

机织复合材料变曲率薄壳件固化特性分析

姚文标¹ 牛雪娟^{1,2}

(1 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

(2 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

文 摘 机织复合材料结构件在固化过程中会经历复杂的物理和化学变化,在固化成型脱模后产生变形,严重影响构件的成型精度。为了准确预测变形,本文首先建立了机织复合材料结构件固化变形的多尺度模型,后结合细观力学方法获得机织复合材料在固化过程中力学性能与热性能的演化。然后以变曲率薄壳件及含曲率的层合板构件作为研究对象,采用顺序热-力耦合的模拟方法,进一步分析了曲率、厚度参数对机织复合材料结构件固化特性的影响。结果表明,厚度较薄的机织复合材料结构件,固化温度梯度较低,固化程度比较均匀;曲率参数会对曲面机织件的固化变形产生一定的影响,且构件厚度越薄,曲率对变形的影响越显著;在变曲率薄壳件固化完成脱模后,同一曲率处,薄壳件经纬纱方向的最大位移大于厚度方向的最大位移。

关键词 曲率,代表性体积单元,多尺度,变形,残余应力

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.010

Analysis of Curing Characteristics of Thin Shell Woven Composites With Variable Curvature

YAO Wenbiao¹ NIU Xuejuan^{1,2}

(1 School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

(2 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

Abstract Composite structures made of woven composites undergo both physical and chemical changes during the curing process, and will produce deformation after demolding, which significantly impacts the accuracy of the parts. In order to accurately predict the deformation, this paper first establishes a multiscale analysis model for the curing deformation of woven composites parts, and combines the meso-mechanical method to obtain the evolution of mechanical and thermal properties of woven composites during the curing process. Then, the effects of curvature and thickness parameters on the curing characteristics of woven composite parts were further analyzed using the sequential thermo-mechanical coupling analysis method to simulate the thin shell parts of variable curvature and laminates with different curvature. The results showed that woven composite parts with a lower thickness have a lower temperature gradient during curing and a more uniform curing degree. The curvature parameters influence on the curing deformation of woven parts, and the thinner the member thickness, the more significant the effect of curvature on deformation. After the thin shell parts of variable curvature was cured and demolded, the maximum displacement in the warp and weft directions is greater than that in the thickness direction at the same curvature.

Key words Curvature, Representative volume element, Multiscale, Deformation, Residual stress

0 引言

碳纤维机织复合材料是由经纬纤维、树脂基体组成的高度非均质材料,其相比于单向纤维预浸料具有更高的抗冲击性、仿形性、损伤容限,被广泛应

用在船舶、航空、汽车制造等领域。机织复合材料结构件在固化过程中由于模具与构件间的相互作用、树脂产生化学收缩、不同组分间的热性能差异等因素,使构件在脱模后产生变形,严重影响构件的后续

收稿日期:2022-09-03

基金项目:天津市自然科学基金重点项目(23JCZDJC00450)

第一作者简介:姚文标,1998年出生,硕士,研究方向为复合材料工艺及制备。E-mail:18888394391@163.com

通信作者:牛雪娟,1977年出生,教授,研究方向为复合材料工艺及制备。E-mail:niuxuejuan@tiangong.edu.cn

使用。

目前国内外学者在固化变形及机织复合材料的力学性能预测方面进行了广泛的研究。唐闻远等^[1]对单向预浸料铺放成型的C型构件进行了固化变形数值模拟,并对温度参数进行了优化。卫宇璇等^[2]研究了变刚度铺层对层合板固化变形的影响。C. BELLINI等^[3]研究了圆角半径、铺层顺序对L型件回弹变形的影响。刘德博等^[4]研究了模具表面状态对构件固化变形的影响,结果表明适当增加涂抹脱模剂的次数可有效减小构件的固化变形。乔巍等^[5]研究了剪滞效应对构件固化特性的影响,结果表明构件的变形随着剪滞效应的增强而减小。薛亚红等^[6]开展了单胞模型周期性边界条件的研究,并准确预测了二维机织复合材料的力学性能。Z. Y. YUAN等^[7]通过把宏观层合板模型计算得到的温度场、固化度场、残余应力等信息引入单向纤维增强复合材料的微观尺度模型,得到微观尺度的残余应力分布。

通过以上研究可以发现学者们对单向预浸料铺放成型的几何结构较为简单的构件进行了深入的研究,且大多集中在分析温度参数、模具、铺层等对变形的影响;但对于具有复杂外形的机织复合材料构件的固化变形及曲率、厚度参数对固化特性的影响研究很少。本文通过建立斜纹机织复合材料结构件固化变形的多尺度分析模型,结合细观力学方法,得到斜纹机织复合材料在固化过程中力学性能与热性能的演化。在薄壳件与钢制模具间粘贴应变片,计算得到剪切力。后结合实验数据进行仿真计算,并进一步分析了变曲率薄壳件及含曲率层合板的温度场、位移场及应力应变场。

$$E_r = \begin{cases} E_r^0 & \alpha \leq \alpha_{\text{gel}} \\ (1 - \alpha_{\text{mod}})E_r^0 + \alpha_{\text{mod}}E_r^\infty + \gamma_r\alpha_{\text{mod}}(1 - \alpha_{\text{mod}})(E_r^\infty - E_r^0) & \alpha_{\text{gel}} < \alpha < \alpha_{\text{gl}} \\ E_r^\infty & \alpha \geq \alpha_{\text{gl}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_{\text{mod}} = (\alpha - \alpha_{\text{gel}})/(1 - \alpha_{\text{gel}}) \quad (5)$$

式中, E_r^0 和 E_r^∞ 分别为树脂黏流态和玻璃态时的弹性模量; γ_r 为竞争因子; α_{gel} 和 α_{gl} 分别为树脂凝胶点和玻璃化点。机织复合材料力学性能与热性能在固化过程的演化通过对建立的多尺度单胞模型计算得到。

1.3 热应变与固化收缩应变

机织复合材料在固化过程中的应变包括机械应变与非机械应变。机械应变主要为模具变形造成构件产生的应变,非机械应变主要为热应变和化学收缩应变。树脂在固化过程中的体积收缩量可以表示为关于固化度的函数^[10]:

$$V_r^S = \begin{cases} 0 & \alpha \leq \alpha_{c1} \\ AC_S + (V_r^{S\infty} - A)C_S^2 & \alpha_{c1} < \alpha \leq \alpha_{c2} \\ V_r^{S\infty} & \alpha > \alpha_{c2} \end{cases} \quad (6)$$

1 理论模型

1.1 热传导模型

机织物在真空灌脂完成后,通常需要在热压罐中加温加压来加快树脂交联反应。构件在热压罐中的固化成型涉及热传导及树脂反应生热,其控制方程为^[8]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 为温度; λ_i ($i=x,y,z$)、 ρ_c 、 c_c 分别为机织复合材料3个轴向的热导率、等效密度、等效比热容,其由下列混合率公式计算得到:

$$\begin{cases} C_c = \frac{V_f \rho_f C_f + (1 - V_f) \rho_r C_r}{V_f \rho_f + (1 - V_f) \rho_r} \\ \rho_c = V_f \rho_f + (1 - V_f) \rho_r \\ \lambda_i = \frac{\lambda_f \lambda_r \rho_c}{V_f \rho_f \lambda_f + (1 - V_f) \rho_r \lambda_r} \quad (i = x, y, z) \end{cases} \quad (2)$$

式中,下标 c 、 f 、 r 分别代表复合材料、纤维、树脂; V_f 为纤维体积分数。式(1)中 Q 为 t 时刻树脂产生的热量,与下方固化反应速率有关:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \rho_r (1 - V_f) H_r \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

式中, α 、 H_r 、 $\frac{d\alpha}{dt}$ 分别为固化度、单位质量树脂生热、反应速率。

1.2 模量演化模型

在固化过程中随着交联反应的进行,树脂经历黏流态、橡胶态到玻璃化固态的转变,因而力学性能发生极大变化。树脂在固化过程中力学性能的演化本文采用CHILE(α)^[9]模型,其表达式如下:

$$C_S = (\alpha - \alpha_{c1})/(\alpha_{c2} - \alpha_{c1}) \quad (7)$$

式中, α_{c1} 和 α_{c2} 分别为树脂开始收缩与结束收缩时的固化度; $A=0.173$ 。树脂收缩产生的应变为:

$$\Delta \varepsilon_r^{\text{sh}} = \sqrt[3]{1 + \Delta \alpha V_r^S} - 1 \quad (8)$$

机织物的收缩应变通过等效温度载荷法^[10]得到。既把化学收缩引起的应变转化为引起同等大小应变所需要模型施加的温度载荷。首先,给树脂赋予一个虚拟线胀系数 β_r ,纤维在固化过程中认为不发生收缩。根据式(6)和式(8)确定树脂的收缩应变 $\varepsilon_r^{\text{sh}}$ 后,等效的温度载荷由下式确定:

$$T_E = \varepsilon_r^{\text{sh}} / \beta_r \quad (9)$$

通过施加 T_E 给微观尺度单胞,纤维束在3个轴向上的收缩应变可由下式计算:

$$\bar{\varepsilon}_k^s = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^k V^i \quad (k = x, y, z) \quad (10)$$

式中, ε_i^k 和 V^i 分别为单元 i 的应变和体积, V 为模型的总体积, n 为模型中包含的单元数。后得到微观尺度单胞的虚拟线胀系数为:

$$\beta_{yam}^k = \bar{\varepsilon}_k^s / T_E \quad (k = x, y, z) \quad (11)$$

将得到的虚拟线胀系数赋予细观尺度单胞中的纤维束,对细观尺度单胞施加温度载荷 T_E , 计算得到机织复合材料在3个轴向的固化收缩系数。

机织复合材料在固化过程中产生的热应变如下:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_1^{th} = \beta_{11} \Delta T \\ \Delta \varepsilon_2^{th} = \beta_{22} \Delta T \\ \Delta \varepsilon_3^{th} = \beta_{33} \Delta T \end{cases} \quad (12)$$

式中, β_{11} 、 β_{22} 、 β_{33} 为机织复合材料3个轴向的线胀系数。

2 变曲率薄壳件数值模拟过程

2.1 多尺度分析模型

机织复合材料是一种高度非均质材料,其性能称为宏观尺度性能,取决于其组分性能及结构参数。对于机织复合材料的细观尺度结构,其可以看作纤维束按相关工艺编织后嵌入在树脂基体中组成。而微观结构可视作单向排列的纤维束增强的复合材料。本文选用斜纹机织复合材料,为得到其在固化过程中的力学性能与热性能,建立了多尺度有限元网格模型如图1。微观尺度单胞模型包括纤维、树脂和界面,根据纤维和纤维束直径计算得到纤维体分比70%,界面为 $0.1 \mu\text{m}$ 的 cohesive 层。使用相关测量工具精确测量构件尺度中细观尺度单胞的经、纬向纤维束的宽度,间隔,织物厚度后,结合斜纹布的编织样式,在TEXGEN中建立了细观尺度单胞的有限元网格模型。

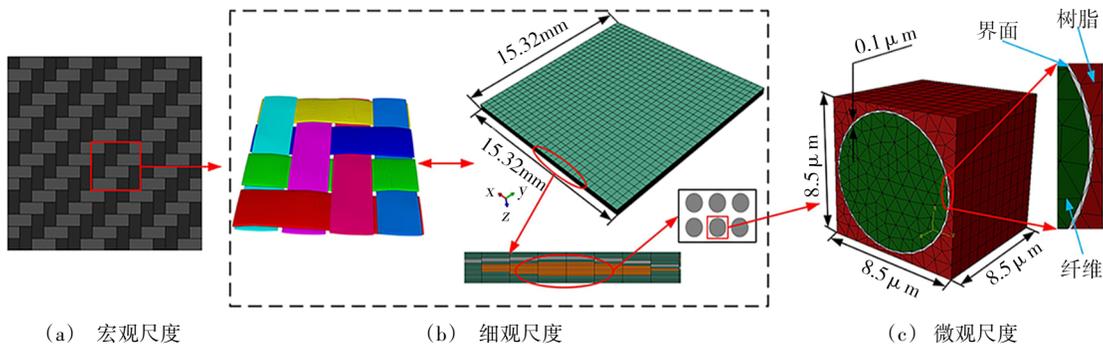


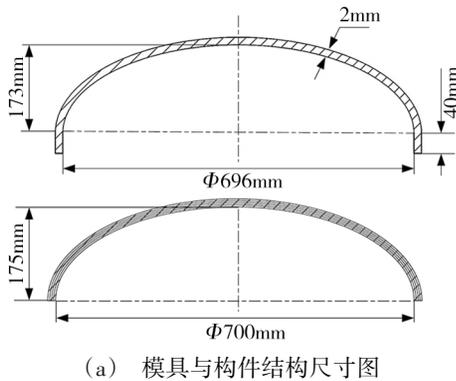
图1 斜纹机织复合材料多尺度有限元单胞模型

Fig. 1 Multiscale finite element single cell model of twill woven composites

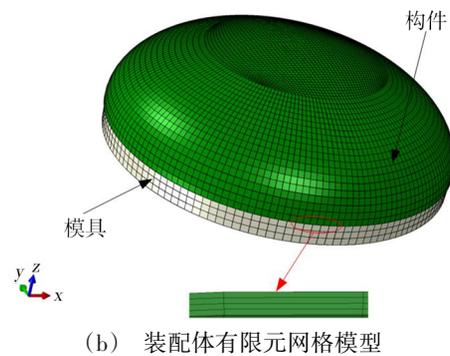
2.2 仿真模型

本文选用工程中广泛应用的变曲率薄壳件进行

仿真计算。模具与构件的结构尺寸图及装配体的有限元网格模型图见图2。



(a) 模具与构件结构尺寸图



(b) 装配体有限元网格模型

图2 结构尺寸图及装配体有限元网格模型图

Fig. 2 Structural dimension diagram and finite element mesh model diagram of assembly

变曲率薄壳件由方程为 $x^2/350^2 + y^2/175^2 = 1$ 的椭圆的上半部分绕对称轴旋转一周形成。构件共4层,每层厚0.5 mm,使用离散坐标系编辑每层的材料方向,材料法向轴方向垂直于各相应单元。模具厚度为2 mm,材料型号选用 invar36。

2.3 实验测定模具构件间剪切力

为确定仿真中变曲率薄壳件与钢制模具间的接触设置,采用实验测定交界面处剪切力的大小。材料使用斜纹布与 IN2 环氧树脂 (Easy Composites 购买)。斜纹布的碳纤维型号为 T300,性能与 AS4 基本一致^[11]。为便于测量,采用常温固化的方式,并在钢制模具外表面及构件最底层不同位置处粘贴应变

片。在实验中共使用16个全桥应变片,分为两组,每组8个,一组粘贴在模具外表面,一组粘贴在构件底层。每组中的8个应变片被均分为4组,分别记作:1- i ($i=1,2$)、2- j ($j=1,2$)、3- m ($m=1,2$)、4- n ($n=1,2$)。每组中的2个应变片粘贴在相同曲率处。模具上应变片的具体粘贴位置如图3所示。构件底层应变片的粘贴位置与模具上相同。共铺放4层斜纹布,在铺放每层斜纹布时保证斜纹布的斜向纹路以及经、纬向与上一层相同,具体的铺层方式见图4。应变片的导线从真空袋中引出后,连接DH3816N应力应变测试分析仪器,后连接计算机,具体连接方式见图5。

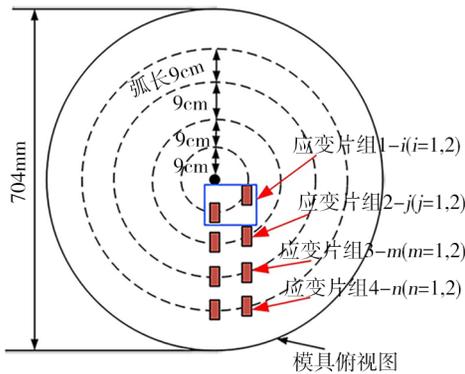


图3 应变片粘贴位置

Fig. 3 Attachment position of strain gauge

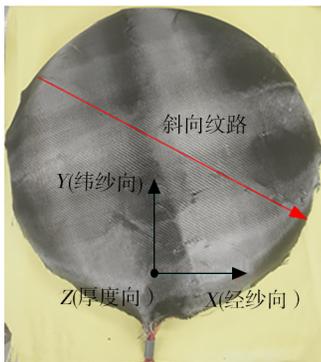


图4 构件的铺层方式

Fig. 4 Laying method of parts



图5 分析系统连接示意图

Fig. 5 Connection schematic of analysis system

测量完成后,对相同曲率处2个应变片的测量值取平均值。薄壳件最底层应变与模具外表面应变的

差值即为剪切应变 ε_1 。剪切应力由式(13)得到:

$$\tau = E_c \varepsilon_1 \quad (13)$$

式中, E_c 为应变片所用材料康铜的弹性模量。

计算完成后,得到薄壳件与模具间的剪切应力见表1。

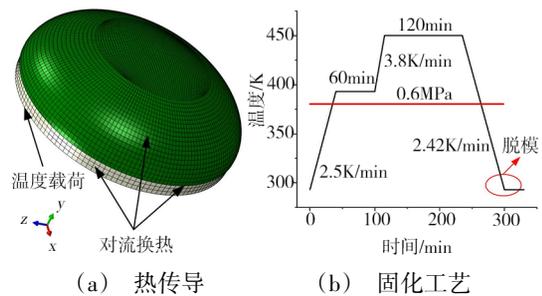
表1 不同位置处剪切应力

Tab. 1 Shear stress at different positions

位置	剪切应力/MPa		
	黏流态	橡胶态	玻璃态
1- i	172.78	167.60	124.90
2- j	83.37	74.08	138.85
3- m	11.87	14.64	15.21
4- n	72.49	100.34	76.01

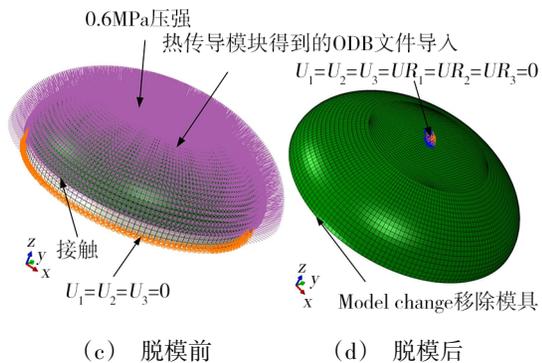
2.4 仿真过程

本文使用的纤维组分为AS4,树脂组分为3501-6,具体的材料性能见文献[12-13]。本文编写了USDFLD、DISP、FILM、HETVAL、UMAT、UEXPEN等子程序来描述机织复合材料在固化过程中的现象,将整个仿真过程分为热传导固化模块与固化变形模块,热传导模块设置一个热传导分析步,固化变形模块共设置两个静力通用分析步,分别模拟薄壳件脱模前和脱模后的状态。具体施加的边界条件见图6。



(a) 热传导

(b) 固化工艺



(c) 脱模前

(d) 脱模后

图6 边界条件

Fig. 6 Boundary conditions

3 分析与讨论

3.1 仿真结果分析

3.1.1 温度场与固化度场分析

热传导模块计算完成后,7 257 s时变曲率薄壳宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第6期

件的温度场、固化度场云图见图7。从图7(a)可看出薄壳件从顶点往外温度逐渐升高,最外圈温度最高。这是因为最外圈底边暴露在外,与热压罐中空气直接进行对流换热,升温较快。因此外圈固化程度相比于与模具接触的面较高。由于构件厚度较薄,因此并无大的温度梯度产生,固化程度也较为均匀。

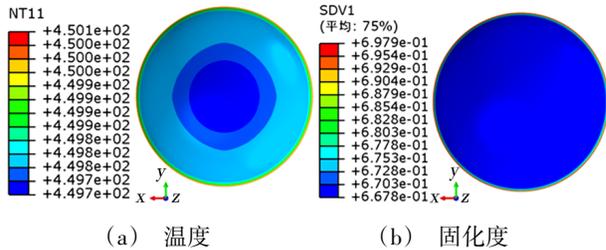


图7 温度与固化度分布云图($t=7\ 257\ s$)

Fig. 7 Cloud plots of temperature and degree of cure ($t=7\ 257\ s$)

图8为构件顶点处温度与固化度的历程曲线,可以看到在两个升温阶段即将结束时的时刻,固化反应速率最快。在第二个保温阶段,固化度接近数值1,表明构件基本固化完成。

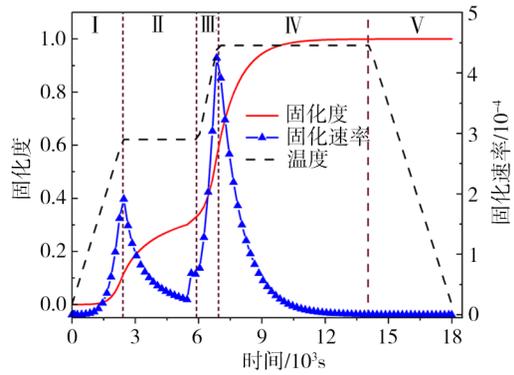


图8 顶点的固化度与固化速率曲线

Fig. 8 Curves of degree of cure and curing rate at the vertex

3.1.2 变形分析

固化模块计算完成后,在脱模后构件的位移云图见图9。可以看到薄壳件的合位移及曲率均呈圆环形带状分布,且从顶点往外,逐渐增大,脱模后构件的最大位移量为 $0.647\ 4\ mm$ 。从 U_1 、 U_2 位移云图中可以看出,薄壳件在脱模后产生向里回弹的变形。构件在脱模前和脱模后沿厚度方向残余应力与残余应变的变化见图10,可以看到最靠近模具的层残余应力降低最多,而残余应变在脱模后也产生了小范围的减小,平均减小 $7.2\ %$ 。

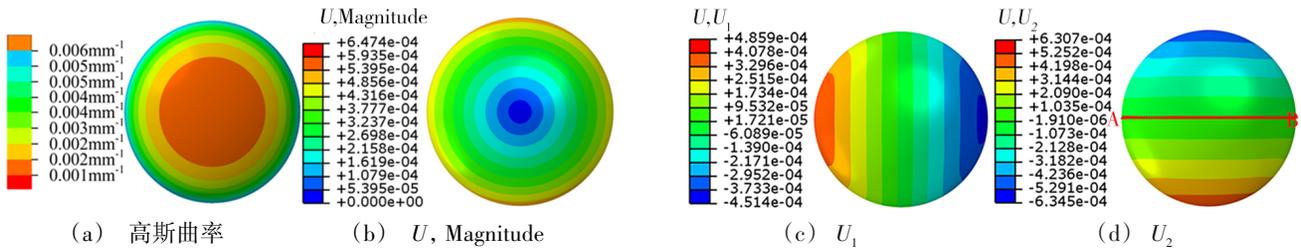


图9 曲率云图、位移云图(脱模后)

Fig. 9 Cloud plots of curvature and displacement (after demolding)

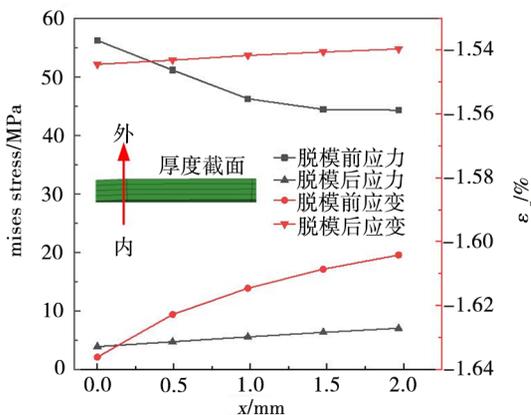


图10 沿厚度方向的残余应力与残余应变

Fig. 10 Residual stress and residual strain along the thickness direction

3.2 曲率对变形的影响

图11给出了曲率及位移沿路径A-B[图9(d)]的

变化曲线。显然路径A-B为半个椭圆,其曲率沿此半个椭圆的对称轴呈对称分布。合位移及 z 向位移的变化趋势与曲率变化趋势相同,即在 $x=350\ mm$ 左侧随着曲率的减小,位移逐渐减小,在对称轴右侧,

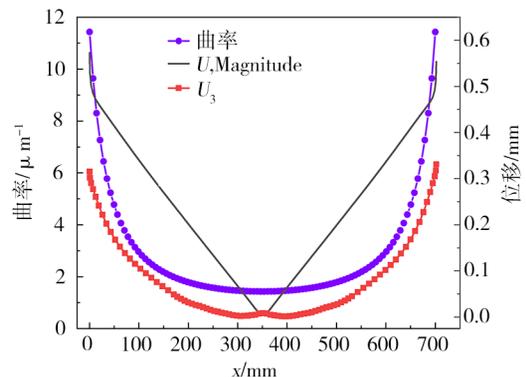


图11 曲率位移曲线

Fig. 11 Curves of curvature and displacement

位移随着曲率增大也逐渐增大,且合位移与 U_3 也大致沿对称轴呈对称分布。 U_3 在顶点处的小凸起是因为在脱模后对顶点处进行了固定约束。变曲率薄壳件上不同曲率处3个方向的最大位移见图12,可以看出 x 向和 y 向的最大位移值在同一曲率时差别不大,而 x,y 向与 z 向的位移值差别很大。曲率为5.23、4.07、2.97、1.99 μm^{-1} 时, x 向的最大位移值比 z 向分别大104%、149%、200%、403%。

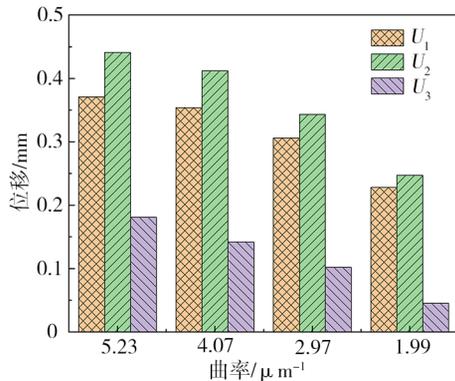


图12 不同曲率处3个方向的最大位移
Fig. 12 Maximum displacement in 3 directions at different curvatures

3.3 构件厚度对变形的影响

为便于分析构件厚度对变形的影响,建立A、B两组含曲率层合板。A组中6个层合板的曲率半径分别为100、200、300、400、500、600 mm;尺寸均为长300 mm、宽50 mm、厚度为4层,每层0.3 mm。B组的与A组中仅厚度不同,B组中的构件为8层。A组中曲率半径为300 mm的层合板与模具的装配体有限元模型如图13所示。由于所建立的层合板的曲率基本在变曲率薄壳件的曲率变化范围内或与之相近,所以层合板与模具间的接触仍采用2.3节中实验测定的数据进行设置。具体的固化模拟过程与变曲率薄壳件的模拟过程相同,此处不再赘述。

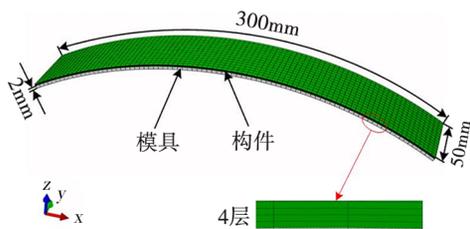


图13 装配体有限元模型
Fig. 13 Finite element model of assembly

图14为两组中曲率半径为300 mm的层合板脱模后的位移云图,可以看到含曲率层合板在脱模后产生回弹变形。

以构件 x 向的最大位移作为最大翘曲位移,得到

两组构件的最大翘曲位移见图15,可以看到层合板的回弹变形随着曲率半径的增大(曲率的减小)而减小;相同曲率下的层合板,随着厚度的增加,回弹变形减小。原因是构件厚度同曲率均为结构参数,在曲率一定时,随着厚度增加,构件的刚度和截面的惯性矩均增大,从而脱模后残余应力释放引起的层合板变形比较小。

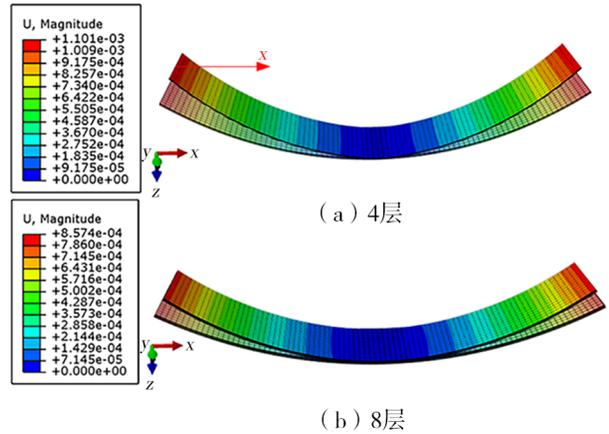


图14 层合板位移云图
Fig. 14 Displacement plots of laminate

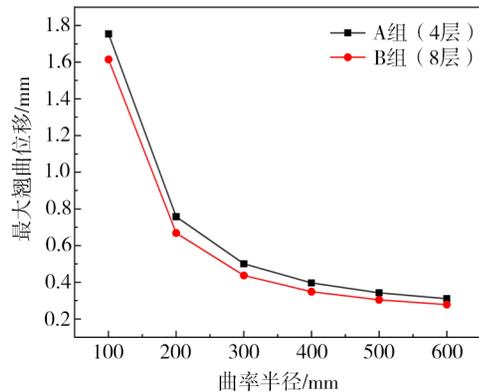


图15 层合板的最大翘曲位移
Fig. 15 Maximum warpage displacement of laminate

4 结论

以变曲率薄壳件及含曲率层合板为研究对象,考虑模具作用,分析了构件的温度场、固化度场、位移场以及应力应变场的演化。

(1)对于厚度较薄的机织复合材料结构件,固化过程中不会有太大的温度梯度产生,其固化程度也较为均匀。

(2)变曲率薄壳件在脱模后产生向里回弹的变形,其位移同曲率变化均呈圆环形带状对称分布,从顶点往外逐渐增大。且同一曲率处,薄壳件经纬纱方向的最大位移值比 z 向平均大214%。

(3)曲率参数对构件的固化变形有一定的影响,薄壳件上曲率为5.23 μm^{-1} 处 x,y,z 向的最大位移比1.99 μm^{-1} 处分别大63%、79%、299%,可见适当减小

曲率,有利于减小构件的变形。

(4)对比不同厚度的含曲率层合板发现,相同曲率下,适当增加构件厚度,可有效减小构件在脱模后的变形。

参考文献

[1] 唐闻远,许英杰,孙勇毅,等. 基于温度曲线优化的复合材料热压罐固化时间与固化质量协同控制[J]. 材料工程, 2021,49(09):142-150.

TANG Wenyuan, XU Yingjie, SUN Yongyi, et al. Simultaneous control of curing time and curing quality of autoclave processed composite based on optimization of temperature profile [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49 (09) : 142-150.

[2] 卫宇璇,张明,刘佳,等. 基于自动铺放技术的变刚度复合材料层合板固化变形特性[J]. 复合材料学报,2022,39(05):2460-2469.

WEI Yuxuan, ZHANG Ming, LIU Jia, et al. Process-induced deformation characteristics of variable stiffness composite laminates based on automatic placement technology [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39 (05) : 2460-2469.

[3] BELLINI C, SORRENTINO L, POLINI W, et al. Spring-in analysis of CFRP thin laminates: numerical and experimental results [J]. Composite Structures, 2017, 173: 17-24.

[4] 刘德博,湛利华,丁星星,等. 模具表面状态对复合材料构件固化变形的影响[J]. 宇航材料工艺,2019,49(01): 63-67.

LIU Debo, ZHAN Lihua, DING Xingxing, et al. Influence of tool surface condition on cure-induced deformation of composite structure [J]. Aerospace Materials and Technology, 2019,49(01):63-67.

[5] 乔巍,姚卫星. 剪滞效应对复合材料固化变形影响的数值分析[J]. 中国机械工程,2021,32(05):611-616+623.

QIAO Wei, YAO Weixing. Numerical analysis of shear-lag effect on curing deformation of composites[J]. China Mechanical Engineering, 2021,32(05):611-616,623.

[6] 薛亚红,陈继刚,闫世程,等. 二维机织复合材料力学分析中的周期性边界条件研究[J]. 纺织学报,2016,37(09):

70-77.

XUE Yahong, CHEN Jigang, YAN Shicheng, et al. Periodic boundary conditions for mechanical property analysis of 2-D woven fabric composite [J]. Journal of Textile Research, 2016,37(09):70-77.

[7] YUAN Zhenyi, WANG Yongjun, YANG Guigeng, et al. Evolution of curing residual stresses in composite using multi-scale method[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 155:49-61.

[8] BOGETTI T A, GILLESPIE J W. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates [J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26 (5) : 626-660.

[9] ZHANG Guiming, WANG Jihui, NI Aiqing. Process-induced stress and deformation of variable-stiffness composite cylinders during curing[J]. Materials, 2019,12(2):259.

[10] WANG Qi, LI Tong, YANG Xufeng, et al. Multiscale numerical and experimental investigation into the evolution of process-induced residual strain/stress in 3D woven composite [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020,135: 105913.

[11] 唐邦铭. AS4 碳纤维及复合材料[J]. 材料工程, 1996,(02):30-31,35.

TANG Bangming. AS4 Carbon fiber and composite materials [J]. Journal of Materials Engineering, 1996, (02):30-31+35.

[12] 马云荣,贺继林,李栋,等. 树脂基复合材料曲面结构件固化变形数值模拟[J]. 复合材料学报,2015,32(03): 874-880.

MA Yunrong, HE Jilin, LI Dong, et al. Numerical simulation of curing deformation of resin matrix composite curved structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015,32(03): 874-880.

[13] 闵荣,元振毅,王永军,等. 基于黏弹性本构模型的热固性树脂基复合材料固化变形数值仿真模型[J]. 复合材料学报,2017,34(10):2254-2262.

MIN Rong, YUAN Zhenyi, WANG Yongjun, et al. Numerical simulation for curing deformation of resin matrix thermosetting composites using viscoelastic constitutive model [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34 (10) : 2254-2262.