

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220950-15

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220950

含衬经的三维机织复合材料参数化 建模方法与力学行为

郭颖钊, 崔海涛, 温卫东, 张宏建, 赵思钰, 鞠宏奎, 郭俊华
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了能够更为准确地描述机织复合材料的细观结构和力学行为, 建立了一种适用于含衬经的三维机织复合材料的参数化模型构建方法, 讨论了几何模型内部各参数之间的等式约束关系, 并以此建立了几何约束模型以实现对几何模型的参数化描述。在几何约束模型的基础上, 重点讨论了参数化模型的建立方法, 以输入参数建立了几何模型与实际结构的映射关系, 提高了几何模型对实际结构的还原程度, 对材料的分析与设计具有指导意义。采用渐进损伤模型预测了三维机织复合材料的经向强度, 并与试验结果进行对比。在拉伸载荷作用下, 经纱和接结纱以纵向断裂失效为主, 纬纱以横向开裂失效为主, 富树脂区的失效模式为拉伸断裂, 经向强度预测值为 853.6 MPa, 相对误差为 2.3%, 与试验结果基本吻合。

关 键 词: 3D 机织复合材料; 参数化模型; 渐进损伤模型; 强度预测; 有限元仿真
中图分类号: V258; TB332 **文献标志码:** A

Parametric modeling method and mechanical behavior of 3D woven composites with warp insertion

GUO Yingzhao, CUI Haitao, WEN Weidong, ZHANG Hongjian, ZHAO Siyu,
JU Hongkui, GUO Junhua

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To describe the microstructure and mechanical behavior of woven composites more accurately, a parametric model construction method for 3D woven composites with warp insertion was established. The equality constraints among the parameters in the geometric model were investigated, and the geometric constraint model was developed to realize the parametric description of the geometric model. Based on the geometric constraint model, the construction method of the parametric model was discussed, and the mapping relationship between the geometric model and the actual structure was established by input parameters, which improved the reduction degree of the geometric model to the actual structure, providing a guidance for material analysis and design. The progressive damage model was applied to predict the strength of 3D woven composites in the warp direction, and the prediction results were compared with the experimental results. Under the tensile load, the failure mode of the warp and binder yarn was mainly longitudinal fracture, the failure mode of the weft yarn was transverse fracture, and the failure mode of the resin-rich region was tensile fracture. The predicted strength of the material in the

收稿日期: 2022-12-12

基金项目: 国家科技重大专项(2017-IV-0007-0044); 国家自然科学基金(52175142)

作者简介: 郭颖钊(1998—), 男, 硕士生, 主要从事先进复合材料结构设计。

通信作者: 崔海涛(1971—), 男, 教授, 博士, 主要从事微动疲劳与复合材料力学。E-mail: cuiht@nuaa.edu.cn

引用格式: 郭颖钊, 崔海涛, 温卫东, 等. 含衬经的三维机织复合材料参数化建模方法与力学行为[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220950.

GUO Yingzhao, CUI Haitao, WEN Weidong, et al. Parametric modeling method and mechanical behavior of 3D woven composites with warp insertion[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220950.

warp direction was 853.6 MPa, with a relative error of 2.3%, which was basically consistent with the experimental results.

Keywords: 3D woven composites; parametric model; progressive damage model; strength prediction; finite element simulation

近几十年来,越来越多的关注集中于三维机织复合材料(3D woven composites, 3DWC)的研究,三维机织复合材料通过接结纱与纬纱相互角联锁形成一种整体结构,具有优异的抗分层特性,高断裂韧性和高损伤容限等特点^[1-2],并且结构简单,工艺性好,因此在航空航天领域具有广泛的应用。三维机织复合材料制造的航空发动机风扇叶片和机匣能够实现有效减重同时提高整体性能,是目前航空领域研究的重点之一。目前,CFM 公司采用三维机织碳纤维预制体制备了 LEAP-X 发动机的风扇叶片,实现了大幅减重,降低噪声同时减少了维护成本^[3-4]。随着三维机织工艺的发展,机织复合材料的结构不断发展丰富,衍生出多种机织结构。

目前针对机织复合材料试验与数值的相关研究如下:考虑材料成型工艺的建模方法能够建立更为真实的几何模型^[5],但对细观结构的测量的要求较高。有学者针对二维机织以及编织复合材料的建模开展了相关研究^[6-7],三维机织中考虑了纱线横截面受到工艺的影响,采用八边形等形状对纱线进行建模^[8]。为了能够还原材料的真实结构,考虑纱线随机性的模型被用于其力学行为预测,并取得较好的结果^[9-11],但同样需要有大量测量数据作为研究的基础。机织复合材料在加载过程中表现出明显的非线性,并且材料的模量和强度受到纱线波动的影响^[12]。渐进损伤模型和多尺度方法目前是研究机织复合材料力学行为的主要技术途径和手段,能够较好模拟材料在加载过程中损伤的萌生和演化规律^[13-18],考虑材料的不同失效模式,实现材料性能的连续退化。有研究采用威布尔分布描述细观尺度的纤维束强度分布,较好地预测了机织复合材料的静强度和损伤扩展^[19-22]。试验方面有学者利用 DIC(digital image correlation, 数字图像相关)和 CT(computed tomography, 计算机断层扫描)等观测手段,对三维机织复合材料的全场应变和内部的损伤进行了观测,并结合多尺度和渐进损伤方法开展强度和损伤分析^[23-26]。

上述研究中对加入衬经纱的三维机织复合材

料采用的几何模型较为理想,忽略了纬纱的波动和经纱的扭转效应,有研究指出经纱的扭转会导致其内部萌生由切应力主导的横向裂纹^[27],该研究也指出这种经纱的扭转来自于纬纱的挤压效应,不同纬纱的波动不一致导致经纱沿其路径存在扭转,因此需要提出一种考虑机织复合材料内部纱线细观结构的建模方法。另一方面,目前采用的几何建模方法往往需要统计大量的细观结构参数,并且统计的对象主要针对内部细观结构中纱线的波动角度,纱线横截面的宽度、厚度等存在一定随机性的数据,且各数据的统计往往是相互独立的,而实际结构中各个参数之间通常存在一定的几何约束关系,独立统计的数据在建模过程中存在一定的不匹配程度,造成建立的几何模型对实际结构的还原存在一定的偏差。

针对上述含衬经的三维机织复合材料的建模存在的不足,本文开展了以下工作:研究了三维机织复合材料细观结构中纬纱波动和经纱扭转等细节特征,明确几何模型内部尺寸参数之间的约束关系,建立了适用于三维机织复合材料的几何约束模型;重点讨论了基于几何约束模型参数化模型建立方法,建立了几何模型与实际结构之间以参数化模型输入参数为联系的映射关系,采用特征参数实现对几何模型的描述,减少了建模所需的结构参数数量,提高了模型的通用性与建模流程的独立性,并在 TexGen^[28]中建立几何模型;采用建立的参数化模型,基于渐进损伤模型模拟了材料在静态单轴拉伸载荷作用下的力学行为,仿真结果与试验结果具有较好的一致性。

1 试验材料与数值模拟方法

1.1 试验材料

本文研究的复合材料^[26]碳纤维参数如表 1 所示,经纱和纬纱为 TG800X-12K 碳纤维,接结纱为 TG800HXC-6K 碳纤维,基体为 TDE-86 环氧树脂。材料采用 RTM(resin transfer molding, 数值传递模塑成型)工艺成型,其细观结构如图 1 所示,材料参数、机织参数和材料细节参数如表 2 和表 3 所示。

表 1 碳纤维材料参数^[26]

Table 1 Parameters of carbon fiber material^[26]

纱线	材料	纱线纤度/(g/km)
接结纱	TG800HXC-6K	250
经纱	TG800X-12K × 2	1 000
纬纱	TG800X-12K × 2	1 000

1.2 三维机织复合材料几何模型

机织复合材料在成型过程中受到模具的压力作用, 纤维预制体表面的接结纱最先受到挤压而向内部移动, 造成了表层纬纱的局部弯曲, 并影响了材料内部的细观结构。因此建立机织复合材

料的代表性体积单元(representative volume element, RVE)需要结合成型工艺针对其内部几何约束关系展开研究。

1.2.1 RVE 模型几何参数等式约束关系

本文对如下截面开展等式约束研究: ①纬纱-接结纱截面(WF-BI), 包括两个 WF-BI1 截面, 分别位于 $y = 0$ 和 $y = L_y$ 平面内, L_y 为 RVE 沿 y 方向的棱长, 以及一个 WF-BI2 截面, 位于 $y = L_y/2$ 平面内, 如图 2 所示, 且 WF-BI1 与 WF-BI2 仅纱线的空间坐标存在差异, 两截面的几何约束关系相同, 因此本文选取 WF-BI1 作为 WF-BI1 和 WF-BI2 的代表截面进行研究, 如图 1(e)所示, 其中 bi、

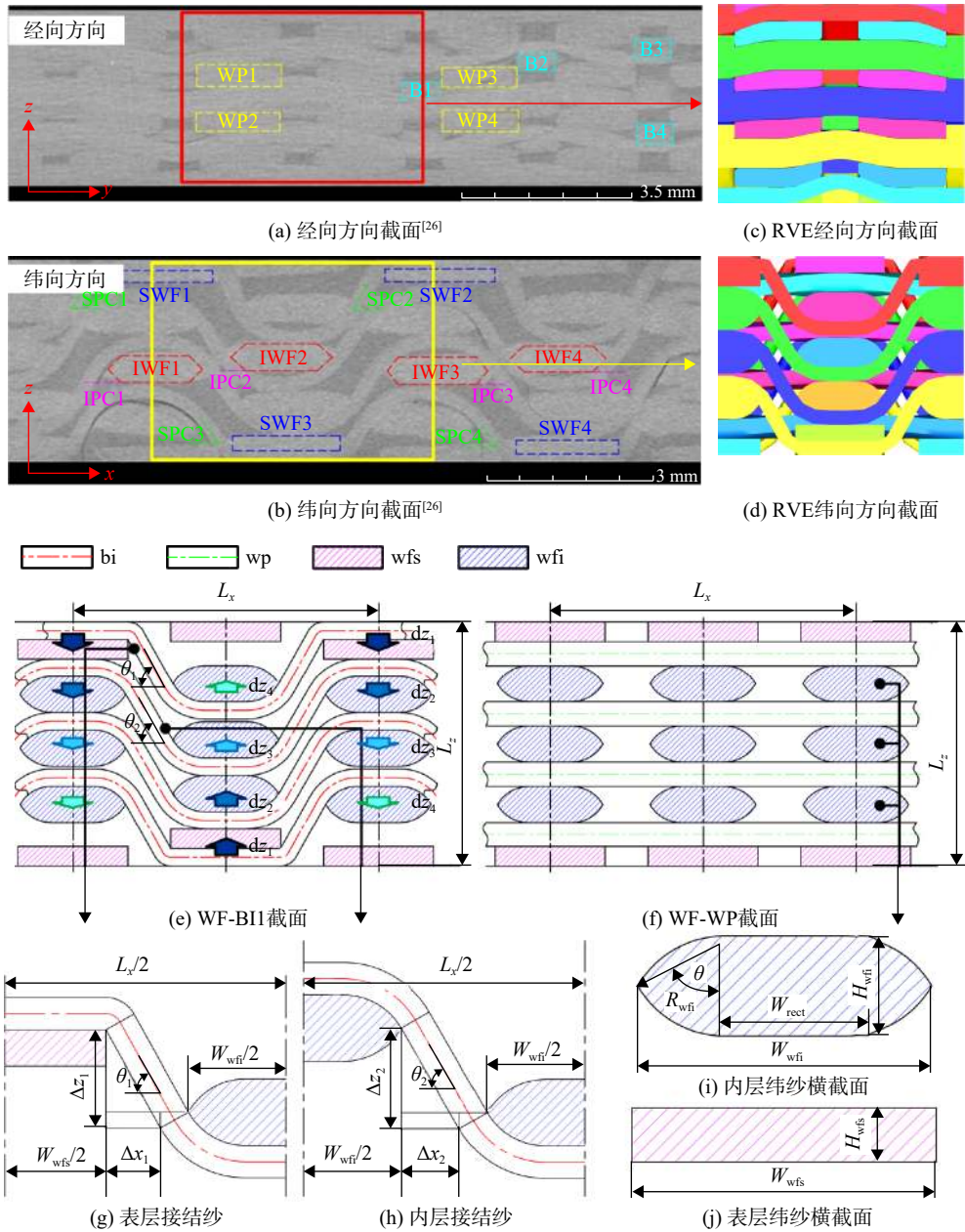


图 1 三维机织复合材料截面

Fig. 1 3D woven composites cross-sections

表 2 组分材料力学性能 ^[26]		
Table 2 Mechanical characteristics of component materials ^[26]		
材料	参数	数值
T800 碳纤维	纵向模量 E_{f1}/GPa	294.0
	横向模量 E_{f2}/GPa	19.3
	切变模量 G_{f2}/GPa	43.5
	泊松比 ν_{f2}	0.29
	纵向拉伸强度 X_{ft}/MPa	5 500
	纵向拉伸失效应变 $\varepsilon_{ft}^{\text{final}}$	0.023 2
	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.8
TDE-86 树脂	树脂模量 E_m/GPa	3.55
	树脂泊松比 ν_m	0.33
	拉伸强度 X_{mt}/MPa	80.0
	压缩强度 X_{mc}/MPa	241.0

wp、wfs 和 wfi 分别表示接结纱、经纱、表层纬纱和内层纬纱, dz_1 、 dz_2 、 dz_3 和 dz_4 表示相应位置纬纱的移动距离; ②纬纱-经纱截面(WF-WP), 包括位于 $y = L_y/4$ 和 $y = 3L_y/4$ 平面内的两个相同截面, 如图 2(a) 所示, 选取其中一个截面进行研究, 具体参数如图 1(f) 所示。取材料的经向为 x 方向, 纬向为 y 方向, 建立如图 2(a) 所示的笛卡儿坐标系, 则

表 3 三维机织复合材料参数 ^[26]	
Table 3 Parameters of 3D woven composites ^[26]	
参数	数值
纬纱机织密度 $M_{wf}/(\text{根}/\text{cm})$	4.0
经纱机织密度 $M_{wp}/(\text{根}/\text{cm})$	4.0
接结纱机织密度 $M_{bi}/(\text{根}/\text{cm})$	4.0
机织复合材料平均厚度 T/mm	4.0
纬纱总层数 $N_{wf}/\text{层}$	5
经纱总层数 $N_{wp}/\text{层}$	4
接结纱总层数 $N_{bi}/\text{层}$	4
表层纬纱横截面平均面积 A_{wfs}/mm^2	0.551
内层纬纱横截面平均面积 A_{wfi}/mm^2	0.852
经纱横截面平均面积 A_{wp}/mm^2	0.760
接结纱横截面平均面积 A_{bi}/mm^2	0.230
表层纬纱平均厚度 H_{wfs}/mm	1.78
接结纱平均宽度 W_{bi}/mm	0.81

$$\begin{cases} L_x = 20/M_{wf} \\ L_y = 20/M_{wp} \\ L_z = T \end{cases} \quad (1)$$

式中 L_x 、 L_y 和 L_z 为 RVE 棱长, T 为材料厚度, M_{wf} 和 M_{wp} 分别为纬纱和经纱的机织密度。
WF-WP 截面内经纱的路径水平, 纬纱排列其间, 则

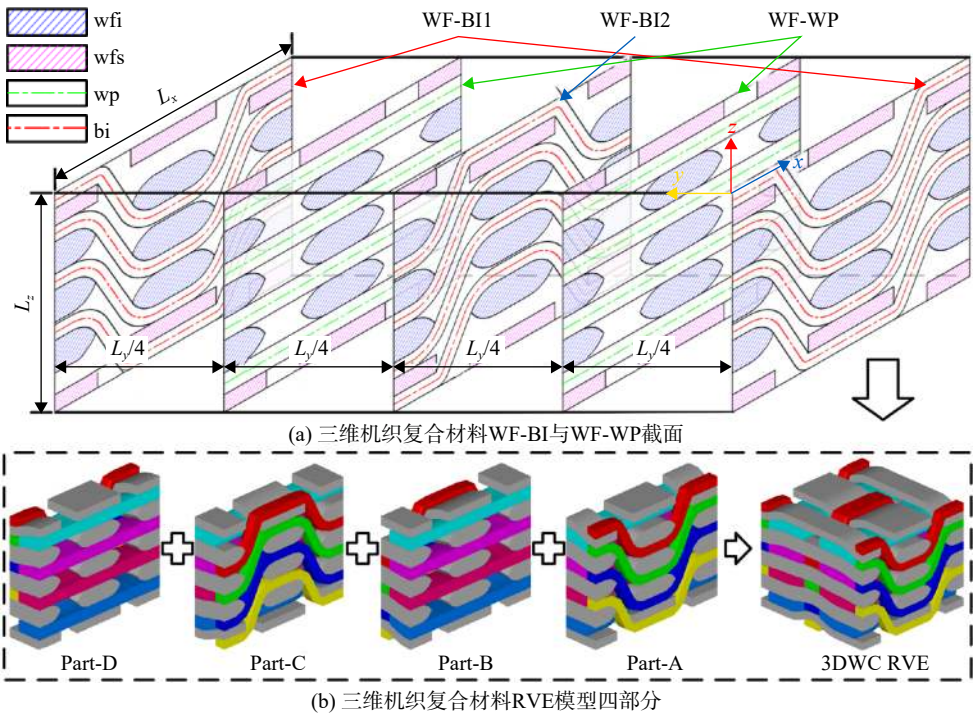


图 2 三维机织复合材料 RVE 截面

Fig. 2 3D woven composites RVE cross-sections

20220950-4

$$2H_{wfs} + (N_{wf} - 2)H_{wfi} + N_{wp}H_{wp} = L_z \quad (2)$$

式中 H_{wfs} 、 H_{wfi} 、 H_{wp} 为表层纬纱、内层纬纱、经纱的厚度, N_{wf} 和 N_{wp} 为纬纱和经纱的层数。经纱、接结纱和表层纬纱的截面尺寸满足

$$\begin{cases} H_{wp} = A_{wp}/W_{wp}, & H_{bi} = A_{bi}/W_{bi} \\ L_y = 2(W_{wp} + W_{bi}), & H_{wfs} = A_{wfs}/W_{wfs} \end{cases} \quad (3)$$

式中 A_{wp} 、 A_{bi} 和 A_{wfs} 为经纱、接结纱和表层纬纱面积, W_{wp} 、 W_{bi} 和 W_{wfs} 为经纱、接结纱和表层纬纱宽度, 表层纬纱横截面如图 1(j) 所示。

WF-BI1 截面的具体结构如图 2(a) 所示。接结纱与纬纱相互交织, 受到织造方法与成型工艺影响, 表层纬纱相对于 WF-WP 截面产生 z 方向的波动, 如图 1(e) 所示, 则表层纬纱沿 z 方向波动距离为 dz_1 :

$$dz_1 = H_{bi} \quad (4)$$

式中 H_{bi} 为接结纱厚度。

受到表层纬纱波动的影响, 内部的纬纱、接结纱向产生移动如图 1(e) 所示, 各层纬纱的移动距离为

$$dz_i = \max[dz_{i-1} + H_{bi} - \max(H_{wp}, H_{bi}), 0] \quad (5)$$

$(i = 2, \dots, N_{bi})$

式中 N_{bi} 为接结纱层数。

接结纱由水平段、弧段和倾斜段组成, 接结纱的纱线路径和纬纱横截面需要满足连续和相切的几何关系。表层接结纱如图 1(g) 所示, 其几何关系为

$$\begin{cases} \Delta z_1 = H_{wfs} + H_{wp} + H_{wfi}/2 - dz_1 - dz_{N_{bi}} + H_{bi} \cos \theta_1 \\ \Delta x_1 = (L_x - W_{wfs} - W_{wfi})/2 - H_{bi} \sin \theta_1 \\ \tan \theta_1 = \Delta z_1 / \Delta x_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 θ_1 表示表层接结纱直段的倾斜角, Δz_1 和 Δx_1 分别表示倾斜段端点的竖直距离和水平距离。

内层接结纱如图 1(h) 所示, 其几何关系为

$$\begin{cases} \Delta z_2 = H_{wp} + H_{wfi} - dz_i - dz_{N_{bi}+1-i} + H_{bi} \cos \theta_2 \\ (i = 2, 3, \dots, N_{bi} - 1) \\ \Delta x_2 = L_x/2 - W_{wfi} - H_{bi} \sin \theta_2 \\ \tan \theta_2 = \Delta z_2 / \Delta x_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中 θ_2 表示内层接结纱直段的倾斜角, Δz_2 和 Δx_2 分别表示倾斜段端点的竖直距离和水平距离。

内层纬纱采用双透镜形截面假设, 如图 1(i) 所示, 则

$$\begin{cases} W_{wfi} = W_{rect} + 2R_{wfi} \sin \theta \\ H_{wfi} = 2R_{wfi} (1 - \cos \theta) \\ A_{wfi} = W_{rect}H_{wfi} + R_{wfi}^2 (2\theta - 2\sin \theta) \end{cases} \quad (8)$$

式中 θ 为内层纬纱截面的半圆心角, 且 $\theta \in \{\theta_1, \theta_2\}$, A_{wfi} 为内层纬纱面积, R_{wfi} 为内层纬纱圆弧半径, W_{rect} 为截面中矩形段的长度。

1.2.2 机织复合材料几何约束模型

文中第 1.2.1 节讨论了三维机织复合材料内部细观结构的等式约束关系, 上述约束关系中描述截面形状和纱线相对位置关系的长度和角度参数称为特征参数, 本节基于上述等式约束关系展开讨论, 利用机织参数等输入数据建立机织复合材料的几何约束模型, 阐述特征参数的计算方法及过程。

根据机织密度、厚度, 由式(1)得到 RVE 模型的整体尺寸; 根据接结纱面积、接结纱宽度, 由式(2)~式(3)得到接结纱的厚度和经纱的宽度, 进而确定经纱的厚度和纬纱的厚度; 通过上述尺寸得到 WF-WP 截面内经纱和纬纱沿厚度方向的相对位置关系。受到成形压力作用, WF-BI1 截面内的纬纱产生波动, 相对 WF-WP 截面的移动距离由式(4)和式(5)获取, 则在 WF-WP 截面基础上得到 WF-BI1 截面内的纬纱之间的相对位置关系, 以式(8)中纬纱面积恒定为条件, 利用式(6)和式(7)进行迭代计算以获取纬纱的宽度、纬纱圆弧半径和接结纱的倾斜角度。几何约束模型所需的参数: ①表层纬纱面积, ②内层纬纱面积, ③经纱横截面面积, ④接结纱横截面面积, ⑤接结纱宽度, ⑥纬纱机织密度, ⑦经纱机织密度, ⑧接结纱(或经纱)层数, ⑨材料厚度。其中①~⑤属于细观结构参数, ⑥~⑨属于宏观结构参数。具体流程如图 3 所示, 表 4 为根据本工作的材料细观结构和几何约束模型得到的 RVE 模型特征参数。

根据 RVE 模型特征参数能够得到纱线路径的关键点的空间坐标, 以简化对纱线路径的描述, 并称这些关键点为主节点, 主节点空间位置如图 4 所示。相邻主节点之间采用三次函数描述纱线路径。纱线路径上相邻两主节点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 与 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, P_1 点为该段路径的起点, 其参数 $t = 0$, P_2 点为终点, 对应 $t = 1$, 向量 $\mathbf{F}_1(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k}$ ($t \in [0, 1]$) 表示该段纱线路径上的空间点的坐标, 则

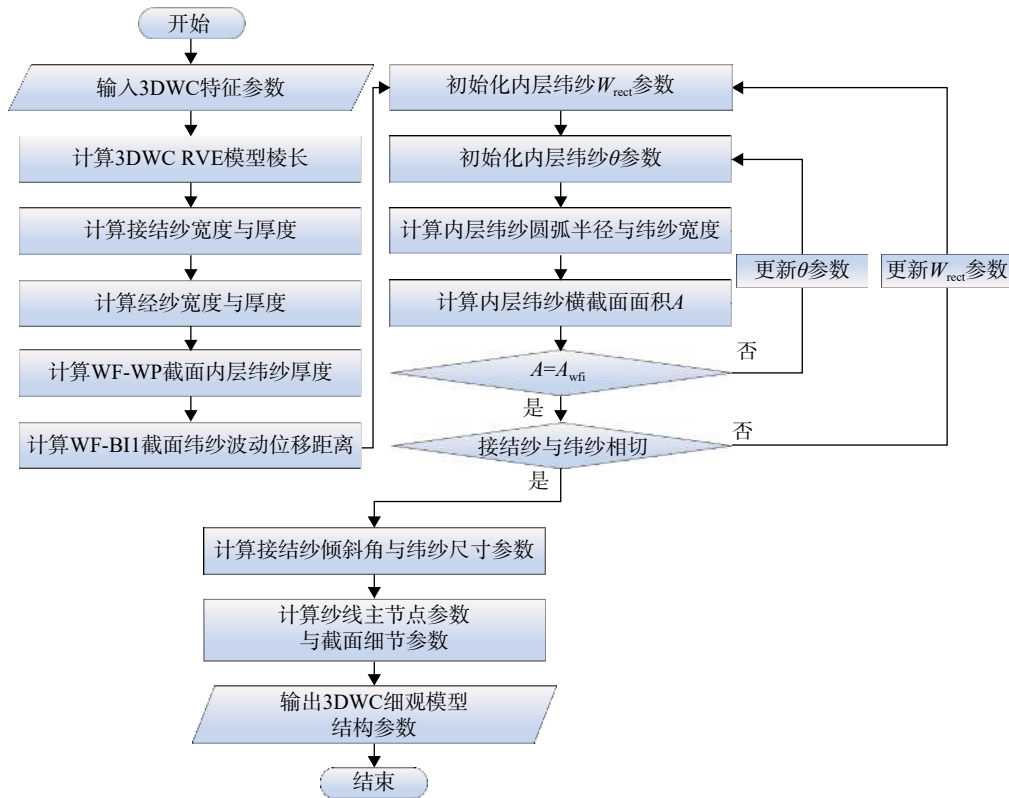


图 3 截面参数计算模型流程图

Fig. 3 Flowchart of the cross-section parameters calculation model

表 4 三维机织复合材料 RVE 模型参数

Table 4 Parameters of 3D woven composites RVE model

参数	数值
RVE 长度/mm	5.0
RVE 宽度/mm	5.0
RVE 厚度/mm	4.0
表层纬纱宽度/mm	1.820
表层纬纱厚度/mm	0.303
内层纬纱宽度/mm	1.784
内层纬纱厚度/mm	0.559
经纱宽度/mm	1.767
经纱厚度/mm	0.430
接结纱宽度/mm	0.733
接结纱厚度/mm	0.314
表层接结纱倾斜角度/rad	1.109
内层接结纱倾斜角度/rad	1.056

$$\begin{cases} x(t) = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x \\ y(t) = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y \\ z(t) = a_z t^3 + b_z t^2 + c_z t + d_z \end{cases} \quad t \in [0, 1] \quad (9)$$

式中 a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i ($i = x, y, z$) 为曲线待定系数。

$P_1 P_2$ 段纱线路径向量 $F_1(t)$ 上节点的切向量为 $V_1(t) = u(t)\mathbf{i} + v(t)\mathbf{j} + w(t)\mathbf{k}$ ($t \in [0, 1]$)，则切向量满足：

$$\begin{cases} u(t) = \frac{dx}{dt} / \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \\ v(t) = \frac{dy}{dt} / \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \\ w(t) = \frac{dz}{dt} / \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \end{cases} \quad t \in [0, 1] \quad (10)$$

P_1 和 P_2 主节点在纱线路径上，且纱线路径在 P_1 和 P_2 点的切向与两个主节点定义的切向方向 (u_1, v_1, w_1) 和 (u_2, v_2, w_2) 相同，则：

$$\begin{cases} F_1(0) = x(0)\mathbf{i} + y(0)\mathbf{j} + z(0)\mathbf{k} = x_1\mathbf{i} + y_1\mathbf{j} + z_1\mathbf{k} \\ F_1(1) = x(1)\mathbf{i} + y(1)\mathbf{j} + z(1)\mathbf{k} = x_2\mathbf{i} + y_2\mathbf{j} + z_2\mathbf{k} \\ V_1(0) = u(0)\mathbf{i} + v(0)\mathbf{j} + w(0)\mathbf{k} = u_1\mathbf{i} + v_1\mathbf{j} + w_1\mathbf{k} \\ V_1(1) = u(1)\mathbf{i} + v(1)\mathbf{j} + w(1)\mathbf{k} = u_2\mathbf{i} + v_2\mathbf{j} + w_2\mathbf{k} \end{cases} \quad (11)$$

通过式(11)确定式(9)的待定系数，得到 $P_1 P_2$ 段纱线路径 $F_1(t)$ 。主节点为 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ ，其切向量为 (u_3, v_3, w_3) ，与 P_2 点构成路径 $P_2 P_3$ 段， P_2 点为该段路径起点，对应 $t = 0$ ， P_3 点为终点，对应 $t = 1$ ，向量 $F_2(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k}$ ($t \in [0, 1]$) 表示该段纱线路径上的空间点的坐标，采用三次函数近似，路径上节点的切向量为 $V_2(t)$ ，则 $F_2(t)$ 与 $V_2(t)$ 满足 P_2 点和 P_3 点的坐标和切线方向：

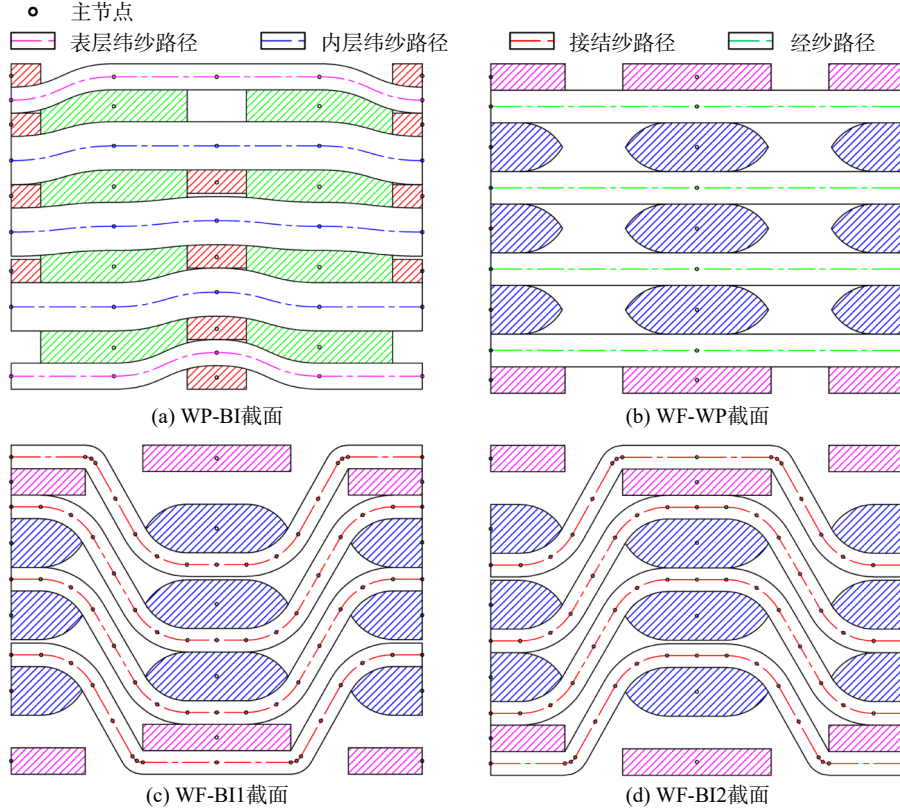


图 4 三维机织复合材料纱线主节点和纱线路径

Fig. 4 Yarn master nodes and paths of 3D woven composites

$$\begin{cases} \mathbf{F}_2(0) = x(0)\mathbf{i} + y(0)\mathbf{j} + z(0)\mathbf{k} = x_2\mathbf{i} + y_2\mathbf{j} + z_2\mathbf{k} \\ \mathbf{F}_2(1) = x(1)\mathbf{i} + y(1)\mathbf{j} + z(1)\mathbf{k} = x_3\mathbf{i} + y_3\mathbf{j} + z_3\mathbf{k} \\ \mathbf{V}_2(0) = u(0)\mathbf{i} + v(0)\mathbf{j} + w(0)\mathbf{k} = u_2\mathbf{i} + v_2\mathbf{j} + w_2\mathbf{k} \\ \mathbf{V}_2(1) = u(1)\mathbf{i} + v(1)\mathbf{j} + w(1)\mathbf{k} = u_3\mathbf{i} + v_3\mathbf{j} + w_3\mathbf{k} \end{cases} \quad (12)$$

通过式(12)确定 $\mathbf{F}_2(t)$ 中的待定系数, 得到 P_2P_3 段纱线路径 $\mathbf{F}_2(t)$ 。将完整的纱线路径分为 n 段, 同理得到余下路径 $\mathbf{F}_i(t)$ ($i = 3, 4, \dots, n$), 则纱线路径 $\mathbf{F}(t)$ 可整理为

$$\mathbf{F}(t) = \begin{cases} \mathbf{F}_1(t/t_1) & t \in [0, t_1] \\ \mathbf{F}_2[(t-t_1)/(t_2-t_1)] & t \in (t_1, t_2] \\ \dots & \dots \\ \mathbf{F}_n[(t-t_{n-1})/(1-t_{n-1})] & t \in (t_{n-1}, 1] \end{cases} \quad (13)$$

路径 $\mathbf{F}(t)$ 和切向量 $\mathbf{V}(t)$ 确定纱线横截面中心坐标和法向方向, 在横截面平面内定义竖直向量 $\mathbf{N}(t)$ 以表征描述截面形状的厚度方向, 与 $\mathbf{V}(t)$ 构成主节点的局部笛卡尔坐标系。

表层纬纱横截面采用矩形假设, 内层纬纱采用双透镜形假设, 纬纱沿其路径在图 2(a) 的 5 个截面内共有 5 个主节点, 将纬纱分为 4 部分, 纬纱横截面沿路径在主节点之间扫描, 将 4 个部分连

接得到完整的纬纱, 具体结构如图 5 所示。同理, 接结纱和经纱的主节点通过图 1(e) 和图 2(a) 中的截面计算, 纱线分段路径函数形式与方向向量形式如表 5 所示。

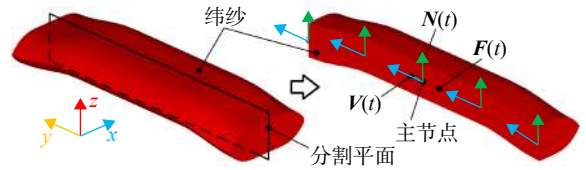


图 5 纬纱的主节点路径和主节点

Fig. 5 Path and master nodes of the weft yarn

经纱和接结纱的截面形状受到纬纱波动和挤压的影响, 截面形状发生变形, 如图 6(a)、图 6(b) 和图 6(c) 所示, 取上表面纬纱的纤维路径为 $\mathbf{F}_{\text{up}}(t)$, 下表面的纬纱路径为 $\mathbf{F}_{\text{bm}}(t)$, 则经纱截面的上表面和下表面形状分别为 $\mathbf{H}_{\text{up}}(t)$ 和 $\mathbf{H}_{\text{bm}}(t)$:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{\text{up}}(t) = [\mathbf{F}_{\text{up}}(t) \cdot \mathbf{k} - T_{\text{up}}(t)/2] \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{H}_{\text{bm}}(t) = [\mathbf{F}_{\text{bm}}(t) \cdot \mathbf{k} + T_{\text{bm}}(t)/2] \cdot \mathbf{k} \end{cases} \quad t \in [t_{\text{wps}}, t_{\text{wpe}}] \quad (14)$$

式中 $T_{\text{up}}(t)$ 和 $T_{\text{bm}}(t)$ 表示上层纬纱和下层纬纱在相应位置的厚度, t_{wps} 和 t_{wpe} 表示经纱截面沿着纬纱路径所在的区间, 由此得到经纱的横截面 CS2,

表 5 纱线路径曲线及横截面方向

Table 5 Yarn path curves and cross-section direction

纱线	$F_i(t)$	$V_i(t)$	$N_i(t)$
接结纱	$F_i(t) = \begin{cases} xi + 0j + zk & (y = 0) \\ xi + (L_y/2)j + zk & (y = L_y/2) \\ xi + L_yj + zk & (y = L_y) \end{cases}$	$V_i(t) = ui + 0j + wk \quad (y = 0, L_y/2, L_y)$	$N_i(t) = -wi + 0j + uk \quad (y = 0, L_y/2, L_y)$
经纱	$F_i(t) = \begin{cases} xi + L_y/4j + zk & (y = L_y/4) \\ xi + (3L_y/4)j + zk & (y = 3L_y/4) \end{cases}$	$V_i(t) = 1i + 0j + 0k \quad (y = L_y/4, 3L_y/4)$	$N_i(t) = 0i + 0j + 1k \quad (y = L_y/4, 3L_y/4)$
纬纱	$F_i(t) = \begin{cases} 0i + yj + zk & (x = 0) \\ (L_x/2)i + yj + zk & (x = L_x/2) \\ L_xi + yj + zk & (x = L_x) \end{cases}$	$V_i(t) = 0i + 1j + 0k \quad (x = 0, L_x/2, L_x)$	$N_i(t) = 0i + 0j + 1k \quad (x = 0, L_x/2, L_x)$

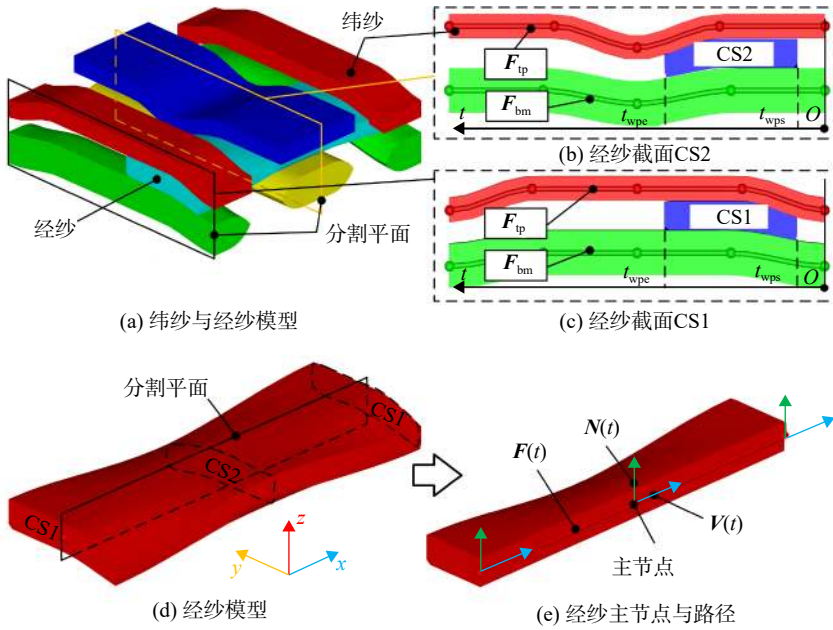


图 6 经纱横截面

Fig. 6 Cross-section of the warp yarn

如图 6(b)所示,同理可得图 6(c)中横截面 CS1,采用扫掠得到经纱几何模型,经纱相邻主节点的横截面变形趋势相反从而导致经纱产生扭转效应,如图 6(d)和图 6(e)所示。基于上述理论与方法,得到接结纱的横截面形状。

1.2.3 机织复合材料的参数化模型

根据建立的几何约束模型,获取并分析输入参数,采用 Python 程序对机织复合材料细观结构的特征参数进行迭代计算,并在迭代过程中对参数的合理性进行分析和判断,对纱线之间的几何关系以及是否存在空间重叠进行判别,实现细观结构模型特征参数在尺寸上的参数化,采用特征参数描述几何模型。首先进行 WF-WP 截面的特征参数计算,考虑纬纱的波动效应,计算 WF-BI1 截面的特征参数,根据纬纱的波动,对经纱和接

结纱的截面进行修正。

特征参数的计算和验证结束后,基于上述特征参数计算 WF-BI1、WF-BI2 和 WF-WP 截面内的纬纱、经纱和接结纱的主节点坐标,将各截面如图 2 所示进行空间排列,确定主节点上纱线横截面的法向向量和竖直向量,并基于主节点坐标和横截面法向方向计算纱线路径,完成对机织复合材料几何结构的参数化描述。借助 TexGen 的 Python 二次开发功能,根据纱线的主节点坐标、纱线横截面形状参数、横截面法向和竖直方向建立几何模型。最后利用 TexGen 软件生成体素单元有限元模型,并将建立的有限元模型用于机织复合材料力学行为的研究,提高有限元模型前处理的效率。

本文参数化模型目的在于建立输入参数与细

观几何模型的映射关系。减少建模所需的结构参数数量, 提高模型的通用性和建模流程的独立性。

在结构参数数量方面, 本文参数化模型所需的输入参数更少。文献 [26] 模型与本文参数化

模型所需参数如表 6 所示, 其中细观结构输入参数需要对材料的细观结构进行测量, 宏观结构输入参数一般由材料的工艺参数确定。本文参数化模型的结构参数的数量较少, 同时对细观结构输入参数的测量要求更少, 因此更具优势。

表 6 几何模型输入参数
Table 6 Input parameters of the geometric model

模型	细观结构输入参数	宏观结构输入参数
几何模型 ^[26]	①表层纬纱宽度, ②表层纬纱厚度, ③内层纬纱宽度, ④内层纬纱厚度, ⑤经纱厚度, ⑥经纱宽度, ⑦接结纱宽度, ⑧接结纱厚度, ⑨表层接结纱倾斜角度, ⑩内层接结纱倾斜角度	
参数化模型	①表层纬纱面积, ②内层纬纱面积, ③经纱横截面面积, ④接结纱横截面面积, ⑤接结纱宽度	⑥纬纱机织密度, ⑦经纱机织密度, ⑧接结纱(经纱)层数, ⑨材料厚度

在模型的通用性方面, 本文参数化模型的通用性更强。机织复合材料的宏观结构参数与细观结构参数以及各细观结构参数之间存在一定联系, 只采用细观结构尺寸作为建模的依据忽视了宏观结构参数的影响, 导致模型只能表征特定的结构, 而不具有通用性。本文参数化模型的输入参数从宏观和细观多层次对材料的结构特征进行描述, 输入参数之间相对独立; 几何约束模型根据输入参数得到描述细观结构尺寸的特征参数, 利用特征参数确定纱线横截面和路径, 并建立几何模型; 建立了输入参数-特征参数-几何模型的联系, 实现输入参数与特征参数的对应, 并依据特征参数建立相应的几何模型, 使建立的模型具有更强的通用性。不同参数的几何模型在文中第 2.1 节进行了详细讨论。

在建模流程方面, 本文参数化模型对实际材料结构的依赖性更小, 独立性更高。参数化模型的这一优势基于其通用性强的特点, 实现输入参数与几何模型的对应, 其核心的几何约束模型基于对实际结构的分析, 但不局限于指定的结构。对于已成型的机织复合材料, 根据其机织工艺参数和内部细观结构的测量数据, 通过参数化模型能够建立高还原度的几何模型; 对于处于设计阶段的材料, 其工艺参数和部分细观结构确定后, 从中提取参数化模型所需的输入参数, 建立对应的几何模型, 通过这种方法, 能够脱离材料实体建立几何模型, 在材料设计阶段结合有限元方法预先研究材料的力学性能, 充分发挥复合材料可设计性的特点, 并能够节省大量时间和经济成本。

综上所述, 本文建立的参数化模型根据输入参数进行计算, 得到的特征参数实现建模, 降低

了输入参数的数量, 提高了模型的通用性和建模流程的独立性。输入参数作为对材料结构特征的描述和几何建模的初始数据, 建立起几何模型与材料结构的映射关系, 从而使模型的建立从对数据的依赖转向对结构特征的描述, 使得建模不再必须依赖材料细观结构的测量; 所建立的模型不仅能够利用有限元验证模型和理论的准确性, 同样能够利用相应的分析结果指导复合材料的设计, 具体如图 7 所示。

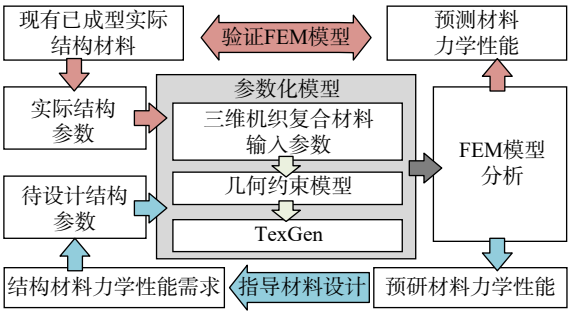


图 7 三维机织复合材料参数化模型
Fig. 7 Parametric model of 3D woven composites

1.3 复合材料渐进损伤模型

目前, 渐进损伤模型是研究复合材料力学行为的有效方法, 能够模拟复合材料的损伤积累和破坏。渐进损伤模型分为 3 部分: ①损伤起始判定; ②损伤本构模型; ③损伤演化模型。

1.3.1 损伤起始判定

本文采用改进的三维 Hashin 失效准则^[29]作为纱线损伤起始的判定方法, 富树脂基体采用抛物面损伤准则^[30], 上述准则损伤函数 φ_{ik} 如表 7 所示。三维机织复合材料碳纤维和基体材料参数如表 2 所示, 纱线等组分材料的弹性常数和相应强

表 7 不同损伤模式与损伤判定准则^[29-30]Table 7 Different damage modes and their criteria^[29-30]

损伤模式	判定准则
纱线纵向拉伸损伤	$\varphi_{lt} = (\sigma_{11}/X_t)^2 + (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2)/S_{lt}^2 \geq 1$
纱线纵向压缩损伤	$\varphi_{lc} = (\sigma_{11}/X_c)^2 \geq 1$
纱线横向拉伸损伤	$\varphi_{tt} = [(\sigma_{22} + \sigma_{33})/Y_t]^2 + (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})/S_{tz}^2 + (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2)/S_{lt}^2 \geq 1$
纱线横向压缩损伤	$\varphi_{tc} = [Y_c^2/(2S_{tz})^2 - 1](\sigma_{22} + \sigma_{33})/Y_c + (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2/(2S_{tz})^2 + (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})/S_{tz}^2 + (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2)/S_{lt}^2 \geq 1$
树脂基体拉伸损伤	$\varphi_{mt} = [3J_2 + I_1(X_{mc} - X_{mt})]/(X_{mc}X_{mt}) \geq 1$
树脂基体压缩损伤	$\varphi_{mc} = [3J_2 + I_1(X_{mc} - X_{mt})]/(X_{mc}X_{mt}) \geq 1$

注: σ_{ii} 和 τ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 为正应力与切应力分量, I_1 为应力第一不变量, J_2 为应力偏量第二不变量; X_t 和 X_c 为纱线纵向拉伸和压缩强度, Y_t 和 Y_c 为纱线横向拉伸和压缩强度, S_{lt} 、 S_{tz} 为纱线剪切强度。

度参数采用 Chamis 模型^[31] 确定:

$$\begin{cases} E_{11} = p_{fi}E_{f11} + (1 - p_{fi})E_m \\ E_{22} = E_m/[1 - \sqrt{p_{fi}}(1 - E_m/E_{f22})] \\ G_{12} = G_m/[1 - \sqrt{p_{fi}}(1 - G_m/G_{f12})] \\ \nu_{12} = p_{fi}\nu_{f12} + (1 - p_{fi})\nu_m \\ X_t = p_{fi}X_{f1} + (1 - p_{fi})X_{mt} \\ X_c = p_{fi}X_{f1} + (1 - p_{fi})X_{mc} \\ Y_t = [1 - (\sqrt{p_{fi}} - p_{fi})(1 - E_m/E_{f22})]X_{mt} \\ Y_c = [1 - (\sqrt{p_{fi}} - p_{fi})(1 - E_m/E_{f22})]X_{mc} \\ S_{lt} = [1 - (\sqrt{p_{fi}} - p_{fi})(1 - G_m/G_{f12})]S_m \end{cases} \quad (15)$$

式中 G_m 为树脂基体切变模量, X_{f1} 为纤维纵向拉伸强度, S_m 为树脂基体剪切强度, p_{fi} 表示纱线的纤维填充系数, 其获取方法为

$$p_{fi} = \frac{T_{ei}}{1000\rho A_i} \quad i = \text{wfi, wfs, wp, bi} \quad (16)$$

式中 T_{ei} 为纱线纤度, A_i 为纱线横截面积。

1.3.2 损伤本构模型

本文采用的纱线的损伤本构模型^[32] 为

$$\begin{cases} \sigma = C_d(b_{ij})\varepsilon \\ C_d(b_{ij}) = M^{-1}(b_{ij})CM^T(b_{ij}) \\ M(b_{ij}) = \text{diag}(b_{11}, b_{1t}, b_{1z}, b_{2t}, b_{2z}, b_{3z}) \\ b_{11} = (1 - D_1)^2 \\ b_{1t} = (1 - D_t)^2 \\ b_{1z} = (1 - D_z)^2 \\ b_{2t} = 2(1 - D_1)(1 - D_t)/(2 - D_1 - D_t) \\ b_{2z} = 2(1 - D_1)(1 - D_z)/(2 - D_1 - D_z) \\ b_{3z} = 2(1 - D_t)(1 - D_z)/(2 - D_t - D_z) \end{cases} \quad (17)$$

式中 σ 和 ε 为应力和应变, C_d 为组分材料损伤刚度矩阵, b_{ij} 表示组分材料的损伤变量, C 表示组分材料未损伤的刚度矩阵, 其中 D_1 、 D_t 和 D_z 表示纱线纵向、横向 t 方向和横向 z 方向的损伤变量。

基体的损伤本构模型与纱线损伤本构模型在形式上相似, 区别在于基体为各向同性材料, 损

伤变量在各个方向上相同, 为 $b_{ij} = 1 - D_m$, 其中 D_m 表示基体的损伤变量。纱线的纵向和横向以及基体的损伤变量采用其所有损伤模式中最大的损伤值:

$$\begin{cases} D_1 = \max(D_{1t}, D_{1c}) \\ D_t = \max(D_{tt}, D_{tc}) \\ D_z = \max(D_{zt}, D_{zc}) \\ D_m = \max(D_{mt}, D_{mc}) \end{cases} \quad (18)$$

1.3.3 损伤演化模型

当材料中某一单元的应力状态满足损伤判据, 则该单元发生损伤, 随着载荷的不断增大, 已发生损伤的单元状态逐渐劣化, 损伤不断累积直至最终失效。根据裂纹带理论^[33], 完全损伤的单元释放的能量等于其内部储存的应变能:

$$\frac{1}{2}\sigma_{eq}^{iki}\varepsilon_{eq}^{ikf}l_{eq}^3 = G_{ik}l_{eq}^2 \quad (19)$$

式中 G_{ik} 为断裂能释放率, σ_{eq}^{iki} 与 ε_{eq}^{ikf} 分别为单元初始损伤时的等价应力与完全失效时的等价应变, l_{eq} 为单元特征长度, 六面体单元特征长度为单元体积的立方根。单元等价位移 χ_{eq}^{ik} 和等价应力 σ_{eq}^{ik} ^[34] 如表 8 所示。为表征材料损伤后的刚度变化, 采用双线性损伤演化模型, 单元的损伤变量为:

$$D_{ik} = \frac{\chi_{eq}^{ikf}(\chi_{eq}^{ik} - \chi_{eq}^{iki})}{\chi_{eq}^{ik}(\chi_{eq}^{ikf} - \chi_{eq}^{iki})} \quad (i = 1, t, z, m; k = t, c) \quad (20)$$

式中 χ_{eq}^{iki} 和 χ_{eq}^{ikf} 分别表示损伤起始等价位移和完全损伤等价位移, 分别为

$$\begin{cases} \chi_{eq}^{iki} = \frac{\chi_{eq}^{ik}}{\sqrt{\varphi_{ik}}} \\ \chi_{eq}^{ikf} = \frac{2G_{ik}\sqrt{\varphi_{ik}}}{\sigma_{eq}^{ik}} \end{cases} \quad (i = 1, t, z, m; k = t, c) \quad (21)$$

表 8 不同损伤模式的等价位移和等价应力^[34]

Table 8 Equivalent displacement and equivalent stress for different damage modes^[34]

损伤模式	等价位移	等价应力
纱线纵向拉伸损伤	$\chi_{eq}^{lt} = \sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2} l_{eq}$	$\sigma_{eq}^{lt} = (\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \tau_{12}\varepsilon_{12} + \tau_{13}\varepsilon_{13}) l_{eq} / \chi_{eq}^{lt}$
纱线纵向压缩损伤	$\chi_{eq}^{lc} = \langle -\varepsilon_{11} \rangle l_{eq}$	$\sigma_{eq}^{lc} = \langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle l_{eq} / \chi_{eq}^{lc}$
纱线横向拉伸损伤	$\chi_{eq}^{tt} = \sqrt{\varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2} l_{eq}$	$\sigma_{eq}^{tt} = (\sigma_{22}\varepsilon_{22} + \tau_{12}\varepsilon_{12} + \tau_{23}\varepsilon_{23}) l_{eq} / \chi_{eq}^{tt}$
纱线横向压缩损伤	$\chi_{eq}^{tc} = \langle -\varepsilon_{22} \rangle l_{eq}$	$\sigma_{eq}^{tc} = \langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle l_{eq} / \chi_{eq}^{tc}$
树脂基体拉伸损伤	$\chi_{eq}^{mt} = \varepsilon_1 l_{eq}$	$\sigma_{eq}^{mt} = \sigma_1 \varepsilon_1 l_{eq} / \chi_{eq}^{mt}$
树脂基体压缩损伤	$\chi_{eq}^{mc} = \varepsilon_3 l_{eq}$	$\sigma_{eq}^{mc} = \sigma_3 \varepsilon_3 l_{eq} / \chi_{eq}^{mc}$

2 结果分析

2.1 参数化几何模型分析

为了研究建模方法的有效性, 将机织复合材料的细观结构的特征参数预测结果与实际结构测量结果进行对比, 如表 9 所示, RVE 尺寸 $L_x=5.0\text{ mm}$, $L_y=5.0\text{ mm}$, 与机织参数中的纱线机织密度相符合, 特征参数的预测相对误差在 10% 以内, 多数参数的相对误差在 5% 以内, 表层纬纱厚度相对误差较大, 为 8.8%, 对比结果表明建立的 RVE 模型对

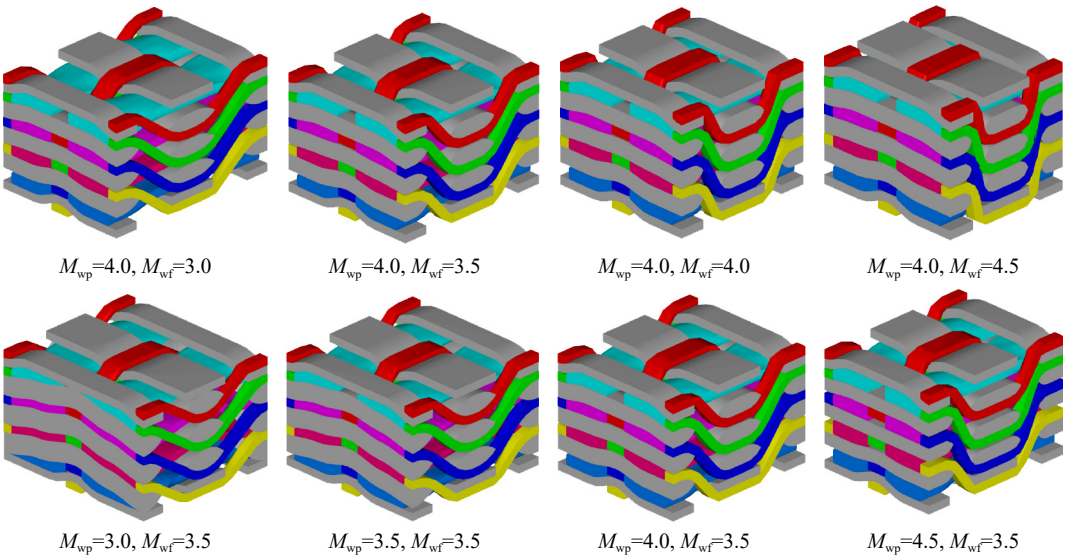
材料的还原程度较高, 说明本文研究的机织复合材料几何约束模型对该类型的机织复合材料适用性较强。

为了研究建模方法的通用性, 建立了不同纬纱密度、经纱密度和接结纱层数等参数组合下的三维机织复合材料 RVE 模型, 如图 8 所示。随着纬纱密度增加, 接结纱的倾斜角度增加、纬纱横截面形状趋于跑道形状; 随着经纱密度的增加, 由于保持经纱横截面面积不变, 经纱厚度明显增

表 9 三维机织复合材料参数化模型特征参数

Table 9 Characteristic parameters of the parametric model for 3D woven composites

特征参数	参数化模型预测值	测量值 ^[26]	相对误差/%
三维机织复合材料 RVE 厚度/mm	4.0	4.0	0
表层接结纱倾斜角度/rad	1.109	1.134	-2.2
内层接结纱倾斜角度/rad	1.056	1.065	-0.8
经纱宽度/mm	1.767	1.70	3.9
经纱厚度/mm	0.430	0.45	-4.4
表层纬纱宽度/mm	1.820	1.78	2.2
表层纬纱厚度/mm	0.303	0.28	8.2



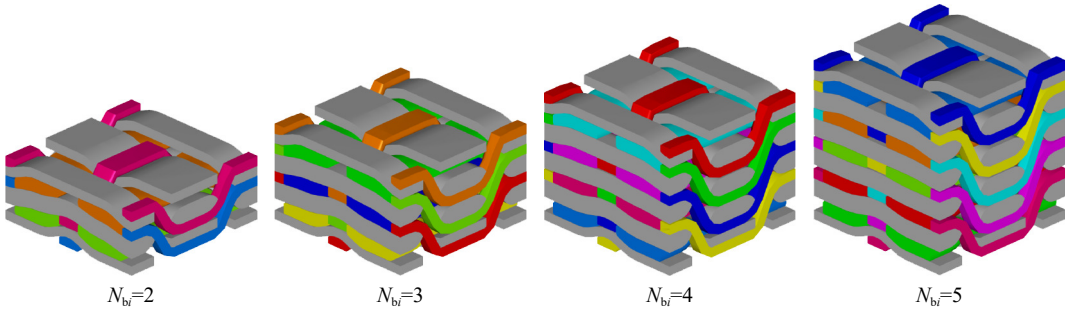


图 8 不同输入参数的三维机织复合材料 RVE 模型

Fig. 8 3D woven composites RVE model with different input parameters

加,导致经纱的宽度与厚度之比降低,进而使得纬纱的形状和接结纱倾角受到影响;改变接结纱层数,随着纬纱层数增加,表层纬纱的波动对内部纬纱的影响逐步降低,这是由于接结纱与经纱的厚度存在差异,根据式(5)可知,当经纱厚度大于接结纱厚度,则纬纱移动距离 $dz_i \leq dz_{i-1} (i = 2, 3, \cdots, N_{bi})$,结合图 1(e)可知纬纱的波动幅度逐步降低。

不同参数组合模型的结构特征差异较大,但其细观结构参数依旧遵循参数化模型的几何约束关系,本文参数化模型建立起输入参数与几何模型的一一对应关系,改变输入参数可实现模型的整体更新,说明本文研究的机织复合材料几何约束模型对不同参数组合下的模型通用性较强。

建立参数化几何模型对机织复合材料的研究具有重要意义,可设计性是复合材料的重要特征之一,对于机织复合材料而言,其力学行为很大程度上受到细观结构的影响,采用参数化建模的方法能够为不同机织参数组合下的设计方案建立几何模型,发挥降低模型构建成本,提高计算分析效率的作用,结合有限元分析得到性能符合要求的设计方案,节约时间和经济成本。

2.2 强度及损伤预测分析

表 10 为机织复合材料经向拉伸的有限元预测结果与试验结果对比,材料的经向模量预测值为 63.2 GPa,与试验值的相对误差为 5.3%,强度的预测值为 853.6 MPa,相对误差为 2.3%。

图 9 为机织复合材料应力应变及损伤单元预测曲线。图 9(a)为材料在经向加载条件下的试验应力应变曲线^[26]及有限元预测结果。在加载初期应力应变呈现线性关系。当应变达到 0.8% 左右,应力应变曲线呈现出非线性特征,随着施加载荷的增加,材料内部纱线和基体已出现损伤并逐渐累积,力学性能逐步退化,表现为材料经

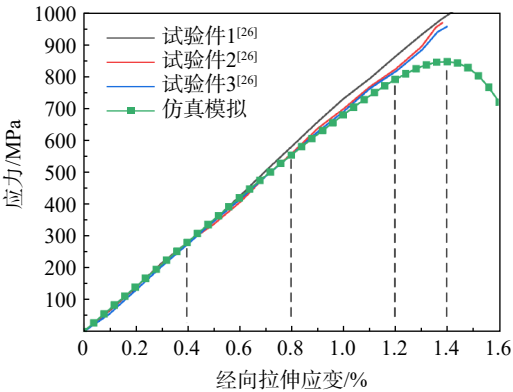
表 10 有限元预测结果与试验结果对比

Table 10 Comparison between predicted results of FEM and experimental results

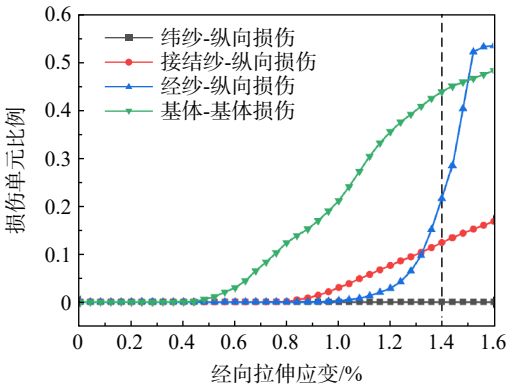
参数	试验值 ^[26]	预测值	相对误差/%
经向强度/MPa	873.9	848.9 ^[26]	2.9
		853.6	2.3
经向模量/GPa	60.0	64.6 ^[26]	7.7
		63.2	5.3

向加载曲线的割线斜率逐步降低,当应变为 1.4% 左右,此时材料所承载的应力最大,为 853.6 MPa。

图 9(b)为纱线的纵向损伤以及基体的损伤情况,在经向应变 0.5% 之前,材料未产生损伤,应力与应变保持线性关系;在 0.5% 的经向应变后,



(a) 经向拉伸应力应变曲线



(b) 纵向损伤单元比例

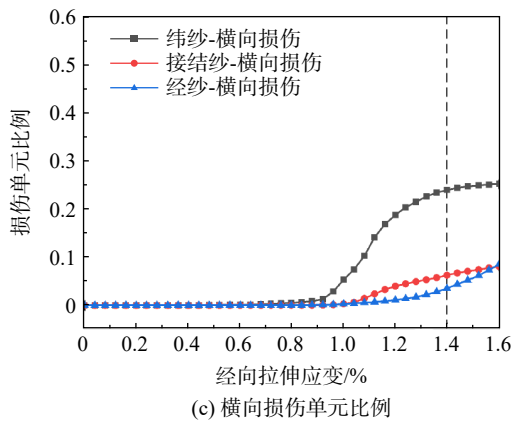


图 9 三维机织复合材料经向拉伸预测结果

Fig. 9 Prediction results for 3D woven composite under tensile load in the warp direction

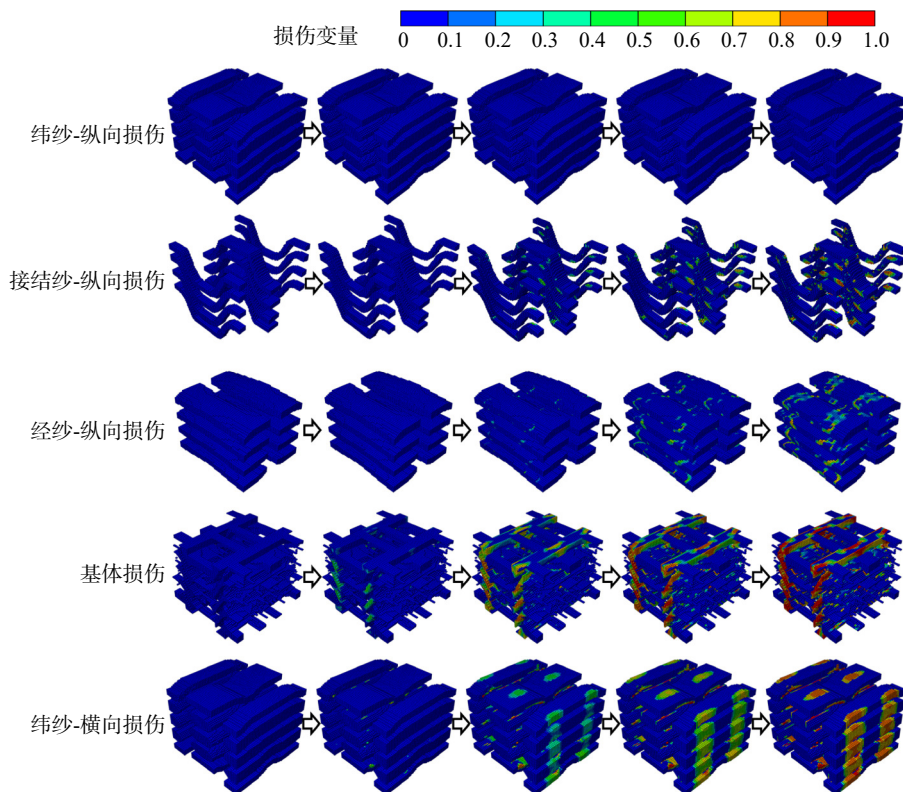
基体发生损伤, 损伤单元数量不断增加, 在 0.8% 应变前由于经纱和接结纱未发生损伤, 而基体的模量较低, 因此材料的应力与应变近似为线性关系; 接结纱和经纱分别在 0.8% 和 1.0% 应变后分别产生损伤, 且经纱的损伤扩展较为迅速, 由于经纱和接结纱的损伤, 应力应变曲线表现出非线性特征。图 9(c) 为纱线的横向损伤情况, 其中以纬纱的横向损伤最为严重, 且纬纱横向损伤发生较早; 接结纱和经纱中也存在纱线的横向开裂。在经向载荷作用下, 经纱内部发生损伤不断加剧, 损伤单元比例迅速增加, 当应变约为 1.4% 时, 纱

线内部的损伤单元数量和损伤程度达到一定水平, 材料力学性能逐步降低。

图 10 为各纱线以及基体在不同应变下的损伤分布, 更为直观地表达损伤的扩展过程。基体的损伤主要集中在接结纱直段和纬纱之间的富树脂区, 该区域的树脂基体承担传递载荷的作用, 而树脂的强度相对较低, 因此发生损伤较早, 并且损伤明显。

结合图 9 中的损伤单元累积情况对纱线的损伤进一步分析。经纱作为经向承载的主要组分, 其纵向应力水平较高, 其损伤形式主要表现为纵向损伤, 同时横向损伤发生几乎与纵向损伤的发生时间一致, 图 10 中经纱纵向损伤与横向损伤的分布位置较为相似, 两者的判定准则中均含有切应力, 且考虑到扭转的经纱在加载时存在矫直的过程会导致内部产生切应力, 说明切应力在经纱的损伤中起到了不可忽视的作用。

接结纱的纵向损伤相对横向损伤更早发生, 接结纱结构相对复杂, 在不同纬纱之间交织形成角度互锁结构, 图 10 中接结纱纵向损伤与横向损伤分布较为接近但并不重合, 纵向损伤位于接结纱直段与弧段的交点位置, 由于经向拉应力的作用而发生纵向损伤; 图 10 中可以看出接结纱并未完全断裂, 进一步施加载荷, 接结纱的变形加大,



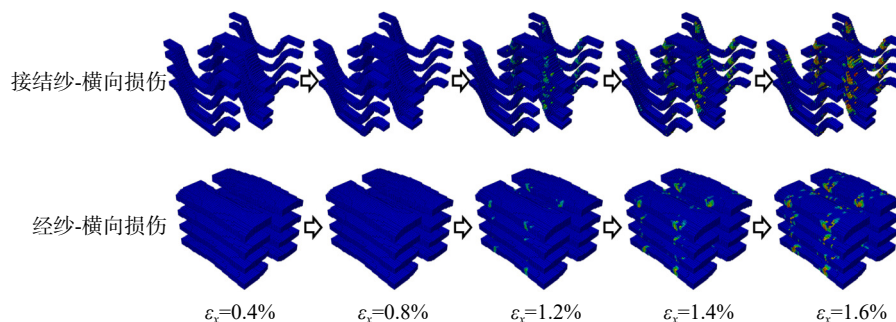


图 10 三维机织复合材料损伤演化过程

Fig. 10 Damage evolution of 3D woven composites

则接结纱直段中存在一定的切应力,同时部分纱线含有纵向损伤,即接结纱中存在垂直于纵向的裂纹,其附近切应力较大,进而在纵向损伤区域附近出现接结纱的横向损伤。

纬纱的损伤模式为横向损伤,是由于纬纱纤维纵向与载荷方向垂直,纱线中横向存在一定的拉应力,同时由于接结纱在经向拉伸过程中伸展,弯曲的接结纱存在矫直的趋势,从而对纬纱有一定的剪切作用,造成纬纱的横向开裂。

3 结 论

通过本文研究,得出如下结论:

1) 本文建立了一种适用于三维机织复合材料细观结构的几何约束模型,并重点讨论了机织复合材料的参数化模型建立方法。以机织复合材料的工艺参数以及内部细观结构参数为输入参数,计算得到特征参数,借助 TexGen 软件实现几何模型的构建,建立起输入参数和几何模型的映射关系,简化建模流程。本文的参数化模型建立方法不仅能够实现对现有材料实际结构较好地还原,且能够为材料细观结构设计建立相应参数的几何模型,实现材料的预先研究,充分发挥复合材料可设计性的特点,对三维机织复合材料的分析与设计具有一定的工程意义。

2) 基于机织复合材料的参数化模型建立了相应结构的有限元分析模型,采用复合材料渐进损伤模型预测三维机织复合材料的强度。预测结果与试验结果对比,材料模量的预测误差为 5.3%,强度的预测误差为 2.3%,与试验结果吻合较好,证明了参数化几何模型和渐进损伤模型在机织复合材料预测方面的有效性,模型中考虑了纬纱的波动以及经纱的扭转等细观结构特征,在预测精度上有所提升。

3) 三维机织复合材料在经向加载条件下,主

要的损伤形式为经纱的纵向断裂和纬纱的横向开裂。经纱的损伤通常发生在与接结纱的交叉区域,且该区域的经纱扭转效应较为明显,纬纱的横向开裂主要集中在纬纱与经纱的交叉区域,并且通常在纬纱波动较为剧烈的位置开始萌生,也说明考虑纬纱波动和经纱扭转的必要性。

参考文献:

- [1] LIU Gang, ZHANG Li, GUO Licheng, et al. Multi-scale progressive failure simulation of 3D woven composites under uniaxial tension[J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 233-243.
- [2] MOUNTASIR A, HOFFMANN G, CHERIF C, et al. Competitive manufacturing of 3D thermoplastic composite panels based on multi-layered woven structures for lightweight engineering[J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 415-424.
- [3] HUANG Tao, WANG Yanling, WANG Gang. Review of the mechanical properties of a 3D woven composite and its applications[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018, 57(8): 740-756.
- [4] MARSH G. Aero engines lose weight thanks to composites[J]. *Reinforced Plastics*, 2012, 56(6): 32-35.
- [5] ISART N, EL SAID B, IVANOV D S, et al. Internal geometric modelling of 3D woven composites: a comparison between different approaches[J]. *Composite Structures*, 2015, 132: 1219-1230.
- [6] LI Haolin, BACARREZA O, KHODAEI Z S, et al. Probabilistic multi-scale design of 2D plain woven composites considering meso-scale uncertainties[J]. *Composite Structures*, 2022, 300: 116099.
- [7] ZHANG Yuyang, LI Huimin, GAO Yihang, et al. Multi-scale modeling and elastic properties prediction of 3D four-directional tubular braided composites[J]. *Composite Structures*, 2022, 292: 115632.
- [8] YANG Xue, AI Jing, ZHU Hao, et al. Multi-directional compression behaviors and failure mechanisms of 3D orthogonal woven composites: Parametric modeling and strength prediction[J]. *Materials & Design*, 2022, 222: 111108.
- [9] GUO Junhua, WEN Weidong, ZHANG Hongjian, et al. Investigation of mechanical properties for 2.5D woven composites with different weft-layer-numbers by a triple-cell model system[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(3): 5243S-5285S.
- [10] GUO Junhua, WEN Weidong, ZHANG Hongjian, et al. Mechanical properties prediction of 2.5D woven composites via voxel-mesh full-cell model[J]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22(7): 1899-1914.
- [11] GUO Junhua, WEN Weidong, ZHANG Hongjian, et al. Represent-

- tative cell modeling strategy of 2.5D woven composites considering the randomness of weft cross-section for mechanical properties prediction[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 237: 107255.
- [12] WARREN K C, LOPEZ-ANIDO R A, GOERING J. Experimental investigation of three-dimensional woven composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 73: 242-259.
- [13] DAI S, CUNNINGHAM P R. Multi-scale damage modelling of 3D woven composites under uni-axial tension[J]. *Composite Structures*, 2016, 142: 298-312.
- [14] LU Zixing, ZHOU Yuan, YANG Zhenyu, et al. Multi-scale finite element analysis of 2.5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension[J]. *Computational Materials Science*, 2013, 79: 485-494.
- [15] LU Huaiyu, GUO Licheng, LIU Gang, et al. Progressive damage investigation of 2.5D woven composites under quasi-static tension [J]. *Acta Mechanica*, 2019, 230(4): 1323-1336.
- [16] SONG Jian, WEN Weidong, CUI Haitao. Experimental and numerical investigation of mechanical behaviors of 2.5D woven composites at ambient and un-ambient temperatures[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 699-720.
- [17] SONG Jian, LIU Lu, LI Lixiao, et al. Thermo-mechanical responses of notched layer-to-layer 3D angle-interlock woven composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176: 107262.
- [18] ZHONG Suyang, GUO Licheng, LIU Gang, et al. A continuum damage model for three-dimensional woven composites and finite element implementation[J]. *Composite Structures*, 2015, 128: 1-9.
- [19] ZHENG Tao, GUO Licheng, SUN Ruijian, et al. Investigation on the compressive damage mechanisms of 3D woven composites considering stochastic fiber initial misalignment[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 143: 106295.
- [20] ZHENG Tao, GUO Licheng, HUANG Jinzhao, et al. A novel mesoscopic progressive damage model for 3D angle-interlock woven composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 185: 107894.
- [21] ZHENG Tao, GUO Licheng, DING Junfeng, et al. An innovative micromechanics-based multiscale damage model of 3D woven composites incorporating probabilistic fiber strength distribution[J]. *Composite Structures*, 2022, 287: 115345.
- [22] ZHENG Tao, GUO Licheng, BENEDICTUS R, et al. Micromechanics-based multiscale progressive failure simulation of 3D woven composites under compressive loading with minimal material parameters[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 219: 109227.
- [23] ZHANG Yifan, GUO Qiwei, CHEN Xiaoming, et al. Effect of apertures on tensile property of warp-reinforced 2.5D woven composites notched plates[J]. *Composite Structures*, 2020, 252: 112693.
- [24] GUO Qiwei, ZHANG Yifan, LI Diansen, et al. Experimental and numerical investigation of open-hole tensile properties and damage mechanisms of 3D woven composites under weft-loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107455.
- [25] ZHANG Yifan, LI Mohan, GUO Qiwei, et al. Tensile failure of multiaxial 3D woven composites with an open-hole: an experimental and numerical study[J]. *Composite Structures*, 2022, 279: 114746.
- [26] GUO Qiwei, ZHANG Yifan, LI Diansen, et al. Tensile properties and failure mechanism of 3D woven composites containing holes of different geometries[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 166: 108115.
- [27] GUO Licheng, HUANG Jinzhao, ZHANG Li, et al. Damage evolution of 3D woven carbon/epoxy composites under tension-tension fatigue loading based on synchrotron radiation computed tomography (SRCT)[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 142: 105913.
- [28] LIN Hua, BROWN L P, LONG A C. Modelling and simulating textile structures using TexGen[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 331: 44-47.
- [29] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(2): 329-334.
- [30] TSCHOEGL N W. Failure surfaces in principal stress space[J]. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1971, 32(1): 239-267.
- [31] SENDECKYJ G P, WANG S S, STEVEN JOHNSON W, et al. Mechanics of composite materials: past, present, and future[J]. *Journal of Composites Technology and Research*, 1989, 11(1): 3.
- [32] ZAKO M, UETSUJI Y, KURASHIKI T. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(3/4): 507-516.
- [33] BAŽANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. *Matériaux et Construction*, 1983, 16(3): 155-177.
- [34] FANG Guodong, LIANG Jun, LU Qi, et al. Investigation on the compressive properties of the three dimensional four-directional braided composites[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 392-405.

(编辑: 陈 越)