

激光与光电子学进展

基体封装式光纤布拉格光栅传感器的应变传递及其影响因素

但丁谊^{1,2}, 丁克勤^{2*}, 舒安庆¹

¹武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;

²中国特种设备检测研究院, 北京 100029

摘要 光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器的应变传递影响因素决定了其在监测结构应变时的准确性。为了研究 FBG 应变传感器的应变传递影响因素,建立了传感器应变传递力学模型,并进行应变传递的理论推导,得到该传感器的应变传递率。为了保证计算正确,对传感器的特殊结构进行了有限元仿真计算。此外,还分析了传感器的应变传递影响因素及其影响效果,并用有限元仿真对不同的影响因素进行了计算,验证了理论推导的准确性。

关键词 光纤光学; 应变传递; 影响因素; 有限元仿真

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0506006

Strain Transfer and Its Influencing Factors of Matrix Encapsulated Fiber Bragg Grating Sensor

Dan Dingyi^{1,2}, Ding Keqin^{2*}, Shu Anqing¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China;

²China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China

Abstract The strain transfer of fiber Bragg grating (FBG) strain sensor determines its accuracy when monitoring the structural strain. To study the influencing factors of strain transfer of FBG strain sensor, the mechanical model of the sensor strain transfer is developed in this paper. The theoretical derivation of the strain transfer is conducted, and the formula of strain transfer rate of the sensor is obtained. Meanwhile, to ensure proper computation the finite element simulation and calculation are performed for its special structure. Furthermore, the influencing factors and effects of the strain transfer of the sensor are analyzed, and different influencing factors are simulated using the finite element simulation, which verifies the accuracy of the theoretical derivation.

Key words fiber optics; strain transfer; influencing factors; finite element simulation

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器具有体积小、质量轻、耐腐蚀、灵敏度高优点^[1-3],但裸光纤

的抗剪能力较差,易脆断,将其应用于结构健康监测时,往往需要进行封装处理^[4]。常用的封装处理方式如表面式、埋入式、金属封装、两端夹持方式^[5-9]均会引入中间层,各层材料弹性模量的差异会导致

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-05-30; 录用日期: 2021-06-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF0214700)

通信作者: *m17611606831@163.com

FBG测得的应变与基体层的实际应变有所差异,引起应变传递失真,进而影响传感器对结构健康监测的准确性^[10]。为了使传感器所测应变更贴近待测结构的实际应变,对FBG传感器应变传递影响因素的研究具有重要意义。

李东升等^[11]分析埋入式FBG传感器的应变传递时发现,在粘接长度足够大时,FBG测得的应变才贴近实际应变。权志桥等^[12]推导得到表面粘接式FBG测量应变与被测应变真值之间的修正关系,并通过有限元模拟和实验,验证了该理论模型的精确性。吴入军等^[13]分析研究了弹性模量、厚度、粘接长度等参数对FBG传感器测量效果的影响。章征林等^[14]分析了分布式光纤应变测量结果的影响因素。张桂花等^[15]引入基体层,推导了基片式FBG传感器应变传递系数的表达式,并进行了实验验证。孙丽等^[16]对楔形槽基片式FBG传感器的应变传递进行了探讨。上述研究虽然推导了各种FBG传感器的应变传递,但缺少对其影响因素的探究。徐义武等^[17]探究了胶体和FBG弹性模量的比值对表面粘接式FBG传感器应变传递率的影响。陈光等^[18]分析了端接式FBG传感器粘接层参数对应变传递率的影响。邵晓娟等^[19]对比了三种不同基体层结构FBG应变传感器的应变灵敏度,结果表明,“回”型结构对应的传感器具有更好的适用性和精度。

本文研究了基体刻槽两端粘接式FBG传感器的应变传递机理,并建立了该结构的应变传递模型,推导了该结构FBG传感器的应变传递率。此外,通过有限元仿真对该传感器特殊结构带来的偏差进行修正,分析了影响传感器应变传递的因素,并进行了仿真验证。

2 基体刻槽两端粘接式FBG传感器的应变传递机理

实验使用的传感器实物图如图1所示,对应的三维模型如图2所示。FBG应变传感器由三部分组成,分别为金属基体层、粘接层、FBG,其截面尺寸示意图如图3所示。其中,基体层的高度为 H ,宽度为 D ,粘接层的高度为 h_1 ,宽度为 D_1 ,光纤到基体层顶部的距离为 h_2 。

FBG应变传感器的两端粘接示意图如图4所示,两端粘接部分的长均为 L , L_f 为裸光纤的长度,坐标系分布如图5所示。推导应变传递率过程中的

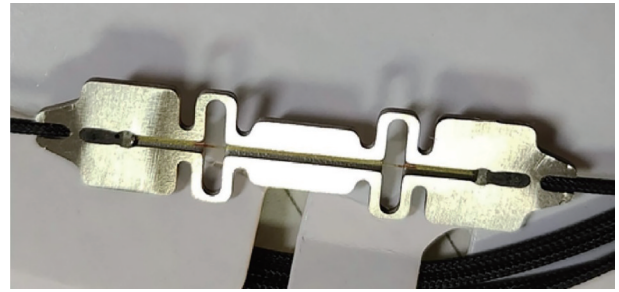


图1 FBG传感器的实物图

Fig. 1 Physical picture of the FBG sensor

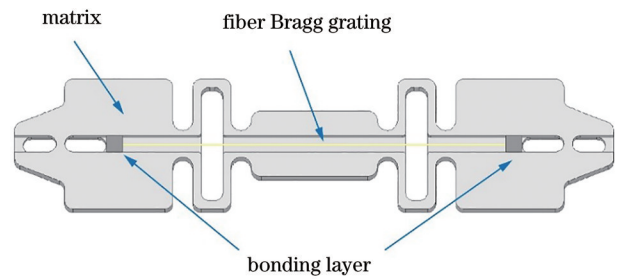


图2 FBG传感器的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of the FBG sensor

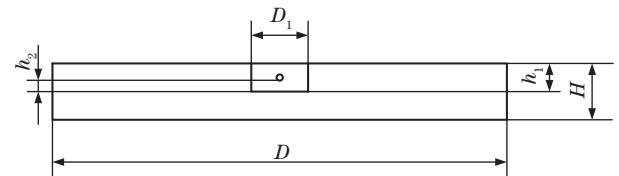


图3 FBG传感器的截面尺寸

Fig. 3 Section size of the FBG sensor

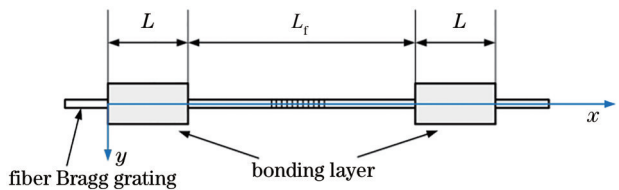


图4 FBG传感器的两端粘接示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the ends-bonding of FBG sensor

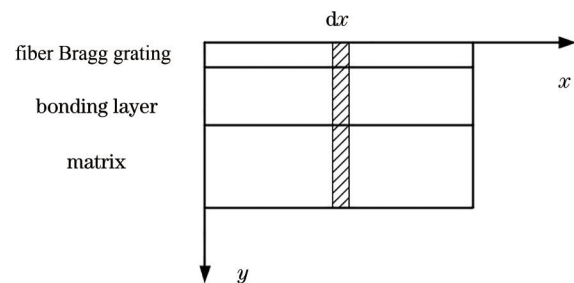


图5 传感器微元段示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sensor micro element section

假设:1)刻栅工艺对FBG的性能影响较小,可忽略不计;2)只有基体层受到外加切应力作用,FBG和粘接层不直接受力;3)各层材料均为线弹性材料,且具有各向同性;4)传感器各层连接紧密,不会产生层间相对滑移、脱粘。

FBG应变传感器应变传递推导过程中设置的参数: r 为各层到光纤中心的距离, E 为材料的弹性模量, G 为剪切模量, λ 为泊松比, σ 为正应力, τ 为切应力, u 为位移, ϵ 为正应变, γ 为切应变。下标f表示FBG层,a表示粘接层,m表示基体层。FBG段的受力分布示意图如图6所示,其中, τ_1 为FBG和粘接层间的切应力。

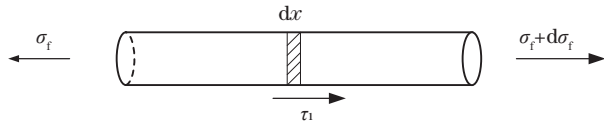


图6 FBG段的受力分布

Fig. 6 Force distribution of the FBG section

FBG微元段的受力平衡方程可表示为

$$\pi r_f^2 (\sigma_f + d\sigma_f) + 2\pi r_f \tau_1 dx = \pi r_f^2 \sigma_f, \quad (1)$$

$$\tau_1 = -\frac{r_f d\sigma_f}{2dx}, \quad (2)$$

由应力应变关系 $\sigma = E \cdot \epsilon$, 得到

$$\tau_1 = -\frac{r_f E_f d\epsilon_f}{2dx}. \quad (3)$$

粘接层的受力分布示意图如图7所示,其中, τ_2 为粘接层和基体层的层间切应力。

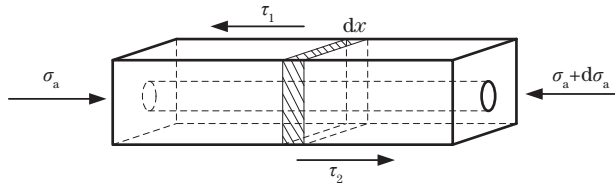


图7 粘接层的受力分布

Fig. 7 Force distribution of the bonding layer

粘接层微元段的受力平衡方程可表示为

$$(D_1 h_1 - \pi r_f^2) (\sigma_a + d\sigma_a) + (2h_1 + D_1) \tau_2 dx - (D_1 h_1 - \pi r_f^2) d\sigma_a - 2\pi r_f \tau_1 dx = 0, \quad (4)$$

$$\tau_2 = -\frac{\pi r_f^2 E_f d\epsilon_f}{(2h_1 + D_1) dx} - \frac{(D_1 h_1 - \pi r_f^2) E_a d\epsilon_a}{(2h_1 + D_1) dx}. \quad (5)$$

由于光纤与其他层同步变形,可近似认为各层的应变传递系数相等,即

$$\frac{d\epsilon_f}{dx} \approx \frac{d\epsilon_a}{dx}, \quad (6)$$

$$\tau_2 = \frac{(-\pi r_f^2 E_f - D_1 h_1 E_a + \pi r_f^2 E_a) d\epsilon_f}{(2h_1 + D_1) dx}. \quad (7)$$

$\tau(x, y)$ 为粘接层 (x, y) 位置处的切应力, $\gamma(x, y)$ 为粘接层 (x, y) 位置处的切应变,由于光纤的径长比很大,可忽略径向位移,则

$$\tau(x, y) = G \cdot \gamma(x, y) = G \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \approx G \left(\frac{du}{dy} \right), \quad (8)$$

$$u_m - u_f = \int_{y_1}^{y_2} \frac{\tau_2}{G_a} dy + \int_{-\frac{D_1}{2}}^{-r_f} \frac{\tau_2}{G_a} dz + \int_{r_f}^{\frac{D_1}{2}} \frac{\tau_2}{G_a} dz = -\frac{(\pi r_f^2 E_f + D_1 h_1 E_a - \pi r_f^2 E_a)(h_2 + D_1 - 2r_f)}{(2h_1 + D_1) G_a} \cdot \frac{d\epsilon_f}{dx}. \quad (9)$$

令 u_{ma} 为基体层与粘接层连接处的位移, u_{af} 为粘接层与FBG连接处的位移,则

$$u_{ma} - u_{af} = -\frac{1}{k^2} \cdot \frac{d\epsilon_f}{dx}, \quad (10)$$

式中, k 为滞后系数,可表示为

$$k = \sqrt{\frac{(2h_1 + D_1) G_a}{(\pi r_f^2 E_f + D_1 h_1 E_a - \pi r_f^2 E_a)(h_2 + D_1 - 2r_f)}}, \quad (11)$$

由

$$G = \frac{E}{2(1 + \lambda)}, \quad (12)$$

得到

$$k = \sqrt{\frac{(2h_1 + D_1) E_a}{2(\pi r_f^2 E_f + D_1 h_1 E_a - \pi r_f^2 E_a)(h_2 + D_1 - 2r_f)(1 + \lambda_a)}}. \quad (13)$$

用(10)式对 x 进行求导,得到

$$\frac{d^2 \epsilon_f(x)}{dx^2} - k^2 \epsilon_f(x) = -k^2 \epsilon_m, \quad (14)$$

该微分方程的通解为

$$\epsilon_f(x) = C_1 \exp(kx) + C_2 \exp(-kx) + \epsilon_m. \quad (15)$$

由于光纤的一端为自由端,没有应力传递。因此,可将另一端近似为FBG实测应变,记为 ϵ_1 ,则边界条件可表示为

$$\begin{cases} \epsilon_f(0) = 0 \\ \epsilon_f(L) = \epsilon_1 \end{cases}, \quad (16)$$

解得

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_m [1 - \exp(-kL)]}{2\sinh(kL)} \\ C_2 = \frac{-\epsilon_1 + \epsilon_m [1 - \exp(-kL)]}{2\sinh(kL)} \end{cases}, \quad (17)$$

$$\epsilon_f(x) = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_m [1 - \exp(-kx)]}{2\sinh(kL)} \exp(kx) + \frac{-\epsilon_1 + \epsilon_m [1 - \exp(kL)]}{2\sinh(kL)} \exp(-kx) + \epsilon_m. \quad (18)$$

如果裸光纤段的位移为 ΔL_f , 则光纤的实测应变变为

$$\epsilon_1 = \Delta L_f / L_f. \quad (19)$$

由于光纤、粘接层和基体结构同步变形, 光纤轴

向变化量与基体轴向变化量也相同, 则有本构关系

$$\epsilon_m(L_f + 2L) = \Delta L_f + 2\Delta L, \quad (20)$$

其中

$$\Delta L = \int_0^L \epsilon_f(x) dx = \int_0^L \left\{ \frac{\epsilon_1 - \epsilon_m [1 - \exp(-kx)]}{2\sinh(kL)} \exp(kx) + \frac{-\epsilon_1 + \epsilon_m [1 - \exp(kL)]}{2\sinh(kL)} \exp(-kx) + \epsilon_m \right\} dx = \frac{\epsilon_1 \cosh(kL) - \epsilon_1 + 2\epsilon_m - 2\cosh(kL)\epsilon_m}{k \sinh(kL)} + \epsilon_m L. \quad (21)$$

联立(19)式~(21)式, 得到传感器的平均应变传递率为

$$\phi = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} = 1 - \frac{2 \sinh(kL)}{kL_f \sinh(kL) + 2kL \cosh(kL)}, \quad (22)$$

式中, 分母中多出的 $kL_f \sinh(kL)$ 是因为该传感器结构以两端粘接方式粘接到基体层, 中间有段裸光纤未与粘接层相连。当裸光纤段的长度趋向于 0 时, 其应变传递率趋向于全粘状态下的应变传递率。

3 传感器应变传递率的修正

由上述分析可知, (22) 式为 FBG 段平均应变和与粘接层相连处基体层平均应变的比值, 但实际测

量中传感器只有两端存在粘接位置, 整个基体层的平均应变 ϵ'_m 以及与粘接层相连的基体层平均应变 ϵ_m 会产生偏差。因此, 采用有限元仿真分析法(软件为 ANSYS Workbench 19.2)对该偏差进行修正。首先, 对传感器模型进行网格划分, 如图 8 所示。考虑到传感器在工作时的受力情况, 对其施加位移约束, 限制 y 方向和 z 方向的位移(即传感器仅在 x 方向产生变形)。考虑到传感器的实际安装方式即其能承受的载荷, 对传感器施加沿 FBG 轴向拉伸的载荷, 大小随步长线性增加。传感器受到的载荷、约束如图 9 所示。仿真得到的基体层变形分布如图 10 所示, 与粘接层相连的基体层变形分布如图 11 所示。

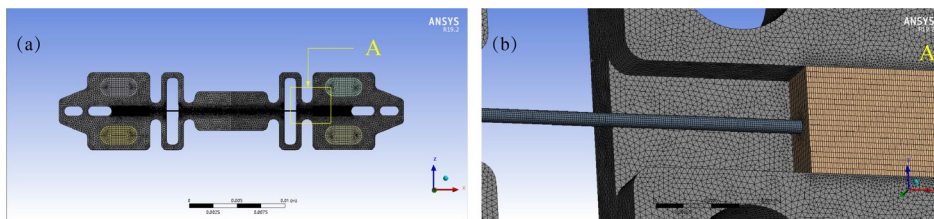


图 8 传感器的网格划分。(a)整体网格;(b)局部放大网格

Fig. 8 Meshing of the sensor. (a) Global mesh; (b) locally enlarged mesh

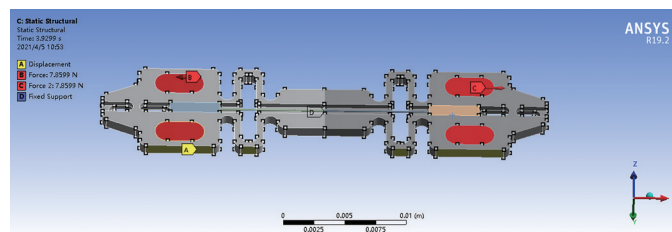


图 9 传感器施加的约束和载荷示意图

Fig. 9 Schematic diagram of constraints and loads applied by the sensor

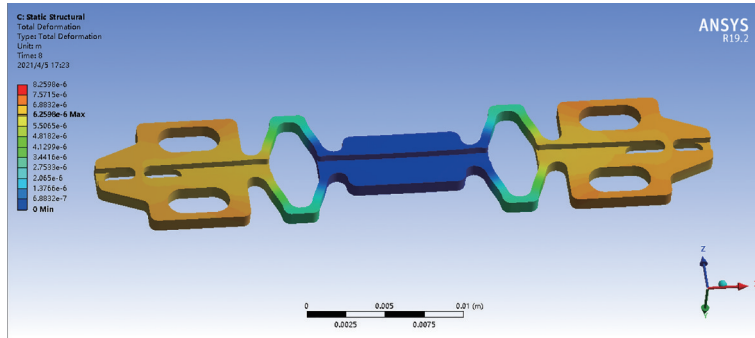


图 10 基体层的变形分布

Fig. 10 Deformation distribution of the matrix layer

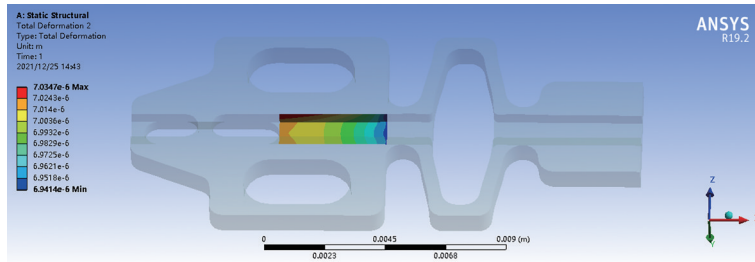


图 11 与粘接层相连基体层的变形分布

Fig. 11 Deformation distribution of the matrix layer at the joint with the bonding layer

提取与粘接层连接的基体层伸长量和整个基体层的伸长量,得到二者与各层初始长度的比值(平均应变),与粘接层相连的基体层平均应变 ϵ_m 和整个基体层平均应变 ϵ'_m 的关系如图 12 所示。可以发现,随着载荷的增加,二者的关系近似为直线,直线斜率即为修正系数 k' 。

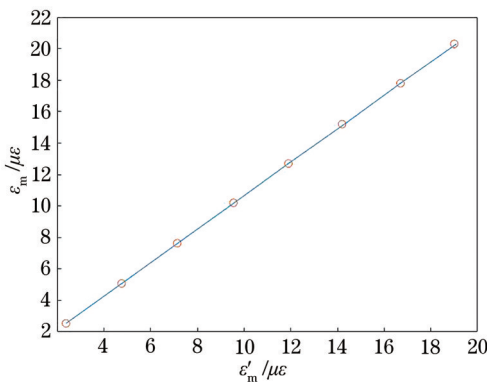


图 12 基体粘接处平均应变和基体层平均应变的关系

Fig. 12 Relationship between the average strain at the bonding point of the matrix and the average strain of the matrix layer

修正后传感器的平均应变传递率约为

$$\bar{\phi}' = \bar{\phi} \times k'. \quad (23)$$

修正系数 k' 的大小与粘接长度、基体层材料、基

体层形状有关。在基体层结构一定时,考虑到传感器的工作环境,将基体层材料确定为 304 不锈钢, k' 随粘接长度的变化不大,约为 1.068。粘接材料为环氧树脂胶 ($E_a = 4 \times 10^9$ Pa, $\lambda_a = 0.34$),基体层的材料为 304 不锈钢 ($E_s = 1.94 \times 10^{11}$ Pa, $\lambda_s = 0.3$),粘接长度为 4 mm,FBG 位于粘接层中心。根据 (22) 式计算得到传感器的平均应变传递率为 0.9196。有限元仿真计算后,提取 FBG 段的平均应变和基体层平均应变的比值,得到的应变传递率为 0.9923。修正后传感器的应变传递率为

$$\bar{\phi}' = \bar{\phi} \times k' = 1.068 \times 0.9196 = 0.98213. \quad (24)$$

可以发现,修正后的应变传递率接近有限元仿真计算的结果。当传感器各层材料和粘接长度相同时,相比槽式板状基体层结构^[20]、“工”字形基体层结构^[21]、改良“工”字形基体层结构^[22],该基体层结构的应变传递率更高。

4 传感器应变传递的影响因素

基体层的槽宽、槽深为定值,因此设置的粘接宽度为槽宽,粘接高度为槽深,且均为定值。基体层采用耐高温、加工性能好、韧性高的 304 不锈钢。传感器的物理参数(常量)如表 1 所示。

由 (11) 式和 (23) 式可知,影响 FBG 应变传感器

表 1 传感器的物理参数

Table 1 Physical parameters of sensor

Physical parameter	Value
Elastic modulus of FBG $E_f / (10^{10} \text{ Pa})$	7.2
Poisson's ratio of FBG λ_f	0.17
Radius of FBG r_f / mm	0.0625
Height of bonding layer h_1 / mm	0.5
Width of bonding layer D_1 / mm	1
Length of bare FBG L_f / mm	17
Elastic modulus of matrix $E_m / (10^{11} \text{ Pa})$	1.94
Poisson's ratio of matrix λ_m	0.3

平均应变传递率的变量包括粘接层的弹性模量 E_a 、粘接层的泊松比 λ_a 、FBG 到粘接层底部的距离 h_2 、粘接长度 L ，因此，仿真分析了各变量对传感器平均应变传递率的影响。

1) 粘接层弹性模量对应变传递率的影响

当传感器粘接层采用的粘接剂弹性模量 E_a 变化范围为 $10^9 \sim 5 \times 10^9 \text{ Pa}$ 时，仿真得到传感器应变传递率的变化曲线如图 13 所示。可以发现，传感器的应变传递率随粘接剂弹性模量的增加逐渐增加，其斜率逐渐减小，应变传递率最终稳定在 0.9849 左右。

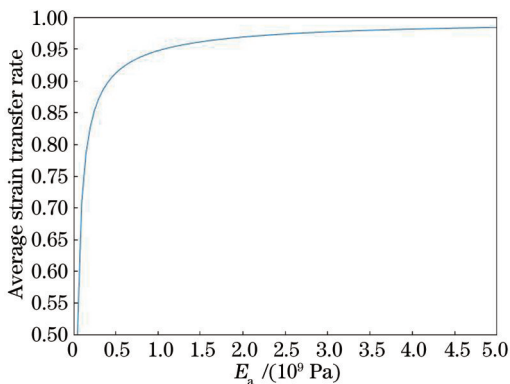


图 13 粘接层弹性模量对传感器应变传递率的影响

Fig. 13 Influence of elastic modulus of bonding layer on average strain transfer rate of sensor

2) 粘接层泊松比对应变传递率的影响

当传感器粘接层的泊松比 λ_a 变化范围为 0.2~0.5 时，仿真得到传感器应变传递率的变化曲线如图 14 所示。可以发现，传感器的应变传递率随泊松比的增加呈线性减小趋势。

3) FBG 到粘接层底部距离对应变传递率的影响

结合传感器基体及其刻槽的实际形状可知，

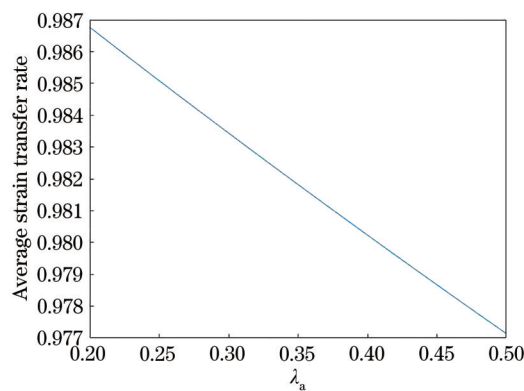


图 14 粘接层泊松比对传感器应变传递率的影响

Fig. 14 Influence of Poisson's ratio of bonding layer on average strain transfer rate of sensor

FBG 到粘接层底部距离 h_2 的变化范围为 0~0.375 mm，仿真得到传感器应变传递率随 FBG 到粘接层底部距离的变化曲线如图 15 所示。可以发现，传感器的应变传递率随 FBG 到粘接层底部距离的增加呈线性减小趋势。

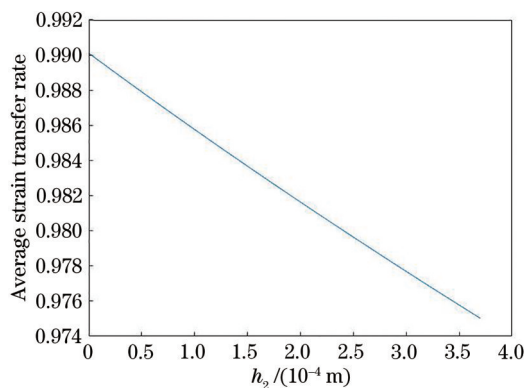


图 15 FBG 到粘接层底部距离对传感器应变传递率的影响

Fig. 15 Influence of the distance from FBG to the bottom of bonding layer on average strain transfer rate of sensor

4) 粘接长度对应变传递率的影响

结合具体的传感器基体及刻槽的实际形状可知，粘接长度 L 的变化范围为 1~4 mm。仿真得到传感器应变传递率随粘接长度的变化曲线如图 16 所示，可以发现，当粘接长度增加时，传感器的应变传递率逐渐增加，其斜率逐渐减小。

综上所述，优化 FBG 应变传感器时，可选取弹性模量较大、泊松比较小的粘接材料，如环氧树脂胶，且 FBG 到粘接层底部的距离不宜太大。为了使粘接层受力均匀，取 FBG 到粘接层底部的距离为 0.1875 mm，最长粘接长度为 4 mm。

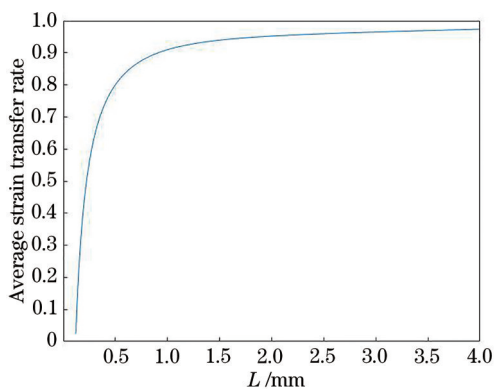


图 16 粘接层长度对传感器应变传递率的影响

Fig. 16 Influence of bonding layer length on average strain transfer rate of sensor

5 有限元仿真验证

通过有限元仿真验证理论推导公式的有效性, 采用的模型、网格划分、约束、载荷方向与理论分析时一致, 载荷大小为常数。通过改变影响传感器应变传递率的因素, 得到不同参数对应应变传递率的影响, 并将有限元计算结果和公式推导的理论解进行对比, 以验证推导公式的准确性。计算得到传感器的变形分布如图 17 所示, 在有限元计算中, 用 FBG 段的平均应变与基体层平均应变的比值作为平均应变传递率。

将理论解与仿真解进行对比, 得到传感器平均应变传递率随各影响因素的变化规律如图 18 所示。

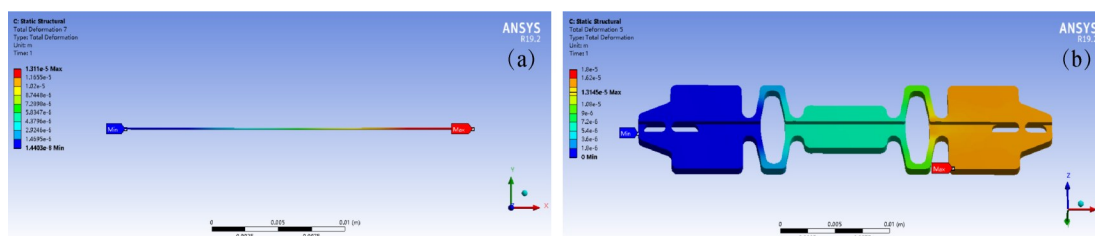


图 17 传感器的变形分布 (a) FBG 的变形分布; (b) 基体层的变形分布

Fig. 17 Deformation distribution of the sensor. (a) Deformation distribution of the FBG; (b) deformation distribution of matrix layer

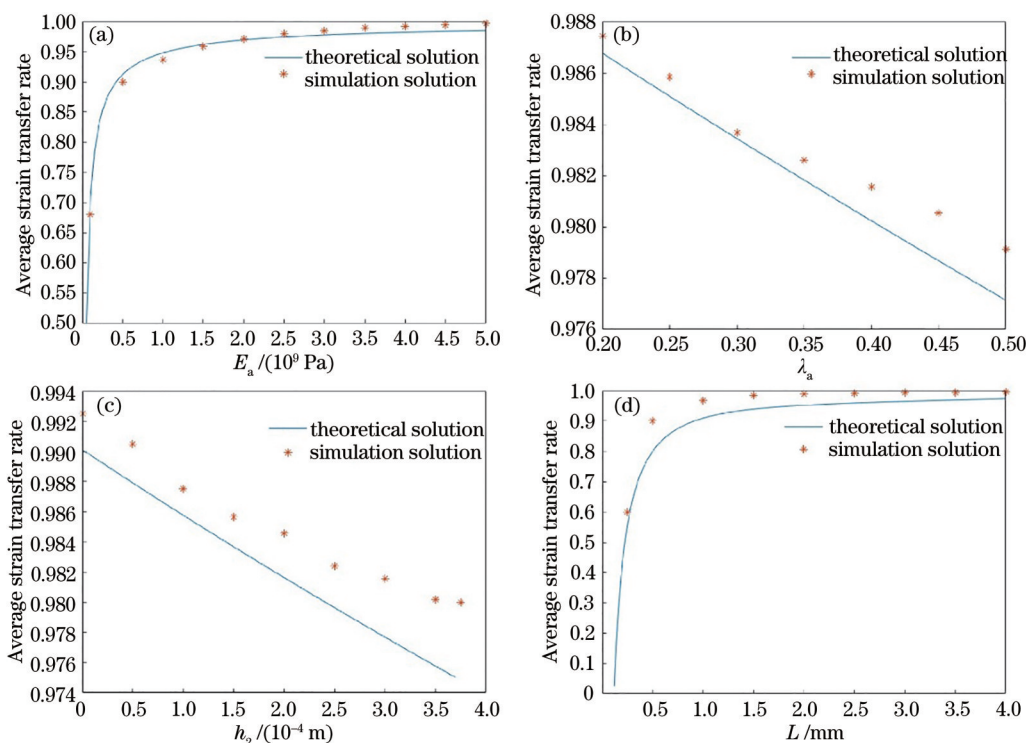


图 18 理论解和仿真解的对比。(a) 粘接层的弹性模量; (b) 粘接层的泊松比; (c) FBG 到粘接层底部的距离; (d) 粘接层的长度
Fig. 18 Comparison between theoretical solution and simulation solution. (a) Elastic modulus of the bonding layer; (b) Poisson's ratio of the bonding layer; (c) distance from the FBG to the bottom of the bonding layer; (d) length of the bonding layer

可以发现,有限元仿真的数值解和理论解的变化规律基本一致,但数值解略大于理论解,原因可能是划分网格的精度有限。

6 结 论

对基体刻槽两端粘接式 FBG 传感器的应变传递率进行了理论推导,并对其特殊结构进行有限元修正计算。分析了传感器应变传递的影响因素及其影响效果,结果表明,传感器的平均应变传递率随粘接层的弹性模量和粘接长度的增加而增加,随粘接层的泊松比和 FBG 到粘接层底部距离的增加而线性减小。其中,影响较大的是粘接层的弹性模量和粘接长度,因此,在设计 FBG 应变传感器时,需注意粘接剂的材料和粘接层的长度、弹性模量,以保证应变传递的准确性。仿真结果表明,有限元计算结果与理论推导结果基本一致,验证了理论推导的准确性,为 FBG 应变传感器的优化设计提供了依据。

参 考 文 献

- [1] Huang H M, Yuan S F. Study on the spectral response of fiber Bragg grating sensor under non-uniform strain distribution in structural health monitoring[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(2): 109-112.
- [2] Cusano A, Cutolo A, Nasser J, et al. Dynamic strain measurements by fibre Bragg grating sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 110(1/2/3): 276-281.
- [3] Liu P F, Liu G J, Wang Y J, et al. Review on development of fiber grating pressure sensor sensibilization technology[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(8): 5-7, 11.
刘鹏飞, 刘国军, 王永杰, 等. 光纤光栅压力传感器增敏技术发展评述[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(8): 5-7, 11.
- [4] Zhan Y G, Cai H W, Geng J X, et al. Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 952-955.
詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(8): 952-955.
- [5] Liu Y Q, Zhang Y B, Wang X M. Fatigue characteristic research of submerged F-P optical fiber strain sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(4): 1219-1222.
刘永前, 张彦兵, 王新敏. 埋入式 F-P 光纤应变传感器的疲劳性能试验研究[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(4): 1219-1222.
- [6] Wang W, Lin Y C, Huang Y G. Research on strain transferring of surface FBG sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1218-1220.
王为, 林玉池, 黄银国. 表面式光纤光栅传感器应变传递研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(12): 1218-1220.
- [7] Guo W, Li X L, Song H. Analysis of strain transfer of fiber grating sensors adhered to the structure surface[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011, 31(4): 1-4.
郭伟, 李新良, 宋昊. 表面粘贴光纤光栅传感器的应变传递分析[J]. *计测技术*, 2011, 31(4): 1-4.
- [8] Hu S Y, Zhao Q D, He S Y, et al. Strain measurement in construction steel bar using a FBG sensor coated by a thin metal tube[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2004, 15(6): 688-690.
胡曙阳, 赵启大, 何士雅, 等. 金属管封装光纤光栅用于建筑钢筋应变的测量[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(6): 688-690.
- [9] Ren L, Li H N, Hu Z Q, et al. Development and application of FBG strain sensor with enhanced sensitivity in the model vibration experiment[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2008, 19(11): 1437-1441.
任亮, 李宏男, 胡志强, 等. 一种增敏型光纤光栅应变传感器的开发及应用[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(11): 1437-1441.
- [10] Cheng C C, Lo Y L, Li W Y. Accurate simulations of reflective wavelength spectrum of surface-bonded fiber Bragg grating[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(17): 3394-3402.
- [11] Li D S, Li H N. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 37(4): 435-441.
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.
- [12] Quan Z Q, Fang X Q, Xue G Z, 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.
- [13] Wu R J, Zhang X F, Zheng B L, 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.
- [14] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410001.
- [15] Zhang G H, Chai J, Li X J, et al. Research on strain transfer of surface fiber grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010601.
张桂花, 柴敬, 李旭娟, 等. 基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010601.
- [16] Sun L, Yue C Y, Song Y S. Strain transfer analysis of substrate fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(5): 849-854.
孙丽, 岳川云, 宋岩升. 基片式光纤布拉格光栅传感器应变传递分析[J]. 光电子·激光, 2013, 24(5): 849-854.
- [17] Xu Y W, Zhang S X. Effect of elastic modulus ratio of surface-bonded colloid and optical fiber on strain transfer rate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210606.
徐义武, 张素侠. 表贴式胶体与光纤弹性模量比对应变传递率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210606.
- [18] Chen G, Ding K Q, Feng Q B, et al. Strain transfer mechanism of end-bonding fibre Bragg grating sensors based on linear viscoelasticity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110604.
陈光, 丁克勤, 冯其波, 等. 线黏弹性端接布拉格光纤光栅传感器应变传递机理[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110604.
- [19] Shao X J, Shu A Q, Ding K Q. Analysis of strain sensitivity of three kinds of fiber Bragg grating strain sensors[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(2): 1-3.
邵晓娟, 舒安庆, 丁克勤. 三种结构光纤光栅应变传感器应变灵敏度分析研究[J]. 化学工程与装备, 2021(2): 1-3.
- [20] Shen H W, Zhu P Y, Xu P S, et al. Strain transfer factor analysis of basal grooving encapsulating fiber Bragg grating sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(2): 96-99.
申昊文, 朱萍玉, 许沛胜, 等. 基底刻槽封装式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析[J]. 仪表技术与传感器, 2015(2): 96-99.
- [21] Yu X J, Yu Y L, Zhang M, et al. Study on the strain and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(9): 1325-1328.
于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. 光子学报, 2006, 35(9): 1325-1328.
- [22] Yuan Z L, Gong Y, Ma Y Y, et al. Structure optimization of fiber Bragg grating strain sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1261-1266.
袁子琳, 龚元, 马耀远, 等. 光纤布喇格光栅应变传感器结构优化研究[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1261-1266.