

基于三胞模型的三维五向编织复合材料刚度性能预测

蒲浩, 王育鹏, 杨胜春

中国飞机强度研究所, 陕西 西安

收稿日期: 2022年10月17日; 录用日期: 2022年11月21日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

三维五向编织复合材料空间拓扑结构复杂, 为了对其刚度性能进行准确预测, 本文首先研究了三维编织工艺中纱线的运动规律, 根据空间纱线轨迹在角部、表面和内部的分布情况确定了角胞、面胞和内胞组成的三胞实体模型。然后对三胞模型划分对称网格并施加合理的周期性边界条件, 通过有限元分析分别计算单胞的刚度性能后, 采用体积平均法获得宏观材料的整体刚度, 并与试验结果进行比对。研究结果表明, 本文构建的三胞结构模型可以准确反映三维五向编织复合材料的细观结构, 刚度性能预测结果较好, 为组分材料的选择及编织工艺的改进提供了理论依据。

关键词

三维五向编织复合材料, 三胞模型, 有限元分析, 刚度性能

Prediction of Stiffness Properties of 3D Five-Directional Braided Composites Based on Three-Cell Model

Hao Pu, Yupeng Wang, Shengchun Yang

Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an Shannxi

Received: Oct. 17th, 2022; accepted: Nov. 21st, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

The spatial topology of the 3D five-directional braided composite material is complex. In order to accurately predict its stiffness performance, this paper firstly studies the motion law of the yarn in

the 3D braiding process, which is determined according to the distribution of the spatial yarn trajectory at the corner, surface and interior. A three-cell solid model consists of corner, face and inner cells. Then, the three-cell model is divided into symmetrical meshes and reasonable periodic boundary conditions are applied. After calculating the stiffness properties of the unit cells through finite element analysis, the overall stiffness of the macroscopic material is obtained by the volume average method and compared with the experimental values. The research results show that the three-cell structure model constructed in this paper can accurately reflect the microstructure of the 3D five-directional braided composite material, and the stiffness performance prediction results are good, which provides a theoretical basis for the selection of component materials and the improvement of the weaving process.

Keywords

3D Five-Directional Braided Composite Material, Three-Cell Model, Finite Element Analysis, Stiffness Performance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三维多向编织复合材料是纺织复合材料的一种重要结构形式,常用的三维四向编织复合材料[1] [2]由于其特殊的纱线结构,纤维在轴向方向扭曲较为严重[3] [4],因此材料在面外方向的力学性能得到改善的同时,其面内方向的力学性能相对较弱。为了加强材料的面内性能,在三维四向编织工艺的基础上再增加轴向增强纱,开发了三维五向编织复合材料,其编织纱经过织造在面内和面外互相连结,克服了层合复合材料层间性能薄弱的缺点,提高了材料的面外性能,轴向纱的加入则弥补了编织过程中纤维扭曲无法充分发挥轴向性能的问题,加强了材料的面内性能。此外,由于三维五向编织复合材料基本采用树脂传递模塑工艺(RTM)成型[5],在生产中选择合适的编织工艺和参数,便可以制造出各种复杂的异形截面结构,因此近年来受到高度重视和关注,目前已成功将其应用在飞机机身框架、导弹弹翼、火箭头锥及航天器接头等部位。

三维五向编织复合材料的宏观性能不仅依赖于组分材料的性能,与细观结构也有直接关系[6],通过对细观编织结构的研究可以更深刻地揭示影响三维五向编织复合材料宏观性能的各项因素。基于此,现采用三胞结构模型对三维五向编织复合材料进行有限元分析并预测其刚度性能,为组分材料的选择及编织工艺的改进提供理论依据。

2. 三胞实体模型

在三维五向编织复合材料生产中,最常采用的是三维四步法 11 编织工艺,如图 1 所示。四步法编织工艺包括编织纱和轴向纱,编织纱均参与编织,纱线绑定在对应的携纱器上,通过携纱器的往复带动纱线运动;轴向纱固定不变,不参与编织,但被编织纱包裹在预成型体内。

图 2 为 $[4 \times 4]$ 三维五向编织工艺携纱器底盘及运动规律,其中“数字标注”表示编织纱携纱器,“圆形标注”表示轴向纱携纱器。在编织过程中,携纱器带着对应的纱线在编织底盘上进行周期性往复运动,当携纱器运动到主体纱的区域时运动轨迹呈现“Z”字型,当携纱器运动到表面时,由于最外侧非主体纱区域只进行一个方向的运动,因此会比在内部时多停留一步。编织纱在携纱器的运动下将最终回到初始位置[7]。

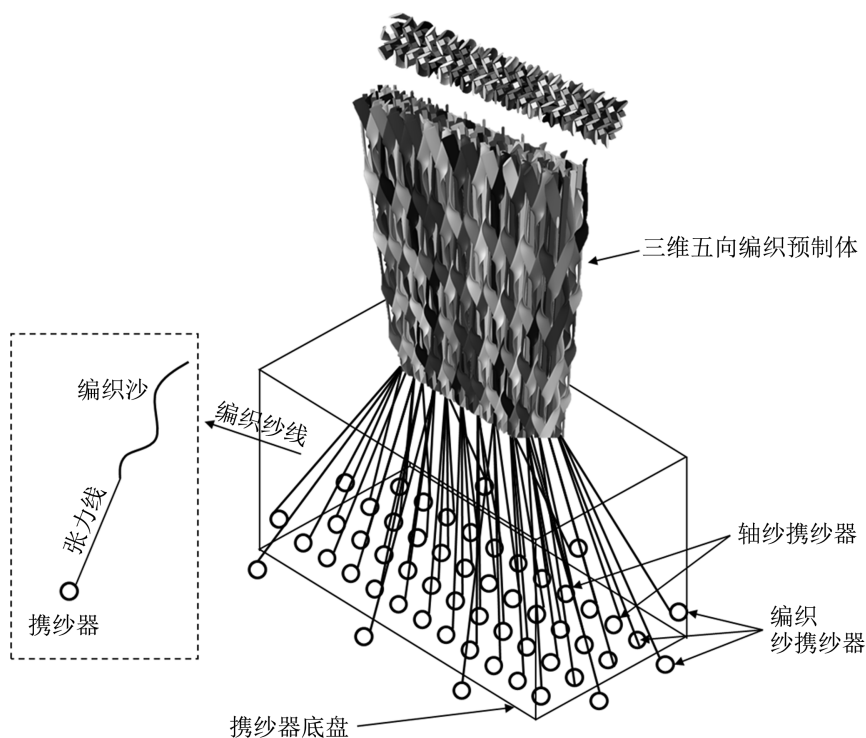


Figure 1. Schematic diagram of weaving process
图 1. 编织工艺示意图

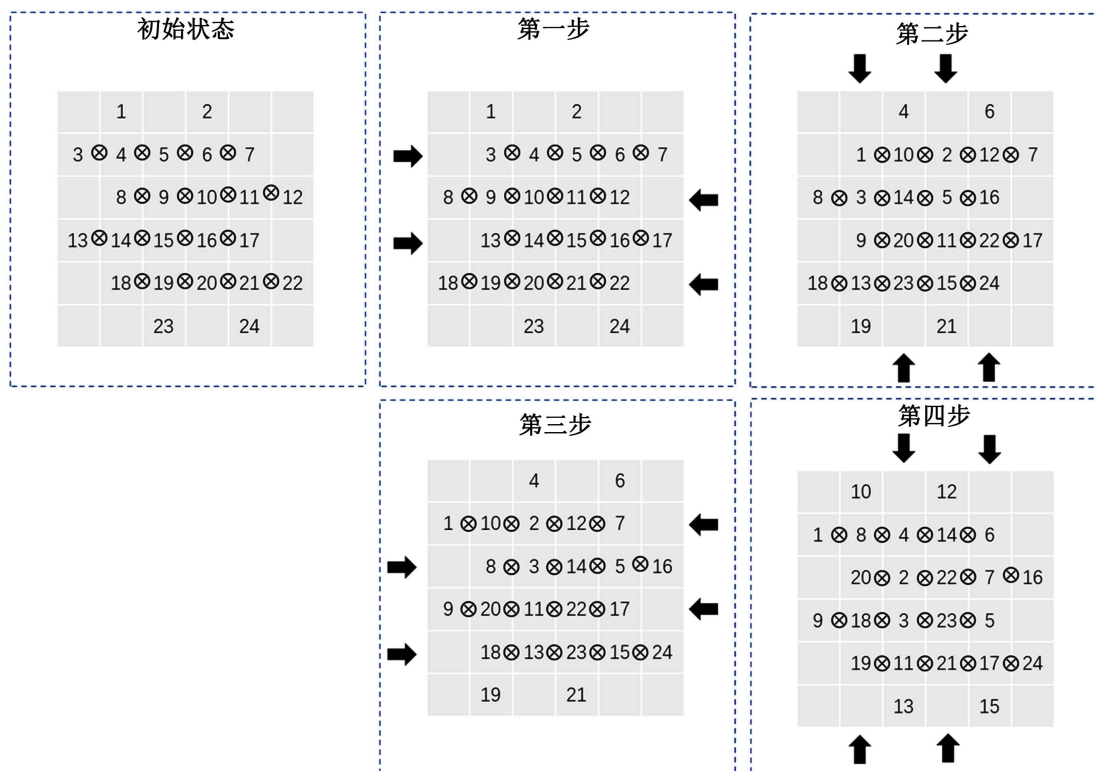


Figure 2. Motion rule of yarn carrier chassis
图 2. 携纱器底盘运动规律

根据以上不同位置的携纱器运动轨迹可以看出，对于三维五向编织复合材料，在角部、表面和内部的纱线运动规律并不相同，在内部轴向纱和编织纱均为直线，在表面处编织纱的扭曲情况较为严重，需在四个运动步中完成从表面绕回内部的过程，对于角部的编织纱扭曲情况最为严重，编织纱需通过两个表面方能绕回预制体内部。本文借鉴三维四向编织复合材料的“三胞模型” [8]，选取了三维五向编织复合材料在角部、表面和内部三个不同区域的单胞，选取位置如图 3 所示。

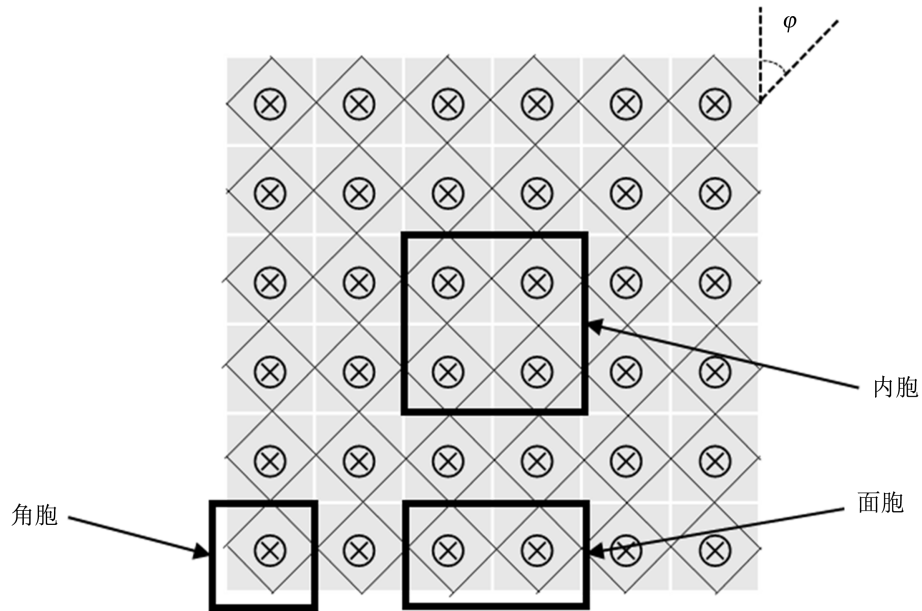


Figure 3. The three-cell model selection location
图 3. 三胞模型选取位置

对于三维四步法 1 × 1 编织工艺，每经过一个编织周期预制体沿轴向增加一个花节长度 h，即编织时每一步纱线沿轴向运动 1/4h。图 4 所示为三维五向编织复合材料编织纱线空间轨迹。

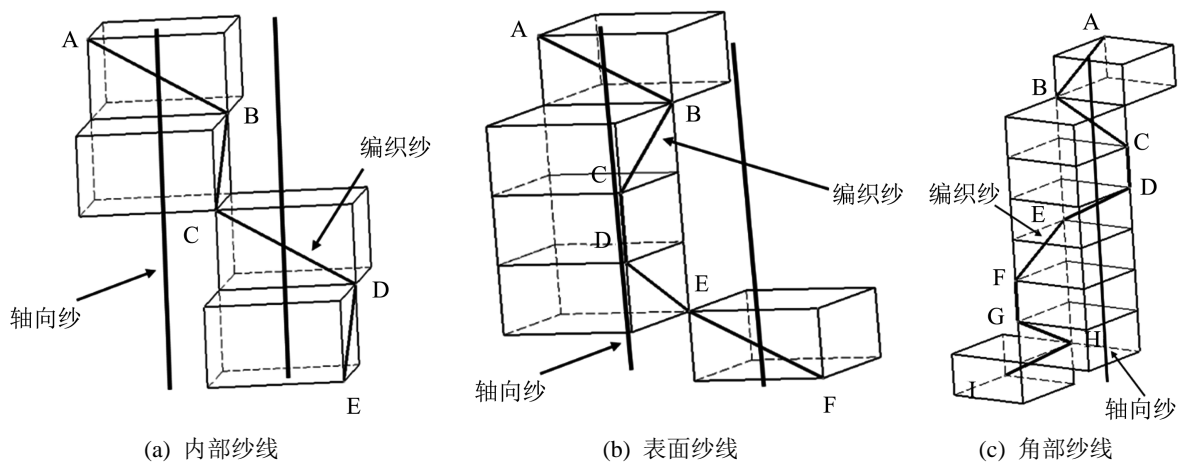


Figure 4. Weaving yarn space trajectory
图 4. 编织纱线空间轨迹

根据内胞、角胞和面胞的纱线运动规律，采用 TexGen 软件建立三胞实体模型，如图 5 所示。

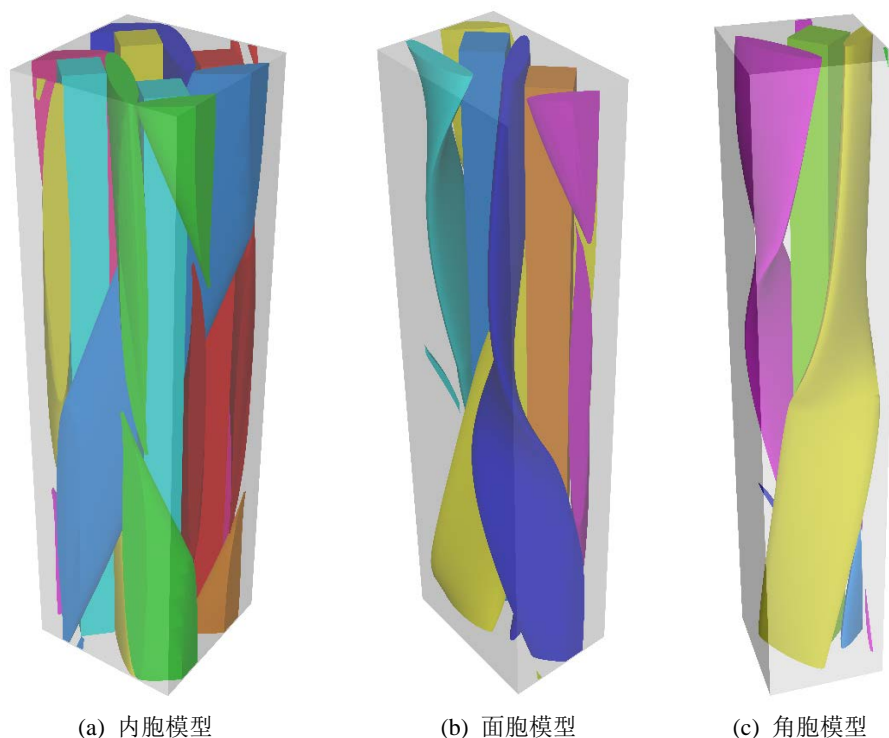


Figure 5. Three-cell entity model
图 5. 三胞实体模型

3. 有限元分析及刚度性能预测

在获得三胞实体模型后，需对其划分对称网格并施加周期性边界条件，将实体模型转化为有限元分析模型。对于单胞模型，在具有周期性的方向上对应表面和棱边的有限元网格也应具有周期性，即数量一致，位置一一对应。本文采用 Texgen 软件中的 Voxel 体素网格划分方法对三胞实体模型进行对称网格划分，将连续曲线和曲面转化为以体素单元为基础的直线段，通过规则六面体堆叠的方式获得网格化的实体模型。并分别针对内胞、面胞和角胞所处位置的实际情况，施加 1 个方向、2 个方向和 3 个方向的周期性边界条件，得到了角胞、面胞和内胞有限元分析模型。

本文选用的三维五向编织复合材料纱线为 CCF800H (12 K)碳纤维，基体为 5284 环氧树脂，采用树脂传递模塑成型工艺(RTM)进行固化，内部编织角为 20° 。纤维和树脂的基本力学性能见表 1，其中纤维认为是横观各向同性材料，树脂为各向同性材料。

Table 1. Material property parameter
表 1. 材料性能参数

组分材料	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{23}
CCF800H (12K)	294	18	12	6.39	0.3	0.35
5284 环氧树脂	3.13	3.13	-	-	0.4	0.4

本文所采用的三维五向编织复合材料试样的携纱器底盘主体纱部分共有 3 行携纱器，但携纱器的列数远大于测试所用试样宽度对应的携纱器数量，试验验证所用试样均为沿宽度方向切割而来，因此只包含面胞和内胞，角胞在切边处理中已被切除。表 2 所示为本文采用的材料不同单胞所占体积比。

Table 2. The volume ratio of different cells
表 2. 不同单胞所占体积比

单胞类别	体积含量
内胞	30.7%
面胞	69.3%
角胞	0%

图 6~8 分别为内胞和面胞在轴向拉伸载荷、横向拉伸载荷和面内剪切载荷作用下的应力分布云图。按照体积平均法可以计算得出宏观材料的刚度性能，如表 3 所示。

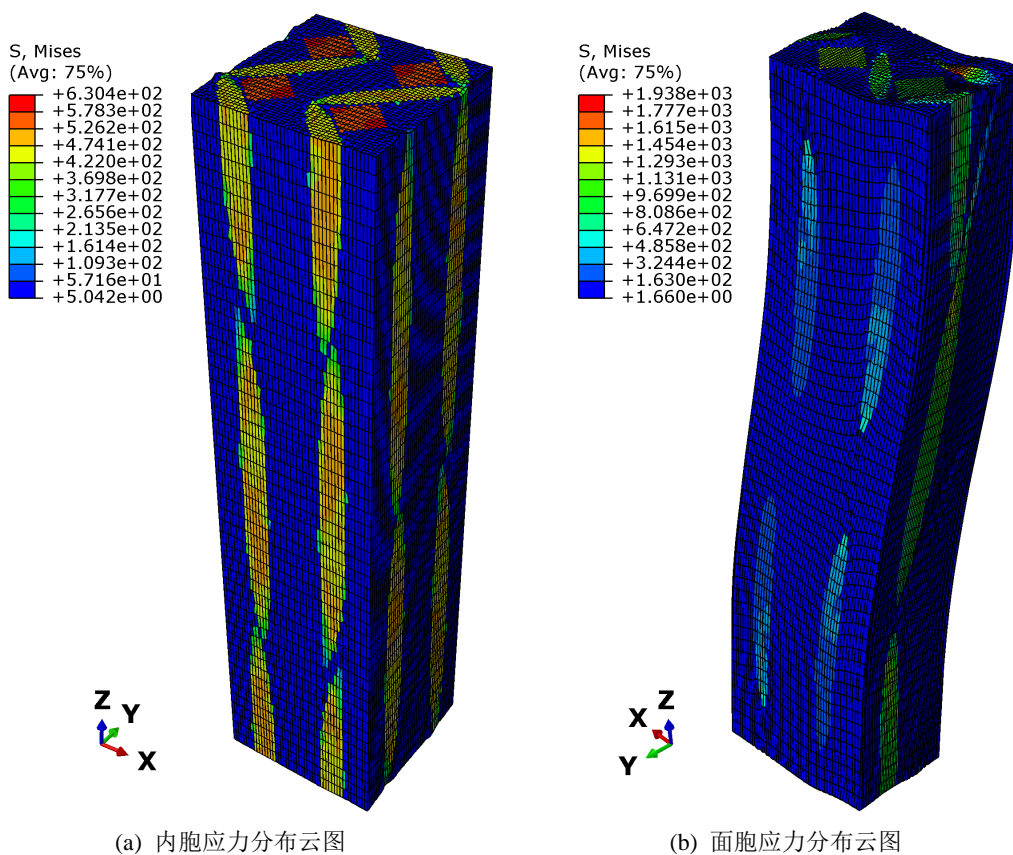


Figure 6. Results of finite element analysis under axial tensile load
图 6. 轴向拉伸载荷下有限元分析结果

Table 3. Predicted values of elastic properties
表 3. 刚度性能预测值

类别	E_{11} /GPa	E_{22} /GPa	ν_{12}
内胞预测值	108	7.09	0.541
面胞预测值	111	7.63	0.402
宏观材料预测值	110	7.46	0.445
宏观材料纤维体积含量修正预测值	120	-	-

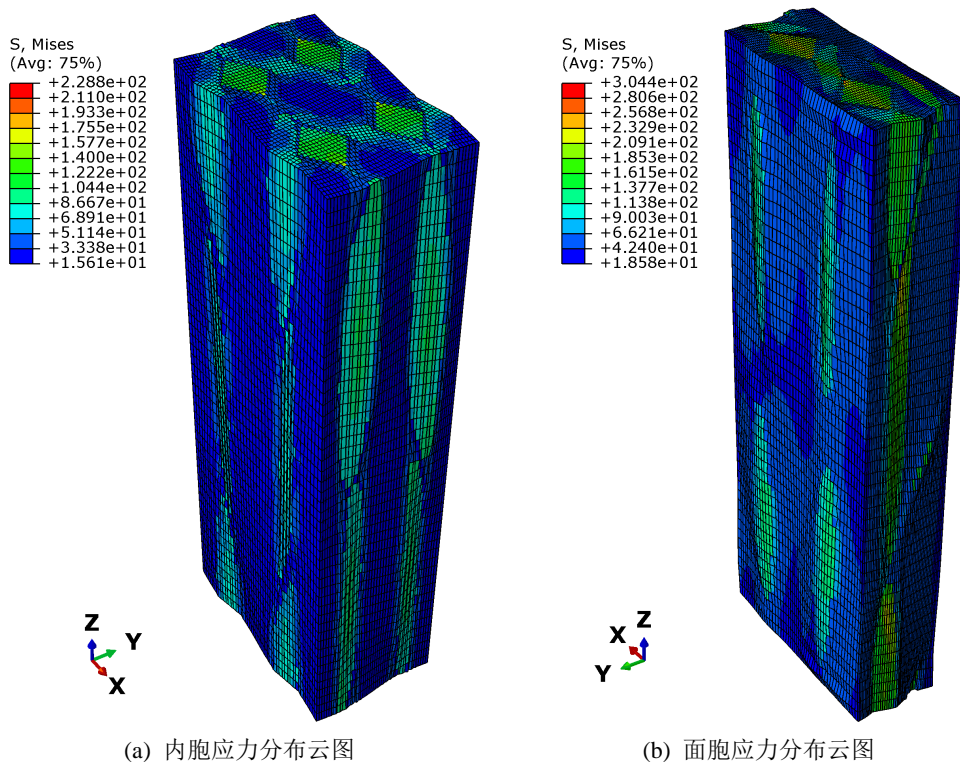


Figure 7. Results of finite element analysis under transverse tensile load
图 7. 横向拉伸载荷下有限元分析结果

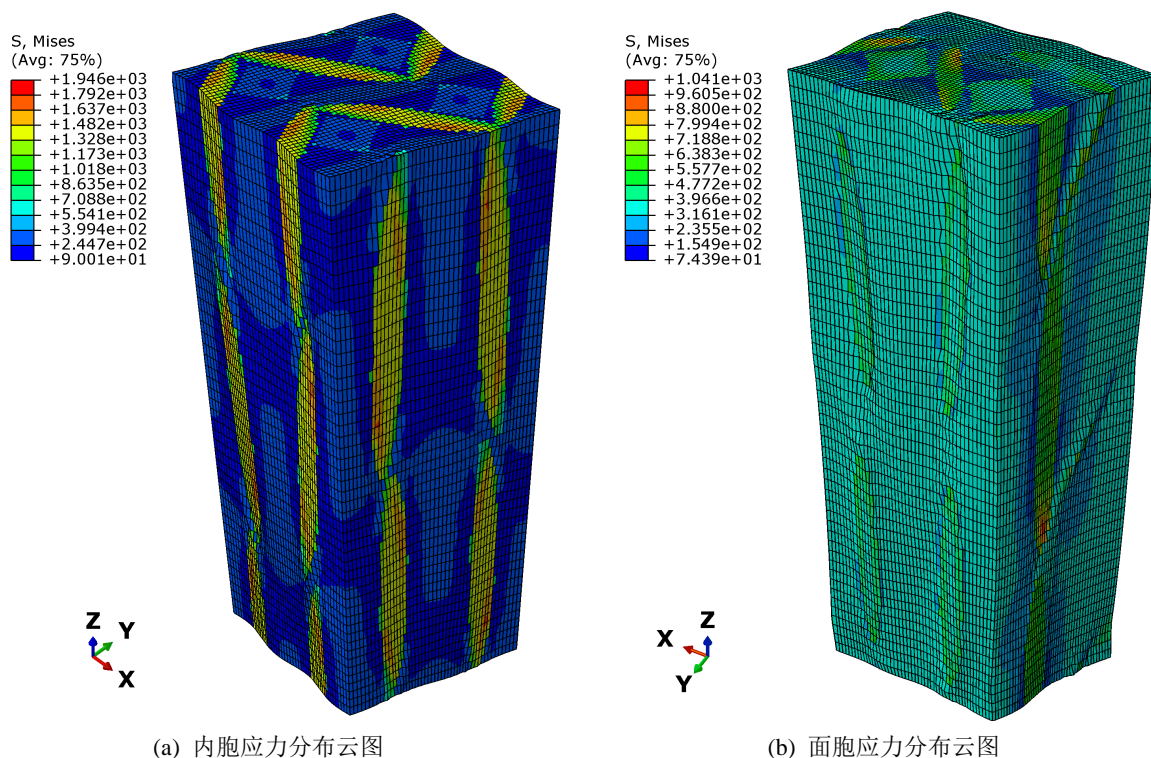


Figure 8. Results of finite element analysis under in-plane shear load
图 8. 面内剪切载荷下有限元分析结果

4. 模型有效性验证

为验证所建模型的有效性, 本文同步开展了试验验证。试验矩阵如表 4 所示, 包括经向和纬向无缺口拉伸试验, 采用 ASTM D3039 [9] 聚合物基复合材料拉伸性能标准试验方法, 试样尺寸为 250 mm × 25 mm × 2.5 mm。试验在 INSTRON 8801 材料力学性能试验机上进行。试验前, 测量试样工作段内三个不同位置的宽度(精确到 0.02 mm)和厚度(精确到 0.002 mm), 取算术平均值。试验时, 将试样对中夹持于试验夹头中, 以 2 mm/min 的加载速率对试样施加拉伸载荷, 加载过程中连续采集载荷和应变数据直至试样破坏, 试验现场状态示意图见图 9。



Figure 9. Unnotched tensile test
图 9. 无缺口拉伸试验

Table 4. Matrix of experimental research on 3D five-directional braided composites
表 4. 三维五向编织复合材料试验研究矩阵

试验类型	试验项目	试验方法	几何尺寸(mm)	试样数量
力学性能	经向无缺口拉伸	参考 ASTM D 3039 [6]	250 × 25 × 2.5	6 件 × 3 批次
	纬向无缺口拉伸			6 件 × 3 批次
总计				36 件

试验结果汇总表见表 5。

Table 5. Measured values of elastic properties
表 5. 刚度性能实测值

类别	E_{11} /GPa	E_{22} /GPa	ν_{12}
宏观材料预测值	110	7.46	0.445
宏观材料纤维体积含量修正预测值	120	-	-
宏观材料实测值	136	7.24	0.415
偏差	11.8%	3.03%	7.2%

对比有限元分析模型得到的材料刚度性能与实测值, 材料的横向弹性模量预测值与实测值的偏差为 3.03%, 主方向的泊松比预测值与实测值的偏差为 7.2%, 结果均比较理想, 有较高的精度。对于材料的轴向弹性模量, 按照内胞和面胞的体积分数计算得到的宏观材料预测值为 110 GPa, 考虑有限元模型的纤维体积含量与实测值存在一定差异, 按照纤维体积含量对宏观材料预测值进行修正后得到宏观材料的轴向弹性模量为 120 GPa, 预测值与理论值的偏差为 11.8%。

5. 结论

本文基于对三维五向编织复合材料的细观结构研究, 建立了三胞结构模型, 分析了三维五向编织复合材料的宏观刚度性能, 主要结论如下:

- 1) 对于三维五向编织复合材料, 在内部、表面和角部的纱线运动规律并不相同, 需分别建立内胞、面胞和角胞才能真实反映材料细观结构;
- 2) 对于三维五向编织复合材料, 由于切边工艺导致试样中不存在角胞, 但是对厚度较小的试样, 面胞所占体积较大甚至可能超过内胞体积, 因此必须考虑面胞的影响;
- 3) 本文建立的三胞结构模型对材料宏观刚度性能中的横向弹性模量、主方向泊松比具有良好的预测精度, 而对于轴向弹性模量, 由于固化工艺的影响, 模型的预测结果与实际值有一定偏差, 一般比实际值偏小。

参考文献

- [1] 冯森林. 三维编织复合材料均匀化方法宏观数值研究[D]: [博士学位论文]. 安徽: 中国科学技术大学, 2000. <https://doi.org/10.7666/d.y361907>
- [2] Chen, L., Tao, X.M. and Choy, C.L. (1999) Mechanical Analysis of 3-D Braided Composites by the Finite Multiphase Element Method. *Composites Science and Technology*, **59**, 2383-2391. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00087-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00087-1)
- [3] 汪博峰. 三维编织复合材料几何成型仿真及算法研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2006. <https://doi.org/10.7666/d.d047037>
- [4] Yu, X.G. and Cui, J.Z. (2007) The Prediction on Mechanical Properties of 4-Step Braided Composites via Two-Scale Method. *Composites Science and Technology*, **67**, 471-480. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.028>
- [5] 郑锡涛, 屈天骄. 三维编织复合材料制造技术及力学性能研究进展[J]. *航空制造技术*, 2011(20): 40-44.
- [6] 杜善义, 吴林志. 复合材料的细观力学研究[C]//中国科学技术协会. 中国科学技术协会“科学技术面向新世纪”学术年会. 北京: 科学出版社, 1998: 1007-1014.
- [7] 陈利, 李嘉禄, 李学明. 三维编织中纱线的运动规律分析[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(2): 71-74.
- [8] Pandey, R. and Hahn, H.T. (1996) Visualization of Representative Volume Elements for Three-Dimensional Four-Step Braided Composites. *Composites Science and Technology*, **56**, 161-170. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(95\)00137-9](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00137-9)
- [9] American Society for Testing and Materials (2014) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken.