

基于Python的Abaqus二次开发在复合材料 固化变形预测中的应用

王鹏博 张永明 蔡晓 安鲁陵 鲍益东

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

文 摘 针对使用Abaqus进行复合材料固化变形仿真中流程复杂的问题,基于Python语言,开发辅助插件,将仿真前处理操作流程规范化,使仿真的设置更加直观、简便,从而提高复合材料固化变形预测的效率。基于该插件对L型复合材料结构进行固化成型仿真分析,并将仿真数据与固化成型试验数据进行对比。结果表明,该集成化插件界面简洁,操作性强,建立的有限元模型有效。仿真与实验结果吻合良好,平均误差为4.83%。同时利用该模型探究降温速率对固化变形的影响,发现随着降温速率的不断增大(0.3、0.6和1°C/min),复合材料结构成型精度越来越高。本研究可为快速预测不同类型复合材料结构件的固化变形分布规律提供参考。

关键词 Abaqus二次开发,Python,复合材料,变形,预测,集成化

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.02.005

Application of Python-based Abaqus Redevelopment in Prediction of Composite Curing Distortion

WANG Pengbo ZHANG Yongming CAI Xiao AN Luling* BAO Yidong

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

Abstract To address the complexity of simulation procedures for composite curing deformation analysis using Abaqus, a Python-based auxiliary plugin was developed to standardize pre-processing operations and enhance the intuitiveness and efficiency of simulation setup. This plugin was subsequently employed to conduct curing simulation analysis on an L-shaped composite structure, with comparative validation against experimental data. Results demonstrate that the integrated plugin features a concise interface and operational effectiveness, establishing a valid finite element model. The simulation outcomes exhibit good agreement with experimental measurements, showing an average error of 4.83%. Furthermore, the model was utilized to investigate the influence of cooling rates on curing deformation. It was revealed that increasing cooling rates (0.3, 0.6, and 1°C/min) progressively improved the forming accuracy of composite structures. This study provides a valuable reference for rapid prediction of curing deformation distribution patterns in diverse composite structural components.

Key words Redevelopment of Abaqus, Python, Composite, Distortion, Prediction, Integration

0 引言

近年来,在航空航天领域飞行装备迫切的减重要求下,复合材料具有的高强度、低密度等特性^[1],使其制件的应用越发广泛^[2-3],以至于复合材料的使用占比成为衡量装备先进性的一项重要指标^[4]。此外由于航空航天器的高机动性,对零件的尺寸精度要求也逐年提高。目前复合材料构件的制造主要以模

具铺贴和热压罐固化为主,而构件在脱模后通常伴随着一定的固化变形^[5]。较大的变形可能会导致零件在装配的过程中由于强制装配引入较大的初始应力,而变形过大会导致超过装配容差而使零件报废。因此,复合材料固化过程中变形量的预测在航空航天器的发展中变得愈发重要^[6]。

传统的模具补偿是基于反复实验的基础上确定

收稿日期:2024-04-26

基金项目:基础科研计划项目(JCKY2019283-WSZC006、ZY202026-XY50-01)

第一作者简介:王鹏博,2000年出生,硕士研究生,主要从事复合材料成型工艺模拟的研究工艺。E-mail:wpb0426@nuaa.edu.cn

通信作者:安鲁陵,1962年出生,教授,博士生导师,主要研究方向为复合材料结构制造技术、飞机装配技术。E-mail:anllme@nuaa.edu.cn

模具补偿型面,对研究者的经验要求比较高,需要耗费大量的人力物力财力^[7]。随着计算机的快速发展,利用数值模拟进行仿真分析是目前预测复合材料构件的固化变形和残余应力的最广泛方法。近年来,国内外针对复合材料固化变形的仿真预测和二次开发也做了许多工作,Y. FENG等^[8]对单向碳纤维增强聚合物的固化诱导变形仿真模型开发了基于Abaqus平台的黏弹性本构的子程序,其中定义了固化动力学的分段自催化模型,复合材料的比热、热导率、密度等参数;定义了树脂的累计应力和时间、温度的函数等。而后利用Abaqus进行热化学和热力学仿真,并通过实验进行了子程序的有效性验证。杨梅等^[9]基于Abaqus编制HETVAL子程序,包括固化动力学方程中固化度、时间、频率因子和活化能之间的函数关系,工艺曲线的定义。而后建立几何模型,定义材料属性,如比热、密度及各方向的热导率等,接着定义各向异性复合材料的纤维方向,并更改网格属性,定义对流属性及初始温度等,完成热化学分析的设置。最终实现了树脂基复合材料成型工艺中固化阶段的三维数值模拟,进而得到固化过程中每个时刻模型的温度和固化度场分布情况。年春波等^[10]针对层合板纤维曲线路径描述较困难且尚没有对周期函数曲线纤维路径进行研究的问题,采用Python对Abaqus二次开发GUI插件,用于对变角度层合板进行屈曲特性分析。通过以正弦曲线为基本参考路径,通过插件控制曲线中的A、T参数,从而实现角度的非线性变化。而后对路径进行平移等距或者平行等距得到整个铺层的路径。并利用该插件探究了参数A、T对屈曲的影响。石庆华等^[11]针对复合材料多加筋整体构件用Abaqus进行仿真时前处理建模、网格划分等过于复杂等问题,对Abaqus进行二次开发。可以实现T筋条、蒙皮、J形、Z形及帽形等零件的快速建模,定义材料的铺层角度、铺层的厚度等参数。并能够实现零件的装配等功能。极大地提升了加筋零件的建模效率。目前利用Abaqus进行复合材料固化变形的预测大部分是基于子程序及Abaqus的前处理模块进行热力耦合来实现。热化学仿真包括材料参数的设置,铺层及铺层角度的定义,温度载荷的设置,零件和模具的接触设置,对流的设置等。热力学的仿真包括分析步的设置,模具和零件的约束设置,压力及摩擦的设置,热场耦合及脱模设置等^[5]。

综上所述,针对用Abaqus软件对复合材料结构进行成型工艺仿真分析时存在前处理设置多,操作复杂等问题,本研究基于Python语言,开发TCDANALYSIS插件,通过将前处理中的流程操作进行优化整合,提高复合材料结构成型工艺仿真中前

处理的操作效率。基于本文开发的插件对L型复合材料结构进行固化变形预测的全流程仿真和实验验证,并探究了L型构件在不同降温速率条件下对复合材料结构固化变形的影响机制。

1 有限元模型

用Abaqus对复合材料零件进行固化成型仿真时,通常需要用户在子程序自行定义所使用的固化动力学方程及相应的本构方程。这对仿真的操作人员提出了一定的技术要求,因此本插件内嵌若干子程序,包括自催化模型以及不同类型的本构方程,包括线弹性本构、黏弹性本构及基于路径的本构,本文算例所使用的模型如下。

1.1 热传导模型

复合材料的热化学仿真主要是基于复合材料在热压罐中的传热场与其本身在热场中发生化学反应放热的温度场的叠加。因此,复合材料温度分布的预测是一个非线性的热传导问题^[12],基于傅里叶瞬态热传导定律以及能量守恒定律,建立复合材料构件三维瞬态热传导控制方程^[13]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \dot{Q} \quad (1)$$

式中, T 为某时刻下的瞬态温度, ρ 为复合材料的密度, k_x 、 k_y 、 k_z 为全局坐标系下的 x 、 y 、 z 方向上的热导率, C 为该复合材料的比热容, t 为固化时间。

复合材料的比热以及密度可根据混合律公式得到如下表达式:

$$\begin{aligned} \rho &= V_f \rho_f + (1 - V_f) \rho_r \\ C &= \frac{V_f \rho_f C_{pf} + (1 - V_f) \rho_r C_{pr}}{\rho} \\ k &= \frac{k_f k_r \rho_c}{V_f \rho_f k_f + (1 - V_f) \rho_r k_r} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, f 代表是纤维的相关参数, r 代表树脂相关的参数, V_f 代表该复合材料中纤维的体积分数。

树脂发生固化反应的放热量 \dot{q} 为:

$$\dot{q} = \rho_r H_u \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

式中, H_u 为单位质量的树脂完全反应后的放热量, α 为固化度, t 为固化工艺时间。

1.2 自催化模型

自催化模型作为目前动力学模型中被广泛应用的固化动力学模型之一,其对树脂的反应速率和固化度的关系表达式如下所示^[14]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(T, \alpha) = K(T)w(\alpha) \quad (4)$$

式中, $f(T, \alpha)$ 为复合材料固化度的函数表达式,其主要受温度及固化度影响。 $K(T)$ 代表树脂固化反应常

数,是一个自变量为温度 T 的函数。 $w(\alpha)$ 为树脂发生固化反应的函数。

在插件内嵌的子程序中的代码如下:

```
DalfaDt=K*alfa**ValueM*(1-alfa)**ValueN/(1+exp(Ca*(alfa-alfaC)))
```

```
FLUX(1)=pr*HR*DalfaDt
```

```
alfa=alfa+DalfaDt*DTIME
```

根据式(4)可计算出复合材料在固化过程中的任意时刻的固化度,进而计算出放热量。根据 Arrhenius 方程,复合材料的固化反应方程表达式如下:

$$K = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (5)$$

式中, A 为固化反应的频率因子, ΔE 为反应的活化能, R 为理想气体常数, T 为温度。

在子程序中如下定义

```
K=Aexp(-AE/(Rs*TEMP(1)))
```

1.3 应力-应变模型

在固化过程中,复合材料的温度在达到凝胶点和玻璃态转化点前后的状态和性质均不一样,通常将复合材料完整的固化过程按照状态分为:黏流态、橡胶态以及玻璃态^[15]。本文仿真选用的描述复合材料相关参数变化的是一种比较常用的 P-D 本构模型,即在其他温度下的复合材料相关参数不变,而在温度达到玻璃态转化点后材料参数发生变化,以树脂的弹性模量为例:

$$E_r = \begin{cases} (E_r)_{\text{end}} & T \geq T_g \\ (E_r)_0 & T < T_g \end{cases} \quad (6)$$

式中, $(E_r)_0$ 为树脂固化之后在常温下时的弹性模量, $(E_r)_{\text{end}}$ 为树脂尚未固化时的弹性模量。

在子程序中定义如下:

```
IF (TEMP. GE. Tg) THEN
```

```
Er=ErEnd
```

```
ELSE
```

```
Er=Er0
```

```
END IF
```

其本构方程可以表达为:

$$\sigma_i = \begin{cases} C_{ij}^r \varepsilon_j^{\text{eff}} & T \geq T_g \\ C_{ij}^g \varepsilon_j^{\text{eff}} - (C_{ij}^g - C_{ij}^r) \varepsilon_j^{\text{eff}} |t = t_{\text{vit}} & T < T_g \end{cases} \quad (7)$$

式中, C_{ij}^r 和 C_{ij}^g 分别是复合材料在橡胶态和玻璃态下的刚度矩阵, σ_i 为其应力张量, t_{vit} 为发生玻璃态转化的时间。

1.4 L型构件有限元模型

为了验证插件的功能及有效性,建立 L 型碳纤维增强环氧树脂编制预浸料构件的有限元模型,制件和模具的几何尺寸如图 1 所示。零件划分成 16 层网格,单元总数一共为 60 848 个。

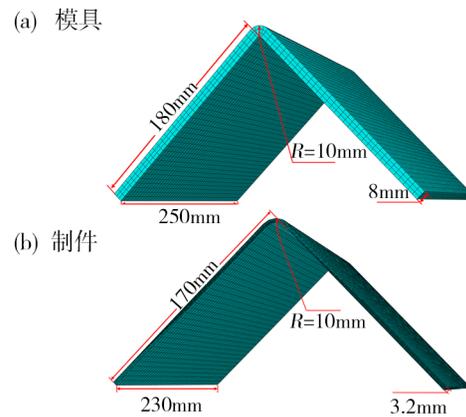


图 1 L 型复材制件和模具的几何尺寸

Fig. 1 Geometry of mold and L-shaped composite part

L 型构件所用的复合材由某研究所提供的碳纤维增强环氧树脂的编织预浸料,纤维密度为 1790 kg/m^3 ,树脂的密度为 1130 kg/m^3 。构件尺寸为 $170 \text{ mm} \times 230 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 。单层厚度 0.2 mm ,共 16 层,堆叠顺序 $[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$,如图 2 所示。模具尺寸为 $180 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,材料为不锈钢。复合材料结构成型工艺仿真所需的部分参数,如表 1 所示。

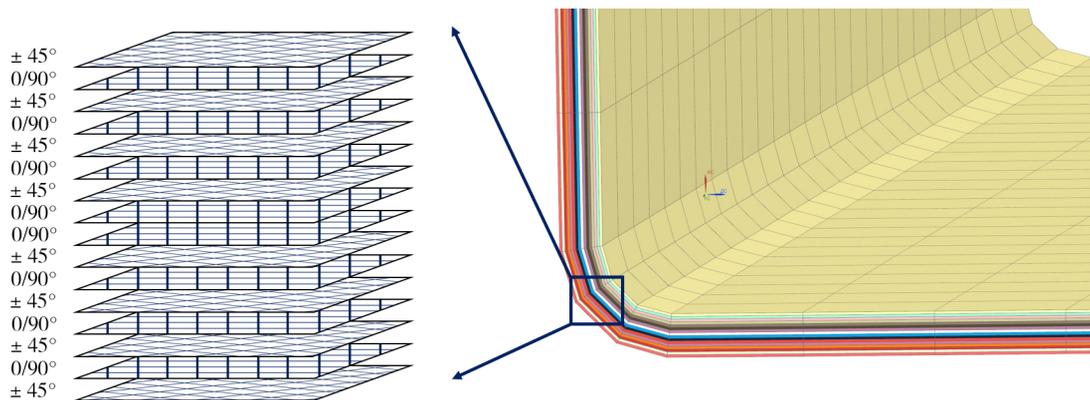


图 2 L 型复材制件的堆叠顺序

Fig. 2 Lamination for L-shaped composite parts

表1 复合材料的相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of composite material

$C_{pc}/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	$\rho_m/kg \cdot m^{-3}$	$E/kJ \cdot mol^{-1}$	A/s^{-1}	$E_{r,r}/MPa$	$E_{r,g}/GPa$	$v_{r,r}$	$v_{r,g}$	$G_{r,r}/GPa$	$G_{r,g}/GPa$
1140	7800	60.03	9930.76	39	3.6	0.497	0.38	2.0	5.0

2 复合材料固化变形预测插件程序设计

复合材料的材料属性及载荷设置等对其固化变形的仿真结果的影响十分显著,因此如何高效准确地按照复合材料固化工艺流程设置对应的参数就成为了一个亟待解决的问题。

基于 Abaqus 二次开发的 TCDANALYSIS 插件,通过将复合材料固化仿真的前处理操作均集成到插件中,可以实现针对复合材料固化变形仿真完整流程的设置工作,实现有限元仿真模型快速及高效建立。该插件包含 THERMOCHEMISTRY 和 THERMODYNAMICS 两部分功能模块。

为了对复合材料进行固化变形的仿真预测,需

要先在计算机上安装软件 Abaqus、VS、Fortran 以及 TCDA 插件。复合材料的固化变形预测流程主要分为热化学仿真分析和热力学仿真分析,如图3所示。首先对模具和构件的几何模型进行网格划分,再对其进行热化学分析。通过设置相应的载荷并且在子程序中定义固化动力学方程和工艺曲线,得到温度场和固化度场等结果分布。然后进行热力学分析,将热化学分析得到的场结果作为这一步的部分载荷等条件,并在子程序中定义随温度或者固化度变化的材料参数以及应力-应变的本构模型等。最终获得构件的应变和残余应力等分布结果。

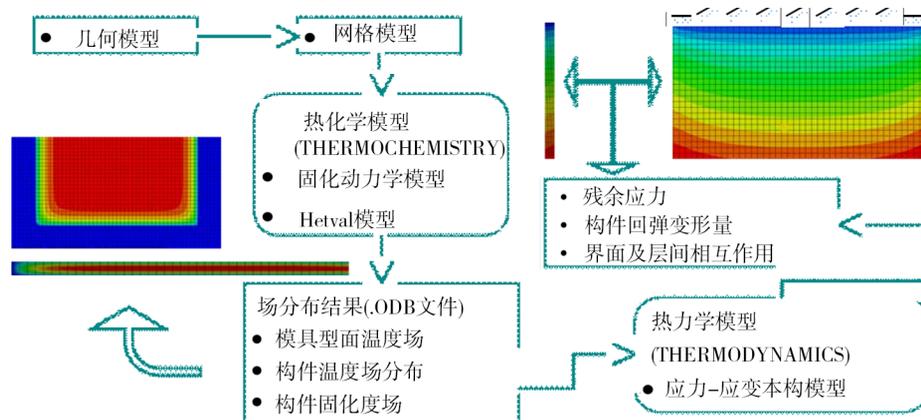


图3 TCDAAnalysis 插件操作流程

Fig. 3 The operational flow chart of the TCDA plugin

2.1 THERMOCHEMISTRY 功能

THERMOCHEMISTRY 是辅助用户在 Abaqus 中对复合材料构件进行热化学相关设置的相关功能。THERMOCHEMISTRY 模块包括如下几个功能:(1) MATERIAL 模块中可以设置材料的参数,并建立 SECTION 赋予到模型中,还可定义铺层的起始点和方向;(2) ASSEMBLY&STEP 模块能添加装配零件,建立传热分析步并设置相关参数;(3) INTERACTION 模块中定义了模具和零件之间接触面的接触属性及传热相关参数;(4) LOAD&MESH 模块中定义了温度载荷及固定约束,并且更改网格的属性为 DC3D8R,使其能进行热化学分析的计算分析。

以定义材料参数为例,通过对脚本文件中的关键字和 GUI 中的关键字进行关联,将图形用户对话框中的参数和数据传输到模型中,即可实现参数的定义。其交互界面如图4所示,在这个界面中,插件直接提示仿真需要的基本的材料参数,也就是进行固化变形仿真中所必要的参数,用户可以根据提示

信息直接在当前界面中定义这些材料参数。

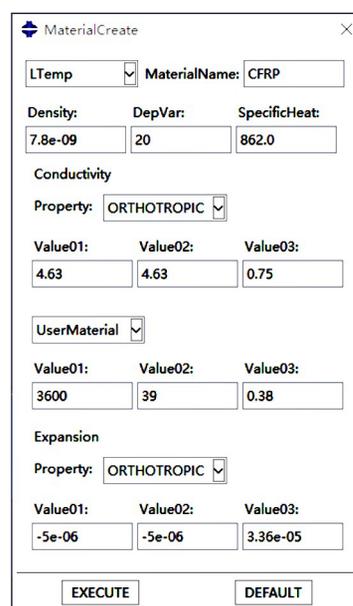


图4 创建材料功能界面

Fig. 4 The interface of the create function in material

部分代码如下：

```
AFXForm. __init__(self, owner)
self. radioButtonGroups = {}
self. cmd = AFXGuiCommand(mode=self, method=
'contactProperty',
objectName='chemicalInteraction_Kernel',
registerQuery=False)
self. modelNameKw = AFXStringKeyword(self.
cmd, 'modelName', True, '')
self. propertyNameKw = AFXStringKeyword(self.
cmd, 'propertyName', True, 'IntProp-1')
self. conductance1Kw = AFXStringKeyword(self.
cmd, 'conductance1', True, '3. 63')
.....
```

采用HETVAL子程序对设置完的热化学模型进行仿真预测,可以得到模具上的温度场分布、构件的温度场分布以及构件的固化度场。热化学分析中的某一时间步的结果如图5所示,可以看出复合材料的温度分布比较均匀,在升温过程中最大温差约为4.5℃,温度最低出现在复合材料内部,而降温过程中最大温差为2℃左右。

热化学仿真得到的温度场及固化度场等结果将作为THERMODYNAMICS分析的输入条件,实现对复合材料构件的应力-应变及回弹变形的分析。

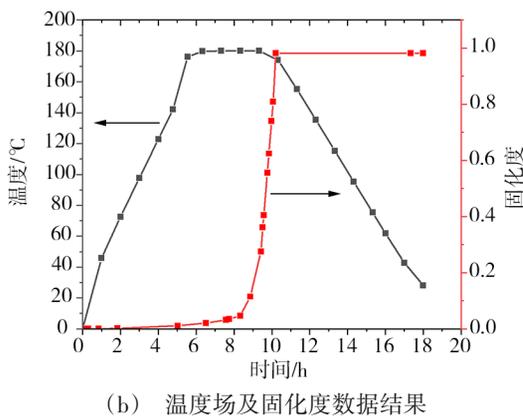
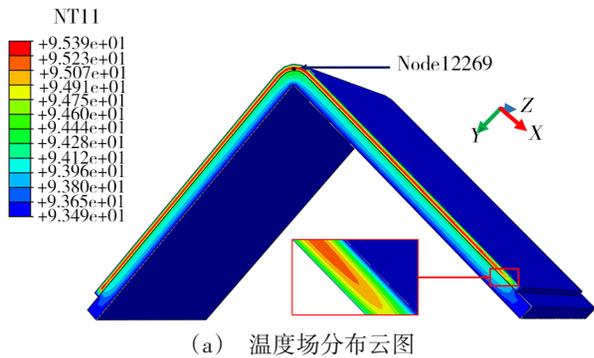


图5 某时间步热化学分析结果云图

Fig. 5 Results of thermo-chemical analysis

2.2 THERMODYNAMICS 功能

THERMODYNAMICS 模块是针对复合材料固化变形分析中的热力学模块建立的,该功能中包括对时间步、接触、网格载荷及边界条件的设置。在使用之前,用户需要先建立各个载荷及边界条件所作用的SET或者SURFACE集合,之后即可通过对话框中的各个操作按钮一键设置分析中必要的参数。THERMODYNAMICS 模块主要包括如下功能:

(1)STEP 模块中定义了分析步的静力学分析类型并设置相关的参数;

(2)INTERACTION 模块中定义了模具和构件制件的接触关系,以及脱模时间步中模具的失效脱离;

(3)LOAD 模块中定义了模拟热压罐中的压力,并且将热化学的分析结果作为输入条件施加在热力学分析模型中,还可以定义模具和零件的约束等;

(4)MESH 模块定义了网格属性为C3D8R,使其满足应力应变的计算等。

以STEP 模块为例,如图6所示,在STEP 模块中,默认直接定义两个时间步,分别为固化时间步和脱模时间步。用户可以根据不同材料和子程序的固化工艺曲线设置相应的时间步的分析数据,比如时间步的分析时间、初始增量和最大/最小增量等。

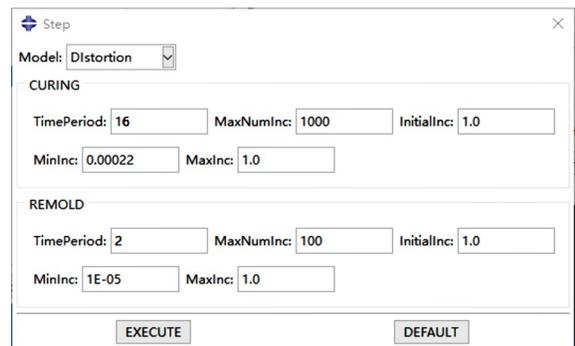


图6 STEP 功能界面

Fig. 6 The interface of the STEP function

在创建求解工作时,本软件中内置3种经典材料本构模型,包括线弹性、黏弹性和基于路径的本构模型,但不仅局限于内置本构,可根据用户需求进行定制开发。

THERMODYNAMICS 功能的部分代码如下:

```
AFXForm. __init__(self, owner)
self. radioButtonGroups = {}
self. cmd = AFXGuiCommand(mode=self, method=
'stressLoad',
objectName='stressStepInteractionLoad_Kernel',
registerQuery=False)
self. modelNameKw = AFXStringKeyword(self.
cmd, 'modelName', True, '')
```

```

self.surfaceNameKw=AFXStringKeyword(self.cmd, 'surfaceName', True, '')
self.stepNameKw=AFXStringKeyword(self.cmd, 'stepName', True, '')

```

通过调用包含不同的本构方程子程序可以实现对该构件的固化变形的预测,得到构件的应力、变形等结果。图7为将变形量放大两倍后变形。

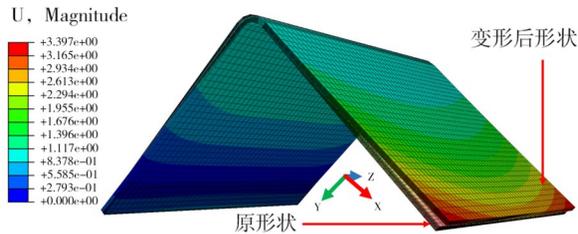


图7 热力学分析结果

Fig. 7 Results of thermo-mechanical analysis

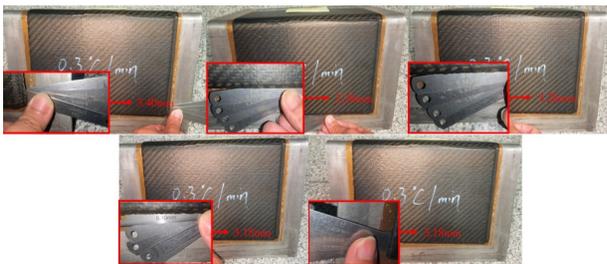
在模型中固定L型试验件的左侧,使另一侧翘曲。从结果云图可看出,翘曲最大值约为3.35 mm,在上述固定条件下,最大翘曲发生在固定位置的相对侧,结果合理。

3 结果与分析

设计L型复合材料试验件,采用热压罐固化成型方法对其进行固化实验,得到的L型构件如图8所示。零件的固化工艺曲线主要分为三个阶段:从0~5 h是升温阶段,从25°C升到180°C;5~10 h是保温阶段,以180°C的温度保温5 h。10~18 h是降温阶段,以20 °C/h的速度降温到25°C。



(a) L型试验件



(b) 塞尺测量方法及结果

图8 L型试验件及测量方法

Fig. 8 L-shaped test piece and measurement method

为了能够比较准确地得到L型复合材料构件的变形量,因此选择固定住L型构件的一个侧边,使另一侧翘曲,选择翘曲侧的五个特征点的位置,利用塞尺测定翘曲的数值,测量方法如图9所示。

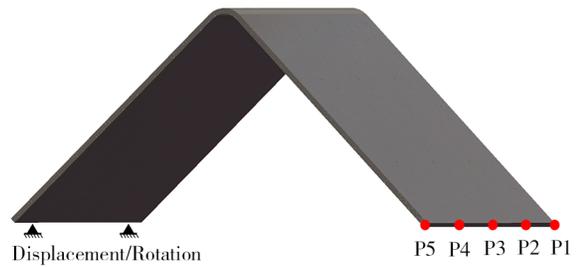


图9 L型试验件变形测量

Fig. 9 Measurement of L-shaped test pieces

3.1 有限元模型的验证

根据试验件的测量方法,相对应在有限元模型中对应选取5个测量点,提取出结果文件中5个测量点的变形量数值,输出5个特征点随时间的变化曲线,结果如图10所示。

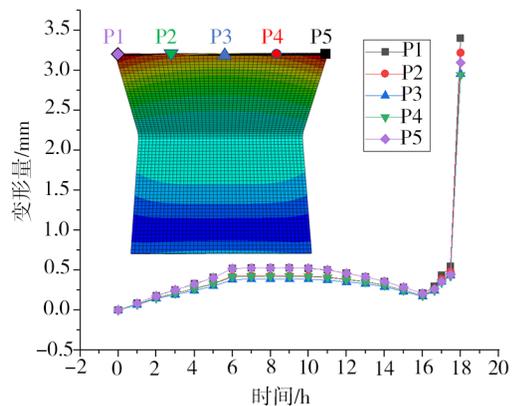


图10 5个特征点的变形量

Fig. 10 Amount of deformation at the five feature points

按同样固化工艺制得的试件上5个特征点的变形量,以降温速率为0.3°C/min为例,实验所得变形量与仿真所得变形量的对比图见图11。在5个特征点的变形量对比中,误差值最大为10.07%,出现在P3点。仿真结果与实验相比,误差小,平均误差为4.83%,表明该插件集成定义的针对复合材料固化变形的仿真前处理方法建立的有限元模型有效。

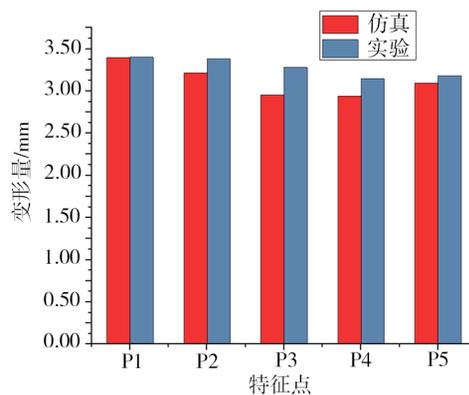


图11 仿真与实验对比

Fig. 11 Simulation and experimental comparison

3.2 降温速率对固化变形的影响

在其他工况条件不变的情况下,利用该仿真模型探究3种不同降温速率对固化变形的影响机制。利用热压罐进行L型复合材料结构的成型试验。提取边缘上28个特征点,测得3种工况下的特征点在脱模后再经过的6h之后的变形量,如图12所示。

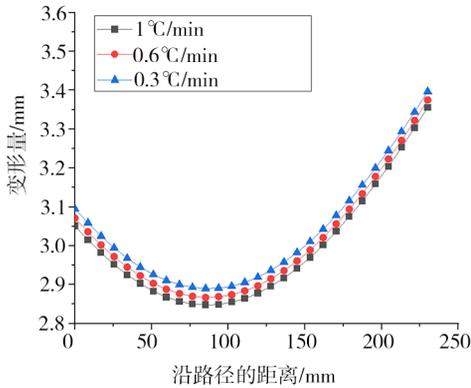


图12 不同降温速率下的变形量

Fig. 12 Amount of deformation at the five feature points

由图12可知,在0.3、0.6、和1°C/min降温速率中,随着降温速率的变化,最终的复合材料构件的变形呈线性变化。在降温速率为0.3°C/min时,构件上的最大变形量为3.397 mm,较比降温速率为0.6、1°C/min的最大变形量分别高0.65%、1.22%,即在该降温速率范围内随着降温速率的降低,变形量逐渐增大。

提取在上述时间点中3种降温速率条件下第一层,即靠模具层上的共33个单元的层间应力,如图13所示。

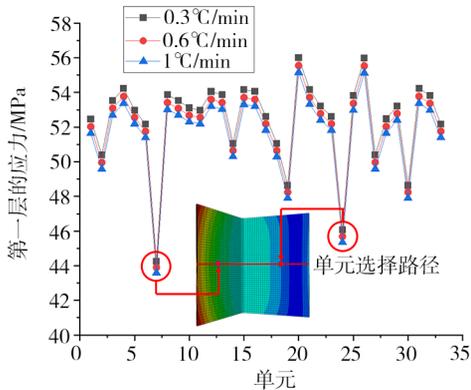


图13 3种工况下的应力

Fig. 13 Ply stress under three conditions

根据图13可知,在实验温度范围内,随着降温速率的提高,第一层的应力逐渐减小。路径中降温速率为0.3°C/min的单元应力最大为55.98 MPa,最小为44.25 MPa,比降温速率为1°C/min的对应单元应力大1.54%,小1.53%。零件自由端变形大的地方

应力相对较大,约束端可能由于固定约束的原因导致应力分布出现较大波动。

4 结论

本文针对复合材料固化仿真开发协助建立有限元模型的插件,并进行试验验证了建立的模型的有效性。同时,在该模型的基础上进一步探究降温速率对复合材料固化变形的影响。具体结论如下:

(1)该插件可以辅助用户快速对复合材料固化变形预测仿真模型进行前处理相关设置,如材料参数,接触属性,载荷施加,网格属性等前处理操作;

(2)使用该插件设置的仿真模型与传统的依次设置方法相比,设置速度快,效率高。通过该插件设置的前处理操作得到的仿真结果和实验结果比较接近,建立的仿真模型有效;

(3)通过仿真对三种不同降温速率下的复合材料固化变形进行预测,对比结果发现在实验范围内,随着降温速率的增加,构件的成型质量有所提高。

参考文献

[1] 张修路,杜芳静,黄文超,等. 飞机复合材料结构固化变形的仿真分析与控制[J]. 航空计算技术,2019,49(4): 54-58.

ZHANG X L, DU F J, HUANG W C, et al. Simulation analysis and control on curing deformation of aircraft composite structure [J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49 (4): 54-58.

[2] 张晨群,鲍益东,杨智勇,等. 基于路径相关本构模型的大型薄壁曲面复合材料零件固化变形分析[J]. 宇航材料工艺. 2022, 52(6): 92-97.

ZHANG C Q, BAO Y D, YANG Z Y, et al. Curing deformation analysis of large thin-walled curved composite parts based on path-dependent constitutive model [J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(6): 92-97.

[3] KIM D, KIM S, LEE I. Evaluation of curing process-induced deformation in plain woven composite structures based on cure kinetics considering various fabric parameters [J]. Composite Structures, 2022, 287: 115379.

[4] 刘俊增,曾玖海. 基于ABAQUS二次开发的直升机桨根快速建模方法及应力分析[J]. 航空科学技术. 2023, 34 (05): 74-79.

LIU J Z, ZENG J H. Rapid modeling method and stress analysis on helicopter propeller root based on ABAQUS secondary development [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(05): 74-79.

[5] 周洪,李宁,李阔,等. 固化工艺影响L形复合材料制件固化变形研究[J]. 航空精密制造技术,2021,57(1): 17-22.

ZHOU H LI N, LI K, et al. Influences of curing process on geometrical deformation of L-shaped composite component [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2021, 57 (1) :

17-22.

[6] 徐碧娥. 热压罐成型复合材料加筋壁板构件固化变形分析[J]. 航空发动机, 2022,48(6): 71-76.

XU B. Analysis of curing deformation in autoclave processing of stiffened composite panel [J]. Aeroengine, 2022, 48(6): 71-76.

[7] DAI J, XI S, LI D. Numerical analysis of curing residual stress and deformation in thermosetting composite laminates with comparison between different constitutive models [J]. Materials, 2019, 12(4): 572.

[8] FENG Y, HAN Z, LI R, et al. Numerical modeling for curing of unidirectional carbon fiber reinforced polymer based on micromechanics in Laplace domain [J]. Composites Science and Technology, 2022, 228: 109637.

[9] 杨梅, 晏石林, 张卫星. 树脂基复合材料成型固化过程的ABAQUS模拟[C]//第九届中日复合材料学术会议论文集. 2010.

YANG M, YAN Shilin, ZHANG Weixing. Numerical simulation of curing process of resin composite material manufacture based on ABAQUS[C]// CJJCC-9, 2010.

[10] 年春波, 王小平, 代文猛, 等. 基于ABAQUS二次开发变角度层合板屈曲特性分析[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(04): 17-22.

NIAN C B, WANG X P, DAI W M, et al. Analysis of buckling properties of variable angle laminated plates based on secondary development of ABAQUS [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(04): 17-22.

[11] 石庆华, 曹正华, 丁立民. 基于Python复合材料多加筋整体构件ABAQUS前处理二次开发[J]. 航空制造技术, 2009(S1): 36-39.

SHI Q H, CAO Z H. The secondary development of ABAQUS pre-process for composites stiffened structures based on python [J]. Aeronautical Manufacturing Technology. 2009 (S1): 36-39.

[12] 陈祥宝, 邢丽英, 周正刚. 树脂基复合材料制造过程温度变化模拟研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 61-65.

CHEN X B, XING L Y, ZHOU Z G. Simulation and modeling of polymeric composite temperature change during manufactory process [J]. Journal of Aeronautical Materials. 2009, 29(2): 61-65.

[13] 花蕾蕾. 复合材料构件固化变形分析及其模具结构优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

HUA L L. Analysis of solidification deformation of composite components and optimization of mold structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[14] 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.

[15] 甘建业, 胡伟叶, 张艺澄, 等. 变厚度树脂基复合材料构件固化变形数值模拟与影响因素分析[J]. 复合材料学报. 2023, 40(7): 4195-4209.

GAN J Y, HU W Y, ZHANG Y C, et al. Numerical simulation and influence factors analysis of cure-induced distortions in resin matrix composites with variable thickness [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 4195-4209.