

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.020

预浸料黏性定量表征方法及其影响因素

祝林¹, 陈素明¹, 王浩军¹, 郑超¹, 赵虎¹, 肖鸿²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089; 2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 预浸料是树脂基复合材料热压罐等成型工艺的原材料, 黏性是预浸料的基本特性, 对复合材料成型过程的生产效率、成型质量与稳定性具有重要意义。目前预浸料的黏性还没有通用的定量测试方法, 主要通过定性方法来评价。为了对预浸料的黏性进行更准确地评价, 建立了一种自动铺放-90°剥离式预浸料黏性的定量测试方法, 测试过程包括预浸料测试样件的制备、预浸料的铺放以及预浸料的剥离。通过正交试验对铺放速度、铺放压力和剥离速度等黏性测试参数进行了优化, 对不同类型的预浸料进行了黏性定量测试, 并且研究了暴露时间对预浸料黏性的影响规律。结果表明, 该测试方法可对预浸料的黏性进行定量测试, 优化后的测试参数为铺放温度 25 °C, 铺放压力 700 N, 铺放速度 1 m/min, 剥离速度 100 mm/min; 在一定范围内, 预浸料的黏性随着铺放压力的增大而增大, 随着铺放速度的增大而减小, 随着剥离速度的增大而增大; 不同类型的预浸料黏性存在一定差距, 预浸料与预浸料之间的黏性大于预浸料与不锈钢板之间的黏性; 随着暴露时间从 0 d 增长到 30 d, AC531/CCF800H 预浸料与预浸料之间的黏性从 4.62 N/cm 降低到 0.89 N/cm, 预浸料与不锈钢板的黏性从 0.81 N/cm 降低到 0.19 N/cm。

关键词: 预浸料; 黏性; 定量测试; 自动铺放; 暴露时间

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0136-07

Quantitative characterization method and influencing factors of prepreg tack

ZHU Lin¹, CHEN Suming¹, WANG Haojun¹, ZHENG Chao¹, ZHAO Hu¹, XIAO Hong²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract : Prepregs are the raw material for autoclave and other processing of resin matrix composite materials. Tack is the basic property of prepreg, which is of great significance to the production efficiency, product quality and stability of the composite forming process. At present, there is no universal quantitative test method for the tack of prepreg, and it is mainly evaluated by qualitative methods. In order to evaluate the tack of prepreg more accurately, an automatic laying-90° peeling prepreg tack quantitative test method was established. The test process included the preparation of prepreg test samples, the laying of prepreg samples and the peeling of prepreg samples. Through orthogonal experiments, the tack test parameters including laying speed, laying pressure and peeling speed were optimized. The tack of different types of prepreg was quantitatively tested, and the influence of exposure time on the tack of prepreg was studied. The results show that the test method can quantitatively test the tack of prepreg. The optimized test parameters are laying temperature 25 °C, laying pressure 700 N, laying speed 1 m/min, and peeling speed 100 mm/min. Within a certain range, the tack of prepreg increases with the increase of laying pressure, decreases with the increase of laying speed, and increases with the increase of peeling speed. The tack of different types of prepregs is variable. The tack between prepregs is greater than the tack between prepreg and stainless steel plate. As the exposure time increases from 0 days to 30 days, the tack between AC531/CCF800H prepregs decreases from 4.62 N/cm to 0.89 N/cm, and the tack between prepreg and stainless steel plate decreases from 0.81 N/cm to 0.19 N/cm.

Keywords : prepreg ; tack ; quantitative analysis ; automatic laying ; exposure time

基金项目: 民用飞机专项科研项目(MJZ1-11N22)

通信作者: 祝林, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为树脂基复合材料

收稿日期: 2025-01-24

引用格式: 祝林, 陈素明, 王浩军, 等. 预浸料黏性定量表征方法及其影响因素[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 136-142.

ZHU Lin, CHEN Suming, WANG Haojun, et al. Quantitative characterization method and influencing factors of prepreg tack[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 136-142.

先进树脂基复合材料因具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀、抗疲劳、破损安全性好、性能可设计等优势已经成为航空航天结构的基本材料^[1-3]。预浸料是树脂基复合材料热压罐等成型工艺的原材料,决定了复合材料产品的性能。热压罐成型工艺的首要步骤是将预浸料逐层铺放形成符合设计要求的特定形状的预制体,预浸料的黏性直接影响其在铺放过程的定位、层间结合以及固化后复合材料的微观结构与宏观质量。因此,预浸料的黏性是预浸料基本的材料特性,确保预浸料具有适宜的黏性对复合材料制造的生产效率、产品质量与稳定性具有重要意义^[4-6]。

目前对预浸料的黏性还没有通用的定量测试方法,主要通过定性方法评价,包括滚球法、撕裂法、粘贴分离法^[7]。在工业上广泛应用的黏性评价方法是垂直金属板法(HB 7736.8-2004),是通过测试垂直的金属板上粘贴的预浸料在一定时间下的彼此分离程度、是否脱落来评定预浸料的黏性。该方法的优点是直观简单,但是受偶然因素影响较大,并且无法定量评价。此外,国内外学者对预浸料黏性的定量测试开展了一些研究工作,主要包括压/拉试验法、探针试验法与剥离试验法^[8-10]。王雪明等^[7]通过预浸料叠层的压缩-拉伸试验,基于预浸料的黏弹性以分离能、压缩黏性指数来表征预浸料的黏性。Wang等^[11]与Tonye等^[12]使用探针来测试探针与预浸料之间的黏结力,使用最大分离力来表征预浸料的黏性。但压/拉试验法与探针法黏性测试机制与预浸料铺贴过程差异较大,无法反映预浸料的铺放过程与受力方式,不太适合表征预浸料铺放过程的黏性。

Crossley等^[13]提出了一种连续铺放-剥离测试装置,可模拟预浸料的铺放过程,采用分段剥离方式,以预浸料之间的剥离力来表征预浸料的黏性,并消除了弯曲刚度对黏性力的影响。Choong等^[14]采用该方法研究了铺放温度、铺放压力等因素对预浸料紧密接触程度以及预浸料黏性的影响规律。Smith等^[15]使用该方法研究了不同室温老化时间下预浸料的黏性。但是该黏性测试方法的铺放速度与剥离速度相同,铺放速度较慢,无法在高速铺放条件下进行测试,并且铺放过程的温度难以控制。猴建杰等^[16]将预浸料铺放与剥离过程分开,采用小型自动铺放设备制备预浸料试样,再进行T型剥离,以剥离

力表征预浸料的黏性。但是该方法得到的剥离力受到预浸料本身刚度的影响,存在一定系统误差,而且无法测试预浸料与刚性基材之间的黏性。

为了对预浸料的黏性进行更加准确的评价,笔者在前人研究工作的基础上,建立了一种自动铺放-90°剥离式预浸料黏性定量测试方法。该方法将预浸料铺放与剥离测试过程分开,可以模拟预浸料高速铺放过程;并且采用90°剥离方式,通过设置两个剥离段消除了预浸料刚度对剥离力的影响。通过正交试验对预浸料黏性测试参数进行了优化,并且研究了不同类型的预浸料的黏性,最后对不同暴露时间的预浸料的黏性进行了测试,并与HB 7736.8-2004黏性定性测试方法的结果进行了对比。

1 实验部分

1.1 主要原材料

高韧性高温固化环氧碳纤维单向带预浸料:AC531/CCF800H,树脂含量35%,北京市中航复合材料有限责任公司;

高韧性高温固化环氧碳纤维织物预浸料:AC531/CF8611,树脂含量40%,北京市中航复合材料有限责任公司;

高温固化高强碳纤维增韧环氧树脂单向带预浸料:CYCOM977-2-35-12K HTS-134,树脂含量35%,氰特工程材料(上海)有限公司;

高温固化高强碳纤维增韧环氧树脂织物预浸料:CYCOM977-2A-37-3K HTA-5H-280,树脂含量37%,氰特工程材料(上海)有限公司;

高温固化环氧碳纤维单向带预浸料:EH104/HF10A,树脂含量33%,江苏恒神股份有限公司;

高温固化环氧碳纤维单向带预浸料:EH104/HFW220TA,树脂含量38%,江苏恒神股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

预浸料铺放试验装置:由六自由度工业机器人和铺放头两部分组成,铺放头结构包括压辊、压紧气缸、导向轮、红外加热装置等;铺放头能够提供可控的铺放压力与铺放速率,并通过温控仪以及热电偶温度反馈进一步实现对铺放温度的控制,预浸料铺放试验装置如图1所示,西安交通大学自主研制;

预浸料剥离试验装置:90°剥离装置由组合式夹板组件与剥离滚轮组件组成;剥离滚轮组件有四个剥离辊轴,包括两个支撑辊、一个剥离导向辊和一个压紧辊;两个支撑辊用于支撑引导铺放基板,剥



图1 预浸料铺放试验装置

Fig. 1 Prepreg laying test device

离导向辊保证剥离角度恒定为 90° ,压紧辊可将预浸料压紧在基板和剥离导向辊上,以保证预浸料能够稳定剥离;组合式夹板组件与试验机上夹头连接用于加持需要剥离的预浸料,同时为预浸料提供恒定的剥离速率,预浸料剥离试验装置如图2所示,西安交通大学自主研制;



图2 预浸料剥离试验装置

Fig. 2 Prepreg peeling test device

万能力学试验机:WDW-100M,济南辰达试验机制造有限公司。

1.3 试样制备

将测试用预浸料裁剪成75 mm宽的料片,制备预浸料测试样件,预浸料样件示意图如图3所示。对于预浸料与预浸料之间黏性的测试,将第一层预浸料粘贴在不锈钢基板上,在剥离段I与夹持段放一层隔离膜,将第二层预浸料按照设定的压力与铺

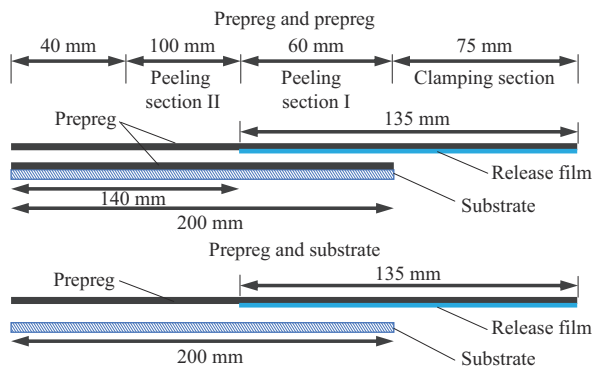


图3 预浸料黏性测试样件示意图

Fig. 3 Prepreg tack test sample schematic diagram

放速度铺放在第一层预浸料上;对于预浸料与不锈钢基板之间的黏性测试,在剥离段I与夹持段放一层隔离膜,将预浸料按照设定的压力、铺放速度与铺放温度铺放在不锈钢基板上。

1.4 测试与表征

1.4.1 预浸料黏性定量表征试验参数确定

以AC531/CCF800H单向带预浸料为研究对象,研究试验参数对预浸料黏性的影响,确定预浸料黏性定量表征试验参数。预浸料黏性的定量表征试验参数包括铺放试验参数与剥离试验参数,铺放试验参数包括铺放压力、铺放速度与铺放温度,剥离试验参数为剥离速度。预浸料通常在室温下进行铺贴,因此铺放温度设定为 25°C 。在已有研究的基础上,对铺放压力、铺放速度与剥离速度设计正交试验,使用3因素4水平正交表 $L_{16}(4^3)$,每组做5次平行试验。将AC531/CCF800H单向带预浸料按不同的铺放参数制备成黏性测试样件,使用预浸料剥离试验装置按不同的剥离参数对预浸料样件进行 90° 剥离试验,记录拉伸试验机中的剥离力、夹板位移等试验数据。

1.4.2 不同类型预浸料黏性的定量表征

按照正交试验确定的黏性定量表征试验参数,对AC531/CCF800H单向带预浸料、AC531/CF8611织物预浸料、CYCOM977-2-35-12K HTS-134单向带预浸料、CYCOM977-2A-37-3K HTA-5H-280织物预浸料、EH104/HF10A单向带预浸料、EH104/HFW220TA织物预浸料进行黏性定量测试,包括预浸料与预浸料的黏性以及预浸料与不锈钢板之间的黏性。

1.4.3 暴露时间对预浸料黏性的影响

将AC531/CCF800H单向带预浸料在室温环境下暴露不同天数(0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 d),温度为 25°C ,相对湿度为55%,按上述方法对不同暴露天数的预浸料的黏性进行定量测试。同时,用HB 7736.8-2004垂直金属板法对不同暴露天数的AC531/CCF800H单向带手工铺放预浸料的黏性进行定性测试。

2 结果与讨论

2.1 预浸料黏性定量表征试验参数的确定

以AC531/CCF800H预浸料为试验对象,使用预浸料铺放试验装置制备预浸料与预浸料黏性测试样件,再使用预浸料剥离试验装置对预浸料样件

进行90°剥离试验,试验结果如图4所示。该黏性测试曲线的横坐标为试验机行程,纵坐标为试验过程的剥离力。剥离力有两个台阶,第一个台阶对应剥离段Ⅰ,该段预浸料之间放置有隔离膜,预浸料之间黏性力为0,试验结果代表预浸料的刚度剥离力;第二个台阶对应剥离段Ⅱ,试验结果代表预浸料刚度剥离力与黏性剥离力的叠加;将两个台阶的剥离力相减即可得到预浸料与预浸料之间的黏性力。这种“两步法”铺放-剥离黏性测试将预浸料样件的制备阶段与剥离阶段分开,试验参数范围更宽,可在更高速度、更高温度下铺放预浸料样件,更接近预浸料铺放工艺过程;而且两个剥离段的设置可以扣除预浸料刚度对剥离力的影响,测试结果更加准确。

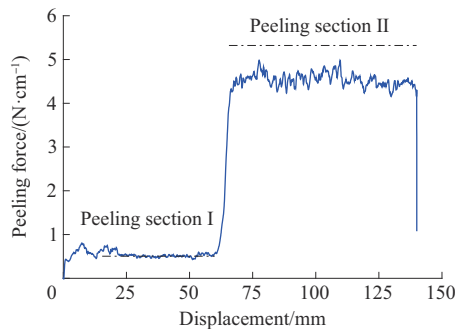


图4 预浸料黏性的典型测试曲线
Fig. 4 Typical test curve of prereg tack

预浸料黏性定量表征方法的试验参数包括铺放压力、铺放温度、铺放速度与剥离速度。以AC531/CCF800H预浸料与预浸料间的黏性为试验对象,铺放温度设定为25℃,对其余参数进行3因素4水平正交试验,计算每组实验的黏性平均值与变异系数,试验结果见表1。

对黏性平均值进行极差分析,见表2。极差分析结果表明,3种因素(铺放压力、铺放速度、剥离速度)对预浸料黏性的影响大小排序为:铺放压力>铺放速度>剥离速度。

绘制各因素对黏性平均值的影响趋势图,如图5所示。由图5a可见,预浸料的黏性平均值随铺放压力的增大而增大。铺放压力增加,有利于预浸料层间树脂的紧密接触与流动,预浸料层间树脂的接触程度增大,层间黏结强度提高。由图5b可知,随着铺放速度增大,预浸料的黏性平均值降低。铺放速度的增加导致预浸料层间的接触时间降低,预浸料层间黏结强度因而降低。图5c表明,预浸料的黏性平均值随剥离速度的增大而增大。这是由于随

表1 预浸料黏性正交试验结果

Tab. 1 Orthogonal test results of prereg tack

No.	P/N	$V_1/(m \cdot min^{-1})$	$V_2/(mm \cdot min^{-1})$	Tack/($N \cdot cm^{-1}$)	CV
1	250	1	25	2.47	0.09
2	250	2	50	2.27	0.13
3	250	4	75	1.55	0.17
4	250	8	100	1.68	0.10
5	400	1	50	1.92	0.07
6	400	2	25	1.88	0.08
7	400	4	100	2.31	0.08
8	400	8	75	2.16	0.08
9	550	1	75	3.00	0.05
10	550	2	100	2.93	0.07
11	550	4	25	2.23	0.06
12	550	8	50	2.39	0.11
13	700	1	100	3.25	0.04
14	700	2	75	3.11	0.12
15	700	4	50	2.97	0.06
16	700	8	25	2.67	0.07

Notes: P is laying force; V_1 is laying speed; V_2 is peeling speed; CV is coefficient of variation.

表2 预浸料黏性平均值极差分析

Tab. 2 Range analysis of mean prereg tack

Level	P	V_1	V_2
1	1.99	2.66	2.31
2	2.07	2.55	2.39
3	2.64	2.26	2.45
4	3.00	2.22	2.54
Range	1.01	0.44	0.23
Ranking	1	2	3

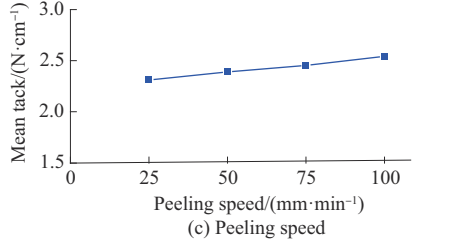
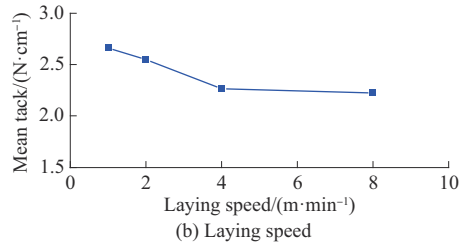
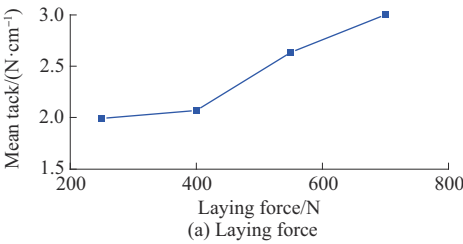


图5 不同试验参数对预浸料黏性平均值的影响

Fig. 5 Influence of different test parameters on mean prereg tack

着剥离速度增加,单位时间内剥离的面积增大,剥离力因而增加。

同理,对预浸料黏性的变异系数进行极差分析,见表3。表3结果表明,3种因素(铺放压力、铺放速度、剥离速度)对预浸料黏性变异系数的影响大小排序为:铺放压力>铺放速度>剥离速度。

表3 预浸料黏性变异系数极差分析

Level	P	V_1	V_2
1	0.125	0.063	0.074
2	0.076	0.099	0.095
3	0.074	0.095	0.105
4	0.072	0.090	0.072
Range	0.054	0.036	0.033
Ranking	1	2	3

绘制各因素对预浸料黏性变异系数的影响趋势图,如图6所示。由图6可见,预浸料黏性变异系数随铺放压力的增加而减小,随着铺放速度、剥离速度增加发生一定波动。

综合考虑各因素对黏性平均值与黏性变异系数的影响规律,以黏性平均值较大、变异系数较小为目标,最优的黏性定量表征测试参数选择为铺放压力700 N、铺放速度1 m/min、剥离速度100 mm/min。

2.2 不同类型预浸料的黏性定量表征

不同类型的预浸料因树脂体系、配方以及微观形貌不同而黏性不同。传统的黏性定性表征方法无法对不同类型的预浸料的黏性进行定量比较,为了比较国内外不同类型预浸料的黏性,采用预浸料黏性定量表征方法对不同类型的预浸料进行了测试。设定铺放压力为700 N、铺放速度为1 m/min、铺放温度为25℃、剥离速度为100 mm/min,对多种类型的预浸料进行预浸料与预浸料、预浸料与不锈钢板的黏性定量表征,结果如图7所示。由图7可知,不同类型的预浸料的黏性存在一定差距,预浸料与预浸料之间的黏性大于预浸料与不锈钢板之间的黏性。而且,对于这6种预浸料,预浸料与预浸料之间的黏性均在(3.17~5.97) N/cm范围内,预浸料与不锈钢板之间的黏性均在(0.41~1.47) N/cm范围内。

2.3 暴露时间对预浸料黏性的影响

在复合材料制造过程中,预浸料不可避免地会在常温下暴露,暴露时间的延长会对预浸料的黏性造成不利影响。为了定量表征暴露时间对预浸料黏性的影响,将AC531/CCF800H单向带预浸料室

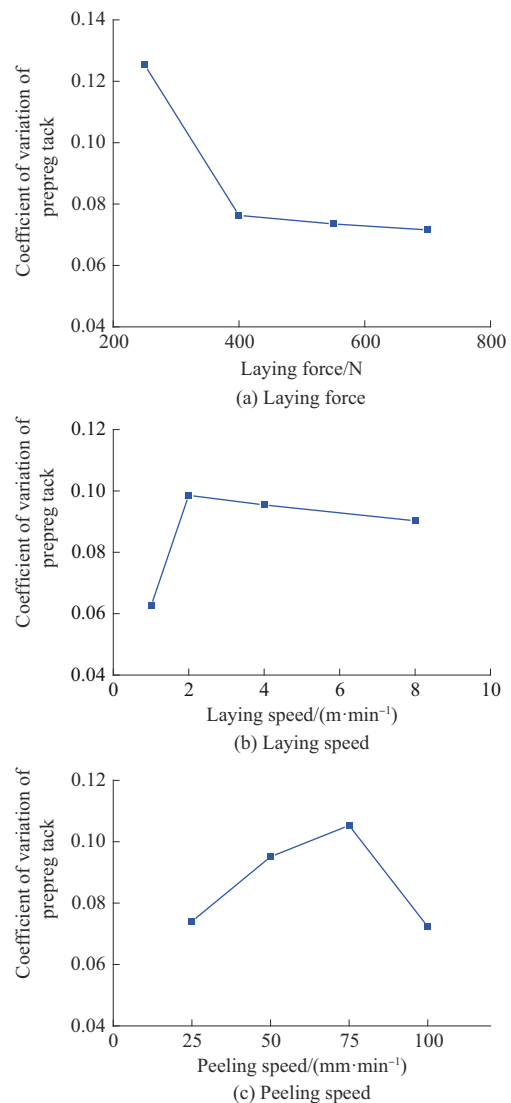


图6 不同试验参数对预浸料黏性变异系数的影响

Fig. 6 Influence of different test parameters on coefficient of variation of prepreg tack

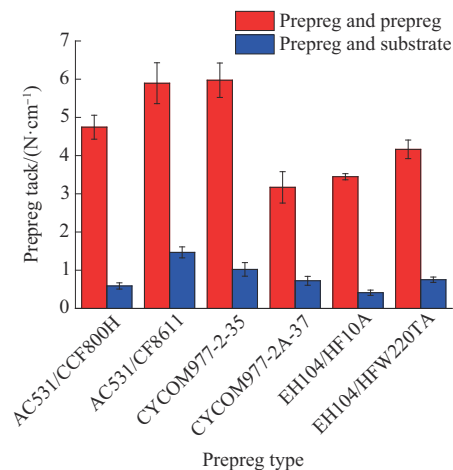


图7 不同类型预浸料的黏性

Fig. 7 Tack of different types of prepreg

温下暴露不同天数(0,5,10,15,20,25,30 d),对预浸料黏性进行了定量测试,同时按照 HB 7736.8-2004 对预浸料黏性进行定性测试,按表 4 对黏性等级进行评定,预浸料黏性测试结果见表 5 和图 8。

表 4 预浸料定性黏性水平的评价方法

Tab. 4 Evaluation method of qualitative tack level of prepreg	
Tack level	Test phenomenon
Level 1	Can affixed to each other, can separated without loss, can affixed to polished steel plate
Level 2	Can affixed to each other, can't separated without loss, can affixed to polished steel plate
Level 3	Can affixed to each other, can separated without loss, can't affixed to polished steel plate
Level 4	Can't affixed to each other, can separated without loss, can't affixed to polished steel plate
Level 5	Can affixed to each other, can't separated without loss, can't affixed to polished steel plate

表 5 不同暴露时间的 AC531/CCF800H 预浸料的定性黏性等级
Tab. 5 Qualitative tack level of AC531/CCF800H prepreg at different exposure time

Exposure time/day	Tack level
0	Level 2
5	Level 2
10	Level 1
15	Level 1
20	Level 1
25	Level 3
30	Level 4

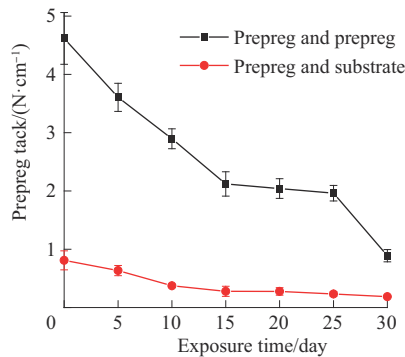


图 8 暴露时间对 AC531/CCF800H 预浸料黏性的影响
Fig. 8 Influence of exposure time on tack of AC531/CCF800H prepreg

由图 8 可见,随暴露时间延长,AC531/CCF800H 预浸料的黏性不断下降。暴露时间从 0 d 增加到 30 d,预浸料与预浸料的黏性从 4.62 N/cm 降低到 0.89 N/cm,预浸料与不锈钢板的黏性从 0.81 N/cm 降低到 0.19 N/cm。将预浸料定量黏性测试数据与定性黏性测试数据对比可得,当暴露时间从 20 d 到 25 d 时,预浸料从能与不锈钢板粘贴转变为不能与不锈钢板粘贴,预浸料的黏性等级从 1 级变为 3 级,此时对应预浸料与不锈钢板的黏性从 0.28 N/cm 降

至 0.23 N/cm,预浸料与预浸料的黏性从 2.04 N/cm 降至 1.96 N/cm;当暴露时间从 25 d 到 30 d 时,预浸料从自身互相粘贴转变为自身不能互相粘贴,预浸料的黏性等级从 3 级变为 4 级,此时对应预浸料与预浸料的黏性从 1.96 N/cm 降低为 0.89 N/cm。

由此可得,当预浸料与不锈钢板的定量黏性大于等于 0.28 N/cm,预浸料与预浸料的定量黏性大于等于 2.04 N/cm 时,对应预浸料既能够与不锈钢板粘贴也能自身互相粘贴;当预浸料与预浸料的定量黏性大于等于 1.96 N/cm 时,对应预浸料能够自身互相粘贴。

3 结论

(1)采用自动铺放-90°剥离装置建立了预浸料黏性定量表征方法,该方法可对预浸料的黏性进行定量表征,优化后的测试参数为铺放温度 25℃,铺放压力 700 N,铺放速度 1 m/min,剥离速度 100 mm/min。

(2)在一定范围内,预浸料的黏性随着铺放压力的增大而增大,随着铺放速度的增大而减小,随着剥离速度的增大而增大。

(3)不同类型的预浸料的黏性存在一定差距,预浸料与预浸料之间的黏性大于预浸料与不锈钢板之间的黏性。

(4)预浸料的黏性随暴露时间延长而降低,暴露时间从 0 d 增加到 30 d,AC531/CCF800H 预浸料与预浸料之间的黏性从 4.62 N/cm 降低到 0.89 N/cm,预浸料与不锈钢板的黏性从 0.81 N/cm 降低到 0.19 N/cm。

参考文献

[1] 单忠德,宋文哲,范聪泽,等.面向 2035 年复合材料构件精确制造发展战略研究[J].中国工程科学,2023,25(1):113-120.
SHAN Zhongde, SONG Wenzhe, FAN Congze, et al. Development strategy for precision manufacturing of composite components facing 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1):113-120.

[2] 邢丽英,李亚锋,陈祥宝.先进复合材料在航空装备发展中的地位与作用[J].复合材料学报,2022,39(9):4 179-4 186.
XING Liying, LI Yafeng, CHEN Xiangbao. Status and role of the advanced composite materials in the development of aviation equipment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 179 - 4 186.

[3] 张晨,刘甲秋,李军,等.复合材料在商用大飞机上的应用现状[J].纤维复合材料,2024,41(4):77-82.
ZHANG Chen, LIU Jiaqiu, LI Jun, et al. Application of composite materials in commercial large aircrafts[J]. Fiber Composites, 2024, 41(4):77-82.

[4] PAN H L, QU W W, YANG D, et al. Analysis and characterization

- of interlaminar tack for different prepreg materials during automated fiber placement[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(7):4 737–4 748.
- [5] BELHAJ M, DODANGEH A, HOJJATI M. Experimental investigation of prepreg tackiness in automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2021, 262. DOI: 10.1016/j.comstruct.2021.113602.
- [6] XIAO R, WANG W, SHI J Q, et al. Two-stage model of prepreg bonding interface formation in automated fiber placement process [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2022, 41(15/16):583–601.
- [7] 王雪明,刘秀,崔郁,等.高性能预浸料粘性定量测试评价技术浅析[J].*纤维复合材料*,2023,40(3):40–43.
WANG Xueming, LIU Xiu, CUI Yu, et al. Analysis of quantitative testing and evaluation technology for high performance prepreg tack[J]. *Fiber Composites*, 2023, 40(3):40–43.
- [8] 宋清华,王跃全,石甲琪,等.环境时效对预浸料自动铺放工艺粘性的影响[J].*纤维复合材料*,2021,38(4):28–32.
SONG Qinghua, WANG Yuequan, SHI Jiaqi, et al. Out-time effects on the prepreg tack in automated lay-up process[J]. *Fiber Composites*, 2021, 38(4):28–32.
- [9] BUDELMANN D, SCHMIDT C, MEINERS D. Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(9):3 440–3 458.
- [10] SHI J Q, WANG W, WANG Y Q, et al. A peel test method to characterize the decay law of prepreg tape tack at different temperatures[J]. *Materials*, 2024, 17(10).DOI:10.3390/ma17102449.
- [11] WANG Y, MAHAPATRA S, BELNOUE J P H, et al. Understanding tack behaviour during prepreg-based composites' processing [J]. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2023, 164.DOI:10.1016/j.compositesa.2022.107284.
- [12] MBOTTO TONYE D, BUET GAUTIER K. Influence of the reinforcement on prepreg tack[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(9): 4 795–4 803.
- [13] CROSSLEY R J, SCHUBEL P J, WARRIOR N A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness[J]. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43 (3):423–434.
- [14] CHOONG G Y H, ENDRUWEIT A, DE FOCATHIS D S A. Analysis of contact area in a continuous application-and-peel test method for prepreg tack[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021, 107.DOI:10.1016/j.ijadhadh.2021.102849.
- [15] SMITH A W, ENDRUWEIT A, CHOONG G Y H, et al. Adaptation of material deposition parameters to account for out-time effects on prepreg tack[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 133. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105835.
- [16] 缙建杰,杨扬,陈代鑫,等.多因素作用下自动铺丝预浸料黏性变化规律[J].*复合材料科学与工程*,2021(9):38–45.
GOU Jianjie, YANG Yang, CHEN Daixin, et al. Tack variation of composite tows for automated fiber placement under multi influence factors[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(9): 38–45.