

现代科技发展对实验力学带来的 挑战和机遇

中国科协第75次“青年科学家论坛”论文集

方岱宁 何小元 谢惠民 主编

 北京理工大学出版社
BEIHANG INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

现代科技发展对实验力学 带来的挑战和机遇

——中国科协第 75 次“青年科学家论坛”论文集

方岱宁 何小元 谢惠民 主编

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

现代科技发展对实验力学带来的挑战和机遇:中国科协第75次
“青年科学家论坛”论文集/方岱宁,何小元,谢惠民主编. —北京:
北京理工大学出版社,2004.8

ISBN 7-5640-0334-0

I. 现… II. ①方…②何…③谢… III. 应用力学-学术会议
-文集 IV. O39-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 068905 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68912824(发行部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefedit@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京迅捷佳彩印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 11

字 数 / 240 千字

版 次 / 2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷 责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 25.00 元 责任印制 / 刘京凤

图书出现印装质量问题,本社负责调换

序 言

为加强国内青年实验力学工作者之间的学术交流和合作,探讨实验力学在 21 世纪的发展,促进我国青年实验力学工作者的成长,由清华大学、天津大学、中国科技大学、东南大学和国防科技大学共同发起,中国科协主办了主题为“现代科技发展对实验力学带来的挑战和机遇”的第 75 次青年科学家论坛。本次论坛得到了从事实验力学研究及相关专业青年学者们的热烈响应,到会代表分别来自微电子、生物、化学、力学、物理、材料、机械、摩擦和润滑等领域,反映出多学科交叉的特点,基本上覆盖了国内从事相关领域的主要优势单位和专家。

我认为实验力学的发展必须重视产业界对基础技术的研究需求,既要强调重视基本方法的研究,也要注意更好地将研究方法进行应用,解决实际问题,这也是此次论坛代表们的一个共识。如何搞好实验力学与其他学科的交叉与融合,是我们实验力学科学工作者面临的另一个焦点问题。论坛集中研讨了物理、化学、微电子、材料以及生物学等学科领域的最新研究成果对于力学测量技术的发展可能发挥的作用和实验力学学科应如何面对微/纳米系统、生命科学、材料科学以及工程领域提出的特殊环境下的力学测量问题,是交叉学科间一次可喜、有益的交流。本次研讨会是我国实验力学学科首次举办的论坛形式的会议,所交流、研究的工作总体上反映了我国青年力学工作者在实验力学和与其他学科交叉领域的前沿研究水平。

进入 21 世纪以来,高科技发展日新月异。作为老一辈的实验力学工作者,希望青年实验力学工作者抓住机遇、密切关注新技术的发展动向,寻求新的生长点、发展新的测试方法和技术。只有不断地创新,开辟新研究领域和解决新问题,才能保证持续地发展,才有可能赶超国际先进水平。除此以外,希望注重对我们这支研究队伍的建设,发挥团队精神,借助集体力量的优势,努力为我国国民经济建设服务,为国防建设做出更多的贡献。

这本论文集汇集了大部分会议论文和部分摘要,涵盖了论坛四个主要议题的相关内容,反映了实验力学学科近期的研究动向和相关交叉学科的最新研究进展。借此机会对本次论坛的成功举办表示祝贺,并将本论文集推荐给大家供今后工作参考。

伍小平 院士

2004 年 3 月 10 日于合肥

目 录

(按作者姓名拼音排序)

高分子合金体积损伤的测量技术	白树林 (1)
光栅应变花与残余应力测试	陈巨兵等 (4)
硅橡胶栅制作及高温云纹干涉测试技术	程 军等 (11)
激光通信中的振动抑制	崔云俊等 (17)
力—电/力—磁耦合场下功能材料物理力学性能实验研究	方岱宁等 (22)
基于时间—空间变换的超声导波信号处理技术研究	何存富等 (36)
材料与结构的发展需要实验力学的新方法和新技术	何小元等 (43)
原子力显微镜力测定研究分子信标与核酸的相互作用(摘要)	金 燕等 (49)
生物分子间的弱相互作用与分子识别研究	鞠焜先等 (51)
全场光学检测技术中若干问题探讨及其在时间和空间调制检测技术方面的发展	李喜德 (56)
磁流变液工程应用及其减振器动态特性研究	吕建刚等 (65)
新型压电单晶的场致高应变特性研究	罗豪甦等 (72)
Electrochemical Study on Mechanism of Voltage - Controlled Friction Phenomena	MENG Yong - gang 等 (78)
低维脆性材料的断裂韧性的纳米压痕测试(摘要)	乔利杰 (84)
数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究	邵龙潭等 (87)
埋入式 BRAGG 光纤光栅原理分析与工程应用研究	汤立群等 (97)
慢速化学—力学过程及其测量	涂善东等 (107)
数字散斑相关方法与应用研究进展	王怀文等 (119)
与植入式生物医用材料相关的力学问题	翁 杰等 (129)
高分辨电镜云纹法	谢惠民等 (139)
Determining Interfacial Thermal Residual Stress Using Electron Moiré Method	Y. M. Xing (149)
用等值线窗口相关条纹图进行单幅散斑条纹图提取相位场	于起峰等 (154)
微拉曼光谱仪和 SPM 在对 MEMS 结构应力和表面力学行为测试中的应用(摘要)	赵亚溥等 (159)
动态剪切滑移带的实验研究与数值模拟	张青川等 (160)

高分子合金体积损伤的测量技术

白树林

(北京大学力学与工程科学系, 北京 100871)

在载荷作用下, 高分子合金会发生明显的体积变化, 其主要原因是材料内部产生了空洞所致。首先在填充相与基体形成的界面处产生裂纹, 随后随着变形的进行, 界面裂纹演变成空洞。空洞向基体中扩展形成横向裂纹, 最终导致材料断裂。根据基体性质的不同, 也有可能在基体内部直接产生空洞。体积变化反映出材料的损伤程度。因此, 测定加载过程中体积的变化是研究高分子合金损伤的一种有效手段。

实验用设备主要包括: 材料试验机 and 摄像头。为了测定试样的体积变化, 需要测出三个方向的变形。体积应变定义为三个方向应变的总和, 即 $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$ 。 ϵ_3 沿拉伸方向。假设 $\epsilon_1 = \epsilon_2$, 则 $\epsilon_v = 2\epsilon_1 + \epsilon_3$ 。 ϵ_1, ϵ_3 需要实验测定。为此目的, 在常规拉伸试样的中间段预制出一段测量区, 测量区的宽度略小于其他部位, 因此保证了变形在该处发生。随后在该区域沿纵向(拉伸方向)涂上五个白色斑点, 沿横向涂上二个白色斑点。这些斑点作为参考点来测定拉伸变形。斑点直径约为 0.4 mm, 间距 1 mm。试样中心横跨三个横向斑点的窄区域成为代表单元, 高度约 0.2 mm。纵向和横向应变通过斑点的位移来计算。图 1 为拉伸试样示意图。图 2 所示为真实试样变形后的形貌。

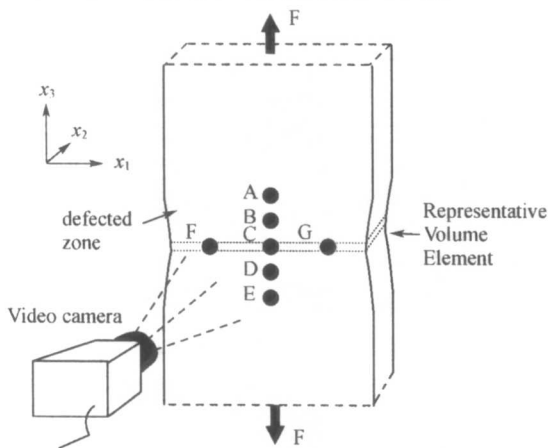


图 1 拉伸试样示意图

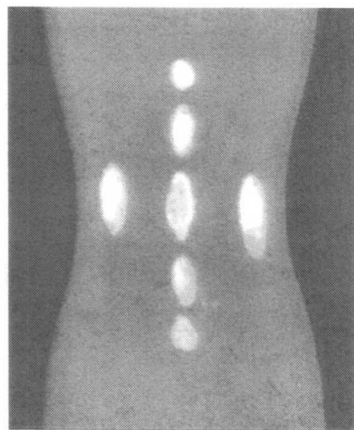


图 2 真实试样变形后的形貌

在拉伸变形过程中, 利用摄像头拍下每一时刻斑点的位移图像, 计算机内计算软件会自动采集数据, 并进行处理, 获得真应变、真应力和体积应变。测量系统的核心是软件的实用性。

以聚丙烯/尼龙 6/马来酸酐接枝乙烯辛烯共聚物(PP/PA6/POE-g-MA)共混高分子合金为研究对象, 完成了单向拉伸和循环拉伸实验。实验结果曲线如图 3~6 所示。为了揭示材料内部发生的空洞化现象, 利用冷冻脆断方法制取变形后的样品, 然后在扫描电子显微镜下观察。结果发现, 体积变形主要来自界面的开裂。界面裂纹进一步发展成空洞。图 7 所示为断口照片。

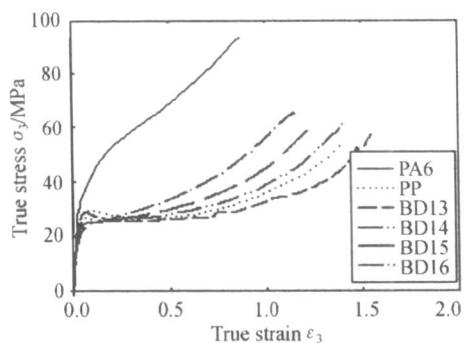


图3 拉伸真应力—真应变曲线

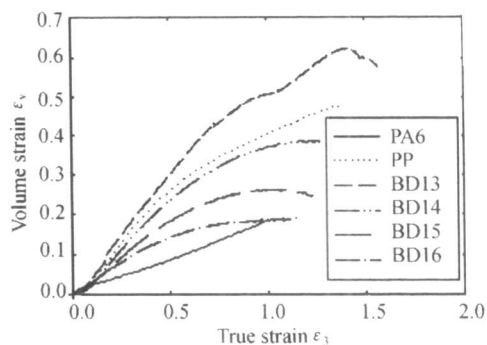


图4 拉伸体积应变—真应变曲线

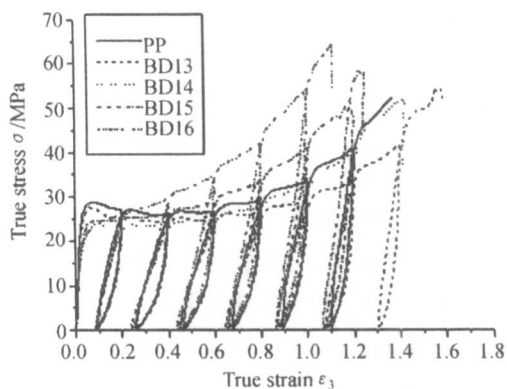


图5 循环拉伸真应力—真应变曲线

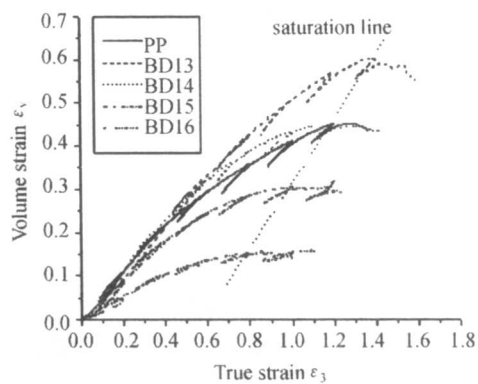


图6 循环体积应变—真应变曲线

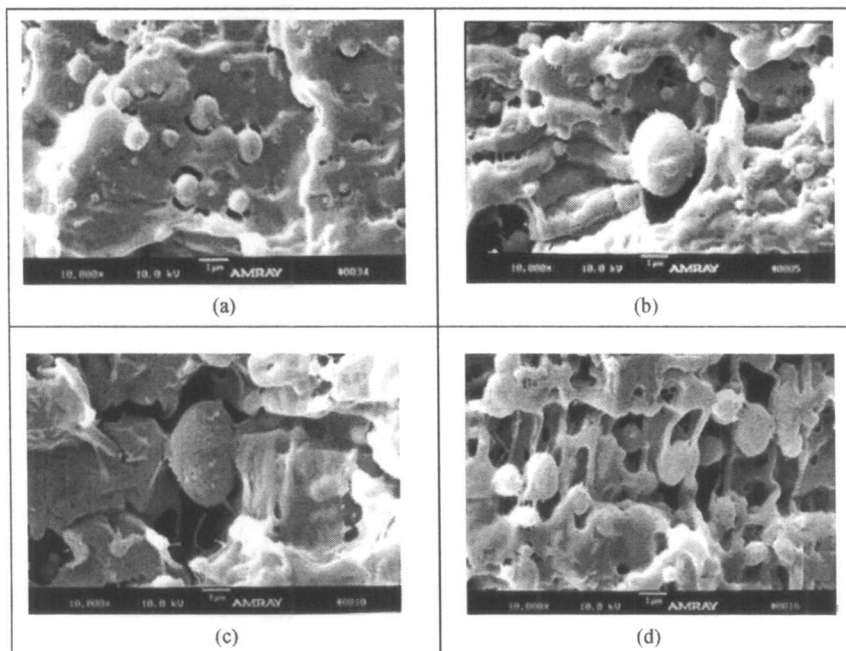


图7 拉伸试样断口照片

拉伸真应变为:(a)0.4; (b) 0.6; (c) 0.8; (d) 1.0

作者简介

白树林,男,出生于 1961 年 2 月,教授,博士生导师

学历

1979—1983: 大连理工大学材料工程系,获学士学位

1983—1986: 大连理工大学工程力学系,获硕士学位

1988—1989: 法国 Ecole Centrale de Paris,复合材料专业,获硕士学位

1990—1993: 法国 Ecole Centrale de Paris,复合材料专业,获博士学位

1994—1996: 北京大学力学与工程科学系固体力学博士后

1996.10 至今: 北京大学力学与工程科学系副教授,教授,博导

研究方向

1. 纤维增强和颗粒填充复合材料的损伤与破坏
2. 复合材料的微观结构与力学性能的关系
3. 复合材料界面性能的研究

著作 已经发表约 50 篇论文,SCI 收录 20 余篇

学术兼职

中国兵工学会应用力学专业委员会委员

中国力学学会爆炸与冲击专业委员会委员

《爆炸与冲击》杂志编委

中国复合材料学会树脂基复合材料分会树脂基专业委员会委员

通讯地址:北京大学力学与工程科学系 北京 100871

电话:62341033

E-mail: slbai@ pku.edu.cn

光栅应变花与残余应力测试

陈巨兵 金香花 余征跃

(上海交通大学工程力学系, 上海 200240)

Grating rosette and its application in residual stresses testing

Jubing Chen Xianghua Jin Zhengyue Yu

Shanghai Jiaotong University Engineering Mechanics Dept. 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, 对于各向异性的复合材料, 其残余应力就更加复杂。本文介绍了采用光栅应变花, 结合钻孔法, 通过测试同一面内三个残余应变: ϵ_x 、 ϵ_y 和 ϵ_{45} , 再计算相应的残余应力 σ_1 、 σ_2 及主应力方向 φ 。

关键词 残余应力 光栅应变花 云纹干涉 钻孔法

Abstract It is well known that residual stresses affect the fatigue strength and life of material and its structure. With different manufacturing and processing of material and its structure, the value and direction of residual stresses were more random, and they were more complicated in anisotropic composite materials. By grating rosette and drilling - hole, three residual strains: ϵ_x , ϵ_y and ϵ_{45} could be tested, further the residual stresses: principal stress σ_1 , σ_2 and the principal stress direction φ could be calculated.

Keywords residual stresses grating rosette moiré interferometry drilling - hole

1 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^[1]; 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^[2]。

用电阻应变花结合钻孔法、移层法是最常见的^[2], 美国 ASTM 还专门制定了该测试残余应力方法的标准^[3], 但电阻应变花测试的只是分别在三个方向上的一个应变, 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,其中纤维的直径可能在几十 μm 左右,也就意味着在直径为几十 μm 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^{[4][5]},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(ϵ_x, ϵ_y 和 γ_{xy}),而不是某个面积上的平均值,通过计算得到相应的应力。如果在残余应力的释放过程中能够准确地定位或保持试件的位置不变,该方法测试的精度和灵敏度都是很高的。可是目前还比较困难,因为即便是试件有很微小的平移或转动,都会造成残余应力释放前后的 Moiré 条纹图相当大的差异。

X 射线衍射法(XRD)^{[6][7][8]}是常用的方法之一。该方法一般适用于具有良好晶体结构的材料。当晶粒尺寸很小或材料成分分布不易预测时,会导致衍射峰值变宽,影响测试精度。X 射线在材料中的穿透深度由其波长和材料的性能决定,通常约为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$,如此弱的穿透能力大大限制了该方法的应用范围。

中子射线技术是一种衍射方法,其主要优点是对大多数材料具有较强的穿透能力,校准技术还可以用来描述残余应力沿厚度的变化情况,这就克服了 X 射线法的许多缺点。但中子的散射强度相对较低,在规定的时间内难以得到足够的测试数据,而且可用的中子源也很有限。

2 钻孔法的基本原理

钻孔法是由 J. Mathar 于 1932 年提出的^[1],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。钻孔法示意如图 1 所示。

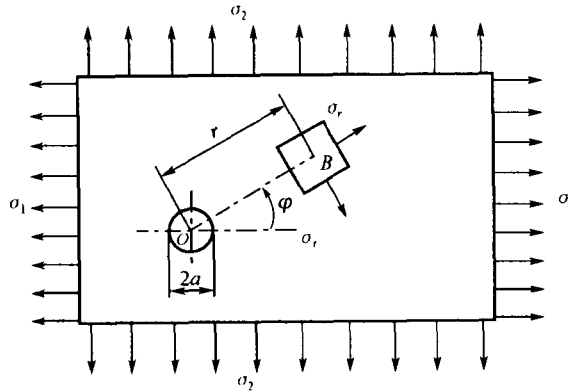


图 1 钻孔法示意图

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 B 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 B 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

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

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

$$\epsilon_r' = \frac{1}{E} (\sigma_r' - \mu \sigma_t') \quad (7)$$

将式(5),(6)代入式(7)即可建立 B 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 ϵ_{rC}' , 即可求得主应力 σ_1, σ_2 和主方向 φ 。径向应变测点布置如图 2 所示。

$$\begin{aligned} \epsilon_r' = & -\frac{1+\mu}{2E} \left(\frac{a}{r} \right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2) + \\ & \frac{1}{E} \left[-2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 + \frac{3(1+\mu)}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right] \cdot \\ & (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi \end{aligned} \quad (9)$$

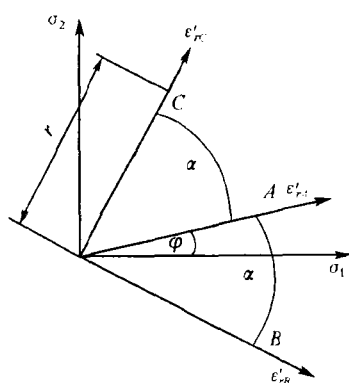


图 2 径向应变测点布置

设在与孔中心 O 等距离为 r , 且与主应力 σ_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 ϵ_{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^[9], 有

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

因此对于复合材料, 在图 1 所示的钻孔法中, 在 A 产生的径向应变为

$$\epsilon_r' = \frac{\sigma_r'}{E_r} - \frac{\nu_{tr}}{E_t} \sigma_t' \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} \epsilon_r' = \frac{1}{E_r} & \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{a^2}{r^2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\varphi \right] - \\ & \frac{\nu_{tr}}{E_t} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{a^2}{r^2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \cos 2\varphi \right) \end{aligned} \quad (15)$$

在图 2 所示径向应变测点布置中,令 $\alpha = 45^\circ$,并将 B, C, A 点分别选在 x, y 轴以及它们的夹角上,因此与主应力 σ_1 成 $(\varphi - 45^\circ)$, φ , $(\varphi + 45^\circ)$ 的三个方向上分别测试其径向应变 ϵ_{xB}' , ϵ_{sA}' 和 ϵ_{yC}' 分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_{sA}' &= \left(\frac{1}{E_s} - \frac{\nu_{ts}}{E_t} \right) \cdot \frac{a^2}{r^2} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \left[\frac{1}{E_s} \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) + \frac{\nu_{ts}}{E_t} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \\ \epsilon_{xB}' &= \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \right) \cdot \frac{a^2}{r^2} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \left[\frac{1}{E_x} \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) + \frac{\nu_{yx}}{E_y} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\varphi \\ \epsilon_{yC}' &= \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \right) \cdot \frac{a^2}{r^2} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \left[\frac{1}{E_y} \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) + \frac{\nu_{xy}}{E_x} \cdot \frac{3a^4}{r^4} \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \end{aligned} \quad (16)$$

因此可以求出残余应力 σ_1, σ_2 及其主方向 φ 与 ϵ_{xB}' , ϵ_{sA}' 和 ϵ_{yC}' 的关系

$$\sigma_1 = f(\epsilon_{sA}', \epsilon_{xB}', \epsilon_{yC}') \quad (17)$$

$$\sigma_2 = g(\epsilon_{sA}', \epsilon_{xB}', \epsilon_{yC}') \quad (18)$$

$$\varphi = \phi(\epsilon_{sA}', \epsilon_{xB}', \epsilon_{yC}') \quad (19)$$

3 光栅应变花

3.1 光栅应变花的制作

3.1.1 实验装置

光栅应变花制作的光路图如图 3 所示。

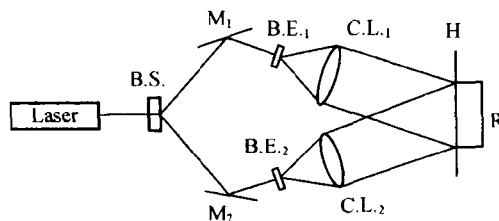


图 3 光栅应变花制作的光路图

Laser—激光器; B. S.—分光镜; B. E.₁, B. E.₂—扩束镜;

M₁, M₂—反光镜; C. L.₁, C. L.₂—准直镜; H—全息干板; R—旋转台

3.1.2 制作步骤

(1) 根据不同的激光功率和全息干板确定相应的曝光时间,进行第一次曝光;

- (2) 将全息干板旋转 90° 进行第二次曝光,再将全息干板同方向旋转 45° 进行第三次曝光;
- (3) 将曝光后的全息干板进行显影、定影和漂白处理即可得到光栅应变花;
- (4) 镀膜。

3.2 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

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

式中 ϵ_x 是变形量, $x = 1, 2, 3$, 分别代表 x, y 以及 45° 方向; u_x 分别表示 x, y 以及 45° 方向的位移场; N_{x1}, N_{x2} 是变形前后的在 Δx 上的条纹数; p, f 分别是试件栅的栅距、频率。

云纹干涉法的实验装置图如图 4 所示。

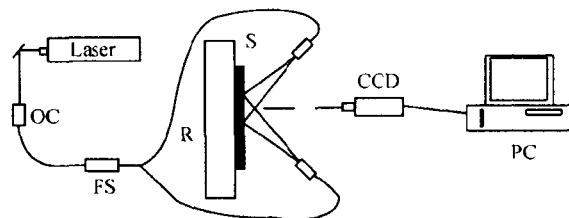


图 4 云纹干涉法的实验装置图

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

光纤耦合器和 Y 型光纤来获得对称入射的双光束, 它们的 ± 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 $\epsilon_{xB'}$, $\epsilon_{xA'}$ 和 $\epsilon_{yC'}$, 进而通过式(17), (18), (19)求出残余应力 σ_1, σ_2 及其主方向 φ 。

4 测试实例

4.1 磨削表面的残余应力^[11]

磨削过程中, 表面残余应力产生的因素非常复杂, 各种工艺参数对磨削表面质量有很大的影响。考虑到径向进给量 f_r 对磨削区的平均温度影响最大, 而无论是不均匀塑性变形、热应力, 还是相变、化学变化等都与温度有关, 这些现象正是影响其表面残余应力大小和性质的主要因素。

磨削表面钻孔前后的 Moiré 条纹如图 5 所示。

磨削表面的残余应力与径向进给量 f_r 的关系如图 6 所示。

4.2 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。碳纤维增强复合材料钻孔前后的 Moiré 条纹如图 7 所

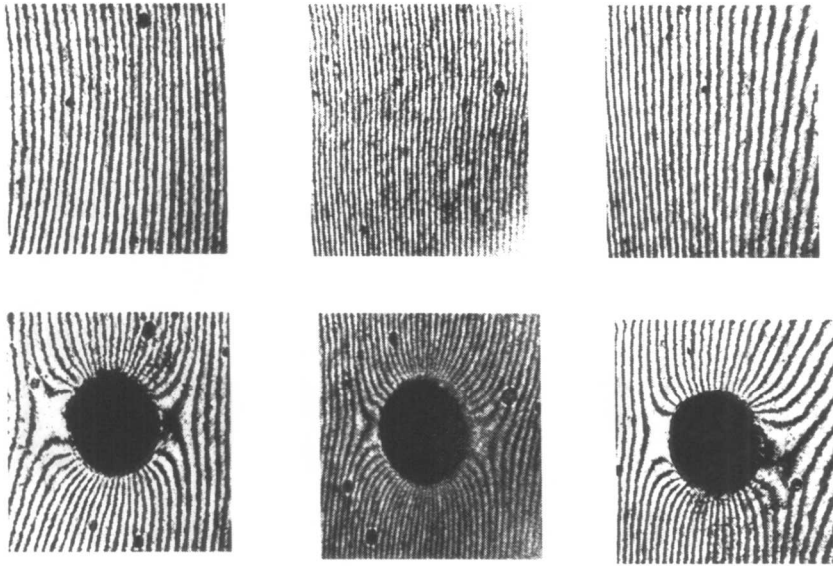


图5 磨削表面钻孔前后的 Moiré 条纹($f_r = 0.35 \text{ mm}$)

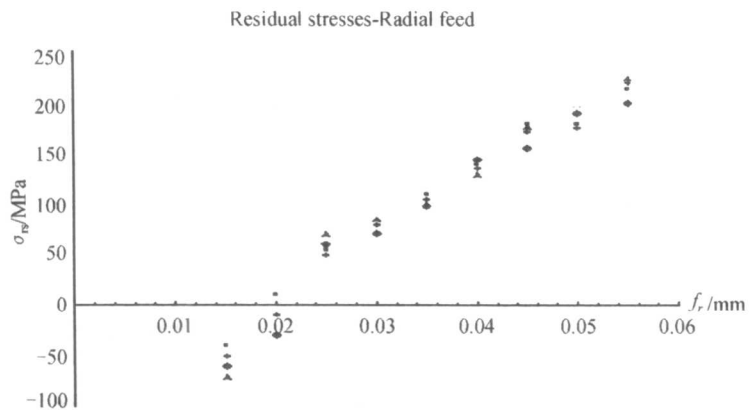


图6 磨削表面的残余应力与径向进给量 f_r 的关系

示,配方:碳纤维为 62%,环氧树脂为 38%;固化剂为酚醛环氧 + 双氰胺;铺层方向为 $\theta = \pm 30^\circ$,层数为 16 层;制作时的压力为 200psi;温度为 125°C 。

5 结论

从以上的实验可以看出,无论是对于各向同性材料,还是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,都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 条纹图比较准确地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;

注: $1 \text{ psi} = 1 \text{ lbf/in}^2 = 6894.757 \text{ Pa}$

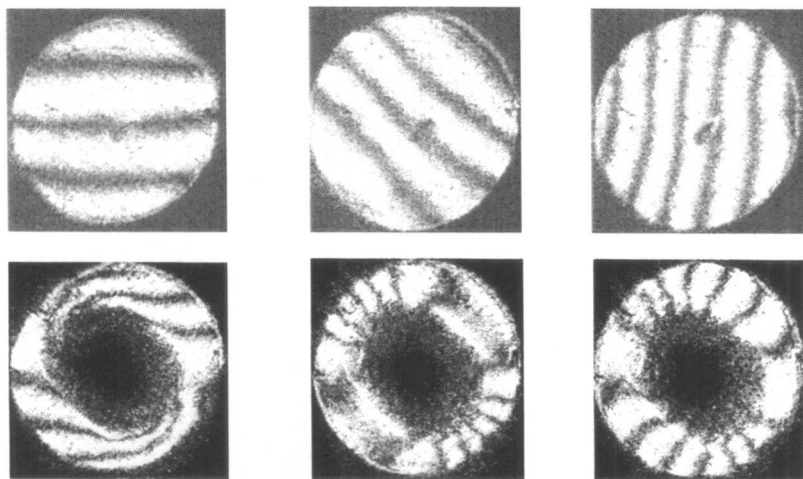


图7 碳纤维增强复合材料钻孔前后的 Moiré 条纹

同时在计算 Moiré 条纹的间距时,始终沿确定的方向(x , y 以及 45° 方向),也可避免偏微分(求 γ_{xy})时的可能误差。

致 谢

本课题的研究得到国家自然科学基金项目 No.10102011 的资助。

参 考 文 献

- 1 袁发荣等著. 残余应力测试与计算. 长沙: 湖南大学出版社, 1987
- 2 J. Lu. Handbook of Measurement of Residual Stresses. Fairmont Press, Inc. Indian., 1996
- 3 ASTM E837 - 94a: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole - Drilling Strain - Gage Method
- 4 何世平, 关锸, 束永生, 伍小平. 应用云纹干涉测量工艺应力分布. 力学学报. 1993, 25(4): 485
- 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. 实验力学. 1994, (3)
- 6 陈玉安等. 三维残余应力及深度分布的 X 射线分析和计算. 重庆大学学报. 2002, 25(1)
- 7 黄玉东等. 碳纤维复合材料界面残余应力的 X 射线衍射分析. 高科技通讯. 2000, 2
- 8 姜传海等. 双相材料中三向残余应力的 X 射线研究. 汽轮机技术. 1997, 9(3)
- 9 罗祖道, 李思简. 各向异性材料力学. 上海: 上海交通大学出版社, 1994
- 10 D Post, B Han, P Ifju. High Sensitivity Moiré. Springer - Verlag 1994: 114 ~ 136
- 11 陈巨兵等. 应用三方向光栅、云纹干涉技术测试平面磨削表面的残余应力. 机械工程学报. 2000, 36(6): 102 ~ 105

硅橡胶栅制作及高温云纹干涉测试技术

程 军¹ 李 禾² 李仁增²

(1. 同济大学固体力学教育部重点实验室, 上海 200092)

(2. 南昌航空工业学院实验力学研究室, 江西, 南昌 330034)

SILICA GEL GRATING AND HIGH TEMPERATURE MOIRÉ INTERFEROMETRY

Cheng Jun¹ Li He² Li Ren-zeng²

(1. Key Laboratory of Solid Mechanics of the MEC, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. Laboratory of Experiment Mechanic, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Jiangxi, Nanchang 330034, China)

摘 要 硅橡胶是一种很好的光栅传递材料, 而且具有耐高温性能。采用光栅复制技术制作的硅橡胶光栅可用于云纹干涉法中, 对 350℃ 以下的材料进行力学性能测试。介绍了硅橡胶光栅的制作方法, 以及在医用材料、航空材料、球栅阵列倒装焊封装高温测量中的应用。

关键词 硅橡胶光栅 云纹干涉法 光栅 高温力学性能测试

Abstract Silica gel having heat-resisting property is a good material for transmitting grating. The grating made of copying silica gel can be used in moiré interferometry to test the material mechanics property below 350℃. The method of making silica gel grating and the application of this grating in medical material, aircraft material and integration circuits with solder joint are introduced.

Key words silica gel moiré interferometry grating mechanics property test at high temperature

在医用、航空、电子封装材料中, 有许多材料不仅需在常温下进行力学测试, 而且通常需在高温下进行测试。以往采用的树脂胶等制栅技术在云纹干涉法中只能测得 200℃ 以下的材料力学性能, 而采用硅橡胶制作的云纹栅可在 350℃ 下进行云纹干涉测量, 云纹图像清晰。该方法在材料高温力学性能测试中可得到较好的效果。^[1~4]

1 硅橡胶光栅的制备及应用

以往在云纹干涉法中使用的光栅有两种: (1) 零厚度试件光栅: 将试件被测表面研磨抛光, 甩上光刻胶, 在全息光路制出正交胶栅, 然后化学刻蚀得到金属零厚度光栅。但在某些试件上难以刻蚀。(2) 环氧树脂转移镀膜试件光栅: 在平整的玻璃板上甩好光刻胶, 通过全息方法或拷贝法制得胶栅, 涂上脱模剂, 蒸镀金属膜层, 用树脂胶(A, B 胶或环氧树脂加乙二胺等固

化剂)将金属膜光栅转移到试件上,但该光栅测试温度较低。为克服以上的缺陷,采用硅橡胶替代环氧树脂进行制栅,硅橡胶光栅是在高质量的传递光栅上复制而成,不但能很好地再现传递光栅的浮雕图形,而且表面光亮,具有较好的衍射效果,同时,硅橡胶光栅具有良好的脱模性能,能制成转移的镀膜光栅。

1.1 母栅的制备

在母栅的制备方法上我们采用全息法(即双光束干涉)制作相位型正交光栅,制栅光路如图 1(a)所示。根据双光束干涉原理

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{2} f \quad (1)$$

其中 α 是准直光入射角; λ 为波长; f 是每毫米干涉条纹数,亦称之为光栅频率。调整 α 角,形成 f 为 1 200 线/mm, 600 线/mm, 300 线/mm 等频率的标准干涉。实际上在制栅中很难做到上述 f 值,只能通过调整 α 角,使误差控制在 0.01% ~ 0.05% 之内。一般光栅频率可通过分光计或图 1(b)衍射光路测试光栅频率。制作光栅的感光胶一般都选用紫外光谱感光的感光胶,如集成电路光刻胶等,制出的光栅具有较好的浮雕图形(即相位型光栅)。

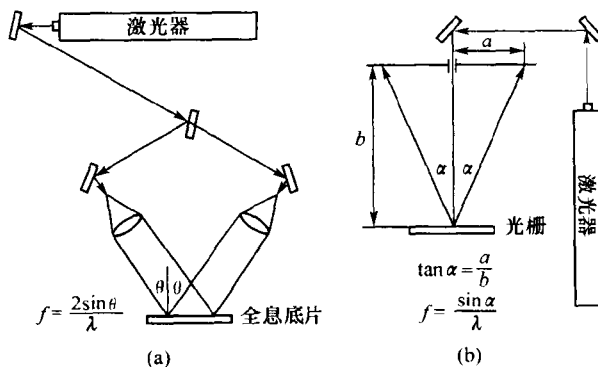


图 1 光路图

Figure 1 Optical system

(a) 制栅光路; (b) 光栅频率测试

(a) grating making; (b) Test of frequency

这类光刻感光胶感光范围在 325 ~ 450 nm 的光谱之间,吸收峰值在 (400 ± 40) nm,应选用光谱为 441.6 nm 的氦镉激光器,激光器输出功率 60 mW 时,双曝光时间约 2 min。也可采用氩离子激光器,因输出光谱距离光刻胶吸收峰值较远,感光时间长(双曝光时间约 10 min)。选用平整度好的浮法玻璃(要求等级高的可选用硼硅玻璃、石英玻璃),进行去油清洁处理,甩上一层感光胶膜,在图 1(b)光路中进行一次预定曝光,再将干板旋转 90°,进行第二次曝光,再经显影和定影处理,得到正交光栅。光栅质量的好坏,取决于两束准直光束、感光时间以及两次感光时间的比例。为了制出质量好的光栅,可采用标准光栅调整制栅光路。根据双光束干涉原理,制 1 200 线/mm 光栅选用 600 线/mm 标准光栅,制 600 线/mm 光栅选用 300 线/mm 标准光栅,通过调整两束准直光的平行度和入射角,使光栅表面的干涉条纹减少,直到全场为暗场(均匀灰度)或亮场,这就是所谓的零场。调准直的光场所制作出的光栅频率与标准栅误差为 $1/f$ mm,而且光栅是等间距的。另外还可以用图 2 所示的四光束干涉光路来检查所制得光栅的零场情况。