

文章编号:1000-8055(2019)04-0864-11

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2019.04.016

热塑性定型剂对干铺丝-RTM 工艺及力学性能影响

李晓涵, 李 勇, 还大军, 刘 丽, 汪 愿
(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)

摘 要: 为了研究热塑性定型剂的添加对干铺丝-树脂传递模塑(RTM)工艺的影响,采用 PA-6 作为热塑性定型剂,通过 T-剥离确定定型剂的质量分数,结合试验和工艺仿真,研究了定型剂对预制体面内渗透率的影响,并对其充模过程进行工艺仿真和分析,在此基础上研究了定型剂对环氧复合材料制品层间性能及韧性的影响。渗透率试验和仿真结果表明:加入定型剂后,纤维预制体的沿纤维和垂直纤维的面内渗透率分别降低了 55.5%和 52.0%;工艺仿真结果与试验结果一致,不同渗透长度下的注胶时间偏差均小于 10%。力学性能试验结果表明:加入热塑性定型剂可显著提升环氧树脂复合材料的韧性,I 型和 II 型层间断裂韧性分别提高了 89.3%和 54.1%,冲击韧性提高了 18.7%,复合材料的层间剪切强度降低了 23.6%。

关 键 词: 干铺丝; 树脂传递模塑(RTM); 工艺仿真; 预制体制备; 热塑性定型剂; 渗透率; 层间断裂韧性

中图分类号: V258; TB332 文献标志码: A

Influence of thermoplastic tackifier on dry fiber placement-RTM process and mechanical properties

LI Xiaohan, LI Yong, HUAN Dajun, LIU Li, WANG Yuan
(College of Materials Science and Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the effect of thermoplastic tackifier addition on the dry fiber placement-RTM (resin transfer molding) process, T-peel test was utilized to determine the mass fraction of PA-6 tackifier. Combining the test with process simulation, the effect of tackifier on the in-plane permeability of preform with PA-6 as the tackifier was studied. The mold filling process was stimulated and analyzed. On this basis, the influence of tackifier on the interlaminar properties and toughness of epoxy composites was studied. The test and simulated results of permeability of preform with tackifier showed that the permeability of fiber preform in parallel with and perpendicular to fiber direction reduced by 55.5% and 52.0%, respectively. The test results were consistent with the revised simulated results, and the deviation values of filling time with different penetration distances were all smaller than 10%. The results of mechanical test showed that the toughness of epoxy composites could be enhanced significantly by adding thermoplastic tackifier. The mode I and II interlaminar fracture toughness improved by 89.3% and 54.1%, respectively. While the impact

收稿日期:2018-08-09
基金项目:国家重点基础研究发展计划(2014CB046501); 江苏高校优势学科建设工程
作者简介:李晓涵(1994—),女,硕士生,主要从事高性能复合材料成型工艺的研究。

引用格式:李晓涵,李勇,还大军,等. 热塑性定型剂对干铺丝-RTM 工艺及力学性能影响[J]. 航空动力学报,2019,34(4):864-874.
LI Xiaohan, LI Yong, HUAN Dajun, et al. Influence of thermoplastic tackifier on dry fiber placement-RTM process and mechanical properties[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 864-874.

toughness improved by 18.7%, the interlaminar shear strength reduced by 23.6%.

Key words: dry fiber placement; resin transfer molding (RTM); process simulation; preform preparation; thermoplastic tackifier; permeability; interlaminar fracture toughness

复合材料风扇叶片已成为商用大涵道比发动机的发展趋势^[1]。现有发动机复合材料风扇叶片制造技术主要包括预浸料铺放/模压技术和三维编织/树脂传递模塑(3D-WOVEN/RTM)技术两大类^[2-3],分别通过预浸料铺放和 3D-WOVEN 制备纤维预制体,然后分别通过模压和 RTM 工艺两种闭模成型技术成型,制备出满足加工精度的风扇叶片。

3D-WOVEN 技术可制备的叶片长度小于预浸料铺放/模压成型的叶片^[1],但是,3D-WOVEN 技术存在成本高、设备昂贵、工艺实施难度大等不足^[4]。而采用预浸料铺放成型叶片预制体一方面受限于预浸料有限的变形能力,难以成型复杂叶片结构,另一方面制造成本高,效率相比于 RTM 技术偏低。因此,如果能将两种技术的优点结合起来,利用自动铺放技术代替传统的三维编织/缝合等技术快速成型纤维预制体,经 RTM 工艺浸渍树脂,则有可能可实现大尺寸复杂复合材料风扇叶片的低成本制造。

为了实现纤维预制体制备,必须保证纤维的定位,在纤维表面添加定型剂——即增黏纤维,达到对纤维定型的效果^[5]。若采用自动铺放增黏纤维制备预制体,再结合液体成型技术,可结合两者的优点,实现高效快速的生产大型结构件,该技术即为干铺丝-液体成型技术^[6-7]。

干铺丝-液体成型技术的关键在于:①选择合适的纤维定型剂;②增黏纤维的制备;③纤维预制体的制备;④液体成型工艺;⑤复合材料构件的性能。

定型剂的主要作用是将纤维黏结在一起,维持预制体形状,防止液体树脂的冲刷变形。定型剂需满足:①足够的黏附力;②与注射树脂的相容性;热固性定型剂要求与注射树脂相容性高,热塑性定型剂要求与基体树脂发生化学键合^[8-9]。研究表明,聚醚醚酮(PEEK)、尼龙(PA)等热塑性树脂可以对环氧进行增韧^[10-13]。因此,与热固性定型剂相比,热塑性定型剂存在增韧作用,且热塑性定型剂的预制体可长期存放。

Belhaj 等^[6]研究了干铺丝工艺中含有一定量热塑性树脂的预浸丝束在成型预制体时纤维束之间的间隙、搭接对渗透率以及最终制件厚度、纤维

体积分数的影响。Tanoglu、Rohatgi 等^[14-15]研究了聚酯做定型剂时,不同定型剂质量分数的黏结效果及对干铺丝成型的复合材料力学性能的影响。结果表明,当定型剂质量分数为 2.6%时,定型剂在织物表面覆盖面积为 50%,定型剂的存在降低了复合材料制品的层间剪切强度和断裂韧性。Steggall-Murphy 等^[16]采用粉末沉积法制备增黏织物、热压法制备预制体,建立模型分析高密度聚乙烯粉末做定型剂时预制体孔隙率的理论值,并用试验值进行验证。

热塑性定型剂分布在纤维表面,可能会阻碍 RTM 工艺中树脂对预制体的浸渍,一定程度会影响成型过程及制品最终性能,必须对纤维预制体的渗透率及加入复合材料制品的力学性能进行研究。本文通过工艺仿真结合试验的方式研究热塑性定型剂 PA-6 对干铺丝-液体成型过程产生的影响。主要内容包括:①不同质量分数 PA-6 定型剂定型效果分析;②PA-6 定型剂对预制体渗透率的影响;③增黏纤维预制体的 RTM 工艺仿真;④定型剂对复合材料层间性能及韧性的影响。

1 试验部分

1.1 试验材料及设备

热塑性定型剂为 PA-6,美国杜邦,密度为 1.14 g/cm³。T700 碳纤维,碳纤维丝束中单丝数量为 12 000,日本东丽,线密度为 0.80 g/m,体密度为 1.80 g/cm³。树脂为 AFG-90H,环氧值为 0.95~1.05,上海华谊树脂厂,结构式如图 1;固化剂为聚醚胺 D230(二元胺),活泼氢当量为 61(氮的摩尔质量与活泼氢个数之比),美国亨斯曼先进材料公司,密度为 0.948 g/mL,结构式如图 2。

试验仪器及设备如表 1。

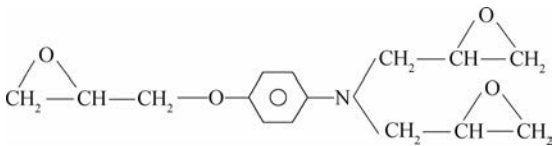


图 1 AFG-90H 环氧树脂结构式

Fig. 1 Structural formula of epoxy resin AFG-90H

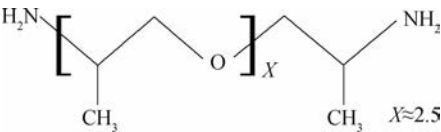


图 2 D230 固化剂结构式

Fig. 2 Structural formula of curing agent D230

表 1 试验设备
Table 1 Test equipment

设备名称	型号	生产商
数显恒温水浴锅	HH-2	国华电器有限公司
数显旋转黏度计	SNB-2	上海衡平仪器仪表厂
热塑性增黏纤维成型设备		自制设备
超声铺放设备		自制设备
RTM 装置		自制设备
电子显微形貌仪	DVM-6A	德国 Leica 公司
电子万能试验机	CMT5150	深圳新三思公司
扫描电子显微镜	QUANTA200	美国 FEI 公司
塑料冲击试验机	XJ-300A	吴忠市材料试验机有限公司

1.2 试样制备及测试方法

1.2.1 增黏纤维的制备

采用试验室自制的热塑性增黏纤维制备平台制备增黏纤维,图 3 为装置示意图。采用粉末悬浮法制备热塑性增黏纤维^[17],配制热塑性定型剂粉末溶剂悬浊液置于超声浸胶槽内,纤维经导辊在浸胶槽内浸胶,再经由高温烘道挥发溶剂,熔融浸渍,最后由双钢带模压机模压成型。

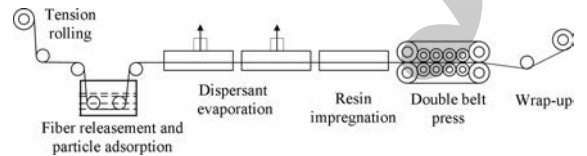


图 3 热塑性增黏纤维制备装置示意图

Fig. 3 Illustration of thermoplastic tackifier fiber preparation facility

1.2.2 预制体渗透率的测定

选用超声作为热源固结热塑性定型剂,制备纤维预制体。超声源的振幅为 10 μm,超声频率为 35 kHz,输出功率为 600 W,铺放速度为 20 mm/s。

本文采用文献[18-19]中提出的渗透率测试方法,分别通过[0]₁₀(其中 0 代表 0°铺层,下标 10 代表铺层数量,下同)和[90]₁₀预制体铺层测得单

个方向的面内渗透率 K_1 和 K_2 。

为保证测试结果接近实际情况,渗透率测试试验中,渗透率测试装置同 RTM 试验装置,无导流网。通过达西定律计算牛顿流体流经多孔介质的渗透率^[20],进行简化后,真空压力即为注射口与流动前沿的压力差,渗透率简化公式为

$$K = \frac{L^2}{t} \cdot \frac{\eta \varphi}{2 \Delta p} \tag{1}$$

其中 K 为渗透率(m^2); η 为流体黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); φ 为预制体孔隙率(%); Δp 为真空压力(Pa); L 为树脂在预制体中的流动距离(m); t 为流动时间(s)。

由于模型过于简化,只考虑了纤维束之间的宏观流动,而实际渗透过程中同时存在宏观流动和微观流动,同时热塑性定型剂的存在会对流动过程产生一定的影响,计算值会与实际值产生一定偏差,引入修正因子 C

$$K = \frac{L^2}{t} \cdot \frac{\eta \varphi}{2 \Delta p} C \tag{2}$$

试验过程中通过记录流经特定距离 L 的时间 t ,画出 L^2-t 关系图,直线斜率即为 L^2/t 的值,孔隙率 $\varphi=20\%$,修正因子 C 为试验计算的斜率比模拟计算的斜率,修正前 $C=1$ 。吸入树脂前抽真空 10 min,保证真空袋内的真空度,树脂用室温下黏度为 0.083 Pa·s 的花生油代替。

1.2.3 复合材料试样制备

RTM 装置示意图见图 4,配制 AFG-90H/D230 胶液,AFG-90H 与 D230 质量比为 2:1。图 5 为树脂体系黏度 η 随温度和时间变化图,从图中可以看出,35℃时胶液黏度约为 48 mPa·s,恒温 2 h 后黏度仍低于 150 mPa·s。先抽真空 10 min,保证真空袋内的真空度,随后利用真空负压将胶液吸入到含预制体的模具内,胶液及模具温度为 35℃,固化制度:80℃保温 0.5 h,升温至 110℃保温 1 h,然后切割成标准试样。

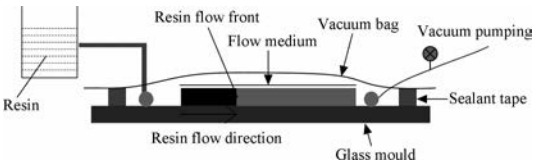


图 4 RTM 试验装置示意图

Fig. 4 Illustration of test set-up for RTM

1.2.4 力学性能测试标准

T 剥离试验按照 ASTM(American Society for Testing Materials)D 1876-01;复合材料层间

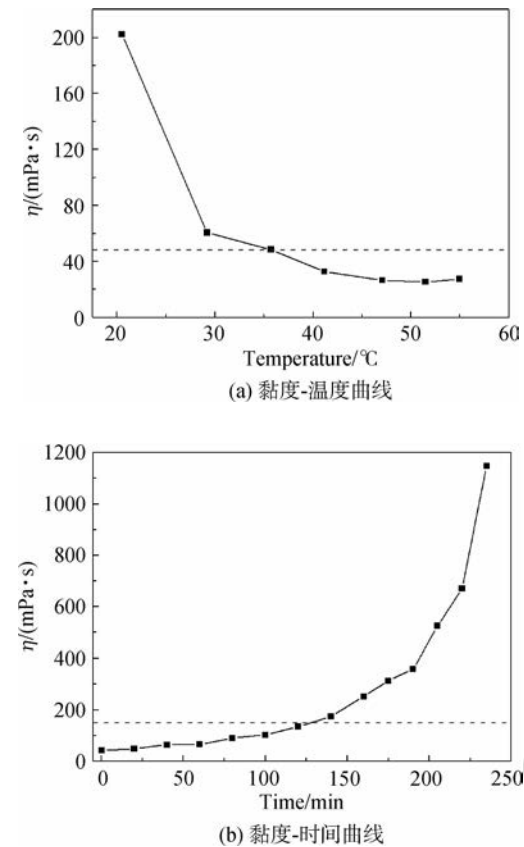


图 5 树脂体系黏度-温度和黏度-时间曲线

Fig. 5 Viscosity-temperature and viscosity-time curves of resin system

剪切强度按照 ASTM D 2344M-06;复合材料 I 型层间断裂韧性按照 ASTM D 5528-07;复合材料 II 型层间断裂韧性按照 HB7403-96;复合材料无缺口冲击性能的测定按照 GB/T1043. 1-08。

2 结果与讨论

2.1 定型剂质量分数对黏结定型性能影响

预制体的剥离强度由 T 型剥离试验确定,剥离试验用来测定预制体抗剥离性能,通过测定不同质量分数增黏纤维的剥离力,选择定型剂用量,试验过程如图 6 所示。图 7 为定型剂质量分数为 8% 的试样剥离力位移曲线。从图中可以看出,剥离力在某一范围内波动,由于定型剂在纤维束表面分布不均,定型剂存在一定的差异,取剥离力平稳阶段的平均值,以平均剥离强度表征黏结性能。

表 2 为不同定型剂质量分数的增黏纤维的平均剥离力的值,图 8 为不同质量分数增黏纤维表面面貌图,图中 w_t 表示定型剂的质量分数。结合表 2 和图 8 可以看出,定型剂平均质量分数为 4% 时,未能起到对纤维定型的效果;质量分数为

6% 时,定型效果不够好,定型剂分布不均,部分区域几乎没有黏结力;当质量分数在 8% 及以上时,定型效果随着定型剂质量分数的增加而增加,由于定型剂覆盖在纤维上,可能会影响树脂的浸渍过程,定型剂在复合材料中可能会形成缺陷,综合考虑,在保证定型效果的同时,选用平均质量分数最低的,即 8% 的增黏纤维作为试验对象。

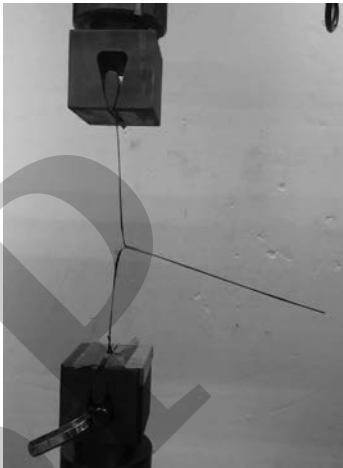


图 6 T-剥离试验

Fig. 6 T peel strength test

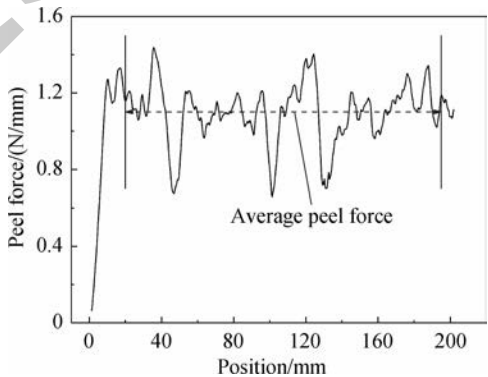


图 7 典型剥离力-位移曲线

Fig. 7 Typical peel force-position curve

表 2 不同定型剂质量分数的试样平均剥离力

Table 2 Average peel force of peel specimens with various mass fraction of tackifier

定型剂平均质量分数/%	剥离力/(N/mm)
4	
6	0.17~0.83
8	1.10
10	1.42
12	1.85

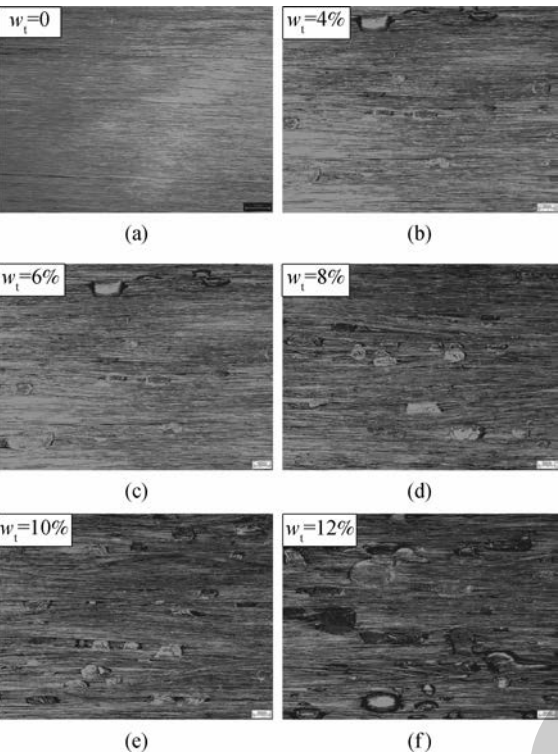


图 8 不同定型剂质量分数的增黏纤维表面形貌
Fig. 8 Surface topography of tackifying fibers with different mass fraction of tackifier

2.2 预制体渗透率试验结果

根据渗透率测试试验中记录的流动距离 L 及对应的流动时间 t , 绘制 L^2-t 曲线。图 9 为 0° 方向和 90° 方向渗透率 K_1 和 K_2 的 L^2-t 线性拟合图(L_1 为 0° 方向的流动距离, L_2 为 90° 方向的流动距离)。拟合公式分别为

$$L_1^2 = -497.44 + 15.380t \tag{3}$$

$$L_2^2 = -35.78 + 0.654t \tag{4}$$

可知, 拟合直线的斜率分别为 15.380、0.654, 由式(1)计算得渗透率 $K_1 = 1.277 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $K_2 = 5.428 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。

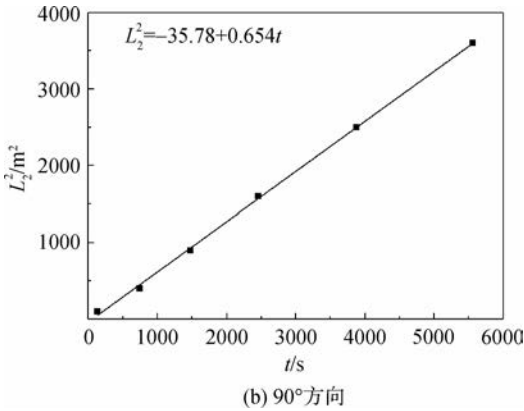


图 9 试验渗透率的 L^2-t 线性拟合图
Fig. 9 Test linear fitting diagram of L^2-t for permeability

2.3 RTM 工艺仿真及渗透率修正

采用 Patran 建模、划分网格, 将划分好网格的模型导入 PAM-RTM 软件, 图 10 为纤维预制体模型图, 模拟树脂充模过程, 模拟时面内渗透率初始值由试验确定, 记录模拟过程中流动距离与流动时间的值。图 11 为模拟时间和试验时间对比图。

图 12 为 0° 方向和 90° 方向修正后的渗透率 K_1 和 K_2 的 L'^2-t 线性拟合图(L' 为修正后的流动距离, L'_1 为修正后的 0° 方向的流动距离, L'_2 为修正后的 90° 方向的流动距离)。拟合公式分别为

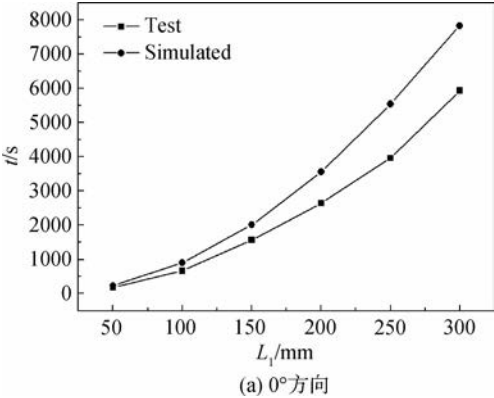
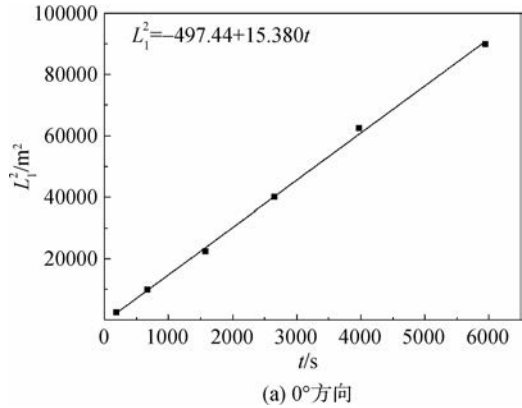
$$L_1'^2 = -499.42 + 19.131t \tag{5}$$

$$L_2'^2 = -42.95 + 1.105t \tag{6}$$

可知, 拟合直线的斜率分别为 19.131、1.105, 通过前文提出的修正方法进行修正, 修正后渗透率 $K_1 = 1.027 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $K_2 = 3.213 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。



图 10 纤维预制体模型
Fig. 10 Model of fiber preform



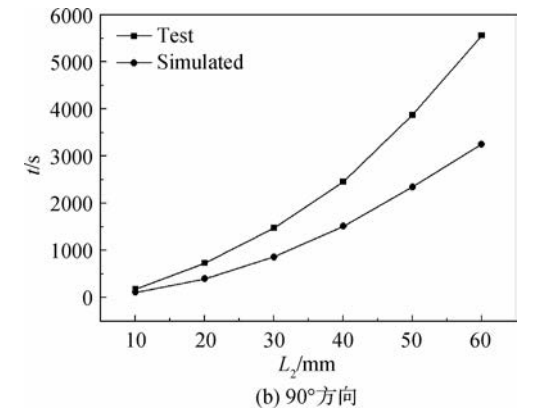


图 11 试验时间和模拟时间对比

Fig. 11 Comparison of test time and simulated time

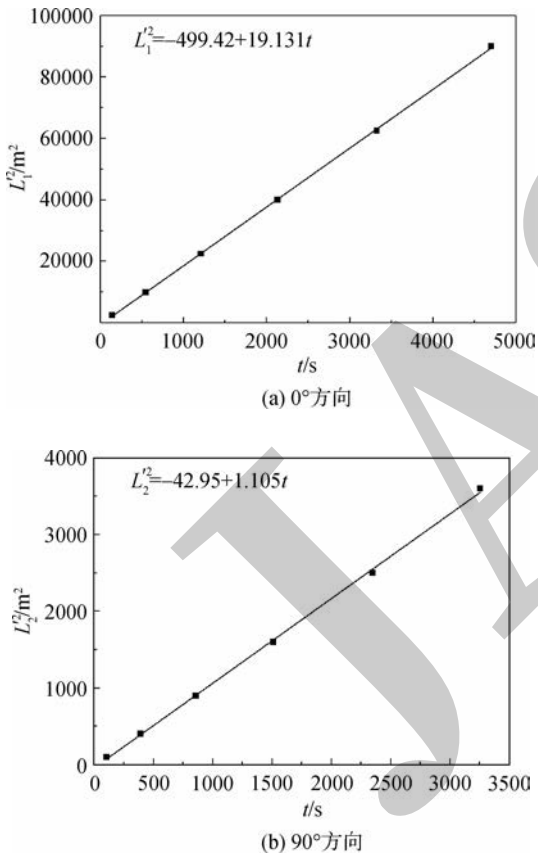


图 12 修正后渗透率的 L^2-t 线性拟合图

Fig. 12 Revised linear fitting diagram of L^2-t for permeability

图 13 为修正后工艺仿真过程及试验充模过程对比图。从图中可以看出,两侧边具有流道效应,可以用中心线的渗透距离作为代表,两个方向的试验充模时间及模拟时间见图 14 和图 15。

为了定量表征工艺模拟与试验的偏差情况,定义了模拟时间与试验时间偏差系数 D

$$D = \frac{t_s - t_e}{t_e} \times 100\% \quad (7)$$

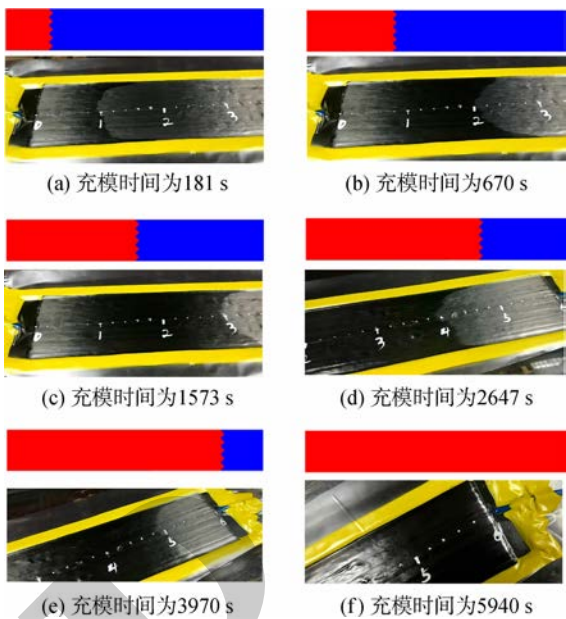


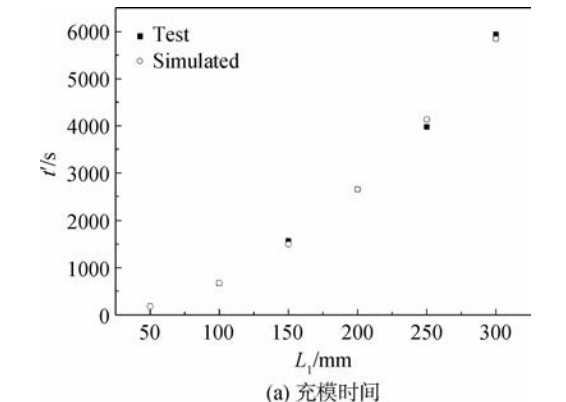
图 13 充模过程中的渗透率模拟及试验对比

Fig. 13 Comparison of permeability simulation and test during mold filling process

式中 t_e 为试验时间(s); t_s 为模拟时间(s)。

图 14 和图 15 分别为沿纤维方向和垂直纤维方向的树脂流动前锋到达指定位置所需的时间和模拟所需的时间对比图,其中图 14(a)和图 15(a)为充模时间 t' 的对比,图 14(b)和图 15(b)为模拟时间与试验时间偏差系数 D 。从图中可以看出,经过修正后,模拟时间与试验时间几乎一致,两个方向的偏差值均小于 10%。因此,经过修正后,可以用于工艺仿真,渗透率值为 $K_1 = 1.027 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $K_2 = 3.213 \times 10^{-14} \text{ m}^2$,热塑性定型剂填充组(以下简称定型剂组)渗透率的试验值和修正值列于表 3。

同理可得,未添加定型剂的预制体渗透率为 $K_1 = 2.306 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $K_2 = 6.695 \times 10^{-14} \text{ m}^2$,空白组渗透率试验值和修正值列于表 4,从表 3 和表 4 可知,两组渗透率的修正因子 C 均小于 1,由



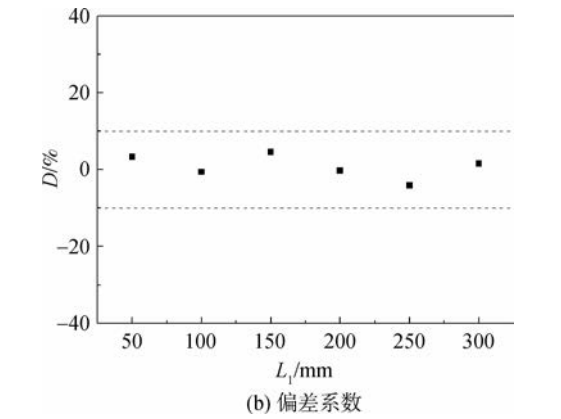


图 14 修正后 K_1 方向试验时间和模拟时间对比图
Fig. 14 Comparison of revised test and simulated time for K_1

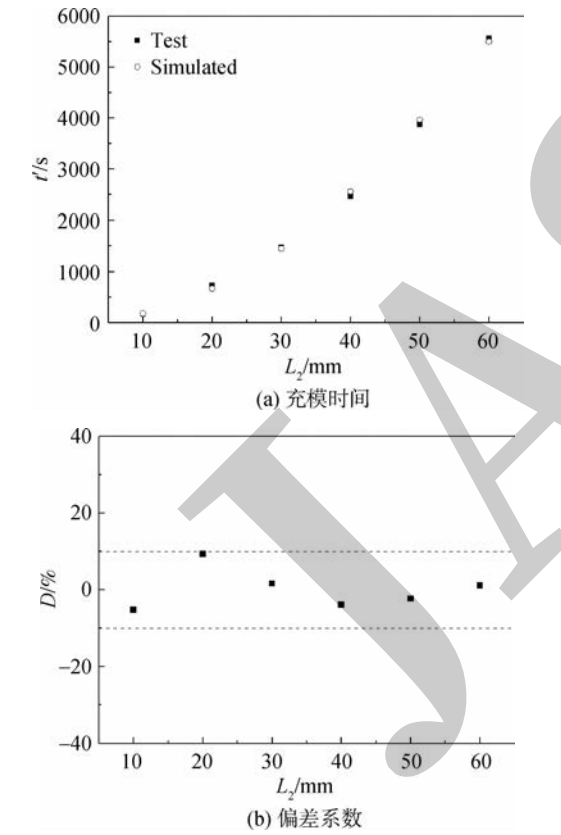


图 15 修正后 K_2 方向试验时间和模拟时间对比图
Fig. 15 Comparison of revised test and simulated time for K_2

表 3 定型剂组渗透率试验值和修正值
Table 3 Test and revised value of permeability of tackifier group

渗透率	试验值/ 10^{-14} m^2	修正值/ 10^{-14} m^2	修正 因子 C
K_1	127.7	102.7	0.804
K_2	5.428	3.213	0.592

表 4 空白组渗透率试验值和修正值 Table 4 Test and revised value of permeability of blank group			
渗透率	试验值/ 10^{-14} m^2	修正值/ 10^{-14} m^2	修正 因子 C
K_1	258.5	230.6	0.892
K_2	10.21	6.695	0.656

于试验过程中,树脂的流动为微观流动和宏观流动的叠加,而简化后的公式只考虑了宏观流动,产生了一定的误差。定型剂组的修正因子小于空白组的修正因子,说明层间引入的定型剂阻碍了树脂的流动,加入定型剂后,预制体的渗透率降低。在层间引入定型剂后,真空状态下,定型剂占据了纤维之间的孔隙,导致孔隙率减小,树脂浸渍困难,降低了预制体渗透率。定型剂组和空白组渗透率对比图见图 16,加入定型剂后,渗透率分别降低了 55.5% 和 52.0%。

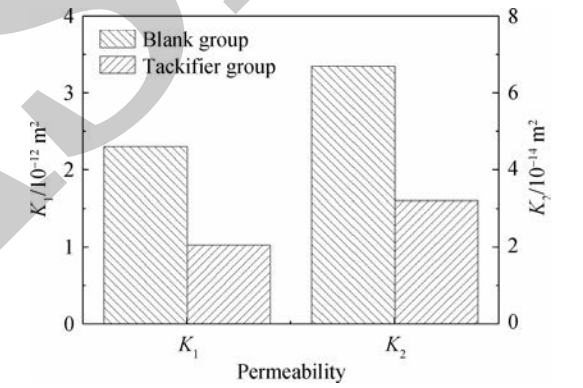


图 16 空白组和定型剂组渗透率对比图
Fig. 16 Comparison of permeability with blank group and tackifier group

2.4 力学性能的影响对比及分析

2.4.1 层间剪切强度的影响

本文采用短梁剪切测试干铺丝-液体成型复合材料层间剪切强度,试验结果列于表 5。图 17 是层间切应力与位移曲线,从图中可以看出层间切应力随着位移的增加先增加,当接近最大值时,开始出现非线性阶段,说明开始出现层间破坏,当达到最大载荷时,试样完全破坏,应力迅速下降。可以发现,空白样在达到峰值前,应力随位移变化呈线性,而加了热塑性定型剂的试样在加载初期呈线性,随着位移的增加,曲线逐渐向下偏移,峰值明显低于空白组。图 18 是两种试样剪切断口

的扫描电镜 (SEM) 照片,从图中可以看出,空白组纤维拔出较短,说明纤维和树脂基体之间的界面黏附程度较好;而定型剂组断口上,纤维拔出较长,断裂面参差不齐,界面黏附较差,因此添加热塑性定型剂后层间剪切强度偏低。

表 5 层间剪切强度
Table 5 Interlaminar shear strength

组别	纤维体积 分数/%	层间剪切强度	
		平均值/MPa	离散度/%
空白组	63.5	58	2.50
定型剂组	57.2	44.3	8.60

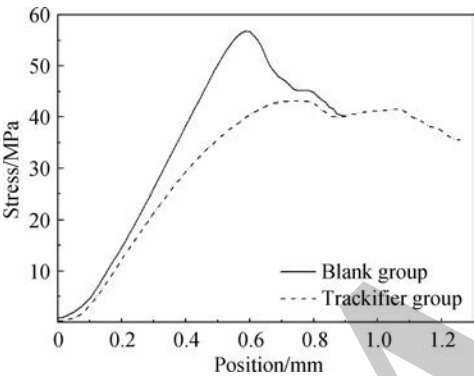


图 17 空白组和定型剂组的层间切应力与位移曲线
Fig. 17 Interlaminar shear stress-position curves of blank group and tackifier group

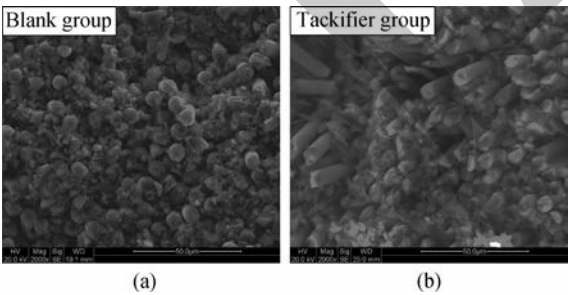


图 18 空白组和定型剂组的层间失效断面形貌对比
Fig. 18 Comparison of interlaminar fracture topography surface with blank group and tackifier group

2.4.2 I 型层间断裂韧性的影响

用双悬臂梁弯曲(DCB)来测 I 型层间断裂韧性 G_{IC} 值,美标 ASTM D 5528 定义了 3 种不同的 G_{IC} 值, $G_{IC,NL}$ 、 $G_{IC,VIS}$ 、 $G_{IC,max}$,其中下标 NL 表示偏离线性段的点;VIS 表示目视可观察到的裂纹扩展点;max 表示载荷达到最大值的点。本文采

用修正梁理论(MBT)法计算 I 型层间断裂韧性。

图 19 是空白组和定型剂组的阻抗 R 曲线,DCB 试验结果见表 6。空白组 $G_{IC,NL}$ 、 $G_{IC,VIS}$ 、 $G_{IC,max}$ 的平均值分别为 192、476、410 J/m²,定型剂组 $G_{IC,NL}$ 、 $G_{IC,VIS}$ 、 $G_{IC,max}$ 的平均值分别为 156、762、776 J/m²,分别改变了一 18.8%、60.1%、89.3%。空白组试样层间没有定型剂,充模过程中,纤维被冲散,层间并没有明显的界限;而定型剂组层间有定型剂,定型效果好,液体成型后的试样尺寸稳定性好,层间界限明显。在 DCB 试验中纤维桥连会对应变能释放速率产生很大的影响,空白组没有层间界限,会产生大量纤维桥连。从图 20 和图 21 中可以看出,空白组存在大量桥连纤维,而定型剂组几乎没有,空白组中的纤维桥连增加了初始裂纹扩展的难度,因此空白样的 $G_{IC,NL}$ 高于定型剂组;在后续裂纹扩展中,由于定型剂组层间存在热塑性定型剂,定型剂的存在阻碍了裂纹扩展,定型剂吸收的能量大于桥连纤维吸收的能量,定型剂组应变能释放速率更大,断裂韧性高于空白组。在层间引入定型剂提高了复合材料的 I 型层间断裂韧性。

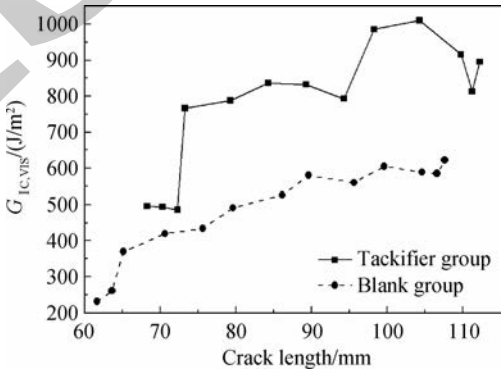


图 19 定型剂组和空白组 DCB 试样分层阻抗曲线
Fig. 19 Delamination resistance curves of tackifier group and blank group with DCB specimens

2.4.3 II 型层间断裂韧性的影响

用端部开口弯曲(ENF)来测 II 型层间断裂韧性 G_{IIC} 。ENF 试验结果见表 7,从表中可以看出,空白组 G_{IIC} 平均值为 519 J/m²,定型剂组 G_{IIC} 平均值为 519 J/m²,定型剂组相比于空白组增加了 54.1%。图 22 是断裂面的 SEM 图,从图中可以看出,定型剂组层间存在热塑性定型剂,裂纹扩展时,吸收了大量的能量,使定型剂组的 II 型断裂韧性高于空白组。在层间引入定型剂提高了复合材料的 II 型层间断裂韧性。

表 6 I 型层间断裂韧性
Table 6 Mode-I interlaminar fracture toughness

组别	纤维体积 分数/%	$G_{IC,NL}$		$G_{IC,VIS}$		$G_{IC,max}$	
		平均值/(J/m ²)	离散度/%	平均值/(J/m ²)	离散度/%	平均值/(J/m ²)	离散度/%
空白组	61.7	192	3.6	476	5.5	410	9.4
定型剂组	56.2	156	3.8	762	10.5	776	2.1

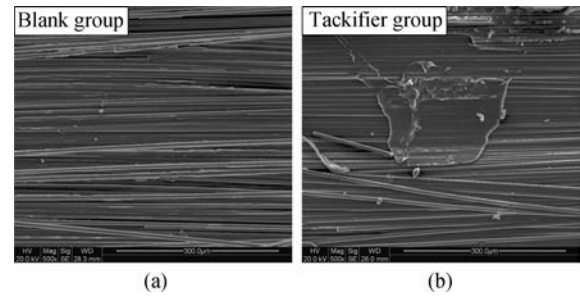


图 20 空白组和定型剂组的 DCB 试样张开断面形貌对比
Fig. 20 Comparison of fracture topography surface of DCB specimens with blank group and tackifier group

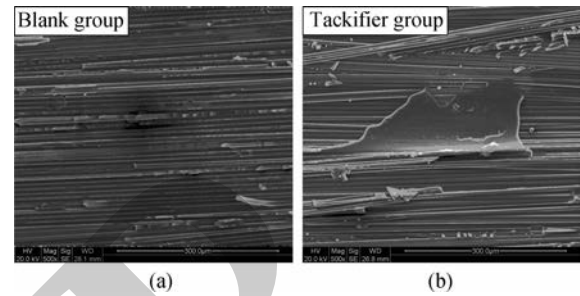


图 22 空白组和定型剂组的 ENF 试样的断面形貌对比
Fig. 22 Comparison of fracture topography surface of ENF specimens with blank group and tackifier group

表 8 冲击强度
Table 8 Impact strength

组别	纤维体积 分数/%	冲击强度	
		平均值/(J/m ²)	离散度/%
空白组	60.5	139	10.6
定型剂组	58.7	165	7.7

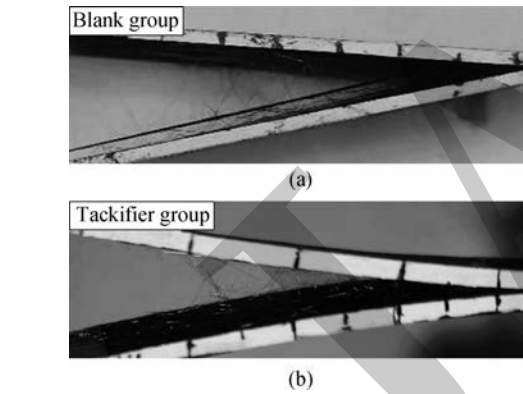


图 21 试样纤维桥连现象
Fig. 21 Phenomenon of fiber bridging of specimen

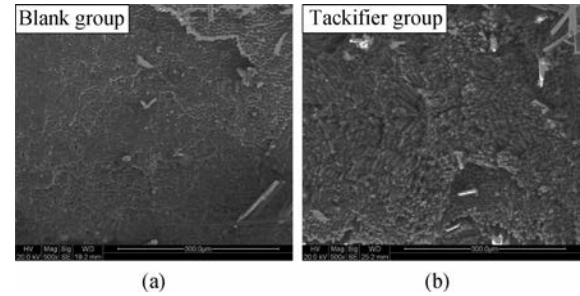


图 23 空白组和定型剂组的冲击试样的断面形貌对比
Fig. 23 Comparison of fracture topography surface of impact specimens with blank group and tackifier group

表 7 II 型层间断裂韧性
Table 7 Mode-II interlaminar fracture toughness

组别	纤维体积 分数/%	G_{IIC}	
		平均值/(J/m ²)	离散度/%
空白组	64.8	519	4.7
定型剂组	55.7	800	23.7

2.4.4 冲击强度的影响

用简支梁无缺口冲击来测冲击强度。冲击性能见表 8,空白组冲击强度为 139 J/m²,定型剂组冲击强度为 165 J/m²,增加了 18.7%。图 23 是冲击断面的 SEM 图片,空白样冲击断面呈现脆

性断裂,断面较平整,纤维和树脂基体的断裂同时发生;定型剂组试样有多个断面,说明冲击裂纹沿截面扩展时受到阻碍,裂纹改变扩展方向,消耗更多的能量,具有更高的冲击强度。

3 结 论

干铺丝-液体成型工艺综合了自动铺放与液

体成型的优点,本文通过试验及工艺仿真,确定了热塑性定型剂 PA-6 最佳质量分数,研究了 PA-6 对预制体渗透率的影响及复合材料制品力学性能的影响,得出以下结论:

1) 通过 T 剥离试验对比了不同质量分数 PA-6 的层间黏结定型效果,结果表明当定型剂质量分数为 8%时,既可以保证定型效果,又可以减少定型剂对树脂充模的阻碍。

2) 通过单向渗透率试验测试了加入 PA-6 前后纤维预制体的渗透率,结合试验测得的渗透率值对工艺仿真模型进行了修正,修正后工艺仿真结果与试验结果吻合较好,加入定型剂后,预制体渗透率分别下降了 55.5%和 52.0%。

3) 短梁剪切试验结果表明,加入 PA-6 后层间剪切强度有所降低,PA-6 与环氧树脂相容性较差,降低了层间结合强度。

4) I 型和 II 型层间断裂韧性结果表明,加入 PA-6 后层间断裂韧性有较大提高, $G_{IC,vis}$ 、 $G_{IC,max}$ 、 G_{IIc} 分别提高了 60.1%、89.3%、54.1%;冲击试验结果表明,加入 PA-6 后冲击韧性有所提升。

参考文献:

[1] 刘强,赵龙,黄峰.商用大涵道比发动机复合材料风扇叶片应用现状与展望[J].航空制造技术,2014,459(15):58-62.
LIU Qiang, ZHAO Long, HUANG Feng. Present conditions and development of composite fan blades of high bypass ratio commercial jet engines[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 459(15): 58-62. (in Chinese)

[2] 廖焕文. 复材叶片在民用航空发动机中的应用和发展[J]. 科技创新与应用, 2016(21): 122.
LIAO Huanwen. Application and development of composite blade in civil aviation engine[J]. Technology Innovation and Application, 2016(21): 122. (in Chinese)

[3] 宋超. 航空发动机复合材料叶片设计及成形技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
SONG Chao. Research on design and manufacture for composites blade in aircraft turbin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

[4] 关留祥,李嘉禄,焦亚男,等. 航空发动机复合材料叶片用 3D 机织预制体研究进展[J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 748-759.
GUAN Liuxiang, LI Jialu, JIAO Yanan, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aero engine [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 748-759. (in Chinese)

[5] 乌云其格,益小苏. RTM 双马树脂用定型剂研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, 27(5): 37-40.

WUYU Qiqige, YI Xiaosu. Research on the tackifier for RTM bismaleimide-based resin[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008, 27(5): 37-40. (in Chinese)

[6] BELHAJ M, DELEGLISE M, COMAS-CARDONA S, et al. Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms[J]. Composites: Part B Engineering, 2013, 50(7): 107-111.

[7] MACK J, MITSCHANG P. Efficient and flexible technology for binder roving manufacturing[J]. International Journal of Applied Sciences and Technology, 2015, 8(2): 93-100.

[8] 蔡吉喆,肇研,刘慧,等. RTM 环氧树脂用新型定位胶黏剂的研制[J]. 材料工程, 2009(增刊 2): 57-60, 64.
CAI Jizhe, ZHAO Yan, LIU Hui, et al. Study on novel tackifier for RTM[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(Suppl. 2): 57-60, 64. (in Chinese)

[9] 梁子青,唐邦铭,李艳亮,等. 定型剂与树脂基体相容性的研究[J]. 材料工程, 2005(4): 15-17, 41.
LIANG Ziqing, TANG Bangming, LI Yanliang, et al. Research on compatibility of tackifier and resin[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(4): 15-17, 41. (in Chinese)

[10] 钟翔屿,包建文,张代军,等. 热塑增韧环氧树脂体系的黏温特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(3): 71-77.
ZHONG Xiangyu, BAO Jianwen, ZHANG Daijun, et al. Viscosity-temperature characteristics of epoxy resin system toughened by thermoplastic particles[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2017, 33(3): 71-77. (in Chinese)

[11] 王惠民,梁伟荣. 聚醚砜/环氧树脂复合体系的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, 15(6): 155-157.
WANG Huimin, LIANG Weirong. Studies on composite systems of polyether sulfone/epoxy resin[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 1999, 15(6): 155-157. (in Chinese)

[12] FRANCIS B, LAKSHMANA R V, RAMASWAMY R, et al. Morphology, viscoelastic properties, and mechanical behavior of epoxy resin modified with hydroxyl-terminated poly(ether ether ketone) oligomer with pendent tert-butyl groups[J]. Polymer Engineering and Science, 2005, 45(12): 1645-1654.

[13] 郝冬梅,王新灵,唐小贞. 反应性聚碳酸酯增韧改性环氧树脂体系固化反应动力学的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(2): 47-50.
HAO Dongmei, WANG Xinling, TANG Xiaozhen. Study on kinetics of curing reaction of epoxy resin toughened by amino polycarbonate[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2002, 18(2): 47-50. (in Chinese)

[14] TANOHLU M, ROBERT S, HEIDER D, et al. Effects of thermoplastic preforming binder on the properties of S2-glass fabric reinforced epoxy composites[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2001, 21(3): 187-195.

[15] ROHATGI V, LEE L J. Moldability of tackified fiber preforms in liquid composite molding[J]. Journal of Compos-

ite Materials,1997,31(7):720-744.

[16] STEGGALL-MURPHY C, SIMACEK P, ADVANI S G, et al. A model for thermoplastic melt impregnation of fiber bundles during consolidation of powder-impregnated continuous fiber composites[J]. Composites; Part A Applied Science and Manufacturing,2010,41(1):93-100.

[17] 陈浩然,李勇,还大军,等. T700/PEEK 热塑性自动铺放预浸纱制备质量控制及性能研究[J]. 航空学报,2018,39(6):1-10.

CHEN Haoran,LI Yong,HUAN Dajun,et al. Quality control and mechanical properties of T700/PEEK thermoplastic prepreg for AFP[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2018,39(6):1-10. (in Chinese)

[18] 肖飞,姜茂川,刘强,等. 复合材料副翼典型结构件的 VARI 工艺模拟及试验验证[J]. 航空材料学报,2015,35(3):69-76.

XIAO Fei,JIANG Maochuan,LIU Qiang,et al. Flap structural composites VARI fluid process molding simulation technology and experiments validation[J]. Journal of Aeronautical Materials,2015,35(3):69-76. (in Chinese)

[19] 倪爱清,蔡红涛,王继辉. 真空灌注成型工艺中玻璃纤维毡渗透率的测量[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(4):67-70.

NI Aiqing, CAI Hongtao, WANG Jihui. Permeability measurement method of the glass mat in VARI process [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2009,31(4):67-70. (in Chinese)

[20] 刘卓峰,彭超义,曾竟成,等. 纤维织物面外渗透率的测试方法及测试模具:CN 101819129 A[P]. 2010-09-01.

(编辑:王碧琚)