

文章编号: 1000-3851(2013)01-0054-08

热残余应力对内埋光纤光栅传感器性能的影响

周玉敬, 刘 刚*, 李雪芹, 益小苏

(北京航空材料研究院 先进复合材料重点实验室, 北京 100095)

摘 要: 将布拉格光纤光栅(FBG)埋植于复合材料 T 型加筋板结构非干涉区一三角填充区作为应变传感器对复合材料加筋板在固化过程及冲击后压缩过程中的应变变化进行监测。对比了光纤刻栅区采用 UV 光固化树脂涂层保护和未保护的两种 FBG 传感器的波谱信号变化; 分析了复合材料在固化成型过程中产生的非轴对称热残余应力对 FBG 传感性能的影响。结果表明, 刻栅区采用聚合物涂层保护的 FBG 传感器的半峰宽(FWHM)在固化过程中未发生变化, 并且聚合物涂层可以有效地消除非轴对称热残余应力对光纤光栅反射波谱的影响。在冲击后压缩过程中, 采用聚合物涂层保护的 FBG 传感器测得的应变与贴于试样表面的应变片测得的应变数据一致性较好。本文对埋植于复合材料加筋板三角填充区的 FBG 传感器在复合材料固化过程及冲击后压缩过程中应变监测的有效性 & 可靠性进行了有益的探索。

关键词: FBG 传感器; 复合材料; T 型加筋板; 残余应力; 压缩应变

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

Effect of thermal residual stress on fiber Bragg grating sensors embedded in T-stiffened panels

ZHOU Yujing, LIU Gang*, Li Xueqin, YI Xiaosu

(Science and Technology on Advanced Composites Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: To monitor the strains of the composite T-stiffened panels during its curing and compression after impact, the fiber Bragg grating (FBG) sensors were embedded in the triangle area of the composite T-stiffened panels (structure non-interference region). The reflection spectra obtained from the uncoated FBG sensors and the FBG sensors coated with UV-cured resin were compared, and the effect of thermal residual stress on the reflection spectrum was studied. It was indicated that the full width at half maximum (FWHM) value of the coated FBG sensor almost unchanged during the curing, and the thermal residual stress upon the reflection spectrum can be attenuated by coating UV-cured resin on the FBG sensors. Furthermore, the strain measured by the coated FBG sensor is correspondence to the results of the strain gauge on the composites surface. The validity of the strain measured by FBG sensors was verified during the curing and the compression after impact.

Keywords: FBG sensors; composites; T-stiffened panels; residual stress; compression strain

近年来, 纤维增强热固性树脂基复合材料因其质量轻, 比强度、比刚度高, 可设计性强等优点, 被广泛应用于航空航天结构的制造^[1]。先进复合材料具有高度各向异性的层合结构特点, 是由纤维增强体及基体树脂两种完全异相的材料复合而成, 两相材料的物理性能完全不同, 因而复合材料在固化过程中会产生热残余应力^[2]。此外复合材料在使用过程中容易受到外来物的冲击损伤, 尤其是在低速

冲击作用下, 其内部可能会发生表面不可见的分层损伤, 从而大大降低结构的承载能力^[3]。目前广泛采用的复合材料无损检测技术主要为离线、静态的结构损伤检测方法^[4], 无法实现对复合材料结构在使用过程中的内部损伤进行实时在线监测, 同时也无法对复合材料在固化过程中所产生的残余应力进行监测。

布拉格光纤光栅 (FBG) 作为一种智能化传感

收到初稿日期: 2011-12-21; 收到修改稿日期: 2012-04-22; 网络出版时间: 2012-10-11 17:22:59

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20121011.1722.010.html

基金项目: 国家自然科学基金(51203144, 51103121); 航空科学基金(20115221003, 20125268002); 国家 973 计划(2010CB631101)

通讯作者: 刘 刚, 高级工程师, 高性能树脂基复合材料 E-mail: liugangphd@gmail.com

器,已应用于建筑、石油等行业的在线结构健康监测^[5]。此外,FBG 传感器的外形尺寸较小,容易埋入复合材料结构内部,与基体材料具有良好的兼容性,一定程度上可满足复合材料结构健康监测对传感器提出的微型化、高可靠性的特殊要求。因此,FBG 传感器被认为是复合材料结构健康监测中最有前途的传感器之一^[6-7]。将 FBG 传感器埋入到复合材料内部,对复合材料固化及使用过程中的应变进行在线监测,对提高复合材料结构的可靠性与实现复合材料结构智能化具有重要意义^[8-9]。如武湛君等^[10]利用单根布拉格光纤光栅监测了复合材料层压板在固化过程中内部的应变变化。Takeda 等^[11]利用光纤光栅监测复合材料层压板冲击过程中的分层损伤,研究了冲击产生的分层损伤面积与光纤光栅反射波谱的相关性。但由于 FBG 传感器材料与基体材料在物理性能上存在较大差异,将 FBG 传感器引入复合材料层板内部,依然会对复合材料的微观结构与宏观力学性能产生一定的影响^[12]。

本文作者将 FBG 传感器引入到复合材料 T 型加筋板的结构非干涉区—三角填充区,在结构非干涉前提下,监测复合材料加筋板在固化过程与冲击后压缩过程中的应变变化;研究了固化过程中非轴对称热残余应力对 FBG 传感器反射波谱的影响;验证了经聚合物涂层保护的 FBG 传感器在复合材料冲击后压缩过程中应变监测的精度及可靠性。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

CCF300/5228A 碳纤维环氧树脂预浸料,北京航空材料研究院,其固化工艺制度如图 1 所示。采用热压罐成型工艺制备复合材料 T 型加筋板。复合材料加筋板蒙皮尺寸为 250 mm×180 mm,加筋板蒙皮铺层顺序: [45/0/-45/90/45/0/-45/90/45/0/-45/0]_s,筋条的铺层顺序: [45/-45/0/45/-45/0/45/-45/0/45/-45/0/45/-45/0]_s。

实验中所用的 FBG 传感器纤芯直径为 (125±5) μm,涂覆层为环氧树脂,涂覆厚度为 62.5 μm,用于增强光纤的力学强度和耐老化性能,中心波长为 152.5~156.5 μm,刻栅区域长度为 10 mm,在光纤刻栅过程中刻栅区原有的涂覆层将被去掉。本

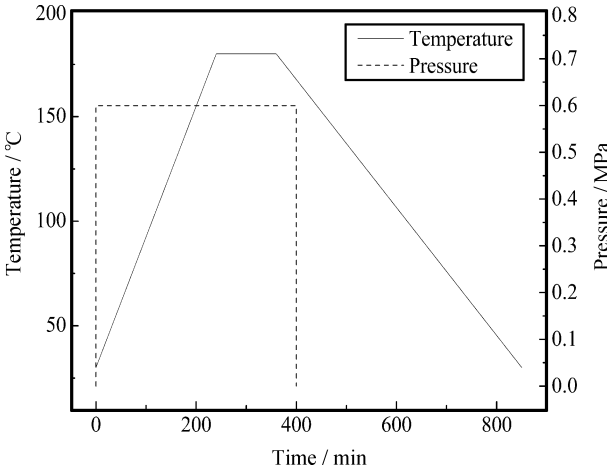


图 1 CCF300/5228A 复合材料固化工艺制度

Fig. 1 Cure schedule of CCF300/5228A prepregs

文中使用了两种 FBG 传感器,一种为刻栅区未进行涂层保护,另外一种则在刻栅区重新涂覆紫外光固化树脂保护层。FBG 传感器沿加筋板三角填充区的 0°纤维方向埋入三角填充区,应变片粘贴于加筋板蒙皮表面,FBG 传感器及应变片位置如图 2 所示。本文中共制备了四个三角填充区埋植 FBG 传感器的加筋板试件,埋植于同一加筋板中为相同类型的 FBG 传感器。在复合材料成型过程中,采用金属铠装保护 FBG 传感器引线,避免其在固化及后续使用过程中折断。

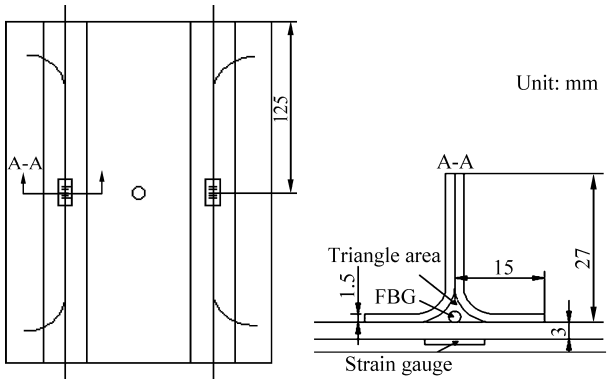


图 2 光纤光栅埋植位置示意图

Fig. 2 Stiffened panels with embedded FBG sensors
(Circle—Impact location; Rectangle—Strain gauge;
Short lines—FBG sensors)

1.2 固化监测

利用埋植于复合材料 T 型加筋板三角填充区中的 FBG 传感器对复合材料加筋板固化过程中的应变进行监测,FBG 传感器信号由布拉格解调仪解调(型号 1ZH100)。实验装置如图 3 所示。

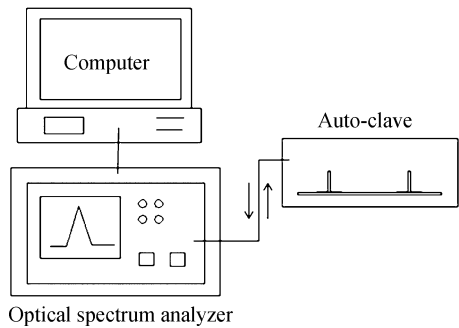


图 3 复合材料固化过程应变监测实验装置
Fig. 3 Test setup of the experimental system
in the cure process of composite

1.3 冲击后压缩测试

采用自由落体冲击设备对复合材料 T 型加筋板进行低速冲击试验，冲击试验示意图如图 4(a)所示，复合材料加筋板采用四边固支的方式，冲头端部为半球形，直径为 16 mm，冲头质量为 5.5 kg，通过调整冲头的下落高度来控制冲击能量，本文的冲击试验中冲击能量为 3 J/mm。冲击后的加筋板在 INSTRON 试验机上进行压缩试验，如图 4(b)所示。在冲击后压缩过程中，应变仪连续监测加筋板的应变变化，光纤光栅波长信号由光栅解调仪连续采集。

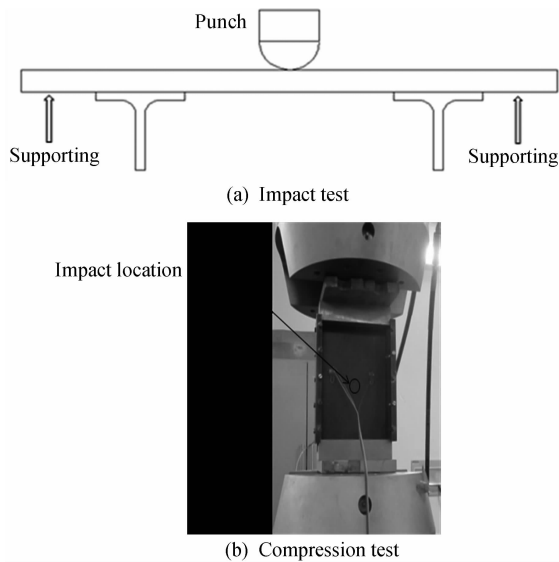


图 4 冲击及压缩实验装置
Fig. 4 A specimen for impact test and compression test

2 结果与讨论

2.1 未涂覆光纤光栅固化过程中的波谱变化

固化过程中未涂覆光纤光栅的反射波谱如图 5 所示。在升温阶段分别记录了 30、80、130、180 °C 下 FBG 传感器的波谱形状(如图 5(a)所示)，随着

温度的升高，FBG 传感器的中心波长逐渐增大，但反射波谱的波形未发生明显变化。在 180 °C 恒温固化阶段，其中心波长略有降低，但波形不变(如图 5(b)所示)。在固化后的降温阶段，传感器的中心波长逐渐降低，在温度降至 100 °C 之前，波形均未发生

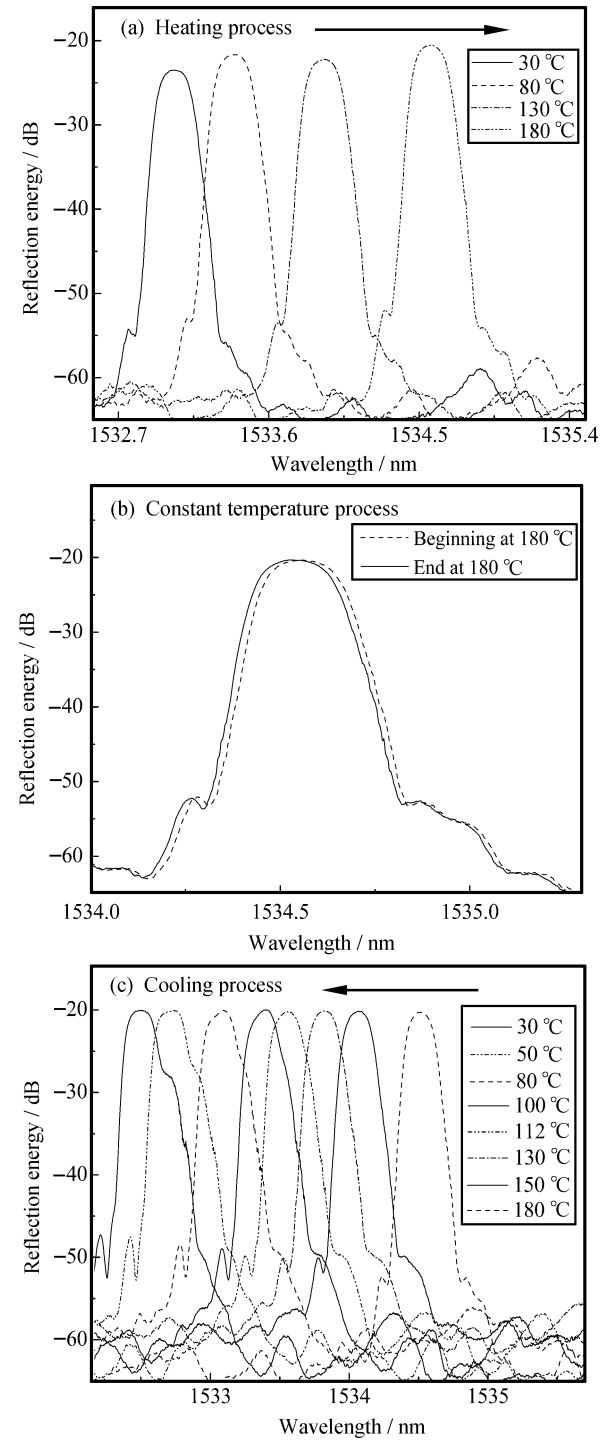


图 5 固化过程中未涂覆的 FBG 传感器反射谱图
Fig. 5 Reflection spectra from the uncoated
FBG sensor during the curing process

明显变化;在温度低于 100 ℃ 后,FBG 传感器的反射波谱开始发生畸变,且随着温度继续下降,反射波谱的波状畸变愈加明显(如图 5(c)所示)。图 6 为升温 and 降温过程中光纤光栅反射波谱半峰宽(FWHM)变化图。可见,在升温过程中,光纤光栅的反射波谱半峰宽未发生明显变化;在降温过程中,光纤光栅的反射波谱半峰宽随温度的降低而增大,降温至 30 ℃ 时 FBG 传感器的 FWHM 值比原来增加了 61.5%,波谱形状发生较大畸变(如图 7 所示)。

从实验结果中可以发现,在刻栅区未进行涂层保护的光纤光栅在复合材料固化过程中,其波谱发生较大畸变,如何理解其背后所代表的物理现象,必须考虑树脂在固化过程中的分子结构变化及内部的应力状态。

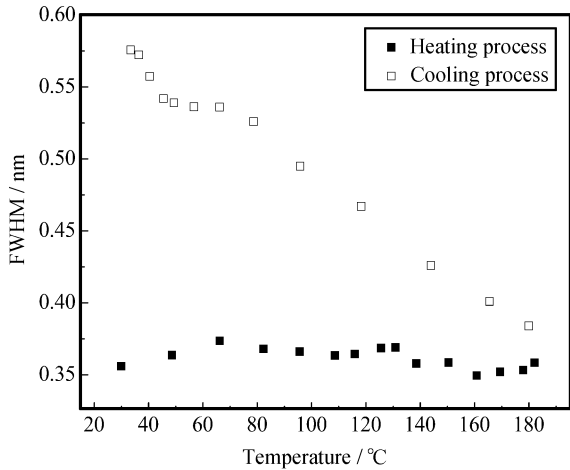


图 6 固化过程中未涂覆的 FBG 传感器反射半峰宽

Fig. 6 FWHM of the uncoated FBG sensor during the curing process

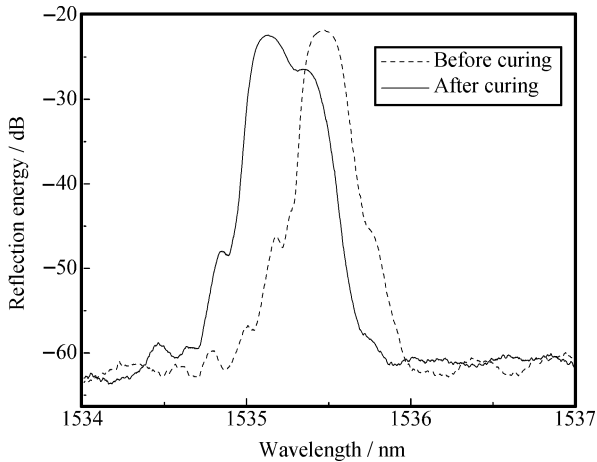


图 7 固化前后未涂覆的 FBG 传感器反射谱图

Fig. 7 Reflection spectra of the uncoated FBG sensor before and after curing

首先,在升温阶段,树脂黏度随温度升高逐渐降低,呈黏流态,树脂由于温度升高将产生一定的热膨胀,此时树脂的黏度较低,分子运动能力较强,因热膨胀而产生的内应力通过树脂分子的热运动即可完全耗散,因此作用于光纤光栅上的应力也较小。FBG 传感器所表现出的反射中心波长增大的正应变状态,主要来自于温度的升高,此时 FBG 传感器的波谱形状无明显变化。

在恒温固化阶段,树脂发生交联反应,树脂黏度随固化度的上升逐渐上升,由黏性流体状态逐渐转化为具有一定固化度的黏弹性固体。其分子结构呈现出三维网络结构。一般来说,绝大多数热固性树脂将在此时发生固化体积收缩即化学收缩,同时在其内部出现热残余应力,并作用于光纤光栅而导致其中心波长比固化反应起始阶段略有降低。

而在降温阶段,温度升高带来的树脂的体积热膨胀消失,变为温度降低导致的体积收缩,与固化反应带来的化学收缩相比,温度降低导致的体积收缩即物理收缩则更为明显,由于树脂的热膨胀系数与纤维增强体的热膨胀系数之间的不匹配性,此时复合材料内部将出现较大的非轴对称热残余应力,且其随着温度的降低而逐渐增大。此时,对于 FBG 传感器而言,复合材料内部非轴对称热残余应力将直接作用于整个光纤光栅,尤其是无任何涂层的刻栅区。在 100 ℃ 以上,复合材料尤其是树脂基体仍处于受热膨胀状态,因此非轴对称热残余应力较小,温度降至 100 ℃ 以下,由于树脂的热膨胀系数与纤维增强体的热膨胀系数不匹配性而导致的作用于光纤刻栅区的非轴对称热残余应力逐渐增大。FBG 传感器是一种波长选择反射器,其中心波长 λ_B 与光纤纤芯有效折射率 n 以及光栅周期 Λ 的关系为

$$\lambda_B = 2n \cdot \Lambda$$

其中心波长在温度和应力等外场作用下容易发生偏移,光纤光栅周围的温度场和作用于光纤光栅上的应力是两个导致光纤光栅中心波长漂移的主要物理量,如图 8(a)所示。在复合材料降温过程中,树脂与纤维的热膨胀系数不一致,在复合材料内部产生非均匀热残余应力,当复合材料加筋板降至室温时,无涂层保护光栅受非均匀残余拉伸应力或压缩应力作用^[2],光栅周期发生非均匀变化(如图 8(b)所示),由于光栅反射波谱发生畸变导致 FBG 传感器的中心波长发生漂移,从而可能会降低 FBG 传感器测量结果的精度及可靠性。

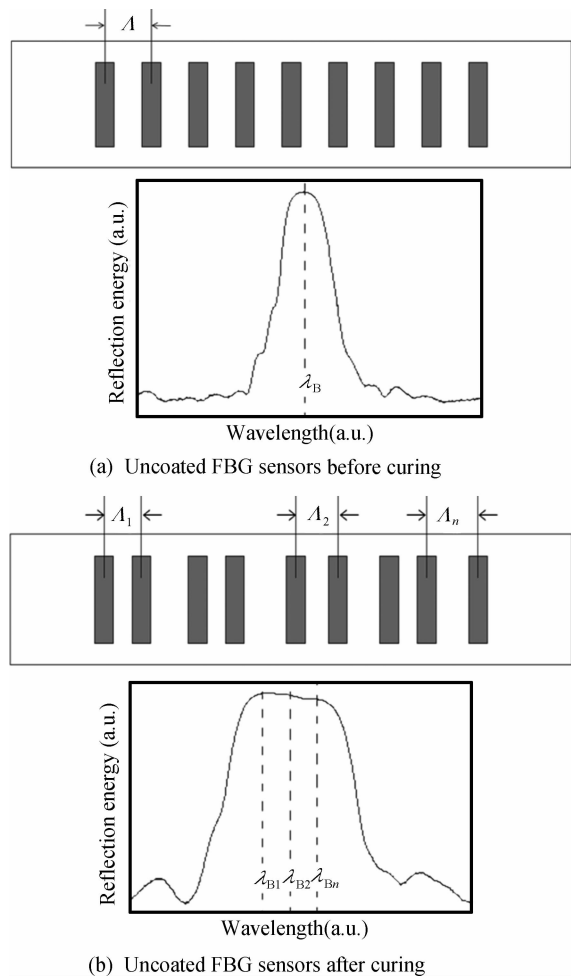


图 8 未涂覆 FBG 传感器刻栅区的栅距变化
Fig. 8 Grating region deformation of the uncoated FBG sensors

2.2 涂覆后光纤光栅固化过程中的波谱变化

考虑到复合材料固化过程中所产生的热残余应力直接作用于裸露的刻栅区使光纤光栅的波形发生畸变，本文中对刻栅区进行涂层保护以尝试消除热残余应力的影响，涂覆层采用紫外光固化树脂，厚度为 64 μm。图 9 为在固化过程中刻栅区采用涂层保护后光纤光栅反射波谱图。在升温及恒温阶段(如图 9(a)和 9(b)所示)，光纤光栅的中心波长随温度变化而变化的趋势与刻栅区未进行涂层保护的传感器的波长变化趋势类似。但在降温阶段(如图 9(c)所示)，采用涂层保护的光纤光栅反射波谱形状在各温度阶段均未产生畸变，同时 FWHM 值未发生明显变化(如图 10 所示)，涂覆后的 FBG 传感器受到热残余压应力作用(如图 11 所示)。

在降温过程中，采用涂层保护的光纤光栅反射波谱未发生变化，可能是由于光栅表面的紫外光固化树脂涂层的 T_g 仅为 13.43 °C，其断裂伸长率约

为 55%，在复合材料升温固化及降温的整个温度区间，光纤光栅表面涂覆的保护涂层近似为弹性体，且表面涂覆层并不影响 FBG 自身特性，而是将复合材料作用于刻栅区的非轴对称热残余应力均匀分布在光栅栅区上(如图 12 所示)，以消除非轴对称热残余应力对光纤光栅反射波谱的影响。

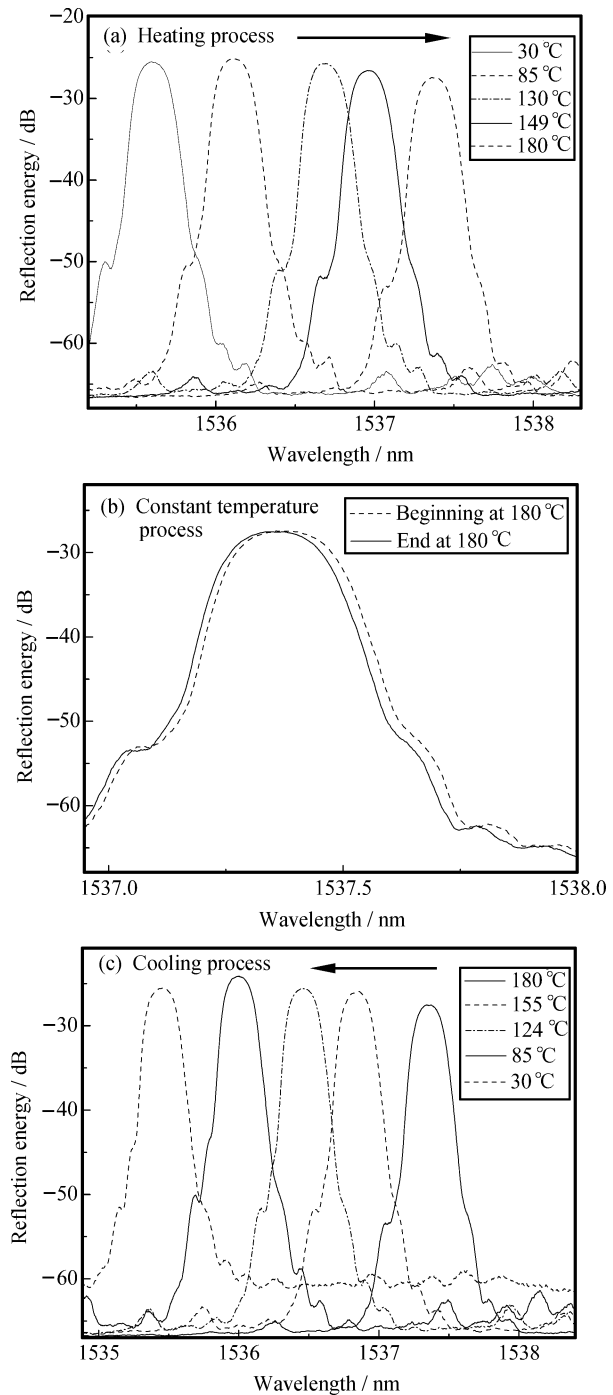


图 9 固化过程中聚合物涂覆的 FBG 传感器反射谱图
Fig. 9 Reflection spectra from the polyimide-coated FBG sensor during the cure process

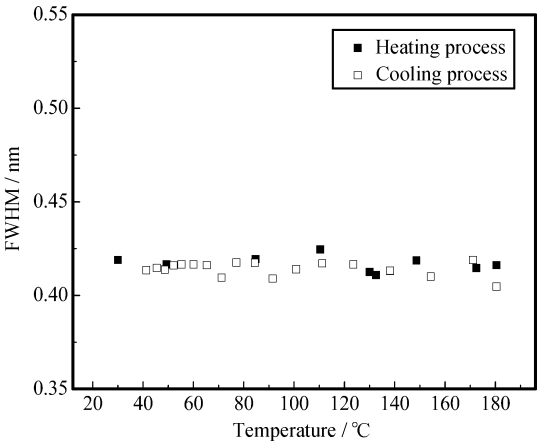


图 10 固化过程中聚合物涂覆的 FBG 传感器反射半峰宽
Fig. 10 FWHM of the coated FBG sensor during the curing process

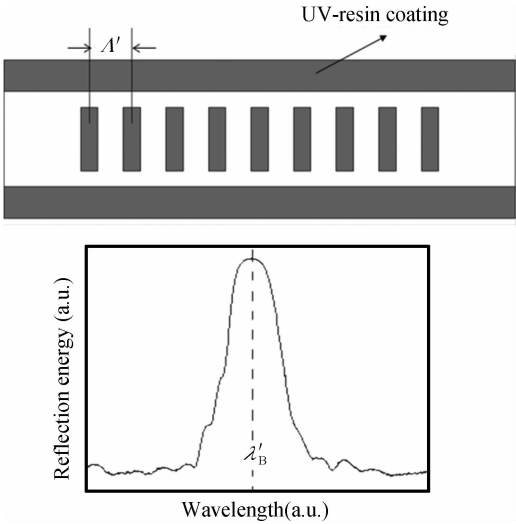


图 12 FBG 传感器刻栅区涂覆后的栅距变化
Fig. 12 Grating region deformation of coated FBG sensors after curing

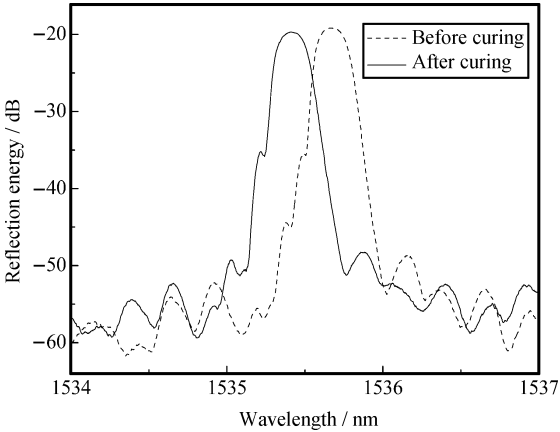


图 11 固化前后聚合物涂覆的 FBG 传感器反射谱图
Fig. 11 Reflection spectra of the coated FBG sensor before and after curing

2.3 光纤光栅对冲击后压缩过程的监测

冲击试验中, 冲击位置为加筋板蒙皮上表面中心。为了验证刻栅区涂层对光纤光栅应变监测灵敏度的影响, 本文中分别比较了刻栅区有涂层保护和无涂层保护的两种光纤光栅在冲击前后的波谱变化。图 13 为两种 FBG 传感器冲击前后的波谱形状变化曲线。其中未涂覆光纤光栅波谱形状在冲击前后发生较大的变化(如图 13(a)所示), 可能是由于外来冲击作用使刻栅区受到的非轴对称热残余应力分布发生变化所致。而对于涂覆后光纤光栅, 涂层将复合材料作用于刻栅区的非轴对称热残余应力均匀化, 因而波谱在冲击前后未发生明显变化(如图 13(b)所示)。

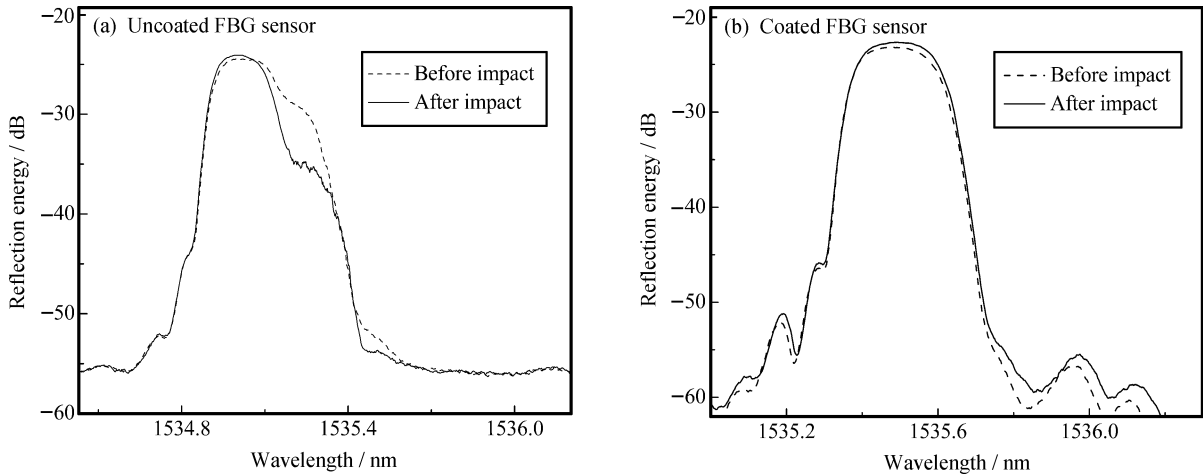


图 13 冲击前后 FBG 传感器反射波谱的变化曲线
Fig. 13 Reflection spectra of FBG before and after impact test

图 14 给出了压缩过程中 FBG 传感器与应变片测得的应变变化图。由图 14(a)可见，在压缩初期，刻栅区未涂覆的 FBG 传感器测得的应变与贴于蒙皮表面的应变片基本一致，在压缩后期，FBG 传感器测得的应变与贴于蒙皮表面的应变片所测得的应变产生偏差，FBG 传感器测得的加筋板破坏应变比应变片测得的破坏应变增大了约 10.8%。图 15 为压缩过程中 FBG 传感器反射波谱变化图。从图 15(a)中可以看出，由于热残余应力导致未涂覆 FBG 传感器的反射波谱

形状分裂成两个波峰，在压缩试验过程中，两个波峰形状变化较大，对布拉格光栅的传感性能产生较大影响。实验结果也进一步表明非轴对称热残余应力使未涂覆的 FBG 传感器的测量结果产生误差。涂覆后的 FBG 传感器测得的应变与贴于蒙皮表面的应变片测得的实验数据一致性较好，如图 14(b)所示，光纤光栅表面的保护涂层并未影响 FBG 传感器的测量精度及灵敏度。涂覆后 FBG 传感器的反射波谱保持单个波峰且形状未发生变化(如图 15(b)所示)。

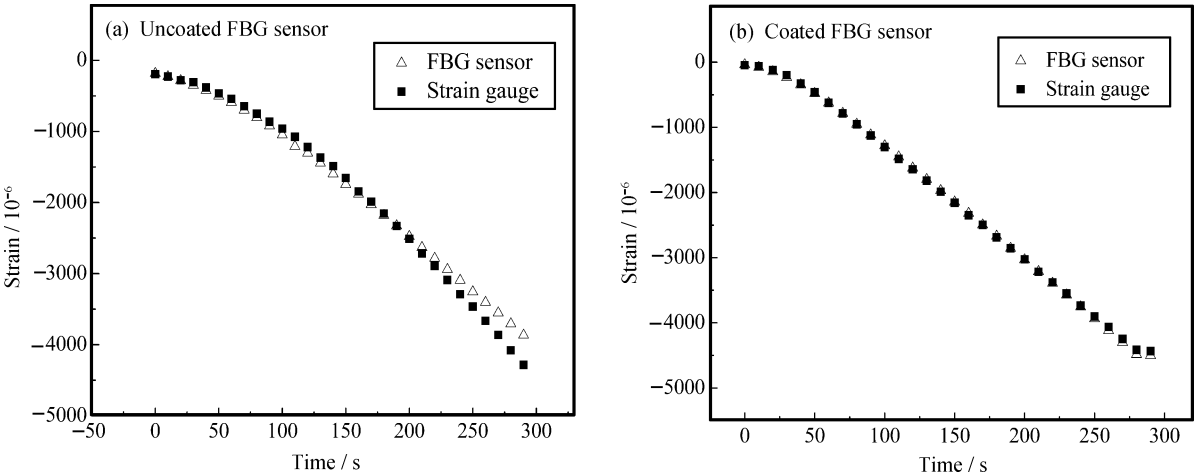


图 14 压缩过程中 FBG 传感器与应变片测得的应变变化图
Fig. 14 Strain measured by the FBG sensors and the strain gauges during the compression test

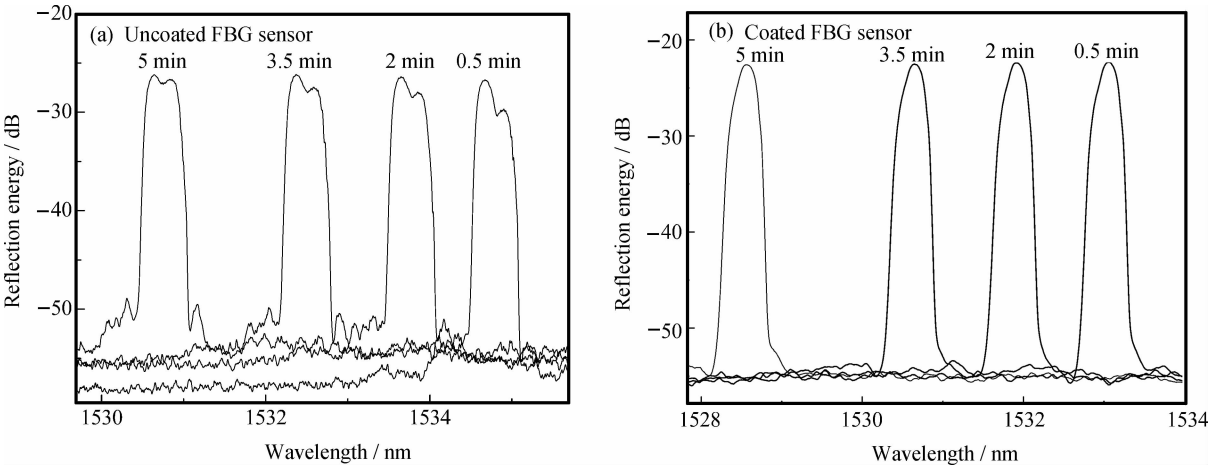


图 15 压缩过程中 FBG 传感器反射波谱变化
Fig. 15 Reflection spectra from the FBG sensors during the compression test

3 结 论

(1) 刻栅区采用紫外光固化树脂涂层保护的

FBG 传感器，在复合材料升温、恒温及降温过程中反射波谱形状及 FWHM 值均未发生变化。刻栅区表面涂覆聚合物可以有效地消除热残余应力对

FBG 传感器波谱形状的影响。

(2) 在冲击后压缩过程中, 涂覆后的 FBG 传感器测得的应变与贴于蒙皮表面的应变片测得的实验数据一致, 刻栅区表面保护涂层对 FBG 传感器在复合材料固化及受载过程中的监测精度没有影响。

参考文献:

[1] Rodrigo A S M, Munoz S, Roberto A L A. et al. Structural health monitoring of marine composite structural joints using embedded fiber bragg grating strain sensors [J]. Composite Structures, 2009, 89(2): 224-234.

[2] 常新龙, 何祥勇, 周家丹, 等. FBG 传感器在复合材料固化监测中的应用 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 750-753.

Chang Xinlong, He Xiangyong, Zhou Jiadan, et al. Application of fiber bragg grating in cure monitoring of composite [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(5): 750-753.

[3] 益小苏. 先进复合材料技术研究与发展 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 2-8.

Yi Xiaosu. Research and development of advanced composites technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 2-8.

[4] Hao Juncai, Leng Jinsong, Wei Zhang. Non - destructive evaluation of composite pressure vessel by using FBG sensors [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(2): 120-122.

[5] 孙 丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 6-13.

Sun Li. Research of fiber bragg grating sensing technology and engineering application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006: 6-13.

[6] Takeda S, Aoki Y, Ishikawa T, et al. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test [J]. Composite Structures, 2007, 79(1): 133-139.

[7] Takeda S, Okabe Y, Takeda N. Delamination detection in CFRP laminates with embedded small - diameter fiber bragg grating sensors [J]. Composite Part A 2002, 33(7): 971-980.

[8] De Baere I, Luyckx G, Voet E, et al. On the feasibility of optical fiber sensors for strain monitoring in thermoplastic composites under fatigue loading conditions [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3): 403-411.

[9] 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.

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.

[10] 武湛君, 张博明, 万里冰. 单根光纤光栅监测复合材料固化工艺过程多目标参量技术的研究 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 82-86.

Wu Zhanjun, Zhang Boming, Wan Libing. Multi - parameters monitoring for fiber reinforced plastics with a single fiber bragg grating [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 82-86.

[11] Takeda S, Minakuchi S, Okabe Y, et al. Delamination monitoring of laminated composites subjected to low - velocity impact using small-diameter FBG sensors [J]. Composite Part A, 2005, 36(7): 903-908.

[12] 赵海涛, 张博明, 武湛君, 王殿福, 戴福洪. 光纤光栅智能复合材料基础问题研究 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26(12): 27-28.

Zhao Haitao, Zhang Boming, Wu Zhanjun, Wang Dianfu, Dai Fuhong. Infrastructure study for optical fiber grating in smart composite materials [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(12): 27-28.