

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.02.013

## 基于纱线交织的旋转编织预制体表面形貌预测

朱翔宇<sup>1</sup>, 单忠德<sup>1,2</sup>, 孙正<sup>1,2</sup>, 郭子桐<sup>1,2</sup>, 王尧尧<sup>1,2</sup>, 刘家乐<sup>1</sup>,  
高一岑<sup>1</sup>, 孙宪鹏<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016; 3. 南京长江工业技术研究院, 南京 211500)

**摘要:** 旋转编织是一种高效的复合材料预制体成形工艺, 编织过程中工艺参数的设计对预制体成形质量至关重要。传统模型由于忽略了纱线之间的相互作用, 导致编织角的预测值与实际值之间存在较大误差。本文基于织物编织成形机理, 划分了编织过程中的交织点行为区域, 定义了纱线交织点的生成速度和消耗速度, 并建立了基于预制体交织数量守恒的旋转编织数学模型, 实现了对预制体编织角和纱线宽度的精确预测。此外, 通过变截面芯模的编织实验验证了该模型的有效性。实验结果表明, 该模型能够有效反映变截面编织过程中编织角和纱线宽度变化的滞后现象, 同时探讨了不同速度配比对预制体表面质量的影响。

**关键词:** 旋转编织; 编织角; 预测模型; 交织点

中图分类号: TS104

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)02-0318-09

## Surface Morphology Prediction of Preforms in Rotational Braiding Process Based on Yarn Interlacement

ZHU Xiangyu<sup>1</sup>, SHAN Zhongde<sup>1,2</sup>, SUN Zheng<sup>1,2</sup>, GUO Zitong<sup>1,2</sup>, WANG Yaoyao<sup>1,2</sup>, LIU Jiale<sup>1</sup>,  
GAO Yicen<sup>1</sup>, SUN Xianpeng<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;  
3. Nanjing Changjiang Industrial Technology Research Institute, Nanjing 211500, China)

**Abstract:** Rotary braiding is an efficient composite preform molding process, and the design of process parameters during braiding is crucial to the preform's forming quality. Traditional models, due to their neglect of the interactions between yarns, result in significant discrepancies between the predicted and actual braiding angles. Based on the mechanism of fabric braiding, this paper divides the interlacing point behavior regions during the braiding process, defines the generation and consumption speeds of yarn interlacing points, and establishes a mathematical model of rotary braiding based on the conservation of interlacing points in the preform. The model achieves accurate predictions of the braiding angle and yarn width of the preform. Furthermore, the validity of the model is verified through braiding experiments using a variable cross-section mandrel. Experimental results show that the model effectively reflects the hysteresis phenomenon of braiding

**基金项目:** 江苏省前沿引领技术基础研究专项基金(BK20212007); 青年科学基金(52305376); 中国博士后科学基金(YBA23044, YBA23031)。

**收稿日期:** 2024-11-05; **修订日期:** 2025-03-24

**通信作者:** 单忠德, 男, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, E-mail: shanzd@nuaa.edu.cn; 郭子桐, 男, 讲师, E-mail: guozitong@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 朱翔宇, 单忠德, 孙正, 等. 基于纱线交织的旋转编织预制体表面形貌预测[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 318-326. ZHU Xiangyu, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. Surface morphology prediction of preforms in rotational braiding process based on yarn interlacement[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(2): 318-326.

angles and yarn width changes during the variable cross-section braiding process and explores the impact of different speed ratios on the surface quality of the preform.

**Key words:** rotational braiding; braiding angle; prediction model; interlacement points

先进复合材料具有高比强度、高比刚度等优点,已广泛应用于航空航天、汽车船舶和轨道交通等领域<sup>[1-3]</sup>。其中编织复合材料与层合复合材料相比,采用编织工艺成形的预制体增强复合材料由于其无缝交错的结构而具有优异的完整性,更耐疲劳、可设计性更强,已应用至发动机扩张段、风扇叶片和火车转向架等关键部件中<sup>[4-6]</sup>。

编织复合材料的制造工艺灵活多样,可以改变不同的工艺参数如运动方式、编织路径及编织速度等来实现不同的结构设计需求<sup>[7]</sup>。这种灵活性使其能够适应复杂形状和大尺寸结构的制造要求,显著提高了设计自由度和生产效率,同时这种灵活性也使工艺规划更复杂多变<sup>[8]</sup>。因此,研究旋转编织机理、成形过程并选取合适的工艺参数对复合材料预制体成形有重要意义。

连续式旋转编织工艺如图1所示,编织底盘上有两组携纱器分别按逆时针和顺时针的方向进行周期性轨迹运动。纱线自携纱器不断被牵拉放出,并通过张力调控手段实现编织过程张力的连续稳定<sup>[9]</sup>,接着穿过编织环以调整纱线的空间分布,最终在芯模上固定所形成的交织点汇聚于芯模表面并堆积为预制体<sup>[10]</sup>。用于描述预制体几何结构的关键参数包括编织角、表面覆盖率和纱线宽度等,研究表明这些参数与编织复合材料的力学性能密切相关<sup>[11-12]</sup>。其中,预制体的编织角指纤维相对于芯模轴向的夹角,与编织复合材料的弹性性能、机械强度及失效形式密切相关<sup>[13-16]</sup>。编织复合材料的表面覆盖率与纱线宽度的波动水平已被证实与复合材料性能稳定性有显著关联<sup>[17]</sup>。

编织过程需调节多种工艺参数以达成预期的预制体几何结构,这些工艺参数包括芯模形状、纱线种类、携纱器角速度和牵引速度等<sup>[18]</sup>,工艺参数

不仅对编织织物的几何结构产生重大影响,还直接关系到织物的成形质量,进而影响材料的整体性能<sup>[19-20]</sup>。为满足编织复合材料的结构和性能要求,针对不同形状和工艺需求的产品往往需要进行新的开发。由于所用材料成本较高且准备工作耗时较长,产品设计需要多次迭代与试错,因此亟需可靠的预测方法来减少开发成本和时间。

由此许多学者针对旋转编织的工艺过程展开研究,探究工艺参数对预制体空间结构的影响。首先在编织角预测模型方面,Du和Popper<sup>[21]</sup>建立了关联底盘携纱器角速度与芯模提升速度的编织角预测模型,为传统预制体编织角的预测提供了基础模型,至今仍被广泛应用。Potluri等<sup>[22]</sup>进一步提出了一种基于编织速度的编织角理论公式,同时计算芯模表面覆盖系数,实现了任意芯模形状下织物结构的模拟。Heieck等<sup>[23]</sup>提出了以编织角波动、纱线宽度波动和芯模表面覆盖率为主的预制体表面编织质量的评价指标,并将其与机械性能相关联,结果表明所测纤维结构与力学性能之间存在很强的相关性。

在编织结构的几何建模方面,Ning等<sup>[24]</sup>在考虑纱线体积间相互作用产生弯曲的基础上,提出了一种以广义玫瑰曲线为数学模型的管状编织结构几何建模技术,有效提升了模型的精确度。Rawal等<sup>[25]</sup>进一步将纱线在芯模表面的波动视为正弦函数,基于此建立了变截面芯模预制体的几何模型,实现了在不同编织角下对织物形貌的精确预测。

在编织过程的解释与预测方面,王晓明等<sup>[26]</sup>探讨了旋转编织时不同起始编织点位置对编织角的影响,提出了描述编织角随时间变化的本构方程,能够预测编织过程中的时间需求与织物长度。Van等<sup>[27]</sup>建立了纱线与纱线之间的接触模型,修正了传统模型中收敛区的长度,实现编织点位置与编织角的预测。Vu等<sup>[28]</sup>则提出了一种新型纱线相互作用模型,能够有效模拟非轴对称和复杂预制体的双轴编织过程,为复杂结构的编织模拟提供了理论支持。

国内外学者对旋转编织工艺的研究较为丰富,但仍存在以下问题:首先,经典的旋转编织模型通常将芯模提升速度、携纱器角速度和芯模半径作为输入参数,但这可能导致部分工艺参数与设备参数不匹配,尤其是携纱器角速度与设备底盘转速在不

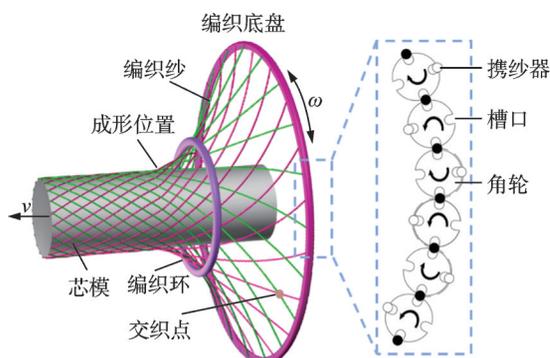


图1 连续式旋转编织工艺示意图

Fig.1 Schematic of continuous rotary braiding process

同编织底盘配置下的关系可能出现偏差。其次,纱线宽度作为预制体表面的关键形貌参数,针对其影响因素与变化规律的研究较为缺乏。为解决这两大问题,本文首先建立了传统工艺参数与设备参数之间的映射关系,并通过数学解析方法构建了旋转编织过程中的纱线交织生成-消耗模型。该模型定量表征了编织过程中纱线交织生成和消耗的速度,并能够预测在变截面编织过程中预制体纱线宽度的变化。后续实验进一步验证了该模型的有效性,并探讨了预制体成形速度、编织角以及纱线宽度对预制体表面均匀性的影响。

## 1 二维编织运动参数与工艺参数映射关系

编织角在预制体结构中起关键作用,对材料的力学性能、稳定性以及最终应用的适应性会产生深远影响。编织角是指在编织过程中,由两组运动方向相反的纱线交错编织而成的预制体中,纱线的走向与芯模轴线之间形成的夹角。Du等<sup>[21]</sup>提出了经典模型,通过分析底盘携纱器角速度与芯模提升速度的关系来预测预制体的编织角。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\omega R}{v}\right) \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为编织角, $R$ 为芯模半径, $v$ 为芯模向上提升的速度, $\omega$ 为携纱器在底盘上圆周运动的角速度。图2展示了该模型所适用的连续式旋转编织设备。



图2 连续式旋转编织设备

Fig.2 Continuous rotary braiding equipment

携纱器在底盘上圆周运动的角速度 $\omega$ 需通过伺服电机转速、减速比以及底盘排布方式进行计算。底盘上携纱器的实际运动方式与运动路线如图3所示,编织设备的底盘由环形排列的角轮组

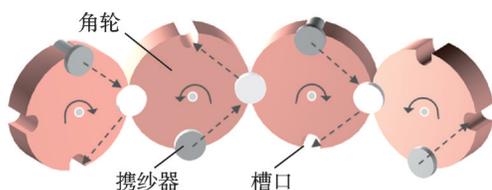


图3 角轮槽口与携纱器位置

Fig.3 Positions of angle wheel groove and carrier

成,相邻的角轮沿相反方向旋转。携纱器在角轮的驱动下沿底盘进行旋转运动,一组携纱器沿顺时针方向旋转,另一组携纱器沿逆时针方向旋转。

为使携纱器能够在圆环面上运动,编织设备采用单部电机驱动锥齿轮组的传动方式:电机通过减速机将动力传递至锥齿轮组,每个锥齿轮刚性连接一个拨盘,拨盘的旋转带动角轮转动。为了避免设备运行时携纱器发生干涉,即在两个角轮交接处只能有一个携纱器,设计要求每个拨盘在同一时刻仅能容纳2个携纱器。

携纱器在底盘运动时的路径为多个半圆形拼接而成,计算出拨盘累计旋转圈数,即可计算出携纱器在底盘上运动周期与角速度。拨盘旋转圈数为

$$n_c = \frac{n_b}{n_o} \quad (2)$$

式中: $n_b$ 为拨盘个数, $n_o$ 为携纱器运动轨道数。对于配置单行拨盘的旋转编织设备,轨道数为2,拨盘个数为32,当携纱器绕底盘运动一圈时,此时所有拨盘均转过半圈,累计旋转16圈。则携纱器在编织底盘上运动一周所需的时间为

$$T = \frac{60n_c i}{n_m} \quad (3)$$

式中: $n_m$ 为电机转速,单位为r/min; $i$ 为电机端到锥齿轮端的减速比。

由于编织设备底盘半径远大于拨盘的半径,可将携纱器在底盘上的运动近似为匀速圆周运动,则携纱器的角速度可表示为

$$\omega = \frac{\pi n_m}{30n_c i} \quad (4)$$

变截面芯模的半径与芯模高度有函数关系 $R(h)$ ,将式(4)代入式(1)中,则导出编织角为

$$\alpha(h) = \arctan\left(\frac{\pi n_m R(h)}{30n_c v i}\right) \quad (5)$$

式中 $\alpha(h)$ 为由经典模型导出的编织角与芯模高度关系。该式建立了工艺参数与二维编织运动参数之间的关键映射。

## 2 旋转编织交织点生成-消耗模型

当从单根或几根纱线的局部运动转换到编织过程的整体视角时,无论任何模式的编织底盘构型和编织设备的运动方式如何,纱线总是在底盘上首先形成交织点,这些交织点在编织过程中不断提升,最终在芯模位置汇聚并形成预制体。基于这一过程,可以将编织设备的操作区域划分为3个主要区域:纱线交织生成区、纱线交织挤压区以及纱线交织消耗区,如图4所示。

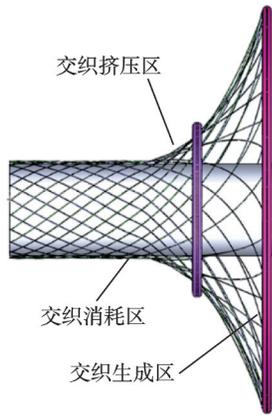


图 4 旋转编织交织点行为区域划分

Fig.4 Division of interlacing point behavior regions in rotary braiding

纱线交织生成区位于编织底盘的核心位置,在该区域内,携纱器在空间中进行相向运动,使纱线彼此交错形成基础的交织结构。在连续式旋转编织中,交织点的形成源于携纱器在轨道上的相向运动;而在步进式旋转编织中,交织点则是在开关(弧拨)旋转 180°时形成。此环节是整个编织过程的基础,决定了预制体的拓扑结构和几何参数。

纱线交织挤压区位于编织环与芯模之间,纱线的相向运动使得其交织点逐渐从底盘外环位置移至芯模中心位置,该区域内纱线已完全聚拢,无空隙但尚未固定在芯模上。此时,由于相互挤压,纱线的宽度出现收窄的现象,这是编织过程中纱线结构紧密度增加的关键阶段。

纱线交织消耗区则位于预制体成形的位置,在此区域,纱线同时受挤压区的纱线径向合力不断聚拢,提升机构的轴向拉力不断提升,其交织点逐渐逼近芯模表面,直至与芯模接触后在纱线张力与芯模表面摩擦力的作用下固定在芯模上而形成预制体结构。这里的“消耗”指交织点在芯模上完成固定,最终形成预制体部分的过程。

在交织点生成区域内,2组携纱器沿轨道进行相向运动并在交错后形成交织点,如图 5 所示,携纱器在运动 1/4 圆后,2 条纱线完成交错,形成一个交织点。基于这一过程,可以通过交织点的生成速度来量化编织速度。在连续式编织设备中,携纱器

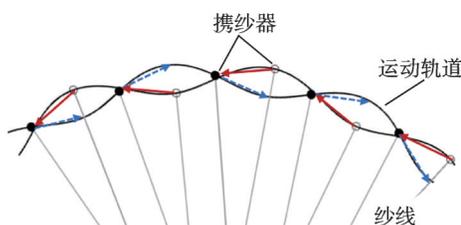


图 5 交织点生成原理

Fig.5 Principle of interlacing point generation

旋转一周后,2组纱线彼此间均完成 1 次两两交织,因此交织生成速度可表示为

$$v_s = \frac{n_d^2}{4T} \quad (6)$$

式中: $n_d$ 为携纱器数量, $T$ 为一个携纱器转一圈所需时间。交织生成速度的物理意义在于单位时间内编织底盘所生成的交织点数量。

芯模上纱线交织点的分布如图 6 所示,预制体可以沿周向分为数量为  $2/n_d$  的菱形代表单元,其宽度由携纱器的锭数和芯模直径表示为  $4\pi D/n_d$ 。在时间元  $dt$  内,芯模向上提升的距离为  $vdt$ ,该距离减去对未编织的纱线的牵拉距离(即编织点的位移)则是预制体编织成形速度。纱线交织的消耗速度可表示为

$$v_h = \frac{\left(v - \frac{dH}{dt}\right) dt}{p} \cdot n_d \cdot \frac{1}{dt} = \frac{1}{p} \cdot \left[ n_d v - \left(\frac{dH}{dt}\right) \right] \quad (7)$$

式中: $p$ 为节距, $H$ 为成形位置高度。交织点消耗速度的物理意义为在单位时间内沉积到芯模上的交织点的个数,定量描述了预制体的成形速度。

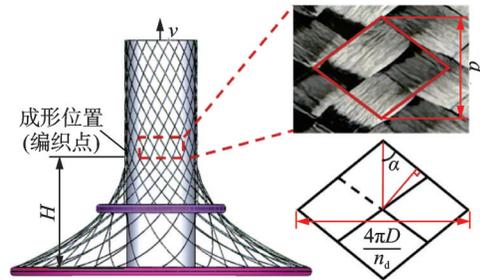


图 6 交织点消耗原理

Fig.6 Principle of interlacing point consumption

在预制体编织成形过程中,交织点始终在底盘上生成,并随着编织过程的进行,逐渐被下层的交织点挤压至芯模表面。交织点的总数量在整个过程中保持守恒,基于交织点生成速度与消耗速度的动态平衡,在时间元  $dt$  内,交织点数目满足

$$v_s dt = v_h dt + \Delta Q \quad (8)$$

式中  $\Delta Q$  指在  $dt$  时间内挤压区纱线交织点的增量,如果该值为正,则表明交织点的生成速度高于消耗速度。该关系式表明,在一段时间内纱线交织生成的数量等于纱线交织消耗的数量与挤压区内纱线交织点的变化量之和。将式(6,7)代入式(8)可导出节距  $p$  为

$$p = \left( n_d v - \frac{dH}{dt} \right) \cdot \left[ \frac{1}{\frac{n_d^2}{4T} - \frac{\Delta Q}{dt}} \right] \quad (9)$$

由此菱形单元的宽度与高度均能被输入参数表示,则编织角即为该代表单元上顶角的一半

$$\alpha = \arctan \frac{4\pi D}{n_d p} \quad (10)$$

当编织过程处于稳定状态时,即编织点的位置不再发生移动,且牵引速度和携纱器的转速保持恒定,此时纱线交织的生成速度与消耗速度相等。在这种稳定状态下,可以从式(10)导出预制体节距和编织角的表达式

$$p = \frac{4Tv}{n_d} \quad (11)$$

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\pi D}{Tv} \right) = \arctan \left( \frac{\omega R}{v} \right) \quad (12)$$

通过上述推导得到的节距和编织角的表达式在化简后与 Du 等<sup>[21]</sup>提出的经典模型式(1)相同。这表明,在稳态编织过程中,通过交织点的消耗生成模型与由单根纱线运动速度导出的编织角具有一致性。进一步说明了编织角不仅可以通过单根纱线的运动角度预测,也可以通过交织点生成和消耗的动态平衡来计算。

当编织达到稳态后,编织点的前后变化量相较于芯模的提升量微乎其微。因此式(9)中可忽略  $\frac{dH}{dt}$ ,并用参数  $\mu(h)$  代替  $\frac{\Delta Q}{dt}$  以反映交织点在挤压区堆积的程度,其中参数  $\mu(h)$  可以通过芯模的几何外形来确定,其表达式为

$$\mu(h) = \int_0^h k(h) dh \quad (13)$$

式中  $k(h)$  表示芯模在高度为  $h$  时的斜率,此处斜率符号应根据芯模的几何形状进行区分:当芯模半径随着高度  $h$  增大时,斜率  $k(h)$  取正值;芯模半径随着高度  $h$  减小时,斜率取负值。该式明确了芯模外形的变化如何影响挤压区内纱线交织点的数量,从而影响编织过程的整体平衡和预制体的成形质量。则式(9)可写为

$$p(h) = (n_d v) \cdot \left[ \frac{1}{\frac{n_d^2}{4T} - \mu(h)} \right] \quad (14)$$

对于碳纤维预制体,假设覆盖率为 100%,则由菱形单元可导出编织纱线宽度为

$$b_t = \frac{n_d p}{4\pi D} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{2\pi D}{n_d} \right)^2 + \left( \frac{p}{2} \right)^2}} \quad (15)$$

### 3 交织点生成-消耗模型的实验验证

为验证上述工艺参数调控的有效性以及编织角和纱线宽度预测的准确性,在芯模上进行了编织实验。实验中,芯模呈圆锥形,小端直径为 30 mm,大端直径为 60 mm,变径长度为 120 mm,编织方向

由小端向大端逐渐编织。

实验设计了 4 组目标编织角,当芯模直径处于 30 mm 时,设定编织角分别为 31°、34°、37°、40°。根据式(10)计算出相应的底盘电机转速与芯模提升速度,如表 1 所示。在每组编织角条件下,分别设置高、中、低 3 挡电机转速和牵引速度,以直接反映预制体的成形速度。通过这些实验设置,可以系统地验证不同编织角下预制体的形成质量,并检验理论预测的编织角和纱线宽度是否与实际成形结果相一致。

实验平台为 108 锭旋转式编织设备,其携纱器布局至多支持三轴织物的编织,本实验采取双轴编织携纱器配置,共计 72 锭纱线,所用碳纤维为恒神 T700-12K 碳纤维,芯模的中心线与编织中线重合。

表 1 实验组工艺参数

Table 1 Process parameters of experimental groups

试件序号	电机转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	牵引速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	预设编织角/(°)	预制体成形速度/(mm·s <sup>-1</sup> )
1	432	370(低速)	31	6.2
2	648	555(中速)	31	9.3
3	864	740(高速)	31	10.6
4	432	332(低速)	34	5.5
5	648	498(中速)	34	8.3
6	864	664(高速)	34	11.1
7	432	297(低速)	37	4.9
8	648	445(中速)	37	7.4
9	864	594(高速)	37	9.9
10	432	266(低速)	40	4.4
11	648	399(中速)	40	6.6
12	864	532(高速)	40	8.8

共编织制备预制体样件 12 个,芯模外形与编织预制体如图 7 所示。由于需在锥形平面上测量

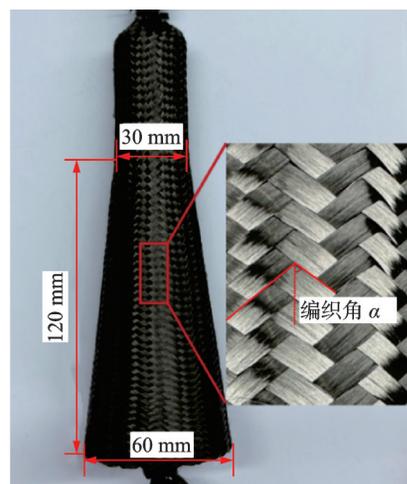


图 7 在变径芯模上编织的预制体段

Fig.7 Preform segment braided on variable-diameter mandrel

每个位置的编织角,故使用数显角度尺手动测量编织角。实际编织角的测量分为两步,首先使用游标卡尺测量每个编织角所处芯模高度位置,再使用数显角度尺依次测量每个编织角大小。预制体的纱线宽度是通过游标卡尺在芯模高度为0、20、40、60、80和100 mm六个等距位置测量,每个高度位置测量8个纱线宽度值,每个实验样件共测量48个纱线宽度数据。

#### 4 模型预测值与实验结果值对比

使用本文提出的交织点生成-消耗模型将变径芯模斜率与表1中各实验组工艺参数代入式(10, 14)中,可计算出各工况下的编织角与纱线宽度分布,同时使用经典模型计算相同工况下的编织角与纱线分布,并将其与实验测量值进行对比分析。如图8所示,随着芯模高度从0 mm增长至100 mm,12组实验样件的编织角均表现出不同程度的增长趋势。在这种工况下,将实验测得编织角与所对应芯模高度计算得到的理论编织角代入式(16)求取其均方根误差(Root mean square error, RMSE)为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (16)$$

式中: $y_i$ 为实验所测的编织角大小, $\hat{y}_i$ 为模型预测编织角大小。本文模型预测的编织角与实验值之间的RMSE约为 $0.664^\circ$ ,而经典模型的RMSE约为 $1.785^\circ$ ,预测误差降低了62%。预测性能的提升主要是因为经典模型仅考虑了编织时的提升速度和旋转速度,而忽略了在变截面过程中纱线的挤压作用,导致其预测误差随着芯模半径的增大而逐渐增加。本文提出的交织点生成-消耗模型则考虑了编织过程中交织点的堆积情况,并引入了参数Q表征交织点的挤压程度。因此,在芯模高度为100 mm时,本文模型预测的编织角比经典模型小 $2^\circ \sim 3^\circ$ ,这一差异反映了编织过程中预制体编织角的滞后现象。

纱线宽度作为预制体表面形貌特征关键参数,反映出预制体编织的均匀性。图9显示纱线宽度与芯模高度关系,随着芯模高度由0 mm增长至100 mm,纱线宽度从2.1 mm增长至3 mm不等。将实验所测纱线宽度与理论模型计算得到的纱线宽度按式(17)求取其平均百分比误差(Mean absolute percentage error, MAPE)为

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (17)$$

使用经典模型对纱线宽度的MAPE预测误差平均约为9.1%,使用本文模型的平均预测误差约

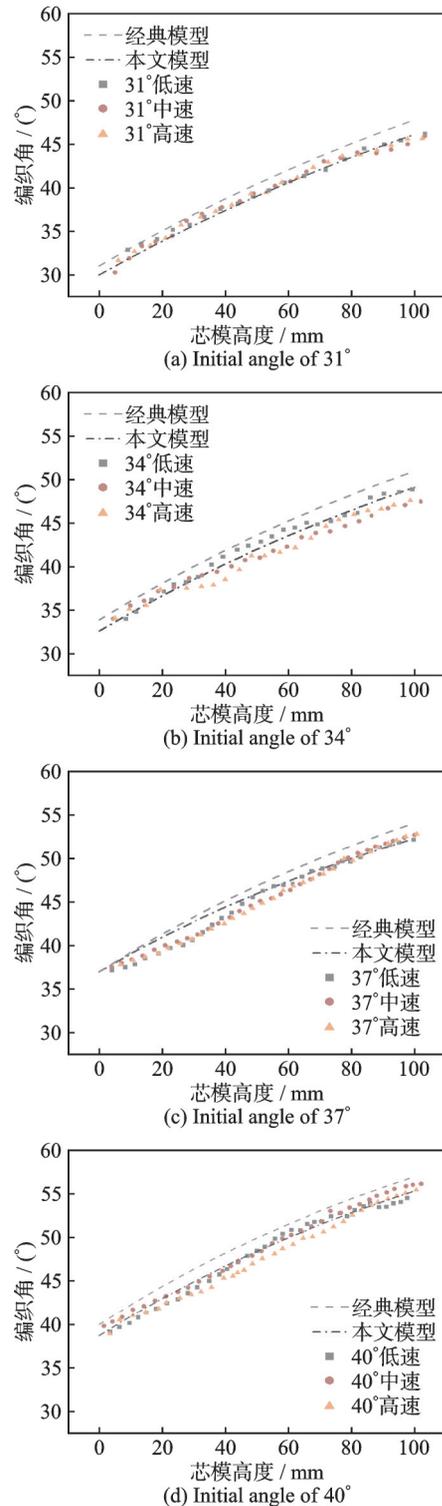


图8 芯模高度-编织角关系

Fig.8 Relationship between mandrel height and braiding angle

为4.7%。本文模型所预测的纱线宽度值较经典模型预测值平均上浮约3%,由式(10, 15)知:在满覆盖率情况下,编织角与纱线宽度呈负相关,这与本文提到的编织角滞后现象相一致。因此,在编织角较小的情况下,纱线在轴向分布相对松散,挤压程度较低纱线宽度更大,本文模型预测的纱线宽度更能反映实际编织过程中的情况。

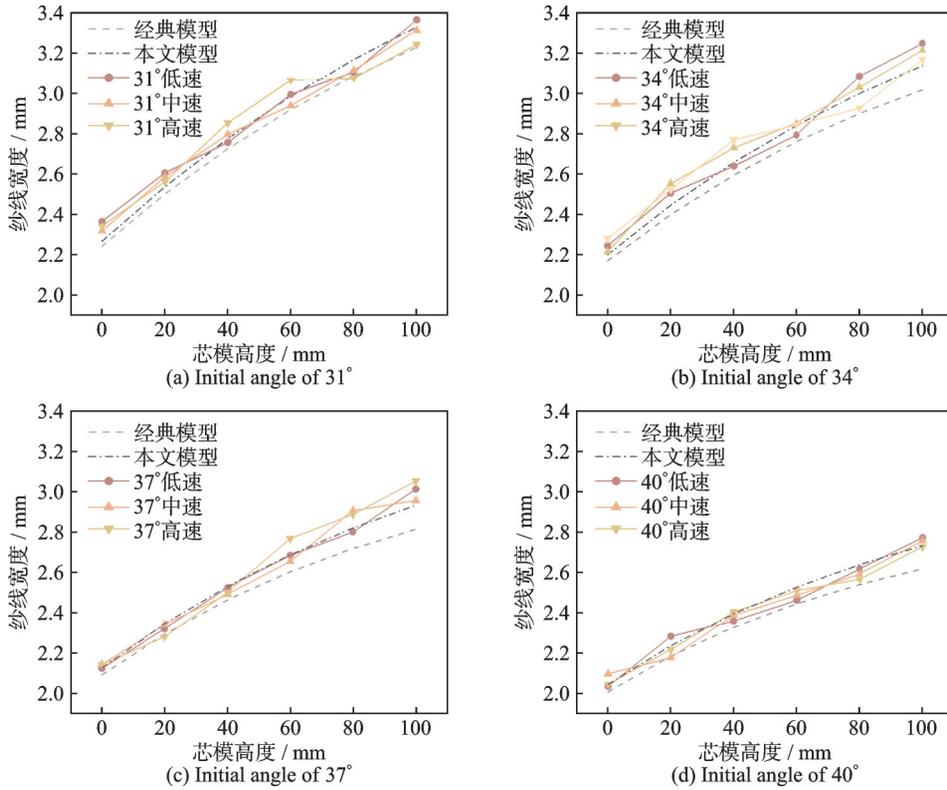


图9 芯模高度-纱线宽度关系  
Fig.9 Relationship between mandrel height and yarn width

观察低速、中速和高速 3 组不同预制体成形速度实验组的纱线宽度变化曲线时发现,不同成形速度对纱线宽度均值的影响较为微弱,均值变化幅度小于 5%。然而,当统计不同预制体成形速度下、相同芯模高度的纱线宽度标准差时(图 10),在 31° 组和 34° 组中,高速编织时的纱线宽度波动水平显著高于低速和中速编织时的波动水平,编织速度提高一倍,纱线宽度标准差增大 21%。这表明,较小编织角时(如 31° 和 34°),编织速度的增加容易导致纱线宽度波动增大,从而影响预制体的表面均匀性;而在较大编织角(如 37° 和 40°)下,纱线的自我挤压作用对表面质量的影响更为显著,编织速度对纱线宽度波动的影响相对较小。

图 11 展示了纱线宽度的方差与纱线宽度均值

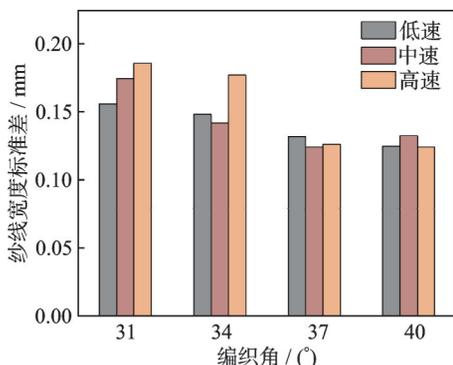


图 10 不同速度下的纱线宽度标准差  
Fig.10 Standard deviation of yarn width at different speeds

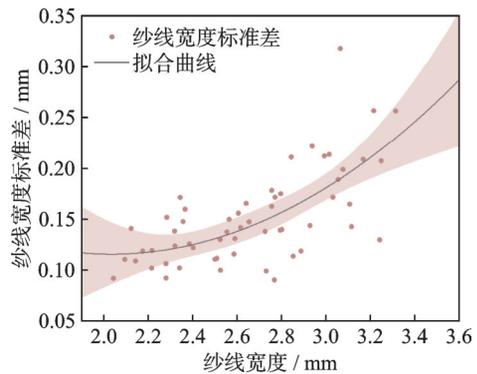


图 11 纱线宽度与其标准差关系  
Fig.11 Relationship between yarn width and its standard deviation

之间的关系,当纱线宽度均值从 2.0 mm 增大至 3.4 mm 时,纱线宽度标准差同步由 0.13 mm 增至 0.23 mm,纱线宽度的波动水平与纱线宽度本身相关。在编织过程中,较宽的纱线通常处于较低的挤压水平,因此其宽度更容易受到外力的影响,导致宽度波动更加显著;而较窄的纱线由于处于较高的挤压水平,其宽度变化相对较小,波动较低,这导致了纱线宽度增大时,其波动水平也相应增高。

## 5 结 论

为探究旋转编织过程中织物表面几何形貌与工艺参数之间的关系,本文构建了旋转编织工艺参数与二维旋转编织设备控制参数的映射关系,并对

编织过程中的交织点行为进行了区域划分。通过定义纱线交织点的生成速度与消耗速度,建立了以编织过程中生成交织数量与消耗交织数量守恒为基础的旋转编织过程数学模型,通过变截面芯模的编织实验,验证了该模型的有效性,并得出了以下结论:

(1) 在变截面编织过程中,编织角和纱线宽度的变化相较于经典模型存在滞后现象。该滞后性表明经典模型未能充分考虑纱线在变截面编织过程中的挤压和堆积效应,而本文提出的模型则更准确地捕捉到了这一特性,模型预测的编织角平均误差为 $0.664^\circ$ ,相比经典模型,误差降低了62%。

(2) 不同挡位的编织速度对成形预制体表面形貌均匀性产生了显著影响。编织速度提高一倍,纱线宽度的波动程度提高约21%,这表明高编织速度会增加纱线宽度的不均匀性,从而影响预制体的表面质量。

(3) 纱线宽度本身也对其波动水平产生影响。较宽的纱线通常表现出更高的波动水平,而较窄的纱线则波动较小。这表明纱线宽度不仅受到编织工艺的影响,其自身的尺寸也在一定程度上决定了波动水平。

#### 参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007(1): 1-12.  
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007(1): 1-12.
- [2] 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.  
LI Wei, GUO Quanfeng. Application of carbon fiber composites in the aerospace field[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212.
- [3] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008(1): 1-10.  
DU Shanyi, GUAN Zhidong. Thoughts on strategies for advanced composite material technology in large civil aircraft in China[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008(1): 1-10.
- [4] 单忠德, 周征西, 孙正, 等. 航空航天先进复合材料三维预制体成形技术与装备研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 64-79.  
SHAN Zhongde, ZHOU Zhengxi, SUN Zheng, et al. Research on three-dimensional preform forming technology and equipment for advanced composite materials in aerospace[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 64-79.
- [5] 汪星明, 邢誉峰. 三维编织复合材料研究进展[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 914-927.  
WANG Xingming, XING Yufeng. Research progress of three-dimensional braided composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 914-927.
- [6] 檀晨晨, 单忠德, 孙正, 等. 预制体织造过程的数字单元法模拟研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 889-898.  
TAN Chenchen, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. Numerical unit method simulation study on the weaving process of preforms[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 889-898.
- [7] 王秋野, 韩琳, 李朋, 等. 三维编织复合材料的发展及应用研究[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(4): 145-149.  
WANG Qiuye, HAN Lin, LI Peng, et al. Development and application research of three-dimensional braided composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2022, 39(4): 145-149.
- [8] 时子祥, 胡吉永. 编织管的结构、工艺及性能研究进展[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(12): 113-122.  
SHI Zixiang, HU Jiyong. Research progress on structure, process, and performance of braided tubes[J]. Modern Textile Technology, 2024, 32(12): 113-122.
- [9] BOGDANOVICH A E. An overview of three-dimensional braiding technologies[M]. [S.l.]: Elsevier, 2016: 3-78.
- [10] MELENKA G W, HUNT A J, VAN RAVENHORST J H, et al. Manufacturing processes for braided composite materials[M]. [S.l.]: Elsevier, 2017: 47-153.
- [11] GUO Z, SHAN Z, HUANG J, et al. Study on the distribution of frictional forces on Z-yarn continuous implanted preforms and their applications[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 62.
- [12] 熊信发, 王校培, 王坤, 等. 三维编织复合材料圆管轴向压缩性能及破坏机理[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4): 702-710.  
XIONG Xinfu, WANG Xiaopei, WANG Kun, et al. Axial compression performance and failure mechanism of three-dimensional braided composite tubes[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 702-710.
- [13] MELENKA G W, CAREY J P. Development of a generalized analytical model for tubular braided-architecture composites[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(28): 3861-3875.
- [14] Anonymous. Mechanical performance of 2-D braided carbon/epoxy composites[J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(2): 253-265.
- [15] Anonymous. Experimental investigation of the crash energy absorption of 2.5D-braided thermoplastic com-

- posite tubes[J]. *Composite Structures*, 2014, 116: 814-826.
- [16] WANG X, CAI D, LI C, et al. Failure analysis of three-dimensional braided composite tubes under torsional load: Experimental study[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(12): 878-888.
- [17] HEIECK F, HERMANN F, MIDDENDORF P, et al. Influence of the cover factor of 2D biaxial and triaxial braided carbon composites on their in-plane mechanical properties[J]. *Composite Structures*, 2017, 163: 114-122.
- [18] CALBA J, SOULAT D, LEGRAND X, et al. Damage investigation on the carbon tows during rewinding and braiding processes[J]. *Fibers*, 2023, 11(3): 30.
- [19] LI D, YANG Y, JIANG L. Experimental study on the fabrication, high-temperature properties and failure analysis of 3D seven-directional braided composites under compression[J]. *Composite Structures*, 2021, 268: 113934.
- [20] MONNOT P, LÉVESQUE J, LABERGE LEBEL L. Automated braiding of a complex aircraft fuselage frame using a non-circular braiding model[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 102: 48-63.
- [21] DU G W, POPPER P. Analysis of a circular braiding process for complex shapes[J]. *The Journal of The Textile Institute*, 1994, 85(3): 316-337.
- [22] POTLURI P, RAWAL A, RIVALDIM, et al. Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(6): 481-492.
- [23] HEIECK F, KUON C, MIENE A, et al. Scatter of mechanical properties of 2D biaxial and triaxial braided reinforced composites and their correlation with visual features[J]. *Composite Structures*, 2023, 322: 117409.
- [24] NING F, POTLURI P, YU W, et al. Geometrical modeling of tubular braided structures using generalized rose curve[J]. *Textile Research Journal*, 2017, 87(4): 474-486.
- [25] RAWAL A, GUPTA S, SARASWATHI, et al. Geometrical modeling of near-net shape braided preforms [J]. *Textile Research Journal*, 2015, 85(10): 1055-1064.
- [26] 王晓明, 邹婷, 李超婧, 等. 基于编织点起始位置及牵拉速度变化的编织角预测模型[J]. *纺织学报*, 2015, 36(9): 28-33.  
WANG Xiaoming, ZOU Ting, LI Chaojing, et al. Prediction model of braiding angle based on initial position of braiding points and variation of traction speed [J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(9): 28-33.
- [27] VAN RAVENHORST J H, AKKERMAN R. A yarn interaction model for circular braiding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 81: 254-263.
- [28] VU A N, GROUVE W J B, AKKERMAN R. Modeling of yarn interactions for non-axisymmetric biaxial overbraiding simulations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 167: 107421.

(编辑:陈珺)