

文章编号: 0258-7025(2001)08-0746-03

应用光栅应变花和云纹干涉技术 测试残余应力*

陈巨兵¹ 周伯明² F. Ginesu³

(¹ 工程力学系, ² 设备处, 上海交通大学 上海 200030; ³ 意大利 Cagliari 大学机械工程系)

提要 研制了一种有三个方向灵敏度的光栅, 称之“光栅应变花”, 应用云纹干涉技术, 结合钻孔法, 能够比较准确地测试出材料、结构的残余应力状况。

关键词 光栅应变花, 残余应力, 云纹干涉, 测试

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Measurement on Residual Stresses by Grating Rosette and Moiré Interference

CHEN Ju-bing¹ ZHOU Bo-ming² F. Ginesu³

¹Engineering Mechanics Department, ²Equipment Department,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030
³Mechanical Department of Cagliari University, Italy

Abstract A kind of three directional grating called grating rosette is made, and a new method for measuring residual stresses has been developed by means of the grating rosette and moire interference technique.

Key words grating rosette, residual stresses, moire interference, measuring

1 引言

残余应力可以说是无处不在, 像焊接、磨削等加工均能带来很大的残余应力, 相应的在各种石油化工的塔、罐、船体以及机械零件的表面均可能存在残余应力, 它们对零件、部件及结构的质量、使用寿命等有很大影响, 有的甚至造成重大事故。由于残余应力产生的原因非常复杂, 同时又有很大的随机性, 很难从理论上计算其大小与方向, 而用实验测试是比较可行的。目前在国内外已经出现的测试残余应力的方法大致有: 电阻应变法、X 射线衍射法、中子法、超声波法、电磁法^[1]和云纹法等。这些方法都有其使用范围和优点, 同时也存在各种各样的缺点。目前的云纹干涉技术中一般都采用单方向或两个方

向的光栅, 在一次加载中只能同时测得一个方向或两个方向的应变场。而对于残余应力的测试, 如能同时测得三个方向的应变场, 则可以减小测试、计算带来的误差, 提高测试的精度和可靠性。本文作者研制的三个方向灵敏度的光栅, 称之“光栅应变花”, 在一次加载和测试中得到三个相互独立的应变场, 从而全面地测试分析出其应变状况。并以此方法来测试残余应力。

2 测试的基本原理

本文采用云纹干涉技术和光栅应变花, 结合钻孔法, 测试残余应力, 是利用在钻孔后残余应力的释放将在已加工表面产生变形而改变云纹干涉中三个方向的莫尔(moiré)条纹的间距, 通过测量其间距的变化来确定所释放的三个方向的应变(ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3)的大小, 进一步确定残余应力

$$\epsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{f} \left[\frac{\partial N_x}{\partial x} \right] = \frac{1}{f} \left[\frac{N_{x2} - N_{x1}}{\Delta x} \right]$$

* 意大利 C. N. R. (Italian National Research Council)

“Progetto Finalizzato Trasporti 2” No. 92.01911. PF74 项目资助。

收稿日期: 2000-04-28; 收到修改稿日期: 2000-06-18

式中, $x = 1, 2, 3$; U 为 x 方向上的位移场; f 为光栅的频率, 本试验 $f = 2000$ 线/mm; Δx 为所选的 x 方向上很小的距离间隔; N_{x1}, N_{x2} 分别是钻孔前、后在 Δx 上的摩尔条纹数。

3 实验装置与方案

3.1 测试残余应力的实验装置

实验装置如图 1 所示^[3,4]。

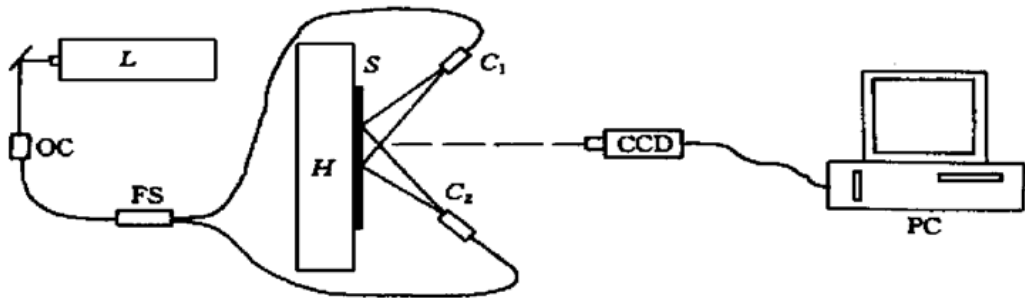


图 1 测试残余应力的实验装置

L: 激光器; OC: 光纤耦合器; FS: Y 型光纤; C_1, C_2 : 光纤夹持器; S: 试件; H: 可旋转工作台; CCD: 摄像机; PC: 计算机

Fig. 1 Experimental set-up for measuring residual stresses

L: laser; OC: optical coupler; FS: Y optical fiber; C_1, C_2 : chucks;

S: specimen; H: rotatable worktable; CCD: video camera; PC: personal computer

3.2 测试过程

将三个灵敏度的光栅复制到被测试件, 并安装在可旋转工作台 H 上, 分别调试出 x, y 轴和与其夹角为 45° 方向的 moiré 条纹, 并储存在 PC 中; 取下试件, 钻孔(孔径 $2a = 1.0$ mm); 重新安装试件, 准确定位在可旋转工作台 H 上, 分别采集三个方向的 Moiré 条纹; 比较钻孔前、后 Moiré 条纹的变化情况, 计算出应变大小, 进而确定残余应力。

3.3 标定

选用已知应力状态的试件, 如铝受单向均匀拉伸 ($\varepsilon = 930 \mu\text{m}$), 如图 2 所示。

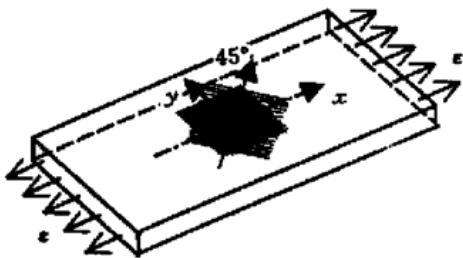


图 2 铝试件结构

Fig. 2 Geometry of aluminum specimen

按 3.2 中的步骤进行测试得到钻孔前、后的位移场(如图 3(a) ~ (f)), 并计算出相应的应变; 再和理论计算比较, 找出其中的误差。理论计算见参考文献[2], 公式如下

$$\sigma_r = \frac{S}{2} \left[1 - \frac{a^2}{r^2} \right] + \frac{S}{2} \left[1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right] \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{S}{2} \left[1 + \frac{a^2}{r^2} \right] - \frac{S}{2} \left[1 + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta$$

$$\tau_{\theta} = - \frac{S}{2} \left[1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right] \sin 2\theta$$

式中, a 为所钻孔孔径, r 为任意点到所钻孔中心的距离, S 为载荷, σ_r 为任意点径向应力, σ_θ 为任意点切向应力, τ_θ 为任意点剪应力, θ 为任意点和所钻孔的中心的连线与 x 轴的夹角, 逆时针为正。实验结果与理论计算的比较如图 4 所示。

4 测试方法的特点

与已有的残余应力测试方法相比(如常见的电测方法), 应用云纹干涉法测试残余应力, 所测得的应变是通过位移场得到的。它能够测得整个被测区域每个点的应变值, 而不是平均应变。因此, 测试的精度和可靠性大大提高。

目前常用的云纹干涉法测试残余应力, 大都采用单方向或两个方向的光栅。它是通过对两个位移场 (u 场和 v 场) 的微分来得到相应的应变 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 和 γ_{xy} 。而本文所采用的光栅应变花, 能够得到三个位移场 (u, v 和 w 场), 可以沿 moiré 条纹的法线方向测量钻孔释放前后条纹间距的变化来确定 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ε_3 。这样可以减小对 u 场和 v 场的微分时可能带来的测量误差。

本文采用的光栅应变花的频率为 1000 线/mm, 每一级条纹所代表的位移是 $0.5 \mu\text{m}$ 。若采用电子

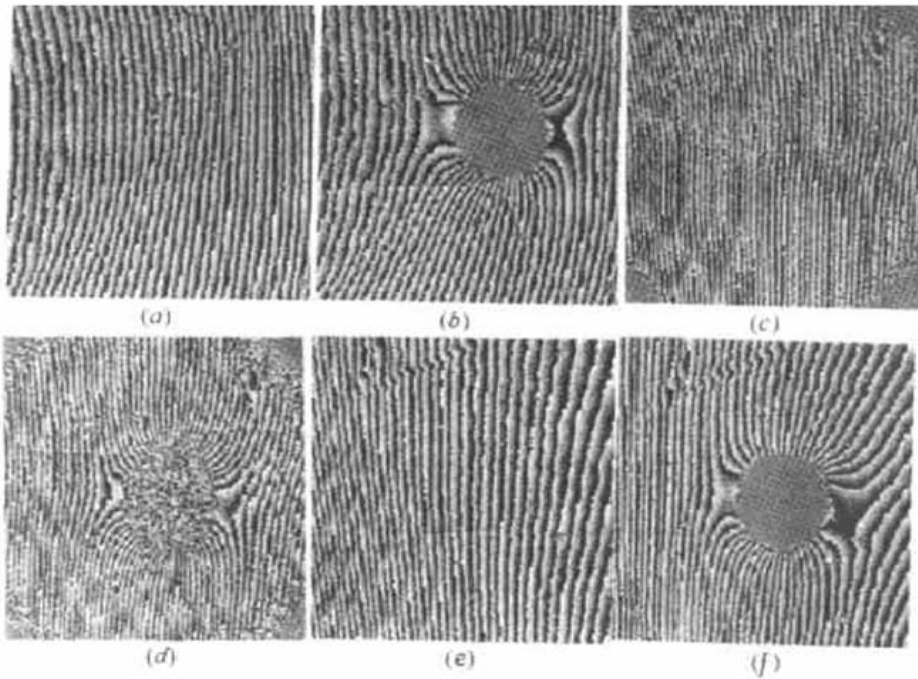


图3 钻孔前后试件表面莫尔(Moiré)条纹
 (a), (c), (e) 钻孔前, (b), (d), (f) 钻孔后, 灵敏度方向: (a), (b) 水平, (c), (d) 45°, (e), (f) : 竖直

Fig.3 Moiré fringes before and after drilling hole

(a), (c), (e) before drilling hole; (b), (d), (f) after drilling hole, sensitive direction: (a), (b) horizon; (c), (d) 45°; (e), (f) vertical

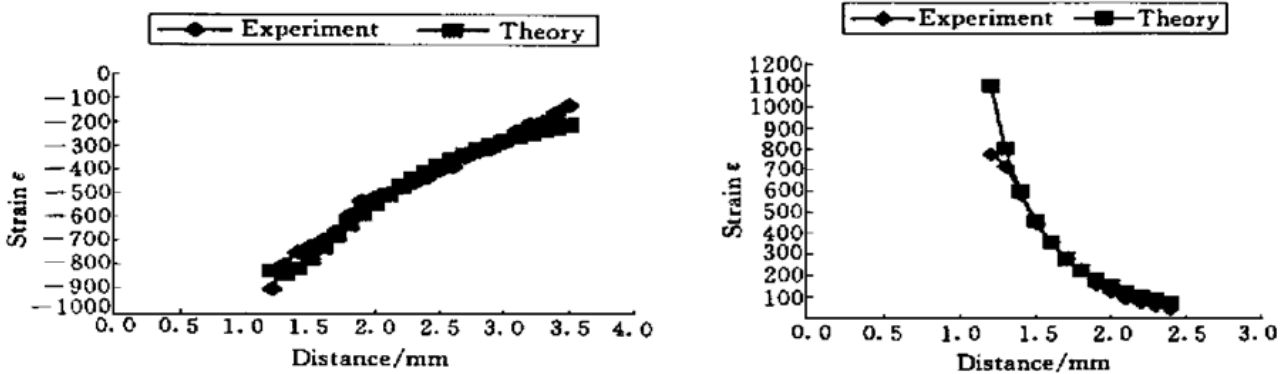


图4 实验结果与理论计算的比较

Fig.4 Comparison with analytical results

细分和相移技术,其灵敏度可达 $0.025 \mu\text{m}$, 而且在三个方向上是完全一致的。

5 结 论

1) 通过实验和理论计算的比较,证明本文所研制的光栅应变花是可行的,将它应用于云纹干涉测试中获得了非常满意的结果;

2) 应用三个方向灵敏度的光栅、云纹干涉技术测试残余应力,可以得到全场实验数据,结果比较准确。本实验中的相对误差 $\leq 10\%$ 。

应用光栅应变花和云纹干涉技术,测试残余应

力的精度是比较满意的。用这种光栅应变花来做云纹干涉测试,不仅使其应用范围更广,而且提高了测试的精度。

参 考 文 献

- 1 Lu Jian. Handbook of Measurement of Residual Stresses. Indian: Fairmont Press. Inc., 5~ 30
- 2 S. P. Timoshenko. Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Company, 1991. 8~ 12, 90~ 96
- 3 F. Bertolino, F. Ginesu, J. Chen. Experimental characterization and analysis of angle-ply composite laminates, 1994 SEM Spring conference, Baltimore, 1994
- 4 R. Ambu, F. Bertolino, F. Ginesu *et al.*. Recent progress in holographic moiré technique, 27' National Congress of AIAS, Perugia, 1998