

固化工艺规范对复合材料固化残余应力影响的实验研究

岳广全, 张博明, 戴福洪, 杜善义

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

摘要: 单束纤维拉伸法是以简单的单束纤维聚合物基复合材料结构为研究对象, 研究固化工艺过程中树脂体积变化与纤维上残余应力之间的关系。同时固化过程中树脂体积是随工艺温度变化而产生变化的, 经理论分析及计算得到了固化工艺温度历程对纤维上固化残余应力的影响规律。

关键词: 复合材料; 固化工艺温度; 单束纤维拉伸法; 残余应力

中图分类号: TB332 O348 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2010)02-0052-05

1 引言

复合材料固化工艺的主要工艺参数包括时间、温度、升降温速率和压力。其中, 聚合物基复合材料的标准固化周期包括若干个升温段、若干个恒温阶段和一个降温阶段^[1, 2]。恒温温度、保持恒温的时间及降温速率对固化残余应力的形成都将产生重要的影响^[3, 4]; 同时, 升温段与恒温段的数量、位置及升温速率也将对残余应力的形成产生影响, 并且这部分影响是不容忽视的^[5, 6]。要想了解固化温度历程如何影响固化残余应力的形成, 就必须完整地考虑整个固化过程包括固化阶段和固化完成后的降温阶段。目前国内外研究复合材料固化残余应力的实验方法有很多种, 包括云纹干涉法^[7]、盲孔法^[8]、应变片包埋法^[9]和光纤布拉格光栅法^[10~12]等, 并且后两种方法可以实现应力的实时监测。而本文介绍了一种新型的固化残余应力监测方法—单束纤维拉伸法, 研究固化工艺规范对固化残余应力发展的影响。

2 实验监测方法

研究固化工艺温度历程对残余应力发展的影响就是要知道在给定的固化温度历程下固化残余应力的发展历程及它们之间的对应关系。选择的实验方案要能够监测整个固化过程中残余应力的发展历程。因此复合材料构件已固化完全再进行测量的方法如云纹干涉法^[7]、盲孔法^[8]等就不能满足要求。而目前能够实现固化工艺在线监测的应变片包埋法^[9]和光纤布拉格光栅法^[10~12]只能监测到监测点处的应力变化, 而固化过程中复合材料内部常常会出现温度和固化度的分布不均, 不同位置的应力发

展水平也不一样, 仅仅了解局部某一点的应力变化不足以认识残余应力的发展过程。

纤维拉伸法^[5, 6]不同于以往的固化监测方法, 它脱离实际复合材料构件, 以简单的单根纤维复合材料结构为研究对象, 能够监测整根纤维上沿着纤维方向的平均残余应力的发展历程。所谓单根复合材料结构是一根纤维包埋在树脂腔内所组成的简单的复合材料结构, 这根纤维即是组分材料又作为传感元件, 该结构可以模拟复合材料在固化过程中纤维与树脂之间的相互作用。纤维拉伸法是不受构件几何形状限制的独立的测试方法, 对与该结构具有相同材料体系的复合材料具有一定的普遍适用性。

纤维拉伸法的原理如图1所示。由于树脂与纤维的热膨胀系数存在着很大的差异, 在固化过程中随固化进程的推进, 纤维与树脂之间存在着相互作用, 树脂基体出现收缩或膨胀, 树脂膨胀纤维上沿纤维方向产生拉应力, 见图1(a)。树脂收缩纤维上沿纤维方向产生压应力, 见图1(b)。而这种相互关系不随复合材料的宏观性能(如几何尺寸、纤维含量等)的改变而变化, 因此可以用一个简单的复合材料结构的固化来模拟实际复合材料构件在固化过程中纤维与树脂之间的这种关系, 如图1(c)所示。依据树脂与纤维之间的这种相互关系开发了纤维拉伸法, 此法示意图如图2所示, 首先建立一个与所研究的复合材料具有相同材料体系的简单的单根纤维复合材料结构, 将一根纤维拉紧并埋在充满树脂的模具腔内。图3所示为单根纤维复合材料结构示意图, 使用拉力传感器监测这根纤维拉力的变化, 得到

收稿日期: 2008-12-25

作者简介: 岳广全 (1982-) 男, 博士研究生, 主要从事先进树脂基复合材料成型工艺研究。

纤维拉力的变化就可以间接了解到纤维上残余应力的变化。纤维拉伸法反映了固化进程与纤维固化残余应力之间的关系,因此可以使用该法研究固化温度历程对纤维固化残余应力的影响。

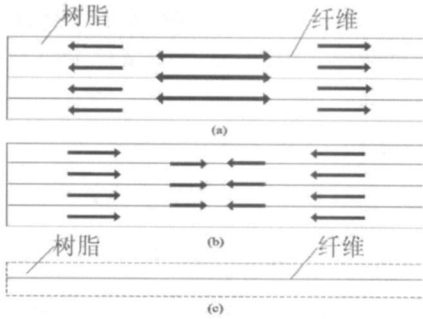


图1 树脂体积变化对纤维残余应力的影响简图

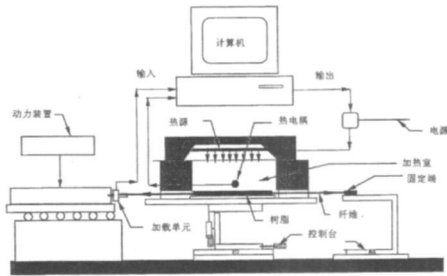


图2 纤维拉伸法示意图

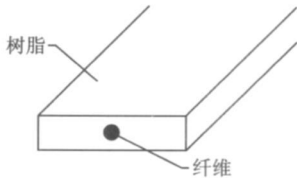


图3 单根纤维复合材料示意图

以单根纤维作为传感元件,测量精度高,但是由于单根纤维很容易折断而且拉力变化很微小,这就给实验操作上带来了困难,并且需要精度很高的力传感器,实验成本也会随之增加。单束纤维拉伸法是基于纤维拉伸法的改进方法,用一束纤维代替单根纤维。根据纤维拉伸法的测量原理,单束纤维在监测纤维上沿纤维方向的应力形成时同单根纤维所起到的作用是一样的。只不过在使用单束纤维时,树脂的浸润效果将影响测量的准确性,准确度没有单根纤维高,如果纤维束不能完全浸润,实际测量得到的拉力变化是浸润到树脂的那些纤维上的拉力变化,而不是整束纤维上的拉力变化,沿纤维方向纤维上的残余应力大小的计算将受到影响。但是我们所关心的是应力的发展趋势,定性地了解应力随温度的变化,并不是要定量地测量出残余应力的大小,所

以我们可以将纤维拉伸法转化为拉伸一束纤维来进行测量即单束纤维拉伸法,这样在实验操作上就容易实现了,同时也降低了实验成本。

3 单束纤维拉伸法监测纤维残余应力

在整个固化过程中,残余应力的形成受到温度变化和固化进程的影响。随着温度的变化,树脂发生固化交联反应,其黏度增加、体积也不断变化^[9]。当树脂具有一定刚度后,在假设树脂与纤维之间粘结得很好不会发生脱粘的情况下,如果树脂体积出现收缩,与其粘结的纤维束将被压缩,纤维内沿轴向产生压应力,力传感器监测到的纤维束拉力将会增大,如图4(a)所示^[5];相反当树脂出现体积膨胀将导致纤维被拉伸,纤维内产生沿轴向的拉应力,传感器监测到的纤维束拉力将会减小,如图4(b)所示^[5]。

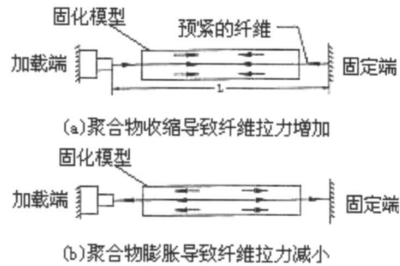


图4 固化残余应力测量的原理图

依据监测得到的纤维束拉力的数据,可以计算出纤维束整个被包埋部分沿纤维方向纤维束内的平均残余应力。

如果假设纤维束包埋部分沿纤维方向的纤维应力分布均匀,并且纤维与聚合物粘结得很好,纤维束包埋部分的平均残余应力可以由简单的材料力学公式计算得到,任意时刻纤维束包埋树脂部分的应力 $\sigma'_f(t)$ 与纤维拉力的关系式如下^[5] (如图5^[5]所示):

$$\sigma'_f(t) = \frac{T(t)-T(0)}{A_f} \tag{1}$$

式中, $T(t)$ 为任意时刻 t 的纤维拉力; $T(0)$ 为初始时的纤维拉力; A_f 为纤维束的横截面积。

则相应的应变可以表示为:

$$\epsilon'_f(t) = \frac{T(t)-T(0)}{A_f E_f} \tag{2}$$

其中, E_f 为纤维的杨氏模量。

纤维束未包埋树脂部分总的长度变化 $\Delta'(t)$ 为:

$$\Delta'(t) = \frac{T(t)-T(0)}{A_f E_f} 2L_1 \tag{3}$$

其中, L_1 如图5^[4]所示。由于在实验过程中纤

维的总长度不变, 所以未包埋树脂部分的长度变化等于负的包埋部分的长度变化, 因此包埋树脂部分的纤维应变 $\varepsilon_f(t)$ 可以表示为:

$$\varepsilon_f(t) = - \frac{T(t) - T(0)}{A_f E_f} \frac{2L_1}{L_2} \tag{4}$$

式中, L_2 如图 5^[4]所示, L_2 为包埋树脂部分纤维的长度。因此, 包埋树脂部分的沿纤维长度方向的纤维束平均应力为:

$$\sigma_f(t) = - 2 \frac{T(t) - T(0)}{A_f} \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \tag{5}$$

在以上的计算中没有考虑纤维长度随温度变化, 因为纤维的热膨胀系数很小, 纤维长度随温度的变化可以不考虑。

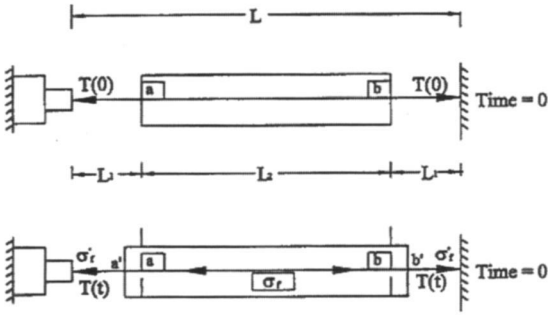


图 5 纤维上固化应力的计算模型示意图

4 实验装置

4.1 单束纤维复合材料结构

本文实验中所使用的单束纤维复合材料结构的固化装置由一个厚度很小的钢质长方形模具, 一束纤维和树脂组成, 模具腔体的尺寸为 200 × 40 × 5.5mm。一束纤维横穿整个模具腔, 通过模具两侧的很小的开孔, 其一端固定于刚性支座上, 另一端粘接到一个拉力传感器上, 传感器固定于一个可以前后移动的支座上亦作为加载单元, 并在监测前对纤维束进行预紧, 拉紧的纤维束放置在模具腔沿长度方向的几何中心处, 如图 3 所示。我们采用这样的固化模型, 纤维束好像浸润在一个无限的树脂内, 把树脂体积变化对沿纤维方向的纤维内残余应力的影响放大, 但其变化趋势同实际复合材料固化相比是一样的^[5]。固定并预紧纤维束后, 将经过脱气处理的树脂注入模具腔内。

4.2 监测及加热设备

测量纤维束拉力所用的力传感器的精度为 0.01N, 其数据输出端连接计算机, 通过固化监测程序可以得到由传感器采集到的纤维束拉力变化值。利用埋置在模具腔内表面的热电偶采集温度, 并且

可以通过计算机程序控制固化温度。

4.3 实验材料

文中实验所使用的材料为环氧树脂和一束大小为 3K 的 T300B 碳纤维束。厂家所提供的标准固化周期包括三个恒温阶段, 100℃加热 2h 120℃加热 2h 160℃加热 6h。升温速率为 2℃/min, 降温过程采用自然冷却。

5 结果与讨论

为了验证纤维束自身的热膨胀性能不会对测量产生影响, 在模具中没有浸入树脂的情况下拉伸单束纤维监测固化温度历程下 T300 碳纤维束的拉力曲线, 如图 6 所示, 纤维束上的拉力最大值与最小值之间的差值为 0.02kg 是纤维拉力平均值 2.58kg 的 1/129, 所以可以认为纤维束拉力在整个固化温度历程下几乎没有变化, 不考虑纤维束自身的热膨胀性能对残余应力测量的影响, 假设纤维束长度随温度不发生变化。

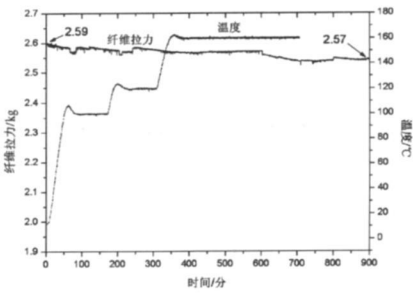


图 6 T300 碳纤维束拉力随温度变化曲线 (没有树脂浸润)

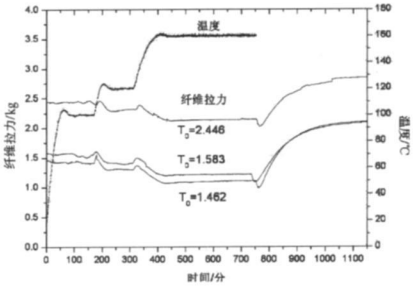


图 7 环氧树脂/T300 碳纤维拉力变化曲线

图 7 所示为环氧树脂 /T300 单束纤维复合材料在不同初始拉力下的纤维束拉力变化曲线, 三条曲线的变化趋势及程度是一样的, 由此可以判断不同的初始拉力不会对实验产生影响。由图 7 可以看到, 随着固化进程, 纤维拉力的变化可以分为三种情况, 即恒定, 增加和减小。在固化初始阶段, 树脂呈液态, 树脂与纤维之间没有相互作用, 纤维束上的拉力没有变化; 在升温阶段, 树脂受热体积膨胀, 树脂

将拉伸纤维,导致纤维束拉力急剧减小;在恒温段,此时树脂已经开始发生强烈的固化反应,出现了固化收缩现象,但与此同时由于树脂具有粘弹性存在着应力松弛,固化收缩导致的纤维应力和此时的应力松弛相互抵消,因此图中显示的后两个恒温段的纤维束拉力没有明显的变化;在固化完成后的降温阶段,随着温度的降低(由固化温度降至室温)树脂收缩,树脂将压缩纤维,导致纤维束拉力增大。

以上纤维束拉力的测量数据经公式(5)计算,可以得到纤维束整个被包埋部分沿纤维方向纤维束上的平均残余应力的变化曲线,如图8所示(其中拉应力为正直,压应力为负值)。在固化初始阶段纤维上没有应力产生;随着固化进程的推进,在第二个和第三个升温阶段,纤维上产生残余拉应力,且残余拉应力的最大值出现在第三个升温阶段结束时,其值为1.39kg。在第二个恒温阶段纤维上的应力没有明显变化,而第三个恒温阶段由于树脂固化收缩加剧,纤维上产生较大的压应力,纤维上的残余拉应力被削弱而逐渐减小,但程度不大;在由固化温度降至室温的降温过程,纤维上的拉应力迅速减小以致变化为压应力,其最大值为2.46kg。图中升温段的开始和结束时出现的应力值突变是实验过程中加热设备的温度漂移造成的。

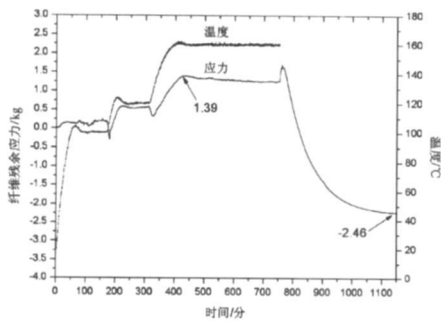


图8 环氧树脂/T300碳纤维纤维内残余应力变化曲线

经由单束纤维拉伸法监测得到的纤维上沿纤维方向的残余应力发展历程曲线可以让我们清楚地认识到整个固化温度历程是如何对纤维固化残余应力产生影响的。纤维上沿纤维方向的固化残余应力主要产生于降温阶段且为压应力,最终的固化残余压应力大小为2.46kg。而在升温阶段纤维上产生的是拉应力,其最大值为1.39kg。从数值上看这部分拉应力对最终残余应力的影响是不可忽视的,可以从利用固化阶段的拉应力去减小最终的残余压应力的角度出发,通过改变升温速率、增减恒温段等手段优化固

化温度历程,以减少最终残余应力的产生。

6 结 论

本文采用单束纤维拉伸法监测热固性树脂基复合材料纤维上沿纤维方向固化残余应力的形成过程,该方法以一个可以模拟复合材料在固化过程中纤维与树脂之间相互作用的简单的单束纤维复合材料结构为研究对象,得到了沿纤维方向整根纤维束上的平均残余应力发展历程曲线。研究结果表明,纤维上沿纤维方向的固化残余应力随着固化进程的推进不断地发生着变化,在升温阶段残余拉应力迅速增加,而在保温阶段残余拉应力逐渐减小,到了降温阶段残余拉应力迅速减小以致变化为压应力,纤维上最终的残余应力为压应力。

参考文献

- [1] S.R.White, Y.K.Kin. Stage curing of composite materials[J]. Composites Part A, 1996, 27(3): 219-227.
- [2] 杨德桐. 复合材料结构件固化成型工艺参数控制[J]. 航天制造技术, 2003, (5): 10-13.
- [3] S.R.White, H.T.Hahn. Cure Cycle Optimization for the Reduction of Processing-Induced Residual[J]. J. of Composite Materials, 1993, 27(14): 1352-1377.
- [4] 郭兆璞, 陈浩然, 杨正林. 复合材料层板在加工固化后期降温速率对残余热应力的影响[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(4): 387-393.
- [5] Madhu S. M. Adhikar, Mohamed S. Genidy, John D. Russell. A New Method to Reduce Cure-Induced Stresses in Thermoset Polymer Composites Part I: Test Method[J]. J. of Composite Materials, 2000, 34(22): 1882-1904.
- [6] Mohamed S. Genidy, Madhu S. M. Adhikar. A New Method to Reduce Cure-Induced Stresses in Thermoset Polymer Composites Part II: Closed Loop Feedback Control System[J]. J. of Composite Materials, 2000, 34(22): 1905-1925.
- [7] 龚之明, 叶邦础. 贴片云纹干涉法测定表面裂纹复合材料层板的内位移场[J]. 强度与环境, 1990, (1): 44-48.
- [8] 侯丽丽, 常红. 盲孔法测量复合材料残余应力[J]. 太原科技大学学报, 2006, 27(5): 378-384.
- [9] 杨博, 薛忠民, 阿茹娜等. 聚合物基复合材料残余应力的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2004, (2): 49-52.
- [10] 万里冰, 武湛君, 张博明. 光纤布拉格光栅监测复合材料固化[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 1-5.
- [11] K.T.V. Grattan, T. Sun. Fiber Optic Sensor Technology: an Overview. Sensors and Actuators[J]. 2000, 82(1): 40-61.
- [12] 秦伟, 吴晓宏, 曹茂盛. RTM工艺成型复合材料树脂固化过程残余应变监测研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(4): 50-52.

(下转第61页)

在采取了上述多项措施后, 玻璃纤维纱可以连续编织, 保证了编织工艺的稳定性, 编织出的网格织物外表美观, 质量优异, 满足半刚性基板的使用要求。

玻璃纤维网格织物外观如图 6 所示。

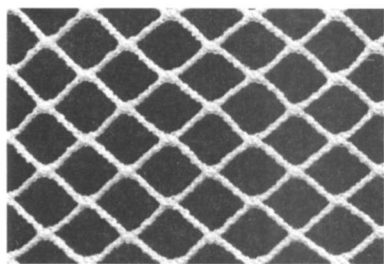


图 6 采取工艺稳定性措施后的网格织物

6 结 语

半刚性太阳能电池阵具有质量轻、使用寿命长、供电效率高等优点, 适合于我国航天发展对大面积、轻型太阳能电源系统的需求。半刚性基板所采用的柔性网格面板, 由于采用低延伸率的玻璃纤维进行编织, 编织工艺稳定性较差, 大大降低了织物的质量与编织效率。

通过对玻璃纤维编织工艺稳定性方面的研究后发现, 可以通过采取改进玻璃纤维纱的生产工艺、控制编织环境、改进整经设备、控制编织张力以及减少编织机件与纱线间的摩擦等多项措施来提高玻璃纤维编织工艺的稳定性, 玻璃纤维编织工艺稳定性的提高则大大提高了玻璃纤维柔性网格织物的质量和编织效率。

参考文献

- [1] Jones P.A., Jones P.A. and Spence B.R. Spacecraft Solar Array Technology Trends[C]. In Aerospace Conference, 1998. Proceedings, IEEE, 1998
- [2] Loewenstein K. L. The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibres[M]. Netherlands Elsevier Science Publishers, 1993.
- [3] Raz S., Warp Knitting Production[M]. Heidelberg Verlag Melliand Textilberichte GmbH, 1987
- [4] Liu X.M., Chen N. L. and Feng X.W. Effect of Fabricate Actions on Glass Yarn Damage During Knitting Process[C]. In 2006 International Forum on Textile Science & Engineering for Doctoral Candidates, 2006. Shanghai China
- [5] 刘晓明, 王程, 蒋金华, 陈南梁, 冯勋伟. 高性能纤维在预型加工过程中的损伤分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, (4): 25-29

INVESTIGATION OF TECHNICS STABILITY ON THE MANUFACTURE OF GLASS FLEXIBLE MESH GRID FABRIC

CHEN Jian-xiang¹, WANG Zhi-yi¹, DONG yi¹, CHEN Nan-liang²

(1. Aerospace System Engineering Shanghai Shanghai 201108 China

2. College of Textiles Donghua University Shanghai 201620 China)

Abstract Semi-rigid solar array has longer life, lighter mass and higher energy transfer efficiency than the rigid array. It is a suitable product for the demand of the future aircraft. As one critical portion, the warp knitted flexible mesh grid fabric should be light and flat with high loop density. However, the glass yarn is more lower elongation during the preform fabrication, which decreases the mechanical properties and the production efficiency of the mesh grid fabric. This paper is an investigation of how to improve technics stability of the glass flexible mesh grid fabric manufacturing.

Key words glass fiber; semi-rigid solar array; mesh grid fabric; damage; technics stability

(上接第 55 页)

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF CURE CYCLE ON CURE-INDUCED STRESSES IN COMPOSITES

YUE Guang-quan, ZHANG Bo-ming, DAIFu-hong, DU Shan-yi

(Harbin Institute of Technology, Centre for Composite Materials and Structures, Harbin 150080, China)

Abstract A-bunch-of-fiber-tensed is a new method to study the relation between the volume change of resin matrix and the development of cure-induced fiber residual stresses. The subject investigated of this method is not actual parts but simple a-bunch-of-fiber/resin composites structure. Because the resin matrix appears shrinkage or expansion when the cure temperature varies following the development of cure temperature, it can obtain the effect of cure cycle on cure-induced fiber stresses in composites by calculating and analyzing.

Key words composites; cure temperature; a-bunch-of-fiber-tensed; residual stresses