

引文格式: 圣晓荣, 吕良, 潘利剑, 等. 国产自动铺放干纤维渗透特性试验研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(19): 144–150.

SHENG Xiaorong, LÜ Liang, PAN Lijian, et al. Experimental study on penetration characteristics of domestic automated placement dry fibers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(19): 144–150.

国产自动铺放干纤维渗透特性试验研究*

圣晓荣^{1,2}, 吕良^{1,2}, 潘利剑², 岳广全², 刘卫平³

(1. 东华大学纺织学院, 上海 201620;

2. 东华大学民用航空复合材料协同创新中心, 上海 201620;

3. 中国商飞上海飞机制造有限公司复合材料中心, 上海 200123)

[摘要] 本文对国产自动铺放干纤维的微观结构进行了表征分析, 并与进口材料进行了对比。通过自制玻璃模具, 采用中心注射的方法, 改变国产自动铺放干纤维铺层层数, 利用达西定律计算国产干纤维的渗透率, 探究影响国产干纤维渗透率的因素。结果表明, 国产干纤维在微观形貌上与进口干纤维 TX1100 具有相同的 3 层结构, 国产干纤维网纱层纤维的平均直径为 20 μm , 是 TX1100 的 3 倍; 相同层数时, X 方向的渗透率是 Y 方向的 2 倍左右; 铺层层数增加时, X 、 Y 两个方向的渗透率都增加, Z 方向的渗透很难。牌号为 231016FH 的干纤维渗透率比 231227FH 大, 231016FH 成型后, 复合材料纤维之间排列更紧密。

关键词: 国产干纤维; 渗透率; 自动铺放; 液体成型; 复合材料

中图分类号: V25; TB332

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.19.144

Experimental Study on Penetration Characteristics of Domestic Automated Placement Dry Fibers

SHENG Xiaorong^{1,2}, LÜ Liang^{1,2}, PAN Lijian², YUE Guangquan², LIU Weiping³

(1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China;

3. Composite Center, COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd., Shanghai 200123, China)

[ABSTRACT] The microstructure of domestic automated placement dry fibers was characterized and analyzed, with a comparative analysis against imported materials. Using a self-made glass mold and adopting the central injection method, the number of layers of domestic automated placement dry fibers was varied. Based on Darcy's law, the permeability of domestic dry fibers was calculated, and the factors influencing their permeability were explored. The results indicate that domestic dry fibers share the same three-layer structure in microstructure as the imported dry fiber TX1100. The average diameter of fibers in the mesh layer of domestic dry fibers is 20 μm , three times that of TX1100. At the same layer count, the permeability in the X -direction is approximately twice that in the Y -direction. As the number of layers increases, the permeability in both X and Y directions rises, while penetration in the Z -direction is relatively difficult. Additionally, the permeability of dry fiber brand 231016FH is higher than that of 231227FH, and the fibers in the composite formed by 231016FH are arranged more tightly.

Keywords: Domestically produced dry fibers; Permeability; Automated placement; Liquid molding; Composites

* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3709204)。

干纤维自动铺放真空辅助树脂灌注 (Vacuum assisted resin infusion, VARI) 技术是一种新型的液体成型工艺, 其干纤维带经自动铺放形成干纤维预成型体, 再经树脂浸渍后制成纤维制品^[1-3]。VARI 工艺具有快速成型、运输储存成本低、可实现复杂形状结构制造的特点^[4-5]。目前, 俄罗斯联合飞机制造公司的 MS-21 单通道客机采用了干纤维自动铺放液体成型技术, 制造结构包括机翼、中央翼、壁板和翼梁等部分^[6]。空客公司在 20 世纪 90 年代就已使用液体成型技术制造飞机零部件, 其多个民用飞机项目的碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 部件中, 有相当一部分采用了液体成型技术生产^[7-8]。

Sharma 等^[9]在美国国际机械工程大会和博览会中采用数值分析法总结出渗透率测量方法, 即通道流量法、径向流量法, 以及三维渗透率的测量法, 并通过仿真模拟修正参数, 从而使渗透率测试更准确。Vernet 等^[10]使用黏度 100~200 mPa·s 的硅油、玉米糖浆或其他液体渗透碳纤维织物, 通过分析每组之间的渗透率方差验证试验的可行性。国内关于干纤维预成型体及液体成型组合工艺的研究还处于初始阶段, 尤其是国产干纤维带本身存在很多问题, 比如: 分切过程中容易出现毛刺, 这些毛刺会对后续铺放工艺的稳定性造成干扰; 干纤维铺放过程中, 首层难以与基底保证紧密贴合; 干纤维表面网纱在复合过程中容易出现缺损或脱粘等; 树脂浸润过程的快慢对产品成型质量有很大的影响。因此, 亟须开发出一批国产碳纤维新材料 (C-L196DF) 对标国外干纤维丝束 (PRISM@TX1100, Cytec), 并使其具有良好的渗透特性。

国产干纤维 3 层结构 (热塑性网纱-碳纤维-定型剂) 均处于发展研究阶段, 网纱的直径, 网纱面纤维及碳纤维的径向排布均匀度, 以及定型剂含量是影响干纤维渗透特性的主要因素^[11-13]。本文通过对国产干纤维 231016FH、231227FH 的渗透过程进行试验研究, 详细描述两种牌号的渗透过程和渗透结果, 分析影响预成型体的渗透因素与纤维层数, 不同牌号的材料以及纤维方向之间的关系, 旨在发现树脂和干纤维的适应性关系以及国产干纤维在结构方面存在的问题, 为国产干纤维的发展奠定基础。

1 试验及方法

1.1 试验设备及材料

1.1.1 试验设备

玻璃平板模具 (订制, 尺寸为 600 mm × 600 mm); 气动隔膜泵 (APC-2C, 台州藤原工具有限公司); 树脂收集器 (RB451, 北京科拉斯科技有限公司); 鼓风烘

箱 (SMO-10, 上海亦博实业有限公司); 金相显微镜 (BX41M-LED, 日本东京 OLYMPUS 公司)。

1.1.2 试验材料

原材料: 国外干纤维丝束 (PRISM@TX1100, Cytec), 牌号为 IMS65-24K-UD-196-6.35; 国产干纤维丝束 (C-L196DF), 牌号为 231016FH、231227FH; 惠柏新材 QT-8158A 环氧树脂、惠柏新材 QT-8158B 固化剂 (双组分质量配比为 100:90)。

辅助材料: MC01A 亚克力树脂粉、MC01B 亚克力固化剂、OSP0.5/0.05 氧化铝浊液抛光剂 (浙江协理仪器设备有限公司); 丙酮 (分析纯, 国药集团); 真空袋膜 (尼龙 6, 上海沥高科技); 真空密封胶带 (LG230, 上海沥高科技); 脱模布 (RF120PM, 上海沥高科技); 螺旋管 (聚四氟乙烯, 北京伊诺瓦科技); 真空管 (聚四氟乙烯, 内径为 8 mm, 上海剑威实业中心); 双宝塔球阀 (外径为 8 mm, 昌恩塑料制品厂)。

1.2 试样装置

截取 210 mm × 210 mm 的单向国产干纤维带, 将其沿纤维径向定义为 X 方向, 垂直于纤维径向定义为 Y 方向。本试验将干纤维带在自动铺丝机上按 X 方向铺层, 如图 1 所示, 通过铺放不同的层数 (3 层、5 层、7 层), 将干纤维带制成预成型体, 探究预成型体 X、Y、Z 3 个方向的渗透特性。

铺放好的预成型体放置到平板模具上, 将密封胶条沿着预成型体四周固定, 使用真空袋和密封胶带将其密封, 用真空管连接树脂收集器后用真空泵对装置进行抽真空。当达到 1 个标准大气压后通入树脂, 并记录渗透试验过程, 试验装置如图 2 所示, 最终将渗透后的预成

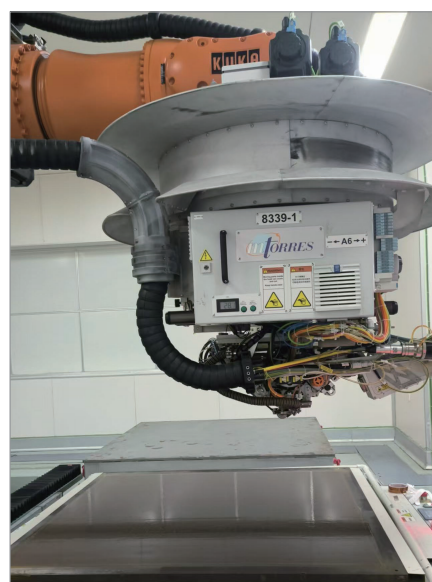


图 1 干纤维自动铺放机

Fig.1 Automatic dry fiber placement machine

形体放入真空烘箱固化,先在鼓风烘箱中以 100 ℃加热 2 h,然后再以 120 ℃加热 2 h。

1.3 测试方法

1.3.1 微观形貌

采用扫描电子显微镜 (SEM),通过电子在电场中移动来反映干纤维表面的特征,观察 C-L196DF 和 TX100 在预成型之前的表面微观形貌,通过对干纤维上表面网纱、中间碳纤维层,下表面定型剂层 3 个部分进行观察,对比分析两种材料的网纱与纤维黏结情况、网纱表面分布情况、碳纤维层分布以及定型剂分布情况,以此研究国产干纤维的优势与不足。

1.3.2 预成型体渗透率测试

采用中心注射方法测试预成型体 X、Y 方向的渗透率。Darcy 定律是描述流体在多孔介质中渗透的经典定律,即

$$V = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

式中, V 为树脂流动速度; K 为渗透率张量; μ 为树脂黏度; P 为压力。

通过对 Darcy 定律变形,可推导出树脂单向流动方程,用来描述预成型体的渗透过程。再根据预成型体体积分数的函数,得出以下公式。

$$L^2 = -\frac{2K\nabla P}{\mu\phi} t \quad (2)$$

$$\phi = 1 - \frac{n\rho_s}{\rho_f h} \quad (3)$$

$$K = \frac{k\mu\phi}{2\Delta P} \quad (4)$$

式中, L 为树脂的流动前锋的位置; t 为时间; h 为模腔厚度; n 为碳纤维铺设层数; ρ_f 为纤维密度; ρ_s 为碳纤维面密度; ϕ 为预成型体空隙率; k 为直线斜率。

本试验采用的惠柏新材双组分环氧树脂,在 25 ℃条件下黏度为 165 mPa·s,并可保持 3 h 的工作平台期,符合 VARI 成型工艺树脂的注胶黏度范围。通过记录

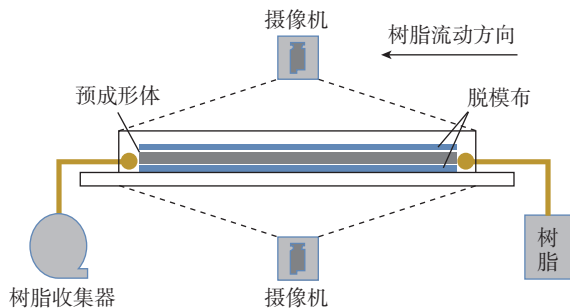


图 2 中心注射测试渗透率试验装置

Fig.2 Experimental setup for permeability testing via central injection method

不同时刻 t 和树脂流动前锋的位置 L ,生成 L^2-t 图,通过线性拟合由直线斜率计算出渗透率。

1.3.3 金相显微镜分析

采用金相显微镜可以观察预成型体固化后的横截面情况,主要包括碳纤维与树脂的分布,碳纤维与树脂的界面结合,碳纤维的致密程度,以及复合材料层合板是否存在缺陷。在金相图中观察到的白色光点及白色线条是碳纤维,灰色或灰黑色区域是树脂聚集区,其余发暗或黑色部分为孔洞或其他缺陷。

2 结果与讨论

2.1 微观结构

根据常州新创提供的信息可知,干纤维是由 3 部分组成的,上表面由具有增韧导流作用的网纱 (PAveil) 形成,具有一定的黏结作用,防止纤维脱散;中间的碳纤维层是干纤维带的主体部分,主要是起承力作用;下表面的定型剂在黏结固定干纤维的同时,可在自动铺放过程中对两层干纤维进行固定,使预成型体能更好地铺放成型。图 3 是国内外干纤维的网纱面和定型剂面的电镜图。从图 3 (a) 中可以看出, TX1100 网纱面的纤维直径约为 7 μm,主体碳纤维层的直径为 5 μm,网纱在碳纤维表面均匀有序分布,且网纱在碳纤维上架起一个三维空间,有很好的导流作用;与图 3 (a) 相比,图 3 (c) 中碳纤维层排列的比较松散,容易分开,单根纤维不够平直、挺括,网纱直径范围在 15~31 μm 左右,约是 TX1100 碳纤维的 3 倍;与图 3 (d) 相比,图 3 (b) 中定型剂厚薄分布一致,既不完全覆盖纤维也不糊成一团,很少有成团集聚的现象,纤维排列更均匀,几乎没有重合或交叉的情况。

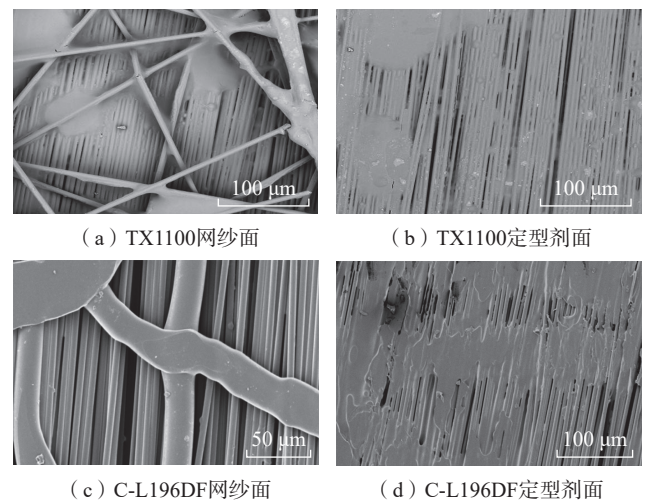


图 3 C-L196DF 与 TX1100 的网纱面和定型剂面电镜图

Fig.3 Electron micrographs of mesh side and sizing agent side of C-L196DF and TX1100

2.2 预成型体的渗透率

2.2.1 牌号 231016FH 干纤维

图 4 为 C-L196DF, 牌号 231016FH 干纤维分别在铺层层数为 3 层 (3P)、5 层 (5P)、7 层 (7P) 时, 其制备的预成型体在 X、Y 两个方向的流动前锋 L 与时间 t 的函数关系 (L^2-t), 以及它们的线性拟合曲线。

根据渗透率拟合曲线得出斜率值, 将其代入 Darcy 定律变形而来的渗透率计算公式 (式 (4)), 最终得到不同铺层层数的预成型体渗透率, 数值如表 1 所示。

由图 4 可知, 231016FH 预成型体的渗透率从宏观上来看, X 方向的渗透速率比 Y 方向快, 约是 Y 方向的 2 倍左右。分析可知, X 方向是沿纤维轴向方向, 碳纤维与碳纤维之间平行排列, 有一定的微孔结构存在, 有利于树脂流动和渗透, Y 方向碳纤维相当于表面是半圆柱形, 树脂流过需要一定的压力, 所以导致渗透率较 X 方向低。对于铺层层数 3P、5P、7P 的预成型体来说, 不论在 X 方向还是 Y 方向, 3P 的渗透速率最慢, 在 Y 方向

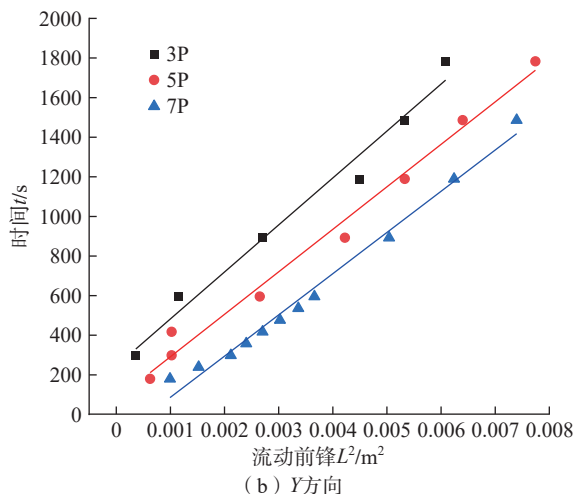
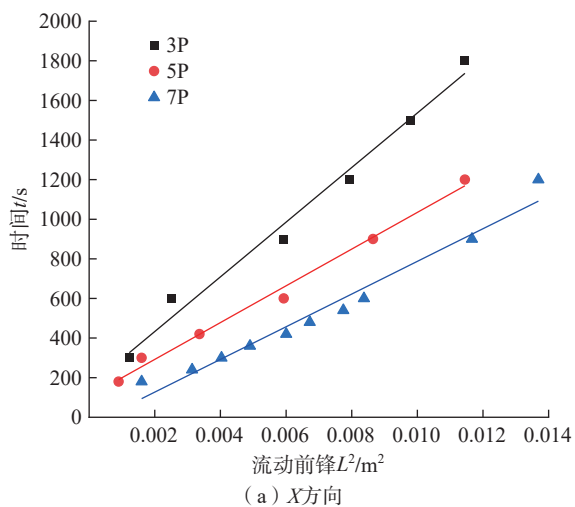


图 4 231016FH 在 X、Y 两个方向的渗透率线性拟合曲线
Fig.4 Linear fitting curves of permeability of 231016FH in X-direction and Y-direction

表 1 231016FH 的渗透率线性拟合数值及公式

Table 1 Linear fitting equations and permeability values of 231016FH

方向	层数	预成型体线性拟合公式	渗透率 $K/(\times 10^{-12} L^2 \cdot m^{-2})$	R^2
X 向	3P	$t=137971.29 \times L^2+157.20$	2.95	0.982
	5P	$t=93890.26 \times L^2+82.90$	4.34	0.969
	7P	$t=82515.25 \times L^2-38.01$	4.93	0.963
Y 向	3P	$t=239739.67 \times L^2+245.95$	1.70	0.975
	5P	$t=225967.30 \times L^2+19.40$	1.80	0.994
	7P	$t=210360.26 \times L^2+124.61$	1.94	0.985

只有 $1.70 \times 10^{-12} L^2 \cdot m^{-2}$; 7P 渗透的最快, 在 X 方向渗透率可达到 $4.93 \times 10^{-12} L^2 \cdot m^{-2}$, 是 3P 时的 1.7 倍, 其原因可能是当碳纤维层数越大时, 预成型体越厚, 导致真空袋内具有更大的压力差, 有利于树脂流动。

2.2.2 牌号 231227FH 干纤维

图 5 中, 231227FH 预成型体的渗透规律与 231016FH

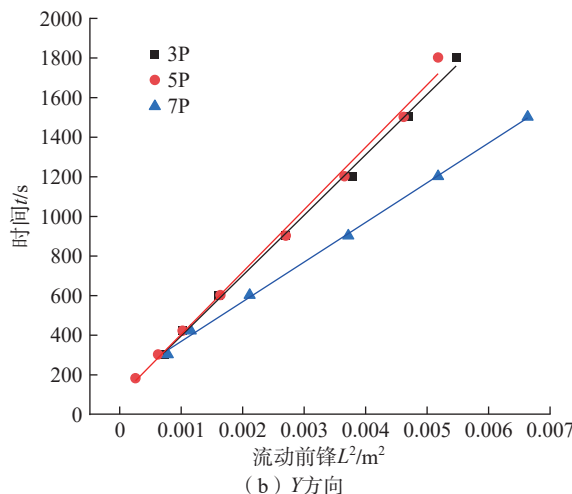
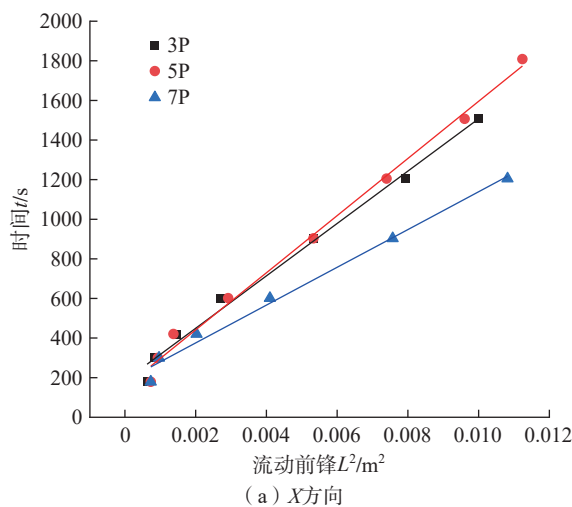


图 5 231227FH 在 X、Y 两个方向的渗透率线性拟合曲线
Fig.5 Linear fitting curves of permeability of 231227FH in X-direction and Y-direction

几乎吻合,遵循着厚度越大,渗透越快的规律(表2)。从单层对比上来看,除Y方向、7P、231016FH在X、Y方向的渗透速率要大于231227FH。

为了探究不同方向的渗透情况,对3P、5P、7P3种板子在X、Y、Z3个方向渗透时间进行统计,如表3所示。渗透0.1m的预成型体,X方向渗透速率最快,Y方向次之,Z方向在纤维层数为3P时可以渗透,渗透231016FH需要31min,渗透231227FH需要42min;当纤维层数为5P时,渗透231016FH需要203min,是3P的6.5倍。这种现象可能是由于在渗透过程中树脂冲散或溶解一部分网纱,一方面减少了网纱的导流作用,另一方面树脂黏度增大,影响渗透速率。在Z向7P未能渗透,当厚度再大时,预成型体在Z向渗透时间将越来越长。

2.3 对固化后的复合材料进行金相观察

图6为金相显微镜及其样品照片,通过观察样品横截面得到了复合材料的金相显微镜照片,如图7所示(白色光点是单根碳纤维,白色光点之间的灰黑色区域是树脂)。牌号231016FH和231227FH在不同铺层层数(3P、5P、7P)下经渗透、固化成型后,纤维层与层之间有明显的界线,存在一层薄薄的树脂区,导致纤维体积分数较低,根据复合材料混合理论,纤维体积分数越低,材料的模量也越低。

表2 231227FH的渗透率线性拟合数值及公式

Table 2 Linear fitting equations and permeability values of 231227FH

方向	层数	预成型体线性拟合公式	渗透率 $K/(\times 10^{-12} L^2 \cdot m^{-2})$	R^2
X向	3P	$t=143445.24 \times L^2+154.07$	2.83	0.993
	5P	$t=131517.25 \times L^2+186.27$	3.10	0.988
	7P	$t=94864.23 \times L^2+185.82$	4.29	0.985
Y向	3P	$t=304691.17 \times L^2+89.13$	1.34	0.997
	5P	$t=314900.21 \times L^2+86.37$	1.29	0.994
	7P	$t=200175.76 \times L^2+165.98$	2.03	0.999

表3 国产干纤维在3个不同方向渗透0.1m的时间

Table 3 Time for domestic dry fibers to penetrate 0.1 m in three different directions min

方向	231016FH			231227FH		
	3P	5P	7P	3P	5P	7P
X向	34	20	18	25	30	19
Y向	56	39	42	58	62	42
Z向	31	203	—	42	—	—

CL196DF干纤维成型后容易出现缺陷,相较于231016FH批次,231227FH批次的干纤维内部排列比较松散,纤维与纤维之间孔隙较大,纤维层之间分层明显,但内部的孔隙较少,整体比较均匀一致。

从图7可以看出,随着纤维层数的增加,层与层之间的距离逐渐拉大,图7(e)和(f)中出现了黑色长条形孔洞,纤维层之间逐渐分离,预成型体的渗透效果越来越差,这是因为纤维层数的增加使树脂并未完全渗透到纤维内部,此时预成型体内部残存一定的气体无法排除,当气体较多时会导致纤维层与层之间产生一定的缝隙,形成宏观上较大的缺陷。针对这种情况,可以通过改变干纤维形貌特征,使其表面的网纱具有更好的导流作用或者减少定型剂的用量,进而在均匀固定碳纤维的同时具有一定的空间,可以让树脂更好地渗透。当纤维层之间出现较厚的树脂层时,可适当增加真空袋的压力以减少树脂的富集。

由渗透试验过程可知,不同批次的国产干纤维在X、Y方向的渗透速率相差较小,Z向渗透效果并不理想,这主要是由于树脂和纤维之间适应性和相容性不好,国产干纤维中的网纱由聚酰胺构成,聚酰胺在高温下容易软化变形,不能起到很好的导流作用;国产干纤维的定型剂分布不均匀,加热后会熔化成团并附着在碳纤维表面,覆盖树脂的流动通道,阻碍树脂的流动路径与方向;当树脂形成包围圈将空气包裹其中时,空气无法排出,便容易导致孔隙和损伤的产生。

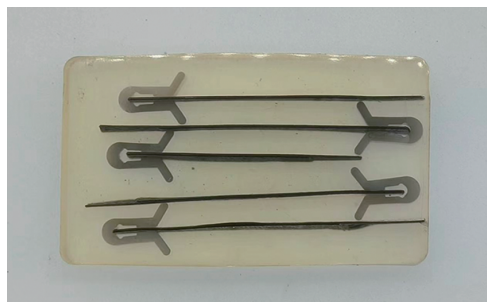


图6 金相显微镜及其样品

Fig.6 Metallographic microscope and its samples

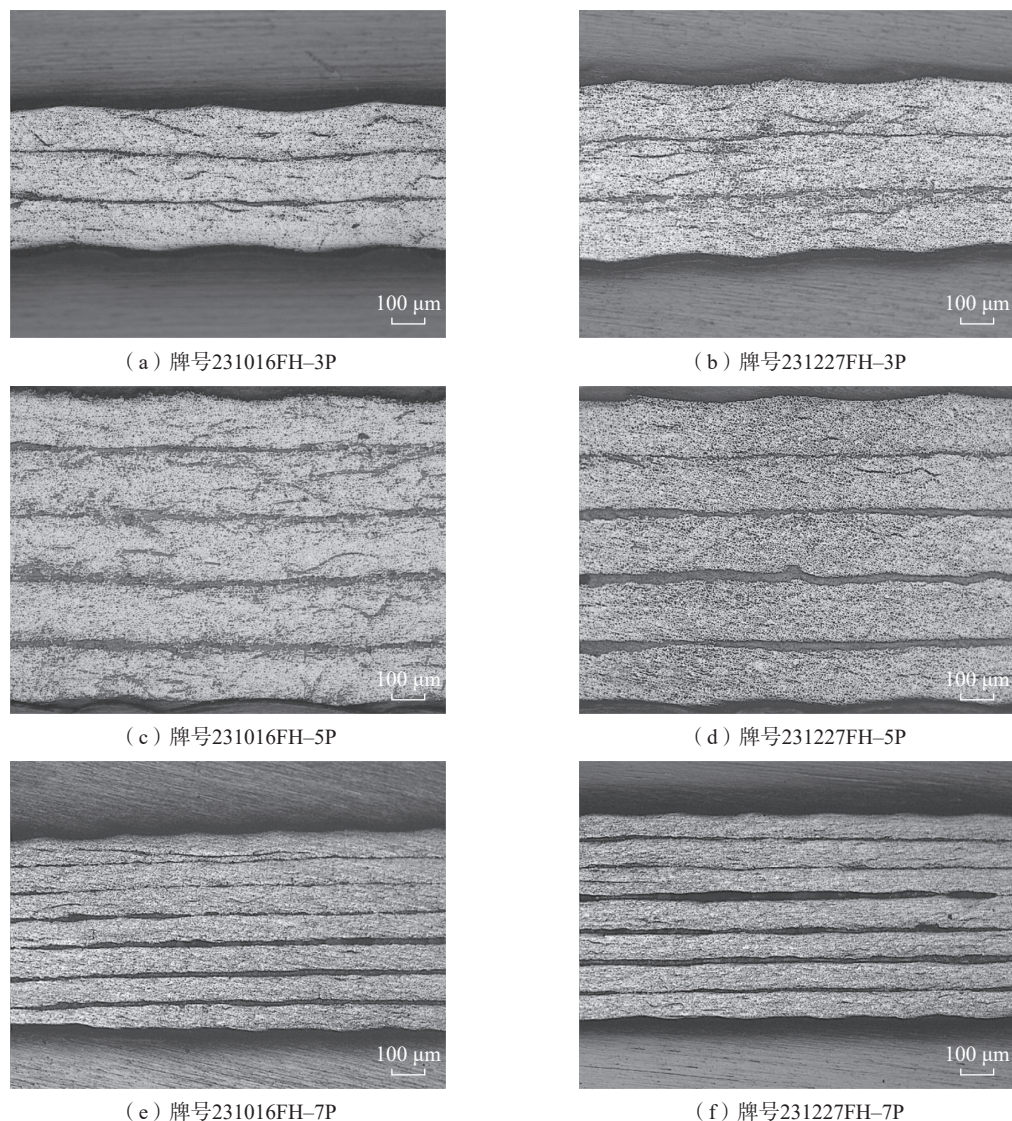


图7 C-L196DF 横截面金相图

Fig.7 Metallographic image of C-L196DF cross-section

3 结论

本文主要对国产干纤维的表面微观形态进行观察,研究干纤维的结构组成和存在形态。根据液体成型工艺和 Darcy 定律设计干纤维预成型体的渗透率试验方案,研究不同铺层厚度、不同批次材料对预成型体的渗透率影响,最后观察固化后复合材料的横截面,并对复合材料的成型质量进行了分析,主要结论如下。

(1) 国产干纤维(C-L196DF)和国外干纤维(TX1100)在微观结构上都是由3层结构组成,从上到下依次是网纱、碳纤维、定型剂。国产干纤维网纱的平均直径是进口材料TX1100的3倍,国内外碳纤维平均直径几乎相同,在 $5\ \mu\text{m}$ 左右,国产碳纤维定型剂分布不均匀,有黏结聚集现象。

(2) 国产干纤维可以实现X、Y、Z3个方向的渗透,X、Y方向的渗透率随着纤维层数的增加而变大,7P时X方向的最大渗透率为 $4.93 \times 10^{-12}\ \text{L}^2 \cdot \text{m}^{-2}$,是3P时的1.7倍;3P时Z方向渗透时间为31 min,5P在Z方向渗透时间是3P的6.5倍,二者相差较大。

(3) 当铺层层数相同时,牌号231016FH的预成型体的渗透率大于牌号231227FH的预成型体,231016FH的渗透效果更好。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

[2] 张浩. 基于 z 向渗透率研究的大型曲面构件液体成型工艺设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

ZHANG Hao. Liquid forming process design of large curved components based on z -direction permeability research[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.

[3] 庄恒飞, 潘利剑, 刘卫平, 等. VARI成型厚度稳定与抽真空时间的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(2): 5–10.

ZHUANG Hengfei, PAN Lijian, LIU Weiping, et al. A study of the steady thickness by the vacuum assisted resin infusion process and the vacuum keeping time[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(2): 5–10.

[4] 刘姝呈, 李林秀, 潘利剑, 等. 自动铺放工艺参数对干纤维预成型体工艺性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2020(11): 93–101.

LIU Shucheng, LI Linxiu, PAN Lijian, et al. Effect of automatic placement process parameters on process performance of dry fiber preforms[J]. Composites Science and Engineering, 2020(11): 93–101.

[5] 段振锦, 潘利剑, 刘卫平, 等. 干纤维铺放真空辅助成型复合材料的性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(12): 43–48.

DUAN Zhenjin, PAN Lijian, LIU Weiping, et al. Structure and properties of vacuum assisted molding composite for dry fiber[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(12): 43–48.

[6] 聂玉强, 付晨辰, 彭运松. 干纤维自动铺放-液体成型技术进展研究[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(4): 19–26.

NIE Yuqiang, FU Chenchen, PENG Yunsong. Research on progress of automatic dry fiber laying-liquid forming[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(4): 19–26.

[7] ROTH Y C, WEINHOLDT M, WINKELMANN L. Liquid composite moulding-enabler for the automated production of CFRP aircraft components[C]//Proceedings of the 16th European Conference on Composite Materials, ECCM. 2014: 22–26.

[8] LAURENZI S, MARCHETTI M. Advanced composite materials by resin transfer molding for aerospace applications[J]. Composite Structures, 2022, 297: 115913.

[9] SHARMA S, SIGINER D A. Permeability measurement methods in porous media: A review[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Naples, 2008, 179–200.

[10] VERNET N, RUIZ E, ADVANI S, et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 61: 172–184.

[11] 郭俊刚, 张新娟, 田亦瑶, 等. 复合材料液体成型技术在飞机上的应用及发展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(2): 85–91.

GUO Jungang, ZHANG Xinjuan, TIAN Yiyao, et al. Development and application of liquid composite molding technique on aircraft[J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(2): 85–91.

[12] 宁莉, 杨绍昌, 冷悦, 等. 先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J]. 复合材料科学与工程, 2020(5): 123–128.

NING Li, YANG Shaochang, LENG Yue, et al. Overview of the application of advanced composite materials on aircraft and the development of its manufacturing technology[J]. Composites Science and Engineering, 2020(5): 123–128.

[13] 李先阳, 刘彬, 于雅琳, 等. 碳纤维复杂构件LCM成型工艺技术发展综述[J]. 复合材料科学与工程, 2023(11): 116–121.

LI Xianyang, LIU Bin, YU Yalin, et al. A review of the development of LCM forming technology for carbon fiber complex components[J].

Composites Science and Engineering, 2023(11): 116–121.

通信作者: 潘利剑, 副教授, 博士后, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料。

(责编 七七)

(上接第 143 页)

[9] 詹庆荣, 段鹏飞, 吴路路, 等. 基于改进弦高误差约束的机器人曲面磨削轨迹规划[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(1): 58–62.

ZHAN Qingrong, DUAN Pengfei, WU Lulu, et al. Robot surface grinding trajectory planning based on improved chord height error constraint[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(1): 58–62.

[10] 戴士杰, 张熠, 王志平, 等. 基于NURBS的航空发动机叶片焊接修复的轨迹规划[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 23–26, 114.

DAI Shijie, ZHANG Yi, WANG Zhiping, et al. Trajectory planning of welded repair for aero-engine blades based on NURBS curve[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(1): 23–26, 114.

[11] 张铁, 张斌. 机器人砂带磨削路径优化插补算法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(8): 983–990.

ZHANG Tie, ZHANG Bin. Optimized interpolation algorithm for robotic belt grinding processes[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(8): 983–990.

[12] 王汝传, 黄海平, 林巧民. 计算机图形学教程[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2009.

WANG Ruchuan, HUANG Haiping, LIN Qiaomin. Computer graphics[M]. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009.

[13] 黄紫双. 基于NURBS的曲面拟合和优化方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.

HUANG Zishuang. Research on surface fitting and optimization method based on NURBS[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.

[14] 孔德明, 黄紫双, 杨丹. 二次曲面的NURBS最优化表示方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(8): 909–917.

KONG Deming, HUANG Zishuang, YANG Dan. Research on NURBS optimization expression method of quadric surfaces[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(8): 909–917.

[15] 孙玉文, 徐金亭, 任斐, 等. 复杂曲面高性能多轴精密加工技术与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

SUN Yuwen, XU Jintong, REN Fei, et al. High-performance multi-axis precision machining technology and method for complex surfaces[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[16] SUN Y W, WANG X M, GUO D M, et al. Machining localization and quality evaluation of parts with sculptured surfaces using SQP method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(11): 1131–1139.

[17] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2013.

SHI Fazhong. Computer aided geometric design and non-uniform rational B-spline[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013.

通信作者: 金滩, 教授, 博士生导师, 研究方向为磨削技术和理论, 以及高速磨削传热理论。

(责编 七七)