

# 环形孔径锥镜剪切激光散斑照相法的研究\*

王开福

沈永昭

(扬州工学院力学室, 扬州 225001)

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

**提要** 研制了环形孔径锥镜剪切相机, 并利用它进行激光散斑照相, 测量物体的位移导数场。该相机一次实验即可在一张散斑图上同时记录物体所有各方向的位移导数场, 且在全场滤波时连续再现各方向的位移导数场。

**关键词** 锥镜剪切, 位移导数, 散斑照相, 环形孔径

文献[1,2]相继报道了双孔和多孔散斑剪切相机, 并利用它们完成了位移导数的测量。但缺点是因相机前放置了小孔而使曝光时间延长, 且一次实验仅可获得一个或几个特定方向的位移导数信息。而离焦剪切技术在一次实验中可同时记录物体所有各方向的位移导数信息, 但缺点是因位相发生畸变而使条纹对比度下降<sup>[3]</sup>。本文在上述研究的基础上研制了环形孔径锥镜剪切相机, 并利用该相机进行激光散斑照相, 测量物体的位移导数场。它除仍保留前述各种散斑剪切方法的优点外, 其最突出的优点是一次实验即可同时得到物体所有各方向的位移导数场的信息, 且曝光时间比多孔剪切照相法短, 条纹质量比离焦剪切照相法高, 可应用于现场进行测试。

## 1 实验装置

环形孔径锥镜剪切相机的光路系统如图1所示。其中锥镜是由一块光学玻璃经旋转精加工而成, 具有旋转对称性,  $\alpha = 12'$ <sup>[4]</sup>。环形孔径的内、外径分别为  $d_0 = 42 \text{ mm}$ ,  $D_0 = 48 \text{ mm}$ , 即  $\eta = d_0/D_0 = 7/8$ <sup>[5]</sup>。把锥镜和环孔对称地紧贴于聚焦的相机前面, 进行激光散斑照相, 这样在像面上将得到无数个沿径向相互错开的像, 各像相对于原位像(即不放置锥镜时的像)的错位量为

$$\delta_r' = (n - 1)\alpha q \quad (1)$$

式中  $q$  是像距,  $n$  和  $\alpha$  分别是锥镜的折射率和倾角。各像相对于原位像折算物面上的错位量为

$$\delta_r = (n - 1)\alpha p \quad (2)$$

式中  $p$  是物距。

\* 江苏省教委自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1993年6月7日, 收到修改稿日期: 1993年10月17日

## 2 理论分析

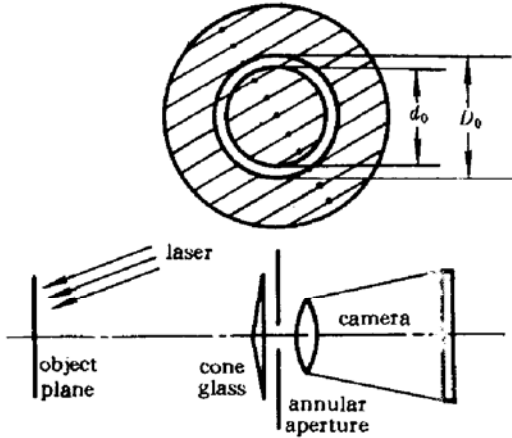


Fig. 1 Imaging system

环形孔径可看成是小孔对的无限密集<sup>[6]</sup>。现考虑某一孔对的作用, 设孔对中心连线平行于  $x$  方向, 且中心间隔为  $d$ 。若无锥镜作用, 则分别通过两孔聚焦所得的两个像在像平面上是完全重合的。但由于存在锥镜, 就使两个像各沿径向发生平移。两像在垂直于  $x$  方向上发生等量同向平移, 而在平行于  $x$  方向上发生等量反向平移。从而使两像沿  $x$  方向发生错位, 物面和像面错位量分别为

$$\delta_x = 2\delta_r \cdot d/D = 2(n-1)\alpha pd/D_0 \quad (3)$$

$$\delta_x' = 2\delta_r' \cdot d/D = 2(n-1)\alpha qd/D_0 \quad (4)$$

用激光照射物体, 则物面上点  $P(x, y)$  的散射光线与其邻域点  $P(x + \delta_x, y)$  的散射光线分别通过两孔到达像面上同一点而产生干涉。设该两点的散

射光在像面引起的场振幅分别为

$$U(x, y) = Ae^{i\phi(x, y)} \quad (5)$$

$$U(x + \delta_x, y) = Ae^{i\phi(x + \delta_x, y)} \quad (6)$$

式中  $A$  是光源振幅,  $\phi(x, y), \phi(x + \delta_x, y)$  分别是  $P(x, y), P(x + \delta_x, y)$  两点处的位相。则像面上的合光场的振幅为

$$U_T = U(x, y) + U(x + \delta_x, y) = A[e^{i\phi(x, y)} + e^{i\phi(x + \delta_x, y)}] \quad (7)$$

光强为 
$$I_T = U_T U_T^* = 2A^2(1 + \cos\beta) \quad (8)$$

式中  $\beta = \phi(x + \delta_x, y) - \phi(x, y)$ 。

同理, 可得到物体受载变形后, 像面上的光强为

$$I_T' = 2A^2[1 + \cos(\beta + \Delta)] \quad (9)$$

式中  $\Delta = \phi(x + \delta_x, y) - \phi(x, y)$  是因物体变形而引起的两点之间的相对位相变化。

显然, 双曝光所记录的总光强为

$$I = I_T + I_T' = 2A^2[1 + \cos(\beta + \Delta/2)\cos(\Delta/2)] \quad (10)$$

式(10)表明光强可表示为一个具有直流分量及由一个低频因子  $\cos(\Delta/2)$  调制的高频载波项  $\cos(\beta + \Delta/2)$  之和。当  $\Delta = (2n + 1)\pi$  时, 高频载波项为零。

## 3 实验结果

采用图 1 所示的记录系统。用 20 mW He-Ne 激光经扩束后垂直照明物体, 取环形孔径的内、外径分别为 42 mm 和 48 mm。用橡胶水配制的金粉均匀地涂布在物面上。用天津全息 I 型干板在像面上记录双曝光散斑图。

实验 I—薄板弯曲实验。试件是直径 31 mm, 厚度 1.3 mm, 周边固定, 中心集中加载的铝板。把所摄双曝光散斑图放入全场滤波系统中, 在某一方向开一高通滤波孔, 则可获得该方向的位移导数的等值条纹。改变滤波孔的方向则可以得到任意方向的位移导数的等值条纹。

图 2 的照片是从不同空间频率处进行高通滤波所得到的位移导数的等值条纹。图 3 是实

验值同理论值的比较。计算表明,最大相对误差不大于 5%。

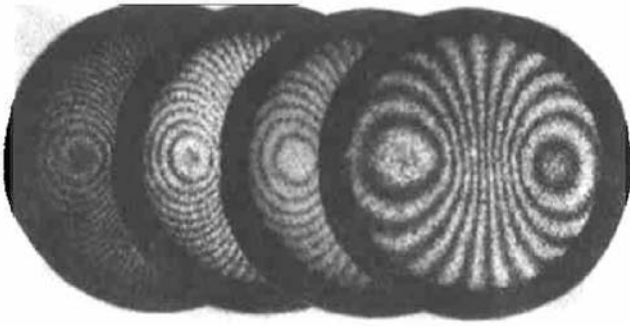


Fig. 2

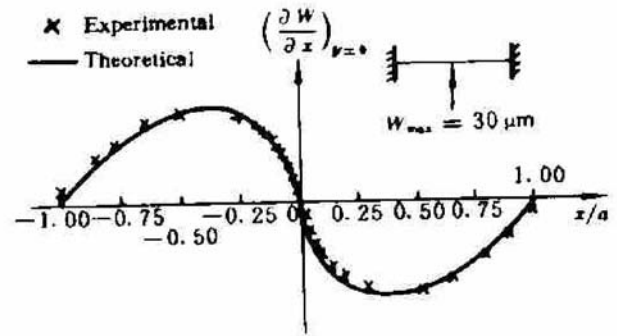


Fig. 3 Experimental and theoretical data

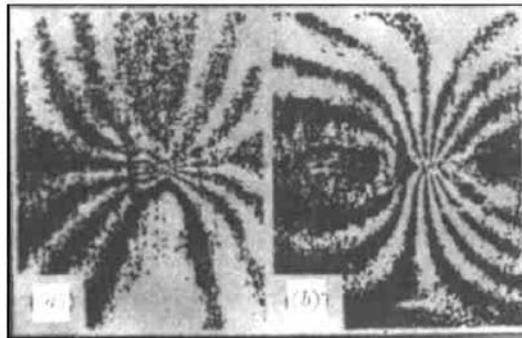


Fig. 4

实验 I 一无损检测实验。试件是  $3.0 \times 4.0 \text{ mm}^2$  的中心加载的铝板,其上有一条裂纹。图 4(a) 和 (b) 分别是平行于和垂直于裂纹方向滤波所得的位移导数的等值条纹。由图 4 可知,图 4(a) 中条纹的不连续清楚地显示了裂纹的位置、方向和大致长度,而图 4(b) 却无法显示裂纹的存在。这说明某一方向的位移导数的等值条纹只对该方向的裂纹敏感,故要检测一条位置及方向都未知的裂纹,尤其是位置及方向都未知的多条裂纹,最佳方案是一次实验必须获得物体所有方向的位移导数场的信息。而本文提出的方法恰恰能满足上述要求。

## 4 结 论

理论分析和实验结果都表明,利用本文研制的环形孔径锥镜剪切相机进行激光散斑照相法研测物体的位移导数场是可行的,测量误差满足工程要求。该相机不仅光路简单,曝光时间短,条纹质量高,测量灵敏度高和灵敏度调节范围宽,而且一次实验即可在一张散斑图上同时记录物体所有各方向的位移导数场的信息,并在全场滤波时可连续再现各方向的位移导数场。该相机的研制为实验应力分析提供了一种重要工具,尤其在无损检测领域和研究断裂力学问题更具有优越性。

致谢 作者感谢王高健勇同志对本研究工作的大力支持。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Y. Hung, C. E. Taylor. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1973, 41: 169

- 2 Y. Y. Hung, A. J. Durelli. *J. Strain. Anal.*, 1979, 14 : 81
- 3 Y. Y. Hung. *Exp. Mech.*, 1978, 8 : 56
- 4 王开福, 沈永昭. 光学学报, 1993, 13(3) : 287
- 5 王 策. 光学学报, 1982, 2(6) : 523
- 6 R. K. Krf 著, 余官正 等译. 散斑计量学. 北京: 中国计量出版社, 1990. 73

## Investigation of Annular Aperture Cone Glass Shearing Laser Speckle Photography

Wang Kaifu

(*Mechanics Division, Yangzhou Institute of Technology, Yangzhou 225001*)

Shen Yongzhao

(*Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006*)

**Abstract** In this paper, Annular aperture cone glass shearing laser speckle photography used for measuring the derivatives of displacements is proposed for the first time. The derivatives of displacements in all directions can be recorded simultaneously on one double exposed specklegram in one step, and the information of every direction can be obtained by whole-field filtering.

**Key words** cone glass shearing, derivatives of displacements, speckle photography, annular aperture.