

# 基于 FBG 的不同工艺下环氧树脂固化监测研究

朱路佳, 刘荣梅

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**不同工艺下复合材料固化时的温度变化、固化速率及产生的应变会对复合材料的成型质量产生巨大影响。针对在不同工艺条件下对树脂基复合材料固化过程的监测要求,采用将光纤布喇格光栅埋入环氧树脂内部的方法,对环氧树脂在恒温 40 ℃ 和室温 24 ℃ 两种不同工艺下的固化过程进行实时在线监测,固化时间均持续 18 h。结果表明,环氧树脂在恒温 40 ℃ 工艺条件下固化时的温度变化、固化速率及产生的应变都比在室温 24 ℃ 工艺条件下大。

**关键词:** 光纤布喇格光栅; 固化监测; 固化速率; 环氧树脂; 复合材料

**中图分类号:** TP212; TN253 **文献标识码:** A

## Study on Curing Process Monitoring of Epoxy Resin With Different Processes Based on Fiber Bragg Grating

ZHU Lujia, LIU Rongmei

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The temperature change, curing rate and the strain produced by the composite materials under different processes can greatly influence the molding quality of composites. In order to meet the requirements of monitoring the curing process of resin matrix composites under different technological conditions, the fiber Bragg gratings (FBGs) were embedded into epoxy resin under different conditions at the constant temperature of 40 ℃ and room temperature of 24 ℃, respectively. And the curing time was lasted for 18 hours. The results showed that the temperature change, curing rate and the strain during the curing under the constant temperature of 40 ℃ were bigger than these at room temperature of 24 ℃.

**Key words:** fiber Bragg grating(FBG); curing monitoring; curing rate; epoxy resin; composite materials

### 0 引言

纤维增强树脂基复合材料因其质量小,强度高,模量高,结构功能和设计制造一体化及易于制造整体化大型构件等优点而广泛用于海洋船舶、土木工程和各类大型民用飞机等领域<sup>[1-4]</sup>。当前应用于航空系统的复合材料中,环氧树脂基复合材料占据统治地位,是一种技术较成熟,应用范围广的复合材料。但由于不同材料间的热膨胀系数存在差异,使得复合材料在制作和服役过程中极易产生热应力,这会对复合材料的性能产生消极影响,从而降低系统的结构强度和可靠性。因此,对复合材料在成型和服役期间的状态进行实时在线监测十分必要。

近年来,光纤光栅被大量应用于光纤通信、光电子产业和大型结构健康监测等工程技术领域<sup>[5-8]</sup>。与传统传感器相比,光纤光栅传感器具有尺寸小,柔韧性好,抗电磁干扰能力强及适用于严苛环境等优点,特别适合埋入复合材料中以实现固化过程及结构服役期间的健康监测。目前,学者已开始将光纤光栅运用到复合材料固化监测的研究中<sup>[9-11]</sup>。

复合材料的性能在很大程度上取决于其制造工艺,其中固化阶段是影响其质量的关键环节之一。在不同工艺条件下,复合材料固化时的固化速率、温度变化及产生的应变等参数会发生变化,这些参数的改变将对复合材料的性能、工作寿命和可靠性产生影响,可能导致复合材料层合板发生翘曲、基体开

收稿日期:2016-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11402112)

作者简介:朱路佳(1992-),男,浙江湖州人,硕士生,主要从事光纤传感器方面的研究。通信作者:刘荣梅(1975-),女,江苏南京人,副教授,硕士生导师,主要从事光纤智能材料和测试技术等方面的研究。

裂及分层等现象。因此,在不同工艺条件下对复合材料的固化过程进行监测、对比、分析具有重要的现实意义。为研究不同工艺条件下树脂基复合材料的固化过程,本文采用将光纤布喇格光栅埋入环氧树脂内部的方法对其固化过程进行简单模拟。设计了专用的环氧树脂固化模具,在恒温 40 ℃ 和室温 24 ℃ 两种不同工艺下,将调配好的环氧树脂分别倒入该模具中,采用布喇格光纤光栅对两组环氧树脂的固化过程进行实时在线监测。探讨在不同工艺条件下环氧树脂固化产生的应变、温度变化和固化速率等参数的变化,实验结果可为树脂基复合材料的固化成型制订更科学的生产工艺提供有益指导。

1 实验原理

光纤布喇格光栅(FBG)的光学特点是传输方向相反的两个纤芯模之间发生耦合<sup>[12]</sup>,传输模式如图 1 所示。由图可见,当宽谱光源入射进光纤后,经过布喇格光栅时,满足相位匹配条件的光将被反射。反射光的中心波长信号与光栅周期、纤芯的有效折射率有关,故当外界的被测量引起光纤光栅温度、应力改变时,都会导致反射光的中心波长发生变化。光纤光栅的中心波长( $\lambda_B$ )与温度( $T$ )、应变( $\epsilon$ )的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon \quad (1)$$

式中: $\alpha$  和  $\zeta$  分别为光纤的热膨胀系数和热光系数; $P_e$  为光纤的有效弹光系数; $\Delta T$  和  $\Delta\epsilon$  分别为光纤光栅的温度变化量和轴向应变变化量。对于石英光纤光栅, $\alpha = 6.3 \mu\text{C}^{-1}$ ,  $\zeta = 0.55 \mu\text{C}^{-1}$ ,  $P_e \approx 0.22$ 。

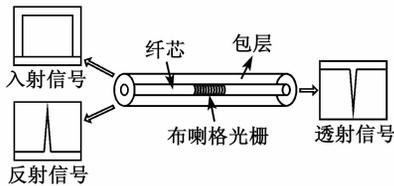


图 1 布喇格光纤光栅的传感结构

为方便计算,可将式(1)简化<sup>[13]</sup>为

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (2)$$

式中: $K_\epsilon$  和  $K_T$  分别为光纤光栅的应变灵敏度系数和温度灵敏度系数。

2 实验过程及装置

本实验所用环氧树脂固化模型如图 2 所示。将环氧树脂和固化剂按 4:1 的比例在专用模具中固化成型,固化后的模型长 200 mm,高 4 mm,边缘宽度

为 20 mm,中间宽度为 10 mm,光纤埋入深度为 2 mm。

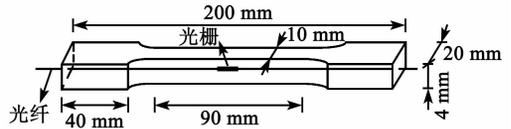


图 2 环氧树脂固化模型

图 3 为整个固化过程监测系统装置的原理图。由图可见,宽带光源发出的光信号经过光隔离器后再经端口 1 进入 3 dB 耦合器,通过 3 dB 耦合器的出射端口 3 入射到埋入在环氧树脂中的布喇格光纤光栅中,此时满足反射条件的光会被光栅反射,最后在端口 2 检测到该反射信号。由计算机对该信号进行采集,并对采集到的信号进行分析、比较。

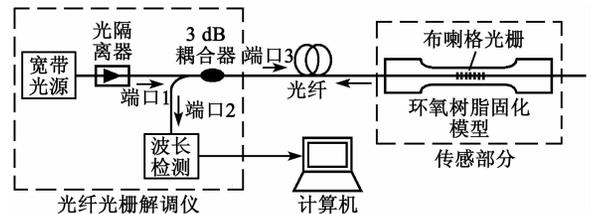


图 3 环氧树脂固化监测系统原理图

本实验对光纤光栅的埋入位置有一定要求,因为在不同位置处的环氧树脂固化时产生的温度和应变都会有所差别。为保证在不同工艺条件下光纤埋入长度和埋入方向的精确性,设计了专用模具,如图 4 所示。该模具厚 4 mm,两端各有一道凹槽(见图 4(a)),且凹槽深度为 2 mm,这样可保证光纤埋放在树脂中间部位<sup>[14]</sup>。实验开始前,先在模具内部涂上一层硅脂,以便于实验结束后对试样进行脱模。

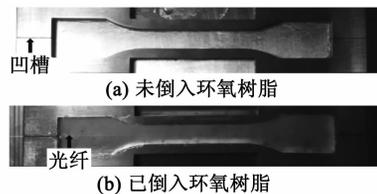


图 4 环氧树脂固化模具

图 4(a)为环氧树脂固化模具的实物图,此时模具内部已涂有一层硅脂,将光纤轻放在模具两端的凹槽内,且在光纤两端施加预应力,使光栅处于模具高度和长度方向的正中间。固定好光纤后再将调配好的 E-51 环氧树脂倒入模具中(见图 4(b)),使其在恒温 40 ℃ 和室温 24 ℃ 的两种不同工艺条件下进行固化,固化时间均持续 18 h。实验刚开始时,先观察两模具中处于液态的环氧树脂的流动是否趋于稳定,待观察得到液态的环氧树脂都已趋于平衡时,

则通过美国 Micron Optics 公司生产的 SM130 光纤光栅解调仪实时监测在不同工艺条件下环氧树脂的固化情况<sup>[15]</sup>。实验中把用于监测 40 ℃、24 ℃ 工艺条件下环氧树脂固化的光纤光栅分别记为 FBG1、FBG2。本实验所用的 FBG1 和 FBG2 的初始中心波长分别为 1 545.295 8 nm 和 1 545.049 2 nm。

### 3 实验结果与分析

不同工艺条件下,环氧树脂的固化速率、温度变化及固化后产生的应变会发生相应的改变。图 5 为在不同工艺条件下环氧树脂固化时光纤光栅中心波长的变化。由图可看出,在 AB 段,FBG1 的中心波长呈缓慢增大的趋势,此时,光纤光栅监测的是环氧树脂固化时温度的变化。这一变化趋势的形成与环氧树脂和固化剂发生化学反应产生的热量有关,该热量会令光纤光栅周围的温度升高,从而使中心波长增加,且在 B 点达到最大值。

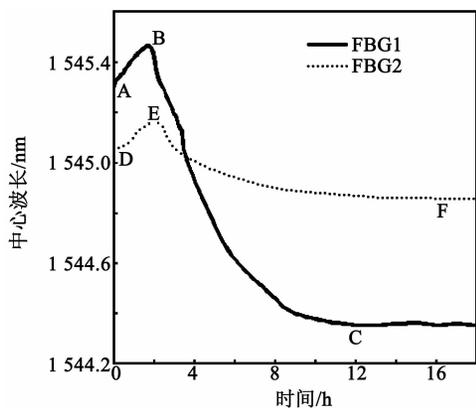


图 5 不同工艺条件下,环氧树脂固化时光栅中心波长变化

在 BC 段,FBG1 的反射波长开始减小,其原因在于:

1) 在这一阶段环氧树脂和固化剂的化学反应开始减弱,释放的热量逐渐减少,使光栅周围的温度开始降低。

2) 此阶段的环氧树脂在固化过程中体积开始收缩,收缩所产生的应力逐步施加在光栅上而造成其中心波长向短波长方向移动。

在这两个因素的共同作用下,光纤光栅的中心波长减小的速率较快,12 h 后,中心波长的变化缓慢,最终趋于稳定。因为环氧树脂固化过程在这时已基本结束,温度早已恢复到原来的 40 ℃,体积不再收缩,无应力再施加在光栅上,所以,光纤光栅中心波长也不再变化。

### 3.1 固化工艺对树脂温度变化的影响

在 AB(DE)段,环氧树脂处于放热过程,且在这段时间内环氧树脂为液态,没有发生体积收缩,故无应力施加在光栅上,即光栅中心波长的变化仅由环氧树脂固化时释放的热量造成光栅周围温度场的变化引起,故可认为式(2)中的  $\Delta\varepsilon = 0$ ,此时式(2)可变换为

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \times K_T} \quad (3)$$

在 B 点和 E 点处,由于树脂固化释放的热量而造成两光栅中心波长变化量达到最大值,FBG1 和 FBG2 在这两点处的中心波长分别为 1 545.466 3 nm 和 1 545.162 1 nm。由式(3)计算可得在恒温 40 ℃ 和室温 24 ℃ 工艺条件下,环氧树脂固化时产生的温度变化分别为 16.1 ℃ 和 10.7 ℃。

由于本实验测量的环氧树脂模型较小,故在两种工艺条件下测得的温度变化量差别不大,但在实际的工程项目中,往往需要用到大量复合材料,这时由于固化工艺不同而造成环氧树脂固化时产生的温度变化将会被放大,这不仅会影响复合材料整体固化均匀程度,同时也会使复合材料产生热变形,从而降低整个系统的结构强度。

### 3.2 固化工艺对树脂固化速率的影响

两种不同工艺条件下环氧树脂所处的温度不同,这会导致热固性环氧树脂的固化速率发生改变。图 5 中,在 2.1~12 h 这段时间内,同一时刻,FBG1 的中心波长变化曲线斜率的绝对值大于 FBG2 的中心波长变化曲线斜率的绝对值。这说明在此时间段,恒温 40 ℃ 工艺条件下的环氧树脂固化速率大于室温 24 ℃ 工艺条件下的环氧树脂固化速率。

固化速率的大小将直接影响树脂固化完成时间。实验中,光纤光栅中心波长值的稳定预示着环氧树脂的固化过程已结束。由图 5 可看出,FBG1 的中心波长在 12 h(C 点)附近已开始趋于稳定,而 FBG2 的中心波长在 16 h(F 点)附近才开始趋于稳定。这说明环氧树脂在恒温 40 ℃ 工艺条件下的固化完成时间比在室温 24 ℃ 工艺条件下的固化完成时间短。

### 3.3 固化工艺对树脂产生应变的影响

环氧树脂进行固化时,树脂体积收缩会引入相应的应变。应变的产生是影响复合材料成型质量的重要因素,它不仅会降低复合材料的强度,对其形状

和尺寸的稳定性也会有所影响。固化工艺的不同造成树脂体积收缩的程度不同,因而最终树脂内部产生的应变也不相同。埋在环氧树脂内部的光纤光栅最终的中心波长变化量反映了环氧树脂固化时产生应变的大小。由于用于监测环氧树脂固化的光纤光栅在实验开始和实验结束时的温度相同,故可认为式(2)中的 $\Delta T=0$ ,此时式(2)可变换为

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B \times K_\varepsilon} \quad (4)$$

式(4)即为树脂固化后产生的应变表达式。固化实验结束后,FBG1和FBG2的中心波长分别为1544.3513 nm和1544.8561 nm。由式(4)计算可得在恒温40℃和室温24℃工艺条件下固化的环氧树脂内部产生的应变分别为779.60  $\mu\varepsilon$ 和159.41  $\mu\varepsilon$ ,比较可知环氧树脂在恒温40℃下固化时内部所产生的应变较大,约为在室温24℃下固化时环氧树脂内部所产生应变的5倍。

#### 4 结论

1) 采用将光纤布喇格光栅埋入环氧树脂内部的方法对环氧树脂在两种不同工艺下的固化过程进行实时在线监测。不同工艺下,环氧树脂固化时产生的温度变化不同,恒温40℃和室温24℃时,环氧树脂固化时产生的温度变化分别为16.1℃和10.7℃。

2) 不同的固化速率将直接影响环氧树脂的固化完成时间。环氧树脂在恒温40℃工艺条件下比在室温24℃工艺条件下的固化速率大,固化完成时间短。

3) 由于环氧树脂和光纤的膨胀系数不同,环氧树脂固化过程结束后,试样内部会残留残余应力,产生残余应变。在恒温40℃和室温24℃工艺条件下环氧树脂固化产生的应变值分别为779.60  $\mu\varepsilon$ 和159.41  $\mu\varepsilon$ 。

虽然在温度较高的工艺条件下,环氧树脂固化速率快,固化完成时间短,但同时也会引入较大的应变,产生较高的温度变化,这是一种潜在的隐患,会对复合材料结构的功能、尺寸和可靠性产生重大影响。因此,在工程应用中可选择让环氧树脂在适当的低温工艺下进行固化,从而减小树脂内部所产生的应变,提高复合材料的固化成型质量。本文通过FBG监测不同工艺条件下环氧树脂的固化过程,可为树脂基复合材料的固化成型提供有益指导。此外,树脂固化后,光纤径向将产生残余应力,这会对光纤光栅的应变灵敏度系数造成一定程度的影响,

有待于今后进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 琚宏昌,张凤,张贝宜,等. FRP复合材料在土木工程中应用的研究进展[J]. 混凝土, 2012, 28(2):11-17. JU Hongchang, ZHANG Feng, ZHANG Beiyi, et al. Research advance for application of FRP composites in civil construction[J]. Concrete, 2012, 28(2):11-17.
- [2] 张帅,朱锡,孙海涛,等. 船用复合材料螺旋桨研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5):620-633. ZHANG Shuai, ZHU Xi, SUN Haitao, et al. Review of researches on composite marine propellers[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5):620-633.
- [3] WANG J, PIECHNA J, MÜLLER N. A novel design and preliminary investigation of composite material marine current turbine[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2012, 58(4):355-366.
- [4] KHATAVKAR N, BALASUBRAMANIAN K. Composite materials for supersonic aircraft radomes with ameliorated radio frequency transmission-a review[J]. Rsc Advances, 2016, 6(8):6709-6718.
- [5] HO M, LAU K, AU H, et al. Structural health monitoring of an asymmetrical SMA reinforced composite using embedded FBG sensors[J]. Smart Materials & Structures, 2013, 22(22):126-132.
- [6] 郭永兴,张东生,周祖德,等. 表面式FBG应变传感器及其在高速公路桥梁工程中的应用[J]. 光电子·激光, 2014, 25(3):435-441. GUO Yongxing, ZHANG Dongsheng, ZHOU Zude, et al. A novel surface-mounted FBG strain sensor and its application in highway bridge engineering [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(3):435-441.
- [7] PEREIRA G, MCGUGAN M, MIKKELSEN L P. Method for independent strain and temperature measurement in polymeric tensile test specimen using embedded FBG sensors[J]. Polymer Testing, 2016, 50:125-134.
- [8] SAAD S, HASSINE L, ELFAHEM W. Hydrogen FBG sensor using Pd/Ag film with application in propulsion system fuel tank model of aerospace vehicle [J]. Photonic Sensors, 2014, 4(3):254-264.
- [9] RAMLY R, KUNTJORO W, ABD R M K. Embedded FBG sensor in aircraft smart composite materials for structural monitoring [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 393(393):311-316.