复合材料学报 第21卷 第1期 2月 2004年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 21 No. 1 February 2004

文章编号: 1000-3851(2004)01-0090-05

二步法方型三维编织复合材料力学性能及影响因素

李嘉禄, 孙 颖, 李学明
(天津工业大学 复合材料研究所, 天津 300160)

摘 要: 对具有不同细观结构参数的二步法方型三维编织复合材料试件进行了轴向拉伸、三点弯曲及轴向压缩的力学性能测试, 获得了这种结构材料的基本力学性能数据。针对其细观结构特点, 从宏观角度分析了编织纱的种类、编织纱与轴纱的线密度之比以及编织节距长度等参数对力学性能的影响。实验和分析结果表明: 二步法方型三维编织复合材料的轴纱对轴向拉伸和压缩性能起主导作用; 节距长度增大, 编织纱越粗, 轴向拉伸强度、拉伸模量以及轴向压缩强度和模量均有增大的趋势。

关键词: 三维编织复合材料; 二步法; 轴向拉伸; 弯曲性能; 轴向压缩
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

RESEARCH ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND THE EFFECTORS OF THE TWO-STEP 3D BRAIDED COMPOSITES

LI Jialu, SUN Ying, LI Xueming
(Composites Research Institute of Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: This paper presents the results of an experimental study conducted on the mechanical property of the two-step rectangle 3D braided composites. The tests include tensile in the axis, flexure and compression in the axis. Thus, the reliable mechanical property data are obtained. On the basis of the character of the microstructure, this paper relates the influence of microstructural variables such as the kinds and sizes of braider yarns, the linear density ratios of axial to braider yarn and the pitch lengths on the mechanical properties of these composites from a macroscopical view. It shows that the axial yarns dominate the tension and compression properties in the axial direction. The strength and modulus of tension and compression in the axial direction increase with the pitch length and size of braider increasing.

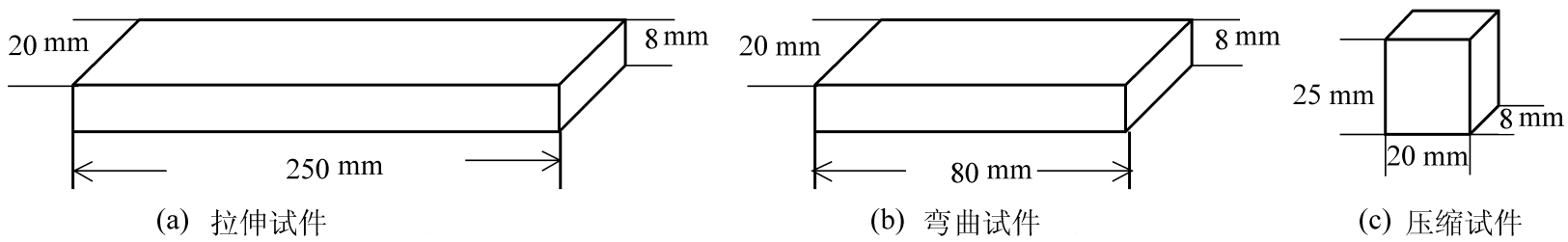
Key words: 3D braided composites; two-step; tensile in the axis; flexure property; compression in the axis

三维编织复合材料体系整体性好, 结构不分层, 力学结构合理, 完全克服了在传统纺织复合材料中经常出现的层间破坏的致命弱点, 同时具有显著的抵抗损伤和裂纹扩散的能力, 使制作主承力复合材料构件成为可能[1]。二步法方型三维编织复合材料是三维编织复合材料的一种, 它以独特的结构和优越的力学性能在纺织复合材料领域中占有一席之地[2]。

二步法方型三维编织有两个纱线系统, 一个纱线系统是编织纱, 另一个纱线系统是轴纱。在编织过程里轴纱保持轴向不动, 编织纱按照一定的规律运动相互交错, 并把轴纱捆绑起来, 从而形成一个不分层的三维编织整体结构, 因此能显著提高复合材料厚度方向的机械性能[3]。

鉴于二步法方型三维编织复合材料的特点, 目前, 在航空航天和建筑领域均有采用这种材料作为

收稿日期: 2002-12-03; 收修改稿日期: 2003-02-01
基金项目: 国家教育部科学研究重点项目(00135)
通讯作者: 李嘉禄, 硕士, 教授, 主要从事纺织复合材料方面的研究 E-mail: lijialu@tjpu.edu.cn



(a) 拉伸试件 (b) 弯曲试件 (c) 压缩试件

图 1 试件的形状和尺寸

Fig. 1 The shapes and sizes of specimens

主要承力结构件的需求, 但因欠缺一些令人信服的主要力学性能资料, 而制约了人们对它的使用。笔者正是通过对二步法方型三维编织复合材料的力学性能的测试和分析, 揭示该结构复合材料力学性能的规律, 为复合材料结构设计提供基本参数, 并能更有效地在生产加工过程中对其力学性能进行控制。同时, 可以为建立合理的力学模型打下基础, 从而掌握性能机理, 用于指导结构材料的优化设计[4]。纤维材料对材料力学性能的影响主要表现在编织纱和轴纱的种类和尺寸; 而纤维材料的交织情况对其力学性能的影响主要表现在编织纱节距长度、编织角和纤维体积含量等结构参数的影响[5]。当复合材料试件外型尺寸等其它参数基本不变时, 节距长度直接影响着编织角和纤维体积含量。据此, 笔者主要通过测试和计算主要的力学性能指标, 考察编织纱的种类、编织纱与轴纱的线密度之比以及编织节距长度等参数对其主要力学性能的影响情况。这方面的实验研究还不充分, 仍需大量的实验来研究它们的变形和破坏规律, 从而为合理描述编织复合材料的力学行为奠定实验基础。

1 试样制备及实验

1.1 试样制备

各试件的轴纱均选用细度为 1200Tex 的高强玻璃纤维(SG); C1～C3 组试件的编织纱为高强玻璃纤维(SG); C4～C6 组编织纱选用细度为 12K 的 T-300 碳纤维。

编织设备: 天津工业大学复合材料研究所的三维编织机上进行编织。

复合固化设备: 真空泵(浙江黄岩求精真空泵厂); 空气压缩机(天津空气压缩机厂); 旋转式粘度计 NDJ-99(同济大学机电厂)。

力学性能测试设备: 天津工业大学复合材料研究所的日本岛津(SHIMADZW)公司制 AG-250KNE 型万能材料试验机。该试验机由计算机控制, 数据自动采集并处理绘制图线, 测试精度高。为进一步提高材料拉伸模量的测试精度, 采用 SG50-10 型纵向引伸仪来精确测得试片纵向的承载变形情况。

预制件均经树脂传递模塑(RTM)工艺注入基体后固化成型。树脂为 TDE-85# 环氧树脂(4, 5- 环氧环巳烷- 1, 2 甲酸二缩水甘油脂); 固化剂为 70# 酸酐(四氢邻苯二甲酸酐); 催化剂为苯胺, 均为津东化工厂生产。

1.2 实 验

测试方法主要参考 GB1447-83《玻璃纤维增强塑料拉伸试验方法》, GB1448-83《玻璃纤维增强塑料弯曲试验方法》和 GB1449-83《玻璃纤维增强塑料压缩试验方法》。根据测试方案, 6 组用于性能测试的试件相关参数平均值及几何形状分别列于表 1 和图 1, 每组试件 5 个试片。二步法方型三维编织复合材料试件的结构参数引自参考文献[3]。

表 1 6 组试件相关参数

Table 1 The parameters of specimens

组号	编织纱/细度	轴纱排列/(m×n)	节距长度/mm	外型尺寸/mm×mm×mm
C1	240Tex	15×17	15	20.06×8.07×250
C2	1200Tex	13×15	15	20.04×7.23×250
C3	2400Tex	13×13	15	20.11×8.43×250
C4	12K	13×15	10	20.09×8.21×250
C5	12K	13×15	15	20.09×8.11×250
C6	12K	13×15	20	20.10×8.02×250

2 结果分析

2.1 轴向拉伸性能及影响因素

测定拉伸弹性模量、伸长率, 绘制应力-应变曲线。图 2 给出了拉伸实验所得 3 个试件的拉伸应力-应变曲线, 表 2 中列出了 6 组试件的主要力学性能测试和计算结果。

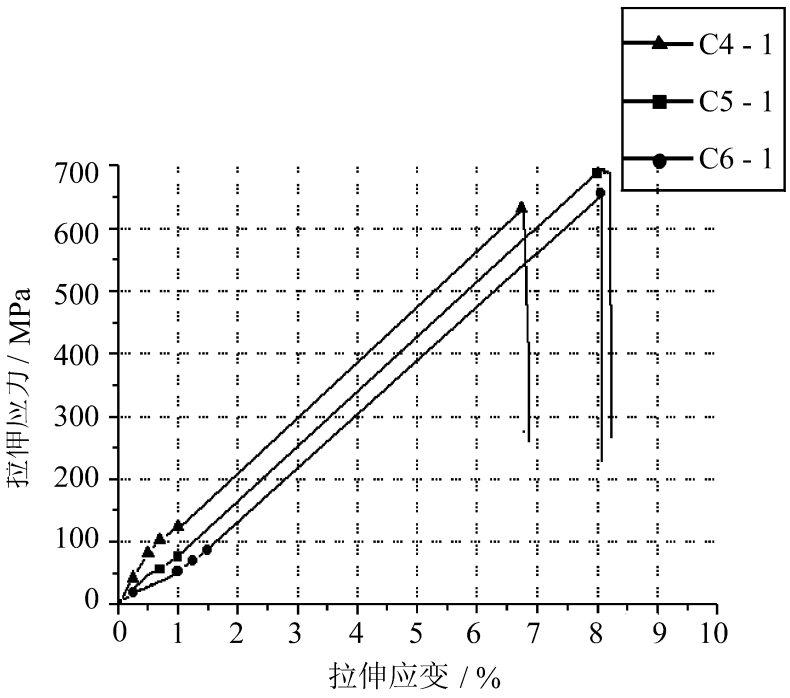


图 2　二步法试件拉伸应力-应变曲线

Fig. 2　Tensile stress-strain curves

表 2　6 组试件拉伸性能数据平均值

Table 2　The average of tension properties

组号	V_f/ %	破坏载荷 P_t/ kN	拉伸强度 e_t/ MPa	初始模量 E_t/ GPa
C1	72.86	97.09	600.51	64.28
C2	58.91	94.21	650.62	41.80
C3	60.66	104.95	619.46	47.26
C4	61.51	106.75	647.84	50.45
C5	61.69	115.87	713.20	51.50
C6	60.98	109.09	677.93	56.24

由表 2 可见:

(1) C1～C3 进行比较发现编织纱的粗细对试件拉伸性能各项数据影响并不明显。这主要是因为二步法方型三维编织复合材料结构的特点,此时轴纱是承载的主要部分;而且编织纱越粗,仅仅使复合材料内部和表面的纯树脂区有少量增加,这有利于裂纹的增长。

(2) C2 与 C5 比较发现材料的拉伸强度和模量与编织纱的种类有关。

(3) C4～C6 进行比较发现节距长度增大,拉伸强度、拉伸模量有增大的趋势。因为节距长度增大,编织角减小,使编织纱对材料的轴向拉伸性能的贡献增大。同时,节距长度增大,编织纱对轴纱的捆绑引起轴纱的挤压变形程度减轻,同时打紧动作对纱线的损伤减缓,材料中的小缺陷有所减少。

(4) 与纤维体积含量相近的四步法三维编织复合材料的拉伸性能进行比较发现:拉伸强度是四步法的 4 倍,弹性模量都有提高,这充分体现了二步法方型三维编织复合材料轴向性能的优越性。用于比较的四步法三维编织复合材料的拉伸性能、弯曲性能及压缩性能数据均参见参考文献[6]。

图 2 应力-应变曲线中,可以清楚地看到 6 组试件中较有代表性试件的拉伸性能比较;初始的直线阶段有一个拐点,这是由于轴向拉伸强度高引起的钳口滑移的结果。可见,其应力应变曲线接近于线性,符合虎克定律。但是,为了避免引伸仪受到损坏,就不能测到试件破坏时的强度和变形。从图 3 的宏观实验破坏形态图中可以看出轴纱纤维束呈正应力拉断特征,充分发挥了轴纱的抗拉性能。

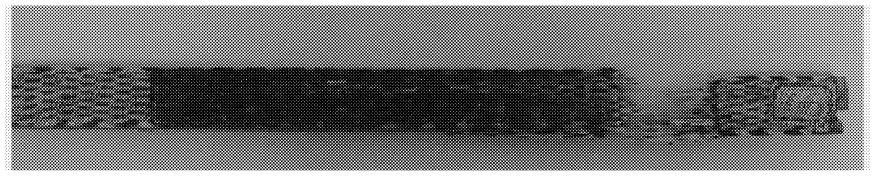


图 3　轴向拉伸破坏形态图

Fig. 3　Damage configurations in the axial tension test

2.2　弯曲性能及影响因素

弯曲性能是反映材料综合性能的一个指标,只要有任何一个薄弱环节存在于复合材料内部,就会降低其弯曲力学性能。一般其力学性能优劣的比较、原材料选择和工艺性能比较均采用弯曲性能试验[6]。文中采用三点弯曲-挠度试验,一次即可得到精确度较高的弯曲强度、弯曲模量数据和载荷-挠度曲线(分别见表 3 和图 4)。

表 3　各组试件弯曲性能数据平均值

Table 3　The average of flexure properties

组号	V_f/ %	破坏载荷 P_t/ kN	弯曲强度 e_t/ MPa	弯曲模量 E_t/ GPa	应变/ %
C1	78.44	12.129	1032.17	54.50	2.24
* C2	63.66	12.554	1081.64	52.71	2.23
C3	61.75	11.779	922.78	58.88	2.12
C4	58.33	8.632	711.45	50.89	1.49
* C5	62.55	9.032	773.34	51.58	1.95
C6	59.12	10.598	874.50	53.64	1.52

注:表中带* 的是用于比较编织纱种类对弯曲性能的影响。

由表 3 中的弯曲性能比较可以看出:

(1) 编织纱的粗细一致时,弯曲强度最高,模量也最高。编织纱越粗,编织纱对轴纱的捆绑作用越大,材料的抗弯强度越大,但当编织纱比轴纱粗时,材料中的富树脂区相对增加,有利于裂纹的扩展,试件的弯曲强度反而下降。

(2) 节距长度增加,轴纱受编织纱捆绑产生的变形程度减轻,同时,打紧作用对轴纱的损伤减少,试件内部缺陷减少,弯曲强度增大,弯曲弹性模量呈增大趋势。

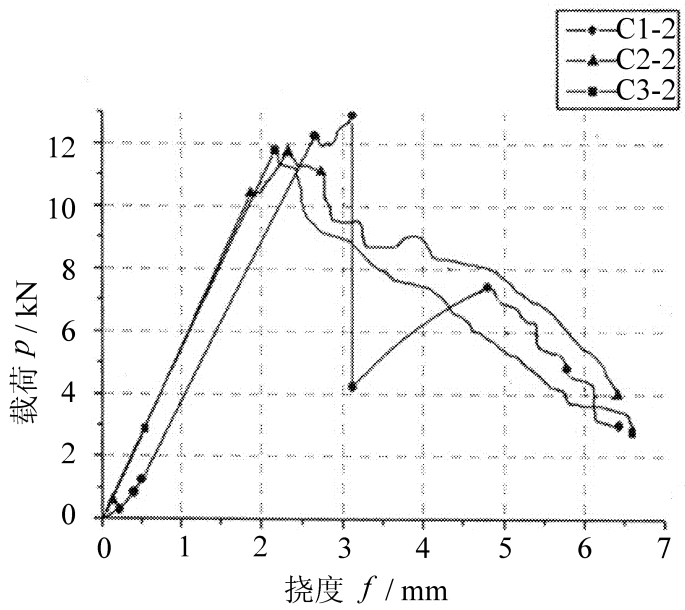


图 4 载荷-挠度曲线

Fig. 4 The curves of load-flexibility

(3) 与纤维体积含量接近的四步法三维方型编织复合材料试件相比, 二步法方型三维编织复合材料的弯曲强度和模量均高出将近 1 倍。

载荷-挠度曲线表明材料结构破坏积累的过程, 从图 4 可以看出: (1) 在中点挠度小于 0.4 mm 之前部分斜率均较小, 反映了材料表面基体或编织纱先破裂; 从此时出现拐点后到材料破坏之前呈直线(服从虎克定律), 且斜率增大, 这部分是轴纱承载与变形的曲线。(2) 第 1 组试件的编织纱最细, 试件发生破坏后强度突然下降了大约 60 %。材料所承受载荷随节距长度的增大而增加。

从图 5 的弯曲实验后试件的破坏形态图可以看到承载的结果。在弯曲性能测试过程中观测到: 加载开始后, 试件上侧受压, 编织纱先断裂; 下侧受拉, 基体产生横向裂纹, 纵向的轴纱对裂纹扩展起到减少应力集中的作用, 裂纹不会很快贯穿整个截面, 有利

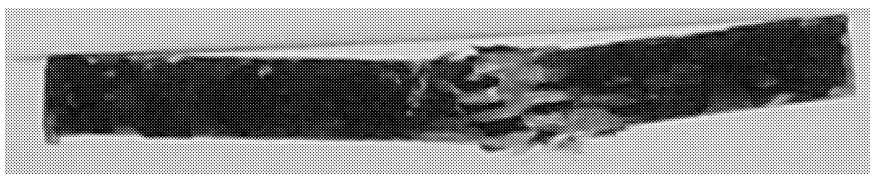


图 5 弯曲破坏形态图

Fig. 5 Damage configuration in the flexure test

于内部尚未破坏的轴纱继续承载。这样基体与纤维之间粘合力以及树脂强度就起了作用。

2.3 轴向压缩性能及影响因素

表 4 列出了 5 组试件的主要力学性能测试和计算结果, 图 6 给出了轴向压缩实验所得 3 个试件的轴向压缩应力-应变曲线。

从各组试件压缩性能数据的比较可以看出: (1) 编织纱越粗, 试件的压缩强度和模量均有增大的

表 4 各组试件压缩性能数据平均值

Table 4 The average of compression properties

组号	V_f / %	破坏载荷 P_c / kN	压缩强度 e_c / MPa	压缩模量 E_c / GPa	应变 / %
* C2	62.46	67.490	410.05	11.363	5.45
C3	64.15	71.000	445.89	12.892	4.36
C4	61.66	67.500	402.91	13.070	1.49
* C5	62.32	64.490	392.79	13.377	1.95
C6	60.19	74.053	441.81	13.720	1.52

注: 表中带* 的是用于比较编织纱种类对压缩性能的影响。

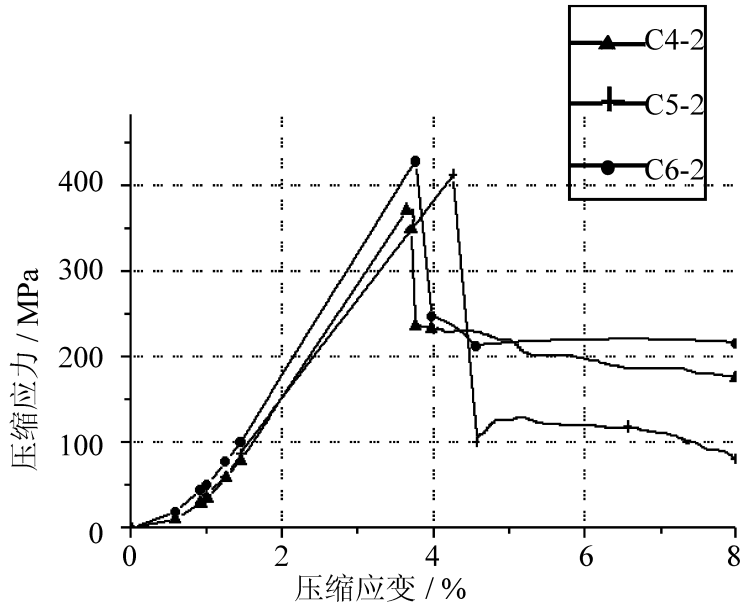


图 6 压缩应力-应变曲线

Fig. 6 Compression stress-strain curves

趋势, 轴纱是轴向承力的主体, 编织纱越粗对轴纱的捆绑作用越大, 使材料结构不易松散, 对材料承受轴向压缩载荷能力的提高有一定的作用但不太大。编织纱的种类对试件压缩性能影响不大。(2) C3 和 C6 的对比发现, 节距长度增大, 轴纱偏离轴向的变形减小, 轴纱的损伤减少, 从而有利于轴向承载力, 材料压缩性能的几项指标均有提高。(3) 与纤维体积含量接近的四步法编织复合材料试件相比压缩强度提高了 2 倍, 压缩模量提高了大约 50%。(4) 与其本身拉伸强度相比, 仅仅降低了 30 %, 参见表 2。

图 6 的轴向压缩应力-应变曲线可以看到: 从开始加载到压缩应变 X≤ 1.2 % 之前, 曲线呈凹线形; 之后至试件结构发生破坏之前基本呈线性, 这一段符合虎克定律。压缩强度达到极值后突然下降。试件的结构破坏后, 强度突然减少了 50 %, 半未降至极小, 破坏成图 7 的状态, 但这并不是意味着材料还可以使用。可以看出: 二步法方型三维编织复合材料的破坏形式基本上是基体屈服开裂, 随之轴纱弯曲、编织纱断开, 接着脆性的轴纱被压碎成一片片并和基体堆砌在一起承载力; 节距长度越大, 材料结构破坏后强度下降越快。

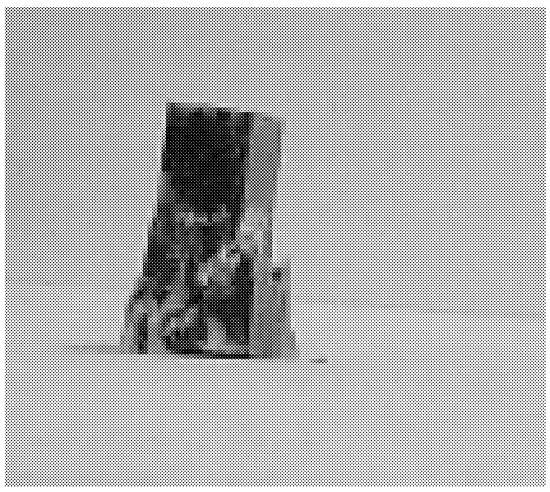


图 7　轴向压缩破坏形态图

Fig. 7　Damage configuration in the axial compress test

3　结　论

对二步法方型三维编织复合材料试件的 3 项基本力学性能进行了测试和分析，其中包括轴向拉伸性能、弯曲性能和轴向压缩性能。同时主要研究了编织纱的种类、细度和编织节距长度对材料基本力学性能的影响。

(1) 二步法方型三维编织复合材料的轴向拉伸性能、弯曲性能、轴向压缩性能优越，均超过纤维体积含量相近的四步法三维编织复合材料。

(2) 二步法方型三维编织复合材料的轴向拉伸性能主要取决于轴纱，小范围改变编织纱的种类、粗细和节距长度对力学性能的影响不显著。

(3) 当编织纱与轴纱种类和粗细一致时材料的弯曲强度最高，节距长度增大，弯曲强度、弯曲模量增加。

(4) 二步法方型三维编织复合材料的轴向压缩性能也主要取决于轴纱，编织纱的种类和粗细对压缩性能影响不大，节距长度增大，压缩强度、压缩模量增加。

参考文献:

[1] 陈　利，李嘉禄，李学明，等. 三维方型编织结构预制件的纱线编织结构 [J]. 复合材料学报，2000，17(4)：1-5.

[2] 李嘉禄，孙　颖. 二步法方型三维编织预制件编织结构参数和工艺参数 [J]. 复合材料学报，2003，20(2)：81-87.

[3] 李嘉禄，孙　颖. 二步法方型三维编织复合材料的细观结构 [J]. 复合材料学报，2002，19(4)：69-75.

[4] Byun J H，Whitney T J，Du G W，et al. Analytical characterization of 2-step braided composites [J]. J Comp Mater，1991，25: 1599-1618.

[5] Kuo W S Chen H I. Fabrication and microgeometry of 2-step braided composites incorporating pultruded rods [J]. Composites Science and Technology，1997，57: 1457-1467.

[6] 焦亚男. 四步法层间连接三维整体预制件的结构及其复合材料的性能 [D]. 天津：天津纺织工学院，1996. 32-40.