

文章编号: 0253-2239(2007)05-0787-7

非轴向力下埋入式光纤传感器应变传递分析*

李宏男 周广东** 任亮

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 利用剪滞法建立了当光纤光栅传感器的轴线和基体主应力的方向成一定角度时, 光纤光栅传感器的测量应变与基体结构实际应变之间的关系, 进而得出了光纤光栅传感器的平均应变传递率的一般公式。采用裸光纤光栅传感器进行实验, 在倾斜角度 α 为 30.72° 时, 实验所得的波长变化之比分别为: 0.727, 0.738, 0.746; 理论计算所得的波长变化之比为 0.739, 相对误差都在 2% 以内。同时分析了埋设角度偏差对测量结果的影响。研究结果表明, 非轴向力作用下光纤光栅传感器的应变与结构基体应变之间的传递关系与其在轴向力作用下存在明显的区别, 埋设角度的偏差会给测量结果造成一定的误差。

关键词: 光纤光学; 应变传递分析; 光纤光栅传感器; 剪滞法; 非轴向力作用

中图分类号: TP125 文献标识码: A

Strain Transfer Model of Fiber Sensors under Non-Axial Stress

Li Hongnan Zhou Guangdong Ren Liang

(National Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: There is a strain transferring ratio between structure and fiber Bragg grating sensor for the existence of sensor's interlayer. A strain transfer model is developed based on shear-lag theory for evaluating the interaction between the surrounding host material and a length of fiber Bragg grating sensor embedded in it, when there is an angle existence between the sensor axis and the external principal stress direction of the host material. And the general formula of average strain transfer rate is deduced at the same time. The fiber Bragg grating sensors were used to verify the theoretical results. When the angle α is 30.72° , the wavelength changes ratios of experimental results are 0.727, 0.738, 0.746 respectively; and the theoretical result is 0.739, the errors are less than 2%. At last, strain measured error which are induced by sensor location angle deviation is discussed. The result indicates that the strain transfer models that the fiber Bragg grating sensor under non-axial stress and axial stress are greatly different, and the measured results have some errors because of the angle location error of fiber Bragg sensors.

Key word: fiber optics; strain transfer; fiber Bragg grating sensor; shear-lag theory; non-axial applied force

1 引言

随着经济的发展和人民生活水平的日益提高, 对各种建筑结构的安全性提出了更高的要求^[1]。想要对结构的安全性进行诊断, 对结构当前状态参量的实时测量是必不可少的, 光纤传感器由于其突出的优点而成为土木工程结构系统的首选传感器之一。光纤光栅传感器(Fiber Bragg grating sensor, FBGs)由于其具有体积小、灵敏度高、耐腐蚀、抗电

磁干扰、分布或者准分布式测量、可实现远距离的监测与数据传输等优点, 在短短的十几年时间内得到了广泛的应用^[2,3]。

光纤光栅传感器的裸光纤部分主要成分是二氧化硅, 其抗剪能力较差, 容易折断。同时由于土木工程结构的施工过程属于典型的粗放式作业, 因此需要对光纤光栅传感器进行封装保护, 使其在浇注、振捣和压模等过程中不被冲击损坏。根据被测结构的

* 国家自然科学基金(50408031)、辽宁省科学技术重点基金(20042149)和面上项目(20032120)资助课题。

作者简介: 李宏男(1957—), 男, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事结构多维抗震、振动控制、健康监测、输电塔体系抗风抗震等方面研究。

** 通信联系人。E-mail: dagongzhougd@163.com

收稿日期: 2006-06-07; 收到修改稿日期: 2006-08-30

需要,光纤光栅研究者们提出了各种不同的封装方式^[4~8]。无论采用何种封装方式,都需要对裸光纤进行涂敷层保护或胶接层保护,从而在结构基体和光纤之间形成一个中间层。由于涂敷层或者胶接层与裸光纤相比,物理特性存在着较大的差异,使结构的应变和光纤光栅传感器所测得的应变不一致。利用光纤光栅传感器对结构基体的应变进行准确测量,必须首先明确光纤光栅传感器和结构基体之间的应变传递关系。Cox 等^[9]认为从基体到纤维的负荷传递依靠两者间实际位移的差异,于 1952 首先提出剪滞(shear-lag)法对单纤维复合材料进行了应变传递分析。国内外学者针对光纤光栅传感器轴向与基体结构的主应力方向平行的情况作了大量的研究^[10~18]。李东升等^[19]在总结以往学者研究成果的基础上,假定光纤传感器粘贴长度中点的应变变化率与基体的应变变化率相同,重新对光纤传感器的轴向应变和结构应变之间的关系进行了推导,得出了更加合理的应变传递公式。

以往研究均是基于光纤光栅传感器轴向与基体结构的主应力方向平行的情况。在光纤光栅传感器的实际应用中,由于以下因素的影响:1)对于土木工程结构,由于结构的复杂性,结构构件经常受到多个方向的复合力系作用,可能无法判断主应力的方向。通过对实验数据的分析表明,光纤光栅传感器轴向与布设点的主应力方向成一定角度;2)在实际工程中,由于施工、构件布置、施工机械等条件的限制,有时无法将光纤传感器埋设在结构的主应力方向;3)光纤光栅传感器用于结构长期监测过程中,由于结构荷载的变化使原先的主应力方向发生改变;4)在随机荷载的作用下,结构的主应力方向将随着荷载的变化随时发生变化,使得光纤光栅传感器的轴向与其所在位置主应力的方向成一定的角度。因此有必要对非轴向力作用下光纤光栅传感器和结构基体之间的应变传递关系进行分析。

本文利用普遍剪滞法的基本原理,分析了非轴向力作用下光纤光栅传感器的应变和结构基体实际应变之间的关系,得出了光纤光栅传感器的平均应变传递系数,并进行了实验验证。同时对光纤光栅传感器的埋设角度偏差对测量结果的影响进行了分析。

2 光纤光栅传感器的应变传递分析

2.1 光纤光栅传感器的测量原理

光纤光栅传感器是利用光纤的紫外敏感特性,在

光纤的一段范围内沿光纤轴向使纤芯折射率发生周期性变化而形成的芯内体光栅(FBG)。当光纤光栅产生轴向应变时,将改变光纤光栅传感器的工作波长,即光纤光栅的反射波长将发生变化。因此,通过测量埋入结构中,或者粘贴在结构表面的光纤光栅的反射光波长的变化即可得知该点结构的应变变化。

2.2 基本假设

以下的理论分析采用如下假定:

- 1) 在界面上,光纤与中间层以及中间层与基体之间结合完好,没有相对滑移;
- 2) 光纤的变形是由基体通过中间层的剪切变形来传递的,光纤和中间层均不直接受力;
- 3) 光纤、中间层和基体均为线弹性材料,不考虑其塑性变形;
- 4) 光纤和中间层只有轴向位移,没有径向位移。

2.3 理论分析

经过简化,可以将结构基体、中间层和光纤看作三个柱体,如图 1 所示。图中 X, Y, Z 指基体结构的整体坐标系; x, y, z 指光纤和中间层的局部坐标系; r_a 指基体圆柱体的半径; α 指光纤的轴向和基体结构 Z 方向之间的夹角; l 指光纤光栅传感器的半长; r_g 和 r_m 分别表示光纤的外半径和中间层的外半径。

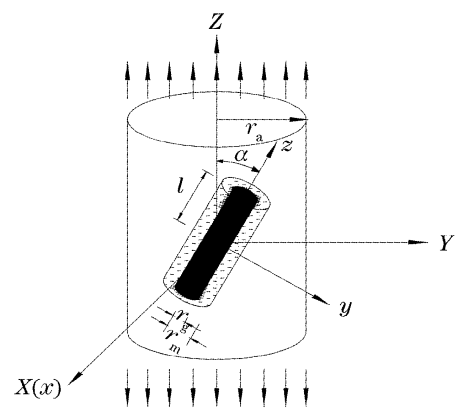


图 1 光纤光栅传感器埋入结构示意图

Fig. 1 Optical fiber sensor embedded in the matrix under non-axial stress

当光纤光栅传感器埋入结构后,由于结构的变形,根据基本假定可得光纤、中间层和基体的受力情况如图 2 所示。

对光纤微段进行受力分析[如图 2(a)],列出平衡方程得

$$\frac{d\sigma_g}{dz} = -\frac{2\tau_{g,c}(z, r_g)}{r_g}, \quad (1)$$

式中 dz 表示光纤微段的长度; σ_g 表示光纤横截面上的正应力; $\tau_{g,c}(z, r_g)$ 表示光纤和中间层的交接面上的剪应力。

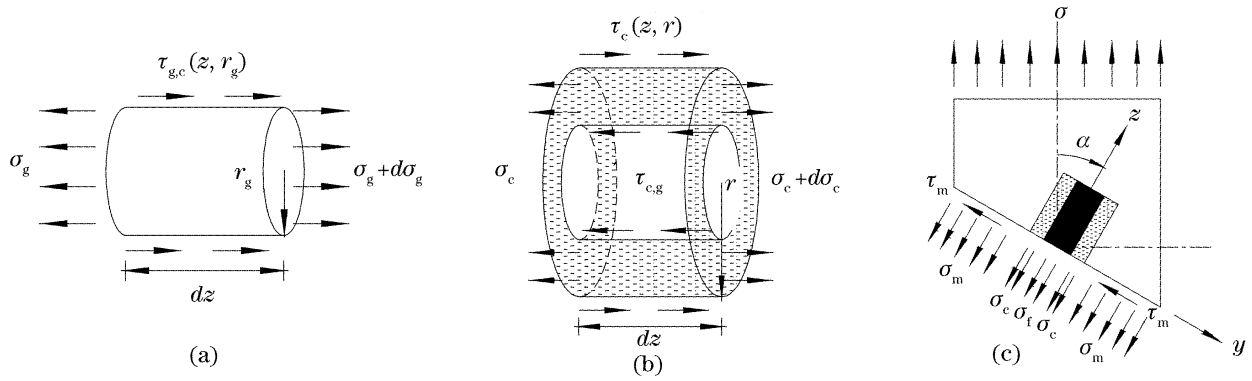


图 2 光纤光栅传感器应力分布示意图。(a) 光纤微段受力图, (b) 中间层微段受力图, (c) 整体受力示意图
Fig. 2 Stresses distribution of representative volume element. (a) An element length dz of fiber, (b) an element length dz of interlayer, (c) representative volume element

同样对中间层微段[如图 2(b)]进行受力平衡分析可知

$$\tau_c(z, r) = \frac{r_g}{r} \tau_{c,g}(z, r_g) - \frac{r^2 - r_g^2}{2r} \frac{d\sigma_c}{dz}, \quad (2)$$

式中 σ_c 表示中间层横截面上的正应力; $\tau_c(z, r)$ 表示中间层的外径为 r 的圆柱面上的剪应力; $\tau_{c,g}(z, r_g)$ 表示光纤和中间层的交接面上的剪应力。

对埋入光纤的基体,其受力情况如图 2(c) 所示,对光纤、中间层和基体进行整体受力分析,列出 z 方向上的平衡方程:

$$r_g^2 \sigma_g + (r_m^2 - r_g^2) \sigma_c + \left(\frac{r_a^2}{\cos \alpha} - r_m^2 \right) \sigma_m = r_a^2 \sigma \cos \alpha, \quad (3)$$

式中 σ_m 表示基体结构横截面上的正应力, σ 表示基体结构 Z 方向上的正应力。

张立群等^[20]在总结以往学者提出的短纤维橡胶复合材料应变传递理论时指出:剪滞模型的实质就是,从基体到纤维的负荷传递、依靠两者间实际位

移的差异,即光纤和基体的相对位移可以根据中间层的剪切应变 γ_c 来确定,即

$$u_m - u_g = \int_{r_g}^{r_m} \gamma_c(r) dr, \quad (4)$$

式中 u_m 和 u_g 分别代表中间层外侧和光纤沿 z 方向的位移; γ_c 指中间层的剪应变。

两边同时对 z 求导得

$$\frac{du_m}{dz} - \frac{du_g}{dz} = \epsilon_m - \epsilon_g = \int_{r_g}^{r_m} \frac{d\gamma_c(r)}{dz} dr, \quad (5)$$

根据结构材料的应力-应变关系得

$$\frac{\sigma_m}{E_m} - \frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{1}{G_c} \int_{r_g}^{r_m} \frac{d\tau_c(r)}{dz} dr, \quad (6)$$

其中 E_m 、 E_g 和 G_c 分别为基体的弹性模量、光纤的杨氏模量和中间层的剪切模量。

将(1)式、(2)式和(3)式代入(6)式,得出光纤、中间层和基体结构的应力关系:

$$\frac{1}{E_m} [r_a^2 \sigma \cos \alpha - r_g^2 \sigma_g - (r_m^2 - r_g^2) \sigma_c] \frac{1}{r_a^2 / \cos \alpha - r_m^2} - \frac{\sigma_g}{E_g} = -\frac{1}{G_c} \int_{r_g}^{r_m} \frac{1}{dz} \left(\frac{r^2 - r_g^2}{2r} \frac{d\sigma_c}{dz} - \frac{r_g^2}{2r} \frac{d\sigma_g}{dz} \right) dr, \quad (7)$$

对(7)式右边进行积分,计算得到

$$\frac{1}{E_m} [r_a^2 \sigma \cos \alpha - r_g^2 \sigma_g - (r_m^2 - r_g^2) \sigma_c] \frac{1}{r_a^2 / \cos \alpha - r_m^2} - \frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{1}{G_c} \frac{1}{dz} \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (r_m^2 - r_g^2) - r_g^2 \ln \left(\frac{r_m}{r_g} \right) \right] \frac{d\sigma_c}{dz} - \frac{1}{2} r_g^2 \ln \left(\frac{r_m}{r_g} \right) \frac{d\sigma_g}{dz} \right\}, \quad (8)$$

经过整理,得

$$\left[\epsilon_m r_a^2 \cos \alpha - \frac{E_g}{E_m} r_g^2 \epsilon_g - \frac{E_c}{E_m} (r_m^2 - r_g^2) \epsilon_c \right] \frac{1}{r_a^2 / \cos \alpha - r_m^2} - \epsilon_g = -\frac{E_g}{G_c} \left\{ \frac{1}{2} r_g^2 \frac{d^2 \epsilon_g}{dz^2} \ln \left(\frac{r_m}{r_g} \right) + \frac{E_c}{E_g} \frac{d^2 \epsilon_c}{dz^2} \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (r_m^2 - r_g^2) - r_g^2 \ln \left(\frac{r_m}{r_g} \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

式中 ϵ_c 和 ϵ_g 分别表示中间层和光纤 z 方向上的应变。

由于光纤光栅、中间层和基体同步变形,三者应变接近,同时中间层的弹性模量和光纤光栅、基体的弹性

模量相比相差很大(一般在 10 倍以上),可以认为

$$E_c/E_m \cong E_c/E_g \cong 0, \quad (10)$$

式中 E_c 表示中间层的弹性模量。

从而将(9)式化简,得

$$\left[\frac{E_g}{G_c} \frac{1}{2} r_g^2 \ln\left(\frac{r_m}{r_g}\right) \right] \frac{d^2 \epsilon_g}{dz^2} - \left[\frac{(E_g/E_c) r_g^2}{r_a^2/\cos \alpha - r_m^2} + 1 \right] \epsilon_g = - \left(\frac{r_a^2 \cos^2 \alpha}{r_a^2 - r_m^2 \cos \alpha} \right) \epsilon_m, \quad (11)$$

其中 ϵ_m 表示基体结构在外力作用下的应变。

设参量

$$\eta^2 = \left[\frac{(E_g/E_m) r_g^2}{r_a^2/\cos \alpha - r_m^2} + 1 \right] \left/ \left[\frac{E_g}{G_c} \frac{1}{2} r_g^2 \ln\left(\frac{r_m}{r_g}\right) \right] \right., \quad (12)$$

$$\xi^2 = \left(\frac{r_a^2 \cos^2 \alpha}{r_a^2 - r_m^2 \cos \alpha} \right) \left/ \left[\frac{E_g}{G_c} \frac{1}{2} r_g^2 \ln\left(\frac{r_m}{r_g}\right) \right] \right., \quad (13)$$

(11) 式可简化为:

$$\frac{d^2 \epsilon_g}{dz^2} - \eta^2 \epsilon_g = - \xi^2 \epsilon_m, \quad (14)$$

(14) 式即为非轴向力作用下光纤内沿轴向分布的应变与基体应变关系的控制方程,参量 η 和 ξ 中包含了光纤、中间层的弹性模量和半径的影响。其通解为

$$\epsilon_g(z) = A \sinh(\eta z) + B \cosh(\eta z) + \frac{\xi^2}{\eta^2} \epsilon_m, \quad (15)$$

式中 A 和 B 为由边界条件决定的积分常数。根据假定,光纤与中间层不直接受力,故其端部为自由端面,没有应力传递,因此边界条件为

$$\epsilon_g(L) = \epsilon_g(-L) = 0, \quad (16)$$

此边界条件等价于下式:

$$\epsilon_g(L) = 0, \quad \dot{\sigma}_g(0) = 0 \quad \text{or} \quad \dot{\epsilon}_g(0) = 0, \quad (17)$$

即光纤粘贴部分中点无剪应力[由于对称性,参考(1)式]。(16)式和(17)式所确定的边界条件可以得到相同的解。将(17)式所确定的边界条件代入(15)式,确定积分常数为

$$A = 0, \quad B = - \frac{\xi^2}{\eta^2 \cosh(\eta L)} \epsilon_m. \quad (18)$$

因此,(14)式的解,也即光纤内的轴向应变分布为

$$\epsilon_g(z) = \frac{\xi^2}{\eta^2} \left[1 - \frac{\cosh(\eta z)}{\cosh(\eta L)} \right] \epsilon_m. \quad (19)$$

光纤光栅传感器所用的光纤与普通通信用的光纤相同,都由纤芯、包层和涂敷层组成。光纤纤芯的直径一般在 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间,包层的直径为 $125 \mu\text{m}$,涂覆层的直径一般为 $250 \mu\text{m}$ 。所以在一般的结构健康监测中,中间层的外径相对于基体的直径来说很小,即有: $r_m \ll r_a$,将此条件代入(12)式和(13)式,化简 η 和 ξ 后得

$$\eta^2 = \frac{1}{(1 + \mu)(E_g/E_c) r_g^2 \ln(r_m/r_g)},$$

$$\xi^2 = \epsilon_m \cos^2 \alpha, \quad (20)$$

将(20)式代入(19)式,得

$$\epsilon_g(z) = \cos^2 \alpha \left[1 - \frac{\cosh(\eta z)}{\cosh(\eta L)} \right] \epsilon_m, \quad (21)$$

(21)式即为非轴向力作用下光纤光栅传感器各点的应变与基体结构应变之间的关系,当角度为零($\alpha = 0$)时与文献[16]给出的应变公式一致。从(21)式可以看出,在非轴向力作用下,光纤光栅传感器应变和结构的应变之间的关系与其在轴向力作用下存在巨大的差异。虽然(21)式是基于光纤光栅传感器推导出的应变传递关系,但是对于依靠纤芯的变形来测量应变的其他光纤传感器也同样适用。

光纤粘贴部分各点的应变传递率(Strain transfer ratio, STR)定义为光纤光栅的应变和该点结构实际应变的比值,可表示为

$$\mu(z) = \frac{\epsilon_g(z)}{\epsilon_m} = \cos^2 \alpha \left[1 - \frac{\cosh(\eta z)}{\cosh(\eta L)} \right], \quad (22)$$

其中,应变传递率最大的点在光纤光栅传感器的中间位置,即

$$\mu_m(0) = \frac{\epsilon_g(0)}{\epsilon_m} = \cos^2 \alpha \left[1 - \frac{1}{\cosh(\eta L)} \right]. \quad (23)$$

根据文献[11],光纤和涂敷层的机械性质如表 1 所示。利用表 1 给出的光纤和中间层的物理性质参量,处在不同角度下光纤光栅传感器各点的应变传递率随长度的变化关系如图 3 所示。

表 1 光纤和中间层的机械性质

Table 1 Mechanical properties of the optical fiber and interlayer

Material parameters	Value
Young's modulus the glass fiber E_g/Pa	7.2×10^{10}
Young's modulus the interlayer E_c/Pa	2.55×10^6
Poisson ratio of the interlayer ν_c	0.48
Radius of the outer boundary of the interlayer $r_m/\mu\text{m}$	102.5
Radius of the glass fiber $r_g/\mu\text{m}$	62.5

图 3 中 α 指基体主应力与光纤光栅传感器轴向之间的角度,从图中可以看出,应变传递率在传感器中心处最大,向两边逐渐减小。

光纤光栅传感器所测量的应变为粘贴长度范围

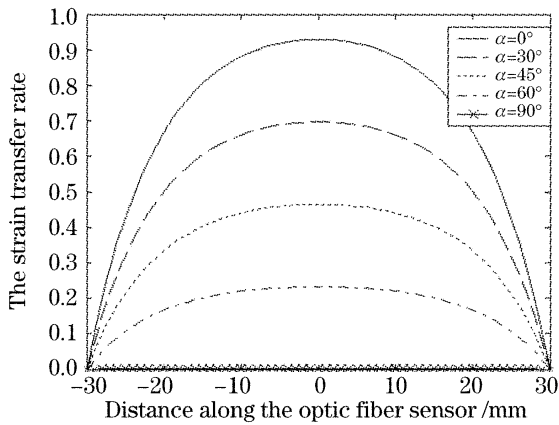


图 3 不同角度下纤芯内的轴向应变传递率沿长度分布图

Fig. 3 Distribution of normal strain transfer ratio in fiber along the length with different angle

内的平均应变,平均应变传递率(ASTR)为

$$\bar{\mu} = \frac{\overline{\epsilon_g(x)}}{\epsilon_m} = 2 \int_0^L \epsilon_g(x) dx / (2L\epsilon_m) = \cos^2 \alpha \left[1 - \frac{\sinh(\eta L)}{\eta L \cosh(\eta L)} \right], \quad (24)$$

由(24)式可看到,当角度为 0 时($\alpha = 0$)即为文献[16]给出的平均应变传递率,因此(24)式为平均应变传递率的一般表达式。

光纤光栅传感器平均应变传递率随角度的变化关系如图 4 所示。

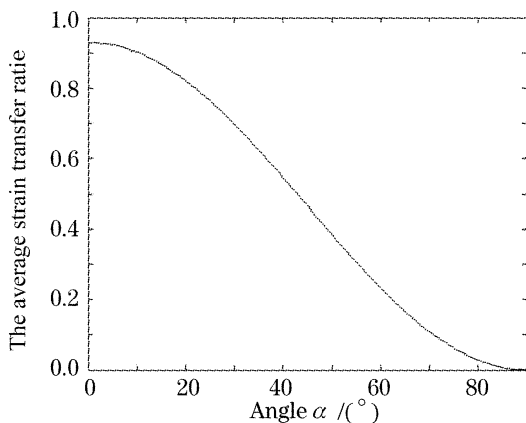


图 4 平均应变传递率随角度的变化关系

Fig. 4 Average strain transfer rate distribution along the angle of fiber sensor

从图 4 可以看出,光纤光栅传感器与基体主应力的角度越小,平均应变传递率越大。随着角度的增加,平均应变传递率逐渐减小。当光纤传感器与基体主应力垂直时,平均应变传递率为零,此时光纤光栅传感器不能测出结构的应变,在实际应用中应特别注意。

3 实验及结果分析

如图 5 所示,采用一块中部等宽等厚的钢板作为实验试件,在钢板表面中部粘贴两个光纤光栅传感器(传感器 1 平行于钢板长向,传感器 2 与钢板纵向成一定角度)。沿试件纵向施加均布荷载,加载方式采用等级加载,每级 5 kN,最大到 40 kN。

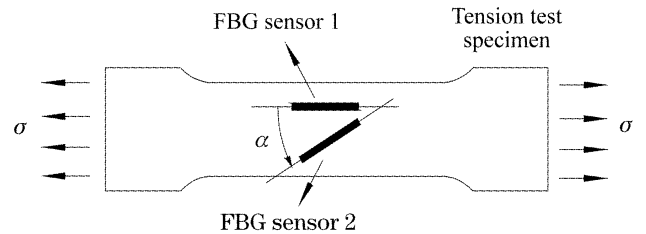


图 5 实验试件及传感器布置

Fig. 5 Arrangement of fiber Bragg grating sensors and the tension-testing specimen

由文献[16]可知,在轴向力作用下光纤光栅传感器粘贴长度范围内的平均应变传递率为

$$\bar{\mu} = 1 - \frac{\sinh(\eta L)}{\eta L \cosh(\eta L)}, \quad (25)$$

比较(24)式和(25)式得,在相同传感器和中间层物理参量的情况下,光纤光栅传感器在非轴向力作用下和轴向力作用下的平均应变传递率相差 $\cos^2 \alpha$,因此根据光纤光栅传感器的测量原理只需验证试件在荷载作用下光纤光栅传感器 2 和 1 的波长变化之比为 $\cos^2 \alpha$ 即可。

实验两传感器的角度 α 为 30.72° , $\cos^2 \alpha$ 等于 0.739。由于实验钢板宽度较小,光纤光栅传感器 2 的测量值受试件泊松效应的影响,其测量值需要进行修正。试件的泊松比 ν 为 0.25,其修正系数为 $\omega = 1 / (1 - \nu \tan \alpha) = 1.1744$ 。实验结果如图 6 所示,实验结果的波长变化之比为 $\cos^2 \alpha = \omega \cdot K_1 / K_2 = 1.1744 \times 17.05 / 27.12 = 0.738$ 。实验共进行了三组,结果如表 2 所示。

表 2 光纤光栅传感器实验结果

Table 2 Test results of fiber Bragg grating sensors

	The first group	The second group	The third group
Test result (c_1)	0.727	0.738	0.746
Theoretical result (c_2)	0.739	0.739	0.739
Error ($c_1 - c_2$) / c_2	1.6%	0.1%	0.9%

从实验结果看出,实验值和理论值相比误差均小于 2%。实验结果与理论结果符合得很好,证明了推导的正确性。

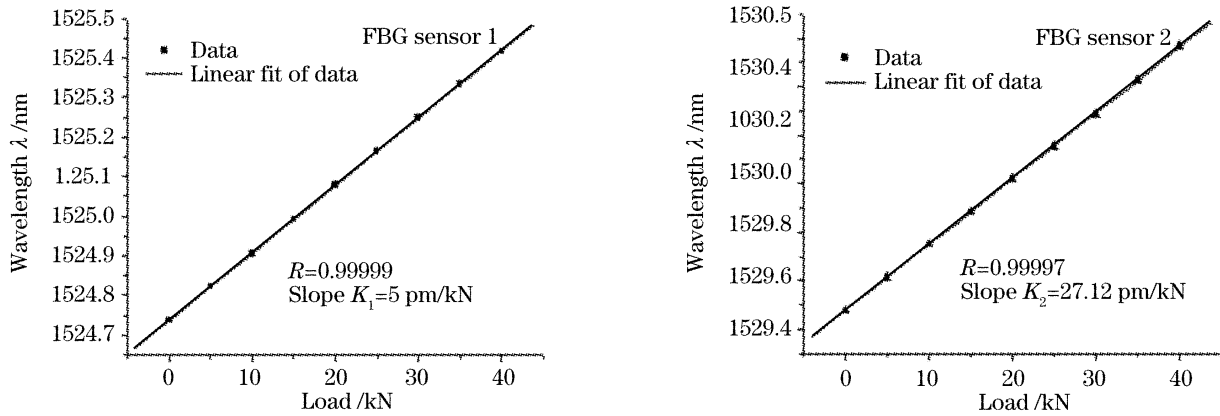


图 6 光纤光栅传感器的波长与加载力的变化关系

Fig. 6 FBG sensor's wavelength versus the test load

4 误差分析

在光纤光栅传感器的实际应用中,由于埋设时的量角误差或埋设后人为干扰等因素造成其实际角度与预设角度存在一定的偏差。造成平均应变传递率的计算偏差,进而影响到基体结构的测量结果。所以有必要对光纤光栅传感器的角度偏差给应变传递系数及应变测量结果造成的影响进行讨论。

根据相对误差的定义^[21],由于光纤光栅传感器的埋设角度偏差造成的结构应变测量的相对误差 δ_m 为

$$\delta_m = \frac{\epsilon'_m - \epsilon_m}{\epsilon_m}, \quad (26)$$

式中 ϵ'_m 指发生角度偏差后测得的结构应变; ϵ_m 指在设定角度下测得的结构应变。将(24)式代入上式得

$$\delta_m = \frac{\bar{\epsilon}_g / \bar{\mu}' - \bar{\epsilon}_g / \bar{\mu}}{\bar{\epsilon}_g / \bar{\mu}} = \frac{\bar{\mu} - \bar{\mu}'}{\bar{\mu}}, \quad (27)$$

其中 $\bar{\mu}'$ 为发生角度偏差后的平均应变传递率。为了研究和应用方便,根据相对误差的概念,定义平均应变传递率误差 ζ (average strain transfer rate error, ASTRE)为发生角度偏差后的平均应变传递率同预设角度上的平均应变传递率之差与预设角度上的平均应变传递率之比,其表达式为

$$\zeta = \frac{\bar{\mu}' - \bar{\mu}}{\bar{\mu}} = \frac{\cos^2(\alpha + \Delta\alpha) - \cos^2\alpha}{\cos^2\alpha}, \quad (28)$$

式中 $\Delta\alpha$ 指光纤光栅传感器的角度偏差。

将(28)式代入(27)式,得出平均应变传递率误差和结构应变测量误差之间的关系如下式:

$$\delta_m = -\zeta / (1 + \zeta). \quad (29)$$

取 $\Delta\alpha$ 分别为 1° 、 2° 和 3° 时,应变测量误差随光纤光栅传感器埋设角度的变化关系如图7所示。

从图7可以看出,应变测量误差随角度的增大而增大。当光纤光栅传感器角度大于 60° 后,应变

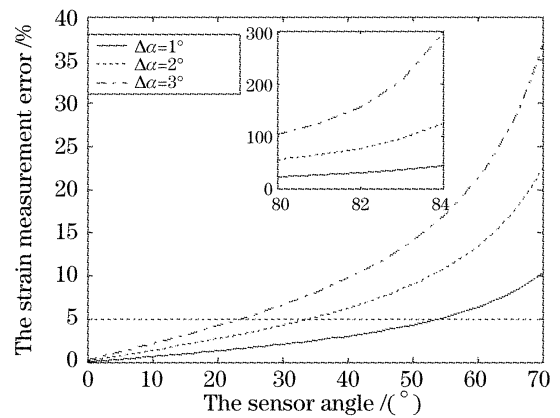


图 7 应变测量误差随光纤光栅传感器角度的变化关系

Fig. 7 Measurement strain error with the α change

测量误差急剧增大;微小的角度偏差将给应变测量带来很大的偏差,同时考虑平均应变传递率的大小,在设计光纤光栅传感器的埋设角度时最好不要使其大于 60° 。在光纤光栅传感器的实际应用中,其角度越大,越需要严格控制其埋设角度的偏差。在一般的实验中允许测量误差为 $\pm 2\%$,根据(28)式和(27)式可以确定各个角度下所允许的最大光纤光栅传感器的角度埋设偏差。

5 结 论

利用普遍剪滞法,采用一个符合实际的假设,建立了直接埋入或者管状封装时非轴向力作用下布拉格光栅光纤传感器模型各点的应变和基体结构实际应变之间的关系,进而得出了传感器长度范围内的各点的应变传递率和整个长度范围内的平均应变传递率,同时讨论了角度给平均应变传递率带来的影响。进而与轴向力作用下的应变传递模型进行了比较,并进行了相应的实验,验证了结论的正确性。最后讨论了光纤光栅传感器的埋设角度偏差给平均应变传递率及测量结果造成的影响。

虽然文中结论是基于光纤光栅传感器得出的,但是对于其他依靠光纤纤芯的变形来测量应变的光纤传感器也同样适用。应变传递率对非轴向力作用下的光纤光栅传感器测量结果的修正,为其在实际工程中的广泛应用奠定了理论基础。

参 考 文 献

- Li Hongnan, Li Dongsheng. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, **22**(3): 82~90 (in Chinese)
李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, **22**(3): 82~90
- Li Hongnan, Li Dongsheng, Zhao Baidong. Progress on study and application of smart health monitoring method by fiber optic sensor in civil engineering [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, **22**(6): 76~83 (in Chinese)
李宏男,李东升,赵柏东. 光纤健康监测方法在土木工程中的研究与应用进展[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, **22**(6): 76~83
- Li Dongsheng, Liang Dakai, Pan Xiaowen. Experimental study of fiber grating smart layer system based on fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1166~1170 (in Chinese)
李东升,梁大开,潘晓文. 基于光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层试验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1166~1170
- Li Sun, Li Hong-Nan, Liang Ren. Experiment study on shrink strain monitoring of concrete in the cure period with FBG sensors [C]. *ASME, PVP*, 2005. 71~91
- Dong-Sheng Li, Hong-Nan Li, Liang Ren *et al.*. Experiments on an offshore platform model by FBG sensors[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5391**: 100~106
- Hu Shuyang, Zhao Qida, He Shiya. Strain measurement in construction steel bar using a FBG sensor coated by a thin metal tube[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(6): 688~690 (in Chinese)
胡曙阳,赵启大,何士雅. 金属管装光纤光栅用于建筑钢筋应变测量[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(6): 688~690
- Zhao Xuefeng, Tian Shizhu, Zhou Zhi *et al.*. Experimental study on strain monitoring of concrete using a steel slice packaged fiber grating[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(2): 171~174 (in Chinese)
赵雪峰,田石柱,周智等. 钢片封装光纤光栅监测混凝土应变试验研究[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(2): 171~174
- Zhao Zhanchao, Liu Haowu, Cai Desuo. Study on lossless monitoring of concrete structure using fiber sensor[J]. *Advances in Mechanics*, 1995, **25**(2): 223~231 (in Chinese)
赵占朝,刘浩吾,蔡德所. 光纤传感无损检测混凝土结构研究述评[J]. *力学进展*, 1995, **25**(2): 223~231
- H. L. Cox, M. A., F. R. Ae. S. *et al.*. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials [J]. *British J. Appl. Phys.*, 1952, **3**(3): 72~79
- Antonio Nanni, C. C. Yang, Kun Pan *et al.*. Fiber-optic sensor for concrete strain/stress measurement[J]. *ACI Materials J.*, 1991, **88**(3): 257~264
- Y. Eugene Pak. Longitudinal shear transfer in fiber optic sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 1992, **1**(1): 57~62
- Farhad Ansari, Yuan Libo. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. *J. Engng. Mechanics*, 1998, **124**(4): 385~394
- Libo Yuan, Limin Zhou. Sensitivity coefficient evaluation of an embedded fiber-optic strain sensor[J]. *Sensor and Actuators A*, 1998, **69**: 5~11
- Gao Qing, Kang Guozheng. The revised shear-lag theory for stress transfer in short fiber composites [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2000, **21**(3): 198~204 (in Chinese)
高庆,康国正. 短纤维复合材料应力传递的修正剪滞理论[J]. *固体力学学报*, 2000, **21**(3): 198~204
- Qingbin Li, Guang Li, Guanglun Wang *et al.*. Elasto-plastic bonding of embedded optical fiber sensors in concrete [J]. *J. Engng. Mechanics*, 2002, **128**(4): 471~478
- Li Guang, Li Qingbin, Zhang Wencui. Ideal elasto-plastic model for internal strain measurement by fiber optic sensors [J]. *Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2001, **41**(11): 102~105 (in Chinese)
李广,李庆斌,张文翠. 光纤传感器应变量测的标定系数修正 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2001, **41**(11): 102~105
- Qingling Zhou, Xingqiang Lu, Jianrong Qiu. Beam-shaping microstructure optical fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **3**(12): 686~688
- Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Research on stress transferring rules for claded fiber Bragg gratin by using shear lag theory [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 636~640 (in Chinese)
赵洪霞,鲍吉龙,陈莹. 利用剪滞法对包覆光纤布拉格光栅应力传递规律的研究 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 636~640
- Li Dongsheng, Li Hongnan. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. *Chin. J. Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, **37**(4): 435~441 (in Chinese)
李东升,李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析 [J]. *力学学报*, 2005, **37**(4): 435~441
- Zhang Liqun, Jin Riguang, Geng Haiping. The structure-performance theory research actuality of single-fiber polymer composites II stress transfer model of single-fiber polymer composites [J]. *Elastic Solid*, 1997, **7**(2): 43~49 (in Chinese)
张立群,金日光,耿海萍. 短纤维橡胶复合材料结构-性能关系理论研究现状 II 短纤维橡胶复合材料应力传递模式 [J]. *弹性体*, 1997, **7**(2): 43~49
- Hefei University of Technology, Chongqing Jianzhu University, Tianjin University. *Metrology [M]*. Beijing: Chinese Construction Industry Press, 1995. 77~81 (in Chinese)
合肥工业大学,重庆建筑大学,天津大学. *测量学[M]*. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. 77~81