

## Application of Fiber Bragg Grating Sensor in Cure Monitoring of Composite

CHANG Xinlong<sup>1\*</sup>, HE Xiangyong<sup>1\*</sup>, ZHOU Jiadan<sup>2</sup>, LI Ming<sup>1</sup>

(1. The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China;  
2. The Second Artillery Command College, Wuhan 430012, China)

**Abstract:** The fiber Bragg grating (FBG) sensor was widely used in the composites structure health monitoring. The double FBG sensors were embedded in the prepreg glass fiber/epoxy laminate composite structure to monitor the variable of temperature, viscosity, internal strain in the hot-press curing processing and the residual strain after curing, analyze the FBG sensor performance affected by the residual strain. The experiments indicated that the FBG sensors could monitor the temperature internal strain and viscosity calculated from temperature in the curing processing of composites and provide a basis for intelligent curing control. The same sensor cured in the composite could be used for health monitor of the composites structure in full life service.

**Key words:** sensor; composite; fiber Bragg grating; cure monitoring; residual strain

**EEACC:** 7230E; 0560

## FBG 传感器在复合材料固化监测中的应用

常新龙<sup>1\*</sup>, 何相勇<sup>1\*</sup>, 周家丹<sup>2</sup>, 李明<sup>1</sup>

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2. 第二炮兵指挥学院, 武汉 430012)

**摘 要:** FBG 传感器广泛应用于复合材料结构健康监测中, 将双光栅的 FBG 传感器埋入到玻璃纤维/环氧树脂预浸层合板结构中, 监测热压固化过程中温度、内应力变化以及固化残余应变, 分析了残余应变对 FBG 传感器性能的影响。实验表明 FBG 传感器可以有效监测复合材料结构固化过程的温度和内应力, 以及由温度计算的粘度变化, 为智能固化控制提供依据, 且固化于复合材料结构内的传感器可用于结构的全服役周期健康监测。

**关键词:** 传感器; 复合材料; 光纤布拉格光栅; 固化监测; 残余应力

**中图分类号:** TP212.12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2010)05-0748-05

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器具有质量轻, 不产生磁场干扰, 直径细, 结构简单, 易于埋入复合材料中且与基体材料兼容性好等诸多优点<sup>[1]</sup>。将 FBG 传感器埋入到复合材料内部, 对复合材料固化过程中温度、内应力等多种参量进行监测<sup>[2,3]</sup>, 具有极大的优势。

在复合材料结构固化成型时, 材料经历大量的化学和物理变化, 其中温度、树脂粘度和内应力是固化工艺的重要参数, 对复合材料结构和性能影响巨大, 因此近年来固化过程监测及智能固化控制成为研究热点。实用的固化过程监测方法主要有静态固化监测和动态(实时)固化监测两类, 此外还有固化模型法等<sup>[4]</sup>, 但尚未达到实用阶段。静态监测法主要是利用先进的仪器分析法如差热分析(DTA)、示差扫描量热法(DSC)、红外光谱分析(IR)及流变分

析等技术监测固化参数<sup>[5]</sup>, 但是这些分析结果不是在产品上直接测出的, 很难反映产品在固化成型过程中的实际情况。动态监测法主要是利用动态介电分析(DDA)技术<sup>[6]</sup>或者将应变片、热电偶、压力探针等传感器埋入到复合材料结构中, 实时监测固化过程中温度和应力参数, 但是由于上述传感器体积大、与复合材料相容性差, 从而影响监测结果<sup>[2]</sup>。

FBG 传感器应用于在固化监测过程时, 温度和应变对 FBG 传感器同时产生影响, 因此必须采用适当的方法分离温度和内应力的响应, 例如埋入热电偶<sup>[3]</sup>, 或者使用混合传感器系统<sup>[7]</sup>。本文将双光栅 FBG 传感器埋入到预浸玻璃纤维/环氧树脂层合板结构中监测其固化过程, 研究固化各个阶段温度和内应力变化及 FBG 传感器的响应, 分析固化后的残余应力及 FBG 传感器用于复合材料固化监测的影响因素。

## 1 FBG 传感器原理

由光纤光栅原理可知<sup>[8]</sup>:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \left( \left\{ 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \Delta\varepsilon + (\alpha + \xi) \Delta T \right) \quad (1)$$

式中,  $\lambda_B$  为光纤光栅的 Bragg 波长,  $\Delta\lambda$  为反射中心波长在一定温度和外力作用下相对于  $\lambda_B$  的偏移,  $\Delta T$  是温度变化,  $\Delta\varepsilon$  是应变。  $n_{eff}$  为有效折射率,  $\nu$  为泊松比,  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  为光弹系数,  $\alpha$  是热膨胀系数,  $\xi$  是热光系数, 这些常数仅与光纤材料有关。令  $P_e$  和  $P_t$  分别为应变系数和温度系数:

$$P_e = \frac{1}{2} n_{eff}^2 [P_{12} - \nu(P_{12} + P_{11})] \quad (2)$$

$$P_t = \alpha + \xi \quad (3)$$

式(1)可以写为:

$$\Delta\lambda = \lambda_B [(1 - P_e) \Delta\varepsilon + P_t \Delta T] \quad (4)$$

为了分离光栅温度和应变交叉影响, 实验中采用了双光栅 FBG 传感器, 即在一根光纤上相近的位置上制作两个不同  $\lambda_B$  的光栅。在这种情况下, 有充分的理由认为这两个光栅的有效折射率、泊松比和热膨胀系数等参数是完全一致的。光栅和参考光栅之间的温度和应变满足如下关系:

$$\Delta\lambda_r = \lambda_{Br} P_t \Delta t \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_c = \lambda_{Bc} [P_t \Delta t + (1 - P_e) \Delta\varepsilon] \quad (6)$$

其中  $\lambda_{Br}$  和  $\Delta\lambda_r$  为参考 FBG 传感器的 Bragg 波长和波长偏移,  $\lambda_{Bc}$  和  $\Delta\lambda_c$  为埋入到层合板内 FBG 传感器的 Bragg 波长和波长偏移。联立求解式(5)和式(6)可得:

$$\Delta t = \frac{\Delta\lambda_r}{\lambda_{Br} P_t} \quad (7)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{1 - P_e} \left( \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_{Bc}} - \frac{\Delta\lambda_r}{\lambda_{Br}} \right) \quad (8)$$

依据实验前对传感器的标定, 式中  $P_e = 0.218$ ,  $P_t = 9.143 \times 10^{-6}$ 。

热固性树脂体系的粘度受温度和固化度变化的综合影响, 温度的升高有利于树脂分子链的运动, 导致粘度降低; 固化度的提高使分子链运动受到阻碍, 导致粘度升高。根据实验测得 TDE-85 树脂恒温粘度以及升温粘度曲线参数, TDE-85 的流变模型<sup>[9]</sup>为:

$$\ln \eta = -3.302 + \frac{598.29}{T} + t \exp(8.4015 \times 10^{-2} - \frac{6.9665}{T}) \quad (9)$$

## 2 实验配置与过程

预浸带纤维缠绕成型法 (Prepreg filament winding

method) 是复合材料结构成型的重要手段之一<sup>[10]</sup>, 工艺过程包括: 预先在加热、加压或使用溶剂的条件下, 将纤维用预催化树脂预浸渍, 树脂通常在环境温度下呈临界固态; 预浸带缠绕在回转的芯轴 (模) 上, 或者用手或机械铺于模具表面; 固化时, 加热到 120 ~ 180 °C, 使树脂重新流动, 并最终固化。固化过程中树脂经历多次状态变化, 固化过程监测比较困难。固化时的附加压力通常由高压釜 (或热压机) 提供, 在本文实验中使用砝码提供固化附加压力。

实验使用的 FBG 传感器制作于普通通信用石英光纤上, 采用直径为 125 μm 的单模光纤, 传感光栅长度为 5 mm, 中心波长为 1 550 nm、1 555 nm, 反射率大于 99%, 两个光栅的中心相距 8 cm; 实验使用的复合材料为高强二号玻璃纤维/4304 环氧树脂 (主要成分为 TDE-85 树脂和甲基四氢苯酐 MTHPA 固化剂的混合物)。在固化前对 FBG 传感器进行了温度和应变系数测定。固化监测实验装置, 如图 1 所示, 其中 MOI Sm125 光栅解调仪的性能参数<sup>[11]</sup>如表 1 所示。

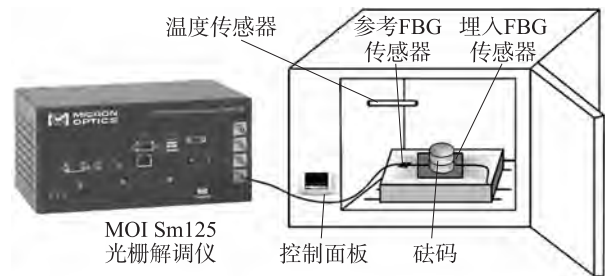


图 1 固化实验装置

表 1 MOI Sm125 光纤光栅解调仪参数

参数	数值
波长范围/nm	1 510 ~ 1 590
动态范围	30 dB
波长精度	1 pm
扫描频率	1 Hz
通道数	4 (至多 16)
工作温度范围	0 ~ 55 °C

将缠绕成型的预浸干纱单向层裁成 6 cm × 6 cm 的方块, 按照 [0/90]<sub>15</sub> 铺层, FBG 传感器埋于 7 层和 8 层之间, 光纤出口使用熔接套管保护。复合材料板夹于两块铝合金板之间, 置于热固化箱内, 使用 15 kg 的砝码 (实际实验中, 以 4 块水泥砖称重后代替) 以提供约 0.4 MPa 的固化压力。为了保证薄板具有指定的厚度, 铝合金板四角各垫一个 3 mm 厚度的垫片。实验中的压力要略小于工业现场的固化压力, 这是为了避免过大压力而使增强纤维过度挤

压 FBG 传感器,从而导致传感器出现严重啾啾甚至失效。

在 FBG 传感器埋入到复合材料试件过程中需要注意:处于临界固体状态的树脂具有一些粘性,在光栅埋入到复合材料层间时,被粘于层间的光栅由于弯曲或者被挤压而出现应变不为 0 的状态,为了避免这种情况,需要适当地对光栅施加一些拉应力,使其处于拉伸状态。

固化过程可分为三个阶段:即升温过程、保温/固化过程与降温过程。实验过程中,参考光栅与埋入光栅的响应如图 2 所示。

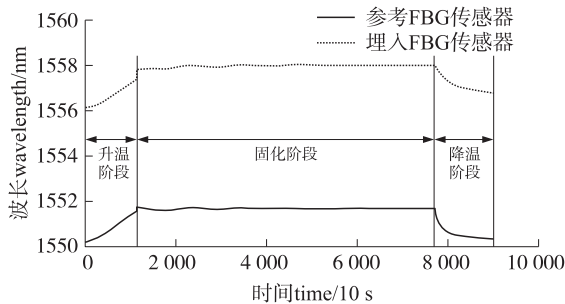


图2 固化过程中的光栅响应

### 3 实验结果与分析

#### (1) 温度测量与分析

参考 FBG 传感器的温度响应依式(7)进行计算(室温为 $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),固化过程温度变化分别如图 2。实验所使用的复合材料层合板比较薄,体积较小,分布相对比较均匀。由图 3 可知,在升温和保温/固化阶段,参考 FBG 传感器和埋入到层合板内部的 FBG 传感器的响应基本一致,表明埋入到层合板内部的 FBG 传感器波长偏移中,处于主导地位。由图 3 可知在降温阶段,在温度下降和树脂收缩的双重作用下,参考 FBG 传感器和埋入的 FBG 传感器显示出较大的差别。

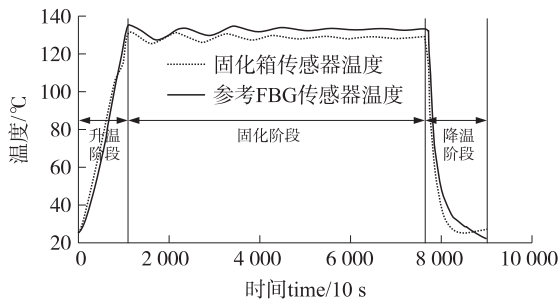


图3 固化过程中的温度变化

#### (2) 粘度测量与分析

粘度由式(9)给出,其粘度测量结果如图 4 所示。在温度从室温升到 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程中,随着温度

的升高,树脂从半固体状态迅速融化,粘度急剧下降,在 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,降到最低点,约 $5.2\text{ cP}$ ;在保温固化阶段,树脂开始发生复杂的物理/化学变化,树脂粘度随着固化时间的增加而缓慢上升,但是始终保持在 $50\text{ cP}$ 以下。在降温阶段,树脂开始玻璃化转化,树脂开始成为固态物质,粘度趋向于无穷。

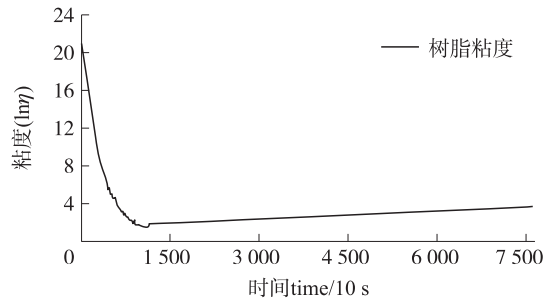


图4 固化过程中的粘度变化

#### (3) 内应力分析

为了简化计算和分析,在整个分析过程中,包括在玻璃化转换点直至降至室温阶段,本文还是近似假定光栅上受到均匀作用力。埋入 FBG 传感器内应力响应依式(8)进行计算,如图 5 所示。

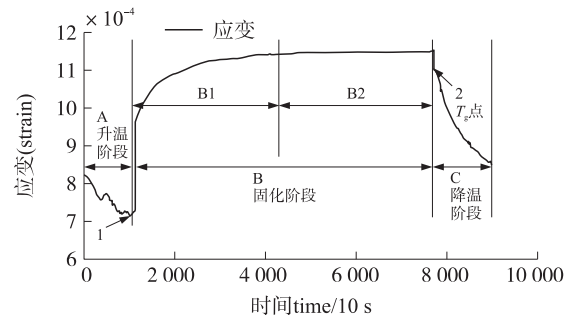


图5 固化过程中的应变变化

A - 升温过程 B - 固化过程 C - 降温过程

1 - 树脂融化点 2 - 玻璃化转换点

由图 3 和 4 可知,升温过程中,随着温度的升高,树脂由临界固态再次软化,直到以粘性液体的形式存在,光栅在埋入阶段所受的拉力逐渐释放,FBG 传感器测量的应变值逐渐下降的。树脂完全融化后,将不能传递应变,没有外压力的情况下,FBG 传感器只能测量温度变化。

在保温固化阶段,树脂开始发生复杂的物理/化学变化,大致可以分为 B1 和 B2 两个阶段。在 B1 阶段树脂完全融化,在压力作用下层合板的“厚度”开始变薄,即树脂在压力作用下开始流动,粘性树脂的流动使得光栅受到拉伸作用。由于最初发生固化的树脂较少,粘性也较低,光栅所测的树脂内应力偏小。随着反应的进行,在压力作用下,层合板边界处的树脂首先被挤出,然后处于中心的树脂开始向边

界面处流动,埋入光栅处的树脂内应力开始增大,点 1 附近的应力升高就反映了这一过程。随着固化过程的持续进行,树脂粘性逐渐增大,同时在压力的作用下逐渐均匀分布。在 B2 阶段,层合板的“厚度”达到 3 mm,此时砝码产生压力主要由垫片承受,树脂向各个方向的流动压力保持平衡,光栅所测的应变也保持在一个稳定的值附近。

降温开始时,当温度下降到玻璃化温度点(点 2)前,固化体系处于冷却收缩(或物理收缩)阶段,光栅由于树脂流动导致的拉伸状态迅速消失,甚至进入收缩状态,由于室温较低,这一过程变化极为迅速。随着温度逐渐降低,树脂持续收缩,应变随着温度降低而变小。

(4) 固化残余应力分析

在降温阶段,内应力主要是玻璃态收缩所致,FBG 传感器从宏观上看,应变随着温度降低而变小,但是微观上看,光栅周围的树脂开始对光栅产生非均匀的拉伸或者压缩,FBG 传感器反射光谱开始发生畸变和劣化。大多数情况下,埋入到复合材料结构中的光纤传感器就是在这过程中被破坏。其中固化前后使用解调仪获得的 FBG 传感器反射图谱如图 6 所示。

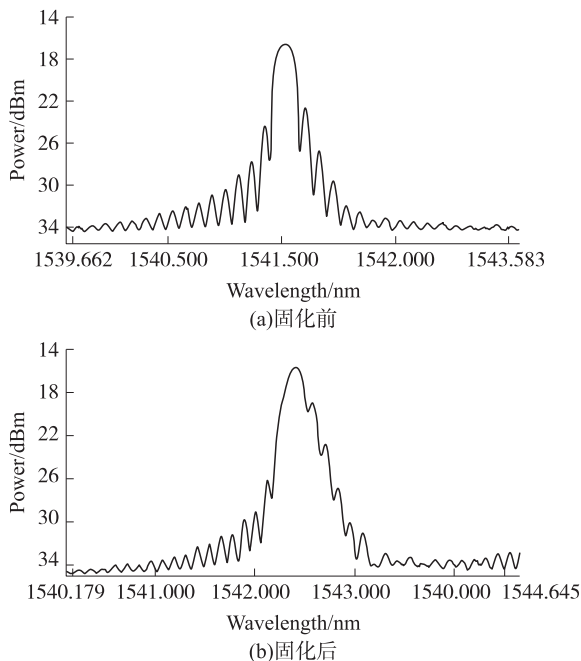


图 6 固化前后光栅反射图谱

使用基于光纤去层法的光谱应力重构技术可以获得光栅上应变的详细分布<sup>[12]</sup>,通过这种技术,可以对固化过程中纤维的应变状况以及固化后的残余应变进行分析。去层法基本原理是通过光纤光栅的因果性获得第一段光纤光栅的失调,根据失调获得第一段光纤光栅的传输矩阵及应变分布,利用该传

输矩阵去除第一段光纤光栅对整体光纤光栅的影响,获得新的光纤光栅,以此类推,逐步重构整个光纤光栅应变分布。依据图 6(b)的光栅反射图谱,固化后光栅长度上的残余应变重构如图 7 所示。

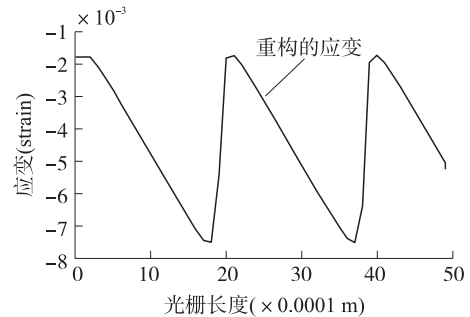


图 7 光栅长度上的残余应变重构

纤维/基体残余应变产生的原因是树脂基体材料和纤维树脂在降温过程中 CTE 不同而导致的失调引起的,因此这一类残余应力以压缩力为主。残余应力可能导致局部的弯曲或者塑性变形,也可能是材料损伤的初始,例如表面微裂纹可能出现的重要因素就是残余应力集中。残余应力是影响复合材料的微观机械性能,进而导致结构强度的下降。

对于传感器而言,从图 7 可以看到,埋入到正交复合材料平板层间的 FBG 传感器受到压缩作用。同时从图 7 中也可以发现,光栅上受到近似于周期性变化的应力,这是由于 FBG 传感器是铺设在两个薄层之间的,在高温高压固化时,在周围与光栅长度垂直方向的纤维或者纤维束对光栅产生了挤压作用,从而出现局部的弯曲,如图 8 所示。

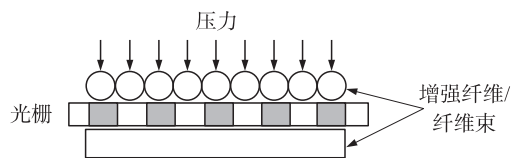


图 8 光栅残余应力产生示意图

如果挤压效应或者树脂收缩残余应变过大或者所导致的 FBG 传感器的光栅段弯曲太多,那么就会破坏传感器,例如传感器断裂、出现啾啾等情况,进而导致传感器失效,影响传感器的成活率,在将 FBG 传感器埋入复合材料结构中必须要注意解决好这个问题。

4 结论

FBG 传感器应用于复合材料固化监测,在固化的不同阶段检测的物理量(如温度、应变等)略有差异:升温及保温固化过程中,FBG 传感器可以监测温度变化及由温度推导出的树脂粘度变化;由于树

脂内应力和压力相关,通常测量树脂内应力可以推断压力变化,为固化压力控制提供依据;监测降温阶段的温度,便于控制降温速率,监测残余内应力的产生及发展过程,减少内应力产生。残余应力的分析表明在将 FBG 传感器埋入复合材料结构中必须要解决固化收缩的非均匀应力以及由此导致的传感器损伤与失效。

FBG 传感器可以准确监测复合材料结构内部内应力和温度分布,能够为智能固化控制提供更加准确的依据。FBG 传感器可以用于测量温度、应变、振动等多种参数,因此固化于结构中的 FBG 传感器可以用于结构全寿命周期健康监测系统,提高复合材料结构的可靠性和稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 冷劲松,王殿富,杜善义. 光纤传感器对机敏复合材料结构性能的影响[J]. 实验力学, 1996,10(4):165-167.
- [2] Roger Vodicka. Cure Monitoring Techniques Using Embedded Sensors[R]. Defence Science and Technology Organisation(DSTO) Aeronautical and Maritime Research Laboratory, USA. DS-TO-TN-0110. 1997: 2-5.
- [3] Kang Hyun-Kyu, Kang Dong-Hoon, Hong Chang-Sun, et al. Monitoring of Fabrication Strain and Temperature During Composite Cure Using Fiber Optic Sensor[C]//SPIE 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, Proc. SPIE 4336, Newport Beach, California, USA, 4-8 March, 2001: 211-218.
- [4] 李君,姚学锋,刘应华,等. 复合材料固化过程中温度及应变场分布的解析解[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009,49(5):767-771.
- [5] 吴晓青,李嘉禄,康庄,等. TDE-85 环氧树脂固化动力学的 DSC 和 DMA 研究[J]. 固体火箭技术, 2007(3):10-14.
- [6] 李岩,胡春静, Vistasp M. Karbhari, 等. 介电分析在纤维增强复合材料健康监测中的应用[C]//第十四届全国复合材料学术会议论文集(下), 湖北宜昌, 2006:1174-1179.
- [7] Guo Zhan-Sheng. Strain and Temperature Monitoring of Asymmetric Composite Laminate using FBG Hybrid Sensors[J]. Structural Health Monitoring, DOI: 10. 1177/14759217070060030201, 2007,6(3):191-197.
- [8] 饶云江,王义平,朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 2006:251-257.
- [9] 路遥,李丹,段跃新,等. TDE-85 环氧树脂体系化学流变特性研究[C]//复合材料—生命、环境与高技术. 天津:第12届全国复合材料学术会议, 2002:312-315.
- [10] 张凤翻. 复合材料用预浸料[J]. 高科技纤维与应用, 2000, 125(24):29-32.
- [11] Micron Optics Int. MOI. Sm125 catalog[EB/OL]. <http://www.micronoptics.com.cn/pdfs/sm125.pdf>, 2009. 12.
- [12] 陈哲敏,陈军,舒睿俊. Bragg 光纤光栅传感器内不均匀应力分布的模拟和重构[J]. 传感技术学报, 2006,19(6):2399-2404.



常新龙(1965-),男,河南唐河人,教授,博士研究生导师,98 获得西北工业大学“航空宇航科学与技术”专业博士学位,主要研究方向为固体火箭动力系统失效物理与可靠性研究, xinlongch@sina.com;



何相勇(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为 FBG 传感器技术和固体火箭动力系统健康监测研究, xiangy. he@gmail.com.