复合材料学报 第21卷 第3期 6月 2004年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 21 No. 3 June 2004

文章编号: 1000-3851(2004)03-0001-05

# 光纤布拉格光栅监测复合材料固化

万里冰, 武湛君*, 张博明, 王殿富
(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 复合材料层合板在固化成型过程中形成的残余应变和应力是影响材料质量的重要因素, 它与预浸料铺层在固化工艺过程中产生的应变密切相关。在研究和测试了光纤布拉格光栅应变和温度传感器传感特性的基础上, 将二者埋入复合材料预浸料铺层, 在热压釜成型工艺过程中监测了材料内部的温度和应变发展历程, 由此获得对称正交层合板的宏观残余应变。监测结果表明, 单向和对称正交层合板在固化结束后都将产生收缩, 对称正交层合板铺层内的残余应变平行于纤维方向为压应变, 垂直于纤维方向为拉应变。光纤光栅传感器为复合材料固化监测及层合板残余应力分析提供了一种新的工具, 为实现复合材料从制造到服役的全寿命、一体化监测提供了可能。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 残余应变; 残余应力; 固化; 工艺过程应变
**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A

# CURE MONITORING OF COMPOSITES USING FIBER BRAGG GRATING SENSORS

WAN Libing, WU Zhanjun*, ZHANG Boming, WANG Dianfu
(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Residual strain and residual stress formed in cure process are two key factors that affect the quality of composite products, and both of them correlate closely with the process induced strain of pre-preg. In this paper, the fiber Bragg grating (FBG) sensors were calibrated and embedded in pre-preg to in-situ monitor the strain and temperature evolution of laminates during the cure process. Based on the strain measured with the FBG sensors, the macro residual strain of the cross-ply laminate was studied. The results show that both of unidirectional and cross-ply laminates will shrink in the course of cure. There is a negative residual strain in the longitudinal direction and a positive residual strain in the transverse direction of any ply of a cross-ply laminate. The FBG sensor can be used as a new tool to monitor the cure process and analyze the residual stress of composites, and makes it possible to monitor composite structures from manufacture stage to service stage continuously.

Keywords: fiber Bragg grating; residual strain; residual stress; cure process; process induced strain

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。随着对光纤传感技术研究的深入及其技术的日益成熟, 80年代末期, 国外开始了光纤传感器监测复合材料成型工艺过程的研究[1, 2]。可用于树脂基复合材料固化过程监测的光纤传感器主要包括光纤折射率传感器、光纤微弯传感器、光纤红外传输谱传感器、光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器以及光纤法布里-玻罗(Fabry-Perot)传感器等[3, 4]。其中, 光纤布拉格光栅传感器主要用于复合材料固化工艺过程应变(Process Induced Strain)的监测, 如, Murukeshan和Kalamkarov分别应用光纤布拉格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[5, 6]; Lawrence和Leng在固化过程中实现了多种铺层方式的层合板内部应变变化历程监测, 并分析了铺层方式对应变变化的影响[7, 8]。本文中在一路光纤上分别实现了单向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, 并据此计算了正交层合板的宏观残余应变, 为复合材料的残余应变(应

收稿日期: 2003-02-20; 收修改稿日期: 2003-06-02
通讯作者: 武湛君, 副教授, 智能复合材料与结构 E-mail: wuzhj@hit.edu.cn

力)分析提供了一种新的方法和手段。

## 1　光纤布拉格光栅传感器工作原理

光纤布拉格光栅是一种波长选择反射器,它所反射的光波波长称为布拉格中心波长。布拉格中心波长 $\lambda_B$ 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 $\Lambda$ 有如下关系:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

光纤布拉格光栅传感原理如图 1 所示,光纤光栅周围的温度场和作用在光纤光栅上的应变是两个能够直接导致布拉格中心波长漂移的物理量。当应变作用于光纤光栅时,光栅的拉伸会导致其周期的变化,同时光弹效应也会导致有效折射率的变化;温度场作用于光纤光栅时,由于光纤材料的热膨胀,会产生由热导致的应变,同时纤芯折射率也会因热光效应而随温度变化。

由应变和温度波动引起的总的布拉格波长漂移可表示为[9]

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 - p_e)\Delta X + \lambda_B(T + a)\Delta T \tag{2}$$

式中: $\Delta X$ 为轴向应变变化量; $\Delta T$ 为温度的变化量; T 和 a 分别是光纤的热膨胀系数和热光系数; $p_e$ 是光纤有效弹光系数。实际的工程应用中,可以分别测定光纤光栅的应变灵敏系数 $K_X$ 和温度灵敏系数 $K_T$,在总的波长漂移中去除温度引起的部分后,由下式得到结构应变[10]:

$$\Delta\lambda = K_X\Delta X + K_T\Delta T \tag{3}$$

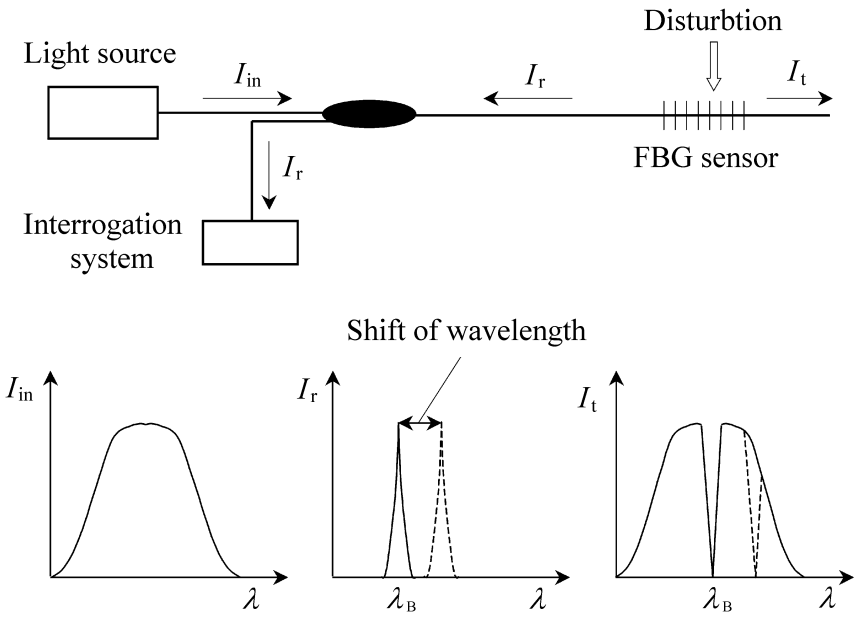


图 1　光纤布拉格光栅传感器工作原理

Fig. 1　Sensing principle of the FBG sensors

## 2　光纤布拉格光栅应变和温度响应

### 2.1　光纤布拉格光栅应变响应

纤维增强树脂基复合材料在固化工艺过程中,树脂基体会产生化学收缩和热收缩。为了获得埋于树脂基体内部的光纤布拉格光栅的应变响应,在试验机上对埋有光纤光栅的复合材料试件进行了拉伸测试。实验所用的试件长 200 mm,宽 15 mm,光纤光栅传感器位置以及预浸料铺设方式为[$0_4$/FBG/$0_4$],光纤光栅传感器的铺设方向与预浸料铺层中的增强纤维平行。在试件的表面粘贴电阻应变片,试验过程中同时记录布拉格波长的漂移和电阻应变仪指示值。采用日本半岛试验机对试件进行加载,加载速度为 2 mm/min,埋于复合材料内部的光纤光栅传感器的应变响应曲线如图 2 所示,对曲线进行拟合,求得埋于复合材料内部的光纤光栅应变灵敏系数为 1.187 pm/$\mu\varepsilon$,布拉格波长漂移与应变之间呈良好的线性关系。

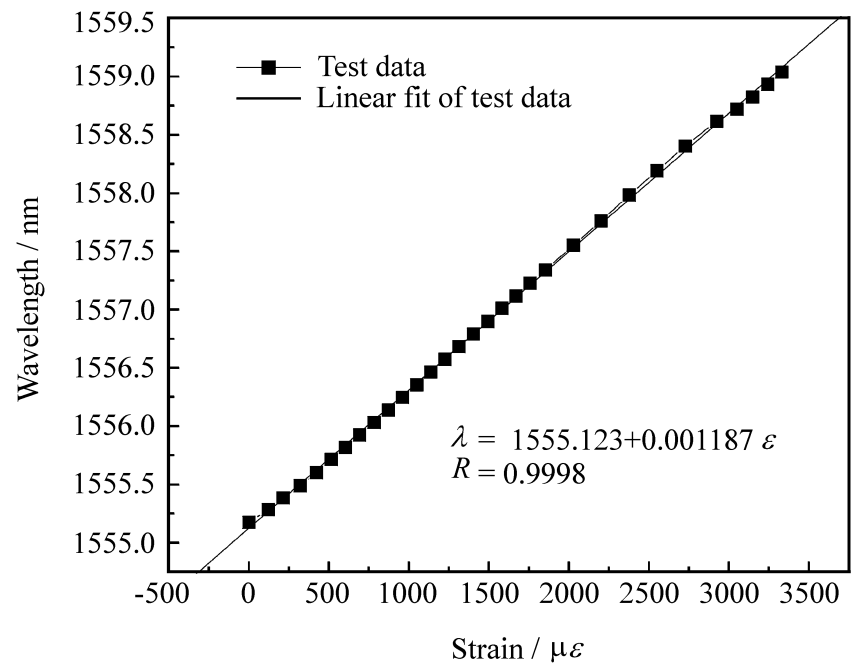


图 2　埋于复合材料内部光纤光栅应变响应

Fig. 2　Strain response of the FBG embedded in the composite specimen

### 2.2　光纤布拉格光栅温度响应

光纤布拉格光栅作为传感器时存在交叉敏感问题,即光纤光栅对于应变和温度都是敏感的,单个光栅无法区分温度和应变分别引起的波长变化。为了获得固化工艺过程中材料内部的应变变化,可以预先测得光纤光栅的温度灵敏系数,然后从总的布拉格波长漂移量中减去温度变化引起的波长漂移部分,即可得到应变。

采用上述方法作为光纤光栅应变测量的温度补偿措施时,需要获得固化过程中材料内部的温度变化历程。为此,本文中将光纤布拉格光栅封装在毛细金属管中,光栅段在管内处于自由状态,封装后的光纤光栅成为温度传感器。封装细金属管外径为 1.2 mm,内径为 0.8 mm,在出口处用环氧树脂将

传输段光纤与管壁粘在一起, 封装结构如图 3 所示。

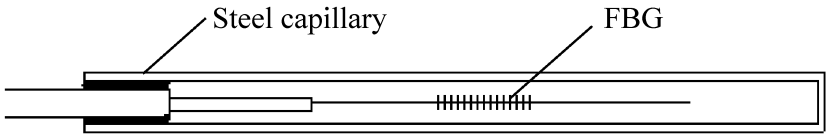


图 3　光纤光栅温度传感器

Fig. 3　Structure of the FBG temperature sensor

采取油浴加热的方法, 在20～200℃的温度范围内, 测量了光纤光栅温度传感器的温度响应, 实验结果如图 4 所示。从曲线可以看出, 光纤布拉格光栅的温度响应曲线呈分段的线性, 在 20～120℃和 120～200℃温度范围内, 光纤光栅温度传感器的温度灵敏系数分别为 10. 599 pm/ ℃和 12. 443 pm/ ℃。

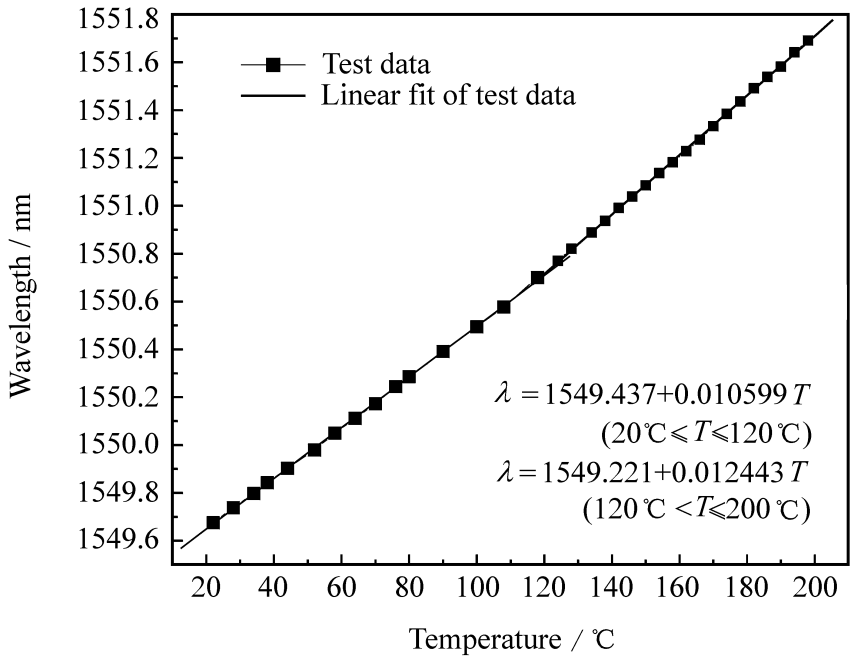


图 4　封装光纤布拉格光栅温度响应曲线

Fig. 4　Temperature response of the packaged FBG

## 3　光纤布拉格光栅监测复合材料固化工艺过程应变

### 3. 1　复合材料固化监测材料、工艺与设备

实验采用 T300/ 环氧 5222A 增强纤维预浸料, 固化工艺制度如图 5 所示, 固化第一保温温度为 135℃, 第二保温温度为180℃。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,

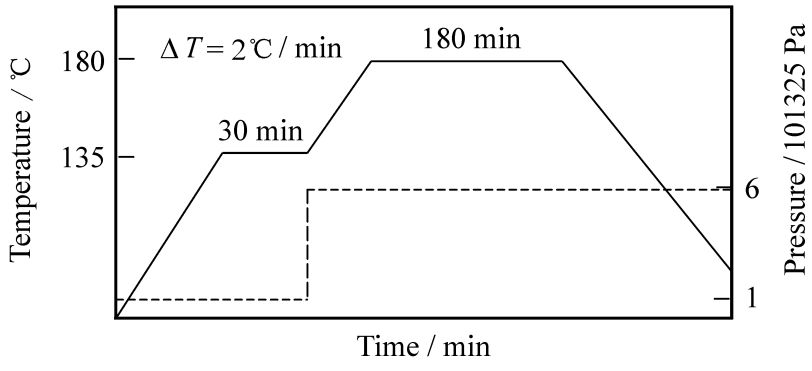


图 5　固化工艺制度

Fig. 5　Cure profile of T300/ 5222A prepreg

由理化-REXC100 控温仪表进行升温和恒温的控制。由空压机对热压釜内加压, 压力为0. 6 MPa。固化监测实验的光纤光栅波长检测设备采用美国 Micron Optics 公司生产的集成化解调系统 FBG-IS。

### 3. 2　固化监测实验结果

应用光纤布拉格光栅传感器, 分别监测了单向层合板 0 °方向和 90 °方向以及对称正交层合板的材料内部应变变化。单向层合板铺层设计为 16 层, 各铺层预浸料尺寸均为 300 mm×300 mm, 光纤光栅传感器位于第 8 层和第 9 层之间。对称正交层合板铺层设计为$[0/90]_{4S}$, 光纤光栅位于第 6 层和第 7 层之间。传感器的传感段位于预浸料铺层的中心位置, 这样可以降低边缘效应的影响。将光纤光栅温度传感器与光纤光栅应变传感器串联, 通过同一路单模通讯光纤线路接入波长探测系统 FBG-IS。

图 6 给出了由热电偶测得的热压釜内温度和光纤布拉格光栅测得的复合材料内部温度变化历程。图 7、图 8 和图 9 分别给出了单向层合板 0 °方向和 90 °方向以及对称正交层合板的光纤光栅工艺过程应变监测结果。

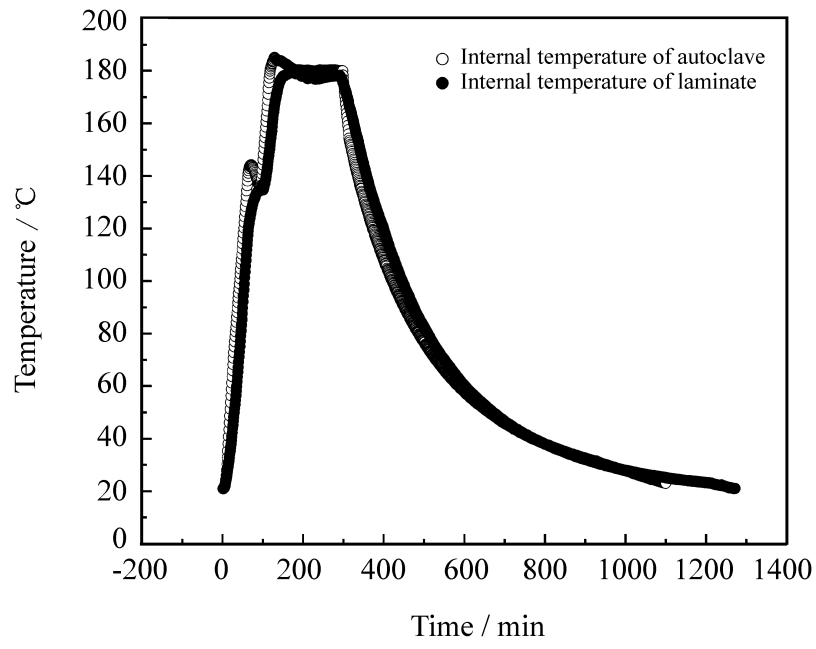


图 6　热压釜内与材料内部温度变化比较

Fig. 6　Comparison of the temperature evolution of laminate and environment

### 3. 3　实验结果分析与讨论

由温度监测实验结果曲线可以看出, 由于电加热管位于热压釜底部以及热传递的原因, 材料内部温度相比热压釜内温度在升温阶段存在着滞后; 在第二保温温度(180℃)开始后, 真空袋内温度与釜内温度逐渐达到平衡, 温度监测曲线显示二者也逐渐重合; 在自然冷却阶段的前段, 由于热压釜内散热较

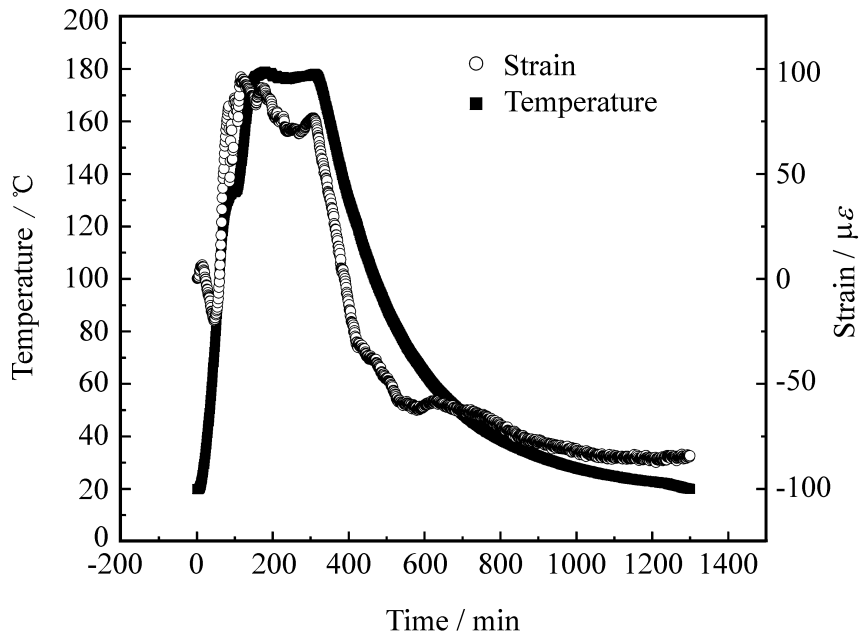


图 7　单向板 0 °方向应变变化历程

Fig. 7　Process induced strain evolution in longitudinal direction of [$0_{16}$] laminate

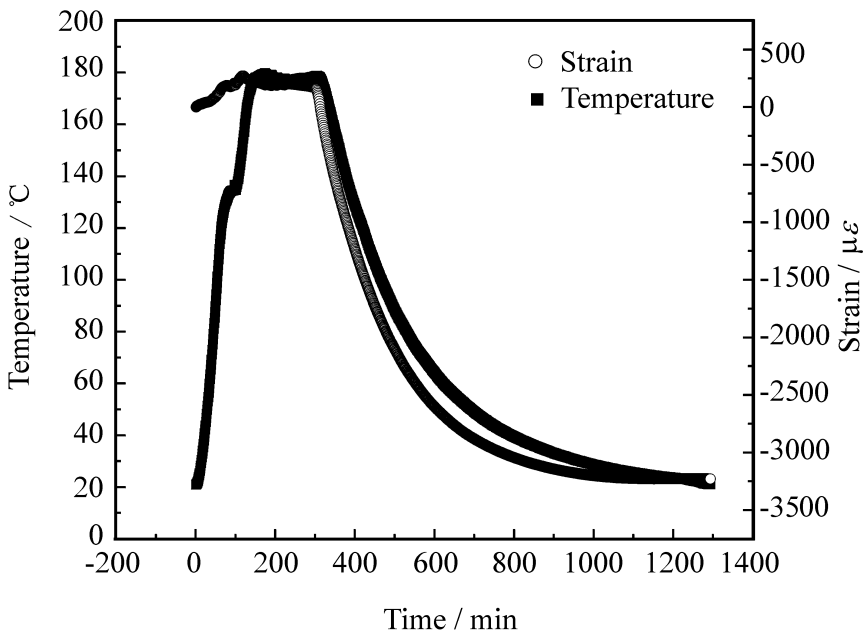


图 8　单向板 90 °方向应变变化历程

Fig. 8　Process induced strain evolution in transverse direction of [$90_{16}$] laminate

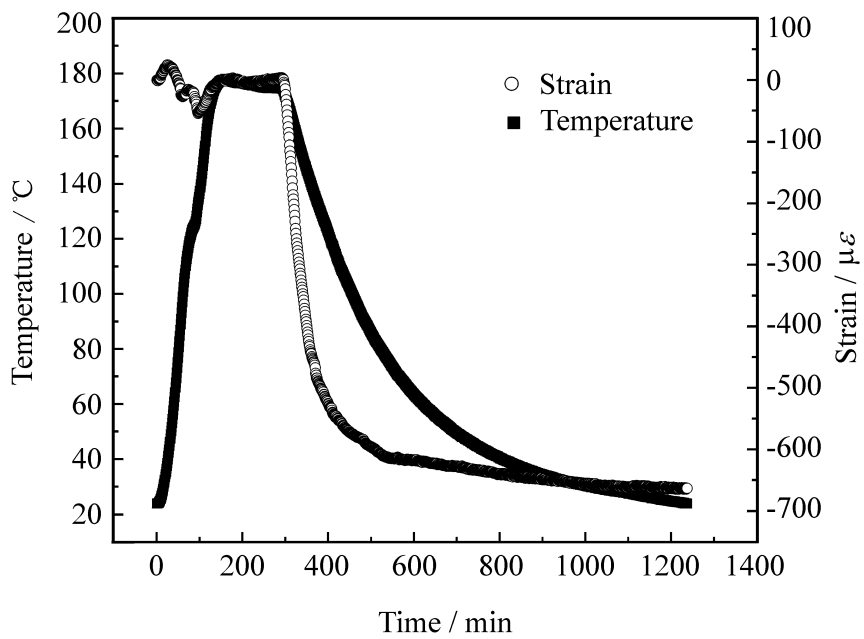


图 9　对称正交层合板应变变化历程

Fig. 9　Process induced strain evolution in [0/90]$_{4S}$ laminate

快，监测曲线也显示釜内温度比材料内部温度下降得快，在自然冷却阶段后半段，二者温度基本保持一致。实验结果显示，封装的光纤布拉格光栅能够在20～180℃温度范围内有效地实现复合材料内部温度变化历程的在线监测，光纤光栅温度传感器克服了传统的热电偶测温由于冷端温度波动导致的测量精度低的问题，为实现固化工艺过程的全光纤监测奠定了基础。

在对热压釜内加压之前，层合板应变监测曲线均出现了不规则的上下波动，这与升温过程中树脂逐渐软化以及树脂软化导致增强纤维的微小位移有关。加压完成后，树脂逐渐发生交联反应，由粘性流体状态逐渐转化为粘弹性固体，其对光纤光栅力的传递性能逐渐增加，光纤布拉格光栅呈正应变状态。在自然冷却阶段，树脂发生热收缩，光纤布拉格光栅测得的应变随着树脂的热变形逐渐降低。光纤光栅应变监测实验结果显示，固化结束后复合材料单向层合板在 0 °方向和 90 °方向都将产生收缩变形，但数值存在较大差异。单向层合板 0 °方向性能由热膨胀系数很小的增强纤维决定，所以其变形很小，光纤光栅监测结果为 - 84 με；单向层合板90 °方向变形由热膨胀系数较大的树脂基体决定，其变形较大，光纤光栅监测结果达到了 - 3230 με；对于对称正交层合板，每一单独铺层变形均受到相邻铺层的约束，所以其变形应该在单向层合板 0 °方向应变和 90 °方向应变之间，光纤光栅的监测结果证实了这一点，实验中测得的应变为 - 663 με。

复合材料固化工艺过程中，层合板的每一单独铺层都会产生收缩。对于非单向层合板，每一铺层的变形均会受到相邻铺层的约束，即不能发生自由变形，由于相邻层之间的互相约束，将导致非单向层合板每一铺层内产生残余应变和残余应力。对称正交层合板由于相邻层互相约束导致的残余应变可以由下式表示，它是在固化工艺过程中该层所产生的应变 $\varepsilon^T$ 与假设可以自由变形时该层的应变 $\varepsilon^U$ 的差值[8]：

$$\varepsilon^R = \varepsilon^T - \varepsilon^U \tag{4}$$

由单向和正交层合板的工艺过程应变实验监测结果，根据式(4)可以获得固化结束后正交层合板内部的残余应变。单向层合板的所有铺层纤维取向均相同，固化过程中各个铺层间无相互约束，所以单向层合板面内两个主方向的工艺过程应变就是式(4)中等号右边的第二项 $\varepsilon^U$，即为对称正交层合板铺层

假设没有相互约束时的工艺过程应变, 式(4)中等号右边第一项 $\dot{X}^T$ 由光纤光栅在固化过程中直接测得。因此, 固化工艺过程结束后, 对称正交层合板铺层内的残余应变平行于纤维方向为压应变, 大小为 - 579 με, 垂直于纤维方向为拉应变, 大小为 2567 με。

## 4 结 论

本文中将光纤布拉格光栅应变传感器和温度传感器在固化成型前埋入复合材料预浸料铺层, 在一路光纤上实现了单向和正交层合板在固化过程中材料内部应变变化历程以及温度变化历程的监测, 并由此获得了正交层合板内的残余应变。对于复合材料单向层合板, 固化工艺过程结束后光纤布拉格光栅测得其在0°方向和90°方向都产生收缩, 90°方向的收缩明显大于0°方向; 对于对称正交层合板, 固化工艺过程结束后光纤光栅测得其铺层内的残余应变平行于纤维方向为压应变, 垂直于纤维方向为拉应变。

光纤布拉格光栅在固化监测实验中充分发挥了结构精巧、波长编码、绝对值测量、便于构成传感阵列的优点, 为复合材料固化过程的应变和温度监测以及层合板残余应变分析提供了一种新的工具。光纤光栅应变和温度传感器能够承受复合材料固化工艺过程中较高的温度(180 ℃)和压力(0.6 MPa), 并且固化结束后仍然保持良好的传感能力, 可以继续应用于材料服役期间的损伤监测与健康评价, 从而为实现复合材料从制造到服役的全寿命、一体化连续监测提供了可能。

## 参考文献:


[1] Roberts S J. Cure and fabrication monitoring of composite materials with fiber optic sensors [J]. Composites Science and Technology, 1993, 49(3): 265- 276.

[2] Crosby P A, Powell G R, Fernando G F. In-situ cure monitoring of epoxy resins using optical fiber sensors [J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5(4): 415- 428.

[3] 武湛君, 张博明, 王殿富, 等. 基于折射率变化的复合材料固化在线监测研究[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 87- 91.

[4] 武湛君, 张博明, 王殿富, 等. 用于FRP固化在线监测的光纤微弯压力传感器[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 125- 129.

[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, 2000, 79(2): 153- 161.

[6] Kalamkarov A L, Fitzgerald S B, MacDonald D O. On the processing and evaluation of pultruded smart composites [J]. Composites: Part B, 1999, 30(7): 753- 763.

[7] Lawrence C M, Nelson D V, Spingarn J R, et al. Measurement of process-induced strains in composite materials using embedded fiber optics sensors[J]. SPIE, 1996, 2718: 60- 68.

[8] Leng J S, Asundi A. Real-time cure monitoring of smart composite materials using extrinsic Fabry-Perot interferometer and fiber Bragg grating sensors [J]. Smart Mater Struct, 2002, 11(2): 249- 255.

[9] Stephanus J S, Peter L F, Matthew N. Rebar-epoxied optical fiber Bragg gratings for civil structures [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1998, 18(3): 214- 219.

[10] Brady G P, Kalli K, Webb D J. Recent developments in optical fibre sensing using fiber Bragg gratings [J]. SPIE, 1994, 2839: 8- 17.