

偏置抛物面卫星天线反射器固化变形分析

牛雪娟^{1,2} 刘江雨¹ 李辰阳¹

(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 偏置抛物面卫星天线反射器由碳纤维预浸料铺制而成,在固化过程中通常会出现热变形、固化收缩变形及机械变形等,且过大的变形会导致反射器反射信号产生偏差。为了有效预测天线反射器在热压罐固化过程中的变形,本文采用线性黏弹性本构模型表征纤维增强复合材料在固化过程中的应力-应变关系。采用顺序热-力耦合分析法,对天线反射器内部温度场、固化度场及位移场的分布进行建模,并对铺层结构及降温速率对天线反射器变形的影响开展研究。结果表明:相较于纯0°铺层结构,正交和准各向同性铺层天线反射器z向变形量减小了51%以上,且降低降温速率有助于提高天线反射器的固化型面变形。

关键词 天线反射器,碳纤维预浸料,固化变形,顺序热-力耦合

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.009

Offset Paraboloid Satellite Antenna Reflector Curing Deformation Analysis

NIU Xuejuan^{1,2} LIU Jiangyu¹ LI Chenyang¹

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

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

Abstract Offset paraboloid antenna reflectors (PSARs) made of carbon fiber prepreps are usually subject to thermal deformation, curing shrinkage deformation and mechanical deformation during the curing process. Excessive deformation will lead to the deviation of transmission signals. In order to effectively predict the deformation of the antenna reflector during the preparation process in a autoclave, a linear viscoelastic constitutive model is adopted to characterize the stress-strain relationship of the fiber reinforced composite material during the curing process. The temperature field, curing degree field and displacement field of the antenna reflector are modeled using the sequential thermal-force coupling analysis method, and the effects of the layup structure and the cooling rate on the deformation of the antenna reflector are analyzed. The analytical results show that the deformation in z-direction of PSARs with orthotropic or semi-isotropic layups is reduced by more than 51% compared with the zero-layup PSARs, and the reduced cooling rate could also help increase the shape accuracy of PSARs.

Key words Antenna reflector, Carbon fiber prepreg, Curing deformation, Viscoelastic

0 引言

偏置抛物面卫星天线反射器的工作原理是由一点发射信号通过反射面进行反射,形成平行信号射向接受卫星,制备过程中过大的变形会使天线反射器的信号产生偏转,因此需要对天线反射器的变形进行合理预测并制定相应的优化方案。

在碳纤维制品的固化变形研究中,相较于试验分析仿真分析因其灵活性高、时间短、成本低等优点被广泛应用,目前国内外已有不少针对固化变形的仿真分析研究。K. K. YEONG等^[1]试验测定了3501-

6树脂的一系列黏弹性行为数据,为复合材料黏弹性本构模型研究奠定了良好的基础。闵荣等^[2]根据黏弹性本构模型对C型的复合材料结构件进行了仿真与实验对比,验证了黏弹性本构模型预测的有效性。X. Y. LI等^[3]研究了在热传导过程中不同材质的模具对复合材料结构件温度梯度的影响。元振毅等^[4]通过引入层间剪切层的概念,模拟了模具与构件之间相互作用对变形的影响,使固化变形预测更加符合实际。祝君军等^[5]对比了阴模模具和阳模模具对V型复合材料结构件固化变形的影响,得出使用阳模

收稿日期:2021-04-30

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52175110)

第一作者简介: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

模具会比使用阴模模具变形要大的结论。而针对天线反射器的研究如下:邢思远等^[6]模拟了偏置抛物面卫星天线反射器在服役过程中不同工况温度下的热变形;江文剑^[7]建立了反射器模具的补偿公式,使模具在反射器固化成型的时候恰好变形到理论型面。

上述研究中的模型大多为平板型、L型以及C型等简单形状结构件的固化变形。对于偏置抛物面卫星天线反射器的研究也多为服役过程中的热变形研究,而针对天线反射器在制造过程中固化变形的研究较少。本文采用顺序热-力耦合的方式模拟天线反射器的固化变形,通过施加不同的边界条件模拟了天线反射器在热压罐中加热固化和脱模之后两种状态,考虑了脱模之后残余应力的释放对变形的影响,为天线反射器变形的预测以及试验提供了可靠的依据。

1 理论模型

1.1 反射器的热传导-固化模型

碳纤维复合材料在固化过程中的二阶偏微分热传导控制方程表达式^[8]为:

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

式中, $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为复合材料在 x, y, z 方向上的热传导系数; T 为固化工艺温度; ρ_c 为密度; c_c 为比热容; Q 为 t 时刻复合材料内部产热量,其表达式为:

$$Q = \rho_r V_r H_r \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

式中, ρ_r 为树脂密度; V_r 为树脂体积分数; H_r 为单位质量树脂的产热量; α 为固化度; $\frac{d\alpha}{dt}$ 为固化速率。

1.2 反射器固化过程中的应力-应变模型

树脂为高分子聚合物材料,在固化过程中表现出明显的黏弹性行为,在目前的研究中通常采用广义Maxwell模型^[9]描述树脂材料的力学松弛行为。广义Maxwell模型如图1所示,广义Maxwell模型由 n 个Maxwell单元和一个弹性模量为 E_∞ 的弹簧并联组成。其中, n 个Maxwell单元模拟了聚合物运动单元的多重性;最后一个弹簧为平衡模量,表征聚合物材料由于受到网络间交联点的限制,使应力松弛至某一平衡值就不再变化这一特征。对于广义Maxwell模型,在恒定初始应变作用下,其弹性模量表达式为:

$$E(t) = E_\infty + \sum_{m=1}^n w_m (E_0 - E_\infty) e^{-\frac{t}{\tau_m}} \quad (3)$$

式中, E_0 为广义Maxwell模型未发生松弛时的模量; E_∞ 为广义Maxwell模型完全松弛时的模量; w_m 为第 m 个Maxwell单元的权重系数; $\tau_m = \eta_m / E_m$ 为第 m 个Maxwell单元的松弛时间。

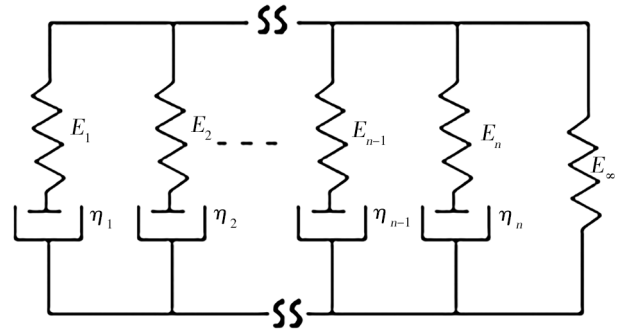


图1 广义Maxwell模型

Fig. 1 Generalized Maxwell model

在固化过程中,由于温度与固化度会随时间变化,因此需要考虑温度与固化度对材料黏弹性行为的影响。线性黏弹性材料的本构方程^[2,10]表示为:

$$\sigma_i(t) = \int_0^t C_{ij} (a_c, T_c, \xi^t - \xi^t) \frac{\partial \varepsilon_j^{eff}}{\partial \tau} d\tau \quad (4)$$

式中, ξ^t 和 ξ^t 为折算时间; a_c, T_c 分别为参考固化度和参考温度; ε_j^{eff} 为有效应变增量; C_{ij} 为刚度矩阵,其表达式为:

$$C_{ij} = C_{ij}^\infty + \sum_{m=1}^{n-1} W_m (C_{ij}^0 - C_{ij}^\infty) e^{-\frac{\xi}{\tau_m}} \quad (5)$$

由于公式(4)不能直接在有限元软件中执行,因此将其转换为应力增量表达式:

$$\Delta \sigma_i^{t+\Delta t} = \sigma_i^{t+\Delta t} - \sigma_i^t = C_{ij}^* \Delta \varepsilon_j^{t+\Delta t} + \Delta \sigma_i^R \quad (6)$$

式中,

$$C_{ij}^* = C_{ij}^\infty + \sum_{m=1}^{n-1} \bar{C}_{ij} W_m \frac{a_T \tau_m}{\Delta t} (1 - e^{-\frac{\Delta \xi^{t+\Delta t}}{\tau_m} - 1}) \quad (7)$$

$$\Delta \sigma_i^R = \sum_{m=1}^{n-1} S_{im}^t e^{-\frac{\Delta \xi^{t+\Delta t}}{\tau_m} - 1} \quad (8)$$

式中, S_{im}^t 为历史状态变量,其表达式为:

$$S_{im}^t = e^{-\frac{\Delta t}{\tau_m}} S_{im}^{t-\Delta t} + \bar{C}_{ij} W_m \frac{a_T \tau_m \Delta \varepsilon_j^t}{\Delta t} (1 - e^{-\frac{\Delta \xi^t}{\tau_m}}) \quad (9)$$

2 天线反射器

2.1 有限元模型建立

本文所用的偏置抛物面卫星天线反射器模型^[11]由一抛物线绕旋转轴一周所形成的抛物面与一圆柱面相截而成。抛物面的母线方程为 $Y^2 = 4 \times F \times X$,焦点坐标为(100,0)。圆柱面直径为350 mm,与回旋抛物面中心的偏置距离为219.76 mm。所截的反射器长轴为520 mm,短轴为350 mm。对天线反射器进行有限元建模时,将天线反射器模型导入ABAQUS前处理模块,划分网格后创建为网格部件。然后将网格部件进行实体网格偏移,每层厚度为0.125 mm,共16层,28 320个单元。模型中使用离散坐标系定义每一层的材料方向,其中材料法向轴方向垂直于模型中各个单元,主轴方向定义为 x 轴方向。主轴沿

法向轴旋转不同角度即可得到不同的铺层方向。图2为反射器几何尺寸及45°铺层结构的网格模型示意图,其中 x' 为铺层在该点处的纤维方向, z' 为其局部曲面法向。

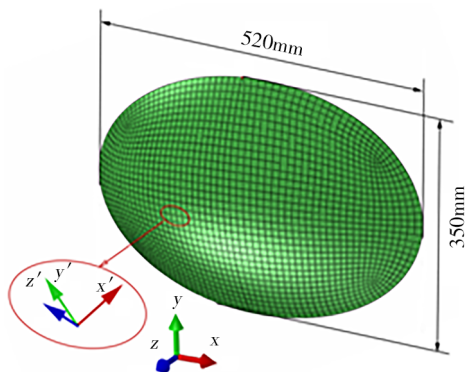


图2 反射器几何尺寸及45°铺层网格模型
Fig. 2 Reflector geometry and 45° grid model

2.2 固化变形相关的用户子程序设计

在进行天线反射器固化变形仿真时,温度边界条件、材料内部生热及黏弹性本构模型都具有时变

特性。仅靠Abaqus软件自身并不能直接定义相关参数,需用Fortran语言编写对应的用户子程序来实现。

在进行热传导-固化分析时,使用DISP子程序定义固化工序温度。使用FILM子程序定义对流换热边界条件,主要定义对流换热系数和环境温度SINK值。其中,对流换热系数 $H(1)=38\text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$ ^[4],SINK值与工艺温度值一致。使用USDFLD子程序定义固化度,并通过状态变量STATEV与定义内部生热的子程序HETVAL交换数据。使用HETVAL子程序定义固化动力学方程中的固化速率、固化度和材料的内部生热。

天线反射器在热压罐中固化成型时,随着温度载荷升高固化度逐步增加,复合材料力学本构关系不断变化,具有典型的黏弹性特性。本文依据式(6)~式(9),通过UMAT子程序为不断变化的本构模型提供应力增量更新和雅可比矩阵 $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ 。并使用UEXPAN子程序定义复合材料在3个方向上的化学收缩应变和热应变特性。本文中预浸料型号为AS4/3501-6,其在未发生松弛时的材料参数见表1。

表1 AS4/3501-6预浸料的未松弛材料参数^[2,12]

Tab. 1 Unrelaxed material parameters of AS4/3501-6 composite^[2,12]

弹性模量/GPa		剪切模量/GPa		泊松比		线胀系数/ $10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$		化学收缩系数/ $10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	
纵向	横向	面内	横向	面内	横向	纵向	横向	纵向	横向
126	8.30	4.10	2.80	0.25	0.35	0.50	35.30	-167	-8 810

2.3 基于顺序热-力耦合的固化变形模拟

本文采用顺序热-力耦合的方法模拟天线反射器的固化变形,分别通过热传导-固化模块和固化变形两个模块进行分析。本文先以非对称铺层方式($[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_4$)为例进行分析,材料选用研究较为完善的AS4/3501-6预浸料,关于3501-6树脂固化动力学所需的各参数值请参考文献[2]。在热传导-固化分析时使用热传递分析步,单元类型为DC3D8,固化工序温度变化见图3。起始温度为293 K,以2.5 K/min的速率升温至393 K后保温60 min;然后以3.8 K/min的速率升温至450 K后保温120 min;最后以-2.42 K/min的速率降温至293 K。

数值模拟时,对天线反射器下表面施加温度载荷,其余面定义热对流交换条件,所施加的边界条件见图4。在分析固化变形模块时,共设置两个静力通用分析步:一个用于分析步反射器在固化过程中的变形;另一个用于模拟脱模后残余应力释放引起的变形。由于天线反射器为偏置抛物面结构,曲面的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第6期

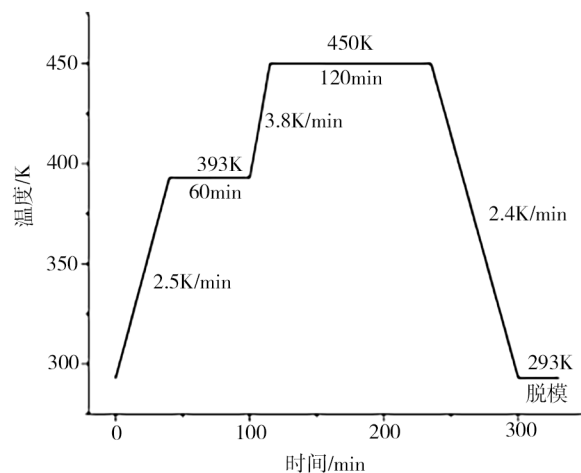


图3 固化工序中温度曲线

Fig. 3 Temperature curve in curing process

变曲率特征使其在固化过程中相对于模具的位移量小,因此,在脱模之前将天线反射器的底面固定,上表面施加0.6 MPa的压力。脱模之前的边界条件见图5,脱模之后固定模型下表面长轴与短轴交点。

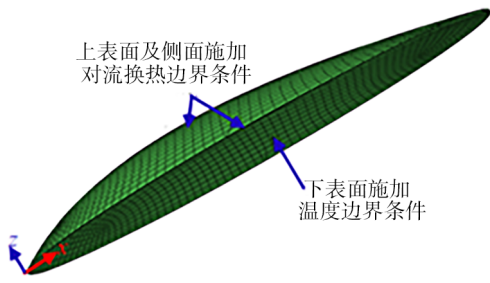


图4 热传导-固化分析步边界条件

Fig. 4 Thermal conduction-curing boundary conditions

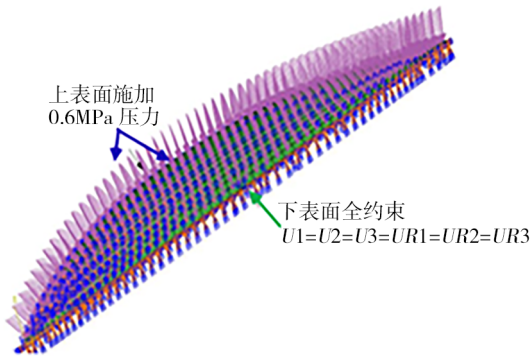


图5 脱模之前边界条件

Fig. 5 Boundary conditions before demolding

3 结果分析

3.1 天线反射器温度与固化度分析

热传导-固化模块求解完成后,得到在固化过程中任意时刻反射器的温度、固化度分布。第1 013 s的天线反射器温度场分布云图如图6所示。可知,天线反射器各处的温度分布较为均匀,没有出现明显的温度梯度。图7为天线反射器模型中心点的温度与固化度随时间变化的曲线。从固化度曲线中可以看出,固化度在两个升温阶段固化速率较大,在达到第二个保温阶段时天线反射器的固化基本完成。由温度曲线可知,由于反射器厚度较小,反射器内部的温度与所施加的温度载荷基本一致。

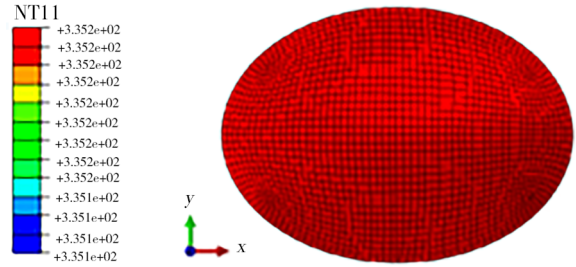


图6 温度场分布图($t=1\ 013\ s$)

Fig. 6 Temperature field distribution map ($t=1\ 013\ s$)

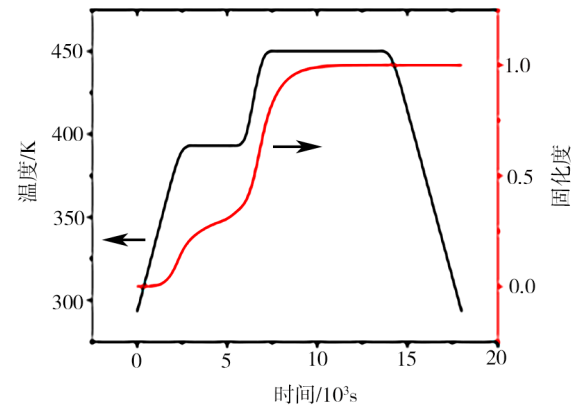


图7 固化度与温度曲线

Fig. 7 Curing degree and temperature curve

3.2 天线反射器固化变形分析

在分析反射器固化变形模块时,反射器模型的节点编号、网格数量需要与热传导-固化模块的反射器模型完全一致,这样便于将热传导-固化模块得到的温度场后处理结果 odb 文件作为温度载荷导入固化变形模块中的预定义场。固化变形模块求解后得出天线反射器脱模前后 z 方向位移云图如图8所示。可知,反射器在脱模之前由于受到压强载荷及固化收缩的影响,使反射器在 z 轴产生压缩变形;在脱模之后反射器出现翘曲变形,且沿反射器中心成对角分布,最大变形量为 2.3 mm 左右。可以看出,非对称铺层结构的天线反射器的固化变形量较大。

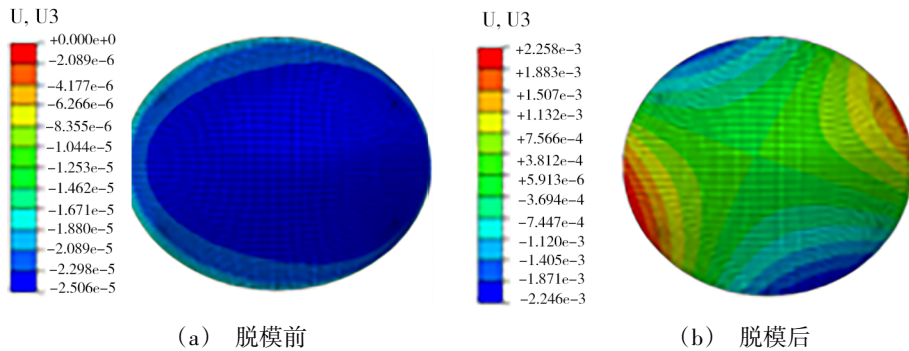


图8 反射器 z 方向变形图

Fig. 8 Reflector z -direction deformation diagram

图9展示了天线反射器上表面短轴端点A在 z 方向应变值随时间的变化。在第 I 阶段,树脂处于流动状态,反射器受热膨胀使应变到达 5 mm 左右。第

II 阶段处于保温阶段,由于树脂的固化收缩,使应变值减小到 1 mm 左右。第 III 阶段中,热膨胀与固化收缩共同作用,但是固化收缩在这一阶段作用更为显

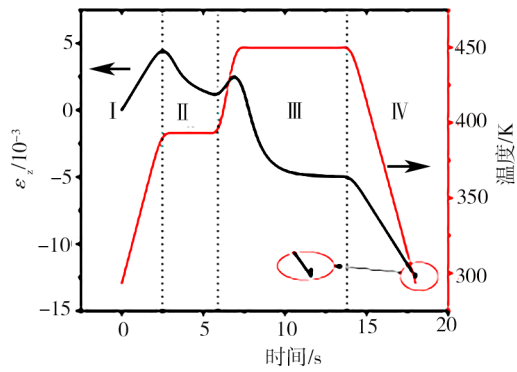


图9 反射器上表面短轴端点A在z方向应变曲线

Fig. 9 Strain curve in z-direction at point A on the upper surface of the reflector

著。因此使应变曲线呈现出先略微增大然后迅速减小的趋势。在第IV阶段中,降温使反射器产生热收

缩应变,应变值进一步迅速降低。最后,在脱模之后反射器底面的约束解除,残余应力释放,使应变值产生阶跃性变化,z方向最终的应变值为-12 mm。本文研究得出的脱模之前应变曲线走势与文献[13]中基本一致,并且本文考虑了脱模之后残余应力释放对变形的影响。综上,本文所建立的天线反射器有限元模型具有较高的可靠性。

3.3 影响变形的因素分析

为了分析不同铺层结构和固化工艺对天线反射器变形的影响,本文对纯 0° 铺层($[0^\circ]_{16}$)、正交铺层($[0^\circ/90^\circ]_{4s}$)和准各向同性铺层($[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$)三种对称铺层结构进行对比分析。不同铺层方式的天线反射器脱模之后的位移如图10所示。

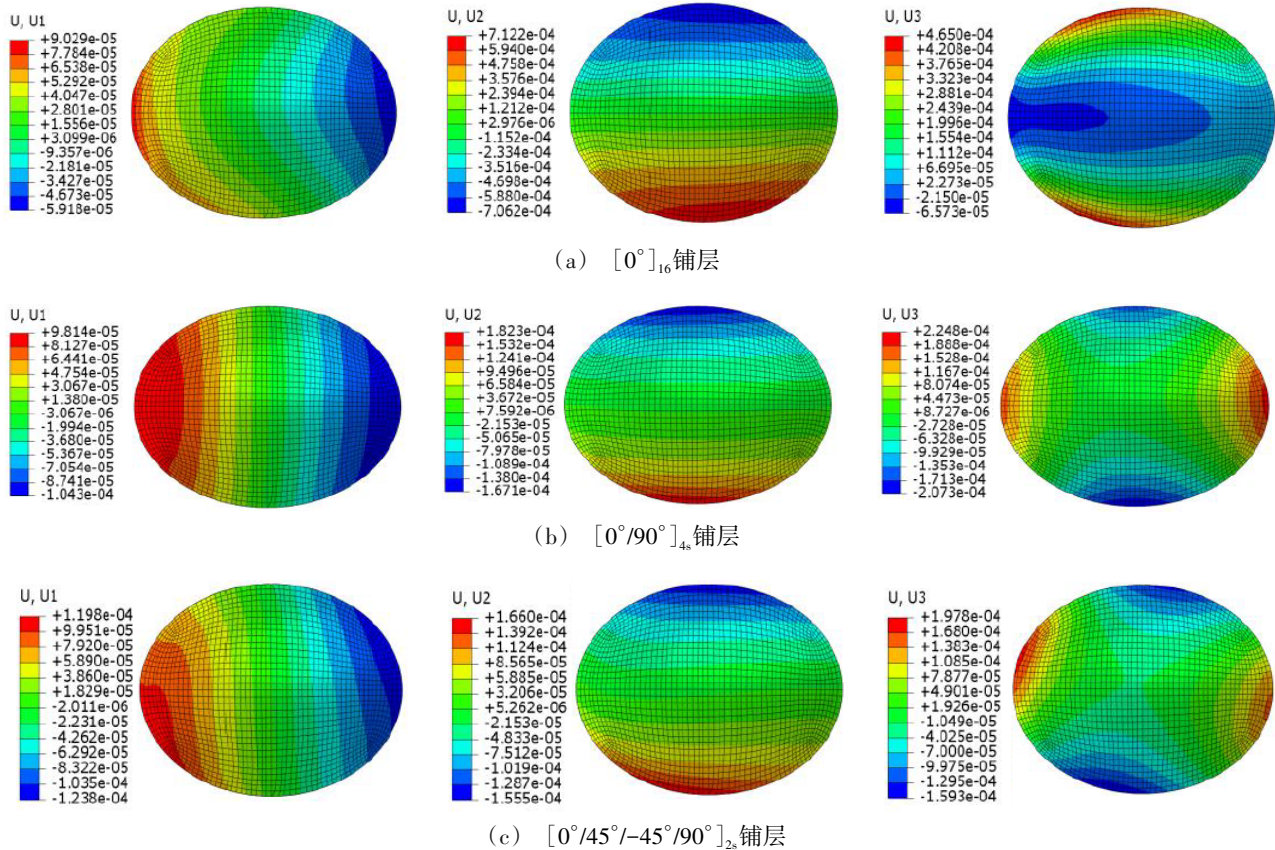


图10 不同铺层方式在x、y、z方向上的变形图

Fig. 10 Deformation diagram in x, y and z directions for different layering methods

由图10可得,纯 0° 铺层的天线反射器变形量在x方向上最小。但在y方向上,纯 0° 铺层的反射器相较于正交对称铺层的反射器发生了严重的固化收缩变形,最大变形量在0.7 mm左右。在z方向上,纯 0° 铺层的反射器变形主要发生在短轴两侧,正交对称铺层的反射器变形位置主要发生在长、短轴端点附近。两种正交对称铺层结构中,准各向同性铺层的反射器变形量相对较小,但是由于 $\pm 45^\circ$ 铺层的原因,使z方向最大变形位置沿 $\pm 45^\circ$ 方向发生了偏移。3种不

同的铺层结构中,正交对称铺层结构比纯 0° 铺层结构在z方向上的最大变形减小了51%以上。造成这种现象的原因是固化过程中构件会产生内应力,而正交铺层结构在厚度方向上对称,层间产生的应力能够被部分抵消。

为分析降温速率对变形的影响,以正交铺层天线反射器为例,采用3种降温速率进行对比。图11为3种降温速率下的反射器上表面短轴端点A在z方向的应变曲线。可知,当降温速率分别为-2.4、-2、-

1 K/min时,对应的应变值依次减小,所以适当降低降温速率有助于减小天线反射器的固化变形。

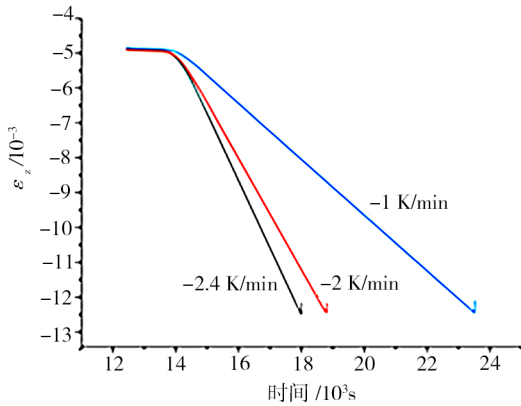


图 11 不同降温速率下 z 方向应变曲线图

Fig. 11 Strain curve in z -direction under different cooling rates

4 结论

(1) 本文将整个制备工艺分为脱模前、脱模后两个工序,并分别设置不同的边界条件和载荷类型,模拟了天线反射器在固化过程中及脱模后的变形行为,从而使天线反射器的变形预测更加符合实际。

(2) 对比分析不同铺层结构对固化变形的影响得出,采用正交对称铺层结构的天线反射器在 z 方向上变形量比纯 0° 铺层结构的天线反射器变形量减小了 51% 以上。

(3) 对比 3 种不同的降温速率得出,降温速率越小, z 方向上的应变值越小。因此,降低降温速率有助于减小天线反射器的固化变形。

参考文献

[1] YEONG K K, SCOTT R W. Stress relaxation behavior of 3501-6 epoxy resin during cure [J]. *Polymer Engineering & Science*, 1996, 36(23): 2852-2862.

[2] 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.

[3] LI Xiaoyang, WANG Jihui, LI Shuxin, et al. Cure-induced temperature gradient in laminated composite plate: Numerical simulation and experimental measurement [J]. *Composite Structures*, 2020, 253(6): 112822.

[4] 元振毅,王永军,王俊彪,等. 基于模具-制件相互作用的复合材料制件固化变形数值模型[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(04): 902-909.

YUAN Zhenyi, WANG Yongjun, WANG Junbiao, et al. Numerical model on curing deformation of composite part based on tool-part interaction [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,

2016, 33(04): 902-909.

[5] 祝君军,文琼华,罗辑,等. 模具形式对 V 型结构复合材料固化变形的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(05): 44-48.

ZHU Junjun, WEN Qionghua, LUO Ji, et al. Effect of mold forming method on curing deformation of V-shaped composites [J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2018, 48(05): 44-48.

[6] 邢思远,刘洪新,彭志刚,等. 高精度复合材料天线反射器结构与热变形仿真优化分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(08): 66-73.

XING Siyuan, LIU Hongxin, PENG Zhigang, et al. Simulation and optimization structure and thermal deformation of high precision composite antenna reflector [J]. *Fiber Reinforced Plastics /Composites*, 2018(08): 66-73.

[7] 江文剑,史明,杨亚宁. 一种高精度偏置反射面天线模具设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(04): 653-657.

JIANG Wenjian, SHI Ming, YANG Yaning. A high-precision mould design method of offset-reflector antenna [J]. *Journal of Terahertz Science & Electronic Information Technology*, 2018, 16(04): 653-657.

[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] 王子川,林福严,刘培伦,等. 根据松弛模量求近似松弛谱的方法研究[J]. *煤炭技术*, 2021, 40(01): 156-158.

WANG Zichuan, LIN Fuyan, LIU Peilun, et al. Research on solving method of approximate spectrum based on relaxation modulus [J]. *Coal Technology*, 2021, 40(01): 156-158.

[10] 乔巍,姚卫星,黄杰. 考虑模具和黏弹性的复合材料固化变形数值模型[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(10): 67-74.

QIAO Wei, YAO Weixing, HUANG Jie. Numerical model of process-induced deformation in composite parts considering mould and material viscoelasticity [J]. *Composites Science & Engineering*, 2020(10): 67-74.

[11] 陆炳荣. 偏置抛物面的几个几何设计计算问题[J]. *电子机械工程*, 1999(01): 50-53.

LU Bingrong. Some problems to be solved in geometric design and calculation of the offset paraboloid [J]. *Electronic Machinery Engineering*, 1999(01): 50-53.

[12] SCOTT R. White, YEONG K. Kim. Process-induced stress relaxation analysis of AS4/3501-6 laminate [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1997, 16(1): 2-16.

[13] 刘哲. 热固性树脂基复合材料固化变形数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 45-46.

LIU Zhe. Numerical simulation of curing deformation of thermosetting resin matrix composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 45-46.