

# 相移等力线法用于三维应力场非破坏检测

计宏伟 计欣华 秦玉文

(天津大学力学系, 天津 300072)

**提要** 给出了三幅图像相移法实现散光等力线条纹自动分析的原理, 论述了相移等力线方法用于三维应力场非破坏测量技术。对复合胶接结构界面三维应力问题进行了实验研究。实验表明, 此方法可以精确、无损、快速得到所测结构的应力分量。

**关键词** 相移, 等力线, 位相图, 三维应力场

## 1 引言

在光测三维应力分析中, 主要包括光弹性应力分析方法和散光法<sup>[1]</sup>。这些方法在不同的应用范围和不同的测量对象中都有其成功的应用, 但也同时存在很多问题。如光弹性冻结切片法, 由于实验中需要切片而破坏试件, 切片总有一定的厚度而引起误差, 同时在高温冻结过程中材料泊桑比改变以及大变形引起误差, 这样就使得测量精度和应用范围受到限制。散光法虽然从原理上说不需要切片, 但由于干涉图像所产生的几何畸变, 给应力计算带来许多麻烦。

1973 年加拿大滑铁卢大学 J. T. Pindera 教授提出了散光等力线方法<sup>[2]</sup>, 该方法成为解决三维应力测试问题的又一有效手段<sup>[3]</sup>。该方法具有非破坏性直接测取受力物体内部应力的特点, 从而克服了三维光弹性冻结应力切片测量时需要破坏试件和测量精度低的局限性; 这种方法仅收集某一方向散射光, 而且用单光束扫描方法代替片光照射, 从而克服了普通散光法需要大功率激光器及条纹清晰度不高的缺点, 它的干涉条纹图像不发生几何畸变。

本文用机械扫描系统、小功率激光器、相移器、CCD 摄像机、图像板和微机组成了散光等力线条纹自动采集与处理系统。在此基础上提出了一种三幅图像的双折射相移法, 以此实现了散光等力线全场条纹的自动分析, 直接得到全场应力分量结果。作为一个重要应用实例, 本文测量了复合胶接结构界面上三维应力分量, 并对界面上的应力分布规律进行了分析和讨论。

## 2 相移散光等力线法测量原理

该方法基本光路及实验装置如图 1 所示。激光器为 2 mW 的 He-Ne 激光器, 激光束以平行于  $x$  轴方向射入模型。在入射光路中, 加一相移器 (Phase shift instrument), 它由偏振片和 1/4 波片组成, 通过调整偏振片偏振轴和 1/4 波片快慢轴的不同位置, 从而使入射光束产生相移量。试件应选择散光性能良好, 具有人工双折射效应的材料, 如 Polymer 6(P<sub>6</sub>)。M 为入射光通

过试件时光路上的任意点,  $N$  为全反镜, 用于收集与  $z$  轴成  $35^\circ \sim 40^\circ$  角方向的散射光。由摄像机、图像板、监视器和计算机及其外设组成了图像自动采集与处理系统。通过机械传动装置, 激光束可以沿  $y$  轴方向扫描整个试件, 从而达到测量整个试件上全场应力的目的。同时扫描装置保证反射镜与激光器同步运动, 从而消除了图像几何畸变。

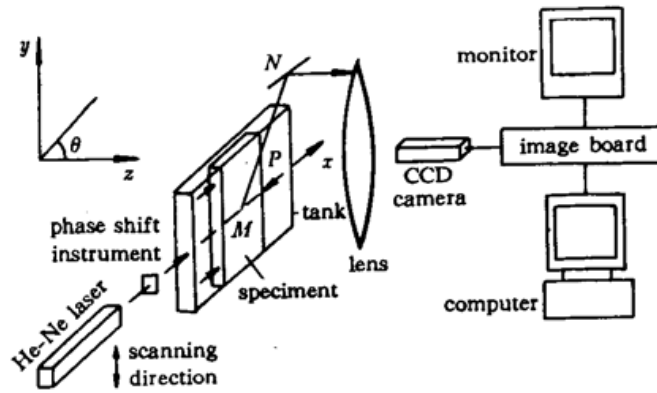


Fig. 1 Experimental setup

依据参考文献[1], 散光法基本公式(8.2)有如下形式

$$I_M = \kappa \alpha^2 (1 - \cos 2\theta \cos 2\psi - \sin 2\theta \sin 2\psi \cos \phi_x)$$

这里  $\theta$  为平面偏振光偏振轴和  $xz$  平面的夹角,  $\psi$  为观察方向与  $xz$  平面的夹角,  $\kappa$  和  $\alpha$  为与光振幅和背景有关的系数,  $I_M$  为  $M$  点散光强度,  $\phi_x$  为应力双折射造成的散射光位相差。

本文我们考虑到光路中相移器对位相的影响, 那么在 CCD 摄像机上接收的光强分布可表达为

$$I = \kappa \alpha^2 [1 - \cos 2\theta \cos 2\psi - \sin 2\theta \sin 2\psi \cos(\phi_x + \Delta)] \quad (1)$$

式中  $\Delta$  为相移器产生的相移值, 其他参数的意义与前面散光法公式相同。

在式(1)中,  $\theta$ ,  $\psi$  和  $\Delta$  在实验中都是确定项, 只有  $\phi_x$  沿  $x$  轴变化, 这样光强  $I$  将随  $\phi_x$  以三角函数关系变化, 所以摄像机采集到的图像便是明暗相间的条纹图像。如果光束从  $x$  轴方向射入受力物体时, 我们把采集到的条纹图像叫作  $x$  方向等力线; 光束从  $y$  轴方向入射时, 得到的条纹图像叫作  $y$  方向等力线。

下面给出应力分量与位相差  $\phi_x$  的关系式。

在文献[1]中, 公式(8.1)给出了散光法的应力光性定律, 即

$$\sigma'_1 - \sigma'_2 = \frac{1}{c} \frac{\partial R}{\partial x}$$

其中  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_2$  为  $yoz$  平面中的两个次主应力,  $c$  为应力光学常数,  $R$  为光程差。

根据光程差的定义有,  $\phi_x = 2\pi R/\lambda$ ,  $\lambda$  为光波长; 再令  $f_\sigma = \lambda/c$ , 把  $f_\sigma$  叫作材料的条纹值(可由实验测得); 把  $\phi_x$ ,  $f_\sigma$  代入应力光性定律公式中, 则有

$$\sigma'_1 - \sigma'_2 = \frac{f_\sigma}{2\pi} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \quad (2)$$

对于有限厚度板, 一般取剪应力分量  $\tau_{xz}$  和  $\tau_{yz}$  为零, 而在  $yoz$  平面中的正应力分量  $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  为次主应力, 把  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  代入(2)式中, 则

$$\sigma_y - \sigma_z = \frac{f_\sigma}{2\pi} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \quad (3)$$

同理,光束从  $y$  方向入射时,可得到沿  $y$  特征方向分布的,且与  $x$  方向应力分量  $\sigma_x$  和  $z$  方向应力分量  $\sigma_z$  之差的积分值有关的位相  $\phi$ ,形成的干涉条纹图,亦有下式成立

$$\sigma_x - \sigma_z = \frac{f_x}{2\pi} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \quad (4)$$

依据弹性力学基本方程,以及边界条件,由此剪应力分量  $\tau_{xy}$  用  $\phi_x, \phi_y$  表示为

$$\tau_{xy} = - \left( \frac{f_x}{2\pi} \cdot \frac{\partial \phi_y}{\partial x} + \frac{\partial f_x}{\partial x} \right) = - \left( \frac{f_x}{2\pi} \cdot \frac{\partial \phi_x}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial y} \right) \quad (5)$$

式中  $f_x$  和  $f_y$  分别为边界载荷沿  $x, y$  两个方向的分量,  $f_0$  用标准试件实验测定。

在求解三维问题全部应力分量时,除(3),(4),(5)式外还需一个补充方程,这样才能解出全部应力分量,一般利用剪应力差法得到一个补充方程{文献[1],公式(8.11)}。

本文提出三幅图像相移法,以此确定全场位相值,进而达到求解应力的目的,公式推导过程如下:

当入射光偏振方向  $\theta = 45^\circ$ ;当反射镜  $N$  的位置确定后,  $\psi$  为常数,一般取  $35^\circ \sim 40^\circ$  角,此时反差良好的图像可以获得。这样公式(1)可表示为

$$I(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \Delta] \quad (6)$$

其中  $A, B$  与观察方向、光振幅、背景光强等有关,是坐标  $x, y$  的函数;  $\Delta$  必须对于全场是统一值。

调整相移器,使  $\Delta$  分别为  $0, \pi/2, \pi$  值。这样得到三幅图像的光强分别对应为  $I_1, I_2$  和  $I_3$ , 它们的表达式为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= A - B \cdot \cos\phi \\ I_2 &= A + B \cdot \sin\phi \\ I_3 &= A + B \cdot \cos\phi \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由(7)式可求得  $\phi$  的表示式为

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}[(2I_2 - I_1 - I_3)/(I_3 - I_1)] \quad (8)$$

(8)式只表达了位相主值的分布,因为反正切函数的定义域为  $-\pi$  到  $\pi$ ,为了求得实际相位值,我们采用 Macy<sup>[4]</sup> 算法进行去包裹处理。

$$\phi'(x_j, y) = \text{AMOD}\{[\phi(x_j, y) - \phi'(x_{j-1}, y) + 201\pi], 2\pi\} + \phi'(x_{j-1}, y) - \pi \quad (9)$$

式中  $\phi'(x_j, y)$  为去包裹后的位相,即实际位相值; AMOD 是 FORTRAN 语言中求两数之商余数的函数算符;因为 AMOD 要求自变量为正,所以数字 201 可取为任意大奇数以保证第一个自变量为正;对于散光等力线条纹图,扫描光束入射边界的位相为零是已知的,所以只要通过一维计算即可得到全场位相  $\phi'(x_j, y)$ 。

### 3 三维应力场非破坏检测实例

如图 2,复合胶接结构梁由合金铝和散光材料 Polymer 6 (P<sub>6</sub>)两种材料用室温固化的环氧树脂粘结而成。受力方式、几何尺寸如图 2。为了能得到  $x, y$  两个特征方向等力线条纹图,整个加载系统可以有水平和垂直两个方向的入射安排。为了研究界面上的三维应力分布,必须测出沿模型厚度不同位置上各应力分量的变化规律,为此按图 3 所示,沿厚度取 5 个等分截面,由于对称性,取其中  $A, B, C$  三个截面为激光束扫描平面,即三个光学切片面。

按图 1 光路加载,这样可以得到对应于  $A, B, C$  三个光切面;  $\Delta = 0, \pi/2, \pi$ ;  $x$  和  $y$  两个特

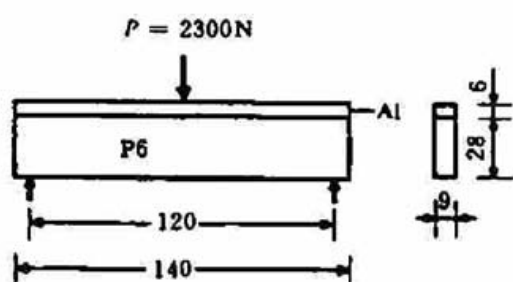


Fig. 2 Loads and dimensions of the specimen  
(units in mm)

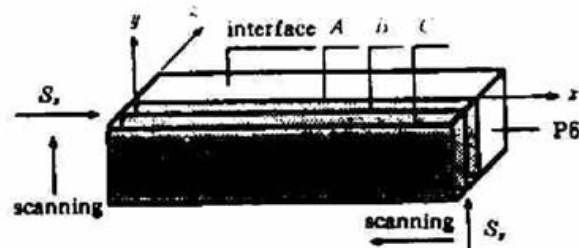


Fig. 3 Laser beam scanning section diagram  
(where A, B, C are three scanning sections)

征方向的 18 幅等力线条纹图如图 4 所示。

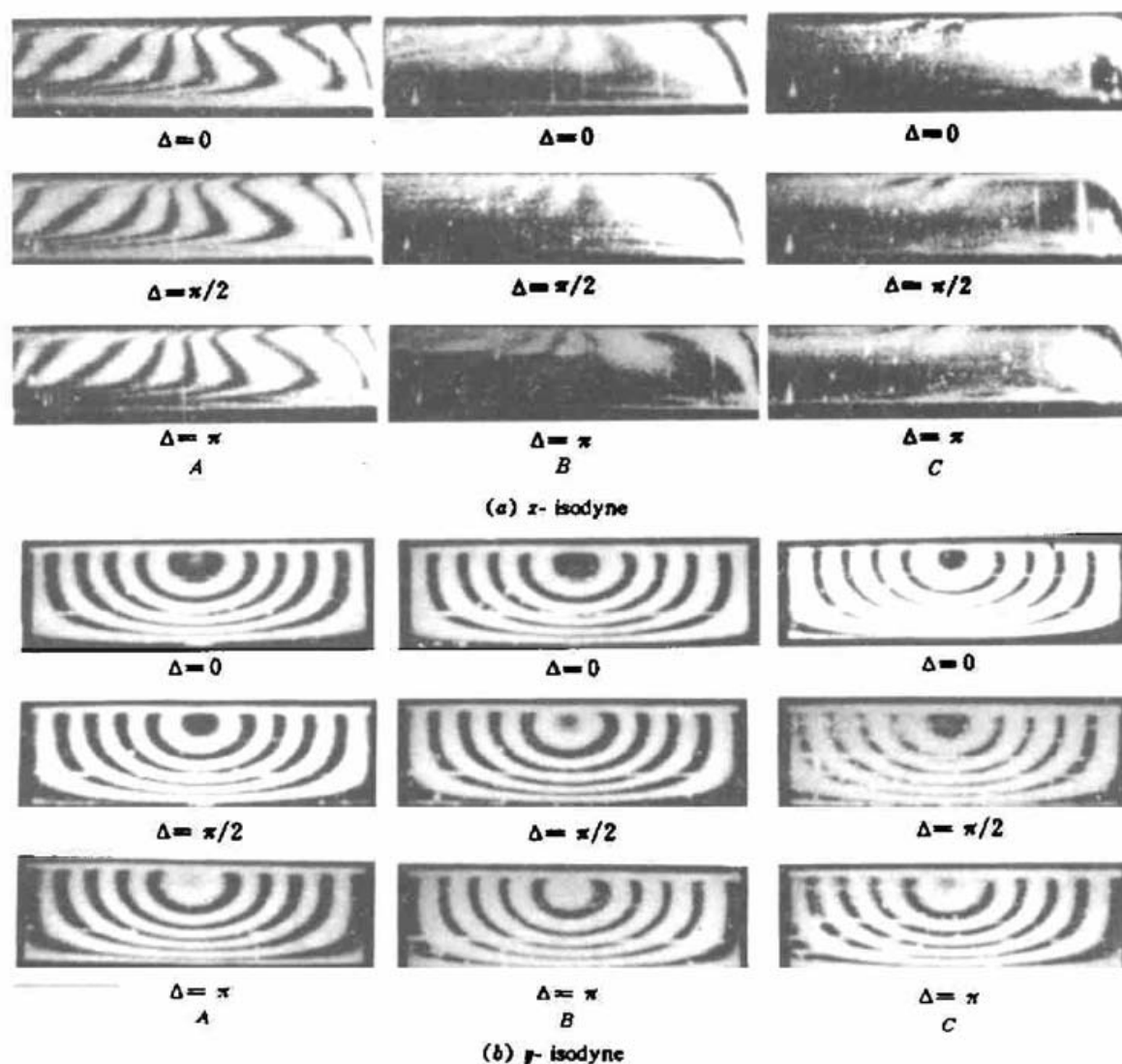


Fig. 4 The whole field isodyne fringe patterns

根据 18 幅图像的灰度值,利用公式(8)可以得到对应于 A, B, C 三个光切面,  $x$  和  $y$  两个特征方向的 6 幅未去包裹位相图,如图 5 所示,图中只给出了对应于 A 切片面上的两个特征方向的两幅位相图,其他从略。再利用公式(9)便可以得到去包裹后的位相图,如图 6 所示,图中也只给出了对应于图 5 去包裹后的位相图。

利用去包裹后的位相值代入公式(3), (4), (5), 便能求解出  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$  四个应力分量的





Fig. 5 Wrapping phase map  
(a)  $x$ -isodyne; (b)  $y$ -isodyne

全场数值。结果如图7所示,图中给出了结构胶接界面上的剪应力分量 $\tau_{xz}$ 的分布情况。图8是当 $x = 42 \text{ mm}$ 时(剪应力最大位置),剪应力沿 $z$ 轴分布的二维显示图。从图中可以看出剪应力 $\tau_{xz}$ 沿界面的分布规律,结果表明界面上沿厚度方向存在着显著的三维应力效应,特别是在危险截面上,主要应力分量 $\tau_{xz}$ 沿厚方向变化的相对偏差达到30%左右。可见若不考虑应力沿厚度方向的变化情况来设计结构将不能满足工程需要。



Fig. 6 Unwrapping phase map  
(a)  $x$ -isodyne; (b)  $y$ -isodyne

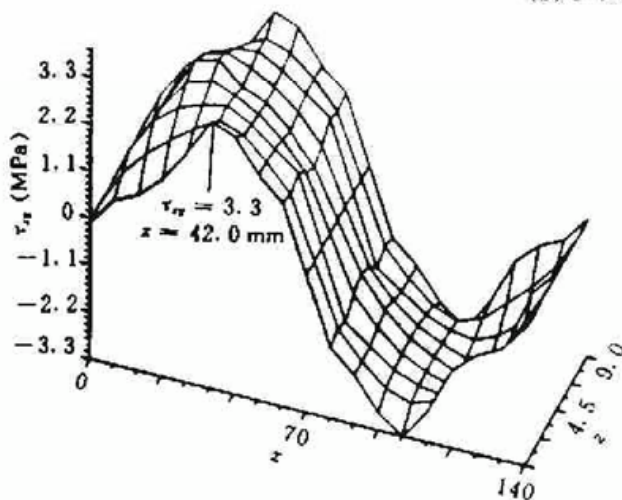


Fig. 7 3-D stress diagram on interface

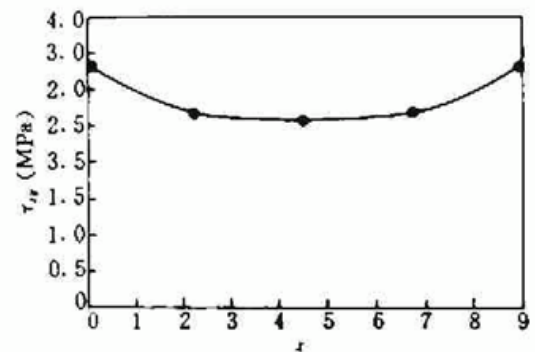


Fig. 8 3-D stress diagram ( $x = 42 \text{ mm}$ )

## 4 结论

相移等力线方法可成功地应用于三维应力场非破坏检测,显示出其光学切片技术的优越性、设备简单、自动化程度高。相位分析法与干涉条纹级次判读法相比,极大地丰富了信息量,提高了测试的灵敏度和精度,避免了人为的误差。

## 参 考 文 献

- 1 天津大学材料力学教研室光弹组编. 光弹性原理和测试技术. 北京: 科学出版社, 1980. 226~327
- 2 J. T. Pindera, M. J. Pindera. Isodyne stress analysis. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1989. 2~8
- 3 J. T. Pindera, B. R. Krasnowski, M. J. Pindera. Theory of elastic and photoelastic isodyne. Samples of application in composite structures. *Experimental Mechanics*, 1983, 25(3): 272~281
- 4 W. W. Macy. Two-dimensional fringe-pattern analysis. *Appl. Opt.*, 1983, 22(23): 3898~3901

## The 3-D Stress Field Measurement with Phase-shift Isodyne

Ji Hongwei Ji Xinhua Qin Yuwen

(Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** An analysis method of whole field measurement of isodyne fringes is presented. This method is based on three pattern phase-shift techniques. The obtained phase map corresponds to stresses components. Phase-shift isodyne is used to determine stresses in composite structure, in particular, the stresses at internal discontinuities and the delaminating stresses. The composite structure beam is taken as an illustrative example in the paper, with particular attention given to the 3-D stress effects. It is demonstrated that the isodyne method allows the determination of the 3-D stress field in the composite structure.

**Key words** phase-shift, isodyne method, phase map, 3-D stress

## 利用激光微束将外源基因导入高等植物细胞的研究

我们建立了激光微束向植物细胞导入外源基因的试验程序,对各种经济作物和林木进行了外源基因导入的研究。所用植物材料为禾本科小麦幼胚、双子叶植物锦葵科棉花胚状体、豆科植物的百脉根子叶、兰科花卉兰花小圆珠茎、小本植物大戟科橡胶胚性愈伤组织、松科的云杉再生胚性愈伤组织。质粒采用 BPI121 和 PJIT101。BPI121 包含有 GUS 基因, PJIT101 包含有 NPT- I 基因。激光微束仪是中国科学院遗传研究所和重庆京渝激光生物所共同研制的 Nd : YAG 激光显微照射系统。使用的激光波长为 0.35  $\mu\text{m}$ , 脉宽为 10~15 ns, 能量大于 2 mJ, 光斑直径为 1.3  $\mu\text{m}$ 。激光照射前首先对植物样品进行预处理。将欲照射的植物细胞用高渗缓冲液浸泡 1 h 左右, 然后洗去高渗液, 加新鲜培养液。吸取 0.5 ml 含细胞的培养液, 加 2~5  $\mu\text{g}$  质粒 DNA, 注入 Rose 小室, 用微束激光照射。

照射时移动载物台, 激光脉冲在细胞团上进行扫描照射。激光照射后将样品用新鲜培养液冲洗 1~2 次。然后根据不同的目的要求进行培养。

检测结果: GUS 基因的检测, 激光照射过的细胞悬浮培养 2~3 天, 离心收集, 用 X-Gluc 溶液染色, 在倒置显微镜下观察。NPT- I 基因的检测, 取 0.15  $\mu\text{g}$  的细菌 HB101 (含质粒和不含质粒), 0.15  $\mu\text{g}$  单株小叶片提取物在 50  $\mu\text{l}$  的反应体积中反应, 然后进行层析分析, 最后放射自显影。PCR 扩增检测, 扩增法参考分子克隆实验指南, 扩增后 0.8% 的琼脂糖凝胶电泳。经微束激光照射的兰花、橡胶、挪威云杉、棉花等植物均获得了 GUS 基因瞬时表达。并获得了 NPT- I 基因稳定表达的转基因小麦和 GUS 基因稳定表达的转基因百脉根。

微束激光转化方法与其他转化方法相比其优点在于操作简便、不受植物种的限制; 受体外植体材料广泛, 可以直接观察打孔部位并准确地定位于被照射的细胞某一部分及细胞器上, 对细胞损伤小, 转化频率高, 重复性好。

(中国科学院遗传所 王兰岚 宋桂英 徐正平 陈正华)