

基于 FBG 传感器的复合材料固化监测

常新龙¹ 何相勇¹ 周家单² 李明¹

(1 第二炮兵工程学院,西安 710025)

(2 第二炮兵指挥学院,武汉 430012)

文 摘 温度和内应力是影响复合材料固化过程和结构性能的重要因素,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、黏度和内应力变化,并简要分析了固化后的残余应变。实验证明 FBG 传感器可有效监测复合材料结构固化过程的温度、黏度和内应力,能够作为智能固化控制依据,且固化结束之后,相同的传感器可以被用于提供结构使用过程中产生的温度/机械变化的信息。

关键词 固化监测,FBG 传感器,温度,复合材料

Cure Monitoring of Composite With Fiber Bragg Grating Sensor

Chang Xinlong¹ He Xiangyong¹ Zhou Jiadan Li Ming¹

(1 The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025)

(2 The Second Artillery Command College, Wuhan 430012)

Abstract The temperature and internal strain are most important factors, affecting the curing processing and structure properties of composites. The double fiber Bragg grating (FBG) sensors were embedded in the prepreg glass fiber/epoxy laminate composite structure to monitor the variable of temperature, viscosity and internal strain in the hot-press curing processing and briefly analyze the residual strain after curing. The experiments indicate that the FBG sensors can monitor the temperature and internal strain in the curing processing of composites and provide a basis for intelligent curing control. Once the composite is cured, the same sensor can be used to provide the information about the mechanical/temperature changes in the performance of structure.

Key words Cure monitoring, Fiber bragg grating sensor, Temperature, Composite

1 引言

复合材料结构固化成型时,温度和内应力对复合材料结构和性能影响巨大。近年来,固化过程监测及智能固化控制成为研究热点。利用先进的仪器分析法如 DTA、DSC、IR 及流变分析等技术监测固化参数,但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。将应变片、热电偶、压力探针等传感器埋入复合材料结构中,实时监测固化过程中温度和应力参数,但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^[1]。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器自 1978 年问世以来,由于其具有质量轻、直径细,不产生磁场干扰,结构简单、埋入复合材料中与基体材料兼容性好等诸多

优点^[2],在智能结构的传感技术研究中倍受青睐。FBG 传感器被埋入到复合材料内部,对固化过程中温度、内应力等多种参量进行监测^[1-3]。但是温度和应变对 FBG 传感器同时产生影响,因此必须采用一定的方法分离温度和内应力的响应,例如埋入热电偶^[3],或者使用混合传感器系统^[4]。

本文将双光栅 FBG 传感器埋入预浸玻璃纤维/环氧树脂层合板结构中,对固化过程进行监测,研究固化各个阶段温度和内应力及固化后的残余应力。

2 FBG 传感器原理

由光纤光栅原理可知^[5]:

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

收稿日期:2009-12-14;修回日期:2010-01-07

基金项目:总装备部装备预先研究项目(51328040111)

作者简介:常新龙,1965 年生,教授,博士研究生导师,主要从事固体火箭动力系统可靠性与环境适应性研究。E-mail: xinlongch@sina.com.cn

式中, λ_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 λ_B 的偏移, ΔT 是温度变化, $\Delta\varepsilon$ 是应变。 n_{eff} 为有效折射率, ν 为泊松比, P_{11} 、 P_{12} 为光弹系数, α 为线胀系数, ξ 为热光系数, 这些常数仅与光纤材料有关。令 Pe 和 Pt 分别为应变系数和温度系数:

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

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

式(1)可以写为:

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

为分离光栅温度和应变交叉影响, 采用双光栅 FBG 传感器, 即在一根光纤上相近的位置上制作两个不同 λ_B 的光栅。在这种情况下, 认为这两个光栅的有效折射率、泊松比和热光系数等参数完全一致。光栅和参考光栅之间的温度和应变满足如下关系:

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

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

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

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

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

研究表明, 热固性树脂体系的黏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, 导致黏度降低; 固化度的提高使分子链运动受到阻碍, 导致黏度升高。黏度 η 随温度和固化时间变化的模型方程:

$$\eta = \eta_{\infty}\exp\left(\frac{E_{\eta}}{RT}\right)\exp\left[k_{\infty}\exp\left(\frac{E_k}{RT}\right)\right] \quad (9)$$

对方程两边取对数, 得到的结果为双 Arrhenius 化学流变模型:

$$\ln\eta(T, t) = \ln\eta_{\infty} + \frac{E_{\eta}}{RT} + k_{\infty}\exp\left(\frac{E_k}{RT}\right) \quad (10)$$

式中, η_{∞} 表示树脂体系在固化度为零且温度无限高的理想状态下的最低黏度, E_{η} 为流动活化能, R 为理想气体常数, k_{∞} 为前因子, E_k 为树脂固化反应的活化能。 η_{∞} 、 E_{η} 、 E_k 、 k_{∞} 及 R 均与温度和时间无关, 对于确定的树脂体系应是一个常数。式(10)作如下简化:

$$\ln\eta(T, t) = \ln A + Bt \quad (11)$$

其中:

$$\ln A = \ln\eta_{\infty} + \frac{E_{\eta}}{RT}, \quad \ln B = \ln k_{\infty} + \frac{E_k}{RT}.$$

由式(11)可以看出, 在一定温度下黏度的自然对数

与温度和固化时间有关。根据实验测得 TDE-85 树脂恒温黏度以及升温黏度曲线参数, 流变模型^[6]为:

$$\ln\eta = -3.302 + \frac{598.29}{T} + t\exp\left(8.4015 \times 10^{-2} - \frac{6.9665}{T}\right) \quad (12)$$

3 实验配置与过程

预浸带纤维缠绕成型法 (Prepreg filament winding method) 其工艺过程包括: 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。固化时的附加压力通常由高压釜(或热压机)提供, 本文使用砝码提供固化附加压力。

FBG 传感器制作于普通通讯用石英光纤上, 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、1 555 nm, 反射率大于 99%, 两个光栅的中心相距 8 cm; 使用的复合材料材料为高强 2[#] 玻璃纤维/TDE-85 环氧树脂。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。

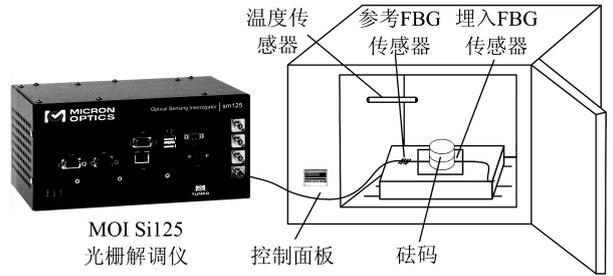


图 1 固化监测实验装置

Fig. 1 Configuration of curing monitor

缠绕成型的预浸干纱单向层被裁成 6 cm×6 cm 的方块, 按照 [0/90]_{15s} 铺层, FBG 传感器置于 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。实验中采用较小压力的原因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。

处于临界固体状态的树脂是具有一些黏性的, 在光栅埋入到复合材料层间时, 会出现“准残余应力”(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, 需要适当地稍微拉伸一下光栅, 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。

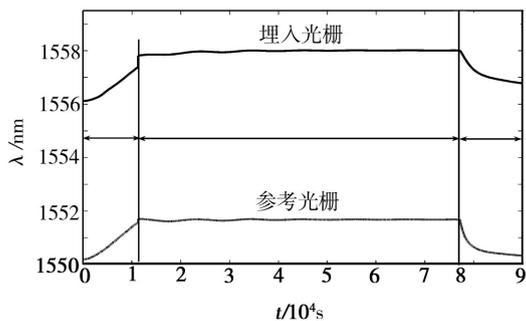


图 2 固化过程中的光栅响应

Fig. 2 Grating response in curing processing

4 结果与分析

实验使用的复合材料层合板较薄,体积较小,分布比较均匀。由图 2 可知,在升温 and 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,进一步分析表明:埋入到层合板内部的 FBG 传感器波长偏移中,温度导致的波长偏移处于主导地位。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。

参考 FBG 传感器的温度响应依式(7)计算(室温为 19.8℃),温度变化如图 3 所示。

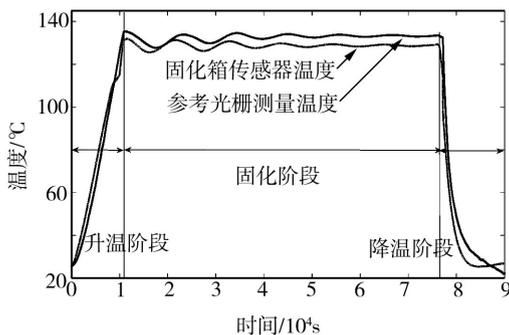


图 3 固化过程中的温度变化

Fig. 3 Temperature variable in curing processing

按照式(12)计算黏度,升温过程中黏度如图 4 所示,保温过程中树脂黏度如图 5 所示。埋入 FBG 传感器内应力响应依式(8)进行计算,如图 6 所示。

在升温过程中,由图 4 可知温度从室温上升到 130℃,随着温度的升高,树脂从半固体状态迅速融化,黏度急剧下降,64℃左右时降到最低点,约 5.2 mPa·s;由图 6 可知此时 FBG 传感器测量的应变值是逐渐下降的,这是因为树脂由临界固态再次软化,直到以黏性液体的形式存在,光栅在埋入阶段所受的拉力逐渐释放。树脂完全融化后,将不能传递应变,没

有外压力下,FBG 传感器只能测量温度变化。

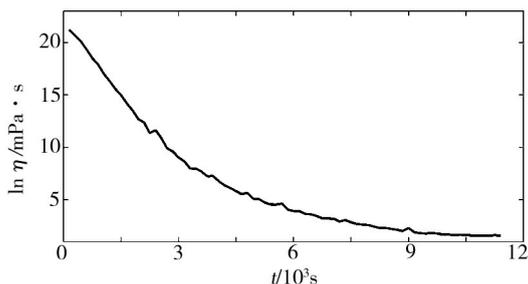


图 4 固化升温过程中的树脂黏度

Fig. 4 Viscosity of resin in temperature increase

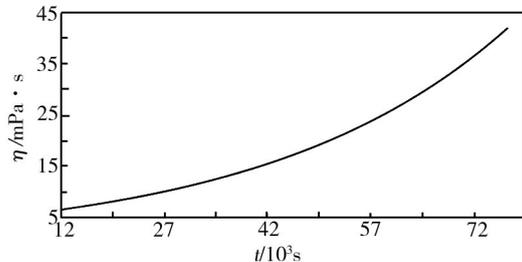


图 5 固化保温过程中的树脂黏度

Fig. 5 Viscosity of resin in temperature keeping

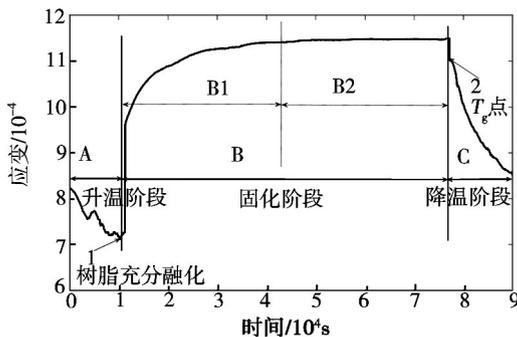


图 6 固化过程中的应变变化

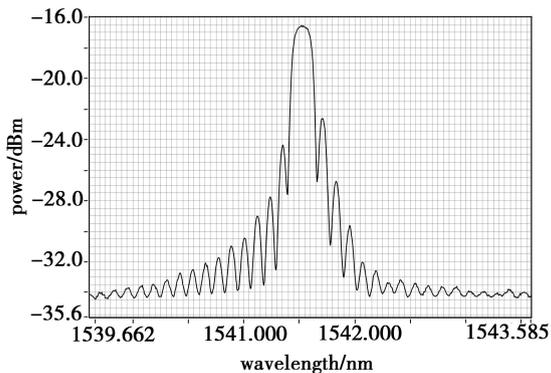
Fig. 6 Internal strain variable in curing processing

在保温固化阶段,树脂黏度随着固化时间的增加而缓慢上升,但是始终保持在 50 mPa·s 以下,大致可以分为 B1 和 B2 两个阶段。在 B1 阶段树脂完全融化,开始进行固化反应,树脂黏度逐渐增加;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,黏度处于最低处,光栅所测的树脂内应力较小;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处流动,埋入光栅处的树脂内应力开始增大,1 点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,树脂黏性逐渐增大,同时在压力的作用下树脂逐渐均匀分布。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

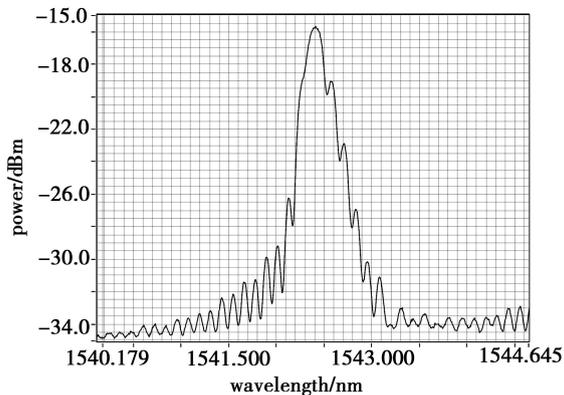
平衡,光栅所测的应变也保持在一个稳定值附近。

降温开始时,当温度下降到玻璃化温度点(2点)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,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。固化前后的FBG传感器反射图谱如图7所示。



(a) 固化前



(b) 固化后

图7 固化前后光栅反射图谱比较

Fig. 7 Comparison of spectral response pre-post curing (a is pre-curing and b is post-curing)

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^[7],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。依据图7(b),固化后光栅长度上的残余应变重构如图8所示。

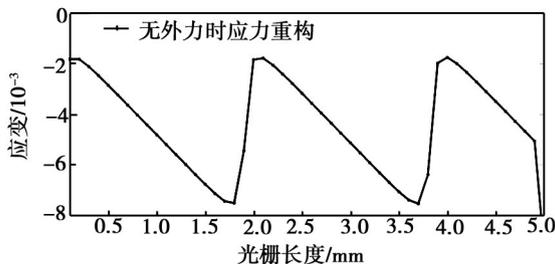


图8 光栅长度上的残余应变重构

Fig. 8 Residual strain reconstruction along grating length direction

5 结论

FBG传感器可以监测固化不同阶段的不同物理量:升温及保温固化过程中,树脂黏度与温度具有确定函数关系,FBG传感器可以监测温度(黏度)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。FBG传感器固化于结构中之后,可以作为结构全寿命周期的温度/应变/振动监测传感器;能够为智能固化控制提供更加准确的依据,具有重大的工程意义。

参考文献

- [1] Roger Vodicka. Cure monitoring techniques using embedded sensors[R]. Defence Science and Technology Organization (DSTO) Aeronautical and Maritime Research Laboratory, USA. DSTO-TN-0110,1997:2-5
- [2] 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(04):165-167
- [3] Hyun Kyu Kang, Dong Hoon Kang, Chang-Sun Hong, et al. Monitoring of fabrication strain and temperature during composite cure using fiber optic sensor[C]. //Newport Beach ed, SPIE 6th annual international symposium on NDE for health monitoring and diagnostics, 2001, California, USA: Proc. SPIE 4336, 2001: 304-312
- [4] Guo Zhansheng. Strain and temperature monitoring of asymmetric composite laminate using FBG hybrid sensors[J]. Structural Health Monitoring, 2007(6): 191-197. DOI:10.1177/14759217070060030201
- [5] 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
- [6] 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——第十二届全国复合材料学术会议论文集,2002:312-315
- [7] 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

(编辑 任涛)