

RTM 工艺成型复合材料树脂固化过程 残余应变监测研究

秦 伟^{1 2}, 吴晓宏^{1 2}, 曹茂盛¹

(1. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001 ; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要 :提出了 RTM 工艺树脂固化过程残余应变布拉格光栅传感器检测新方法。通过光纤光栅波长偏移与温度和固化时间之间的关系测试,得到了树脂固化过程中残余应变的变化历程,成功实现了 RTM 工艺树脂固化过程中残余应变的在线监测。实验结果表明,在降温过程中,残余应变的变化与温度的变化呈线性关系,这为复合材料层合板的残余应力分析提供了实验依据。

关键词 :RTM ; 布拉格光栅 ; 环氧树脂 ; 固化

中图分类号 :TB332

文献标识码 :A

文章编号 :1005-5053(2005)04-0050-03

RTM 工艺^[1]树脂固化过程中由于材料内部温度场和固化度场分布不均匀以及树脂基体与增强纤维热膨胀系数不一致等因素会产生残余应力,残余应力的存在会大幅度降低材料性能,导致复合材料基体开裂、断裂韧度低、疲劳强度低以及脱层等现象发生。因此,如果能对树脂固化过程产生的残余应变进行实时监测,了解其变化历程,通过适当调整工艺参数减小残余应力具有很大的实际意义^[2~6]。目前,关于 RTM 树脂固化监测方面的工作比较少,这是由于复合材料残余应力存在于材料内部,一般需要无损检测技术进行测量。光纤布喇格光栅具有体积小,不会对固化后的复合材料力学性能产生影响、测量精度高,温度/应变交叉敏感性等优点^[7]。本研究采用光纤布喇格光栅应变传感器监测 RTM 工艺树脂固化过程,测试了光纤光栅波长偏移与温度和固化时间之间的关系,成功实现了 RTM 工艺树脂固化过程中残余应变的在线测量,为减少 RTM 成型过程中由于树脂热收缩引起的残余应力打下基础。

1 试 验

以 T-300 碳纤维缝编织物为增强体,711# 环氧、2-乙基 4-甲基咪唑为树脂体系。采用 RTM 成型工艺制备复合材料。RTM 注射条件 :压力 0.02MPa ,

时间 30s。固化工艺为 100℃,1.5h ;120℃,4h。光纤布喇格光栅应变传感器监测复合材料固化过程残余应变的实验在干燥箱中进行,光纤光栅应变传感器预先埋入增强纤维铺层正中间,方向为沿树脂流动方向。在光纤光栅传感段放置热电偶,用来观测树脂温度变化。模具注入树脂后在干燥箱中固化,光纤布喇格光栅应变传感器从模具侧孔引出,采用 FC/PC 接头与通讯光纤连接。光纤布喇格光栅应变传感器监测信号由布喇格光栅解调仪解调,并直接传送给与其相连接的计算机识别。

2 结果与讨论

2.1 光纤布喇格光栅理论基础

光纤布喇格光栅的原理是由于光纤芯区折射率周期变化造成光纤波导条件的改变,导致一定波长的光波发生相应的模式耦合,使得其透射光谱和反射光谱对该波长出现奇异性。由耦合理论可知,光纤布喇格光栅中心反射波长为 :

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中 n_{eff} —纤芯有效折射率 ; Λ —光栅周期。

光纤布喇格光栅中心波长为光纤光栅的特征值,光栅制作成型后,中心波长随之确定。由式(1)可知,光纤光栅的反射波长 λ_B 随 n_{eff} 和 Λ 的改变而变化。光纤布喇格光栅对于应力和温度变化都是敏感的,应力影响是由光弹效应和光纤光栅周期的变化引起的,温度影响则是由热光效应和热膨胀效应引起的。波长满足布喇格条件式(1)的入射光将被光纤光栅反射,光纤光栅原理示意图如图 1 所示。

收稿日期 :2004-10-28 ;修订日期 :2004-11-10

基金项目 :国家自然科学基金重点资助项目(59833110)

作者简介 :秦伟(1972-),男,博士后,副教授,主要从事先进复合材料成型、改性及其在空间环境中的评价和防护。

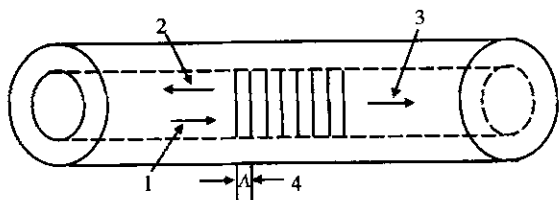


图1 光纤光栅原理示意图

1—入射光 2—反射光 3—透射光 4—光栅周期

Fig. 1 The FBG Bragg condition for reflection

1—incident light 2—reflected light ;

3—transmitted light 4—grating periodic

假设应变和温度所引起的光纤布喇格光栅中心反射波长的变化是相互独立的,当应变和温度同时发生变化时,光纤布喇格光栅中心反射波长的变化可以表示为:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = k_\varepsilon \varepsilon + k_T \Delta T \quad (2)$$

对于确定的光纤光栅,应变及温度系数均为定值。二者均可采用实验标定。对于确定的纤芯材料,应变系数为一定值,在室温下对光纤布喇格光栅应变传感器施加应变测量其波长偏移而得到。

2.2 树脂固化过程残余应变监测

因为光纤传感器信号偏移不仅与应变有关,也与温度有关,所以去除温度的影响才能反映真实的由应变引起的偏移。图2给出了监测点位置温度变化曲线,由于复合材料层板很薄,可以假设在固化过程中复合材料内部温度是均匀的,即光纤传感器上传感器段的温度在固化过程均匀,并且与温度传感器监测位置的温度一致。图3给出了光纤布喇格光栅应变传感器波长变化随时间变化曲线。可见,在复合材料固化过程中,光纤布喇格光栅应变传感器波长变化随着固化过程的进行发生了显著的变化。由图2和图3比较可以看出,光纤布喇格光栅应变传感器波长变化与温度变化有密切的关系。

由于光纤布喇格光栅具有温度/应变交叉敏感性,实际测得的波长偏移应该是温度和应变共同作用的结果,且有如下关系:

$$\Delta\lambda_{\text{measured}} = \Delta\lambda_{\text{actual}} + \Delta\lambda_{\text{thermal}} \quad (3)$$

温度造成的波长偏移($\varepsilon_{\text{thermal}}$,也称为热表观应变)主要是由于温度变化导致纤芯折射率发生改变而引起的,可以由下式给出:

$$\Delta\lambda_{\text{thermal}}/\lambda_B = C(T - T_0) \quad (4)$$

式中: T 为布喇格光纤光栅的温度, λ_B 为光纤光栅的中心波长,由式(1)决定, T_0 为室温,即光纤布喇格应变传感器的无应变温度, C 为常数,本实验中为

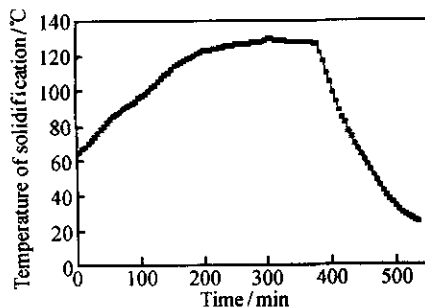


图2 树脂温度随时间变化曲线

Fig. 2 Resin temperature profile during the cure process of composite

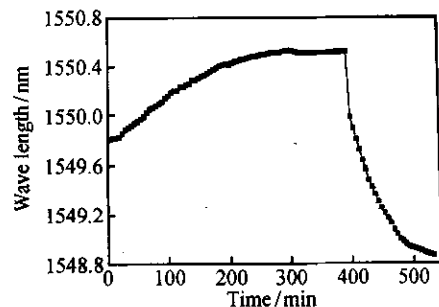


图3 光栅波长随时间变化曲线

Fig. 3 Wavelength profile during the cure process of composite

0.0102nm/°C。光纤布喇格光栅应变传感器波长偏移随应变的变化系数为1.2nm/ $\mu\varepsilon$ 。将温度变化的影响去除之后,光纤布喇格光栅的应变变化在复合材料固化过程中的发展历程如图4所示。从图4可以看出,树脂固化开始阶段为粘性流体阶段,纤维树脂体系所承受的压应力主要由纤维承受,所以监测结果表现为材料受到压力,应变为负值,并基本保持不变,光纤光栅反射波长的偏移仅反映温度的变化。随着温度的继续升高,树脂不断进行交联反应,由粘性流体状态逐渐转化为粘弹性固体,此时外界压力逐渐由树脂承担,纤维所受压力减小,在曲线上表现为负应变逐渐减少,直到固化反应开始。在恒温阶段,树脂逐渐固化,固化反应放热使材料体系温度逐渐升高,同时材料收缩,产生压应变,在图形上表现为应变逐渐降低。在降温过程中,树脂体积发生热收缩,光纤布喇格光栅的应变随着树脂基体热收缩程度的逐渐增大而逐渐降低。

图5为残余应变与温度关系图。由图可见,复合材料降温过程中,树脂体积的热收缩是由温度变化控制的。复合材料固化过程的后期,即自然降温过程中,光纤布喇格光栅应变变化与温度变化之间的关系几乎是线性的,这为复合材料层合板的残余

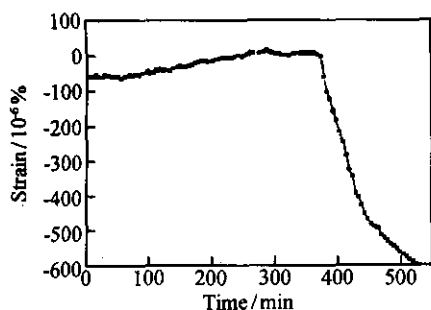


图4 光纤光栅应变随时间变化曲线

Fig.4 Strain evolution of the FBG during the composite curing process

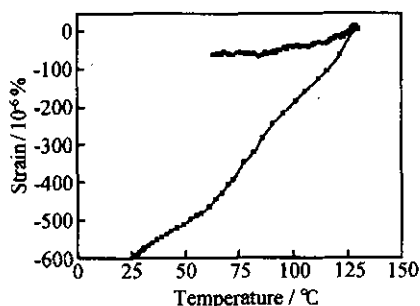


图5 残余应变与温度的关系

Fig.5 The relation of residual strain with temperature

应力分析提供了重要的实验依据。

3 结 论

(1)提出了 RTM 工艺固化过程中的树脂热收缩引起的残余应变光纤布喇格光栅监测方法,为进一步研究 RTM 成型复合材料界面残余应力打下了基础。

(2)固化反应前光纤光栅主要反映纤维承受应

力的变化,固化时主要反映纤维与树脂的整体应变变化,固化后反应复合材料的残余应变变化。

(3)在降温过程中,残余应变的变化与温度的变化呈线性关系,这为复合材料层合板的残余应力分析提供了重要的实验依据。

参考文献:

- [1] 秦伟,张志谦,黄玉东,等.超声处理对 RTM 成型复合材料界面性能的影响[J].复合材料学报,2003,20(3):31-34.
- [2] 赵若飞,周晓东,戴干策.纤维增强聚合物复合材料界面残余热应力研究进展[J].纤维复合材料,2000,17(2):20-24.
- [3] ANIFANTIS N K, KAKAVAS P A, PAPANICOLAOU G C. Thermal stress concentration due to imperfect adhesion in fiberreinforced composites[J]. Composites Science and Technology, 1997, 57: 687-696.
- [4] DU W, TAO X M, TAM H Y *et al.* Fundamentals and applications of optical fiber bragg grating sensors to textile structural composites[J]. Composite Structures, 1998(42): 217-229.
- [5] FIEDLER B, KLISCH A, SCHULTE K. Stress concentrations in multiple fibre model composites[J]. Composites, 1998, Part A 29: 1013-1019.
- [6] BECHEL V T, SOTTOS N R. The effect of residual stresses and sample preparation on progressive debonding during the fibre push-out test[J]. Composites Science and Technology, 1998, 58: 1741-1751.
- [7] MURUKESHSAN V M, CHAN P Y, SEAH L K. Cure monitoring of smart composites using fiber bragg grating based embedded sensors[J]. Sensors and Actuators, 2000, 79: 153-161.

Monitoring for Residual Strain of Resin Cure During the Process of RTM Composites

QIN Wei^{1,2}, WU Xiao-hong^{1,2}, CAO Mao-sheng¹

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The monitoring system of fiber Bragg grating for the RTM curing process was established. The real time monitoring for residual strain induced by resin cure during the RTM process was realized by measuring the relationship among wave deflection, temperature and curing time. The result shows that the relationship between the residual strain and the temperature change is approximately linear during the process of cooling, which supplies experimental support for the residual stress analysis of composite plate.

Key words: RTM; Bragg grating; epoxy resin; cure