

文章编号: 1001-4888(2005)01-0077-06

# 钻孔法和光栅应变花测试复合材料的残余应力<sup>\*</sup>

金香花, 陈巨兵, 辛全成

(上海交通大学 工程力学系, 上海 200240)

**摘要:** 残余应力对材料、结构的疲劳强度和使用寿命等性能的影响早已为人们所熟知, 由于它的大小、方向和分布随制造加工或处理方法不同而有很大的随机性, 国内外对它的研究很重视。对于各向异性的复合材料, 随着加上生产制造过程及工艺参数的不同, 其中的残余应力的方向等就变得更加复杂。从国内外对残余应力的研究中, 可以看出大多数都着重于实验研究。本文应用钻孔法和云纹干涉技术的成果, 针对残余应力测试中的特点, 尤其是在利用钻孔法和云纹干涉技术测试残余应力时存在的问题, 在目前绝大多数云纹干涉技术所使用的正交光栅的基础上, 提出并研制出一种三个方向的光栅, 即在原来  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  两个方向光栅上, 再加上一个  $45^\circ$  方向的光栅, 在进行云纹干涉测试时, 一次加载时就可以同时测试出三个独立的位移场:  $u$  场、 $v$  场和  $s$  场, 利用这三个位移场就可以得到相应的三个应变:  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{90}$  和  $\epsilon_{45}$ , 进而可以计算得到相应的应力。

**关键词:** 纤维增强复合材料; 残余应力; 光栅应变花; 钻孔法

**中图分类号:** O348

**文献标识码:** A

## 1 概述

碳纤维增强复合材料的单向层片是由纤维和基体复合而成, 在微观构造上是不均匀的。叠层复合材料除了层片内的不均匀性外, 由于铺层材料和铺层方向的不同, 沿厚度方向也是不均匀的, 呈现层性。在复合材料中存在裂纹、脱层、纤维断裂和空隙等, 使局部的位移、应变、应力不连续, 很难甚至不可能求得精确解。而且这种不均匀性和不连续是随机分布的, 加上制造过程中工艺和各种参数的影响, 使得计算复合材料及其结构的残余应力变得非常复杂和困难, 目前更多的是采用实验测试的办法来确定复合材料或结构残余应力的大小与方向。

## 2 残余应力的测试方法

残余应力的测试方法很多, 按被测对象是否被破坏来分, 可分为有损测试法和无损测试法两大类。钻孔法、取条法、切槽法和移层法等都属于有损测试法<sup>[1]</sup>; X 射线衍射法、中子法、超声波法、电磁法等都属于无损测试法<sup>[2]</sup>。

用电阻应变花结合钻孔法、移层法是最常见的<sup>[2]</sup>, 美国 ASTM 还专门制定了该测试残余应力方法的标准<sup>[3]</sup>, 但由于电阻应变花测试的只是分别在三个方向上一个应变, 而且是平均值。因为残余应力本来就带有随机性, 其大小和方向在非常小的面积上都可能是变化的, 像纤维增强型复合材料, 其中纤维的直径

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2004-01-17; 修订日期: 2005-01-12

基金项目: 本课题的研究得到国家自然科学基金项目 No. 10102011 的资助

通讯作者: 陈巨兵, 男, 教授。主要研究方向: 云纹干涉技术、全息无损检测、光纤传感技术和制造技术、复合材料细观力学及其性能检测、断裂与疲劳实验研究、电磁介质力学的测试及研究、残余应力测试研究等。E-mail: jichen@sjtu.edu.cn

可能在几十  $\mu\text{m}$  左右,也就意味着在直径为几十  $\mu\text{m}$  的面积上残余应力都可能有很大的变化,因此用相对比较大面积上的平均应变值代替它,肯定会有误差;应用云纹干涉结合钻孔法、移层法已经有比较成功的范例<sup>[4,5]</sup>,该方法可以测试到整个被测面积上的应变场。尤其是使用正交光栅,每次测试可以得到两个位移场,通过测试残余应力释放前、后这两个位移场的变化,再用微分计算获得三个应变场。它可以在测试范围内得到任意点的三个应变分量  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  和  $\gamma_{xy}$ ,而不是某个面积上的平均值,通过计算得到相应的应力。但如果在残余应力的释放过程中试件有很微小的平移或转动,都可能会造成残余应力释放前、后的 Moiré 条纹图相当大的差异。

### 3 钻孔法的基本原理

钻孔法是由 J. Mathar 于 1932 年提出的<sup>[1]</sup>,其基本思想是在具有残余应力的构件上钻一小孔,使孔的邻域内因部分应力的释放而产生相应的位移和应变,测量这些位移或应变,便可计算得到钻孔处原来的应力。

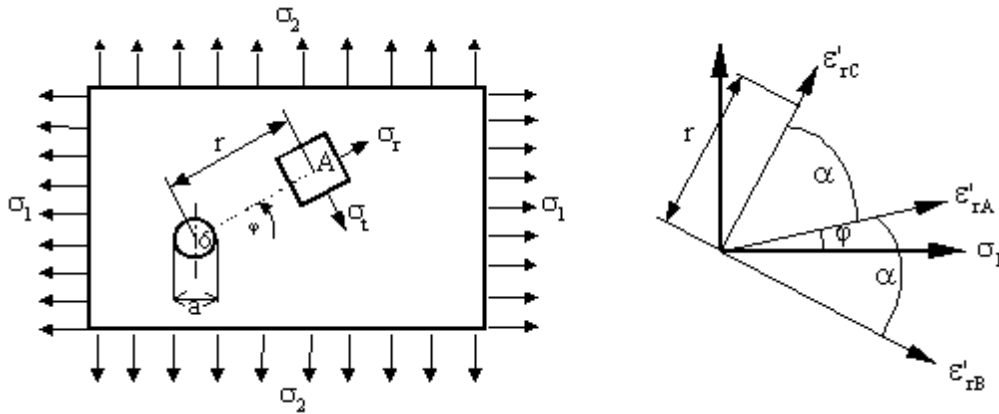


图1 钻孔法示意和径向应变测点布置图

Fig. 1 The position of releasing strain in hole-drilling method

设在无限大平板上作用着主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  ( $\sigma_1 > \sigma_2$ ),则在板上任意点 A 的应力为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \quad (2)$$

在平板 O 处钻一半径为  $a$  的通孔后,则在孔的邻近 A 点的应力分量的 Kirsch 解为:

$$\sigma_{r0} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} \right] + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left[ 1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right] \cos 2\varphi \quad (3)$$

$$\sigma_{t0} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left[ 1 + \frac{a^2}{r^2} \right] - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left[ 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cos 2\varphi \quad (4)$$

因此由于钻孔引起的应力改变量为:

$$\sigma'_r = \sigma_{r0} - \sigma_r = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{a^2}{r} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left[ \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right] \cos 2\varphi \quad (5)$$

$$\sigma'_t = \sigma_{t0} - \sigma_t = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{a^2}{r^2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \cos 2\varphi \quad (6)$$

在 A 产生的径向应变为:

$$\epsilon'_r = \frac{1}{E} (\sigma'_r - \mu \sigma'_t) \quad (7)$$

将式(5),(6)代入式(7)即可建立 A 点的径向应变与主应力和主方向之间的关系:

$$\epsilon'_r = \epsilon'_r(\sigma_1, \sigma_2, \varphi) \quad (8)$$

根据式(8),只需要测量 O 点邻近与其等距离的三点 A、B、C 的径向应变  $\epsilon'_{rA}$ 、 $\epsilon'_{rB}$  和  $\epsilon'_{rC}$ ,即可求得主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和主方向  $\varphi$ 。

$$\epsilon'_r = -\frac{1+\mu}{2E} \left( \frac{a}{r} \right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{E} \left[ -2 \left( \frac{a}{r} \right)^2 + \frac{3(1+\mu)}{2} \left( \frac{a}{r} \right)^4 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi \quad (9)$$

设在与孔中心 O 等距离为  $r$ ,且与主应力  $\sigma_1$  成  $(\varphi - \alpha)$ 、 $\varphi$ 、 $(\varphi + \alpha)$  的三个方向上分别测试其径向应变  $\epsilon'_{rA}$ 、 $\epsilon'_{rB}$  和  $\epsilon'_{rC}$ :

$$\epsilon'_{rA} = -\frac{1+\mu}{2E} \left( \frac{a}{r} \right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{E} \left[ -2 \left( \frac{a}{r} \right)^2 + \frac{3(1+\mu)}{2} \left( \frac{a}{r} \right)^4 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi \quad (10)$$

$$\epsilon'_{rB} = -\frac{1+\mu}{2E} \left( \frac{a}{r} \right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{E} \left[ -2 \left( \frac{a}{r} \right)^2 + \frac{3(1+\mu)}{2} \left( \frac{a}{r} \right)^4 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\varphi - \alpha) \quad (11)$$

$$\epsilon'_{rC} = -\frac{1+\mu}{2E} \left( \frac{a}{r} \right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{E} \left[ -2 \left( \frac{a}{r} \right)^2 + \frac{3(1+\mu)}{2} \left( \frac{a}{r} \right)^4 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\varphi + \alpha) \quad (12)$$

对于具有特殊正交各向异性的平面应力问题<sup>[6]</sup>

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

因此在图 1 所示的钻孔法中,在 A 产生的径向应变为:

$$\epsilon'_r = \frac{\sigma'_r}{E_r} - \frac{\nu_r}{E_t} \sigma'_t \quad (14)$$

将式(5)、(6)代入式(14)即可建立 A 点的径向应变与主应力和主方向之间的关系:

$$\epsilon'_r = \frac{1}{E_r} \left[ \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{a^2}{r^2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\varphi \right] - \frac{\nu_r}{E_t} \left[ \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{a^2}{r^2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \cos 2\varphi \right] \quad (15)$$

在图 1(b)径向应变测点布置中,令  $\alpha = 45^\circ$ ,并将 A、B、C 点分别选在 X、Y 轴以及它们的夹角上,因此与主应力  $\sigma_1$  成  $(\varphi - 45^\circ)$ 、 $\varphi$ 、 $(\varphi + 45^\circ)$  的三个方向上分别测试其径向应变  $\epsilon'_{rB}$ 、 $\epsilon'_{rA}$  和  $\epsilon'_{rC}$  分别为:

$$\begin{aligned} \epsilon'_{rA} &= \left[ \frac{1}{E_s} - \frac{\nu_s}{E_t} \right] \cdot \frac{a^2}{r^2} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \left[ \frac{1}{E_s} \left( \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) + \frac{\nu_s}{E_t} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \\ \epsilon'_{rB} &= \left[ \frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{xr}}{E_y} \right] \cdot \frac{a^2}{r^2} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \left[ \frac{1}{E_x} \left( \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) + \frac{\nu_{xr}}{E_y} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\varphi \\ \epsilon'_{rC} &= \left[ \frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{ry}}{E_x} \right] \cdot \frac{a^2}{r^2} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \left[ \frac{1}{E_y} \left( \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) + \frac{\nu_{ry}}{E_x} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \end{aligned} \quad (16)$$

因此可以求出残余应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及其主方向  $\varphi$  与  $\epsilon'_{rB}$ 、 $\epsilon'_{rA}$  和  $\epsilon'_{rC}$  的关系:

$$\sigma_1 = f(\epsilon'_{rA}, \epsilon'_{rB}, \epsilon'_{rC}) \quad (17)$$

$$\sigma_2 = g(\epsilon'_{rA}, \epsilon'_{rB}, \epsilon'_{rC}) \quad (18)$$

$$\varphi = \varphi(\epsilon'_{rA}, \epsilon'_{rB}, \epsilon'_{rC}) \quad (19)$$

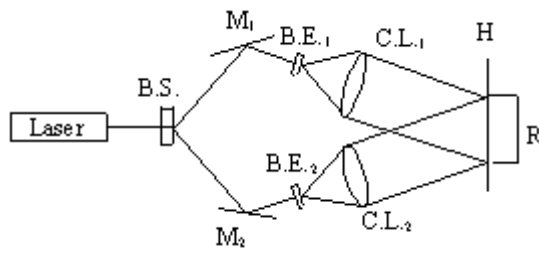
## 4 光栅应变花原理

### 4.1 光栅应变花的制作(图 2)

#### 4.1.1 实验装置(图 3)

#### 4.1.2 制作步骤

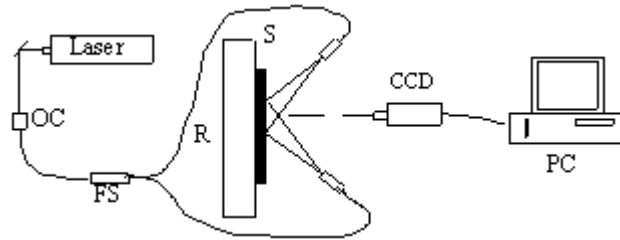
① 根据不同的激光功率和全息干版确定相应的曝光时间,进行第一次曝光;② 将全息干版旋转  $90^\circ$  进行第二次曝光,再将全息干版同方向旋转  $45^\circ$  进行第三次曝光;③ 将曝光后的全息干版进行显影、定影和漂白处理即可得到光栅应变花;④ 镀膜。



Laser:激光器 B.S.:分光镜 B.E.<sub>1</sub>, B.E.<sub>2</sub>:扩束镜 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>:反光镜 C.L.<sub>1</sub>, C.L.<sub>2</sub>:准直镜 H:全息干板 R:旋转台

图2 光栅应变花制作的光路图

Fig. 2 Schematic of experimental set-up for manufacturing grating rosette



L:激光器 OC:光纤耦合器 FS:Y型光纤 C1, C2:光纤夹持器 S:试件 R:工作台 CCD:摄像机 PC:计算机

图3 云纹干涉法的实验装置图

Fig. 3 Experimental set-up for moiré interferometry

#### 4.2 测试原理

在小变形情况下可以得到试件的应变与条纹级数之间关系的基本公式<sup>[7]</sup>:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = p \frac{\partial N_x}{\partial x} = \frac{1}{2f} \frac{N_{x2} - N_{x1}}{\Delta x} \quad (20)$$

式中:  $\epsilon_x$  是变形量,  $x=1, 2, 3$  分别代表 X、Y 以及  $45^\circ$  方向,  $u_x$  分别表示 X、Y 以及  $45^\circ$  方向的位移场,  $N_{x1}$ 、 $N_{x2}$  是变形前、后的在  $\Delta x$  上的条纹数,  $p$ 、 $f$  分别是试件栅的栅距、频率。

光纤耦合器和 Y 型光纤来获得对称入射的双光束, 它们的  $\pm 1$  级衍射光产生干涉, 形成的光栅与试件栅一起形成 Moiré 条纹。当试件产生变形时, 随之变形的试件栅将造成 Moiré 条纹的变化, 用 CCD 和 PC 采集和记录残余应力释放前、后 Moiré 条纹的变化, 通过式(20)计算出三个方向的应变  $\epsilon'_{xB}$ 、 $\epsilon'_{yA}$  和  $\epsilon'_{zC}$ , 进而通过式(17)、(18)、(19)求出残余应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及其主方向  $\varphi$ 。

#### 5 测试实例——碳纤维增强复合材料的残余应力

复合材料的残余应力与其结构、制造工艺和工艺参数都有很大关系。比如碳纤维增强复合材料, 碳纤维/环氧预浸料的配方、固化剂的类型; 碳纤维的铺层方向、层数; 制作时的压力、温度等对其残余应力均有不同的影响。图4所示的是: 配方为碳纤维: 62%, 环氧树脂: 38%; 固化剂为酚醛环氧+双氰胺; 铺层方向:  $\theta = \pm 30^\circ$ , 层数: 16 层; 制作时的压力: 200psi, 温度:  $125^\circ\text{C}$ 。

从图4中可以看出, 三个方向的位移场在钻孔前、后都有比较明显的变化, 通过这种变化量的计算便可以得到公式(17)~(19)中的三个应变  $\epsilon'_{xB}$ 、 $\epsilon'_{yA}$  和  $\epsilon'_{zC}$ ; 而且在计算应变时只需要沿 Moiré 条纹的法线方向, 因此当钻孔过程中试件有微小转动时, 可以对比钻孔前的 Moiré 条纹图来调整试件的位置。

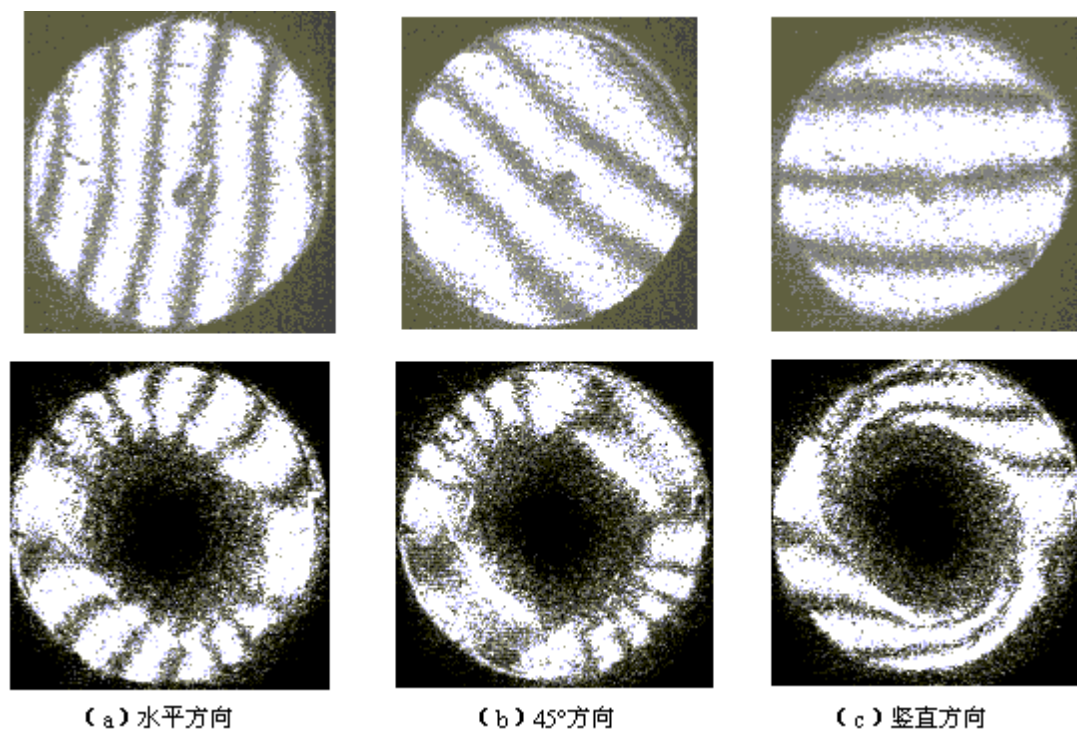


图 4 碳纤维增强复合材料钻孔前后的 Moiré 条纹

Fig. 4 Moiré patterns before and after drilling on carbon fiber reinforces composite material

## 6 结论

从以上的实验可以看出,对于各向异性的碳纤维增强复合材料,应用光栅应变花、云纹干涉技术,结合相应的应力释放方法,可以检测到其中的残余应力。

这种方法的优点是可以根据应力释放前的 Moiré 条纹图比较准确调整试件在残余应力释放后的位置,力求使试件在残余应力释放前、后处在同一位置,以消除试件移动带来的误差;同时在计算 Moiré 条纹的间距时,可以始终沿确定的方向(X、Y 以及  $45^\circ$  方向)测量;也可避免偏微分时(求  $\gamma_{xy}$ )的可能误差。

### 参考文献:

- [1] 袁发荣. 残余应力测试与计算[M]. 长沙:湖南大学出版社,1987. 1~6 (Yuan Farong. Measurement and calculation of residual stresses. Changsha:Hunan university press,1987. 1~6 (in Chinese))
- [2] Lu J. Handbook of Measurement of Residual Stresses [M]. Lilburn, Fairmont Press, Inc., 1996. 5~30
- [3] ASTM E837-94a: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method[S]
- [4] 何世平,关锸,束永生等. 应用云纹干涉测量工艺应力分布[J]. 力学学报,1993,25(4):485~491 (He Shiping, Guan E, Shu Yongsheng. Test on the distributing of residual stress by moiré interferometry. ACTA MECHANICA SINICA, 1993,25(4):485~491 (in Chinese))
- [5] 卿新林,戴福隆,秦玉文. 云纹干涉法在新材料细观力学实验中的应用[J]. 实验力学,1994,(3):201~208 (Qing Xinlin, Dai Fulong, Qin Yuwen. Micromechanical Experimental Study of New Materials by Moiré Interferometry. Journal of Experimental Mechanics, 1994,(3):201~208 (in Chinese))
- [6] 罗祖道,李思简. 各向异性材料力学[M]. 上海:上海交通大学出版社,1994. 10~28 (Luo Zudao, Li Sijian. Anisotropic material mechanics. Shanghai Jiaotong University press, 1994. 10~28 (in Chinese))
- [7] Post D, Han B, Ifju P. High Sensitivity Moiré [M]. New York, Springer-Verlag Press, 1994. 114~136

## A Study on Grating Rosette and its Application in Measuring Residual Stresses of Composite Material

JIN Xiang-hua, CHEN Ju-bing, XIN Quan-cheng

(Shanghai Jiaotong University Engineering Mechanics Department, Shanghai 200240)

**Abstract:** Residual stresses are induced during most manufacturing processes involving material deformation, heat treatment, machining or processing operations that transform the shape or change the properties of a material. Residual stresses may be sufficiently large to cause local yielding and plastic deformation, and can severely affect component performance. For this reason it is vital to deduce the residual stress states either from measurements or modeling predictions. Because of the randomness of residual stresses, it is very difficult to study the problem by theory. The present treatment generally emphasizes on methods of measuring residual stresses.

In this paper, a grating rosette was made. A grating with  $45^\circ$  angle was added to the crossed grating ( $0^\circ$  and  $90^\circ$  direction), so that the grating rosette could contribute three directional deformation fields to this kind moiré interference technique. It should be stressed that in moiré interferometry simple grating or crossed grating is applied in general. In crossed grating moiré interferometry, two fringe patterns can be obtained to determine the full strain evaluation ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  and  $\gamma_{xy}$ ). For measuring residual stress, if the specimen was moved during drilling hole, it is very difficult to reposition it with high precision. There must be errors as we compared the corresponding moiré patterns (before and after drilling) to determine the full strain evaluation. Especially as computing  $\gamma_{xy}$  by the derivatives of two fringe patterns, a very small rotation of specimen may result in sizable errors.

**Key words:** fiber-reinforced composite material; residual stresses; grating rosette; drilling-hole