

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.06.009

三维结构复合材料预制体轮廓约束机理

应哲赞¹, 单忠德^{1,2}, 刘丰¹, 吴晓川¹, 杜悟迪¹, 陈哲¹

(1. 中国机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100083; 2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 为实现三维结构复合材料预制体的高性能、快速成形织造, 研究了基于柔性导向三维多针成形原理的预制体轮廓约束方法, 利用图像处理技术获得了预制体纤维环形状特征, 建立了工艺参数对纤维环形状特征影响的理论模型, 搭建了纤维环成环试验装置, 探究了织造针伸出长度、织造层数和织造高度对纤维环形状特征的影响规律。并通过该理论模型对纤维环进行形状特征调控, 完成典型件的试织。结果表明, 纤维环侧边高度以及最大内接圆直径随伸出长度和织造高度增大而增大, 随织造层数增大而减小, 该模型预测与实际测得的纤维环侧边高度及最大内接圆直径的最大相对误差分别为6.29%和4.63%, 进一步通过调节织造高度来改变纤维环的形状特征, 完成层数为90层的预制体织造, 说明该理论模型可以准确描述纤维环形状特征, 并可通过该模型对纤维环形状特征进行调控, 扩大了预制体轮廓约束工艺窗口, 为实现预制体轮廓自动、高质量约束提供了理论指导和实践基础。

关键词: 预制体; 轮廓约束; 纤维环; 形状调控

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)06-0054-08

Contour Constraint Mechanism of Three-Dimensional Structure Composite Preform

Ying Zheyun¹, Shan Zhongde^{1,2}, Liu Feng¹, Wu Xiaochuan¹, Du Wudi¹, Chen Zhe¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : In order to realize the high-performance and rapid forming weaving of three-dimensional structural composite preforms, the contour constraint method of preforms based on the principle of flexible-oriented three-dimensional multi-needle forming was studied. The shape characteristics of preform annulus were obtained by image processing technology. The theoretical model of the influence of process parameters on the shape characteristics of annulus was established, and the annulus forming test device was built. The influence of weaving needle extension length, weaving layers and weaving height on the shape characteristics of annulus was explored. Through the theoretical model, the shape characteristics of the fiber annulus were regulated, and the weaving of typical parts was completed. The results show that the side height and the maximum inscribed circle diameter of the fiber annulus increase with the increase of the extension length and the weaving height, and decrease with the increase of the weaving layers. The maximum relative error between the model prediction and the actual measurement of the side height and the maximum inscribed circle diameter is 6.29% and 4.63% respectively. The shape characteristics of the fiber annulus are further changed by adjusting the weaving height, and the preform weaving with 90 layers is completed, which shows that the theoretical model can accurately describe the shape characteristics of the fiber annulus, and the shape characteristics of the fiber annulus can be regulated by the model. It expands the process window of the preform contour constraint, and provides theoretical guidance and practical basis for realizing the automatic and high-quality constraint of the preform contour.

Keywords : preforms ; contour constraint ; fiber annulus ; regulation of shape

三维增强复合材料由于其厚度方向引入了Z向纤维束, 克服了二维复合材料抗分层能力和抗冲击

性差的缺陷, 受到了越来越多的国内外学者的关注^[1]。由于三维增强复合材料具有轻质、高比强度、

基金项目: 国防科技基础加强计划项目

通信作者: 单忠德, 研究员, 研究方向为数字化机械装备与先进成形制造

收稿日期: 2023-03-17

引用格式: 应哲赞, 单忠德, 刘丰, 等. 三维结构复合材料预制体轮廓约束机理[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(6): 54-61.

Ying Zheyun, Shan Zhongde, Liu Feng, et al. Contour constraint mechanism of three-dimensional structure composite preform[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6): 54-61.

高比模量、抗烧蚀和可设计性强等特点,使其在航空航天、轨道交通和生物医疗等领域得到了更多的青睐和应用,如固体火箭发动机喉衬^[2-3],复合材料天线罩^[4],发动机叶轮^[5],J型血管支架^[6]等。

常见的三维纤维预制体成形方法有三维机织^[7]、三维编织^[8]以及柔性导向三维织造成形^[9]等。为实现预制体的近净成形,需要对预制体轮廓进行精准约束。在三维机织中通过引纬机构将纬纱引入由开口机构形成的梭口中完成对经纱的约束,再由织边系统对纬纱进行固定,实现三维机织物的轮廓约束。常见的引纬机构有剑杆引纬、剑带引纬、喷气引纬和喷水引纬^[10-12]。为实现段纬类织物的自动化快速织造,蔡志城等^[13]分析了通纬和手工段纬两种方法织造段纬类织物存在的缺陷,设计了可以变动程引纬织造的段纬自动引纬机构,避免了纬纱相互纠缠和纱线浪费。冯伟等^[14]从织机适应市场需求为出发点,分析了挠性剑杆织机凸轮箱的振动问题,建立了打纬机构主从动件之间的关系方程,为织机高速化的优化改进提供理论依据。蔡锡松等^[15]针对多眼综丝开口方式在织造三维织物过程中无法有效开启各层经纱层梭口的问题,设计了一种辅助开口系统,并验证了各轴满足所需运动规律,有效提高了织造效率。董红坤等^[16]依据不同类型三维织物,设计了通过携纱器携带织边纱锁定纬纱,预打纬机构根据横截面外形牵动纬纱使织边纱与经纱贴合的新型织边系统,打破了织边纱只能锁边不能塑形的局限。三维编织物则是通过引入轴向纱或周向纱实现预制体轮廓的约束。蒋宇等^[17]提出了飞轮的三维五向编织工艺制造方法,保证圆周方向携纱器数量为偶数,采用四步法编织,第四步时引入周向纬纱,完成一个编织花节长度的轮廓约束,以此往复得到所需长度的编织飞轮预制件。

柔性导向三维织造成形方法其原理是通过织造针将纤维束铺设于导向阵列中,采用轮廓约束工艺实现纤维束固定,再通过压实工艺完成预制体成形^[9]。在轮廓约束工艺中,织造针携带的纤维束与导向阵列边缘形成具有一定形状的纤维环,将辅助边棒置入纤维环中实现单层轮廓约束,研究纤维环形状特征对预制体轮廓约束工艺具有重要意义。

笔者基于柔性导向三维织造成形工艺,分析了织造成形过程中纤维环的形状特征,建立了描述纤维环形状特征的理论模型,探究了各工艺参数对纤

维环形状特征的影响规律。进一步使用该理论模型对纤维环形状特征进行调控,完成预制体样件的试织,扩大了工艺窗口,为后续预制体轮廓自动约束装置的研发提供了实践基础与理论依据,推动了三维结构复合材料预制体数字化成形技术发展。

1 纤维成环工艺分析与建模

在柔性导向三维多针织造过程中,织造针携带纤维束伸出导向阵列一定长度后,织造针、导向阵列和纤维束形成的封闭图形称之为纤维环,如图1所示。纤维环形状特征决定了置入辅助边棒的难易程度。

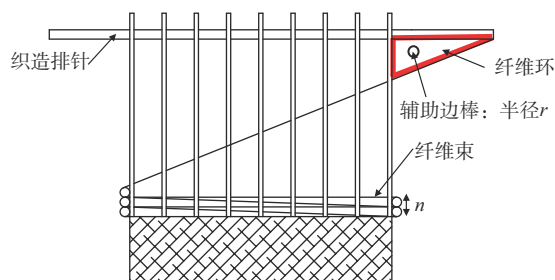


图1 纤维成环过程示意图

当纤维束在一定张力条件下,纤维环近似于直角三角形。基于纤维环直角三角形假设和三维织造工艺特点,建立如图2所示的纤维环成形理论分析模型。

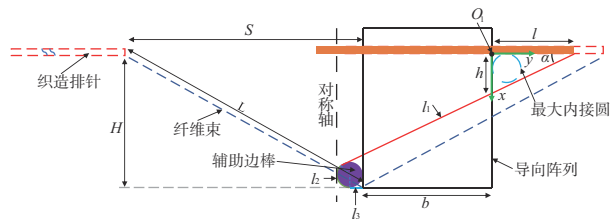


图2 纤维成环结构示意图

在图2中,建立以 O_1 点为原点、垂直向下为 x 轴正方向、水平向右为 y 轴正方向的坐标系。图2中模型各参数物理意义见表1。

织造针伸出导向阵列后,为保证纤维束处于保

表1 纤维成环模型参数物理意义表

参数名称	物理意义
H	织造高度
L	纤维预留长度
S	织造针尖至导向阵列距离
l	织造针伸出长度
h	纤维环侧边高度
b	进针方向预制体幅宽
α	织造针与纤维束夹角
l_1	辅助边棒切点至织造针尖距离
l_2	辅助边棒纤维束覆盖段
l_3	辅助边棒切点至导向阵列距离

持绷直状态, S 应满足以下关系:

$$S = b + l + 4r \quad (1)$$

式中: r ——辅助边棒半径。

在纤维束送纱过程中,纤维预留长度保持不变,送纱完成后纤维预留长度由三部分构成,分别为 l_1, l_2, l_3 。纤维预留长度及三部分长度分别为:

$$L = \sqrt{[H - 2(n-1)r]^2 + S^2} \quad (2)$$

$$l_1 = \frac{r \sin \alpha + r + b + l}{l} \sqrt{l^2 + h^2} \quad (3)$$

$$l_2 = (\pi - \alpha)r \quad (4)$$

$$l_3 = r \quad (5)$$

式中: L ——纤维预留长度;

n ——织造层数。

辅助边棒沿导向阵列边缘置入,纤维环侧边高度可以决定辅助边棒沿 x 正方向的运动空间,联立式(2)、式(3)、式(4)、式(5)可得侧边高度与其它各参数的关系:

$$\frac{r \sin \left(\arctan \frac{h}{l} \right) + r + b + l}{l} \sqrt{l^2 + h^2} + \left(\pi - \arctan \frac{h}{l} \right) r + r = \sqrt{[H - 2(n-1)r]^2 + S^2} \quad (6)$$

为进一步描述纤维环形状特征,提出其最大内接圆直径和圆心位置参数,最大内接圆直径可以决定可置入辅助边棒的直径大小,圆心位置可以为轮廓约束装置置入位置提供参考,最大内接圆直径确定如式(7)。

$$d = \frac{2hl}{h + l + \sqrt{l^2 + h^2}} \quad (7)$$

式中: d ——最大内接圆直径。

圆心坐标值为: $(d/2, d/2)$ 。

根据式(6)和式(7)可知,当参数一定时,可通过纤维环侧边高度以及最大内接圆直径来表征纤维环形状特征。

2 试验材料及方法

选取直径为1 mm的304不锈钢棒,布置 2×76 的矩形导向阵列,导向棒中心距为2.4 mm,即进针方向导向阵列等效幅宽为180 mm。采用T300-3K碳纤维进行纤维束铺放,使用直径为3 mm的辅助边棒进行轮廓约束,通过MV-CA060-10GC工业相机进行纤维成环图像采集,搭建纤维环数据采集试验台,如图3所示。试验环境保持相对湿度为30%~50%,温度为20~25℃,设定织造排针运动速度为

20 mm/s,开展纤维成环理论模型验证试验以及探究织造针伸出长度、预制体织造层数以及织造排针初始高度对纤维环形状特征的影响规律试验。

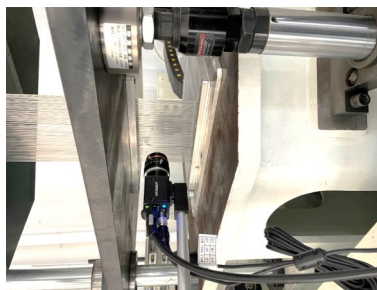
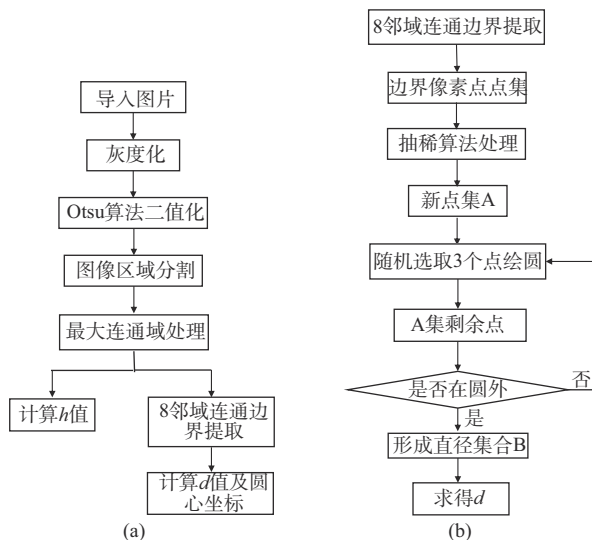


图3 纤维环数据采集试验台

对纤维环图像依次进行灰度化、Otsu二值化、ROI区域提取、最大连通域提取、8邻域边缘提取处理,可得纤维环侧边高度、最大内接圆直径以及其圆心坐标值,其图像处理流程及分析过程如图4和图5所示。

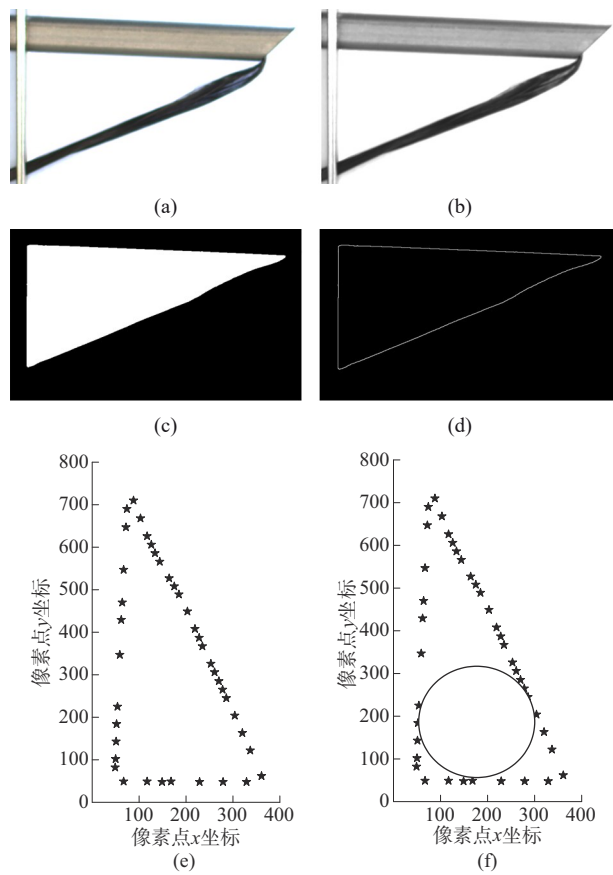


a—图像分析流程; b—最大内接圆直径(d)求解流程

图4 图像分析流程图

3 结果与讨论

在预制体轮廓约束过程中,理想情况下辅助边棒在圆心位置以一定初始速度进入多束纤维环中最大内接圆形成的圆柱形通道,对纤维束进行固定,由于织造针刚性较差,在纵向存在一定的挠度,经过多次试验表明,其轮廓可约束的纤维环最大内接圆直径需大于10 mm。在三维多针织造成形过程中,对纤维环形状特征规律变化的把握至关重要,因此针对各工艺参数对纤维环形状特征的影响规律展开探究。



a—原图; b—灰度图; c—最大连通域图; d—边缘轮廓图;
e—抽稀处理图; f—最大内接圆图

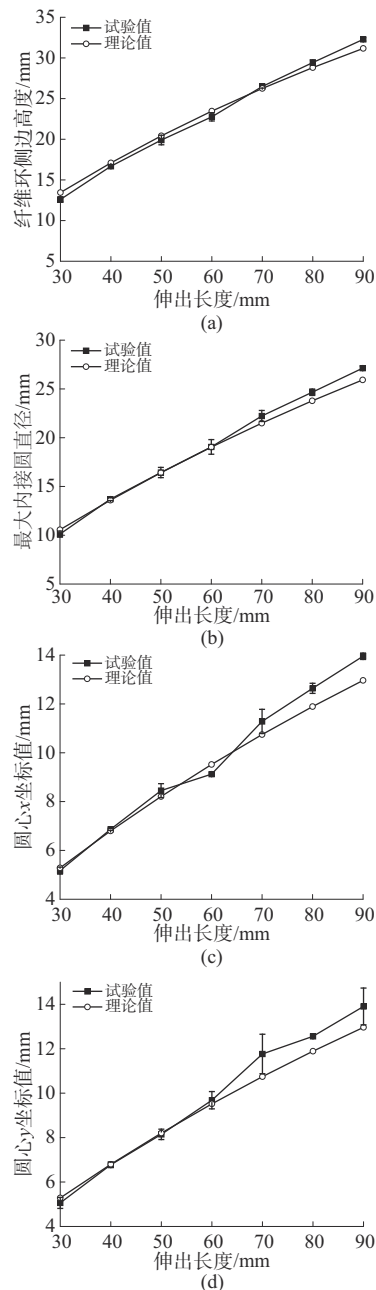
图5 图像分析过程图

3.1 工艺参数对纤维环形状特征的影响规律

(1) 伸出长度对纤维环形状特征的影响规律。

选取织造高度为 100 mm, 织造层数为 1 层。根据织造针的有效长度和布置导向阵列的幅宽, 可以知道织造针伸出长度的最大值为 95 mm; 由织造经验可知, 织造针伸出长度最小值为 30 mm。获得织造针伸出长度对纤维环侧边高度、最大内接圆直径及圆心坐标的影响规律, 如图 6 所示, 经 20 余次试验得到的最大内接圆圆心坐标斜率统计如图 7 所示。

由图 6 可以看出, 在织造高度、织造层数一定时, 织造针伸出长度越大, 纤维环侧边高度越大, 纤维最大内接圆直径也越大; 纤维环侧边高度试验值和理论值最大相对误差为 6.29%, 纤维环最大内接圆直径试验值和理论值最大相对误差为 4.63%。圆心 x, y 坐标值相对于理论 x, y 坐标值最大相对误差分别为 7.25%, 7.63%, 圆心 x, y 坐标值随着织造针伸出长度的增大, 均逐渐增大; 实际圆心坐标斜率均匀分布于理论圆心坐标斜率两侧(图 7), 最大斜率为



a—纤维环侧边高度; b—最大内接圆直径;
c—圆心 x 坐标; d—圆心 y 坐标

图中坐标值为圆心位置到设定原点的距离, 下同
图6 伸出长度对纤维环形状特征的影响规律

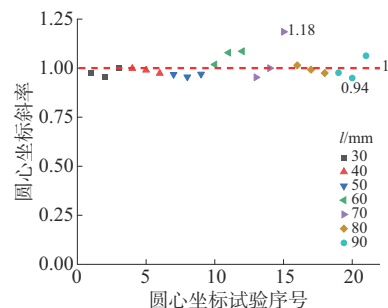


图7 不同伸出长度(l)下最大内接圆圆心坐标斜率统计分布图

1.18,最小的斜率为0.94。在该工艺参数下,考虑到进针侧预制体幅宽和织造针有效长度,为了保证织造效率(较长的织造针伸出长度需要较长的运动时间)和轮廓顺利约束,织造针伸出长度以40~60 mm为佳。

(2) 织造层数对纤维环形状特征的影响规律。

选取织造针伸出长度为40 mm,织造高度为100 mm,探究织造层数对纤维环形状特征的影响规律。通过对纤维环的图像分析,获得织造层数对纤维环侧边高度、最大内接圆直径及圆心坐标的影响规律和圆心坐标斜率分布(共试验50次),如图8和图9所示。

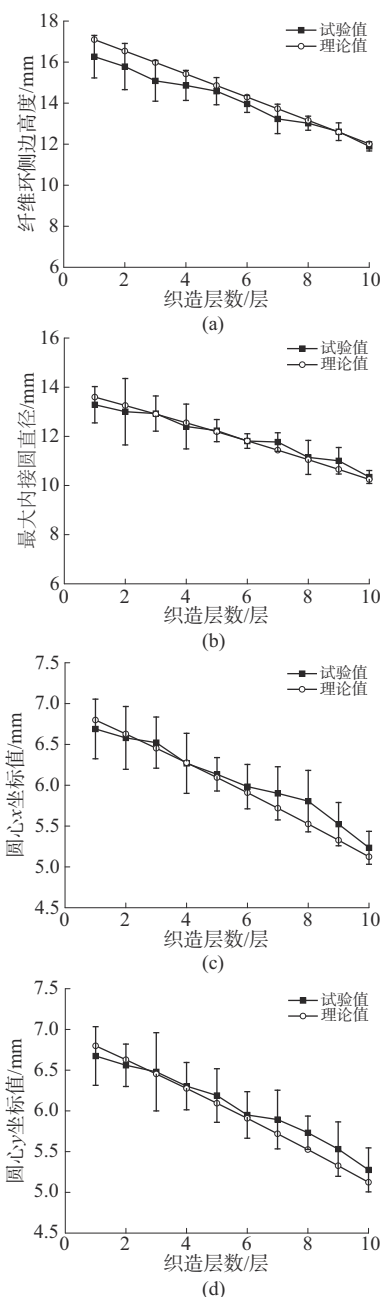
由图8和图9可知,纤维环侧边高度和最大内接圆直径与织造层数均呈负相关,纤维环侧边高度试验值和理论值最大相对误差为5.59%,最大内接圆直径试验值和理论值之间的最大相对误差为3.31%,最大相对误差均小于10%。圆心 x 坐标值的最大相对误差为5.08%,圆心 y 坐标值的最大相对误差为3.83%。

随着织造层数的增加,圆心坐标靠近设定原点,当织造层数大于8层时,圆心坐标斜率的试验值基本分布于理论值上方(图9圆圈之处)。这是由于随着织造层数的增加,辅助边棒增多,辅助边棒与纤维的摩擦力增大,从而导致纤维张紧力增大,织造针在纤维张紧力作用下产生沿 x 方向的挠度变形,使得实际圆心坐标沿 x 轴负方向移动,导致试验值大于理论值。为便于将辅助边棒置入纤维环中,所形成的纤维环最大内接圆直径应不小于10 mm,则在该选定织造参数下,理论最大可织造层数为10层。当确定织造工艺参数时,可根据纤维成环理论模型进行最大可织造层数的预测。

(3) 织造高度对纤维环形状特征的影响规律。

进一步地,探究织造高度对纤维环形状特征的影响规律,选取织造针伸出长度为40 mm,织造层数为1层,获得织造高度对纤维环侧边高度、最大内接圆直径及圆心坐标的影响规律和圆心坐标斜率分布,如图10和图11所示。

由图10和图11可知,随着织造高度的增加,纤维环侧边高度和最大内接圆直径增加,最大内接圆圆心坐标 x, y 值也随之变大。纤维环侧边高度试验值和理论值最大相对误差为4.30%,最大内接圆直径试验值和理论值之间的最大相对误差为2.78%;



a—纤维环侧边高度; b—最大内接圆直径;
c—圆心 x 坐标; d—圆心 y 坐标

图8 织造层数对纤维环形状特征的影响规律

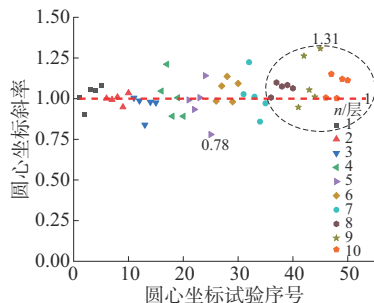


图9 不同织造层数(n)下圆心坐标斜率统计分布图

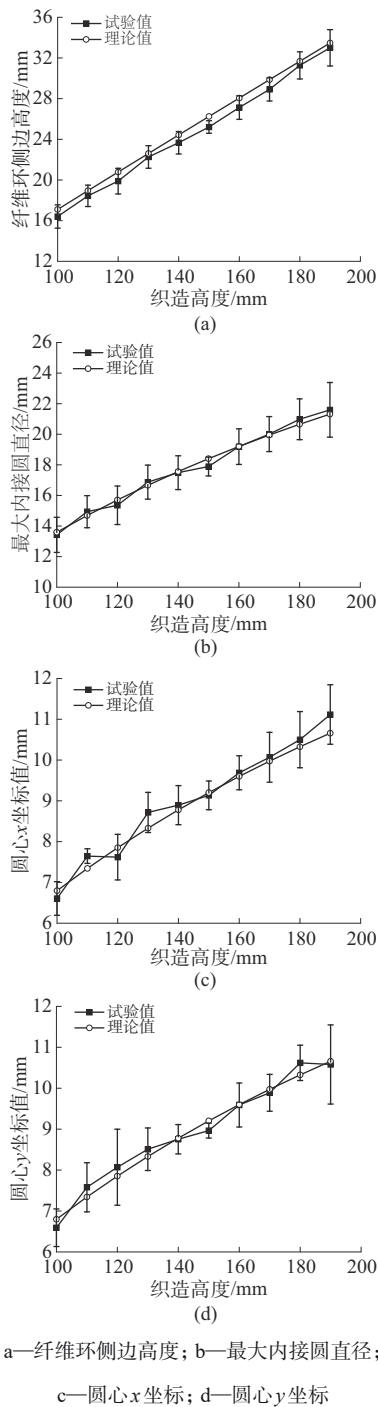


图10 织造高度对纤维环形状特征的影响规律

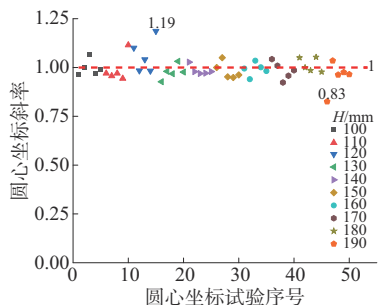


图11 不同织造高度(H)下圆心坐标斜率统计分布图

圆心斜率统计分布图中,实际最大斜率为1.19,最小斜率为0.83,均匀分布于理论值两侧。在实际织造过程中,选择较大的织造高度,使得纤维环形状特征便于轮廓约束。

3.2 典型预制体试织

基于工艺参数对纤维环形状特征影响的理论计算模型,选取典型复合材料预制体进行织造验证,其织造技术规格见表2。

表2 预制体织造技术规格

纤维规格		外形尺寸		层厚/mm
x,y向	z向	长/mm	宽/mm	
6K×1	6K×4	100	100	20

导向阵列布置为43×43,如图12所示,根据纤维密排堆积可计算所需层数为90层。

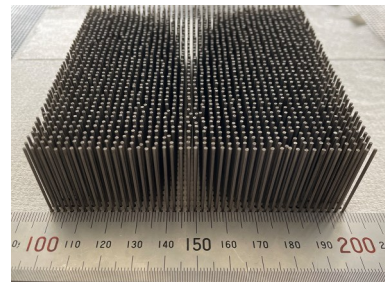


图12 导向阵列布置图

在织造过程中选定织造针伸出长度为50 mm,初始织造高度为100 mm,通过式(6)、式(7)计算该织造参数下的纤维环形状特征,如图13所示。

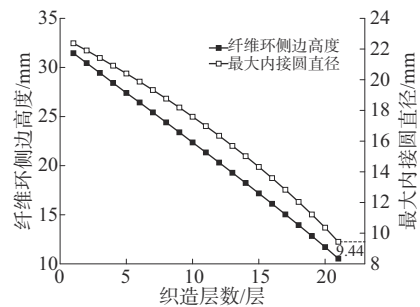


图13 各层纤维环理论形状特征

由图13可知,在该织造参数下,当织造层数为21层时,最大内接圆直径为9.44 mm,不满足边棒置入要求,即其最大可织造层数为20层。根据纤维环形状特征理论计算模型可知,可通过改变织造针伸出长度或织造高度来调节纤维环的最大内接圆直径,从而获得更多的织造层数以保证预制体的可织造性。

以最大内接圆直径10 mm为目标,通过改变织造针伸出长度来调节纤维环的形状特征,其计算结

果见表3。由表3可知,当织造层数为24层时,织造针伸出导向阵列的距离为257.31 mm,受织造装备限制,织造排针末端将与导向阵列发生碰撞。所以通过调节织造针伸出导向阵列的长度来调整纤维环形状特征时,其最大织造层数为23层。

表3 伸出长度调节纤维环形状特征

织造层数/层	伸出长度/mm	最大内接圆直径/mm
21	54.94	10
22	67.53	10
23	119.64	10
24	257.31	10

同样的,以最大内接圆直径10 mm为目标,通过改变织造高度来调节纤维环的形状特征,其计算结果如图14所示。

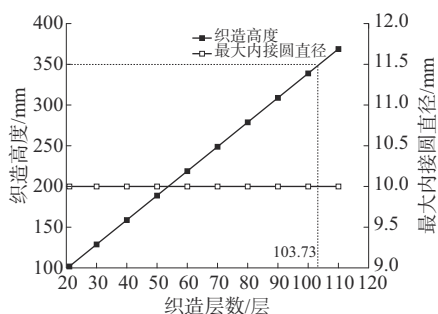


图14 织造高度调节纤维环形状特征

由图14可知,为保证每一层纤维环最大内接圆直径为10 mm,织造层数与织造高度呈线性相关,即每一层调整高度为3 mm,由于受设备允许最大织造高度及导向棒有效长度限制,在103层以下可以任意织造。

在典型预制体样件的试织过程中采用通过织造高度来调节纤维环形状特征,完成织造。预制体样件试织如图15所示。



图15 典型预制体件试织

4 结论

根据复合材料柔性导向三维多针织造成形工艺特点,基于预制体轮廓约束方法,建立了织造工艺参数对纤维环形状特征影响的理论计算模型,搭

建了纤维环测量试验装置,并进行了模型验证和规律探究,通过实验结果得到以下结论。

(1)不同工艺参数下,纤维环侧边高度试验值与理论值的最大相对误差为6.29%,最大内接圆直径试验值与理论值的最大相对误差为4.63%,证明该理论模型可以准确描述纤维环形状特征。

(2)通过探究纤维环成形规律,发现纤维环形状随着织造针伸出长度和织造高度增大而增大,随织造层数的增大而减小,为保证所形成的纤维环便于辅助边棒的置入,根据织造预制体幅宽和织造针有效长度,在合理范围内,可选取较大的织造针伸出长度和织造高度。

(3)进一步依据提出的理论计算模型,通过改变织造高度调整纤维环形状特征,完成典型预制体样件的试织。

(4)笔者所建立的纤维环理论计算模型,为后续实现预制体轮廓自动约束技术提供理论指导和技术支撑,进一步地提高三维多针织造成形设备的自动化程度,缩短预制体的成形周期。

参考文献

- [1] 荆云娟,韦鑫,张元,等.三维编织复合材料的发展及应用现状[J]. 棉纺织技术,2019,47(11):79-84.
Jing Yunjuan, Wei Xin, Zhang Yuan, et al. Development and application status of three-dimensional knitting composite material[J]. Cotton Textile Technology, 2019, 47(11):79-84.
- [2] 刘澜涛,陈冠宇,易黎明,等.固体火箭发动机炭/炭复合材料喉衬烧蚀行为研究[J]. 炭素技术,2021,40(3):31-35.
Liu Lantao, Chen Guanyu, Yi Liming, et al. Study on the ablation mechanism of C/C composite throat for solid rocket motor[J]. Carbon Techniques, 2021, 40(3):31-35.
- [3] 张天昊,查柏林,李志农,等.轴棒法编织C/C复合材料等离子烧蚀性能分析[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(9):237-243.
Zhang Tianhao, Zha Bailin, Li Zhinong, et al. Analysis on plasma ablation properties of axial carbon rod woven 4D C/C composites [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(9): 237-243.
- [4] 许建伟,李春林,高凌,等.三维织物复合材料天线罩的应用研究[J]. 电子机械工程,2018,34(2):36-39.
Xu Jianwei, Li Chunlin, Gao Ling, et al. Study on application of 3D fabric composite radome[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2018, 34(2):36-39.
- [5] 孟祥福.三维编织复合材料叶轮制件的RTM工艺设计[D]. 西安:西安工程大学,2019.
Meng Xiangfu. RTM process design of 3D braided composite impeller parts[D]. Xi'an:Xi'an Polytechnic University, 2019.
- [6] Emonts C, Grigat N, Merkord F, et al. Innovation in 3D braiding

- technology and its applications[J]. Textiles, 2021, 1(2):185–205.
- [7] Wei Qingsong, Yang Dan, Gao Bo. Ballistic penetration simulation of a 3D woven fabric using High strain-rate dependent yarn model[J]. The Journal of The Textile Institute, 2022, 113(7):1 401–1 410.
- [8] 翟建军,王露晨,孔祥霞. 三维多向编织复合材料温度效应综述: 热传导、热膨胀性质和力学响应[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2 459–2 478.
- Zhai Junjun, Wang Luchen, Kong Xiangxia. A review on temperature effect of 3D multi-directional braided composites: Heat conduction, thermal expansion properties and mechanical response [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8):2 459–2 478.
- [9] 单忠德,刘丰. 复合材料预制体数字化三维织造成形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- Shan Zhongde, Liu Feng. Digital precision forming technology and equipment for composite materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [10] 李文启. 剑杆织机空间四连杆引纬机构动力学分析与仿真[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- Li Wenqi. Dynamic analysis and simulation of space four-bar linkage weft insertion mechanism of rapier loom[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018.
- [11] 汪文煜,周小红. 混织织物喷气引纬工艺探索[J]. 现代纺织技术, 2015, 23(3):1–3, 6.
- Wang Wenyu, Zhou Xiaohong. Exploration of jetting weft insertion technology of blended-weft fabric[J]. Advanced Textile Technology, 2015, 23(3):1–3, 6.
- [12] Li Dandan, Yang Jiancheng, Wang Huaqing, et al. 3D design and performance analysis of weft insertion mechanism of carbon fiber multi-layer loom[C]//Proceedings of 2013 3rd International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering(ICMMME 2013 III). [S.l.]:Trans Tech Publications Ltd, 2013: 605–610.
- [13] 蔡志城,房家惠,马颜雪,等. 段纬自动引纬技术的研发[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(1):20–23, 43.
- Cai Zhicheng, Fang Jiahui, Ma Yanxue, et al. Research and development of automatic segment filling insertion technology[J]. Technical Textiles, 2021, 39(01):20–23, 43.
- [14] 冯伟,王盛,张守伟. 挠性剑杆织机打纬机构高速化分析[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(6):51–52, 85.
- Feng Wei, Wang Sheng, Zhang Shouwei. High speed analysis of flexible rapier loom's beating-up mechanism[J]. Machine Building & Automation, 2011, 40(6):51–52, 85.
- [15] 蔡锡松,胥光申. 基于多眼综丝开口方式的辅助开口系统[J]. 轻工机械, 2022, 40(6):81–87.
- Cai Xisong, Xu Guangshen. Auxiliary opening system based on multi-eye heald opening mode[J]. Light Industry Machinery, 2022, 40(6):81–87.
- [16] 董红坤,贺辛亥,钟鹏,等. 三维机织物织边造型工艺设计[J]. 纺织学报, 2017, 38(4):50–54.
- Dong Hongkun, He Xinhai, Zhong Peng, et al. Design of 3-D woven fabric selvage modeling process[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(4):50–54.
- [17] 蒋宇,李志雄,汤双清,等. 三维五向编织复合材料飞轮预制件的工艺设计[J]. 现代制造工程, 2009(10):83–87.
- Jiang Yu, Li Zhixiong, Tang Shuangqing, et al. Process design of three dimensional and five directional braided composite flywheel [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(10):83–87.

(上接第 26 页)

- [14] 余春平,袁明. 肉桂醛的研究与应用进展[J]. 山东化工, 2022, 51 (19):97–99.
- Yu Chunping, Yuan Ming. Recent advances of research and application on cinnamaldehyde[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(19):97–99.
- [15] 于文喜,段华伟,曾少甫,等. 山梨酸钾抗菌包装材料研究进展 [J]. 包装学报, 2019, 11(6):7–16.
- Yu Wenxi, Duan Huawei, Zeng Shaofu, et al. Advances in antimicrobial packaging materials of potassium sorbate[J]. Packaging Journal, 2019, 11(6):7–16.
- [16] 李凤红,师岩,陈延明,等. 一种可降解复合增塑剂改性的 PVA 及其制备方法:CN111303570A[P]. 2020-06-19.
- Li Fenghong, Shi Yan, Chen Yanming, et al. A degradable composite plasticizer modified PVA and its preparation method:CN111303570A [P]. 2020-06-19.
- [17] Gao H F, Yang H. Preparation and characterization of cinnamaldehyde/polyvinyl alcohol/silver nanoparticles ternary composite films[J]. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 2021, 26(1):24–36.
- [18] 王帅阳. 添加剂对聚乙烯醇/木聚糖复合膜性能的影响[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- Wang Shuaiyang. Influence of additives on properties of poly vinyl alcohol/xylan composite films[D]. Guang Zhou: South China University of Technology, 2014.
- [19] Fasihnia S H, Peighambaroust S H, Peighambaroust S J, et al. Development of novel active polypropylene based packaging films containing different concentrations of sorbic acid[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 18:87–94.
- [20] Ardekani-Zadeh A H, Hosseini S F. Electrospun essential oil-doped chitosan/poly (ϵ -caprolactone) hybrid nanofibrous mats for antimicrobial food biopackaging exploits[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 223. DOI:10.1016/j.carbpol.2019.115108.
- [21] 韩笑. 抑菌性聚乙烯醇膜对冷鲜猪肉的保鲜研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- Han Xiao. Study on preservation of cold fresh pork by polyvinyl alcohol film[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [22] Ke J X, Xiao L Y, Yu G X, et al. The study of diffusion kinetics of cinnamaldehyde from corn starch-based film into food simulant and physical properties of antibacterial polymer film[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125:642–650.