

典型复合材料结构固化变形仿真预测与控制验证

杨智勇¹ 左小彪¹ 范春浩² 易美军¹ 鲍益东² 王超¹
胡俊山² 李艳¹

(1 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(2 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

文 摘 针对典型复合材料结构固化成型过程中变形难以控制的问题, 本文对典型复合材料结构的固化变形进行仿真预测, 从固化工艺和模具补偿两方面对固化变形加以控制和验证。固化工艺方面以各设计点变形数据为基础确定了最优固化工艺曲线, 模具补偿方面提出了一种构件有限元模型自适应调整的方法, 综合考虑固化工艺参数与模具型面补偿采用了一种基于全局补偿量的协同控制方法。结果表明, 通过仿真模拟L形构件的固化变形误差为12.4%, 借助响应面优化算法得到的L形构件最优固化工艺曲线其固化变形预测值与各试验设计点最大变形的最小值偏差不超过3.3%; T形加筋壁板有限元模型经自适应调整后, 对于下表面与目标型面之间的偏差距离, 数值模拟值与试验测量值的最大相对误差为17.20%。通过全局补偿量的协同控制方法对半筒形壁板的模具进行补偿, 其固化变形最大值相比于传统单一模具型面补偿控制方法降低了接近90%。

关键词 固化变形, 仿真预测, 最优固化工艺, 自适应调整, 协同控制, 验证

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.02.006

Simulation Prediction and Control Verification of Curing Deformation on Typical Composite Structure

YANG Zhiyong¹ ZUO Xiaobiao¹ FAN Chunhao² YI Meijun¹ BAO Yidong²
WANG Chao¹ HU Junshan² LI Yan¹

(1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract In response to the problem of difficult control of deformation during the curing process of typical composite material structures, the curing deformation of typical composite structures was simulated and predicted, and the curing deformation was controlled and verified from two aspects: curing process and die compensation. In terms of curing process, the optimal curing process curve was determined based on the deformation data of each design point. In terms of mold compensation, a method of adaptive adjustment of the finite element model of the component was proposed. A collaborative control method based on global compensation was adopted to comprehensively consider the curing process parameters and mold surface compensation. The results show that the solidification deformation error of L-shaped components through simulation is 12.4%. The optimal solidification process curve of L-shaped components obtained by response surface optimization algorithm has a deviation of no more than 3.3% between the predicted solidification deformation value and the minimum maximum deformation value at each experimental design point. After adaptive adjustment of the T-shaped reinforced wall panel finite element model, the maximum relative error between the numerical simulation value and the experimental measurement value for the deviation distance between the lower surface and the target profile is 17.20%. The mold of the semi cylindrical wall panel is compensated by the collaborative control method of global compensation, and

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 基础科研计划项目

第一作者简介: 杨智勇, 1984年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事先进树脂基复合材料基础与应用研究工作。E-mail: yzy512007@126.com

the maximum curing deformation is reduced by nearly 90% compared with the traditional single mold surface compensation control method.

Key words Curing deformation, Simulation and prediction, The optimal curing process, Adaptive adjustment, Synergetic control, Verification

0 引言

先进树脂基复合材料具有高比强度、高比模量、抗疲劳性能好及多功能集成等特点,在航空、航天、电子等领域的应用广泛且不断拓增^[1]。复合材料整体化设计与制造可有效减少系统零件和紧固件数目、减轻结构整体质量、降低成型和装配成本,是结构系统轻量化的应用发展趋势。

然而复合材料成型工艺多采用调定高温高压参数的热压固化工艺,固化后内部存在的残余应力会导致结构脱模后与设计形状不一致,即固化后变形^[2]。复合材料结构件的成型质量直接影响构件总装的配合精度与服役性能,复合材料结构尺寸越大、复杂程度越高、整体化程度越高,固化后变形影响越明显,因此,面向航天器轻质结构体系,典型复合材料结构的固化变形机理及有效控制技术是复合材料结构产品应用中必须掌握的关键技术。采用有限元模型模拟复合材料构件固化工艺过程,预测复合材料的固化变形趋势,进而提出变形控制方法,提高构件的成型精度。

当前对于复合材料固化变形的仿真预测和控制方法研究主要集中在复合材料固化工艺和模具补偿等方面。在固化工艺方面,马飞等^[3]通过延长保温时间使酚醛树脂充分反应的方法,从而提升了复合材料结构固化的均匀性,改善了成型精度。李艳霞等^[4]通过改变工艺参数并结合固化仿真的方案,实现了不同参数下复合材料成型精度的评价。KUMAR等^[5]通过改进温度、压力和成型时间等加工参数,使得环氧树脂完全浸渍三维编织结构从而提升了结构的综合力学性能。在模具补偿方面,陈文等^[6]以U形混杂夹层结构为例,以仿真结果作为成型工装的设计依据,并证明补偿后的工装成型出的零件成型精度良好。王雪华等^[7]针对飞机C形梁结构,建立了固化变形仿真预测模型,发现主要变形发生在缘条端部,采用型面可调的模具对该位置反向补偿方法,实现了结构固化变形的有效控制。KAPPEL等^[8]对盒形碳纤维复合材料结构的模具型面在宽度方向给以反向补偿达到了很好的效果。WUCHER等^[9]基于数值模拟结果对模具进行补偿,使双曲面复合材料结构翘曲度大幅度减少。

为提升复合材料成型后尺寸精度,本文重点关注固化制度和模具补偿两方面,开展对典型复合材料

料结构进行固化变形仿真预测,提出了探求最优固化工艺曲线、构件有限元模型自适应调整、基于全局补偿量协同控制的方法实行固化形变控制,并分别以L形构件、T形加筋壁板和半筒形壁板为典型构件进行仿真和工艺验证。

1 复合材料固化变形控制方法

从固化工艺、模具补偿以及两者结合的角度提出了三种复合材料固化变形控制方法,用于保证复合材料构件的型面精度。

1.1 固化工艺参数优化

图1为多数复合材料固化工艺曲线。

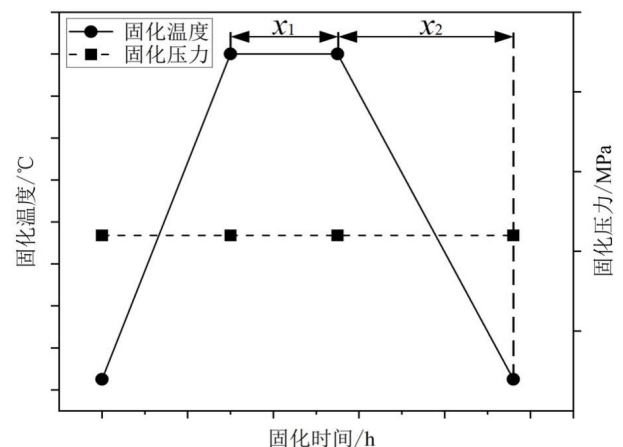


图1 复合材料固化工艺曲线

Fig. 1 Curing process curve of composite

在复合材料固化成型过程中,升温阶段树脂具备一定的流动性,少量的化学收缩也可以通过树脂流动进行调节故此阶段不会影响残余应力;保温阶段树脂已从液体转变为固体,固化反应持续进行至玻璃化点,化学收缩作用对残余应力有较大贡献,由橡胶态转变为玻璃态后固化反应基本结束;降温阶段由于各向异性的热膨胀作用引起各层热变形不匹配导致结构翘曲和回弹,此外模具作用也集中在树脂转变为玻璃态以后。故本文将升温时间设为一定,取保温时间 x_1 和降温时间 x_2 作为关键工艺参数进行优化。在一定范围内的保温时间和降温时间中,基于软件的用户自定义设计法在样本空间构造若干试验点,经仿真分析取得各工艺参数对应的最大变形后,利用响应面优化模型获得固化变形最大值与保温时间和降温时间的关系,即式(1),继而确定固化总时间一定时最优的固化工艺曲线。

$$d = f(x_1, x_2) \quad (1)$$

式中, d 为 L 形构件固化变形最大值, x_1 和 x_2 分别为保温时间和降温时间。

1.2 构件有限元模型自适应调整

构件在固化结束后会产生变形, 为达标最有效的方法即对成型模具进行修正, 然而经补偿后的

模具如果要进一步验证其成型精度, 则需要基于该模具型面重新进行复合材料构件的有限元建模, 增加了额外大量的有限元建模工作。因此, 针对二次有限元建模的难题, 提出了一种复合材料构件模型自适应调整方法, 该方法如图 2 所示。

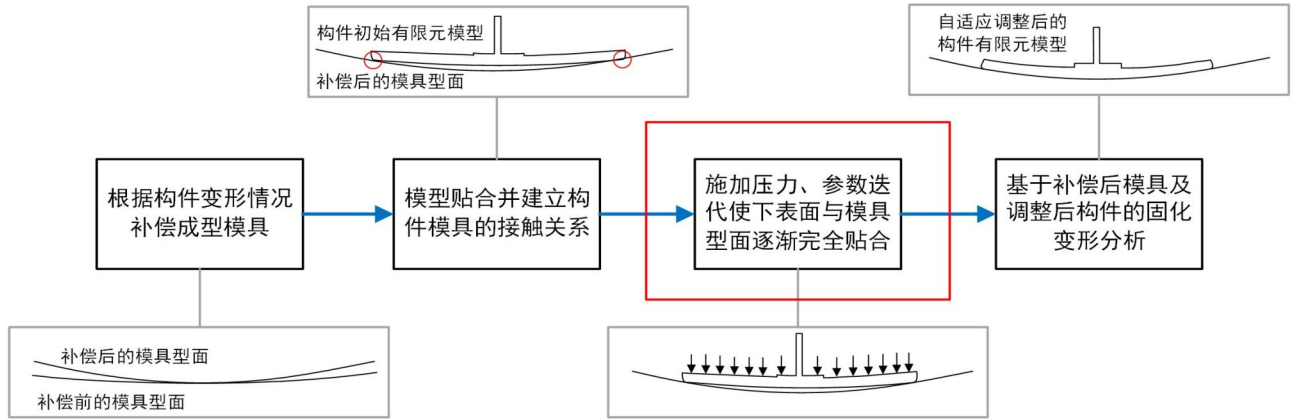


图 2 构件有限元模型自适应调整流程图

Fig. 2 Diagram of adaptive adjustment of finite element model of component

首先根据数值模拟计算得到的变形情况使用 Dynaform 软件的回弹补偿(Springback Compensation Process, SCP)模块对模具进行补偿^[10-11], 得到新的模具型面; 再将需要进行自适应调整的构件与补偿后的模具建立接触关系; 然后基于虚拟的非线性超弹性材料模型, 在构件上表面部分区域施加压力, 通过改变材料参数进行迭代计算, 达到构件有限元模型的网格与补偿后的模具型面完全贴合的目的; 最后对完成自适应调整的有限元模型和补偿后的模具型面再次进行成型仿真。将变形后的构件有限元模型与目标构件有限元模型进行对比, 获得两者间各节

点的偏差距离, 若最大偏差未超出允许范围则模具补偿合格, 反之则需对模具再次补偿并重复自适应调整过程直至合格。

1.3 基于全局补偿量的协同控制法

为了实现对大型复杂曲面的复合材料构件固化变形的高效控制, 基于 L 形构件和 T 形加筋壁板的固化变形控制方法, 将两者作为大型复杂复合材料构件的代理模型, 先后考虑工艺参数和模具补偿对固化变形加以控制, 提出了一种基于全局补偿量的复合材料固化变形的协同控制方法, 该方法如图 3 所示。

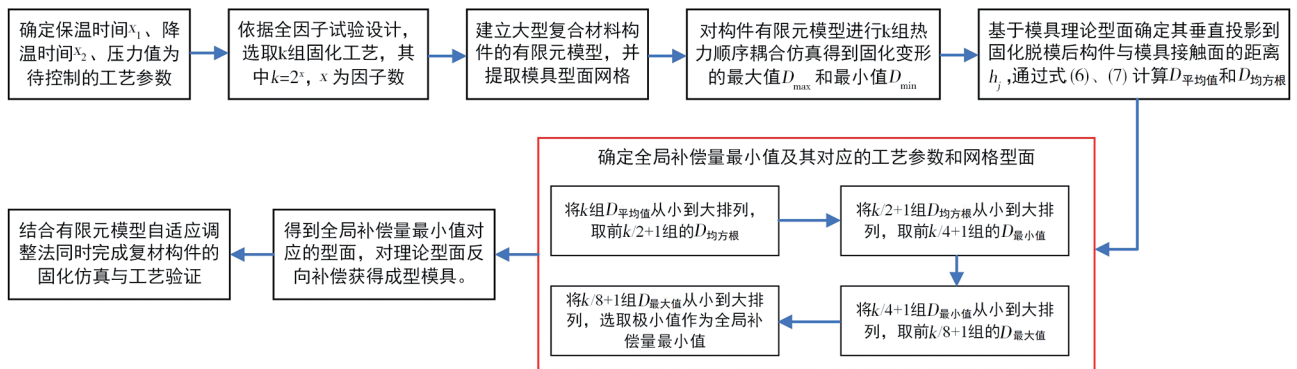


图 3 基于全局补偿量的协同控制法流程图

Fig. 3 Diagram of the collaborative control method based on the global compensation

首先将 x_1 、 x_2 和压力值作为工艺参数变量并确保二者处于预设范围内; 依据全因子试验设计进行 k 组复合材料构件固化成型仿真; 得到各工艺参数下对应的固化变形量位移云图后, 获得固化变形最大值 D_{\max} 和最小值 D_{\min} 并通过式(2)和式(3)得到网格加权

固化变形平均值、固化变形均方根值; 然后将 k 组 \bar{D} 按从小到大顺序排列, 取前 $k/2+1$ 组的 $\sqrt{\bar{D}}$ 作为下次排序的依据, 从小到大顺序排列后取前 $k/4+1$ 组的 D_{\min} 作为下次排序的依据, 从小到大顺序排列后取前

$k/8+1$ 组的 D_{\max} 作为下次排序的依据,从小到大顺序排列后选取其中的极小值作为全局补偿量最小值,确定该值对应的工艺参数组合及仿真构件模型的网格型面;最后对理论型面反向补偿获得成型模具,结合有限元模型自适应调整方法同时完成复合材料构件的固化仿真与工艺验证。

$$\bar{D} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h_j \quad (2)$$

$$\sqrt{\bar{D}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h_j^2} \quad (3)$$

式中, m 和 n 分别为模型表面的网格和节点个数, S_i 是模型表面第 i 个网格的面积, h_j 是模型网格上第 j 个节点沿法向投影到模具理论型面的距离,其原理如图 4 所示,虚线部分为仿真构件模型,实线部分为模具理论模型。

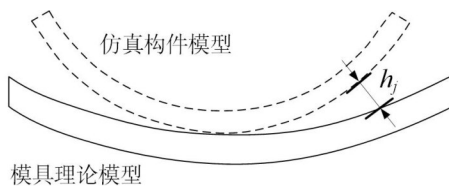


图 4 构件模型网格的 h_j 原理示意图

Fig. 4 h_j schematic of component model grid

根据不同结构形式复合材料构件的模拟固化变形趋势和变形量,可探索出复合材料结构件的固化变形主因,从而针对性地采用合适的控制方法。具体地讲,对于构件固化工艺参数或模具型面与其固化变形有明显直接对应关系的,相应采用第一种或第二种方法即可实现构件固化变形的有效控制;对于构件结构复杂且单一因素难调控其固化变形的,采用第三种基于全局补偿量的协同控制方法实现构件高精度成型。

2 典型复合材料结构固化变形仿真与工艺验证

对三种方法分别予以仿真和工艺验证,三者均采用国产 T800 级碳纤维为增强体、603A 环氧树脂为基体的复合材料。初始固化工艺参数设定为:起始和结束温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,升温速率 $25\text{ }^\circ\text{C/h}$,保温温度 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.1 固化工艺参数优化仿真及工艺验证

为预测最优固化工艺曲线,以 L 形构件为例,先通过仿真得到各工艺曲线下固化变形最大值再借助热压罐固化实验确定仿真的准确性。复合材料 L 形构件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 80\text{ mm}$,铺层顺序为 $[0/45/0/45/45/0/45/0]_s$ 。

首先为构件和模具的有限元模型外表面(图 5 方框选中区域)添加热边界条件后,设置约束条件并在构件上表面施加压力场,如图 5 所示。然后利用 Design Expert 的用户自定义设计方法同时考虑了热

压罐固化周期约为 20 h 的限制,在样本空间构造出 20 个试验设计点,得到各固化工艺曲线,仿真获得各工艺参数对应的固化变形最大值,如表 1 所示。

确定保温时间 $x_1=6\text{ h}$ 、降温时间 $x_2=8\text{ h}$ 为固化工艺参数。根据铺层设计在模具上铺贴预浸料,为了减小模具对结果的影响,需在模具和制件之间铺设脱模布。按照模具-脱模布-预浸料-脱模布-隔离膜-透气毡-真空袋的顺序完成固化前辅助材料包覆,参照工艺曲线,采用热压罐成型工艺,制得 L 形构件,如图 6 所示。

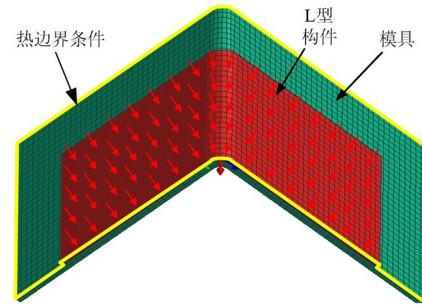


图 5 L 形构件模型边界条件示意图

Fig. 5 Boundary conditions of L-shaped model

表 1 部分设计点最大变形量

Tab. 1 Max deformation of partial points

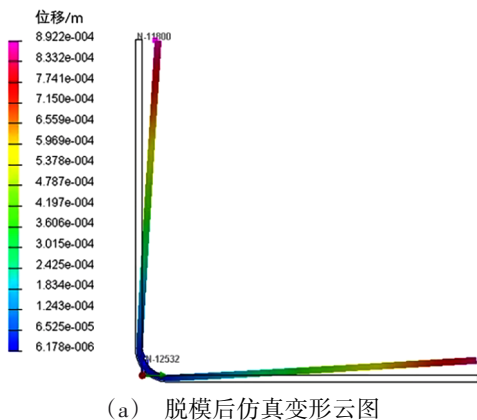
| 保温时间 x_1/h | 降温时间 x_2/h | 所需时间 t/h | 最大变形 δ/mm | 式(4)预测值 δ/mm |
|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 0.0 | 2.0 | 2.0 | 1.047 9 | - |
| 2.0 | 0.2 | 2.2 | 1.045 7 | 1.034 2 |
| 0.0 | 4.0 | 4.0 | 1.037 8 | - |
| 2.0 | 2.0 | 4.0 | 1.003 6 | 1.000 1 |
| 4.0 | 0.2 | 4.2 | 1.038 9 | - |
| 0 | 6.0 | 6.0 | 1.031 2 | - |
| 2.0 | 4.0 | 6.0 | 0.970 2 | 0.972 6 |
| 4.0 | 2.0 | 6.0 | 1.001 2 | - |
| 2.0 | 6.0 | 8.0 | 0.941 3 | 0.953 4 |
| 4.0 | 4.0 | 8.0 | 0.949 8 | - |
| 6.0 | 2.0 | 8.0 | 0.963 6 | - |
| 2.0 | 8.0 | 10.0 | 0.925 6 | - |
| 4.0 | 6.0 | 10.0 | 0.917 8 | 0.912 9 |
| 6.0 | 4.0 | 10.0 | 0.926 5 | - |
| 4.0 | 8.0 | 12.0 | 0.896 5 | 0.892 8 |
| 6.0 | 6.0 | 12.0 | 0.903 2 | - |
| 6.0 | 8.0 | 14.0 | 0.892 2 | 0.863 4 |

该工艺曲线下复合材料 L 形构件固化变形仿真结果和实验数据云图如图 7 所示。从图 7(a) 可见仿真构件脱模后的最大变形为 0.892 2 mm ,换算成回弹角为 0.324 ° 每边。图 7(b) 中实验型面固化变形最大值为 0.794 1 mm ,换算成回弹角为 0.289 ° 每边。可见,仿真与实验结果误差为 12.4%,仿真分析较为准确。将 L 形构件各设计点的工艺参数代入仿

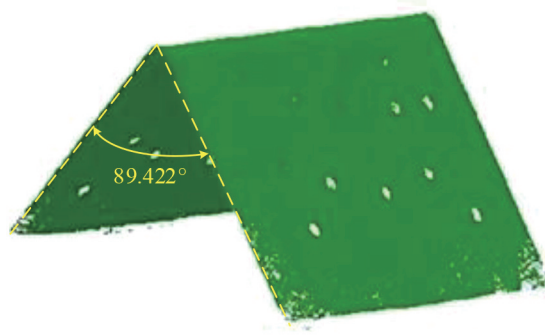


图6 固化完成后的L形构件
Fig. 6 The L-shaped model after curing

真模型中得到最大变形量,拟合响应面得到三维曲



(a) 脱模后仿真变形云图



(b) 实验型面点云拼接外形及角度

图7 L形构件固化仿真与实验的变形

Fig. 7 Deformation of L-shaped component in curing simulation and experiment

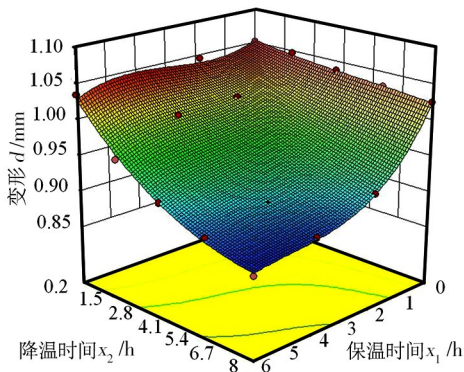


图8 L形构件最大变形响应面三维曲面图

Fig. 8 Three-dimensional surface diagram of L-shaped maximum deformation

2.2 构件有限元模型自适应调整的仿真及工艺验证

以复合材料T形加筋壁板为例,通过仿真和工艺验证构件有限元模型自适应调整的可行性。T形加筋壁板尺寸约为300 mm×300 mm,壁板铺层顺序为[0/90/0/90/90/0/90/0]_{2s}、T形筋条铺层顺序为[0/90/0/90/90/0/90/0]。

对图9所示的T形加筋壁板网格进行自适应调整,T形加筋壁板自适应调整的初始有限元模型如图10所示,方框内为压力施加区域。从中间至两边逐步施加压力于壁板和筋条上表面并确定虚拟材料参

数,保证构件与模具完全贴合后即可进行数值模拟。固化试验前,在模具上进行预浸料铺贴、压实、抽真空处理及辅助材料包覆,按要求工艺曲线加热固化,固化后脱模得到T形加筋壁板。

$$d = 1.07 - 2.11 \times 10^{-2}x_1 - 1.60 \times 10^{-2}x_2 - 2.50 \times 10^{-3}x_1x_2 + 2.64 \times 10^{-3}x_1^2 + 1.14 \times 10^{-3}x_2^2 \quad (4)$$

由表1可得当固化总时间相同时,降温时间的延长有助于固化变形的控制。经式(4)确定的工艺参数,其固化变形最大值与表1中加粗行最大变形的偏差不超过3.3%。故可用本方法确定出L形件的最优固化工艺曲线,为大尺寸复杂的复合材料构件固化工艺参数初步选取提供了参考。

数,保证构件与模具完全贴合后即可进行数值模拟。固化试验前,在模具上进行预浸料铺贴、压实、抽真空处理及辅助材料包覆,按要求工艺曲线加热固化,固化后脱模得到T形加筋壁板。



图9 复合材料T形加筋壁板

Fig. 9 T-stiffened siding composite

仿真结果如图11(a)所示,可见最大偏差为0.185 3 mm,相比于未补偿的1.073 5 mm,减小了82.60%,效果明显。对固化后的T形加筋壁板下表面与初始模具型板上表面进行扫描测量,将扫描数据导入Polyworks软件,并进行自动对位及对比分析等处理,得到图11(b),图中红色区域偏差较大,黄绿色区域次之,由此可见,实验结果与仿真结果的整体偏差趋势较为一致。

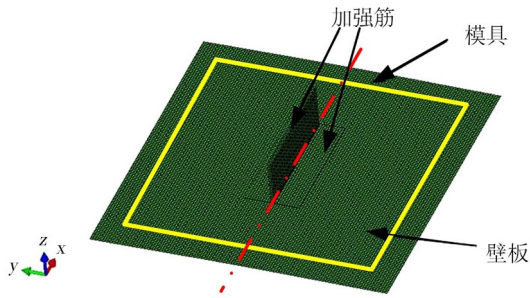
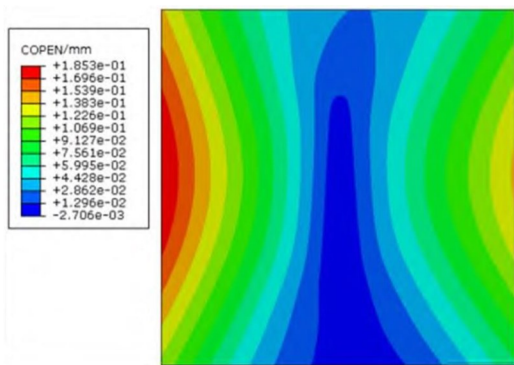


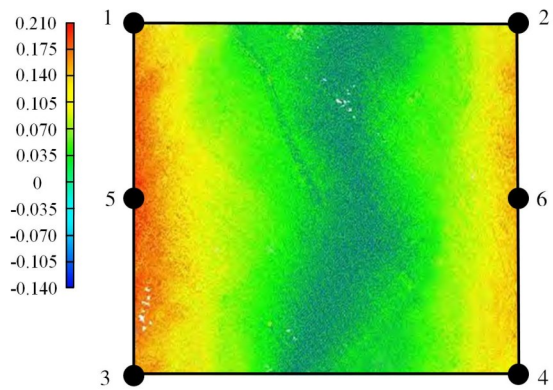
图10 T形加筋壁板自适应调整初始有限元模型

Fig. 10 The initial finite element model of T-stiffened panel adaptive adjustment

进一步选取图 11(b)中六点的试验结果与仿真结果进行对比,如表 2 所示,相对误差最大值为



(a) 仿真结果



(b) 实验结果

图11 T形加筋壁板下表面与目标型面对比图

Fig. 11 Comparison diagram between the lower surface of T-stiffened panel and target profile

2.3 基于全局补偿量的协同控制法仿真及工艺验证

为验证基于全局补偿量的协同控制方法可用于大型复杂截面复合材料构件固化变形的有效控制,以半筒形复合材料壁板为例进行仿真和工艺验证。半筒形壁板尺寸约为 1 800 mm×(2 100 mm~2 500 mm)×(600 mm~800 mm)(轴向尺寸为 1 800 mm,环向尺寸由大端 2 500 mm 逐渐变小,高度方向由大端 800 mm 逐渐变小),整体为 Nomex 纸蜂窝夹层结构件,局部口盖区域为预先固化复合材料泡沫夹层结构件,壁板四周及口盖四边设计为局部加厚区。Nomex 纸蜂窝规格为 2.75 mm 孔格边长、72 kg/m³ 密度,设计为四周厚度渐变至相近蒙皮。泡沫为硬质 PMI 泡沫,密度为 110 kg/m³。

对该半筒形复合材料壁板进行网格划分,由于该构件具有对称性,对其一半进行建模,同时对口盖和蜂窝夹层等复杂结构采用接触位置处节点对齐的方法进行简化,其有限元模型如图 12 所示。图中实线框为固化过程热边界条件,虚线框为脱模时位移边界条件。

确定降温 and 保温时间之和为 10 h 后,以 L 形构件

17.20%、最小值为 6.63%,匹配误差未超过 20%,验证了此方法用于复合材料固化变形控制的有效性。

表2 T形加筋壁板选取点处偏差量数值模拟结果与试验结果的对比

Tab. 2 Comparison of simulation and experiment at selected points of T-stiffened panel

| 选取点 | 试验测量值/mm | 数值模拟值/mm | 相对误差/% |
|-----|----------|----------|--------|
| 1 | 0.171 | 0.144 | 15.79 |
| 2 | 0.109 | 0.091 | 16.51 |
| 3 | 0.128 | 0.114 | 10.94 |
| 4 | 0.093 | 0.077 | 17.20 |
| 5 | 0.196 | 0.183 | 6.63 |

固化变形结果为参考,确定保温时间两水平为 4 h 和 6 h、降温时间为 6 h 和 4 h、压力值为 0.4 MPa 和 0.6 MPa。根据壁板仿真分析结果及相关计算,壁板全局补偿量最小值对应的固化工艺参数为:保温时间 x_1 为 4 h 和降温时间 x_2 为 6 h,固化压力为 0.6 MPa。

采用基于全局补偿量的协同控制方法的壁板固化变形位移云图如图 13(a)所示。经后处理分析可知,模具材料确定时,与传统单一模具型面补偿方法

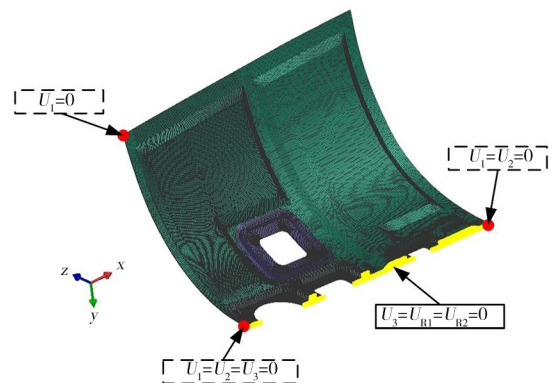


图12 半筒形壁板有限元模型及边界条件示意图

Fig. 12 The finite element model and boundary condition of cylindrical panel

得到的固化变形量位移云图[如图 13(b)所示]相比,基于全局补偿量的协同控制方法固化变形位移云图数值全局均匀性更好,无易见局部凸显。本方法较传统补偿控制方法固化变形最大值降低了 88%,验证了本方法的正确性及有效性。

因此结合上述仿真结果,壁板固化工艺依照全局补偿量最小值对应的工艺参数进行设定,模具补偿根据全局补偿量最小值对应的构件模型网格型面反向补偿,并仿照 T 形加筋壁板有限元模型自适应调整的方法后,形成最佳的半筒形壁板固化变形控制

方案。进而按此方案研制出的复合材料壁板构件如图 14 所示。

采用激光跟踪仪检测其型面精度;测量数据在自由状态下测量得到,通过最佳拟合的对齐方式将测量数据对齐到理论数模上,偏差比较结果如图 15 所示(正值表示点云相对理论数模外偏移,负值表示点云相对理论数模向内偏移)。由检测结果可知,型面偏差 PV 最大值为 0.48 mm,型面偏差平均值 0.026 mm,型面 RMS 值为 0.322 mm,满足壁板型面精度及固化变形控制的技术要求。

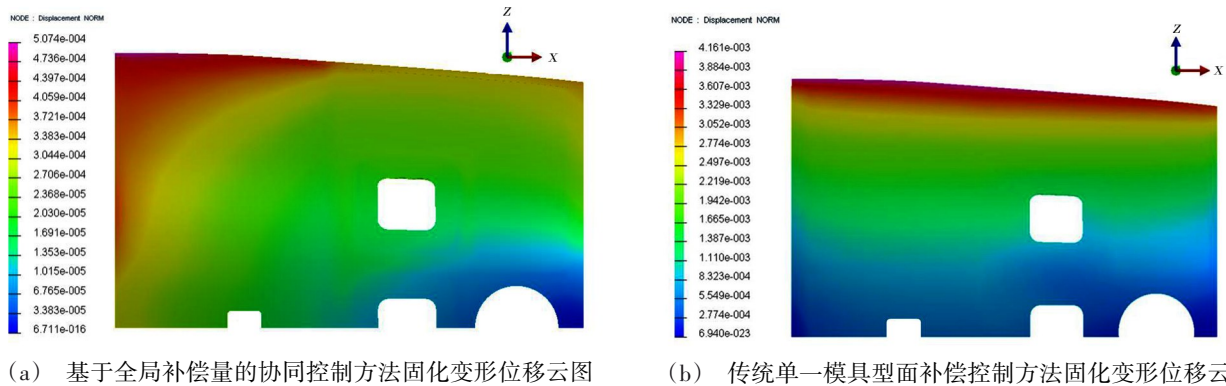


图 13 半筒形壁板固化变形仿真位移云图

Fig. 13 Simulated displacement cloud map of semi cylindrical wallboard curing deformation

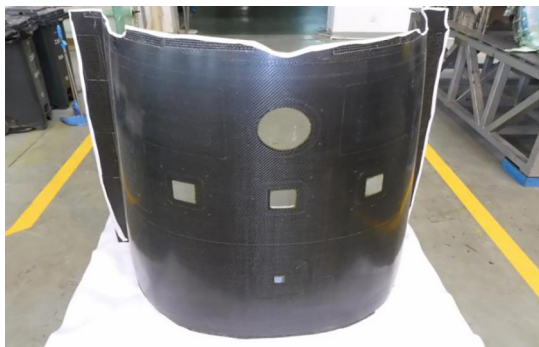


图 14 研制出的复合材料半筒形壁板构件

Fig. 14 Developed composite semi cylindrical wall panel components

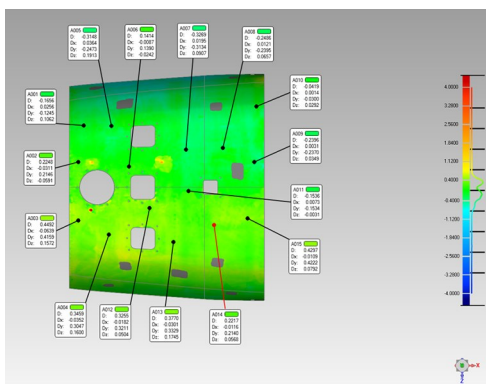


图 15 复合材料半筒形壁板构件型面轮廓图

Fig. 15 Profile diagram of composite semi cylindrical wall panel components

3 结论

(1)通过仿真模拟 L 形构件的固化变形误差为 12.4%,再借助响应面优化算法预测 L 形构件的固化变形最大值,与固化形变较小的设计点偏差不超过 3.3%。

(2)通过自适应调整方法重建 T 形加筋壁板的有限元模型,仿真得到壁板型面最大偏差减小了 82.60%,固化实验结果与仿真结果的相对误差最大值为 17.20%、最小值为 6.63%。

(3)通过全局补偿量的协同控制方法,工艺与仿真结果吻合度较好,借此确定最优工艺参数并对半筒形壁板模具进行补偿,相比于传统单一模具型面补偿控制方法,固化变形最大值降低接近 90%,成型出壁板的型面精度得到了改善。

可见,依据复合材料构件的不同结构形式和材料组成等输入信息,采用专门有限元模型,仿真获得该构件固化变形的最主要因素,进而针对构件变形主因,采用匹配的控制方法,可研制出满足型面精度要求的高质量复合材料结构件。

参考文献

[1] 杨智勇,张东,顾春辉,等. 国外空天往返飞行器用先进树脂基复合材料研究及应用进展[J]. 复合材料学报, 2022,39(7):3029-3043.

YANG Z Y, ZHANG D, GU C H, et al. Research and 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第2期

application of advanced resin matrix composites for aerospace shuttle vehicles abroad [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7):3029-3043.

[2] 程文礼, 邱启艳, 陈静. 热压罐成型复合材料固化变形机理及控制研究[J]. *材料导报*, 2012, 26(S2):410-414.

CHENG W L, QIU Q Y, CHEN J. Study on the cured-induced deformation mechanism and control of composites structures in autoclave process [J]. *Materials Reports*, 2012, 26(S2):410-414.

[3] 马飞, 杨雯, 梁希凤. 厚壁碳/酚醛复合材料热压罐固化工艺优化[J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(3):53-56.

MA F, YANG W, LIANG X F. Optimize curing process in autoclave of thick wall carbon fibers/phenolic composite [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2017, 47(3):53-56.

[4] 李艳霞, 顾铁卓, 李敏, 等. 复合材料固化工艺评价与优化虚拟仿真实验[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(12):170-173.

LI Y X, GU T Z, LI M, et al. Virtual experiment on evaluation and optimization of composite curing process [J]. *Experimental Technology and Management*, 2019, 36(12):170-173.

[5] KUMAR R M, MICHAL P, KUMAR B B, et al. 3D woven textile structural polymer composites: effect of resin processing parameters on mechanical performance [J]. *Polymers*, 2022, 14(6):1134.

[6] 陈文, 赵月青, 韩舒, 等. 复合材料U形混杂夹层结构固化变形及控制研究[J]. *高科技纤维与应用*, 2023, 48(1):54-60.

CHEN W, ZHAO Y Q, HAN S, et al. Study on curing

deformation control of U-shaped hybrid sandwich composite structure [J]. *Hi-Tech Fiber and Application*, 2023, 48(1):54-60.

[7] 王雪华, 陈俊林, 满珈诚, 等. 复合材料C形梁结构的固化变形控制研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(6):67-72.

WANG X H, CHEN J L, MAN J C, et al. Study on curing deformation control of C-shaped composite beams [J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(6):67-72.

[8] KAPPEL E, STEFANIAK D, HOLZHÜTER D, et al. Manufacturing distortions of a CFRP box-structure-A semi-numerical prediction approach [J]. *Composites Part A*, 2013, 51:89-98.

[9] WUCHER B, MARTINY P, LANI F, et al. Simulation-driven mold compensation strategy for composites: Experimental validation on a doubly-curved part [J]. *Composites Part A*, 2017, 102:96-107.

[10] 李奇涵, 刘海静, 李笑梅, 等. 基于Dynaform的汽车顶盖冲压成形回弹模拟及回弹补偿[J]. *锻压技术*, 2015, 40(10):16-19, 23.

LI Q, LIU H J, LI X M, et al. Springback simulation and compensation of car roof stamping based on dynaform [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2015, 40(10):16-19, 23.

[11] 毛欣然, 刘淑梅, 罗阳, 等. 基于Dynaform的弯曲成型及回弹数值模拟[J]. *黑龙江科学*, 2019, 10(10):4-9.

MAO X R, LIU S M, LUO Y, et al. Numerical simulation of bending and springback based on dynaform [J]. *Heilongjiang Science*, 2019, 10(10):4-9.