

文章编号: 0258-702X(2002)04-0376-05

# 一种新型的实验地震学光学模拟系统

熊秉衡, 王正荣, 吕小旭, 钟丽云, 张永安, 余灿麟

(昆明理工大学激光所, 云南昆明 650051)

许昭永, 杨润海, 赵晋明, 王赟赟, 李佩林, 华培忠

(云南省地震局地震工程研究院, 云南昆明 650041)

**提要** 介绍了一种新型的实验地震学光学模拟系统。它将实时全息技术与声发射源测定技术相结合应用于实验地震学研究,前者检测和记录试件内应力场及其变化,后者检测和记录微破裂所激发的超声波,借以确定试件内微破裂发生的时间、位置和强度。综合两种方法所获数据,从微破裂丛集成核过程与应力场之间的关系来寻求破裂形成、扩展的某些规律性。试验观察到一些极有研究价值的现象,特别是系统能将破裂的形成和扩展,从微破裂丛集成核直至整个试件碎裂的过程,以较高的分辨率记录下来,初步获得微破裂成核过程与应力场关系的某些规律性。

**关键词** 实时全息术,微破裂,瞬态波形自动记录仪,应力(应变)场,核,破裂

**中图分类号** TN 249.10.438.1 **文献标识码** A

## A Novel Optical System Created for Experimental Earthquake Simulation Research

XIONG Bing-heng, WANG Zheng-rong, LÜ Xiao-xu, ZHONG Li-yun, ZHANG Yong-an, SHE Can-lin  
(Laser Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051)

XU Zhao-yong, YANG Run-hai, ZHAO Jin-ming, WANG Yun-yun, LI Pei-lin, HUA Pei-zhong  
(Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650041)

**Abstract** By means of combining the real-time holographic device and the acoustic source testing device, a new tool for experimental earthquake simulation research is developed. The stress fields and its variations in the specimen are recorded by real-time holographic interferometry while the wave-forms of ultra-sonic waves stimulated by the micro-cracks are recorded by a transient automatic wave-form recorder to determine the time, location and intensity of the micro-cracks. Some noticeable phenomena have been observed in the experiment, the elastic strain and plastic strain can be visualized clearly and can be recorded in high resolution by this method as well as the generation and extending of cracks.

**Key words** real-time holography, micro-crack, transient automatic wave-form recorder, stress (strain) field, nucleation, fracture

## 1 引言

实时全息术是一种非常有用的检测方法,已用于无损检测、应力分析、振动分析、结构优化等方面<sup>[1]</sup>。我们将它与声发射源测定方法相结合,采用

两种方法的相应装置组成一套实验地震学光学模拟系统。由于试件破裂的过程是从若干微破裂丛集成核开始,在试件周边安放多个PZT传感器,将它们与多通道瞬态波形自动记录仪相连接,以记录微破裂

收稿日期 2001-01-16;收到修改稿日期 2001-04-02

基金项目 国家科自然科学基金(批准号:46764010)和云南省科委应用基础研究基金(批准号:97D027Q)资助项目。

作者简介 熊秉衡(1930.9—),男,云南人,昆明理工大学教授,主要研究领域为全息、光信息处理、散斑、光纤光学及其应用。E-mail: bhxiong@public.km.yn.cn

激发的超声波波形,及其到达传感器的时间。传感器因空间位置的不同,同一个微破裂发射的超声波到达各传感器的时间、强度各不相同,根据这些差异,通过计算机的处理,即可确定微破裂发生的时间、位置和强度。同时,用摄像机记录实时全息系统显示的相应应力场干涉条纹及其变化,根据微破裂丛集成核及破裂发生、发展过程与应力场之间的关系,寻求破裂形成、发展的某些规律性。此项课题的前期工作,我们使用一台小型加载架和简易的实时全息系统,已初步观察到一些值得注意的现象,说明这种方法是可行的<sup>[2]</sup>。在此基础上,研制了一台重型的三轴加载装置,试件负载可高达 30 吨力,而加载装置自身的位移量不大于亚微米级;研制了一台性能优良的精密液门,并相应地改造了防震台,特别是在实时全息技术中发展了一些新方法,使实时全息干涉条纹不仅具有高衬比,也具有高亮度的检测光场<sup>[3]</sup>,并在“参考光场”中检测记录<sup>[4]</sup>,从而在新的实验中获得了突破性的结果。由于干涉条纹的高衬比、检测光场的高亮度,此装置能以较高的分辨率观察和记录下破裂的形成和扩展直至试件全部碎裂的全过程,捕获到一些极有研究价值的现象,初步的分析研究,已获得了微破裂成核与应力场分布的一些规律<sup>[5]</sup>。此方法的成功为实验地震学研究提供了一个新的有效手段,并可望应用于其他领域。

## 2 实时全息检测系统实验装置

实验光路布局如图 1 所示,它主要包括:

1) 三轴加载装置 它是专门为此项研究设计制作的,高 800 mm,宽 920 mm,深 300 mm,重约 800 kg。通过油压系统,可在试件的水平、竖直和垂直三个正交方向对试件加载。水平、竖直的最大压力可达 30 吨力,垂直试件的最大压力可达 1 吨力。有三个压力计分别实时显示所加压力之值。此装置稳定性好,油路采用耐高压软管连接,在加载过程中其自身引起的附加位移不大于亚微米量级;

2) 采用大口径透镜缩放光束以提高检测有效截面 液门的窗口只有 80 mm × 100 mm,使用直径 300 mm 的大口径准直透镜 CL1 和直径 450 mm 大口径成像透镜  $L_2$  来缩放光束,使检测截面的线度可达到 420 mm<sup>[6]</sup>;

3) 改用“参考光场”进行检测 通常实时全息检测系统都在“物光场”进行检测,而我们利用“参考光场”进行检测。它不仅消除了一些元件和试件的

光学缺陷带来的畸变,改善了检测光场的光学质量,而且可在任意位置进行记录,而不象在“物光场”进行检测时必须在像面附近进行记录<sup>[4]</sup>;

4) 用压电移相器判断形变方向 在参考光路中置有一台移相器,即图 1 中的 PS,它实际上是一个装在压电晶体上的反射镜,用改变电压来控制镜面的位置,借以利用它快速判断试件的形变方向<sup>[7]</sup>;

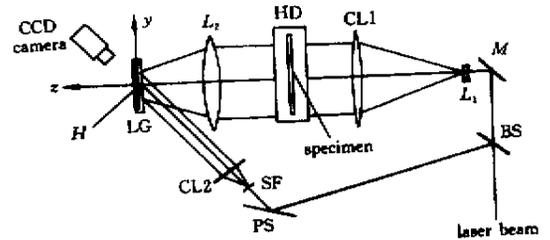


图 1 实时全息系统的光路布局

BS:分束镜;SF:空间滤波器;CL1: $\phi$  300 mm 准直透镜;CL2: $\phi$  100 mm 准直透镜;H:全息干版;M:反射镜; $L_2$ : $\phi$  450 mm 成像透镜;HD:试件加载架;PS:移相器; $L_1$ :凹透镜;LG:液门

Fig. 1 Schematic diagram of the optical setup for this real-time holographic system

BS: beam splitter; SF: spatial filter; CL1:  $\phi$  300 mm collimator; CL2:  $\phi$  100 mm collimator; H: hologram plate; M: mirror;  $L_2$ :  $\phi$  450 mm imaging lens; HD: specimen holder; PS: phase shifter;  $L_1$ : concave lens; LG: liquid gate

5) 连续记录应力场变化信息 采用录像机、数码相机和连拍相机记录,录像机幅频为 25 帧/s,数码相机和连拍相机幅频为 3 和 5 帧/s,快门速度最高可达 1/4000 s;

6) 激光光源 一台输出功率 30 mW 的氦氖激光器即可满足快速记录的要求。这是由于利用了可以获得预期位相调制度的方法,在实验中同时获得了高亮度检测光场和高衬比的干涉条纹的缘故<sup>[8]</sup>;

7) 精确测定微破裂 在试件周围边沿,安放有 8 个 PZT 传感器,它们将接收到的微破裂所激发的声波信号传递给一台多通道瞬态波形自动记录系统,并将所有信息转存在电脑内。根据这些数据可确定微破裂发生的位置和强度,定位偏差不超过  $\pm 3.0$  mm<sup>[2]</sup>;

8) 试件 目前阶段试件采用有机玻璃材料,它的性能与高温、高压下的岩石性能接近,可在一定程度上模拟地层深处的岩石受力状态。试件尺寸为:200 mm × 200 mm 的正方形,厚 14 mm。在试件上用

大功率 YAG 激光器的强激光束刻划了几条预置狭缝。预置狭缝共 6 条,排列成 Y 形,以模拟“雁列式”

断层组成的 Y 形块体边界,见图 2(a)。这是地震实验研究常使用的一种典型排列<sup>[9~11]</sup>。

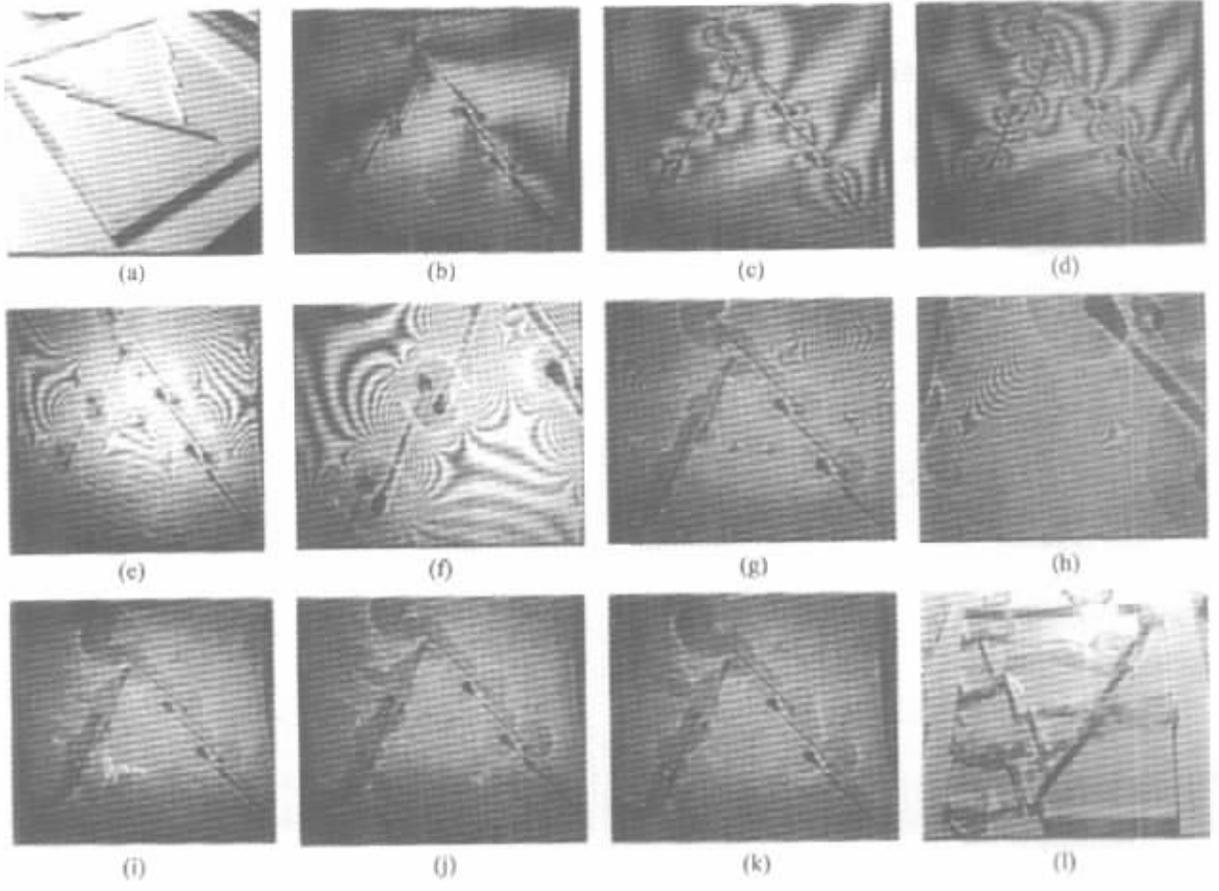


图 2 1# 试件从加载至破裂的全过程

Fig.2 Whole fracture process of 1# specimen under press loading

### 3 条纹分析

#### 3.1 形变大小的计算

设试件处于与  $xy$  平面相平行的平面内(见图 1),当它受到该平面内压力负荷作用时,由于泊松效应,产生  $z$  方向的应变  $\epsilon_z$  与干涉条纹级数  $N$  的关系为<sup>[1]</sup>

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

式中,  $t$  为试件的厚度,  $n_0$  为试件在拍摄实时全息图时的折射率,空气的折射率取 1,  $A$  为试件材料的应力光学系数,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比。应用式(1)就可以根据实时全息的干涉条纹图,定量计算试件各个部位的形变。

干涉条纹级数  $N$  的计算,在目前阶段我们还只是采用人眼观察、直接判读的原始方法。因为试件是从条纹为 0 的状态开始加压,条纹逐渐增多的过程全部以摄像机连续记录下来,条纹级数  $N$  的判读

并不困难。今后,准备采用 CCD 配合计算机图像处理的方法来判读条纹级数  $N$ ,并同时计算试件相应的应变和应力分布。

此外,在目前阶段的试验中,形变主要在  $z$  方向,  $x, y$  方向的形变很小而忽略不计。在今后的试验中,我们将辅以电子散斑法检测  $\epsilon_x$  和  $\epsilon_y$ 。

#### 3.2 变形方向的判断

在全息干涉计量术中,判断物体形变方向或判断条纹级数的方法不少,但对于实时全息法而言并不很实用。所以根据实时全息的特点提出了一种根据条纹的动态判断变形方向的方法。

实时全息中的干涉条纹是实时地跟随着物体的变化而变化,所以常被称作动态条纹“live fringes”。注意到  $z$  方向的应变  $\epsilon_z$  是试件受力后其厚度的增量  $\delta_t$  与原来试件厚度  $t$  之比,即  $(\delta_t/t)$ ,故

$$\delta_t = t\epsilon_z = N\lambda \lambda [(n_0 - EA/\nu) - 1] \quad (2a)$$

当该点厚度变化为  $\delta_i'$  时,相应的条纹序数变化为  $N'$

$$\delta_i' = t\epsilon_z' = N'\lambda[(n_0 - EA/\nu) - 1] \quad (2b)$$

于是有

$$\delta_i' - \delta_i = (N' - N)\lambda[(n_0 - EA/\nu) - 1] \quad (3)$$

当  $\delta_i' - \delta_i > 0$  时,即当该点厚度增大时,相应的条纹序数也增大。因此,条纹从序数大向序数小的方向移动。反之,当  $\delta_i' - \delta_i < 0$  时,即当该点厚度减小时,相应的条纹序数也减小,条纹从序数小向序数大的方向移动。此外,在停止加力时,物体及其表面上的干涉条纹处于静止的状态,这时,可采用压电移相器的方法来判断物体表面形变的方向<sup>[7]</sup>。

## 4 实 验

我们一共做了 3 次同样试件的试验,试件形状大小及试件上预置裂纹的形状大小和排列完全一样,试验的重复性极好,所获结果几乎完全一致。以 1<sup>#</sup> 试件为例,整个试验大致可分为 4 个阶段:

第一阶段 见图 2(b)~(d),此阶段,加载力还不大,应力和应变服从虎克定律,试件的形变可用方程(1)定量计算。随着加载力增大,条纹逐渐增密。在连续加力过程中,闭合干涉条纹的变化有两类,一是条纹向周围扩展,不断有新条纹从核心处逐条“吐出”;二是条纹向核心收拢,并在核心处被逐条“吞没”消失。根据前面的分析,前者代表试件凸起的区域或称“凸区”,其核心处是其最高点,可称为“峰”;后者代表试件凹下的区域或称“凹区”,其核心处是最低点,可称“谷”。“凸区”与“凹区”的交界处对应于试件保持原状的区域,即“无应变区”,可称为“应变缝隙”或“应变空区”。

第二阶段 见图 2(e)~(f),当负载应力增大至破裂应力的 30% 左右后,实验进入第二阶段。在“峰”、“谷”附近首先出现阴影区,并且,它们随着负载力的增大变得越来越大。在此过程中,有许多微破裂先后发生,它们大多出现在阴影区内,阴影区周边有一根很亮的包络线。

第三阶段 见图 2(g)~(h),当负载应力增大至破裂应力的 70% 左右时,试验进入了它的第三阶段。此时,阴影区继续增大,并有少数破裂发生。这些破裂通常发生在阴影区,它们伴随着清脆的“噼啪”响声,有的破裂可以直接用眼看到。

第四阶段 见图 2(i)~(k),当负载应力增大到接近破裂应力时,阴影区出现异常分支,并以一种加速的方式扩展,迅速导致整个试件的完全破裂。阴影区的扩展趋向通常是向“应变间隙”即“无应变区”延伸。

塑性变形阴影区出现分支,迅速扩大,直至整个试件破裂的全部动态过程都被清晰地记录下来,在整个试样破裂的前几秒钟,一个预制裂缝周围的阴影区迅速变大,在靠“应变间隙”的一侧出现尖角形异常分支,迅速扩大延伸,出现新的分叉,此分叉又急剧扩展,最后导致整个试样破裂。这些现象能清晰地直接观察到,并以较高的分辨率记录下来。过程持续了 6 s,记录图像百余幅,图 2(i)~(k)只是其中 3 幅。如此丰富的信息为破裂机理的深入研究提供了重要依据。

实验中,出现在试件内某些部位的阴影区实际上是试件受载时形成的透镜效应引起的焦散现象。在实验力学的焦散线法中,将阴影区称作“焦散斑”,其包络亮线称作“焦散曲线”。图 3(a)是试验第二阶段干涉场中记录下的图像,而图 3(b)是遮去参考

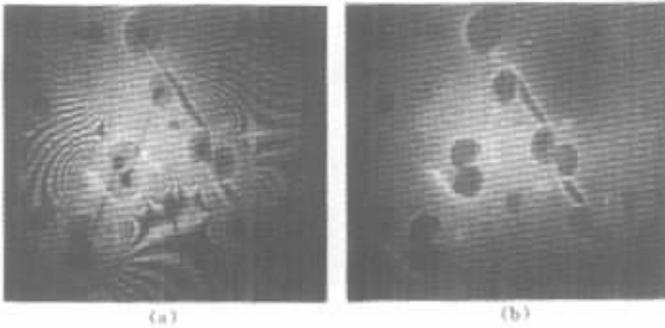


图 3 (a) 加载至第二个阶段,当试件内的某些部分出现阴影区的干涉图纹;

(b) 当遮去参考光,只用物光照明实时全息图时,对应于(a)的相应图像

Fig.3 (a) Interferogram at the second stage when some shadow regions appear in the specimen;

(b) Corresponding photograph of (a) when the real-time hologram illuminated by the object wave only

光在物光场中记录下的图像。这说明暗区的形成确非干涉的结果,而纯属焦散现象。在定量分析时,干涉条纹的分析采用(1)式,而阴影区的分析则采用“焦散线法”的分析方法<sup>[12,13]</sup>。

## 5 结 论

这套系统可将加载过程中试件从弹性变形到出现塑性变形的过程,以及塑性变形阴影区出现异常分支及其扩展,直至整个试件完全破裂的过程中应力场及其变化可视化,并能以较高的分辨率记录下来。而相应的微破裂的发生则通过瞬态波形自动记录仪加以记录并存储于电脑中,通过电脑的分析处理便可获得微破裂聚集成核过程的所有细节。综合两种方法的数据,我们获得了微破裂丛集成核过程以及裂纹的延伸、扩展和应力场之间的关系的丰富信息,并初步获得了破裂成核过程的某些规律性,这些结果有助于强震前震源成核过程的研究。下一个阶段我们将使用岩石试件,采用反射型实时全息法,并辅以电子散斑法进行研究。

此系统不仅为实验地震学研究提供了一个新的有效手段,而且,可望应用于其他的研究领域。例如,最近我们曾应用这套系统为昆明医学院检测双尖牙受载后的应力分布以研究双尖牙在嚼硬物时发生“折裂”,以及牙颈部的牙骨质发生剥脱损坏的现象,为四川大学光电科学技术系的一个直径250mm的大尺寸晶体的加工质量进行检测评估,都获得了很好的结果。前者是一项科研课题的前期准备工作,后者则属于一项有偿技术服务。

## 参 考 文 献

- 1 C. Vest. Holographic Interferometry [M]. New York: John Wiley & Sons, 1979. 373 ~ 377
- 2 Yang Yunhai, Xu Zhaoyong, Zhao Jinming *et al.*. Experimental study between core-forming process of micro rupture and stress field [J]. *Journal of Seismological Research* (地震研究), 1998, 21(2): 128 ~ 133 (in Chinese)
- 3 Xiong Bingheng, Zhang Yongan, Wang Zhenrong *et al.*. A

- real-time hologram recording method for obtaining high brightness of the testing optical field and high contrast of the fringes [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, 19(5): 604 ~ 608 (in Chinese)
- 4 Xiong Bingheng, Wang Zhengrong, Zhang Yongan *et al.*. A novel testing method of transparent objects for real-time holography [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, 21(7): 841 ~ 845 (in Chinese)
- 5 Z. Xu, R. Yang, J. Zhao *et al.*. Experimental Study of Seismic Short-Imminent Precursory Mechanism by New Methods and Technique [C]. The 2nd ACES Workshop of APEC Cooperation for Earthquake Simulation, Oct. 15 ~ 20, 2000, Tokyo & Hakone, Japan
- 6 Wang Zhengrong, Xiong Bingheng, Zhang Yongan *et al.*. A simple system for studying low-speed phenomena with real-time holographic interferometry [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, 17(5): 572 ~ 576 (in Chinese)
- 7 Xiong Bingheng, She Canlin, Wang Zhenrong *et al.*. Predicting the deformation directions of an object by using a piezoelectric shifter [J]. *Acta Phononica Sinica* (光子学报), 1996, 25(8): 713 ~ 718 (in Chinese)
- 8 Xiong Bingheng, Wang Zhenrong, Zhang Yongan *et al.*. A study for making a thin silver-halide phase hologram with an expectation phase modulation [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, 17(8): 1021 ~ 1027 (in Chinese)
- 9 Du Yijun, Ma Jin, Li Jianguo. Interaction and stability of enechelon cracks [C]. *Chinese Journal of Geophysics* (地球物理学报(实验地球物理研究文集)), 1989, 32(Suppl. 1): 218 ~ 231 (in Chinese)
- 10 Li Shiyu, Teng Chunkai, Lu Zhenye *et al.*. The experimental investigation of microcracks nucleation in typical tectonics [J]. *Acta Seismologica Sinica* (地震学报), 2000, 22(3): 278 ~ 287 (in Chinese)
- 11 Zhang Zhili, Fang Xing. Experiment study on the propagation processes of mixed mode cracks in an inhomogeneous rock plates [C]. *Chinese Journal of Geophysics* (地球物理学报(实验地球物理研究文集)), 1989, 32(Suppl. 1): 183 ~ 193 (in Chinese)
- 12 Wu Dafang, Gao Zhenrong, Wu Zhengxi. Deformation of mixed-mode stress intensity factor for three-dimensional crack by caustics and photoelasticity [J]. *Journal of Experimental Mechanics* (实验力学), 1998, 13(1): 1 ~ 8 (in Chinese)
- 13 Guan Dachun, Jin Jiang, Wang Mu. Two improving methods for determining stress intensity factors by the method of caustics [J]. *Journal of Experimental Mechanics* (实验力学), 1996, 11(4): 457 ~ 462 (in Chinese)