复合材料学报
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA
第17卷 第4期 11月 2000年
Vol 17 No. 4 November 2000

文章编号: 1000-3851(2000)04-0092-08

用数值模型研究复合材料固化过程规律

李辰砂, 张博明, 王殿富, 杜善义
(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 复合材料在固化过程中的内部历程很复杂, 科学地设计操作工艺需研究过程机理。本文对复合材料的固化过程的机理进行了阐述和发展, 并根据机理模型编制了电算程序, 通过数值计算模拟热压条件下复合材料的固化变化过程, 解释实验现象, 设计出合理的操作工艺使产品的各项指标得以保证。

关键词: 复合材料; 固化; 数值模拟
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

STUDYING THE CURING PROCESS OF COMPOSITE BY NUMERICAL MODEL

LI Chen-sha, ZHANG Bo-ming, WANG Dian-fu, DU Shan-yi
(The Center of Composite Material of HIT, Harbin 150001, China)

Abstract: It is a complex process for curing composite laminates and we need to research the principles of the curing process of composite in order to effectively design the operation technology of producing composite. In this paper, two models about curing process are set forth and developed. Then a computer code based on the models is made to calculate the curing process and optimize the operation technology of curing process of composite in order to ensure the quality of composite.

Key words: composite; cure; principle; numerical model

纤维增强层合结构复合材料是通过将由未固化的树脂(含固化剂)和增强纤维构成的预浸层板按要求铺制成层合预浸件(Prepreg), 于热压罐内在温度、压力的作用下, 经过固化反应而制成。固化体系如图1所示[1], 预浸料被铺置于金属底板(Base)上, 周围设置围堰(Dam)来加固, 上面铺设吸胶层(Bleeder)用于收集多余树脂, 整个固化体系被装入真空袋内抽成真空而后放置于热压罐中。操作开始后, 在加热器的加热下, 罐温逐渐升高至设计固化温度 T_a, 在适当时刻(t_p), 施以罐压 P_a, 温度作用使树脂基体的固化交联反应得以发生, 压力作用使预浸料内的多余树脂被排出, 层合结构得以巩固。

罐温和罐压的历程可以根据需要改变, 它们会影响固化体系的如下参数变量[8]: (1) 复合材料内温度、固化度和粘度的分布及变化; (2) 各预浸铺层内压力的分布、变化以及复合材料厚度随时间的变化; (3) 固化周期, 即完成固化所需时间。复合材料在固化过程中的内部历程比较复杂, 对操作工艺的要求较高。

首先, 操作过程应确保固化体系内温度的均匀, 即材料的表层与中间层的温差小于某一界限, 使各铺层的固化进展一致, 确保力学等性能的一致。树脂基体的固化反应不可过于剧烈而导致温度骤变, 尤其不能在局部出现这种情况, 以免发生明显的副反应。另外, 体系内的温度不可超过某一最高允许值, 以免材料内的残余应力过大[1]。

在固化初期, 树脂基体的粘度由于温度上升而降至最低点, 随着固化度(已反应掉的官能团数占总官能团数的比例)的增长, 树脂的粘度转而上扬, 固化度达到凝胶点(a_g)以后, 树脂丧失流动性。工艺过程必须结合粘度变化的这一特点: 在树脂粘度降至较低之时施以罐压, 此时树脂流动性好, 有利于层板被压缩和气泡被流动的树脂带出, 还有利于使树脂均匀地分布在铺层中, 从而使层合结构紧凑, 质量得以保障; 当粘度降至最低点时, 应使罐温中途恒定一段时间, 以阻止粘度的迅速上扬, 以便有充分的时间

收稿日期: 1999-04-13; 收修改稿日期: 1999-08-02
作者介绍: 李辰砂(1969), 男, 现在哈尔滨工业大学智能材料与结构中心攻读博士学位, 从事光纤智能材料与结构及智能化在线监控生产过程的研究。

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

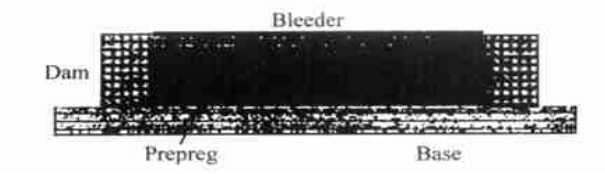

图 1 固化体系简图

Fig 1 The curing system of composite

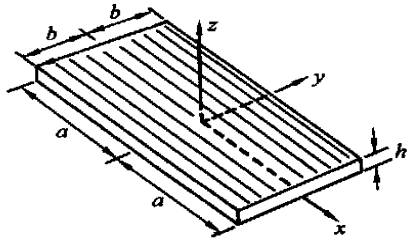

图 2 预浸层板坐标体系

Fig 2 The coordinate system of prepreg

使固化体系在罐压作用下排尽多余的树脂[1]。工艺过程必须保证在凝胶点以前使固化体系排尽多余树脂, 各铺层都被压紧, 否则会造成压缩不充分, 不但难以巩固层合结构, 而且使材料内各铺层的厚度不均匀, 成为废品。当复合材料层板被压紧之后, 应及时提升罐温至设计固化温度, 使固化交联反应进行得快一些, 避免固化体系内的树脂过量流失。

固化达到终点时, 应及时终止操作, 以减少操作周期, 节省生产成本。

因热压罐内的复合材料在各时刻的状态无法被直接看到, 因此很难把握施加罐压、调整罐温等操作的时机, 也就难以保证生产质量。传统的以经验为基础而设计的生产工艺存在产品合格率低, 生产成本居高不下的弱点。通过对小型试件的模拟实验而确定固化工艺[13], 虽然能在一定程度上克服影响固化生产的不利因素, 但仍然不是科学地设计工艺过程的好办法。

如果深入研究复合材料在固化生产中的内部变化历程, 分析其机理, 建立描述过程的模型, 就可以利用模型计算各种操作条件下材料内各参数变量的变化历程, 为科学地设计和优化固化操作工艺提供重要依据。本文对前人的关于复合材料固化的理论进行了分析、比较和发展, 建立了过程模型, 以模型为基础编制电算程序, 通过数值计算模拟出了层合结构复合材料在固化过程中的内部温度、固化度、压力等关键参数变量的变化过程, 解释了一些实验现象, 并根据数值计算的结果对固化操作工艺进行了优化。

1 固化过程机理

由固化体系的性质和温压操作条件决定了在固化操作过程中, 固化体系内部主要存在树脂基体的固化反应和反应放热、材料内外的传热和树脂的流动、层板的压缩等过程, 形成热-化学历程和树脂流动历程。

1.1 热-化学历程

热-化学历程包括复合材料内的温度和温度分布的变化历程及树脂基体的固化度和粘度的变化历程。如图 1 所示的固化体系, 在罐温的加热作用下, 树脂基体发生固化反应并释放热量, 固化体系内部不同部分之间及体系与罐内环境之间存在温差导致热量传递, 这两个因素综合作用决定了固化体系内存在温度分布。对图 2 所示的层板坐标体系, 取任一微元进行能量平衡分析, 可推得如下关系式

$$\rho_C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \rho_r \dot{H} V_r \qquad (1)$$

式中: ρ 和 c 分别为复合材料的密度和热容, ρ_r 为树脂密度, V_r 为树脂体积分数, 它与纤维体积分数 V_f 之和为 1。k_z 为垂直于层板方向的导热系数, k_x, k_y 分别为层板面内的沿平行于纤维方向和垂直于纤维方向导热系数, $\dot{H}$ 为固化反应放热速率, t 为时间。

$$\dot{H} = (\mathrm{d}a/\mathrm{d}t) H_U \qquad (2)$$

H_U 为整个反应过程的总放热量, $(\mathrm{d}a/\mathrm{d}t)$ 为固化反应速率, a 为固化度, 其表观值为反应放热量与 H_U 之比。对确定的体系, 固化反应速率由温度和固化度决定[1], 如果忽略剪切速率的影响, 则树脂的粘度 μ 只由温度和固化度决定, 即[1]

$$\mathrm{d}a/\mathrm{d}t = f(T, a), \quad a = \int \frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \qquad (3)$$

$$\mu = g(T, a) \qquad (4)$$

本文的模型针对复合材料罐内固化的特点, 做如下处理:

(1) 假定罐内宏观温场均匀, 这样同一层面内的温度一致, 关系式 (1) 简化为

$$\rho_C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \rho_r \dot{H} V_r \qquad (5)$$

(2) 固化操作开始之前 ($t < 0$), 罐温和复合材料固化体系内的温度为室温 T_0, 固化度为 0, 即初始条件

$$\left.\begin{aligned} T_j(z) &= T_0 \\ a_j &= 0 \end{aligned}\right\} \quad 0 \le z \le h, \ t < 0$$

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

操作开始后($t \geq 0$),层板上表面温度由罐内温度的变化历程所决定,由于金属的导热系数较大,可以认为层板下表面温度与金属底板相等,即与罐温相等,因此边界条件

$$\left.\begin{aligned} T_h &= T_h(t)_{z=h} \\ T_U &= T(t) \end{aligned}\right\} \quad t \geq 0$$

$$\int \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \mathrm{d}z = h_g(T(t) - T_h) - (k_z \frac{\partial T}{\partial z})_{z=0} + \int \rho_r H \dot{V}_r \mathrm{d}z$$

式中:h 为复合材料层板的厚度,$T_j(z)$ 和 a_j 分别为各铺层温度和固化度的初始分布,T_h 和 T_U 分别为层板的上表面($z=h$)和下表面($z=0$)处温度,h_g 为罐内空气的对流传热系数,$T(t)$ 为罐内空气温度,即罐温,其最大值为设计固化温度 T_a。

利用上述关系式(2)、(3)、(5)和关于温度、固化度的初始条件与边界条件,可计算复合材料内的温度和温度分布随时间的变化,关系式(3)计算不同时刻下固化度 a 和固化反应速率 $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t$。关系式(4)计算不同时刻下树脂基体的粘度。

1.2 树脂流动历程

树脂的流动是在其粘度处于较低之时,由罐压 P_a 作用引起的,多余树脂在压力作用下流出复合材料,同时预浸层板也被压缩,层合结构得以巩固。树脂流动包括两种形式:(1)沿垂直于层板方向流进吸胶层;(2)在层板内沿平行于纤维方向流出体系,实际生产中一般材料的长宽远大于厚度,可以认为只发生前一种流动过程。伴随着树脂的流动过程,还存在着纤维的因承受负荷而产生的弹力作用。

根据 Gutowski 的关于树脂流动/纤维作用机理的理论[5],预浸层板可被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。施以外压后,在初始阶段纤维尚未发生形变,所施负荷完全由树脂承担,随着因树脂的流出而使预浸铺层被压缩程度的加深,纤维的体积分数增大,纤维受压迫变形而产生弹力的效果开始明显,部分负荷被纤维承担,树脂中的平均压力减小。随着预浸铺层被继续压缩,纤维承担负荷的比例越来越大,最终的纤维体积分数取决于纤维束的弹性性能。

如图 2 所示的纤维增强复合材料层板坐标体系,从力平衡、连续性和树脂流动三个方面进行分析,求得在假定 z 轴和 x 轴方向的渗透系数 S_{zz}、S_{xx} 只与纤维体积分数 V_f 有关,且 $V_f = V_f(z)$ 的前提下,关于树脂流动和压力分布的基本关系式如下[5]:

$$\frac{S_{xx}}{V_f}\frac{\partial^2 P_r}{\partial x^2} + \frac{S_{zz}}{V_f}\frac{\partial^2 P_r}{\partial y^2} + \frac{1}{V_0^2}\frac{\partial}{\partial z}(V_f S_{zz}\frac{\partial P_r}{\partial z}) = \mu \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1 - V_f}{V_f}\right) \tag{1}$$

纤维束渗透系数和纤维束承担负荷分别为[5,6]

$$S_{ii} = \frac{r_f^2}{4k_{ii}}\frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \tag{2}$$

$$\sigma = A_S \frac{(V_f/V_0 - 1)}{(1/V_f - 1/V_a)^4} \tag{3}$$

V_0 为初始纤维体积分数,P_r 为树脂内的压力,σ 为表观纤维应力,等于纤维承担的压力与其体积分数乘积 $\sigma = P_f V_f$,r_f 为平均纤维半径。k_{ii} 为"kozeny 常数",与预浸料的性质、纤维束的空隙率等因素有关,V_a 为有效纤维体积分数,与纤维沿铺层面内横向分布的密度、纤维排列的规整程度和纤维束末端状况等因素有关,"A_S"为"Springer 常数",与纤维的弹性性能和预浸料的几何形状有关[6,7]。

本文针对复合材料层板在固化罐内的固化过程,对上述理论进行相应处理,分析如下:

层板一般尺寸较大,这样固化体系内基本不存在树脂沿铺层面内的流动,只有沿垂直于预浸层板的 z 方向的流动,关系式(1)经简化整理后形式如下:

$$\frac{\partial V_f}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\frac{V_f^2}{V_0^2}\left[V_f S_{zz}\frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} + \frac{\partial (V_f S_{zz})/\partial V_f}{\partial \sigma/\partial V_f}\left(\frac{\partial \sigma}{\partial z}\right)^2\right] \tag{4}$$

其中,$\sigma + P_r = P_a$,因为复合材料内各处的树脂基体内的压力 P_r 与纤维束所承担的负荷 σ 之和应等于所施外压[6,7]。

层板的底部有金属平板支撑,树脂无法流动。层板的顶部直接受罐压作用而最先于极短时间内被压至极限,而且其紧邻吸胶层,因此层板顶部的树脂基体内的压力等于吸胶层的孔隙内的压力——即真空袋内的压力 P_b。因此,

在加压时刻 t_p 之前($t < t_p$):$V_f = V_0$,$0 \leq z \leq h$

施加罐压之后($t > t_p$):

$$\begin{cases} \partial P_r/\partial z = 0, & z = 0 \\ \sigma(V_f) + P_b = P_a, & z = h \end{cases}$$

式中:t_p 为加压时间,h 为层板厚度。利用关系式(4)、(2)、(3)及初始条件和边界条件可以计算罐压作用下层板内压力和纤维体积分数的分布及变化。如果忽略树脂在固化过程中体积的变化,层板内各铺层的厚度和层板总厚度计算如下:

$$l(j) = V_0 l_0/V_f(j) \tag{5}$$

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

$$h = \sum_{j=1}^{n} l(j) \qquad (6)$$

式中: j 为铺层号, n 为总铺层数, $l(j)$ 为第 j 号铺层的厚度, l_0 为每一铺层的初始厚度。

当平均固化度 a 达到凝胶点以后, 因树脂丧失流动性, 树脂流动和层板压缩过程终止。

2 编程设计固化操作工艺

本文以上述理论为基础编制计算机程序, 利用程序计算固化过程中复合材料的各参数变量的变化过程, 以模拟复合材料的固化历程, 研究其规律并解释实验现象。以此为基础设计和优化固化操作工艺, 可选择若干组温压历程分别带入程序计算固化体系的各参数变量随时间的变化, 以本文引言部分中的关于固化操作的分析为依据对输出的计算结果的合理性进行判断, 确定使输出结果最佳的一组操作变量作为设计工艺。本程序的结构化流程图为图 3。

对图 3, 在框 1 部分输入的固化体系的参数, 包括: (1) 几何参数: 复合材料的长宽、铺层初始厚度、铺层数、铺设角分布、纤维的体积分数。(2) 物理参数: 材料的密度、热容、导热系数(这些参数可根据树脂和纤维的相应参数按一定的混合规则计算[1, 9]), 有关树脂流动的参数、有关纤维弹性的参数。(3) 化学参数或关系式: 固化反应动力学关系式、反应放热速率和树脂的粘度与温度和固化度的关系式。(4) 初始条件: 初始固化度、温度分布、铺层厚度等。(5) 生产要求: 固化结束时需达到的固化度和被压紧的铺层的厚度。

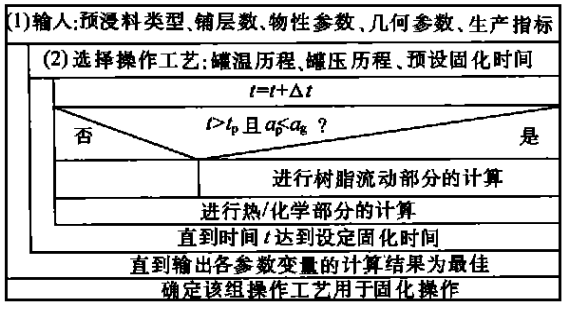

图 3 复合材料固化工艺的数值模拟设计

Fig. 3 The numerical model frame about curing process of composite

在框 2 部分输入操作变量(温度、压力)的变化历程, 如图 4、图 5 所示。

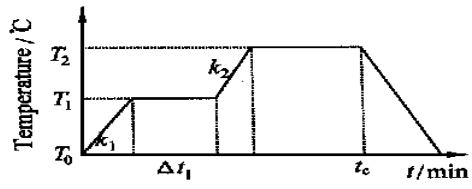

图 4 操作温度历程

Fig. 4 The operation temperature process

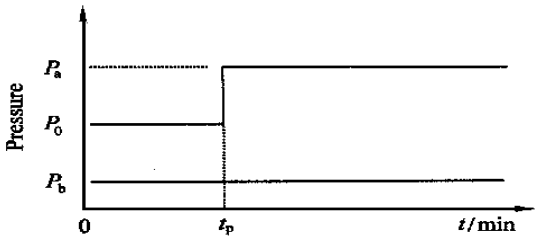

图 5 操作压力历程

Fig. 5 The operation pressure process

程序输出的结果为 (1) 热/化学部分: 各时刻各铺层内的温度, 树脂基体的固化度和粘度, 中间铺层与外层的温差, 完成固化操作所用的时间。(2) 树脂流动部分: 层板的各铺层的树脂基体内的压力的变化过程, 各铺层的厚度随时间的变化过程, 层板总厚度及排出的树脂量随时间的变化。

因每一铺层的厚度很小, 因此用每一铺层的厚度作为沿 z 轴的距离步长 Δz, 并且认为每一铺层内的温度、固化度、粘度、压力、纤维体积分数等在该铺层内不沿 z 轴变化。为保证数值计算的收敛性, 必须使 $\Delta t/\Delta z^2$ (Δt 为时间步长) 小于某一限度。用本程序对 32 层和 64 层 T300/976 预浸料 (以 Fiberite976 树脂为基体, 增强纤维为型号 T300 的碳纤维) 的固化过程进行计算, 其固化指标和对其所确定的一组合理操作变量列于表 1, 对固化体系固化过程的计算结果列于图 6、图 7。

图 6(b)、图 7(b) 的结果显示, 树脂基体的固化度的增长在初期较慢, 在中间阶段较快, 在固化后期又变得缓慢直至恒定, 整个变化过程呈“S”形, 可据此确定固化终点。计算发现, 提高固化温度和升温速率可缩短固化终点时间和提高终点固化度, 升温速率太慢或固化温度较低将会延长固化时间, 甚至难以使固化度达到所设计值。但升温速率越快, 层板表面与中间的温差越大, 即温度分布越不均匀。另外, 固化温度太高会造成明显的副反应和较高的残余应力, 本文正是权衡这些利弊因素来选择升温速率和固化温度。图 6(a) 和图 7(a) 显示, 利用本文设计的

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

表 1　T300/976 预浸料的固化指标、物性参数和所选操作工艺参数

Table 1　The items of cured product, the parameters of material and the optimized operation parameters of T300/fiberite prepreg

固化指标	设计操作参数	物性参数[2, 4, 6, 7]
设计铺层数: 32、64 初始固化度设计终了固化度: a_0= 0, a_c= 0.9 设定最高控制温度: T_{max}= 200℃ 控制中间层与表层温差: ΔT_{max}= 3℃左右[9]	设计固化温度: T_2= 190℃(初始罐内温度 T_0= 20℃) 中间恒温温度: T_1= 120℃ 恒温时间: Δt_1= 25min, 45min 升温速率: k_1= 4℃/min, k_2= 4℃/min 预设固化时间: t_c= 300min 加压时刻: t_p= 25min, 125min 操作压力: P_a= 2.2 大气压, P_a= 4.56 大气压 真空袋内压力: P_b= 0.016	单层铺层初始厚度: l_0= 1.61×10^{-4}m 初终纤维体积分数: V_0= 0.59, V_c= 0.7 凝胶点: a_g= 0.2 树脂密度: ρ_r= 1.26×10^{3}kg/m^3 树脂热容: c_r= 1.26kJ/kg/K 树脂导热系数: k_r= 1.67×10^{-4}W/m/K 树脂反应热: H_U= 530J/kg 固化反应速率与固化度和温度的关系: 参见文献[2] 粘度与固化度和温度的关系: 参见文献[2] 纤维密度: ρ_f= 1.79×10^{3}kg/m^3 纤维热容: c_f= 0.712kJ/kg/K 纤维导热系数: k_f= 26.0W/m/K 纤维的弹性参数: A_s= 138.8N/m^2, V_a= 0.85 铺层平均渗透系数: S_{zz}= 2.4×10^{-16}m^2

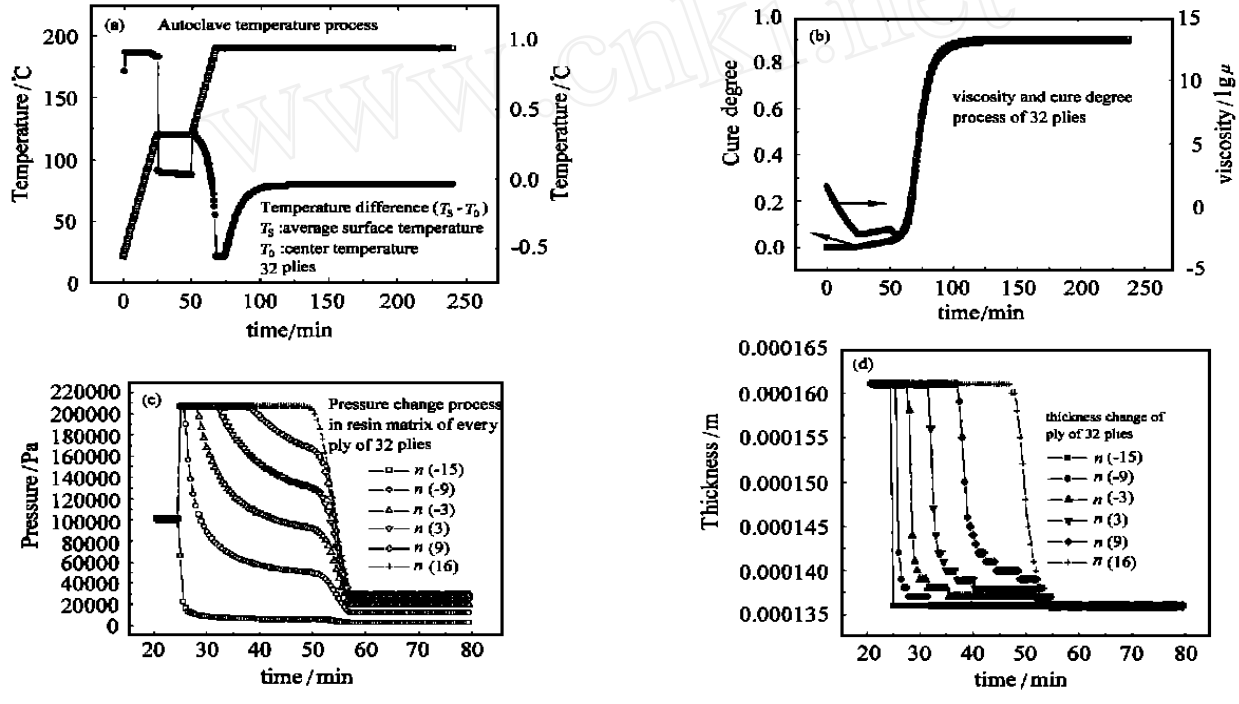

图 6　对 32 层铺层 T300/976 预浸料固化历程的模拟计算结果,

铺层号从上到下为 n(-15)～n(16), 中间恒温时间为 25min, 加压时刻 t_p= 25min, 罐压 300Pa

Fig. 6　The output effects computed by numerical model about 32 plies of T300/976 prepreg

罐温历程, 32 层铺层预浸料的中间层与表层的温差在 1℃以内, 64 层铺层的内外温差相对大一些。在固化过程的中间阶段因固化反应速率较快, 放热较多, 使内层温度高于外层。程序输出结果还显示各铺层的固化度和粘度的差别微小。

固化操作开始后, 树脂基体的粘度随温度的上升而下降至最低点, 而后随着固化度的增长, 粘度转而上扬, 在接近凝胶点时出现陡变。接近固化终结点时, 粘度曲线变得平缓并趋于稳定。图 6(b)和图 7(b)显示, 由于为方便层板压缩而安排了一段时

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

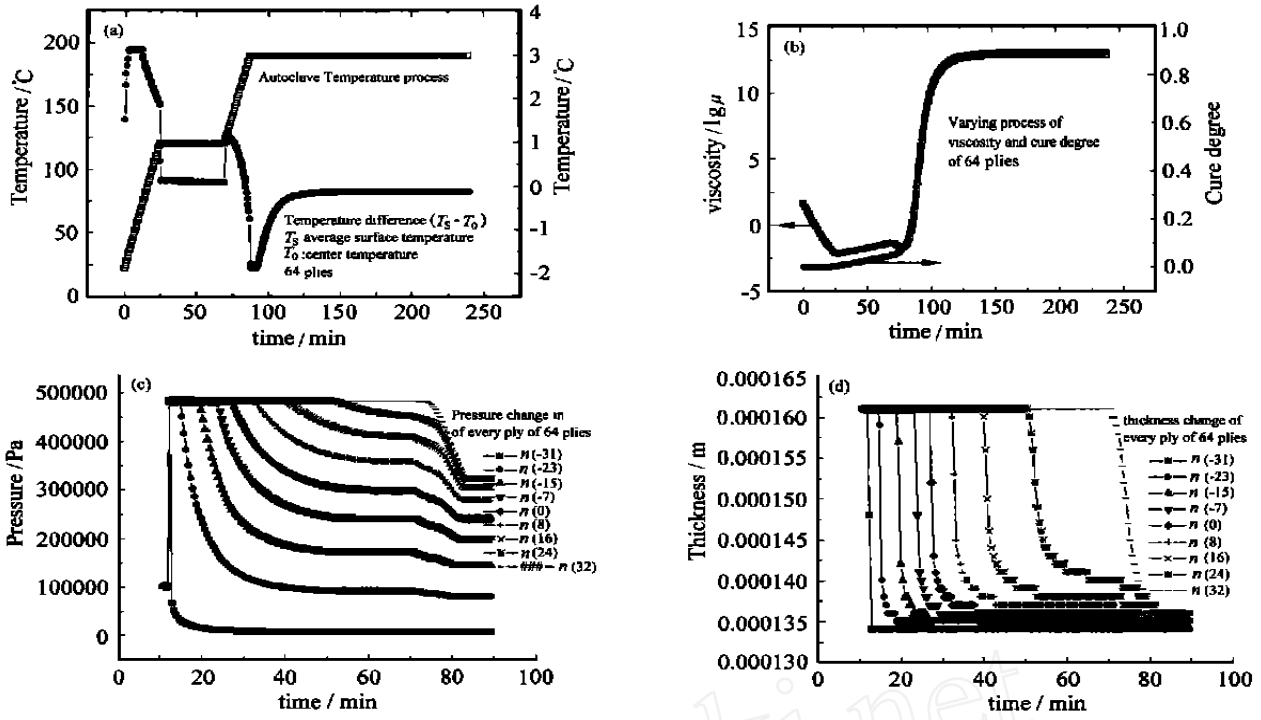

图 7 对 64 层铺层 T300/976 预浸料固化历程的模拟计算结果

铺层号从上到下为 $n(-31)$～$n(32)$, 中间恒温时间为 45min, 加压时刻 t_p = 12.5min, 罐压 700a

Fig. 7 The output effects computed by numerical model about 64 plies of T300/976 prepreg

间的中间恒温, 延缓了固化进程, 树脂的粘度在降至最低点后没有很快上扬, 也基本恒定了一段时间, 计算结果表明, 绝大多数铺层都在树脂粘度处于较低阶段时完成压缩过程, 这符合最佳工艺要求。

图中显示树脂基体的粘度在"恒定"阶段也有小幅度的增长, 且在中间恒温阶段结束前又出现轻微下降, 原因如下: 由于固化反应的进行, 即使在中间恒温阶段, 粘度也要因固化度的缓慢进展而缓慢增长。当继续升温时, 粘度又因温度的上升而下降, 但此时的继续升温又加速了固化反应速度, 使固化交联的进展加快, 因此粘度稍微下降后又很快上扬。这就是图 6(b) 和图 7(b) 中粘度变化规律的原理。图中的粘度取对数值。

从程序输出结果发现, 罐压作用下层板的压缩是逐层进行的, 即上一铺层先压缩, 而后下一铺层再压缩, 如此一直传递到最底层; 但越往下面的铺层压缩进程越慢, 各铺层最后稳定在相同的厚度; 增大罐压虽能缩短完成层板压缩的时间, 但基本不改变铺层的最终厚度, 这些规律与 Springer 的实验结果很一致[3]。图 6(d) 和图 7(d) 为个别铺层厚度随时间变化过程, 二者的铺层数不同, 罐压大小不同, 但各铺层最终厚度相同。图中还显示下面铺层的厚度变化过程滞后于上面铺层, 表明层板的压缩是逐层进行的。另外, 每一铺层在被压缩过程中, 其树脂基体内的压力也下降, 如图 6(c)、图 7(c) 所示。根据本文的理论, 某一铺层被压缩过程中, 树脂向上流出, 同时增强纤维发生弹性形变, 产生弹性应力而承担部分载荷, 致使该铺层树脂基体内压力下降, 当下降到一定程度, 下一铺层的树脂基体与该铺层树脂基体之间出现明显压差, 使下一铺层中的树脂流向该铺层, 压缩至一定程度时, 从该铺层向上流出的树脂的速率与从下一层流向该铺层的树脂的速率相等, 该铺层的厚度达到稳定, 其树脂基体内的压力也稳定; 而下一铺层因其中的树脂向上流出因而也被压缩, 而后的经历同上面铺层一样, 此过程依次传递直到最底层, 这就是逐层压缩的机理。各铺层的厚度最终稳定在相同值, 不受罐压大小、加压时刻和铺层数的影响, 本文曾改变 2.2 节 (3) 式中 A_s、V_a 两个参数并重新计算, 发现铺层最终厚度发生变化, 这说明层板的最终厚度完全由纤维的性能决定, 这与 Gutoski 的实验结论一致[5～7]。由于铺层数越多, 层板压缩时间越长, 因此对 64 层板安排的中间恒温时间和罐压均大于 32 层板, 加压时刻也比 32 层板提前。

在控制好材料内的温度和确保层板压缩进程的

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

前提下,应尽量提高升温速率煌缩短恒温时间,以缩短固化周期,节省生产成本。图6(b)和图7(b)显示,到150min(2 5h)左右,平均固化度达到了设计值(0 9)。

3 总 结

利用数值模拟设计程序可以快速、准确、低成本地设计和优化复合材料固化操作工艺,相对于传统的以经验为基础设计操作工艺是很大的进步。通过数值计算模拟出不同的操作条件下固化体系的各参数变量的变化历程,使我们清楚地了解固化体系的机理过程,从中总结规律,便于对操作参数进行优化。

传统工艺无法有效地把握对固化体系内温度分布的控制,对较厚的构件,只能不惜延长固化时间,尽量降低升温速率或增加中途恒温次数来维持材料内温度的均匀,使生产成本增加。利用数值模拟可以兼顾确保温度均匀和节省固化时间这两方面来调整升温和恒温,还能准确地判断到达凝胶点的时间和固化结束时间,避免固化不足和过度固化。在压力作用对体系内部历程的影响方面,不少工作者没有认真研究增强纤维的弹力作用,解释不了层板逐层压缩等现象,顶多在模型中将这些现象作为既定的事实来考虑[1,3],而对某些变量的变化——如树脂内压力随时间的变化——则不能确定,这就不利于对相关问题——如受树脂内压力影响较大的气孔的活动[4]——的预测。本文将关于树脂流动/纤维作用的理论进一步发展,深入描述罐压作用下复合材料层板所的变化历程,计算结果直接反映出层板被逐层压缩、树脂内压力下降及铺层终了厚度不变等规律,并在理论上解释了这些规律,更有助于设计和优化操作工艺。

本文将关于热化学过程和树脂流动过程的理论有机地结合和发展,并在此基础上编制程序对复合材料的固化过程进行数值计算,以模拟的方式显示固化体系的各参数变量的变化历程,计算结果和显示的参数变量的变化规律与实验结果和生产经验比较一致,并且解释了一些实验现象,相对于前人的研究结果又有新的突破。根据一系列的计算结果确定最佳操作工艺,既可保证产品质量、提高生产效率,又可降低生产成本,是科学地设计和优化固化工艺的一个途径。

当然,数值模拟作为一种"虚拟设计",也不可能完全准确地预测实际固化过程中的各种偶然变化,其计算结果不可能百分之百地准确,但它可以与实验相结合,例如通过数值计算确定操作变量的合理范围,再进行一定的实验来确定最佳操作工艺。

数值模拟的功能不只限于设计操作工艺,它还有助于建立针对复合材料固化过程的智能化在线监控系统,如专家系统、神经网络:固化过程中实时采集的固化体系的各参数变量传入智能监控系统,经过处理、预测、判断等过程,反馈操作指令给罐内的固化操作装置系统(加热器、冷却器、压力调控设备等)以调控固化操作过程[11]。智能化在线监控技术是近些年来发展的新技术,数值模拟对它的益处在于可以提供丰富的数据基础和推理预测依据,例如:利用数值模拟进行的大量的模拟各种条件下的计算结果可以为专家系统的判据规则的制定提供依据[10],还可以对神经网络系统进行学习训练[11,12],有了丰富的数据基础,就可以建立起有效的智能化推理判断机制,用于监控复合材料的固化过程,能够达到提高生产效率、降低成本的目的。这方面的工作仍在进行。

参考文献:

[1] Ciriscioli P R, Springer G S. Smart Autoclave Cure of Composites[M]. Lancaster PA: Technomic Publishing Co Inc, 1990. 2- 6.

[2] Dvsi M R, Lee W L, Ciririscioli P R, Springer G S. Cure kinetics and viscosity of fiberite 976 resin[J]. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21: 243—261.

[3] Springer G S. Resin flow during the cure of fiber reinforced composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 1982, 16: 400—410.

[4] Jian Man Tang, Woo IL ee, Springer George S. Effects of cure pressure on resin flow, voids, and mechanical properties[J]. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21: 421—440.

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

[6] Gutowski T G, Cai Z, Kingery J, Wineaman S J. Resin flow/fiber deformation experiments[J]. *SAM PE Quarterly*, 1986, 17(4): 54—58.

[7] Gutowski T G. A resin flow/fiber deformation model for composites[J]. *SAM PE Quarterly*, 1985, 16(4): 58—64.

[8] Telikicherla M K, Aitun M C, Lai F C. Autoclave curing of thermosetting composites: process modeling for the cure assembly[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1994a, 21 (6): 785—797.

[9] Telikicherla M K, Li X, Altan M C, Lai F C. Numerical Study

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

of Conjugate Heat Transfer in Autoclave Curing of Thermosetting Composites [A]. Thermal Processing of Materials: Thermo-Mechanics, Controls, and Composites, Heat Transfer Division [C]. ASME. New York, (Publication) HTD 289, 1994b. 213—221.

[10] Jin Ho Choi, Dai Gil Lee. Expert cure system for the carbon fiber epoxy composite materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1995, 29: 1181—1200.

[11] Demirci H H. An investigation of real-time intelligent control of molding processes[D]. Lehign University, Ph D Dissertation, 1994. 7-10.

[12] Joseph, Frieda Wang Hanratty. Predictive control of quality in a batch manufacturing process using artificial neural network models [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1993, 32(9): 1951—1961.

[13] 李玉华. 动态介电法在航空结构制造工艺参数制定中的应用[A]. 第九届全国复合材料会议论文集(下)[C]. 北京, 1996. 555—560.

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