

引用格式: WU Ru-jun, ZHANG Xiao-feng, ZHENG Bai-lin, *et al.* Two-way Coupled Analysis of Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0806005

吴入军, 张晓峰, 郑百林, 等. 光纤布拉格光栅传感器应变传递双向耦合分析[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0806005

光纤布拉格光栅传感器应变传递双向耦合分析

吴入军¹, 张晓峰¹, 郑百林², 陈田¹

(1 上海电机学院 机械学院, 上海 201318)

(2 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘 要: 粘贴于受弯基体表面的光纤布拉格光栅传感器测量应变与基体真实应变之间存在误差, 因此研究光纤布拉格光栅传感器的变形机理、分析测量应变与真实应变之间的关系是目前的研究热点. 首先研究光纤布拉格光栅传感器与基体之间的相互作用机理, 然后, 利用有限元解、实验值和理论解进行对比验证, 并分析产生误差的原因. 最后, 通过参数分析研究弹性模量、厚度、粘结长度等参数对光纤布拉格光栅传感器测量效果的影响. 结果表明有限元解、实验值和理论解具有相同的变化趋势, 有限元解与理论解的误差在 2% 以内, 测量值与理论解的误差在 7% 以内. 平均应变传递率随着基体弹性模量的增大、粘结长度的增长而逐渐增大, 随粘结层弹性模量的减小、粘结层厚度的增大而逐渐减小. 该理论对应用于受弯基体应变测量的光纤布拉格光栅传感器的设计具有一定的指导意义.

关键词: 光学工程; 应变测量; 力学分析; 光纤布拉格光栅传感器

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204908.0806005

Two-way Coupled Analysis of Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor

WU Ru-jun¹, ZHANG Xiao-feng¹, ZHENG Bai-lin², CHEN Tian¹

(1 School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201318, China)

(2 School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: There is an error between the measured strain of the fiber Bragg grating sensor bonded on the surface of bending host material and the real strain of the host material. As a result, the issues of the deformation mechanism and the relationship between measured strain and real strain of the fiber Bragg grating sensor received considerable critical attention. First of all, the interaction mechanism between the fiber Bragg grating sensor and the host material was studied. Then, finite element solution, experimental value and theoretical solution were used for comparison and verification. Also, the causes of the errors were analyzed. Finally, the influence of the parameters (e.g., Young's modulus, thickness, bonding length) on the measurement effect of fiber Bragg grating sensor was studied. The results reveal that finite element solution, experimental value and theoretical solution exhibit the same variation trend. The error between finite element solution and theoretical solution is controlled within 2%, while the error between experimental value and theoretical solution is controlled within 7%. The average strain transfer rate increase with an increase of both the Young's modulus of the host material and the bonding length. Opposite conclusion held for the decreasing elastic modulus of the adhesive and increasing thickness of the adhesive. This theory has a certain guiding significance for the design of fiber Bragg grating sensors used for the strain

基金项目: 国家高技术发展计划(No.2012AA040106), 上海市高峰高原学科项目(No. A1-5701-18-007-03), 上海市自然科学基金(No.15ZR1417200)

第一作者: 吴入军(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为固体力学和光纤光栅传感技术. Email:wurujunwurujun@163.com

收稿日期: 2020-03-18; 录用日期: 2020-06-05

<http://www.photon.ac.cn>

measurement of the bending host material.

Key words: Optical engineering; Strain measurement; Mechanical analysis; Fiber Bragg grating sensor

OCIS Codes: 060.2370; 060.2300; 060.2280; 060.3735; 060.3738

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器作为一种新型的传感技术主要通过波长的变化来测量外界应变,由于FBG传感器体积小、抗电磁干扰、精度高等优点,逐渐在航空航天、土木工程、电力、石油等行业得到了广泛应用^[1-4].FBG传感器主要通过表面粘贴或内部埋入两种方式安装在被测结构上,由于FBG传感器改变了被测结构的局部结构,导致被测结构局部刚度的改变,同时,FBG传感器与被测结构之间存在保护层和粘结层等结构,导致测量应变与实际应变有一定的误差,为了更好地设计和使用FBG传感器以便于提高应变测量精度,需研究FBG传感器应变测量力学机理,探索实际应变与测量应变之间的表征关系.

针对该问题,诸多学者进行了相关研究,张业兵等^[5]分析了FBG传感器同时测量温度和应变的耦合机理和非线性误差.ANSARI F等^[6]利用FBG传感器各层结构中点处应变相等的假设,建立了基体应变与测量应变之间的关系,并进行了实验验证;LI Dong-sheng等^[7]利用各层应变梯度相等的假设,对ANSARI F提出的应变传递理论进行了修正,得到更加精确的真实应变与测量应变之间的关系表达式;ZHOU J等^[8]利用有限元软件Ansys和实验两种方法验证并对比了ANSARI F和LI Dong-sheng提出的埋入式FBG传感器应变传递理论,证实LI Dong-sheng提出的理论具有更高的精度;WU Ru-jun等^[9-10]针对毛细钢管封装的FBG传感器,建立了真实应变与测量应变的关系,针对FBG传感器粘贴在半无限大体的情况,利用半无限体弹性力学理论推导出测量应变与基体应变的关系表达式.吴永红等^[11]基于FBG传感器的粘弹性力学行为,建立了FBG传感器光-力转换方程.WAN K T等^[12]论述了现有的应变传递理论,通过有限元和实验分析了粘结长度、宽度、厚度等参数对应变传递效果的影响.HER S C等^[13]分析了FBG传感器保护层对测量效果的影响,并通过三点力学实验进行了验证分析.权志桥等^[14]研究了均匀拉伸的被测物体应变传递机理,并利用实验分析了粘结层厚度和宽度对测量结果的影响.

现有FBG传感器应变传递理论的建立大多都是基于被测基体承受均匀拉压应变,因此现有的FBG传感器应变传递理论仅适用于均匀拉压的被测基体,并不适合受弯基体的应变测量.粘贴于受弯基体表面的FBG传感器的测量应变既包括拉压应变还包括弯曲应变,同时FBG传感器的变形会导致受弯基体应变状态重新分布,因此,受弯基体应变测量问题属于双向耦合范畴,针对受弯基体的应变测量,利用材料力学和弹性力学理论,研究FBG传感器与受弯基体双向耦合机理,分析测量应变与真实应变之间的关系,为FBG传感器的设计与应用提供理论基础.

1 理论推导

图1为FBG传感器应变测量模型示意图,该模型由光纤、保护层、粘结层和基体组成,基体承受弯矩 $M(x)$,在弯矩 $M(x)$ 的作用,各层结构将产生弯曲.下标f、p、a和m分别代表光纤、保护层、粘结层和基体; $2L$ 为粘结长度, L 为半粘结长度, h 为基体中性层与基体被测表面之间的距离, σ 、 ϵ 、 τ 和 γ 代表正应力、正应变、剪应力和剪应变, I 为惯性矩, E 为弹性模量.假设 ϵ_0 为基体被测表面的真实弯曲正应变,那么基体被测表面的弯曲正应变为^[15]

$$\epsilon_0 = M(x)h/E_m I_m \quad (1)$$

在FBG传感器应变传递理论的建立过程中,假设:1)光纤、保护层、粘结层和基体都是线弹性材料;2)所有的界面无相对滑移;3)忽略热膨胀的影响;4)忽略泊松比引起的收缩.

FBG传感器的测量应变由拉压应变和弯曲应变组成,在光纤、保护层、粘结层和基体之间主要作用有剪应力和 r 方向正应力,在剪应力作用下各层结构将产生拉压变形,使FBG传感器产生拉压应变, r 方向正应力将产生导致各层结构发生弯曲的层间弯矩,从而使FBG传感器产生弯曲应变.

假定光纤与保护层之间的层间弯矩为 $M_1(x)$ 、保护层与粘结层之间的层间弯矩为 $M_2(x)$ 、粘结层与基

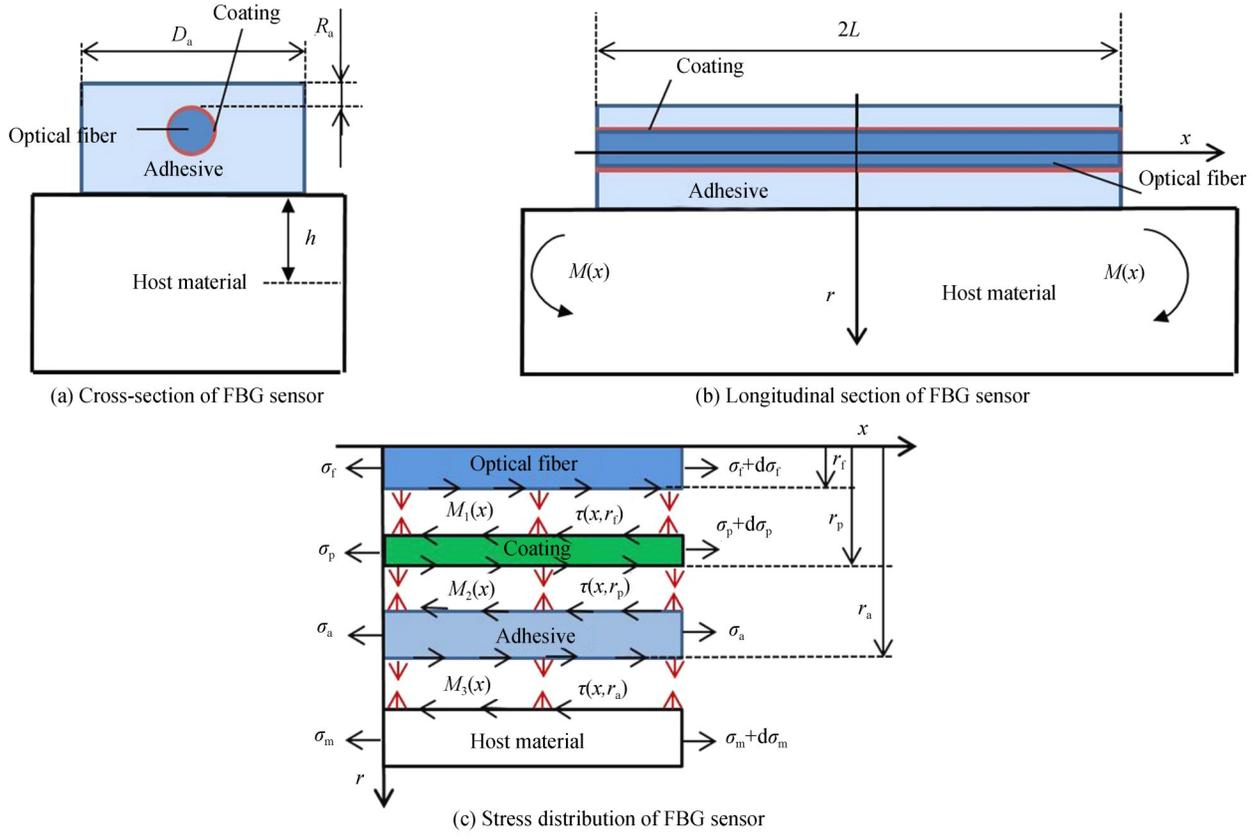


图1 FBG传感器模型

Fig.1 Modal of the FBG sensor

体之间的层间弯矩为 $M_3(x)$. 由于光纤、保护层、粘结层和基体的中性层曲率是近似相等的, 因此存在关系式^[15]

$$\rho = \frac{E_f I_f}{M_1(x)} = \frac{E_p I_p}{M_2(x) - M_1(x)} = \frac{E_a I_a}{M_3(x) - M_2(x)} = \frac{E_m I_m}{M(x) - M_3(x)} \quad (2)$$

式中, ρ 为中性层曲率半径.

求解式(2), 得到

$$\begin{cases} M_1(x) = \frac{E_f I_f M(x)}{E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f} \\ M_2(x) = \frac{(E_p I_p + E_f I_f) M(x)}{E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f} \\ M_3(x) = \frac{(E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f) M(x)}{E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f} \end{cases} \quad (3)$$

求得中性层曲率半径为

$$\rho = \frac{M(x)}{E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f} \quad (4)$$

由于弯曲而造成的测量应变绝对误差为

$$\Delta \epsilon = \frac{M(x) r_a}{E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f} \quad (5)$$

由弯曲造成的FBG应变传递率为

$$\eta_1 = 1 + \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \frac{E_m I_m r_a}{(E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f) h} \quad (6)$$

根据各层结构 x 方向正应力和剪应力之间的平衡关系, 分别对光纤、保护层和粘结层建立微分方程

$$\pi r_f^2 \sigma_f = \pi r_f^2 (\sigma_f + d\sigma_f) + 2\pi r_f \tau(x, r_f) dx \quad (7)$$

$$\pi(r^2 - r_f^2) \sigma_p + 2\pi r_f \tau(x, r_f) dx = \pi(r^2 - r_f^2) (\sigma_p + d\sigma_p) + 2\pi r \tau(x, r) dx \quad (8)$$

$$[D_a(R_a + r_p + r) - \pi r_p^2] \sigma_a + 2\pi r_p \tau(x, r_p) dx = \tau(x, r) D_a dx + [D_a(R_a + r_p + r) - \pi r_p^2] (\sigma_a + d\sigma_a) \quad (9)$$

假定FBG传感器各层应变梯度近似相等,则存在^[6-8]

$$\frac{d\epsilon_f}{dx} \cong \frac{d\epsilon_p}{dx} \cong \frac{d\epsilon_a}{dx} \quad (10)$$

整理式(7)~(10)可以得到保护层和粘结层的剪应力分布

$$\begin{cases} \tau_p(x, r) = - \left[\frac{r_f^2 E_f}{2r} + \frac{(r^2 - r_f^2) E_p}{2r} \right] \frac{d\epsilon_f}{dx} \\ \tau_a(x, r) = - \frac{1}{D_a} \left\{ \pi [r_f^2 (E_f - E_p) + r_p^2 E_p] + E_a [D_a (R_a + r_p + r) - \pi r_p^2] \right\} \frac{d\epsilon_f}{dx} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\tau_p(x, r)$ 和 $\tau_a(x, r)$ 为保护层和粘结层的剪应力.

由于 x 向是主要变形方向^[7,12-14], 根据虎克定理, 存在

$$\gamma = \frac{du}{dr} + \frac{dv}{dx} \cong \frac{du}{dr} \quad (12)$$

式中, u, v 分别为 x, r 方向变形.

对虎克公式(12)进行积分, 得到

$$\int_{r_f}^{r_a} \left(\frac{du}{dr} \right) dr = \int_{r_f}^{r_p} \frac{\tau_p(x, r)}{G_p} dr + \int_{r_p}^{r_a} \frac{\tau_a(x, r)}{G_a} dr \quad (13)$$

求解式(13)得到

$$u_m(x, r_a) - u_f(x) = - \frac{1}{k^2} \frac{d\epsilon_f(x)}{dx} \quad (14)$$

式中, $u_m(x, r_a), u_f(x)$ 为在剪应力作用下基体和光纤的 x 方向位移, k 的值为

$$\frac{1}{k^2} = \frac{2r_f^2 (\ln r_p - \ln r_f) (E_f - E_p) + (r_p^2 - r_f^2) E_p}{4G_p} + \frac{\pi(r_a - r_p) [r_f^2 (r_a - r_p) + r_p^2 E_p] + E_a \{ [D_a (R_a + r_p) - \pi r_p^2] (r_a - r_p) + (r_a^2 - r_p^2) D_a / 2 \}}{D_a G_a} \quad (15)$$

将式(14)对 x 求导, 得到

$$\epsilon_m(x, r_a) = \epsilon_f(x) - \frac{1}{k^2} \frac{d^2 \epsilon_f(x)}{dx^2} \quad (16)$$

式中, $\epsilon_f(x), \epsilon_m(x, r_a)$ 分别为剪应力作用下光纤应变和基体应变.

据式(11)得到粘结层与基体之间的界面剪应力

$$\tau(x, r_a) = - E_{eq} \frac{d\epsilon_f}{dx} \quad (17)$$

式中, E_{eq} 为FBG传感器的等效模量, 即

$$E_{eq} = \frac{1}{D_a} \left\{ \pi [r_f^2 (E_f - E_p) + r_p^2 E_p] + E_a [D_a (R_a + r_p + r_a) - \pi r_p^2] \right\} \quad (18)$$

由于基体的尺寸远大于FBG传感器的尺寸, 将基体看为半平面体, 在粘结层与基体之间的界面剪应力作用下, 基体被测表面的应变为^[16-17]

$$\epsilon_m = \frac{M(x)h}{E_m I_m} - \frac{2}{\pi E_m} \int_{-L}^L \frac{\tau(\zeta, r_m) d\zeta}{x - \zeta} \quad (19)$$

将式(19)代入式(16)中, 得到剪应力作用下的FBG传感器测量应变耦合方程

$$\frac{M(x)h}{E_m I_m} - \frac{2}{\pi E_m} \int_{-L}^L \frac{\tau(\zeta, r_m) d\zeta}{x - \zeta} = \epsilon_f(x) - \frac{1}{k^2} \frac{d^2 \epsilon_f(x)}{dx^2} \quad (20)$$

对式(20)求解非常困难, 对其进行适当简化得到^[7]

$$\epsilon_f(x) = \epsilon_m(0,0) \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right] \quad (21)$$

基体与粘结层之间的界面剪应力为

$$\tau(x,0) = - \frac{E_{eq} k \epsilon_m(0,0) \sinh(kx)}{\cosh(kL)} \quad (22)$$

利用式(20)和式(22)得到

$$\frac{M(x)h}{E_m I_m} - \frac{2E_{eq} k \epsilon_m(0,0)}{\pi E_m \cosh(kL)} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta} = \epsilon_m(0,0) \quad (23)$$

进一步得到基体坐标原点处 x 向应变为

$$\epsilon_m(0,0) = \frac{M(x)h}{E_m I_m \left[1 + \frac{2E_{eq} k}{\pi E_m \cosh(kL)} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta} \right]} \quad (24)$$

将式(24)代入式(21)中得到,在层间剪应力作用下的光纤应变表达式为

$$\epsilon_f(x) = \frac{M(x)h \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]}{E_m I_m + \frac{2E_{eq} k}{\pi \cosh(kL)} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta}} \quad (25)$$

将式(25)代入式(22)中,得到基体与粘结层之间的层间剪应力为

$$\tau(x,0) = - \frac{\epsilon_0 E_{eq} k \sinh(kx)}{\cosh(kL) + \frac{2E_{eq} k}{\pi E_m} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta}} \quad (26)$$

在剪应力作用下,FBG传感器的应变传递率为

$$\eta_2(x) = \frac{1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)}}{1 + \frac{2E_{eq} k}{\pi E_m \cosh(kL)} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta}} \quad (27)$$

根据式(6)和式(27)得到FBG传感器应变传递率为

$$\eta(x) = \eta_1(x) \eta_2(x) = \frac{\left[(E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f) h + E_m I_m r_a \right] \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]}{(E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f) h \left[1 + \frac{2E_{eq} k}{\pi E_m \cosh(kL)} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta} \right]} \quad (28)$$

FBG传感器测量应变是在粘结方向上测量应变平均值,根据式(28)得到平均应变传递率为

$$\bar{\eta} = \frac{\int_{-L}^L \eta(x) dx}{2L} = \frac{\left[(E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f) h + E_m I_m r_a \right] \left[1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)} \right]}{(E_m I_m + E_a I_a + E_p I_p + E_f I_f) h \left[1 + \frac{2}{\pi E_m} \frac{E_{eq} k}{\cosh(kL)} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta} \right]} \quad (29)$$

当基体弯曲刚度远大于FBG传感器弯曲刚度时,FBG传感器平均应变传递率简化为

$$\bar{\eta} = \frac{(h + r_a) \left[1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)} \right]}{h \left[1 + \frac{2}{\pi E_m} \frac{E_{eq} k}{\cosh(kL)} \int_{-L}^L \frac{\sinh(k\zeta) d\zeta}{\zeta} \right]} \quad (30)$$

2 理论验证

2.1 有限元验证

为验证文中理论的正确性,利用商业CAE软件Ansys对粘贴于受弯基体的FBG传感器模型进行建模并分析,粘结长度为40 mm,受弯基体尺寸为长120 mm、高25 mm、宽度5 mm,为简化计算,取模型的一半进

行分析,采用一阶六面体单元,有限元模型如图2,受弯基体材料为合金铝,其他参数见表1.

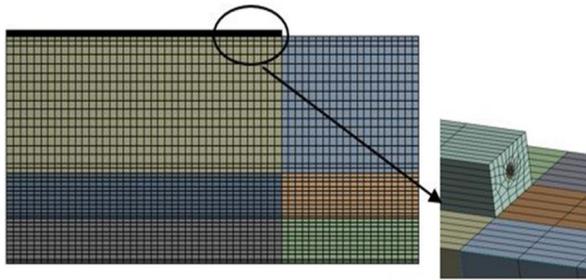


图2 FBG传感器有限元模型
Fig.2 Finite element models of FBG sensor

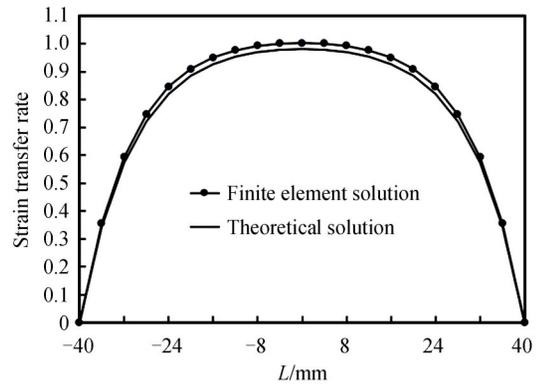


图3 应变传递率对比
Fig.3 Comparison of the strain transfer rate

表1 材料属性
Table 1 Material properties

	Optical fiber	Coating	Adhesive
Young's modulus/MPa	72 000	2.55	4 000
Thickness/mm	0.062 5	0.04	0.3
Poisson's ratio	0.17	0.48	0.3

图3是应变传递率对比图,有限元解是利用 Ansys 计算得到的计算结果,理论解是利用式(28)得到的计算结果.由图3可知:有限元解和理论解具有相同的变化趋势,并且有限元解和理论解非常接近,两者之间的误差在2%以内,有限元解稍大于理论解;在FBG传感器中间区域出现应变传递率稍大于100%的现象,这主要是因为基体受弯后,FBG传感器的曲率半径与被测区域的曲率半径不同造成的.

2.2 实验论证

为进一步验证理论的正确性,采用参考文献[12]中的实验进行理论验证和分析,文献中实验是三点支撑的铝合金梁的弯曲试验,利用FBG传感器测量铝合金梁的应变值,具体实验细节见文献[12].表2中测量值和理论值1均来自于文献[12],理论值2是根据式(29)得到的理论解,图4为平均应变传递率的测量值、理论值1理论值2的比较,由图4可知:测量值、理论值1和理论值2具有相同的变化趋势,测量值稍大于理论值,且粘结长度越长,则应变传递效果越好;去除保护层后的FBG传感器具有更好的应变传递效果.与理论值1相比,式(29)得到的理论值2与测量值之间的误差较小,保持在7%左右,其中,剥去保护层的FBG传感

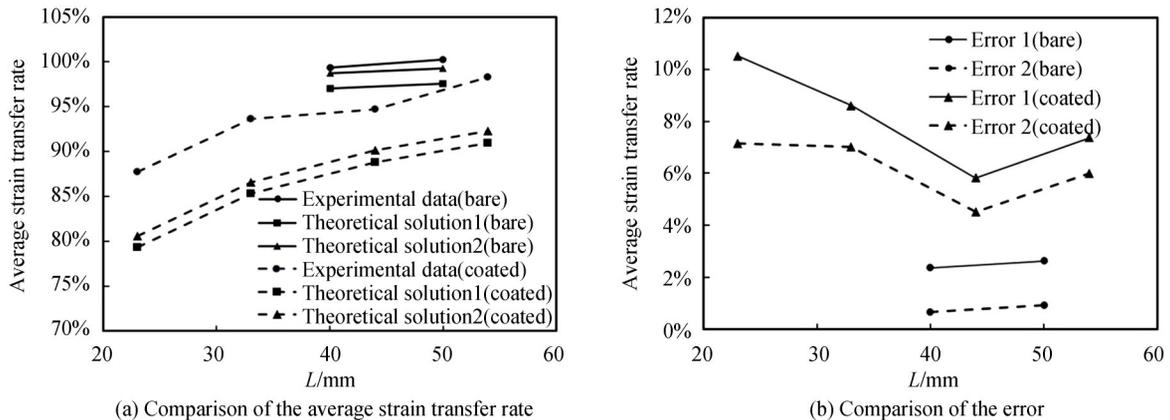


图4 测量值、理论值1和理论值2的比较
Fig.4 Comparison of experimental data, theoretical solution1 and theoretical solution2

表2 平均应变传递率数据对比
Table 2 Comparison of the average strain transfer rate

Bonding length/mm	Experimental data	Theoretical solution 1	Error 1	Theoretical solution 2	Error 2
40(bare)	99.40%	97.03%	2.38%	98.73%	0.67%
50(bare)	100.24%	97.61%	2.63%	99.32%	0.92%
23(coated)	87.71%	79.36%	10.52%	80.55%	7.16%
33(coated)	93.60%	85.30%	8.61%	86.58%	7.02%
44(coated)	94.67%	88.81%	5.83%	90.14%	4.53%
54(coated)	98.31%	90.94%	7.37%	92.30%	6.01%

器的理论值2与测量值之间的误差在1%以内,具有更高的精度,由于文中理论不仅考虑了铝合金梁的伸长,还考虑了铝合金梁的弯曲效应,因此具有更高的测量精度.

3 参数分析

利用理论公式(26)、(27)和(29),分析弹性模量、半粘结长度、厚度等参数对应变传递效果的影响,参数见表1.

图5(a)为半粘结长度为20 mm、40 mm、60 mm、80 mm和100 mm时的应变传递率的分布规律图,由图5(a)可知:半粘结长度越长则应变传递率越大,越接近真实应变,且中间区域测量效果较好,两侧测量效果较差;图5(b)为基体弹性模量为1 000 MPa、2 000 MPa、4 000 MPa和6 000 MPa时的应变传递率在粘结长度方向上的分布规律,由图5(b)可知:基体弹性模量对应变传递率的分布具有一定影响,随着基体弹性模量的增大,应变传递率逐渐增大,这主要是因为基体弹性模量越大,基体刚度越大,FBG传感器的存在对基体应变的影响减小造成的.

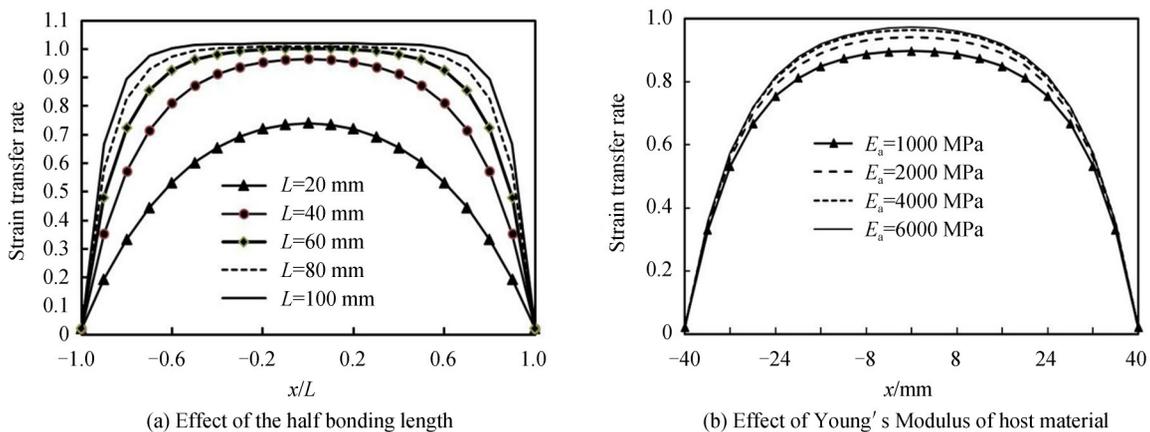


图5 应变传递率曲线图
Fig.5 Diagrams of curves of strain transfer rate

图6(a)是半粘结长度为20 mm、40 mm、60 mm、80 mm和100 mm时,平均应变传递率与基体弹性模量之间的关系曲线图,图6(b)基体弹性模量为1 000 MPa、2 000 MPa、4 000 MPa和6 000 MPa时,平均应变传递率与半粘结长度之间的关系曲线图.由图6可知:平均应变传递率与半粘结长度、基体弹性模量有较大关系,粘结长度越长、基体弹性模量越大则平均应变传递率越大,因此,当基体模量较小时,需要适当增加粘结长度以减小测量误差.

图7(a)为剥离保护层的FBG传感器平均应变传递率与基体弹性模量的关系曲线图,图7(b)为剥离保护层的FBG传感器平均应变传递率与半粘结长度的关系曲线图.图7与图6具有相似的变化规律,但同图6相比,剥离保护层之后,FBG传感器的平均应变传递率具有明显的提高,这主要是由于保护层具有较小的弹性模量,虽然可以起到保护光纤避免脆断的作用,但同时也降低了应变测量效果.

图8(a)为基体应变为 $\epsilon_0 = 0.001$ 时,半粘结长度为20 mm、40 mm、60 mm、80 mm和100 mm时,粘结层

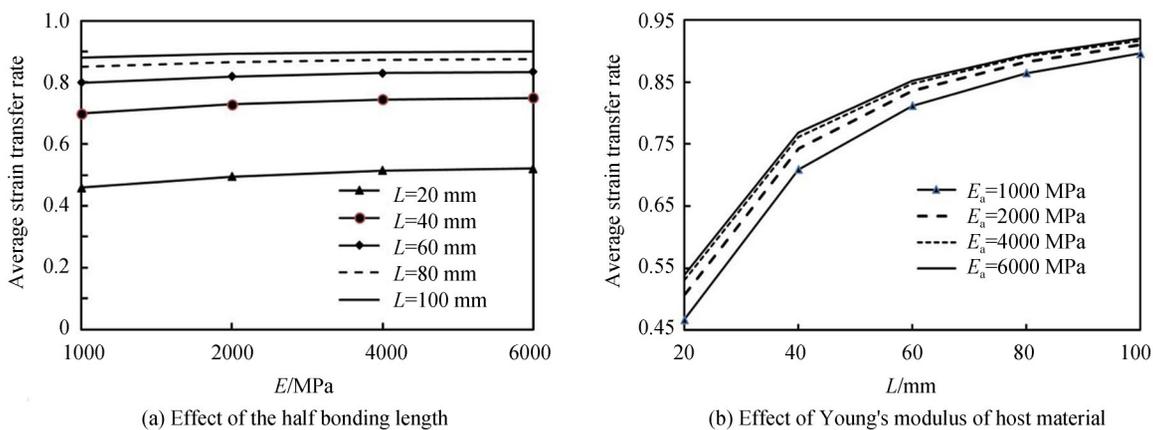


图 6 平均应变传递率曲线图
Fig.6 Diagrams of curves of average strain transfer rate

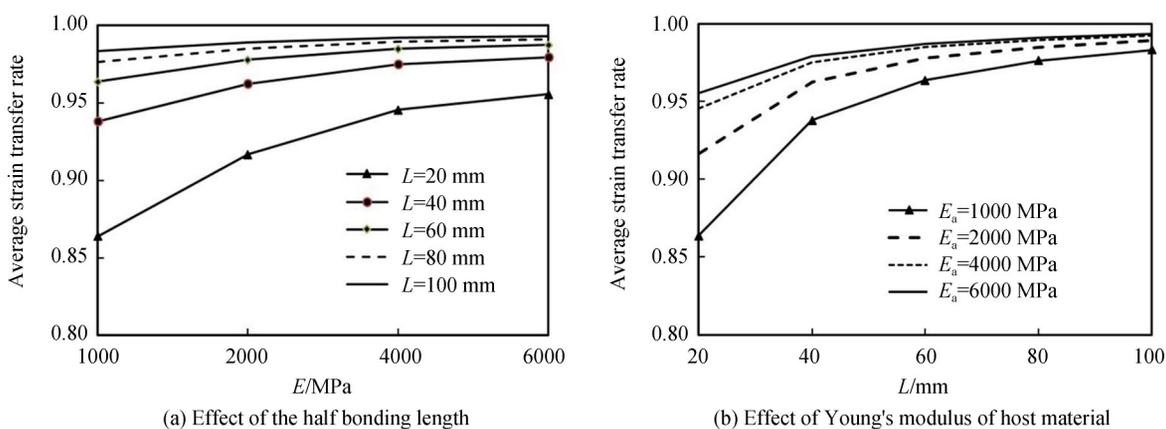


图 7 剥离保护层的FBG应变传感器平均应变传递率曲线图
Fig.7 Diagrams of curves of average strain transfer rate by coating removed FBG sensor

与基体之间的层间剪应力分布曲线,图8(b)为基体应变为 $\epsilon_0 = 0.001$ 时,基体弹性模量为1 000 MPa、2 000 MPa和4 000 MPa时的剪应力分布曲线,由图8可知:剪应力呈现中心对称分布,两端的剪应力最大,出现应力集中现象,这主要是由于两端结构突变造成的,自两端逐渐较小至中间剪应力为0;基体弹性模量越大,则剪应力越大,因此平均应变传递率越大.

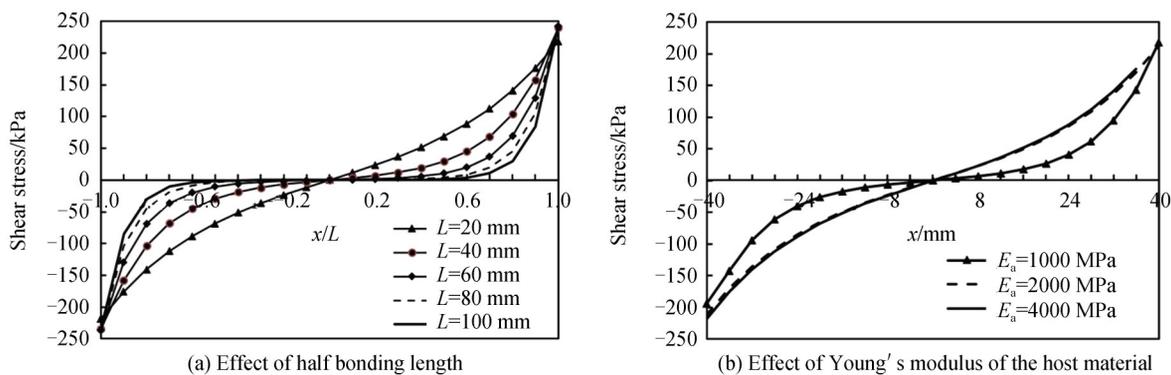


图 8 剪应力曲线图
Fig.8 Diagrams of curves of shear stress

图 9(a)为半粘结长度为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm 和 100 mm 时,粘结层弹性模量对平均应变传递率的影响,图 9(b)为半粘结长度为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm 和 100 mm 时,粘结层厚度对平均应变传递

率的影响.由图9可知:平均应变传递率随着粘结层弹性模量的增大而逐渐增大,随着粘结层厚度的增厚而逐渐减小,因此适当增大粘结层弹性模量、减小粘结层厚度有利于提高应变传递效果,提高测量精度.

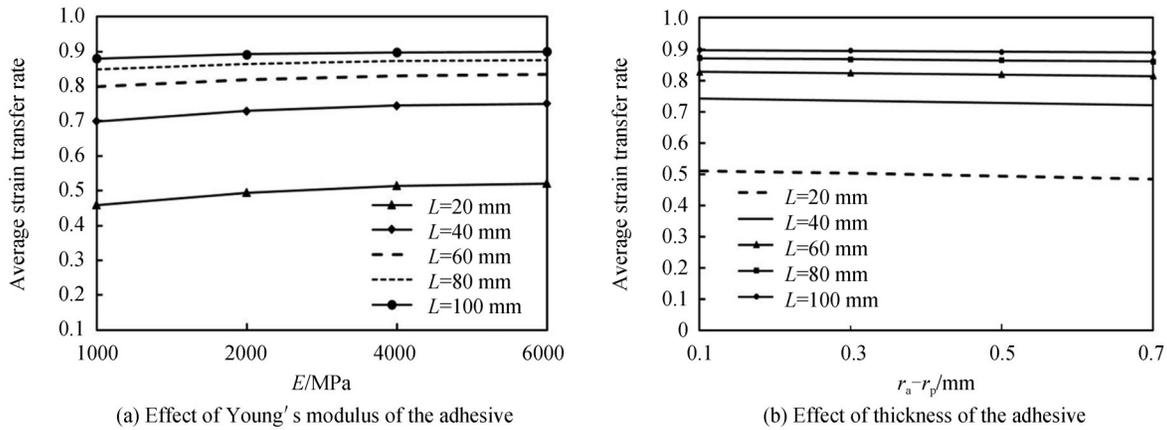


图9 粘结层对平均应变传递率的影响

Fig.9 Effect of the adhesive on average strain transfer rate

4 结论

针对粘贴于弯曲基体表面的FBG传感器,建立了FBG传感器与受弯基体双向耦合的应变传递理论,利用有限元法和实验验证了理论的正确性,并讨论了弹性模量、厚度等参数对传递效果的影响,得到以下结论:1)FBG传感器的测量应变主要由拉压应变和弯曲应变两部分组成,层间弯矩使FBG传感器产生弯曲应变,层间剪应力使FBG传感器产生拉压应变;由于光纤与受弯基体并不直接接触,同时FBG传感器的存在改变了基体的应变分布,从而造成测量应变误差.2)随着FBG传感器粘贴长度增长、受弯基体弹性模量增大、粘结层弹性模量增大、粘结层厚度变薄,则平均应变传递率逐渐增大,可有效降低测量误差,提高测量应变精度.3)FBG传感器与受弯基体之间的剪应力关于粘结中心点对称分布,两端的剪应力最大,逐渐减小到中心为0,且受弯基体弹性模量越大则剪应力越大,应变传递效果越好.由于FBG传感器两端结构突变,会导致该处应力集中,从而出现剪应力趋于无穷的现象.

参考文献

- [1] LI Shao-min, LIU Xiao-ying, LI You, *et al.* FBG sensing temperature characteristic and application in oil/gas down-hole measurement[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2009, **2**(2): 233-238.
- [2] 孙丽. 光纤光栅传感应用问题研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 2011.
- [3] GUO Tuan, LIU Bo, ZHANG Wei-gang. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology [J]. *Acat Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 828-834.
郭团, 刘波, 张伟刚. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 828-834.
- [4] TAN Zhan, LIAO Chang-rui, LIU Shen, *et al.* Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(12): 98-104.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. *光学学报*, 2018, **38**(12): 98-104.
- [5] ZHANG Ye-bing, ZHANG Yan-hui. Error analysis in FBG differing temperature and strain measurement of reference grating method[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, **21**(5): 43-46.
张业兵, 张延惠. 参考光栅法分离光纤光栅温度和应变的误差分析[J]. *光电技术应用*, 2006, **21**(5): 43-46.
- [6] ANSARI F, YUAN L. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber Sensors[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **12**(4): 385-394.
- [7] LI Dong-sheng, LI Hong-nan, REN Liang, *et al.* Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(2): 02440.
- [8] ZHOU J, ZHOU Z, ZHANG D. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, **21**(11): 1117-1122.
- [9] WU Ru-jun, ZHENG Bai-lin, FU Kun-kun, *et al.* Study on strain transfer of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8): 085105

- [10] WU Ru-jun, ZHENG Bai-lin, HE Peng-fei, *et al.* Influence of encapsulation structures for embossed fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(1): 24-30.
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.
- [11] WU Yong-hong, SHAO Chang-jiang, QU Wen-jun, *et al.* Nonlinear and time-dependant opto-mechanical transformation equation for fbg strain sensors[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, **39**(1): 53-56.
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]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, **39**(1): 53-56.
- [12] 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**(3): 035037.
- [13] HER S C, HUANG C Y. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, **11**(7): 6926-6941.
- [14] QUAN Zhi-qiao, FANG Xin-qiu, XUE Guang-zhe, *et al.* Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, **47**(1): 0104004.
权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. 中国激光, 2020, **47**(1): 0104004
- [15] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [16] STEHLIN P. Strain distribution in and around strain gauges[J]. *Strain Analysis for Engineering Design*, 1972, **7**(3): 228-235.
- [17] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.