

文章编号 1004-924X(2011)12-2941-06

## 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

吴俊<sup>1,2\*</sup>, 陈伟民<sup>1</sup>, 章鹏<sup>1</sup>, 刘立<sup>1</sup>, 刘浩<sup>1</sup>

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

**摘要:** 考虑光纤 Bragg 光栅 (FBG) 粘接层的材料特性会直接影响 FBG 传感器的应变测量精度, 本文根据粘接层应变传递模型, 结合应变传递系数  $K$  的表达式, 在确定粘接层结构尺寸参数的前提下, 仿真分析了粘接层弹性模量对应变传递系数  $K$  的影响。分析结果表明, 金属材料的应变传递效率明显优于有机胶的应变传递效率。进行了传递效果评价对比试验, 结果表明, 铅粘接层的应变传递系数维持在 0.98 左右, 环氧树脂粘接层的应变传递系数维持在 0.90 左右, 前者比后者的应变传递效率提高了约 8.9%, 显示将粘接材料由环氧树脂改进为铅后, 可大大提高应变测量的精度, 更加充分发挥光纤器件自身优越的应变测量能力。

**关键词:** 光纤传感; 光纤 Bragg 光栅传感器; 粘接层; 弹性模量; 应变传递系数

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2941

## Influence of bond layer characteristics on strain sensing properties of FBG sensors

WU Jun<sup>1,2\*</sup>, CHEN Wei-min<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Southwest Water Transport Research Department, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

\* Corresponding author, E-mail: wujun\_gd@126.com

**Abstract:** As material characteristics of a bond layer directly affect the measurement accuracy of Fiber Bragg Grating (FBG) strain sensors, this paper simulates the impact of elastic modulus of the bond layer materials on strain transfer coefficient  $K$  according to the bond layer strain transfer model and the formula of strain transfer coefficient  $K$  under the premise of determining the structure size parameters. The results show that the strain transfer efficiency of metal is superior obviously to that of the organic adhesive. A contrast test is carried out. Test results indicate that the strain transfer coefficient  $K$  of the lead maintains a level of 0.98 while that of epoxy maintains about 0.90, and the former's

收稿日期: 2011-04-22; 修订日期: 2011-06-22.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (No. 2007BAE15B04); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50975301)

transfer efficiency has increased by 8.9% as compared with that of the latter. By replacing epoxy with the lead, it can greatly improve the strain measurement precision, and can more fully exert fiber optic sensors' strain measurement ability.

**Key words:** optical fiber sensing; Fiber Bragg Grating (FBG) sensor; bone layer; elastic modulus; strain transfer coefficient

## 1 引言

布拉格光纤光栅<sup>[1]</sup> (Fiber Bragg Grating, FBG)应变传感器具有测量精度高、灵敏度好等优点,作为目前最受关注的光纤应变传感器,已被广泛应用于土木建筑<sup>[2]</sup>、军事装备、航天器件<sup>[3]</sup>等多个领域的结构状态监测。

为了实现结构应变监测,光纤光栅器件须以一定的连接方式与被测物固定连接,通过与被测物的协同变形,实现对被测物应变的测量。应变测量中,光纤光栅与被测物协同变形的程度表现为应变测量的效果。粘接层作为向光纤光栅器件传递应力的关键环节,其材料特性与结构尺寸均会对应力传递的效果产生影响<sup>[4]</sup>。

国内外学者针对粘接层对应变测量精度的影响进行了很多的研究,也有一些研究者针对传感器的应变测量灵敏度<sup>[5]</sup>及粘接层的应力传递特性<sup>[6-10]</sup>进行了深入的研究,并针对某一种特定有机胶材料,研究了粘接层长度、宽度、厚度等结构尺寸参数对应力传递特性的影响,给出了确定粘接层长度、宽度、厚度等结构尺寸参数的基本原则。然而,在粘接层的厚度、长度、宽度等参数满足应力传递基本要求的前提下,粘接层材料特性就成了影响应力传递的唯一因素,但迄今为止,国内外尚未见到针对不同粘接层材料特性对测量精度影响的研究报道,更没有进行相关试验验证。

此外,以往粘接层仅限于有机胶材料,最近重庆大学研制成功的光纤传感器金属连接方法<sup>[11]</sup>能够在不对光纤传感器性能造成影响的前提下,将粘接层材料由有机胶扩展到金属材料,使得对粘接层材料的选择更有余地。在这样的背景下,研究金属、有机胶等粘接层材料特性对光纤光栅传感器应变传感性能的影响,对于评价不同粘接层材料的应变传递效果,进行粘接层材料的优选,确保光纤光栅器件应变测量优越性能的发

## 2 粘接层应变传递模型

应变测量中,应变传递过程可简化为 3 个环节:基体、粘接层、光纤光栅器件,其结构原理示意简图如图 1 所示。

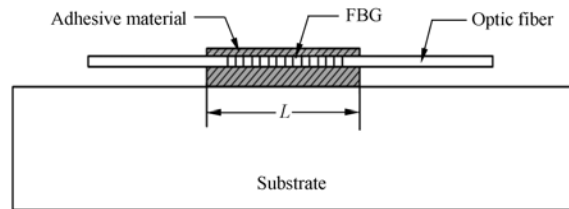


图 1 光纤光栅应变测量原理图

Fig. 1 Strain sensing principle of fiber Bragg grating

图 1 为应变测量原理图,其对应的应力传递示意图如图 2 所示。

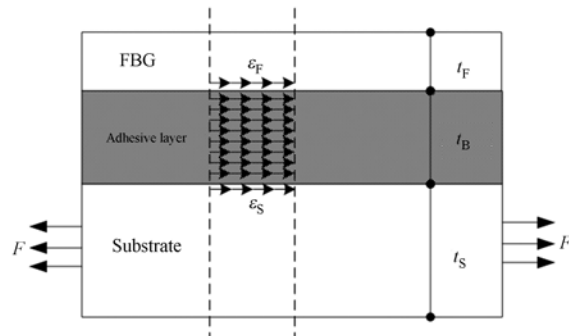


图 2 应力传递过程示意图

Fig. 2 Scheme of strain transfer process

由图 2 可见,直径为  $t_f$  的光纤器件通过厚度为  $t_b$  的粘接层粘贴在厚度为  $t_s$  ( $t_s \gg t_f, t_b$ ) 的基体上,当基体受到沿轴向外力  $F$  作用时,基体产生的应变通过粘接层传递给光纤传感器。根据光纤传感器截面远小于基体截面积、基体应力均匀等条件,依据弹性力学方程,光纤传感器感受到的应变  $\epsilon_f$  与基体实际应变  $\epsilon_s$  之间的关系<sup>[9]</sup>如式(1):

$$\epsilon_F = \left(1 - \frac{1}{\cosh \bar{\Gamma}}\right) \left(\frac{E_S t_S}{E_S t_S + E_F t_F}\right) \left(\frac{E_S A_S}{E_S A_S + E_F A_F + E_B A_B}\right) \epsilon_S, \quad (1)$$

其中,  $\bar{\Gamma} = \frac{E_B L^2}{E_F t_F t_B (1 + \nu)} \left(1 + \frac{t_F E_F}{t_S E_S}\right)$ ,

式中  $E_F, E_B, E_S$  分别为光纤器件、粘接层材料、金属基体的杨氏模量;  $\nu$  为粘接层材料的泊松比;  $L$  为粘接层长度;  $A_S, A_B, A_F$  分别为基体、粘接层、光纤器件的截面积。

定义由粘接层决定的应力传递效率为  $K$ ,

$$K = \frac{\epsilon_F}{\epsilon_S}, \quad (2)$$

则

$$K = \left(1 - \frac{1}{\cosh \bar{\Gamma}}\right) \left(\frac{E_S t_S}{E_S t_S + E_F t_F}\right) \left(\frac{E_S A_S}{E_S A_S + E_F A_F + E_B A_B}\right), \quad (3)$$

式(3)表明,在基体确定的情况下,传递效率  $K$  受粘接层弹性模量、结构尺寸参数的综合影响。

### 3 粘接层弹性模量对应力传递性能的影响

实际情况中,由于粘接层的结构参数已确定,所以粘接层弹性模量成为影响应变传递效率  $K$  的唯一因素。

设测量基体为钢质材料,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.39,尺寸为 10 mm × 60 mm,光纤传感器件弹性模量为 70 GPa,直径为 0.125 mm,粘接层厚度为 2 mm,将以上参数代入式(3),

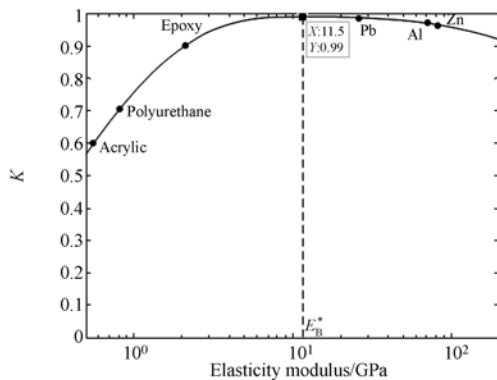


图 3 应变传递效率随粘接层弹性模量的变化曲线  
Fig. 3 Change curve of strain transfer efficiency with bond layer elastic modulus

可得到如图 3 所示的应变传递系数随弹性模量变化的曲线图。

由图 3 可见,当粘接层弹性模量由 0 增加至  $E_B^*$  时,应变传递效率  $K$  随着粘接层弹性模量的增加而增加,且该区间内应变传递效率对弹性模量的变化较为敏感;当弹性模量达到  $E_B^*$  时,应变传递效率  $K$  达到最大值;当粘接层弹性模量由  $E_B^*$  继续增加时,应变传递效率  $K$  随着粘接层弹性模量的增加而减小,但该区间内应变传递效率对弹性模量的变化敏感度大大降低。

令  $\frac{dK}{dE_B} = 0$ , 可得

$$\sinh(\sqrt{K_2 E_B}) (K_1 + E_B A_B) - 2\sqrt{K_2 E_B} A_B (\cosh^2(\sqrt{K_2 E_B}) - \cosh(\sqrt{K_2 E_B})) = 0, \quad (4)$$

式(4)中

$$K_1 = E_S A_S + E_F A_F, K_2 = \frac{L^2}{2(1 + \nu) t_B E_F t_F}.$$

由式(4),可得最优化弹性模量  $E_B^* = 11.5$  GPa。

分别将几种常用金属材料及有机粘接剂材料弹性模量代入式(3),得到如表 1 所示的各种粘接层材料对应的应变传递系数。

表 1 多种粘接层材料对应的应变传递系数

Tab. 1 Strain transfer coefficients of different materials

粘接层材料	弹性模量/GPa	应变传递系数
铅(Pb)	17	0.982 8
铝(Al)	70	0.975 6
锌(Zn)	82	0.963 5
镍(Ni)	180	0.960 4
环氧树脂胶(Epoxy)	1.888	0.884 7
丙烯酸树脂(Acrylic)	0.55	0.594 1
聚氨酯粘接剂脂(Polyurethane)	0.825	0.706 5

由表 1 可见,由于有机胶类粘接材料的弹性模量均小于最优化弹性模量  $E_B^*$ ,而金属类粘接材料弹性模量均大于最优化弹性模量  $E_B^*$ ,所以金属材料的应变传递效率明显优于有机胶的应变传递效率。当铅作为传递层时,应变传递效率高达 0.982 8,相比常用环氧树脂粘接剂应变传递效率 0.88 提高了 11%。

将表 1 中多种粘接层材料对应的数据点标注在图 3 中可见,有机胶类粘接材料的弹性模量均

处于  $0 \sim E_B^*$  间,由于该区间内应变传递系数对弹性模量的变化较为敏感,所以由于有机胶类材料本身不可避免的蠕变、老化所引起的弹性模量变化就会引起较大测量误差。金属类粘接材料的弹性模量均大于  $E_B^*$ ,该区间内应变传递系数对弹性模量的变化敏感度较低,且金属的材料特性稳定性较高,所以金属粘接材料的应变传递效率基本比较稳定。相比有机胶类粘接剂而言,金属材料不但可以实现应变的精确监测,而且可以保证应变的稳定监测。

#### 4 有机胶与金属材料粘接层传递效果对比试验

为了验证理论分析的正确性,进行了有机胶粘接层与金属粘接层传递效果评价对比试验。

有机胶选用环氧树脂胶,金属粘接层材料选用应变传递效率最高的铅。为了便于分析,将利用环氧树脂与铅连接固定的两只 FBG 均固定于一根钢丝上进行拉伸试验。利用铅作为粘接材料将 FBG 固定在钢丝上的实物图如图 4 所示。

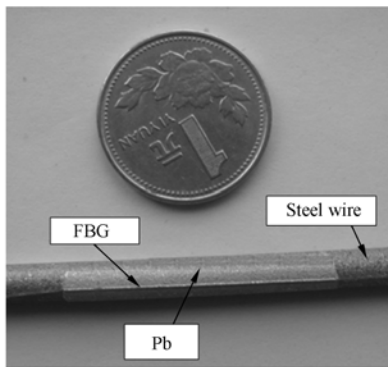


图 4 铅为粘接材料的 FBG 固定连接实物图  
Fig. 4 Metal lead packaged FBG sensor

利用材料试验机对固定有光纤光栅的钢丝进行了拉伸试验,试验现场如图 5 所示。

拉伸试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知,两种粘接层材料的拉伸试验结果均呈较好的线性,铅材料对应的灵敏度系数为 0.162 3,环氧树脂胶对应的灵敏度系数为 0.149,铅的应变传递效果较环氧树脂胶提高 8.9%。

通过给材料试验机加装引伸计测量钢丝实际应变  $\epsilon_s$ ,FBG 感知的应变  $\epsilon_f$  可通过 FBG 波长

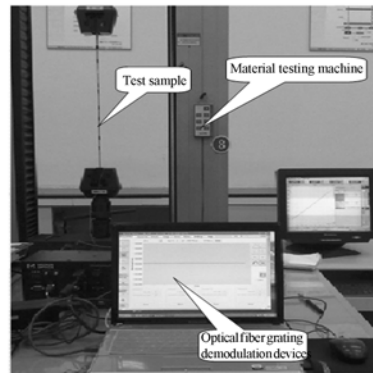


图 5 拉伸试验现场  
Fig. 5 Test site

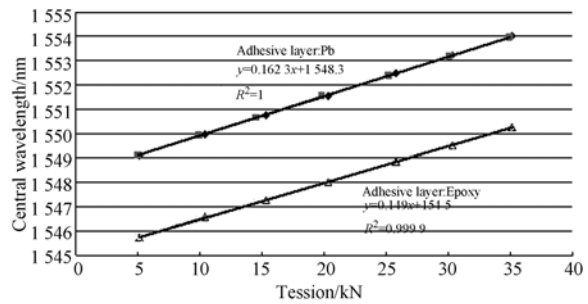


图 6 两种粘接层材料的拉伸试验结果

Fig. 6 Experiment results of two bond layer materials

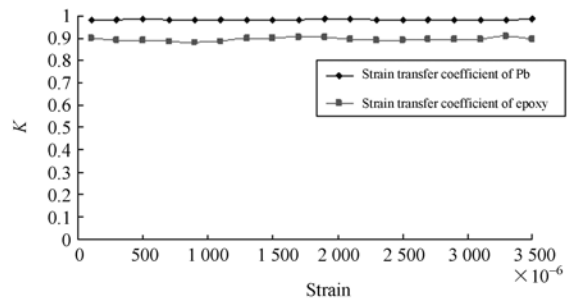


图 7 铅与环氧树脂的应变传递系数对比

Fig. 7 Comparison of strain transfer coefficient between lead and epoxy

改变量除以 FBG 应变灵敏系数计算得到。计算各种应变值时,两种粘接层材料计算得到的应变传递系数见图 7。

由图 7 可见,当铅为粘接层材料时,应变传递系数平均值为 0.98,无明显波动;环氧树脂粘接层的应变传递系数维持平均值为 0.90,有小幅波动。结果表明,通过将粘接材料由环氧树脂改进为铅后,可大大提高应变测量的精度,能够更加充分发挥光纤器件自身优越的应变测量能力。该试

验结果与理论分析结果较为接近,证明了理论模型的正确性。

## 5 结 论

本文研究了光纤 Bragg 光栅传感器粘接层材料特性对其应变传递性能的影响。仿真得出了应变传递效率随粘接层弹性模量变化的趋势线,并计算出了多种金属材料、有机胶粘接层材料的应变传感效果。分析结果表明,金属材料的应变传递效率明显优于有机胶的应变传递效率。当铅作为传递层时,应变传递效率高达 0.982 8,相比常用的环氧树脂粘接剂应变传递效率 0.88 提高了 11%。

进行了环氧树脂胶与金属铅的传递效果的对比

试验,试验结果表明,铅粘接层的实际应变传递系数为 0.98,而环氧树脂粘接层的实际应变传递系数为 0.90,铅的应变传递效率较环氧树脂粘接剂应变传递效率提高了约 8.9%。说明将粘接材料由环氧树脂改进为铅后,大大提高了应变测量的精度,能够更加充分发挥光纤器件自身优越的应变测量能力。该试验结果与理论分析结果较为接近,证明了理论模型的正确性。

该项研究在粘接材料弹性模量基本稳定(短时间内测量)的情况下进行了应变传递效果分析评价,但是由于材料的老化蠕变,粘接材料在长期使用中弹性模量会波动变化,为了更好地分析应变测量的效果,还需在后续的工作中针对粘接材料弹性模量波动对应变传递精度的影响进行分析研究。

## 参考文献:

- [1] 李剑芝,杜彦良,刘晨曦. 采用在线成型工艺的光纤光栅传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 19(9): 2069-2075.  
LI J ZH, DU Y L, LIU CH X. FBG strain sensor based on online forming[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 19(9): 2069-2075. (in Chinese)
- [2] 吴俊,陈伟民,章鹏,等. 基于锚固区光纤布拉格光栅应变传感的智能缆索技术[J]. 中国激光, 2010, 32(1): 69-75.  
WU J, CHEN W M, ZHANG P, et al.. Smart cable technology based on fiber bragg grating strain sensing in cable anchorage zone[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 32(1): 69-75. (in Chinese)
- [3] 尚柏林,宋笔锋,万方义. 光纤传感器在飞行器结构健康监测中的应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2008, 3: 7-10.  
SHANG B L, SONG B F, WAN F Y. Application of optical fiber sensors in structural health monitoring of flight vehicle[J]. *Optical Fiber&Electric Cable*, 2008, 3: 7-10. (in Chinese)
- [4] 陈伟民,张娅玲,章鹏,等. FBG 旁瓣对复用解调的影响及旁瓣抑制方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2672-2677.  
CHEN W M, ZHANG Y L, ZHANG P, et al.. Affects of sidelobes of FBG on multiplexing demodulation and suppression methods for sidelobes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2672-2677. (in Chinese)
- [5] 何俊,周智,董惠娟,等. 灵敏度系数可调布拉格光栅应变传感器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2339-2346.  
HE J, ZHOU ZH, DONG H J, et al.. Design of coefficient-adjustable FBG strain sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2339-2346. (in Chinese)
- [6] 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.  
LI D SH, LI H N. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. *Chin. J. Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, 37(4): 435- 441. (in Chinese)
- [7] 李宏男,周广东,任亮. 非轴向力下埋入式光纤传感器应变传递分析[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 787-793.  
LI H N, ZHOU G D, REN L. Strain transfer model of fiber sensors under non-axial stress[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 787-793. (in Chinese)
- [8] 刘德华,金伟良,张玉. 光纤传感器与结构基体的应变传递关系[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(11): 1847-1851.  
LIU D H, JIN W L, ZHANG Y. Strain transfer relationship between optical fiber sensor and structure matrix [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(11): 1847-1851. (in Chinese)
- [9] CHENG CH CH, LO Y L, PUN B S, et al.. An investigation of bonding-layer characteristics of sub-

strate-bonded fiber bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11):3907-3915.

- [10] YANG K W, LIU A G, CHENG C C, *et al.*. Topology and shape optimizations of substrate using for chirp fiber Bragg grating spectrum tuning[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2002, 20(7):1182-1187.

- [11] 陈伟民, 吴俊, 章鹏, 等. 光纤应力/应变传感器无胶连接方法: 中国, 201010250217[P]. 2010-08-10. CHEN W M, WU J, ZHANG P. Metal connection method for optical fiber stress /strain sensors: China, 201010250217 [P]. 2010-08-10. (in Chinese)

#### 作者简介:



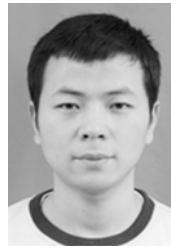
吴俊(1981—),男,江苏南通人,博士研究生,助理研究员,2007年于重庆大学获得光学工程硕士学位,主要从事光电技术及系统等方面的研究。E-mail: wujun\_gd@126.com



刘立(1987—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事光纤传感器、光纤通信网络、结构健康检测等方面研究。E-mail: ligood@163.com



陈伟民(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光电技术、精密仪器、光纤传感等方面的研究。E-mail: wm-chen0802@126.com.cn.



刘浩(1987—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事光纤传感器、精密机械及仪器、智能结构等方面研究。E-mail: liuhao338500@163.com



章鹏(1970—),男,湖北荆州人,博士,副教授,主要从事光纤传感及信号处理方面的研究。E-mail: zhangpeng@cqu.edu.cn.