

# 地震微破裂成核过程的实验模拟研究

熊秉衡<sup>1</sup> 王正荣<sup>1</sup> 张永安<sup>1</sup> 余灿麟<sup>1</sup> 许昭永<sup>2</sup> 杨润海<sup>2</sup> 赵晋明<sup>2</sup> 王 彬<sup>2</sup>

(1. 云南工业大学激光研究所, 昆明 650051; 2. 云南省地震局, 昆明 650041)

摘要: 以透明试件受压破裂过程模拟均匀岩体的破裂过程, 用实时全息干涉摄影系统记录试件应力场分布及其变化, 用瞬态波形自动记录仪记录微破裂的位置和强度. 通过两种方式所获数据来探索地震微破裂成核过程与应力场关系.

关键词: 实时全息术; 地震波; 微破裂; 应力(变)场.

中图分类号: P65 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)03-0319-05

作者简介: 熊秉衡, 男, 教授, 1930年生, 1961年毕业于云南大学, 主要从事光电子技术及应用研究.

## 0 引言

近年国外对强震前震源成核过程有较多的研究<sup>[1-6]</sup>, 认为它有助于强震前兆的认识, 有助于提高强震预报水平. 研究较多的是断裂摩擦滑动成核及应力腐蚀成核, 但在这些工作中都未能将微破裂活动的时空分布与应力场变化的关系联系起来进行研究. 本研究的特点在于将两者关系联系起来进行研究, 用实时全息干涉摄影系统记录试件应力场分布及其变化, 用瞬态波形自动记录仪记录微破裂的位置和震动强度, 通过两种方式所获数据来探索地震微破裂成核过程和应力场关系.

此外, 国内许多学者基于对唐山、海城、邢台等中国东部地震的研究结果<sup>[7,8]</sup>, 认为: 这些地震的孕育和发生与深部构造有关, 地幔上涌对地震发生有重要影响, 它与中国特殊的大地构造位置有关, 是板内地震的特点. 为了模拟这种地幔上涌的深部作用, 我们对加力架的设计是采取双轴加压、一面加力的作用方式.

我们的这种检测手段能够记录下成核过程应力场的连续变化, 包括加力架对试件停止加力后, 试件仍继续发生微破裂的过程(相当于余震的发生过程).

在实时全息干涉计量方法中, 我们采用了一些新的技术, 如获得高反衬度干涉条纹的技术<sup>[9]</sup>, 可同时获得高亮度检测光场的技术<sup>[10]</sup>, 测量和控制位相调制度 $\alpha$ 的取值的技术<sup>[11]</sup>, 用移相器快速判断被测物体变形方向的技术<sup>[12]</sup>等, 从而提高了检测的精度.

实验表明这种方法是很有成效的. 初步的工作已观察到许多值得注意的现象. 如: 大破裂发生前微破裂有丛集(成核)现象; 微破裂的丛集与局部应力集中有关; 大破裂(宏观裂缝)延伸方向是应力场高梯度变化方向等. 这种方法的成功为地震基础研究提供了一种新的有效的研究手段, 有助于推动地震预报基础研究的进一步深入.

## 1 实验光路

实验中所采用的实时全息干涉摄影系统是一套带有液门的实时全息干涉系统和摄像机及具有连拍功能的相机所组成的实时全息干涉摄影系统<sup>[13]</sup>. 光路布局如图1所示.

地震模拟实验试件是透明有机玻璃板材制作的, 其尺寸为10 mm厚, 边长200 mm×200 mm的正方形. 由于液门的窗口较小, 只有80 mm高, 100 mm宽. 我们采用了大口径透镜来缩放光束, 使检测截面的直径可达到400 mm. 此外, 我们还采用了用物光再现的参考光和原参考光的干涉图纹进行检测的方法, 消除了由于大口径全息透镜质量达不到要



图 1 实时全息干涉计量摄影系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the optical setup for real-time holographic testing method

BS. 分束镜;  $M_1, M_2$ . 反射镜; SF. 空间滤波器;  $CL_1$ .  $\Phi 300$  mm 准直透镜;  $CL_2$ .  $\Phi 450$  mm 准直透镜;  $CL_3$ .  $\Phi 100$  mm 准直透镜; L. 凹透镜; LG. 液门; O. 地震模拟实验试件; S. 透镜  $CL_2$  离记录平面距离; F. 透镜  $CL_2$  焦距;  $f$ . 记录平面与透镜  $CL_2$  焦点之间距离

求而带来的位相畸变<sup>①</sup>. 试件中部开有一段长 25 mm 的预置裂缝. 试件装在加力架上. 加力架可在试件周边  $X, Y$  方向加压, 也可在  $Z$  方向即样品中部的法线方向加力. 当试件发生微破裂时, 其震动波的传播通过瞬态波形自动记录仪自动记录. 试件的受力状态以及状态的变化则通过实时全息干涉摄影系统记录下来.

## 2 测量原理

当试件受力后, 光程要发生相应的变化. 其因素有二: 一是由于受力后试件厚度的微小变化而引起; 二是由于受力后试件折射率的微小变化而引起. 若  $X, Y$  方向的应力远大于  $Z$  方向的应力. 这时, 在一定近似程度上可视为所有应力都位于  $X, Y$  平面内, 即试件处于平面应力状态. 由于泊桑效应, 材料在  $Z$  方向所产生的应变  $\epsilon_Z$  为<sup>[14]</sup>:

$$\epsilon_Z = \delta t / t. \quad (1)$$

式中:  $t$  为试件厚度. 在弹性材料中, 这种横向应变与应力场的关系为

$$\epsilon_Z = -(\nu/E)(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (2)$$

$\sigma_1, \sigma_2$  为主应力 (principal stresses), 它们互相垂直, 并位于  $X, Y$  平面. 若物光沿  $Z$  轴方向照明透射试件进行二次曝光全息干涉计量, 第一次曝光在试件

受力之前, 第二次曝光在试件受力之后,  $n$  为受力状态下试件的平均折射率,  $n_0$  为未受力状态下试件的折射率, 则两次曝光之间的光程差为

$$\Delta\delta = [n(t + \delta t)] - [n_0 t + \delta t]. \quad (3)$$

设  $n_1$  为光在  $\sigma_1$  方向偏振的折射率;  $n_2$  为光在  $\sigma_2$  方向偏振的折射率;  $A, B$  为材料的应力-光学系数 (stress-optic coefficients of the material).

$$n_1 - n_0 = A\sigma_1 + B\sigma_2, n_2 - n_0 = B\sigma_1 + A\sigma_2. \quad (4)$$

对于应力-光学灵敏度较低的材料 (materials of low stress-optic sensitivity), 近似地有

$$A = B, n_1 = n_2 = n. \quad (5)$$

对于光学上各向同性的材料, (4) 式可写作

$$n - n_0 = A(\sigma_1 + \sigma_2) \text{ 或 } n - n_0 = -AE\epsilon_Z/\nu. \quad (6)$$

于是

$$\Delta\delta = (n - n_0)t + (n - 1)\delta t = t\epsilon_Z[n_0 - (AE/\nu) - 1] - (AE/\nu)(\epsilon_Z)^2 t. \quad (7a)$$

注意到  $(AE/\nu)(\epsilon_Z)^2 t$  是一个比 (7a) 式中其他项小得很多的项, 将它略去后就得到

$$\Delta\delta = t\epsilon_Z[n_0 - (AE/\nu) - 1]. \quad (7b)$$

干涉条纹的亮纹条件为  $\Delta\delta = N\lambda$ , 于是

$$\epsilon_Z = N\lambda / [(n_0 - EA/\nu) - 1]t, \quad (8)$$

式中:  $N$  为条纹序数,  $(n_0 - AE/\nu)$  可视为试件的有效折射率 (effective refractive index). 于是, 由 (8) 式可定量计算  $Z$  方向试件的应变  $\epsilon_Z$ . 通过应变与应力场的关系式 (2) 可计算主应力之和的分布. 至于微破裂发生的强度大小以及它所在的空间位置是采用 PZT 传感器和瞬态波形自动记录仪来检测. 在试件周围边缘附近安放 8 个 PZT 传感器 (图 2 中, 方形



图 2 在压力负荷下的薄透明试件

Fig.2 Thin specimen of transparent material subjected to a compressive load

●. PZT 传感器

①熊秉衡, 王正荣, 张永安, 等. 实时全息术中采用参考光和物光再现的参考光形成的干涉图检测透明物的方法. 光学学报 (待刊).

试件周边的 8 个黑点所示),它们将微破裂传来的声波转换为电信号并记录在 8 通道瞬态波形自动记录仪中.根据微破裂(声源)声信号到达这 8 个传感器的时间,可以准确判断微破裂的空间位置.定位偏差不超过  $\pm 3.0$  mm.由 8 个通道所记录的震动波形,可分析微破裂的强度等性质.所有记录下的震动波形均分别存储在 AST 386 型计算机内,其计算和分析方法另文<sup>[15]</sup>介绍.

### 3 实验

加力方式:实验开始阶段,在试件两侧,水平( $X$ 轴)和竖直( $Y$ 轴)方向加压(加力方式为面接触方式,即试件侧面所受之力基本上是均匀分布在试件之整个侧面上),并使主应力  $\sigma_X < \sigma_Y$ . 达一定程度后,保持不变,再在试件中心预置裂缝附近的法线方向( $Z$ 轴方向)加力  $F_Z$ ,即  $Z$ 轴方向只有局部受力.当  $F_Z$  逐渐增大,实时全息干涉图纹随之变化,分别用摄像机和摄影机记录.与此同时,微破裂所发出的声信号通过 PZT 传感器转换为电信号,并记录和存储在瞬态波形自动记录仪中.停止加力后,往往微破裂过程仍在试件内继续进行.因此,停止加力后,声发射记录和图纹摄影记录需继续进行,直至应力场稳定下来,不再接收到声发射信号时为止.然后,再继续加力,重复上述步骤.

微破裂记录系统主要参数:PZT 传感器,谐振频率 1 MHz,直径 5 mm;放大器,带宽 1 kHz ~ 1 MHz,增益 80 dB,从 32 dB 开始,步进 6 dB,实验中所用增益为 50 dB 和 56 dB;瞬态波形自动记录仪,8 通道记录,每道采样率 10 MHz,每道内存 16 kB.实验共进行了 8 次,试件与加力方式基本相同,仅传感器布置略有差异.结果表明,8 次实验的破裂活动特点基本相同.文献①以第 5 次实验为例,详细介绍了实验中微破裂活动的基本特征:每个加力阶段微破裂首先在预置裂缝的中部或两端密集发生(丛集),到一定程度后,发生很强烈的微破裂事件,同时裂缝延伸.从文献[15]中的微破裂活动空间分布图与其相对应的应力场分布图对照分析,可获得以下的结果.

#### 3.1 微破裂的丛生

在  $X$  和  $Y$  方向对试件加力的初始阶段,预置裂缝两端有明显的应力集中,其他部分,应力场分布基本均匀.继续加力,干涉条纹逐步增密变细,裂缝尖

端应力集中更为明显.然后在  $Z$  方向对试件局部加力,该局域附近条纹增密,梯度增大,达到一定程度后,在裂缝中部或其附近有微破裂连续发生,并在此局域成群出现(丛生).当小事件发展到一定程度后,有一个或几个大事件发生(相当于强震发生),裂缝向两侧或一侧延伸.有时,虽然试件已处于停止加力状态,仍接着有断续微破裂小事件发生(相当余震),然后才趋于平静.重复加力过程,微破裂有相似的丛生规律.然而,微破裂空间分布特征有所不同:一是大破裂发生在微破裂丛生区;二是大破裂发生在裂缝延长线上或其分支上<sup>[15]</sup>.

#### 3.2 裂缝的延伸

当  $F_Z$  增大时,加力区附近条纹增密,裂缝尖端应力集中区也受影响,该处的条纹更加增密,梯度也更加增大,达一定程度后大事件突然发生,裂缝快速延伸,新的裂缝尖端处仍是应力集中区.裂缝延伸方向是应力场高梯度变化方向.微破裂先在预置裂缝中部活动而后延伸<sup>[15]</sup>.

#### 3.3 裂缝的分叉

预置裂缝端部及新裂缝尖端都形成应力集中区.当条纹密度及应变梯度达到一定程度后,形成新的裂缝分叉,其延伸方向是几个高应力区包围的低应力区或是条纹曲率变符号区<sup>[15]</sup>.

## 4 讨论

#### 4.1 核的形成与应变场及作用力方式的关系

实验中观测到大事件(相当于强震)发生前微破裂有丛集(成核)现象,而大破裂或者发生在丛集区内及其附近,或者发生在丛集区外延伸裂缝上.微破裂的丛集现象发生在高应变梯度区或几组高应变梯度区包围的相对低的应变区.一般情况下,微破裂丛集区在条纹密集区或几个条纹密集区的包围圈中.而这些区域正是局部作用力  $F_Z$  的施力区或预置裂缝端部及其附近.这些区域容易造成应力集中,加上材料有一定的脆性,于是就容易形成一系列微破裂,进而形成微破裂丛集区.由此看来,微破裂丛集区的形成与应力场的分布、应力场内应力的集中程度和介质材料性质等有关,而且,大破裂的位置也不一定在微破裂丛集区,这些都是需要进一步深入研究的.

强震前震源成核过程的研究,一般的实验往往在主破裂形成之时试件也整个损坏,很难记录到相应于余震的微破裂.我们设计的这种实验装置,可以

在一块试件中观测到多次的成核过程,这与实际情况更为一致,对地震预报研究也更有意义.同时,我们尝试模拟研究上地幔的上涌作用,这种作用与特殊的大地构造有关,这也许是板内地震的特色.

#### 4.2 值得进一步研究的问题

在已有研究中有有震核和无震核之分,即有小震成核且有震核和无震核之分,即有小震成核且有大震和有小震成核但无大震两种情况.后者往往为磨擦滑动造成.而在我们的结果中,大(主)破裂不在微破裂丛集区,而发生在延伸裂缝上,其最可能的方式是撕裂,即断裂力学中的Ⅲ型破裂.这就把断裂力学与成核理论联系起来.另外,从地震观测也发现有些大地震发生在前震丛集区,而另一些大震甚至连前震都没有,或者虽有小震丛集区形成却无大震发生.在我们的结果中,丛集区外的大破裂发生在延伸裂缝上此裂缝端部正是高应力(应变)集中区.再有,新分叉的大破裂离微破裂丛集区不远,并处在几个高应变(梯度)区的包围圈之中.由此启示我们,在小震丛集区及其附近,同时加强应变(形)变或应力观测并密切监视其变化,有助于预测大震位置和发生的时间.总之,小震成核比较确定,无论大震是否在成核区发生,但成核区的规模与大震发生的位置和时间受应力(变)场特征及介质材料性质等因素的影响.

#### 参考文献:

- [1] Yasuhiro Umwda. The bright spot of an earthquake [J]. *Tectonophysics*, 1992, 211(1~4): 13~22.
- [2] Douglas A D. Foreshock sequence of the 1992 Landers, California: earthquake and its implications for earthquake nucleation [J]. *J Geophy Res*, 1995, 100(B7): 9865~9880.
- [3] Dieterich J H. Earthquake nucleation on faults with rate-

- and-state-dependent strength [J]. *Tectonophysics*, 1992, 211(1~4): 115.
- [4] Onaka M. Earthquake source nucleation: a physical mode for short-term precurse [J]. *Tectonophysics*, 1992, 211(1~4): 149~178.
- [5] Yukutake H. Fracture nucleation process in intact rock [J]. *Tectonophysics*, 1992, 211(1~4): 247~258.
- [6] Lockner. The role of acoustic emission in the study of rock [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1993, 30(7): 883~899.
- [7] 陈运泰,黄立人,林邦慧,等.用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式[J].*地球物理学报*, 1979, 22(3): 201~215.
- [8] 魏斯禹,滕吉文,王谦身,等.中国大陆东部边缘地带的岩石圈结构与动力学[M].北京:科学出版社,1990. 147~162.
- [9] 熊秉衡,王正荣,张永安,等.可获得高反衬度干涉条纹的实时全息记录方法[J].*光子学报*, 1996, 25(8): 705~712.
- [10] 熊秉衡,王正荣,张永安,等.同时获得高亮度检测光场和高衬比度干涉条纹的实时全息记录方法[J].*光学学报*, 1999, 19(5): 604~608.
- [11] 熊秉衡,王正荣,张永安,等.利用卤化银乳胶制作具有予期位相调制度的、位相型、薄全息光栅的研究[J].*光学学报*, 1997, 17(8): 1021~1027.
- [12] 熊秉衡,余灿麟,王正荣,等.利用压电移相器判别物体形变方向[J].*光子学报*, 1996, 25(6): 713~718.
- [13] 王正荣,熊秉衡,张永安,等.用实时全息术研究低速变化过程的一种简易系统[J].*光学学报*, 1997, 17(8): 572~576.
- [14] 维斯特 C M. 全息干涉度量学[M]. 樊雄文,王玉洪译.北京:机械工业出版社,1984. 413~417.
- [15] 杨润海,许昭永,赵晋明,等.微破裂成核过程和应力(场)关系的实验研究[J].*地震研究*, 1998, 21(2): 128~133.

## EXPERIMENTAL SIMULATION STUDY OF MICRO-FRACTURE NUCLEATION PROCESS

Xiong Bingheng<sup>1</sup> Wang Zhengrong<sup>1</sup> Zhang Yongan<sup>1</sup> She Canlin<sup>1</sup> Xu Zhaoyong<sup>2</sup> Yang Runhai<sup>2</sup>  
Zhao Jinming<sup>2</sup> Wang Bin<sup>2</sup>

(1. *Laser Institute, Yunnan Polytechnic University, Kunming 650051, China*; 2. *Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650041, China*)

**Abstract:** The fracture process of transparent samples are used in this paper to simulate that of a homoge-

neous rock mass. In order to discover relationships between the micro-fracture nucleation and its surrounding stress field, a real-time holographic optical setup is used to record the distribution and variations of the samples' stress fields and the transient wave-form automatic recorder is used to record the location and intensity of the micro-fractures. The initial research has brought about some phenomena worthy of notice. This method has provided us with a new approach to make a seismic experimental research.

**Key words:** real-time holography; seismic wave; micro-fracture; stress (strain) field.

\*\*\*\*\*

## 《地球科学——中国地质大学学报》 2000 年 第 25 卷 第 4 期 要目预告

成矿系统及其演化——初步实践到理论思考 .....	翟裕生
矿床变化与保存的研究内容和研究方法 .....	翟裕生
剪切蚀变与物质迁移及金的富集 .....	邓 军
构造体制转换与流体多层循环成矿动力学 .....	邓 军
胶东金矿集中区岩石圈结构与深部成矿作用 .....	杨立强
凡口超大型铜锌矿床成矿流体的物理特征和地球化学特征 .....	陈学明
初论金刚石原生矿床成矿系列 .....	银剑钊
安徽铜陵天马山矿床与大团山矿床流体成矿作用对比研究 .....	杜杨松
辽东古元古代镁质非金属矿床成矿系统研究 .....	蔡克勤
华北地台北缘西段主要成矿系统分析 .....	肖荣阁
中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系 .....	吴淦国
浙江遂昌银-金矿田构造体系控矿的动力生成演化 .....	王思源
广西大瑶山-西大明山金银成矿系统研究 .....	崔 彬
胶东焦家金矿田构造形迹的分形研究 .....	丁式江