

基于非正交本构模型的热塑性机织物预浸料宽温域赋形褶皱缺陷仿真方法

吕炳熠 王时玉 校金友 文立华 侯晓

A simulation method of forming wrinkle defects in thermoplastic woven fabric preregs in a wide temperature range based on non-orthogonal constitutive model

LV Bingyi, WANG Shiyu, XIAO Jinyou, WEN Lihua, HOU Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220812.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑拉剪耦合的二维编织物各向异性超弹性本构模型

An anisotropic hyperelastic constitutive model considering shear-tension coupling for 2-dimensional woven fabrics

复合材料学报. 2017, 34(6): 1388–1393 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160825.001>

碳纤维机织物增强热塑性树脂复合材料热冲压叠层模型

A lamination model for thermostamping of carbon woven fabric reinforced thermoplastic resin composites

复合材料学报. 2017, 34(12): 2741–2746 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170307.004>

褶皱缺陷影响L型层合板失效行为：实验和数值研究

Impact of wrinkle defects on failure behavior of L-shaped laminates: Experimental and numerical study

复合材料学报. 2020, 37(8): 1932–1943 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191022.001>

各向异性不同含量羟基铁粉颗粒/磁性聚氨酯泡沫的可控力学和声学性能

Tunable mechanical and acoustic properties of anisotropic magnetic polyurethane foams with different carbonyl iron powder magnetic particle contents

复合材料学报. 2020, 37(12): 3102–3110 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200401.001>

超顺排碳纳米管/硅橡胶复合材料各向异性的电学性能和力学性能

Anisotropic electrical and mechanical properties of the superaligned carbon nanotubes film/silicone composites

复合材料学报. 2017, 34(7): 1533–1539 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161018.002>

剪切载荷下温度和应变率对碳纤维增强聚醚醚酮复合材料强化行为的影响

Effects of temperature and strain rate on hardening behavior of carbon fiber reinforced polyether ether ketone composite under shear load

复合材料学报. 2021, 38(8): 2578–2585 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201015.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220812.001

基于非正交本构模型的热塑性机织物预浸料
宽温域赋形褶皱缺陷仿真方法



分享本文

吕炳熠¹, 王时玉¹, 校金友^{*1}, 文立华^{*1}, 侯晓²

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072; 2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 热塑性复合材料预制体的赋形质量直接影响结构件的制造质量。由于热塑性基体具有较高的熔融温度和黏度, 赋形工艺温度设计不合理会导致褶皱等赋形缺陷, 给热塑性复合材料结构高质量成型带来了挑战。现有的热塑性预浸料热成型研究主要基于连续介质力学、离散元、半离散元法, 通过建立多机制耦合的本构模型分析热塑性预浸料的各向异性大变形行为, 未充分考虑工艺调控对赋形宏观变形过程中褶皱缺陷的影响。发展了一种热塑性预浸料宽温域赋形褶皱缺陷仿真方法。通过表征热塑性机织物预浸料在不同温度、载荷下的力学性能, 获取宽温域热塑性预浸料本构参数, 基于非正交本构模型, 提出了温度对热塑性预浸料赋形褶皱缺陷的作用规律, 揭示了赋形过程中宽温域褶皱缺陷的变形机制, 获得了赋形温度优化调控方案。研究结果表明: 褶皱缺陷的萌生和演化过程由不同温度下的面内剪切和压缩变形行为共同影响, 预浸料的褶皱缺陷变形程度随温度的增加而减弱, 非正交本构模型的模拟结果与实验结果基本一致。

关键词: 热塑性预浸料; 赋形工艺设计; 非正交本构模型; 各向异性; 温度; 褶皱缺陷

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)04-2355-10

A simulation method of forming wrinkle defects in thermoplastic woven fabric prepregs
in a wide temperature range based on non-orthogonal constitutive model

LV Bingyi¹, WANG Shiyu¹, XIAO Jinyou^{*1}, WEN Lihua^{*1}, HOU Xiao²

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: The forming quality of thermoplastic composite preforms directly affects the manufacturing quality of structure. Due to the high melting temperature and viscosity of thermoplastic matrix, unreasonable design of forming process temperature will lead to forming defects such as wrinkles, which brings challenges to high-quality forming of thermoplastic composite structures. Currently, the existing researches on thermoforming of thermoplastic prepregs are mainly based on the continuous, the discrete and the semi-discrete approaches, the anisotropic large deformation behavior of thermoplastic prepreg is analyzed by establishing a multi-mechanism coupled constitutive model, which is not fully considered the influence of process control on wrinkle defects during forming macroscopic deformation. In this paper, a simulation method of forming wrinkle defects in thermoplastic prepregs in a wide temperature range was developed. By characterizing the mechanical properties of thermoplastic woven fabric prepregs at different temperatures and loads, the non-orthogonal constitutive model parameters of thermo-

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2022-07-22; 录用日期: 2022-08-05; 网络首发时间: 2022-08-12 16:23:10

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220812.001>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52090051); 国家自然科学基金委员会-中国航天科技集团有限公司航天先进制造技术研究联合基金 (U1837601); 陕西省重点研发计划 (2021ZDLGY11-02); 国家自然科学基金青年基金项目 (11902255)
Key Project of National Natural Science Foundation of China (52090051); The Joint Fund of Advanced Aerospace Manufacturing Technology Research of National Natural Science Foundation of China and China Aerospace Science and Technology Corporation (U1837601); Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (2021ZDLGY11-02); Youth Fund Project of National Natural Science Foundation of China (11902255)

通信作者: 校金友, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算结构力学、复合材料结构设计 E-mail: xiaojy@nwpu.edu.cn;

文立华, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞行器结构设计 E-mail: Lhwen@nwpu.edu.cn

引用格式: 吕炳熠, 王时玉, 校金友, 等. 基于非正交本构模型的热塑性机织物预浸料宽温域赋形褶皱缺陷仿真方法 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2355-2364.

LV Bingyi, WANG Shiyu, XIAO Jinyou, et al. A simulation method of forming wrinkle defects in thermoplastic woven fabric prepregs in a wide temperature range based on non-orthogonal constitutive model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2355-2364(in Chinese).

plastic prepregs in a wide temperature range were obtained. The effect of temperature on forming wrinkle defects in thermoplastic prepregs was proposed, and the deformation mechanism of wrinkle defects in a wide temperature range in the forming process was revealed, and the optimal control scheme of forming temperature was obtained. The research results show that the initiation and evolution of wrinkle defects has been affected by the in-plane shear and compressive deformation behaviors at different temperatures, the deformation degree of wrinkle defects of prepreg has been decreased with the increase of temperature. The simulation results of the non-orthogonal constitutive model are basically closer to the experimental results.

Keywords: thermoplastic prepreg; forming processing design; non-orthogonal constitutive model; anisotropic; temperature; wrinkle defect

热塑性复合材料具有良好的韧性、抗冲击性和耐温性能,是21世纪航空航天和国防领域尖端装备的理想材料^[1]。赋形工艺是保证热塑性复合材料结构高质高效制造的首要环节,通过热压、激光辅助自动铺放等加温加压手段,使预浸料贴合模具进而形成预制体^[2]。在复杂结构赋形过程中,纱线通过滑动、转动和弯曲等行为实现重分布以适应复杂的三维型面,其变形行为对温度等工艺参数依赖性较高,赋形工艺参数选取不当易导致结构变形不协调,诱发褶皱、滑移等赋形缺陷。因此,发展一种热塑性预浸料宽温域赋形褶皱缺陷仿真方法在复合材料结构高质高效制造领域具有重要的意义。

热塑性复合材料赋形过程中伴随着面内拉伸、面内剪切、面外弯曲和层间滑移等多种变形模式,耦合变形机制复杂^[3],在宏观尺度下变形行为难以准确表征。一方面是由于现有简单解耦各种变形模式的模型无法保证真实系统的能量传递规律^[4],另一方面由于目前的高温实验方法难以准确表征各种非线性和耦合因素,造成实验数据分散性大^[5],为热塑性复合材料赋形过程精确仿真带来严峻挑战^[6]。基于纯运动学的 Pin-Joint Net (PJN) 映射方法^[7]能够预测机织物预浸料面内剪切变形和纱线路径,但该方法需要有很强的假设约束。随着研究的深入,基于计算力学的有限元方法逐渐替代了 PJN 方法。Jauffrès 等^[8]将描述纱线拉伸行为的梁单元与描述基体剪切行为的二维壳单元相结合提出了混合单元法,该方法在网格化划分上较复杂且纱线之间呈正交状态,变形机制的简化和对织物-树脂力学性能的忽视导致褶皱缺陷预测不准确。为提高仿真模拟的准确性,Hamila 等^[9]基于内部虚功理论开发了半离散元法,能够准确捕捉编织预浸料的各向异性变形行为,但需要通过相邻节点单元的位置和位移计算编织单元的曲率,严重限制了其通用性。Khan 等^[10]在半离散元法

的基础上开发了一种基于纱线旋转张量客观导数的次弹性模型,该模型能够计算机织物沿经纬向的变形行为,极大地改善了半离散元法的普适性。近年来,一种基于连续介质力学的非正交本构模型^[11]被广泛接受,该方法通过解耦分析拉伸、剪切和弯曲三部分变形机制,可满足热塑性预浸料赋形变形过程仿真分析,有效提高纤维剪切角和纱线走向的预测精度,并与实验结果具有较高的一致性^[12]。

尽管非正交本构模型能够有效预测赋形过程中预浸料的纱线走向,但模型对高温条件下纤维和树脂基体之间的热传导、黏性流动状态和纤维大变形相互耦合行为考虑不充分,导致对热塑性复合材料赋形褶皱缺陷的萌生和演化规律认识不全面。赋形过程中温度升高会导致树脂黏度降低,树脂刚度及对纱线的束缚能力减弱,预浸料弯曲刚度下降^[13]。同时树脂黏度的降低也会减小接触面摩擦阻力,不仅促进了层间滑移作用,减少了褶皱的产生^[14],同时也使预浸料受到的剪切作用减弱,改善了纱线的偏转情况^[15]。对于单穹顶结构等复杂型面构件,温度等赋形工艺参数选取不当极易引发褶皱等缺陷^[16]。大多数研究集中于建立多机制耦合的本构模型,揭示热塑性预浸料赋形过程中存在的各种变形机制,忽略了预浸料变形在宏观尺度上表现出的强温度依赖性^[17]。目前,赋形温度的设计却依赖于大量测试数据遴选出合适的工艺参数,缺乏温度对热塑性预浸料赋形变形、进而诱发赋形褶皱缺陷的系统研究,不利于工程实际应用。

因此,本文选取了基于连续介质力学的机织物非正交本构模型,有利于模拟大变形下的经纬向纱线走向。其次,预浸料高温力学性能参数确定需要开展预浸料高温拉伸、剪切和弯曲实验,以准确获取仿真模型中所需的实验参数。最终,通过实验与仿真对比不同温度下的褶皱形貌,证

明了该仿真方法的有效性。

1 实验材料及方法

为获得较准确的热塑性预浸料宽温域参数，首先需要开展一系列高温力学实验，为非正交本构模型提供数据支撑，具体内容见本节。

1.1 实验材料

本文研究对象为宁波福瑞科公司生产的平纹碳纤维/聚碳酸酯 (CF/PC) 机织物预浸料，具体参数见表 1。文中 CF/PC 机织物预浸料的高温力学性能实验及单穹顶结构赋形实验所使用的试验机均为三思纵横科技股份有限公司生产的 UTM5000 系列 100 kN 电子万能试验机。

表 1 平纹碳纤维/聚碳酸酯 (CF/PC) 机织物预浸料参数

Table 1 Parameters of plain weave carbon fiber/polycarbonate (CF/PC) woven fabric prepreg

Parameter	Fabric
Weave	Plain
Density/(kg·mm ⁻³)	1.461×10 ⁻⁶
Thickness/mm	0.35
Fiber volume fraction/vol%	45
Glass transition temperature T _g /°C	150
Melting point T _m /°C	220
Fabric image	

1.2 面内单轴拉伸和偏轴拉伸实验

为防止高温夹持端打滑现象，增大夹持端接触面积，面内单轴拉伸试件和偏轴拉伸试件形状设计为哑铃型^[18]。为保证试件有效拉伸区域存在足够多的单元格，且偏轴拉伸试件在中心区域两端的纱线自由，试件尺寸为 160 mm×40 mm。试件表面划线是为测量拉伸过程中纤维剪切角的变化，如图 1 所示。为了探究温度对预浸料赋形过程中褶皱缺陷的作用规律，选取 200、210、220、230、240、250℃ 等温度点开展预浸料高温变形行为研究。为消除实验误差，每个温度点重复 3 次，

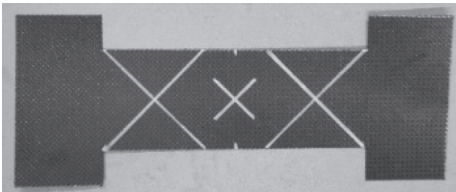


图 1 CF/PC 预浸料偏轴拉伸试样

Fig. 1 Bias-extension specimen of CF/PC prepreg

每组实验保温时间 10 min。为保证试件在高温下夹持力稳定，拉伸速率设为 2 mm/min，试件装配如图 2 所示。

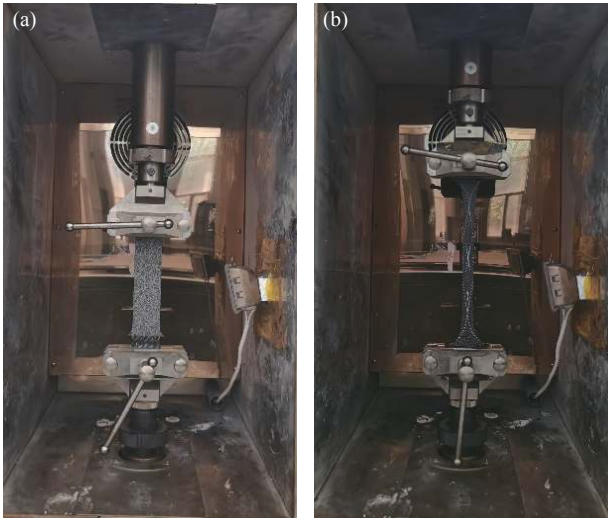


图 2 (a) 单轴拉伸实验；(b) 偏轴拉伸实验

Fig. 2 (a) Uniaxial tension experiment; (b) Bias-extension experiment

在热塑性预浸料高温力学实验过程中，假设纱线之间不存在平移滑动^[19]，可以得到纤维剪切角 γ 与位移之间的关系：

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{D+u}{\sqrt{2}D}\right)$$

(1)

其中： D 是试样初始高度与宽度之差； u 是万能试验机十字头位移。经纬向纱线在拉伸端是自由运动的，且不受张力影响。当纤维剪切角接近临界值时，极易出现由纱线滑移导致的夹持不稳定现象，因此，公式 (1) 仅用来表征经纬向纱线达到剪切锁死状态之前的变形过程。

1.3 面外弯曲实验

由于预浸料在赋形温度范围内具有一定柔软性，纱线滑移会大大降低预浸料的弯曲刚度^[20]，传统的三点弯实验不再适用，因此，本文采用悬臂梁弯曲实验。本文根据《纺织品 弯曲性能的测定 第一部分：斜面法》(GB/T 18318.1—2009)^[21] 的原理改进了夹持方式，如图 3 所示，其中，试件表面温度由热电偶实时监测，弯曲状态由数字图像相关 (DIC) 系统 VIC-2D 进行测量，求取不同位置的坐标平均值，最终获得各温度下预浸料的弯曲挠曲线。

2 结果与讨论

通过一系列高温力学实验，分析温度对热塑性预浸料拉伸、剪切和弯曲性能的作用规律，进

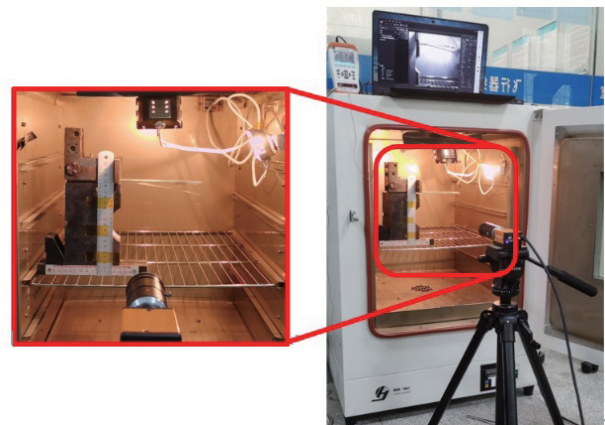


图3 弯曲实验环境
Fig. 3 Bending experiment environment

一步为宽温域下的多种变形机制及非正交本构模型提供参数，具体内容见本节。

2.1 CF/PC 预浸料面内单轴拉伸性能

图4给出了不同温度下CF/PC预浸料的单轴拉伸应力-应变结果。在预加载阶段，为保证采集数据的完整性，需要在实验开始之前将预浸料保持松弛状态，出现一定的内凹弯曲现象，而不同组实验不可避免会出现不同程度的松弛状态，导致应力-应变曲线刚开始出现不同程度的波动，直到预浸料逐步受力绷直，应力出现明显变化，在此之前的纱线状态被定义为“波动阶段”，如图4中蓝色线圈区域，不同组实验的最大波动应变不影响材料的稳定拉伸模量。随着载荷增加，预浸料呈现出近似线弹性特征，不同温度下预浸料的单轴拉伸应力-应变曲线斜率基本一致(稳定拉伸

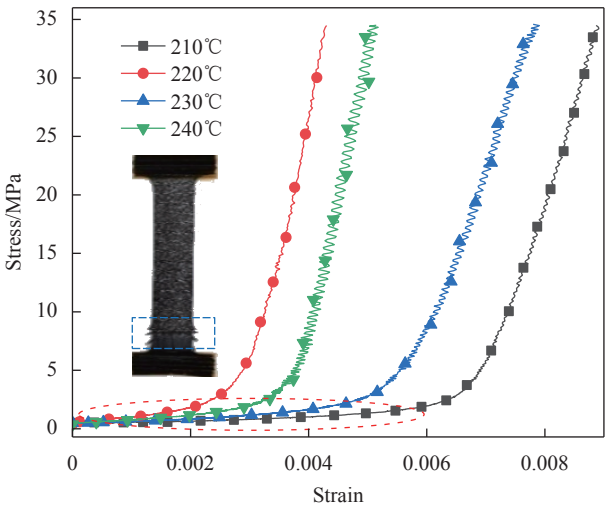


图4 各温度下CF/PC预浸料的单轴拉伸实验应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of uniaxial tension experiments of CF/PC prepreg at different temperatures

模量约为18.8 GPa)，这是由于高温拉伸时张力主要由纱线承载，而纱线对温度敏感性很低，基本忽略温度对拉伸刚度的影响；最终观察到预浸料部分纱线断裂，并伴随着端部纱线出现脱粘，如图4中蓝色线圈区域。因此，选择波动阶段末端的应变及波动阶段后的稳定刚度来描述温度对预浸料单轴拉伸行为的影响是较为合理的。

2.2 CF/PC 预浸料面内偏轴拉伸性能

图5给出了不同温度下CF/PC预浸料的偏轴拉伸剪切角变化结果。首先，施加初始预载荷来克服纱线之间的黏附摩擦效应以开始内部剪切行为，纱线在交织点处发生旋转摩擦、滑动等变形，相邻纱线彼此作用导致空隙逐渐减小^[22]，曲线呈现先升后平的趋势，出现明显“颈缩”现象，如图5中红色线圈所示。当纱线压缩至极限后，张力对试件产生了侧面压缩作用，纤维剪切角达到峰值，试件出现面外弯曲现象进而诱发褶皱缺陷，曲线表现为急剧上升趋势。由于纤维剪切角的变化与树脂基体的高温力学性能息息相关，随着温度的升高，树脂逐渐向熔融态转变，纤维剪切角变化引起的应力逐渐减小，当温度超过240℃后，变化基本趋于一致。综上所述，预浸料在不同温度下的平面内剪切行为存在较大差异，这种差异将在赋形过程中发挥重要作用。

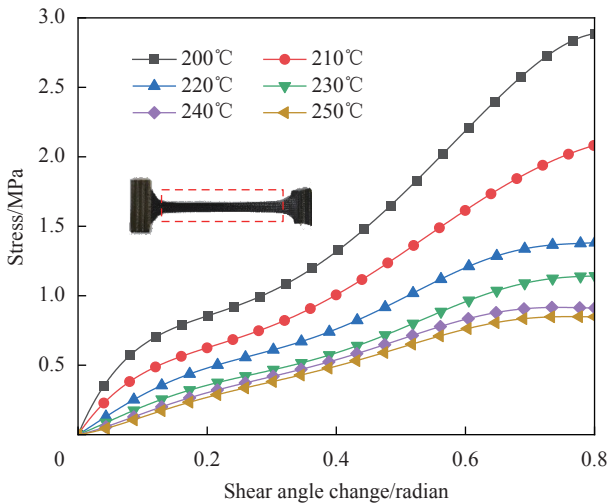


图5 各温度下CF/PC预浸料偏轴拉伸实验纤维剪切角变化
Fig. 5 Variation of fiber shear angle in bias-extension experiments of CF/PC prepreg at different temperatures

2.3 CF/PC 预浸料面外弯曲性能

图6给出了升温过程中CF/PC预浸料弯曲变形图。为减小误差，沿中心线进行图像处理提取单个基准点，获得整个试件截面点的运动路径。

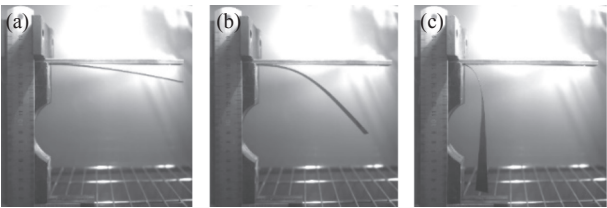


图6 升温过程中CF/PC的预浸料弯曲变形图：
(a) 25℃；(b) 150℃；(c) 250℃

Fig. 6 Bending deformation diagram of CF/PC prepreg during heating process: (a) 25℃; (b) 150℃; (c) 250℃

研究发现：随着温度的升高，树脂逐渐转变为熔融状态，受自身重力的作用，试件逐渐弯曲。由于经纱和纬纱间相互交织，机织物预浸料的弯曲变形机制不再主要基于纱线滑动，而是主要由于纱线的弯曲、旋转和纱线间的侧向挤出^[3]。

图7给出了CF/PC预浸料在熔融温度附近的弯曲曲线。可以发现随着温度的升高，纵向位移逐渐增加，材料内部大分子链发生微布朗运动，分子链结构重新排列^[23]，对应弯曲刚度逐渐减小。当温度超过240℃之后，弯曲刚度变化较小，树脂已完全融化呈流体状态，预浸料的弯曲刚度主要是由纱线刚度所贡献，说明温度升高对褶皱缺陷的抑制作用较为明显。

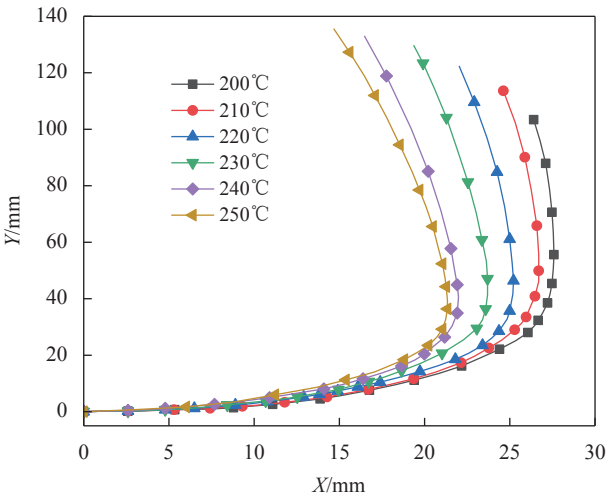


图7 各温度下CF/PC预浸料悬臂梁弯曲实验结果

Fig. 7 Bending experiment results of cantilever beam for CF/PC prepreg at different temperatures

3 赋形仿真与验证

在准确表征实验规律的基础上，选取典型的双曲率复杂结构件，通过实验与仿真相结合的方法，研究热塑性预浸料宽温域下的各向异性大变形行为，提出赋形变形主要影响机制，为工艺参

数优化调控奠定基础，具体内容见本节。

3.1 应用于机织物预浸料赋形过程的非正交本构模型

本文采用基于宏观连续介质力学的非正交本构模型，其关键思想是追踪变形过程中经纬纱线方向，构建高度依赖纱线方向的各向异性本构模型^[24]。实验研究表明，在机织物复合材料中可以完全把沿经纬向纱线方向拉伸变形和纱线间面内剪切进行解耦分析^[25]，图8给出了非正交本构模型中不同坐标系的定义，其中， f_1^0 和 f_2^0 与机织物预浸料初始正交方向经纬向纱线吻合， e_1^0 和 e_2^0 是最初局部共旋转坐标系X-Y方向， f_1 和 f_2 为当前经纬向纱线变形后方向， e_1 和 e_2 是当前局部正交共旋转坐标系X-Y变形后方向，其中， m_1 为变形过程中 e_1 和 e_2 的平分线， m_2 是 m_1 沿顺时针方向的恒定正交坐标轴。

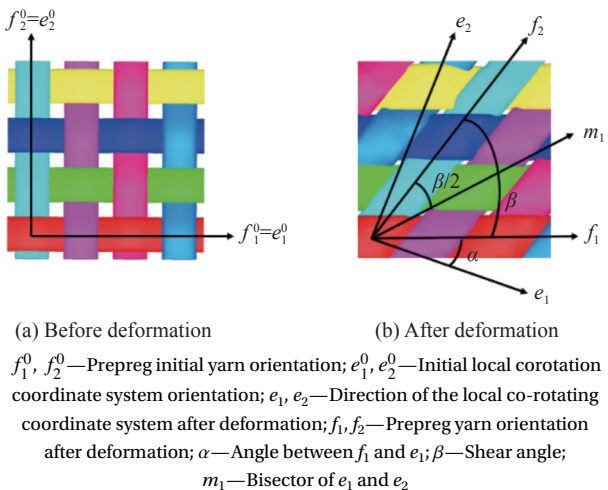


图8 非正交本构模型不同坐标系定义

Fig. 8 Definition of different coordinate systems for non-orthogonal models

其中： σ_{f1} 和 σ_{f2} 是纱线拉伸引起的应力分量，它们分别沿经纬方向； σ_{m1} 和 σ_{m2} 是纱线旋转引起的应力分量，分别沿 m_1 - m_2 方向，上述应力分量计算后全部转化到全局坐标系X-Y下(σ_{XX} 、 σ_{XY} 和 σ_{YY})，利用商用有限元软件ABAQUS®Explicit求解器，建立三维壳单元以实现热塑性机织物预浸料的建模，编写用户定义子程序VUMAT求解计算。该模型使用变形梯度张量 F 将纱线变形前后的方向关联起来，用以更新计算赋形过程中纱线应变、纱线拉伸坐标系和纱线旋转坐标系，如下式所示：

$$\begin{cases} g = F \cdot G \\ e = R \cdot E \end{cases} \quad (2)$$

其中： $\mathbf{g}$ 和 $\mathbf{G}$ 分别为局部纱线拉伸的最终方向和初始方向； $\mathbf{e}$ 和 $\mathbf{E}$ 分别为局部共旋转系的最终方向和初始方向； $\mathbf{R}$ 为旋转张量。此时可以计算出局部经线方向 f_1 与局部共旋转坐标 e_1 的相对旋转量 α 和局部经线方向 f_1 与局部纬线方向 f_2 的相对旋转量 β (纤维剪切角)。前文介绍的高温力学实验对经纬向纱线在不同条件下拉伸和旋转引起的非正交应力分量进行了表征，根据张量坐标变换原理，通过 $\sigma = \sigma^f + \sigma^m$ 计算得到了全局 $X - Y$ 坐标下的应力张量，计算过程如下式所示：

$$\sigma_{XX}^f = \sigma_{f1} \cos^2 \alpha + \sigma_{f2} \cos^2 (\alpha + \beta) \tag{3}$$

$$\sigma_{XY}^f = \sigma_{f1} \sin 2\alpha + \frac{1}{2} \sigma_{f2} \sin 2(\alpha + \beta) \tag{4}$$

$$\sigma_{YY}^f = \sigma_{f1} \sin^2 \alpha + \sigma_{f2} \sin^2 (\alpha + \beta) \tag{5}$$

$$\sigma_{XX}^m = \frac{\sigma_{m1} + \sigma_{m2}}{2} + \frac{\sigma_{m1} - \sigma_{m2}}{2} \cos (2\alpha + \beta) \tag{6}$$

$$\sigma_{XY}^m = \sigma_{f1}^m = \frac{\sigma_{m1} - \sigma_{m2}}{2} \sin (2\alpha + \beta) \tag{7}$$

$$\sigma_{YY}^m = \frac{\sigma_{m1} + \sigma_{m2}}{2} - \frac{\sigma_{m1} - \sigma_{m2}}{2} \cos (2\alpha + \beta) \tag{8}$$

$$\sigma_{XX} = \sigma_{XX}^f + \sigma_{XX}^m \tag{9}$$

$$\sigma_{XY} = \sigma_{f1} + \sigma_{XY}^m \tag{10}$$

$$\sigma_{YY} = \sigma_{f1} + \sigma_{YY}^m \tag{11}$$

其中： σ_{XX}^f 、 σ_{XY}^f 、 σ_{YY}^f 为 XX 、 XY 、 YY 方向沿纤维的应力； σ_{XX}^m 、 σ_{XY}^m 、 σ_{YY}^m 为 XX 、 XY 、 YY 方向沿基体的应力。非正交模型采用增量更新应力状态，并分析了应力-应变增量之间的关系，如下式所示：

$$d\sigma_{fk} = C_{fk} d\varepsilon_{fk}, \quad k = 1, 2 \tag{12}$$

其中： C_{fk} 是沿两个纱线方向的刚度分量； ε_{fk} 是沿两个纱线方向的拉伸应变； C_{m1} 是表征纤维剪切角变化阻力的刚度分量； γ_{12}^f 表示纤维剪切角变化增量。当经纬向纱线之间的夹角小于设定的剪切锁死角，则保持上述计算流程不变，单元中的总应力将通过式(3)更新到式(11)。当经纬向纱线之

间的夹角达到剪切锁死角时，纱线的挤压接触使结构不再具有各向异性特征，进一步剪切变形的阻力将大大增加，可近似看作各向同性材料计算。此时，由纱线拉伸引起的应力 σ_f 仍将通过式(3)~(5)计算，而纱线旋转引起的应力 σ_m 的剪切分量将由下式推导，其增量形式为：

$$d\sigma_{XY}^m = d\sigma_{f1}^m = E_{cs} d\varepsilon_{XY} \tag{13}$$

式中： E_{cs} 为纱线的稳定横向压缩模量； $d\varepsilon_{XY}$ 剪切锁定后的剪切应变增量。

3.2 非正交本构模型材料参数输入

材料性能表征是预测机织物预浸料在赋形过程中力学性能的关键，由于未固化树脂在高温下从固态转变为高黏度流体，导致预浸料的力学性能具有十分强烈的温度依赖性，在实验中确保恒定和均匀的温度场对于探究温度对赋形褶皱缺陷的作用规律非常重要。

在ABAQUS®拉伸计算中，从应力-应变曲线可以获得面内泊松比、稳定拉伸模量 E_t 和最大波动应变，在节点处由变形梯度张量得到沿纱线方向的应变，进一步计算得到由经纬向纱线拉伸引起的应力 σ_{f1} 和 σ_{f2} ；在ABAQUS®剪切计算中，可以获得纤维剪切角 β ，基准测试过程参考文献[26]，由于 C_{m1} 涉及到较复杂的纱线横向变形，本文中 C_{m1} 通过拟合纤维剪切角变化的六次多项式函数与应变的关系描述，将拟合函数的系数按照多项式次数输入非正交本构模型求解计算，如表2所示；在ABAQUS®弯曲计算中，由于压缩条件下的 C_{fk} 值无法通过单轴拉伸实验直接确定，故本文通过悬臂弯曲实验反推有限元仿真结果获得[27]，在有限元模型中输入模量和密度等材料特性，调整模量直到试件端部在 Y 方向上达到与实验中相同的位移。总之，通过单轴拉伸实验、偏轴拉伸实验和悬臂弯曲实验，可以表征纱线在不同变形状态下所有拉伸和旋转引起的非正交应力分量，为非正交本构提供准确的材料参数。

表 2 纤维剪切角变化拟合曲线
Table 2 Fitting curve of fiber shear angle change

Temperature/℃	Curve fitting parameter	Coefficient of determination R^2
200	$y = -74.21x^6 + 216.57x^5 - 275.98x^4 + 184.66x^3 - 60.72x^2 + 10.92x$	0.99996
210	$y = -7.86x^6 + 48.83x^5 - 99.01x^4 + 85.52x^3 - 32.09x^2 + 6.84x$	0.99998
220	$y = 106.35x^6 - 252.89x^5 + 208.95x^4 - 66.94x^3 + 4.25x^2 + 2.92x$	0.99998
230	$y = 74.43x^6 - 185.49x^5 + 162.48x^4 - 57.72x^3 + 6.17x^2 + 1.83x$	0.99997
240	$y = 76.99x^6 - 189.97x^5 + 169.8x^4 - 66.76x^3 + 10.68x^2 + 0.97x$	0.99999
250	$y = 66.99x^6 - 168.78x^5 + 155.42x^4 - 64.17x^3 + 11.36x^2 + 0.64x$	0.99998

3.3 典型构件赋形仿真与验证

本文选取典型的单穹顶结构作为验证案例，双曲率结构在赋形过程中会产生较大的纤维剪切角变化，能够直观反映预浸料在复杂结构赋形过程中的大变形行为，图 9 给出了单层 CF/PC 预浸料的单穹顶结构赋形模型。



图 9 单层 CF/PC 预浸料的单穹顶结构赋形模型示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the preforming model of the single dome structure of CF/PC monolayer prepreg

单层 CF/PC 预浸料的赋形实验在带有环境箱的万能试验机上进行，预浸料尺寸为 250 mm×250 mm，如图 10(a) 所示，冲头直径 120 mm，ABAQUS®中一共有 17 685 个 S4 R 线性四边形单元，迭代收敛性良好。本文设计了控制面外约束的单穹顶赋形模具如图 10(b) 所示，通过紧固螺栓可调节高温玻璃下预浸料的压边力大小，预埋 K 型热电偶以便实时监测预浸料和模具的温度变化。将模具和预浸料预热到目标温度后，控制十字冲头下移开始赋形，冲头达到指定位置后赋形过程结束。将整个系统冷却至室温后取出预浸料，观察单层 CF/PC 预浸料纱线变化及赋形褶皱缺陷。

图 11 对比了 CF/PC 预浸料单穹顶实验与仿真

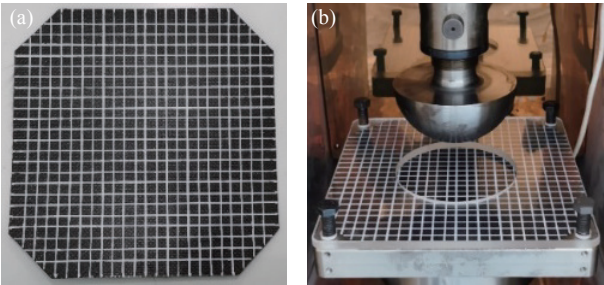


图 10 (a) CF/PC 赋形试件; (b) 单穹顶实验装置
Fig. 10 (a) CF/PC shaped specimen; (b) Single-dome experimental device

褶皱形貌。在预浸料拉深距离和纤维剪切角分布等量化指标上吻合良好，准确预示了不同温度下预浸料的褶皱缺陷，验证了非正交本构模型的计算精度。

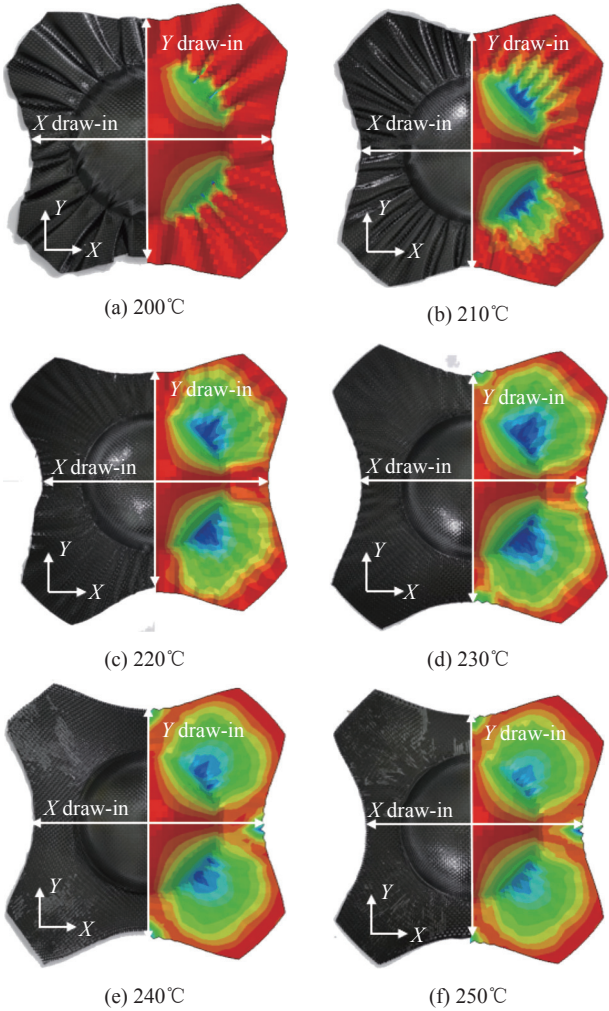


图 11 CF/PC 预浸料各温度下褶皱缺陷仿真与实验对比
Fig. 11 Comparison of wrinkle defect in simulation and experiment results of CF/PC prepreg at each temperature

3.3.1 拉深距离

拉深距离是指预浸料变形前后边界线之间的距离，从图 11 的结果可以看出，本文建立的仿真模型能够准确预测不同温度下经纬向拉深距离，反映了经纬向纱线在旋转过程中材料特性的变化。其中，200℃ 仿真拟合效果最好，褶皱位置和大小基本一致。随着温度升高，实验中 CF/PC 预浸料拉深距离波动变化，在 250℃ 仿真结果中观察到拉深距离稍小，导致偏差的主要原因一方面是由于大摩擦引起的界面接触不稳定性，没有考虑高温环境下不同界面间的摩擦效应；另一方面是由于实验材料性质的不均匀和实验模具温度不均匀引起的，对比结果见表 3。

表 3 CF/PC 预浸料拉深距离仿真与实验对比

Table 3 Comparison of draw-in values from experiment and simulation of CF/PC prepreg

Temperature/℃	X direction/mm		Y direction/mm	
	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation
200	28.7	28.6	28.8	28.4
210	29.4	29.3	29.5	29.5
220	29.6	29.7	29.6	29.2
230	29.5	29.5	29.7	29.6
240	29.7	29.7	29.8	29.7
250	29.8	29.9	29.9	29.6

3.3.2 纤维剪切角

纤维剪切角主要用来表征面内剪切行为，进而评估褶皱等缺陷的变形程度。由于结构有用部分为中心部分，故采样点都位于圆顶区域。测量路径沿坐标轴和±45°方向，如图 12 所示。在每条曲线测量路径上，有 4 个等间距的采样点，对这些对称路径上的纤维剪切角进行测量并取平均值，结果如表 4 所示。本文以 210℃ 为例，对比了仿真和实验中不同路径的纤维剪切角，可以看出，非正交本构模型成功地模拟到了纤维剪切角的变化，结果显示，7 次测量中单个点最大误差约为 4.10%，相较于 X 方向误差稍大。导致单个取样点差异较大的原因可能是：(1) 高温下熔融预浸料表面与模具表面之间的局部摩擦迟滞；(2) 理想仿真模型与物理实验边界条件略有差异；(3) 真实预浸

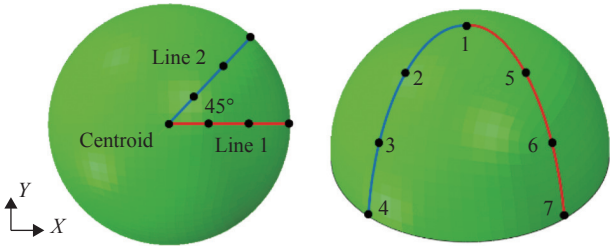


图 12 纤维剪切角测量路径

Fig. 12 Measurement path of fiber shear angle

表 4 纤维剪切角仿真与实验对比 (210℃)

Table 4 Comparison of fiber shear angle values from experiment and simulation (210℃)

Position	Shear angle/(°)		Error/%
	Experiment	Simulation	
1	89.8	89.9	0.11
2	79.3	78.5	1.00
3	68.4	65.6	4.10
4	48.7	46.9	3.70
5	89.8	89.9	0.11
6	89.5	89.6	0.12
7	86.3	86.1	0.23

料的力学性能不均匀；(4) 大变形造成的厚度分布不均。综上所述，本文采用的非正交本构模型预测纤维剪切角误差小于 5%，进一步证明了该模型在预测赋形过程中纤维剪切角变化时具有较高的准确性。

3.4 褶皱缺陷机制分析

图 11(a)~11(f) 给出了不同温度下的 CF/PC 预浸料褶皱缺陷变形形貌。观察到单穹顶结构的有效区域在±45°方向均会出现明显的纱线剪切变形，发现在机织物复合材料赋形过程中面内剪切和压缩行为是引发褶皱缺陷的主要机制。

如图 11(a)~11(d) 所示，当温度较低时 (200~230℃)，预浸料变形主要由压缩行为主导。单穹顶结构大变形区域的高斯曲率非零，赋形过程中横截面圆周上存在压缩应力和张应力。预浸料沿纱线方向的压缩敏感性较高，摩擦效应会引起在局部纱线轴向的压缩载荷，诱发预浸料瞬时屈曲失稳。由于预浸料此时存在足够的刚度以克服压缩应力和张应力，可以观察到预浸料边缘出现较为明显的褶皱缺陷并延伸至有效区域。如果预浸料继续变形，则会产生局部剪切力，通过屈曲或面外变形进行补偿。

如图 11(e)、图 11(f) 所示，随着温度的升高 (240~250℃)，预浸料变形主要由面内剪切行为主导。树脂在 240℃ 以上受压流动性增大、黏度减小的同时降低了对纱线的束缚能力，弯曲刚度衰减导致预浸料无法产生克服压边力的法向反作用力，褶皱缺陷被抑制，图中仅能观察到少量轻微的褶皱缺陷和较为严重的树脂溢出现象。对于正交各向异性预浸料，材料对压缩应力的响应取决于施加应力相对于纤维的方向。若应力方向与纱线方向不一致，则材料可以通过压缩和剪切来调节应力；若应力与纱线方向一致，则材料可能会发生弯曲，进而出现褶皱缺陷。

褶皱缺陷是一种全局变形行为,其萌生、演化过程由不同温度下的压缩和剪切变形行为共同影响,同时也是几何结构、材料刚度和作用于预浸料法向的面内载荷分布共同作用的结果。基于上述研究结果,褶皱缺陷变形程度随温度的增大而减小,为提高预制件的表面成型质量和力学性能,热塑性机织物预浸料 CF/PC 的最优赋形温度应为 235℃ 左右。后续采用电子显微镜及工业 CT 方法,检测零件特殊区域的缺陷分布及缺陷形式,进一步优化赋形工艺设计方法,实现热塑性复合材料双曲率零件赋形工艺的集成验证。

4 结论

基于连续介质力学的非正交本构模型,提出了热塑性预浸料宽温域下各向异性大变形赋形仿真方法,探究了温度对赋形过程中褶皱缺陷的作用规律,获得热塑性预浸料赋形温度优化调控方案。得到主要结论如下:

- (1) 采用的非正交本构模型能够准确模拟预浸料大变形行为,通过对比实验中经纬向拉深距离及不同位置纤维剪切角分布,验证了模型的准确性;
- (2) 面内剪切和弯曲是控制预浸料赋形褶皱缺陷的主要变形机制,调控温度能够引起预浸料刚度变化,进而影响预浸料赋形的主导机制;
- (3) 褶皱缺陷变形程度随温度的增大而减小,热塑性机织物预浸料 CF/PC 的最佳赋形温度应在 235℃ 左右。

在未来的工作中,会将该方法引入到多层复杂结构的赋形仿真模型中,推广应用。然而,本文提出的方法仍存在一定的程度简化处理,例如没有精确控制预浸料与模具之间相互作用关系,在变形过程中没有考虑不同压边力对褶皱形貌的影响,但基于本文的研究,结合细观仿真方法,探究预浸料赋形过程局部褶皱纱线形貌和力学行为,可实现多参数、多目标的赋形工艺设计方法和褶皱缺陷抑制方法,从而为工业中的大型构件赋形提供优化的赋形工艺方案。

参考文献:

[1] 洪旗,史耀耀,路丹妮,等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(12): 2822-2832.
HONG Qi, SHI Yaoyao, LU Danni, et al. Multi-response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relational analysis and response sur-

face methodology[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2822-2832(in Chinese).

[2] TATSUNO D, YONEYAMA T, KAWAMOTO K, et al. Effect of cooling rate on the mechanical strength of carbon fiber-reinforced thermoplastic sheets in press forming[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(7): 3482-3488.

[3] GONG Y, SONG Z, NING H, et al. A comprehensive review of characterization and simulation methods for thermo-stamping of 2D woven fabric reinforced thermoplastics[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 203: 108462.

[4] DENIS Y, MORESTIN F, HAMILA N. A hysteretic model for fiber-reinforced composites at finite strains: Fractional derivatives, computational aspects and analysis[J]. *Computational Materials Science*, 2020, 181: 109716.

[5] GUZMAN-MALDONADO E, HAMILA N, BOISSE P, et al. Thermomechanical analysis, modelling and simulation of the forming of pre-impregnated thermoplastics composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 78: 211-222.

[6] KÄRGER L, GALKIN S, DÖRR D, et al. Capabilities of macroscopic forming simulation for large-scale forming processes of dry and impregnated textiles[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 47: 140-147.

[7] VAN WEST B P, PIPES R B, KEEFE M. A simulation of the draping of bidirectional fabrics over arbitrary surfaces[J]. *Journal of the Textile Institute*, 1990, 81(4): 448-460.

[8] JAUFFRÈS D, SHERWOOD J A, MORRIS C D, et al. Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(2): 1205-1216.

[9] HAMILA N, BOISSE P. Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(6): 999-1010.

[10] KHAN M A, MABROUKI T, VIDAL-SALLÉ E, et al. Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2): 378-388.

[11] PENG X Q, CAO J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics[J]. *Composites part A: Applied Science and manufacturing*, 2005, 36(6): 859-874.

[12] PENG X, DING F. Validation of a non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics via hemispherical stamping simulation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(4): 400-407.

[13] LIANG B, HAMILA N, PEILLON M, et al. Analysis of ther-

- moplastic prepreg bending stiffness during manufacturing and of its influence on wrinkling simulations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 67: 111-122.
- [14] 张衡. 编织碳纤维增强热塑性复合材料叠层模型及热冲压工艺研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- ZHANG Heng. Lamination model and thermoforming process investigation of carbon woven fabric reinforced thermoplastic composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017(in Chinese).
- [15] 李哲夫, 谈源, 张俭, 等. 热模压预成型工艺参数对复合材料帽型长桁质量的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10): 3270-3280.
- LI Zhefu, TAN Yuan, ZHANG Jian, et al. Effects of hot stamp forming process parameters on quality of the hat-shaped structure preforms of composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10): 3270-3280(in Chinese).
- [16] 付掌印, 林大钧. 不可展曲面近似展开方法的合理性判断标准[J]. *工程图学报*, 2005, 26(6): 36-40.
- FU Zhangyin, LIN Dajun. Some criteria for evaluating the methods of developing undevelopable curved surface[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2005, 26(6): 36-40(in Chinese).
- [17] WANG P, HAMILA N, PINEAU P, et al. Thermomechanical analysis of thermoplastic composite prepregs using bias-extension test[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2014, 27(5): 679-698.
- [18] BOISSE P, HAMILA N, GUZMAN-MALDONADO E, et al. The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepregs: A review[J]. *International Journal of Material Forming*, 2017, 10(4): 473-492.
- [19] HARRISON P, CLIFFORD M J, LONG A C. Shear characterisation of viscous woven textile composites: A comparison between picture frame and bias extension experiments[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(10-11): 1453-1465.
- [20] BOISSE P, HAMILA N, VIDAL-SALLÉ E, et al. Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(5): 683-692.
- [21] 中国纺织工业协会. 纺织品 弯曲性能的测定 第1部分: 斜面法: GB/T 18318.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- China National Textile and Apparel Council. Textiles—Determination of bending behavior—Part 1: Incline method: GB/T 18318.1—2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2009(in Chinese).
- [22] MACHADO M, MURENU L, FISCHLSCHWEIGER M, et al. Analysis of the thermomechanical shear behaviour of woven-reinforced thermoplastic-matrix composites during forming[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 86: 39-48.
- [23] 李林秀. 热塑性复合材料热冲压成型褶皱缺陷的形成机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- LI Linxiu. Study on the formation mechanism of wrinkle defects in hot stamping of thermoplastic composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2020(in Chinese).
- [24] ZHANG W, REN H, LIANG B, et al. A non-orthogonal material model of woven composites in the preforming process[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 257-260.
- [25] BOISSE P, GASSER A, HIVET G. Analyses of fabric tensile behaviour: Determination of the biaxial tension-strain surfaces and their use in forming simulations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(10): 1395-1414.
- [26] CAO J, AKKERMAN R, BOISSE P, et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(6): 1037-1053.
- [27] LIANG B, SASA G A O, ZHANG W. An integrated preforming-performance model for high-fidelity performance analysis of cured woven composite part with non-orthogonal yarn angles[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(6): 367-378.