

引文格式: 杨龙英, 余宁. 复合材料缝合预制体的研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(15): 112-117.

YANG Longying, YU Ning. Study on stitched composite material preform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(15): 112-117.

复合材料缝合预制体的研究

杨龙英, 余宁

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 缝合技术作为复合材料预制体成型的主要方法,在航空领域应用广泛。临缝、链式缝合和锁式缝合是缝合技术中较为常用的3种缝合方式,不同的缝合方式对缝合复合材料预制体的渗透特性和压缩特性产生的影响不同。同时缝合参数包括针距和行距对缝合复合材料预制体的渗透特性和压缩特性也会产生不同的影响。本文通过试验分别研究了临缝、链式缝合和锁式缝合3种缝合方式以及不同的针距和行距对缝合复合材料预制体渗透特性和压缩特性的影响。试验结果表明,缝合预制体的渗透率均大于未缝合织物的渗透率,且链式>锁式>临缝,链式缝合预制体随着缝合针距的增加,渗透率显著增大,临缝预制体的渗透率随行距的增加而减小;缝合预成型体厚度压缩率的大小关系为:临缝>链式>未缝合;链式缝合预制体的厚度压缩率随着缝合密度的增加而增加;临缝的压缩率随着针距的增大而减小。

关键词: 复合材料; 预制体; 缝合方式; 缝合参数; 渗透特性; 压缩特性

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.15.112



杨龙英
高级工程师, 硕士。

复合材料预制体是指由连续长丝纤维或者短切纤维通过缝合、编织或树脂等有机物复合等方法制成的具有特定结构的纤维预成形体^[1]。

缝合技术作为复合材料预制体成型的主要方法,在航空航天界应用广泛。缝合是采用缝合线将二维织物织构成三维立体织物或使织物连接成整体结构的技术^[2]。缝合技术不仅克服了复合材料层间强度弱、抗冲击性能差等缺点,也减少了金属连接件的使用,起到显著的减重效果^[3]。根据缝合线在预制体中的状态,缝合方式分为临缝、锁式缝合和链式缝合3种,如图1所示^[4]。缝合时需设置缝合压力、针距和行距等参数,不同的缝合方式和缝合参数对预制体的性能会产生不同的影响。随着缝合技术的推广,国内众多企业都引进了先进的缝合设备,在缝合复合材料预制体方面开展研究。这些研究主要集中在缝合预制体的制备,如刘苏骅等^[5]研究临缝复合材料预制体的成型过程,分析了缝合参数及缝合对复

合材料力学性能的影响;姬灵超等^[6]对碳/碳复合材料预制体单边双针缝合工艺进行了研究,并对缝合过程中出现的问题进行了优化改进;封桥桥等^[7]开展了复合材料预制体单边弯针缝合装备技术的研究;吴刚等^[8]对不同缝合方式的工艺特点及适用范围进行了分析,并探讨缝合技术在纤维织物预制体研制中的应用及影响。目前,国内外对缝合预制体的渗透率研究较少,吴晓青等^[9]研究了缝合预制体在RTM中的渗透性、缝针型号、缝合参数对渗透率的影响,以及铺层方向和铺层密度对横向渗透率的影响;Lundström^[10]对缝合后的多向经编织物的渗透率进行了研究。

本文对比研究了临缝、锁式缝合和链式缝合3种不同的缝合方式对缝合复合材料预制体的渗透和压缩

特性的影响,同时研究了不同的缝合参数包括针距和行距对缝合复合材料预制体的渗透和压缩特性的影响,由此确定缝合方式和缝合参数对渗透特性和压缩特性的影响规律。

1 试验

1.1 预制体的制备

试验件采用 T700-12K 双向经编织物(南京玻璃纤维研究院)铺叠,铺层角度为 $[45/-45/0/90]_{4s}$,共 16 层。分别采用锁式缝合、链式缝合和临缝 3 种缝合方式进行缝合,缝合线为 Kevlar-29(美国杜邦公司),缝合针距分别为 4 mm、6 mm、7 mm 和 8 mm,缝合行距分别为 10 mm、15 mm 和 20 mm。

1.2 试验方法

试验为测试预制体的渗透特性和压缩特性,将预制体置于真空袋中,记录不同压力下的预制体的厚度变化,从而表征预制体的压缩特性,图 2 为预制体压缩特性测试装置示意图。测量真空下树脂充模流动过程中,树脂(6421 双马树脂,中航复合材料有限公司)浸润预制体距离随时间的变化表征预制体的渗透特性,图 3 为带可视窗口的预制体渗透特性测试模具。

2 结果与讨论

2.1 缝合方式对预成型体影响

2.1.1 缝合方式对预制体渗透特性的影响

测试未缝合、锁式、链式和临缝复合材料预成型体的渗透率,缝合参数为 6 mm(针距)×10 mm(行距),结果如图 4 所示。

3 种缝合方式缝合的预制体的渗透率均大于未缝合织物的渗透率。这是由于缝合线的引入,一方面使面内纤维束间距增大,树脂流动通道扩大而流速增加;另一方面在厚度方向上引入额外的流道,加速了树脂在厚度方向上的渗透^[11]。不同缝合方

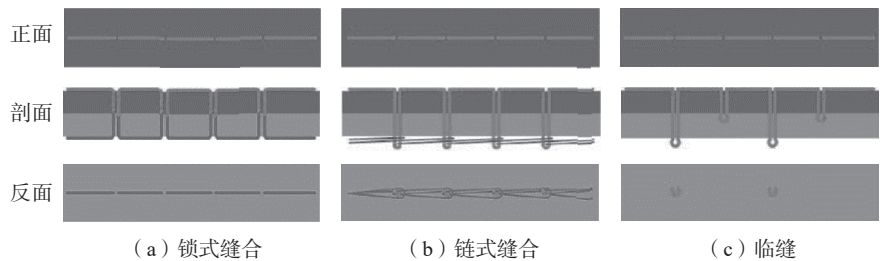


图 1 3 种缝合方式^[4]

Fig.1 Three stitching ways^[4]

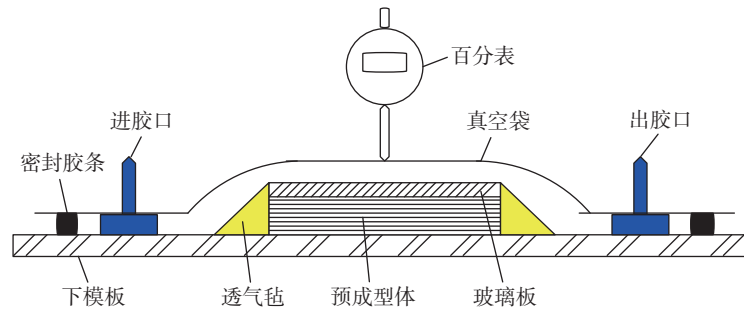


图 2 预制体压缩特性测试装置

Fig.2 Preform compression characteristic test device

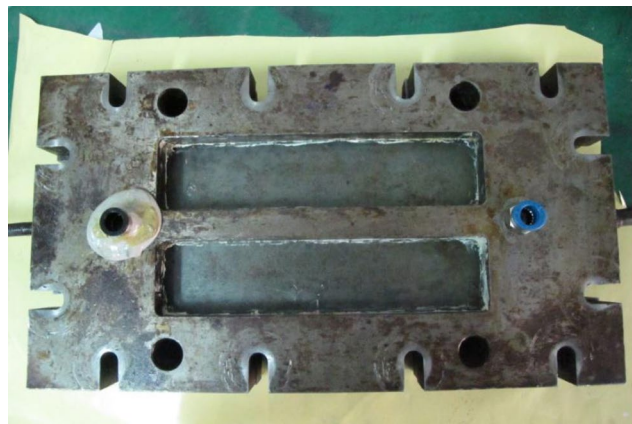


图 3 带可视窗口的织物渗透率测试模具

Fig.3 Fabric permeability test mold with visual window

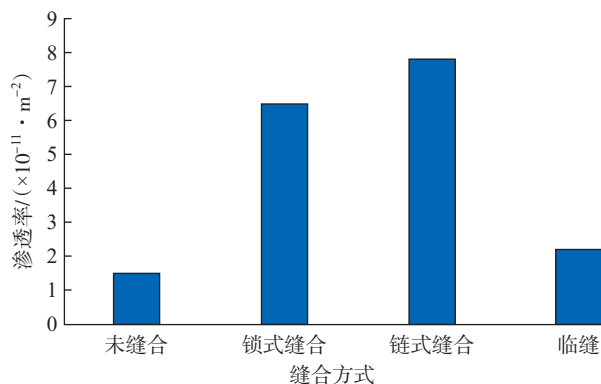


图 4 缝合方式对预制体渗透率的影响

Fig.4 Effect of stitching ways on permeability of stitched preform

式的渗透率提高幅度不同,锁式和链式缝合提高幅度比临缝的大,这与缝合线在织物表面分布状态(图5)和缝合张力密切相关。

链式缝合与锁式缝合预成型体在受压前,缝合线均匀地分布在织物表面,同时缝合张力的存在进一步增大纤维束间的间距和树脂流动的通路,而且链式缝合预制体背面形成线环(图5(a)),缝合线自身厚度大,在表面会形成树脂额外的流道^[12],因而渗透率最高。如图6所示,预制体厚度方向的缝合线上有大量树脂,链式和锁式缝合的缝合线与树脂结合良好,但锁式缝合预制体在厚度方向的缝合线上树脂较少,因此锁式缝合预

制体缝合线与树脂结合状况不如链式缝合,渗透率较链式缝合差。对于临缝预制体,虽然缝合线的引入增加了树脂流动通道,但是临缝预制体在织物背面的线圈分布杂乱(图5(c)),受压后相互叠压,阻碍了树脂流动,因而渗透率相对较低。

2.1.2 缝合方式对预制体压缩特性的影响

以缝合参数为6 mm(针距)×10 mm(行距)的织物为例,对比研究链式、临缝两种缝合方式对压缩特性的影响,测试结果如表1所示。

压缩量 = $h_{20kPa} - h_{100kPa}$, 压缩率 = $[(h_{20kPa} - h_{100kPa}) / h_{20kPa}] \cdot 100$, 理论纤维体积含量 = $(n \cdot \rho_s) / (h_{100kPa} \cdot \rho_f)$ 。

h_{20kPa} 和 h_{100kPa} 分别为压强 20 kPa 和 100 kPa 时的预制体厚度; n 为层数; ρ_s 为纤维面密度; ρ_f 为纤维体密度。实际厚度为成型后复合材料层板的平均厚度,由实际厚度计算得到的纤维体积分数即为实际纤维体积分数。

缝合预制体厚度压缩率的大小关系为:临缝 > 链式 > 未缝合,且临缝预制体的厚度达到稳定的时间最长。这是由于临缝表面线圈杂乱分布,且发生相互叠压,缝合线自身厚度造成织物厚度的增加量大。此外由于缝合张力为0,织物层间松散不受捆束^[13],可更大程度地被压实。成型后的复合材料层板厚度会发生一定程度的回弹,临缝的回弹量更大,说明树脂浸润过程中,临缝预制体中的纤维协调运动能力强,厚度方向不受缝合线张力的束缚^[14]。成型后的缝合复合材料层板厚度均比未缝合的大,这是由缝合线自身厚度引起的。在层板表面会形成缝合线/树脂层,链式缝合的厚度最大,这是由于缝合线自身厚度大,缝合线张力造成织物中间产生隆起所致。

2.2 缝合参数对预成型体的影响

2.2.1 缝合参数对预成型体渗透

特性的影响

分别测试不同缝合密度的链式、临缝预成型体的渗透率,结果如图7所示(C代表链式缝合,T代表临缝,字母后的前两位数字代表针距,后两位数字代表行距,mm,如T0610代表临缝针距为6 mm,行距为10 mm)。

从图7(a)可以看出,链式缝合

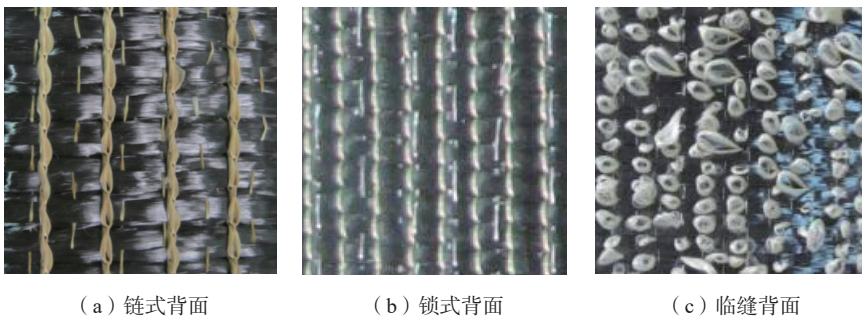


图5 缝合线在预制体表面的分布状态
Fig.5 Distribution of stitch threads on preform surface

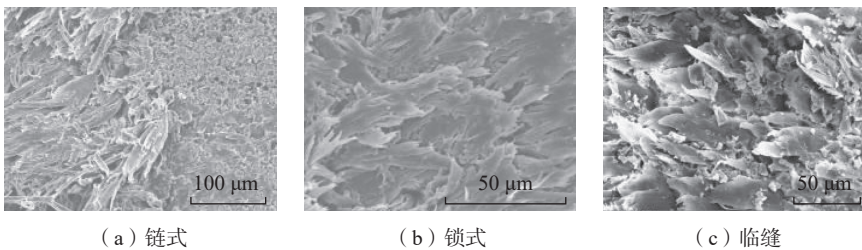


图6 预制体内部缝合线浸润图
Fig.6 Permeability of stitch threads inside preform

表1 不同缝合方式的预制体厚度

Table 1 Thickness of stitched preform by different stitching ways

缝合方式	厚度/mm					压缩率/%	理论纤维体积分数/%	实际厚度/mm	实际纤维体积分数/%
	20 kPa	40 kPa	60 kPa	80 kPa	100 kPa				
未缝合	1.722	1.660	1.632	1.614	1.598	7.20	0.68	1.82	0.59
链式	2.078	2.024	1.976	1.934	1.922	7.51	0.57	2.14	0.51
临缝	1.870	1.780	1.724	1.684	1.658	11.34	0.66	2.01	0.54

预制体的渗透率均高于未缝合织物,随着缝合针距的增加,渗透率显著增大,缝合行距对渗透率的影响很小,增大行距时渗透率基本保持不变。不同缝合方式缝合预制体的金相图如图 8 所示^[15],从图 8 (a)可以看出,在缝合线张力的作用下,纤维束被挤压变形,纤维束间间距增大,树脂的宏观流动增强^[16],同时束内纤维间距减小,毛细作用下的微观流动会减弱,但在树脂流动浸润速度很快的情况下,宏观流动速度加快是渗透率增大的主要原因^[17]。在链式缝合过程中,虽然可以由程序设定同样的缝合张力,但通常缝合线的张力会随针距的增大而增大,导致纤维变形更严重。因此,渗透率也会随着链式缝合的针距增大而增大。缝合行距改变时,纤维束间距、织物结构形貌改变不大,因而对渗透率没有显著影响作用。

图 7 (b) 显示,临缝预制体的渗

透率与未缝合织物相比,一部分有所提高,另一部分下降,渗透率随针距的变化非单调,随行距的增加而减小。主要是两个因素相互竞争的结果,一方面缝合线的引入增大了树脂流动通道(图 8 (b)); 另一方面临缝缝合线圈杂乱的分布在织物表面,并发生相互叠压,干扰树脂均匀流动,使得渗透率下降^[18]。但由于临缝缝合张力为 0,针脚处纤维变形与针距大小没有明显关系,而且线圈的杂乱分布也掩盖针距对渗透率的影响作用。随缝合行距的增加,单位面积上的针眼数量减少,使树脂沿厚度方向上的渗透作用减弱,因而渗透率减小。

综上所述,缝合后预制体的渗透作用增强,缝合密度对于渗透率的影响是通过改变纤维束间距离、树脂流动通道数量和线圈在织物表面分布状态实现的。试验发现针距为 8 mm 时的渗透率最高。

2.2.2 缝合参数对预成型体压缩特性的影响

分别测试不同缝合密度的临缝、链式缝合预制体的压缩特性,结果如表 2 和 3 所示。

由表 2 可以看出,链式缝合预制体在 1 个大气压下的厚度压缩率大多比未缝合织物大,且随着缝合密度的降低,厚度压缩率越来越接近未缝合织物。缝合预制体的最终厚度均大于未缝合织物,且随缝合密度的增加,压实后的预制体厚度也会增加。这是因为缝合线张力的存在会使两针之间的纤维隆起,增加织物内部可压缩的空间^[19]。同时缝合线自身的厚度不可忽略,尤其是链式缝合织物背面形成线环,随着缝合密度的增加,缝合线自身引起的厚度增加会增大,但随着行距的增加,缝合线的这一作用减弱。纤维隆起和缝合线的自身厚度也导致了缝合预制体的最终厚度大于未缝合织物。

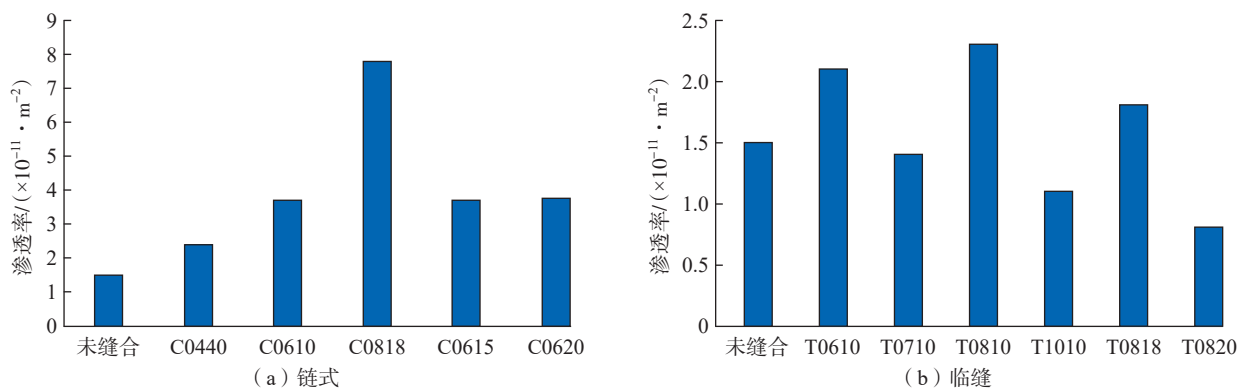


图 7 缝合密度对预制体渗透率的影响

Fig.7 Effect of stitching density on permeability of stitched preform

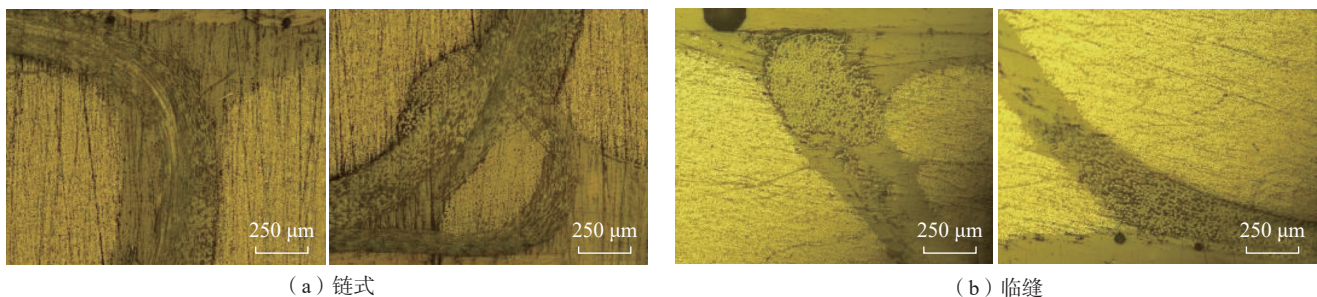


图 8 不同缝合方式缝合预制体的金相图^[15]

Fig.8 Metallographic microcopy of stitched preform with different stitching ways^[15]

表 2 不同缝合密度的链式预制体厚度

Table 2 Thickness of chain stitched preform by different stitching densities

缝合密度	厚度/mm					压缩率/%	理论纤维 体积分数/%	实际厚度/ mm	实际纤维 体积分数/%
	20 kPa	40 kPa	60 kPa	80 kPa	100 kPa				
未缝合	1.722	1.660	1.632	1.614	1.598	7.20	0.68	1.82	0.59
C0410	2.016	1.932	1.870	1.828	1.804	10.52	0.61	2.20	0.50
C0610	2.078	2.024	1.976	1.934	1.922	7.51	0.57	2.14	0.51
C0810	2.054	1.968	1.924	1.888	1.874	8.76	0.58	2.21	0.49
C0615	2.006	1.950	1.918	1.882	1.868	6.88	0.59	2.08	0.53
C0620	1.954	1.922	1.890	1.858	1.842	5.73	0.59	2.25	0.49

表 3 不同缝合密度的临缝预制体厚度

Table 3 Thickness of Tufting stitched preform by different stitching densities

缝合密度	厚度/mm					压缩率/%	理论纤维 体积分数/%	实际厚度/ mm	实际纤维 体积分数/%
	20 kPa	40 kPa	60 kPa	80 kPa	100 kPa				
未缝合	1.722	1.660	1.632	1.614	1.598	7.20	0.68	1.82	0.59
T0610	1.870	1.780	1.724	1.684	1.658	11.34	0.66	2.01	0.54
T0710	2.002	1.892	1.838	1.802	1.774	11.39	0.62	2.00	0.55
T0810	2.088	1.970	1.906	1.858	1.838	11.97	0.60	1.93	0.57
T1010	1.838	1.770	1.720	1.682	1.664	9.47	0.66	1.92	0.57
T0815	2.190	2.110	2.056	2.018	1.990	9.13	0.55	1.88	0.58
T0820	2.033	1.975	1.927	1.903	1.852	8.90	0.59	1.86	0.59

由表 3 可以看出,临缝预制体在 1 个大气压下的压缩率均大于未缝合织物。针距相差较小时,压缩率基本保持不变,针距增大较多时,压缩率显著减小,这是由于临缝没有缝合张力,不会造成织物隆起,针距的增大会使背面线圈密度减小,减少相互叠压,因而厚度压缩率减小。

3 结论

(1) 链式缝合、锁式缝合和临缝 3 种缝合方式预制体的渗透率均大于未缝合织物的渗透率,且链式 > 锁式 > 临缝。

(2) 缝合预成型体厚度压缩率的大小关系为:临缝 > 链式 > 未缝合。

(3) 对于链式缝合预制体,随着缝合针距的增加,渗透率显著增大;缝合行距对渗透率的影响很小。临

缝预制体的渗透率随针距的变化无明显规律,会随行距的增加而减小。

(4) 链式缝合预制体的厚度压缩率随着缝合密度的增加而增加;临缝的压缩率随着针距的增大而减小。

参考文献

[1] 艾涛,王汝敏. Kevlar 缝合复合材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2005, 19(1): 64-67.
 AI Tao, WANG Rumin. Progress in stitched composites with Kevlar yarns[J]. Materials Review, 2005, 19(1): 64-67.
 [2] 韩雪梅,李嘉禄,焦亚男. 缝合连接三维编织复合材料技术 [J]. 山东纺织科技, 2005, 46(3): 48-49.
 HAN Xuemei, LI Jialu, JIAO Yanan. Technology of stitching joint three-dimensional braided composites[J]. Shandong Textile Science & Technology, 2005, 46(3): 48-49.
 [3] HOSUR M V, ADYA M, VAIDYA U K, et al. Effect of stitching and weave architecture

on the high strain rate compression response of affordable woven carbon/epoxy composites[J]. Composite Structures, 2003, 59(4): 507-523.

[4] 尹昌平,李建伟,刘钧,等. 缝合/RTM 复合材料层合板的力学性能研究 [J]. 材料导报, 2007, 21(11): 136-138.

YIN Changping, LI Jianwei, LIU Jun, et al. Research on mechanical properties of stitched/RTM composite laminates[J]. Materials Review, 2007, 21(11): 136-138.

[5] 刘苏骅,李崇俊,嵇阿琳. Tufting 缝合复合材料预制体的成型与研究进展 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(14): 88-92, 96.

LIU Suhua, LI Chongjun, JI Alin. Manufacture and advances of Tufting composite preform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(14): 88-92, 96.

[6] 姬灵超,董九志,蒋秀明. 碳/碳复合材料预制体单边双针缝合工艺研究及改进 [J]. 纺织器材, 2020, 47(2): 65-68.

Ji Lingchao, DONG Jiuzhi, JIANG Xiuming. Research and improvement of single-side double-needle stitching process for carbon/carbon

- composite preform[J]. *Textile Accessories*, 2020, 47(2): 65–68.
- [7] 封桥桥, 文立伟, 肖军, 等. 复合材料预制品单边弯针缝合装备技术研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(11): 86–94.
- FENG Qiaoqiao, WEN Liwei, XIAO Jun, et al. Research on the technology of single-sided curved needle stitching equipment of the composites preform[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2019(11): 86–94.
- [8] 吴刚, 赵龙, 高艳秋, 等. 缝合技术在复合材料液体成型预制品中的应用研究[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(23/24): 70–72.
- WU Gang, ZHAO Long, GAO Yanqiu, et al. Application research of stitching technology on fabric preform for composites liquid forming[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(23/24): 70–72.
- [9] 吴晓青, 李嘉禄, 刘井红. 缝合预制品在RTM中的渗透性[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(3): 93–97.
- WU Xiaqing, LI Jialu, LIU Jinghong. Permeability of stitched preform in RTM[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(3): 93–97.
- [10] LUNDSTRÖM T S. The permeability of non-crimp stitched fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(12): 1345–1353.
- [11] 简抗抗, 张佐光, 顾轶卓, 等. 不同纤维堆积状态下饱和渗透率实验研究[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(1): 31–36.
- JIAN Kangkang, ZHANG Zuoguang, GU Yizhuo, et al. Experimental research of saturated permeability with different fiber stacking states[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(1): 31–36.
- [12] 张佐光, 李敏, 孙志杰, 等. 单向纤维集束的树脂浸润影响因素[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(10): 934–938.
- ZHANG Zuoguang, LI Min, SUN Zhijie, et al. Factors effecting on the wicking of epoxy resin in capillaries of unidirectional fibre bundles[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(10): 934–938.
- [13] 李晨, 许希武, 汪海. 缝合复合材料层面内力学性能试验与分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(2): 192–197.
- LI Chen, XU Xiwu, WANG Hai. Experiment and analysis on mechanical properties of stitched laminates[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(2): 192–197.
- [14] MOURITZ A P, COX B N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(1): 1–27.
- [15] 杨龙英, 黄当明. 不同缝合方式的缝合复合材料无损检测及微观状态研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2018(5): 96–101.
- YANG Longying, HUANG Dangming. Study of nondestructive testing and microstate of stitched composites with different stitch methods[J]. *Composites science and Engineering*, 2018(5): 96–101.
- [16] 程小全, 酆正能, 赵龙. 缝合复合材料制备工艺和力学性能研究[J]. *力学进展*, 2009, 39(1): 89–102.
- CHENG Xiaoquan, LI Zhengneng, ZHAO Long. Fabricating process and mechanical property research of stitched composite structures[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(1): 89–102.
- [17] 谈昆伦, 刘黎明, 刘千, 等. 缝合对复合材料力学性能的影响[J]. *江苏纺织*, 2012(S1): 32–34, 40.
- TAN Kunlun, LIU Liming, LIU Qian, et al. Effect of stitching on mechanical properties of composites[J]. *Jiangsu Textile*, 2012(S1): 32–34, 40.
- [18] AYMERICH F, PRIOLO P, SUN C T. Static and fatigue behaviour of stitched graphite/epoxy composite laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(6): 907–917.
- [19] 王春敏, 董娟, 董孚允. 缝合复合材料的力学性能[J]. *纤维复合材料*, 2002, 19(1): 18–22.
- WANG Chunmin, DONG Juan, DONG Fuyun. Mechanical properties of stitched composites[J]. *Fiber Composites*, 2002, 19(1): 18–22.

Study on Stitched Composite Material Preform

YANG Longying, YU Ning

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] As the main method of forming composite material preform, the stitching technique has been widely applied in aerospace. There are three different ways of stitching including Tufting, chained stitching and locking-type stitching. Different stitching ways had different effects on the permeability and compressibility of stitched preform. Meanwhile the different stitching parameters such as stitch pitch and stitch spacing also had different effects on the permeability and compressibility of stitched preform. In this article, the effects of three different stitching ways including Tufting, chained stitching and locking-type stitching, as well as different stitch pitch and stitch spacing on the permeability and compressibility of stitched preform were studied and compared by experiments. The test results show that the permeability of stitched preform is greater than that of non stitched fabric, and chained stitching > locking-type stitching > Tufting. The permeability of chained type preform increases significantly with the increase of stitch pitch, the permeability of the Tufting preform decreases with the increase of stitch spacing; The relationship between compressibility of stitched preform is as follows: Tufting > chained stitching > non stitched; The compressibility of chained type preform increases with the increase of stitch density; The compressibility of Tufting preform decreases with the increase of stitch pitch.

Keywords: Composite material; Stitched preforms; Stitching ways; Stitching parameters; Permeability; Compressibility

(责编 晓月)