

旋转锥镜相机研测动态曲率和斜率*

王开福

沈永昭

(扬州大学工学院力学教研室, 扬州 225001) (苏州大学物理系, 苏州 215006)

摘 要 采用旋转锥镜相机, 进行激光散斑剪切照相, 研测缓慢变形物体的动态曲率和斜率。拍摄一张散斑图即可获得曲率和斜率动态变化的全过程。

关键词 曲率, 斜率, 旋转锥镜相机。

文献[1]拓展了研测动态位移场的旋转孔径散斑照相法^[2]和散斑剪切照相法^[3], 提出了研测动态位移导数场的旋转孔径锥镜剪切散斑照相法。本文基于上述的研究, 进一步探讨了利用旋转锥镜相机研测缓慢变形物体的动态曲率和斜率的可行性, 给出了实验结果。

1 实验装置

图 1 是记录物体曲率和斜率动态变化全过程信息的旋转锥镜相机的光路系统示意图。在聚焦相机前对称放置锥镜和孔屏。锥镜为文献[1]和文献[4]中锥镜经研磨而成。孔屏上开三个直径相等, 中心间距相等且位于一直线上的小孔。由于锥镜和孔屏的存在, 此时在像面上出现三个沿三孔中心连线方向相互横向错开的像, 相邻像和相隔像间的剪切量分别为

$$\begin{aligned} \Delta_i &= (n-1)ad_i, \\ \Delta'_i &= 2(n-1)ad_i. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n 和 α 分别为锥镜的折射率和倾角, d_i 为像距。折算到物面上, 相邻像和相隔像间的物面剪切量分别为

$$\begin{aligned} \Delta'_0 &= (n-1)ad_0, \\ \Delta_0 &= 2(n-1)ad_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中 d_0 为物距。

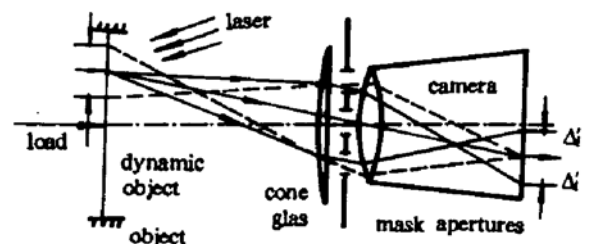


Fig. 1 Optical system

* 江苏省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994 年 5 月 26 日; 收到修改稿日期: 1994 年 9 月 13 日

2 理论分析

2.1 静态双曝光记录

在锥镜和孔屏保持静止时,对物体变形前后分别进行一次曝光,则变形前后像点的光强分别为^[5]

$$I_1 = A^2 [3 + 2 \cos (\phi_{21} + \delta_x) + 2 \cos (\phi_{13} + \delta_x) + 2 \cos (\phi_{23} + 2\delta_x)] \quad (3)$$

$$I_2 = A^2 [3 + 2 \cos (\phi_{21} + \delta_{21} + \delta_x) + 2 \cos (\phi_{13} + \delta_{13} + \delta_x) + 2 \cos (\phi_{23} + \delta_{23} + 2\delta_x)] \quad (4)$$

式中 $\phi_{ij} = \phi_i - \phi_j$ 为随机位相差, $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 为因变形而引起的位相的相对变化, $\delta_x = kx_0 D/d_0$, δ_x 中各量的物理意义同文献[5]。经双曝光后,像点的总光强为

$$I = I_1 + I_2 \quad (5)$$

对散斑图进行全场滤波,在频谱面上将出现 5 个衍射晕点。零级晕点为各孔自相关频谱的叠加,不含信息;两个 1 级晕点为中间孔分别与外边两孔所形成的互相关频谱的叠加,含相同的曲率信息,在其中一个晕点(+1 级或-1 级)上进行全场滤波,则分析系统像面光强为

$$\begin{aligned} I_{+1(\text{或}-1)} &= |A^2 \{ \exp [i(\phi_{21} + \delta_x)] + \exp [i(\phi_{21} + \delta_{21} + \delta_x)] \\ &\quad + \exp [i(\phi_{13} + \delta_x)] + \exp [i(\phi_{13} + \delta_{13} + \delta_x)] \} |^2 \\ &= 4A^4 (1 + \cos \frac{\delta_{21} + \delta_{13}}{2} \cos \frac{\delta_{21} - \delta_{13}}{2}) + \text{高频项} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\delta_{21} + \delta_{13}$ 和 $\delta_{21} - \delta_{13}$ 分别由下式表示

$$\left. \begin{aligned} \delta_{21} + \delta_{13} &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \Delta_0^2 \sin \theta + \frac{\partial w}{\partial x} \Delta_0^2 (1 + \cos \theta) - \frac{2D}{d_0} u_1 \right] \\ \delta_{21} - \delta_{13} &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta_0^2 \sin \theta + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Delta_0^2 (1 + \cos \theta) \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

显然在+1 级(或-1 级)晕点上滤波将得到因两斜率条纹的剪切而产生的曲率条纹。显然

$$\delta_{21} - \delta_{13} = \begin{cases} (2N + 1)\pi, & \text{对应于暗曲率条纹} \\ 2N\pi, & \text{对应于亮曲率条纹} \end{cases} \quad (8)$$

式中 N 为整数条纹级数。

薄板横向受载而弯曲变形时,面内位移可忽略,此时(7)式化简为

$$\delta_{21} - \delta_{13} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_0^2 (1 + \cos \theta) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (9)$$

结合(8)式,得

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \begin{cases} \frac{(N + 1/2)\lambda}{\Delta_0^2 (1 + \cos \theta)}, & \text{对应于暗曲率条纹} \\ \frac{N\lambda}{\Delta_0^2 (1 + \cos \theta)}, & \text{对应于亮曲率条纹} \end{cases} \quad (10)$$

同理,两个 2 级晕点为外边两孔的互相关频谱,含相同的斜率信息,在其中一个(+2 级或-2 级)晕点上进行全场滤波将得到斜率条纹。此时分析系统像面光强为

$$\left. \begin{aligned} I_{+2(\text{或}-2)} &= 2A^4 (1 + \cos \delta_{23}) \\ \delta_{23} &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \Delta_0^2 \sin \theta + \frac{\partial w}{\partial x} \Delta_0^2 (1 + \cos \theta) - \frac{2D}{d_0} u_1 \right] = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_0^2 (1 + \cos \theta) \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

显然,当

$$\frac{\partial w}{2\lambda} = \begin{cases} \frac{(N + 1/2)\lambda}{\Delta_0''(1 + \cos \theta)} \text{ 时,} & \text{对应于暗斜率条纹} \\ \frac{N\lambda}{\Delta_0''(1 + \cos \theta)} \text{ 时,} & \text{对应于亮斜率条纹} \end{cases} \quad (12)$$

式中 N 为整数条纹级数。

根据边界条件不难确定物面上任一点处的条纹级数, 此时再依据(10)式和(12)式, 可分别求得各点处的曲率和斜率的数值。进而可对变形薄板进行内力、应力和应变分析。

2.2 动态双曝光记录

当物体保持静止状态时, 并在锥镜和孔屏匀速旋转半圈的过程中进行第一次曝光; 然后当物体缓慢动态变形时, 再让锥镜和孔屏以同样的角速度匀速旋转半圈, 并作第二次曝光。此时所形成的衍射晕分布除中心亮斑(零级)外还有两个同心圆环[如图 2(a)所示], 内环为 1 级晕环, 外环为 2 级晕环。

根据旋转孔径散斑照相法的基本原理^[2], 内半环(相当于+1级)上的不同晕点含不同时刻物体的瞬态曲率信息, 另外的内半环(相当于-1级)所含信息相同。在内半环的某点进行全场滤波将得到与该点对应的某时刻的瞬态曲率条纹, 依次在内半环的不同点进行会场滤波将得到物体在动态变形过程中所有各时刻的瞬态曲率条纹。

同理在外半环的不同晕点进行全场滤波将得到物体在动态变形过程中所有各时刻的瞬态斜率条纹。

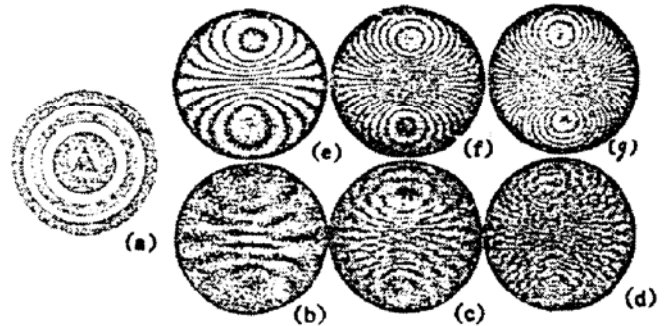


Fig. 2 Experimental result

3 实验结果

试件为 32 mm 的铝板, 周边固定, 中心用带刻度值的螺旋千分头连续集中加载, 螺旋千分头的位移量(即铝板中心挠度)在 0~40 μm (由螺旋千分头直接读取)范围内连续改变。用 1 米长的 He-Ne 激光器作照明光源, 激光束径扩束并准直后接近垂直照明试件。锥镜倾角 $\alpha = 12'$, 孔屏上孔的直径均为 5 mm, 相邻孔的中心间距均为 20 mm。采用焦距 240 mm 的相机和天津全息 I 型干板记录散斑图。

图 2 是对散斑图进行全场滤波所得的实验结果。图 2(a)为衍射晕分布照片, 除 1 个中心亮斑外还有两个同心圆环。图 2(b)、(c)和(d)分别为在内半环上三个不同位置(对应角度分别为 $\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{\pi}{4}$ 和 $\frac{5\pi}{6}$)进行全场滤波所得的对应于物体三个不同时刻(对应的铝板中心挠度由螺旋千分头分别读得为 10 μm 、19 μm 和 26 μm)的瞬态曲率分布的等值条纹照片。图 2(e)、(f)和(g)分别为在外半环上三个相应角度处进行全场滤波所得的对应于物体三个不同时刻(对应的铝板中心挠度值分别与(b)、(c)和(d)相同)的瞬态斜率分布的等值条纹照片。

图 3 给出了铝板中心挠度 $W_0 = 19 \mu\text{m}$ 瞬时沿径向的曲率分布的理论曲线和实验结果。其中理论曲线是根据下列方程绘制的

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{4w_0}{a^2} \left(1 + \ln \frac{r}{a}\right) \quad (13)$$

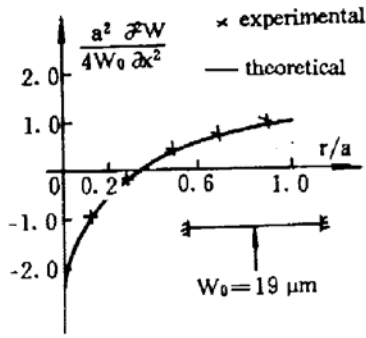


Fig. 3 Experimental and theoretical data

式中 w_0 为铝板中心挠度, a 为铝板半径。实验值是由 (10) 式求得的。计算表明, 误差不超过 10%。

结 语 理论分析和实验结果均表明, 利用旋转锥镜相机研测缓慢变形物体的动态曲率和斜率是可行的, 可用于薄板动态变形时的实验应力分析。所得斜率条纹照片清晰, 但曲率条纹照片因受斜率条纹的影响, 使清晰度下降。

参 考 文 献

- [1] 王开福, 沈永昭, 旋转孔径锥镜剪切散斑照相法. 光学学报, 1993, 13(3): 287
- [2] 顾 杰, 沈永昭, 研测动态问题的旋转孔径散斑照相法(1). 光学学报, 1987, 7(12): 1069
- [3] Y. Y. Hung *et al.*, Image-shearing camera for direct measurement of surface strains. *Appl. Opt.*, 1979, 18(7): 1046
- [4] 王开福, 沈永昭, 环形孔径锥镜剪切激光散斑照相法. 中国激光, 1994, 21(4): 293
- [5] 王开福, 沈永昭, 五孔剪切相机同时测量二维曲率、扭率和斜率. 光学学报, 1994, 14(1): 73

Dynamic Measurement of Slope and Curvature with a Rotating Cone-Glass Shearing Camera

Wang Kaifu

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

Shen Yongzhao

(Physics Department, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 26 May 1994; revised 13 September 1994)

Abstract This paper discusses the rotating cone-glass shearing camera used for dynamic measurement of slope and curvature. The whole process of slope and curvature can be recorded on a single specklegram.

Key words curvature, slope, rotating cone-glass camera.