

安装偏差对光纤布喇格光栅应变测量的影响*

谭敏峰 朱四荣 宋显辉 李卓球

(武汉理工大学工程力学系, 武汉 430070)

摘要 通过理论推导和试验分析研究了安装偏差对光纤应变测量的影响, 得到安装误差所带来的测量误差的计算公式. 发现光纤的轴向与预定安装方向的角偏差越大, 测量误差也越大. 用光纤光栅进行应变测量时, 必须考虑光纤的安装偏差, 它直接关系到测量结果的准确性. 实际测量中要尽量确保传感器安装方位的准确.

关键词 光纤布喇格光栅; 安装偏差; 横向效应; 应变

中图分类号 O348 **文献标识码** A

0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating)是一种将被测试件上的应变转换成波长变化的传感元件. 作为一种新型敏感元件, 其测量技术正日趋成熟^[1,2]. 光纤具有灵敏度高、抗电磁干扰、结构简单、体积小等优点, 这种敏感元件可广泛用于复合材料、大型建筑结构、宇航飞行器、军工产品等结构健康诊断.

和电阻应变计一样, 光纤同样存在横向效应^[3]. 在实际工程中, 由于测量的需要, 当应变的主向和光栅的轴向存在夹角时, 布喇格波长变化将不再满足通常意义下的波长-应变响应关系, 而安装误差(即实际安装方位与所需要的安装方位之间存在夹角, 简称安装偏差或者角偏差)也会带来测量结果的误差. 安装偏差对测量结果准确度的影响, 是一个值得研究的问题.

1 光纤的横向效应

在光纤的应变测量中, 通常利用的是其轴向应变响应. 光纤布喇格光栅的轴向应变灵敏系数一般定义为^[4~8]: 将光纤安装在处于单向应力状态的试件表面, 使其轴线与应力方向重合时, 布喇格波长的相对变化与沿其轴向的应变之比值, 通常记为 K , 即

$$K_{\epsilon_x} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (1)$$

传感器生产商就是在上述条件下对光栅进行标定, 从而提供灵敏系数 K . 但如果实际使用条件不同于标定条件时(如双向应力场), 由于光纤横向效应的存在, 光纤光栅沿栅宽方向的应变可能导致明显的读数误差. 这中间存在一个横向灵敏系数. 如图 1, 在一个单向应变场中, 给定一个单向应变 ϵ_x ,

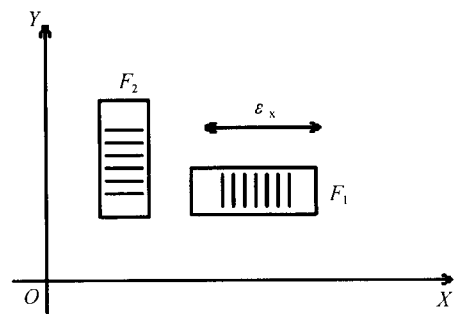


图 1 横向效应系数的测定

Fig. 1 The test of the transverse effect's coefficient tests 对于垂直安装的光栅 F_2 ($\epsilon_L = 0, \epsilon_B = \epsilon_x$, 其中 L 代表轴向, B 代表横向), 布喇格波长变化为

$$\Delta\lambda_{\perp} = \lambda K_B \epsilon_x \quad (K_B \text{ 为光栅的横向灵敏系数})$$

对于平行安装的光栅 F_1 ($\epsilon_L = \epsilon_x, \epsilon_B = 0$), 布喇格波长变化

$$\Delta\lambda_{\parallel} = \lambda K_L \epsilon_x \quad (K_L \text{ 为光栅的轴向灵敏系数})$$

定义光纤的横向效应系数等于其横向灵敏系数与轴向灵敏系数之比, 故有

$$H = \frac{\Delta\lambda_{\perp}}{\Delta\lambda_{\parallel}} = \frac{K_B}{K_L} \quad (2)$$

2 安装方位对光纤应变测量的影响

如图 2, 在一个双向应变场中, 设整个坐标平面内各点应变状态均相同, 主应变 ϵ_1 和 ϵ_2 方向为 OX 和 OY , 光纤与 X 轴夹角 θ . 显然, 光纤的轴向和横

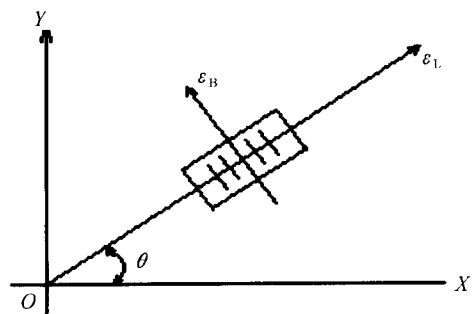


图 2 双向应变场中的布喇格光栅

Fig. 2 The FBG in the two-way plane strain

* 国家自然科学基金(50238040)资助项目

Email: tanminfengwh@126.com

收稿日期: 2005-12-19

向分别受到应变的作用,沿其轴向的应变记为 ϵ_L ,沿其横向的应变记为 ϵ_B ,其波长的变化可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda(K_L\epsilon_L + K_B\epsilon_B) \quad (3)$$

式(3)表示,布喇格波长的变化是两部分的迭加,一部分是光栅仅受到 ϵ_L 作用时的波长变化,另一部分是光栅仅受到 ϵ_B 作用时的波长变化.由式(2)、(3)可得

$$\Delta\lambda = \lambda K_L \left(1 + \frac{H\epsilon_B}{\epsilon_L}\right) \epsilon_L$$

令

$$\alpha = \epsilon_B / \epsilon_L$$

对于已经安装的光纤布喇格光栅, α 表示作用在光栅上的横向应变和轴向应变之比,因此, α 与测点的应变场特征和光纤安装方位有关,于是可以得到

$$\Delta\lambda = \lambda K_L (1 + \alpha H) \epsilon_L \quad (4)$$

若令

$$K^* = K_L (1 + \alpha H)$$

则式(4)可写成

$$\Delta\lambda = \lambda K^* \epsilon_L \quad (5)$$

此式与式(1)形式上相同,式(1)只适用于应变第一主向与光纤轴向重合的情况,否则,就只能用式(4)和式(5).它表明光栅的应变灵敏系数的确定是有前提条件的,除了取决于光栅本身的特性外,还与安装方位、被测点应变场有关.如果使用条件满足应变第一主向与光纤轴向重合,即

$$\alpha = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_L} = \frac{-\mu_0 \epsilon_X}{\epsilon_X} = -\mu_0$$

此时

$$K^* = K = K_L (1 - \mu_0 H) \quad (6)$$

所以,如光纤的轴向与应变第一主向不重合,它表现出来的灵敏系数将不是 K (式(6)),而由式(4)决定的 K^* .如果仍然套用式(6)所确定的 K 值,那么测得的应变($\epsilon_{测}$)就会出现误差.比如安装情况如图 2 之光纤,欲求的应变是沿光纤轴向的 ϵ_L ,所以布喇格波长的变化应该由式(5)决定.如果仍然认为光栅的灵敏系数为 K (式(6)),有 $K^* \epsilon_L = K \epsilon_{测}$ 或写为

$$K_L (1 + \alpha H) \epsilon_L = K_L (1 - \mu_0 H) \epsilon_{测}$$

可得

$$\epsilon_{测} = \frac{\epsilon_L (1 + \alpha H)}{1 - \mu_0 H} \quad (7)$$

$\epsilon_{测}$ 与欲求应变 ϵ_L 的相对误差为

$$e = \frac{\epsilon_{测} - \epsilon_L}{\epsilon_L} - 1 = \frac{1 + \alpha H}{1 - \mu_0 H} - 1 = \frac{\alpha + \mu_0}{1 - \mu_0 H} H \quad (8)$$

光纤的横向效应是造成误差的根本原因.由式(8)可知,如果 $H=0$,则 $e=0$.如果 $H \neq 0$,只要应变第一

主向与光栅轴向平行,即 $\alpha = -\mu_0$,则也有 $e=0$,否则误差总会存在.所以需要对测量结果进行修正.

图 1 中的光栅(F_1),其测得的波长变化是由 ϵ_L 和 ϵ_B 共同造成的,得到的应变也是由 ϵ_L 和 ϵ_B 共同造成的,这可由式(7)变换得到,即

$$\epsilon_{测1} = \frac{\epsilon_L + H\epsilon_B}{1 - \mu_0}$$

而 ϵ_L 才是要想测得的真实应变.所以,还需有一方程才能解得 ϵ_L .再沿垂直于 F_1 的方向安装一根光栅(F_2),得到应变 $\epsilon_{测2}$

$$\epsilon_{测2} = \frac{\epsilon_B + H\epsilon_L}{1 - \mu_0 H}$$

于是解得

$$\epsilon_L = \frac{1 - \mu_0 H}{1 - H^2} (\epsilon_{测1} - H\epsilon_{测2})$$

$$\epsilon_B = \frac{1 - \mu_0 H}{1 - H^2} (\epsilon_{测2} - H\epsilon_{测1}) \quad (9)$$

式(10)就是双向应变状态下布喇格光栅应变测量的修正计算公式.

3 安装误差对应变测量的影响

在实际测量的时候,光纤光栅粘贴后的实际方位,很难保证和预定的基准方位完全重合,即存在安装偏差,由此会带来测量误差.假设预定安装方向的基准线与应变主方向的夹角为 φ' ,光纤光栅的实际粘贴方位与应变主方向的夹角为 φ ,则粘贴偏差(即角偏差)为 $\delta\varphi = \varphi' - \varphi$,基准线上的应变 ϵ_φ 用主应变可表示为

$$\epsilon_\varphi = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2\varphi$$

由于光纤光栅的粘贴误差,实际测得的是与主方向成 φ' 角方向的应变

$$\epsilon_{\varphi'} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos (\varphi + \delta\varphi)$$

所以应变测量的误差为

$$\delta\epsilon_\varphi = \epsilon_\varphi - \epsilon_{\varphi'} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} [\cos 2\varphi - \cos 2(\varphi + \delta\varphi)]$$

变形后得到

$$\delta\epsilon_\varphi = (\epsilon_1 - \epsilon_2) \sin (2\varphi + \delta\varphi) \sin \delta\varphi \quad (11)$$

由式(11)可知,粘贴误差带来的测量误差不仅与角偏差 $\delta\varphi$ 有关,而且还和预定粘贴方位与测点主方向的夹角 φ 有关.预定方位与主方向的夹角越大,测量误差越大.

在单向应力状态下,传感器沿主方向粘贴($\varphi=0$),则有^[8] $\epsilon_1 - \epsilon_2 = (1 + \mu)\epsilon_1$,由式(11)可得相对误差为

$$e_\varphi = \frac{\delta\epsilon_\varphi}{\epsilon_1} = (1 + \mu) \sin^2 \delta\varphi$$

如果光纤光栅不是沿主方向粘贴,而呈夹角 $\varphi = 45^\circ$,此时 $\epsilon_{45^\circ} = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2) = \frac{1}{2}(1 - \mu)\epsilon_1$,相对误差为

$$e_\varphi = \frac{\delta\epsilon_\varphi}{\epsilon_{45^\circ}} = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \sin 2\delta\varphi$$

取 $\mu = 0.3$,分别作出 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 45^\circ$ 时的误差曲线如图 3.

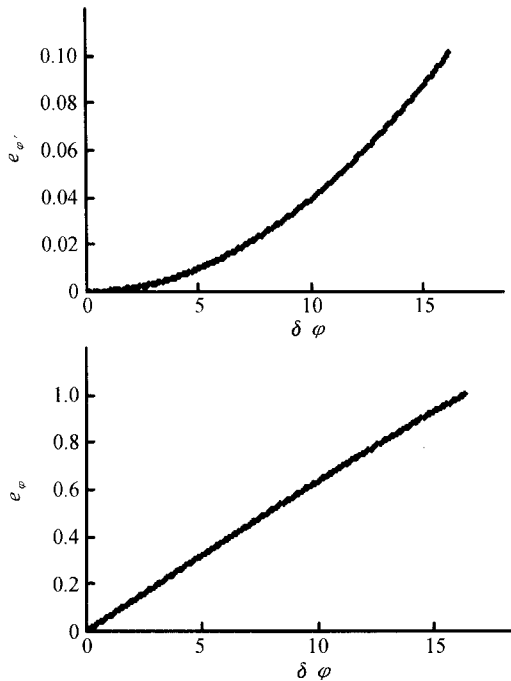


图 3 预定粘贴方向为 0° 和 45° 时的误差曲线

Fig. 3 The error curve when the scheduled direction is 0° and 45°

当 $\varphi = 0^\circ$ 时,若 $\mu_0 = 0.3$, $\delta\varphi = 5^\circ$,可得

$$e_\varphi = (1 + 0.3) \times \sin^2 5^\circ = 0.00989 < 1\%$$

当 $\varphi = 45^\circ$ 时,由式(11)可得

$$\delta\epsilon_\varphi = (1 + \mu_0)\epsilon_1 \cos \delta\varphi \cdot \sin \delta\varphi = (1 + \mu_0)\epsilon_1 \frac{1}{2} \sin 2\delta\varphi$$

在 $\varphi = 45^\circ$ 方向上的真实应变为

$$\epsilon_{45^\circ} = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2) = \frac{1}{2}(1 - \mu_0)\epsilon_1$$

相对误差为

$$e_\varphi = \frac{\delta\epsilon_\varphi}{\epsilon_{45^\circ}} = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \sin 2\delta\varphi$$

若 $\delta\varphi = 1^\circ$ 或 $\delta\varphi = 5^\circ$ 时,可算得相对误差 $e_\varphi = 6.48\%$ 或 $e_\varphi = 32.4\%$. 可见,当粘贴方位远离应变主向时,应变测量的误差对粘贴角偏差是相当敏感的. 这一点由图 3 也可以看出.

4 结论

通过理论推导和实验分析,可以得到以下结论: 1) 在双向应力状态下,在用光纤光栅进行应变测量时,当应变主向和光纤的轴向存在夹角时,由于横向效应的存在,所得到的布喇格波长变化与欲求的波长变化就存在误差,得到的应变值必须进行修正; 2) 在单向应力作用下,传感器的预定安装角和安装偏差角同时决定测量误差的大小,预定安装角越大,角偏差对测量结果的影响越大,同时角偏差越大,测量误差也越大.

参考文献

- 1 Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. London: Academic Press, 1999
- 2 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(8): 1442 ~ 1463
- 3 朱四荣, 谭敏峰, 宋显辉, 等. 光纤布喇格光栅的横向效应研究. 武汉理工大学学报, 2005, **27**(9): 7~9
Zhu S R, Tan M F, Song X H, et al. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005, **27**(9): 7~9
- 4 沈乐, 郑史烈, 章献民. 侧面研磨光纤 Bragg 光栅的外部折射率敏感特性研究. 光子学报, 2005, **34**(7): 1036 ~ 1038
Shen Y, Zheng S L, Zhang X M. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1036 ~ 1038
- 5 张文, 陈伟民, 高庆, 等. 光纤光栅的双向温度/波长调谐技术研究. 光子学报, 2005, **34**(6): 844 ~ 847
Zhang W, Chen W M, Gao Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 844 ~ 847
- 6 王义平, 饶云江. 新型长周期光纤光栅的横向负载特性及其偏振相关性研究. 光子学报, 2005, **34**(8): 1196 ~ 1200
Wang Y P, Rao Y J. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1196 ~ 1200
- 7 张如一, 陆耀楨. 实验应力分析. 北京: 机械工业出版社, 1981. 52 ~ 69
Zhang R Y, Lu Y Z. Analysis of the Experimental Stress. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981. 52 ~ 69
- 8 Wareich R B, Atia W A, Singh H, et al. Effects of Diametric load on fiber Bragg gratings fabricated in low birefringent fibers. *Electron Lett*, 1996, **32**(13): 1223 ~ 1224
- 9 刘鸿文. 材料力学. 北京: 高等教育出版社, 1992. 306 ~ 318
Liu H W. Materials Mechanics. Beijing: Higher Education Press, 1992. 306 ~ 318

Impact on Strain Measurement by Fiber Bragg Grating of Error of Installation

Tan Minfeng, Zhu Sirong, Song Xianhui, Li Zhuoqiu

Dept. of Engineering Structures and Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

Received date: 2005-12-19

Abstract The strain measurement by the fiber Bragg grating (FBG) is achieved by the Bragg wavelength change when the FBG receives axial strain. But, because of the transverse effect, the FBG's position of installation will affect the result of the measurement, and the error of the installation will bring the error of the measurement. This paper receives the formula of the error which comes from the error of the installation through theoretical analysis. When the angle has existed in the axial of the optic fibre and installation positions needed, the greater the angle is, the greater the error is. The accuracy of installing position of optic fibre is very important, it concerns directly the accuracy of the measurement's result.

Keywords Fiber Bragg grating; Error of installation; Transverse effect; Strain



Tan Minfeng was born in April, 1977 in Hubei, China. He received the B. S. degree in the Engineer College of Airforce, Xi'an China, in 1999, and now he is studying in Wuhan University of Technology for the M. S. degree. His profession is solid mechanics. He joined the National Natural Science Foundation, the wit concrete and its smart structures. He published a paper in Journal of Wuhan University of Technology.