复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第27卷 第1期 2月 2010年
Vol. 27 No. 1 February 2010

文章编号：1000-3851(2010)01-0025-07

复合材料网格结构软模共固化成型工艺数值仿真

黄其忠，任明法*，陈浩然
（大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室，大连 116024）

摘 要： 基于平面应变有限元分析模型与策略，研究了软模共固化成型工艺中工艺间隙、固化周期和残余应力对复合网格结构性能的影响。通过模拟一典型复合材料网格结构的共固化工艺过程，得出了合适工艺间隙的确定方法，建立了降低耦合场梯度策略，并且解释了产生残余应力的原因。这对复合网格结构的软模共固化工艺的工艺参数合理选择具有一定的参考价值。

关键词： 复合材料网格结构；软模；共固化；数值模拟；工艺参数
中图分类号： TB332；TB33011 **文献标志码：** A

Numerical simulation of soft-mode aided co-curing process for advanced grid stiffen structure

HUANG Qizhong, REN Mingfa*, CHEN Haoran
(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the 2D plane strain finite element analysis model and strategy, the influences of technology gap, curing cycle and residual stress on the performance of grid structure were studied. From numerical simulation of the co-curing process for a typical advanced grid stiffen structure, a method for appropriate technical gap is given, the strategy for reducing the gradient of coupling fields is provided and the mechanism of residual stress generation is explained. Therefore, this study will be meaningful for the proper determination of technical parameters during soft-mode aided co-curing processes.

Keywords: advanced grid structure (AGS); soft-mode; co-curing; numerical simulation; technical parmeters

树脂基复合材料是一类由树脂和纤维增强材料所组成的先进材料。利用这种复合材料制成的格栅结构(AGS)具有比传统格栅结构更显著的高比强度和比刚度、可设计性、抗疲劳性、耐腐蚀性等优良性能以及便于大面积整体成型等独特优点，已广泛应用于建筑、汽车、航空航天等领域。关于复合材料生产工艺的研究，国内外已经做了大量的工作并取得了相应的成果[1-3]。随着人们对树脂基复合材料研究的深入，发展了许多适用于不同结构的成型工艺，主要包括手糊、拉挤、树脂传递模塑、热压罐、缠绕成型等。尽管这些成型工艺区别很大，但它们都需经过纤维浸渍、缠绕(铺设)、固化、脱模等阶段，其中区别最大的是固化阶段，即通过树脂分子间的交联反应固化成型阶段。传统的生产工艺由于自身的技术限制，生产出的产品多带有缺陷，如纤维含量低、分布不均匀和孔隙率较高等，故不能充分发挥复合材料的性能，从而也限制了该结构在工程中的大量使用[4-6]。

近年来，复合材料工程界发展了一种用于复合材料网格结构的软模共固化成型工艺，因其具有快捷的固化过程的优点，已成为复合材料先进工艺的研究热点。该工艺的显著特点是：(1) 硅橡胶软模在加热固化过程中膨胀，均匀高效地对复合材料网格结构预浸料施加侧向压力，实现挤胶和压实，提高了肋骨纤维体积分数，从而有效改善了复合材料网格结构的整体性能；(2) 复合材料预浸料构件在实现共固化成型后，能很方便地从硅橡胶软模模腔中脱去。靳武刚、肖加余、郦正能等通过试验和数值模拟验证了软模技术在简单复合材料网格结构共固化成型中的可行性，并介绍了几种可用于软模技

收稿日期： 2009-02-13；**收修改稿日期：** 2009-06-01
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(10702012)；国家重点基础研究发展计划(2006CB601205)；国家自然科学基金重点项目(90816025)
通讯作者： 任明法，副教授，研究方向：复合材料工艺力学 E-mail：renmf@dlut.edu.cn

术的硅橡胶材料[7-9]。Huybrechts 等提出一种简单的数值方法用于预测采用热膨胀工艺成型的复合材料结构的最终尺寸[1]。

软模工艺中的关键问题是硅橡胶膨胀压力的控制，硅橡胶膨胀压力不仅影响复合材料网格结构的性能和质量，而且影响复合材料网格结构的尺寸精度。硅橡胶对温度的敏感性使工艺间隙的确定不仅需要考虑固化过程中温度的变化，还需要考虑复合材料预浸料刚度的变化，即需要考虑固化过程温度场、固化度场、应力场的多场耦合问题。本文中采用 ANSYS 有限元软件对一典型复合材料网格结构软模共固化成型工艺过程进行了数值模拟，探究固化过程中相关物理量的变化规律，并提出相应的优化参数策略。

1　有限元分析模型与理论

1.1　分析模型和策略

复合材料网格结构软模共固化成型工艺过程是一个温度场、固化度场、应力场、压力场等物理场相互耦合的过程。在固化过程中该结构的温度场受树脂交联反应放热的影响将发生剧烈变化，进而影响结构中固化度场与软模压力的不均匀分布，最终影响产品的质量。如何准确高效模拟分析固化过程中的多场耦合效应是该数值分析的难点，本文中采用了 Newton－Raphson (N－R)方法为基础的时空有限元法的分析策略，对成型工艺过程进行了数值模拟，其计算流程图如图 1 所示。

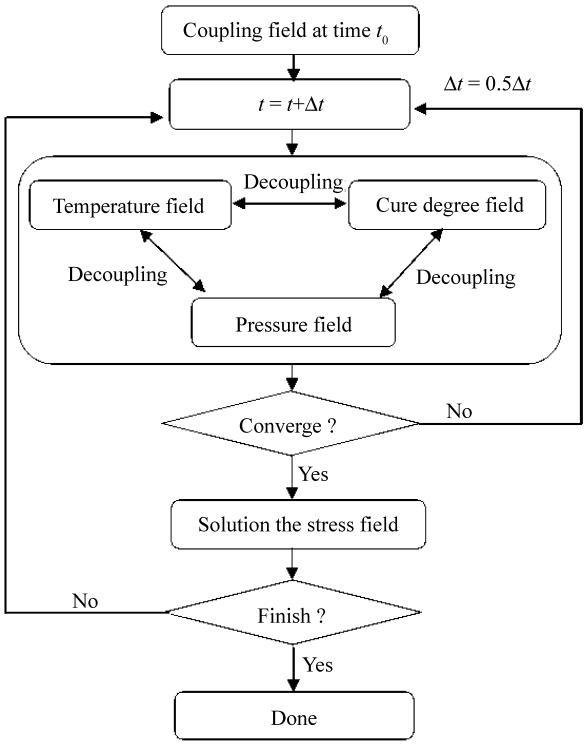

图 1　耦合场分析计算流程图

Fig. 1　Flow chart for numerical analysis of coupling-fields

1.2　分析理论和方法

1.2.1　固化过程分析

在预浸料固化反应过程中，α 在 0～1 之间变化。若用化学反应过程中所放出的热量来定义固化度，则

$$\alpha = H(t)/H_r \tag{1}$$

式中，$H(t)$和 H_r 分别表示固化反应进行到 t 时刻和反应结束时总的化学放热量，其值可以通过差示扫描量热(DSC)技术测得。

若以 Glass/Polyester 复合材料为例，其固化动力学方程可表示为

$$\frac{d\alpha}{dt} = A\exp\left(\frac{-\Delta E}{RT}\right)\alpha^m(1-\alpha)^n \tag{2}$$

式中：A、ΔE、m 和 n 均是与材料有关的常数，如表 1 所示，其值可通过对实验数据进行曲线拟合的方法得到；ΔE 是材料的活化能；R 是气体常数；T 是绝对温度；α 是固化度。若复合材料的化学反应速率($d\alpha/dt$)和总的化学放热量 H_r 已知，则固化过程中化学放热速率可由下式求得：

$$\dot{Q} = \rho H_r \frac{d\alpha}{dt} \tag{3}$$

表 1　复合材料树脂基体固化动力学参数[10]

Table 1　Curing kinetics parameters of polyester matrix[10]

Parameters	Value
A/min^{-1}	3.7×10^{22}
$\Delta E/(\mathrm{J\cdot mol^{-1}})$	1.674×10^{5}
m	0.524
n	1.476
$H_r/(\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}})$	77.5
R	8.3145

1.2.2　热传导分析

复合材料固化工艺过程中的热传导问题可归结为求解如下有源的正交各向异性体的瞬态热传导方程：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{Q} \tag{4}$$

式中：ρ 和 c_p 分别为复合材料的密度和比热容；λ_y

和λ_z分别为y坐标方向和z坐标方向的等效热传导系数；$\dot{Q}$为内部热源项，对于复合材料固化过程，$\dot{Q}$是树脂固化产生的化学放热速率，该值需通过复合材料反应动力学方程来确定。

热传导控制方程可写成泛函的形式，然后，根据变分原理，经过整理可得到热传导有限元分析的热平衡方程式：

$$\boldsymbol{KT}+\boldsymbol{C}_T\frac{\partial \boldsymbol{T}}{\partial t}=\boldsymbol{P} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{K}$称为热刚度矩阵；$\boldsymbol{C}_T$称为温度T时的一致热容矩阵；$\boldsymbol{P}$称为当量节点力向量，其值可通过边界条件与固化生热率确定。将热传导与固化热解耦可得如下平衡方程：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_T & -\rho H_r\boldsymbol{C}_\alpha\\ 0 & \boldsymbol{C}_\alpha\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\boldsymbol{T}}\\ \dot{\boldsymbol{\alpha}}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{K} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\boldsymbol{T}\\ \boldsymbol{\alpha}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{P}_h\\ \boldsymbol{P}_\alpha\end{Bmatrix}$$

式中，$\boldsymbol{P}_h$、$\boldsymbol{P}_\alpha$分别为边界条件和树脂固化放热。然后，采用Newton－Raphson(N－R)计算方法，分别对固化度场、温度场和应力场解耦，可计算得出不同时刻下复合材料预浸料中各个耦合场的分布。

1.2.3 弹性模量变化

树脂固化过程中随着发生交联反应高分子的增多，树脂的力学性能也在不断发生变化。固化过程中树脂的力学性能可通过混合树脂固化度的方法来表示

$$E_m=(1-\alpha_{mod})E_m^0+\alpha_{mod}E_m^\infty,$$

$$G_m=\frac{E_m}{2(1+\nu_m)},\ \alpha_{mod}=\frac{\alpha-\alpha_{gel}^{mod}}{\alpha_{diff}^{mod}-\alpha_{gel}^{mod}}. \tag{6}$$

式中：E_m^0、E_m^∞分别表示与温度相关树脂基体预聚状态时的弹性模量与固化完全时的弹性模量；α_{diff}^{mod}、α_{gel}^{mod}分别表示扩散时和树脂为胶状时的固化度。在本文中设E_m^0、E_m^∞、ν_m为不随温度变化的常数并如表2所示，且$\alpha_{gel}^{mod}=0$和$\alpha_{diff}^{mod}=1$。本文中所用树脂和纤维的力学参数如表2所示。

表2 树脂和纤维的力学性能[10]

Table 2 Mechanical properties of resin and fiber[10]

E_m^0/MPa	E_m^∞/GPa	E_f/GPa	G_f/GPa	ν_f	ν_m
2.757	2.757	73.08	29.92	0.22	0.4

1.2.4 接触分析

软模工艺中，复合材料网格结构预浸料壁上的固化压力是由硅橡胶受热膨胀产生的接触压力提供，因此需考虑接触问题。弹性接触问题的平衡方程式为

$$\iint_{A_c}p(y,z)\mathrm{d}y\mathrm{d}z=Q \tag{7}$$

式中：Q为作用载荷即硅橡胶受热膨胀在预浸料上产生的接触压力；p为接触应力；A_c为肋骨接触区域。硅橡胶是一种泊松比接近0.5的体积不可压缩的材料，硅橡胶接触压力的大小受温度的影响十分显著。根据变分原理可将接触平衡方程写成泛函的形式并最终离散成有限元格式，采用罚函数法引入接触界面约束条件和接触摩擦效应，经过推导，可得到Update Lagrangian(U. L.)格式的有限元求解方程：

$$\boldsymbol{M}^{t+\Delta t}\ddot{\boldsymbol{u}}+(\boldsymbol{K}_L^t+\boldsymbol{K}_{NL}^t+\boldsymbol{K}_{c\alpha})\boldsymbol{u}=\boldsymbol{Q}_L^{t+\Delta t}+\overline{\boldsymbol{Q}}_c^{t+\Delta t}-\boldsymbol{F}^t$$

式中：$\boldsymbol{K}_{c\alpha}$是与罚函数有关的矩阵；$\boldsymbol{Q}_L^{t+\Delta t}$代表$t+\Delta t$时刻的外载荷向量；$\overline{\boldsymbol{Q}}_c^{t+\Delta t}$是$t+\Delta t$时刻的等效节点接触力向量；$\boldsymbol{K}_L^t$、$\boldsymbol{K}_{NL}^t$和$\boldsymbol{F}^t$分别表示$t$时刻线性刚度阵、非线性刚度阵和外力。设定合适的时间步长，采用ANSYS有限元程序可自动计算出不同时刻、不同工艺间隙下的接触压力。

2 数值模拟结果

假设软模共固化模具是铝合金材料，纤维增强复合材料网格结构中肋骨可视为宏观各向同性材料，而蒙皮为复合材料层合板，则其固化过程中树脂、温度、接触压力的变化规律可由网格结构横截面上相应物理量的变化揭示。本文中研究一正交复合材料网格板软模共固化过程，其中肋骨和蒙皮由Glass/Polyester预浸料分别按$[0]_{100}$和$[0/90]_{10S}$铺设而成，为了分析方便起见，将该问题简化为平面应变问题。其模型具体的尺寸参数、约束条件与材料参数如图2与表3所示。

表3 软模工艺中所用材料的热力学参数

Table 3 Thermo-dynamics parameters used in the soft-mode technical process

		Silicon rubber	Aluminium alloy	Composite
Young's modulus/MPa	C10	3.2	76700	—
	C01	0.8		
Poisson's ratio		0.49	0.28	—
Thermal conductivity/(W(m·K)$^{-1}$)		1.30	177.00	0.22
Thermal expansion/($\times10^{-6}$K^{-1})		200.0	26.5	8.00
Heat capacity/(kJ(mol·K)$^{-1}$)		1.53	0.88	1.26
Density /($\times10^{-3}$ kg·m^{-3})		1.23	2.71	1.89

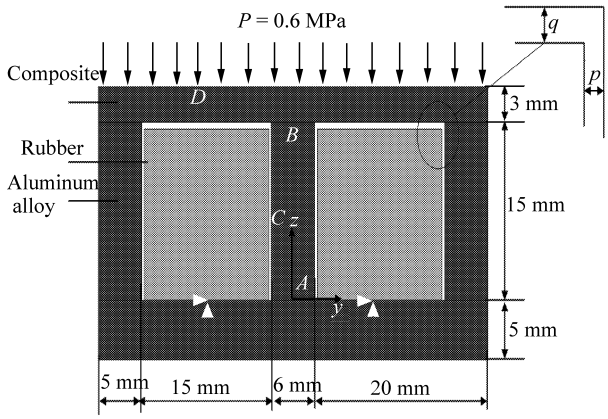

图 2　共固化软模工艺仿真的简化平面应变模型

Fig. 2　A simplified plane-strain model for numerical simulation of soft-mode aided co-curing process

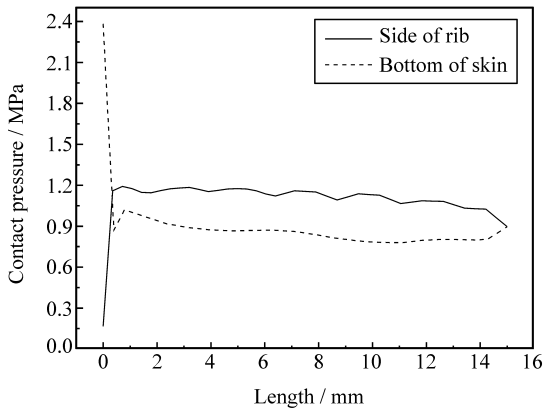

图 3　在固化过程中肋骨与蒙皮上的接触压力分布

Fig. 3　Contact pressure distribution on rib and skin during curing process

2.1　固化过程中工艺间隙比例的确定

由软模共固化成型工艺过程经验可知：(1) 固化反应起始阶段树脂流动性最高，若此时施加合适的压力不仅可以提高产品的纤维体分比，降低空隙率，使树脂分布均匀，还能准确控制产品的外形；(2) 软模工艺通过固化过程中受热硅橡胶膨胀产生接触压力的大小与分布实现对复合材料结构产品质量控制，为此，硅橡胶不仅要保证结构所需的尺寸，还要保证对复合材料预浸料施加接触压力的合适大小与时机；(3) 通过在硅橡胶软膜与复合材料预浸料间设置合适的工艺间隙，可控制接触压力的大小，该间隙值可由硅橡胶尺寸与固化过程中的温度变化确定。

为保证硅橡胶受热后向复合材料肋骨与蒙皮同时施加压力，软模与蒙皮间的工艺间隙 q 和软模与肋骨间的工艺间隙 p 需设置成合适的比例。若工艺间隙 q 为 0.6 mm，则采用简单的热膨胀算法[1] p 应为 $0.53q$。有限元计算模拟出软模模具升温 160℃时，复合材料肋骨与蒙皮上的接触压力分布如图 3 所示。

从图 3 可知：(1) 采用简单热膨胀变形方法确定出的工艺间隙所得到硅橡胶产生的复合材料肋骨与蒙皮上的接触压力分布是不均匀的。除在边缘点处存在接触压力分布相同点外，其余各处肋骨的接触压力均显著高于蒙皮上的接触压力，其中最大差值近 0.3 MPa。因此，以此工艺间隙进行生产的结构，将因在固化过程中肋骨上出现过大的接触压力而导致贫胶和树脂分布不均等缺陷，从而降低结构的整体性能。(2) 该结构的接触压力并不是沿硅橡胶尺寸方向均匀分布的。其中在肋骨与蒙皮连接处的接触压力较小，且接触压力随着距该点距离的增大而增加。在距离最远处接触压力将产生突变，肋骨上的接触压力变为零而蒙皮上的值突然增大到 2.4 MPa，其原因是硅橡胶过度膨胀导致肋骨顶部脱离了与铝合金板的接触及接触边界。因此，为保证产品的几何尺寸及合适的固化压力分布，需要将模具的几何形状尤其是工艺间隙进行修正。通过有限元数值计算模拟，改变工艺间隙 p 和 q 的比例，最终确定出当工艺间隙 p 为 $0.63q$ 时，肋骨与蒙皮上的接触压力能实现均匀分布。

2.2　间隙变化对接触压力的影响

复合材料固化过程中为保证最终产品的质量需要施加合适的接触压力，根据以往成型工艺经验，该压力值通常可取为 0.6 MPa。若已知模具在复合材料固化过程中的温差，则可确定出合适的工艺间隙。图 4 为当模具温差为 160℃，工艺间隙 AA 为 $0.63DD$ 时，随工艺间隙 DD 变化的蒙皮接触中心与肋骨接触中心接触压力的变化曲线。

由图 4 可知：(1) 随着工艺间隙的增大，肋骨上的接触压力呈近似线性变化，由 0.2 mm 时的 1.8 MPa降为 0.7 mm 时的 0；(2) 受蒙皮上表面施加 0.6 MPa 压力载荷影响，蒙皮上接触压力分布与肋骨有显著区别，当工艺间隙为 0.2～0.5 mm 时，该接触压力值基本维持在 0.9 MPa，而后随着工艺间隙的继续增大其接触压力也减小。当工艺间隙大于 0.6 mm 后，可发现在蒙皮上的接触压力与肋骨上的接触压力值大致相同。但是当工艺间隙大于 0.7 mm 后接触压力均为 0，这是由于此时的间隙

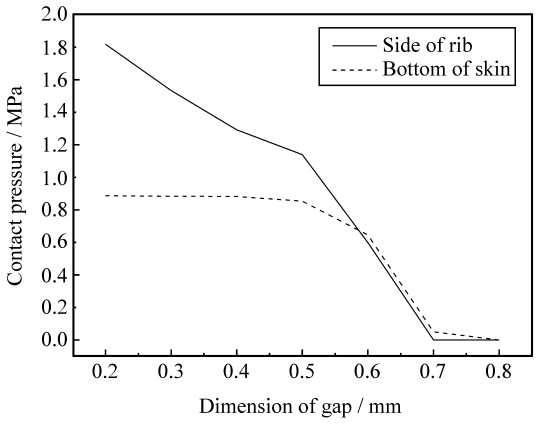

图 4　工艺间隙变化对接触压力的影响

Fig. 4　Effect of technical gap on contact pressure distribution

值大于硅橡胶的最大热膨胀量，即硅橡胶与复合材料预浸料脱离了接触。为此，从图 4 可确定出该复合材料结构固化时的合适工艺间隙为 0.6 mm。

2.3　不同时刻下聚合物树脂温度对固化度的影响

图 5 为不同时刻聚合物树脂温度对固化度的影响曲面图。

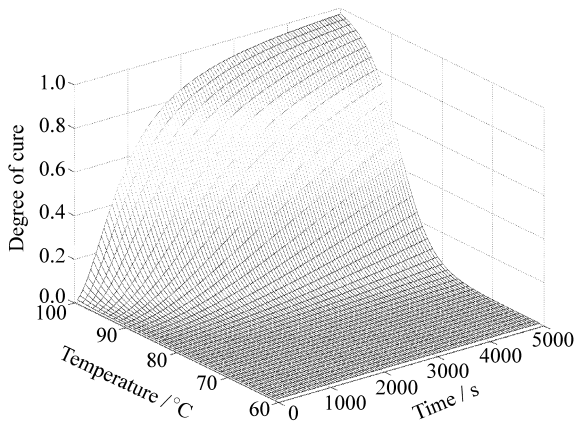

图 5　不同时刻温度对固化度的影响

Fig. 5　Effect of temperature on cure degree at different times

从图 5 中可看出：(1) 树脂温度 80℃是固化反应的一个分界点，当温度小于该分界点时树脂几乎不发生固化反应，即随着时间增加该树脂的固化度始终维持在 0；当温度大于该分界点时树脂开始发生固化反应。固化反应速率随着时间和温度的增长而增快，当固化度大于 0.8 后固化反应速率反而下降并缓慢达到完全固化。(2) 若树脂温度低于临界固化温度 80℃，固化反应的反应速率基本为 0，即该树脂无论在热压釜中放置多久生热率始终为 0；温度大于该临界点时树脂随着温度的升高，固化反应的完成速度也提高。(3) 树脂温度越高固化反应完成得越快，即固化时的生热率越大，若树脂温度为 100℃，则固化反应只需 1500 s 就基本完成且生热率在 500 s 时达到最大，此后，因固化反应基本完成，生热率迅速减小。(4) 为保证复合材料产品质量，预浸料固化时需要在一稳定均匀的温度场中固化，若树脂温度维持在 85℃，则固化反应可缓慢进行，且反应速率基本维持在恒定值，因而该温度将是最有利于预浸料固化的温度。

2.4　固化过程中结构内温度的分布

聚合物树脂固化过程是一个放热化学反应的过程，且该反应的生热率与固化反应速率成正比。固化反应中的生热率将影响复合材料预浸料中的温度场分布并最终影响产品的质量，因此，在成型工艺中必须探明固化反应生热率与温度、时间的相互联系。

图 6 为固化过程中不同位置处的温度变化图，其中，*A*、*B*、*C* 和 *D* 分别代表图 2 中复合材料预浸料横截面上肋骨顶部、肋骨中心、肋骨根部与蒙皮中心位置。

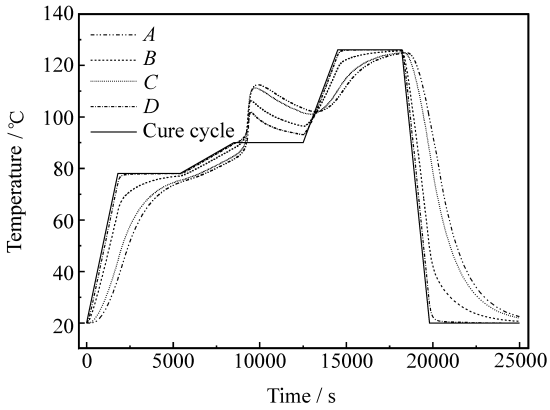

图 6　在固化过程中预浸料不同位置的温度变化图

Fig. 6　Variations of temperature in different locations of prepreg during curing process

从图 6 可以看出：(1) 距离复合材料预浸料蒙皮表面越远，该处预浸料达到固化周期时的温度所需时间越长。其中，第 2 个保温平台 87℃是固化反应发生的主要区域，在此刻复合材料预浸料内部将产生大量的反应热，影响预浸料内部温度场的分布。(2) 距离外表面越远的复合材料预浸料内部的峰值温度越高，其原因是由于固化过程产生的热量没有及时耗散出去，而使该区域成为高热量区域即高温区。但是可发现，在 *D* 点的温度分布与固化周

期的温度几乎相同，其原因是由于该复合材料预浸料蒙皮区域厚度较小，故在 D 点不仅可以迅速达到热压釜的固化温度，还可将固化过程产生的固化反应热迅速扩散出去。(3) 肋骨上温度分布与距离蒙皮表面的远近有关，而与肋骨的宽度几乎没有关系。为此，为了保证产品质量，工艺人员应根据复合材料构件的几何特点制定合理的固化周期以实现固化过程中预浸料温度场均匀分布的要求。

2.5　固化过程中结构内的固化度变化

图 7 为固化过程中图 2 所示该复合材料预浸料横截面上 A、B、C 和 D 位置处的固化度变化曲线。

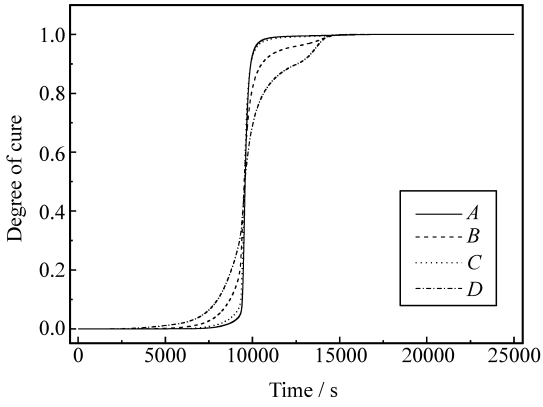

图 7　固化过程中的固化度变化曲线

Fig. 7　Variation of cure degree during curing process

由图 7 中可知，该预浸料距离蒙皮外表面越近越早发生固化反应，同时完成固化所需的时间也越长，即固化反应越平稳进行。预浸料蒙皮区域完全固化所需时间大于肋骨区域所需的时间，且肋骨上距离蒙皮越远的区域该现象越明显。其原因是由于该预浸料固化时，其外部热量无法迅速传入，同时又因为固化反应产生的反应热未能及时耗散(见图 6)。从图 7 还可发现肋骨温度分布的迟滞现象。

2.6　升温速率对固化度场分布的影响

为了研究升温速率对固化度的影响，在图 8 中分别给出了经历 80℃保温平台之后以升温速率为 1.0℃/min、0.5℃/min、0.25℃/min 和 0.0℃/min 的固化周期，以及固化过程中该预浸料表面固化度与肋骨中心固化度差值的变化曲线。从图 8 可知：(1) 厚度越大的预浸料采用越平缓的升温速率，其内部的固化度场分布将越均匀，即内部和表面的固化度差值越小；(2) 当预浸料达到固化临界温度后即使不升温，预浸料受固化反应热的影响仍然可缓慢发生固化反应。从该模拟中可知固化周期中的升

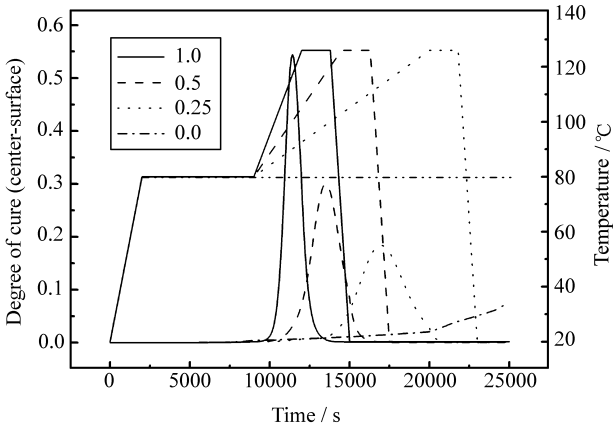

图 8　不同升温速率下固化度差值变化

Fig. 8　Variation of cure degree difference with elevated temperature rate of curing process

温速率是影响产品质量的一个重要因素。

2.7　固化过程中预浸料横向弹性模量变化

复合材料固化过程中，预浸料的力学性能将随树脂流动及固化度变化而不断改变。假设预浸料的纤维体积分数随固化度由 0.48 线性变化至 0.7，图 9 给出了由公式(6)得到的预浸料横向弹性模量随固化度和纤维体积分数变化的规律。从图 9 可知，(1) 固化度超过 0.5 后，预浸料横向弹性模量受固化度影响将十分显著；(2) 单向预浸料的横向弹性模量主要由树脂提供，因此，受固化度的影响要比因纤维体积分数的改变更为明显。

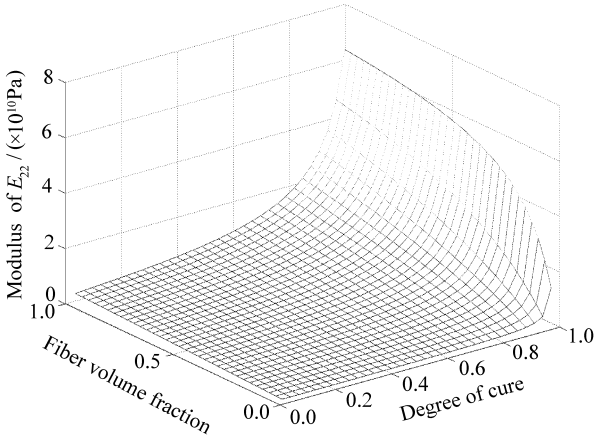

图 9　在固化过程中预浸料横向弹性模量变化

Fig. 9　Variation of prepreg's transverse Young's modulus during curing process

2.8　固化过程中结构横向应力分布

设复合材料预浸料在固化过程中其纤维体分比由 0.48 随固化度线性增加至 0.7。图 10 给出了固

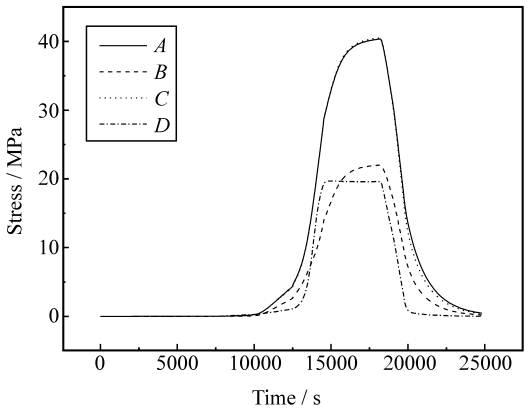

图 10　固化过程中预浸料内横向应力的变化

Fig. 10　Variation of transverse stress in prepreg during curing process

化过程中预浸料中 A、B、C 和 D 点横向应力的变化曲线(A、B、C 和 D 位置见图 2 中所示)。从图 10 可知：(1) 该预浸料在 10000 s 以前，即固化开始之前，因其处于自由状态，为此，各点的横向应力几乎为零；(2) 当固化开始后，随着温度的升高，横向应力开始增加，其中受硅橡胶膨胀挤压影响，肋骨处的横向应力显著高于蒙皮处；(3) 当固化完成后，各处应力都随着温度下降而减小，但肋骨区域残余应力比蒙皮更大。

3　结　论

(1) 采用 ANSYS 有限元软件对一典型复合材料网格结构软模共固化成型工艺过程进行了数值模拟，探究固化过程中相关物理量的变化规律，并提出相应的优化参数策略。

(2) 硅橡胶软膜与复合材料预浸料间设置合适的工艺间隙可控制接触压力的大小，该间隙值可由硅橡胶尺寸与固化过程中的温度变化确定。

(3) 肋骨高度对预浸料温度场的均匀分布具有重要影响，应根据肋骨高度来设计合适的保温时间和升温速率。

(4) 在固化过程中肋骨内的固化过程应力和残余应力值都将明显高于蒙皮区域应力值，应合理控制固化度和硅橡胶膨胀量的变化以降低肋骨内的固化过程应力和残余应力值。

参考文献：

[1] Huybrechts Steven M, Meink Troy E, Wegner Peter M, et al. Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures [J]. Composites Part A, 2002, 33(2): 155-161.

[2] Kim Thomas D. Fabrication and testing of thin composite isogrid stiffened panel [J]. Composite Structures, 2000, 49(1): 21-25.

[3] 谭　华，晏石林. 热固性树脂基复合材料固化过程的三维数值模拟[J]. 复合材料学报，2004，21(6)：167-172.
Tan Hua, Yan Shilin. Three-dimensional simulation of curing process for thermoset composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 167-172.

[4] 陈浩然，任明法，赵　伟. 复合材料缠绕壳体结构成型和使用过程多场分析的研究进展[J]. 力学进展，2007，37(2)：233-245.
Chen Haoran, Ren Mingfa, Zhao Wei. Advances of multi-fields analysis of filament wound comopsite structure during manufacture and service periods [J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(2): 233-245.

[5] 任明法. 具有金属内衬复合材料缠绕结构成型和使用过程的一体化分析[D]. 大连：大连理工大学，2005.

[6] 张明龙，肖加余. 气囊辅助 RTM 工艺成型导弹舱段构件[J]. 复合材料学报，2008，25(1)：41-45.
Zhang Minglong, Xiao Jiayu. Missile cabin fabrication by blader-assisted RTM [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 41-45.

[7] 靳武刚. 热膨胀硅橡胶在复合材料成型工艺中的应用[J]. 塑料科技，2003，154(2)：4-6.
Jin Wugang. Application of thermal expansion silicone rubber to moulding process of composites [J]. Plastics Sci & Technology, 2003, 154(2): 4-6.

[8] 尹昌平，刘　钧，曾竟成，肖加余. 硅橡胶在聚合物基复合材料成型中的应用[J]. 材料导报，2006，20(11)：35-39.
Yin Changping, Liu Jun, Zeng Jingcheng, Xiao Jiayu. Application of silicone rubber in polymer based composites molding [J]. Materials Review, 2006, 20(11): 35-39.

[9] 张纪奎，郦正能，关志东，程小全，刘　涛. 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)：125-130.
Zhang Jikui, Li Zhengneng, Guan Zhidong, Cheng Xiaoquan, Liu Tao. Compaction of laminated composites numerical simulation and analysis on influencing factors [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 125-130.

[10] Bogetti Travis A, Gillespie J W. Two dimensional cure simulation of thick thermosetting composites [J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25(3): 239-273.

[11] 郭兆璞，陈浩然，段滋华. 复合材料层合板粘弹性固化残余应力分析[J]. 计算结构力学及其应用，1996，13(4)：401-407.
Guo Zhaopu, Chen Haoran, Duan Zihua. Thermo-viscoelastic analysis of curing residual stresses in composite laminates [J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1996, 13(4): 401-407.