

DOI: 10. 13475/j.fzxb.20180800408

# 多层多向机织复合材料细观结构建模及其性能

王心淼<sup>1,2</sup>, 陈利<sup>1,2</sup>, 张典堂<sup>3</sup>, 陈冬<sup>1,2</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. 生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122)

**摘要** 为分析多层多向机织复合材料的细观结构, 基于多层多向机织工艺及不同于传统机织结构的纱线空间运动规律, 推导了工艺参数与结构参数之间的关系, 建立了细观结构分析模型; 为研究多层多向机织复合材料的拉伸性能和失效机制, 采用多层多向机织工艺、树脂传递模塑复合工艺, 以碳纤维和环氧树脂为原材料制备了 2 种不同结构的多层多向机织复合材料, 采用万能试验机和非接触全场应变仪对材料进行了 0° 和 90° 方向的准静态拉伸性能测试, 并与正交三向机织复合材料进行了对比分析。结果表明: 斜向纱的存在对多层多向机织复合材料的拉伸破坏模式和断口形貌有较大影响, 斜向纱一定程度上阻碍了裂纹和应变沿承载方向扩展, 0° 方向拉伸试样断口处经纱层内经纱全部断裂, 90° 方向拉伸试样断口处纬纱层内经纱全部断裂, 2 个方向的拉伸试样斜向纱层中均存在部分斜向纱纤维未断裂, 拉伸试样非完全断裂。

**关键词** 多层多向机织; 机织复合材料; 细观结构; 拉伸性能

中图分类号: TB 332 文献标志码: A

## Micro-structure and properties of multilayer multiaxial woven composites

WANG Xinmiao<sup>1,2</sup>, CHEN Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Diantang<sup>3</sup>, CHEN Dong<sup>1,2</sup>

(1. College of Textile Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 3. Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract** In order to study the tensile property and failure mechanism of multilayer multiaxial woven composites, based on the multilayer multiaxial weaving process and the spatial movement rule of yarn in the structure, the relationship between process parameters and structure parameters were deduced. Two kinds of multilayer multiaxial woven composites of different structures were prepared from carbon fibers and epoxy resin as raw materials by the multilayer multiaxial weaving process and the resin transfer molding composite process. The quasi-static tensile property of the material were measured by universal testing machine and a non-contact all-field strain meter, and was compared with that of three-dimensional orthogonal composite. The results show that the content of bias yarn in the structure has certain influence of the warpwise tensile property of the multilayer multiaxial woven composites. Bias yarn blocks cracks and strain from extending along the warpwise direction to a certain extent, and influences the failure modes of the material to a great extent. All the warps in the warp layer at the fracture of the sample are broken, and some of yarn in the bias yarn layer are not broken, and the tensioned samples are not completely broken.

**Keywords** multilayer multiaxial woven preform; woven composite; micro-structure; tensile property

三维机织复合材料由于其增强体结构中存在贯穿厚度方向的纱线, 具有优异的整体性, 克服了传统

二维机织复合材料层间强度低、易分层等缺点, 被广泛应用于航空航天、交通运输、安全防护等重要领

收稿日期: 2018-08-01

修回日期: 2018-11-16

获奖说明: 本文荣获中国纺织工程学会颁发的第 19 届陈维稷优秀论文奖

基金项目: 天津市高等学校创新团队项目(TD13-5043)

第一作者: 王心淼(1989—), 女, 博士生。主要研究方向立体机织复合材料。

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

域<sup>[1-2]</sup>。三维机织复合材料增强体主要包括角联锁结构和正交三向结构,诸多学者<sup>[3-5]</sup>围绕其细观结构和材料的拉伸、压缩、弯曲、冲击、疲劳等力学性能进行了广泛的研究,并取得了有益的结论。角联锁机织结构和正交三向机织结构中,交织纱线主要沿着织物的长度方向和宽度方向分布,因此其面内抗剪切性能相对较低<sup>[6]</sup>。

近年来,多层多向机织结构得到迅速的发展。在三维机织结构基础上,通过各种方法引入斜向纱线,有效提高了复合材料的抗剪切性能。众学者先后研发了多种织造技术,发展了不同构造的多向机织结构。Anahara 等<sup>[7]</sup>开发研制了多轴向三维机织物及其成型织造技术,斜向纱通过导向块的引导下形成±45°倾斜纱线。Ruzand 等<sup>[8]</sup>研发出基于浮纹织造原理的多向三维机织物织造方法和设备,该织物的斜向纱排布在织物的上下 2 个表面。Farely<sup>[9]</sup>利用浮纹织造原理开发出一种织造技术,通过改进引纬及打纬机构,理论上可实现在织物厚度方向任一位置通过浮纹装置引入斜向纱。Hiroshi 等<sup>[10]</sup>利用导纱辊的运动形成多轴向三维机织物,并提出一种垂纱的缝纫装置,使得这种生产方法更加完善。Bilisik 等<sup>[11-13]</sup>开发了多向三维机织结构及其织造装置,研究表明引入斜向纱线可以显著提高三维机织复合材料的面内剪切性能。Ahmad<sup>[14-16]</sup>通过研究多轴向内部结构及斜向纱运动规律,提出一种新的织造工艺及设备,实现了在+θ斜向纱层与-θ斜向纱层之间添加经纱层,并后续对多层多向机织复合材料进行了的面内拉伸性能试验研究及一系列的加载/卸载试验,分析了材料性能及模量退化。

本文采用自主开发的多层多向机织工艺,设计并制备了 2 种不同结构的多层多向机织复合材料,在分析多层多向机织结构纱线空间拓扑规律的基础上,建立了便于力学分析计算的细观结构模型;采用万能试验机和非接触全场应变仪测试了多层多向机织复合材料在 0°方向和 90°方向的拉伸力学性能,获得了拉伸应力作用下全场应变分布,重点分析了斜向纱对材料拉伸破坏模式和破坏形貌的影响,为该类材料的工程应用提供设计参考。

## 1 实验部分

### 1.1 试样制备

多层多向机织预制件内包含 5 个纱线系统:经纱系统(0°)、纬纱系统(90°)、+斜向纱系统(+θ)、-斜向纱系统(-θ)以及 Z 向纱系统,Z 向纱捆绑其它系统纱线形成整体结构。织造工艺主要包括以下 5 个主要工序<sup>[17]</sup>:纱线层排列、斜向纱运动、Z 向纱

引入、纬纱引入及打纬,具有操作简单稳定、生产效率高的特点。结构中斜向纱线层的排列位置、斜向纱线角度 θ 均可灵活设计。若减去工艺中斜向纱运动工序,可进行正交三向机织预制件的织造。

将碳纤维 T300-3 K 和碳纤维 T300-6 K 合股作为 Z 向纱,碳纤维 T700-12 K 作为经纱、+θ 斜向纱、-θ 斜向纱和纬纱,在天津工业大学复合材料研究所自研织机上完成了 2 种纱线总层数相同、纤维体积含量相近的多层多向机织预制件和一种正交三向机织预制件,斜向纱线角度 θ 为 45°。

以环氧树脂(TDE86<sup>#</sup>)作为基体,采用树脂传递模塑(RTM)成型工艺对 3 种预制件进行复合固化,制备的 3 种复合材料参数如表 1 所示。

表 1 多层多向机织复合材料结构参数  
Tab.1 Structural parameters of multilayer multiaxial woven composites

试样编号	纱线层排列	密度/(根·(10 cm) <sup>-1</sup> )		纤维体积含量/%	实际厚度/mm
		经向	纬向		
WB4	90/0/45/-45/90/-45/45/0/90	50	50	48.89	6.0
WB2	90/0/90/45/90/-45/90/0/90	50	50	49.14	5.5
WB0	90/0/90/0/90/0/90/0/90	50	50	49.43	5.0

### 1.2 单轴拉伸实验

参考 ASTM D-3039《聚合物基复合材料拉伸性能标准试验方法》,分别沿 0°(经纱轴向)和 90°(纬纱轴向)截取板条型试样,试样两端黏贴尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm 的铝质加强片。为使 DIC 测试系统在实验过程中有效识别试样表面散斑的变形,采用黑白 2 种颜色的喷漆对试样表面进行均匀制斑处理。制斑后的试样如图 1 所示。

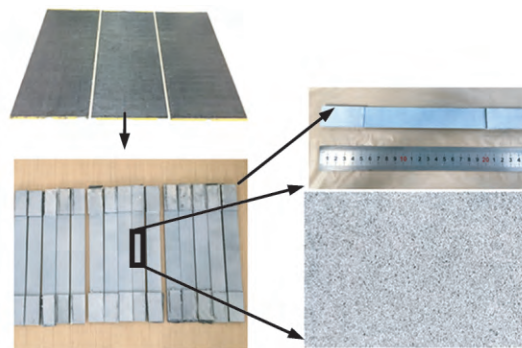


图 1 多层多向机织复合材料 0°方向拉伸试样  
Fig.1 Specimens of multilayer multiaxial woven composite specimens in 0° direction

拉伸实验在岛津 AG-250KNE 型万能材料试验机上完成,搭载非接触式全场应变测量仪(DIC 测试系统)采集全场试样在拉伸过程中的位移及应变渐进分布过程,实验机加载速率为 2.0 mm/min,图像

采集频率为 2 Hz。利用电子显微镜( Zeiss , 500 倍)对试样断面进行图像观测及捕捉。

## 2 结果及分析

### 2.1 细观结构分析

#### 2.1.1 纱线空间拓扑规律与基本假设

基于多层多向机织工艺分析结构内部的纱线空间拓扑规律,结构面内由经纱层(0°)、纬纱层(90°)、+斜向纱层(+θ)和-斜向纱层(-θ)组成,各层纱线之间保持平行,互不相连。经纱层内各经纱始终保持不动;+θ(或-θ)斜向纱层内的所有斜向纱轴向均与经纱轴向方向成+θ(或-θ)夹角;纬纱垂直于经纱,连接宽度方向的纱线;Z向纱与纬纱、经纱呈正交状态配置,将各纱线层捆绑约束成为整体结构。

文献[17]研究表明,多层多向机织预制件在“打纬”工序后,结构内各系统纱线处于相互挤紧状态,导致不同纱线层中Z向纱的截面形状不同,受其所在纱线层及其前、后纱线层的影响,Z向纱共存在36种截面形状。

为方便建立力学分析模型,本研究考虑到Z向纱在结构中受到来自周围8个方向纱线的挤压力(见图2),同时其他纱线的截面也受到其周围纱线的影响,因此对Z向纱截面形状进行简化,并建立以下几点假设。

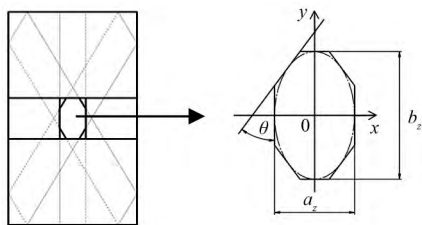


图 2 法向纱几何模型

Fig.2 Geometric model of Z-yarn of multilayer multiaxial woven preform

- 1) Z向纱截面形状为八边形。
- 2) 经纱、纬纱、+θ斜向纱和-θ斜向纱截面形状均为矩形。
- 3) 至少在一定织造长度内,织造工艺稳定,以保证织物结构基本均匀一致。
- 4) 织物各组纱线在织造过程中保持平行伸直状态,纱线的截面形状沿纱线轴向方向保持不变,相邻纱线均紧密接触,各纱线具有相同的填充因子ε。
- 5) 各纱线层具有相同的纤维体积含量, \$V\_f\$。

#### 2.1.2 细观结构模型建立

将Z向纱的截面形状假设为八边形后,工艺参数与结构参数之间的复杂关系也随之简化。在此基础上建立单胞各参数之间的关系,从而建立多层多向机织复合材料的细观结构模型,实现当设计不同的输入参数值时,可计算得到各纱线的几何尺寸,用于后续力学性能的分析计算。

根据多层多向机织复合材料的结构特点,将织物分解为4种单层:经纱层、纬纱层、+θ斜向纱层和-θ斜向纱层。对每层分别提取代表性体积单元,建立每层独有的代表性体积单元参数化几何模型。代表性体积单元厚度即为该层的厚度,各层代表性体积单元具有相同的宽度、高度尺寸分别定义为 \$w, h\$, 如图3所示。

根据结构最终使用要求设计结构纤维体积含量以及各类纱线层的层数后,可得:

$$T_1 = \frac{A_1 h}{V_f h w - A_5}$$

$$T_2 = \frac{A_2 w}{V_f h w - A_5}$$

$$T_3 = \frac{A_3 h}{(V_f h w - A_5) \cos \theta}$$

$$T_4 = \frac{A_4 h}{(V_f h w - A_5) \cos(-\theta)}$$

$$A_i = \frac{\lambda_i}{10^3 \rho \varepsilon}, i = 1, 2, 3, 4, 5$$

$$h = \frac{100}{P_j}$$

$$w = \frac{100}{P_w}$$

式中: \$T\_1, T\_2, T\_3\$ 和 \$T\_4\$ 分别为经纱层、纬纱层、+θ斜向纱层和-θ斜向纱层的厚度, mm; \$A\_1, A\_2, A\_3, A\_4\$ 和 \$A\_5\$ 分别为经纱、纬纱、+θ斜向纱、-θ斜向纱和法向纱的理论横截面积, mm<sup>2</sup>; \$\lambda\_i\$ 为对应纱线的线密度, tex; \$\rho\$ 为体积密度, g/cm<sup>3</sup>; \$\varepsilon\$ 为纤维填充因子, 一般约为 0.7<sup>[18]</sup>; \$\theta\$ 为斜向纱对应经纱轴向的倾斜角度(°), 一般逆时针为正, 顺时针为负; \$P\_j\$ 和 \$P\_w\$ 分别为经密、纬密, 根/(10 cm)。

根据Z向纱与经纱、斜向纱、纬纱的挤压关系, 可求得各纱线的宽度尺寸

$$W_i = \frac{A_i}{T_i \varepsilon}, i = 1, 2, 3, 4$$

$$a_z = w - W_1$$

$$b_z = h - W_2$$

式中: \$W\_1, W\_2, W\_3\$ 和 \$W\_4\$ 分别为对应纱线的宽度, mm; \$a\_z, b\_z\$ 分别为Z向纱截面八边形内切椭圆的短

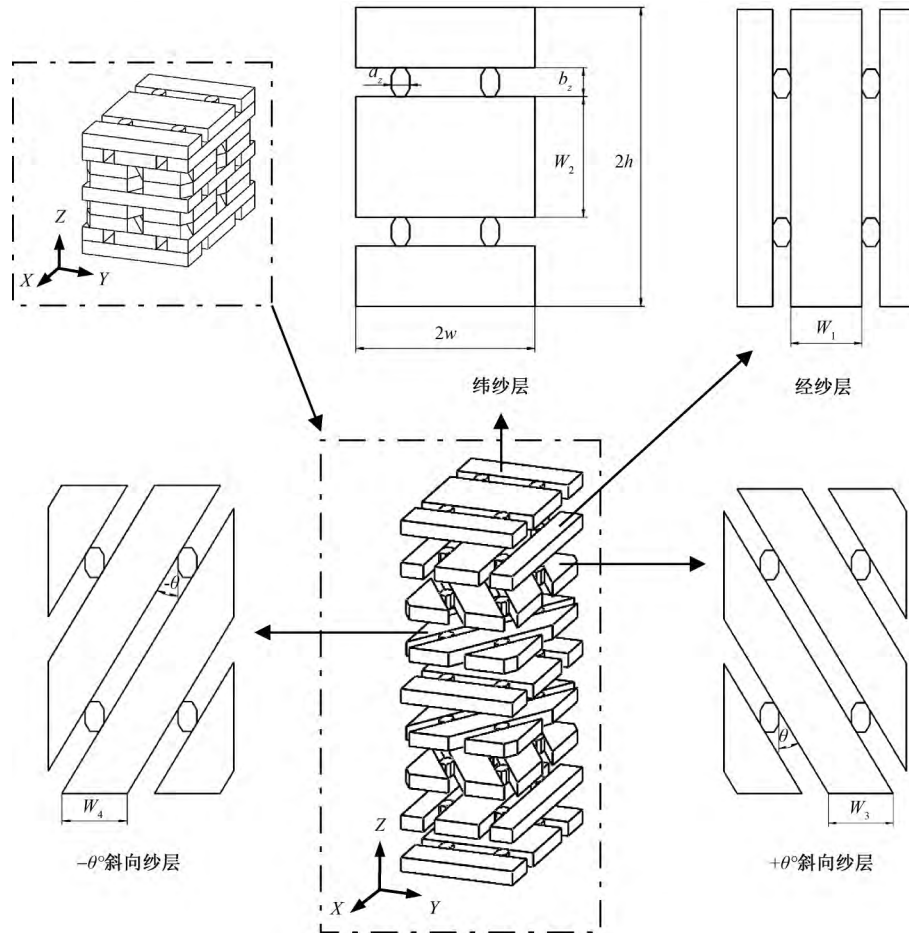


图 3 多层多向机织复合材料及各纱线层代表体积单元几何模型

Fig.3 Geometric models of multilayer multi-axial woven preform and different layers

轴长、长轴长, mm。

进而可求得整个代表性体积单元结构的厚度  $T$ 。

$$T = \sum_{i=1}^4 (n_i \times T_i)$$

式中  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  和  $n_4$  分别表示经纱层、纬纱层、 $+\theta^\circ$  斜向纱层和  $-\theta^\circ$  斜向纱层的层数。

通过上述细观结构模型关系式,计算多层多向机织复合材料的厚度(见表 2)。同实测值进行比较结果表明,预测值与实验值均吻合较好,证明了所建立模型的准确性。

## 2.2 多层多向机织复合材料拉伸性能分析

### 2.2.1 实验结果分析

各组典型试样的  $0^\circ$  方向和  $90^\circ$  方向拉伸应力-应变曲线如图 4 所示。可看出,各曲线初始阶段近似线性,因为该阶段基体与增强体之间的界面结合较好,起到了传递应力的作用,沿拉伸方向试样内纤维共同承受载荷,表现出较高的初始模量。随着应变的增大,载荷缓慢的增加,一段时间之后,载荷开始呈近似线性增加,直至应力达到最大值后,载荷发生突然下降,试样破坏。所有试样在破坏前均保持

表 2 多层多向机织复合材料的拉伸性能

Tab.2 Tensile mechanical properties of multilayer multi-axial woven composites

试样编号	方向/ ( $^\circ$ )	拉伸 强力/ kN	拉伸 强度/ MPa	弹性 模量/ MPa	泊松 比	厚度计 算值/ mm
WB4	0	45.38	302.50	39 427	0.275	5.98
WB2	0	37.13	270.46	41 120	0.210	5.51
WB0	0	70.12	561.00	45 887	0.051	5.05
WB4	90	50.06	333.75	29 087	0.281	5.98
WB2	90	52.50	381.82	34 897	0.157	5.51
WB0	90	80.37	643.00	57 078	0.081	5.05

良好的线性关系。

由于结构中斜向纱的存在减少了原本经纱体积在结构体积中的比例,导致试样 WB4 和 WB2 在  $0^\circ$  方向的拉伸强度均小于 WB0。

而经纱体积含量近似相同的含 4 层斜向纱的试样 WB4 与含 2 层斜向纱的试样 WB2 相比,试样 WB4 的  $0^\circ$  方向拉伸强力比试样 WB2 增加了 22.21%,拉伸强度增强了 11.85%,因为在试样拉伸过程中,斜向纱试图沿试样轴向伸直,该过程斜向纱会承载一定的载荷,使得材料轴向承受的最大载荷增大。因此,在纤维体积含量和经纱体积含量均保

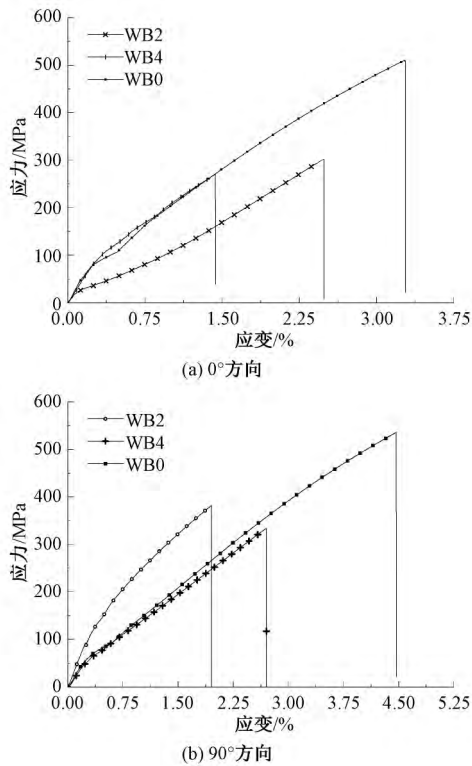


图 4 不同方向多层多向机织复合材料拉伸试样应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of multilayer multi-axial woven composite specimens. (a) 0° direction; (b) 90° direction

持不变的条件下,斜向纱层数增加,斜向纱含量增大,多层多向机织复合材料的 0°方向拉伸性能也随之增加。90°方向拉伸时,由于试样 WB2 的纬纱体积在结构体积中的比例高于试样 WB4 的纬纱体积比例,因此试样 WB2 在 90°方向的拉伸性能优于试样 WB4。

### 2.2.2 试样破坏形貌分析

本论文拉伸性能的研究重点在于分析试样破坏形貌和破坏模式以及斜向纱对试样破坏形貌的影响。

图 5 示出 DIC 测试系统视域内监测到的试样 WB4 在 0°方向拉伸过程的高应变区域分布及最终破坏试样。高应变区域较多分布在法向纱交织点处和易先断裂的富树脂区,可明显观察到试样断裂前高应变区域沿纬向树脂通道一步步形成连续曲线分布的变化过程。与正交三向机织复合材料试样 WB0 不同的是,多层多向机织复合材料试样 WB4 的高应变区域沿纬纱方向分布规律明显,如图 5 中带箭头的虚线所示,而 WB0 的高应变区域则分布规律不太明显(见图 5、6)。

分析试样断口破坏形貌发现,结构中不存在斜向纱的正交三向结构试样 WB0,其 0°方向和 90°方

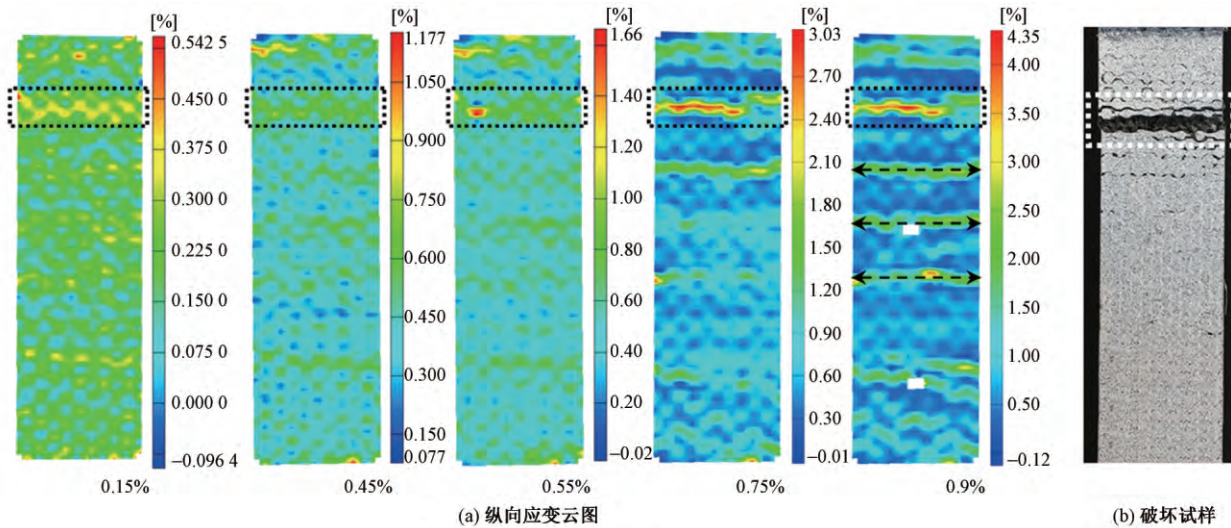


图 5 0°方向拉伸试样 WB4 在不同应变水平下的纵向应变云图及拉伸破坏试样

Fig.5 Experimental surface strain (a) in different strain level and failure specimen (b) of WB4 in 0° direction

向的拉伸破坏形貌相同,如图 7 所示。可看出试样断口整齐,均表现为典型的脆性断裂,断口处纤维束之间的树脂发生粉碎性破坏,碳纤维发生脆性断裂,仅有小部分纤维束断裂后,从树脂基体中直接抽拔而出,这说明断口横截面内的碳纤维几乎同时被拉断。观测可得抽拔出的部分纤维束仍保持矩形截面。

与试样 WB0 明显不同的是,多层多向机织复合

材料试样 WB4 与试样 WB2 在失效时均未完全断裂,试样断口处由斜向纱连接,破坏模式并非典型的脆性断裂,且 0°方向拉伸与 90°方向拉伸的试样断口形貌也有较大差异。

图 8 示出试样 WB4 的 0°方向拉伸破坏形貌显微镜照片。可看出 0°方向拉伸的破坏试样断口处基体完全开裂,所产生的裂痕近似直线,垂直于承载方向(即平行于纬向);断口处法向纱均发生断裂,

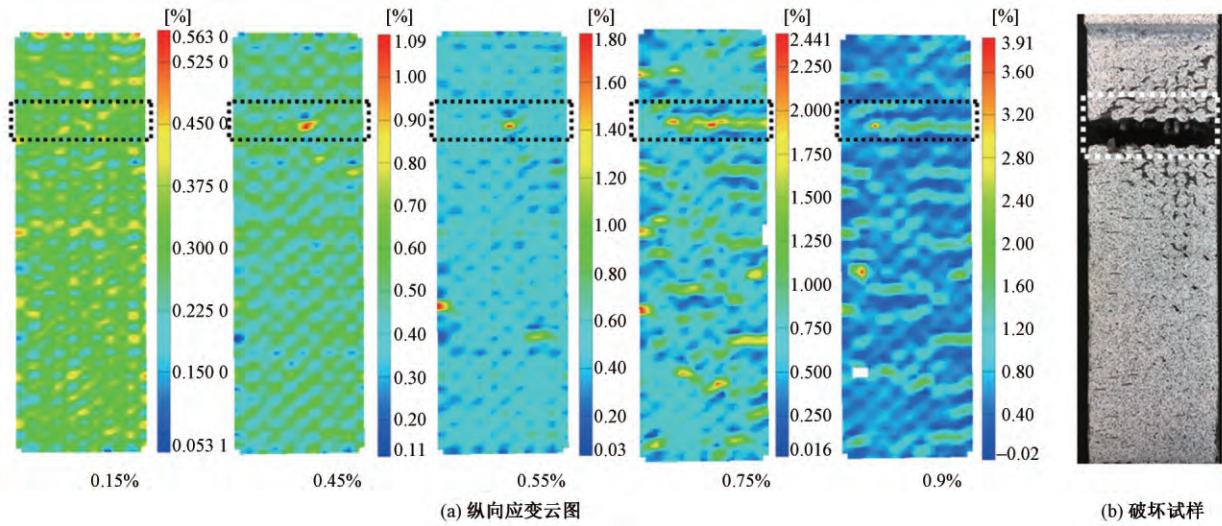


图 6 0°方向拉伸试样 WB0 在不同应变水平下的纵向应变云图及拉伸破坏试样

Fig.6 Experimental surface strain ( a ) in different strain level and failure specimen ( b ) of WB0 in 0° direction

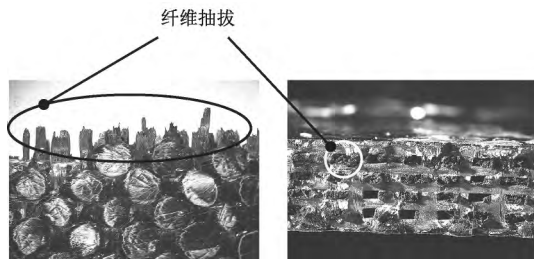


图 7 正交三向机织复合材料试样 WB0 拉伸破坏形貌  
Fig.7 Tensile fracture morphologies of 3-D orthogonal woven composites specimens WB0

表层断口上、下边缘存在部分粘连的法向纱交结点。结构中第 2 层、第 8 层经纱层内的经纱全部断裂,第 3、4、5 层和 7 层斜向纱层内,小部分斜向纱纤维断裂或与基体脱黏,余下部分斜向纱纤维未曾断裂,起到连接试样的作用。

图 9 示出试样 WB4 的 90°方向拉伸破坏形貌显微镜照片。可看出 90°方向拉伸试样断口形貌与 0°方向拉伸试样断口形貌明显不同,拉伸破坏类型接近斜角断裂,断口方向与试样承载方向之间夹角接近 45°。

结合上述试样断口形貌对比分析发现,多层多向机织复合材料拉伸试样的应变分布及试样破坏形貌受结构中斜向纱的影响较大。依据多层多向机织结构的特点,对复合材料拉伸试样的拉伸破坏过程进行分析。

0°方向拉伸时,随着承受载荷增加,试样表面交结点处的法向纱在受力过程中试图伸直,交结点附近应变集中加剧,基体产生初始裂纹;裂纹沿树脂通道加速向两边传播,导致基体首先发生破坏,并与纤维界面逐渐脱粘、出现断裂或剥落,随后第 2 层、第

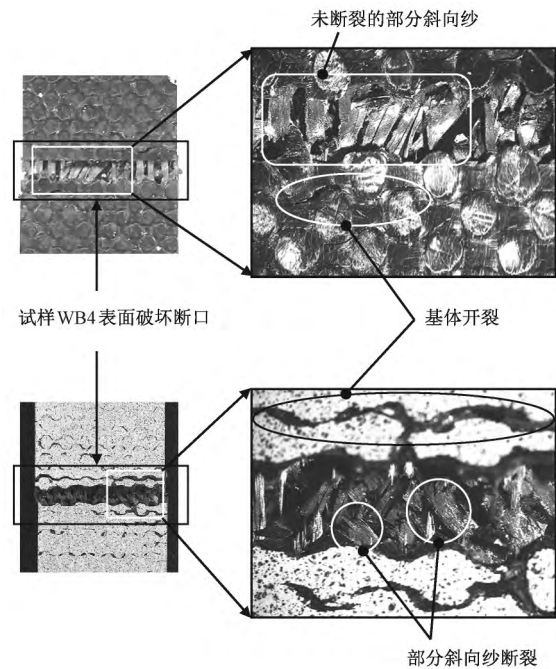


图 8 多层多向机织复合材料 0°方向拉伸破坏形貌照片  
Fig.8 Tensile failure morphologies of multilayer multiaxial woven composites in 0° direction

8 层的经纱与第 3、4、5 层和 7 层的斜向纱共同承载拉伸载荷,承载过程中,斜向纱受力后试图沿经向伸直,其伸直过程将产生桥联作用,在一定程度上阻碍了法向纱在经向的变形以及裂纹和应变沿经向扩展,转而应变沿纬向扩展特征更加明显,加之试样表层纱线层为纬纱层,导致裂纹更易沿纬向扩展,随着载荷继续增大,部分斜向纱被拉断,直至主要承载的经纱完全断裂时,试样发生整体破坏失效。

90°方向拉伸时,主要由纬纱承受载荷,经纱层中经纱间距随着试样表面基体裂纹产生而出现增大趋势,经纱之间树脂基体产生裂纹并随后断裂剥落,

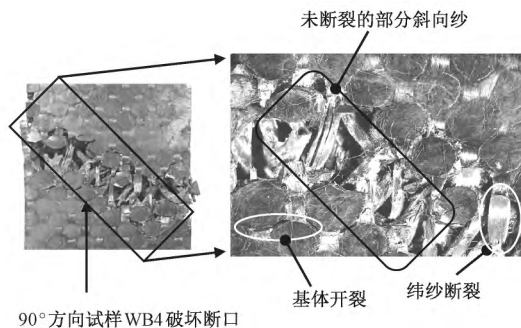


图 9 多层多向机织复合材料 90° 方向拉伸破坏形貌照片

Fig.9 Tensile failure morphologies of multilayer multiaxial woven composites in 90° direction

纬纱层中的纬纱继续保持承载,且斜向纱层中同样承载的斜向纱受力后试图伸直,与试样表层的纬纱层之间发生斜向错位,导致裂纹在试样表层的纬纱层沿 45°斜向纱方向扩展,直至纬纱全部断裂后试样失效,此时断口处法向纱均发生断裂,试样内部部分斜向纱发生断裂,试样表面呈现明显接近 45°的倾斜断口,断口处由未断裂的斜向纱桥联试样。

### 3 结 论

本研究通过分析多层多向机织复合材料的细观结构,以层为单元建立了单胞几何模型,并研究了多层多向机织复合材料的拉伸性能和破坏形貌以及斜向纱对破坏形貌的影响。

1) 建立的单胞几何模型将多层多向机织复合材料结构分解为经纱层、纬纱层、 $+\theta$ 斜向纱层和 $-\theta$ 斜向纱层,结合了织物结构中各参数之间的几何关系,在结构设计时,只需改变纤维体积含量、纱线的经密、纬密参数和纱线规格即可得到各层的纱线尺寸及单胞模型。复合材料厚度的理论预测值与实验值吻合较好,所建立细观结构关系式准确性较好。

2) 斜向纱的存在较大程度上影响了多层多向机织复合材料的破坏模式和断口形貌。0°方向与 90°方向拉伸时,斜向纱承载后均试图沿承载方向伸直,其伸直过程将产生桥联作用,在一定程度上阻碍了法向纱在承载方向的变形以及裂纹和应变沿承载方向扩展,最终破坏断口处斜向纱层中仅部分斜向纱纤维被拉断,部分斜向纱纤维未断裂,导致材料破坏失效时试样并未完全断裂。0°方向拉伸断口处经纱层内的经纱全部断裂,90°方向拉伸断口处纬纱层内的纬纱全部断裂。表面纱线层为纬纱层时,0°方向拉伸断口近似直线,垂直于承载方向,90°方向拉伸试样断口形貌接近斜角断裂,断口方向与试样承载方向之间夹角接近 45°。

FZXB

### 参考文献:

- [ 1 ] SALEH M N , SOUTIS C. Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites [J]. Mech Adv Mater Mod Processes , 2017 , 3 ( 1 ) : 12.
- [ 2 ] BILISIK K. Multiaxis three - dimensional weaving for composites: a review [J]. Text Res J , 2012 , 82 ( 7 ) : 725-743.
- [ 3 ] 杨彩云, 李嘉禄. 基于纱线真实形态的三维机织复合材料细观结构及其厚度计算 [J]. 复合材料学报, 2005 22( 6 ) : 178-182.  
YANG Caiyun , LI Jialu. Microstructure and thickness equation of 3D woven composites based on yarn's true configuration [J]. Acta Mater Compos Sinica , 2005 , 22( 6 ) : 178-182.
- [ 4 ] KYLE C , WARREN R A. Lopez - Anido , et al. Experimental investigation of three - dimensional woven composites [J]. Composite: Part A , 2015 , 73: 242-259.
- [ 5 ] ROBERT G , CLIVE R Siviour , JENS Wiegand , et al. In - plane and through-thickness properties , failure modes , damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading [J]. Compos Sci Technol , 2012 , 72: 397-411.
- [ 6 ] WARREN Kyle C , LOPEZ-ANIDO R A , GOERING Jonathan. Experimental investigation of three - dimensional woven composites [J]. Compos: Part A , 2015 , 73: 242-259.
- [ 7 ] ANAHARA M , YASUI Y , OMORI H. Three dimensional fabric and method for producing the same: US 5137058 [P]. 1992-8-11.
- [ 8 ] RUZAND J M , GUENOT G. Multiaxial three - dimensional fabric and process for its manufacture: WO 94/20658 [P]. 1994-9-15.
- [ 9 ] FARLEY G L. Method and apparatus for weaving a woven angle ply fabric: US 5224519 [P]. 1993-7-6.
- [ 10 ] UCHIDA H , YAMAMOTO T , TAKASHIMA H , et al. Three dimensional weaving machine: US 6003563 [P]. 1999-12-21.
- [ 11 ] MOHAMED M H , BILISIK A K. Multi - layer three - dimensional fabric and method for producing: US5465760 [P]. 1995-11-14.
- [ 12 ] BILISIK A K. Multiaxial three - dimensional ( 3D ) circular woven fabric: US 6129122 [P]. 2000-10-10.
- [ 13 ] BILISIK K. Multiaxis three dimensional ( 3D ) flat woven fabric and weaving method: feasibility of prototype tube carrier weaving [J]. Fibres Text East Eur , 2009 , 17( 6 ) : 63- 69.

- [14] BILISIK K. Multiaxis 3D woven preform and properties of multiaxis 3D woven and 3D orthogonal woven carbon/epoxy composites [J]. *J Reinf Plast Compos*, 2010, 29( 8): 1173-1186.
- [15] 张一帆, 马明, 陈利. 多层多向织物复合材料力学性能分析[J]. *宇航材料工艺*, 2013( 2): 31-34.  
ZHANG Yifan, MA Ming, CHEN Li. Mechanical properties of composite reinforced by multi-ply multi-axial performs [J]. *Aerospace Mater Technol*, 2013( 2): 31-34.
- [16] AHMAD Rashed Labanieh, XAVIET Legrand, VLADAN Koncar. Development in the multiaxis 3D weaving technology [J]. *Text Res J*, 2016, 86: 1869-1884.
- [17] WANG Ximmiao, CHEN Li, WANG Junshan. A novel multiaxial three-dimensional woven preform: process and structure [J]. *J Reinf Plast Compos*, 2018, 37( 4): 247-266.
- [18] SALEH M N, LUBINEAU G, POTLURI P. Micro-mechanics based damage mechanics for 3D orthogonal woven composites: experiment and numerical modelling [J]. *Compos Struct*, 2016, 156: 115-124.