

文章编号: 0258-7025(2006)09-1251-04

安装方位对光纤布拉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, 湖北 武汉 430070)

摘要 光纤布拉格光栅(FBG)应变测量是基于光栅受到轴向应变作用时其波长将会发生相应变化。但在复杂应力状态下,由于横向效应的存在,光纤布拉格光栅的安装方位对光纤应变测量产生影响。通过理论推导和实验分析验证了安装方位对光纤应变测量的影响,并以单向应力状态为例,导出应变测量误差与光纤布拉格光栅安装方位的关系曲线:光纤的轴向与主应力的夹角 60° 附近,误差急剧增大,可使测量结果严重失真。为消除安装方位引起的误差,给出了复杂应力状态的应变测量修正公式。

关键词 测量;光纤布拉格光栅;横向效应;应变测量;安装方位

中图分类号 TN 247;TP 212.14 **文献标识码** A

Impact of Fiber Bragg Grating Direction upon Strain Measurement

TAN Min-feng, ZHU Si-rong, SONG Xian-hui, LI Zhuo-qiu

(Department of Engineering Structures and Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract The strain measurement by the fiber Bragg grating (FBG) is achieved by the change of FBG's wavelength upon axial strain. But in the complicated stress state, the FBG's strain respond error occurs due to the transverse effect. The impact of direction of FBG on strain measurement is proved through theoretical analysis and experimental results. The relationship between direction of FBG and strain measurement error in the state of uniaxial stress was derived and tested. The results indicate that the error increases rapidly when the FBG angle is about 60° , the results of strain are distorted extremely. In order to remove the error, modified formulas for strain were derived.

Key words measurement; fiber Bragg grating; transverse effect; strain measurement; installed direction

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是一种能将被测构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^[1~5]。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、军工产品等结构的健康诊断。

由于测量的需要,应变的主向和光栅的轴向往往存在夹角。但由于光纤存在横向效应,也即横向应变也会导致布拉格波长的变化。横向应变所产生

的波长变化在测量结果中往往占有较大的比例,使得测量结果出现不可忽略的误差。本文将讨论和研究如何修正横向效应带来的误差,以及安装方位对横向效应误差大小的影响程度。

2 光纤的横向效应

在光纤的应变测量中,通常利用其轴向应变响应。光纤布拉格光栅的轴向应变灵敏系数一般定义为^[6]: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,布拉格波长的相对变

收稿日期:2005-12-08;收到修改稿日期:2006-03-22

基金项目:国家自然科学基金(50238040)资助项目。

作者简介:谭敏峰(1977—),男,土家族,武汉理工大学硕士研究生,主要从事智能材料及其结构方面的研究。E-mail:tanminfengwh@126.com

导师简介:朱四荣(1969—),女,武汉理工大学副教授,博士,主要从事智能材料及其结构方面的研究。E-mail:zhusirong@mail.whut.edu.cn

化 ($\Delta\lambda/\lambda$) 与沿其轴向的应变 (ϵ_x) 之比值, 通常记为 K , 即

$$K\epsilon_x = \Delta\lambda/\lambda. \quad (1)$$

由于光纤横向效应的存在, 光纤对横向应变也有所响应, 存在一个横向灵敏系数。如图 1 所示, 在一个单向应变场中, 给定一个单向应变 ϵ_x , 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), 布拉格波长变化为

$$\Delta\lambda_{\perp} = \lambda K_B \epsilon_x, \quad (2)$$

K_B 为光栅的横向灵敏系数。对于平行安装的光栅 F_1 ($\epsilon_L = \epsilon_x, \epsilon_B = 0$), 布拉格波长变化为

$$\Delta\lambda_{\parallel} = \lambda K_L \epsilon_x,$$

K_L 为光栅的轴向灵敏系数, 定义光纤的横向效应系数 H 为横向灵敏系数与轴向灵敏系数之比

$$H = \frac{\Delta\lambda_{\perp}}{\Delta\lambda_{\parallel}} = \frac{K_B}{K_L}. \quad (3)$$

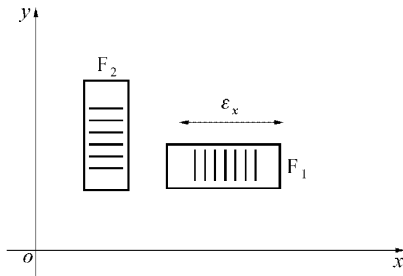


图 1 横向效应系数的测定

Fig. 1 Measurement of the transverse effect coefficient

3 理论推导

如图 2 所示, 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^[7,8], 主应变 ϵ_1 和 ϵ_2 方向为 ox 和 oy , 一光纤与 x 轴夹角为 θ 。显然, 光纤的轴向和横向分别受到应变作用, 其波长的变化可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda(K_L\epsilon_L + K_B\epsilon_B), \quad (4)$$

式(4)表示, 布拉格波长的变化是两部分的叠加, 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(3), (4)可得

$$\Delta\lambda = \lambda K_L \left(1 + \frac{H\epsilon_B}{\epsilon_L}\right) \epsilon_L, \quad (5)$$

令 $\alpha = \epsilon_B/\epsilon_L$, 对于已经安装的光纤布拉格光栅, 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

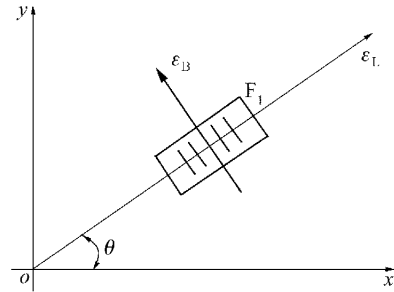


图 2 双向应变场中的布拉格光栅

Fig. 2 Fiber Bragg grating in the two-way plane strain

$$\Delta\lambda = \lambda K_L (1 + \alpha H) \epsilon_L, \quad (6)$$

若令 $K^* = K_L (1 + \alpha H)$, 则式(5)可写成

$$\Delta\lambda = \lambda K^* \epsilon_L, \quad (7)$$

(7)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, 只能用式(6)和(7)。它表明光栅的应变灵敏系数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

$$K^* = K = K_L (1 - \mu_0 H), \quad (8)$$

所以, 如果光纤的轴向与应变第一主向不重合, 灵敏系数则由式(6)决定。如果仍然套用式(8)所确定的 K 值, 那么测得的应变 (ϵ_m) 就会出现误差。比如安装如图 2 所示的光纤, 欲求的应变是沿光纤轴向的 ϵ_L , 所以布拉格波长的变化应该由式(7)决定。如果仍然认为光栅的灵敏系数为 K (式(8)), 有

$$K^* \epsilon_L = K \epsilon_m, \quad (9)$$

或写为

$$K_L (1 + \alpha H) \epsilon_L = K_L (1 - \mu_0 H) \epsilon_m, \quad (10)$$

可得

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon_L (1 + \alpha H)}{1 - \mu_0 H}, \quad (11)$$

ϵ_m 与欲求应变 ϵ_L 的相对误差为

$$e = \frac{\epsilon_m - \epsilon_L}{\epsilon_L} - 1 = \frac{1 + \alpha H}{1 - \mu_0 H} - 1 = \frac{\alpha + \mu_0}{1 - \mu_0 H} H. \quad (12)$$

光纤的横向效应是造成误差的根本原因, 由式(12)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。在图 2 中的情况, 如果是单向应力, 即有

$$\epsilon_y = -\mu_0 \epsilon_x, \quad (13)$$

则

$$\alpha = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_L} = \frac{\epsilon_{\theta+90^\circ}}{\epsilon_\theta} = \frac{\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2(\theta + 90^\circ)}{\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta} = \frac{1 - \mu_0 - (1 + \mu_0) \cos 2\theta}{1 - \mu_0 + (1 + \mu_0) \cos 2\theta}, \quad (14)$$

将式(14)代入到式(12),取光纤的横向效应系数 $H = 1.33\%$,构件材料的泊松比 $\mu_0 = 0.30$,可得

$$|e| = \left| \frac{0.91 - 0.91 \cos 2\theta}{54.42 + 97.35 \cos 2\theta} \right|, \quad (15)$$

做出夹角与误差的关系曲线如图 3 所示,可以看出,在 40° 以前,随着角度的增加,误差增加比较平缓,在 60° 附近,存在一个相对误差急剧增加的区域。在这个区域,测量误差很大,所以需要对测量结果进行修正。

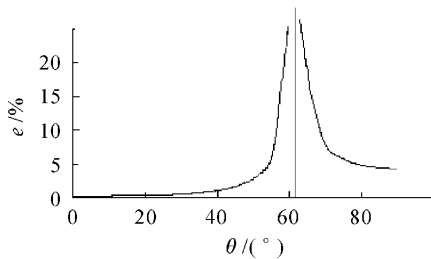


图 3 夹角与误差关系曲线

Fig. 3 Curve of the angle and error

图 2 中的光栅(F_1),其波长变化是由 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,可由式(11)变换得到

$$\epsilon_{m1} = \frac{\epsilon_L + H\epsilon_B}{1 - \mu_0}, \quad (16)$$

而 ϵ_L 才是要想测得的真实应变。所以,还须有一方程才能解得 ϵ_L 。再沿垂直于 F_1 的方向安装一根光栅(F_2),得到应变 ϵ_{m2}

$$\epsilon_{m2} = \frac{\epsilon_B + H\epsilon_L}{1 - \mu_0 H}, \quad (17)$$

于是解得

$$\begin{aligned} \epsilon_L &= \frac{1 - \mu_0 H}{1 - H^2} (\epsilon_{m1} - H\epsilon_{m2}), \\ \epsilon_B &= \frac{1 - \mu_0 H}{1 - H^2} (\epsilon_{m2} - H\epsilon_{m1}), \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)就是双向应变状态下布拉格光栅应变测量的修正计算公式。对于二氧化硅光纤

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.78\epsilon_x, \quad (19)$$

所以式(11)可写成

$$\begin{aligned} \epsilon_L &= \frac{1 - \mu_0 H}{0.78(1 - H^2)} \left(\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - H \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} \right), \\ \epsilon_B &= \frac{1 - \mu_0 H}{0.78(1 - H^2)} \left(\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} - H \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

4 实验与数据分析

图 4 所示的拉伸试件由低碳钢加工而成,其尺寸为 $600 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。由圣维南原理可知,试件的中央区域可认为处于相同的均匀应变状态,以保证布拉格光栅的测得值是一点的应变。

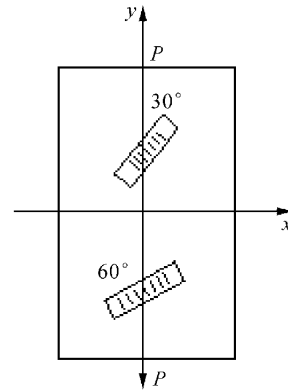


图 4 实验示意图

Fig. 4 Experimental schematic illustration

在拉伸试件的中间区域上粘贴上两根布拉格光栅,分别与试件的轴线成 30° 和 60° 的夹角。粘贴时要注意试件表面的清洁,要给光纤施加一定的预紧力,以确保测量的准确性。用 Instron5882 万能材料试验机进行拉伸。室温保持在 25°C ,试件的轴向应变为 $40 \sim 560 \mu\epsilon$,重复进行 5 次拉伸,得到波长变化量的重复性都比较好。 $\Delta\lambda_{30^\circ} = 0.291 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_{60^\circ} = 0.030 \text{ nm}$,试件的泊松比 $\mu_0 = 0.30$,光栅的横向效应系数已经通过实验得出, $H = 1.33\%$, $\lambda_{30^\circ} = 1298.453 \text{ nm}$, $\lambda_{60^\circ} = 1300.628 \text{ nm}$ 。将实验数据分别代入到式(18)和(19),可得

$$\begin{aligned} \epsilon_{30^\circ} &= \frac{\Delta\lambda_{30^\circ}}{0.78\Delta\lambda_{30^\circ}} = \frac{0.291}{0.78 \times 1298.453} = 287 \mu\epsilon, \\ \epsilon_{60^\circ} &= \frac{\Delta\lambda_{60^\circ}}{0.78\Delta\lambda_{60^\circ}} = \frac{0.030}{0.78 \times 1300.628} = 30 \mu\epsilon, \\ \epsilon_{30^\circ}^* &= \frac{1 - \mu_0 H}{0.78(1 - H^2)} \left(\frac{\Delta\lambda_{30^\circ}}{\lambda_{30^\circ}} - H \frac{\Delta\lambda_{60^\circ}}{\lambda_{60^\circ}} \right) = 286 \mu\epsilon, \\ \epsilon_{60^\circ}^* &= \frac{1 - \mu_0 H}{0.78(1 - H^2)} \left(\frac{\Delta\lambda_{60^\circ}}{\lambda_{60^\circ}} - H \frac{\Delta\lambda_{30^\circ}}{\lambda_{30^\circ}} \right) = 26 \mu\epsilon, \end{aligned}$$

其中带 * 的为修正过的应变,如果不对测量结果进

行修正,其相对误差分别为

$$|e_{30^\circ}| = \left| \frac{\epsilon_{30^\circ} - \epsilon_{30^\circ}^*}{\epsilon_{30^\circ}^*} \right| = \left| \frac{287 - 286}{286} \right| = 0.35\%$$

$$|e_{60^\circ}| = \left| \frac{\epsilon_{60^\circ} - \epsilon_{60^\circ}^*}{\epsilon_{60^\circ}^*} \right| = \left| \frac{30 - 26}{26} \right| = 15.38\%。$$

由数据分析可知,沿 30° 方向粘贴的光栅的测量误差不到 1%,而沿 60° 方向粘贴的光栅的测量误差就非常大。在测量中,所测方向与应变主向的夹角越大,所得结果的误差也就越大,必须进行误差修正。

5 结 论

通过理论推导和实验分析可知,在双向应力状态下,在用光纤进行应变测量时,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,所得到的布拉格波长变化与欲求的波长变化就存在误差;在单向应力作用下,当测量光纤的轴向与应变第一主向的夹角不大于 30° 时,所测应变的误差较小,不超过 1%,可以忽略,而在 60° 附近误差急剧增大,测量结果失真,必须进行误差修正。

参 考 文 献

- 1 Raman Kashyap. Fiber Bragg Gratings [M]. London: Academic Press, 1999
- 2 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15** (8):1442~1463
- 3 R. B. Wareich, W. A. Atia, H. Singh *et al.*. Effects of Diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13):1223~1224
- 4 Jiang Desheng, Richard O. Claus. Smart Materials Devices Structures and Their Applications [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003. 141~182
姜德生, Richard O. Claus. 智能材料器件结构与应用 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2003. 141~182
- 5 Mekatoronikusu. Introduction to Sensor [M]. Beijing: Science Press, 2002. 151~163
雨宫好文(日). 传感器入门 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 151~163
- 6 Zhang Ruyi, Lu Yaozhen. Analysis of the Experimental Stress [M]. Beijing: China Machine Press, 1981. 52~60
张如一, 陆耀楨. 实验应力分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 52~60
- 7 Liu Hongwen. Materials Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992. 306~318
刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. 306~318
- 8 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):232~235
黄锐, 蔡海文, 瞿荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器 [J]. 中国激光, 2005, **32**(2):232~235