文章编号：1001-4888(2006)06-0667-22

剪切散斑：一种光学测量技术及其应用*

洪友仁[1]，何浩培[2]，何小元[3]

（1. 香港城市大学 制造工程与工程管理系，香港 九龙，Email：memhung@cityu.edu.hk；
2. 香港中文大学 电子工程系，香港 沙田，Email：hpho@ee.cuhk.edu.hk；
3. 东南大学 工程力学系，江苏 南京，Email：mmhxy@seu.edu.cn）

摘要：本文综述了剪切散斑测量技术及其成功的应用领域。剪切散斑技术是一种基于激光的全场、非接触表面变形(位移或应变)测量技术，它无需特殊的隔震装置，克服了因参考光束给全息干涉技术所带来的诸多限制。因此，它是用于现场测量的一个有效工具。剪切散斑测量技术已经得到了工业界的普遍认同，尤其是在工业无损检测方面更显示出了它的极大优势，它可以通过识别被诱发的异常变形来显示物体的内部缺陷。剪切散斑的应用还包括应变测量、材料特性表征、残余应力评估、泄漏探测、振动分析和三维形貌测量等。

关键词：剪切散斑；干涉术；散斑；位相识别；无损检测；变形测量；残余应力测量；振动分析；泄漏探测；表面轮廓术；三维形貌测量

中图分类号：O348　　**文献标识码**：A

0 引言

剪切散斑是针对全息术的不足而提出来的一种干涉计量技术。它最大的优点是：(1)无需参考光束，因而使得所用的光学装置变得简单、所需激光器的相干长度相对减小、对测量环境的隔震要求大大降低；(2)可以直接测量表面应变(表面位移的一阶导数)。由于这些独特的优点使剪切散斑测量技术成为一种有效实用的测量工具，并且在无损检测方面已经得到了工业界的广泛接受与认可。例如，在橡胶工业中剪切散斑已成为评价轮胎的常规检测手段，在航空航天工业中用它对飞行器结构，特别是复合结构进行无损检测。剪切散斑技术在其它领域的应用还包括：应变测量、材料特性检测、残余应力表征、三维形状测量、振动分析以及泄漏探测等等。

剪切散斑测量技术有三种记录方式：(1)照相记录；(2)热塑录像；(3)数字记录。其中，照相记录方式采用普通照相机，配以高分辨率的感光乳剂作为记录介质[1]。如图 1(a)所示，一个具有微小楔角的“屋顶”形棱镜被置于照相机镜头的前面使得物体表面的一点在照相机的像面上产生一对具有很小错位的两个像。同样，物体表面相邻的两个点经棱镜折射后，在像面处可以位于同一点上(如图 1(b)所示)。图像被错动的方向称之为图像的剪切方向。由于物体表面被激光(相干光)照明，使得由于错位产生的两幅剪切图像相互干涉而形成了一个包含随机干涉图样的剪切散斑场。剪切散斑的测量需要在同一照相底板上连续记录物体发生微小变形前和变形后的两幅散斑图样。在对经两次曝光的底板进行显影和定影的化学处理之后，再对底板进行傅立叶光学滤波处理，然后，代表位移在图像错位方向上导数的条纹图样将会显现出来。这一技术也被称之为双曝光剪切散斑。由于双曝光剪切散斑需要后续的傅立叶

* **收稿日期**：2005-10-09
基金项目：本文工作得到了香港研究资助局中央拨款资助计划(CityU 1/01C)的资助和香港研究资助局的研究资助(CityU 1196/02E)

滤波处理,因此,它不适用于实时测量的应用场合。另一种技术被称为实时剪切散斑[2],它无需傅立叶滤波处理就可以实时观察到物体的连续变形。在物体变形前,先在照相底板上记录一组物体表面的散斑图案,然后,把经显影、定影处理过的照相底板放回到照相机内原来的底板位置上,就可以从底板的后面看到一个活动的条纹图样。在实时剪切散斑中,由于经显影、定影处理后的底板需要精确复位,因此,实际操作起来是相当困难的。用照相底板进行记录的主要缺点还在于它既费工又费时的照相底板化学处理过程。高分辨率照相底板的成本也进一步阻碍这种实时剪切散斑技术的工业实施。

热塑记录法[3]使用相同的光学装置(如图 1),在这里可以重复利用的热塑板代替了照相底板,用这一方法记录后的热塑板可以被即时处理。虽然排除了对照相底板进行化学处理所带来的不便,但仍需进行傅立叶滤波处理。而且,热塑记录法不能用于实时测量。热塑板的成本也同样阻碍了热塑记录法的工业应用。况且,热塑板成品质量的一致性也是非常难以保证的。

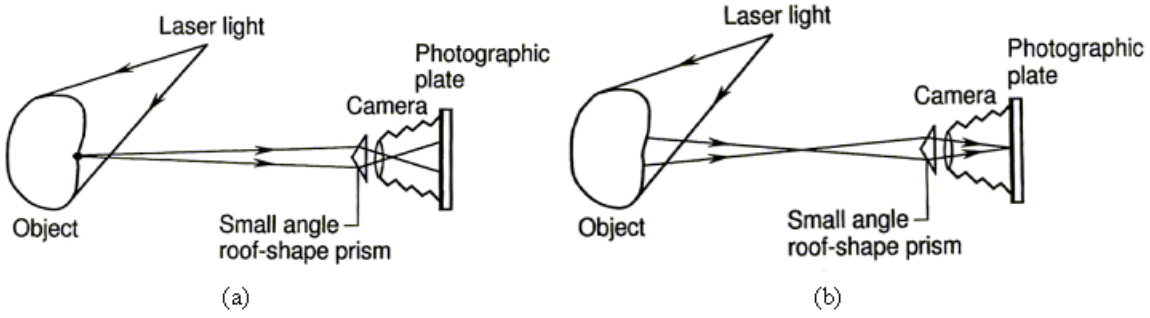

图 1 照相剪切散斑示意图。(a)用"屋顶"形棱镜产生一对错位图像的图像错位相机;(b)同样地,用作错位装置的屋顶型棱镜也可使物体上相邻两点的漫射光在像平面相遇并干涉

Fig. 1 Schematic diagram of photographic shearography. (a) The image-shearing camera is equipped with a roof-shape prism which produces a pair of laterally-sheared images; (b) Conversely, the roof-shape prism (as shearing device) brings rays scattered from two neighboring object points to meet and interfere in the image plane.

数字剪切散斑[4]使用图像传感器(如 CCD)作为记录介质,并且用数字处理技术进行数据的获取和分析。避免了照相记录和热塑记录的消耗品使用,数字剪切散斑不需依靠傅立叶滤波就能实现条纹再现,因此,使得实时测量和检测成为可能。数字剪切散斑的关键在于它可以直接并且自动地测量位相变化(亦即应变)而无需进行条纹重建。本文将着重讨论数字剪切散斑技术及其应用。

1 数字剪切散斑的原理

1.1 数字剪切散斑技术

如图 2 所示,数字剪切散斑需要使用一个激光点光源照明被测物体,同时一个与微型计算机相连的视频剪切摄像头用于记录和处理数字信号。该摄像头包括一个 CCD 图像传感器和一个用于图像错位的双折射棱镜(例如渥拉斯顿棱镜)。用双折射棱镜进行图像错位的原理如图 3 所示。图 3(a)表明通过这种棱镜的一束光可以被分解为成一定夹角的两束光。相反地,来自物体上不同两点互不平行的散射光线通过该剪切装置后可以在一条直线上,用像 CCD 这样的低分辨率图像传感器就可以解析所形成的低频干涉条纹。这一点可以通过图 3(b)得到解释。沿图像剪切装置两轴传输的两错位波前,由于它们具有相互正交的偏振方向,因此它们不能相互干涉。要使它们发生干涉,需要加一个偏振镜,其偏振方向应在与光波的偏振方向成 45 度的方位上。由于被照明的表面为一般的光学粗糙表面,两束错位波前将干涉产生剪切散斑图样。图 4 所示是经放大的剪切散斑图样。

当物体发生变形时散斑图样也发生微小改变。数字剪切散斑技术的实现是通过图像采集卡相继对被测物体发生微小变形前后的散斑图样进行数字化并输入微型计算机(如图 2)。正如将要在 1.2 节讨论的那样,两幅散斑图样的差将使得代表图像剪切方向的位移导数的条纹图案得以再现。图像采集卡在线处理功能的使用可以进一步实现视频速率的实时条纹再现。尽管数字剪切散斑也可以采用迈克尔

逊干涉仪来实现[5,6],但作者更偏爱双折射棱镜,因为它具有更高的光学效率、更宽的视场范围和更高的条纹质量。渥拉斯顿棱镜用于剪切散斑和全息测量的一个统一的方法曾在文献[7]中有过报道。

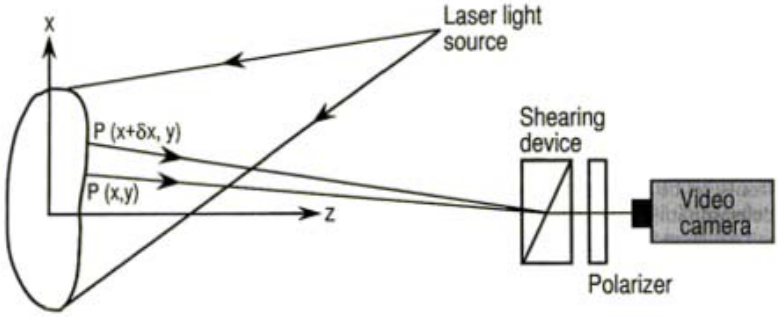

图 2　数字剪切散斑示意图。这里将一个双折射棱镜用作错位装置。

Fig. 2　Schematic diagram of digital shearography. Note that a double-refractive prism is used as a shearing device.

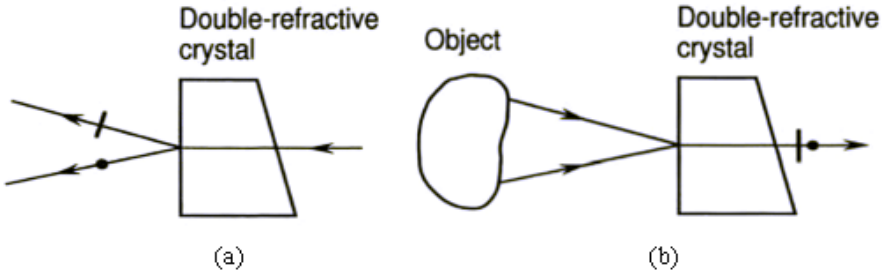

图 3　双折射棱镜用作错位装置图解。(a)一束光被分解为成一定夹角且具有相互正交偏振状态的两束光。(b)相反地,来自物体上不同两点且互不平行的两漫射光束经棱镜后成为共线光束。

Fig. 3　Illustration of the doubly-refractive prism as a shearing device. (a) One light beam is split into two angularly separated and orthogonally polarized beams. (b) Conversely, two nonparallel rays scattered from two different points on the object are combined and become collinear.

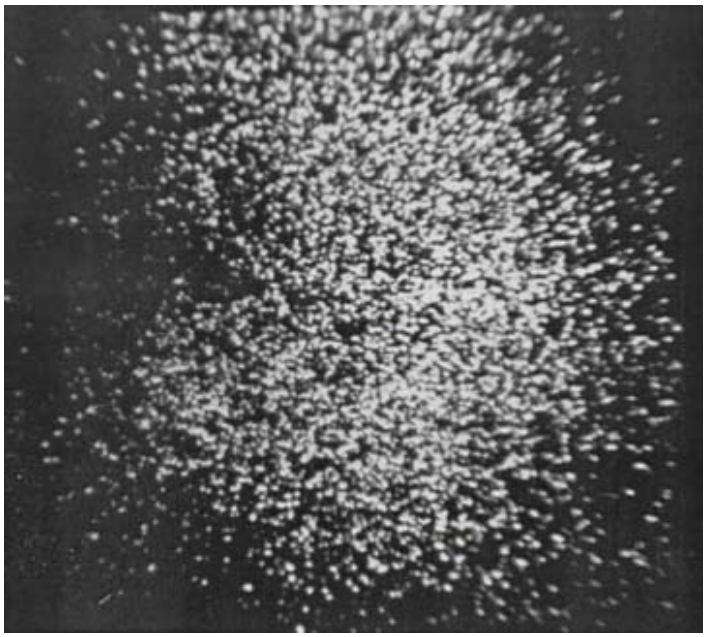

图 4　放大的散斑图样(随机干涉图样)

Fig. 4　A magnified speckle pattern (random interference pattern)

1.2 条纹形成的原理

剪切散斑图像可以用下式表达：

$$I = I_0[1 + \mu\cos\varphi] \tag{1}$$

这里 I 是摄像机像面上散斑图样的光强分布；I_0 是背景光强(也可以理解为直流项)；μ 是散斑图样的调制幅值；φ 是随机位相角。物体变形后，散斑图样的光强分布变为 I'，并且可以通过下式进行描述：

$$I' = I_0[1 + \mu\cos(\varphi + \Delta)] \tag{2}$$

这里 Δ 表示由于表面变形引起的相位变化。

注意到方程(1)和(2)所包含的随机相位角 φ，因此，不可能简单地从这些图像中获取可以被解释的信息。然而，如果计算一下两幅散斑图案(方程(1)和(2))的强度差即可产生一个可见的条纹图案，并且可以通过下式加以描述：

$$I_d = 2I_0\left[\mu\sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right)\sin\left(\frac{\Delta}{2}\right)\right] \tag{3}$$

这里，I_d 是两幅散斑图对应像素的强度差。方程(3)所表明的条纹图案信息代表了条纹的相位 Δ。这里暗条纹对应于 $\Delta = 2n\pi$，$n = 0,1,2,3,\cdots$ 是条纹级次，而亮条纹则对应于半数级条纹。图 5(a)为一周边固支的矩形板受侧向均布载荷作用时，并且图像沿 x 方向错位的剪切散斑图，图 5(b)则是图像沿 y 方向错位的剪切散斑图。值得注意的是，为了用于图像显示，在这里，I_d 不能为负值，要取绝对值。

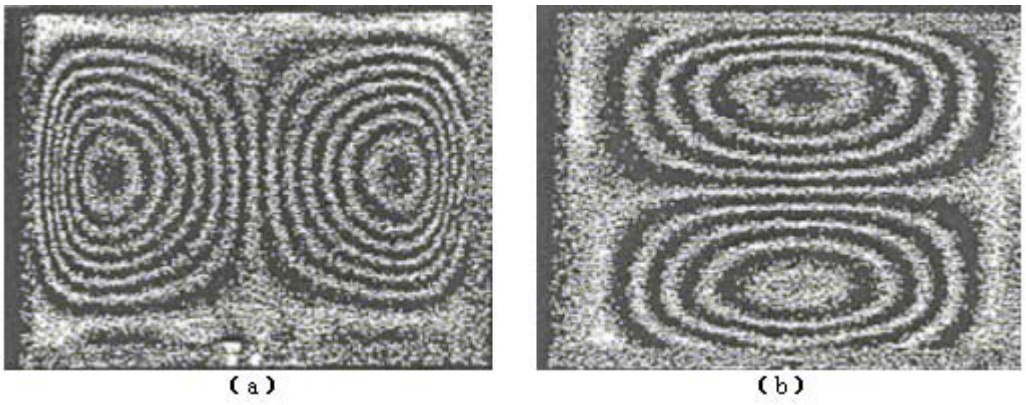

图 5 描述周边固支矩形板受均布压力时挠屈梯度的条纹图样(a)$\partial w/\partial x$ 和 (b)$\partial w/\partial y$

Fig. 5 Fringe patterns depicting the deflection derivatives of a rectangular plate clamped along its boundaries and subjected to uniform pressure: (a) $\partial w/\partial x$, (b) $\partial w/\partial y$

1.3 条纹解释

若考虑图像在平行于 x 轴的方向上产生 δx 的的剪切量，则物体上相邻两点 $P(x, y, z)$ 和 $P(x+\delta x, y, z)$ 漫射光的相对光程变化所产生的位相变化为方程(2)中的 Δ。同样，Δ 也可以用来表示该相邻两点间相对位移所对应的位相变化，如下式：

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}(A\delta u + B\delta v + C\delta w) \tag{4}$$

这里，(u, v, w) 和 $(u+\delta u, v+\delta v, w+\delta w)$ 分别是矢量 $P(x, y, z)$ 和 $P(x+\delta x, y, z)$ 的位移，λ 是激光的波长，A，B，C 为相对于光源位置 $S(x_s, y_s, z_s)$ 和摄像机位置 $O(x_0, y_0, z_0)$ 的敏感因子，其表达如下：

$$\begin{aligned} A &= \frac{(x - x_0)}{R_0} + \frac{(x - x_s)}{R_s} \\ B &= \frac{(y - y_0)}{R_0} + \frac{(y - y_s)}{R_s} \\ C &= \frac{(z - z_0)}{R_0} + \frac{(z - z_s)}{R_s} \end{aligned} \tag{5}$$

并且，$R_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2$ 及 $R_s^2 = x_s^2 + y_s^2 + z_s^2$。当仅考虑物体表面时，$z$ 将不是一个独立的变量，$z=$

$z(x,y)$可用来描述一个物体表面。而方程(4)可以写成:

$$\Delta=\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left[A\frac{\delta u}{\delta x}+B\frac{\delta v}{\delta x}+C\frac{\delta w}{\delta x}\right]\delta x \tag{6}$$

微小的图像错位产生一个微小偏移量 δx。方程(6)中诸相对位移项也相应地可以被看作为位移 u, v, w 在图像错位方向 x 的偏导数。因此,方程(6)成为

$$\Delta=\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left[A\frac{\partial u}{\partial x}+B\frac{\partial v}{\partial x}+C\frac{\partial w}{\partial x}\right]\delta x \tag{7}$$

绕光轴旋转图像错位装置(如图 2)将改变图像的错位方向,改变后的条纹图案代表位移在当前图像错位方向的导数。因此,如果沿 y 方向图像的错位为 δy,则方程(7)将改为以下形式:

$$\Delta=\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left[A\frac{\partial u}{\partial y}+B\frac{\partial v}{\partial y}+C\frac{\partial w}{\partial y}\right]\delta y \tag{8}$$

因此,对于发生侧向位移的板,图 5(a)和(b)中的条纹图也就相应地代表$\partial w/\partial x$ 和$\partial w/\partial y$ 。所以,用一个可以多方向错位的图像错位摄像机就可以同时记录对于 x 和 y 方向的位移导数[8]。

1.4　条纹位相自动测定

传统的剪切图案分析方法依赖于再现的可见条纹和条纹级数的正确判断(方程(3))。因此,只有在出现明条纹和暗条纹的地方条纹级数才能被正确地确定,其它地方的条纹级数只能用线性插值进行估计,尽管条纹载波方法的发展可以减轻一些不确定性。下面介绍一种不需要依靠条纹重建和条纹级数判断就能直接获得每一个数值点上位相变化 Δ 的自动处理方法。由此可以看到数字剪切散斑极大的优越性。

分析一下方程(1)和(2)可以看到,在方程(1)和(2)中有四个未知数,即 I_0, μ, φ 和 Δ;通过在方程(1)和(2)中添加已知位相的方法,产生附件方程就可以求解这些未知数。这是用于数字剪切散斑位相自动判别的相移技术的基础。常用的相移方法有:(1)转动物体,(2)转动物光,(3)平移图像错位装置,(4)基于偏振光的波前处理和(5)使用可变的光波延迟器。在这些方法中,作者更青睐于使用可变的光波延迟器。

图 6 所示是用一个可变的液晶光波延迟器进行相移的光路布置。延迟器由计算机控制,被置于图像错位装置前面,与此同时,它的快慢轴被对准于图像错位装置的两个偏振轴上。这样的布置可以改变两错位波前之间的位相差(见下面的方程(9))。根据多幅相移散斑图可以采用不同的算法来确定位相[9],本文仅介绍四幅图的算法。对方程(1)所表示的散斑图进行四步相移,每步增加 $\pi/2$,可以产生以下四幅散斑图:

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_0[1+\mu\cos(\varphi+0)]\\
I_2 &= I_0[1+\mu\cos(\varphi+\frac{\pi}{2})]\\
I_3 &= I_0[1+\mu\cos(\varphi+\pi)]\\
I_4 &= I_0[1+\mu\cos(\varphi+\frac{3\pi}{2})]
\end{aligned} \tag{9}$$

因此,位相分布 φ 可用以下方程确定。

$$\varphi=\arctan\frac{(I_2-I_4)}{(I_3-I_1)} \tag{10}$$

对于方程(2)所表示的变形后散斑图重复以上处理,同样可以得到:

$$\varphi+\Delta=\arctan\frac{(I_2'-I_4')}{(I_3'-I_1')} \tag{11}$$

把方程(11)减去方程(10)就可以得到由于变形引起的位相变化分布 Δ。然而,这样计算出来的位相变化值 Δ 被限制在 $-\pi\sim\pi$ 之间变化,由 Macy[10] 提出的解包裹算法可以用来展开上述位相值。应该指出的是 Δ 的确定是基于在变形过程中随机位相 φ 保持不变的假设,否则 φ 将不能被完全从方程(10)和(11)中抵消。在位相解包裹的过程中可能遇到的一个问题是噪声的存在。研究发现,迭代降噪算法[11]对于解决这一问题是非常有效的。图 7 是图 5(a)和(b)所示条纹图案位相变化分布的三维图形。

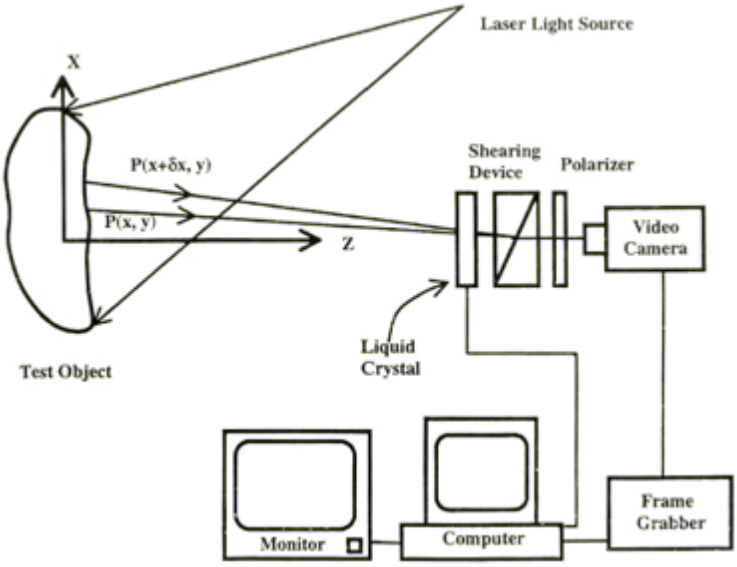

图 6 具有相移功能的数字剪切散斑。相移装置是计算机控制的可调液晶光波延时器。

Fig. 6 Digital shearography with phase-shift capability. The phase shift device is a computer-controlled variable wave-retarder made of liquid crystal.

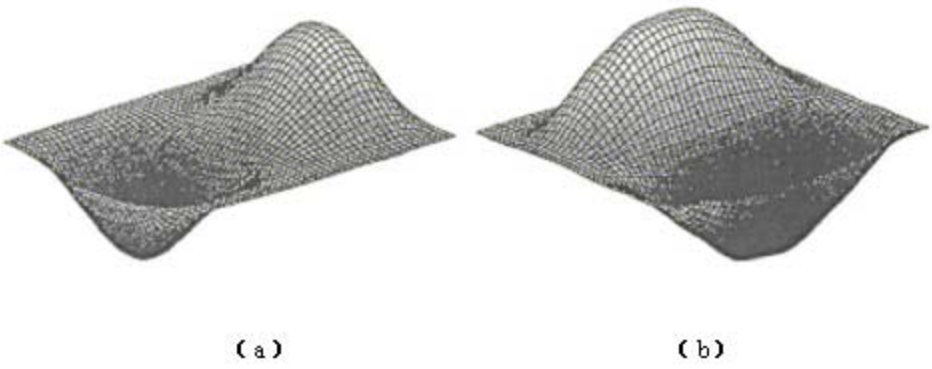

图 7 由自动位相识别算法得到的板变形(图 5)的位相分布三维图:(a)$\partial w/\partial x$,(b)$\partial w/\partial y$

Fig. 7 Three-dimensional plot of: (a) $\partial w/\partial x$, (b) $\partial w/\partial y$ of the plate deformation of Fig. 5 obtained by the automated phase determination algorithm.

2 应用

2.1 一般表面变形测量

方程(7)包含三个位移导数分量,即$\partial u/\partial x$,$\partial v/\partial x$和$\partial w/\partial x$,为了分离这三个分量,需要用不同的敏感因子 A, B, C 测量三次。然而,如果物体的几何尺寸与照明和记录的距离相比非常小,敏感因子可被近似为:

$$\begin{aligned} A &= \sin\alpha \\ B &= \sin\beta \\ C &= 1+\cos\gamma \end{aligned} \tag{12}$$

这里,α和β分别是照明方向与 yz 平面和 xz 平面所成的夹角;γ是照明光束与 z 轴(也是摄像机镜头的成像方向——光轴)之间的夹角。

安排光路的布置使 $\beta=0$,敏感因子 B 也成为零,这样的测量光路对$\partial v/\partial x$将不敏感。因此,该光学系统可以测量$\partial u/\partial x$和$\partial w/\partial x$的组合。同样地,对于 $\alpha=0$ 的光路布置将可以用来测量$\partial v/\partial x$和$\partial w/\partial x$

的组合。然而,要从这种光路中分离出$\partial v/\partial x$是不可能的,因为敏感因子 C 永远取不到 0 值。

采用类似的光路布置,方程(8)中的三个位移导数分量也可以被确定下来。因此,三光束剪切散斑可以被用于一般表面变形测量[12]。

2.2　离面位移测量

如果使照明方向和成像的方向都平行于 z 轴,则敏感因子 A 和 B 都为 0 值。因此,这样的光路布置仅测量$\partial w/\partial x$。图 5 所示的变形条纹就是用这种光路得到的结果。

2.3　面内应变测量

面内应变可以用以下两个表面正应变分量和一个剪应变分量来表达:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{13}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

使用单光束照明不可能直接测量面内位移的导数而不受离面位移导数的影响(2.1 节)。但是,若采用双光束剪切散斑这将是可能的[13]。如图 8 所示,被测物被两束与 z 轴成相同夹角的准直激光束照明,并且激光束的方位由待测的面内应变分量所确定。在图 8 中,照明光束的方向与 yz 平面成对称分布,所以只能测量 ε_x。在测量过程中,采用 1.4 节所描述的相移技术可以确定每一光束相对于变形的位相变化。对于相同的变形,由于不同的照明方向所产生的位相变化的差值即为计算 ε_x 的依据。图 9(a)所示是自由端受集中载荷悬臂梁的 ε_x 条纹图。实验的条纹图与图 9(b)所示的理论条纹图相比具有很好的一致性。

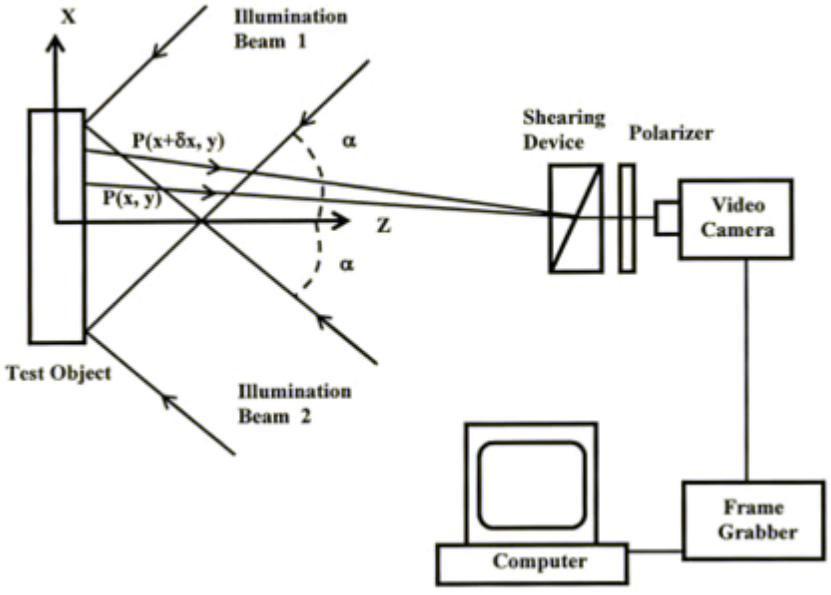

图 8　测量面内应变的双光束技术示意图

Fig. 8　Schematic diagram of dual-beam technique for measuring in-plane strains

对双光束剪切散斑的原理可以作如下简述。由右手边光束 1 照明所得的位相变化由下式给出:

$$\Delta_r = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left[(\sin\alpha)\frac{\partial u}{\partial x} + (1+\cos\alpha)\frac{\partial w}{\partial x}\right]\delta x \tag{14}$$

对于相同的变形,由左手边光束 2 照明所产生的位相变化可改写方程(14)为以下表达:

$$\Delta_l = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left[(-\sin\alpha)\frac{\partial u}{\partial x} + (1+\cos\alpha)\frac{\partial w}{\partial x}\right]\delta x \tag{15}$$

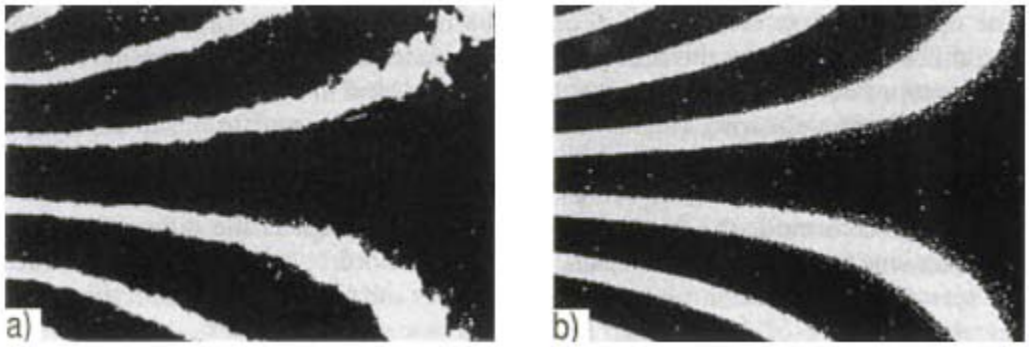

图 9 代表悬臂梁水平面内应变分量 ε_x 的条纹图。(a)双光束剪切散斑测量结果和(b)理论计算结果。

Fig. 9 Fringe patterns depicting ε_x, the horizontal in-plane strain component of the cantilever beam. (a) Result of the dual-beam shearography, (b) theoretical result.

方程(14)减去方程(15)可得由于不同照明方向产生的位相变化的差值 Δ_d。因此

$$\Delta_d = \Delta_r - \Delta_l = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)(\sin\alpha)(\delta x)\frac{\partial u}{\partial x} \tag{16}$$

对照方程(13)可知,Δ_d对应于正应变分量 ε_x。而若使照明光束与 xz 平面成对称分布并且图像的错位方向平行于 y 轴,则方程(16)中的$\partial u/\partial x$ 将变为$\partial v/\partial y$,即 ε_y。用同样的方法,通过调节照明光束的方位,任一方向的面内应变都可以被测量出来。以三个不同的方向照明,测量系统即等同于一个全场应变花,即可以确定一个完整的面内应变状态。

双光束布置也能得到离面位移的导数。这可以通过把方程(14)和(15)相加而得到,从位相的和值 Δ_s 可以直接测量$\partial w/\partial x$,Δ_s 由下式给出:

$$\Delta_s = \Delta_r + \Delta_l = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)(1+\cos\alpha)(\delta x)\frac{\partial w}{\partial x} \tag{17}$$

并且,用同样的方法也可以确定$\partial w/\partial y$。

2.4 两个不同物体变形的比较

图 10 所示的光路布置能用于比较两个不同物体的变形。在这一光路中,来自一点的相干光源同时照明两个不同的物体(被测物和参考物),并且一个具有大错位量的双折射错位晶体被用于将两个物体的像错位重叠,并在摄像机的 CCD 传感器上发生干涉。在这种光路布置中,一个物体充当另一物体的参考物。当两个物体都发生变形时,所产生条纹代表两个物体之间的变形差。如果仅一个物体(被测物)发生变形,则该光路可以测量被测物体的表面位移。当然,这产生了与全息或电子散斑干涉(ESPI)相同的结果。可是,光路布置得到了极大的简化。图 11 显示了用这一方法获得的条纹图案,它代表了周边固支的矩形板中心受集中载荷作用时的侧向变形。

2.5 残余应力测量[14,15]

在残余应力测量中,盲孔法是一个惯用的方法,应变花的使用可以确定一定钻孔量下的应变释放量。这需要特殊的应变花装置,并且钻孔与应变计的位置要严格对准。不仅如此,应变花的有限尺寸也阻碍了钻孔边缘的测量。对较小的被测物,如在微电子封装中,应变花的粘贴是不可能的。并且对于一些低硬度的材料,应变计将会改变实际结构的行为。剪切散斑,相当于一个非接触的光学应变花,已经被用于塑料和复合材料的残余应力测量[16]。当使用钻孔法使被测结构的残余应力得到释放时,图 12 所示的三种条纹图案揭示了不同的残余应力程度。

用微压痕法取代钻孔法可以实现快速剪切散斑残余应力测量。用一个大错位量的图像错位装置可以使被测物上相距较远的两个不同区域所发出的光波在像面上形成散斑图案。这等效于比较用作参考的物体和被测物体之间两个不同区域的变形。由于微压痕导致应力释放仅伴随邻近区域的变形,而压痕以外的区域几乎不受应力释放的影响,所以,这些区域可以近似地用作参考表面。因此,这一技术可

以测量压痕附近的绝对位移。

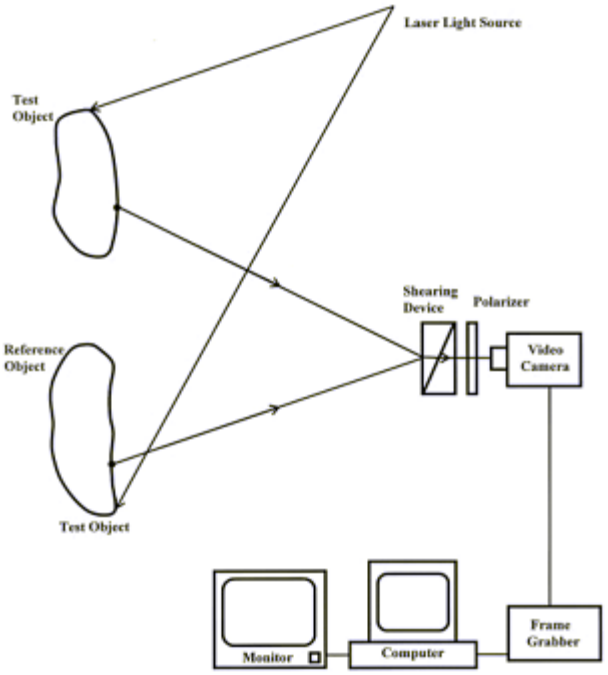

图 10　比较两个不同物体变形的光路布置。注意到如果其中的参考物不变形,则该光路的作用相当于测量被测物表面位移的 ESPI 光路的作用。

Fig. 10　Optical arrangement for comparing deformations of two different objects. Note that if the reference object is not deformed, the setup is equivalent to ESPI which measures surface displacement of the test object.

图 11　采用图 10 所示的光路布置,对于不变形的参考物,代表矩形板侧向位移的条纹图案。

Fig. 11　Fringe pattern depicting the deflection of a rectangular plate using the setup of Fig. 10 with the reference object not deformed.

如图 13(a)所示,将微压痕法用于没有残余应力的被测物所得到的条纹几乎是中心对称的。而残余应力存在将使条纹图案变为非中心对称的(图 13(b))。主应力的方向就是对称轴的方向,并且残余应力的大小即与偏离对称轴的程度有关。由于微压痕引起应力释放而导致应力重新分布的力学问题非常复杂,而其研究又希望实现残余应力的定量测量。但尽管如此,这一技术还是可以提供一个快速的残余应力定性分析方法,并且可以直接用于现场和生产的环境之中。况且,压痕是如此之小而浅(只有几微米的深度)以致于可以认为这一技术是非破坏性的。

2.6　稳态振动研究

2.6.1　时间积分剪切散斑[17,18]

对于稳态振动的被测物体,方程(2)中的位相变化 Δ 可以描述为时间的正弦函数。时间积分剪切散斑技术被研究用于测量振幅的导数。光路布置与图 2 所示相同,所不同的仅是被测物处于稳定的振动状态。在记录过程中,图像错位摄像机的 CCD 传感器在大于数个振动周期的时间间隔内对振动物体的光强进行积分。累积的散斑图案光强 I_a 由以下方程给出:

$$I_a = I_0\left[1+\mu\cos(\varphi)J_0\left(\kappa\frac{\partial A}{\partial x}\right)\right] \tag{18}$$

这里,$\partial A/\partial x$ 是振幅的导数;$\kappa=(2\pi/\lambda)(1+\cos\gamma)$ 是敏感因子;J_0 是零阶的第一类贝塞尔函数。在推导方程(18)的过程中,假设振动只有离面位移并且图像的错位方向平行于 x 轴。

对方程(18)施加 π 的相移量可得以下方程:

$$I_b = I_0\left[1+\mu\cos(\varphi+\pi)J_0\left(\kappa\frac{\partial A}{\partial x}\right)\right] \tag{19}$$

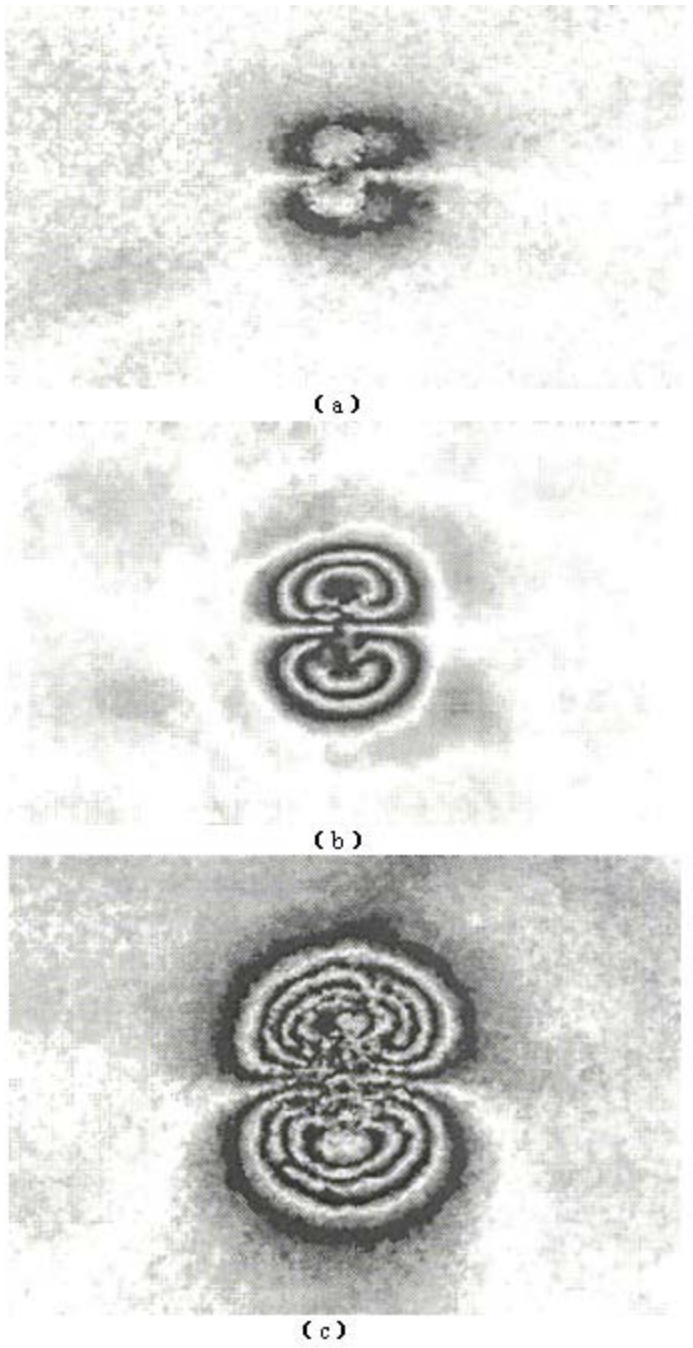

图 12 (a-c) 代表一复合材料板中三种不同残余应力水平的条纹图案

Fig. 12 (a-c) Fringe patterns depicting three different levels of residual stresses in a composite panel

取方程(18)和方程(19)的差值,可得下列方程:

$$I_{a-b} = 2\,I_0\left[\mu\cos(\varphi)\,J_0\left(\kappa\frac{\partial A}{\partial x}\right)\right] \tag{20}$$

这可以很容易地得到一幅可见的条纹图案,并且当满足以下条件时形成黑条纹:

$$\left[J_0\left(\kappa\frac{\partial A}{\partial x}\right)\right] = 0 \tag{21}$$

变量$\partial A/\partial x$可以通过令贝塞尔函数的坐标自变量等它的根来确定。图 14 所示是两幅典型的条纹图,分别对应于周边固支的矩形板以其基频 630Hz 振动时的振幅和振幅的导数。

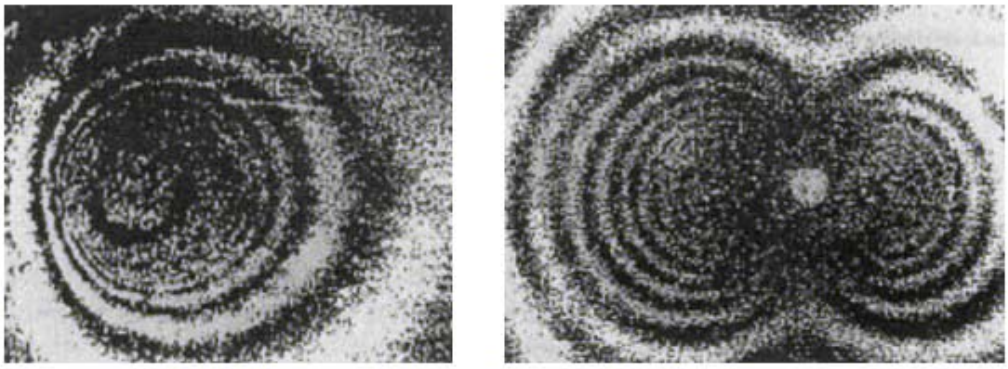

图 13　用微压痕方法释放残余应力:(a)没有残余应力,(b)有残余应力

Fig. 13　Fringe patterns using micro-indentation as a means of stress release. (a) without residual stress, (b) with residual stress

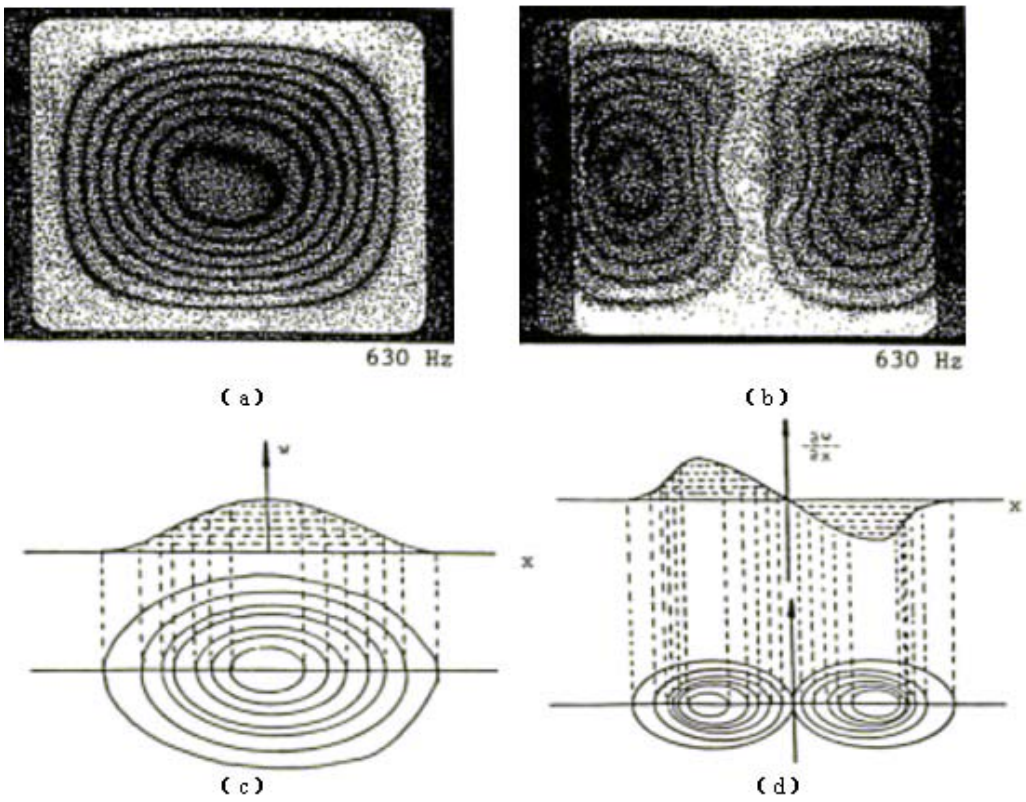

图 14　以基频振动的矩形板的时间积分条纹图(a)振幅和(b)振幅对 x 的导数;沿板的水平中心线方向的振幅分布和振幅导数分布分别示于(c)和(d)。

Fig. 14　Time-integrated fringe patterns depicting (a) the vibration amplitude and (b) the amplitude derivative with respect to x of a rectangular plate vibrating at its fundamental mode; their corresponding plots along the plate's horizontal center line are shown in (c) and (d), respectively.

2.6.2　频闪剪切散斑[19]

研究稳态振动的另一种方法是频闪技术。在频闪剪切散斑中,振动物体被激光以频闪方式照明,利用低的占空度(曝光时间相对于振动周期的比)可使 CCD 的曝光仅发生在振动的波峰处。通过与静止状态物体的图像进行比较,所产生的条纹图案就代表了物体振幅的导数。注意到时间积分剪切散斑所

产生的条纹图案降低了条纹的可见度(因为贝塞尔函数的调制)并且其位相不能用相移技术得到确定。用频闪技术得到的条纹图是正弦变化的,因此可以用相移技术自动地确定条纹的位相(1.4 节)。图 15 展示了频闪技术的一个测量结果。

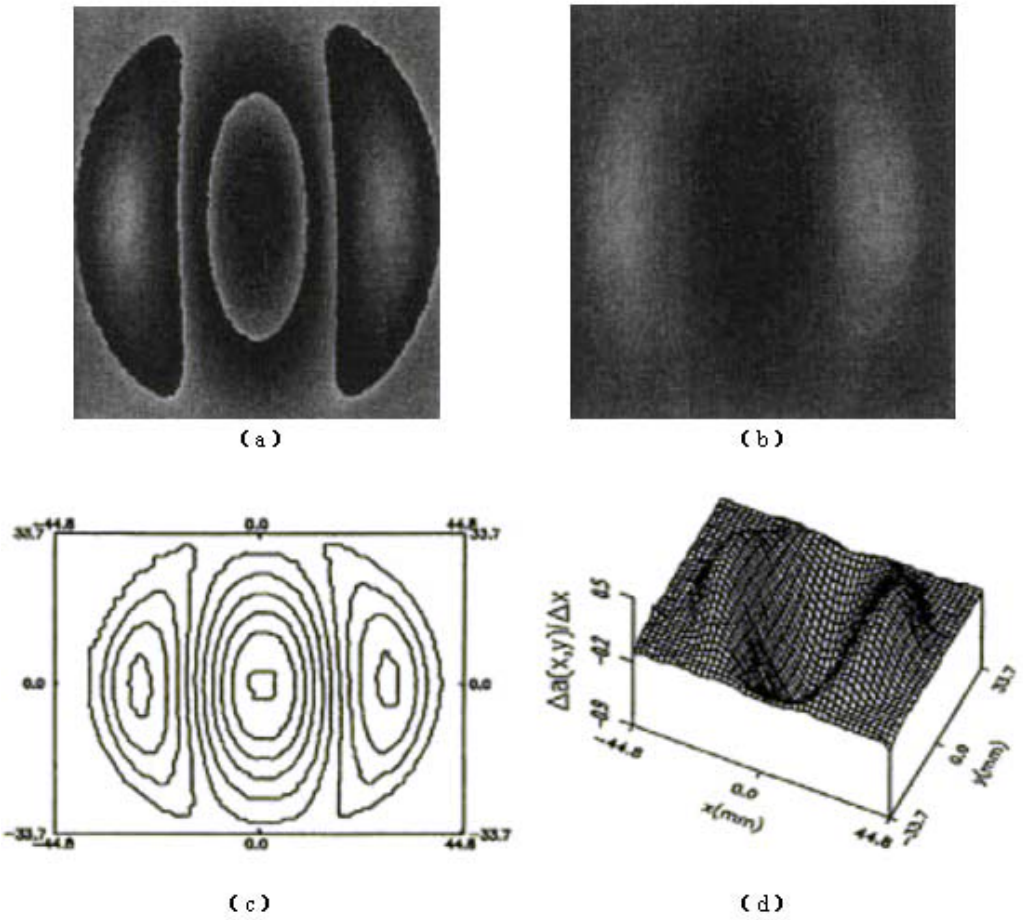

图 15 以 3.07kHz 振动板的频闪剪切散斑实验结果。(a-b)解包裹前后的位相分布图,(c-d)振幅对于 x 方向导数的二维和三维分布图。

Fig. 15 Result of stroboscopic shearography of a vibrating plate at 3.07 kHz. (a-b) Phase maps before and after unwrapping, (c-d) 2D and 3D display of the amplitude derivative with respect to x.

2.7 时间相关变形测量

利用连续采集变形物体散斑图案的技术[20]可以测量物体随时间变化的变形。在感兴趣的点处位移梯度与时间的关系可以从被存于计算机内存内随时间变化的位相变化图中提取,并且总的位相变化可以通过将位相变化曲线对时间积分而得到。对于低应变率的情况,一个商品化的录像机就可用于以每秒 30 帧的速度记录散斑图案。对于高应变率的变形,亦已开发了基于高速数字图像采集系统的高速剪切散斑[21]。作者们所采用的图像采集系统是柯达 EktaPro 4540 型高速运动分析仪,其最大采集速率为每秒 40500 帧。记录下的图像可以以每秒 2～30 帧的速度回放。回放的图像再通过微型计算机中的图像采集卡进行数字化。从任意两幅散斑图案的差中也同样可以重建条纹图案。除了可以测量随时间变化的变形之外,高速剪切散斑也已经被用于微电子封装密封的快速评价[22]。

2.8 无损检测[23-25]

2.8.1 剪切散斑如何检测缺陷?

当对一个含有缺陷的物体施加载荷时,在缺陷的附近将会产生应变集中。如果物体中的缺陷不是太深,则所产生的应变集中将会引起表面应变分布的异常。同样,如果在加载前后抓取两幅散斑图像,

则应变的异常就转化为条纹的异常。因此,通过对异常条纹的辨别就可以揭示物体表面和内部的缺陷;并且也可以进行全场的非接触检查。

2.8.2　剪切散斑与超声波

剪切散斑在无损检测中已有广泛的应用,并且作为一个有用的无损检测手段已经得到工业界的广泛承认,特别是对于复合结构,如轮胎和蜂窝结构等。它对于发现层间剥离尤其有效。图 16 所示是对一个复合材料试样分别进行数字剪切散斑和 C-扫描超声探伤的测试结果比较。两项技术都能容易地揭示边缘的脱落和剥离。用数字剪切散斑,在一秒钟内缺陷就能被揭示出来,而超声技术需要沿测试表面进行逐点扫描,同时必须保证传感器与测试表面之间有适当的液体耦合。然而,由于剪切散斑技术的基本原理是基于测试表面的状态变化,因此,其局限性在于检测过程中它需要对被测物施加适当的应力增量。

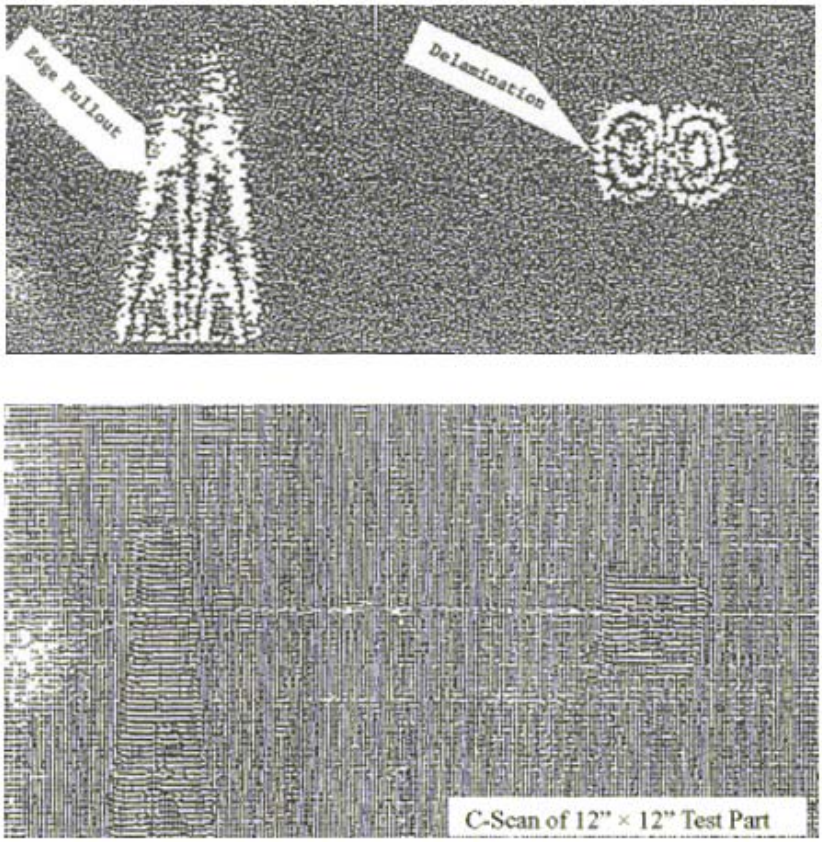

图 16　剪切散斑与 C-扫描超声波方法的比较。两种技术都能揭示复合材料板的边缘剥落和层间剥离。所需时间:超声波 10 分钟,剪切散斑 1 秒钟。况且,超声波检测必须要有耦合液体。

Fig. 16　Comparison of shearography with C-scan ultrasound. An edge pullout and a delamination in a composite panel are revealed by both techniques. Time required: 10 minutes for ultrasound and 1 second for shearography. Moreover, fluid coupling is needed in ultrasonic testing.

2.8.3　施加应力的方法

从本质上讲,剪切散斑无损检测过程的改进已经成了能使物体容易地显示缺陷的实际应力施加方法的改进。理想情况下,所施加的应力增量应该类似于物体的工作应力,以使得对物体工作寿命有影响的那些缺陷能被揭示出来,而使那些对被测结构的完整性不构成危害的缺陷能被忽略掉。这样做将使得在检测过程把无需判为不合格品的成品判为不合格的可能性降到最小。在这一点上,剪切散斑优于超声检测,因为后者是靠识别物体内部的不均匀性来检测缺陷而不能提供缺陷危险程度的直接信息。然而,在剪切散斑测试中,要精确地复制实际的应力增量通常是困难的。因此,必须研究各种不同的对

物体施加应力的方法。在研究这些方法的过程中,特别值得注意的一点就是,在对物体施加应力时要限定刚体位移的发生,因为过大的刚体运动将会引起散斑之间丧失相关性,其结果是降低了条纹的质量。

过去用于全息无损检测的各种施加应力的方法[26]通常都可用于剪切散斑无损检测。这些常用的方法还不致引起被测物过大的刚体运动,这些方法包括:施加压力、抽真空、加热和声波或机械激励等。用微波检查塑料和非金属复合材料中的湿气是特别有效的,但是必须认真注意安全防护的问题。下面是一些用不同方法施加应力的例子。

图 17 所示是使用内部增压来揭示钢质压力容器内部裂缝的例子。图 18 是使用部分抽真空施加压力的方法来揭示一个大型索加固橡胶板由于疲劳破坏引起多处分离的例子。图 19 是使用热辐射施加热应力的方法成功发现复合涡流叶片中裂缝的例子。图 20 表现了在胶接复合材料装配中使用多频激振方法激励,并用剪切散斑技术进行检测所得的结果[27]。粘结完好的区域表现为暗色,而那些不是很暗的区域为不太牢固的粘结,同时没有粘结好的地方表现为明亮的区域。可以看到,在图 20 中有两条粘结线和一个非粘结以及多个弱粘结区存在。

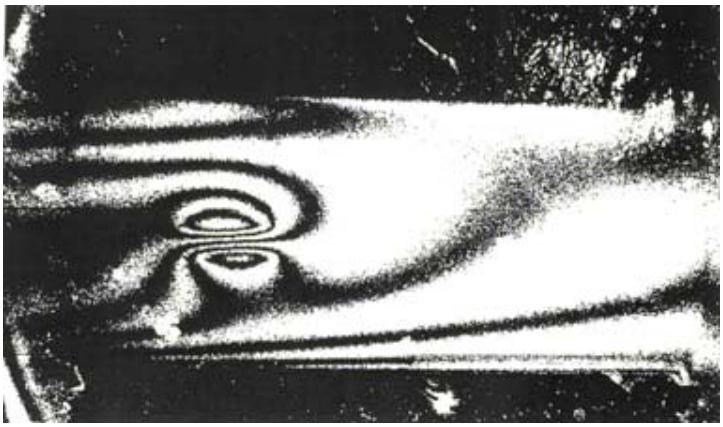

图 17 使用增加内压的方法检测出钢质压力容器中的两个内部裂缝

Fig. 17 The use of internal pressurization detects two internal cracks in a steel pressure vessel

图 18 显示大型索加固橡胶板中几处剥离的条纹图案。施加应力的方法是部分抽真空。

Fig. 18 Fringe pattern reveals several areas of separation in a large cord-reinforced rubber panel. The method of stressing is partial vacuum.

图 19　用施加热应力的方法探测涡流叶片内的裂缝。采用干发机对物体加热。

Fig. 19　Detection of a crack on a composite turbine blade using thermal stressing. The object was heated with a hair dryer.

剪切散斑已经被橡胶工业广泛采用,用于检查轮胎的剥离和其它非完整性。该技术已经被美国联邦航空管理局(FAA)指定用于检查飞机轮胎。轮胎是复杂的层状复合结构,并且用真空方法施加压力非常适用于轮胎检测。没有装配轮子的轮胎被放在可以减压的真空腔内。在检测过程中,轮胎内壁被激光照明并且被剪切散斑摄像机成像;随着腔内压力的减小(约 50mm 汞柱)两幅数字剪切散斑图像相继被采集。通过计算两幅图像的差产生出可以识别轮胎不完整性的条纹图案。图 21 所示是一个揭示卡车轮胎沿钢带边缘分离而形成条纹图案的例子。

2.8.4　**缺陷识别**

缺陷的评定是一项困难的工作,这是由于缺陷所引起的条纹异常取决于缺陷对于所施加应力的响应,与缺陷的性质、形状、大小、位置以及在缺陷处所施加的应力状态等因素有关。迄今为止,只有复合材料层间的剥离能被可靠地评定。用于描述剥离的一个简单模型是周边固支的圆板。当局部施加真空时,剥离部分所表现的行为就如同承受均布压力的板一样。板的侧向位移导数的等值线呈现蝴蝶的形状,剥离的尺寸近似等于蝴蝶的大小。从条纹的密度可以估计出剥离的深度。对于相同大小的剥离,靠近表面的剥离具有较高的条纹密度,而远离表面的剥离条纹则相对稀疏。这一点可从图 22 中的条纹分

布看出,尺寸几乎相同的 4 处剥离,其距离表面的深度分别为 3mm、6mm、9mm 和 12mm,显然,最靠近表面 d1 缺陷所呈现的条纹最密,而对应于最深的缺陷则条纹最稀。由薄板理论可知板的侧向变形的导数反比于板的抗弯刚度,而抗弯刚度则与板厚度的三次方成正比。该模型考虑了等效板的厚度等价于从被测表面算起的剥离所处位置的深度,并且等效板的形状和大小也相当于剥离的形状和大小。同时,等效板也被看作是沿周边为弹性支撑并且承受与所施加真空相同的均匀侧向压力。这意味着对于相同大小的剥离,条纹的密度与深度的三次方成反比。关于剥离响应的更详尽分析见参考文献[28,29]。

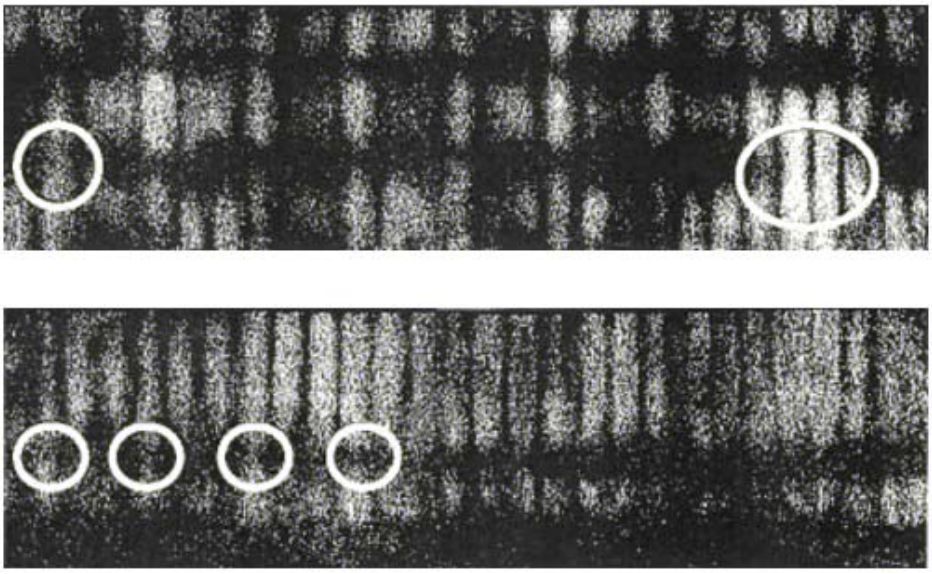

图 20 采用剪切散斑和多频激振方法检测复合材料装配中的粘结线。这里有两条粘结线。完好的粘结应该是暗条纹区,不太暗的区域表示为弱粘结区。

Fig. 20 Shearographic inspection of adhesive-bonded lines in composite assemblies using multi-frequency vibrational excitation. There are two bonded lines. Perfect bond lines should dark, and any deviation from darkness is indicative of weak bond.

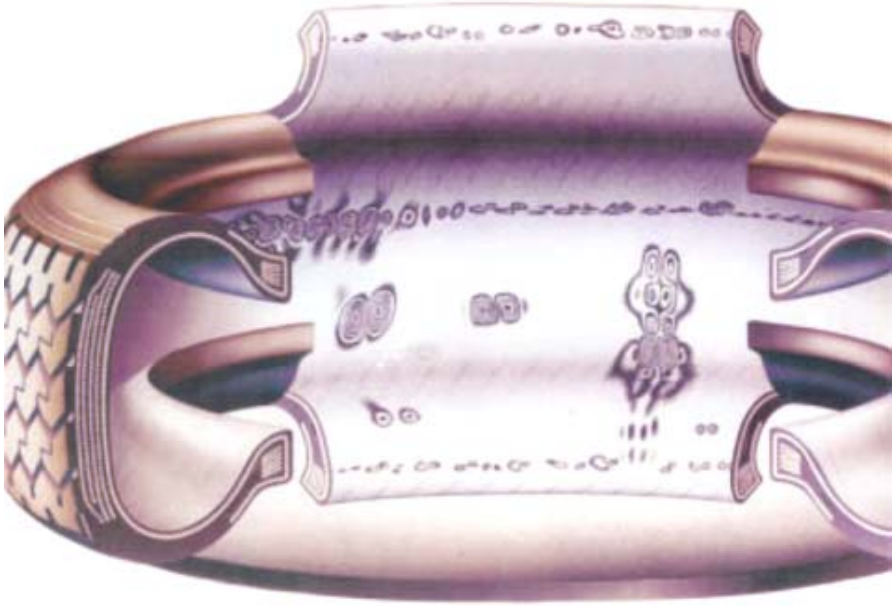

图 21 揭示卡车轮胎沿钢带边缘分离的剪切散斑条纹图案。

Fig. 21 Shearographic fringe pattern revealing separation along the steel belt edge of a truck tire.

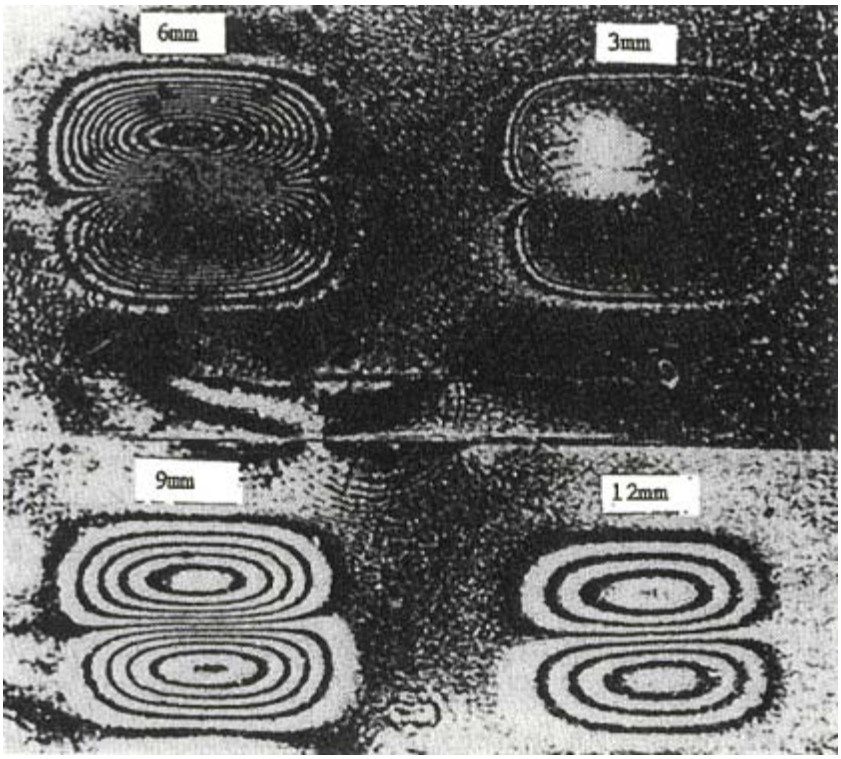

图 22　不同深度剥离(3mm、6mm、9mm 和 12mm)的条纹图案。显然,最靠近表面的缺陷所呈现的条纹最密,而对应于最深的缺陷则条纹最稀。

Fig. 22　Fringe patterns of debonds at the various depths (3mm, 6mm, 9mm and 12mm). Note that the one closest to the surface has the highest fringe density and vice versa.

2.9　三维形状测量

剪切散斑技术也能被用来测量一个三维物体表面 $Z(x,y)$的表面倾斜度$\partial Z/\partial x$ 和$\partial Z/\partial y$。下面将介绍三种形状测量方法。

2.9.1　双波长法[30]

这一方法需要使用一个可变波长的激光器。一个半导体激光器,可以通过控制电流来改变它的波长。采用与图 2 相同的光路布置,被测表面的两幅数字散斑图相继被采集,前一幅对应于波长 λ,后一幅对应于波长 $\lambda+\delta\lambda$。由于位相变化 Δ 与表面倾斜度有关,所以两幅散斑图的差所产生的条纹图代表了表面深度 $Z(x,y)$对图像错位方向的导数,并由下式表述:

$$\Delta = 4\pi\delta x\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda^2}\right)\frac{\partial Z}{\partial x} \tag{22}$$

这里,x 是图像的错位方向。

通过调节图像的错位方向即可测量表面任意方向的倾斜度,因此,当使图像错位方向平行于 y 轴时,方程(22)中的$\partial Z/\partial x$ 将变为$\partial Z/\partial y$。位相变化 Δ,亦即表面倾斜度,因此可以用 1.4 节介绍的相移技术自动确定。图 23(a)所示的条纹图代表了一个灯泡表面的$\partial Z/\partial x$,并且图 23(b)是由(a)的倾斜度信息积分而得到的 $Z(x,y)$的三维图。

2.9.2　双折射率法[31]

在测量过程中,当物体周围介质的的折射率从 n 变为 $n+\delta n$ 时,相继采集两幅数字散斑图。通过对两幅数字散斑图相减而形成的条纹图同样代表了表面倾斜度对于图像错位方向的导数。如果图像错位沿 x 方向,而照明和成像的方向都沿 z 轴,则对应于表面倾斜度的位相变化 Δ 由下式表示:

$$\Delta = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)(\delta x)(\delta n)\frac{\partial Z}{\partial x} \tag{23}$$

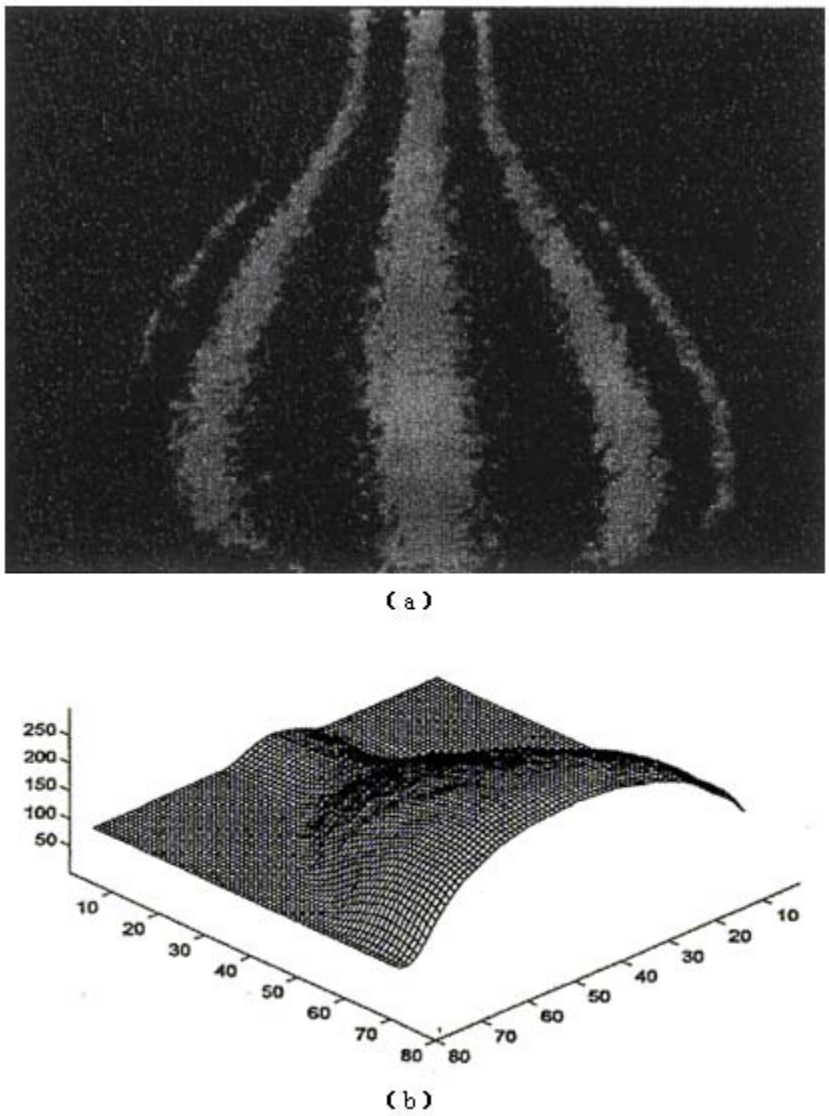

图 23 (a)采用双波长方法所得的代表一个灯泡表面$\partial Z/\partial x$的条纹图和(b)由(a)的倾斜度信息积分而得到表面形状 Z 的三维分布图。

Fig. 23 (a) Fringe pattern depicting $\partial Z/\partial x$ of a light bulb using the double wavelength method, and (b) A 3D plot of the surface shape (Z) obtained by integrating the fringe phase of (a).

同样,通过改变图像错位方向可以得到沿任意方向的表面倾斜度,并且相移技术也同样可以用于自动确定位相。

2.9.3 **双光源法**[32,33]

在这一方法中,物体被与 z 轴成一夹角的方向上的准直相干光束照明。当照明光束发生微小偏转时相继采集两幅数字散斑图。两幅数字散斑图相减的结果为包含 $Z(x,y)$对图像错位方向偏导数信息的条纹图案。

2.10 **密封情况评估**[22]

微电子器件是许多工业产品的关键部件。微电子器件失效的一个普遍原因是由于微电子封装的密封问题所引起的器件故障。封装器件的密封缺陷导致湿气和其它杂质的侵入而引起微电路的故障。直到今天,微电子封装的密封检测还是采用最初的通过氦气泄漏进行检测,该方法既慢又麻烦而且不可能用到生产线上。剪切散斑能被用于微电子封装密封情况的快速评估。采用剪切散斑技术评估微电子封装密封的情况是基于测量封装表面随时间的变形。待测的封装器件被放在可改变气压的容器内,当压

力改变时,封装器件表面将发生变形。如果封装器件密封完好该变形保持不变。然而,如果封装器件有泄漏,则表面变形将逐渐恢复,引起一个随时间而变的变形。因此,用剪切散斑技术测量封装器件的表面变形随时间的变化函数,泄漏的封装器件就将被揭示出来。这一检测微电子封装器件泄漏的过程非常迅速,可以在 2 秒钟内完成。传统的方法大概需要 2 小时。图 24 所示是一个泄漏的封装器件的测量结果。

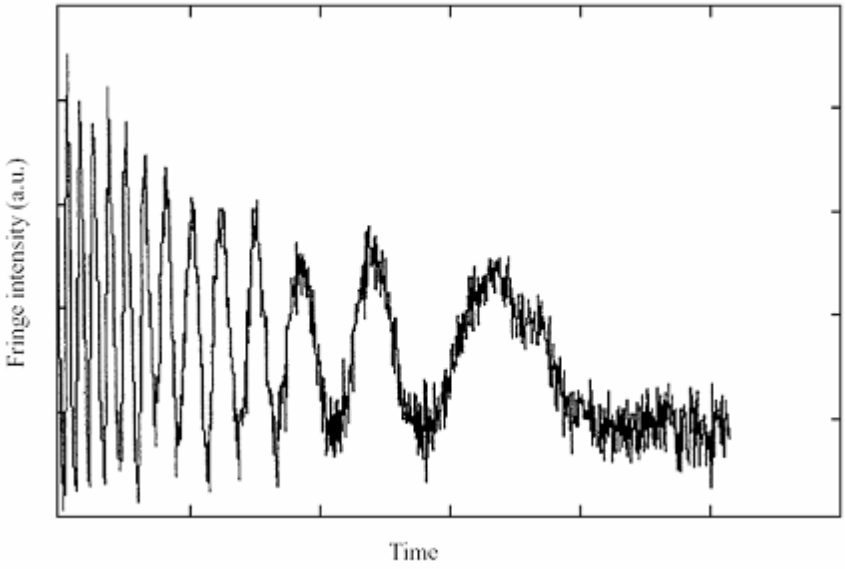

图 24　一个泄漏封装器件的测量结果

Fig. 24　Sample result of a leaky package

2.11　气体泄漏探测

这一应用的原理是基于气体泄漏会改变泄漏周围空气折射率的现象,由此而产生的位相变化将出现一个可见的条纹图案。图 25 所示是从一个装有氦气的压力容器的阀门处泄漏的情况。由此可见,剪切散斑不仅可以检测气体泄漏,而且也能确定泄漏的位置。在检测中,为了增强折射率的变化,使用与被测物内不同的外围气体会更好些。氦气和空气就是一个很好的组合。

3　局限性及其完善

作为一种光学方法,剪切散斑同样享有非接触和全场性的优良特征。虽然该方法也是基于干涉原理,但它不需要苛刻的光学校直和极端稳定的测量环境。然而,与所有的散斑干涉技术一样,剪切散斑也存在一个固有的障碍。这就是对刚体运动的有限宽容。过度的刚体运动包括物体的平移和转动将导致散斑之间丧失相关性,其结果是大大降低了条纹的可见度。传统的散斑失相关理论[34,35]认为当与视线正交的刚体平移超出散斑尺寸时散斑完全丧失相关性(散斑尺寸近似为摄像机镜头的 f 值与激光波长乘积的 1.2 倍)。根据作者的经验已经发现剪切散斑对刚体平移的宽容度比理论预计的至少要大一个数量级。总的来说,这个宽容度取决于表面粗糙度和表面应变的量级等表面特征。尽管有更大的宽容度,但由于大型结构的变形而导致过度的刚体运动是不可避免的,尤其是对较大的物体,散斑的失相关还是制约着它许多实际的应用。在剪切散斑技术中,可以通过平移图像传感器或在计算机中移动数字图像来抵消刚体平移,如文献[36]所报道。然而,要补偿由于刚体转动引起的失相关却是非常困难的,除非已知转动轴。要减轻失相关问题,一个有效的方法是将剪切散斑系统(摄像机和照明系统)附着于被测物上。这排除了测量系统与物体之间相对的刚体运动(包括平移和转动),因此,所测量的仅是变形。当然,这样布置必须使剪切散斑设备小型化,这可以通过使用激光二极管和微型摄像机来实现。

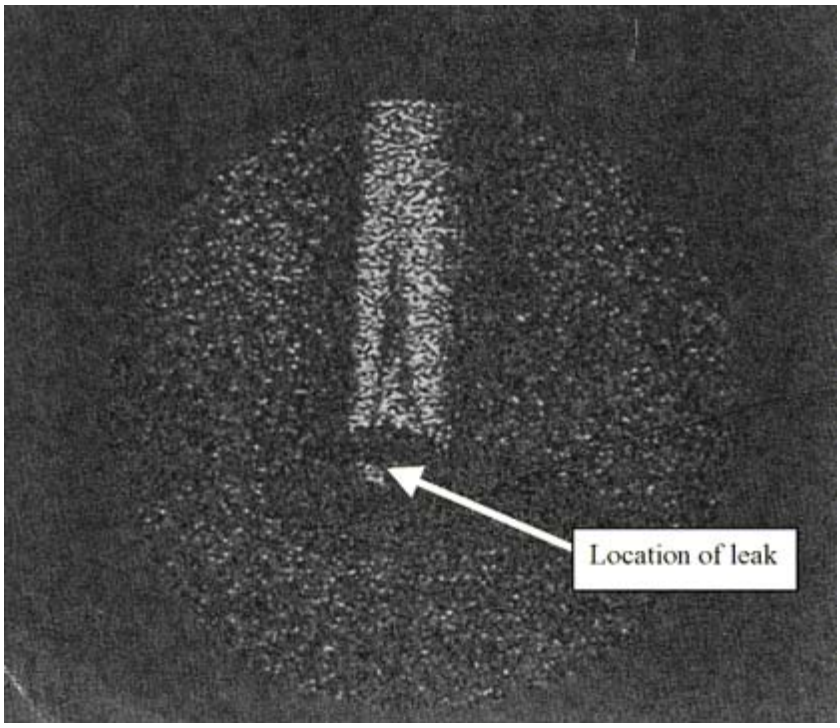

图 25 来自压力容器阀门处的氦气泄漏。

Fig. 25 A leakage from the valve of a pressure vessel. The escaping gas is helium.

4 结论

本文对剪切散斑技术及其应用进行了综述。剪切散斑是一项非常实用的测量技术,因此,作为一个有用的测量和无损检测的工具,它很快得到了工业界的认可。但这一技术毕竟还相当年轻,它全部能力的发挥还值得进一步探索。

5 致谢

本文工作得到了香港研究资助局中央拨款资助计划(CityU 1/01C)的资助和香港研究资助局的研究资助(CityU 1196/02E)

参考文献:

[1] Hung Y Y. Shearography: A New Optical Method for Strain Measurement and Nondestructive Testing[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):391～395.

[2] Hung Y Y, Tang S, Hovanesian J D. Real-time Shearography for Measuring Time-dependent Displacement Derivatives[J]. Experimental Mechanics, 1994,34(1):89～92.

[3] Hung Y Y, Hovanesian J D. Fast Detection of Residual Stresses in an Industrial Environment by Thermoplastic-based Shearography [C]. Proceedings of the 1990 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, Albuquerque, New Mexico, June 4-6, 1990:769～775.

[4] Hung Y Y. Nondestructive Evaluation by Electronic Shearography, presented at the 16th Symposium on Nondestructive Evaluation, San Antonio, Texas, April 21-23, 1987. Also, Apparatus and Method for Electronic Analysis of Test Object, US Patent 4,887,899, 1989.

[5] Hung Y Y. A Speckle-Shearing Interferometer: A tool for measuring derivatives of surface displacement[J]. Optical Communications, 1974, 11(2):132～135.

[6] Leendertz J A, Butters J N. An Image Shearing Speckle Pattern Interferometer for measuring bending moments[J]. J. of Physics: E., Sci. Instrum., 1973, 6(11):1107～1110.

[7] Hung M Y Y, Shang H M, Yang L. Unified Approach for Holography and Shearography in Surface Deformation Measurement and Nondestructive Testing[J]. Optical Engineering, 2000, 42(5):1197～1207.

[8] Hung Y Y, Durelli A J. Simultaneous Measurement of Three Displacement-Derivatives Using a Multiple Image Shearing Interferometric Camera[J]. J. of Strain Analysis, 1979,14(3):81～88.

[9] Creath K. Phase-Measurement Techniques for Nondestructive Testing[C]. Proceedings of SEM Conference on Hologram Interferometry and Speckle Metrology, Baltimore, Maryland, November 5-8, 1990:473～478.

[10] Macy W W. Two-dimensional Fringe Pattern Analysis[J]. Applied Optics, 1983, 22(23):3898～3901.

[11] Jie Gu, Hung Y Y, Fang Chen. Iteration Algorithm for Computer-aided Speckle Interferometry[J]. Applied Optics, 1994, 33(23):5308～5317.

[12] Long K W. 3-Beam Phase Shift Shearography for Simultaneous Measurement of In-plane and Out-ofplane Displacements and Its Applications to Residual Stress Measurements[M]. PhD Dissertation, Oakland University, 1996.

[13] Hung Y Y, Wang J Q. Dual-beam Phase Shift Shearography for Measurement of In-plane Strains[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1996, 24(5/6):403～413.

[14] Hung Y Y, Long K W, Wang J W. Measurement of Residual Stress by Phase Shift Shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 27(1):61～73.

[15] Hung Y Y, Long K W, Hovanesian J D, Hathaway R. Fast Detection of Residual Stresses by Shearography[C]. Proc. SPIE Industrial Laser Interferometry, Detroit, Michigan, June 27-28, 1988,955:26～35.

[16] Hung Y Y, Shang H M, Lin L, Zhang Yubei, Wen Xinyu. Evaluation of Residual Stresses in Plastics and Composites by Shearography[C]. SAE Paper #1999-01-1254, 1999 SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, March 1-4, 1999.

[17] Hovanesian J D, Hung Y Y, Durelli A J. New Optical Method to Determine Vibration Induced Strains with Variable Sensitivity after Recording[C]. Proceedings of the Conference on Experimental Stress Analysis, Smolenice, Czechoslovakia, October 16-18, 1978.

[18] Hung Y Y, Griffen C T. Digital Shearography versus TV-Holography for Vibration Measurement[C]. Proc. The 15th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise and 1995 ASME Design Engineering Technical Conferences, Vol. 3, Part C, pp1461～1470, Boston, Massachusetts, September 17-20, 1995.

[19] Chen F, Griffen C T, Hung Y Y. Stroboscopic Phase Shifting Shearography for Automated Vibration Measurement[C]. Proc. The 15th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise and 1995 ASME Design Engineering Technical Conferences, Vol. 3, Part C, pp1399～1415, Boston, Massachusetts, September 17-20, 1995.

[20] Hung Y Y. Electronic Shearography for Measurement of Time-Dependent Deformation[C]. Proc VII Int. Congress on Experimental Mechanics, Vol. 2, pp674～678, Las Vegas, Nevada, June 1992.

[21] Hung Y Y, Griffen C T, Chen F. High Speed Shearography for Measuring Transient Deformation and Vibration [C]. Proc VIII International Congress on Experimental Mechanicals, pp206～207, Nashville, Tennessee, June 10-13, 1996.

[22] Hung Y Y, Dahuan Shi. Technique for Rapid Inspection of Hermetic Seals of Microelectronic Packages Using Shearography[J]. Optical Engineering, 1998, 37(5):406～1409.

[23] Hung Y Y. Shearography: A Novel and Practical Approach to Nondestructive Testing[J]. J. of Nondestructive Evaluation, 1989, 8(2):55～68.

[24] Hung Y Y. Automated Shearography for Nondestructive Testing and Strain Measurement[C]. Proc of SPIE Conference on Nondestructive Eavaluation of Aircraft, Airports, Aerospace Hardware and Materials, Vol. 2455, pp238～249, Oakland, California, June 6-8, 1995.

[25] Hung Y Y. Computerized Shearography and its Application for Nondestructive Evaluation of Composites, Chapter 17, Manual on Experimental Methods of Mechanical Testing of Composites[M]. edited by C. H. Jenkins, published by Society for Experimental Mechanics, 1998.

[26] Holographic Nondestructive Testing[M]. edited by R. K. Erf, Academic Press, 1974.

[27] Hung Y Y. Automated Nondestructive Shearographic Inspection of Debonds in Composites Using Multi-frequency

Vibrational Stressing[C]. Proceedings of 1997 SEM Spring Conference, pp98～99, Bellevue, Washington, June 2-4, 1997.

[28] Shang H M, Toh S L, Chau F S, Shim V P W, Tay C J. Locating and Sizing Disbonds in Glassfibre-Reinforced Plastic Plates using Shearography, Transactions ASME[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1991, 113(1):99～103.

[29] Shang H M, Tham L M, Chau F S. Shearographic and Holographic Assessment of Defective Laminates with Bond-lines of Different Elasticities, Transactions ASME[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, 117(3):322～329.

[30] Huang J R, Ford H D, Tatam R P. Slope Measurement by Two-wavelength Electronic Shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 27(3):321～333.

[31] Hung Y Y, Turner J L, Tafralian M, Hovanesian J D, Taylor C E. Optical Method for Measuring Contour Slopes of an Object[J]. Applied Optics, 1978, 17(1):128～131.

[32] Tay C J, Chau F S, Shang H M, Shim V P W, Toh S L. The Measurement of Slope Using Shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1991, 14(1):13～24.

[33] Tay C J, Shang H M, Poo A N, Luo M. On the Determination of Slope by Shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1994, 20(3):207～217.

[34] Petersen M O. Decorrelation and Fringe Visibility: On the limiting behaviour of various electronic speckle pattern correlation interferometers[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1991, 8(7):1082～1089.

[35] Yura H T, Hanson S G, Grum T P. Speckle Statistics and Interferometric Decorrelation Effects in Complex ABCD Optical Systems[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1993, 10(2):316～323.

[36] Hung Y Y, Wang J Q. Technique for Compensating Excessive Rigid Body Motion in NDT of Large Structures Using Shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 26(2/3):249～258.

Shearography: An Optical Measurement Technique and Applications

Y. Y. Hung[1], H. P. Ho[2], X. Y. He[3]

(1. Department of Manufacturing Engineering and Engineering Management,
City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, Email: mehead@cityu.edu.hk;
2. Department of Electronic Engineering, Chinese University of Hong Kong
Shatin, Hong Kong, Email: hpho@ee.cuhk.edu.hk;
3. Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, Email: mmhxy@seu.edu.cn)

Abstract: This article reviews shearography and its applications. Shearography is a laser based technique for full-field, non-contacting measurement of surface deformation (displacement or strain). It was developed to overcome several limitations of holography by eliminating the reference beam. It does not require special vibration isolation; hence, it is a practical tool that can be used in a field/factory environment. Shearography has already received considerable industrial acceptance, in particular, for nondestructive testing. In nondestructive testing, shearography reveals defects in an object by identifying defect-induced deformation anomalies. Other applications of shearography include strain measurement, material characterization, residual stress evaluation, leak detection, vibration studies and 3-D shape measurement.

Key words: shearography; interferometry; speckle pattern; phase determination; nondestructive testing; deformation measurement; residual stress measurement; vibration study; leakage detection; surface profiling; 3-D shape measurement