

表贴式胶体与光纤弹性模量比对应变传递率的影响

徐义武^{1,2}, 张素侠^{1,2*}

¹ 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300354;

² 天津市非线性动力学与控制重点实验室, 天津 300354

摘要 表贴式光纤布拉格光栅传感器包括光纤、中间层、基体三部分, 通过分析胶体与光纤的弹性模量比, 探究胶体的弹性模量、泊松比、长度等因素对基体到光纤平均应变传递率的影响。实验结果表明, 与未考虑弹性模量比时的平均应变传递率相比, 考虑弹性模量比时, 平均应变传递率随胶体弹性模量、长度的增加而增加, 随胶体厚度、泊松比的增加而减小, 随胶体宽度的增加先增加后减小, 研究结果更符合实际应用情况。

关键词 光纤光学; 表贴式传感器; 弹性模量比; 平均应变传递率

中图分类号 TN253 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.210606

Effect of Elastic Modulus Ratio of Surface-Bonded Colloid and Optical Fiber on Strain Transfer Rate

Xu Yiwu^{1,2}, Zhang Suxia^{1,2*}

¹ Department of Mechanics, College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;

² Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Control, Tianjin 300354, China

Abstract The surface-bonded fiber Bragg grating (FBG) sensor consists of three parts: fiber, middle layer, and matrix. By analyzing the ratio of the elastic modulus of the colloid to the optical fiber, the influences of the elastic modulus, Poisson's ratio, length and other factors of the colloid on the average strain transfer rate from the matrix to the optical fiber are explored. Compared with the average strain transfer rate without considering the elastic modulus ratio. Experimental results show that when considering the elastic modulus ratio, the average strain transfer rate increases with the increase of elastic modulus and length of colloid, decreases with the increase of thickness and Poisson's ratio of colloid, and first increases and then decreases with the increase of colloid width. The research results are more in line with the actual application.

Key words fiber optics; surface-bonded sensor; elastic modulus ratio; average strain transfer rate

OCIS codes 060.2310; 060.2430; 060.3735

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有体积小、抗电磁干扰能力强、灵敏度高等特点, 广泛应用于多种领域中, 如输电系统健康监测^[1]、钢梁损伤定位^[2]、飞艇外壳的结构健康监测^[3]。研究基体到 FBG 传感器的应变传递率对提高应变传递率和优化方法具有重要意义, 而目前对应变传递率的研究大多忽略了胶体与光纤的弹性模量比, 导致对应变传递率的分析存在偏差。

FBG 传感器一般有表面粘贴、埋入、固定在载体上或两端固定等固定方法^[4]。在埋入式 FBG 传感器方面, Ansari 等^[5]建立了纤芯-涂层-寄主材料的模型, 并令各层中心的应变相等, 推出了光纤应变传递率及平均应变传递率随光纤长度的变化规律; 李东升等^[4]建立了光纤-中间层-寄主材料的模型, 分析了应变传递关系, 并提出了多层模型分析公式, 推导出传感器的临界粘贴长度公式。在直接粘贴 FBG 传感器方面, 田石柱等^[6]针对抛物线型的粘贴结构构建了 3 层模型, 通过剪滞理论分析得到组合

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-03-18; 录用日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51479136)、天津市自然科学基金(17JCYBJC18700)

* E-mail: zhangsux@tju.edu.cn.

梁的实际应变与理论应变关系。在两端固定 FBG 传感器方面, Sun 等^[7]根据端接支座构建了 3 层模型, 并基于剪滞理论分析了应变传递关系。陈光等^[8]在端接模型中, 建立了光纤-粘接层-基体的 3 层模型, 分析了准静态下的应变传递关系。周广东等^[9]认为任何结构都可以简化为 3 层模型, 并基于文献[4]的模型, 分析了不同因素对应变传递率的影响。上述分析均未考虑胶体与光纤的弹性模量比, 吴入军等^[10]考虑了胶体与光纤弹性模量比, 分析了表贴式结构 FBG 传感器的应变传递率, 推导了基体与光纤之间的应变函数, 并探究了不同因素对应变传递率的影响。

一般认为光纤的弹性模量是中间层胶体弹性模量的 10 倍以上^[11-12], 从而在分析时忽略胶体与光纤弹性模量的比项。但实际结构中, 该项还与传感器的结构尺寸有关, 因此, 不能简单将其忽略。本文针对该问题, 在考虑胶体与光纤弹性模量比的情况下, 分析了不同因素对平均应变传递率的影响, 并与忽略该项时的平均应变传递率进行了对比分析。

2 有无弹性模量比项的平均应变传递率

表贴式裸 FBG 的结构主要由光纤-粘接体-基体组成, 因此, 通过 3 层模型^[11-12]进行分析。其纵截面如图 1(a) 所示, 横截面如 1(b) 所示。其中, $2L$ 为胶体的长, D 为胶体的宽。根据纵向结构的一半长度建立坐标系, 如图 2 所示。其中, 光纤的半径为 r_f , 光纤圆心到基体的距离为 r_b , x 为纵向光纤到圆心的距离, r 为横向胶体到圆心的距离。

由于光纤微元和粘接体的微元受力平衡, 得到粘接体的剪切应力为^[12]

$$\tau_b(x, r) = -\frac{\pi r_f^2 E_f}{D} \left(\frac{d\epsilon_f}{dx} + \frac{8Dr + \pi D^2 - 8\pi r_f^2}{8\pi r_f^2} \cdot \frac{E_b}{E_f} \frac{d\epsilon_b}{dx} \right), \quad (1)$$

式中, E_f 为光纤的弹性模量, E_b 为胶体的弹性模量, ϵ_f 为光纤在 x 方向的应变, ϵ_b 为胶体在 x 方向的应变。保留(1)式中胶体和光纤弹性模量的比项,

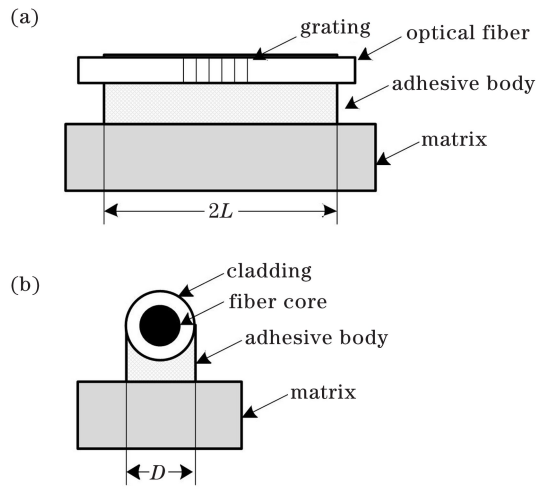


图 1 表贴式 FBG 传感器的结构示意图。

(a) 纵截面; (b) 横截面

Fig. 1 Schematic diagram of surface-bonded FBG sensor structure. (a) Lengthwise section; (b) cross section

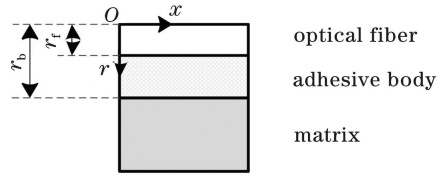


图 2 结构坐标系

Fig. 2 Structural coordinate system

推导出平均应变传递率, 并与忽略该项得到的平均应变传递率^[10]进行对比。

可将光纤结构的应变变化率近似为胶体的应变变化率, 即 $\frac{d\epsilon_f}{dx} \approx \frac{d\epsilon_b}{dx}$ ^[4,12], 将胶体的剪切应力近似为^[12]

$$\tau_b(x, r) = G_b \gamma(x, r) \approx \frac{E_b}{2(1+u_b)} \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (2)$$

式中, G_b 为胶体的剪切模量, $\gamma(x, r)$ 为胶体的剪切应变, u_b 为胶体的泊松比, u 为胶体在 x 方向的位移。将(2)式和应变变化率的关系带入(1)式, 并对 r 从 r_f 到 r_b 进行积分, 得到

$$u_{bx} - u_f = -\frac{2\pi r_f^2 E_f (1+u_b) (r_b - r_f)}{DE_b} \left[1 + \frac{4D(r_b + r_f) + \pi D^2 - 8\pi r_f^2}{8\pi r_f^2} \frac{E_b}{E_f} \right] \frac{d\epsilon_f}{dx}, \quad (3)$$

式中, u_{bx} 、 u_f 分别为基体和光纤的纵向位移, 令

$$k_{in}^2 = \frac{1}{\frac{2\pi r_f^2 E_f (1+u_b) (r_b - r_f)}{DE_b} \left[1 + \frac{4D(r_b + r_f) + \pi D^2 - 8\pi r_f^2}{8\pi r_f^2} \frac{E_b}{E_f} \right]}, \quad (4)$$

(4)式中的 k_{in}^2 包含弹性模量比项,可将(3)式简化为

$$u_{br} - u_f = -\frac{1}{k^2} \frac{d\epsilon_f}{dx}, \quad (5)$$

式中, $k = k_{in}$,用(5)式对 x 求导可得到

$$\frac{d^2\epsilon_f(x)}{dx^2} + k^2\epsilon_b - k^2\epsilon_f = 0, \quad (6)$$

式中, ϵ_b 为基体 ϵ_s 的应变, $\epsilon_f(x)$ 为光纤在 x 处的应变,设通解并带入边界条件,可得到最终解的形式^[4,11-12]为

$$\epsilon_f(x) = \epsilon_s \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]. \quad (7)$$

光纤 x 位置处的应变传递率为

$$\alpha(x) = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)}. \quad (8)$$

平均应变传递率为

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)}. \quad (9)$$

上述分析均为考虑弹性模量比时的平均应变传递率,在不考虑弹性模量比时, $k = k_{ex}$, k_{ex} 为不考虑弹性模量比时积分后的系数,可表示为^[11]

$$k_{ex} = \left[\frac{DE_b}{2\pi r_f^2 E_f (1 + u_b) (r_b - r_f)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

3 弹性模量比项对应变传递率的影响

为探究弹性模量比项对应变传递率的影响,通过数值模拟,分析了不同参数下光纤的平均应变传递率,并与文献[11]的结果进行对比。目前,表贴式FBG传感器结构的主要参数有光纤参数和粘接体的参数,光纤结构的参数变化不大,纤芯和包层的材料主要为二氧化硅,近似认为其参数相同^[4,13]。实验主要研究的是裸光纤,不考虑涂覆层的参数。分析时光纤的弹性模量为72 GPa,半径为0.125 mm,粘接体的参数如表1所示。

表1 粘接体的参数

Table 1 Parameters of adhesive

Parameter	Range of values
Modulus of elasticity/GPa	2.2-10.2
Poisson's ratio	0.25-0.45
Length/mm	10-30
Width/mm	0.05-10
Thickness/mm	0.25-4

图3为有无弹性模量比项的平均应变传递率随粘接体弹性模量的变化曲线,其中,无弹性模量比时

的平均应变传递率为文献[11]的模拟结果。可以发现,当粘接体的弹性模量为2.2~10.2 GPa时,有无弹性模量比项的平均应变传递率均随粘接体弹性模量的增加而增加,但两种情况下的平均应变传递率相差大于8%。图4为平均应变率随粘接体泊松比的变化曲线,可以发现,有无弹性模量比的平均应变传递率均随粘接体泊松比的增加而减小,且两种情况下的平均传递率相差大于8%,考虑弹性模量比项的平均应变传递率均小于无弹性模量比项的平均应变传递率。

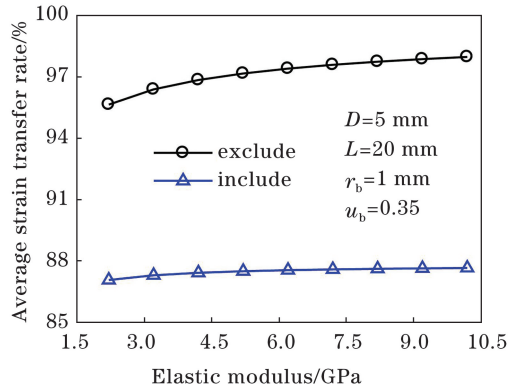


图3 平均应变传递率随弹性模量的变化曲线

Fig. 3 Change curve of average strain transfer rate with elastic modulus

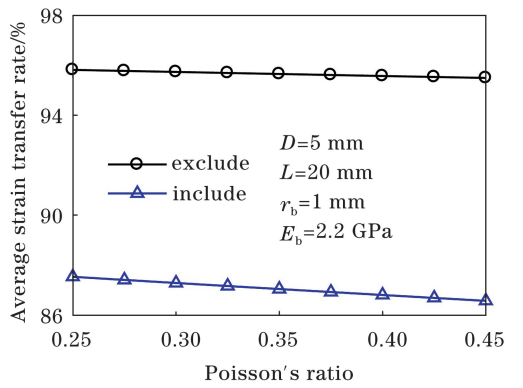


图4 平均应变传递率随泊松比的变化曲线

Fig. 4 Change curve of average strain transfer rate with Poisson's ratio

图5为平均应变传递率随 r_b 的变化曲线,可以发现,当 r_b 为0.25 mm到4 mm时,平均应变传递率均随 r_b 的增加而减小,但考虑弹性模量比项的平均应变传递率曲线的斜率较大。此外,在 r_b 为0.25 mm时,两种情况下的平均应变传递率都超过95%,这表明当光纤靠近基体时,平均应变传递率较高,弹性模量比项对平均应变传递率的影响较小;当光纤远离基体时,弹性模量比项对平均应变传递率

的影响较大,使两者得到的平均应变传递率差值超过 20%。

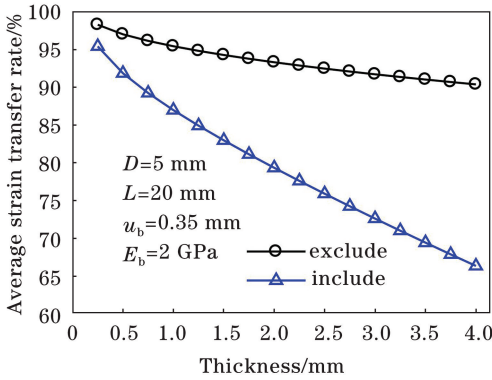


图 5 平均应变传递率随 r_b 的变化曲线

Fig. 5 Change curve of average strain transfer rate with r_b

图 6 为平均应变传递率随胶体宽度的变化曲线,可以发现,不包含弹性模量比项的平均应变传递率随胶体宽度的增加而增加,且增加速度逐渐减缓;而包含弹性模量比项的平均应变传递率随胶体宽度的增加先增加后减小,且在胶体宽度较小时,弹性模量比项对平均应变传递率的影响较小。当胶体宽度增加时,弹性模量比项对平均应变传递率的影响较大,两种情况下的平均应变传递率相差超过 8%。

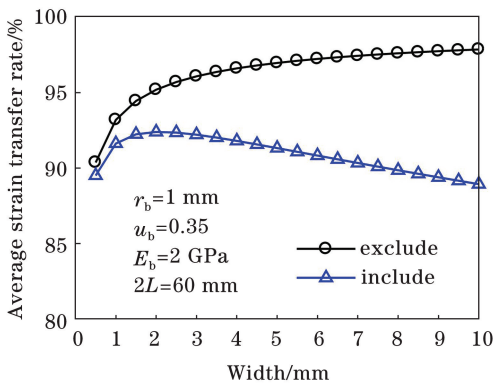


图 6 平均应变传递率随胶体宽度的变化曲线

Fig. 6 Change curve of average strain transfer rate with colloid width

图 7 为平均应变传递率随胶体长度的变化曲线,可以发现,有无弹性模量比项的平均应变传递率均随胶体长度的增加而增加。实际中胶体的长度大于光栅的长度,导致平均应变传递率变高。实验主要分析了弹性模量比对平均应变传递率的影响,为了与文献[11]的结论进行对比,只考虑了胶体的总长度。此外,有无弹性模量比时的平均应变传递率相差小于 5%,这表明弹性模量比对平均应变传递率的影响较小。

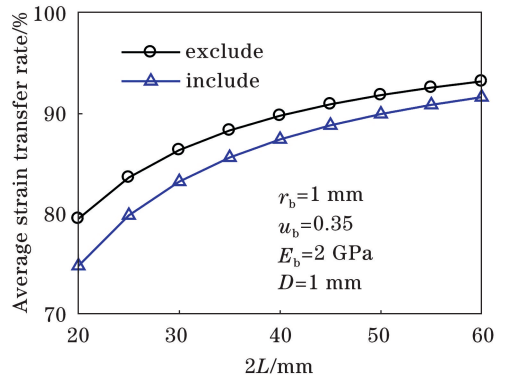


图 7 平均应变传递率随胶体长度的变化曲线
Fig. 7 Change curve of average strain transfer rate with colloid length

在表贴式 FBG 传感器的研究中,文献[10]在考虑胶体与光纤弹性模量比的情况下,对实验和理论的结果进行对比,发现两者的结果相差 8%。此外,通过数值模拟发现,应变传递率随光纤长度的增加而增加,随胶体厚度的增加而减小。文献[14]发现光纤长度为 40 mm,宽度从 2 mm 变化到 11 mm 时,平均应变传递率随胶体宽度的增加而减小,与实验分析的结果一致。

4 结 论

在考虑胶体与光纤弹性模量比的情况下,分析了平均应变传递率随光纤不同参数的变化情况。仿真结果表明,考虑弹性模量比时,平均应变传递率随胶体弹性模量的增加而增加,随胶体泊松比的增加而减小,随胶体厚度的增加而减小,随胶体宽度的增加先增加后减小,随胶体长度的增加而增加。对比考虑弹性模量比和不考虑弹性模量比情况下的平均应变传递率发现,在不同因素下两者的平均传递率均存在差异,且随胶体宽度的变化趋势不同,这表明考虑弹性模量比时,平均应变传递率在数值和趋势上会发生变化,此时分析的结果更接近实际情况。

参 考 文 献

[1] Xie K, Zhang H Y, Zhao Y S, et al. Structural health monitoring of power transmission system based on optical fiber sensor under transmission line galloping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (7): 070606.
谢凯, 张洪英, 赵衍双, 等. 导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070606.

[2] Tian S Z, Wen K, Wang D P. Study on damage

- location of steel beam based on long-gage fiber grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040603.
- 田石柱, 温科, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040603.
- [3] 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*, 2012, 13(7): 538-545.
- [4] 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.
- [5] Ansari F, Yuan L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- [6] Tian S Z, Zhang G Q, Wang D P. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0805005.
- 田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0805005.
- [7] Sun L, Li C, Li J, et al. Strain transfer analysis of a clamped fiber Bragg grating sensor [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(2): 188.
- [8] Chen G, Ding K Q, Feng Q B, et al. Strain transfer mechanism of end-bonding fiber 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.
- [9] Zhou G D, Li H N, Ren L, et al. Study on influencing parameters of strain transfer of optic fiber Bragg grating sensors [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(6): 169-173, 97.
- 周广东, 李宏男, 任亮, 等. 光纤光栅传感器应变传递影响参数研究[J]. *工程力学*, 2007, 24(6): 169-173, 97.
- [10] Wu R J, Zheng B L, Fu K K, et al. Influence of layered structure for surface-bonded FBG sensor on measured strain [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3183-3190.
- 吴入军, 郑百林, 付昆昆, 等. 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[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3183-3190.
- [11] Li H, Zhu L Q, Liu F, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1744-1750.
- 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1744-1750.
- [12] Zhang W X, He X F. Analysis of strain transfer factors of pasted optical fiber Bragg grating sensor [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013, 41(6): 82-86.
- 张文晓, 何秀凤. 粘贴式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析[J]. *工程勘察*, 2013, 41(6): 82-86.
- [13] Huang X D, Wang Y, Sun Y Y, et al. Mechanism analysis on the impact of coating to fiber Bragg grating strain transfer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(6): 1233-1240.
- 黄肖迪, 王源, 孙阳阳, 等. 涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(6): 1233-1240.
- [14] Bao T F, Li J M, Zhao J L. Modeling and sensitivity analysis of strain transfer between surface-bonded POFs and concrete [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(5): 59-64.
- 包腾飞, 李涧鸣, 赵津磊. 表面粘贴式塑料光纤与混凝土间应变传递模型及敏感性分析[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(5): 59-64.