

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.01.004

## 层联衬经斜纹机织预制体细观结构几何建模

陈利<sup>1,2</sup>, 俞成童<sup>1,2</sup>, 王静<sup>1,2</sup>, 张长龙<sup>1,2</sup>, 周庆<sup>3</sup>

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387; 3. 北京普诺泰新材料科技有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 为分析层联衬经斜纹机织预制体的细观结构, 通过 X 射线显微镜(Micro-CT)观测复合材料中的纤维, 基于 Micro-CT 观测的纤维横截面形状和空间走向, 提出矩形衬经纱横截面、矩形接结经纱横截面、凸透镜形纬纱横截面、直线型衬经纱路径、直线型纬纱路径和抛物线形接结经纱路径等假设, 推导了纤维预制体厚度和纤维体积含量与纤维参数之间的关系, 建立了预制体细观结构模型, 通过纤维宽度和厚度计算纱线横截面变异系数、预制体厚度和纤维体积含量。为验证模型的准确性, 以芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维为原材料制备了 2 种相同结构、不同纤维的层联衬经斜纹机织复合材料, 并与提出的预制体模型对比分析。结果表明: 理论值与实测值在合理误差范围之内, 预制体厚度误差小于 1.5%, 预制体纤维体积含量误差小于 1.5%。

**关键词:** 层联衬经斜纹机织预制体; 细观结构; 预制体厚度; 预制体纤维体积含量; Micro-CT 技术  
**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2024)01-0028-07

## Geometric modeling of meso-structure of laminate lined wrap twill woven prefabrication

CHEN Li<sup>1,2</sup>, YU Chengtong<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Changlong<sup>1,2</sup>, ZHOU Qing<sup>3</sup>

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites of Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Beijing Protech New Material Science Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** In order to analyze the meso-structure of the laminated lining twill woven prefabrication, the yarn profile and direction of the composite materials were observed using Micro-CT. Based on the observation results of Micro-CT, the assumptions of rectangular liner warp cross section, rectangular jointed warp cross section, convex lens weft cross section, linear liner warp path, linear weft path and parabolic jointed warp path were put forward. The relationship between the thickness and fiber volume content of the prefabrication and fiber parameters was deduced, and the meso-structure model of the prefabrication was established. The variation of yarn cross-section variation coefficient, prefabrication thickness and fiber volume content were calculated by yarn width and thickness. In order to verify the accuracy of the model, two kinds of interlayer warp twill woven composites with the same structure and different fibers were prepared using aramid fiber and UHMWPE fiber as raw materials, and compared with the proposed prefabrication model. The results show that the theoretical and measured values are within the reasonable error range, the thickness error of the prefabrication is less than 1.5%, and the fiber volume error of the prefabrication is less than 1.5%.

**Key words:** laminated interleaved twill woven prefabrication; meso-structure; thickness of prefabrication; fiber volume content of prefabrication; Micro-CT technology

纺织结构织物及其增强复合材料因重量轻、强度高、易于设计以及良好的耗能和吸能等显著优势, 在航空航天、运动装备、车辆防护和防弹等工程领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。相对于二维增强复合材料, 三维增强复合材料在 Z 向上由接结经纱捆绑在一起, 极大地

提高了复合材料的性能, 改善了二维增强复合材料抗冲击性能和层间性能差等缺点<sup>[2]</sup>。而影响复合材料性能的因素有预制体的结构(纱线之间的位置关系、交织情况、纱线弯曲程度等)、树脂性能和界面性能。结构决定性能, 纤维增强体结构对提高复合材料性能至

收稿日期: 2022-12-01 基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(19JCYBJC18300)

通信作者: 陈利(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为纺织复合材料。E-mail: chenli@tiangong.edu.cn

关重要。因此,纤维增强树脂基复合材料的细观结构近年来受到研究者的重视。

受检测技术的影响,研究人员针对三维机织复合材料预制体模型提出过许多假设,例如“直法线假设”“椭圆截面假设”“跑道型截面假设”等<sup>[3-6]</sup>。然而复合材料细观结构决定其力学性能,纱线与纱线、纱线与基体间的相互作用对其力学性能有着极大的影响,所以构建的模型的准确性对模拟其性能是至关重要的。而随着扫描成像技术的发展,X射线显微镜(Micro-CT)技术走入研究者的视野,Micro-CT可以进行三维组织表征、重构及成像,无损伤地对样品进行三维组织表征,可获得样品的三维组织形貌及不同角度、不同位置的虚拟二维切片组织形貌信息<sup>[7-9]</sup>。可以通过Micro-CT技术无损的对预制体或复合材料内部纱线交织结构进行观测<sup>[9]</sup>。Yan等<sup>[10]</sup>基于Micro-CT观测结果,建立了一套模拟界面形变的数学公式,提出了一种复合材料细观结构建模方法。陈城华<sup>[11]</sup>使用Micro-CT和图像处理技术建立三维编织复合材料的细观结构模型。通过分析模型发现,纤维束的截面近似椭圆,在材料内部的纤维束的空间路径近似直线,而在材料表面的纤维束的空间路径是一条曲线。于陈陈等<sup>[12]</sup>假设纱线截面为椭圆形,确立编织工艺参数和纤维细观结构参数之间的关系,并用控制体积法建立T形截面交接区域的特殊细观几何模型。杨彩云<sup>[13]</sup>在研究4种结构的三维角联锁结构复合材料中,基于观测结果,提出接结经纱和衬经纱的横截面呈长方形,纬纱和纬纱横截面呈凸透镜形的假设。彭秀钟<sup>[14]</sup>基于Micro-CT扫描图像将三维机织复合材料分为面域和内域2部分,并假设经纱的横截面为凸透镜形,纬纱的横截面为矩形,建立三维机织复合材料细观结构的几何模型。通过编写Python程序利用纺织建模软件TexGen实现三维机织复合材料的参数化建模,分别建立了2种三维机织复合材料细观实体模型(不带填充经纱和带填充经纱的)。Naik等<sup>[15]</sup>假设纱线横截面为椭圆形,纱线路径为正弦型曲线,研究在外界拉伸作用下,不同结构的层合板在不同阶段的失效模式。

结构决定性能。随着科学技术的发展和研究者对纺织复合材料的研究,复合材料细观建模逐渐被重视。Chen等<sup>[16]</sup>基于纱线宽度变形与纱线厚度变形相比可以忽略不计的假设,在介观水平上模拟了单层和多层机织预制件在压实下的纱线横截面变形。任丽冰等<sup>[17]</sup>提出假设,经纱路径为抛物线,纬纱横截面为凸透镜,建立了层联机织预制体的细观结构模型。陆慧中<sup>[18]</sup>在设计衬经2.5D机织物预制体的过程中,提出了5种引纱加

纱方案,采用Micro-CT观测不同引纱加纱方案中经纱、纬纱和接结经纱横截面形态变化和纱线路径情况,并计算了各引纱加纱单胞内纤维体积,发现纱线在引出过程中受到其他纱线的挤压,横截面从椭圆形变成梯形,再变成三角形,纱线填充因子先减小后增大;由经纱在从未交织的纬纱上方引出,但与其接触的纬纱却在压力影响下由椭圆形横截面变为瓜子型,而且纬纱明显偏向经纱引出的方向,建立了不同引纱加纱结构的单胞模型,并计算单胞内纤维体积,发现纤维体积增大0.51%~1.2%。郭瑞卿<sup>[19]</sup>使用Micro-CT对复合材料预制体结构进行了扫描重构,基于观测结果对各纱线系统界面进行了合理假设,其中假设纬纱横截面积为双凸透镜形,衬经纱和斜向纱的横截面为矩形,接结经纱的横截面随着位置的变化而变化,建立了预制体单胞模型,并根据模型计算出的复合材料厚度及纤维体积含量与实际值在误差范围内。王心森等<sup>[20]</sup>基于预制体结构中各参数之间的几何关系,以层为单元建立了细观结构模型,知道目标复合材料中纤维体积含量、纱线的经密、纬密参数和纱线规格即可得到复合材料各层的纱线尺寸及单胞模型。曹鹏军等<sup>[21]</sup>利用Micro-CT技术观测缎纹织物细观结构,从而对其Z向渗透率进行预测。

本文在层联斜纹机织结构基础上引入衬经纱线,提高织物纤维体积含量,设计了一种新型的层联衬经斜纹结构。采用树脂传递模塑成型(RTM)工艺制备了2种层联衬经斜纹的复合材料,在使用Micro-CT观测层联衬经斜纹机织复合材料纱线空间拓扑规律的基础上,建立了细观结构模型,为该类材料的工程应用提供设计参考。

## 1 层联衬经斜纹机织预制体组织结构

层联衬经斜纹机织复合材料的预制体是由多层衬经纱、纬纱与接结经纱相互交织而成。衬经纱与纬纱呈彼此垂直的不交织的伸直状,接结经纱时沿衬经纱走向呈有规律的弯曲形态,把相连的衬经纱与纬纱捆绑在一起,结构如图1所示。

利用Micro-CT技术扫描层联衬经斜纹机织复合材料的预制体结构,如图2所示。复合材料试样尺寸为20 mm × 20 mm,水刀切割机切割得到。Micro-CT扫描重构在德国Zeiss公司生产的卡尔蔡司Xradia 510设备上进行的。

图3示出衬经纱与纬纱的路径为直线型,接结经纱的路径为抛物线型。同时图3还表征了层联衬经斜纹机

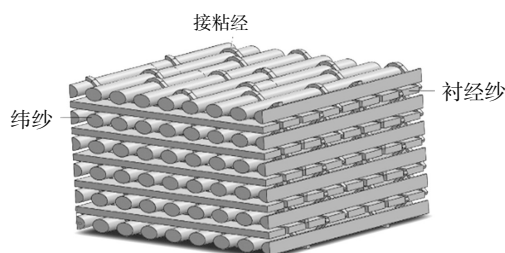


图 1 层联衬经斜纹机织预制体结构

Fig.1 Structure diagram of laminate lined wrap twill woven prefabrication

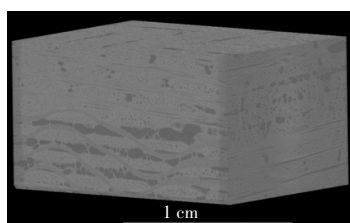
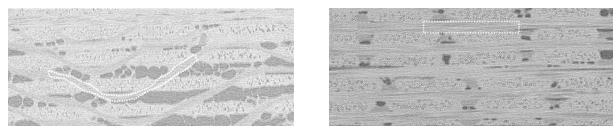


图 2 层联衬经斜纹机织预制体 Micro-CT 扫描图

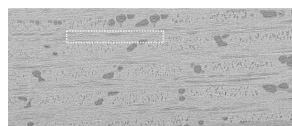
Fig.2 Micro-CT scan of laminate lined wrap twill woven prefabrication

织预制体中衬经纱、纬纱和接结经纱的截面形状。衬经纱、纬纱何接结经纱之间相互挤压,纱线横截面发生变形,衬经纱的横截面呈矩形状,纬纱横截面呈凸透镜形状,而接结经纱的横截面随着位置的变化而变化。



(a) 接结经纱路径

(b) 衬经纱路径

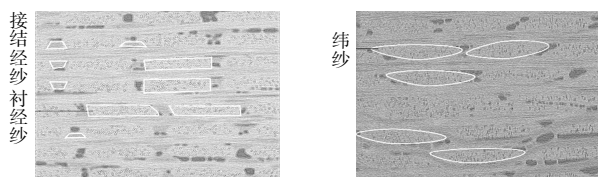


(c) 纬纱路径

图 3 层联衬经斜纹机织预制体中纱线交织形态

Fig.3 Yarn interweaving form in laminate lined warp twill woven prefabrication

观测多个 Micro-CT 结果发现,接结经纱的横截面存在多个形状,不同位置的接结经纱横截面的形状有正梯形、倒梯形、矩形等,如图 4 所示。



(a) 经纱横截面

(b) 纬纱横截面

图 4 层联衬经斜纹机织预制体中纱线横截面形状

Fig.4 Shape of yarn cross-section in laminate lined wrap twill woven prefabrication

## 2 层联衬经斜纹机织预制体微观几何建模

### 2.1 基本假设

预制件内部的衬经纱、纬纱和接结经纱的路径是不规则的,为了量化描述纤维空间路径的变形,基于 Micro-CT 观测结果,对纤维形态做出以下假设:

- (1) 纬纱的横截面为 2 个一元二次方程曲线围成的凸透镜形,且其长轴方向和衬经纱平行;
- (2) 衬经纱的横截面为矩形;
- (3) 纬纱的路径函数为直线;
- (4) 衬经纱的路径函数为直线;
- (5) 接结经纱的路径函数为沿中心对称的抛物线,且两段都是与相邻纬纱交织的抛物线段;
- (6) 预制体中的各个纤维相对位置和相互挤压程度呈稳定的;且每根纤维都排列紧密。

#### 2.1.1 衬经纱横截面假设

根据上述假设,建立衬经纱横截面模型,如图 5 所示。

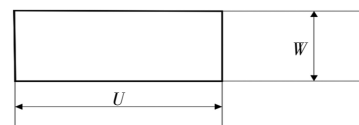


图 5 层联衬经斜纹机织预制体衬经纱横截面形状

Fig.5 Cross-sectional shape of laminate lined warp twill woven prefabrication

同层衬经纱和接结经纱相互挤紧,则衬经纱矩形横截面宽度  $U$ (mm)和厚度  $W$ (mm)分别为:

$$U = \frac{10}{P_j} \times \frac{\sqrt{\text{Tex}_i}}{\sqrt{\text{Tex}_i} + \sqrt{\text{Tex}_j}} \quad (1)$$

$$W = \frac{S_j}{U} \quad (2)$$

式中:  $P_j$  为经纱密度(根·cm<sup>-1</sup>);  $\text{Tex}_i$  为纤维的细度(tex);  $S_j$  为经纱横截面面积(mm<sup>2</sup>)。则衬经纱横截面变异系数  $\mu$  为:

$$\mu = \frac{U}{W} \quad (3)$$

#### 2.1.2 接结经纱横截面

假设接结经纱横截面在不同位置的形状相同,且假设为矩形,但接结经纱材料与经纱不同,所以接结经纱的宽度和厚度与经纱不同,如图 6 所示。

同层接结经纱相互挤紧,则接结经纱横截面宽度  $Y$ (mm)和厚度  $P$ (mm)别为

$$U = \frac{10}{P_s} \times \frac{\sqrt{\text{Tex}_i}}{\sqrt{\text{Tex}_i} + \sqrt{\text{Tex}_j}} \quad (4)$$

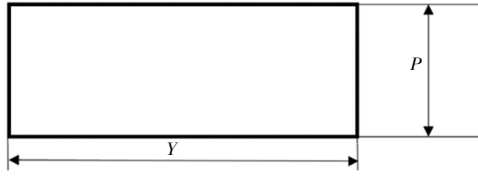


图 6 层联衬经斜纹机织预制体接结经纱横截面形状  
Fig.6 Cross-sectional shape of laminate lined warp twill woven prefabrication junction warp

$$P = \frac{S_s}{Y} \quad (5)$$

式中: $P_s$ 为接结经纱密度(根· $\text{cm}^{-1}$ ); $S_s$ 为接结经纱横截面面积( $\text{mm}^2$ )。则接结经纱横截面变异系数  $\varphi$  为:

$$\varphi = \frac{Y}{P} \quad (6)$$

### 2.1.3 纬纱横截面

假设层联衬经斜纹机织预制体纬纱的横截面形状为由 2 个对称的一元二次方程曲线围成的“凸透镜”形,这 2 个一元二次方程为  $Z_1$  和  $Z_2$ ,如图 7 所示。

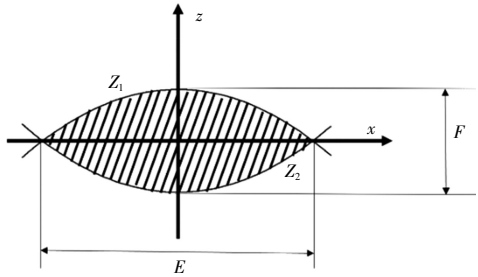


图 7 层联衬经斜纹机织预制体纬纱横截面形状  
Fig.7 Cross-sectional shape of laminate lined wrap twill woven prefabricated weft yarn

设纬纱横截面的厚度为  $F(\text{mm})$ ,宽度为  $E(\text{mm})$ ,曲线  $Z_1$ 、 $Z_2$  表示为:

$$Z_1(x) = \frac{2F}{E^2}x^2 + \frac{F}{2} \quad (7)$$

$$Z_2(x) = \frac{2F}{E^2}x^2 - \frac{F}{2} \quad (8)$$

对曲线  $Z_1$  方程积分可得纬纱横截面的面积为:

$$S_w = 4 \int_0^{\frac{E}{2}} Z_1(x) dx = \frac{2}{3}EF \quad (9)$$

则,纬纱横截面变异系数  $\lambda$  为:

$$\lambda = \frac{E}{F} \quad (10)$$

根据 Micro-CT 扫描切片,建立层联衬经斜纹机织预制体细观结构模型,如图 8 所示。

如图 8 所示,接结经纱的走向  $Z_3$  可由抛物线方程表示为:

$$Z_3(x) = \frac{2(F+P)x^2}{a^2} - \frac{F+P}{2} \left( -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2} \right) \quad (11)$$

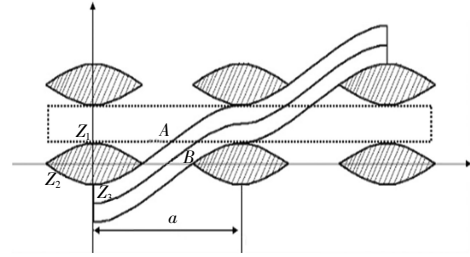


图 8 层联衬经斜纹机织预制体细观结构  
Fig.8 Mesoscopic structure of laminate lined warp twill woven prefabrication

$$Z_3(x) = \frac{2(F+P)(x-a)^2}{a^2} + \frac{(F+P)}{2} \left( \frac{a}{2} \leq x < a \right) \quad (12)$$

式中: $a$ 为层联衬经斜纹机织预制体的纬纱间距( $\text{mm}$ )。

点 A 到曲线  $Z_3$  的距离为  $P/2(\text{mm})$ ,根据平面等距线的方程计算<sup>[2]</sup>,该点的坐标为:

$$X_A = \frac{a}{2} - \frac{P(F+P)}{\sqrt{a^2 + 4(F+P)^2}}$$

$$Z_A = \frac{aP}{2\sqrt{a^2 + 4(F+P)^2}} \quad (13)$$

曲线  $Z_2$  经过点 A,将公式(13)代入公式(8)得  $E^2(2Z_A + F) = 4FX_A^2$  (14)

由公式(9)和公式(14),消去  $E$ ,用数学计算方法获得纬纱横截面厚度  $F$ ,再将  $F$  代入公式(10)即可求解纬纱横截面变异系数  $\lambda$ 。

## 2.2 预制体厚度和纤维体积含量

设层联衬经斜纹机织预制体的衬经纱层数为  $N$ ,单层厚度为  $W$ ,接结经纱的层数是  $N$ ,单层厚度为  $P$ ,纬纱层数为  $N+1$ ,单层厚度为  $F$ 。层联衬经斜纹机织预制体的厚度为:

$$T = NW + (N+1)F \quad (15)$$

层联衬经斜纹机织机织预制体纤维体积含量为:

$$V_f = \frac{NaS_j + (N+1)cS_w + 2NLS_s}{a \times T \times c} \quad (16)$$

其中

$$l = \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{1 + [Z'_3(X)]^2} dx$$

$$a = \frac{10}{P_w} \quad (17)$$

$$c = 2 \times \frac{10}{P_j}$$

$$S_i = \frac{\text{Tex}_i}{1000\varepsilon_i\rho_i} \quad i = j, W, S \quad (18)$$

式中: $P_w$ 为纬纱密度(根·cm<sup>-1</sup>); $P_j$ 为经纱密度(根·cm<sup>-1</sup>);  
Tex<sub>i</sub>为纤维的细度(tex); $\rho_i$ 为纤维密度(g·cm<sup>-3</sup>)。

### 3 实验对比分析

#### 3.1 纱线的横截面变异系数

本文设计了 PE 型层联衬经斜纹机织预制体和芳纶型层联衬经斜纹机织预制体,其结构如图 9 所示。

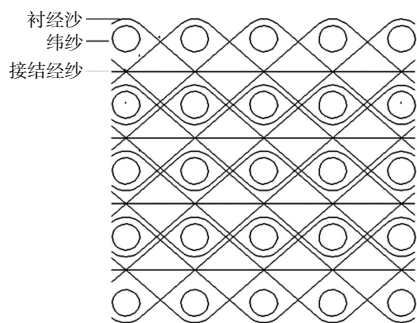


图 9 层联衬经斜纹机织物预制体

Fig.9 Laminate interlined wrap twill prefabrication prefabricated

2 种结构的层联衬经斜纹机织预制体的衬经纱、纬纱和接结经纱的密度皆为 8 根/cm,且接结经纱都是细度为 222 dtex 的超高分子量聚乙烯纤维。PE 型层联衬经斜纹机织预制体的衬经纱和纬纱是超高分子量聚乙烯纤维;芳纶型层联衬经斜纹机织预制体衬经纱和纬纱是芳纶纤维。

2 220 dtex 的超高分子量聚乙烯纤维的理论横截面积为 0.228 9 mm<sup>2</sup>;2 220 dtex 的芳纶纤维的理论

横截面积为 0.154 2 mm<sup>2</sup>;222 dtex 的超高分子量聚乙烯纤维的理论横截面积为 0.022 89 mm<sup>2</sup>;222 dtex 的芳纶纤维的理论横截面积为 0.015 42 mm<sup>2</sup>。

通过 Micro-CT 观测技术,获得了 2 种预制体的切片图,如图 10 所示。层联衬经斜纹机织预制体结构参数如表 1 所示。采用 ImageJ 软件测量 Micro-CT 切片图像中的预制体纱线横截面的长度、宽度、厚度及其面积,本文对每个试样取 5 个 Micro-CT 切片进行测量,每个切片测量 6 个横截面。通过对比纱线的理论横截面面积,可以计算得到纱线填充因子  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$ ,如表 2 所示。

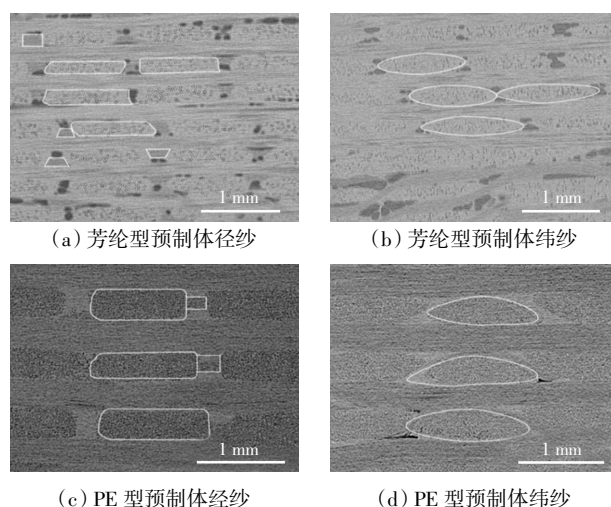


图 10 层联衬经斜纹机织预制体纤维横截面尺寸

Fig.10 Cross-sectional dimensions of laminate prefabricated yarn of laminate interlined wrap twill prefabricated fiber

表 1 层联衬经斜纹机织预制体结构参数

Tab.1 Structure parameters of laminate interlined wrap twill prefabrication

预制体编号	接结经纱细度/dtex	接结经纱密度/(根·cm <sup>-1</sup> )	衬经纱细度/dtex	衬经纱密度/(根·cm <sup>-1</sup> )	衬经纱层数	纬纱细度/dtex	纬纱密度/(根·cm <sup>-1</sup> )	纬纱层数	PE 纤维密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	芳纶纤维密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
芳纶	222	8.0	2 220	8.0	5	2 220	8.0	6	0.97	1.44
PE	222	8.0	2 220	8.0	4	2 220	8.0	5	0.97	1.44

表 2 层联衬经斜纹机织预制体纱线填充因子

Tab.2 Filling factors for laminate interlined wrap twill prefabricated yarns

预制体编号	S <sub>1</sub> /mm <sup>2</sup>	S <sub>2</sub> /mm <sup>2</sup>	S <sub>3</sub> /mm <sup>2</sup>	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$
芳纶型	0.212	0.223	0.034	0.727	0.691	0.673
PE 型	0.332	0.346	0.044	0.689	0.662	0.520

注:S<sub>1</sub>为经线的矩形截面积,S<sub>2</sub>为纬纱凸透镜的截面面积,S<sub>3</sub>为接结经纱的矩形截面积。

对比理论值与实测值发现,理论值与实测值在合理误差范围内。通过数值计算获得 2 种预制体经纬纱横截面的厚度和变异系数,如表 3 所示。

表 3 纤维横截面的厚度和变异系数

Tab.3 Thickness and coefficient of variation of fiber cross-section

预制体编号	纱线种类	横截面厚度/mm		横截面变异系数	
		实测值	理论值	实测值	理论值
芳纶型	衬经纱	0.225	0.223	4.221	4.259
	接结经纱	0.115	0.113	2.611	2.658
PE 型	纬纱	0.231	0.229	6.268	6.380
	衬经纱	0.324	0.350	2.931	2.713
	接结经纱	0.154	0.146	1.950	2.057
	纬纱	0.354	0.343	4.141	4.411

### 3.2 预制体的厚度和纤维体积含量

通过数值计算获得2种结构层联衬经斜纹机织预制体的厚度和纤维体积含量如表4所示。通过理论与实测值对比发现,本文模型理论计算值与实测值误差在合理范围之内。

表4 层联衬经斜纹机织预制体的厚度和纤维体积含量

Tab.4 Thickness of laminated lining by twill woven prefabrication and fibers volume content

预制体 编号	厚度			纤维体积分数		
	实测值/ mm	理论值/ mm	相对误差/ %	实测值/ %	理论值/ %	相对误差/ %
芳纶型	2.46	2.49	1.20	62.14	62.52	0.61
PE型	3.16	3.12	-1.28	63.05	63.86	1.27

## 4 结论

本研究通过使用Micro-CT观测层联衬经斜纹机织预制体纱线横截面和交织情况,对衬经纱、纬纱和接结经纱的横截面形状和纱线走向做出合理假设,建立了层联衬经斜纹机织预制体的细观结构模型。将理论计算值和实测值对比,发现误差在合理范围之内,并得到以下主要结论:

(1) 假设矩形衬经纱横截面、凸透镜纬纱横截面以及抛物线形接结经纱路径所建立的层联衬经斜纹机织预制体细观结构是合理的,并通过该关系式可获得衬经纱、纬纱和接结经纱横截面变异系数的确定解。

(2) 接结经纱的横截面形状随着位置的变化而变化,基于其多个位置的横截面形状,对其做出合理假设,建立预制体模型,可计算出复合材料的厚度和纤维体积含量,复合材料厚度误差小于1.5%,预制体纤维体积分数误差小于1.5%。

### 参考文献:

[1] 杨志,焦亚男,谢军波,等. 纺织复合材料纤维预制体力学性能测试方法研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(4): 1511-1533.  
YANG Z, JIAO Y N, XIE J B, et al. Research progress in testing methods of mechanical properties of textile composite fiber preforms[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1511-1533 (in Chinese).

[2] 陈利,焦伟,王心森,等. 三维机织复合材料力学性能研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 62-72.  
CHEN L, JIAO W, WANG X M, et al. Research progress on mechanical properties of 3D woven composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 62-72 (in Chinese).

[3] 朱元林,崔海涛,温卫东,等. 含纤维束截面形状变化的三维编织复合材料细观模型及刚度预报[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 187-196.  
ZHU Y L, CUI H T, WEN W D, et al. Microstructure model and stiffness prediction of 3D braided composites considering yarns' cross-section variation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(6): 187-196 (in Chinese).

[4] 李冠志,赵强,汪军,等. 纱线截面压缩变形仿真与验证[J]. 纺织学报, 2017, 38(2): 184-190.  
LI G Z, ZHAO Q, WANG J, et al. Modeling and experimental study on yarn's cross-section compression deformation[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(2): 184-190(in Chinese).

[5] 葛敬冉,刘增飞,乔健伟,等. 航空复杂结构纤维预制体成型工艺与复合材料性能仿真研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(16): 14-30.  
GE J R, LIU Z F, QIAO J W, et al. Research progress on molding processes of fiber preforms and performances simulation of composites for aeronautical complex structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(16): 14-30 (in Chinese).

[6] BROWN L P, LONG A C. Modeling the geometry of textile reinforcements for composites: TexGen[C]//Composite Reinforcements for Optimum Performance. Amsterdam: Elsevier, 2021: 237-265.

[7] GOMMER F, ENDRUWEIT A, LONG A C. Analysis of filament arrangements and generation of statistically equivalent composite micro-structures[J]. Composites Science and Technology, 2014, 99: 45-51.

[8] GOMMER F, ENDRUWEIT A, LONG A C. Quantification of micro-scale variability in fibre bundles[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 87: 131-137.

[9] WANG H, WANG Z W. Statistical analysis of yarn feature parameters in C/epoxy plain-weave composite using micro CT with high-resolution lens-coupled detector[J]. Applied Composite Materials, 2016, 23(4): 601-622.

[10] YAN S B, ZENG X S, BROWN L, et al. Geometric modeling of 3D woven preforms in composite T-joints[J]. Textile Research Journal, 2018, 88(16): 1862-1875.

[11] 陈城华. 基于Micro-CT的三维编织复合材料精细化建模与力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
CHEN C H. Refine modeling of three-dimensional braided composites based on Micro-CT and analysing of mechanical properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).

[12] 于陈陈,瞿畅,邓婕,等. T形截面三维编织复合材料细观结构分析及弯曲性能预测[J]. 纺织学报, 2015, 36(6): 42-49.  
YU C C, QU C, DENG J, et al. Micro-structure analysis and

- bending property prediction of three-dimensional braided composites with T section[J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(6): 42-49(in Chinese).
- [13] 杨彩云. 三维角联锁结构复合材料的力学性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2005.  
YANG C Y. Study on the mechanical properties of three dimensional angle-interlock architecture composites[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2005(in Chinese).
- [14] 彭秀钟. 三维机织复合材料细观力学性能数值仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.  
PENG X Z. Numerical simulation of mesomechanics properties of three-dimensional woven composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020(in Chinese).
- [15] NAIK N K, KUCHIBHOTLA R. Analytical study of strength and failure behaviour of plain weave fabric composites made of twisted yarns[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(5): 697-708.
- [16] CHEN Z R, YE L, KRUCKENBERG T. A micromechanical compaction model for woven fabric preforms. Part I: Single layer[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(16): 3254-3262.
- [17] 任丽冰, 陈利, 焦伟. 基于一元二次函数的层联机织预制体细观结构表征[J]. *纺织学报*, 2021, 42(8): 76-83.  
REN L B, CHEN L, JIAO W. Microstructure characterization of multi-layer interlocked woven preforms based on quadratic functions[J]. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(8): 76-83(in Chinese).
- [18] 陆慧中. 编织复合材料连接件的设计与制备[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.  
LU H Z. Design and preparation of braided composite connector[D]. Tianjin: Tiangong University, 2021(in Chinese).
- [19] 郭瑞卿. 多层多向层联机织复合材料细观结构与力学性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2020.  
GUO R Q. Study on microstructure and mechanical properties of multi-layer and multi-directional on-line woven composites[D]. Tianjin: Tiangong University, 2020(in Chinese).
- [20] 王心淼, 陈利, 张典堂, 等. 多层多向机织复合材料细观结构建模及其性能[J]. *纺织学报*, 2019, 40(2): 45-52.  
WANG X M, CHEN L, ZHANG D T, et al. Micro-structure and properties of multilayer multiaxial woven composites[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(2): 45-52(in Chinese).
- [21] 曹鹏军, 赵文斌, 杨斌, 等. 基于 Micro-CT 图像的缎纹织物细观结构分析及渗透率预测[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1751-1763.  
CAO P J, ZHAO W B, YANG B, et al. Meso-structure analysis and permeability prediction of satin fabric based on Micro-CT[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1751-1763(in Chinese).
- [22] 刘耀荣, 王锐英. 等距线的性质及其应用[J]. *北京建筑工程学院学报*, 1995, 11(3): 97-103.  
LIU Y R, WANG R Y. The characteristics and applications of the equidistance lines[J]. *Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture*, 1995, 11(3): 97-103(in Chinese).

#### 本文引文格式:

陈利, 俞成童, 王静, 等. 层联衬经斜纹机织预制体细观结构几何建模[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(1): 28-34.

CHEN L, YU C T, WANG J, et al. Geometric modeling of meso-structure of laminate lined wrap twill woven prefabrication[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(1): 28-34(in Chinese).