

# 基于 COMPRO 模型的复合材料热压罐成型工艺仿真

陈 飞<sup>1</sup> 王 健<sup>2</sup>

(1 中国运载火箭技术研究院研究发展中心,北京 100076)

(2 达索系统,北京 100025)

**文 摘** 有效利用热压罐技术来实现复合材料成型的关键在于选择合适的工艺参数和制定合理的工艺方案,虚拟热压罐工艺仿真可以有助于对固化过程进行预测,提高工艺设计效率,降低生产成本。本文介绍了热压罐工艺仿真软件 COMPRO 以及典型的固化过程分析模型(热化学模型、流动压实模型和应力变形模型)。最后给出了影响 COMPRO 数值模拟的关键参数及翼梁样件试验数据与数值模拟对比,COMPRO 可以较为准确的预测固化工艺。

**关键词** 复合材料,热压罐,固化仿真,COMPRO

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.007

## Curing Simulation of Composites Autoclave Forming Based on COMPRO Model

CHEN Fei<sup>1</sup> WANG Jian<sup>2</sup>

(1 China Academy of Launch Vehicle Technology R & D Center, Beijing 100076)

(2 Dassault Systemes, Beijing 100025)

**Abstract** The appropriate parameter and reasonable process of technics is the key for autoclave molding of composite. The technical simulation of virtual autoclave make for the prediction of curing process, and the improvement of technical efficiency and reduction of manufacture cost. The paper show a software of autoclave simulation; COMPRO, and the typical model of curing process analysis: thermochemical model, flow-compaction model and stress deformation model. At last, the key parameter effect on COMPRO analysis have been shown, and a conclusion about accuracy of COMPRO analysis can be done through the comparison between the data of spar prototype and COMPRO simulation.

**Key words** Composite, Autoclave, Curing simulation, COMPRO

### 0 引言

热压罐成型技术是目前航空航天用先进复合材料结构广泛采用的成型方法之一,主要用于机体结构蒙皮壁板、肋、框等构件的制造成型。热压罐成型的优点之一是罐体内的压力和温度均匀,成型后的复合材料构件孔隙率低,树脂含量均匀,力学性能稳定;此外,一次可以同时成型多种结构,适用范围广、效率高。然而,复合材料构件的热压罐成型也给企业带来不少的困扰。首先,每次热压罐成型固化都需要真空封装,耗费大量昂贵的辅助材料,成本高。其次,在复杂的固化成型过程中,复合材料构件会产生分层、气孔和固化变形等制造缺陷,再加上复合材料的回收还

存在问题,废品率使得材料成本和工序成本居高不下。因此,提高工艺的效率 and 准确性,实现低成本、高质量的复材制造是当前国内外复合材料制造业共同面临的重要课题<sup>[1]</sup>。

在热压罐成型过程中,复合材料构件的几何尺寸、材料特性、固化成型工艺参数在不同程度上,均影响最终成型质量。为减小复合材料成型的制造缺陷,传统的方法是在经验和工艺试验的基础上,研究固化工艺条件影响和材料热胀系数的差异,然后对固化工艺曲线和零件固化所用模具的型面进行反复的调整,以控制缺陷的形成。由于影响因素众多,采用实验方法确定工艺参数有一定的局限性。同时,这种累试法

收稿日期:2013-10-30

作者简介:陈飞,1979 年出生,硕士,工程师,主要研究方向为固体力学、飞行器设计。E-mail:chinabone@126.com

费时费料,也给人力和物力带来大量的浪费。通过数值模拟方法分析各种因素对成型质量的影响,进而选取合理的工艺参数,对节省试验费用和缩短研制周期具有重要意义<sup>[2]</sup>。本文介绍了热压罐固化成型仿真软件 COMPRO,及其所具备的理论数学模型,并给出使用该工具进行了某典型复材构件的固化仿真分析案例。

## 1 热压罐成型工艺仿真技术

### 1.1 热压罐固化成型过程概述

复合材料构件在热压罐固化成型过程中,由于温度变化以及树脂固化反应放热效应,构件的内部不可避免地产生温度梯度分布及残余应力,导致构件变形和天然缺陷。引起复合材料构件固化变形的原因主要包括:热胀系数不一致、固化收缩变形以及构件与成型模具的相互作用<sup>[3]</sup>。

复合材料热压罐成型工艺仿真主要通过对固化过程的模拟,最终来预测构件的固化行为,包括对构件的固化温度、固化时间、固化度及结构厚度变化等进行评估,从而优化出零件成型过程的固化工艺参数。由于在成型过程中反应机制的复杂性和多样性,如热传导,树脂流动,压实过程,树脂固化和残余应力的发展等,因而模拟复杂层压板结构的固化成型是一项非常艰巨的任务。为了克服这一困难,通常在整体过程模型结构中采用子模块的方法,Hubert<sup>[4]</sup>对模块进行了阐述,整体-子模块方法的主体由一系列的子模块组成,每个模块负责执行一项任务,大体将固化过程分为热-化学模块、流动-压实模块和应力-变形模块三个子模块,流动-压实模块负责计算树脂流动,应力-变形模块负责计算内部残余应力。

### 1.2 热压罐成型工艺仿真软件 COMPRO

COMPRO 是 Convergent Manufacturing Technologies 公司的主打产品,是世界领先的复合材料成型过程建模分析软件。该软件提供了一个相对成熟的技术,使用“虚拟制造”方法来对复合材料结构成型过程进行模拟,可用于检查工艺参数对产品质量的影响,也可以评估不同结构设计对产品制造的影响,该软件已经被一些世界顶尖的航空航天公司制造公司所采用,并且应用到多种产品制造过程当中。

ABDUL RAHIM AHAMED ARAFATH<sup>[5]</sup>通过已有研究成果,建立了模拟复合材料热压罐成型过程的有限元计算模型 CCA(CCA:COMPRO Component Architecture,即 COMPRO 通用组件架构,如图 1 所示),该模型包含了从简单、封闭式分析到复杂、可适应的有限元分析等一系列数值分析工具,有效地解决了 COMPRO 在工程应用中的二维局限性,它允许多种前处理器、后处理器、有限元求解引擎和 COMPRO 工

艺建模引擎之间进行互操作,这样可以充分利用商用有限元软件如 ABAQUS, ANSYS 或 NASTRAN,来进行复合材料成型过程建模仿真。

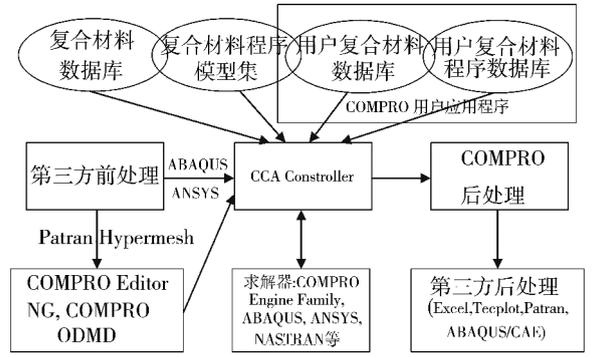


图 1 COMPRO 通用组件架构

Fig. 1 General component configuration of COMPRO

COMPRO 包括虚拟热压罐模块、热化学模块、树脂流动模块、应力变形模块、输入和输出模块,COMPRO 模块组成及数据流如图 2 所示,模块功能如下:

- (1) 虚拟热压罐模块:预测热压罐内部温度、压力与真空袋压力随时间的变化,还预测与结构边界条件相关的其他参数,如局部传热系数;
- (2) 热化学模块:预测的构件和模具的内部温度和复合材料结构的固化度;
- (3) 树脂流动模块:采用渗透流动模型来预测复合材料构件的树脂流动和纤维层的压实;
- (4) 应力变形模块:模拟结构和模具的残余应变和变形的发展;
- (5) 输入模块:控制程序运行所需的输入参数;
- (6) 输出模块:控制外部输出的所有参数,包括屏幕显示和硬盘存储。

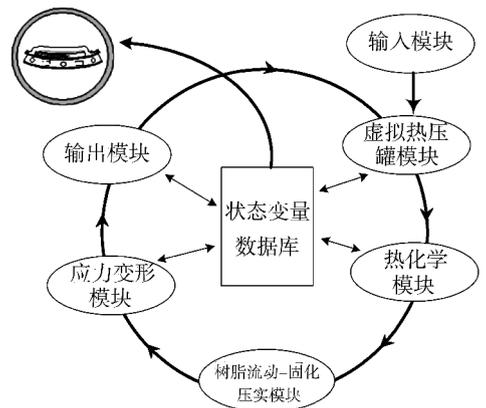


图 2 COMPRO 的模块组成和数据流

Fig. 2 Module and data flow of COMPRO

## 2 COMPRO 固化过程数学模型

### 2.1 热化学模型

热化学模块负责计算构件内部温度和树脂的固化度。该模块包括热传导和固化动力学分析的组合。基于 2D 笛卡尔坐标系的热传导控制方程是:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) + \rho_R \dot{H} \quad (1)$$

式中,  $\rho_R$  是树脂密度,  $\dot{H}$  是树脂的固化反应热生成率,  $\rho$  和  $C_p$  是复合材料的密度和比热容,  $K_x$  和  $K_z$  为热传导系数。

方程 1 中树脂固化反应热生成率可根据下式确定:

$$\dot{H} = \frac{d\alpha}{dt} \cdot H_R \quad (2)$$

式中,  $\frac{d\alpha}{dt}$  为固化反应速率,  $\alpha$  为树脂的固化度, 固化反应速率是固化度和温度的函数, 固化动力学方程具体形式由 DSC 获得。COMPRO 提供了 6 种应用最广泛的固化动力学模型供用户选择, 见方程(3) ~ (8)。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= (K_1 + K_2\alpha)(1 - \alpha)(B - \alpha) & \alpha \leq \alpha_c \\ \frac{d\alpha}{dt} &= K_3(1 - \alpha) & \alpha > \alpha_c \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} [K_i &= A_i e^{-\Delta E_i/RT} \\ \frac{d\alpha}{dt} &= K\alpha^m(1 - \alpha)^n \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} [K &= A e^{-\Delta E/RT} \\ \frac{d\alpha}{dt} &= K(1 - \alpha)^n \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= (K_1 + K_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n \\ [K_i &= A_i e^{-\Delta E_i/RT} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= K_1(1 - \alpha)^l + K_2\alpha^m(1 - \alpha)^n \\ [K_i &= A_i e^{-\Delta E_i/RT} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{K\alpha^m(1 - \alpha)^n}{1 + e^C[\alpha - (\alpha_{CO} - \alpha_{CT})]} \quad (8)$$

模型中  $T$  是树脂温度,  $H_R$  是全树脂热反应,  $A_i$  是指数因子,  $\Delta E_i$  是活化能量,  $R$  是气态常数,  $C$  是扩散常数,  $\alpha_{CO}$  是扩散常数,  $\alpha_{CT}$  是扩散常数。

## 2.2 树脂流动模型

根据达西定律, 树脂在增强纤维中的流动被处理为在多孔介质中的流动。流动压实模型的求解主要采用达西定律, 在每次求解时间步长中计算树脂黏度、树脂压力和纤维体积分数。流动压实模型主要是求解两个方程: 应力平衡方程和树脂连续性方程。基于 2D 笛卡尔坐标系的应力平衡方程为:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中,  $\bar{\sigma}_x$  和  $\bar{\sigma}_z$  是有效应力,  $p$  为树脂压力,  $F_x$  和  $F_z$  为外力。树脂连续性方程由下式给出:

$$\frac{\partial \dot{\epsilon}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\epsilon}_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_x}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_z}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (10)$$

式中,  $\dot{\epsilon}_x$  和  $\dot{\epsilon}_z$  是应变率,  $K_x$  和  $K_z$  是纤维床的渗透率,  $\mu$  是树脂黏度。

树脂黏度是温度和固化度的函数, 一般由经验模型中得出。COMPRO 提供两种树脂黏度计算模型, 见方程(11)和(12)。

$$\mu = \mu_\infty \exp\left(\frac{U}{RT} + K\alpha\right) \quad (11)$$

$$\mu = A_\mu \exp\left(\frac{E_\mu}{RT}\right) \cdot \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{(A+B\alpha)} \quad (12)$$

模型中,  $U$ 、 $K$ 、 $A_\mu$ 、 $E_\mu$ 、 $A$ 、 $B$  为方程常数,  $\alpha_g$  是凝固固化度。

纤维床的压实模型和纤维床的渗透率模型是纤维体积分数的函数。两者都使用经验模型或分析模型计算, 纤维床压实模型见公式(13)和(14), 纤维床的渗透率模型见方程(15) ~ (19)。

$$E = E; \nu = \nu \quad (13)$$

$$\{ E_1 = E_1; E_{13} = E_{13} \}$$

$$\{ E_2(\epsilon) = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)(\epsilon - \epsilon_i)} + \sigma_i \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &(\epsilon_i < \epsilon < \epsilon_{i+1}) \\ \left\{ \begin{aligned} K_x &= K_x \\ K_z &= K_z \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$(V_f^i \leq V_f \leq V_f^{i+1})$$

$$K_x = \frac{K_x^{i+1} - K_x^i}{V_f^{i+1} - V_f^i} (V_f - V_f^i) + K_x^i \quad (16)$$

$$\left( K_z = \frac{K_z^{i+1} - K_z^i}{V_f^{i+1} - V_f^i} (V_f - V_f^i) + K_z^i \right)$$

$$\left( K_x = \frac{r_f^2}{4K_x} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right. \quad (17)$$

$$\left. \left( K_z = \frac{r_f^2}{4K_z} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right. \right)$$

$$\left( K_x = \frac{r_f^2}{4K_x} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right.$$

$$\left. \left( K_z = \frac{r_f^2}{4K_z} \cdot \frac{\left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1\right)^3}{\left(\frac{V_a}{V_f} + 1\right)} \right. \right) \quad (18)$$

$$\left( K_x = \frac{8r_f^2}{c} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right. \quad (19)$$

$$\left. K_z = C \left( \sqrt{\frac{V_{fmax} - 1}{V_f}} \right)^{5/2} \cdot r_f^2 \right)$$

模型中,  $K$  为纤维床渗透率,  $V$  为纤维体积分数,  $r_f$  为纤维半径,  $K_x$  为 Kozeny 常量,  $C$  为常量。

### 2.3 应力变形模型

应力变形模型模拟了固化过程中内部应力和变形的发展。工艺过程引起的应力也极大的影响了结构的极限强度和疲劳寿命。此外, 这些应力可以导致面内的尺寸变化和结构翘曲。

当前模型包含五种诱导应力主要来源的应力分析, 它们是:

- (1) 各向异性铺层的热膨胀;
- (2) 各向异性树脂固化收缩;
- (3) 构件内部的温度梯度和树脂的固化度;
- (4) 树脂的不均匀流动;
- (5) 工装模具的效果。

目前, 固化瞬时线弹性材料模型 (Cure Hardening Instantaneous Linear Elastic, CHILE) 被用来描述树脂的固化行为。在每个时间步长初始, 铺层的力学性能由局部纤维体积分数来确定, 树脂的力学性能由温度和固化度来计算。

树脂通常被认为是各向同性的, 而纤维是各向异性的。因而, 纤维的力学性能为:

- (1) 面内模量

$$E_{11} = E_{11f}V_f + E_r(1 - V_f) + \frac{4(v_r - v)k_f k_r G_r (1 - V_f)V_f}{(k_f + G_r)k_r + (k_r - k_r)G_r V_f} \quad (20)$$

其中,  $G_r = \frac{E_r}{2(1+\nu_r)}$

- (2) 剪切模量

$$G_{12} = G_{13} = G_r \cdot \frac{(G_{13f} + G_r) + (G_{13f} - G_r)V_f}{(G_{13f} + G_r) - (G_{13f} - G_r)V_f} \quad (21)$$

$$G_{23} = \frac{G_r [k_r(G_r + G_{23f}) + 2G_{23f}G_r + k_r(G_{23f} - G_r)V_f]}{k_r(G_{23f} + G_r) + 2G_{23f}G_r - (k_r + 2G_r)(G_{23f} - G_r)V_f} \quad (22)$$

其中,  $G_{23f} = \frac{E_{33f}}{2(1+\nu_{23f})}$

- (3) 泊松比

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{13f}V_f + \nu_r(1 - V_f) + \frac{(\nu_r - \nu_{13f})(k_r - k_f)G_r(1 - V_f)V_f}{(k_f + G_r)k_r + (k_r - k_f)G_r V_f} \quad (23)$$

$$\nu_{23} = \frac{2E_{11}k_r - E_{11}E_{22} - 4\nu_{13}^2 k_r E_{22}}{2E_{11}k_T} \quad (24)$$

式中,  $k$  定义为“各向同性面内应变体积模量”,  $k = \frac{E}{2(1-\nu-2\nu^2)}$ ,  $k_T$  为有效面内应变体积模量, 定义为:

$$k_T = \frac{(k_f + G_r)k_r + (k_f - k_r)G_r V_f}{(k_f + G_r) - (k_f - k_r)V_f}$$

固化时的树脂弹性模量计算为以下两个模型。

模型 1:

$$\begin{cases} E_r^1 = E_r^0 & \alpha < \alpha_{c1} \\ E_r^1 = (1 - \alpha_{mod})E_r^0 + \alpha_{mod}E_r^\infty + \\ \gamma_r \alpha_{mod}(1 - \alpha_{mod})(E_r^\infty - E_r^0) & \alpha_{c1} < \alpha < \alpha_{c2} \\ E_r^1 = E_r^\infty & \alpha > \alpha_{c2} \end{cases}$$

$$[E_r = E_r^1 [1 + \alpha_{Er}(T - T_0)]]$$

其中:  $\alpha_{mod} = \frac{\alpha - \alpha_{c1}}{\alpha_{c2} - \alpha_{c1}}$

模型 2:

$$\begin{cases} E_r^1 = E_r^0 & T^* < T_{C1}^* \\ E_r^1 = E_r^0 + \frac{T^* - T_{C1}^*}{T_{C2}^* - T_{C1}^*} \cdot (E_r^\infty - E_r^0) & T_{C1}^* < T^* < T_{C2}^* \\ E_r^1 = E_r^\infty & T^* > T_{C2}^* \end{cases}$$

$$[E_r = E_r^1 [1 + \alpha_{Er}(T - T_0)]]$$

其中:  $T^* = (T_{ga} + T_{gb} \cdot \alpha) - T$ ;

$$T_{C1}^* = T_{C1a}^* + T_{C1b}^* \cdot T$$

有限元计算使用四节点的 2D 平面应变等参单元, 为了缩短求解时间, 每个单元通常代表厚度方向上的几个铺层, 一个组合的梯形规则/高斯积分用来映射铺层属性和应变来获得等效单元刚度和节点位移<sup>[6]</sup>。

### 3 应用案例

COMPRO 模型提供了从简单、封闭式分析到复杂、可适应的有限元分析等一系列数值分析模型与工具, 在某翼梁样件研制中, COMPRO 成功应用于分析和预测翼梁在制造过程中的变形, 如图 3 所示。

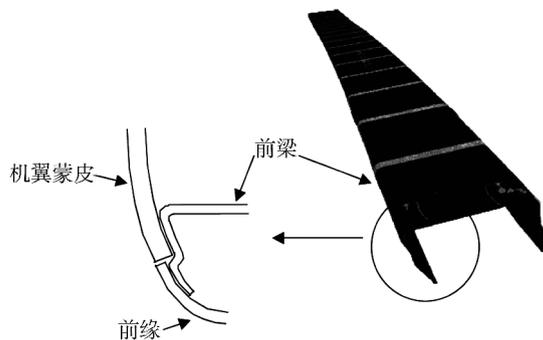


图 3 翼梁设计方案

Fig. 3 Design scheme of Wing front spar

该研究主要面向 C 型前梁, 两侧缘条具有变化的角度以适应翼型形状。精确控制翼梁缘条的尺寸和角度至关重要, 以便获得良好气动修正的前缘轮廓。两个缘条上均带有下陷以适应前缘和蒙皮之间的厚度差。

经验表明, C 型梁在阳模上进行固化成型通常会表现出三种类型的变形: (1) 缘条角度的回弹; (2) 腹板的翘曲; (3) 圆角处厚度变薄, 如图 4 所示, 有时候缘条的回弹变形量非常大, 不得不在模具上加垫片进行补偿。构件的固化变形过程依赖于大量的工艺参数, 这也是该研究通过仿真方法进行分析解决的目标<sup>[7]</sup>。

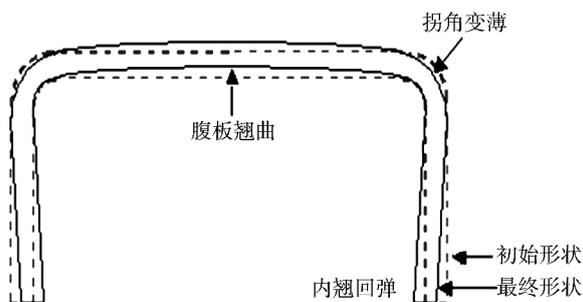
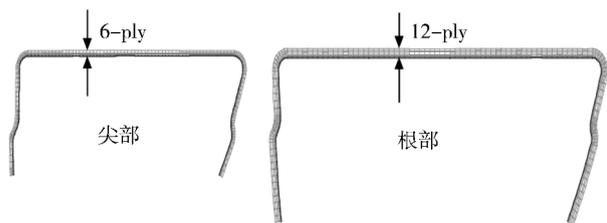


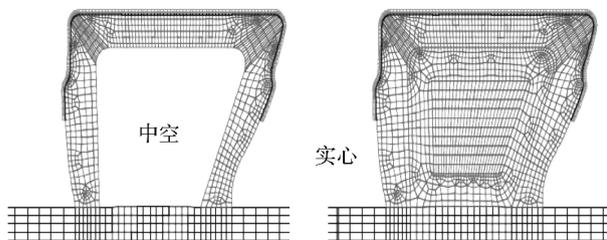
图 4 典型的前梁固化变形形式

Fig. 4 Typical curing deformation of spar

COMPRO 对翼梁的两个横截面进行 2D 有限元建模, 两个横截面一个在根部一个在尖端, 使用



(a) 横截面 X1



(c) 模具热容量 X3

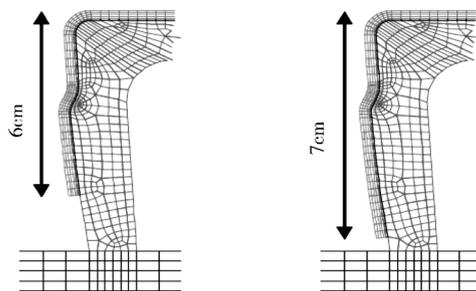
COMPRO 进行工艺建模, 通过虚拟试验来评估不同工艺参数的变化影响, 以及预测变形发生的过程。该设计试验不仅能够给出特定参数的影响效果, 而且还能得知参数之间相互作用的效果, 试验结果可以用来指导模具设计, 构件设计, 材料的选择, 以及固化工艺曲线设计。分别针对部分关键参数进行敏感度分析, 参数分为过程参数和模型参数, 如表 1 所示。

表 1 敏度分析参数列表

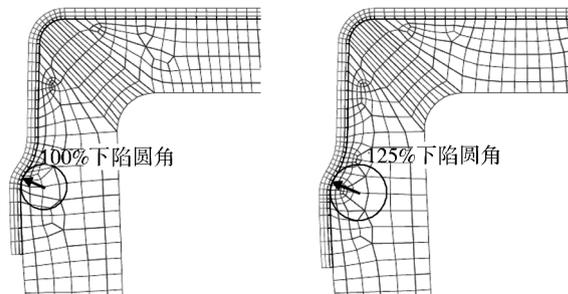
Tab. 1 Parameter list of sensitivity analysis

过程相关参数	描述	参数区间	模型相关参数	描述	参数区间
X <sub>1</sub>	横截面	12 层截面/ 6 层截面	X <sub>6</sub>	固化动力学	±10%
X <sub>2</sub>	缘条长度	6cm/7cm	X <sub>7</sub>	模量生长	±10%
X <sub>3</sub>	模具热容量	实心/空心	X <sub>8</sub>	树脂 CTE	±10%
X <sub>4</sub>	加热率	5/1 (°C/min)	X <sub>9</sub>	树脂固化收缩量	±10%
X <sub>5</sub>	下陷角 高/低(名义值/+25%)		X <sub>10</sub>	树脂黏性	±10%

相关参数的有限元示意如图 5 所示。通过 COMPRO 的分析, 预测不同参数带来的回弹和翘曲结果见表 2, 可以看出, 在 COMPRO 分析中对回弹影响较大的参数依次是: 固化收缩率、截面以及固化动力学, 显著影响翘曲的主要参数为: 模量生长和截面。



(b) 缘条长度 X2



(d) 下陷圆角 X5

图 5 有限元建模示意图

Fig. 5 Finite element Model sketch map

表 2 各参数对回弹和翘曲的影响结果

Tab. 2 Parameters for springback and warp effect

参数	根部左侧/(°)	尖部左侧/(°)	根部右侧/(°)	尖部右侧/(°)	翘曲/ $\mu\text{m}$
$C_1$ (截面)	0.00	-0.05	-0.12	-0.15	45.5
$C_2$ (下陷角)	0.00	0.00	0.01	0.00	-3
$C_3$ (缘条长度)	0.03	0.00	0.03	0.00	-2
$C_4$ (模具热容量)	0.02	0.02	0.02	0.02	0
$C_5$ (加热率)	0.00	0.00	0.00	0.00	1
$C_6$ (固化动力学)	0.10	0.09	0.11	0.10	-0.7
$C_7$ (模量生长)	-0.06	0.02	-0.02	0.06	-107
$C_8$ (树脂 CTE)	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.5
$C_9$ (固化收缩量)	0.17	0.15	0.20	0.18	2
$C_{10}$ (树脂黏性)	0.01	0.01	0.01	0.01	0

COMPRO 分析与试验数据的对比如图 6 所示,在缘条-腹板夹角  $90^\circ$  到  $120^\circ$  的区间内(即零件实际成型夹角区间),数值模拟与试验样件的回弹角大约存在 25% 的差异(基值较小,造成数据分析的数值百分比差异性较大)。

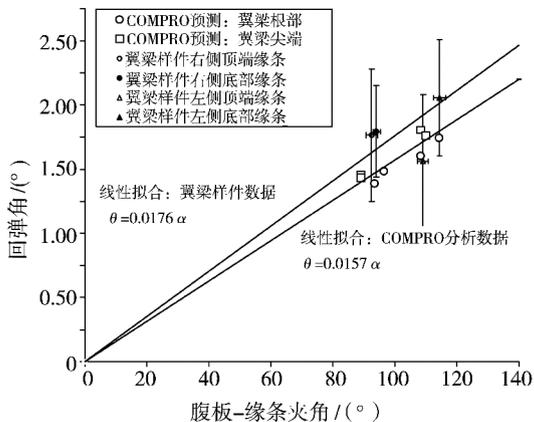


图 6 分析结果与试验结果的对比

Fig. 6 Comparison between analysis and experimentation

通过分析可以确定,COMPRO 数值模拟能较为

准确的预测层压板热压罐成型的回弹量;影响数值模拟的关键参数可以用来指导构件设计、材料选择以及工艺参数的确定。

#### 4 结论

上述案例研究表明,复合材料固化工艺仿真能够对常规的层压板结构提供良好的预测。使得计算机模拟技术能够给复合材料制造带来越来越大的价值。如何精确控制复合材料构件的尺寸和质量,实现无垫片装配,是一个重要课题。采取科学的方法通过计算机模拟技术,结合部分试验,来理解和预测热压罐的工艺过程,将带来更大的成本收益。

#### 参考文献

[1] 王雪明,谢富原. 热压罐成型复合材料复杂结构对制造缺陷的影响规律[J]. 航空学报,2009,30(4):757-762

[2] 张纪奎,酆正能. 复合材料层合板固化压实过程有限元数值模拟及影响因素分析[J]. 复合材料学报,2007,24(2):125-129

[3] 陈晓静. 复合材料构件固化成型的变形预测与补偿[D]. 南京航空航天大学,2011:5-7

[4] Hubert P, Vaziri R, Poursartip A. A two dimensional flow model for the process simulation of complex shape composite laminates[J]. International Journal of Numerical Methods in Engineering, 1998,44(1):1-26

[5] Abdul Rahim Ahamed Arafath. Efficient numerical techniques for predicting process-induced stresses and deformations in composite structures [D]. The University of British Columbia, 2007

[6] COMPRO-The Virtual Autoclave[R]. Convergent Manufacturing Technologies Inc. ,2012

[7] Fernlund G, Poursartip A, Nelson K, et al. Process modeling for dimensional control-sensitivity analysis of a composite spar process[J]. Int. SAMPE Symp. ,1999,44:1745-1754

(编辑 吴坚)