复合材料学报 第17卷 第1期 2月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol 17 No. 1 February 2000

文章编号: 1000-3851(2000)01-0037-05

多功能光纤智能复合材料研究

张博明 王殿富 杜善义 李辰砂 王淑芳

(哈尔滨工业大学 复合材料研究室 150001) (* 航空工业第一集团公司航空材料工艺研究所 100024)

摘 要: 提出采用光纤微弯传感器测量复合材料固化中粘度的变化。选择了合适的光纤并进行了增敏处理。完成了不同铺层方式的复合材料固化进程的粘度测量, 并与动态介电方法的测量结果进行了比较。结果发现, 光纤微弯衰减方法对于热压情况下复合材料的固化监测是敏感的。该方法可重复性好, 可以准确给出树脂粘度最低点和固化完成点的时间, 灵敏度与光纤同增强纤维的交角有关。利用完成固化监测功能后仍具有光波导性能的已埋入光纤, 研制了两种类型的振动传感器。

关键词: 光纤传感器; 固化; 微弯; 统计模

中图分类号: TB33; TB381 **文献标识码**: A

INVESTIGATION OF MULTI-FUNCTIONAL FIBER OPTIC SMART COMPOSITE

ZHANG Bo-ming WANG Dian-fu DU Shan-yi LI Chen-sha

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(* Institute of Aeronautical Materials Technology, Aeronautical Industrial Corporation of China)

Abstract: In this paper it is proposed to measure the change of viscosity of composite resin using fiber optic microbend attenuation. Proper optical fibers were selected and processed to increase sensitivities. Experiments of viscosity measurement for different lay up conditions were accomplished and the results were compared to dielectric measurement. It is found that fiber optic attenuation is sensitive to composite cure monitoring in autoclave with good reliability which can indicate the gel point and the end point of the cure processing. The sensitivity is found to be related to the cross angle of optical fiber to reinforced fiber and the pressure in cure process. Embedded optical fibers which can accomplish cure monitoring and maintain optical wave guide perfomance are developed to be two sorts of vibration sensors based on the statistic mode of fiber optic vibration sensing mechanism.

Key words: fiber optic sensor; cure; microbend; statistic mode

智能材料与结构是把传感器、致动器和处理器埋入先进复合材料, 其设计思想参照了生物有机器官, 用于飞行器、空间站结构或蒙皮, 可以极大地提高整体多方面的性能[1,2]。而光纤传感器由于其独特的传感性能和与复合材料良好的兼容性成为智能材料与结构中传感器的首选[1]。埋入光纤对材料力学性能的影响, 数据接口数量的限制, 成本等多种因素要求一根埋入光纤具有尽可能多的传感功能[3], 而对用于工艺过程监测的光纤传感器, 则要求在完成工艺过程监测任务以后, 还可以在材料服役期继续发挥作用, 其优点在于提高实用性, 降低系统复杂程度, 促进基于光纤传感器的智能材料与结构技术由实验室向实际应用转换。

本文中提出利用一根埋入的特制多模光纤首先完成复合材料工艺过程在线实时监测, 然后同一根光纤应用于材料服役期的振动监测的测量, 真正实现从材料制造到使用过程的终身多功能测量, 达到固化-振动监测一体化。

1 光纤监测预浸料热压固化

热压环境下监测预浸料固化时, 预浸料树脂粘度的变化对于控制固化进程十分重要。在过程初期,

收稿日期: 1998-08-03; 收修改稿日期: 1998-10-26

作者介绍: 张博明(1966), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 智能材料与结构, 复合材料低成本制造技术

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

树脂粘度由于温度上升而降低至最低点。工艺过程要求在粘度最低点以后、凝胶点以前加压,这样才能保证适当的树脂-纤维体积比和材料内部压力的均匀,确保产品的质量[4]。同时通过测量粘度的变化还可以确定固化结束时间,避免不完全固化和过度固化。因此在工艺过程中监测粘度的变化是改进产品质量、降低成本的关键。本文中提出采用光纤微弯传感器测量复合材料固化中树脂粘度的变化。根据光纤微弯传感器原理,分析了影响测量灵敏度的因素,选择了合适的光纤并进行了增敏处理,完成了不同升温条件下不同铺层方式的复合材料固化进程的测量,并与动态介电方法的测量结果进行了比较。

微弯造成光纤传输能量损失,主要是由于纤芯最高阶传导模耦合到包层的辐射模,然后很快衰减。这种模态间的耦合可以由许多环境效果造成,如温度、压力、碰撞或引起结构应变的声波。复合材料预浸料中的增强纤维具有固定的空间频率,可以用来产生光纤的微弯损耗。这种内部微弯装置由于其结构紧凑坚固,具有广阔的应用前景。

将光纤微弯损耗原理应用于复合材料固化监测,其中光纤微弯是由于预浸料中周期分布的增强纤维引起的,即所谓内部微弯装置[5,8],实验框图如图1。光源采用He-Ne激光器,光电探测采用硅光电二极管。为提高光纤微弯传感器的灵敏度[5],实验中试用了多种光纤。普通通讯光纤在设计制造时一般都会采取措施减少微弯损耗,因此实验中发现采用通讯光纤灵敏度很低。采用特制的BJ2型PCS玻璃光纤,传感段剥皮增敏,大大增强了光纤在预浸料固化过程中微弯损耗的灵敏度。图2～图4给出对应不同铺层方式的光衰减测量结果(双马I预浸料,压强约为0.4MPa)。

依据Gutowski关于树脂流动-纤维作用机理的模型[6],把预浸层板看作是充满粘性流体的具有非线性弹性形变性能的多孔介质,对其施以釜压后,树脂和纤维共同承担负荷。在初始阶段纤维尚未发生形变,所施负荷完全由树脂承担,随着温度升高树脂粘度降低,此时若层板边缘处树脂压力较低,在内外压差作用下树脂将流动,由纤维造成的光纤微弯减弱;当粘度降至最低点时,预浸层被压缩,纤维受压迫而变形并产生弹力,此时部分负荷被纤维承担,光纤微弯开始增强,树脂中的平均压力减小;随着预浸层被继续压缩,纤维所承担负荷的比例越来越大,光纤微弯也越来越强,最终的纤维体积分数完全取决于纤维束的弹性性能,与树脂的流动过程无关,直至

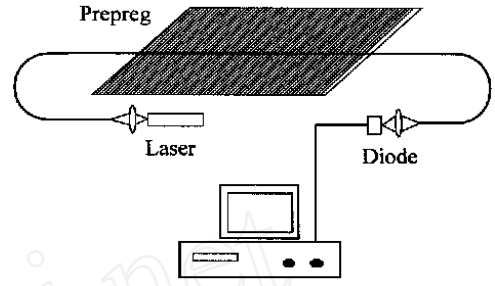

图1 内部光纤微弯传感器

Fig. 1 Intrinsic fiber optic microbend sensor

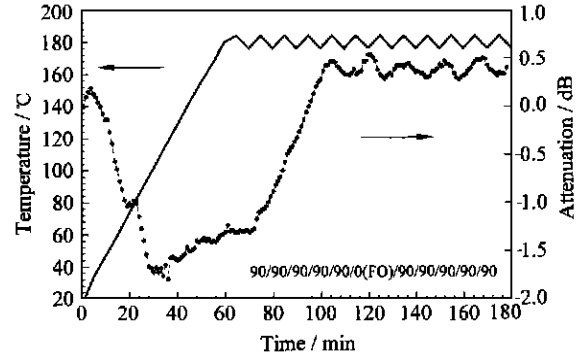

图2 第1组试验结果

Fig. 2 Experiment results for first group

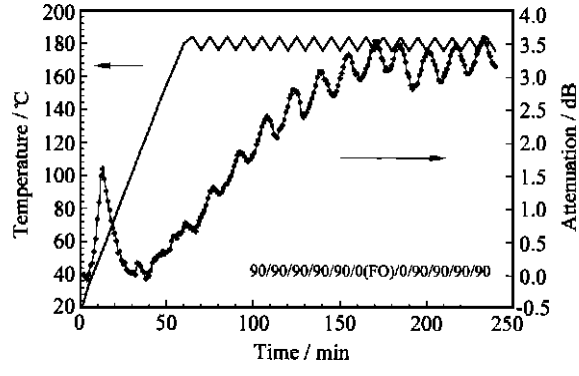

图3 第2组试验结果

Fig. 3 Experiment results for second group

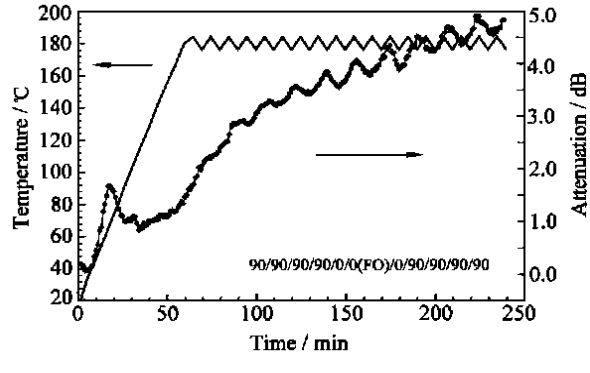

图4 第3组试验结果

Fig. 4 Experiment results for third group

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

固化结束, 光纤微弯也保持最强, 不再改变。

综合以上实验结果发现这种方法可以精确测量树脂粘度最低点对应的温度, 与在相似升温条件下使用动态介电方法测量结果(见图 5)基本吻合。通过比较不同铺层方式的测量结果发现, 铺层方式 90/90/90/90/90/0(FO)/0/90/90/0/90 的测量结果最为理想。存在的问题是在固化后期衰减信号发生振荡, 估计是保温装置温度波动引起的。

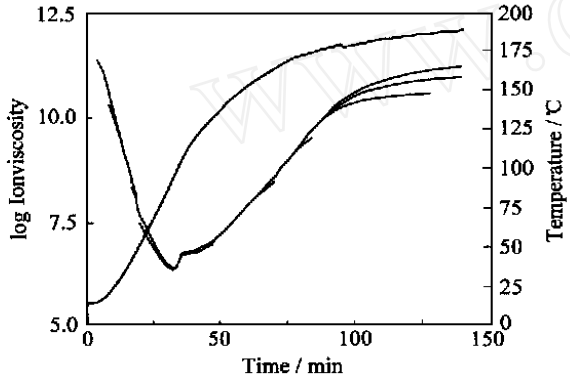

图 5 动态介电方法测量结果

Fig. 5 Experiment result of dielectric cure monitoring

2 具有振动感知能力的光纤智能材料

为了实时控制宇航结构的动作与姿态, 一个能在任何时刻提供高精度振动频率与振动幅度测量的闭环控制系统是十分必要的。传统上需要将大量的加速度传感器安装在结构的各处表面, 通过各点测量推算出结构整体的运动状态。光纤传感技术的发展已经可以制造出可实用的基于一根埋入光纤的振动传感器, 提供高精度测量振动频率和振幅的能力[7]。由于结构内部状态的改变或运动机械的故障情况也可以通过振动信号的测量反映出来, 这种传感技术的应用已经扩展到桥梁、高层建筑、大坝等土木项目和诸如发电机工作状态监测等许多民用领域。本文中利用完成固化监测功能后仍具有光波导性能的埋入光纤, 根据统计模光纤传感器测量振动的机理, 发展了两种类型的振动传感器, 使埋入光纤复合材料具有感知振动状态的功能。这有助于建立结构损伤评价系统, 提高结构的可靠性, 为降噪、减振、形状控制等应用提供关键部位的信息。

利用统计模传感[7]的方法, 通过对多模光纤输出的远场图象测量, 可以反映光纤沿途所受到的振动扰动。根据不同的要求可以分为 SMS-A 型和 SMS-B 型。SMS-A 型传感器的配置如图 6 所示。

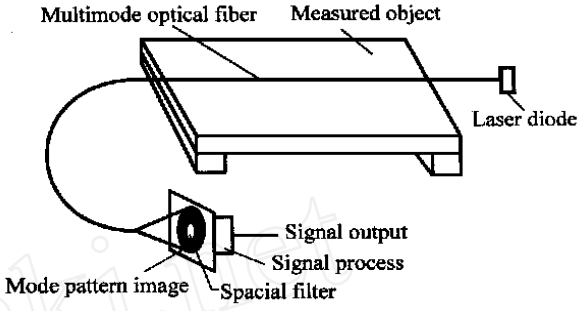

图 6 SMS-A 型传感器原理框图

Fig. 6 Scheme of SMS-A sensor experiment

将一正弦扰动信号作用于埋光纤传感器复合材料试件, 频率从 10Hz 到 130Hz 连续变化。输出的测得频率如图 7 所示, 实验结果的标准偏差小于 1%。说明这种传感器可以在很大的动态范围内完成对振动频率的测量。由于这种方法仪器设备极其简单, 测量结果精确可靠, 操作时只需将光纤埋入材料或粘在材料结构表面, 未来将可以在许多领域发挥不可替代的作用。

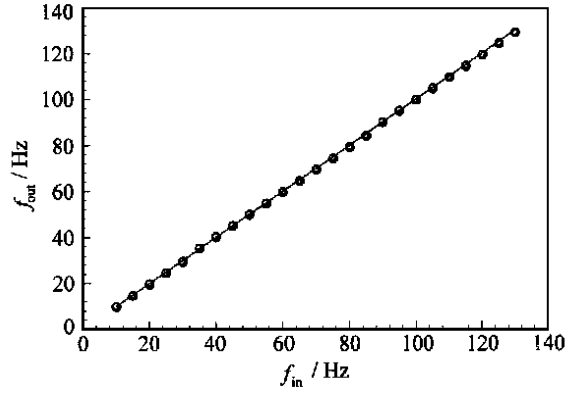

图 7 SMS-A 型光纤振动传感器频率测量结果

Fig. 7 Results of frequency measurement using SMS-A fiber optic vibration sensor

利用 SMS-A 型光纤振动传感器, 测量两根材料相同但长度不同的复合材料悬臂梁自由振动, 两组信号分别进行 Fourier 变换, 结果示于图 8。每根悬臂梁自由振动信号可以清晰给出三阶振动频率, 长梁的三阶主频分别小于短梁的三阶主频, 说明利用这种传感器监测材料的振动状况可以反映材料力学性质的改变。由于光纤传感器在复合材料安装时就已埋入, 这种振动测量能力不仅可以反映振动状况, 还可以用于反映固化后产品的力学模量、服役期受载情况和能够引起振动状况改变的损伤。

SMS-B 型传感器的配置如图 9。光纤末端用敏

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

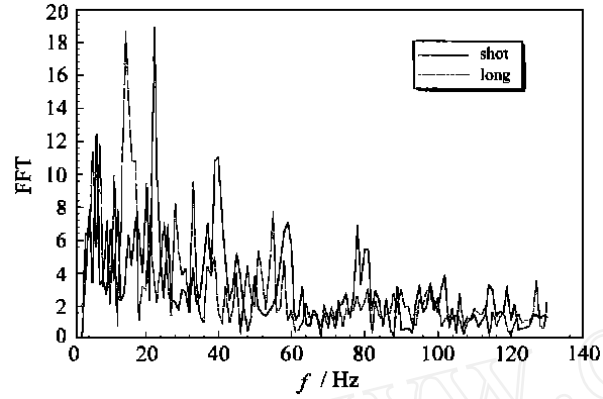

图 8 两根不同长度复合材料悬臂梁自由振动信号比较

Fig. 8 Free vibration signal comparison of two composite cantilever beam with different length

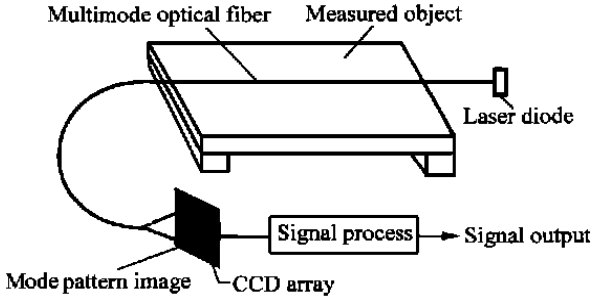

图 9 SMS-B 型传感器原理框图

Fig. 9 Scheme of SMS-B sensor experiment

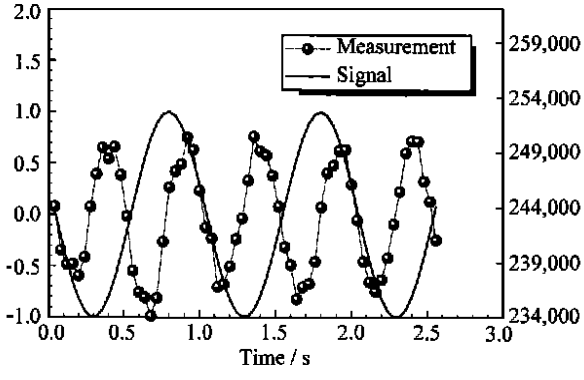

图 10 扰动与测量信号时域比较

Fig. 10 Time domain comparison between signals of perturbation and measurement

通 CCD 摄像机监测模斑分布, 通过中自公司图象采集卡将信号传入计算机。

当扰动信号频率从 0.5 Hz 到 7 Hz 连续变化时, 扰动信号与 ΔI_T 的时域信号比较见图 10, 输出的测得频率如图 11 所示, 振幅测量结果见图 12。

从原理上讲, 这种传感器的测量精度和动态范围由所用硬件决定。由于所用 CCD 摄像机和图象采集卡的每秒采样帧数固定为 25 帧, 扰动信号频率超过 6Hz 以后, 振动传感失效。测量精度由一次采样的图象帧数决定, 因为图象实时采集的帧数由计算机内存大小决定, 所以增大内存可以提高测量的精确度。

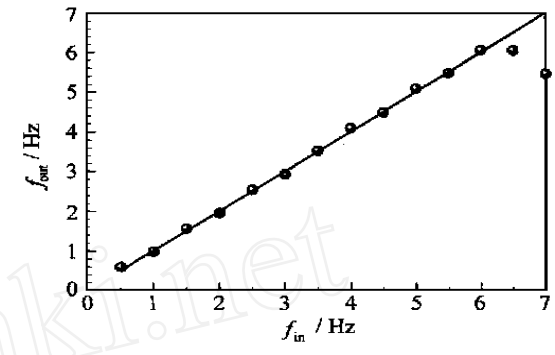

图 11 SMS-B 型光纤振动传感器频率测量结果

Fig. 11 Results of frequency measurement using SMS-B fiber optic vibration sensor

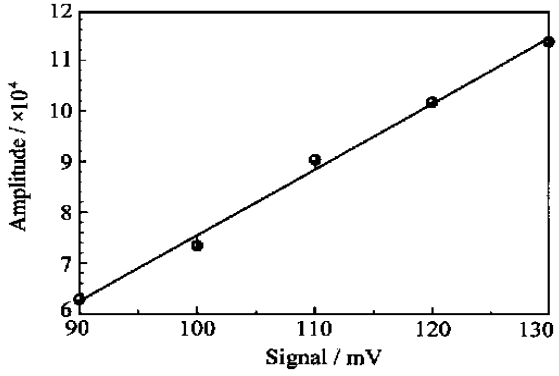

图 12 SMS-B 型光纤振动传感器振幅测量结果

Fig. 12 Results of amplitude measurement using SMS-B fiber optic vibration sensor

3 结 论

本文针对光纤智能材料与结构在复合材料固化在线监测和振动测量领域的应用, 对利用一根多模光纤实现多功能传感的目标进行了系统研究。发现多模光纤传感器可以实现固化监测与振动传感的多功能测量。制备新型特种光纤作为监测树脂固化的传感器, 降低了安装难度, 提高了可靠性。提出采用光纤微弯传感器测量复合材料固化中粘度的变化, 通过测量粘度的变化可以确定粘度最低和固化结束时间。应用这种方法可以改进产品质量, 降低成本, 避免不完全固化和过度固化。完成了不同铺层方式的复合材料固化进程的粘度测量, 并与动态介电方法的测量结果进行了比较。结果发现, 光纤微弯衰减方法对于热压情况下复合材料的固化监测是敏感

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的, 这种方法的可重复性较好, 可以准确给出树脂粘度最低点和固化完成点的时间, 灵敏度与光纤同增强纤维的交角有关。利用完成固化监测功能后仍具有光波导性能的已埋入光纤, 根据多模光纤统计模光纤传感器测量振动的机理, 研制了两种类型的光纤振动传感器。在 SMS-A 型光纤振动传感器实验中, 给出了传感器测量精度, 表明该传感器测量结果精确可靠, 提出利用这种传感器反映被测物体力学性质的方法在 SMS-B 型光纤振动传感器实验中, 完成了振动频率与振幅的测量, 对影响测量精度和动态范围的因素进行了分析。

参 考 文 献

[1] Eric Udd. Overview of fiber optic smart structure for aerospace application [J]. *SPIE*, 1988, 986: 2～5.

[2] 杜善义, 冷劲松. 光纤机敏化复合材料及其监控系统的研究 [J]. 力学进展, 1992(4): 496～502.

[3] May R G, Sanderson J M, Claus R O. Combined fiber optic strain sensor and composite cure monitor for smart structure applications [J]. *SPIE*, 1994, 2191: 46～57.

[4] 李玉华. QY8911-III 高韧性双马来酰亚胺树脂固化工艺规范的研究 [J]. 化学世界, 1996, 37: 249～251.

[5] Tim Clark, Herb Smith. Microbend fiber optic sensors [M]. Eric Udd, ed. New york: John Wiley & Sons Inc, 1994. 319～360.

[6] Gutowski T G, Morigaki T, Cai Z. The consolidation of laminate composites [J]. *Journal of Composite Materials*. 1987, 21: 172～188.

[7] Spillman W B, Jr, Kline B R. Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses [J]. *Applied Optics*. 1989, 28 (15): 3166～3177.

[8] Suopajarvi P, Lyori V, Nissila S M, *et al*. Indicating cure and stress in composite containers using optical fibers [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(9): 2587～2591.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net