

文章编号 1004-924X(2014)01-0024-07

埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构 对测量应变的影响

吴入军¹, 郑百林^{1*}, 贺鹏飞¹, 谭跃刚²

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092;

2. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:考虑在实际应变测量中传感器封装形式会影响光纤 Bragg 光栅测得的应变响应, 本文研究了测量应变与实际应变之间的关系。针对埋入式光纤 Bragg 光栅传感器, 建立了应变传递函数, 并对传递函数的正确性和各个参数对测量应变的影响进行了研究。首先, 根据埋入式光纤 Bragg 光栅传感器的受力特点, 提出了多项式形式的剪应力分布, 进一步建立了应变传递函数。然后, 利用数值方法和实验对该应变传递函数进行验证。最后, 分析了传感器长度、胶结层弹性模量、胶结层厚度对测量应变的影响。计算结果表明: 该应变传递函数正确; 胶结层厚度越薄, 弹性模量越大, 越有利于应变传递。该应变传递函数计算误差控制在 5% 以内, 完全满足埋入式光纤 Bragg 光栅测量精度要求, 对其实际应用具有指导意义。

关键词: 光纤布拉格光栅; 光纤传感器; 应变测量; 应变传递; 剪应力

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20142201.0024

Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement

WU Ru-jun¹, ZHENG Bai-lin^{1*}, HE Peng-fei¹, TAN Yue-gang²

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University,
Shanghai 200092, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of
Technology, Wuhan 430070, China)

* Corresponding author, E-mail: blzheng@tongji.edu.cn

Abstract: As the package structures of a sensor seriously interfere the strain responses measured by a Fiber-optic Bragg Grating (FBG), this paper focuses on the relationship of measured strain and true strain in the actual measurement. It establishes a strain transfer function for embedded FBG sensors and verifies the validity of the transfer function and the influence of different parameters on the measured strain. Firstly, based on mechanical characteristics of embedded FBG sensors, the shear stress distribution with a form of polynomial is presented, then the strain transfer function is established and verified by taking a numerical method and an experiment. Finally the influence of sensor length, ce-

收稿日期: 2013-05-20; 修订日期: 2013-06-26.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA040106)

mentation layer modulus and cementation layer thickness on the measured strain is analyzed. Experimental results indicate that the strain transfer function is valid. Moreover, the thinner the cementation thickness and the higher the cementation modulus are, the more convenient the strain transfer is. The strain transfer function satisfies the accuracy requirement of embedded FBG sensors because the calculation error is controlled within 5%, which is considered as a guidance for its practical application.

Key words: fiber-optic Bragg grating; optic fiber sensor; strain measurement; strain transfer; shear stress

1 引言

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 是最近几年发展非常迅速的光纤元器件之一。它具有体积小、结构灵巧、不受电磁干扰、耐用能力强、精度高等诸多优点,并在航空航天、船舶、混凝土、桥梁等领域有着广泛的应用前景^[1-2]。FBG 传感器所用的光纤与通信用光纤基本相同,由纤芯、包层和涂覆层组成。纤芯和包层的主要成分为二氧化硅,涂覆层一般为环氧树脂,用于增强光纤的柔韧性、机械强度和耐老化特性^[1-2]。单模光纤的外径非常细,易脆断,因此在实际使用时需要对其进行封装。封装形式通常有埋入式和表面式两种,埋入式是将 FBG 用金属或其它材质包裹起来,该类传感器常用于混凝土结构的应变测量;表面式传感器是将 FBG 粘贴在某种衬底上,然后再粘贴于被测物表面进行检测。无论哪种封装形式,光栅与被检测物体之间都存在着包层、涂覆层、胶结层等,使得 FBG 测得的应变并非实际的物体应变。因此,研究测量应变与实际应变的关系具有重要的意义^[2]。

国内外学者针对 FBG 传感器的应变传递机理做了大量的研究。Ansari 等人^[3]假定光纤中心处的应变与基体应变相同,得到了轴向应变与各层剪应力的分布。周智等人^[4]利用轴向正应力与剪应力的关系得出了应变传递函数的一般表达式。李东升等人^[5]假定光栅与基体的应变率相等,进一步修正了应变传递函数。梁德志等人^[6]用数值分析方法研究了 FBG 传感器的应变传递规律,并对 Ansari、李东升等人提出的应变传递函数做了验证工作,假定光纤与基体的应变率相等得到的应变传递函数更接近实际应变。常新龙等人^[7]针对埋入式 FBG 传感器建立了黏弹性应

变传递函数。郭伟、丘野等人^[8-9]针对表面粘贴式 FBG 传感器,忽略主应力,利用剪应力平衡建立了其应变传递函数。吴俊等人^[10]详细研究了黏结层对应变传递函数的影响。吴永红等人^[11]则从弹塑性角度描述了 FBG 传感器应变传递的非线性行为。本文根据埋入式 FBG 传感器的受力特点,由多项式形式的剪应力分布进一步建立了应变传递函数。

2 应变传递力学模型

2.1 埋入式 FBG 传感器结构

埋入式 FBG 传感器由纤芯、包层、涂覆层组成。在实际使用中,可以选择有机物、金属、合金等材料作为基体对 FBG 进行封装。其中,最常用的是将 FBG 粘贴于毛细钢管的内壁制作成 FBG 传感器,然后以埋入的方式进行应变测量,传感器基本结构如图 1 所示。本文分析了毛细钢管封装的 FBG 传感器的应变传递机制,推导 FBG 中心线处应变(测量应变)与毛细钢管内壁处应变(真实应变)之间的关系。

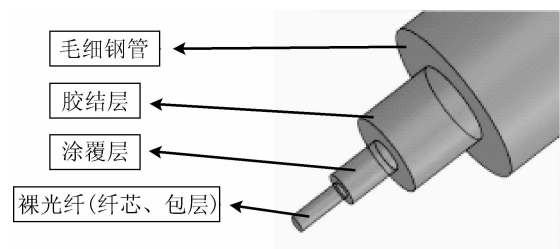


图 1 FBG 传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG sensors

由于该传感器是轴对称结构,本文取其 1/4 轴截面来分析其应变传递特性,如图 2 所示。图中 r_g, r_m 分别为裸光纤半径、毛细钢管内半径; $d\sigma_g, d\sigma_c, d\sigma_m$ 分别为裸光纤、中间层(将裸光纤与

毛细钢管之间的涂覆层、胶结层等材料称为中间层)、毛细钢管微单元的轴向应力; $\tau(x, r)$ 为 r 方向的剪切应力;传感器的宽度为 d , 黏结长度为 $2L$ 。

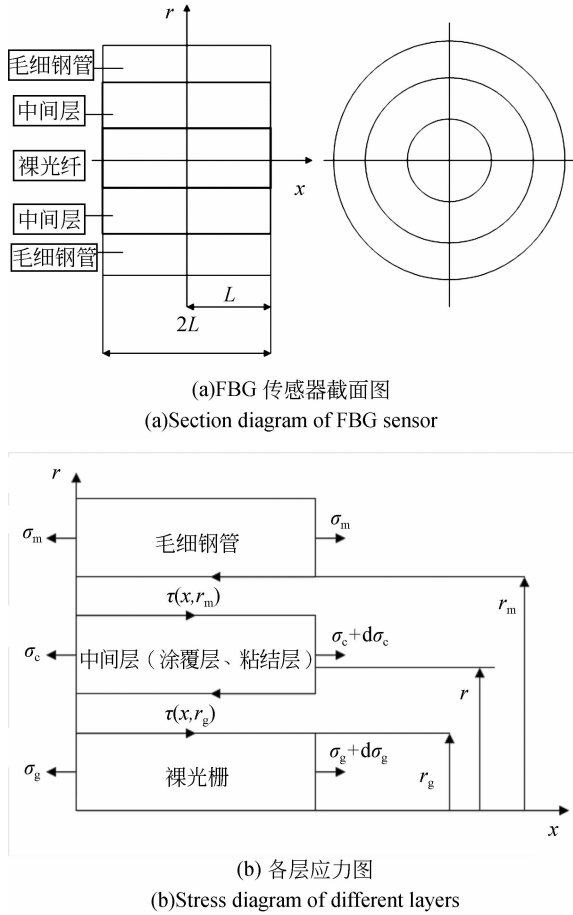


图 2 埋入式 FBG 传感器应变传递分析示意图
Fig. 2 Schematic diagram of strain transfer analysis on embedded FBG sensors

2.2 应变传递函数的建立

本文的理论推导基于以下假设:

(1) 假定 FBG 的纤芯和包层两者的力学性能相同。两者均采用二氧化硅材料, 但光纤纤芯含有微量 Ge;

(2) 假定传感器各层之间为理想界面, 即裸光纤、中间层、毛细钢管之间是紧密黏结在一起的。

建立光纤平衡方程:

$$\frac{d\sigma_g}{dx} = -\frac{2\tau(x, r_g)}{r_g}, \quad (1)$$

得出:

$$\tau(x, r_g) = -\frac{r_g}{2} \frac{d\sigma_g}{dx}. \quad (2)$$

假定毛细钢管承受均匀的拉压变形, 因毛细钢管的弹性模量远大于胶结层的弹性模量, 忽略胶结层对毛细钢管应变的影响。因此, 在毛细钢管与胶结层的接触界面上, 即 $r = r_m$ 时, 满足条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau(x, r_m)}{\partial r} = 0 \\ \tau(x, r_m) = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

在 $r=0$ 的边界上, 存在边界条件:

$$\tau(x, 0) = 0. \quad (4)$$

假定 $\tau(x, r)$ 在 r 方向满足某多项式函数, 则存在:

$$\tau(x, r) = f(x)r(r - r_m)^2. \quad (5)$$

利用式(2)进一步求出各层的剪应力, 为:

$$\tau(x, r) = -\frac{r(r - r_m)^2}{2(r_m - r_g)^2} \frac{d\sigma_g}{dx}. \quad (6)$$

仅考虑轴向变形^[3]情况下得到:

$$\tau(x, r) = G\gamma(x, r) \cong G \frac{du}{dr}. \quad (7)$$

由式(6)、式(7)积分得到:

$$\int_0^{r_m} \left[G \frac{du}{dr} \right] dr = -\int_0^{r_m} \frac{r(r - r_m)^2}{2(r_m - r_g)^2} \frac{d\sigma_g}{dx} dr. \quad (8)$$

得:

$$u_m - u_g = -\frac{1}{k^2} \frac{d\epsilon_g}{dx}, \quad (9)$$

其中:

$$k^2 = \frac{(r_m - r_g)^2}{\sum_1^n \frac{E_g}{E_i} (1 + \mu_i) \int_{r_i}^{r_{i+1}} r(r - r_m)^2 dr}, \quad (10)$$

式(10)已经考虑中间层含有多层的情况, r_i 为第 i 层的内径, E_i, μ_i 为第 i 层的弹性模量和泊松比。

式(9)对 x 求导数得到埋入式 FBG 传感器的应变微分方程:

$$\frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2} - k^2 \epsilon_g + k^2 \epsilon_m = 0, \quad (11)$$

其中: ϵ_g, ϵ_m 分别为光纤、毛细钢管的应变。

其通解为:

$$\epsilon_g(x) = c_1 e^{kx} + c_2 e^{-kx} + \epsilon_m. \quad (12)$$

光纤两端为自由端面, 存在边界条件^[5]:

$$\epsilon_g(L) = \epsilon_g(-L) = 0, \quad (13)$$

求得参数为:

$$c_1 = c_2 = -\frac{\epsilon_m}{2 \cosh(kL)}. \quad (14)$$

因此 FBG 中心线的轴向应变为:

$$\epsilon_g(x) = \epsilon_m \left(1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right), \quad (15)$$

虽然式(15)与文献[5]中的轴向应变方程形式是相同的,但是本文的剪应力式(6)与文献[5]不同,所以参数 k 是不同的。

FBG 传感器的应变传递率为:

$$\alpha(x) = \frac{\epsilon_g}{\epsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)}. \quad (16)$$

为进一步考虑时间因素,利用“弹性-黏弹性对应原理”推导黏弹性力学解。对应原理中存在如下对应关系:

$$\begin{cases} \bar{E}(s) = \frac{3}{s[2\bar{J}'(s) + \bar{J}''(s)]} \\ \bar{\mu}(s) = \frac{\bar{J}'(s) - \bar{J}''(s)}{2\bar{J}'(s) + \bar{J}''(s)} \end{cases}, \quad (17)$$

其中: $\bar{J}'(s), \bar{J}''(s)$ 分别描述变形的畸变部分和体积变化部分; $\bar{E}(s), \bar{\mu}(s)$ 分别表示黏弹性和弹性问题中弹性模量、泊松比对应的参数。

将毛细钢管应变进行拉普拉斯变化得到:

$$\bar{\epsilon}_m = \frac{\epsilon_m}{s}, \quad (18)$$

式中: s 代表复频率。将式(17)、(18)带入式(15)中,然后进行拉普拉斯逆变换可得到考虑黏弹性的 FBG 中心线的轴向应变方程:

$$\epsilon_g(x, t) = L^{-1} \left[\frac{\epsilon_m}{s} \left(1 - \frac{\cosh(\bar{k}x)}{\cosh(\bar{k}L)} \right) \right]. \quad (19)$$

其中: \bar{k} 为将式(17)带入 k 后的参数。

3 理论分析验证

3.1 分析模型以及参数

为了验证该应变传递函数的正确性,通过数值分析计算 FBG 中心线处的应变值,并将计算结果与根据式(15)得出的理论计算结果、文献[5]得到的结果进行对比。

表 1 各层结构参数^[12]

Tab.1 Structural parameters of different layers^[12]

层	半径 $R/\mu\text{m}$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
裸光纤	62.5	7.2×10^4	0.17
涂覆层	125	3 000	0.35
胶结层	325	3 451	0.35
毛细钢管	625	2.0×10^5	0.3

根据 FBG 的使用情况,将其结构分为裸光纤、涂覆层、胶结层和毛细钢管 4 层,各层参数如表 1 所示^[12]。在实际计算时,假定各层结构之间是理想界面,FBG 传感器的长度为 10 mm,毛细钢管两端各均匀拉伸 0.001 25 mm,建立的 FBG 有限元模型如图 3 所示。

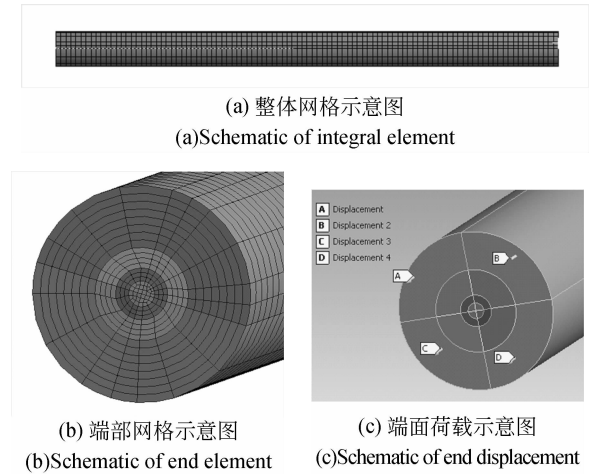


图 3 FBG 有限元模型

Fig. 3 Finite element models of FBG

3.2 结果分析

图 4 中为 FBG 中心线处的应变值对比图。数值解由 Ansys 软件计算得出,理论解 1 是利用本文应变传递函数得出的结果,理论解 2 是文献[5]方法得出的结果。从图 4 可以看出,理论解 1 小于理论解 2,理论解 1 与数值解的误差要小于理论解 2 与数值解的误差。理论解 1 与理论解 2 产生区别的主要原因是两者的应变传递函数是不相同的,本文剪应力函数是根据边界条件,假定剪应力符合某多项式函数;而文献[5]主要是运用层间剪应力平衡来创建应变传递函数的。

理论解 1 和数值解在整个黏结长度的分布趋势是相同的。在传感器的中间区域的结果非常接近,几乎是相等的;但在两端两者有一定的差距。除两端端点数值外,在整个黏结长度区域里理论解和数值解的误差都在 5% 以内。因为在理论推导时做了一定的假设,数值解本身是近似解,所以两者存在一定的差别。

FBG 两端区域的计算结果偏小,为了保证测量结果的正确性,必须保证一定的黏结长度,须在 FBG 两端留有一定的黏结余量。

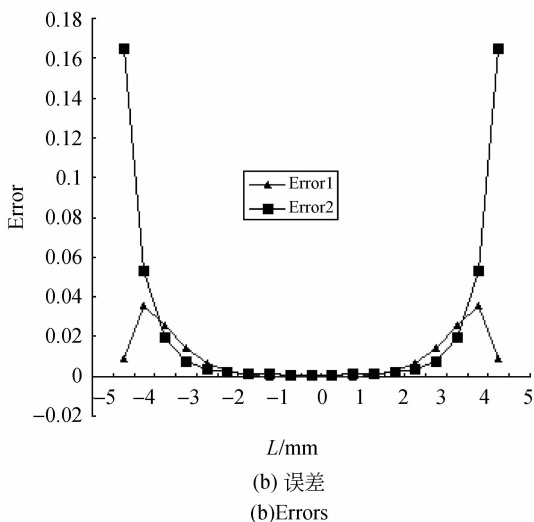
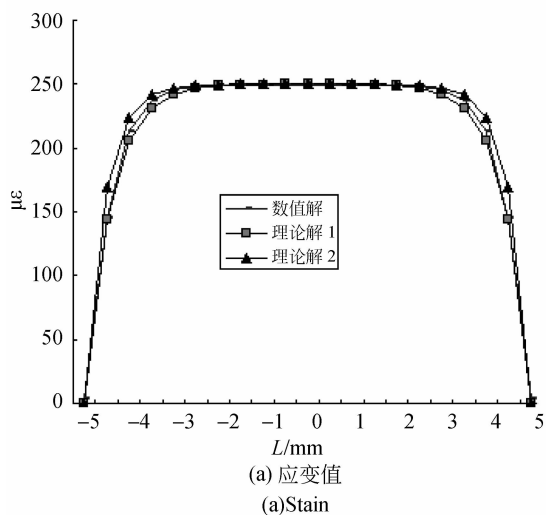


图 4 数值解与理论解的比较

Fig. 4 Comparison between numerical and theoretical solutions

4 实验验证和分析

通过式(15)求得光纤的轴向平均应变为:

$$\bar{\alpha} = \frac{\int_{-L}^L \epsilon_g(x) dx}{2L} = \epsilon_m \left[1 - \frac{\sinh(kL)}{KL \cosh(kL)} \right]. \quad (20)$$

平均应变表示为传感器整个黏结长度上应变的平均值,同时反应 FBG 传感器测量的是平均应变这一思想。采用文献[13]中的实验结果对式(20)进行验证。具体参数参考文献[13],这里不再赘述。

从图 5 可以看出,实验值和理论值是基本吻

合的,实验值与理论值误差在 4% 以内。产生误差的主要原因一是该理论模型的建立过程中做了一些假设;二是传感器的制作过程中存在制作误差。此外,还有材料参数误差、操作误差等。

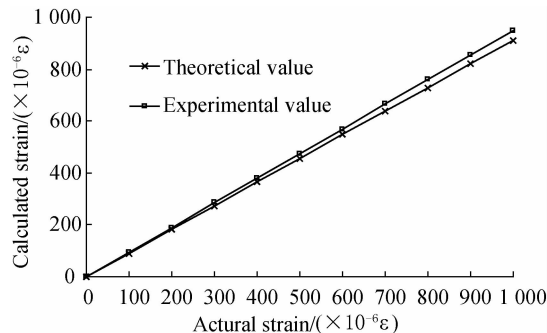


图 5 理论值和实验值的比较

Fig. 5 Comparison between theoretical and experimental values

5 各参数对应变传递率的影响

从式(16)可以看出,影响应变传递率的主要参数有:FBG 传感器长度、胶结层厚度、胶结层弹性模量等因素。针对埋入式 FBG 传感器,分析了不同参数对应变传递率的影响,计算中所用的参数见表 1。

胶结层厚度取 0.2 mm,FBG 传感器长度依次取 8,10,15,20 mm 的情况下,应变传递率如图 6 所示。应变值两端小,中间大,中间区域的应变传递率逐渐趋近 1。以应变传递率 0.99 为临界值,则有效长度依次为 3,5,10,15 mm,两端的余量均为 2.5 mm,即黏结长度必须大于 5.0 mm。因此在实际使用中,为了保留测量结果的精度,须保留一定的黏结长度。

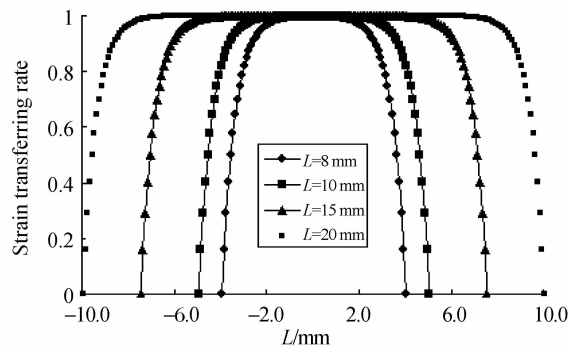


图 6 传感器黏结长度对应变传递率的影响

Fig. 6 Effect of adhesive length on strain transferring rate

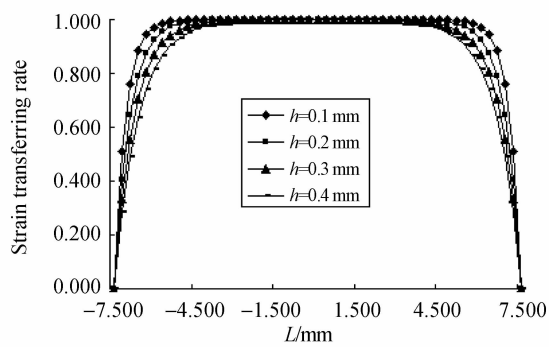


图 7 胶结层厚度对应变传递率的影响

Fig. 7 Effect of adhesive layer thickness on strain transferring rate

胶结层厚度依次为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm 时,应变传递率如图 7 所示。从图中可以看出,随着黏结层厚度的变大,有效黏结长度逐渐变小。以应变传递率 0.99 为有效长度的临界值,不同厚度下的有效长度依次为 11.1, 9.6, 8.2, 6.7 mm。因此,较小的胶结层厚度有利于传递应变,降低剪应力的损失,但是黏结层过薄,会造成 FBG 脱离,传感器失效。在实际使用中,要选择合适的中间层厚度。

胶结层厚度取 0.2 mm,胶结层弹性模量依次为 500, 1 000, 3 000, 5 000 MPa 时,应变传递率如图 8 所示。从图中得出,胶结层弹性模量对应变传递率、有效黏结长度都有比较大的影响。随着胶结层弹性模量的增加,有效长度逐渐变大。传感器的有效长度依次为 3.8, 6.8, 9.3, 10.0 mm。因此,胶结层弹性模量的增加有利于应变的传递,大大减少了通过胶结层造成的剪应力损失。

参考文献:

- [1] 吴朝霞,吴飞. 光纤光栅传感器原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
WU ZH X, WU F. *Fiber-optic Grating Sensors Theory and Application*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京:科学出版社,2009.
ZHANG Z J. *Optic Fiber Grating Theoretical Basis and Sensing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [3] FARHAD A, YUAN L B. Mechanics of bond and in-

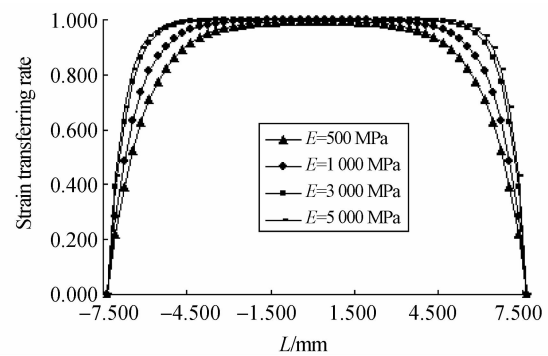


图 8 胶结层弹性模量对应变传递率的影响

Fig. 8 Effect of elasticity modulus of adhesive layer on strain transferring rate

6 结 论

本文根据剪应力边界条件提出了多项式形式的剪应力分布形式,并推导出应变传递函数,通过数值计算和实验验证了该理论的正确性。针对传感器不同参数进行的分析表明,光纤轴向应变的理论解和数值解在整个黏结长度内的变化趋势完全相同,且两者误差在 5% 以内;光纤轴向平均应变的理论解和实验值的误差在 4% 以内。

FBG 黏结长度的中间区域应变值是比较准确的,两端区域的数值偏小不具有可信度。因此,在 FBG 两端必须留有一定的余量。

随着胶结层厚度的变薄,应变传递率逐渐增大,有效黏结长度也逐渐变长;随着弹性模量的增加,应变传递率逐渐增大,有效黏结长度也逐渐变长。

- terface shear transfer in optical fiber sensors[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998,124(4):385-394.
- [4] 周智,李冀龙,欧进萍. 埋入式光纤光栅界面应变传递机理与误差修正[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006,38(1):49-55.
ZHOU ZH, LI J L, OU J P. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006,38(1):49-55. (in Chinese)
- [5] 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.
LI D SH, LI H N. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese*

- Journal of Theoretical and Applied Mechanic.* 2005,37(4):435-441. (in Chinese)
- [6] 梁德志,孙丽,黄昌铁,等. 埋入式 FBG 传感器应变传递的有限元计算与理论分析比较[J]. 沈阳建筑大学学报,2008,24(1):72-76.
LIANG D ZH, SUN L, HUANG CH T, *et al.*. Comparison of strain transfer of embedded FBG sensors calculated by FEM and theory formula [J]. *Journal of Shenyang Architectural University*, 2008, 24(1):72-76. (in Chinese)
- [7] 常新龙,李明,谷小飞. 基于线粘弹性的埋入式聚合物光纤传感器应变传递研究[J]. 固体火箭技术, 2010,33(3):353-359.
CHANG X L, LI M, GU X F. Study on strain transfer of embedded polymer fiber-optic sensors based on viscoelasticity theory[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 33(3):353-359. (in Chinese)
- [8] 郭伟,李新良,宋昊. 表面粘帖式光纤光栅传感器的应变传递分析[J]. 计测技术,2011,31(4):1-3.
GUO W, LI X L, SONG H. Strain transfer analysis of surface pasted optical fiber grating sensors [J]. *Metrology & Measurement Technology*. 2011,31(4):1-3. (in Chinese)
- [9] 丘野. 表面粘帖式 FBG 传感器应变传递机制研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
QIU Y. *Strain Transfer Study of Surface Pasted FBG Sensors*[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [10] 吴俊,陈伟民,章鹏,等. 粘接层弹性模量对 FBG 传感器应变传递性能的影响[J]. 光学精密工程, 2011,19(12):2941-2946.
WU J, CHEN W M, ZHANG P, *et al.*. Strain transfer influence of binding layer modulus on fiber-optic Bragg grating sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2941-2946. (in Chinese)
- [11] 吴永红,邵长江,屈文俊,等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的非线性时变方程[J]. 同济学报:自然科学, 2011,39(1):53-56.
WU Y H, SHAO CH J, QU W J, *et al.*. Nonlinear time-dependent equation of light-force transition of fiber-optic grating strain sensors[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(1):53-56. (in Chinese)
- [12] 周建华. 光纤光栅传感器应变传递特性分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
ZHOU J H. *Strain Transfer Characteristic of Fiber Bragg Grating Sensors*[D]. Wu Han: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] 吴永红,屈文俊,邵长江,等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. 光学学报,2009,29(8):2067-2070.
WU Y H, QU W J, SHAO CH J, *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8):2067-2070. (in Chinese)

作者简介:



吴入军(1979—),男,山东德州人,博士研究生,2007年于同济大学获得硕士学位,主要从事工程力学、光纤光栅传感技术的研究。E-mail: wurujunwurujun@163.com

通讯作者:



郑百林(1966—),男,山西岐山人,教授,博士生导师,1989年,1992年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,1998年于同济大学获得博士学位,2000年为悉尼大学博士后,主要从事复合材料界面力学、工程 CAE 技术以及非均匀材料力学行为分析等领域的研究。E-mail: blzheng@tongji.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)