

旋转锥镜散斑剪切术测量动态扭率和斜率*

王开福

(扬州大学工学院, 扬州 225009)

摘 要 采用旋转锥镜技术, 进行激光散斑剪切照相, 测量变形物体的动态扭率和斜率, 拍摄一幅散斑图可获得扭率和斜率动态变化的全过程。

关键词 散斑剪切照相, 旋转锥镜, 扭率, 斜率。

文献[1]报道了旋转锥镜散斑剪切照相法, 不久文献[2]又报道了旋转锥镜散斑剪切照相法在动态曲率和斜率测量中的应用。本文基于上述研究, 进一步利用旋转锥镜散斑剪切照相法测量变形物体的动态扭率和斜率。

1 实验装置

图 1 是测量动态扭率和斜率所采用的光路系统。激光束照射漫反射物面, 相机对物面进行聚焦成像, 在相机的镜头前对称地放置孔屏和顶角均为 α 的锥镜。在孔屏上开 4 个直径相等、圆心分别位于正方形 4 个顶点上的小孔, 如图 2 所示。为使衍射晕互不重叠, 须满足条件

$$\sqrt{2}a - d \geq a + d, \quad \text{即} \quad d \leq a/5 \quad (1)$$

式中 d 为各孔直径, a 为相邻孔的中心间距。由于锥镜和孔屏的存在, 此时在像面上将出现 4 个沿径向错位的像, 且各像相对于原位像的错位量为

$$\Delta' = (n - 1)\alpha d; \quad (2)$$

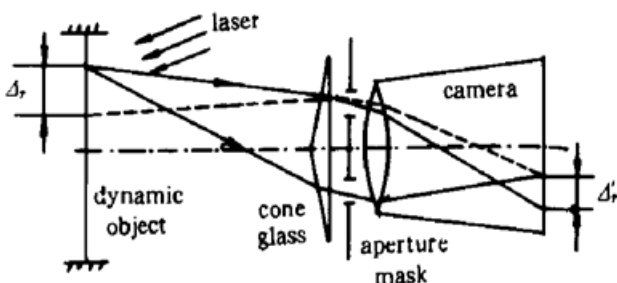


Fig. 1 Optical system

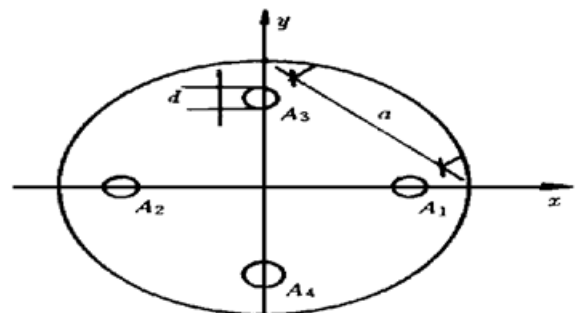


Fig. 2 Aperture mask

* 江苏省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-03-01; 收到修改稿日期: 1997-11-17

折算到物面的错位量为

$$\Delta = (n - 1)\alpha d_0 \tag{3}$$

同理可得相邻像和相对像间的物面错位量分别为

$$\Delta_{x'} = \sqrt{2}(n - 1)\alpha d_0, \quad \Delta_r = 2(n - 1)\alpha d_0 \tag{4}$$

2 理论分析

2.1 静态双曝光记录

2.1.1 信息记录

保持锥镜和孔屏静止, 物体变形前后分别进行一次曝光, 变形前后像点的光强分布为^[3]

$$I_1 = A^2 [4 + 2 \cos(\phi_2 + \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_4 + \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_{31} - \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_{24} - \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_{12} + 2\delta_x) + 2 \cos(\phi_{34} + 2\delta_y)] \tag{5}$$

$$I_2 = A^2 [4 + 2 \cos(\phi_2 + \delta_{32} + \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_4 + \delta_{14} + \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_{31} + \delta_{31} - \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_{24} + \delta_{24} - \delta_x + \delta_y) + 2 \cos(\phi_{12} + \delta_{12} + 2\delta_x) + 2 \cos(\phi_{34} + \delta_{34} + 2\delta_y)] \tag{6}$$

式中 $\phi_{ij} = \phi_i - \phi_j$ 为随机位相差, $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 为因物体变形而引起的位相的相对变化, $\delta_x = kx_{ia}/\sqrt{2d_i}$, $\delta_y = ky_{ia}/\sqrt{2d_i}$, (x_i, y_i) 为像点坐标。双曝光后像点总光强分布为

$$I = I_1 + I_2 \tag{7}$$

2.1.2 信息处理

对散斑图进行全场滤波, 在频谱面上将出现 9 个衍射晕点如图 3 所示, 零级晕点为各孔自相关频谱的叠加, 不含信息; 晕点 A_{12} 是孔 A_1 、 A_2 的互相关频谱, 含斜率信息, 在其中一个晕点上滤波, 则分析系统像面光强分布为

$$I_{\text{slope}} = |A^2 \exp[i(\phi_{12} + 2\delta_x)] + A^2 \exp[i(\phi_{12} + \delta_{12} + 2\delta_x)]|^2 = A^4(2 + 2 \cos \delta_{12}) \tag{8}$$

考虑到薄板横向受载变形时, 面内位移可忽略, 则上式中 δ_{12} 可表示为

$$\delta_{12} = k\Delta_r(1 + \cos \theta_x) \frac{\partial W}{\partial x} \tag{9}$$

显然晕点 A_{12} 含纯斜率 $\partial W/\partial x$ 信息, 而且

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \begin{cases} 2N\pi/[k\Delta_r(1 + \cos \theta_x)] & \text{对应亮斜率条纹} \\ (2N + 1)\pi/[k\Delta_r(1 + \cos \theta_x)] & \text{对应暗斜率条纹} \end{cases} \tag{10}$$

式中 N 为整数条纹级数。同理晕点 A_{34} 含纯斜率 $\partial W/\partial y$ 信息。

晕点 (A_{14}, A_{23}) 是孔 A_1 、 A_4 的互相关频谱和孔 A_2 、 A_3 的互相关频谱的叠加, 含扭率信息, 在其中一个晕点上滤波, 则分析系统像面光强分布为

$$I_{\text{twist}} = |A^2 \exp[i(\phi_2 + \delta_x + \delta_y)] + A^2 \exp[i(\phi_4 + \delta_x + \delta_y)] + A^2 \exp[i(\phi_2 + \delta_{32} + \delta_x + \delta_y)] + A^2 \exp[i(\phi_4 + \delta_{14} + \delta_x + \delta_y)]|^2 = A^4 [4 + 4 \cos \frac{\delta_{32} + \delta_{14}}{2} \cos \frac{\delta_{32} - \delta_{14}}{2} + 2 \cos(\phi_2 - \phi_4) +$$

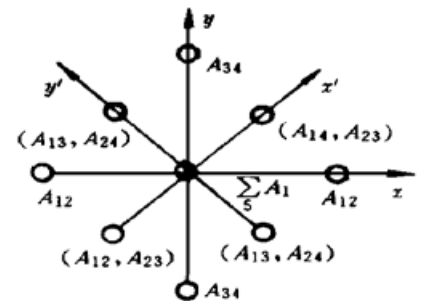


Fig. 3 Halo distribution

$$2 \cos (\phi_{32} - \phi_{14} + \delta_{32}) + 2 \cos (\phi_{32} - \phi_{14} - \delta_{14}) + 2 \cos (\phi_{32} - \phi_{14} + \delta_{32} - \delta_{14}) \quad (11)$$

考虑到面内位移可忽略, 则上式中低频项为

$$\left. \begin{aligned} \delta_{32} + \delta_{14} &= [2k\Delta_x'(1 + \cos \theta_x')] \partial W / \partial \alpha' \\ \delta_{32} - \delta_{14} &= [k\Delta_x'^2(1 + \cos \theta_x')] \partial^2 W / \partial \alpha' \partial y' \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

显然在晕点 (A_{14} , A_{23}) 上滤波将得到因两斜率条纹的错位而产生的扭率条纹, 而且

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \alpha' \partial y'} = \left\{ \begin{array}{ll} 4N\pi/[k\Delta_x'^2(1 + \cos \theta_x')] & \text{对应亮扭率条纹} \\ 2(2N + 1)\pi/[k\Delta_x'^2(1 + \cos \theta_x')] & \text{对应暗扭率条纹} \end{array} \right\} \quad (13)$$

同理晕点 (A_{13} , A_{24}) 含扭率 $\partial^2 W / \partial y' \partial \alpha'$ 信息。

2.2 动态双曝光记录

物体保持静止状态, 让锥镜和孔屏一起匀速旋转 $\pi/2$, 在锥镜和孔屏旋转过程中, 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 $\pi/2$, 并进行第二次曝光。此时所形成的衍射晕分布除中心亮斑外还有两个同心圆环[如图 4(a)所示]。外环上 $0 \sim \pi/2$ 或 $\pi \sim 3\pi/2$ 范围的不同晕点含不同时刻的斜率 $\partial W / \partial \alpha$ 信息, 在某晕点进行滤波将得到与该点对应的某时刻的瞬态斜率条纹, 依次在不同晕点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; 同理依次在外环上 $\pi/2 \sim \pi$ 或者 $3\pi/2 \sim 2\pi$ 范围的不同点滤波将得到所有各时刻的瞬态斜率 $\partial W / \partial \alpha$ 条纹。

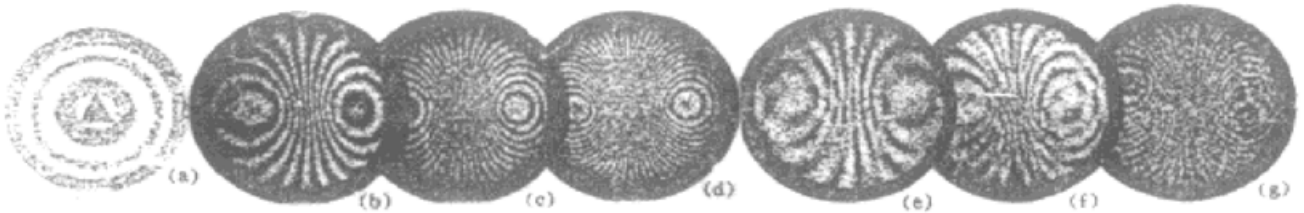


Fig. 4 Experimental results

内环上 $\pi/4 \sim 3\pi/4$ 或 $5\pi/4 \sim 7\pi/4$ 范围的不同点含不同时刻的扭率 $\partial^2 W / \partial \alpha' \partial y'$ 信息, 在不同点依次滤波将得到物体在变形过程中所有各瞬时的扭率条纹; 同理在内环上 $3\pi/4 \sim 5\pi/4$ 或 $-\pi/4 \sim \pi/4$ 范围的不同点依次滤波将得到物体各瞬时的扭率 $\partial^2 W / \partial y' \partial \alpha'$ 条纹。

3 实验结果

试件为直径 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在 $0 \sim 40 \mu\text{m}$ 范围内连续改变。用 1 m He-Ne 激光器作照明光源, 激光经扩束并准直后近似垂直照明试件。锥镜顶角 $\alpha = 12'$, 孔屏上四孔直径为 5 mm, 相邻孔中心间距为 28 mm。采用焦距为 240 mm 的相机和天津全息 I 型干板记录散斑图。

图 4 是实验结果。其中图 4(a) 为衍射晕; 图 4(b)、图 4(c)、图 4(d) 分别为在外环上 $0 \sim \pi/2$ 范围内三个不同位置滤波所得的对应于三个不同时刻的瞬态斜率分布的等值条纹图; 图 4(e)、图 4(f)、图 4(g) 分别为在内环上 $\pi/4 \sim 3\pi/4$ 范围内三个不同位置滤波所得的对应于三个不同时刻的物体瞬态扭率分布的等值条纹图。

图 5(a) 和图 5(b) 分别绘制了铝板在中心横向受载时斜率和扭率的空间分布图及其等值条纹图。其中斜率和扭率空间分布图是分别根据方程

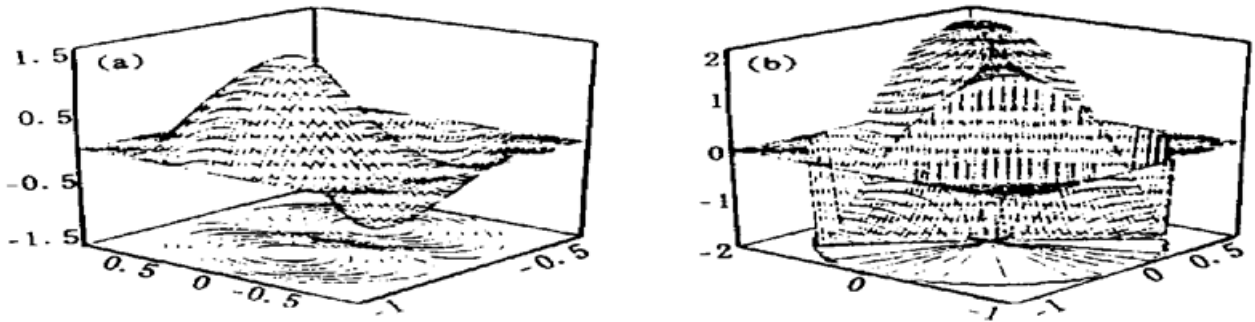


Fig. 5 (a) 3-D slope distribution surface and its contours; (b) 3-D twist distribution surface and its contours

$$\frac{\partial W}{\partial x} = (4W_0/a^2)x \ln(r/a), \quad \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} = (4W_0/a^2)(xy/r^2) \quad (14)$$

绘制的。式中 W_0 为铝板中心挠度, a 为铝板半径。图 6(a) 和图 6(b) 分别给出了铝板中心挠度 $W_0 = 25 \text{ mm}$ 时沿径向斜率分布的理论曲线和实验数据以及沿周向扭率分布的理论曲线和实验数据。其中实验数据由(10)式和(13)式分别求得。计算结果表明, 斜率的最大相对误差为 4.8%, 扭率的误差较大, 达到 9.4%。

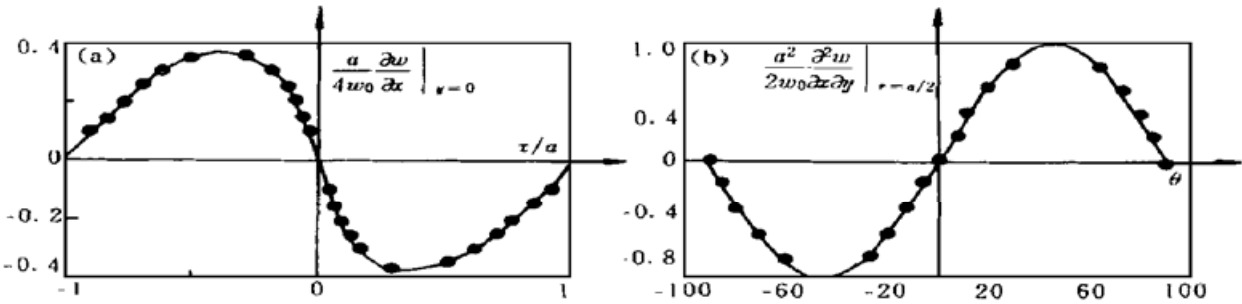


Fig. 6 (a) Theoretical and experimental values of slope; (b) Theoretical and experimental values of twist

结 论 理论分析和实验结果表明, 利用旋转锥镜散斑剪切照相法测量变形物体的动态斜率和扭率是可行的, 可对变形薄板进行实验应力分析。但在扭率条纹中因存在斜率条纹从而使扭率条纹的清晰度大大降低, 这给精确计算带来了一定的困难。

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~ 288
 [2] 王开福, 沈永昭, 旋转锥镜研测动态曲率和斜率. 光学学报, 1995, 15(9): 1271~ 1274
 [3] 王开福, 沈永昭, 五孔剪切相机同时测二维曲率、扭率和斜率. 光学学报, 1994, 14(1): 73~ 77

Dynamic Measurement of Slope and Twist by Rotating Cone-Glass Speckle Shearography

Wang Kaifu

(Mechanics Division, Yangzhou University Institute of Technology, Yangzhou 215006)

(Received 1 March 1997; revised 17 November 1997)

Abstract The rotating cone-glass speckle shearography used for dynamic measurement of slope and twist is discussed. The whole process can be recorded on a single specklegram. Optical systems are illustrated and experimental results are presented.

Key words speckle shearography, rotating cone-glass, twist, slope.