

文章编号: 0258-7025(2010)05-1298-06

应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程

贾子光¹ 任 亮¹ 李宏男¹ 任明法² 黄其忠²

(¹ 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; ² 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘要 介绍了光纤布拉格光栅(FBG)传感器的基本原理及优点,开发了基于光纤光栅技术的温度传感器和应变传感器,并对它们的工作特性进行了分析。应用自行封装的光纤光栅传感器,监测了碳纤维复合材料固化过程中材料内部的温度变化和收缩应变。实验结果表明,使用光纤光栅传感器对复合材料固化期收缩应变监测时需进行温度补偿。光纤光栅传感器为复合材料固化监测及分析提供了一种新的工具,是监测复合材料固化过程的理想器件。

关键词 传感器;光纤光栅传感器;碳纤维复合材料;收缩应变;温度漂移

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1298

Application of Fiber Bragg Grating Sensors in Monitoring Curing Process of Carbon Fiber Composite

Jia Ziguang¹ Ren Liang¹ Li Hongnan¹ Ren Mingfa² Huang Qizhong²

(¹ Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)
(² Department of Engineer Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract Basic principle and merits of fiber Bragg grating (FBG) are introduced. A novelty strain sensor and a temperature sensor with FBG technology are presented. Theoretical and experimental analyses of FBG sensor are implemented. The variations of temperature and strain profiles during curing process are experimentally explored by embedded FBG sensors. However, the thermal drift of FBG strain sensor should be considered during the strain measurement. The experimental results indicate that application of FBG sensor on monitoring the composite in curing process is suitable.

Key words sensors; fiber Bragg grating sensor; carbon fiber composite; shrink strain; thermal drift

1 引 言

碳纤维是一种新型非金属材料,它和它的复合材料具有高比强度和比模量等一系列的优异性能,被广泛应用于宇航、导弹、飞机、汽车以及文体用品等各个领域^[1]。碳纤维复合材料的质量和力学性能与固化工艺过程密切相关,为了稳定复合材料性能与质量,对其固化成型过程进行实时监测,并在此基础上形成反馈控制系统是一种行之有效的方法^[2,3]。

光纤布拉格光栅(FBG,简称为光纤光栅)传感器具有结构简单、成本低、体积小、插入损耗小、抗干扰能力强、耐腐蚀性好、埋入复合材料中与基体材料兼容性好等优点^[4~7]。但裸光纤光栅纤细易断,采用适当的封装工艺可使光纤光栅传感器埋入结构后正常工作^[8,9]。许多研究学者使用光纤光栅传感器对复合材料固化工艺过程的温度和应变进行了监测。万里冰等^[10]应用光纤光栅传感器实现了单向

收稿日期: 2009-09-06; 收到修改稿日期: 2009-10-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10702012)、国家“十一五”科技支撑计划(2006BAJ03B05, 2006BAJ06B08)、辽宁省博士科研启动基金(20071093)和高等学校学科创新引智计划(B08014)资助课题。

作者简介: 贾子光(1984—),男,硕士研究生,主要从事结构健康监测中光纤光栅传感技术方面的研究。

E-mail: 030507jiaziguang@163.com

导师简介: 李宏男(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事多维地震动、结构多维抗震设计理论及其应用,结构减震控制、重大工程健康监测与损伤评估等方面的研究。E-mail: hnli@dlut.edu.cn

和正交层合板在固化过程中材料内部应变和温度变化历程的监测。赵海涛等^[11]将光纤光栅传感器埋入铝板与缠绕复合材料板之间,监测整个固化历程中的温度变化以及固化过程和降温过程的应变变化。Murukeshan 等^[12]和 Kalamkarov 等^[13]分别应用光纤光栅传感器在复合材料的热压釜成型工艺和拉挤工艺中实现了固化过程材料内部应变变化历程的监测。以上实验均分别监测了复合材料固化过程中的温度和收缩应变,但在处理应变变化时,并未考虑温度漂移对应变变化的影响。由于固化过程中温差很大,对光纤光栅温度传感器波长影响可达近 1.7 nm,且应变传感器同样对温度敏感,故在分析收缩应变时必须考虑温度漂移的影响。

本文阐述了光纤光栅传感器的传感原理;介绍了自行封装的光纤光栅应变传感器和温度传感器,并在万能实验机和水浴锅中进行标定,得出应变灵敏度系数和温度灵敏度系数;最后,应用光纤光栅应变传感器监测碳纤维复合材料固化过程中材料内部的收缩应变,并利用光纤光栅温度传感器对温度进行了实时监测,有效消除了温度变化对应变变化的影响,实现了温度和应变的同步监测。

2 光纤光栅传感基本原理

光纤光栅是纤芯中具有折射率周期性变化的结构。根据模耦合理论, $\lambda_B = 2n\Lambda$ 的波长就被光纤光栅反射回去。反射的中心波长信号 λ_B , 跟光栅周期 Λ , 纤芯的有效折射率 n 有关,所以当外界的被测量引起光纤光栅温度、应力以及磁场改变时都会导致反射的中心波长的变化。也就是说光纤光栅反射光中心波长的变化反映了外界被测信号的变化情况。

假定温度和应变导致的中心波长变化是相互独立的,忽略光栅中心波长导致的灵敏度系数影响,那么温度和应变共同产生的变化可表示为

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\epsilon \cdot \epsilon + \alpha_T \cdot \Delta T, \quad (1)$$

式中 α_ϵ 为应变灵敏度系数; α_T 为温度灵敏度系数; ϵ 和 ΔT 分别为应变和温度变化量。从(1)式中可以看出,应变和温度对波长的作用可以当作是独立、线性叠加的。

3 传感器设计

3.1 应变传感器

开发了一种两端夹持式光纤光栅应变传感器^[5,6],其原理如图 1 所示。传感器由光纤光栅、两个夹持部件以及两个固定支点组成。采用胶接的方

法将光纤光栅固定在夹持部件内,由于胶粘剂没有直接封装光纤光栅区域,消除了胶粘剂对光纤光栅应变传递的影响。夹持部件为钢管,直径为 d ;设两端固定支点的距离为 L ,两端夹持部件内侧端点之间的距离为 L_f 。假设两固定支点间发生 ΔL 的轴向变形,相应夹持部件和光纤光栅的变形分别为 ΔL_s 和 ΔL_f 。忽略钢管内胶层和光纤的影响,由材料力学基本原理可得

$$\Delta L_s = \frac{P_s L_s}{E_s A_s}, \quad (2)$$

$$\Delta L_f = \frac{P_f L_f}{E_f A_f}, \quad (3)$$

式中 E_s 和 E_f 分别为钢和光纤的弹性模量; A_s 和 A_f 分别为钢管和光纤的截面积; P 为传感器结构的内力。结构内部内力处处相等,由此可得

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_f} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s}. \quad (4)$$

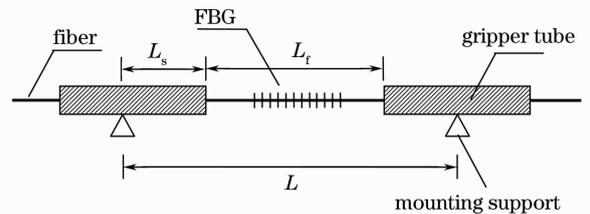


图 1 两端夹持式光纤光栅应变传感器原理图

Fig. 1 A schematic diagram of FBG strain sensor packaged by two gripper tubes

在整个传感器的结构中,夹持部件的应变可以忽略。固定支点之间的变形量几乎全部加载在了光纤上。对于中心波长处于 1550 nm 波段的光纤光栅,传感器中心波长变化与外界应变的关系为

$$\epsilon = \frac{L_f}{L} \epsilon_f = \frac{L_f \Delta \lambda_{\text{FBG}}}{1.2L}. \quad (5)$$

3.2 温度传感器

光纤光栅温度传感器的封装机构主要由金属厚管、金属薄管、胶粘剂、光纤光栅以及传输光缆组成。金属薄管的作用主要是为了悬空光纤光栅,使光纤光栅免受外界应变影响。胶粘剂的主要作用是将金属厚管、金属薄管以及光纤固结在一起,使其成为一个整体。从结构上看,该封装形式不仅保持了裸光纤光栅的温度灵敏度,能够自由地感应结构对象的温度变化,而且充分消除掉了外界应力的影响^[14,15]。其基本结构如图 2 所示。

图 3 和图 4 分别给出了实验中应用的自行封装的光纤光栅应变传感器及温度传感器。

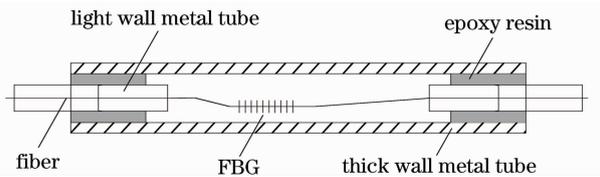


图 2 金属管封装的光纤光栅温度传感器原理图

Fig. 2 A schematic diagram of an encapsulated FBG temperature sensor

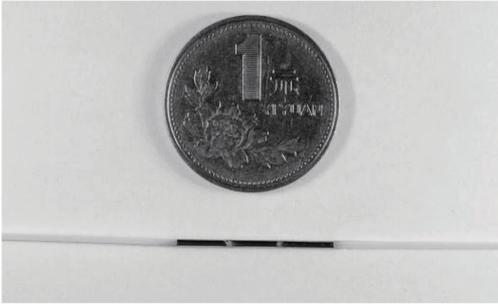


图 3 自行封装的光纤光栅应变传感器

Fig. 3 Packaged FBG strain sensor

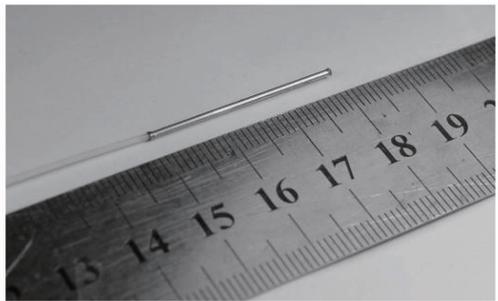


图 4 自行封装的光纤光栅温度传感器

Fig. 4 Packaged FBG temperature sensor

4 传感器标定实验

为了获得光纤光栅传感器的 α_ϵ 和 α_T ，分别采用万能试验机拉伸和水浴加热的方法对传感器进行标定。图 5 给出了中心波长为 1519 nm 的光纤光栅温度传感器温度响应曲线。从图 5 可知，封装后的光纤光栅温度传感器的温度灵敏度系数约为 0.01 nm/°C。

由于封装后的光纤光栅应变传感器同时对温度和应变敏感，故需要分别标定其温度灵敏度系数和应变灵敏度系数。图 6, 7 分别给出了中心波长为 1543 nm 的应变传感器的应变响应曲线和温度响应曲线，由图 6, 7 可知，其应变灵敏度系数约为 0.0012 nm/ $\mu\epsilon$ ，而温度灵敏度系数与温度传感器有所不同，约为 0.0135 nm/°C，在处理应变数据时，应考虑这一区别。

图 5~图 7 标定实验结果中， λ 为波长， T 为温

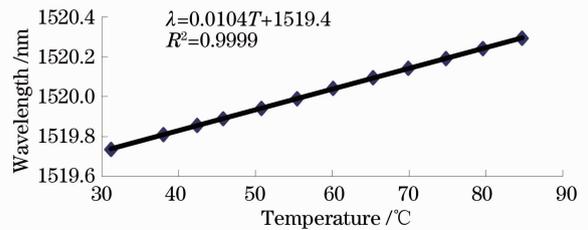


图 5 中心波长为 1519 nm 的光纤光栅温度传感器温度响应曲线

Fig. 5 Relationship between wavelength variation of FBG temperature sensor and temperature as $\lambda_B = 1519$ nm

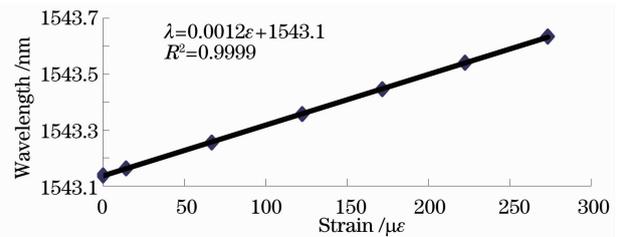


图 6 中心波长为 1543 nm 的光纤光栅应变传感器应变响应曲线

Fig. 6 Relationship between wavelength variation of FBG strain sensor and strain as $\lambda_B = 1543$ nm

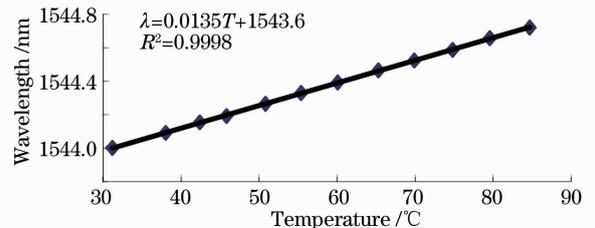


图 7 中心波长为 1543 nm 的光纤光栅应变传感器温度响应曲线

Fig. 7 Relationship between wavelength variation of FBG strain sensor and temperature as $\lambda_B = 1543$ nm
度， ϵ 为应变， R 为拟合曲线与原始曲线的相关性系数。从图中可以看出，温度和应变与波长的变化呈现良好的线性关系，相关性均达到 99.9% 以上。

5 碳纤维复合材料固化期监测实验

5.1 复合材料介绍及传感器布设

使用 T700 型碳纤维和 603 型环氧树脂制作预浸带。预浸带在无极变速缠绕机上缠绕而成，每层 0.15 mm。将制成的预浸带逐层铺在硅胶模具中，形成复合材料单向板。硅胶模具如图 8 所示。

在铺设预浸带的过程中，于肋骨和蒙皮的指定位置处，安装光纤光栅应变传感器和温度传感器各 4 只。传感器位置如图 9 所示，其中 S1~S4 为应变传感器，T1~T4 为温度传感器。各传感器的中心

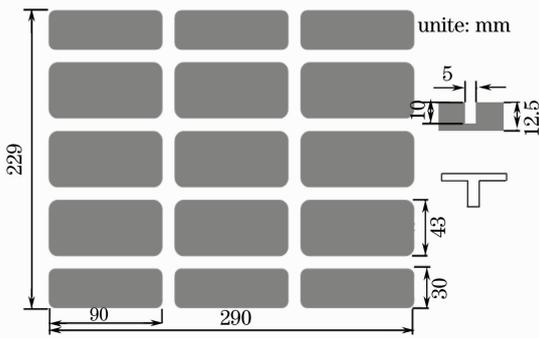


图 8 硅胶模具尺寸
Fig. 8 Size of the silicon rubber mold

波长在表 1 中列出。由于应变传感器和温度传感器在材料中位于对称的位置,故可利用温度传感器作为应变传感器的温度补偿。

固化使用的材料成型设备为热压釜,罐内通过电加热升温,热电偶测温,为避免在复合材料加热固化过程中对热压釜内真空加压对传感器信号造成影响,各传感器引线均采用铠装保护。实验结果表明,虽然真空加压对传感器信号造成一定程度的减弱,但并未影响测量结果和数据的完整性。采用的光纤光栅波长监测设备为美国 MOI 公司生产的集成化解调仪 sm130。固化成型后的碳纤维复合材料如图 10 所示。

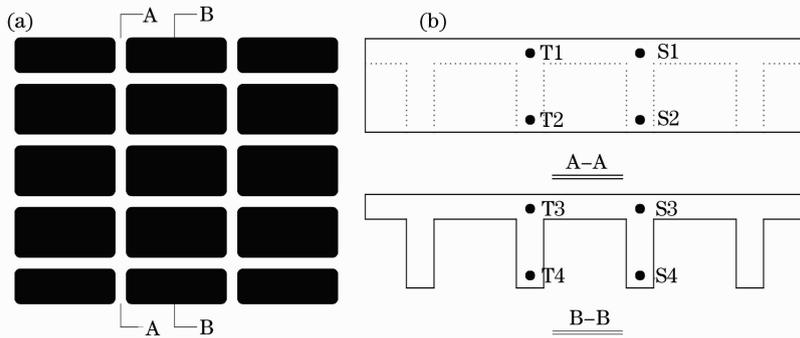


图 9 模具(a)和传感器(b)位置示意图
Fig. 9 Schematic diagram of mould (a) and sensor location (b)

表 1 传感器中心波长

Table 1 Central wavelength of FBG sensors

Type	FBG strain sensor				FBG temperature sensor			
Number	S1	S2	S3	S4	T1	T2	T3	T4
Wavelength /nm	1570	1550	1570	1544	1520	1568	1515	1512



图 10 固化后的碳纤维复合材料
Fig. 10 Composite specimen manufactured by the co-curing process

脂流入热压釜内,在包裹复合材料的真空袋外缠绕若干棉布,这对材料内部形成一定的热阻效应。从图 11 可以看出,热电偶和光纤光栅温度传感器测得的温度变化趋势滞后于空气温度的变化。

蒙皮和肋骨的温度变化略有不同,肋骨处的峰

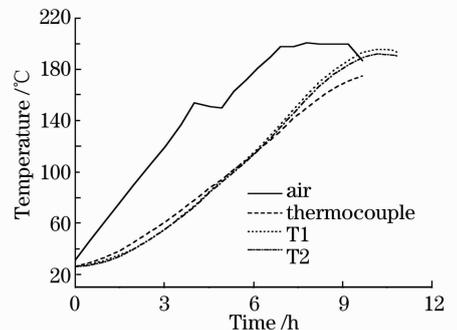


图 11 空气温度、热电偶及光纤光栅温度传感器所测温度的变化曲线

Fig. 11 Result of temperature monitor in the experiment

5.2 固化过程实验数据分析

5.2.1 温度

在热压釜内安置热电偶,以测量环境温度。整个加热过程历时 9 h,降温过程约 8 h。图 11 给出了加热过程中两只温度传感器(T1, T2)和热电偶以及空气温度的变化过程。为了防止预浸带中的环氧树

值温度略高于蒙皮处的峰值温度。两者温度差的最大值出现在降温的开始阶段,约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 12(a) 给出了肋骨处温度传感器 T2 和蒙皮处温度传感器

T1 整个加热和降温过程所测得的温度变化趋势,图 12(b) 给出两者温度差的变化趋势。

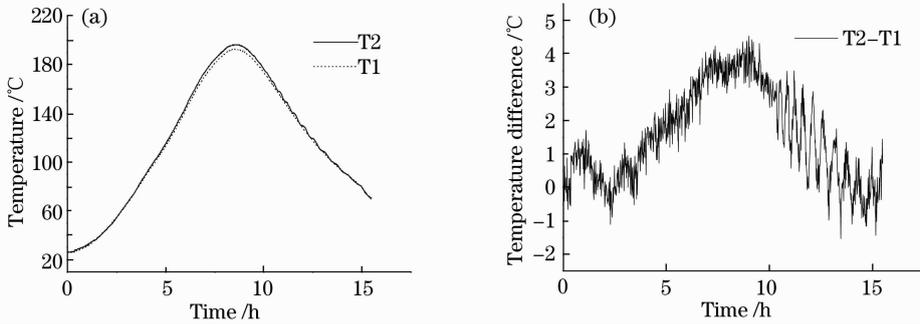


图 12 (a) T1, T2 温度变化曲线对比; (b) T1, T2 温度差变化曲线

Fig. 12 (a) Temperature variation of composite during the co-curing process; (b) temperature difference in the composite during the co-curing process

5.2.2 应变

固化过程中温度变化很大,由于温度变化而对光纤光栅温度传感器的波长影响可达近 1.7 nm ,为了得到被测点的真实应变,需要消除温度变化引起的波长漂移。图 13 中上部曲线为未考虑温度影响时,应变传感器 S4 所测得的应变时程曲线;下部曲线为去除温漂影响而得到的同一应变传感器的应变时程曲线。可以看出,对于监测高温固化过程,温度漂移对应变测量结果的影响是很大的。

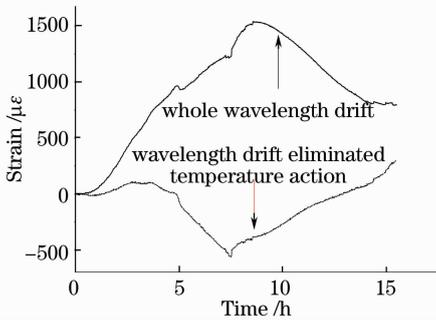


图 13 S4 应变时程曲线

Fig. 13 Strain variation of S4

图 14 给出了两肋骨处的固化收缩应变的时程曲线比较。S4 的方向与预浸带粘贴方向平行,在固化加热阶段的前 3 h,出现 $100\text{ }\mu\epsilon$ 左右的拉应变。在随后加热的 5 h 中,材料固化收缩,并于加热峰值时刻附近出现收缩应变最大值,约为 $600\text{ }\mu\epsilon$ 的压应变。停止加热后,随着温度的下降,收缩应变也逐渐减小。待降至室温后,转为拉应变。而 S2 处为纵横粘贴的预浸带的交叉点,由于两种预浸带在固化过程中沿各自方向作用,使得此处的应变变化规律并不明显。此测点在整个固化收缩过程中,均为压应

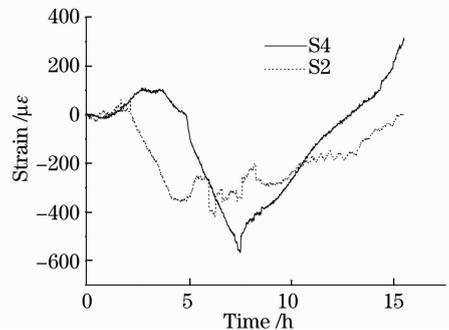


图 14 S2 与 S4 应变时程比较

Fig. 14 Strain variation comparison of FBG sensor S2 and S4

变,且峰值压应变较 S4 略低,约为 $400\text{ }\mu\epsilon$ 。

6 结 论

应用光纤光栅应变传感器和温度传感器实时监测碳纤维复合材料固化过程中的收缩应变和温度变化,并对所测得的应变变化量进行温度补偿。根据实验结果,复合材料的蒙皮和肋骨的温度变化略有不同,其峰值相差近 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$;不同点处的收缩应变差别较为明显,最大收缩应变可达 $600\text{ }\mu\epsilon$ 。该实验方法可用于监测相似复合材料固化过程中的温度变化和收缩应变。

参 考 文 献

- 1 S. M. Huybrechts, T. E. Meink, P. M. Wegner *et al.*. Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures[J]. *Compos Part A*, 2002, **33**(2): 155~161
- 2 H. K. Kang, D. H. Kang, H. J. Bang *et al.*. Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2002, **11**(2): 279~287
- 3 M. Mülle, F. Collombet, P. Olivier *et al.*. Assessment of cure residual strains through the thickness of carbon/epoxy laminates

- using FBGs[J]. *Compos Part A*, 2009, **40**(11): 94~104
- 4 Liu Jinxuan, Chai Jing, Zhu Lei *et al.*. Theory of fiber Bragg grating multi-point sensing of rock deformation and its engineering application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2143~2147
刘金瑄, 柴敬, 朱磊等. 岩层变形检测的光纤光栅多点传感理论与工程应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2143~2147
- 5 Yang Sha, Geng Jianxin, Ye Qing *et al.*. Application of fiber Bragg gratings in monitoring metal corrosion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 641~644
阳莎, 耿建新, 叶青等. 光纤光栅在金属锈蚀传感中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 641~644
- 6 Li Hongnan, Zhou Guangdong, Ren Liang. Strain transfer model of fiber sensors under non-axial stress [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 787~793
李宏南, 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
- 7 Li Hongnan, Ren Liang. Fiber Bragg Grating Sensor Technology in Structural Health Monitoring[M]. The First Edition, Beijing: Structure Industry Publishing House of China, 2008
李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 第一版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- 8 Ren Liang, Li Hongnan, Hu Zhiqiang *et al.*. Development and application of FBG strain sensor with enhanced sensitivity in the model vibration experiment[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(11): 1437~1441
任亮, 李宏男, 胡志强等. 一种增敏型光纤光栅应变传感器的开发及应用[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(11): 1437~1441
- 9 Liang Ren, Jianyun Chen, Hongnan Li *et al.*. Design and application of a fiber Bragg grating strain sensor with enhanced sensitivity in the small-scale dam model [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2009, **18**(3): 035015
- 10 Wan Libing, Wu Zhanjun, Zhang Boming *et al.*. Cure monitoring of composites using fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, **21**(3): 1~5
万里冰, 武湛君, 张博明等. 光纤布拉格光栅监测复合材料固化[J]. *复合材料学报*, 2004, **21**(3): 1~5
- 11 Zhao Haitao, Zhang Boming, Wu Zhanjun *et al.*. Monitoring of cure strain on the interface between filament wound composites and aluminum plate using FBG [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, **23**(6): 64~68
赵海涛, 张博明, 武湛君等. 光纤光栅监测缠绕复合材料与铝板界面的固化应变[J]. *复合材料学报*, 2006, **23**(6): 64~68
- 12 V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, L. S. Ong *et al.*. Cure monitoring of smart composites using fiber Bragg grating based embedded sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **79**(2): 153~161
- 13 A. L. Kalamkarov, S. B. Fitzgerald, D. O. MacDonald. On the processing and evaluation of pultruded smart composites [J]. *Composites: Part B*, 1999, **30**(7): 753~763
- 14 Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming *et al.*. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1959~1961
曹彬, 欧攀, 贾明等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1959~1961
- 15 Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun *et al.*. Temperature compensation for fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 677~679
黄勇林, 李杰, 开桂云等. 光纤光栅的温度补偿[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 677~679