

三维五向编织复合材料纵向性能的实验研究

Experimental Investigation on Longitudinal Properties of 3-D 5-Directional Braided Composites

陈利¹, 梁子青², 马振杰¹, 刘景艳¹, 李嘉禄¹

(1 天津工业大学 复合材料研究所先进纺织复合材料天津市重点实验室, 天津 300160;

2 北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

CHEN Li¹, LIANG Zi-qing², MA Zhen-jie¹, LIU Jing-yan¹, LI Jia-lu¹

(1 Tianjin Key Laboratory of Advanced Composites,

Composite Materials Research Institute, Tianjin

Polytechnic University, Tianjin 300160, China;

2 National Key Laboratory of Advanced Composites,

Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 通过对具有不同编织结构参数的三维五向编织复合材料试件的纵向拉伸和压缩实验, 分析了该类材料的纵向拉、压刚度和强度随编织工艺参数的变化规律以及材料的失效形式。三维五向编织复合材料在破坏前基本保持线弹性, 纵向拉、压破坏具有脆性特征, 拉伸模量和压缩模量比较接近, 但拉伸强度远大于压缩强度。编织角和纤维体积含量对材料性能的影响显著, 纱线粗细的影响不大。提高第五向纱线的比例, 可提高材料的纵向性能。此外, 研究中采用短标距薄板试件, 以避免试件产生整体屈曲和端部纤维束开裂破坏。

关键词: 复合材料; 三维编织; 力学性能; 实验研究

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2005) 08-0003-04

Abstract: The longitudinal tensile and compression tests were conducted on the 3-D 5-directional braided composites with different braiding parameters. The effect of braiding parameters on the longitudinal tensile and compressive properties was discussed, and the failure mechanism of materials was investigated. The stress-strain curves showed that the longitudinal tensile and compressive properties of 3-D 5-directional braided composites were linear elastic, and had brittle fracture characteristics. Tensile modulus was almost equal to compressive modulus, but the tensile strength was far higher than compressive strength. Braiding angle and fiber volume fraction had significant influence on the mechanical properties of 3-D 5-directional braided composites, but the linear density of yarns had little effect. Increasing the proportion of axial yarns could improve the longitudinal properties of materials. Moreover, shot-gauge plate samples were used to avoid the buckling and end cracking.

Key words: composite; 3-D braiding; mechanical property; experimental investigation

三维编织复合材料作为一种新型的复合材料, 由于它具有整体异形性和三维净体制造等优点和灵活的性能可设计性, 在国内外航空、航天等领域得到了广泛的应用。近20年, 国内外对三维编织复合材料力学性能开展了系列研究^[1-6], 但是由于三维编织复合材料的力学性能的影响因素较多, 相关实验研究还不充分。

三维四向编织复合材料克服了传统层合复合材料的分层开裂敏感、抗冲击损伤性能差等缺点, 厚度方向强度得到了很大提高, 但同时面内性能有所下降。为了提高三维编织复合材料的纵向性能, 发展了

三维五向编织复合材料。本工作通过对具有不同编织结构参数的三维五向编织复合材料在纵向进行了拉伸和压缩实验, 确定了该类材料的刚度、强度随编织工艺参数的变化规律及试件失效形式, 并探索了三维编织复合材料压缩实验的方法。

1 三维五向编织结构

三维五向编织结构是在基本的三维四向编织结构基础上, 在编织过程中引入沿编织成型方向不动的纱线而形成的一种新的整体编织结构。两种编织结构

的内部单胞模型如图 1 所示。在三维四向编织结构中，所有的编织纱线均与编织成型方向有一个夹角，共有四种空间倾斜方向，部分纱线通过了材料的厚度方向，有效提高了材料厚度方向的性能，但是，同时使材料的面内性能有所下降。而在三维五向编织结构中，除了有四组倾斜分布的编织纱线以外，还有一组沿材料纵向（编织成型方向或第五向）分布的纱线。纵向纱线几乎处于伸直状态，可以改善材料纵向性能。

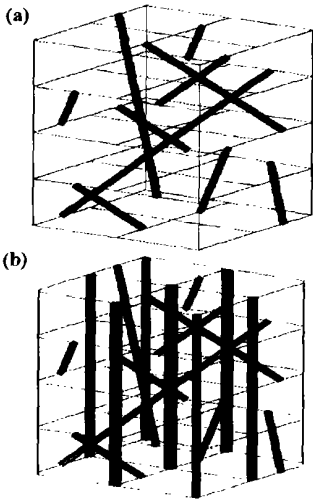


图 1 三维编织复合材料的内部结构单胞模型
(a) 三维四向编织结构；(b) 三维五向编织结构
Fig. 1 Interior unit-cell of 3-D braided composites
(a) four-directional braiding structure;
(b) five-directional braiding structure

2 三维五向编织复合材料的纵向拉伸和压缩实验

所用试样均由天津工业大学复合材料研究所制

备。试件采用三维五向编织工艺编织，再经过树脂传递模塑工艺（RTM）渗入树脂后固化成型。所选用的增强纤维为日本东丽公司生产的碳纤维，其中 12K 碳纤维的牌号为 T 700SC，其他 K 数的碳纤维牌号为 T 300B，基体材料为 TDE-86 环氧树脂，固化剂为 70[#] 酸酐。共制备了九类试样，如表 1 所示。

表 1 中编织角和纤维体积含量为每组实验件的平均值，纱线组合表示编织纱和第五向纱所用纱线粗细，且第五向纱为满加纱方式。

拉伸和压缩实验方法分别参考国家标准 GB1447-83 和 GB3856-83，以及相关的 ASTM 测试标准。拉伸实验件规格为 250mm×25mm×4mm。压缩实验件规格为 120mm×25mm×4mm。试件两端粘贴有厚为 1mm 长为 50mm 的铝板作为加强片，并加工有 45° 倒角。所有实验在日本岛津公司的 AG-250KNE 型万能材料试验机上完成。应变由电阻应变片测定。信号由 YD-15 型动态电阻应变仪采集。数据由计算机记录处理。试件的状态、实验环境及设备按国家标准 GB1446-83 的相关规定调整。测试速度为 2mm/min。

3 结果和分析

3.1 三维五向编织复合材料的纵向拉伸性能

三维五向编织复合材料的纵向拉伸实验结果列于表 2。

表 2 中数据显示，在纤维体积含量相同时（CLA3，CLA4 和 CLA5），拉伸弹性模量、拉伸强度随编织角的增大而减小，泊松比随编织角的增大而增大；在编织角相同时（CLA1 和 CLA3），拉伸弹性模量、拉伸强度和泊松比随纤维体积分量的增大而增大。此外，比较采用较细纱线的 CLA2 和较粗纱线的

表 1 拉伸和压缩实验件的规格
Table 1 Specifications of the tensile and compression samples

No.	Braiding structure	Braiding yarns/ axial yarns	Braiding angle/ (°)	Fiber volume fraction/ %	Number of sample
CLA1	5-directional	12K/ 12K	12.6	46.6	4
CLA2	5-directional	6K/ 6K	11.5	58.2	4
CLA3	5-directional	12K/ 12K	12.2	56.7	4
CLA4	5-directional	12K/ 12K	20.1	55.3	4
CLA5	5-directional	12K/ 12K	30.2	57.3	4
CTA1	5-directional	12K/ 12K	22.7	58.1	4
CTA2	5-directional	12K/ 12K	31.4	56.8	4
CTA3	5-directional	6K/ 6K	30.6	53.0	4
CTA4	5-directional	3K/ 12K	32.1	57.2	4

CLA 3 两组试件的实验结果可知, 前者的拉伸模量和拉伸强度略高于后者, 而二者泊松比基本相近。与 CLA 3 相比, CLA 2 的编织角略小, 而纤维体积含量略高。如果去除编织角和纤维体积含量波动的影响, 并考虑到 CLA2 所用纱线 T 300B 碳纤维的拉伸强度 (3530MPa) 小于 CLA3 所用纱线 T 700SC 碳纤维的拉伸强度 (4900MPa), 加之两种碳纤维的弹性模量几

乎相同, 可以认为, 编织所用纱线的粗细对材料的拉伸模量和泊松比影响不显著, 但采用相对较细的纱线有利于提高材料的拉伸强度。这主要是由于较细的编织纱线使材料的内部单胞结构尺寸减小, 材料的结构均匀性得到进一步提高, 同时可以有效减少纱线交织点处的富树脂区体积。

几组试件的典型拉伸应力-应变曲线表明, 在实

表 2 纵向拉伸实验结果

Table 2 Experimental data of the longitudinal tensile tests

No.	Strength/MPa	C_v / %	Modulus/GPa	C_v / %	Poisson's ratio	C_v / %
CLA1	710.2	9.7	96.5	8.3	0.42	12.1
CLA2	784.3	7.4	119.2	6.5	0.45	10.2
CLA3	753.2	10.1	115.4	9.1	0.46	6.2
CLA4	720.8	9.2	98.1	6.3	0.49	8.5
CLA5	510.6	12.6	72.1	9.0	0.56	13.7

验破坏前试样基本保持为一条直线, 这说明三维五向编织复合材料试件在拉伸破坏前是线弹性的, 如图 2 所示。

在纵向拉伸实验过程中, 当载荷达到一定值时, 试件开始发出轻微的响声, 基体或界面发生破坏, 随着载荷的增加, 响声越来越大、越来越急促。当达到破坏载荷时, 材料突然发生断裂, 断口基本上为平断口, 如图 3 所示。断口处纤维被拉断。沿纵向分布的第五向纱线的加入使材料的失效模式更趋向于脆性破坏, 并使材料的应力-应变更接近线性关系。

题, 研究中参考国家标准 GB3856- 83, 采用了短标距薄板试件, 并专门设计了一套压缩卡具, 完成了三维五向编织复合材料的压缩实验。

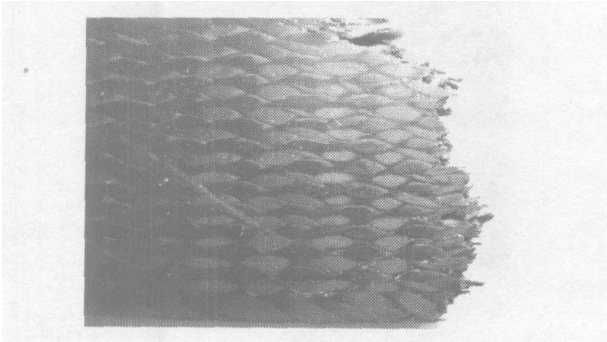


图 3 拉伸断口形貌

Fig. 3 Morphology of the fracture section of tensile sample

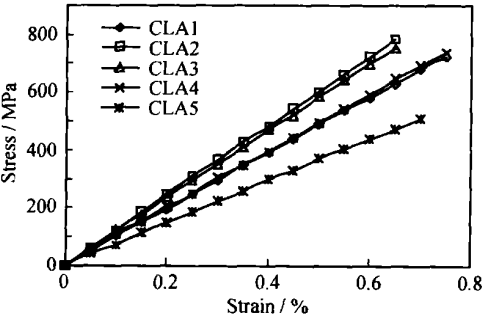


图 2 纵向拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of longitudinal tensile tests

3. 2 三维五向编织复合材料的纵向压缩性能

目前三维编织复合材料的压缩性能实验主要参考国家标准 GB1448- 83, 采用方柱形实验件, 两端加压测试。该方法在测试三维编织复合材料时比较容易出现试件两端纤维束开裂破坏现象。为了避免上述问

题, 图 4 分别给出了每组实验件典型的压缩应力-应变曲线。材料的应力-应变曲线在试件破坏前保持较好的线性关系, 说明三维五向编织复合材料纵向压缩性能基本上为线弹性。实验中所有试件的破坏均发生在测试的有效部位。实验数据重复性较好。

图 5 为典型的压缩断口形貌。沿试件的宽度方向, 断口较平整, 而沿试件的厚度方向, 断口与受力方向约成 45 角, 呈现明显的剪切破坏特征。实验过程中, 试件基本无响声, 直到试件断裂瞬间, 才有较大的树脂开裂和纤维断裂的声音传出, 载荷突然降低, 表现出脆性破坏的特点。

由纵向压缩实验获得的材料主要力学性能参数

见表 3。在纤维体积含量基本相同的情况下(CTA1 和 CTA2)，三维五向编织复合材料的压缩模量和压缩强度随编织角的增大而降低。与拉伸实验结果相比，纵向压缩弹性模量与拉伸弹性模量接近，但纵向压缩强度要比拉伸强度低许多。这主要是二者的破坏模式不同。拉伸试件的破坏主要是基体破坏和纤维束被拉断等造成的拉伸破坏，而压缩试件的破坏是纤维束与基体界面分离以及纤维束在压剪作用下折断等造成的剪切破坏。

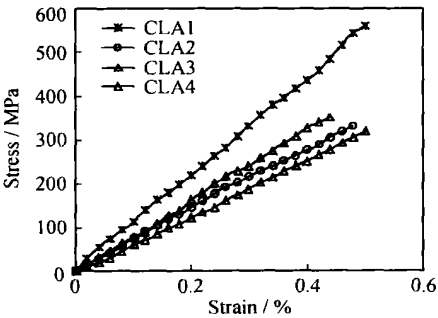


图 4 纵向压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of longitudinal compression tests

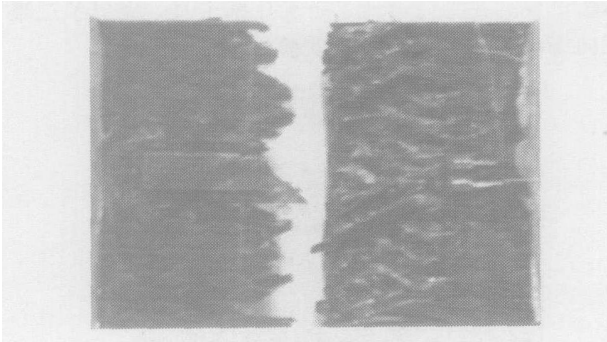


图 5 压缩断口形貌

Fig. 5 Morphology of the fracture section of compression sample

表 3 纵向压缩实验结果

Table 3 Experimental data of the longitudinal compression tests

No.	Strength/MPa	$C_v / \%$	Modulus/GPa	$C_v / \%$
CTA1	553.45	14.1	105.8	6.9
CTA2	332.65	6.6	78.3	4.7
CTA3	318.85	7.6	71.5	8.1
CTA4	346.02	14.4	84.9	15.3

比较 CTA2 和 CTA3 试件，这两组试件所采用的纱线的粗细不同。CTA2 选用的是 12K 的 T700SC 碳纤维，CTA3 选用的是 6K 的 T300B 碳纤维。CTA3 的

压缩弹性模量和强度略低于 CTA2。去除 CTA3 的纤维体积含量略低于 CTA2 的影响后，这两组试件的性能几乎相同。如考虑二者所用碳纤维的性能，可以认为纱线粗细对三维五向编织复合材料的压缩模量影响不大，但纱线较细时有利于改善材料的结构均匀性，提高材料的压缩强度。

CTA4 试件通过减小编织纱的细度，从而提高了第五向纱线在结构中的比例。与 CTA2 试件相比，CTA4 试件的压缩强度和压缩模量均有所提高，但其分散度较大。

4 结论

(1) 三维五向编织复合材料的纵向拉伸和压缩应力-应变曲线在试件破坏前基本保持线性关系，试件的失效方式均趋向于脆性破坏。

(2) 三维五向复合材料的拉伸和压缩模量基本接近，而压缩强度远低于拉伸强度，主要是由于拉伸和压缩破坏模式不同。

(3) 编织角和纤维体积含量是影响材料性能的主要因素，随着编织角的增大，三维五向编织复合材料的纵向强度和模量逐渐减小，纵向拉伸泊松比逐渐增大；随着纤维体积含量的增大，材料的纵向强度、模量和纵向拉伸泊松比逐渐增大。

(4) 纱线粗细对材料的拉、压模量影响不大，但较细的纱线有利于提高三维五向编织复合材料的拉、压强度。提高第五向纱线的比例，可以提高材料的纵向性能。

参考文献

[1] CHEN LI, TAO X M, CHOY C L. On the microstructure of three-dimensional braided performs [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59 (3): 391- 404.

[2] YERRAMALLI, CHANDRA S, WAAS. Compressive splitting failure of composites using modified shear lag theory [J]. International Journal of Fracture, 2002, 115 (1): 27- 40.

[3] 刘谦, 李嘉禄, 李学明. 三维编织复合材料的弯曲和压缩性能探讨研究 [J]. 材料工程, 2000, (8): 3- 6.

[4] 庞宝君, 杜善义, 韩杰才, 等. 三维四向编织碳/环氧复合材料实验研究 [J]. 复合材料学报, 1999, 16 (4): 136- 141.

[5] 王波, 矫桂琼, 陶亮, 等. 三维编织复合材料拉压性能的实验研究 [J]. 实验力学, 2002, 17 (3): 302- 306.

[6] 卢子兴, 胡奇. 三维编织复合材料压缩力学性能的实验研究 [J]. 复合材料学报, 2003, 20 (6): 67- 72.

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(51460020304QT3201); 天津市高等学校科技发展基金资助项目(2004z0404)

收稿日期: 2004-03-08; 修订日期: 2005-05-24

作者简介: 陈利(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事先进纺织复合材料的研究, 联系地址: 天津工业大学复合材料研究所(300160)。