

文章编号 1004-924X(2014)12-3183-08

表面粘贴式光纤布拉格光栅传感器层状结构 对测量应变的影响

吴入军¹, 郑百林^{1*}, 付昆昆^{1,2}, 贺鹏飞¹, 谭跃刚³

- (1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092;
2. 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;
3. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 由于用表面粘贴式光纤布拉格光栅(FBG)传感器测量应变时会影响基体的应变分布, 本文研究了光纤应变与基体应变之间的关系。针对该类传感器建立了基体与光纤之间的应变传递函数用以修正测量应变, 然后研究了 FBG 传感器与基体之间的相互作用。最后, 利用有限元分析(FEA)和实际实验对提出的理论进行了验证。结果显示: 光纤应变的 FEA 解与理论解的误差在 5% 以内, 实验解与理论解的误差在 8% 以内, 结果表明该理论完全满足表面粘贴式 FBG 传感器的精度要求。另外, 分析了黏结层和基体对应变传递的影响, 结果显示: 平均应变传递率和应变传递率随着基体弹性模量的增加而增加, 但它们随着黏结层顶端厚度和底端厚度的增加而逐渐减小。

关键词: 光纤布拉格光栅; 光纤传感器; 层状结构; 应变传递率

中图分类号: TN253; TH823 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3183

Influence of layered structure for surface-bonded FBG sensor on measured strain

WU Ru-jun¹, ZHENG Bai-lin^{1*}, FU Kun-kun^{1,2}, HE Peng-fei¹, TAN Yue-gang³

- (1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;
 2. Harbin Institute of Marine Boiler and Turbine, Harbin 150078, China;
 3. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)
- * Corresponding author, E-mail: blzheng@tongji.edu.cn

Abstract: When a surface-bonded Fiber Bragg Grating (FBG) sensor is used to measure the strain of a host material, it will effect the strain distribution of the host material. Therefore, this paper explores the relationship between optical fiber strain and host material strain. A theoretical model of strain transfer of the host material to the optical fiber was presented to modify the measured strain, and the interaction between FBG sensor and host material was considered. Finally, the theoretical predictions proposed in this paper were verified by Finite Element Analysis(FEA) and practical experiments. The results show that the error between FEA and theoretical solution is controlled within 5%, and that

收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-06-20.

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

between theoretical solution and experimental data is controlled within 8%. These mean that the strain transfer mode satisfies the accuracy requirement of surface-bonded FBG sensors. Moreover, the effects of geometrical and material parameters on the average strain transfer rate and the strain transfer rate were analyzed. The obtained results indicate that the average strain transfer rate and the strain transfer rate increase with the Young's modulus of the host material. However, they decrease with increasing the top thickness and bottom thickness of an adhesive layer.

Key words: fiber Bragg grating; optical fiber sensor; layered structure; strain transfer rate

1 引言

相对于传统传感器, 光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器具有质量轻、结构小、灵敏度高以及抗电磁干扰等众多优势, 因此近年来在航空航天、医药、建筑等众多领域具有非常广泛的应用^[1]。Liu^[2]等使用聚合物封装的 FBG 传感器实现了压力和温度的同时测量。Lau^[3]等设计了一个简单实验计算了埋入式 FBG 传感器的应变传递率。在 FBG 传感器实际使用中, 表面粘贴式和埋入式是两种主要方式。但无论哪一种方式, 光纤和基体之间都存在保护层、黏结层等中间结构, 所以光纤应变并不等于基体应变。此外, FBG 传感器的存在改变了基体应变的分布状态, 因此研究光纤应变与基体应变之间的传递关系具有重要的意义^[4]。

目前, 关于 FBG 传感器应变传递问题的研究有很多。Ansari^[5]等假定光纤与基体中点处的应变相等, 得到了光纤的轴向应变分布方程。李东升等^[6-8]在 Ansari 研究的基础上, 抛弃光纤中点与基体中点应变相等的假设, 得到了更为准确的光纤轴向应变方程。周智等^[9]基于材料的线黏弹性, 得到了光纤轴向应变随时间的变化关系, 并进一步得到了光纤应变的误差修正方程。Her 和 Huang^[10]推导出表面粘贴式 FBG 传感器的应变传递方程, 并且研究了保护层与基体之间的相互作用。Wan 等^[11]建立了一个三维有限元模型去模拟表面粘贴式 FBG 传感器的应变传递状态, 并验证了应变传递方程的正确性。邱野等^[12-13]基于基体承受的均匀轴向应力, 得出了表面粘贴式 FBG 传感器的应变传递方程。吴入军等^[14]提出了多项式形式的剪应力分布, 得出了埋入式 FBG 传感器的应变传递方程, 并利用有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 和实验进行了验证。

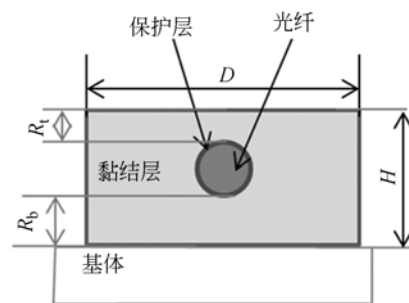
吴俊等人^[15]详细研究了黏结层对应变传递函数的影响。郭伟等^[16]在假定基体应变恒定的前提下建立了粘贴式 FBG 传感器的应变传递方程。吴永红等^[17]基于材料的弹塑性行为, 建立了埋入式 FBG 传感器的非线性应变传递方程。

现有的大部分文献都是假定基体承受均匀的轴向应变/应力, 即假设基体的弹性模量是非常大的, 忽略了传感器对基体应变的影响。然而, 当基体弹性模量很小时, FBG 传感器的存在就会影响基体的应变分布。因此在基体弹性模量较小时, 基于这个假设得出的应变传递函数就会产生误差。本文针对表面粘贴式 FBG 传感器提出了一种新的应变传递方程, 该方程充分考虑了基体与传感器之间的相互作用, 并利用 FEA 和实验两种方法验证该理论, 进一步分析了黏结层和基体对应变传递的影响。

2 理论推导

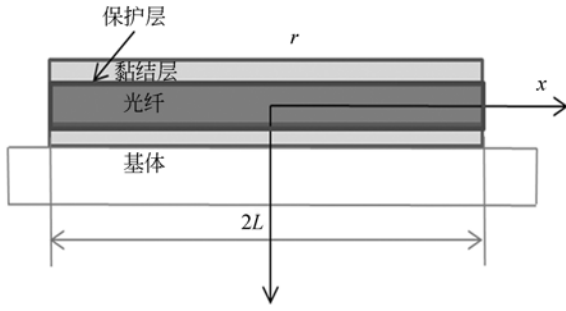
FBG 传感器的分析模型如图 1 所示, 它包括光纤、保护层、黏结层和基体。基体承受一远程应变, 该应变通过保护层、黏结层使光纤变形。本文理论的推导基于以下假设^[11-14]:

(1) 所有的材料, 包括光纤、保护层、黏结层和



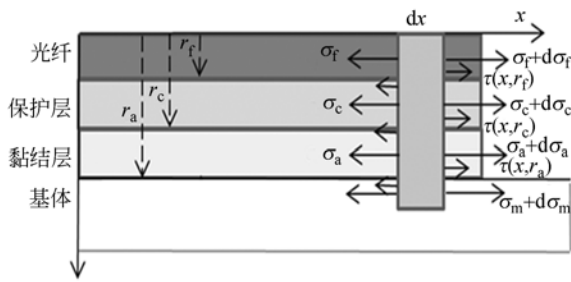
(a) 横向截面图

(a) Cross-section



(b) 纵向截面图

(b) Longitudinal cross-section



(c) 应力分布图

(c) Stress distribution

图 1 面粘贴式 FBG 传感器模型

Fig. 1 Model of surface-bonded FBG sensor

基体都属于线弹性材料。

(2)所有的界面,包括光纤与保护层之间、保护层与黏结层之间以及黏结层与基体之间的界面都是理想界面,即无相对滑移。

图中: f, c, a 和 m 分别代表光纤、保护层、黏结层和基体; E 和 G 分别为弹性模量和剪切模量; L, H 和 D 分别为半粘结长度、传感器的厚度和宽度; σ, τ, ϵ 和 γ 分别代表应力、剪应力、应变和剪切应变; R_t 和 R_b 分别为黏结层的顶端厚度和底端厚度。

光纤平衡微分方程为:

$$\pi r_f^2 \sigma_f = \pi r_f^2 (\sigma_f + d\sigma_f) + 2\pi r_f dx \tau(x, r_f), \quad (1)$$

其中: $\tau(x, r_f)$ 代表光纤与保护层间界面的剪应力。

同理,保护层和黏结层的平衡微分方程为:

$$\pi (r^2 - r_f^2) \sigma_c + 2\pi r_f dx \tau(x, r_f) =$$

$$\pi (r^2 - r_f^2) (\sigma_c + d\sigma_c) + 2\pi r dx \tau(x, r_c), \quad (2)$$

$$[D(R_t + r_c + r) - \pi r_c^2] \sigma_a + 2\pi r_c dx \tau(x, r_c) =$$

$$\tau(x, r) D dx + [D(R_t + r_c + r) - \pi r_c^2] (\sigma_a + d\sigma_a), \quad (3)$$

其中: $\tau(x, r_c)$ 代表保护层与黏结层之间界面的剪应力。

由式(1)~(3)得到:

$$\begin{cases} \tau_c(x, r) = -\frac{r_f^2}{2r} \frac{d\sigma_f}{dx} - \frac{(r^2 - r_f^2)}{2r} \frac{d\sigma_c}{dx} \\ \tau_a(x, r) = -\frac{2\pi r_c}{D} \left[\frac{r_f^2}{2r_c} \frac{d\sigma_f}{dx} + \frac{(r_c^2 - r_f^2)}{2r_c} \frac{d\sigma_c}{dx} \right] - \left[R_t + r_c + r - \frac{\pi r_c^2}{D} \right] \frac{d\sigma_a}{dx} \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $\tau_c(x, y)$ 和 $\tau_a(x, y)$ 分别代表保护层和黏结层的剪切力。

因为光纤、保护层和黏结层是同步变形,近似认为三者具有相同的应变梯度,即:

$$\frac{d\epsilon_f}{dx} \approx \frac{d\epsilon_c}{dx} \approx \frac{d\epsilon_a}{dx}. \quad (5)$$

将式(5)带入式(4)得到:

$$\begin{cases} \tau_c(x, r) = -\left[\frac{r_f^2 E_f}{2r} + \frac{(r^2 - r_f^2) E_c}{2r} \right] \frac{d\epsilon_f}{dx} \\ \tau_a(x, r) = -\left[\left(\frac{\pi r_f^2 E_f}{D} + \frac{\pi (r_c^2 - r_f^2) E_c}{D} \right) + \left[R_t + r_c + r - \frac{\pi r_c^2}{D} \right] E_a \right] \frac{d\epsilon_f}{dx} \end{cases}. \quad (6)$$

r 方向变形是微小的相对于 x 方向的变形,因此存在以下关系:

$$\tau(x, r) = G\gamma(x, r) = G\left(\frac{du}{dr} + \frac{dv}{dx}\right) \approx G \frac{du}{dr}, \quad (7)$$

其中: $u = u(x), v = v(x)$ 分别代表 x 和 r 向位移。

将式(7)带入式(6),并积分得到:

$$\int_{r_f}^{r_a} \left(\frac{du}{dr} \right) dr = \int_{r_f}^{r_c} \frac{\tau_c(x, r)}{G_c} dr + \int_{r_c}^{r_a} \frac{\tau_a(x, r)}{G_a} dr. \quad (8)$$

式(8)的积分结果为:

$$u_m(x) - u_f(x) = -\frac{1}{k^2} \frac{d\epsilon_f(x)}{dx}, \quad (9)$$

其中:

$$k^2 = \frac{1}{\frac{2r_1^2(\ln r_c - \ln r_1)(E_t - E_c) + (r_c^2 - r_1^2)E_c}{4G_t} + \frac{\pi(r_a - r_c)[r_1^2(E_t - E_c) + r_c^2 E_c] + E_a \{ [DXR + r_c] - \pi r_c^2 (r_a - r_1) + (r_a^2 - r_c^2)D/2 \}}{DG_a}}$$

式(9)对 x 求导得到:

$$\epsilon_m(x, r_a) = \epsilon_f(x) - \frac{1}{k^2} \frac{d^2 \epsilon_f(x)}{dx^2}, \quad (10)$$

其中: $\epsilon_f(x)$ 和 $\epsilon_m(x, r_a)$ 分别为光纤和基体的应变。微分方程(10)的解为:

$$\begin{aligned} \epsilon_f(x) &= c_1 e^{kx} + c_2 e^{-kx} + \\ &\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k^2}{k^2 + \lambda^2} \epsilon_m(\lambda, r_a) \cos \lambda x d\lambda, \\ &-L \leq x \leq L, \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$\epsilon_m(\lambda, r_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon_m(x, r_a) \cos \lambda x dx, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_f(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k^2}{k^2 + \lambda^2} \epsilon_m(\lambda, r_a) \cos \lambda x d\lambda - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k^2}{k^2 + \lambda^2} \epsilon_m(\lambda, r_a) \cos \lambda L d\lambda \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \cong \\ &\epsilon_m(0, r_a) \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right], \quad -L \leq x \leq L. \end{aligned} \quad (15)$$

黏结层与基体之间界面的剪切力表达式为:

$$\begin{aligned} \tau(x, r_a) &= - \left[\left(\frac{\pi r_1^2 E_t}{D} + \frac{\pi(r_c^2 - r_1^2) E_c}{D} \right) + \right. \\ &\left. \left(R_t + r_c + r_a - \frac{\pi r_c^2}{D} \right) E_a \right] \frac{d\epsilon_f(x)}{dx} = \\ &\frac{E_{eq} k \epsilon_m(0, r_a) \sinh(kx)}{\cosh(kL)}, \\ &-L \leq x \leq L, \end{aligned} \quad (16)$$

其中: E_{eq} 代表 FBG 传感器的等效剪切模量, 其表达式为:

$$E_{eq} = \left(\frac{\pi r_1^2 E_t}{D} + \frac{\pi(r_c^2 - r_1^2) E_c}{D} \right) + \left(R_t + r_c + r_a - \frac{\pi r_c^2}{D} \right) E_a.$$

因为基体尺寸要远大于 FBG 传感器的尺寸, 因此将基体看作半无限体, 存在以下方程^[18]:

$$\begin{aligned} \epsilon_m(0, r_a) &= \epsilon_\infty - \frac{E_{eq} k (1 + \mu) \epsilon_m(0, r_a)}{2\pi E_m \cosh(kL)} \int_{-D/2}^{D/2} \int_{-L}^L \sinh(kx) \cdot \\ &\left\{ \frac{(2 - 6\mu)x}{(x^2 + y^2)^{1.5}} + \frac{6\mu x^3}{(x^2 + y^2)^{2.5}} \right\} dx dy, \end{aligned} \quad (17)$$

其中: ϵ_∞ 代表基体的远程应变。令:

$$\beta = \int_{-D/2}^{D/2} \int_{-L}^L \sinh(kx) \left\{ \frac{(2 - 6\mu)x}{(x^2 + y^2)^{1.5}} + \frac{6\mu x^3}{(x^2 + y^2)^{2.5}} \right\} dx dy,$$

$\epsilon_m(\lambda, r_a)$ 是基体应变 $\epsilon_m(x, r_a)$ 的傅里叶余弦变换, λ 代表频域变量^[18]。

因为光纤两端为自由表面, 因此存在以下关系^[12-14]:

$$\epsilon_f(L) = \epsilon_f(-L) = 0. \quad (13)$$

求得参数 c_1 和 c_2 为:

$$c_1 = c_2 = - \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k^2}{k^2 + \lambda^2} \epsilon_m(\lambda, r_a) \cos \lambda L d\lambda}{2 \cosh(kL)}, \quad (14)$$

将式(14)带入式(11)中, 得到光纤应变与基体应变之间的关系为:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{E_{eq} k (1 + \mu) \beta}{2\pi E_m \cosh(kL)}}.$$

式(17)进一步简化为:

$$\epsilon_m(0, r_a) = \alpha \epsilon_\infty. \quad (18)$$

将式(18)带入式(15)得到光纤应变的表达式:

$$\epsilon_f(x) = \alpha \epsilon_\infty \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]. \quad (19)$$

应变传递率 $\eta(x)$ 为:

$$\eta(x) = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_\infty} = \alpha \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]. \quad (20)$$

平均应变传递率为:

$$\bar{\eta} = \frac{\int_{-L}^L \epsilon_f(x) dx}{2L \epsilon_\infty} = \alpha \left[1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)} \right]. \quad (21)$$

3 理论验证和参数分析

3.1 有限元验证

本文利用商业软件 Ansys Workbench 进行 FEA 计算, 并与式(20)的计算结果进行对比, 以验证本文理论的正确性。FEA 的计算参数如表 1

所示,其他参数为: $r_f = 0.0625\text{ mm}$, $r_a = 0.3525\text{ mm}$, $L = 25\text{ mm}$, $r_c = 0.1025\text{ mm}$, $R_l = 0.2\text{ mm}$, $R_b = 0.25\text{ mm}$, $h_m = 1\text{ mm}$, $D_a = 2\text{ mm}$, 其中 h_m 为基体厚度。因为 FBG 传感器为对称结构,因此取其 1/4 进行分析,网格模型如图 2 所示。

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

| 参数 | 光纤 | 保护层 | 黏结层 | 基体 |
|----------|-------------------|------|-------|-------|
| 弹性模量/MPa | 7.2×10^4 | 2.55 | 4 000 | 2 000 |
| 泊松比 | 0.17 | 0.48 | 0.34 | 0.3 |

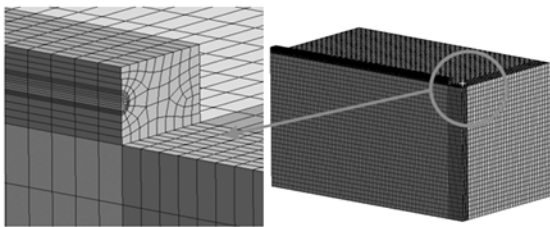


图 2 FBG 传感器的有限元模型

Fig. 2 Finite element meshes of FBG sensor

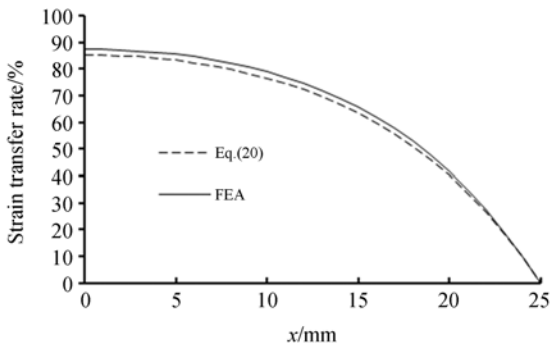


图 3 理论分析结果与 FEA 计算结果的比较

Fig. 3 Comparison between FEA and theoretical solution

从图 3 可以看出:理论分析结果和 FEA 分析结果具有良好的一致性,且两者的误差只有 5%。最大应变传递率产生在中间区域,两端最小为 0,因此为了获得比较大的应变传递率,将 FBG 位于中间区域,且保证在 FBG 两端留有一定的黏结余量。由于本文理论模型的建立是基于上述的两个假设,且 FEA 计算结果本身就是近似解,因此会产生误差。

3.2 实验验证

FBG 传感器的应变测量值是光纤轴向应变的平均值。在本节利用参考文献[11]中的实验数据来验证式(21)的正确性。从图 4 可以看出,理论值和实验值基本一致,两者之间的误差在 8% 左右,具体的实验值、理论值及两者的误差如表 2 所示。产生误差的主要原因是:(1)该理论模型的建立提出了一些假设;(2)在实验测试过程中,存在制作误差和设计误差。具体实验参数及细节请参考文献[11]。

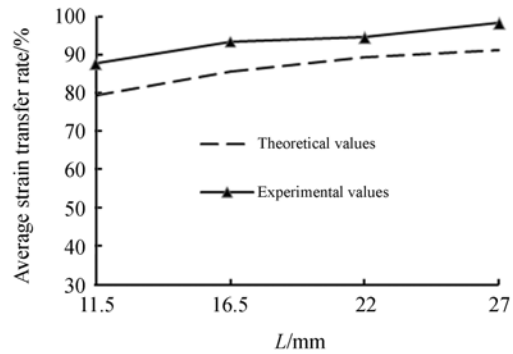


图 4 实验值与理论值的比较

Fig. 4 Comparison between experimental values and theoretical solution

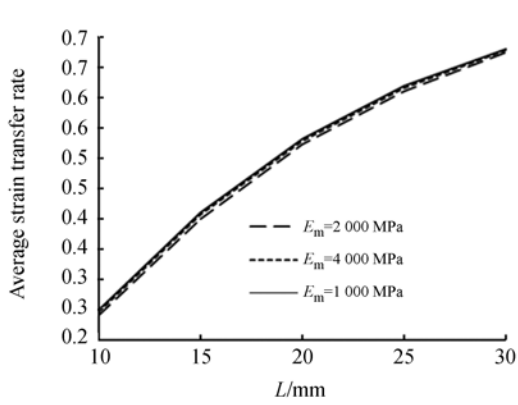
表 2 实验值与理论值的比较

Tab. 2 Comparison between experimental data and theoretical solution

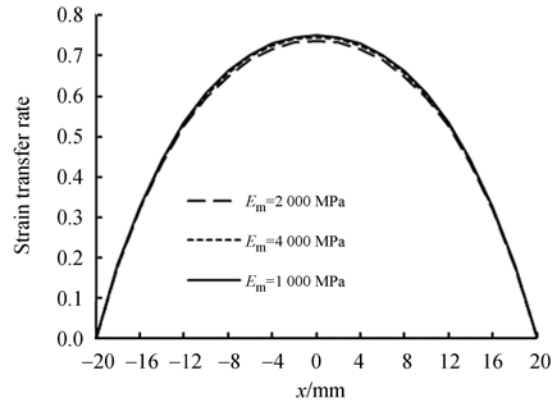
| 黏结长度/mm | 计算值 | 实验值 | 误差/% |
|---------|-------|-------|------|
| 23 | 0.796 | 0.877 | 9.3 |
| 33 | 0.858 | 0.935 | 8.2 |
| 44 | 0.893 | 0.947 | 5.6 |
| 54 | 0.913 | 0.983 | 7.1 |

3.3 参数分析

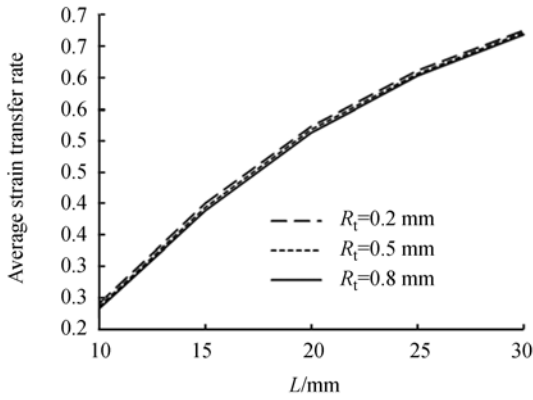
利用式(20)和式(21)分析应变传递率和平均应变传递率,研究基体和黏结层的几何、材料参数对应变传递的影响,使用参数如表 1 所示。由图 5(a)和 5(b)可以看出,平均应变传递率和应变传递率随基体弹性模量的增大而增大,不同基体弹性模量对应变传递的影响是不同的,因此部分现有文献中基于基体为均匀应变状态而建立的应变传递函数会造成一定的误差,特别是基体弹性模量较小的情况。图 5(c)和 5(d)显示:随着黏结层顶端厚度变厚,平均应变传递率和应变传递率都



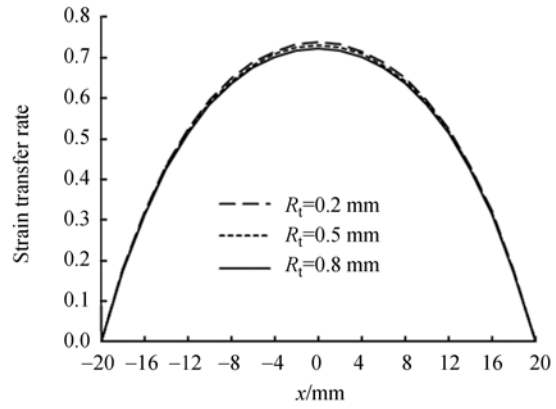
(a) 基体弹性模量对平均应变传递率的影响
(a) Effect of Young's modulus of host material on average strain transfer rate



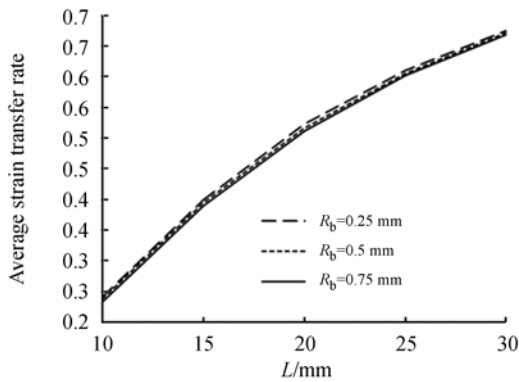
(b) 基体弹性模量对应变传递率的影响
(b) Effect of Young's modulus of host material on strain transfer rate



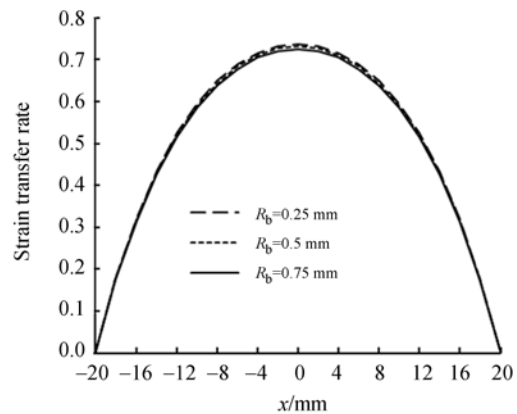
(c) 黏结层顶端厚度对平均应变传递率的影响
(c) Effect of top thickness of adhesive layer on average strain transfer rate



(d) 黏结层顶端厚度对应变传递率的影响
(d) Effect of top thickness of adhesive layer on strain transfer rate



(e) 黏结层底端厚度对平均应变传递率的影响
(e) Effect of bottom thickness of adhesive layer on average strain transfer rate



(f) 黏结层底端厚度对应变传递率的影响
(f) Effect of bottom thickness of adhesive layer on strain transfer rate

图 5 FBG 传感器参数对应变传递的影响

Fig. 5 Effect of parameters of FBG sensor on strain transfer

逐渐变小。这是因为随着顶端厚度的增大,基体与黏结层之间的剪切力逐渐变大,减小了基体的应变。图 5(e)和 5(f)显示:随着黏结层底端厚度的增加,平均应变传递率和应变传递率逐渐变小,这主要是因为黏结层底端厚度的增加,不但增加了黏结层与基体之间的剪切力,还增加了基体与光纤之间的应变衰减。所以减小黏结层底端厚度有助于提高应变传递,但是黏结层厚度过薄会导致 FBG 传感器的脱落,因此在实际使用过程中,需要选择合适的厚度。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] LIU Y Q, GUO Z Y, ZHANG Y, *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36: 564-566.
- [3] LAU K T, YUAN L B, ZHOU L M, *et al.*. Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors[J]. *Composite Structures*, 2001, 51: 9-20.
- [4] CHENG C, LO Y, LI W. Accurate simulations of reflective wavelength spectrum of surface bonded fiber Bragg grating[J]. *Applied Optics*, 2010, 49: 3394-3402.
- [5] ANSARI F, LIBO Y. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124: 385-394.
- [6] ZHOU Z, LI J L, OU J P. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 5384: 190-198.
- [7] LI D S, LI H N. Strain transferring of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 5765: 1085-1093.
- [8] LI D S, LI H N, REN L, *et al.*. Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45: 024402.
- [9] LI J L, ZHOU Z, OU J P. Interface transferring mechanism and error modification of embedded FBG strain sensor based on creep part[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 5765: 1061-1072.
- [10] HER S C, HUANG C Y. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11: 6926-6941.
- [11] WAN K T, LEUNG C K Y, OLSON N G. Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17: 035037.
- [12] WANG Q B, QIU Y, ZHAO H T, *et al.*. Analysis of strain transfer of six-layer surface-bonded fiber Bragg gratings[J]. *Applied Optics*, 2012, 51: 4129-4138.
- [13] ZHAO H T, WANG Q B, QIU Y, *et al.*. Strain transfer of surface bonded fiber Bragg grating sensors for airship envelope structural health monitoring[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2012, 13: 538-545.
- [14] 吴入军, 郑百林, 贺鹏飞, 等. 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[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 24-30.
WU R J, ZHENG B L, HE P F, *et al.*. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-op-

4 结 论

本文针对表面粘贴式 FBG 传感器提出了一种新的应变传递理论模型。该模型考虑了基体与 FBG 传感器之间的相互作用, 并利用 FEA 和实验进行验证, 对不同参数的影响进行了分析。实验结果表明: 光纤应变的 FEA 解与理论解的分布基本一致, 两者误差在 5% 以内, 实验值与理论解之间的误差在 8% 左右。平均应变传递率和应变传递率随着基体弹性模量的增加而增加, 但它们随黏结层的顶端厚度和底端厚度的增加而逐渐减小。

- tic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):24-30. (in Chinese)
- [15] 吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 粘接层弹性模量对光纤 Bragg 光栅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)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1986.
- WU J L. *Theory of Elastic Mechanics*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1986. (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,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,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的研究。

(版权所有 未经许可 不得转载)