

# FBGS 在纺织复合材料中传感检测的误差分析

杨 斌<sup>(1)</sup> 俞建勇<sup>(3)</sup>

(东华大学纺织学院, 上海, 200051)

陶肖明<sup>(2)</sup>

(香港理工大学纺织及制衣学系)

摘 要: 介绍纤维布拉格光栅传感器(FBGS)埋入纺织复合材料中的有效性及测量误差, 并对存在问题提出探讨。结果表明: 为确保测量效果, 必须选择合适的涂层, 最有效的方法是适当提高涂层弹性模量。

关键词: 纤维布拉格光栅传感器(FBGS) 测量 误差 纺织复合材料

中图分类号: TS 101.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-9721(2004)05-0064-02

光纤传感器具有直径小、质量轻、柔韧易弯曲等优点, 但在一些特殊情况下埋入的光纤对复合材料基体的强力、刚度, 甚至性能受到很大损害<sup>[1~14]</sup>, 并能影响光纤传感器测量结果的可靠性<sup>[15, 16]</sup>。由埋入光纤传感器引起的应力集中已经研究得较深入: Sirkis 和 Dasgupta<sup>[3]</sup>研究了涂层的泊松系数对应力集中的作用, Pak<sup>[4]</sup>、Madsen<sup>[5]</sup>和 Hadjirocopiou<sup>[6, 7]</sup>研究了涂层的模量和厚度对应力和应力集中的作用, 并给出了减少应力集中的最佳参数。Levin 和 Nilsson<sup>[2, 8]</sup>指出选择合适的包层界面参数可减少应力集中。Jensen<sup>[9]</sup>、Sirkis<sup>[10]</sup>和 Mall<sup>[11]</sup>针对包埋光纤对复合材料强力和刚度的影响作了研究。

纤维/涂层及涂层/树脂界面对复合材料的力学性能有较大影响。Haaksma<sup>[12]</sup>用显微照相机观测了包含传感器的试样, 发现纤维/涂层较涂层/环氧树脂界面先出现剥离; Henkel<sup>[13]</sup>提出裂缝生长和由于剥离而引起传感特性损失。Zhong<sup>[14, 17]</sup>发现断裂过程对聚酯的粘聚特性较敏感, Levin 和 Nilsson<sup>[2, 8]</sup>也指出加工应力和层间湿度对传感器的可靠性有重大影响。

## 1 布拉格光栅传感器(FBGS)在纺织复合材料中进行检测的误差分析

### 1.1 参数变化对光纤测量有效系数的影响

定义光纤测量有效系数  $\beta = H_{b5}/H^{181}$ ,  $H_{b5}$  为归一化轴向应变  $e$  为 0.95 时的  $z$  值( $z$  为沿物体长度方向  $z$  轴坐标值), 光纤在物体中越有效, 有效系数  $\beta$  越大。随着光纤涂层弹性模量、基体高度、基体与纤维的拉伸刚度比的增加, 光纤测量的有效性也提高。这些参数有一临界值, 超过了临界值, 则有效性提高很小, 如图 1~3。如考虑了上述物理含义即只有当  $|z|$  小于  $H_{b5}$  时, 光纤的测量结果才是有效的,  $H_{b5}$  越大, 光纤在物体中越有效, 光纤传感器所测得的应变能代表所测构件的应变分布。另外有效系数  $\beta$  随

物体尺寸  $H$  的增加而增加, 然后渐趋平缓, 因此当物体沿测量方向尺寸较小时必须考虑其测量效果。

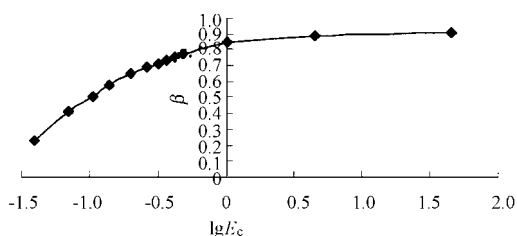


图 1 涂层弹性模量对光纤测量有效系数  $\beta$  的影响

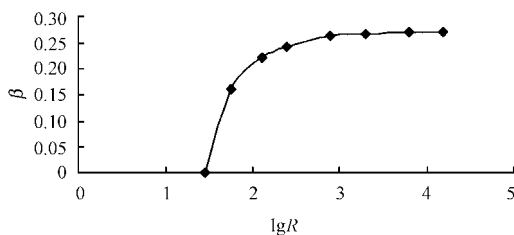


图 2 基体对纤维的拉伸刚度比对光纤测量有效系数  $\beta$  的影响

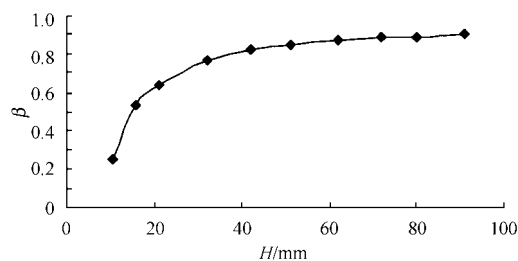


图 3 基体高度对光纤测量有效系数  $\beta$  的影响

光纤的有效泊松系数  $\nu = -\epsilon_z/\epsilon_r$ , 随着物体尺寸  $H$  增加, 有效泊松系数先增加然后趋缓, 且  $\nu$  与位置半径  $r$  无关, 在  $z < 7$  mm 时可看作一常数(除了边界处), 涂层模量  $E_c$  增加则  $\nu$  逐渐下降, 过临界点  $E_c = 1$  GPa 后,  $\nu$  迅速下降, 这与对  $\beta$  的影响相反, 综合考虑涂层模量对  $\beta$  及  $\nu$  (进而灵敏度系数  $f$ ) 的影响, 选定最佳涂层模量为  $E_c = 1$  GPa, 如图 3~5。

### 1.2 位置和方向引起的应变误差

通过三点弯曲试验<sup>[19]</sup>(见图 6), 垂直位移  $\delta$  由测微计控制和自动记录, 当  $\delta$  变化时, 光谱记录仪记

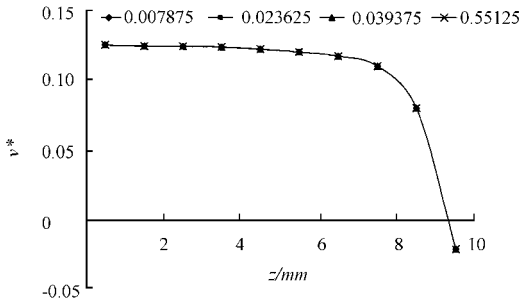


图4 纤维有效泊松系数在不同半径位置上沿长度方向的分布

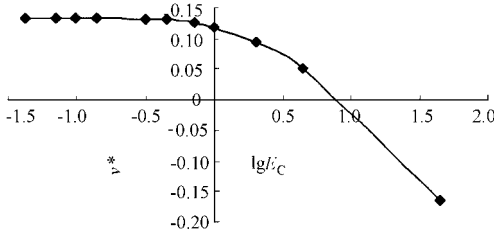


图5 涂层弹性模量对纤维有效泊松系数的影响

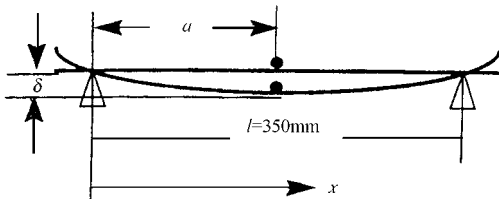


图6 三点弯曲试验装置

录相应 FBGS 峰值波长偏差  $\Delta\lambda$ 。假设试样  $x$  方向的弹性模量为一常数,则试样应变可以推出:

$$\epsilon(x, y) = \begin{cases} \frac{3 \delta xy}{a^2(l-a)} & (0 < x < a) \\ \frac{3 \delta (l-x)y}{a(l-a)^2} & (a < x < l) \end{cases} \quad (1)$$

在理想状态下,所有 FBGS 沿复合材料平行放置,若沿  $x, y$  方向分别有小的偏差  $dx, dy$ ,则新的偏  $x$  轴方向的余弦为:  $\cos(d\alpha_1), \cos(\pi/2 - d\alpha_2), \cos(\pi/2 - d\alpha_3)$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_3$  分别为传感器和复合材料主应变,即  $x, y, z$  方向的夹角,则相对误差  $R_\epsilon$  为:

$$R_\epsilon = R_p + R_d = \left| \frac{dy}{y} \right| + \begin{cases} \left| \frac{dx}{x} \right| + (d\alpha_1)^2 + \left| \frac{y}{\epsilon} d\alpha_2 \right| & (0 < x < a) \\ \left| \frac{dx}{l-x} \right| + (d\alpha_1)^2 + \left| \frac{y}{\epsilon} d\alpha_2 \right| & (a < x < l) \end{cases} \quad (2)$$

这里  $\gamma$  为横梁的剪切应变,  $R_p, R_d$  分别是由位置和方向引起的相对误差。相对而言,由位置偏差引起的相对误差较方向偏差大得多。当  $x = a$  和  $a = l/2$

时,在条件  $\gamma = 0$  和  $\epsilon = \epsilon_{max}$  下,  $x$  轴上由位置偏差引起的相对误差最小,且  $y$  轴方向上由方向偏差引起的相对误差亦最小。最大相对误差可由所用实验参数估计出:  $R_\epsilon \approx R_p < 7.02\%$ 。

实际实验中,在纤维/涂层和涂层/树脂界面的局部脱粘,对单端头 FBG 传感器的可靠性影响较大,而对双端头 FBG 传感器的影响较小。在初始应变场可忽略的条件下,局部脱粘对测量结果的影响较小,且通过实验可测出不同传感器测量应变的最大相对误差接近 7%,这与由于位置引起的最大相对误差在同一范围内。

在实验中传感器是置于相对误差最小的最佳位置上,若传感器置于应变变化大的区域和裂缝顶端附近,则位置、方向引起的相对误差将非常大。

## 2 结论

1. FBGS 埋入复合材料中是行之有效的,为确保测量效果,必须选择合适的涂层,最有效的方法是适当提高涂层弹性模量。

2. 通过实验测出不同传感器测量应变的最大相对误差接近 7%,这与由于位置引起的最大相对误差在同一范围内。

## 参考文献

- 1 M. Le Blanc et al. Proceedings of the SPIE,1993:1918,215.
- 2 K. Levin et al. Proceedings of the SPIE,1996:2779,222.
- 3 J. S. Sirkis et al. Proceedings of the SPIE,1990:1370,129.
- 4 Y. E. Pak et al. Proceedings of the ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conference,1992:121~128.
- 5 J. S. Madsen et al. Proceedings of SPIE,1993:1918,228.
- 6 M. Hadjiprocopiou et al. Proceedings of SPIE,1995:2442,109.
- 7 M. Hadjiprocopiou et al. Smart Materials and Structures,1966(4):441.
- 8 K. Levin et al. Proceedings of SPIE,1994:2361,379.
- 9 D. W. Jensen et al. Proceedings of the ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conference,1992:129~134.
- 10 J. S. Sirkis et al. Proceedings of SPIE,1995:2442,152.
- 11 S. Mall et al. Smart Materials and Structures,1996(4):209.
- 12 R. A. Haaksma et al. Optical Fiber Materials and Processing Symposium,1990:71~76.
- 13 D. P. Henkel. Proceedings of SPIE,1993:1916,97.
- 14 Q. Zhong et al. Proceedings of SPIE,1993:1916,97.
- 15 Jensen D W. Validation of Active Strain Measurements in Composites Using Mach-Zehnder Interferometry with Embedded Optical Fibers. J Reinforced Plastics Composites,1993(3):268~284.
- 16 Butler C D et al. Fiber Optics Strain Gauge. Appl Opt,1992:1370,189~96.
- 17 Q. Zhong. in: IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1994 7th Annual Meeting(Cat. No. 94CH 3371-2),1994:2,247~248.
- 18 Xiaoming Tao et al. Internal Strain Measurements by Fiber Bragg Grating Sensors Textile Composites,Composites Science and Technology,2000,60:657~669.
- 19 Liqun Tang et al. Reliability of Fiber Bragg Grating Sensors Embedded in Textile Composites. Composite Interfaces,1998(5):421~435.