

文章编号: 1001-3806(2002)05-0385-03

## 一种封装的光纤 Bragg 光栅应变传感器\*

万里冰 张博明 王殿富 武湛君 赵雪峰 周 智  
(哈尔滨工业大学复合材料研究所, 哈尔滨, 150001) (哈尔滨工业大学土木工程系, 哈尔滨, 150090)

**摘要:** 采用不锈钢管对光纤布喇格(Bragg)光栅进行封装,封装后的光纤光栅作为应变传感器,灵敏系数为  $1.19\text{pm}/\mu$ , Bragg 中心反射波长与应变呈良好的线性关系。传感器能够与被测结构紧密结合,保证应变的有效传递,便于安装,适于实际工程中的应用。

**关键词:** 应变传感器;光纤 Bragg 光栅;封装

**中图分类号:** TN256 **文献标识码:** A

### A kind of fiber Bragg grating strain sensor with jacket

*Wan Libing, Zhang Boming, Wang Dianfu, Wu Zhanjun*  
(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)  
*Zhao Xuefeng, Zhou Zhi*  
(Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150090)

**Abstract:** A kind of fiber Bragg grating (FBG) strain sensor with stainless steel tube jacket is presented in this paper. The sensor has wavelength sensitivity coefficient to strain of  $1.19\text{pm}/\mu$  and excellent linearity was shown between the wavelength shift and the strain. The sensor can be bonded tightly to structure, which makes strain transferred effectively. It is very suitable for measurement of the strain in engineering.

**Key words:** strain sensor; fiber Bragg grating; encapsulation

## 引 言

应变是反映材料和结构力学特征的重要参数之一,从材料和结构中的应变分布情况能够得到构件的强度储备信息,确定构件局部位置的应力集中以及构件所受实际载荷状况,因此,应变的测量被广泛用于材料的性能测试、机械设备及其模型的受力和变形测量、工程结构的损伤检测、振动测试等方面。传统的应变测量多采用电阻应变片的方法,应变片本身容易受外界环境腐蚀,测量结果也容易受电磁干扰,一般情况下只能测量构件表面上的应变。

光纤传感器是近年来出现的一种新型传感器,由于其具有体积小、重量轻、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰等众多优点,极具发展前途和市场前景<sup>[1]</sup>。用于应变(应力)测量的光纤传感器主要有 3 种类型:利用双光束干涉技术的光纤迈克尔逊(Michel-

son)传感器和光纤马赫-泽德(Mach-Zehnder)传感器;利用多光束干涉技术的光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)传感器;光纤布喇格(Bragg)光栅传感器<sup>[2]</sup>。光纤 Bragg 光栅是在一段光导纤维纤芯中建立起的一种空间周期性的折射率分布,可以改变和控制光波在光纤中的传播。光纤 Bragg 光栅传感器由于其波长编码、绝对值测量以及在一路光纤上应用波分复用技术就可以实现分布式测量等优点,在传感技术领域引起了广泛关注,尤其是 1993 年 Hill 等人发明相位掩模方法写入光栅<sup>[3]</sup>,以及 Lemaire 提出的普通单模通讯光纤的低温栽氢增敏技术<sup>[4]</sup>,促使光纤光栅的制造成本降低,质量稳定性提高,其在通讯和传感技术领域的研究迅速成为热点。目前,国内外针对光纤 Bragg 光栅传感器的应用主要包括大型土木工程的健康诊断、腐蚀监测、复合材料固化监测及其成型后的损伤检测、振动测试等方面。

光纤 Bragg 光栅作为应变传感器在实际工程中的应用主要受两方面因素的制约,一是环境温度和应变的变化都能导致布喇格中心波长的漂移,即温度与应变的交叉敏感问题,应变测量时必须采取温度补偿措施。二是光纤 Bragg 光栅制造于去掉涂覆

\* 哈尔滨工业大学跨学科交叉研究基金资助项目。

作者简介:万里冰,男,1971 年 2 月出生。博士研究生。现从事光纤光栅传感技术和智能材料与结构研究。

收稿日期:2001-09-25;收到修改稿日期:2001-11-19

层的单模石英光纤上,容易折断,因此,必须寻找有效的封装方式,对光纤光栅进行保护,以保证传感器在工业现场环境中能够存活并正常工作。

### 1 光纤 Bragg 光栅传感原理

光纤 Bragg 光栅应变传感器工作的基本原理可以归结为 Bragg 中心波长的测量。Bragg 中心波长  $\lambda_B$  与光纤纤芯有效折射率  $n_{eff}$  以及光纤光栅呈周期性变化的纤芯折射率一个周期的长度  $\Lambda$  相关,它们有如下关系:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

从(1)式可知,光纤纤芯有效折射率  $n_{eff}$  和光栅折射率变化周期  $\Lambda$  的变化都可以导致 Bragg 中心波长的漂移。当光纤 Bragg 光栅粘贴在构件表面或埋入材料内部时,基体材料发生的形变传递到光栅区,会导致光纤光栅的折射率周期  $\Lambda$  以及有效折射率  $n_{eff}$  均发生改变,从而产生 Bragg 中心波长的变化,由解调系统测得 Bragg 波长的漂移量,根据光纤光栅的应变灵敏系数即可以得到应变值,光纤 Bragg 光栅应变传感原理如图 1 所示。

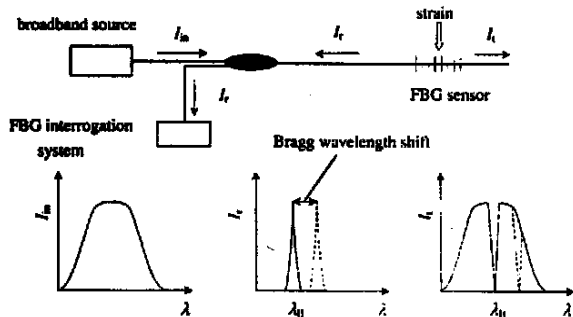


Fig. 1 Schematic diagram for FBG sensing principle

光纤光栅周围的温度场和作用在光纤光栅上的应变变化都能够导致 Bragg 中心反射波长的漂移。应变影响波长是由于光纤光栅周期  $\Lambda$  的变化及由此产生的弹光效应改变了有效折射率;温度导致波长漂移则是由于热光效应和光纤的热膨胀。在应变和温度的共同作用下,Bragg 中心反射波长的相对漂移为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \frac{\Delta L}{L} + (1 + \nu) \frac{\Delta T}{T} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_B$  为 Bragg 中心反射波长,  $\Delta \lambda_B$  为 Bragg 中心反射波长的变化量,  $p_e = n_{eff}^2 [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] / 2$  为光纤的有效弹光系数,  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为弹光系数,  $\nu$  为光纤纤芯材料的泊松比,  $\Delta L$  为光纤光栅所受的轴向应变,  $\Delta T$  为温度的变化量,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。(2)式也可以写作:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = K \epsilon + K_T \Delta T \quad (3)$$

式中的两个系数  $K$  和  $K_T$  都可以由实验获得。从

(3)式知,单独的光纤 Bragg 光栅无法区分由应变和温度所分别导致的 Bragg 中心波长的变化,为了去除环境温度波动对应变测量的影响,光纤 Bragg 光栅用做应变传感时,必须采取温度补偿措施。

### 2 传感器的封装及传感特性

目前,光纤 Bragg 光栅通常是利用相位掩模技术写于预先载氢的普通单模通讯光纤上,质地脆,容易断裂,石英光纤的化学性质虽然比较稳定,但其抗酸能力和抗碱能力都较差,在实际的工程应用中,为了便于传感器的安装和抵抗恶劣的环境,应采取封装措施对光栅进行保护。

为了适应不同的应用场合,各国学者提出了多种光纤光栅的封装方法,如刘云启等设计了一种聚合物封装的光纤光栅压力传感器<sup>[5]</sup>,聚合物有压力增敏和保护光栅的双重作用,Wang 则利用呈长方体形状的树脂基复合材料层板对光栅进行封装<sup>[6]</sup>。笔者采用一种不锈钢管的封装形式,钢管外径 1.2mm,内径 0.8mm,长度为 9cm,在光纤上施加一定的预应力,以使光纤光栅在钢管内保持平直并位于钢管的中心线上。为了保证应变能够有效传递到光纤光栅上,在钢管内腔中充满环氧树脂,封装形式如图 2 所示。

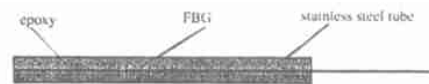


Fig. 2 FBG strain sensor with stainless steel tube jacket

待环氧树脂完全固化后,将封装后的光纤 Bragg 光栅应变传感器粘贴在钢试件表面,在传感器传感段附近同时粘贴电阻应变片,采用 WE-100 型实验

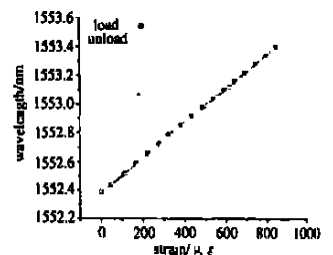


Fig. 3 Strain sensitivity of FBG with jacket

机对试件加载进行拉伸实验。Bragg 中心反射波长的测量采用美国 Micro Optics 公司生产的集成解调系统 FBG-IS,波长检测的分辨率为 1pm,精度 5pm,扫描频率为 50Hz,FBG-IS 系统集成了波长范围为 1528nm ~ 1568nm 的宽带光源,可以同时检测 32 路光信号,通过数据采集卡和计算机通讯,由计算机软件系统自动记录波长的变化。在对试件加载和卸载的过程中,分别记录 Bragg 中心反射波长和电阻应变片的数值,实验中分别测量了 5 只封装光纤

Bragg 光栅的应变响应,数据拟合后的应变灵敏系数和相关系数如表 1 所示,其中 1 号光纤光栅加载和卸载过程中 Bragg 中心反射波长与应变的关系曲线如图 3 所示。从表 1 和图 3 知,封装后的光纤光栅传感器应变响应呈良好的线性,应变灵敏系数平均为  $1.19\text{pm}/\mu$ ,性能稳定,可以粘贴于结构的表面,进行应变的测量。

Table 1 Sensitivity and correlation coefficient of FBG strain sensor with jacket

coefficient	FBG				
	1	2	3	4	5
sensitivity/ $(\text{pm } \mu^{-1})$	1.18	1.2	1.2	1.19	1.18
correlation coefficient	0.9996	0.9998	0.9998	0.9999	0.9991

### 3 光纤光栅应变传感器的温度补偿

由于光纤 Bragg 光栅对应变与温度交叉敏感,即温度和应变的变化都可以导致 Bragg 中心波长的漂移,为了准确测量应变,必须从总的波长漂移量中解耦温度项,即采取温度补偿措施。采取水浴加热的方法,

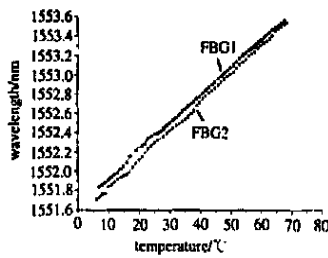


Fig. 4 Temperature sensitivity of FBG with jacket

测量封装 1 号和 3 号光纤光栅应变传感器的温度响应,实验曲线如图 4 所示,拟合后得温度灵敏系数分别为  $0.02846\text{nm}/^\circ\text{C}$  和  $0.02921\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,相对于裸光纤光栅的温度灵敏系数  $0.01\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,热膨胀系数较大的不锈钢管使传感器对温度的响应更敏感。

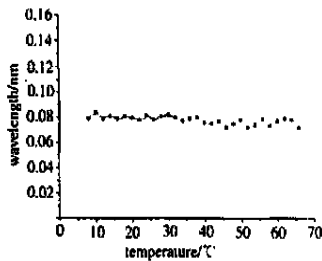


Fig. 5 Relative wavelength shift of two FBG sensors

为了解决光纤 Bragg 光栅传感器的温度与应变交叉敏感问题,人们提出了双光栅叠加、设置参考光栅、采用啁啾光栅等多种温度补偿方法。所述的测量系

统中,波长探测系统 FBG IS 能够同时解调 32 路光信号,所以,设置参考光栅是最为简便的温度补偿措施。参考光栅法是在测量光栅上串联另一个作为参考的光纤光栅,测量光栅粘贴在结构的表面或埋于材料的内部,参考光栅则处于自由状态,测量光栅和参考光栅对环境温度的变化具有相同的响应,所以,两者之间的波长相对移动(二者差值)只与测量光栅所受应变有关,与环境温度变化无关,由此实现温度补偿。采取水浴加热的方法,使两只串联的封装光纤 Bragg 光栅应变传感器处于相同的温度场中,在  $8 \sim 66$  范围内,两个传感器之间的 Bragg 波长相对移动如图 5 所示,温度变化时,两个光纤光栅的 Bragg 波长相对移动只有微小波动,进行应变测量时,可以忽略。

### 4 结论

写于单模通讯光纤上的 Bragg 光栅质地脆弱,易折断,欲作为传感器在工程中得到实际应用,必须采取有效的封装方法。采用不锈钢管对光纤 Bragg 光栅进行封装,封装后的光纤 Bragg 光栅应变传感器的应变灵敏系数为  $1.19\text{pm}/\mu$ ,能够快速响应应变的变化,线性度高,迟滞误差小,粘贴于构件表面进行应变测量时,可以设置另一封装的参考光纤光栅作为温度补偿措施。封装后的光纤 Bragg 光栅传感器便于操作和安装,适于实际工程中的应用,封装过程中应注意保持工艺的稳定性,以保证传感器性能的稳定。

#### 参考文献

- [1] Grattan K T V, Sun T. *Sensors & Actuators*, 2000, 82 (1): 40 ~ 61.
- [2] Udd E, Nelson D, Lawrence C *et al.* *Proc SPIE*, 1996, 2718: 104 ~ 109.
- [3] Hill K O, Malo B, Bilodeau F *et al.* *A P L*, 1993, 62 (10): 1035 ~ 1037.
- [4] Lemaire P J, Atkins R M, Mizrahi V *et al.* *Electron Lett*, 1993, 29 (13): 1191 ~ 1194.
- [5] 刘云启, 郭运转, 刘志国 *et al.* *中国激光*, 2000, A27(3): 211 ~ 214.
- [6] Wang Y, Tjin S C, Hao J Z *et al.* *Proc SPIE*, 2000, 4073: 297 ~ 304.

(上接第 384 页)

- [3] Bruesselbach H, Jones D C, Rockwell D A *et al.* *J O S A*, 1995, B12(8): 1434 ~ 1447.
- [4] Troxel S E, Welsh B M. *J O S A*, 1995, A12(3): 570 ~ 577.
- [5] 王世杰译. *强激光技术进展*, 1996, 6(6): 38 ~ 41.
- [6] Wang X Ch, Zhou D W, Zhang Y M. *Chin J Phys*, 1989, 38: 466

- [7] Fried D L. *J O S A*, 1982, 72: 52 ~ 61.
- [8] Lind R C, Dunning G J. *Laser Focus*, 1983, 19(9): 14.
- [9] 宋正方, 魏合理. *强激光技术进展*, 1996, 6(6): 23 ~ 28.
- [10] 王月珠, 杜晓军, 马祖光. *中国激光*, 1998, A25(4): 328.
- [11] 鞠有伦, 杜晓军, 王月珠. *自然科学进展*, 1999(5): 443 ~ 447.
- [12] 王乃彦. *新兴的强激光*. 北京: 原子能出版社, 1992.