

文章编号: 0258-7025(2002)12-1089-04

# 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其 传感特性研究

周 智<sup>1</sup>, 赵雪峰<sup>1</sup>, 武湛君<sup>2</sup>, 万里冰<sup>2</sup>, 欧进萍<sup>1</sup>  
(哈尔滨工业大学<sup>1</sup> 土木工程学院, <sup>2</sup> 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要** 提出了一种光纤光栅(FBG)的毛细钢管封装工艺,并通过材料试验和水浴法试验对其应变与温度传感特性进行了研究。与裸光纤光栅的测试结果比较表明,毛细钢管封装工艺基本不改变光纤光栅的应变传感特性,但是温度灵敏度系数提高了约 2.5 倍。经过该工艺封装的光纤光栅可以探测识别 1  $\mu\epsilon$  与 0.05  $^{\circ}\text{C}$  的应变与温度变化。

**关键词** 光纤光栅,封装工艺,应变传感,温度传感

中图分类号 TP 212; TN 818 文献标识码 A

## Study on FBG Sensor's Steel Capillary Encapsulating Technique and Sensing Properties

ZHOU Zhi<sup>1</sup>, ZHAO Xue-feng<sup>1</sup>, WU Zhan-jun<sup>1</sup>, WAN Li-bin<sup>2</sup>, OU Jin-ping<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> School of Civil Engineering, <sup>2</sup> School of Astronautics,  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090)

**Abstract** In consideration of bare optical fiber being fragility, the steel capillary encapsulating technique for FBG sensor was developed in this study, and then the temperature and strain sensing properties of the encapsulated FBG sensor were experimentally studied on material test system and under hot water, respectively. The comparison of the experimental results between encapsulated fiber and bare fiber indicated that the strain sensing properties of the encapsulated FBG sensor are nearly the same as that of bare FBG, however, the temperature sensing ability of encapsulated FBG sensor is improved and the sensitivity coefficient is 2.5 times as much as that of bare FBG. The strain and temperature sensing precisions of the encapsulated FBG are 1  $\mu\epsilon$  and 0.05  $^{\circ}\text{C}$ , respectively. The encapsulated FBG is proper for application in civil engineering.

**Key words** fiber Bragg grating, encapsulating technique, strain sensing, temperature sensing

## 1 引 言

光纤光栅已在很多领域得到应用,文献[1,2]综述了布拉格光栅传感器在航空航天、复合材料、混凝土、高压输电线、医学等领域的部分应用研究。近年来,光纤光栅已被作为一种重要的传感手段,如美国的 Sutapun 等<sup>[3]</sup>用钯膜封装光纤光栅,利用钯吸氢后改变光栅中心波长的能力制作了氢传感器;新加坡的 Murukeshan 等<sup>[4]</sup>将光纤光栅埋入智能复合材

料监测其固化过程;Chan 等<sup>[5]</sup>用光纤光栅测量了复合材料加固的混凝土应变;英国的 Gwandu 等<sup>[6]</sup>用光纤光栅同时测量了结构的应变与曲率;香港的 Ho 等<sup>[7]</sup>用光纤光栅研究了结构的动静态测量,并得到 2.6  $\mu\epsilon$  的分辨率等。光纤光栅的传感能力已经得到认同。

由于裸光纤光栅特别纤细,外径约为 125  $\mu\text{m}$ ,其主要成分是  $\text{SiO}_2$ ,因此特别脆弱,尤其其它的抗剪

收稿日期: 2002-05-08; 收到修改稿日期: 2002-06-17

基金项目: 国家 863 计划重大项目(2001AA602023)与国家高技术应用发展项目(1999-2062)。

作者简介: 周智(1973—),男,湖南道县人,哈尔滨工业大学土木工程学院讲师,博士研究生,主要从事智能传感元件与结构健康监测研究。E-mail: zhizhou@263.net

能力很差, 直接将其作为传感器在工程实际中遇到了布设工艺的大难题。目前国内外对光纤光栅的封装工艺研究很少, 尤其是针对工程应用的封装工艺未见报道。因此, 针对需要解决的问题研究实用的光纤光栅的封装工艺意义重大。

针对土木工程粗放式施工的特点, 本文将研究光纤光栅的毛细钢管封装工艺, 并通过材料试验和水浴法试验对其应变与温度传感特性进行研究。

## 2 光纤光栅的应变和温度传感模型

光纤布拉格光栅(FBG)中心波长  $\lambda$  可表达为<sup>[8]</sup>

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中,  $n$  为纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期。

不考虑光纤光栅应变与温度的耦合作用, 光纤光栅有应变与温度效应

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left[ 1 - \frac{n^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right] \varepsilon + \left[ \alpha + \frac{1}{n}\zeta \right] \Delta T \quad (2)$$

式中,  $\Delta\lambda$  为波长变化,  $p_{11}$  与  $p_{12}$  为光弹常数,  $\nu$  为泊松比,  $\varepsilon$  为应变,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\zeta$  为热光常数,  $T$  为温度。

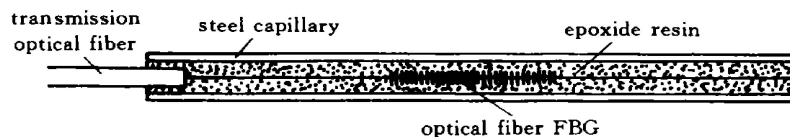


图 1 光纤光栅毛细钢管封装示意图

Fig. 1 Sketch of steel capillary encapsulating for FBG

## 4 毛细钢管封装光纤光栅的应变与温度传感特性

### 4.1 试验设备与材料

采用的光纤是通信用单模光纤, 光栅由紫外侧写入而成。采用的毛细钢管外径为 1.2 mm, 内径 0.8 mm, 长度为 9 cm。接头采用通用的光纤 FC/APC 跳线头。布拉格中心波长识别系统采用 FBG-IS (Fiber Bragg Grating-Interrogation System)。该仪器基于 F-P (Fabry-Perrot) 干涉原理对布拉格反射谱中心波长进行解调, 波长分辨率为 1 pm, 扫描范围为 1530~ 1570 nm, 扫描频率为 50 Hz。

### 4.2 毛细钢管封装光纤光栅的应变传感特性

光纤光栅的应变传感特性可能会因为封装材料

$$\text{令 } K_\varepsilon = 1 - \frac{n^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], K_T = \left[ \alpha + \frac{1}{n}\zeta \right], \text{ 得}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T \quad (3)$$

式中,  $K_\varepsilon$  为光纤光栅应变传感灵敏度系数,  $K_T$  为光纤光栅温度传感灵敏度系数。对于纤芯为纯石英的光纤情况,  $K_\varepsilon = 0.78 \times 10^{-6}$  左右,  $K_T = 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  左右。但是, 由于采用的光纤不同、写入光栅的工艺不同以及退火工艺的差别, 不同光纤光栅的传感灵敏度会有差异, 尤其光纤光栅经过封装后, 封装材料会极大地改变光纤光栅的传感特性, 因此光纤光栅必须经过标定才能用作实际测量。

## 3 光纤光栅毛细钢管封装工艺

光纤光栅的毛细钢管封装工艺如图 1 所示, 即将光纤光栅用环氧树脂封装在毛细钢管内, 钢质为不锈钢。封装时, 力图保证光纤光栅平直并位于毛细钢管的轴线上, 而且使光栅处于管的正中部位。注入环氧树脂时, 要适当加热, 目的是增加环氧树脂的流动性, 保证管内充满密实, 并减小形成气泡的可能性。

的应变传递原因而改变。本文采用万能材料试验机拉伸法进行毛细钢管封装光纤光栅的应变传感特性研究, 即将 2 根中心波长为 1552 nm 的管式封装光纤光栅用丙烯酸脂(俗称 J39)胶粘剂粘贴于经过抛光处理的钢板上, 并在相应位置布设高精度应变片, 然后将钢板在万能材料试验机上进行拉伸, 保证毛细钢管封装光纤光栅与应变片发生相同的应变值。经过多次反复加载, 得到的结果分别如图 2(a), (b) 所示。

为了比较, 将中心波长分别为 1548 nm 和 1554 nm 的两根同样工艺制作的裸光纤光栅用 502 胶粘剂粘贴于经过抛光处理的钢板上, 并在相应位置布设高精度应变片, 然后将钢板在万能材料试验机上进行张拉试验, 多次拉伸后得到的波长变化-应变关

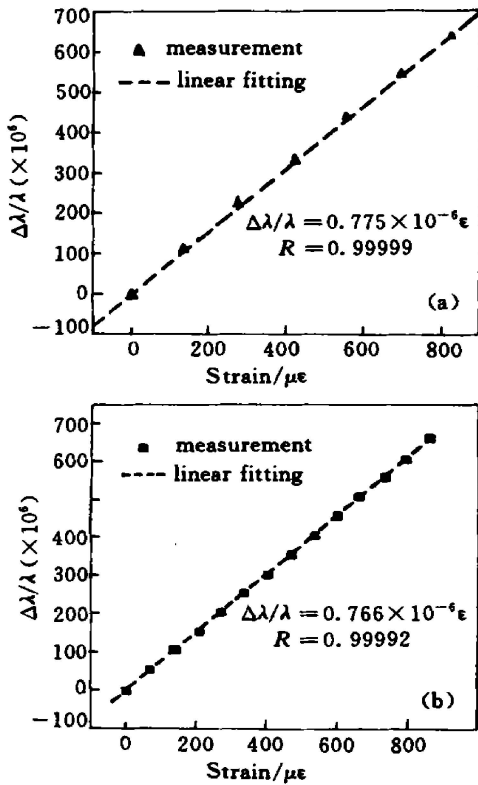


图 2 封装光纤光栅 1(a) 和 2(b) 的波长增量与应变关系  
Fig. 2 Relationship of wavelength increment and strain for encapsulated FBG 1 (a) and 2(b)

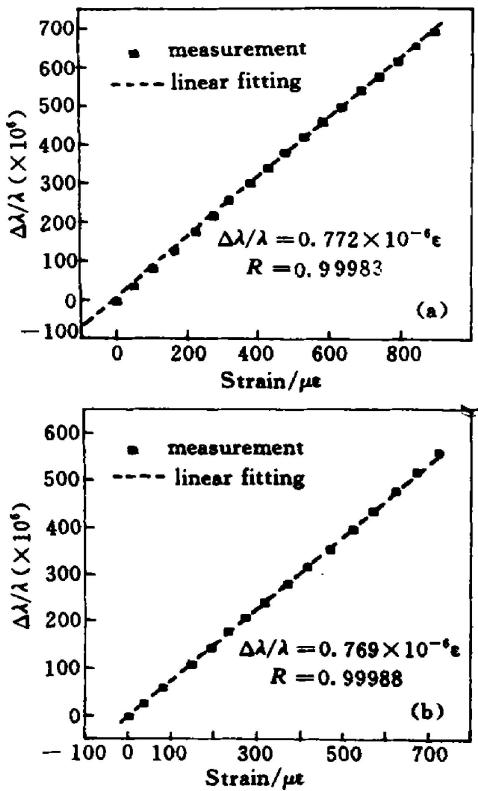


图 3 1548 nm(a) 和 1554 nm(b) 裸光纤光栅波长增量与应变关系  
Fig. 3 Relationship of wavelength increment and strain for 1548 nm (a) and 1554 nm (b) bare FBGs

系结果分别如图 3(a), (b) 所示。

从毛细钢管封装光纤光栅的波长变化-应变关系曲线可以看出, 毛细钢管封装光纤光栅应变传感的线性度很好, 相关系数均达 0.9999 以上。灵敏度系数取 2 个毛细钢管封装光纤光栅标定值的平均值, 即  $K_\epsilon = (0.775 + 0.766) \times 10^{-6}/2 \approx 0.77 \times 10^{-6}$ , 而两个裸光纤光栅的灵敏度系数平均值为  $K_\epsilon = (0.772 + 0.769) \times 10^{-6}/2 \approx 0.77 \times 10^{-6}$ , 两者吻合很好, 从而说明毛细钢管光纤光栅封装工艺基本没有改变光纤光栅的应变传感特性。

### 4.3 封装光纤光栅的温度传感特性研究

为了有效地调节与保持温度, 同时保证光纤光栅均匀地感应温度, 采用水浴法对毛细钢管封装光纤光栅进行标定, 即将 2 根中心波长为 1552 nm 的毛细钢管封装光纤光栅置于温度可调的水浴锅中, 并在紧靠光纤光栅的附近放置经质量标准站标定的高精度水银温度计。水银温度计的精度为 0.1  $^\circ\text{C}$ , 量程分别为 0  $^\circ\text{C}$ ~ 50  $^\circ\text{C}$  和 50  $^\circ\text{C}$ ~ 100  $^\circ\text{C}$ 。记录温度恒定下的光纤光栅波长与温度值, 得到图 4(a), (b) 的结果。

为了对比, 采用同样的方法对 2 根中心波长为

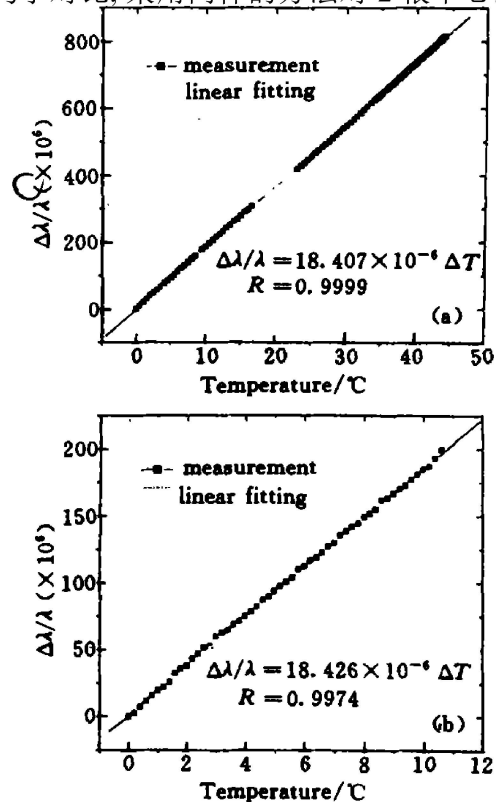


图 4 封装光纤光栅 1(a) 和 2(b) 的波长增量与温度变化关系  
Fig. 4 Relationship of wavelength increment and temperature for encapsulated FBG1 (a) and FBG2 (b)

1554 nm 的光纤光栅进行水浴法温度传感试验, 得到图 5(a), (b) 的结果。

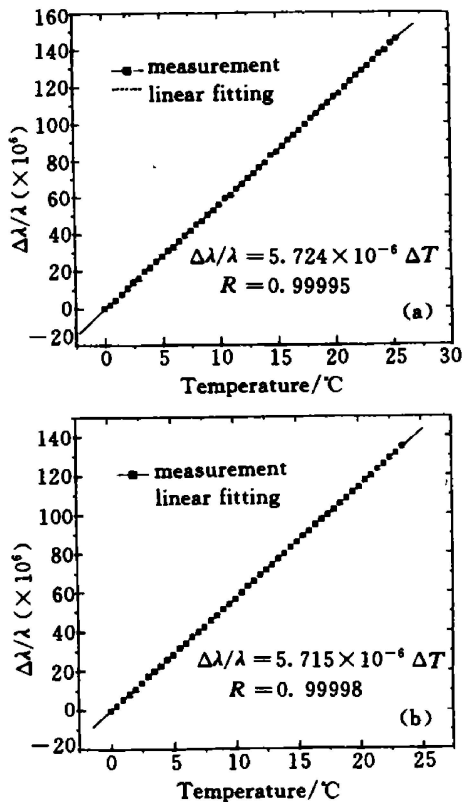


图 5 裸光纤光栅 1(a) 和 2(b) 的波长增量与温度变化关系

Fig. 5 Relationship of wavelength increment and temperature for bare FBG1 (a) and FBG2 (b)

从水浴试验得到的波长增量-温度变化关系曲线可以看出, 毛细钢管封装光纤光栅温度传感的线性度很好, 相关系数达 0.999 以上。温度传感灵敏度系数取 2 个封装光纤光栅标定值的平均值, 即  $K_{T_{\text{encapsulated}}} = 14.17 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \approx 14.2 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 。而裸光纤光栅温度传感的灵敏度系数取其平均值为  $K_{T_{\text{bare}}} = 5.719 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \approx 5.72 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 。比较两者的差异,  $K_{T_{\text{encapsulated}}} \approx 2.5 K_{T_{\text{bare}}}$ 。封装光纤光栅的温度灵敏度系数大大超过裸光纤光栅的原因是毛细钢管的热膨胀系数远远大于主要成分是  $\text{SiO}_2$  的光纤, 在温度变化过程中, 管式封装的光纤光栅与毛细钢管之间形成拉应力, 从而提高了它的温度灵敏度系数。根据试验得到的裸光纤光栅与毛细钢管封装的光纤光栅传感灵敏度系数, 对于中心波长为 1550 nm 的光纤光栅而言, 裸光纤光栅的应变与温度传感系数分别为:  $1.193 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $8.866 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ; 毛细

钢管封装的光纤光栅应变与温度传感系数分别为:  $1.193 \text{ pm}/\mu\epsilon$  与  $22.010 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。光纤光栅信号解调仪的波长分辨率为 1 pm, 因此, 裸光纤光栅可以识别  $1 \mu\epsilon$  与  $0.1 ^{\circ}\text{C}$  的应变与温度变化, 而管式封装光纤光栅可以识别  $1 \mu\epsilon$  与  $0.05 ^{\circ}\text{C}$  的应变与温度变化。

## 5 结论

将本文的结果与经过同样试验方法得到的裸光纤光栅传感灵敏度系数比较, 可以得到如下主要结论:

1) 毛细钢管光纤光栅封装工艺基本不改变光纤光栅的应变传感特性, 即光纤光栅的应变传感灵敏度仍为  $0.77 \times 10^{-6}$  左右, 但是该工艺大大改变了光纤光栅的温度传感特性, 其灵敏度系数约为裸光纤光栅的 2.5 倍, 即为  $14.2 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$  左右。

2) 裸光纤光栅可以准确识别  $1 \mu\epsilon$  与  $0.1 ^{\circ}\text{C}$  的应变与温度, 经过毛细钢管封装后, 大大提高了温度敏感特性, 可以达到识别温度  $0.05 ^{\circ}\text{C}$  的精度。

## 参考文献

- 1 Y. J. Rao. Recent progress in applications of ir fiber Bragg grating sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, **31**: 297~ 324
- 2 R. C. Tennyson, T. Coroy, G. Duck *et al.*. Fiber optic sensors in civil engineering structures [J]. *Can. J. Civ. Eng.*, 2000: 880~ 889
- 3 B. Sutapun, M. Tabir-Azar, A. Kazemi. Pd-coated elastooptic fiber optic Bragg grating sensors for multiplexed hydrogen sensing [J]. *Sensors and Actuators*, 1999, **B60**: 27~ 34
- 4 V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, K. S. Ong *et al.*. Cure monitoring of smart composites using fiber Bragg grating based embedded sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **A79**: 153~ 161
- 5 P. K. C. Chan, W. Jin, K. T. Lau *et al.*. Multi-point strain measurement of composite-bonded concrete materials with a RF-band FMCW multiplexed FBG sensor array [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **A87**: 19~ 25
- 6 B. A. L. Gwandu, X. W. Shu, Y. Liu *et al.*. Simultaneous measurements of strain and curvature using superstructure fibre Bragg gratings [J]. *Sensors and Actuators*, 2002, **A96**: 133~ 139
- 7 H. L. Ho, W. Jin, C. C. Chan *et al.*. A fiber Bragg grating sensor for static and dynamic measurands [J]. *Sensors and Actuators*, 2002, **A96**: 21~ 24
- 8 G. Meltz. Overview of fiber grating based sensors [C]. *SPIE*, 2000, **2838**: 2~ 22