

碳纤维三维编织复合材料的结构对拉伸和弯曲性能的影响

Influence of Structures of Carbon Fiber
Three Dimensional Braiding Composites
on Their Tensile and Bending Properties

李嘉禄¹, 魏丽梅¹, 杨红娜²

(1 天津工业大学, 天津 300160;

2 北京空间机电研究所, 北京 100076)

LI Jia-lu¹, WEI Li-mei¹, YANG Hong-na²

(1 Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China;

2 Beijing Institute of Mechanics and Electrics, Beijing 100076, China)

摘要: 研究了碳纤维四步法三维四向、三维五向编织结构复合材料的拉伸和弯曲性能, 以及结构参数—编织角的变化对其拉伸和弯曲性能的影响, 并与层合复合材料作了对比性研究。结果表明, 三维编织复合材料具有良好的力学性能, 其拉伸强度可达 810MPa、拉伸模量可达 95.6GPa, 弯曲强度可达 829.03MPa、弯曲模量可达 67.5GPa。同时, 编织角和编织结构对复合材料性能有较大的影响。随着编织角的增大, 复合材料的拉伸、弯曲强度和模量均减小; 三维五向结构的拉伸、弯曲强度和模量均高于四向结构; 在纤维体积含量相近的情况下, 通过对编织角的设计, 可以设计三维编织复合材料的性能。

关键词: 三维编织复合材料; 编织结构; 编织角; 力学性能

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2004) 12-0003-05

Abstract: The tensile and bending properties of 4-step three-dimensional four-direction and five-direction braiding composites were studied. The influence of the structural parameter—braiding angle on their mechanical properties were discussed. The mechanical properties of three-dimension braiding composites were compared with that of laminated composites. The results showed that 3-D braiding composites had better mechanical properties than laminated composites. The tensile strength of three-dimension braiding composites reached 810MPa, the tensile modulus was 95.6GPa, the bending strength was 829.03MPa, and the bending modulus was 67.5GPa. The braiding angle and braiding structure had a great influence on their mechanical properties. The strength and modulus of tensile and bending decreased with increase of the braiding angles. The strength and modulus of tensile and bending properties of 3-D five-direction structures were higher than that of 3-D four-direction structure. The mechanical properties of 3-D braiding composites were determined by designing their braiding structure.

Key words: 3-D braiding composite; braiding structure, braiding angle, mechanical property

三维编织技术是 20 世纪 80 年代为适应对结构和多功能复合材料的需要而发展起来的一种高新纺织技术。三维编织复合材料是三维编织技术和现代复合材料技术相结合的产物, 它与传统的层合复合材料具有较大的区别。层合复合材料由于层间存在纯基体区而带来力学性能的弱点: 如易分层、开裂敏感和损伤扩展快、沿厚度方向的刚度和强度低、冲击韧性和损伤容限水平较低、抗面内剪切强度低等^[1]。而三维编织物增强体中纤维束或纱线贯穿材料的长、宽、

高三个方向, 形成一个不分层的三维整体网状结构, 因而从根本上消除了层合复合材料的“层”, 解决了层合复合材料的缺陷, 为复合材料应用于结构件提供了广阔的前景^[2-4]。

本工作主要研究了树脂基碳纤维三维编织复合材料的结构, 包括三维四向、三维五向、和纤维的走向或编织角对三维编织复合材料拉伸性能和弯曲性能的影响, 并和层合复合材料进行了对比, 从而确定三维编织复合材料的拉伸和弯曲性能与复合材料结

构的关系，为三维编织复合材料的设计提供依据。

1 力学性能测试方案

1.1 试件种类

试件共分三类：四步法 1×1 三维四向结构、三维五向结构和二维机织物铺层结构树脂基复合材料。三维编织复合材料制件所用的纤维为 12K 的 T300 碳纤维。二维机织物铺层复合材料所用的织物为平纹织物，经纬纱线均为 1K 的 T300 碳纤维。机织物的面密度为 150g/m²，经密、纬密均为 11 根/cm，厚度为 0.18mm，每一层织物按 0°/90° 相同的方向叠加铺放。

在三维编织复合材料中，一般以编织角来表示编织纱线的走向。编织角包括表面编织角 α 和内部编织角 γ，如图 1 所示。它们之间是相关的。由于表面编织角容易测量和控制，所以表面编织角是经常被使用的三维编织复合材料的一个结构参数^[5-7]。本研究中除特别说明的以外，编织角就代表表面编织角。

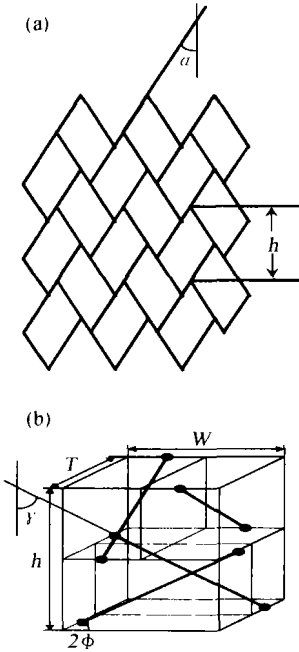


图 1 三维编织复合材料编织角形态示意图
(a) 表面编织角; (b) 内部编织角
Fig.1 Braiding angles of 3-D braiding composites
(a) surface braiding angle; (b) inner braiding angle

1.2 复合固化

所有复合材料试件的基体均为 TDE-85 环氧树脂，复合固化采用 RTM (Resin Transfer Molding) 工艺，即树脂传递模塑工艺。

1.3 测试标准

本研究参考中国国家标准 GB1447-83 《玻璃纤维增强塑料拉伸性能试验方法》和 GB1449-83 《玻璃

纤维增强塑料弯曲性能试验方法》进行测试。

2 拉伸性能

2.1 试片的形状与尺寸

根据 GB1447-83 《玻璃纤维增强塑料拉伸性能试验方法》，试片的形状为长方体，总长为 250mm，厚度 4~5 mm，宽度 25mm，夹具间距离 170mm。所测试件实际外形尺寸为测量工作段内任意 5 点的宽度和厚度，取其算术平均值。

2.2 试验条件

为保证试件拉伸时钳口处不首先破坏，在试件的两端分别粘贴 2mm 厚的玻璃钢加强片。拉伸试验在 MTS880-50KN 试验机上进行，加载速度为 1mm/min，环境温度为 15℃，相对湿度为 18%。拉伸试件的变形用应变计测量。

2.3 试片参数

复合材料试片具体的编号和参数见表 1。

表 1 复合材料试片参数
Table 1 Parameters of composites samples

Sample	Structure of samples	Surface braiding angle / (°)	Fiber volume fraction / %
LA1-1	Three dimensional four-direction braiding	12.80	45.57
LA1-2		12.95	45.22
LA1-3		13.40	44.94
LA2-1		19.9	45.76
LA2-2		19.5	45.19
LA2-3		20.0	47.86
LA3-1		30.0	48.73
LA3-2		29.1	48.29
LA3-3		30.1	47.63
LB1	Three dimensional five-direction braiding	19.40	48.03
LB2		19.45	49.30
LB3		18.75	48.72
LC1	Laminas (34 layers)		52.91
LC2			51.49
LC3			52.69

2.4 测试结果

试验所得结果见表 2 和表 3。

图 2 为拉伸试验初始阶段应力-应变关系曲线，由图可见，在试验的初始阶段五组试件的应力-应变曲线均表现为明显的线性。其中，三维五向 LB 组由于轴向纤维的加入，试件直线斜率最大，模量最大，其次为编织角最小的 LA1 组试件，编织角最大的 LA3 组试件模量最小。层合复合材料的初始模量居中。

由表 2 可见在纤维体积含量基本相同的情况下，试件类别不同所对应的拉伸强度也有所不同，可从 300MPa 到 750MPa 左右变化。其中三维五向的编织结构对应的拉伸强度最大，其次为编织角最小的三维四向结构，铺层结构位于第三位。编织角最大的三维四向结构拉伸强度最小。通过结构的改变可使三维编织复合材料的强度发生变化。这充分体现了三维编织复合材料在拉伸强度方面的可设计性。

表 2 各组试件拉伸性能数据 (平均值)

Table 2 Tensile properties (average)

Sample	Breaking load / kN	Strength / MPa	Initial modulus / GPa	Failure strain / %
LA 1	72.37	683	82.7	0.84
LA 2	41.57	394	49.8	0.79
LA 3	32.01	300	34.8	0.88
LB	86.04	810	95.6	0.85
LC	54.13	526	57.1	0.92

表 3 拉伸性能离散系数 (%)

Table 3 Discrete coefficient of tensile properties (%)

Sample	Strength	Initial modulus	Failure strain
LA 1	15.7	11.8	22.2
LA 2	24.8	17.3	8.08
LA 3	3.07	16.1	16.3
LB	9.18	4.63	13.9
LC	2.7	1.45	2.83

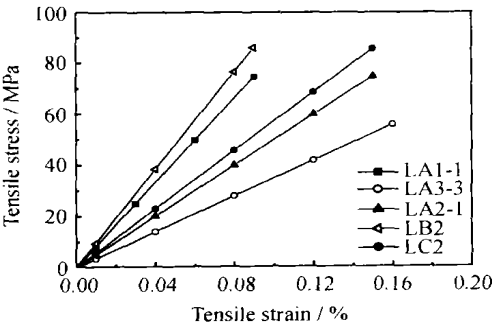


图 2 拉伸试验初始阶段应力-应变关系

Fig. 2 Tensile strain-stress curves at initial stage

由表 2 可见，不同种类试件的拉伸模量的变化趋势与拉伸强度相似。模量变化范围为 30~90 GPa。通过编织结构的改变，可使三维编织复合材料的模量改变。这种模量的可设计性将解决不同用途的制件对力学性能的要求。

图 3 为编织角对试件拉伸性能的影响。编织角是

编织结构参数中的一个重要指标，也是影响三维编织复合材料力学性能的重要因素。在纤维体积含量一定的情况下，编织角越小，三维编织复合材料的拉伸强度和模量越高。改变编织角是调节模量变化范围的有效途径。

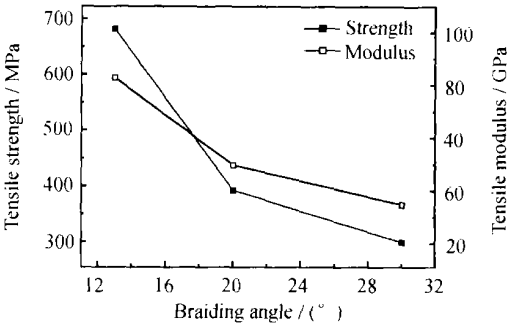


图 3 编织角度对拉伸强度和模量的影响

Fig. 3 Influence of braiding angles on tensile strength and modulus

2.5 结果讨论与分析

由表 2 和表 3 可知，在五组不同结构的复合材料试件中，与三维四向和铺层结构试件相比，三维五向编织结构的试件在织物编织成型方向，即 0 方向的拉伸强度和模量最大；在三维四向结构的三组试件中，随着编织角度的增大，试件的拉伸强度和模量跟着降低。

三维五向编织结构试件在织物编织成型方向，即 0 方向加入了加强纱线，与具有相近纤维体积分含量的三维四向编织结构的试件相比，试件内部沿 0 方向的纱线比例增大，试件在此方向的承载能力增强。0 方向纱线的加入，大幅度提高了材料在该方向的强度和模量，出现如试验所得的一致结果。

在三维四向结构中，编织角为纱线与编织方向的夹角。材料受拉伸载荷作用的过程中纤维起主要的承载作用，基体在纤维之间传递载荷，材料的承载能力主要表现为纤维的承载能力。在受沿 0 方向的拉伸力作用时，编织角小的试件，纱线在 0 方向所能承受的分力较大，垂直于 0 方向所能承受的分力较小，因而编织角小的试件在 0 方向承载能力较强；而随着编织角的增大，试件内部纱线在 0 方向所能承受的分力减小，纱线在 0 方向承载的贡献降低，导致试件在 0 方向承载能力下降，表现为拉伸强度和模量的降低^[8]。

由本小节得到的拉伸试验数据可知，铺层结构材料与三维编织材料相比，在相近的纤维体积分含量下，它的强度不如三维五向结构和三维四向结构中编织角最小的试件高。

由表 3 可知个别组试件所测得的拉伸数据离散

系数较大, 除试验技术影响外, 还与该试件的制造工艺有很大的关系, 如编织过程中编织结构控制得不够均匀等。

3 弯曲性能

3.1 试片的形状与尺寸

根据 GB1449- 83 《玻璃纤维增强塑料弯曲性能试验方法》, 试片的形状为长方体, 总长度为 100mm, 厚度为 4~5 mm, 宽度为 25mm。

3.2 试件参数

复合材料试片具体的编号和参数见表 4。

表 4 复合材料试片参数

Table 4 Parameters of composites samples

Sample	Structure of samples	Surface braiding angle/ (°)	Fiber volume fraction/ %
WA 1-1	Three dimensional four-direction braiding	13. 4	45. 44
WA 1-2		13. 4	45. 21
WA 1-3		13. 0	43. 26
WA 2-1		18. 5	45. 65
WA 2-2		18. 5	45. 65
WA 2-3		19. 5	47. 05
WA 3-1		29. 4	51. 41
WA 3-2		27. 2	49. 00
WA 3-3		27. 2	49. 93
WB1	Three dimensional	14. 3	48. 91
WB2	five-direction braiding	15. 7	45. 31
WB3		15. 7	45. 42
WC1	Lam inas (34 layer s)		50. 52
WC2			51. 03
WC3			51. 07

3.3 试验条件

采用三点弯曲测试方法。在 AG-250KNE 型万能材料试验机上进行试验。测定弯曲强度和弯曲载荷-挠度曲线, 加载速度为 2mm/min, 跨距为 80mm。

3.4 测试结果

试验所得结果见表 5 和表 6。

图 4 为载荷-挠度曲线图, 它显示了材料结构破坏积累的过程。由图可看出 5 条曲线的初始阶段均表现为明显的线性, 但随着载荷量的增加编织角较大的 WA3, WA 2 组试件开始出现非线性, WA 1, WC, WB 组的线性仍较明显直到试件破坏。

在纤维体积含量相近的情况下, 五组试件承受的最大载荷量有所不同, 弯曲强度有所不同, 其中 WA 1 组试件编织角最小, 承受的破坏载荷量最大, 弯曲强

度最大; 其次为三维五向的 WB 组试片, 然后是铺层的 WC 组试片, 编织角最大的 WA3 组试片弯曲强度最小。

表 5 各组试件弯曲性能数据 (平均值)

Table 5 Bending properties (average)

Sample	Breaking load/ kN	Maximum flexibility/ mm	Bending strength/ MPa	Bending modulus/ GPa
WA 1	4. 0917	2. 84	829. 03	67. 50
WA 2	2. 5489	2. 22	475. 83	57. 34
WA 3	1. 7898	3. 97	313. 11	39. 53
WB	3. 9388	2. 94	765. 56	67. 10
WC	3. 3854	3. 08	636. 27	48. 85

表 6 弯曲性能离散系数 (%)

Table 6 Discrete coefficient of bending properties (%)

Sample	Strength	Modulus
WA 1	7. 81	3. 02
WA 2	11. 89	13. 19
WA 3	2. 39	6. 37
WB	11. 67	12. 08
WC	4. 57	7. 91

由表 5 可看出三维编织试件的弯曲强度随着试件结构的不同具有很大的变化范围。在纤维体积含量相近的情况下, 编织角最小的 WA 1 组试件弯曲强度最大, 好于铺层结构和三维五向结构的试件。通过编织结构的改变, 可以有效的调节弯曲性能值, 因而设计空间具有很大的余量。

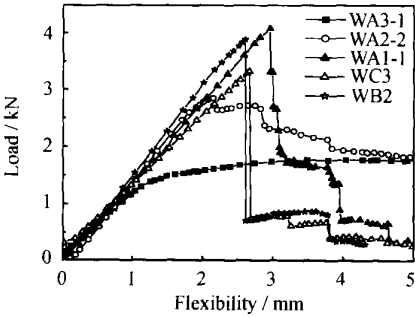


图 4 载荷-挠度曲线
Fig. 4 Load-flexibility curve

图 5 表明了试件弯曲强度随编织角变化的情况。随着试件编织角度的增大, 弯曲强度逐渐降低。编织角在 12 左右时弯曲强度可达到 850MPa, 当编织角为 30 左右时, 弯曲强度为 300MPa 左右, 通过改变编织角这个主要参数, 也可有效地达到根据需要设计弯曲强度的目的。

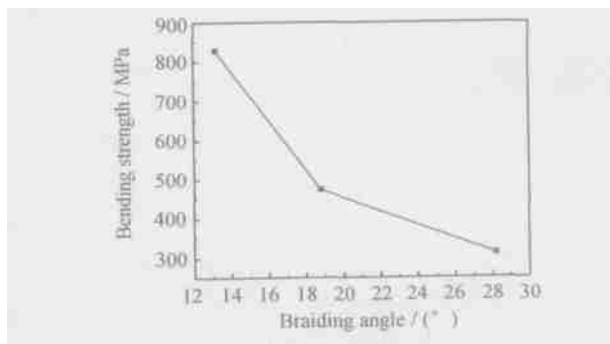


图5 编织角对弯曲强度的影响

Fig. 5 Influence of braiding angles on bending strength

图6为WA1, WA3, WC组试件破坏后的侧面照片。由图可见, 编织角小的(WA1)脆性断裂, 编织角大的(WA3)发生了塑性变形, 而铺层试样(WC)发生层间破坏, 导致材料失效。

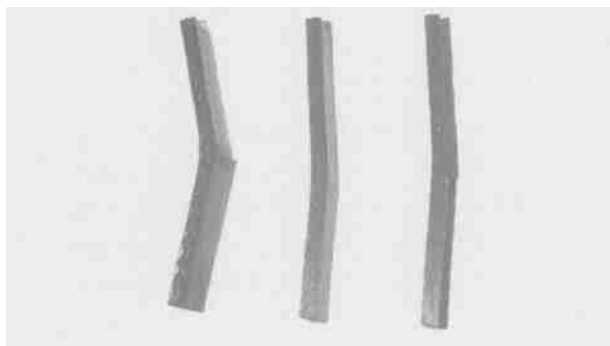


图6 三种材料的弯曲破坏模式

(a) WA1; (b) WA3; (c) WC

Fig. 6 Bending failure conditions of different samples

(a) WA1; (b) WA3; (c) WC

3.5 结果讨论与分析

由表5可看出, 三维四向结构中, 在纤维体积含量相近的情况下, 随着编织角的增大, 试件弯曲强度和模量降低。同时编织角小的三维四向结构试件的弯曲强度和模量均高于铺层结构试件。

试件在弯曲载荷作用下, 受力状态较为复杂, 上底面受压缩应力、下底面受拉伸应力。当垂直于0°方向加弯曲载荷作用时, 相当于试件在0°方向同时承受拉伸和压缩载荷。由拉伸试验部分的结果讨论可知, 试件编织角小, 试件内部在编织方向纱线的取向度高, 在编织方向的承载能力强, 表现为拉伸和压缩强度、模量均较高。编织角大, 试件内部沿编织方向的纱线取向度低, 纱线在编织方向的承载能力较差, 表现为拉伸、压缩的强度和模量较低。由此可以得出试件在承受弯曲载荷作用时, 编织角小的试件弯曲强度和模量较高, 编织角大的试件弯曲强度和模量较低。

当试件所载荷达到一定程度时, 试件的受压面首先发生破坏, 表现为部分基体材料的变形超过线性阶段, 发生碎裂, 纤维也部分发生弯曲变形; 随后随着变形量的增大, 受拉面开始出现纤维断裂。编织角小的试件承压能力强但在小变形下就发生断裂; 编织角大的试件, 承压能力弱, 材料在大变形下发生破坏。

4 结论

(1) 三维编织复合材料的力学性能具有可设计性, 可根据具体要求, 通过改变编织角等结构参数进行设计, 无论是强度值还是模量值都可有很大的变化范围。

(2) 三维四向编织复合材料中编织角的大小直接影响到复合材料的力学性能。在纤维体积含量一定的情况下, 随着编织角的增大, 材料的拉伸、弯曲强度均减小。编织角小的材料变形能力差, 试件应力-应变曲线表现为明显的线性, 随着编织角度的增大, 应力-应变曲线由线性向非线性过度。

(3) 纤维体积含量基本相同的情况下, 编织角较小的三维编织复合材料的拉伸、弯曲性能要优于铺层结构。

(4) 纤维体积含量基本相同的情况下, 三维五向编织复合材料由于在预制件成型方向加入了加强纱线, 使它的拉伸、弯曲强度、模量均高于其它组试件, 但脆性也明显增加。

参考文献

- [1] 吴德隆, 沈怀荣. 纺织结构复合材料的力学性能 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [2] BROOKSTEIN D. Braiding of a three-dimensional article through select fiber placement [P]. USA Patent: 5123458, 1994 - 10-23.
- [3] MCCONNELL R, POPPER P. Complex shaped braided structures [P]. USA Patent: 4719837, 1988-01-19.
- [4] 李嘉禄, 肖丽华. 立体多向编织结构对复合材料性能的影响 [J]. 复合材料学报, 1996, (3): 71-75.
- [5] 修英姝, 陈利. 三维编织复合材料制件的细观单胞分析 [J]. 复合材料学报, 2003, (4): 63-66.
- [6] 陈利. 三维编织中纱线的运动规律 [J]. 复合材料学报, 2002, (2): 71-74.
- [7] 李嘉禄, 刘谦. 三维编织复合材料中纤维束走向的研究 [J]. 纺织学报, 1999, (4): 7-10.
- [8] 卢子兴, 冯志梅. 编织复合材料拉伸力学性能的研究 [J]. 复合材料学报, 1999, (3): 129-134.

基金项目: 天津市自然科学基金 (023604811)

收稿日期: 2004-07-28; 修订日期: 2004-08-18

作者简介: 李嘉禄 (1947-), 男, 硕士, 教授, 主要从事三维纺织复合材料的研究工作, 联系地址: 天津市河东区程林庄路63号天津工业大学复合材料研究所 (300160)。