



多尺度模拟法研究腔体结构麻纤维增强树脂基复合材料拉伸模量

夏凡 何莉萍 陈大川

**Investigation on tensile modulus of lumen-bast fiber reinforced composites using multiscale simulation method**

XIA Fan, HE Liping, CHEN Dachuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220000.000000>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220000.000000

# 多尺度模拟法研究腔体结构麻纤维增强树脂基复合材料拉伸模量



分享本文

夏凡<sup>1,2</sup>, 何莉萍<sup>\*1,2</sup>, 陈大川<sup>3</sup>

(1. 湖南大学整车先进设计制造技术全国重点实验室, 长沙, 410082; 2. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙, 410082;  
3. 湖南大学土木工程学院, 长沙, 410082)

**摘要:** 本研究针对现有植物麻纤维增强复合材料弹性模量预测模型中, 未能充分考虑麻纤维独特的腔体微观结构特征, 难以准确获取真实纤维特征参数并预测麻纤维增强复合材料弹性模量的现状, 综合混合定律和 Micro-CT 技术, 提出了基于麻纤维腔体结构特征的麻纤维等效模型及其弹性模量计算公式。在此基础上, 采用多尺度模拟法构建基于腔体结构的苧麻纤维增强树脂基复合材料 (RFPC) 的代表性体积元 (RVE) 模型并求解了 RFPC 的拉伸模量。并通过 RFPC 拉伸实验测试结果验证了 RVE 模型的有效性。另一方面, 本文采用正交试验设计和方差分析探讨了纤维含量、纤维空腔占比、纤维取向和纤维长径比 4 个参数对 RFPC 拉伸弹性模量的影响权重, 从而明确了纤维含量和纤维取向是影响复合材料拉伸弹性模量的主要因素。运用多项式拟合法获得了以上述 4 个参数为自变量的麻纤维增强树脂基复合材料拉伸弹性模量预测公式, 并系统揭示了影响 RFPC 拉伸模量的参数主效应和参数两两之间的协同效应规律。本研究提出的基于腔体结构的植物麻纤维增强树脂基复合材料弹性模量预测方法, 可望为麻纤维增强树脂基一大类复合材料的拉伸性能调控提供新方法。

**关键词:** 腔体结构; 麻纤维; 树脂基复合材料; 正交试验设计; 拉伸模量预测

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)00-0001-10

## Investigation on tensile modulus of lumen-bast fiber reinforced composites using multiscale simulation method

XIA Fan<sup>1,2</sup>, HE Liping<sup>\*1,2</sup>, CHEN Dachuan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicles, Hunan University, Changsha, 410082; 2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, 410082; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, 410082)

**Abstract:** Currently, the models for predicting the tensile modulus of bast fiber reinforced composites have not considered unique lumen microstructure of bast fibers. Therefore, in the present work, an equivalent model of lumen-bast fiber and its theoretical formula for calculating the elastic modulus were proposed in this study by combining the rule of mixture and Micro-CT technology. On this basis, a representative volume element (RVE) model of ramie fiber reinforced composite (RFPC) which considered lumen microstructures was established using multiscale simulation method, and its tensile modulus was computed. The validity of the RVE model was verified by experimental results. Additionally, the influence weights of four parameters (fiber content, fiber lumen ratio, fiber orientation, and aspect ratio) on the tensile elastic modulus of RFPC were investigated using orthogonal experimental

收稿日期: 2024-06-12; 修回日期: 2024-08-15; 录用日期: 2024-08-25

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220000.000000>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3704803); 湖南大学整车先进设计制造技术全国重点实验室研究课题 (No.72175004)

National Key Research and Development Program of China (2022YFB3704803); Foundation of State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle (No. 72175004)

通信作者: 何莉萍, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纤维增强复合材料 E-mail: [lphe@hnu.edu.cn](mailto:lphe@hnu.edu.cn)

引用格式: 夏凡, 何莉萍, 陈大川. 多尺度模拟法研究腔体结构麻纤维增强树脂基复合材料拉伸模量 [J]. 复合材料学报, 2024, 42(0): 1-10.

XIA Fan, HE Liping, CHEN Dachuan. Investigation on tensile modulus of lumen-bast fiber reinforced composites using multiscale simulation method [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 42(0): 1-10 (in Chinese).

design and variance analysis. It was found that fiber content and fiber orientation are the primary factors affecting the tensile modulus of RFPCs. A polynomial fitting method was employed to obtain a predictive equation for estimating the tensile modulus of RFPC using these four parameters as independent variables. The main effects and synergistic effects of parameters on the tensile modulus of RFPC were systematically analyzed. This research provides a prediction method for estimating the tensile modulus of lumen-bast fiber reinforced composites and can be served as a theoretical basis for controlling their tensile performance.

**Keywords:** lumen structure; bast fibers; composites; orthogonal design; prediction of tensile modulus

麻纤维具有与玻璃纤维相当的比强度和比刚度,同时成本低、来源广泛、绿色天然无污染,因此由其增强的复合材料有望在汽车、高铁、飞机等运载工具上得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。由于麻纤维增强复合材料的力学性能对其在运载工具上的应用有很大影响,如何有效地设计和开发麻纤维增强复合材料以达到所需性能已成为当务之急。以往的研究大都通过实验探究麻纤维增强复合材料的性能: Mohammad<sup>[5]</sup>通过实验得出黄麻纤维增强复合材料拉伸性能改善的最佳辐射剂量; Akash<sup>[6]</sup>的研究获得了剑麻纤维/大麻纤维混杂的增强复合材料最大弯曲和压缩强度下的纤维含量; Jomy<sup>[7]</sup>采用实验发现黄麻增强复合材料的耐磨性最佳的黄麻含量。然而实验研究包括了制备和测试等过程,需要花费大量的成本和时间,采用数值仿真分析技术有望弥补实验研究的不足,从而快速有效地设计和预测复合材料性能。

因此, Kern 等<sup>[8]</sup>利用二维 RVE 模型对比了具有和不具有微孔泡沫结构的短切天然麦秸纤维复合材料的力学行为。Sukiman 等人<sup>[9]</sup>基于二维 RVE 研究了随机分布的短纤维复合材料的微观结构,以评估复合材料有效的热和机械性能。但对于不连续天然纤维复合材料,纤维在空间上分布不同,采用 2D 平面模型计算出的结果会与其整体性能有偏差。Sliseris 等人<sup>[10]</sup>在考虑纤维缺陷和纤维束的情况下,采用 RSA 算法生成了不同纤维取向和不同长径比的亚麻短纤维复合材料微观三维 RVE 结构模型,并研究了复合材料的损伤机理。然而,相比于玻璃纤维和碳纤维等人造纤维,植物麻纤维具有更复杂的微观结构,有空腔结构的纤维管胞,每个管胞为厚壁中空结构,由初级细胞壁、次级细胞壁、中空空腔组成<sup>[11-12]</sup>。而现有麻纤维复合材料拉伸性能 RVE 模型在建模过程中却未充分考虑麻纤维的腔体结构对麻纤维增强树脂基复合材料弹性模量的影响,迫切需要进一步开展基于腔体结构的麻纤维增强复合材料弹性模量预测方法研究,以期更为准确地预测和调控麻纤

维增强树脂基一大类复合材料的性能。

为此,本研究针对植物麻纤维增强复合材料力学性能模拟仿真中,未能充分考虑麻纤维独特的腔体微观结构特征,难以准确预测麻纤维增强复合材料拉伸性能的现状,本研究以注塑成型短苧麻纤维增强聚丙烯复合材料为研究对象,综合混合定律和 Micro-CT 技术,提出了基于麻纤维腔体结构特征的麻纤维等效模型及其弹性模量计算理论公式。在此基础上,探寻一种基于腔体的天然麻纤维增强树脂基复合材料的 RVE 多尺度模型并预测复合材料弹性模量的理论方法,从微/细观尺度出发,求解其均质化性能,构建多尺度计算联系,并与实验测试结果进行对比以验证 RVE 多尺度建模的有效性与可靠性。另一方面,采用正交试验和方差分析探讨纤维含量、纤维空腔占比、纤维取向、纤维长径比多参数对麻纤维增强复合材料弹性模量的影响权重顺序,运用多项式拟合法获得了以上述 4 个参数为自变量的麻纤维增强树脂基复合材料弹性模量预测公式,由于各类植物麻纤维都具有与苧麻纤维类似的腔体结构,本研究提出的基于腔体结构的植物麻纤维增强树脂基复合材料弹性模量预测方法可以推及拓展至麻类纤维增强树脂基一大类复合材料,为预测和调控麻纤维增强树脂基一大类复合材料的拉伸模量提供了新方法。

## 1 理论与模型

### 1.1 复合材料内部微观结构

本文采用 CT 扫描技术(Xradia515 Versa, ZEISS)对苧麻纤维增强复合材料进行 CT 扫描。首先将样品固定在夹具中,并放在工作台上。采用 60 kV 加速电压和 5 w 的功率以 1.99  $\mu\text{m}$  的分辨率对复合材料样品进行扫描,扫描结果如图 1 所示。

由图 1 可见,苧麻纤维具有腔体微观结构特征。通过 CT 扫描自带软件构建复合材料 3D 图像堆栈,然后导入 Avizo 软件进行可视化和纤维数据分析。首先在选择的分析区域(图 1(b)红框部



分)进行双边滤波,得到所选区域放大图像图1(d),再对区域进行阈值分割和降噪处理得到图1(e),最终采用Avizo软件计算获得空腔体积比为20vol%。

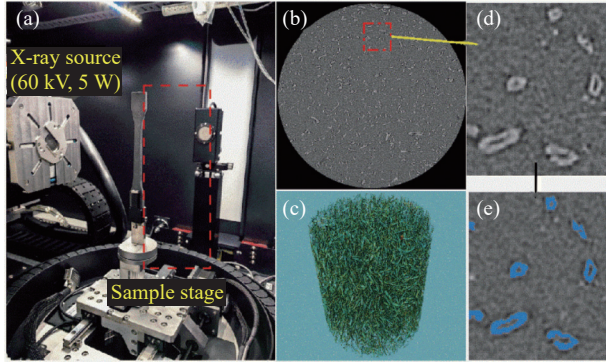


图1 苧麻/聚丙烯复合材料CT扫描(a)工作台(b)CT扫描2D图(c)CT扫描3D图(d)图像处理前(e)图像处理后  
Fig.1 CT scan of RFPC (a) workstation (b) 2D pictures (c) 3D pictures (d) before image process (e) after image process

## 1.2 麻纤维等效模型及其弹性模量计算

由苧麻纤维的SEM扫描电镜截图(图2)可知<sup>[13,14]</sup>,麻纤维具有独特的腔体结构特征,该微观结构将影响麻纤维增强复合材料的整体力学性能和预测建模的准确性<sup>[15,16]</sup>。因此,本研究在建模的过程中充分考虑麻纤维腔体结构,将含空腔的麻纤维看成具有空腔和纤维两种组分的非均质材料,如图2(c)所示。麻纤维的等效弹性模量可采用均匀化方法中的混合定律<sup>[17]</sup>求解,求解公式如下:

$$E_{ef} = v_l E_l + v_f E_f \quad (1)$$

$$v_l + v_f = 1 \quad (2)$$

式中,  $E_{ef}$ 、 $E_l$ 、 $E_f$ 分别为含空腔麻纤维等效弹性模量、空腔弹性模量、麻纤维弹性模量;  $v_l$ 、 $v_f$ 分别为空腔体积占比和除空腔部分的纤维体积占比。由于空腔的弹性模量为0 MPa,故公式(1)可简化为:

$$E_{ef} = v_f E_f \quad (3)$$

## 1.3 纤维取向

考虑麻纤维增强复合材料注塑成型过程中形成的纤维取向<sup>[18,19]</sup>,采用Bay和Tucker<sup>[20]</sup>提出的纤维的取向模型,描述了三种典型纤维取向状态,并给出了纤维取向张量分量的取值,在纤维增强复合材料中,纤维一般假设为不可弯曲的棒状体,用单位矢量 $\mathbf{p}$ 来描述单根纤维的取向,如图3所示, $\mathbf{p}$ 的表达式如下:

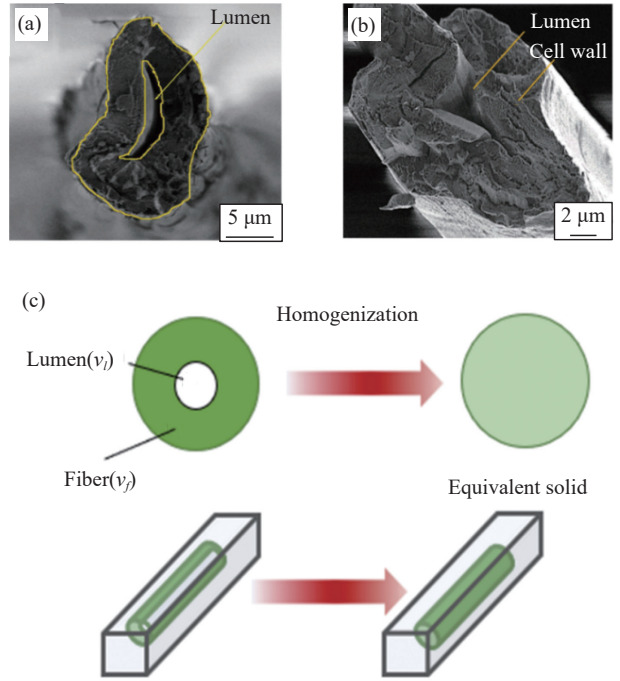


图2 苧麻纤维等效模型(a)(b)苧麻纤维SEM截面图<sup>[14][15]</sup>(c)含空腔麻纤维等效为实心结构

Fig.2 Equivalent model of ramie fiber (a)(b) SEM images of ramie fiber (c) ramie fiber with lumen equivalent to solid

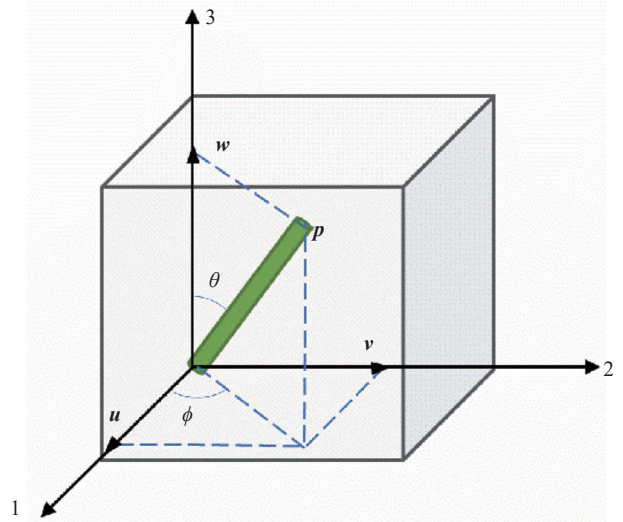


图3 纤维取向

Fig.3 Fiber orientation

$$\mathbf{p} = (u, v, w) = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta) \quad (4)$$

式中,  $\theta$ 表示 $\mathbf{p}$ 与3轴的夹角,范围是 $(0, 90^\circ)$ ,  $\varphi$ 表示 $\mathbf{p}$ 在1-2平面上的投影与1轴的夹角,范围是 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 。

对RVE中的所有纤维,取向也可以用取向概率分布函数 $\psi(\mathbf{p})$ 来表示,取向在 $\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{p}+d\mathbf{p}$ 之间的纤维概率为 $\psi(\mathbf{p})d\mathbf{p}$ ,基于概率分布函数 $\psi(\mathbf{p})$ 定义

的二阶取向张量  $a_{ij}$  为:

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(\mathbf{p}) d\mathbf{p} = \int p_i p_j \psi(\theta) \sin\theta d\theta d\phi \quad (5)$$

对角化后的纤维二阶取向张量可以采用如下形式:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ , 设  $\lambda_1 = \sin^2\theta \cos^2\varphi$ ,  $\lambda_2 = \sin^2\theta \sin^2\varphi$ ,  $\lambda_3 = \cos^2\theta$ <sup>[20]</sup>. 根据此式画出的纤维取向三角如图 4 所示, 其中三角形的三个端点 A(1,0), B(0.5,0.5), C(0.33,0.33) 对应纤维取向的三个状态: 单向分布、平面随机分布和空间随机分布。

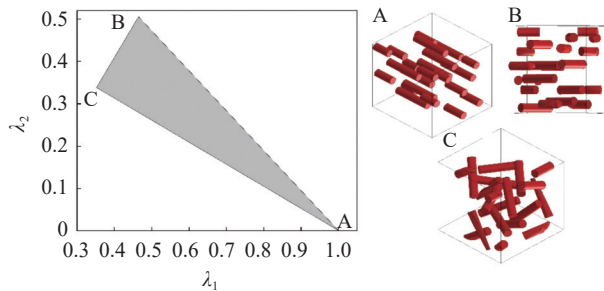


图 4 纤维取向三角和三角端点 ABC 对应的纤维取向状态  
Fig. 4 Orientation triangle of fiber and corresponding states of its vertex

CT 扫描苧麻纤维取向角度参数如表 1 所示, 在注射成型复合材料的初始填充中, 纤维主要位于注射流动平面中, 与平面有轻微的偏转角<sup>[21]</sup>, 取向张量的分量  $\lambda_3$  的中位数为 0.01, 考虑到研究和建模的便利性, 设  $\lambda_3$  为零<sup>[22]</sup>, 由此可得  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ , 实际注射成型样件的纤维取向张量  $\lambda_1$  的范围在 0.00-1.00 之间。

表 1 CT 扫描获取苧麻增强复合材料中苧麻纤维取向张量分量值、长度和直径分布参数

Parameters	Max	Min	Mean
$\lambda_1$	1.00	0.00	0.83
$\lambda_2$	1.00	0.00	0.14
$\lambda_3$	0.92	0.00	0.03
$L/\mu\text{m}$	505	65	122
$d/\mu\text{m}$	86	3	20

Notes:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ -fiber orientation tensor components,  $L$ -fiber length,  $d$ -fiber diameter

#### 1.4 纤维长径比

除了纤维取向, 纤维长径比对纤维增强复合

材料的性能也有较大的影响, 通过 Avizo 软件分析 CT 扫描并统计获取苧麻纤维的长度 ( $L$ ) 和直径 ( $d$ ) 的最大值、最小值和平均值数据如表 1 所示, 苧麻纤维长径比分布图如图 5 所示。

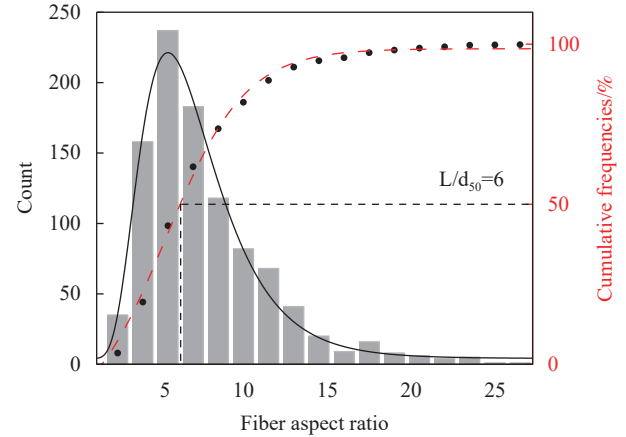


图 5 苧麻纤维长径比分布图  
Fig. 5 Aspect ratio distribution of ramie fibers

#### 1.5 RVE 多尺度模型

采用 Digimat 软件构建注塑成型苧麻短纤维增强复合材料的 RVE 有限元模型, 麻类纤维增强复合材料可以采用同样的方式来构建, 两种组分材料力学参数如表 2 所示, 聚丙烯 (PP) 的弹性模量参数由 PP 样件的拉伸实验获取。RVE 尺寸设置为  $2L \times 2L \times 4d$  ( $L$ -纤维长度,  $d$ 纤维直径)<sup>[23]</sup>, 拉伸方向为 1 方向。

表 2 苧麻纤维与聚丙烯力学性能参数  
Table 2 Mechanical properties of ramie fiber and polypropylene in materials

Components	Elastic modulus/ MPa	Density/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Poisson's Ratio
Ramie fiber	61 400	1.550	0.30
Polypropylene(PP)	790	0.904	0.42

建立合适的代表性体积元 (RVE) 后, 对其进行网格划分, 网格类型为四面体网格 (conforming (tetra)), 网格尺寸设为 0.004, 边界条件设置为周期性边界条件, 然后进行有限元数值计算, 用 RVE 的平均力学性能代表整体结构的性能。

$$\bar{\sigma}_{11} = \frac{1}{V'} \int \sigma_{11} dV \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}_{11} = \frac{1}{V'} \int \varepsilon_{11} dV \quad (8)$$

$$E_{11} = \frac{\bar{\sigma}_{11}}{\bar{\varepsilon}_{11}} \quad (9)$$

## 1.6 仿真试验设计

通过正交试验法研究纤维含量(A)、纤维空腔占比(B)、纤维取向张量分量 $\lambda_1$ (C)、纤维长径比(D)四个因素对麻纤维增强聚丙烯复合材料拉伸弹性模量的影响规律及影响权重。正交设计方案的仿真试验因素和水平如表3所示。

表3 仿真实验水平和因素

Table 3 Simulation experiment levels and factors

Level	Factors			
	A/wt%	B/vol%	C	D
1	5	16	0.4	2
2	10	18	0.6	6
3	15	20	0.8	10
4	20	22	1.0	14

Notes: A - fiber content, B - lumen volume fraction, C - fiber orientation tensor component  $\lambda_1$ , D - fiber aspect ratio

## 2 拉伸性能实验

### 2.1 麻纤维增强复合材料制备

本文以麻纤维增强聚丙烯复合材料为研究对象,其制备所用主要原材料包括苧麻(工业级,农科院麻类研究所),氨基硅油微乳液(自制)<sup>[24]</sup>,聚丙烯(工业级,中石油兰州石化公司)。

麻纤维增强树脂复合材料的制备过程是首先取一定量麻纤维浸入到氨基硅油微乳液中,超声振荡45 min,然后将麻纤维放入干燥箱充分干燥。将充分干燥的麻纤维和聚丙烯粒料在挤出机中充分混合造粒,然后将复合粒子放入注塑机中注塑成型为麻纤维含量为10 wt%的麻纤维/聚丙烯复合材料(RFPC)测试标准样件。

### 2.2 拉伸性能测试

拉伸模量按照GB/T 1447-2005(纤维增强塑料拉伸性能试验方法)<sup>[25]</sup>在微型电子万能试验机(WDW3020)上进行测试,拉伸速度为10 mm/min,标距为60 mm,将5组数据获取的平均值作为复合材料的拉伸模量值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 仿真模型验证

为验证仿真模型的可靠性,设定仿真模型中的纤维参数与实验测试中的纤维参数相同,即纤维含量为10 wt%,纤维长度和直径值选择表1中的平均数(122  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ ),空腔占比20 vol%,建立RVE多尺度模型计算复合材料的拉伸模量,RVE有限元模拟与拉伸实验测试结果的对比如图6

所示。由图可知,当 $\lambda_1$ 为0.2-1.0的范围内时,考虑植物麻纤维腔体结构的拉伸模量值相比于未考虑植物麻纤维腔体结构的拉伸模量值更接近实验值,表明考虑腔体结构的复合材料RVE模型相比未考虑腔体结构的复合材料更为精确。为了验证建立模型的有效性,本文采用CT扫描技术测试获取了本文研制的苧麻纤维含量为10wt%的苧麻纤维增强聚丙烯复合材料(RFPC)内苧麻纤维的取向张量分量 $\lambda_1$ 的均值为0.83。按照拉伸模量测出的改材料的弹性模量为1 020 MPa。由图6可知,模拟仿真对应的复合材料当 $\lambda_1=0.83$ 时,其拉伸模量模拟值为1 157 MPa,模拟结果与实验测试的误差为13.4%,该误差满足工程模拟误差小于等于20%的要求<sup>[26]</sup>,表明所建立的RVE仿真模型具有有效性。

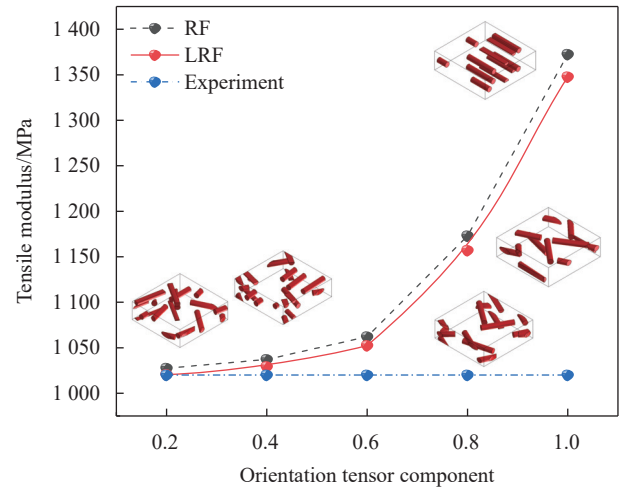


图6 苧麻/聚丙烯复合材料拉伸模量模拟和实验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results of tensile modulus of ramie fiber reinforced composites (Notes: RF - ramie fiber, LRF - lumen-ramie fiber)

### 3.2 麻纤维参数对复合材料弹性模量的影响分析

#### 3.2.1 正交试验和方差分析

本研究将纤维含量(A)、纤维空腔占比(B)、纤维取向张量分量 $\lambda_1$ (C)、纤维长径比(D)四个参数作为仿真实验变量,纤维直径采用CT扫描获取的平均值,采用正交试验设计了正交表 $L_{16}(4^4)$ ,进行了16次仿真试验,RVE模型如图7所示,正交试验结果如表4所示。

从图8和表5中可以清楚地看出,纤维含量(A)对复合材料的拉伸性能影响最为显著,纤维空腔占比(B)对复合材料拉伸模量的影响最不显著,四个参数对麻纤维复合材料拉伸模量的影响权重大小排序为:纤维含量(A)>纤维长径比(D)>



取向张量分量(C)>空腔占比(B)。对拉伸模量最大的影响因素是纤维含量,随着纤维含量的增加,复合材料拉伸模量增大。这是因为纤维的刚度高于基体的刚度,因而纤维含量越高,复合材料的弹性模量越大。纤维长径比对复合材料的拉伸模量也有较大的影响,纤维长径比与复合材料的界面多少有关,纤维长径比越大,纤维和基体之间的界面越多,界面可以实现复合材料力的转移和传递,因此纤维长径比越大,组分间的结合强度增加,故其复合材料的弹性模量也相应的增加。随着纤维在拉伸方向的取向张量分量值增大,拉伸模量也增大。这是由于纤维取向分量值越接近1,纤维长度方向与受力方向越一致,纤维可以承受的力就越大,因此纤维取向分量值越大,其增强的复合材料的拉伸模量值也越大。空腔占比越大,拉伸模量越小,这是因为随着空腔占比的增加,纤维的刚度下降。

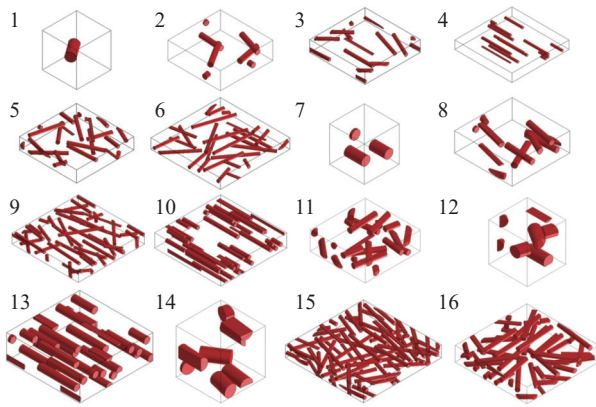


图7 苧麻/聚丙烯复合材料正交实验 RVE 有限元模型

Fig.7 RVE finite element models of ramie fiber reinforced composites for orthogonal experiment

由图8可知,拉伸模量最大时的参数组合为A4B1C4D4,即纤维含量为20wt%,纤维空腔占比为16vol%,纤维取向张量分量 $\lambda_1$ 为1.0,纤维长径比为14。

3.2.2 多项式拟合

为定量求解纤维增强相参数与复合材料拉伸性能之间的作用规律,本研究以 $x_i$ 设定4个麻纤维参数,以 $x_1$ 代表纤维含量、 $x_2$ 代表纤维空腔占比、 $x_3$ 代表纤维取向、 $x_4$ 代表纤维长径比,并以 $y$ 代表拉伸模量进行拟合,建立纤维参数与拉伸模量之间的函数方程式,具体表示为:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_{ii} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_{ij} \quad (10)$$

表4 苧麻/聚丙烯复合材料拉伸模量正交试验结果

Table 4 Orthogonal experimental results for tensile modulus of ramie fiber reinforced composites

No.	Factors				Evaluation metrics
	A/wt%	B/vol%	C	D	
1	1	1	1	1	836.1
2	1	2	2	2	955.6
3	1	3	3	3	1 084.0
4	1	4	4	4	1 234.7
5	2	1	2	3	1 185.5
6	2	2	1	4	1 131.7
7	2	3	4	1	991.1
8	2	4	3	2	1 195.1
9	3	1	3	4	2 149.3
10	3	2	4	3	2 255.0
11	3	3	1	2	1 187.3
12	3	4	2	1	1 070.1
13	4	1	4	2	2 051.8
14	4	2	3	1	1 191.0
15	4	3	2	4	2 202.0
16	4	4	1	3	1 426.8

Notes: A - code of fiber content, B - code of lumen volume fraction, C - code of fiber orientation tensor component  $\lambda_1$ , D - code of fiber aspect ratio, TM-tensile modulus

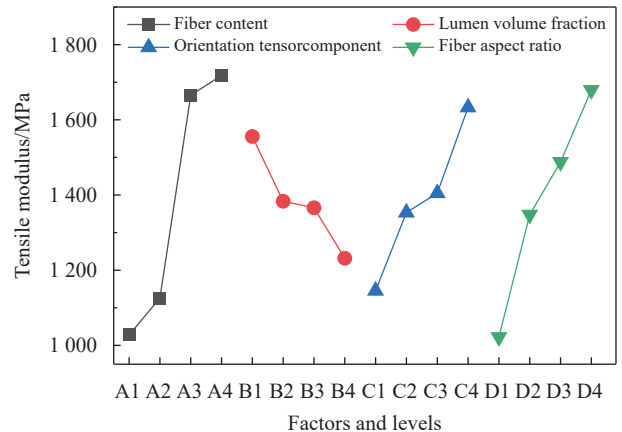


图8 苧麻/聚丙烯复合材料拉伸模量均值折线图

Fig.8 Mean line chart for tensile modulus of ramie fiber reinforced composites

表5 苧麻/聚丙烯复合材料拉伸模量方差分析

Table 5 Analysis of variance for tensile modulus of ramie fiber reinforced composites

Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value
A	3	1 537 406	512 469	4.127	0.137
B	3	211 984	70 661	0.569	0.673
C	3	481 388	160 463	1.292	0.419
D	3	921 524	307 175	2.474	0.238

Notes: Df - degree of freedom, Sum Sq - sum of squares, Mean Sq - mean of squares

利用 Matlab 对表3中的16组正交实验数据进行多项式拟合,求解出函数方程式的系数值,得

出纤维参数与弹性模量之间的函数方程式:

$$y = -3802.23 - 59.31x_1 + 503.77x_2 - 64.01x_4 - 1.09x_1^2 - 10.70x_2^2 + 257.01x_3^2 - 0.81x_4^2 + 0.23x_1x_2 + 123.81x_1x_3 + 6.03x_1x_4 - 102.30x_2x_3 - 1.29x_2x_4 + 130.67x_3x_4 \quad (11)$$

将多项式拟合方程计算出的值与正交实验的

仿真模拟值进行对比并计算出两者之间的误差,如表 6 所示。可以看出拟合结果与模拟结果的误差较小,最大仅为 1.67%,说明本研究拟合求解所得的函数方程式 (11) 具有较高的准确性,可用于分析纤维参数与拉伸模量的影响规律,预测并获知拉伸模量最大时的麻纤维参数组合。

表 6 苕麻/聚丙烯复合材料拉伸模量正交实验结果与拟合结果误差表

Table 6 Errors between orthogonal experimental results and fitting results for tensile modulus of ramie fiber reinforced composites

No.	Factors				Tensile modulus/MPa		
	$x_1$ /wt%	$x_2$ /vol%	$x_3$	$x_4$	Fitting values	Simulation values	Error/%
1	5	16	0.4	2	841.1	836.1	0.59
2	5	18	0.6	6	955.0	955.6	-0.06
3	5	20	0.8	10	1 084.6	1 084.0	0.05
4	5	22	1.0	14	1 229.7	1 234.7	-0.40
5	10	16	0.6	10	1 167.7	1 185.5	-1.50
6	10	18	0.4	14	1 135.3	1 131.7	0.32
7	10	20	1.0	2	987.5	991.1	-0.36
8	10	22	0.8	6	1 212.9	1 195.1	1.49
9	15	16	0.8	14	2 167.1	2 149.3	0.83
10	15	18	1.0	10	2 258.6	2 255.0	0.16
11	15	20	0.4	6	1 183.7	1 187.3	-0.30
12	15	22	0.6	2	1 052.3	1 070.1	-1.67
13	20	16	1.0	6	2 039.3	2 051.8	-0.61
14	20	18	0.8	2	1 207.1	1 191.0	1.35
15	20	20	0.6	14	2 185.9	2 202.0	-0.73
16	20	22	0.4	10	1 439.3	1 426.8	0.88

Notes:  $x_1$  - fiber content,  $x_2$  - lumen volume fraction,  $x_3$  - fiber orientation tensor component  $\lambda_1$ ,  $x_4$  - fiber aspect ratio

### 3.2.3 单一麻纤维参数对拉伸模量的主效应作用规律

通过前面的分析得出纤维含量  $x_1$  和纤维长径比  $x_4$  为影响复合材料拉伸模量的显著因素,这里利用降维处理的方法从麻纤维参数中分离出单一参数进行主效应分析,取  $x_2=20$ 、 $x_3=0.8$ 、 $x_4=6$  代入公式 (11) 获得以 8, 显著因素  $x_1$  (纤维含量) 为自变量的复合材料拉伸模量公式 (12), 同理, 取  $x_1=10$ 、 $x_2=20$ 、 $x_3=0.8$  的值代入公式 (11) 获得以显著因素  $x_4$  (纤维长径比) 为自变量的复合材料拉伸模量公式 (13)。纤维含量  $x_1$  和纤维长径比  $x_4$  与拉伸模量的函数图像如图 9 所示。

$$y_1 = -1.09x_1^2 + 80.52x_1 + 580.05 \quad (12)$$

$$y_2 = -0.81x_4^2 + 75.03x_4 + 855.24 \quad (13)$$

由图 9(a) 可知, 纤维质量比在 5-20 wt% 时, 复合材料拉伸弹性模量随着纤维含量的增加而增大。纤维含量为 5 wt% 时, 拉伸弹性模量最小为 955.4 MPa; 纤维质量比为 20 wt% 时, 拉伸弹性模

量最大为 1 754.4 MPa。纤维含量越高, 复合材料弹性模量越大, 这是由于纤维的刚度高于基体的刚度, 因此纤维含量越高, 复合材料的弹性模量越大。由图 9(b) 可知, 纤维长径比在 2-14 时, 复合材料拉伸模量随着纤维长径比的增加而增加, 当纤维长径比为 2 时, 拉伸弹性模量最小为 1 002.0 MPa; 当纤维长径比达到 14 时, 拉伸弹性模量达

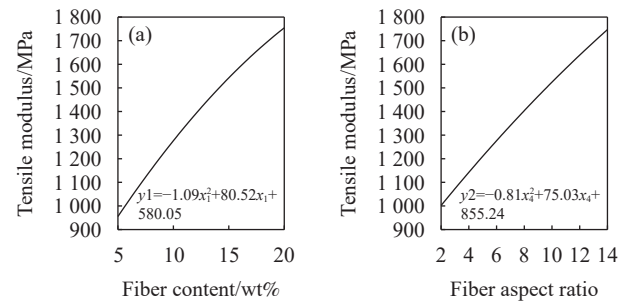


图 9 纤维含量和纤维长径比对苕麻/聚丙烯复合材料拉伸模量影响的主效应图 (a) 纤维含量 (b) 纤维长径比

Fig. 9 Main effects of fiber content and fiber orientation on tensile modulus of ramie fiber reinforced composite (a) fiber content (b) fiber aspect ratio



到了最大的 1 746.8 MPa。

### 3.2.4 麻纤维双参数对拉伸模量的协同作用规律

从图 10 可以看到纤维含量、纤维空腔占比、纤维取向、纤维长径比之间两两协同作用对麻纤维增强复合材料弹性模量的影响。图 10(a) 为纤维含量与纤维空腔占比对拉伸模量的影响规律，随着纤维含量的增大，拉伸模量增加；空腔占比对拉伸模量的影响不大。从等高线图可以看到，最大的拉伸模量出现在纤维含量和空腔占比分别为 20 wt% 和 19.5 vol% 时。图 10(b) 为纤维含量与纤维取向对拉伸模量的影响规律，当纤维取向张量分量  $\lambda_1$  在 0.4-0.5 之间时，复合材料拉伸模量随

着纤维含量的增加变化不大，当纤维取向张量分量  $\lambda_1$  大于 0.5 时，复合材料拉伸模量随着纤维含量的增加而增加， $\lambda_1$  越大，拉伸模量随纤维含量增加而增加的幅度越大。从等高线图可以看到，最大的拉伸模量出现在纤维含量和纤维取向张量分量  $\lambda_1$  分别为 20 wt% 和 1.0 时。图 10(c) 为纤维含量与纤维长径比对拉伸模量的影响规律，纤维长径比在 2-4 之间时，复合材料拉伸模量随纤维含量的增加变化不显著，随着纤维长径比的增加，复合材料拉伸模量随纤维含量的增加而显著增加。从等高线图可以看到，最佳的纤维含量和长径比的组合为 20 wt% 和 14。

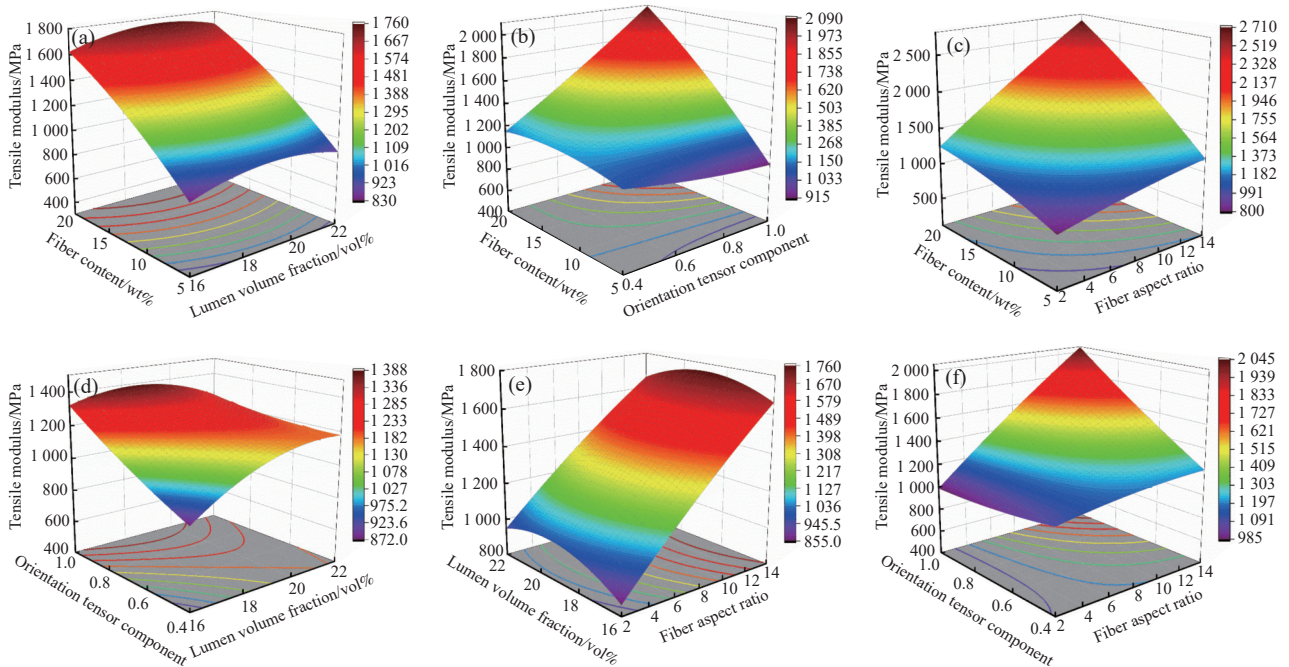


图 10 纤维参数协同作用对苧麻/聚丙烯复合材料拉伸模量的影响 (a) 空腔占比和纤维含量 (b) 纤维取向和纤维含量 (c) 纤维长径比和纤维含量 (d) 纤维取向和空腔占比 (e) 空腔占比和纤维长径比 (f) 纤维长径比和纤维取向

Fig. 10 Synergistic effects of fiber parameters on tensile modulus of ramie fiber reinforced composites (a) lumen volume fraction and fiber content (b) fiber orientation and fiber content (c) fiber aspect ratio and fiber content (d) fiber orientation and lumen volume fraction (e) lumen volume fraction and fiber aspect ratio (f) fiber aspect ratio and fiber orientation

图 10(d) 是纤维空腔占比与纤维取向张量分量对拉伸模量的影响规律，从图上可知空腔占比对复合材料的拉伸模量影响不大；随着纤维取向张量分量的增大，复合材料拉伸模量也随之增加。从等高线图可以看到，最佳的纤维空腔占比和纤维取向张量分量的组合为 18.5 vol% 之间和 1.0。图 10(e) 为纤维空腔占比与纤维长径比对拉伸模量的影响规律，从图上可知空腔占比对复合材料的拉伸模量影响不大；随着纤维长径比的增大，

复合材料拉伸模量也随之增加。从等高线图可以看到，最佳的纤维空腔占比和纤维长径比分量的组合为 18.9 vol% 和 14。图 10(f) 为纤维取向张量分量与纤维长径比对拉伸模量的影响规律，从图上可知，随着纤维取向张量分量和纤维长径比的增大，复合材料拉伸模量也随之增加。从等高线图可以看到，最佳的纤维取向张量分量与纤维长径比的组合为 1.0 和 14。

综上所述，纤维含量越高，复合材料弹性模

量越大,这是由于纤维的刚度高于基体的刚度,因此纤维含量越高,复合材料的弹性模量越大。纤维空腔越大,纤维的刚度相应的减小,使得复合材料的模量减小。纤维取向张量分量值越接近1,说明纤维长度方向与受力方向越一致,纤维可以承受的力就越大,因此其相应方向的弹性模量值也越大。纤维长径比与复合材料的界面多少有关,纤维长径比越大,纤维和基体之间的界面越多,界面可以实现复合材料力的转移和传递,因此纤维长径比越大,复合材料的弹性模量也相应的增加。

#### 4 结论

本文针对麻纤维腔体结构的微观结构特征,开展了含腔体麻纤维的均匀化等效模型理论研究,以苧麻纤维增强聚丙烯复合材料为研究对象,构建了基于腔体特征的麻纤维增强树脂基复合材料RVE多尺度模型,并开展了不同纤维参数下的复合材料弹性模量预测研究。

(1)本研究应用混合定律将含空腔特质麻纤维均匀化为等效固体材料,并计算其等效弹性模量。基于此,采用有限元分析法构建了腔体特征麻纤维增强树脂基复合材料RVE数值仿真模型,并通过与拉伸实验结果的对比较验证了数值建模的有效性。

(2)采用正交试验法探讨了麻纤维多参数(纤维含量、纤维空腔占比、纤维取向、纤维长径比)对麻纤维增强复合材料弹性模量的影响,并分析明确了影响麻纤维复合材料弹性模量的麻纤维参数的权重顺序为:纤维含量>纤维长径比>纤维取向张量分量值>纤维空腔体积比。获得了弹性模量最大时的麻纤维参数组合为A4B1C4D4,即纤维含量为20wt%,纤维空腔占比为16vol%,纤维取向张量分量 $\lambda_1$ 为1.0,纤维长径比为14。

(3)采用多项式拟合法获得了定量预测求解麻纤维增强树脂基复合材料弹性模量的计算公式,研究明确了麻纤维参数中纤维含量和纤维取向为主效应参数,并系统分析了四个麻纤维参数的协同效应,为指导麻纤维增强复合材料微细观结构设计,降低实验测试成本,设计和调控力学性能提供了理论依据。

总之,本文提出的基于腔体结构的植物麻纤维增强树脂基复合材料弹性模量预测方法,可望为更为准确地预测和调控麻纤维增强树脂基复合

材料这一大类复合材料的性能提供新理论和新方法。

#### 参考文献:

- [1] KUMAR R, UL HAQ M I, RAINA A, et al. Industrial applications of natural fibre-reinforced polymer composites - challenges and opportunities[J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2019, 12(3): 212-220.
- [2] CHANDGUDE S, SALUNKHE S. In state of art: Mechanical behavior of natural fiber-based hybrid polymeric composites for application of automobile components[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(6): 2678-2703.
- [3] 何莉萍,刘龙镇,苏胜培,等.纤维含量对黄麻纤维增强树脂基复合材料力学与热性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4): 2038-2048.  
HE Liping, LIU Longzhen, SU Shengpei, et al. Effects of fiber addition on the mechanical and thermal properties of jute fiber reinforced resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(4): 2038-2048 (in Chinese).
- [4] THYAVIHALLI GIRIJAPPA Y G, MAVINKERE RANGAPPA S, PARAMESWARANPILLAI J, et al. Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 226.
- [5] SHAHRIAR KABIR M, HOSSAIN M S, MIA M, et al. Mechanical Properties of Gamma-Irradiated Natural Fiber Reinforced Composites[J]. *Nano Hybrids and Composites*, 2018, 23(4): 24-38.
- [6] AKASH, VENKATESHA GUPTA N S, SREENIVAS RAO K V. An Experimental Study on Sisal/Hemp Fiber Reinforced Hybrid Composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 7383-7387.
- [7] JOSEPH J, MUNDA P R, KUMAR M, et al. Sustainable conducting polymer composites: study of mechanical and tribological properties of natural fiber reinforced PVA composites with carbon nanofillers[J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2020, 59(10): 1088-1099.
- [8] KERN W T, KIM W, ARGENTO A, et al. Finite element analysis and microscopy of natural fiber composites containing microcellular voids[J]. *Materials & Design*, 2016, 106: 285-294.
- [9] SHARMA V, GRUJOVIC N, ZIVIC F, et al. Effective thermal and mechanical properties of randomly oriented short and long fiber composites[J]. *Mechanics of Materials*, 2017, 107: 56-70.
- [10] SLISERIS J, YAN L, KASAL B. Numerical modelling of flax short fibre reinforced and flax fibre fabric reinforced polymer composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 89: 143-154.

- [11] SINHA A K, BHATTACHARYA S, NARANG H K. Abaca fibre reinforced polymer composites: a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(7): 4569-4587.
- [12] YANG C, ZHU D, YANG F, et al. Quantitative analysis based on atomic force microscopy characterization of interfacial properties between carbon fibers and epoxy resin subjected to hydrothermal and thermal treatments[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 198: 108278.
- [13] HAMAD S F, STEHLING N, HOLLAND C, et al. Low-Voltage SEM of Natural Plant Fibers: Microstructure Properties (Surface and Cross-Section) and their Link to the Tensile Properties[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 200: 295-302.
- [14] HAMAD S F, STEHLING N, HAYES S A, et al. Exploiting Plasma Exposed, Natural Surface Nanostructures in Ramie Fibers for Polymer Composite Applications[J]. *Materials*, 2019, 12(10): 1631.
- [15] BOGARD F, BACH T, ABBES B, et al. A comparative review of Nettle and Ramie fiber and their use in biocomposites, particularly with a PLA matrix[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2022, 19(14): 8205-8229.
- [16] 栾丛丛, 林志伟, 姚鑫骅, 等. 3D 打印碳纤维复合材料力学性能计算与实验 [J]. *材料科学与工程学报*, 2023, 41(4): 540-544. Luan Congcong, Lin Zhiwei, Yao Xinhua, et al. Calculation and Experiment of Mechanical Properties of 3D Printed Carbon Fiber Reinforced Composite[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2023, 41(4): 540-544(in Chinese).
- [17] BARBERO E J. Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus[M]. 2th ed. Boca Raton: CRC Press, 2023: 216-218.
- [18] HE L, LU G, CHEN D, et al. Smoothed particle hydrodynamics simulation for injection molding flow of short fiber-reinforced polymer composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(11): 1531-1539.
- [19] HE L, LU G, CHEN D, et al. Three-dimensional smoothed particle hydrodynamics simulation for injection molding flow of short fiber-reinforced polymer composites[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2017, 25(5): 055007.
- [20] 丁智平, 黄达勇, 荣继刚, 等. 注塑成型短玻纤增强复合材料各向异性弹性常数预测方法 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(24): 126-134. DING Zhiping, HUANG Dayong, RONG Jigang, et al. Predicting Method of Anisotropic Elastic Constants for Injection Molded Short Glass Fiber Reinforced Composites[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(24): 126-134(in Chinese).
- [21] LI Z, LU J, QIU R, et al. Multiscale modeling based failure criterion of injection molded SFRP composites considering skin-core-skin layered microstructure and variable parameters[J]. *Composite Structures*, 2022, 286: 115277.
- [22] LI Z, LIU Z, XUE Y, et al. A novel algorithm for significantly increasing the fiber volume fraction in the reconstruction model with large fiber aspect ratio[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(1\_suppl): 506S-530S.
- [23] BABU K P, MOHITE P M, UPADHYAY C S. Development of an RVE and its stiffness predictions based on mathematical homogenization theory for short fibre composites[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 130-131: 80-104.
- [24] HE L, XIA F, WANG Y, et al. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of the Amino Silicone Oil Emulsion Modified Ramie Fiber Reinforced Composites[J]. *Polymers*, 2021, 13(23): 4083.
- [25] 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005. Standardization Administration of the People's Republic of China. Fiber-reinforced plastics composites-Determination of tensile properties: GB/T 1447-2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005 (in Chinese).
- [26] 乔力伟, 桑琮辉, 王列妮, 等. 双通道供风条件下施工隧道最优风速参数研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(7): 105-112. QIAO Liwei, SANG Zonghui, WANG Lieni, et al. Study on optimal wind speed parameters of construction tunnel under condition of double-channel air supply[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(7): 105-112(in Chinese).