

文章编号: 0253-2239(2005)09-1166-5

# 基于光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅 智能夹层试验研究\*

李东升 梁大开 潘晓文

(南京航空航天大学, 南京 210016)

**摘要:** 传感元件与复合材料的一体化是智能结构研究的最终目标之一。设计一种具有自诊断功能的标准化、模块化光纤智能夹层系统,正是实现这种一体化最有潜力的技术途径。采用聚酰亚胺薄膜制作了基于光纤布拉格光栅(FBG)传感器的光纤光栅智能夹层,对智能夹层中光纤布拉格光栅传感器的应变、温度特性进行了标定试验,并建立了基于光纤布拉格光栅传感器光纤光栅智能夹层的应变、温度测量模型。试验表明,智能夹层内布拉格光栅波长偏移与应变、温度之间具有良好的线性关系。不过在温度测量时,必须考虑被埋入结构的热膨胀效应。利用光纤光栅智能夹层内光纤布拉格光栅传感器网络和先进信息处理技术,可以建立结构损伤主动、在线和实时监测系统。

**关键词:** 光纤布拉格光栅传感器; 光纤光栅智能夹层; 标定试验; 应变测量; 温度测量

中图分类号: TP212 文献标识码: A

## Experimental Study of Fiber Grating Smart Layer System Based on Fiber Bragg Grating Sensors

Li Dongsheng Liang Dakai Pan Xiaowen

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract:** One of the final research goals for smart structures is to integrate sensing elements with composite materials. It is the most potential technical approach that the standardization and modularization of fiber optic smart layer system with function of self-diagnosing is designed. The fiber grating smart layer (FGSL) with embedded fiber Bragg grating (FBG) sensors is fabricated using dielectric substrate of polyimide. The calibration test of embedded FBG sensors is conducted and the models of strain measurements and temperature measurements for FBG sensors embedded inside FGSL are set up. The experimental results show that the wavelength shift of Bragg grating is excellently linear with strain and temperature by embedded FBG sensors, but it is noted that the thermal characterization of the structure built-in FGSL should be investigated. The active and real time monitoring system would be established by fiber Bragg grating networks embedded inside FGSL and advanced information treatment technology.

**Key words:** fiber Bragg grating sensor; fiber grating smart layer; calibration test; strain measurement; temperature measurement

### 1 引 言

智能结构的研究于 20 世纪 80 年代中期起源于航空航天领域,至今已有近 20 年的历史。传感元件与复合材料的一体化是智能结构研究的最终目标之

一,而光纤自诊断系统的模块化、集成化研究正是实现这种一体化最有潜力的技术途径。

按照传感方式的不同,智能夹层主要分为压电智能夹层<sup>[1]</sup>和光纤智能夹层两大类。光纤传感器一

\* 国家自然科学基金(90205031)资助课题。

作者简介: 李东升(1965~),男,湖北荆州人,南京航空航天大学航空宇航学院在站博士后,主要从事光纤传感技术与智能结构研究。E-mail: njustlds@sohu.com

收稿日期: 2004-06-22; 收到修改稿日期: 2005-04-01

直是智能结构中自诊断系统的首选对象及发展方向。与压电陶瓷相比,光纤具有柔软、可挠曲,电绝缘,耐腐蚀,抗电磁干扰,工作中不发热,无辐射,并与复合材料良好耦合等诸多优点。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器较之于压电传感器,还具有如下特点<sup>[2~5]</sup>:1)可实现参量的动态测量和静态测量,可实现应变、温度的同步测量;2)布拉格(Bragg)光栅波长与被测参量之间具有确定的对应关系,可实现参量的绝对测量和相对测量;3)单根光纤单段检测,易于埋入复合材料;4)波分复用,可实现参量的分布测量。

## 2 光纤光栅智能夹层的制作

目前在光纤自诊断系统的研究和应用中,仅限于光纤传感器本身的研究,然后直接将其排布在结构内部以构成智能结构中的自诊断系统。这种研究方法有诸多问题难以解决:1)智能结构中光纤接口部分缺乏必要的保护,影响结构外形及加工;2)传感器排布和结构成型同时进行,传感系统性能难以得到保证;3)传感器阵列缺少埋置前的标定环节,传感器特性的不一致将影响自诊断系统对结构信息判别的正确性。

解决上述问题的途径是设计一种具有自诊断功能的标准化、模块化光纤智能夹层系统,使其便于埋置和连接,且便于在埋入复合材料之前对光纤传感器进行标定,充分了解光纤传感系统的性能,从而进行结构的健康监测<sup>[6~8]</sup>。

光纤光栅智能夹层是指预制了光纤布拉格光栅传感器网络的光纤智能夹层,其中含有光纤布拉格光栅传感器和基体材料<sup>[9]</sup>。

光纤智能夹层埋入复合材料层合板并随之一同固化时,需要承受一定的温度和压力,因此基体材料应满足这一要求,并具有良好的介电性能,与复合材料良好结合,不对结构性能造成太大影响。聚酰亚胺薄膜是聚酰亚胺最早的商品之一,它具有热稳定性好,耐低温,高强度,高韧性,介电性好,热膨胀性小等特点,适宜作为基体材料。

以美国杜邦公司 Kapton 聚酰亚胺薄膜为例,主要技术参量为:

- 1)工作温度 -269~400℃;
- 2)弹性模量 2.96 GPa;
- 3)抗拉强度 234 MPa;
- 4)延伸率 60%~80%;

- 5)热膨胀系数  $24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ;
- 6)密度 1.38 g/cm<sup>3</sup>;
- 7)绝缘强度 142 kV/mm;
- 8)介电常量 3.6(1 MHz)。

光纤光栅智能夹层的制作单位是常州市宇宙星电子制造有限公司。其制作过程如下:将长宽大小为 250 mm×250 mm,厚度 0.025 mm 的聚酰亚胺薄膜(美国杜邦公司生产)平铺于平板上,厚度 0.025 mm 的丁晴橡胶系固化胶(美国杜邦公司生产)粘贴于该薄膜上,所需埋入光纤布拉格光栅传感器经理顺后粘接定位,再将长宽大小为 250 mm×250 mm 的固化胶和薄膜依次平铺粘贴。用电烙铁轻轻熨平,放入平板硫化机中,在固化压力 3 MPa,热压温度 170℃条件下热压 2 h,水冷至常温后取出。图 1 所示为光纤光栅智能夹层示意图。

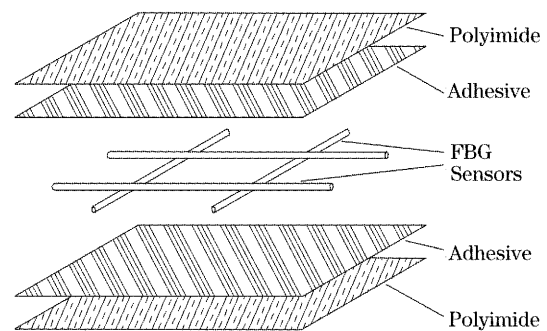


图 1 光纤光栅智能夹层示意图

Fig. 1 Sketch graph of fiber grating smart layer

光纤光栅智能夹层制作过程中光纤布拉格光栅传感器在接头部位未出现断裂现象。对智能夹层内光纤布拉格光栅传感器的测试表明,光纤布拉格光栅传感器性能完好,即使在承载过程中仍具有良好的性能。轴向拉伸及轴向压缩试验表明,较之未埋入光纤光栅智能夹层的玻璃纤维复合材料试件而言,埋入智能夹层试件的轴向抗拉及抗压强度均有所降低,大约为 6%~8%。不过,失效不是发生在智能夹层/复合材料界面,而是出现在复合材料内部。因此,在光纤光栅智能夹层与复合材料层合中,需要严格控制复合材料制作及智能夹层埋入工艺,采用高温固化环氧树脂或真空法常温固化环氧树脂粘接方法,确保光纤光栅智能夹层的埋入不对结构强度产生太大影响。

光纤光栅智能夹层制作工艺及试验研究的意义在于,智能夹层不仅具有光纤传感器的高灵敏度特性,而且智能夹层的埋入对复合材料结构力学性能影响较小。因此,可以采用高温固化环氧树脂或真

空法常温固化环氧树脂粘接方法,将其分别铺设于复合材料表面或埋入复合材料内部,以便实现结构的健康监测。

### 3 光纤光栅智能夹层工作原理

光纤布拉格光栅传感器在外形上犹如一根光纤,易于埋入智能夹层。在光纤光栅智能夹层中埋入光纤布拉格光栅传感器,可以监测结构应变或温度;也可以在智能夹层中埋入双路光纤布拉格光栅传感器,同时监测结构应变和温度。

#### 3.1 光纤布拉格光栅传感器工作原理

光纤布拉格光栅传感器是在光纤的一小段范围内沿光纤轴向使纤芯折射率发生周期性变化而引起的芯内体光栅。其工作原理是对入射光束波长进行调制,通过波长偏移进行测量。根据布拉格条件,光栅的布拉格中心波长为<sup>[9,10]</sup>

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (1)$$

式中  $n$  为纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  为纤芯折射率的调制周期。显然,  $n$  或  $\Lambda$  发生变化都将引起光栅波长的偏移,即

$$\Delta\lambda_B = \alpha\Delta\epsilon + \beta\Delta T, \quad (2)$$

其中

$$\alpha = \lambda_B(1 - p_e), \quad \beta = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n),$$

式中  $\alpha$  为布拉格光栅应变灵敏度;  $\Delta\epsilon$  为应变变化量;  $\beta$  为布拉格光栅温度灵敏度;  $\Delta T$  为温度变化量;  $p_e$  为有效光弹系数,取  $p_e = 0.22$ ;  $\alpha_\Lambda$  为光纤热膨胀系数,二氧化硅光纤取  $\alpha_\Lambda = 0.55 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha_n$  为光纤热光系数,掺铒光纤取  $\alpha_n = 8.3 \times 10^{-6}$ 。对中心波长  $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$  的布拉格光栅而言,由(2)式可以得到  $\alpha = 1.209 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$ ,  $\beta = 0.0137 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

#### 3.2 光纤光栅智能夹层工作原理

由(2)式可知,布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_B$  由两部分组成:其一由  $\Delta\epsilon$  引起,其二由  $\Delta T$  引起。当光纤光栅智能夹层粘贴于结构表面或埋入结构内部后,结构因热膨胀而产生热应变,从而使布拉格光栅产生波长偏移。即  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_s + \Delta\epsilon_t$ , 代入(2)式中可得

$$\Delta\lambda_B = \alpha\Delta\epsilon_s + (\alpha \cdot \alpha_t + \beta)\Delta T, \quad (3)$$

或

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_s + \Delta\lambda_t, \quad (4)$$

式中  $\Delta\epsilon_s$  为无温度变化( $\Delta T = 0$ )时的应变变化量;  $\Delta\epsilon_t$  为仅温度变化(外载荷  $P = 0$ )时的应变变化量;  $\alpha_t$  为被埋入结构的热膨胀系数;  $\Delta\lambda_s$  为无温度变化时布拉格光栅的波长偏移;  $\Delta\lambda_t$  为仅温度变化时布拉

格光栅的波长偏移。

采用基于单个光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层可实现应变测量。在(3)式中令  $\Delta T = 0$ , 可得  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_s$ 。故

$$\alpha = \Delta\lambda_B/\Delta\epsilon_s. \quad (5)$$

采用基于单个光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层亦可实现温度测量。在(3)式中令  $\Delta\epsilon_s = 0$ , 有  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_t$ 。故

$$\beta = \Delta\lambda_B/\Delta T - \alpha \cdot \alpha_t. \quad (6)$$

采用基于双路光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层亦可实现应变和温度的同步测量。通过解联立方程,即可求得布拉格光栅灵敏度  $\alpha$  和  $\beta$ 。特别地,若已知温度变化时布拉格光栅的波长偏移  $\Delta\lambda_t$ , 则由(4)式可得

$$\Delta\lambda_s = \Delta\lambda_B - \Delta\lambda_t. \quad (7)$$

## 4 光纤光栅智能夹层试验

### 4.1 应变测量

采用四点弯曲试验方法,将电阻应变片沿轴向粘贴在钢质弯曲梁上表面,采用 YJR-5 型静态电阻应变仪测定弯曲梁横截面上的最大应变(即弯曲梁的上表面应变)。将光纤光栅智能夹层试件粘贴于弯曲梁上表面,固化时间为 40 h,采用 si425 型光栅解调仪测定布拉格光栅波长  $\lambda$ 。

图 2 为光纤光栅智能夹层内中心波长为 1550.079 nm 的布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_B - \epsilon_s$  曲线。其中应变  $\epsilon_s$  由电阻应变法获得。由图可见,布拉格光栅波长偏移与应变之间具有良好的线性关系。布拉格光栅应变灵敏度为  $1.1556 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$ , 与计算值  $1.209 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$  相近。

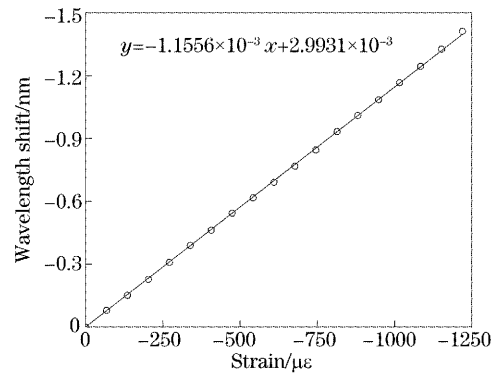


图 2 布拉格光栅波长偏移-应变曲线

Fig. 2 Wavelength shift of Bragg grating versus strain

### 4.2 温度测量

将光纤光栅智能夹层试件粘贴于钢质弯曲梁上

表面,固化时间 40 h,然后放入电烘箱内。采用 si425 型光栅解调仪测定布拉格光栅波长  $\lambda$ ,在达到设定温度后保温 5 min,测量 1 min 时间内的布拉格光栅波长并取平均值。

图 3 为光纤光栅智能夹层内中心波长为 1550.079 nm 的布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_B - \Delta T$  曲线。其中初始温度为 26 °C,钢梁的热膨胀系数  $\alpha_t = 17.0 \times 10^{-6}$ 。由图 3 可见,布拉格光栅波长偏移与温度变化之间具有较好线性关系,布拉格光栅温度灵敏度为 0.025 nm/°C,比理论值 0.0137 nm/°C 高出仅一倍,与(6)式计算值接近。因此,采用光纤光栅智能夹层测定温度时,必须考虑被埋入结构的热膨胀效应,并对智能夹层的温度特性进行标定。

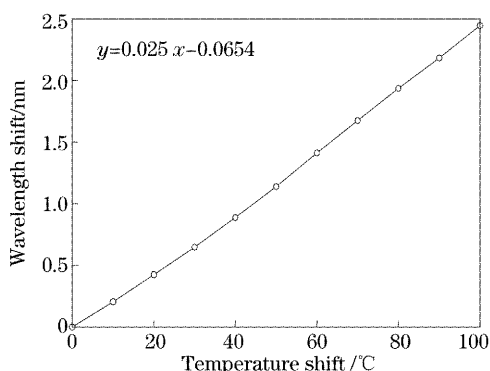


图 3 布拉格光栅波长偏移-温度变化曲线

Fig. 3 Wavelength shift of Bragg grating versus temperature shift

#### 4.3 应变温度测量

采用三点弯曲试验方法,将光纤光栅智能夹层试件粘贴于钢质弯曲梁上表面,固化时间为 40 h,然后放入电烘箱内。采用 si425 型光栅解调仪测定布拉格光栅波长,在达到设定温度后保温 5 min,测量 1 min 时间内的布拉格光栅波长并取平均值。首先测定温度变化(无外载荷)时布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_t - \Delta T$  曲线,然后在钢质弯曲梁上表面施加恒定集中载荷,并测定温度变化时布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_B - \Delta T$  曲线。

图 4 为光纤光栅智能夹层内中心波长为 1550.079 nm 的布拉格光栅在初始温度 26 °C 时的  $\Delta\lambda_B$ 、 $\Delta\lambda_t$  和  $\Delta\lambda_s$  曲线。其中,无温度变化时布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_s - \Delta T$  由  $\Delta\lambda_B$ 、 $\Delta\lambda_t$  以及(7)式求得。如图 4 所示,当温度变化较大时,由于电烘箱内温度波动以及结构内部、外表面温度梯度现象趋于严重,布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_B$  和  $\Delta\lambda_t$  与温度变化之间的线性关系有所降低。由此所得无温度变化时

布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_s$  不是常数,而是有所波动。理论上而言, $\Delta\lambda_s$  为弯曲载荷作用时布拉格光栅波长偏移,当钢质弯曲梁上表面施加恒定集中载荷时, $\Delta\lambda_s$  应为恒定值。不过,由于存在温度波动,在恒定载荷作用下, $\Delta\lambda_s$  亦存在一定的波动。分析表明,布拉格光栅波长偏移  $\Delta\lambda_s$  平均值与理论计算值误差小于 6%。

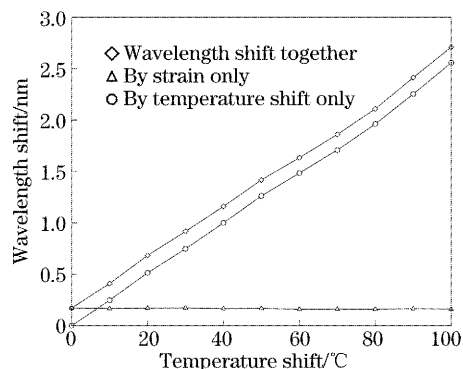


图 4 布拉格光栅波长偏移与应、温度变化曲线

Fig. 4 Wavelength shift of Bragg grating versus strain and temperature shift

#### 4.4 试验分析

采用基于单个光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层测量应变时,布拉格光栅波长偏移与应变之间线性关系良好,应变灵敏度高,可满足工程测量要求。

采用基于单个光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层测量温度时,其线性关系良好,温度灵敏度高出理论值近一倍,有利于提高测量精度。这是由于光纤光栅智能夹层粘贴于结构表面或埋入结构内部后,结构因热膨胀产生热应变,使布拉格光栅波长产生偏移所致。因此,采用光纤光栅智能夹层测量温度时,必须考虑被埋入结构的热膨胀效应,并对智能夹层的温度特性进行标定。

采用基于单个光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层,在已知布拉格光栅温度特性或完成温度特性标定后,测量应变时的线性关系良好,所得应变值与理论值接近,可满足工程测量要求。

## 5 结 论

建立了基于光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层应变、温度测量模型。试验表明,智能夹层中布拉格光栅波长偏移与应变、温度之间具有良好的线性关系。

采用基于双路光纤布拉格光栅传感器的智能夹

层可以实现应变和温度的同步测量,不过测量时必须考虑被埋入结构的热膨胀效应。

在光纤光栅智能夹层的制作中可以选用光纤布拉格光栅传感器,以监测结构应变和温度。利用智能夹层中的光纤布拉格光栅传感器网络和先进的信息处理技术,可以建立结构损伤主动、在线和实时监测系统。

### 参 考 文 献

- 1 Lin Mark, Chang Fukuo. The Manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics [J]. *Composites Science and Technology*, 2002, **62**(7): 919~939
- 2 Dong Xingfa, Huang Yonglin, Jiang Li *et al.*. Active temperature compensation design of sensor with fiber gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 562~564
- 3 Fu Haiwei, Fu Junmei, Qiao Xueguang. High sensitivity fiber Bragg grating pressure difference sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 621~623
- 4 Yu Youlong, Zhao Hongxia, Liu Shengchun. Time-domain demodulation technique for active fiber Bragg grating sensor system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 983~987 (in Chinese)  
余有龙,赵红霞,刘盛春. 光纤光栅传感系统有源时域解调技术[J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 983~987
- 5 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 330~336 (in Chinese)  
张伟刚,开贵云,董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论及实验研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 330~336
- 6 Liang Dakai, Huang Minshuang, Tao Baoqi. Research on some problems about optic fiber embedded in carbon fiber smart structures [C]. *Proc. the 2nd International Workshop on Structure Health Monitoring*, 1999. 680~689
- 7 Yang Hong, Liang Dakai, Tao Baoqi. Application and influence of hollow optical fiber embedded in fiber glass/ epoxy composite materials[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2000, **17**(2): 130~134
- 8 Huang Minshuang, Liang Dakai, Yuan Shenfang *et al.*. Research on novel fiber optic sensing technology in the application of smart structures[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, **22**(4): 326~332 (in Chinese)  
黄民双,梁大开,袁慎芳等. 应用于智能结构的光纤传感新技术研究[J]. 航空学报, 2001, **22**(4): 326~332
- 9 Li Dongsheng, Liang Dakai, Xiong Ke. Research on manufacture and testing of fiber-optic smart layer [J]. *J. Transducer Technology*, 2005, **24**(1): 28~29 (in Chinese)  
李东升,梁大开,熊克. 光纤智能夹层制作工艺及试验研究[J]. 传感器技术, 2005, **24**(1): 28~29
- 10 Li Xiaochun. Embedded sensors in layered manufacturing[D]. Ph. D Dissertation, Stanford University. USA. 2001