

# 表面式光纤光栅传感器应变传递研究

王 为, 林玉池, 黄银国

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:**建立了表面式光纤光栅传感器力学模型;推导了表面式光纤光栅传感器感测应变与基体应变间的关系;仿真分析了衬底厚度和黏结长度对应变传递效果的影响;实验证明在黏结长度为40mm有衬底和无衬底及黏结长度为20mm有衬底三种情况下光纤光栅应变传感器的灵敏度系数分别为54.4 $\mu\text{m}/0.1\text{mm}$ , 54.8 $\mu\text{m}/0.1\text{mm}$ , 52.8 $\mu\text{m}/0.1\text{mm}$ 。实验结果证明了理论推导和仿真分析,为传感器封装提供了指导。

**关键词:**表面式光纤光栅传感器;应变传递;黏结长度;衬底厚度

**中图分类号:**TP212.14 **文献标识码:**A

## Research on Strain Transferring of Surface FBG Sensor

WANG Wei, LIN Yu-chi, HUANG Yin-guo

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The mechanic model of surface FBG sensor is set up. The relationship between the sensing strain and actual strain is deduced. The effect of substrate thickness and bond length on strain transferring is simulated. The sensitivity of surface FBG sensor is respectively 54.4 $\mu\text{m}/0.1\text{mm}$ , 54.8 $\mu\text{m}/0.1\text{mm}$ , 52.8 $\mu\text{m}/0.1\text{mm}$  when bond length is 40mm with substrate and without substrate and the bond length is 20mm with substrate. The experiment result is proved that the theoretical deduction and simulation are correct and provide guidance for sensor package.

**Key words:** surface FBG sensor; strain transfer; bond length; substrate thickness

### 1 引 言

光纤光栅是最近几年发展较为迅速的光纤无源器件之一,具有体积小、不受电磁干扰、复用能力强、能实现绝对测量等许多独特的优点,使得其在航空航天飞行器<sup>[1]</sup>、船舶<sup>[2]</sup>等的健康监测中有着广泛潜在的应用前景。

单模光纤的外径为125 $\mu\text{m}$ 左右,而做成光纤光栅时还将涂覆层拨去,因此光纤光栅传感器易脆断。实际在结构的健康检测中,均需对光纤光栅进行封装使用。封装形式通常有埋入式和表面式两种,前者是将光纤光栅传感器用金属或其他材质包裹起来,此类传感器常用于混凝土结构的健康检测;表面式传感器是将光纤光栅粘贴在某种衬底上,然后再粘贴于被测物表面进行检测,通常用于船舶、航空器等。不管何种封装,光栅与被检测物体之间存在着

包裹层或衬底层以及黏结剂。由于这些材质的弹性模量与光纤的弹性模型相差较大,使得光纤光栅所测得的应变并非实际物体的应变。因此,从理论和实验上分析检测应变与实际应变的关系对传感器的封装设计具有指导意义。国内外一些学者对此问题进行了研究,Ansari等人假定埋入式光纤黏贴长度中心的应变与基体应变相同而得出了光纤的轴向应变和剪应力分布<sup>[3]</sup>;国内周智等人对埋入式和表面式的多层黏结光纤光栅传感器情况进行了分析,得出了更一般的结果,但同样假定黏贴长度中心的应变与基体应变相同<sup>[4]</sup>;李东升等人通过理论分析,推导了埋入式光纤光栅传感器所测应变与实际

**作者简介:**王 为(1980-),男,博士研究生,主要研究光纤光栅传感及应用。E-mail:wangweivip@tju.edu.cn

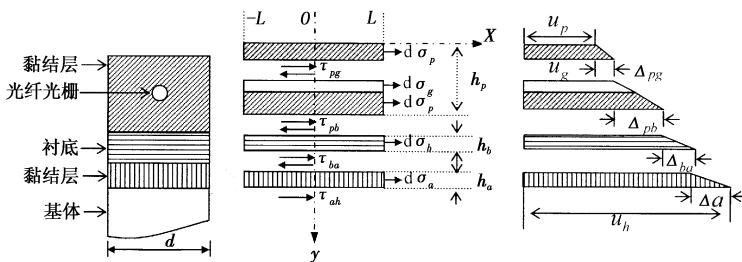
**收稿日期:**2008-06-04

结构应变的关系,发现只有在黏结长度足够大时才能使测量应变值与实际值接近<sup>[5]</sup>。梁德志等人通过有限元分析,仿真分析了埋入式光纤光栅传感器所测应变与实际应变并不相同<sup>[6]</sup>。

本文针对广泛应用于船舶、航天器的健康检测中的表面式封装光纤光栅传感器,建立了表面式传感器力学模型,运用材料力学的原理,理论上推导了表面式光纤光栅传感器的应变传递规律,仿真分析了黏结长度和衬底厚度对应变传递效果的影响。并通过等强度悬臂梁实验,对比不同黏结长度和衬底厚度情况下传感器的应变灵敏度,证实了理论分析。

### 2 表面式光纤光栅传感器应变传递性能

图1为表面式传感器的应变传递示意图。图中 $h_p, h_b, h_a$ 分别为上部黏结层、衬底、下部黏结层的厚度,光纤光栅传感器的半径为 $r_g$ ;  $d\sigma_p, d\sigma_g, d\sigma_b, d\sigma_a$ 分别为上部黏结层、光纤光栅、衬底、下部黏结层微单元的轴向应力;  $\tau_{pg}, \tau_{pb}, \tau_{ba}, \tau_{ah}$ 为各相邻层间的剪切应力;传感器的宽度为 $d$ ,黏结长度为 $2L$ 。



(a) 传感器截面图 (b) 传感器应力分布图 (c) 传感器位移示意图  
图1 表面式光纤光栅传感器应变传递示意图

将传感器结构按图1(b)进行分层,取各层微单元 $dx$ 进行受力分析。第一层受力平衡分析得:

$$d\sigma_p(x) \times d \times (h_p \div 2 - r_g) + \tau_{pg} \times d \times dx = 0 \quad (1)$$

即:

$$\frac{d\sigma_p(x)}{dx} = \frac{-\tau_{pg}}{h_p \div 2 - r_g} \quad (2)$$

同理,对其他各层微单元分析可得:

$$\frac{d\sigma_g(x)}{dx} = \left(\frac{d \times h_p}{\pi r_g^2} - 1\right) \frac{1}{h_p/2 - r_g} \tau_{pg} - \frac{d}{\pi r_g^2} \tau_{pb} \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma_b(x)}{dx} = \frac{\tau_{pb} - \tau_{ba}}{h_b} \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_a(x)}{dx} = \frac{\tau_{ba} - \tau_{ah}}{h_a} \quad (5)$$

由于基体应变是通过各层间的剪切应力传递给传感光纤光栅,由图1(c)可见满足位移平衡关系:

$$u_h = u_g + \Delta_{pb} + \Delta_{ba} + \Delta_a \quad (6)$$

式中, $u_h, u_g$ 为基体和光纤光栅的轴向形变量; $\Delta_{pb}, \Delta_{ba}, \Delta_a$ 为各层由于剪切应力引起的轴向剪切形变量,并且:

$$\begin{cases} u_h = \int_0^x \sigma_h(x) / E_h \times dx \\ u_g = \int_0^x \sigma_g(x) / E_g \times dx \\ \Delta_{pb} = \int_{h_p/2 - r_g}^{h_p} \tau(x, y) / G_p \times dy \\ \Delta_{ba} = \int_{h_p}^{h_p + h_b} \tau(x, y) / G_b \times dy \\ \Delta_a = \int_{h_p + h_b}^{h_p + h_b + h_a} \tau(x, y) / G_a \times dy \end{cases} \quad (7)$$

由于各层均很薄,可以假设各层的剪切应力是线性变化,即:

$$\tau(x, y) = \begin{cases} \frac{\tau_{bp}}{h_p} y & 0 \leq y \leq h_p \\ \frac{\tau_{ba} - \tau_{pb}}{h_b} (y - h_p) + \tau_{pb} & h_p \leq y \leq h_p + h_b \\ \frac{\tau_{ah} - \tau_{ba}}{h_a} (y - h_p - h_b) + \tau_{ba} & h_p + h_b \leq y \leq h_p + h_b + h_a \end{cases} \quad (8)$$

则由式(2)和式(3)可得:

$$\frac{d\sigma_g(x)}{dx} = \frac{-\tau_{pb}}{h_p} \quad (9)$$

另由于光纤光栅与各层是同步变形,各层的应变梯度相同,即:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_b(x)}{dx} &= \frac{E_b d\epsilon_b(x)}{dx} = \frac{E_b d\epsilon_g(x)}{dx} = \\ &= \frac{E_b}{E_g} \frac{d\sigma_g(x)}{dx} = o\left(\frac{d\sigma_g(x)}{dx}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

对于下部黏结层,式(10)推导亦成立。以上各式中 $G$ 代表各层剪切模量, $E$ 代表各层杨氏模量。

根据剪切应力线性变化并结合式(10)计算各层位移量,并代入式(6)可得:

$$\begin{aligned} \int_0^x \frac{\sigma_h(x)}{E_h} dx &= \int_0^x \frac{\sigma_g(x)}{E_g} dx + \\ &+ \left[ \frac{(3h_p - 2r_g)(h_p + 2r_g)}{8h_p G_p} + \frac{h_a}{G_a} + \frac{h_b}{G_b} \right] \tau_{pb} \end{aligned} \quad (11)$$

将式(9)代入式(11),并对上式微分得:

$$\epsilon_h = \epsilon_g(x) - 1/k^2 \epsilon_g''(x) \quad (12)$$

式中, $\epsilon_h$ 是基体应变(常量); $\epsilon_g(x)$ 为光纤光栅的轴向应变变量; $k$ 由下式确定:

$$k = \frac{1}{\sqrt{E_g h_p \left[ \frac{(3h_p - 2r_g)(h_p + 2r_g)}{8h_p G_p} + \frac{h_a}{G_a} + \frac{h_b}{G_b} \right]}} \quad (13)$$

由于光纤光栅与黏结层相交的端面为自由端,没有应力传递,即  $\varepsilon_g(-L) = \varepsilon_g(L) = 0$ ,由此初始条件,求解微分方程式(12)得:

$$\varepsilon_g(x) = \varepsilon_h(1 - \cosh(k \times x) / \cosh(k \times L)) \quad (14)$$

式(14)即是表面式光纤光栅传感器的轴向应变传递公式。

由式(14)可以看出,光纤光栅检测应变与黏结长度、黏结剂厚度、衬底厚度以及各层的剪切模量有关。为了明确各参数对应变传递的影响,取  $L = 0.01\text{m}$  和  $L = 0.02\text{m}$ ,衬底厚度为  $h_b = 25\mu\text{m}$  和无衬底进行仿真分析,结果如图2所示。其中各材料参数取参考文献[3]中的赋值,  $G_b = 2 \times 10^8\text{Pa}$ ;  $\varepsilon_h = 1$ 。

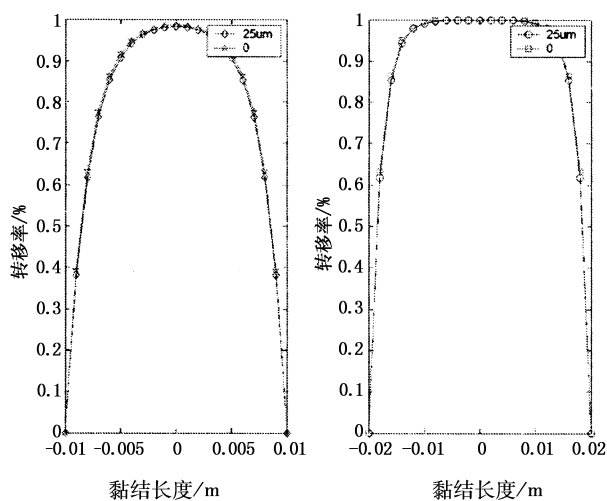


图2 应变传递效果仿真图

从图2可以看出作为表面式封装的衬底其厚度大小影响着应变的传递性能,厚度越大,传递效果越差;同时也可以看出光纤光栅的黏结长度是影响应变传递的重要因素。通常光纤光栅长度为  $0.01\text{m}$  左右,从仿真可见,当黏结长度较短时,基体应变不能完全传递到光栅,同时光栅各处感应应变大小亦有差异这容易使得光栅感受非均匀应变从而产生反射谱变形影响传感解调精度;当黏结长度足够长时,处于黏结中间部位的光栅能完全感测基体应变,而且各处应变基本相同,此时衬底的厚度对应变传递影响可以忽略。这些仿真结论对表面式传感器的设计具有重要的指导意义。

### 3 实验与讨论

为了验证理论推导和仿真结果,运用等强度悬臂梁装置观察在不同衬底厚度、不同黏结长度情况下光纤光栅的应变灵敏度系数。选用的光纤光栅中心波长为  $1560\text{nm}$ ,栅长  $10\text{mm}$ ;衬底选用常见聚酰亚胺薄膜,厚度为  $25\mu\text{m}$ ;黏结剂为常用的氰基丙烯酸酯黏合剂。实验通过光谱仪观察不同悬臂梁绕度情况下的光纤光栅波长漂移量。实验结果如图3所示。

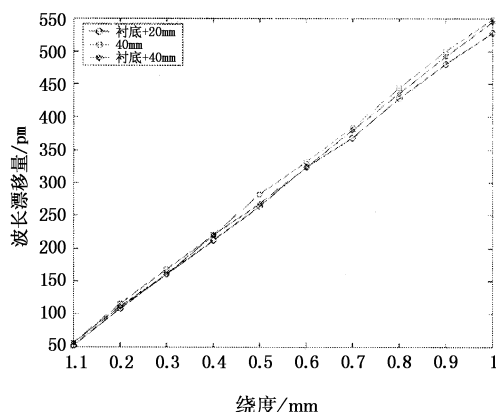


图3 应变灵敏度对比图

从图3可以看出,实验记录了黏结长度为  $40\text{mm}$  时,有衬底和无衬底及黏结长度为  $20\text{mm}$  时有衬底三种情况下的应变传递情况。值得注意的是在黏结过程中需尽量保证光栅部位处于黏结长度的中间。通过计算可得三种情况下的光纤光栅的应变灵敏度分别为:  $54.4\text{pm}/0.1\text{mm}$ ,  $54.8\text{pm}/0.1\text{mm}$ ,  $52.8\text{pm}/0.1\text{mm}$ 。从实验分析可以明显看出,在黏结长度为  $40\text{mm}$  时,衬底对应变传递的影响并不明显;但是在黏结长度为  $20\text{mm}$  时,其应变灵敏度系数明显小于  $40\text{mm}$  黏结长度时的应变灵敏度系数。实验结果证实了表面式光纤光栅传感器封装时黏结长度和衬底的选择是能否真实感测基体应变的两个重要参数。

### 4 结论

本文建立了表面式光纤光栅传感器力学模型,推导了表面式光纤光栅传感器应变传递规律;并通过仿真和实验分析了黏结长度、衬底厚度等对表面式传感器的应变传递效果的影响。结果对光纤光栅在实际使用过程中的封装具有指导意义。

### 参考文献:

- [1] S Takeda, Y Aoki, T Ishikawa, et al. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test [J]. Composite Structures, 2007, (79): 133 - 139.
- [2] Jansons. Kiddy, et al. Structural load monitoring of the RV triton using fiber optic sensors [J]. SPIE, 2002, 4698: 461 - 472.
- [3] Farhad Ansari, Yuan Libo. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 385 - 394.
- [4] 周智, 李冀龙, 等. 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.
- [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.
- [6] 梁德志, 孙丽, 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.