

文章编号: 0253-2239(2004)09-1219-5

全息检测中的焦散线现象与干涉条纹的关系*

熊秉衡 李俊昌 王正荣 钟丽云 吕小旭
(昆明理工大学激光所, 昆明 650051)

许昭永 陈顺云 杨润海 赵晋明 王贇贇
(云南省防灾研究所, 昆明 650041)

摘要: 在实时全息干涉计量实验中,当试件负荷甚大时,干涉条纹中会出现一些阴影区,它们在试件破裂过程中起重要作用。当负荷接近试件断裂强度时,可清晰看到并记录下阴影区的延伸、分叉、扩展直至试件破裂的过程。这些阴影区实际上就是几何光学中的焦散线现象。应用此现象可以计算应力强度因子。介绍了在寻找全息干涉条纹与应力强度因子之间关系所作的研究,导出了干涉条纹最大值与应力强度因子之间的定量关系式。从而,为使用全息法与焦散线法相结合的检测方法提供了定量计算的基础。

关键词: 全息术; 实时全息干涉计量术; 焦散线现象; 焦散斑; 焦散斑特征长度
中图分类号: TB877 文献标识码: A

Caustic Phenomena in Holographic Interferometry and Its Relation with the Interference Fringes

Xiong Bingheng Li Junchang Wang Zhengrong Zhong Liyun Lu Xiaoxu
(Laser Institute of Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

Xu Zhaoyong Chen Shunyun Yang Runhai Zhao Jinming Wang Yunyun
(Seismology Institute of Yunnan Province, Kunming 650041)

(Received 13 August 2003; revised 5 January 2004)

Abstract: In the experiments of real-time holographic interferometry, some dark shadow areas appear among the interference fringes. The dark shadow areas play a very important role in the fracture process. When the applied force increases near to the fracture stress, these dark areas extend in an accelerative manner and quickly leads to total rupture of the specimen. In fact, the appearing of these dark shadow areas are the phenomena of caustic in geometry optics. The shadow area is so-called shadow spot and the factor of stress intensity can be calculated by measuring the size of corresponding length of the shadow spot according to fracture mechanics theory. The research works on the relationship between interference fringes and the factor of stress intensity are introduced. The quantitative expression of this relationship has been found and introduced. It provides a basic foundation for calculating the results of the experiment in real-time holographic interferometry combine with caustic method.

Key words: holography; real-time holographic interferometry; caustics phenomena; shadow spot, characteristic length of the shadow spot

* 国家自然科学基金(46764010)、云南省科委应用基础研究基金(97D027Q)资助课题。

E-mail: bhxiong@public.km.yn.cn

收稿日期: 2003-08-13; 收到修改稿日期: 2004-01-05

1 引 言

在我们的一系列实时全息实验中,当试件负荷增至一定程度时,干涉条纹中会出现一些阴影区。它们随负荷增大而扩展,在反映试件的破裂过程中起着重

要的作用。当负荷接近试件断裂强度时,它们迅速延伸并发生分叉,扩展直至破裂。对于这些阴影区出现的现象,在有关论文中^[1,2]我们曾作过报道,但却以为它们可能是一种在试件中局部出现的塑性变形区或屈服区。后经多次实验观察分析,我们确认,阴影区现象实际上就是几何光学中的焦散线现象^[3,10]。是试件上某些区域在变形较大时,使其前后表面形成凸或凹透镜的效果。这时,平行光束通过这些区域时便出现焦散线现象。它们对应试件上形变较大的区域,多数仍只是属于弹性形变的范畴。界线分明的阴影区就是几何光学中所谓的“焦散斑”,其周围明亮的包络线就是“焦散曲线”。根据断裂力学理论,可通过测量焦散斑的“特征长度”而计算应力强度因子。这种利用测量焦散斑的“特征长度”计算应力强度因子的实验方法,在实验力学中称为“焦散线法”,已成为实验力学中的一种重要检测手段^[8]。

在文献^[3]中,着重介绍的是“一种新型的实验地震学光测系统”。对于这种焦散线现象,只简略地作了一点定性的讨论。现在,经过进一步的研究,我们找出了全息干涉条纹与应力强度因子之间的关系,导出了干涉条纹最大值与应力强度因子之间的定量关系式,它提供了定量研究的基础。通过测量焦散斑的特征长度可以确定裂纹尖端即应力集中点的条纹序数。零级条纹和裂纹尖端之间的条纹根数也就等于这个条纹序数之绝对值,而零级条纹所在位置,又可以根据条纹的动态变化来确定^[1],这就大大方便了条纹的判读。

实时全息干涉条纹、焦散斑和焦散线,在实验中容易观察和记录。当变化过程进行很快时,也能以摄像机记录下大量的动态图像信息。因而,试件的应变场/应力场分布和裂纹尖端的应力强度因子及其变化,均可依据这些信息作进一步的定量分析研究。与声发射源测定方法相配合,用瞬态波形自动记录仪记录微破裂所激发的超声波波形,借以确定试件内微破裂发生的时间、位置和强度,可进一步分析微破裂的聚集成核的过程及其与周围应力场的关系。将全息法与焦散线法以及声发射源测定法结合起来应用于试件的检测,既可定量检测试件的应变场/应力场分布及其变化以及微破裂的聚集成核过程,又能直接观察和记录裂纹延长、分叉、扩展直至试件破裂的整个过程。这种方法为研究试件破裂过程的机理提供了一种新的有效手段。

2 实验光路布局

在上述实时全息计量实验中,我们采用的光路如图 1 所示。试件 O 是一块尺寸为 200 mm×200 mm 厚度为 15 mm 的有机玻璃平板,上面用大功率 YAG 激光器预刻了 6 条排成 Y 形的狭缝。这在实验地震学中是一种典型的“雁列式”预置狭缝,见图 2(a)。试件被夹持在一座双轴油压式加力架上,其最大负荷可加到 300 kN。液门窗口只有 100 mm×80 mm,因此我们使用了一个大口径的非曲面透镜 CL2,使得被测试件的有效截面的直径可达 400 mm。此外,在实验中采用了实时全息技术中的一些新方法,大大提高了干涉条纹的衬比和检测视场的亮度,增大了阴影区的发展变化的清晰度^[4~7]。

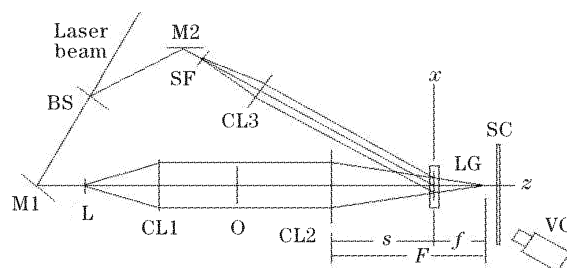


Fig. 1 Schematic diagram of the real-time holographic optical setup in our experiments. BS: Beam splitter; M1, M2: Mirror; SF: Spatial filter; CL1: $\phi 300$ mm Collimator; O: Specimen; VC: Video camera; CL2: $\phi 450$ mm imaging lens; CL3: $\phi 100$ mm collimator; L: Concave lens; LG: Liquid gate; SC observation screen

3 在全息干涉计量中的焦散线现象

将试件夹持在双轴油压式加力架上。从零负荷开始,逐渐加压,直至试件破裂。整个试验过程中试件上的干涉图纹变化,可以直接以肉眼观察,并用摄像机和数码相机记录下来。试件在负荷作用下发生的微破裂则由瞬态波形自动记录仪(即声发射源自动检测仪)记录并存储在计算机中。我们使用刻有同样雁列式狭缝的同样类型的试件,在同样条件下的五次试验,获得了类似的结果。以 1# 试件为例,整个试验过程可分为 4 个阶段:

第一阶段,见图 2(b)、(c)、(d),当加载的力还不是很大,条纹不是很多,应力和应变服从胡克定律,试件的形变可以用方程(12)定量计算。

第二阶段,见图 2(e)、(f),在第二阶段,当负载

应力增大至断裂应力的 30% 左右, 在每一根预置裂缝的端点处出现阴影区, 并且, 它们随着负载力的增大变得越来越大。这过程中, 发生有许多微破裂, 它们大多发生在阴影区内, 阴影区周边有一根很亮的包络线。

第三阶段, 见图 2(g)、(h), 当负载应力增大至断裂应力的 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)、(j)、(k), 当负载应力增大到接近断裂应力时, 试验进入了它的第四阶段。这时, 裂纹的扩展以一种加速的方式, 迅速导致整个试件的完全破裂。

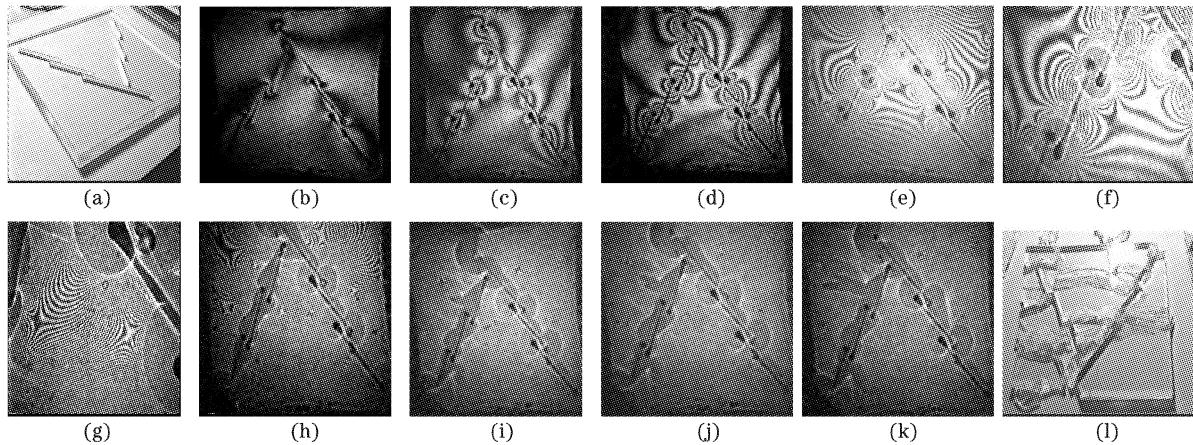


Fig. 2 Whole fracture process of 1[#] specimen under a compressive load

我们观察到并记录下从预制裂缝端点开始形成并逐步扩大直到最后整个试件破裂(断裂)的裂纹发展的动态过程。在整个试样整体破裂的前几秒钟, 一个预制裂缝端点的阴影区迅速变大, 延伸, 并在一侧出现分叉, 分叉继续急剧扩展直至整个试样破裂。这些现象不仅能直接清晰地观察到, 并能以较高的时间分辨率记录下来, 有助于对破裂机理的进一步深入研究。

在文献[1]中我们曾指出:“阴影区的出现在破裂过程中起着重要的作用, 就我们所知, 这类阴影区过去未曾见诸于文献。这是我们首次在全息干涉计量中观察到, 并估计它可能是一种在试件中局部出现的塑性变形区或屈服区。”如今, 经过进一步的研究, 可以确认: 这些阴影区属于几何光学中所谓的“焦散线现象”。

当试件负荷增加到相当值后, 试件某些应力集中区变形很大, 这些变形区, 形成类似微凸透镜(压应力负荷)或微凹透镜(张应力负荷)的效果, 光束通过它们将发生折射, 并在空间形成一个三维包络面。此包络面即焦散曲面。若在此空间放置一个与试件平面平行的观察屏, 就可直接观察到这种焦散曲面的横截面。在此横截面的图中, 存在着一条明亮的曲线, 它包围着一个暗区。在几何光学中, 这条明亮的曲线称作“焦散曲线”。它所包围的阴影区称作

“焦散斑”^[10]。根据断裂力学理论, 可以通过测量焦散斑的“特征长度”(见图 4) 计算应力强度因子。这种利用测量焦散斑的“特征长度”计算应力强度因子的实验方法, 在实验力学中称为“焦散线法”^[8]。将全息干涉计量的光路图与实验力学的焦散线实验光路^[8]相比较, 可以发现: 撤去图 1 中参考光光路的元件(即 M2, SF 和 CL3), 剩余的光路布局恰好和实验力学的焦散线实验光路是一样的。

图 3(a) 是采用图 1 的实时全息实验获得的干涉图纹, 图中既有干涉条纹, 又有阴影区(焦散斑)和它们的包络——明亮的焦散曲线。在上述试验中, 当遮住参考光时, 就获得图 3(b)。可以看到, 这是一幅典型的焦散线实验的结果。图中没有干涉条纹, 只有焦散斑和明亮的焦散曲线。这表明: 阴影区

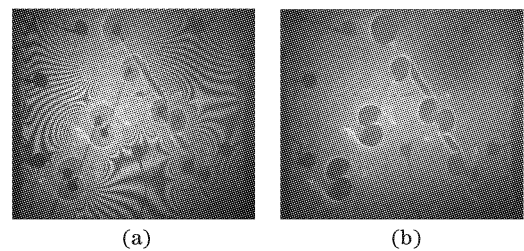


Fig. 3 (a) Interferogram at the second stage when some shadow regions appear on the specimen, (b) The corresponding photograph of (a) when the real time hologram illuminated by the object wave only

的形成是由于光的折射,而不是由于两束光的干涉现象。而且,当撤除试件负荷后,绝大部分阴影区都会恢复原来状态。它基本上属于弹性变形现象,而非塑性或屈服变形现象。当然,在负荷甚大时,有少数应力集中处会产生塑性或屈服变形,这些部分将不恢复原状。

4 应用焦散线方法计算应力强度因子

根据断裂力学理论,这些出现在预制狭缝尖端附近的焦散斑属于Ⅱ型破裂。它们所对应的应力强度因子 K_{II} 可按下式计算^[8]:

$$K_{II} = 2(D/3.02)^{5/2} (2\pi)^{1/2} / [3Z_0 |C| t M^{3/2}], \quad (1)$$

式中 t 是试件的厚度; M 是光学系统的放大倍数; Z_0 是焦散线像平面至物平面(试件平面)之间的距离;

D 是焦散斑的特征长度,其值可根据图 4 所示予以测定; C 是与泊松比和弹性模量有关的参量。

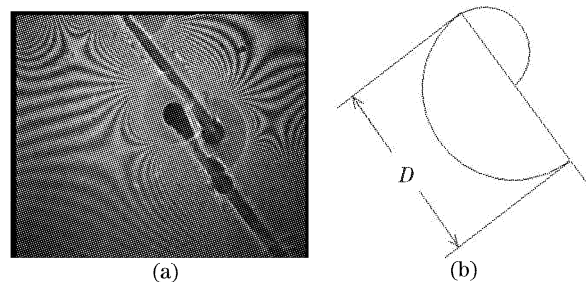


Fig. 4 (a) Shadow spots in an interferogram of real-time holographic interferometry, (b) Characteristic length of a shadow spot

根据断裂力学理论,应力和应力强度因子之间有以下关系^[8,11]:

$$\sigma_{xx} = - [K_{II} / 2(2\pi r)^{1/2}] \sin(\theta/2) [2 + \cos(\theta/2) \cos(3\theta/2)], \quad (2)$$

$$\sigma_{yy} = [K_{II} / 2(2\pi r)^{1/2}] \sin(\theta/2) \cos(\theta/2) \cos(3\theta/2), \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = [K_{II} / 2(2\pi r)^{1/2}] \cos(\theta/2) [1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)], \quad (4)$$

式中 $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}, \sigma_{yx}$ 是应力张量 $\mathbf{S}(\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{yy})$ 的诸分量。若 \mathbf{S} 的本征值为 Λ_1, Λ_2 , 则每点的主应力之和为

$$\Lambda_1 + \Lambda_2 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy}, \quad (5)$$

又,我们知道各个点的应力与应变的关系如下:

$$\epsilon_x = (1/E)(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}), \quad (6)$$

$$\epsilon_y = (1/E)(\sigma_{yy} - \sigma_{xx}), \quad (7)$$

$$\epsilon_z = -(\nu/E)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \quad (8)$$

借助于上述关系式,在选取适当坐标后,即可确定应力强度因子之值以及试件上每个点的 $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}, \sigma_{yx}$ 和 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 之值。当具体计算时,还需应用叠加原理,考虑几个端点相应的应力场的叠加。有关使用此表达式的具体例证,我们在另文中讨论。

5 应变的计算

取坐标使 x - y 平面与试件平面重合,沿 x 和沿 y 坐标方向向试件施加平面压应力,由于泊松效应,试件在 z 方向的形变为 ϵ_z ^[9]

$$\epsilon_z = \delta t / t, \quad (9)$$

式中 t 为试件的厚度。在弹性材料中,这种横向应变与应力场的关系为

$$\epsilon_z = -(\nu/E)(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (10)$$

σ_1, σ_2 为主应力,它们互相垂直,并位于 x, y 平面。基于全息理论,从干涉图纹,根据下式,可以定量计算

试件的纵向形变^[9]。

$$\epsilon_z = N\lambda / [(n_0 - EA/\nu) - 1]t, \quad (11)$$

式中 N 为条纹序数, n_0 为光在记录时的折射率; A 为材料的应力-光学系数; λ 为照明光源的波长; E 为试件材料的弹性模量; ν 为泊松系数; $(n_0 - EA/\nu)$ 可视作试件的有效折射率。注意到 $\Lambda_1 + \Lambda_2 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} = \sigma_1 + \sigma_2$, 由(11)式, (2)式, (3)式和(8)式,我们有

$$N = \frac{(\nu K_{II}) [(n_0 - EA/\nu) - 1] \sin(\theta/2)}{\lambda E (2\pi r)^{1/2}}, \quad (12)$$

表达式(12)是一个十分重要的公式,它将全息干涉计量与断裂力学理论联系起来。式中 N 是位于狭缝尖端处干涉条纹的序数。通过测定焦散斑的特征长度后,便可获得应力强度因子之值。然后依据(12)式,就可确定裂纹尖端的条纹序数。而该值也正是这部分区域内干涉条纹的极值(当裂纹尖端处于凸区时, N 取正值,即为条纹序数之最大值;而当裂纹尖端处于凹区时, N 取负值,即为条纹序数之最小值)。序数为零的条纹所在处为无形变位置,也就是凸区和凹区的交界边沿区域。也就是说,从这里到狭缝尖端,共有 $|N|$ 条干涉条纹。

结束语

1) 在实时全息干涉计量中,当负载很大时出现阴影区的现象是焦散线现象:(i) 阴影区的形成是

由于光的折射,而非两束光的干涉;(ii)在实时全息光路中撤除参考光路的所有光学元件,剩余的光路正好就是实验力学中焦散线的光路布局;(iii)撤除试件负荷后,绝大部分阴影区都会恢复原来状态。它基本上属于弹性变形现象,而非塑性或屈服变形现象。当然,在负荷甚大时,有少数应力集中处会产生塑性或屈服变形,这些部分将不恢复原状。

2) 在实时全息干涉计量中,当负载很大、条纹过于密集而难于分辨条纹序数时,此方法有助于识别条纹序数。首先,可以根据条纹的动态变化,确定零级条纹所在位置^[1]。然后,通过测量焦散斑的特征长度和公式(12)确定最大或最小条纹序数。而零级条纹和裂纹端点之间的条纹根数也就等于这个最大序数或最小条纹序数之绝对值,这就大大方便了条纹的判读。

3) 本文以Ⅱ型裂纹为例进行了定量的讨论,实际上,本文提出的方法也适用于Ⅰ型裂纹、Ⅲ型裂纹。限于篇幅,有关于Ⅰ和Ⅲ型裂纹的问题我们将另文分析^[11]。

4) 阴影区的发展变化可以直接观察,也便于记录。配合声发射自动检测仪,记录微破裂的发生时间、位置和强度,再加上全息干涉条纹提供的周围应力场分布变化的数据,大大丰富了实验过程记录的信息。将全息法与焦散线法以及声发射源测定法结合起来应用于试件的检测中,不仅可以定量检测试件的形变场、应力场分布,而且有助于裂纹生成、扩展机理的研究。此方法不仅可用于实验地震学的基础研究,还可应用于更广阔的领域。

参 考 文 献

1 Xiong B, Wang Z, Lu X *et al.*. Application of real-time holographic method to the micro-crack nucleation process

study. *Proc. SPIE*, 2000, **4221**: 326~330

2 Xu Z, Yang R, Zhao J *et al.*. Experimental study of seismic short-imminent precursory mechanism by new methods and technique. *Proc. 2nd APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES)*, 2000. 101~108

3 Xiong Bingheng, Wang Zhengrong, Lu Xiaoxu *et al.*. A novel optical system created for experimental earthquake simulation research. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(4): 376~380 (in Chinese)

4 Xiong Bingheng, Lu Xiaoxu, Wang Zhengrong *et al.*. A real-time hologram recording method for obtaining high brightness of the testing optical field and high contrast of the fringes. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5): 604~608 (in Chinese)

5 Xiong Bingheng, Wang Zhengrong, Zhang Yongan *et al.*. A study for making a thin silver-halide phase hologram with an expectation phase modulation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(8): 1021~1027 (in Chinese)

6 Xiong Bingheng, Wang Zhengrong, Zhang Yongan *et al.*. A novel testing method of transparent objects in real-time holography. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7): 841~845 (in Chinese)

7 Wang Zhengrong, Xiong Bingheng, Zhang Yongan *et al.*. A simple system for studying low-speed phenomena with real-time holographic interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(6): 572~576 (in Chinese)

8 Su Xianji, Li Zheng. *Dynamic Testing Technology for Solid Mechanics*. Beijing: High Education Press, 1997. 159~181

9 Hecht E, Zajac A. *Optics*. London: Addison-Wesley Publishing Co., 1974. 176~177

10 Xu Z, Yang R, Zhao J *et al.*. Experimental study of the process zone, nucleation zone and plastic area of earthquakes by the shadow optical method of caustics. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, **159**(9): 1951~1966

11 Xiong Bingheng, Li Junchang, Wang Zhengrong *et al.*. Quantitative relation between caustic phenomena and holographic fringes. *Practical Holography XVI*, part of IS&T/SPIE's Electronic Imaging 2004, Jan., San Jose, CA, USA

王赞赞

王赞赞

王赞赞