

布拉格光栅植入角度对在复合材料中传感检测特性影响^{*}王 奔¹,段玉岗¹,李金键¹,高 侃²

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049;

2. 中国电子科技集团公司第二十三研究所,上海 200437)

[摘要] 植入到复合材料内部的布拉格光栅可用于监测复合材料内部应力应变及温度变化,但是现有研究里对于光栅植入过程中对光栅传感检测特性造成的影响却未见报道。在植入过程中,植入光栅与碳纤维存在的夹角将会产生内应力,这会对光栅传感检测效果产生影响。为了研究其影响规律,通过将光栅植入到准各向同性复合材料的不同层中,研究光纤与相邻预浸带中碳纤维之间的夹角对温度与应力检测特性影响。研究表明:光栅植入角度会对其温度和应变传感检测特性造成较大影响,当光栅与相邻预浸带碳纤维存在夹角时,光栅拉伸应变测量值与应变片测量值出现偏差,发生啁啾现象;同时光栅与相邻预浸带碳纤维的夹角越大,光栅温度检测曲线线性拟合度越差。

关键词: 布拉格光栅; 复合材料; 温度; 应变; 传感特性

Study on Sensing Characteristics of Different Embedding Angles of Bragg Gratings in Composites

WANG Ben¹, DUAN Yugang¹, LI Jinjian¹, GAO Kan²

(1. State Key Lab for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. No. 23 Research Institute, China Electronic Technology Corporation Group, Shanghai 200437, China)

[ABSTRACT] Fiber Bragg grating (FBG) is proposed to embed in the composites to monitor the variation of strains and temperature, however, the influence of embedment on the sensing performance is not clear in the current studies. In the process of embedment, the angle between OF (optical fiber) and carbon fiber in the adjacent prepreg will generate the internal stress, which affect the sensing performance. For the sake of the investigation on this influence, the composites embedded the varying angle of OF is prepared and tested under the variation of strains and temperature to observe the influence on the sensing. Obtained results indicated that the angle of OF will affect the sensing performance including strains and temperature. In the inspection under the temperature, the degree of fitting for the sensing curve decreases with the increasing angle. Also, the deviation of the data measured by OF and strain gauge increases with the angle, implying a bigger deviation.

Keywords: Bragg grating; Composites; Temperature; Strain; Sensing performance

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.07.105

复合材料因其高比强度、高比模量、良好的抗疲劳特性等优点而广泛应用于航空航天、能源装备等领域,但复合材料构件的制造与维护成本较高,在复合材料结构服役期间需要进行实时检测,及时发现内部存在的缺陷,并采取相应的修补措施^[1-2]。光纤传感器体积小、灵敏度高、不受电磁干扰,易于植入到复合材料内部,实现工程化应用。因此光纤智能复合材料的研究越来越受到重视^[3],目前对于植入到复合材料内部光纤光栅传感特性的相关研究主要集中于对复合材料热压罐固化过程及复合材料温度和应变的检测进行研究^[4-5]。如

Satori等^[6]研究了小直径光纤光栅植入复合材料后对温度和应变的检测特性。Viera等^[7]研究了不同光栅涂层和光栅长度对光栅检测特性的影响规律。但是,目前的研究主要集中于改善植入光栅的检测效果,却很少有研究对于光纤植入方式与检测效果影响机制进行研究。对于光纤植入方式,现有的研究里主要针对于光纤与碳纤维之间夹角对复合材料力学性能的影响^[8-9],但是却未有有关夹角对在复合材料内传感检测特性影响的相关研究。本文对内置于准各向同性复合材料层间的光纤传感器在拉伸与弯曲过程中的检测特性进行研究,并与粘贴在试样表面的应变片检测数据进行比较,探索植入复合材料的光纤传感器在复合材料应变检测中的有

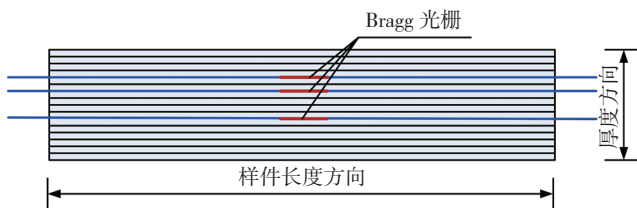
* 基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0419)、西安交通大学基本科研业务费(08143020)资助。

效性与可靠性。

1 试验材料与方法

试验用碳纤维预浸带由威海光威公司提供,其中碳纤维为 TC35-12K (台湾台丽),树脂为环氧树脂,预浸带树脂的质量分数为 33%。光纤为 fibertronix 公司生产的聚酰亚胺涂层单模光纤(OF),纤芯直径为 8.4 μm ,包层直径为 125 μm 度为 10 μm ,布拉格光栅由中国电子科技集团公司第二十三研究所刻制,光栅长度为 10mm。

试验采用准各向同性的复合材料层合板[-45/90/45/0/-45/90/45/0]_s,样件的总体尺寸为 250mm \times 15mm \times 1mm。检测特性试验包括温度特性检测以及拉伸应力检测。其中,拉伸试验在 INSTRON8803 型试验机上进行,分级施加载荷至试样破坏,加载速度为 1.5mm/min。在拉伸过程中应变仪连续监测试样表面的应变变化,由光栅解调仪(SM125)收集检测信号。对于拉伸试验,存在光纤植入方向、各层碳纤维方向、拉伸方向 3 种方向,而拉伸应力基本沿平面方向发展,因此为了减少试验量,保证试验精度与可靠性,试验中将光纤植入方向与拉伸方向保持一致,植入到不同复合材料层中,以实现不同植入光纤与碳纤维之间的夹角。试验将光纤植入到 3 种不同夹角之中(0/0 层、0/45、45/90 层)如图 1 所示。布拉格光栅位于样件的中间位置与拉伸方向相同,而应变片粘贴在试样表面的中心位置。采用高低温箱提供温度环境通过电子加热炉得到不同温度下布拉格光栅的温度检测图谱。试验中,由箱内的温度计和面板上的数字表读取温度值,精度为 1 $^{\circ}\text{C}$ 。同时,本文将与碳纤维方向一致的光纤植入到单向复合材料当中(中心位置)作为对比试样,以尽可能减少角度畸变对光栅检测信号带来的影响^[10],比较排除植入光纤的复合材料在固化过程中会产生热应力等因素的影响。



(a) 植入光纤的复合材料样品示意图



(b) 植入光纤的复合材料拉伸应变测试样品

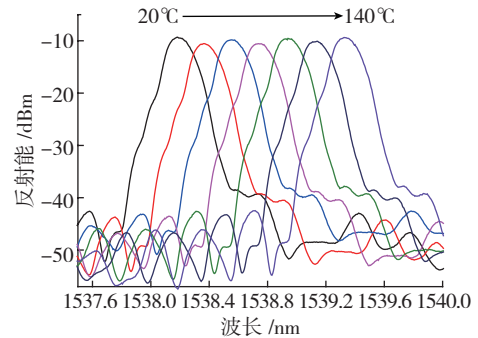
图1 植入光纤的复合材料试样件

Fig.1 Sample of composite embedded with OF

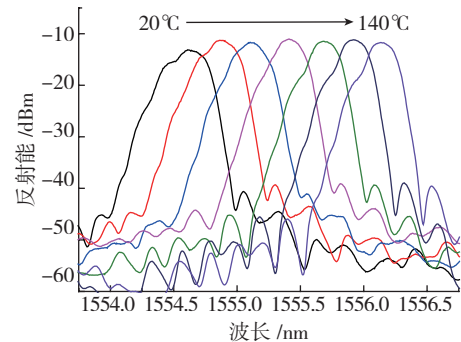
2 结果与分析

2.1 不同植入角度布拉格光栅温度特性

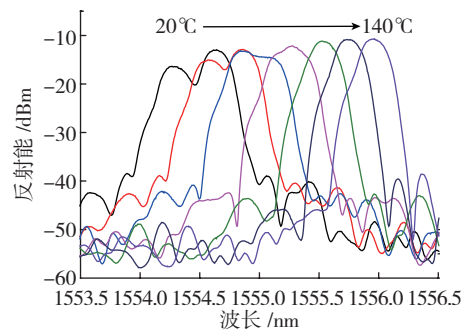
植入到复合材料层合板内的光栅在各温度下的反射谱如图 2 所示。可知,光纤植入到不同层中,不同温



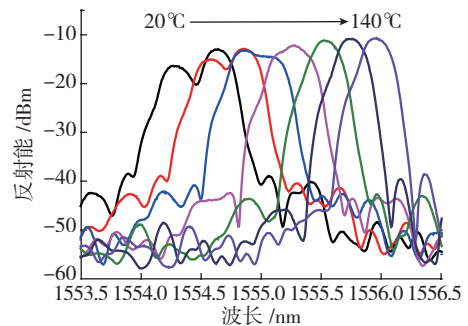
(a) OF 植入在单向层合板中间光栅的反射图谱



(b) OF 植入在 0/0 层中间光栅的反射图谱



(c) OF 植入在 0/45 层中间光栅的反射图谱



(d) OF 植入在 45/90 层中间光栅的反射图谱

图2 20~140 $^{\circ}\text{C}$ OF 植入在不同层内的反射光谱图

Fig.2 Spectra of OF embedded composite arranging from 20 $^{\circ}\text{C}$ to 140 $^{\circ}\text{C}$

度下检测特征峰并不一样。在 0/0 层内,光栅的特征峰形态基本与单向板保持一致,同时特征峰峰值随着温度增加而向右移动,出现啾啾现象;而在 0/45 层与 45/90 层内,低温下的特征峰呈现双峰形态,而随着温度的增加特征峰恢复到单峰形态。

为定量描述布拉格光栅反射谱的变化,将 OF 植入前与植入后的半高峰宽(FWHM)进行比较。图 3 为植入前后各光栅半高峰宽的变化对比图。可知,植入到单向、0/0、0/45、45/90 层中间光栅的半高峰宽分别增大了 0.11nm、0.123nm、0.257nm、0.443nm,说明 OF 植入到复合材料后各光栅光谱均发生变化,但是与单向层合板相比,光纤植入到准各向同性层合板中半高峰宽变化更大,并且随着相邻两层预浸带的夹角越大,光栅半高峰宽度也越大。在准各向同性层合板中,而当 OF 与相邻两层预浸带的夹角越大,光栅反射谱变化更加明显。这是因为在复合材料进行热压罐固化时,植入到准各向同性层合板中的光纤光栅周围树脂和碳纤维分布不均匀,加上树脂与碳纤维的热膨胀系数不匹配,导致在固化降温阶段产生了不均匀的收缩应力,从而导致光栅光谱出现劣化现象。图 4 为采用 VH-8000 数字光学显微镜观察到的 3 根植入到复合材料内光纤光栅的断面图。由图可以看到,当 OF 植入到 45/90 层预浸带中间时,因为与相邻层的预浸带存在夹角,OF 周围有较大范围的树脂富足区,造成光栅周围产生较大残余不均匀应力;而植入到 0/45 层和 0/0 层预浸带中间的 OF 四周包围着碳纤维,光纤已经移动到 0° 方向的预浸带中,OF 植入造成的局部不均匀残余应力比较小。

此外,通过对各光栅反射谱随温度的变化趋势图的观察可以看出,当复合材料的温度升高时,植入到复合材料的光栅反射谱劣化现象逐渐消失。图 5 所示为光纤光栅半高峰宽随温度的变化关系曲线,随着温度的升高,各光栅的半高峰宽值逐渐减小,当温度达到 100℃ 时,植入到 0/0 层和 0/45 层预浸带的光栅反射谱半高峰宽开始保持稳定,100℃ 之后随着温度的升高仅仅光栅

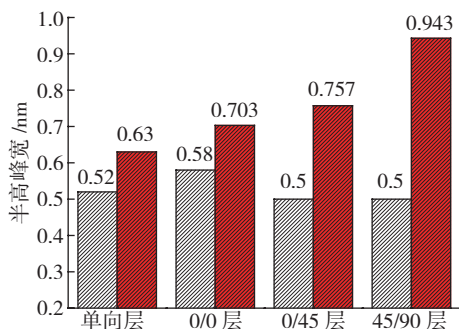
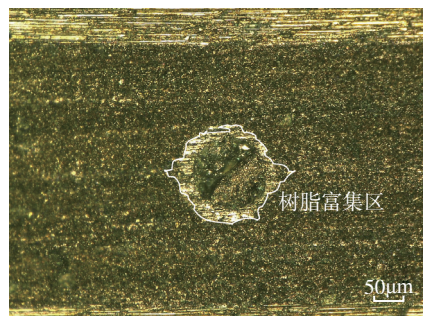


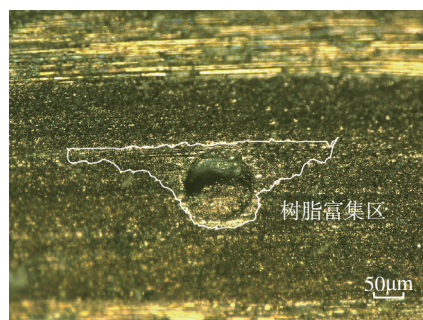
图3 OF植入前后半高峰宽变化

Fig.3 Variation of FWHM before and after OF embedding

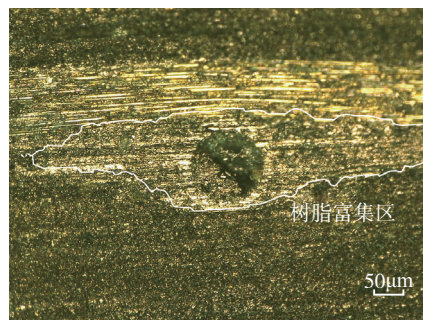
反射波长发生变化,光栅反射谱形状不再发生变化;而植入到 45/90 层预浸带间光纤光栅反射谱的半高峰宽在温度达到 120℃ 时开始保持稳定。由上述现象可以证实,与相邻层预浸带不同夹角的光栅反射谱出现劣化现



(a) 植入 0/0 层预浸带间的 OF



(b) 植入 0/45 层预浸带间的 OF



(c) 植入 45/90 层预浸带间的 OF

图4 光栅植入复合材料后的断面图

Fig.4 Cross-section view (microscopic scale) for the composites structure with the embedded OF

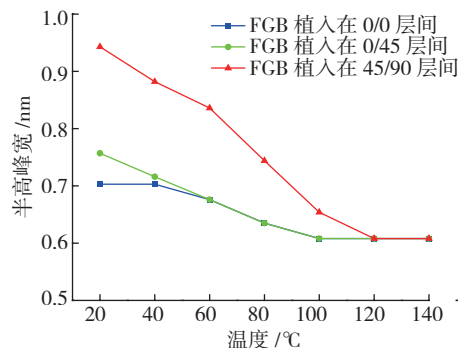


图5 光栅半高峰宽随温度的变化曲线

Fig.5 Variation of embedded OF FWHM with temperature

象是由于光栅周围的热固化残余不均匀热应力导致的,且植入的 OF 与复合材料的夹角越大,固化后在光纤周围产生的残余不均匀应力越大。因此随着温度升高,复合材料发生热膨胀,使复合材料热固化降温过程中在光纤周围产生的残余不均匀应力逐渐释放,各光栅反射谱的形状也逐渐恢复。

植入复合材料各光栅的反射波长随温度的变化关系曲线如图 6 所示,植入到 0/0 层、0/45 层、45/90 层预浸带中间的布拉格光栅反射波长与温度变化的拟合曲线分别为 $y=0.01296x+1554.353$, $y=0.01265x+1554.335$, $y=0.01136x+1554.351$, 各拟合曲线的相关系数分别为 0.998、0.996、0.968, 可以看到,与相邻预浸带存在夹角时光栅温度检测拟合曲线的线性拟合度相对较差,且夹角越大,拟合曲线的线性拟合度越差。这是由于光栅反射谱发生劣化,在复合材料温度升高过程中光栅反射谱形状不断变化而导致光栅反射波长在原来预定偏移量的基础上的无规律变化而引起的。

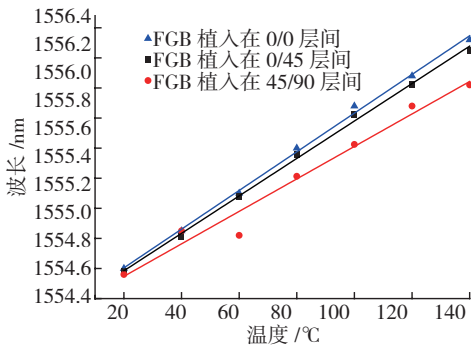
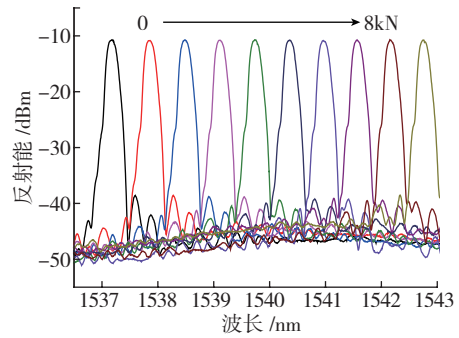


图6 光栅波长-温度拟合曲线
Fig.6 Fitting curve of FBG wavelength versus temperature

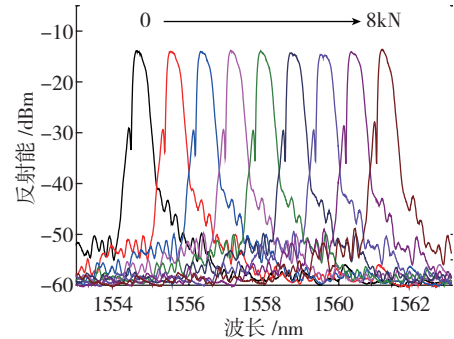
2.2 不同植入角度光栅拉伸应变检测特性

图 7 为各光栅反射谱随加载载荷的变化,与单向层合板相比,植入到 0/0 层预浸带中间的光栅光谱在加载过程中相对稳定,从载荷为 5kN 开始光谱出现轻微变化,但总加载过程光谱形状保持性较好。而植入到 0/45 层预浸带中间的光栅光谱加载之前已经出现劈裂峰,这主要是由于光纤与相邻碳纤维之间存在夹角,引起应力不均匀造成的;随着拉伸载荷的增大,光谱中的最高峰逐渐在两个峰之间发生偏移,2kN 以内光栅左侧峰为最高峰,而 3~4kN 时右侧峰为最高峰,5~6kN 变换到左侧,7~8kN 最高峰又出现在右侧,这说明随着应力的增加光栅周围的应力分布发生了变化。而对于植入到 45/90 层的光栅,这种特征峰的畸变变得更加强烈,并且随着载荷的增加,特征峰也发生了两个峰形状的变化,这说明与 0/45 层相比,45/90 层的中光栅周围应力分布更加不均匀,严重影响了光栅特征峰的选取^[11]。

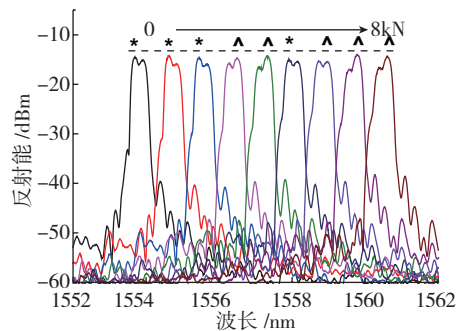
为了进一步说明由于光纤在不同铺层中对应变测



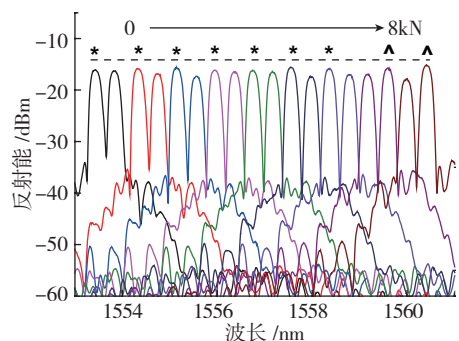
(a) OF 植入在单向层合板中间光栅的反射图谱



(b) OF 植入在 0/0 层中间光栅的反射图谱



(c) OF 植入在 0/45 层中间光栅的反射图谱



(d) OF 植入在 45/90 层中间光栅的反射图谱
注:“*”表示左峰峰值较大,“^”表示右峰峰值较大。

图7 OF植入在不同层内随拉伸载荷变化的反射光谱图(0~8kN)
Fig.7 Spectra of OF embedded composites with tensile load arranging from 0 to 8kN

试的影响,表 1 将各加载载荷下应变片与光栅的应变值进行了比较。可知,在各加载载荷下,植入到 0/0 层预浸带中间光栅的应变测量值小于应变片的应变测量值,

表1 拉伸过程应变片与光栅对应的应变值 $\mu\epsilon$

载荷 /kN	应变片	0/45 层光栅	45/90 层光栅	0/0 层光栅
0	0	0	0	0
1	767	758	746	767
2	1455	1470	1421	1438
3	2136	2333	2100	2108
4	2811	3037	2771	2775
5	3488	3516	3425	3450
6	4168	4196	4088	4113
7	4866	5075	5133	4792
8	5531	5758	5808	5471

而植入到 0/45 层间光栅的应变值远大于应变片的应变值；对于植入到 45/90 层的光栅来说，其应变值在载荷 6kN 之前与应变片的测量值较为接近，但是当载荷大于 6kN 时，光栅的应变值大于应变片的检测值。

为表示各不同植入角度光栅的检测精度，采用在各载荷下光栅测量到的应变值与应变片测量到的应变值差值绝对值的平均数 $\overline{\Delta\epsilon}$ 来表示^[12]

$$\overline{\Delta\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n |\epsilon_{\text{光栅 } i} - \epsilon_{\text{应变片 } i}|}{n}$$

式中： $\epsilon_{\text{光栅 } i}$ 为加载载荷为 i 时光栅应变值 ($\mu\epsilon$)； $\epsilon_{\text{应变片 } i}$ 为加载载荷为 i 时应变片应变值 ($\mu\epsilon$)。

$\overline{\Delta\epsilon}$ 计算结果见图 8，当相邻两层预浸带的方向为 0/45、45/90 时，光栅的 $\overline{\Delta\epsilon}$ 值远远大于植入到 0/0 层预浸带中间的光栅，说明与相邻两层预浸带的夹角增大会引起光栅较大的检测偏差，影响光栅的检测精度。

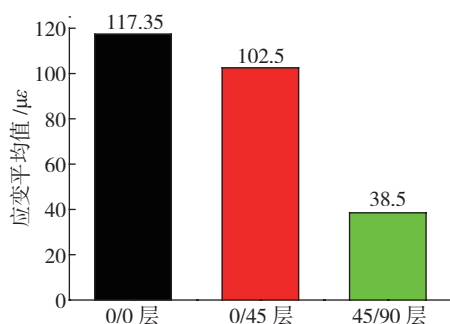


图8 光栅与应变片测量值偏差平均值
Fig.8 Average difference values of strain

3 结论

在准各向同性的复合材料层合板中，OF 在不同层内会对其温度和应变检测特性造成较大影响，与相邻层预浸带的夹角越大，光栅周围应力分布越不均匀，造成光栅反射谱劣化现象越严重，光栅检测曲线线性拟合度

越差；同时比较准各向同性各层的测试结果，位于 0/0 层内的光栅反射图谱特征峰明确，线性拟合结果较好，因此，对于光纤植入复合材料来说，应将光栅植入与相邻碳纤维同一方向的层内。

参考文献

- [1] SURGEON M, WEVERS M. Static and dynamic testing of a quasi-isotropic composite with embedded optical fibers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(3):317-324.
- [2] 唐桂云,王云飞,吴东辉,等. 先进复合材料的无损检测[J]. 纤维复合材料, 2006, 23(1): 33-36.
TANG Guiyun, WANG Yunfei, WU Donghui, et al. Non-destructive test of advanced composite materials[J]. Fiber Composites, 2006, 23(1): 33-36.
- [3] 董晓马,张为公. 光纤智能复合材料的研究及其应用前景[J]. 测控技术, 2004, 23(10): 3-5.
DONG Xiaoma, ZHANG Weigong. Development and applications of fibreoptic smart composites[J]. Measurement and Control Technology, 2004, 23(10): 3-5
- [4] KANG H K, KANG D H, BANG H J, et al. Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11(2): 279.
- [5] MURUKESHAN V M, CHAN P Y, ONG L S, et al. Cure monitoring of smart composites using fiber Bragg grating based embedded sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 79(2): 153-161.
- [6] SATORI K, FUKUCHI K, KUROSAWA Y, et al. Polyimide-coated small-diameter optical fiber sensors for embedding in composite laminate structures[C] //Proceedings the International Society for Optical Engineering, 2001, 4328: 285-294.
- [7] VIERA A, DE OLIVEIRA R, FRAZÃO O, et al. Effect of the recoating and the length on fiber Bragg grating sensors embedded in polymer composites[J]. Materials & Design, 2009, 30(5): 1818-1821.
- [8] 刘荣梅. 基于界面分析的光纤智能复合材料结构强度性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
LIU Rongmei. The study of optical fiber reinforced composite based on the interface[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [9] LEE D, LEE J, YUN S. The mechanical characteristics of smart composite structures with embedded optical fiber sensors[J]. Composite Structures, 1995, 32(1):39-50.
- [10] EATON N, DREW R, GEIGER H. Finite element stress and strain analysis in composites with embedded optical fiber sensors[J]. Smart Materials and Structures, 1995, 4(2):113-117.
- [11] 黄贤武, 郑筱霞. 传感器原理与应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999.
HUANG Xianwu, ZHENG Xiaoxia. Principle and application of sensors[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1999.
- [12] 常新龙, 何相勇, 周家单, 等. 基于 FBG 传感器的复合材料固化监测[J]. 宇航材料工艺, 2010(4):80-83.
CHANG Xinlong, HE Xiangyong, ZHOU Jiadan, et al. Cure monitoring of composite with fiber bragg grating sensor[J]. Aerospace Material & Technology, 2010(4):80-83.

通讯作者: 段玉岗, 教授, 研究方向为复合材料自动化成型技术, E-mail: ygduan@xjty.mail.edu.cn.

(责编 叶枫)