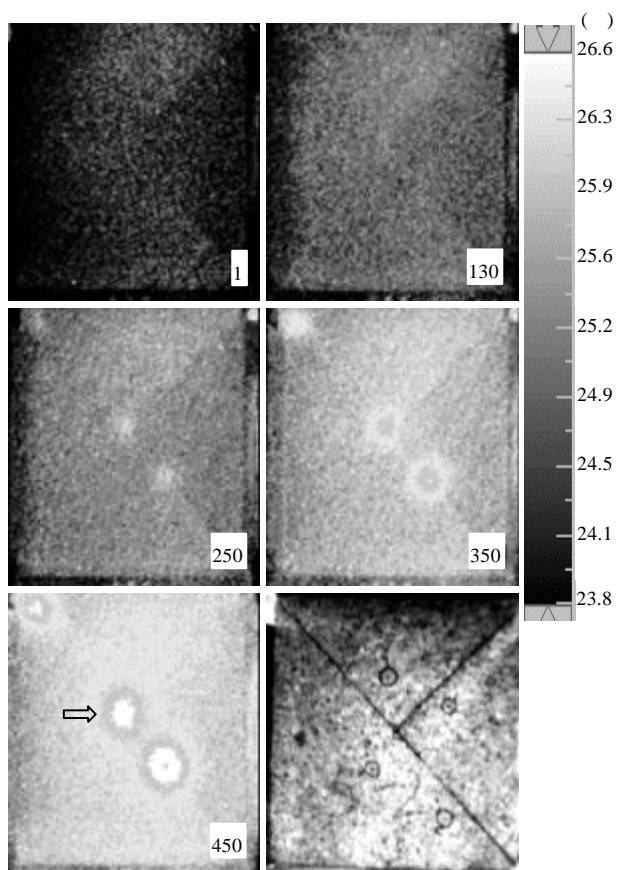
从声发射探测结果来看,其时间序列发展特征与力学性质的变化有很好的对应关系,均表现出阶段性发展的特点。当主次断层为垂直交汇的关系时,声发射在2个不同的力学阶段分界处表现为强发射,而当断层斜交时,这种特征减弱并逐渐消失。

从滑动过程中的热像表明,在应力上升阶段,试件表面的红外辐射呈均匀整体性上升,无明显的局部性差异。此时红外辐射上升的原因是由于试件在双轴载荷作用下产生了热弹效应。在这个阶段,温度上升的幅度较小,一般小于0.2。在重复粘滑阶段,由于主断层连续发生滑动,在摩擦热效应的作用下,主断层面上温度必然上升,从而造成主断层相对其周围出现高强度红外辐射。辐射强度的大小与断层摩擦的强烈程度和摩擦作用的时间有关。摩擦越强烈、作用的时间越长,辐射强度就越高。由于主断层上各处的应力状态不同、摩擦强烈程度不同,因而造成高温辐射的不均匀分布。

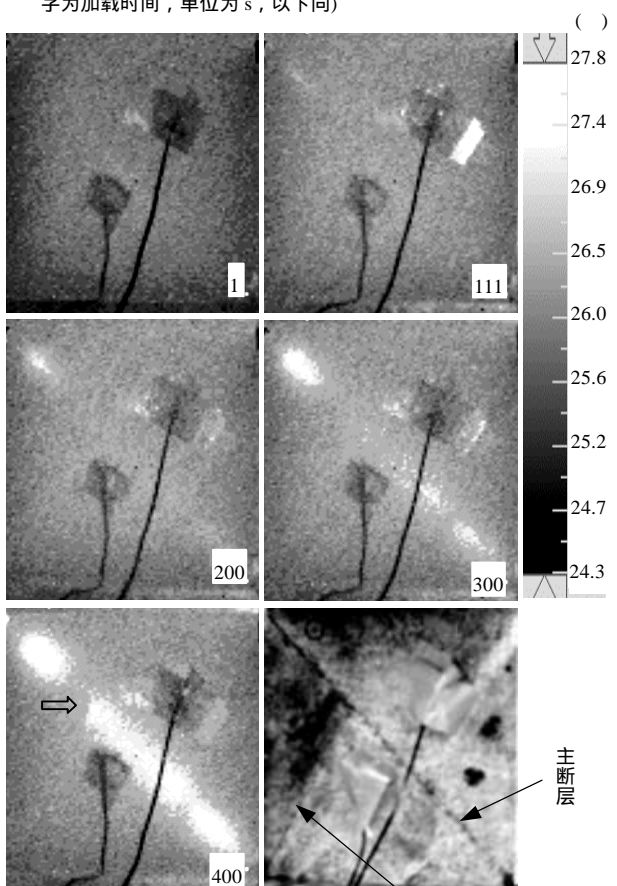
对本次实验有两点需要讨论:

(1) 侧压的影响:过去的实验表明,侧压对断层滑动的特征影响较大,高侧压易于使断层发生粘滑,而低侧压易于使断层发生稳滑。但本次实验有两点值得讨论:一是,本次实验使用的侧压较低(小于7MPa),且不同交汇角度的组合断层试样的侧压相差不大(小于2MPa),这样小的侧压差异不足以引起摩擦滑动特征的较大变化。二是,文中的Z5-4和Z5-7两个试件的侧压相差值与Z5-2和Z5-4试样的相差值相同,均为50kN,但Z5-4和Z5-7两个试件的摩擦滑动特征接近(表现在载荷-时间曲线上较为相似),而它们与Z5-2试件却有明显差异。表明低侧压对试样的滑动特征的影响较小,此时主次断层间结构特征应是断层滑动特征的主控因素。

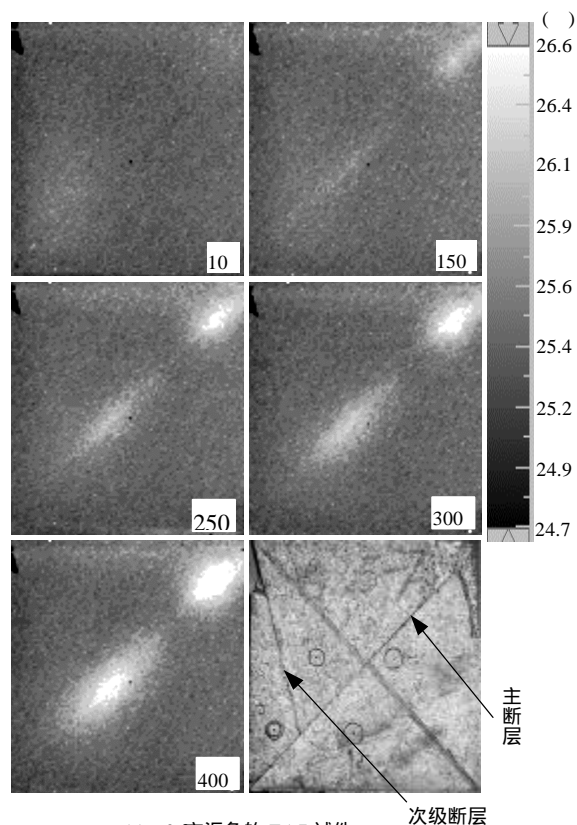
(2) 接触条件的影响:本次实验由于岩石的滑动面未经过打磨,因此,滑动面各处的应力状态与接触条件有关。这就造成摩擦面上的红外辐射的变化多样性。但垂直交汇的3个组合断层试样在主次断层的交汇部位都出现了高温红外辐射,表明主断层上的高温辐射受主次断层结构制约,此时断层交汇部位即是应力集中部位和摩擦强烈部位,该部位也必然是红外高温辐射部位。自然界构造地震大多



(a) 90° 交汇角的 Z5-2 试件(右下角为可见光照片, 图像中的数字为加载时间, 单位为 s, 以下同)



(b) 75° 交汇角的 Z5-4 试件



(c) 60° 交汇角的 Z5-7 试件

图 5 组合断层试样加载过程中的红外热像

Fig.5 The IR images of intersectant fault samples at different included angle

是由于断层的突然粘滑所造成的, 这种地震的发生多具重复性的特点。这些重复地震可以是震级相近、在时间序列上呈周期性大震的重复, 也可以是一次大震的前震或余震。由于一定的断层几何结构和确定的边界应力条件, 必然造成固定的应力分布和发展的格局, 同时由此产生的红外辐射温度场也必然是确定的, 因此, 上述断层组合物理模型的红外辐射监测实验结果对地震预测预报有参考意义。

5 结 论

本次研究通过对交汇型断层的物理模型进行加载实验, 利用声发射仪、红外热像仪等手段观测了加载过程中的声发射时间序列特征及断层活动的红外辐射特征。结果表明:

- (1) 交汇型组合断层试件在双轴加载过程中其力学性质存在着阶段性的变化, 这种阶段性的变化分别对应声发射及红外辐射的不同特征反映。
- (2) 不同交汇角度的组合断层, 其声发射、红外辐射特征明显不同。当 2 条断层垂直交汇时, 试件的声发射在 2 个不同力学阶段的分界处表现为最

强,同时2个断层交汇处亦为红外辐射的高强度部位。而当2条断层由垂直向斜交过渡、且斜交角度逐渐减小时,这种特征趋于消失,声发射序列特征逐渐转变为单一的增强趋势,且红外辐射在断层交汇处的高强度辐射不复存在。

(3) 本次研究的加载条件下最大主应力方向与主断层成45°角,此时,断层的滑动主要是沿主断层进行。因此,受摩擦热效应的影响,红外高温辐射区域也沿主断层分布。同时,主断层靠近加载端的一侧常为高温辐射的区域。

中国大陆强震一般涉及2个以上方向断层的活动,本实验的结果表明,断层活动常在主断层上伴随高温红外辐射异常,同时断层的交汇部位及其附近应是卫星遥感监测的重点区域。

致谢 双轴加载实验得到清华大学水利系李庆斌教授、张翠英老师的支持和配合。在此一并致谢!

参 考 文 献

- Gorny V I, Salman A G, Tronin A A, et al. The earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity[J]. Proc. Acad. Sci. USSR, 1988, 30(1): 67 ~ 69
- Qiang Z J, Dian C G, Li L Z, et al. Satellite thermal IR increase temperature anomalous field with imminent and short-term prediction before earthquake[A]. In: Proc. of IEAS'97 & IWGIS'97[C]. Beijing: [s. n.], 1997, 3: 1 266 ~ 1 270
- 刘德富, 罗灼礼, 彭克银. 强烈地震前的 OLR 异常现象[J]. 地震, 1997, 17(2): 126 ~ 132
- Liu D F, Peng K Y, Liu W H, et al. There are thermal precursors for earthquake[J]. ACTA Seismologica SINICA, 1999, 21(6): 652 ~ 656
- Cui C Y, Zhang J K, Xiao Q, et al. Monitoring the thermal IR anomaly of Zhangbei earthquake precursor by satellite remote sensing technique[A]. In: Proc. 20th Asia RS Congress[C]. Hong Kong: [s. n.], 1999, 1 179 ~ 1 184
- 马 瑾, 单新建. 利用遥感技术研究断层现今活动的探索[J]. 地震地质, 2000 a, 22(3): 210 ~ 215
- 徐秀登, 徐向民, 马升灯等. 电场作用与大气增温效应的再试验[J]. 西北地震学报, 1997, 19(1): 27 ~ 31
- 强祖基, 孔令昌, 郭满红等. 卫星热红外增温机制的实验研究[J]. 地震学报, 1997 b, 19(2): 197 ~ 201
- 耿乃光, 于 萍, 邓明德等. 热红外震兆成因的模拟实验研究[J]. 地震, 1998, 18(1): 83 ~ 88
- 强祖基, 侯常恭, 徐秀登. 地球放气、热红外异常与地震活动[J]. 科学通报, 1992, 24: 2 259 ~ 2 262
- Tronin A A. Satellite thermal survey: a new tool for the study of seismoactive regions[J]. Int. J. Remote Sensing, 1996, 17(8): 1 439 ~ 1 455
- 崔承禹, 邓明德, 耿乃光. 在不同压力下岩石光谱辐射特性研究[J]. 科学通报, 1993, 38(6): 538 ~ 541
- 邓明德, 崔承禹, 耿乃光. 遥感用于地震预报的理论及实验结果[J]. 中国地震, 1993, 9(2): 163 ~ 169
- Wu L X, Wang J Z. Features of infrared thermal image and radiation temperature of coal rocks loaded[J]. Science in China, 1998, 41(2): 158 ~ 164
- Wu L X, Liu S J, Wu Y H, et al. Changes in IR with rock deformation[J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 2002, 39(6): 825 ~ 831
- 刘善军, 吴立新, 吴焕萍等. 多暗色矿物类岩石单轴加载过程中红外辐射定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 585 ~ 1 589
- 马 瑾. 从断层中心论向块体中心论转变[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 363 ~ 370
- 张四昌, 徐 杰. 1976年龙陵地震地质特征的探讨[J]. 地震研究, 1978, 1(3): 44 ~ 54
- 张四昌. 中国大陆共轭地震构造研究[J]. 中国地震, 1991, 7(2): 69 ~ 76
- 高又学, 马 瑾. 首都圈地震地质环境与地震灾害[M]. 北京: 地震出版社, 1993
- 马 瑾, 马胜利, 刘力强等. 交叉断层的交替活动与块体运动的实验研究[J]. 地震地质, 2000 b, 21(1): 65 ~ 73