

碳纤维单轴向缝编织物及其复合材料性能影响研究

颜鸿斌 季雪松 刘胜利

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 以碳纤维单轴向缝编织物为研究对象,开展了树脂体系及其复合工艺、织物结构参数和碳纤维种类对碳纤维单轴向缝编织物使用工艺性及其复合材料主要力学性能的影响研究。结果表明:经向碳纤维和衬纬材料的种类及其面密度等结构参数对织物弯曲硬挺度和织物单向渗透率的影响规律基本相似;无论是碳纤维缝编织物单向渗透率还是复合材料的主要力学强度,真空吸附工艺中,基于 TDE-85 环氧树脂的自制 6# 环氧树脂体系均明显优于市售用基于双酚 A 环氧树脂的环氧树脂体系;采用 610A 树脂预浸料工艺、或经向碳纤维的适当展纱、或干喷湿法纺丝技术制备的碳纤维,均有利于进一步提高碳纤维单轴向缝编织物复合材料的主要力学性能。这为碳纤维缝编织物结构设计、主要原材料选择、制备工艺、配套树脂体系及其复合工艺等选择优化提供一些参考,为碳纤维缝编织物、尤其是为国产碳纤维缝编织物的制备和推广应用奠定了良好基础。

关键词 碳纤维,单轴向缝编织物

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.02.008

Influence on Performance of Carbon Fiber Uniaxial Stitch Bonded Fabrics and Its Composite

YAN Hongbin JI Xuesong LIU Shengli

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract In this paper, the influence of carbon, fabric structure, resin and processing on the properties of carbon fiber uniaxial stitch bonded fabrics and its composite was studied. The results show that the fabric structural parameters, such as the types and the area density of warp carbon and weft material, have the same influence on the bending stiffness and the unidirectional permeability coefficient of the fabric. The No.6 epoxy resin compound based on TDE85 has obvious advantages than the other epoxy resin compounds based on Bisphenol A, on improving the unidirectional permeability coefficient of the fabric and the mechanical strength of the fabric composite. The mechanical strength of the fabric composite benefit from the process of hot-melt prepreg based on 610A resin, spreading of the warp carbon fiber and the carbon fiber of dry-jet-wet electrospinning process.

Key words Carbon fiber, Uniaxial stitch bonded fabric

0 引言

缝编织物是一种有效的预设计增强材料,它能够最大限度地利用材料中每一个组成部分的优良性能,沿厚度方向的增强能够有效提高复合材料的损伤容限和面外性能^[1]。因此,缝编织物增强复合材料被广泛地应用于航空航天结构件、交通运输车辆、船舶、

涡轮叶片和各种复杂形状的复合材料构件^[2]。对于缝编织物结构及其复合材料性能的实验及理论研究已有许多^[3-11],但大多以多轴向缝编织物或玻璃纤维缝编织物为主,对碳纤维缝编织物、尤其是单轴向碳纤维缝编织物的结构及其复合材料性能的研究仍少见。本文以单轴向碳纤维缝编织物为研究对象,重

收稿日期:2016-10-22

基金项目:科技部 863 计划资助项目(2012AA03A201)

第一作者简介:颜鸿斌,1972 年出生,高级工程师,主要从事高分子材料及树脂基复合材料研究。E-mail:hongbin_y@sina.com

点开展了树脂体系及其复合工艺、织物结构参数和碳纤维种类对单向碳纤维缝编织物及其复合材料性能的影响研究,以期能对碳纤维缝编织物结构的优化设计提供指导,并为国产碳纤维缝编织物的推广应用奠定良好基础。

1 实验

1.1 主要原材料

碳纤维:中复神鹰碳纤维有限责任公司碳纤维 SYT-45-12K,日本东丽碳纤维 T700-12K,河南永煤碳纤维有限公司 MT700C-12K,恒神纤维材料有限公司 HF30-12K,中国石油吉林石化公司 JHT45-12K。

单向碳纤维缝编织物:航天长征睿特科技有限公司。

真空灌注工艺用树脂体系:6#环氧树脂体系(TDE-85 环氧树脂+胺类固化剂)^[12]、8#环氧树脂体系(TDE-85 环氧树脂+酸酐类固化剂+促进剂)^[12]、陶氏化学 760E/766H 环氧树脂体系;巴陵石化 F175/HD501 环氧树脂体系。

热熔预浸料用中温固化环氧树脂体系:601A 环氧树脂体系,自制。

1.2 性能测试

弯曲硬挺度:采用莱州市电子仪器有限公司生产的 LLY-01 电子硬挺度仪参照 GB/T7689.4—2001 测试织物弯曲硬挺度。织物树脂渗透率参考文献

[13]测试织物单向渗透率。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维单向缝编织物结构参数对织物及其复合材料的影响

织物弯曲硬挺度是影响织物的铺覆操作工艺的重要性能。织物树脂渗透率是织物本身的一个重要特性,直接影响到织物的树脂复合工艺性能,是织物在复合材料领域应用的一个重要指标。本节主要采用两种典型的干喷湿法纺丝工艺制造的碳纤维作为原材料,研究分析了碳纤维单向缝编织物材料结构参数对与织物树脂渗透率、铺覆工艺性(弯曲硬挺度)和对应复合材料主要力学性能的影响。

表1数据显示,碳纤维单向缝编织物弯曲硬挺度与织物材料结构密切相关。(1)碳纤维原材料品种影响明显,采用 T700 织造的碳纤维单向缝编织物的弯曲硬挺度明显高于国产 SYT45 碳纤维单向缝编织物的弯曲硬挺度;(2)经向碳纤维面密度和/或衬纬材料面密度越大,缝编织物的弯曲硬挺度越高;(3)碳纤维作为衬纬材料的碳纤维单向缝编织物的弯曲硬挺度明显大于玻璃纤维作为衬纬材料的碳纤维单向缝编织物的弯曲硬挺度;(4)经向碳纤维展纱后,其面密度降低,所制备的碳纤维单向缝编织物的弯曲硬挺度明显减小。

表1 织物结构参数对织物弯曲硬挺度的影响¹⁾

Tab.1 Influence of structural parameters on the bending stiffness of the fabric

织物结构参数		国产 SYT45 碳纤维		进口 T700 碳纤维	
经向碳纤维面密度 /g·m ⁻²	衬纬材料	正面弯曲硬挺度 /mN·m	反面弯曲硬挺度 /mN·m	正面弯曲硬挺度 /mN·m	反面弯曲硬挺度 /mN·m
216	8g/m ² 碳纤维毡	3.003	2.423	4.596	3.302
216	8g/m ² 玻纤纬	1.714	1.523	3.654	2.484
216	32g/m ² 玻纤纬	1.897	1.544	4.280	3.409
216	50g/m ² 玻纤网布	-	-	4.426	3.672
216	32g/m ² 玻纤毡	3.413	2.407	4.802	3.029
146(展纱)	8g/m ² 玻纤纬	-	-	2.019	0.805
216	8g/m ² 碳纤维	-	-	4.836	3.125

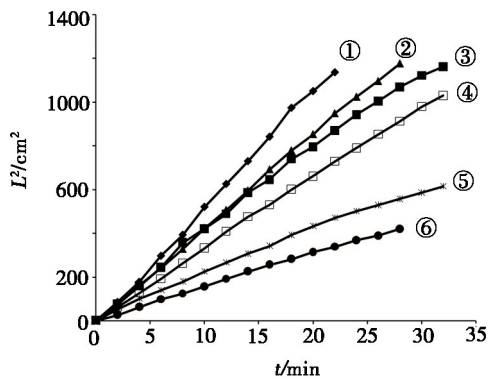
注:1)经向碳纤维朝上时测试结果为正面弯曲硬挺度。

图1结果表明:在其他结构参数相同的情况下,(1)T700 碳纤维缝编织物的单向渗透率(图1中直线斜率)大于 SYT45 碳纤维缝编织物的单向渗透率;(2)衬纬材料面密度越大,缝编织物的单向渗透率越高;(3)经向碳纤维展纱后,其面密度降低,所制备的碳纤维单向缝编织物的单向渗透率明显减小;(4)碳纤维作为衬纬材料的碳纤维单向缝编织物的单向渗透率大于玻璃纤维作为衬纬材料的碳纤维单向缝编织物

的单向渗透率;(5)纤维毡作为衬纬材料的碳纤维单向缝编织物的单向渗透率大于纤维纱作为衬纬材料的碳纤维单向缝编织物的单向渗透率。

结合表1和图1分析结果,可以看出,碳纤维单向缝编织物结构参数对织物弯曲硬挺度和织物单向渗透率的影响规律或趋势基本相似。这表明碳纤

维单轴向缝编织物弯曲硬挺度和织物单向渗透率之间似乎存在一定程度的对应关系。不同织物结构参数下的织物树脂浸渍过程照片见图2。



①T700(玻纤毡 32 g/m²);②SYT45(玻纤毡 32 g/m²);
③SYT45(碳纤毡 8 g/m²);④SYT45(玻纤纬 32 g/m²);
⑤SYT45(玻纤纬 8 g/m²);⑥T700(展纤 8 g/m²玻纤纬)。

图1 织物结构参数对单向渗透性能的影响(35℃)

Fig.1 Influence of the fabric structural parameters on the unidirectional permeability

从表2中数据可以看出,碳纤维单轴向缝编织物增强复合材料的主要力学性能与织物材料结构密切相关。(1)碳纤维原材料品种影响明显,T700碳纤维单轴向缝编织物增强复合材料的拉伸强度高于SYT45碳纤维单轴向缝编织物增强复合材料的拉伸

强度,但上述两种碳纤维织物增强复合材料的压缩强度则基本相当;(2)在其他结构参数相同的情况下,碳纤维单轴向缝编织物增强复合材料的拉伸和压缩强度随衬纬材料面密度的减小或经向碳纤维面密度的增加而提高;(3)纤维毡作为衬纬材料的碳纤维单轴向缝编织物增强复合材料的拉伸和压缩强度低于纤维纱作为衬纬材料的碳纤维单轴向缝编织物增强复合材料的拉伸和压缩强度;(4)采用经向碳纤维展纱后制造的碳纤维单轴向缝编织物,尽管其经向碳纤维面密度减小了,但该织物增强复合材料的拉伸和压缩强度反而有所提高。



图2 不同织物结构参数下的织物树脂浸渍过程照片

Fig.2 Photo of resin infusion process of different fabric structural parameters

表2 织物结构参数对其复合材料主要力学性能的影响(均采用6#环氧树脂体系)

Tab.2 Influence of structural parameters on the main mechanical properties of the fabric composite (No.6 epoxy resin compound)

碳纤维	经向面密度/g·m ⁻²	衬纬材料	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	压缩强度/MPa	压缩模量/GPa
SYT45-12K	216	32g/m ² 玻纤毡	1184	92.3	692	93.6
	216	32g/m ² 玻纤纬	1250	105	763	121
	216	8g/m ² 玻纤纬	1640	128	843	138
	216	8g/m ² 碳毡	1290	106	784	120
	420	8g/m ² 碳毡	1790	145	774	149
T700-12K	216	32g/m ² 玻纤毡	1552	95.9	716	98.1
	216	32g/m ² 玻纤纬	1680	121	748	118
	216	16g/m ² 玻纤纬	-	-	806	106
	216	8g/m ² 玻纤纬	1782	105.8	814	131
	146(展纱)	8g/m ² 玻纤纬	1910	97.7	862	113

2.2 树脂体系及其复合工艺对碳纤维单轴向缝编织物及其增强复合材料的影响

树脂体系是碳纤维缝编织物在复合材料领域应用的一个重要配套材料,其性能直接影响到织物的树脂复合工艺性能和织物增强复合材料的主要力学性

能。本节主要比较研究了两类低黏度环氧树脂体系及其真空吸附工艺、一种热熔预浸料树脂体系及其热压罐成型工艺对碳纤维单轴向缝编织物及其增强复合材料的影响。

图3结果显示,6#环氧树脂体系起始黏度较市售

通用环氧树脂体系低 50%，升至 1~1.5 Pa·s 的操作寿命则长 50%。图 4 数据则显示，6# 环氧树脂体系针对碳纤维单向缝编织物的单向渗透率（图 2 中直线斜率）也远远大于上述市售通用环氧树脂体系之相应值。表明 6# 环氧树脂体系具有相对更好的真空吸附复合工艺性能。

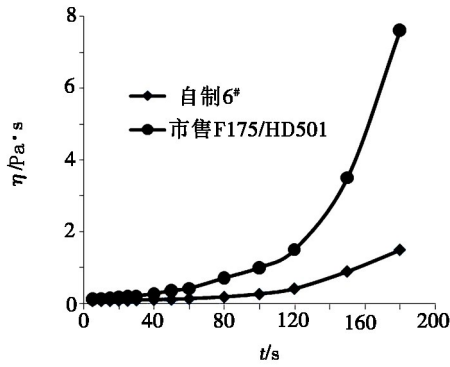


图 3 真空吸附工艺用两类树脂体系黏度-时间曲线
Fig. 3 Viscosity vs time curve of the resin

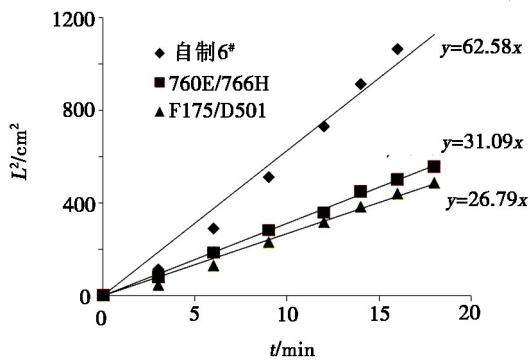
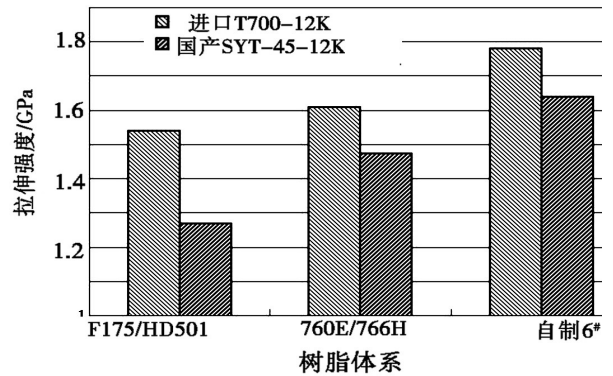


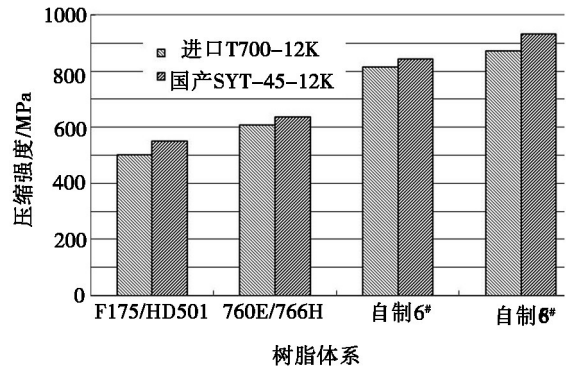
图 4 不同树脂体系浸渍距离之平方-浸渍时间曲线
Fig. 4 Relationship of flow distance and time

图 5 数据表明，真空吸附工艺树脂体系对碳纤维单向缝编织物复合材料强度影响较大。（1）采用自制环氧树脂体系制备的碳纤维单向缝编织物复合材料的拉伸和压缩强度明显大于上述市售通用环

氧树脂体系之相应值；（2）T700 碳纤维单向缝编织物增强复合材料的拉伸强度高于 SYT45 碳纤维单向缝编织物增强复合材料的拉伸强度，但其压缩强度则低于 SYT45 之相应值。



(a) 拉伸强度



(b) 压缩强度

图 5 不同真空吸附工艺树脂体系对碳纤维单向缝编织物复合材料强度的影响

Fig. 5 Influence of VARI resin compounds on the mechanical strength of the fabric composite

上述结果表明，自制环氧树脂体系对碳纤维单向缝编织物而言，不仅真空吸附复合工艺性能优异，还能显著提高其复合材料的强度、尤其是压缩强度。

表 3 不同树脂体系及其复合工艺对国产碳纤维单向缝编织物增强复合材料主要力学性能的影响

Tab. 3 Influence of resin and its process on the main mechanical properties of the fabric composite

国产碳纤维 SYT45 织物增强复合材料		拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	压缩强度 /MPa	压缩模量 /GPa	纵横剪切强度 /MPa	纵横剪切模量 /GPa
6#环氧树脂真 空吸附工艺	2013 批	1640	128	843	138	62.9	4.2
	2014 批	1740	105	939	110	-	-
601A 环氧树脂预 浸料热压罐工艺	2014 批	1950	125	1050	120	63.0	4.64
性能提高率/%	(2014 批)	12.1	19.0	11.8	9.1	-	-

表 3 数据表明，与 6# 环氧树脂真空吸附工艺比较，采用 610A 树脂预浸料工艺能进一步提高国产碳纤维材料工艺

http://www.yhclgy.com 2017 年 第 2 期

纤维单轴向缝编织物的主要力学性能。

2.3 经向碳纤维种类对碳纤维单轴向缝编织物增强复合材料的影响

一般而言,溶液湿法纺丝技术制备的碳纤维具有规整的表面沟槽结构,有利于碳纤维树脂基复合材料形成良好的界面结构,而干喷湿法纺丝技术一方面由于纺丝速度快,容易实现产品的低成本化,另一方面干喷湿法纺丝技术最终制备的碳纤维因表面光滑无沟槽,外力作用时无应力集中,碳纤维自身的性能得到提高,但是却导致与树脂的机械啮合力下降,接触面积也降低,不利于界面结合力的提高。

图6数据表明,与溶液湿法纺丝技术制备的碳纤维(HF30、JHT45和MT700C)比较,采用干喷湿法纺丝技术制备的碳纤维(T700和SYT45)织造的单轴向缝编织物具有相对更好的复合材料拉伸和压缩强度。这可能是溶液湿法纺丝技术制备的碳纤维在缝编织物织造过程中更容易产生工艺损伤所致。

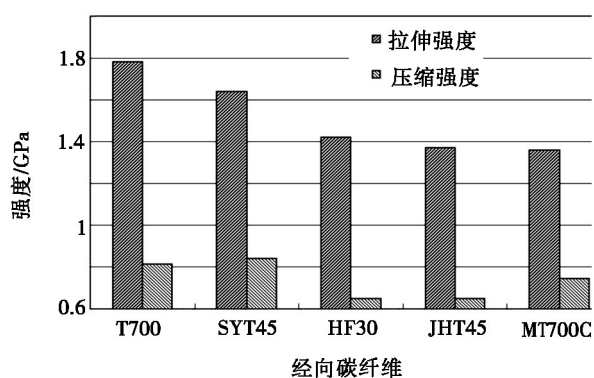


图6 碳纤维种类对单轴向缝编织物复合材料主要力学强度的影响(均采用6#环氧树脂体系)

Fig.6 Influence of carbon fiber on the main mechanical strength of the fabric composite(No.6 epoxy resin compound)

3 结论

(1)碳纤维缝编织物中经向碳纤维和衬纬材料的种类及其面密度对织物的铺覆和树脂浸渍复合使用工艺性能影响较大,一般情况下,对织物弯曲硬挺度和织物单向渗透率的影响规律基本相似。

(2)不同真空吸附工艺树脂体系对碳纤维缝编织物单向渗透率及其复合材料的主要力学性能影响较大,采用自制6#环氧树脂体系之相应值明显大于采用上述市售通用环氧树脂体系之相应值。

(3)与6#环氧树脂真空吸附工艺比较,采用610A树脂预浸料工艺能进一步提高碳纤维单轴向缝编织物的主要力学性能。

(4)经向碳纤维的适当展纱,有利于提高碳纤维单轴向缝编织物复合材料的主要力学性能,但不利于

树脂浸渍,该碳纤维单轴向缝编织物的单向渗透率明显减小。

(5)碳纤维缝编织物中的碳纤维需经受编织、铺放、树脂浸渍复合等工艺过程,其使用工艺性的优劣直接影响复合材料的性能以及碳纤维本征特性的充分发挥。与溶液湿法纺丝技术制备的碳纤维(HF30、JHT45和MT700C)比较,采用干喷湿法纺丝技术制备的碳纤维(T700和SYT45)织造的单轴向缝编织物具有相对更好的复合材料拉伸和压缩强度。

参考文献

- [1] BENSON DEXTER H, HASKO GREGORY H. Mechanical properties and damage tolerance of multiaxial warp-knit composites [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(3): 367-380.
- [2] 谈昆仑,段跃新,杨乃宾. 碳纤维经编织物在大飞机结构上的应用[C]//杜善义,肖加余. 复合材料创新与可持续发展. 第十六届全国复合材料会议论文集. 北京:中国科学技术出版社, 2010: 1229-1233.
- [3] LOMOV S V, BARBURSKI M, STOILOVA T, et al. Carbon composites based on multiaxial multiply stitched performs, Part 3: Biaxial tension, picture frame and compression tests of the performs [J]. Composites Part A, 2005, 36(1): 1188-1206.
- [4] DRANSFIELD K, JAIN L, MAI Y W. On the effects of stitching in CFRPs I: mode I delamination toughness [J]. Compos Sci Technol, 1998, 58(6): 815-827.
- [5] LOMOV S V, VEPOEST I, BARBURSKI M, et al. Carbon composites based on multiaxial multiply stitched performs, Part 2: KES-F characterization of the deformability of the performs at low loads [J]. Composites Part A, 2003, 34(4): 359-370.
- [6] 祝君军,段跃新,等. 碳纤维经编织物定型参数及渗透特性[J]. 复合材料学报, 2012, 29(3): 42-48.
- [7] 韩帅,段跃新,等. 不同针织结构经编碳纤维复合材料弯曲性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(5): 52-57.
- [8] 江丽华,李炜. 轴向经编织物的拉伸性能及其影响因素研究[J]. 纺织科技进展, 2006(1): 53-55.
- [9] 李龙,段跃新. 双轴向经编织物 T700/BMI6421 复合材料力学性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(6): 92-97.
- [10] 蒋金华,赵兆,陈南梁,等. 捆绑纱对预定向经编织物性能的影响[J]. 玻璃纤维, 2013(1): 1-6.
- [11] 李丽英,孟松鹤. 定型剂对单轴向经编织物复合材料力学性能影响的试验研究[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 304-316.
- [12] 颜鸿斌. 一种碳纤维织物增强复合材料主梁帽及其制造方法[P]. 发明专利申请号 CN 201410215962. 9.
- [13] 颜鸿斌,安明康,等. 风机叶片用缝编织物渗透性能评估[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2): 101-104.