

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.015

## NY9200GA 树脂体系预浸料自动铺放粘结性工艺研究

李勇 王敏 肖军 还大军 褚奇奕

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,210016)

**摘要:**为研究 NY9200GA 环氧树脂体系预浸料的自动铺放粘结性工艺特性,采用自行设计的预浸料粘结性测试装置,通过单因素试验,研究不同铺放工艺条件下预浸料的层间粘结性变化规律;运用正交试验法确定各铺放工艺参数对粘结性的影响程度。结果表明,随着铺放温度的升高,预浸料层间粘结性先增大后降低,在温度为 40 °C 时粘结性出现峰值;铺放压力的增大和速度的减小均会增加预浸料层间的粘结性;温度对预浸料层间粘结性值的影响最大,压力的影响次之。此外,预浸料层间粘结性与放置时间和纤维方向有关,在室温环境中存放的时间越长,预浸料层间的粘结性越低;随着相邻铺层间纤维夹角的增加,预浸料层间粘结性也逐渐增加,其中 0°/90°铺层间粘结性是 0°/0°的近两倍。

**关键词:**预浸料;自动铺放;层间粘结性;铺放工艺参数;纤维方向

**中图分类号:**V258;TB332      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2015)04-0571-08

## Research on Prepreg Tack of NY9200GA Resin Series for Automatic Placement Process

Li Yong, Wang Min, Xiao Jun, Huan Dajun, Chu Qiyi

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** A prepreg tack testing device is established to study the automatic placement process characteristics of the NY9200GA epoxy prepreg tack. Prepreg tack between layers under different placement processing parameters is discussed based on one-factor-at-a-time approach. Orthogonal test is used to determine the influence of placement processing parameters on tack. The results indicate that the prepreg tack between layers increases initially then decreases with rising of placement temperature. Tack peak appears at 40 °C. Both the increase of pressure and the decrease of feed rate lead to the increase of the prepreg tack between layers. The influence of temperature on tack is the largest. Pressure takes the second place to prepreg tack. Furthermore prepreg tack relates to exposure time and fiber direction. The longer the exposure time at room temperature is, the lower the prepreg tack will be. Prepreg tack between layers rises gradually with the increasing intersection fiber angle of the adjacent prepreg layers. The tack of 0°/90° layers is nearly double of the figure of 0°/0° layers.

**Key words:** prepreg; automatic placement; tack between layers; placement process parameters; fiber direction

自动铺放技术利用数控系统,实现预浸料的自动铺放、压实、剪切和重送等加工能力的集成<sup>[1]</sup>,是

目前世界上自动化、数字化程度最高的复合材料低成本制造技术之一<sup>[2]</sup>。自动铺放技术在航空航天

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2014CB046501)资助项目。

**收稿日期:**2014-08-07;**修订日期:**2014-12-03

**通信作者:**李勇,男,教授,博士生导师,E-mail:lyong@nuaa.edu.cn。

领域的快速发展,加快了铺放材料体系和工艺技术的研究步伐。预浸料作为自动铺放工艺的原材料,是自动铺放技术发展和应用的基础。由于欧美发达国家对相关设备和技术细节对中国保持封锁,中国国内自主研发预浸料体系仍在进行中<sup>[3]</sup>。NY9200GA系列树脂是中国自主开发的高温固化环氧树脂体系,以其为基体制备的预浸料具有室温贮存期长、固化温度带宽、固化时间短、工艺性能突出等优点,已经应用于多种型号的教练机、直升机等军机的复合材料结构成型<sup>[4]</sup>。预浸料的粘结性是指预浸料自身或与模具可粘贴的能力<sup>[5]</sup>,粘结性过大,在自动铺带中预浸料难以与背衬纸剥离;粘结性过小,预浸料无法在适当的工作温度和铺放压力作用下,依靠自身的粘结性铺覆在模具表面,会发生预浸料随铺放头的运动在模具表面打滑的现象<sup>[6]</sup>,粘结性的大小直接影响后续的铺层操作,所以预浸料的粘结性是保证自动铺放过程顺利进行的关键因素。

测定预浸料粘结性的方法分为定性和定量两种。预浸料粘结性定性测量包括滚球法<sup>[7]</sup>、撕裂法<sup>[8]</sup>及垂直金属板法<sup>[9]</sup>;定量测定则有压/拉试验法<sup>[10]</sup>、探针试验法<sup>[11]</sup>和剥离试验法<sup>[12]</sup>。这些方法仅适用于表征手工铺放成型预浸料的(静态)粘结性,而不适合自动铺放过程中预浸料(动态)粘结性的表征。目前自动铺放用预浸料粘结性的测定主要有两种方法:美国 Brooks 等<sup>[13]</sup>将自动铺放过程和剥离过程分开进行,先让预浸料处于影响粘结性的不同的状态,然后在万能试验机上剥离预浸料,用平均分离力(或分离能)来表征预浸料粘结性的大小;国内孙容磊等<sup>[8]</sup>采用类似的方法对自动铺放过程中预浸料铺层之间的粘结性进行定量研究,分析了铺放工艺参数(包括取出时间、铺放压力、铺放速率及热风温度等)对预浸料粘结性的影响。英国 Crossley 等<sup>[14-16]</sup>基于对自动铺带过程的理解,开发了另一种用于测量自动铺带过程中的预浸料与模具之间粘结性的剥离试验台,该装置可以同时表征预浸料的粘结性和刚度。陆楠楠等<sup>[17]</sup>借鉴这种方法设计了一套测试预浸料粘结性的装置,重点研究了预浸料与模具间的粘结性,但对预浸料层间的粘结性缺乏研究。

本文以自行研制的预浸料粘结性装置为试验平台,针对国产 HF10A/NY9200GA 铺放专用预浸料,研究分析铺放工艺参数(铺放温度、铺放压力和铺放速度等)、预浸料的室温存放时间以及相邻铺层不同纤维方向对预浸料层间粘结性的影响,为

中国国产预浸料用于自动铺放成型中工艺参数的选择提供了参考。

## 1 试验装置与原理

预浸料层间粘结性试验装置由万能试验机、测试夹具、加压装置以及控温装置组成(图1),其中测试夹具主要由上夹头,4个钢辊、不锈钢板、摇摆杆以及固定板组成(图2)。4个钢辊中的两个模拟自动铺放设备的导向槽,两个模拟压实系统;不锈钢板作为铺放模具;摇摆杆的设计便于实验操作;固定板用来连接各部件。试验机提供 $0\sim 500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度,加压装置由砝码提供,压力在 $30\sim 220\text{ N}$ 之间。控温装置利用电热管中电阻丝加热,将测试夹具置于环境箱中,用热电偶感应预浸料表面温度,环境箱的测试温度在室温到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



图1 粘结性试验装置图

Fig. 1 Tack test device

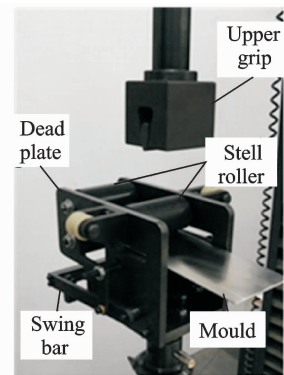


图2 测试夹具图

Fig. 2 Test jig

图3为测量预浸料层间粘结性过程的受力分析。预浸料在剥离过程中,匀速运动,根据能量守恒定律并参考文献<sup>[17]</sup>最终可得剥离力与粘结性值之间的关系

$$P = \mu P_n + G_p b + G_a b \quad (1)$$

式中: $P$ 为实验中测得的剥离力, $\mu$ 为预浸料与预浸料之间的摩擦系数, $P_n$ 为实际压力, $b$ 为待测料的宽度, $G_p$ 为单位面积塑性变形能, $G_n$ 为单位面积脱粘能。

先通过加热模具表面预铺一层预浸料,然后将其另一层预浸料平放在它上面,其另一端固定在上夹头。预浸料层间粘结性的测量分为两部分,第一阶段有PE膜覆盖在上下层预浸料表面,测量的是预浸料的刚度值( $\mu P_n + G_p b$ );第二阶段测定的预浸料表面没有PE薄膜,记录的是剥离阻力( $\mu P_n + G_p b + G_n b$ ),从平均剥离阻力中减去刚度值,就是粘结性值的大小( $G_n b$ )。图4为试验用试样各部分组成。图5为记录的载荷-位移曲线。

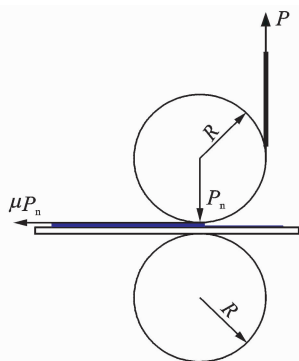


图3 预浸料受力分析图

Fig. 3 Force analysis of prepreg



图4 试样各部分组成

Fig. 4 Composition of each part of sample

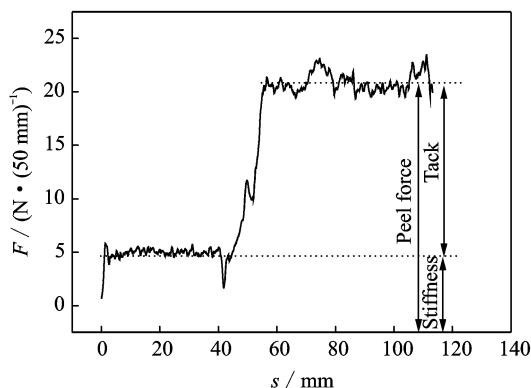


图5 典型载荷-位移曲线

Fig. 5 Typical load-displacement curve

放技术研制的预浸料: NY9200GA/PT-33%-3KHF10A-U-133gsm-300,其中预浸料中树脂种类为高温环氧 NY9200GA,树脂含量 33%,碳纤维种类 HF10A、规格 3K,预浸料的面密度 133 g/m<sup>2</sup>。经裁剪后用于实验的上下两层预浸料尺寸分别为 310 mm×50 mm 和 150 mm×50 mm。对影响预浸料层间粘结性的铺放工艺参数(包括铺放温度、压力和速度),预浸料在室温下的存放时间,以及相邻铺层不同纤维方向分别进行研究,同一参数下重复 5 次实验,取平均值作为该工艺条件下预浸料层间的粘结性值,计算单位为 N·(50 mm)<sup>-1</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 铺放工艺参数对预浸料层间粘结性的影响

自动铺放成型主要有 3 个工艺参数:铺放温度、成型压力和铺放速率。为保证预浸料铺放成型质量,应根据预浸料的层间粘结性,在铺放过程中选择合适的铺放温度、铺放压力、铺放速率等工艺参数以使其始终处于铺放成型的工艺窗口内<sup>[18]</sup>。

##### 3.1.1 单因素试验

首先进行单因素试验,一次试验只有一个工艺参数变化,另两个工艺参数固定在它们相对中间值。分别以温度(25, 30, 35, 40, 50, 55, 60 °C),压力(30, 70, 107, 165, 220 N),速度(10, 20, 50, 100, 150, 300 mm/min)为单因素,考察各铺放工艺参数对预浸料层间粘结性的影响。

将压力设为 107 N,速度设为 100 mm/min,在温度 25~60 °C 之间测定预浸料层间的粘结性,温度对预浸料层间粘结性的影响结果如图 6 所示。可以看出在 25~40 °C 范围内预浸料层间的粘结性随温度的升高而增加,这是因为温度升高,预浸料中树脂分子的无规热运动加剧,分子间距变大,较多的能量使材料内部形成更多的自由体积,使得预浸料间的树脂会相互渗入,导致树脂的流动性和表面接触改善并开始渗透到纤维之间。在一定的压力作用下,相互接触的表面会变得湿润,预浸料层间的粘结性变大。但是随着温度的进一步升高,在 40~60 °C 预浸料层间粘结性开始下降,这与基体树脂温度升高,链段的热运动逐渐剧烈,链段沿作用力方向的协同运动有关。这不仅使分子链的形态改变而且导致大分子的重心发生相对位移,聚合物开始呈现流动性<sup>[19]</sup>,预浸料在运动过程中出现挤压渗流,导致预浸料层间的粘结性下降。

成型压力是直接影响预浸料在铺放过程变形量的重要影响因素<sup>[20]</sup>。加压可以保证铺层间紧密

## 2 试验材料与方法

采用江苏恒神纤维材料有限公司面向自动铺

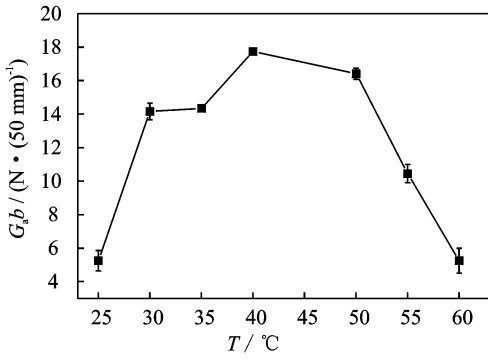


图6 预浸料层间粘结性随温度的变化曲线

Fig. 6 Prepreg tack between layers responses to increasing temperature

的接触,若压力过小,铺层间会出现孔隙;但是压力过大,铺层会发生变形,且树脂挤出流动加剧。将温度设为 30 °C,速度设为 100 mm/min,在压力 30~220 N 之间测定预浸料层间的粘结性,粘结性随压力的变化曲线如图 7 所示,在一定的压力范围内,预浸料层间的粘结性随压力的增大而增加。这是因为压力的增大,上下两层预浸料之间紧密贴合,可有效减少层间的空隙,同时可挤压预浸料,有利于两层预浸料间树脂流动,铺层界面逐渐被浸润,增加层间粘合,所以粘结性会增大。

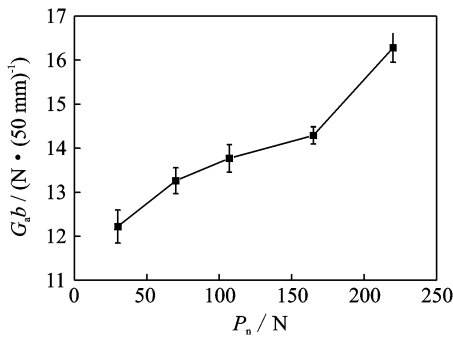


图7 预浸料层间粘结性随压力的变化曲线

Fig. 7 Prepreg tack between layers responses to increasing pressure

速度是与自动铺放的生产效率直接相关的工艺参数,速度越快,则生产效率越高,铺放制造成本也随之降低,但速度过快会影响铺放质量,降低制件的性能。本试验中,速度参数受万能试验机的限制,所以选定的实验速度范围在 10~300 mm/min,压力设为 107 N、温度设为 30 °C,预浸料层间的粘结性随速度的变化规律如图 8 所示,从图中可知随速度的增加,预浸料层间的粘结性呈下降趋势。对于高温 NY9200GA 树脂体系预浸料,随着铺放速度的增加,压辊作用时间变短,基体树脂来

不及渗透到纤维之间,导致树脂对铺层界面的浸润变差,铺层相互贴合能力变差,粘结性下降。

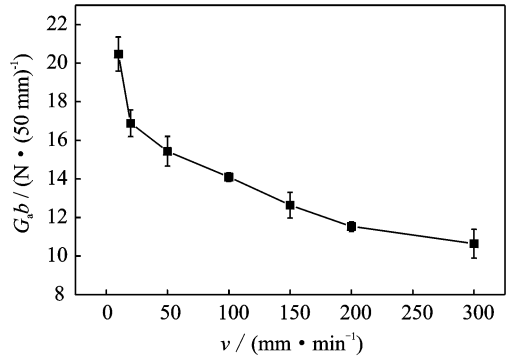


图8 预浸料层间粘结性随速度的变化曲线

Fig. 8 Prepreg tack between layers responses to increasing feed rate

### 3.1.2 多因素试验

前面的分析过程是基于一次一因子试验法,然而,在任何一次试验过程中,都可能有超过一个工艺参数变化。正交试验设计是由试验因素的全部水平组合中,挑选部分有代表性的水平组合进行试验,能够基本反映全面试验的效果。综合单因素试验结果,选取温度( $T$ )、压力( $P_n$ )和速度( $v$ )3个因素并考虑因素间的交互作用,在单因素试验的基础上采用六因素三水平的试验方法,试验因素与水平设计见表1。

表1 试验因素与水平设计表

Tab. 1 Experimental factors and levels

Level	Experimental factor		
	$T / ^\circ\text{C}$	$P_n / \text{N}$	$v / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
1	25	70	100
2	30	107	200
3	35	165	300

根据正交试验设计方法,六因素三水平共需 18 组独立的试验,每组试验包含不同的工艺参数组合,在现有的实验装置下,预浸料层间粘结性正交试验结果与分析如表 2 所示。

表 2 中  $k_i$  表示每个因素在同一水平时的粘结性平均值。极差  $R$  表示各因素在不同水平下取值的变化幅度, $R$  值越大,代表该因素的水平对实验指标的影响越大。由表 2 可知, $R_T > R_{P_n} > R_v > R_{T \times v} > R_{v \times P_n} > R_{T \times P_n}$ ,即温度对预浸料层间粘结性值的影响最大,为主要影响因素,其次为压力的影响,第三为速度的影响,第四为温度和速度的交互作用,第五是速度和压力的交互作用,温度和压力的交互作用影响最小。

表2 试验结果和极差分析

Tab.2 Orthogonal test results and range analysis

Experiment No.	$T$	$P_n$	$T \times P_n$	$v$	$T \times v$	$v \times P_n$	Tack/ $(N \cdot (50\text{mm})^{-1})$
1	1	1	1	1	1	1	8.32
2	1	2	2	2	2	2	6.73
3	1	3	3	3	3	3	8.61
4	2	1	1	2	2	3	11.58
5	2	2	2	3	3	1	12.93
6	2	3	3	1	1	2	16.17
7	3	1	2	1	3	2	13.48
8	3	2	3	2	1	3	14.34
9	3	3	1	3	2	1	13.70
10	1	1	3	3	2	2	0.90
11	1	2	1	1	3	3	9.40
12	1	3	2	2	1	1	9.57
13	2	1	2	3	1	3	12.81
14	2	2	3	1	2	1	14.19
15	2	3	1	2	3	2	12.89
16	3	1	3	2	3	1	12.97
17	3	2	1	3	1	2	14.95
18	3	3	2	1	2	3	16.71
$k_1$	7.255	10.010	11.807	13.045	12.693	11.947	
$k_2$	13.428	12.090	12.038	11.347	10.635	10.853	
$k_3$	14.358	12.942	11.197	10.650	11.713	12.242	
$R$	7.103	2.932	0.841	2.395	2.058	1.389	

### 3.2 室温存放时间对预浸料层间粘结性的影响

预浸料表面粘结性随着时间的变化会发生相应的改变,研究室温存放时间对预浸料层间粘结性的影响对实际铺放具有十分重要的工程指导意义。预浸料制作完成后运输到实验室的时间比较短暂,待预浸料表面温度与室温一致时,在湿度为34%,30℃,107 N,100 mm/min条件进行第一次试验。然后将裁剪好的预浸料放置在室温环境中,每隔12 h测量预浸料间的粘结性,实验结果如图9,可见预浸料在室温下存放的时间越长,预浸料层间粘结性越小。其中最高粘结性值可达 $14.62 \text{ N} \cdot (50 \text{ mm})^{-1}$ ,而最低的值仅为 $0.60 \text{ N} \cdot (50 \text{ mm})^{-1}$ ,这是因为一方面预浸料内的树脂含有固化剂,会随时间的延长而发生交联,导致预浸料表层树脂逐渐变干,树脂流动性降低,难以浸润预浸料间的界面,预浸料层间的贴合程度降低,粘结性下降;另一方面,预浸料置于室温条件下,碳纤维表面的极性基团易与水分子形成氢键,导致水分子很容易聚集在聚合物/纤维界面,引起界面脱粘<sup>[21]</sup>,从而降低预浸料层间粘结性。

### 3.3 相邻铺层不同纤维方向对预浸料层间粘结性的影响

预浸料由纤维与树脂组成,由上述试验结果可见,树脂在预浸料贴合过程中起到粘合剂的作用,预浸料的粘结性主要受树脂的影响。但预浸料粘

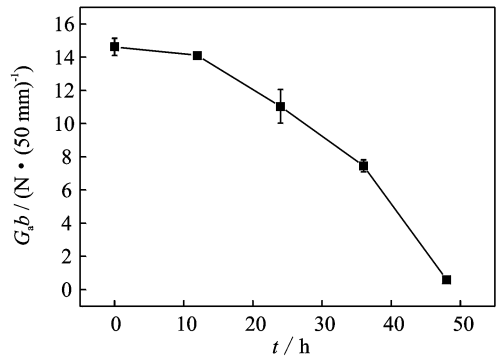


图9 预浸料层间粘结性随室温存放时间的变化曲线  
Fig.9 Prepreg tack between layers responses to increasing storage time at room temperature

结性与纯树脂粘结性相比更复杂,预浸料中的增强纤维,阻止了树脂基体间的紧密接触,在铺放时会导致预浸料界面的粗糙和不连续,从而影响预浸料层间的贴合,所以有必要研究相邻铺层间不同的纤维方向对预浸料层间粘结性的影响。

在温度为30℃,压力107 N,速度100 mm/min下,对 $0^\circ/0^\circ$ , $0^\circ/30^\circ$ , $0^\circ/45^\circ$ , $0^\circ/60^\circ$ , $0^\circ/90^\circ$ 五种不同纤维方向的铺层层间粘结性进行研究,试验结果如表3所示。从表3中可见, $0^\circ/0^\circ$ 铺层间的粘结性值为 $12.86 \text{ N} \cdot (50 \text{ mm})^{-1}$ ,而 $0^\circ/60^\circ$ 铺层间的粘结性值却达到了 $21.45 \text{ N} \cdot (50 \text{ mm})^{-1}$ ,是 $0^\circ/0^\circ$ 铺层粘结性值的1.67倍。当测定 $0^\circ/90^\circ$ 铺层

间的粘结性时,由于在低速(100 mm/min)下,0°/90°铺层间的粘结性大于铺在模具板上作为基底的预浸料与90°方向预浸料之间的粘结性,导致试验中位于模具板上的纤维方向为90°的预浸料被破坏(如图10所示),所测得的力不是0°/90°铺层间的剥离力,所以试验中并没有得到0°/90°铺层间的粘结性。为了验证试验结果的准确性,并得到0°/90°铺层间的粘结性,保持温度、压力不变,实验速度由100 mm/min提高到300 mm/min,得到速度300 mm/min时不同纤维方向下预浸料层间粘结性值(如图11所示),可见随着上下两层预浸料之间纤维夹角角度的增加,预浸料层间的粘结性值一直在增加,0°/90°铺层间粘结性是0°/0°的1.97倍。

将试样在LeicaDVM5000超景深三维视频显

表3 100 mm/min速度下不同纤维方向对应的预浸料层间粘结性值

Tab. 3 Different fiber directions corresponding to prepreg tack of different layers at 100 mm/min

Fiber direction $\alpha/(^{\circ})$	0/0	0/30	0/45	0/60
Tack $G_b b / (N \cdot (50 \text{ mm})^{-1})$	12.86	15.11	17.53	21.45
Standard deviation	0.24	0.64	0.85	0.59
Dispersion coefficient/%	1.93	3.67	5.64	2.76

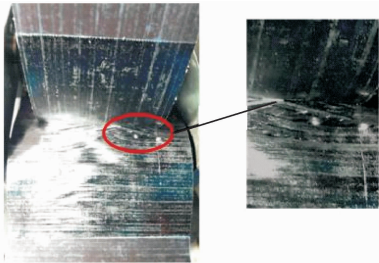


图10 0°/90°铺层预浸料在剥离过程中的破坏样式

Fig. 10 Failure mode of 0°/90° layers during peel test

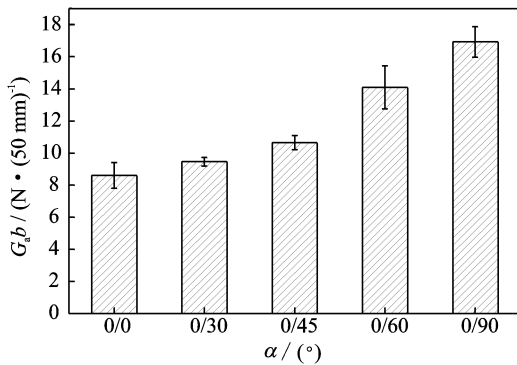


图11 300 mm/min速度下预浸料层间粘结性随纤维方向的变化规律

Fig. 11 Different fiber directions corresponding to prepreg tack of different layers at 300 mm/min

显微镜下放大200倍观察试验后0°/0°,0°/30°,0°/45°,0°/60°,0°/90°五种铺层剥离面的微观形貌(如图12所示)。可见上下两层预浸料在剥离时,预浸料中的树脂会在压力的作用下相互润湿。观察图12(a,c,e,g,i)上铺层预浸料,随着纤维方向角度的增加,上铺层表面的树脂变多,树脂逐渐浸润纤维,当下铺层的纤维方向为90°(如图12(j))时,预浸料表面基本上都是树脂,而看不到纤维。由于在显微镜下不容易观察同一位置上下铺层的表面形貌,所以很难看出是同层预浸料中树脂对纤维的浸润还是不同层预浸料中树脂对纤维的浸润,但通过观察下铺层的预浸料(如图12(b,d,f,h,j)所示),

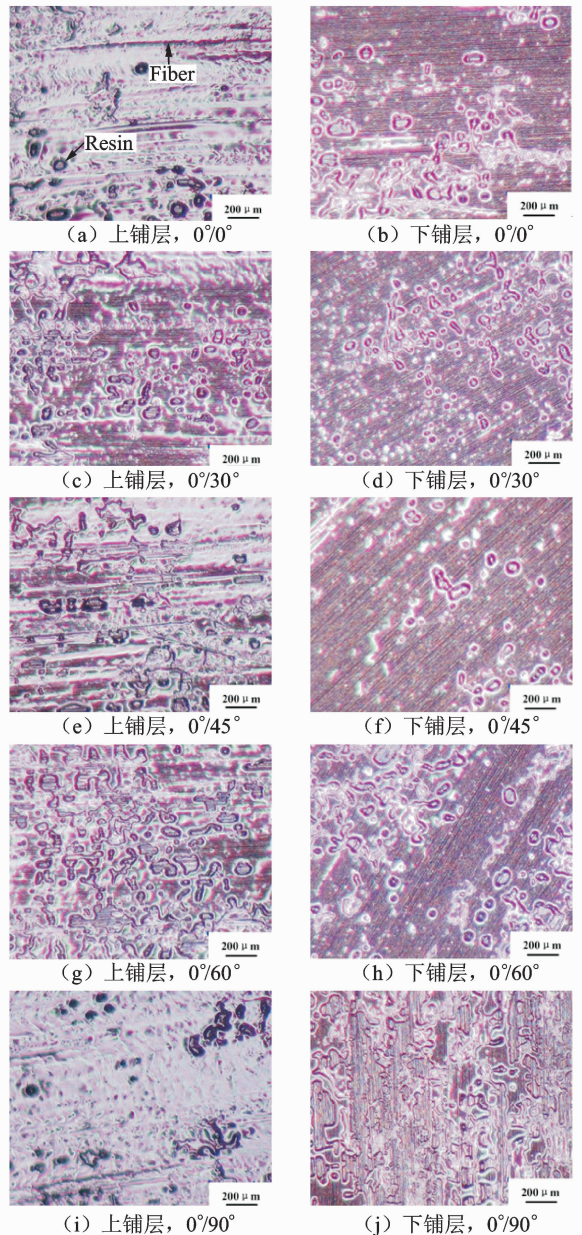


图12 不同纤维方向上下两层预浸料的表面微观形貌

Fig. 12 Surface microstructures of upper and lower layers of different fiber directions

可以看出,随着纤维夹角角度的变大,树脂会逐渐浸润纤维,预浸料层间的粘结性增大。

## 4 结 论

本文利用自行设计的预浸料层间粘结性试验装置,测定了中国国产 HF10A/NY9200GA 铺放专用预浸料在不同工艺参数下的层间粘结性,通过分析试验结果得到如下结论:

(1)预浸料层间的粘结性与铺放温度、压力和速度有关,随着温度的升高,预浸料层间粘结性值先增大后降低,当温度为 40 °C 时,出现粘结性峰值;当温度保持不变时,增加铺放压力或减小速度均会增加预浸料层间粘结性。

(2)温度对预浸料层间粘结性值的影响最大,其次为压力的影响,温度和压力的交互作用对粘结性的影响最小。

(3)预浸料在室温环境中存放时间的长短对预浸料层间粘结性的影响不能忽视,随着存放时间的延长,预浸料层间的粘结性值逐渐降低,并且下降趋势显著。

(4)相邻铺层间不同纤维方向对预浸料层间的粘结性也有影响,随着相邻预浸料铺层间纤维夹角角度的增加,层间粘结性逐渐增加,0°/0°纤维方向两层预浸料层间的粘结性值最低,0°/90°纤维方向的两层预浸料层间粘结性值最高。

### 参考文献:

- [1] 还大军,肖军,李勇. 基于弧长的复合材料自动铺带统一边界处理方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(5): 645-649.  
Huan Dajun, Xiao Jun, Li Yong. Uniform boundary treatment in automated tape-laying based on arc-length[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(5): 645-649.
- [2] 严飙,肖军,文立伟,等. 预浸纤维束自动搭接方法与系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(2): 250-254.  
Yan Biao, Xiao Jun, Wen Liwei, et al. Prepreg tows auto-splicing method and system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(2): 250-254.
- [3] 张旭坡. 自动铺丝预浸纱制备技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2007.  
Zhang Xupo. Preparation technology of prepreg for automated fiber placement[D]. Nanjing: College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [4] 龙国荣,熊惠玲,陈小丽,等. NY9200 树脂体系及其复合材料性能[J]. 洪都科技, 1996(3): 19-32.  
Long Guorong, Xiong Huiling, Chen Xiaoli, et al. NY9200 resin series and characteristic of the composite[J]. Hongdu Science and Technology, 1996(3): 19-32.
- [5] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 11.  
Chen Xiangbao. Handbook of polymer matrix composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 11.
- [6] 文琼华,王显峰,何思敏,等. 温度对预浸料铺放效果的影响[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1740-1745.  
Wen Qionghua, Wang Xianfeng, He Simin, et al. Influence of temperature on placement effect of prepreg[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(9): 1740-1745.
- [7] 李红卫,贺昊皓,陈虎,等. 一种胶料表面粘性测量方法及专用测量系统[P]. 中国: CN102661909A, 2012-09-12.  
Li Hongwei, He Jionghao, Chen Hu, et al. Tack measuring method and special measuring system of a rubber surface [P]. China: CN102661909A, 2012-09-12
- [8] 黄文宗,孙容磊,连海涛,等. 预浸料的铺放适宜性评价(一)——粘性篇[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(6): 3-11.  
Huang Wenzong, Sun Ronglei, Lian Haitao, et al. Assessment for placement suitability of prepreg-part of tack [J]. Fiber Reinforced Plastic/Composites, 2013(6): 3-11.
- [9] 张博明,王洋,叶金蕊. 自动铺放工艺的复合材料预浸带的适宜性评价方法[J]. 航空制造技术, 2012(11): 78-81.  
Zhang Boming, Wang Yang, Ye Jinrui. Assessment method for suitability of composites prepreg for automated tape laying [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(11): 78-81.
- [10] Ahn K J, Seferis J C, Pelton T, et al. Analysis and characterization of prepreg tack[J]. Polymer Composites, 1992, 13(3): 197-206.
- [11] Dubois O, Le Cam J B, Beakou A. Experimental analysis of prepreg tack[J]. Experimental Mechanics, 2010, 50(5): 599-606.
- [12] Banks R, Mouritz A P, John S, et al. Development of a new structural prepreg: Characterisation of handling, drape and tack properties [J]. Composite Structures, 2004, 66(1): 169-174.
- [13] Brooks J R, Platt P R. Method and apparatus to de-

- termine composite prepreg [P]. tack; U. S. Patent 5513537, 1996-05-07.
- [14] 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*, 2011, 43(3): 423-434.
- [15] Crossley R J, Schubel P J, Warrior N A. Experimental determination and control of prepreg tack for automated manufacture [J]. *Plastics Rubber and Composites*, 2011, 40(6/7): 363-368.
- [16] Crossley R J, Schubel P J, De Focatiis D S A. Time-temperature equivalence in the tack and dynamic stiffness of polymer prepreg and its application to automated composites manufacturing [J]. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 2013 (52): 126-133.
- [17] 陆楠楠, 肖军, 齐俊伟, 等. 面向自动铺放的预浸料动态黏性实验研究[J]. *航空学报*, 2014, 35(1): 279-286.  
Lu Nannan, Xiao Jun, Qi Junwei, et al. Research on the experiment of prepreg dynamic tack based on automated placement process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 279-286.
- [18] 张建宝. 复合材料自动铺带控制及工艺关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2010.  
Zhang Jianbao. Research on the key control and processing technology of composites automated tape placement[D]. Nanjing: College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [19] 金日光, 华幼卿. 高分子物理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 129-143.  
Jin Riguang, Hua Youqing. *Polymer physics* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 129-143.
- [20] 张建宝, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带成型压力控制技术[J]. *航空学报*, 2009, 30(10): 1973-1977.  
Zhang Jianbao, Wen Liwei, Xiao Jun, et al. Processing pressure control technique for automatic tape laying[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(10): 1973-1977.
- [21] 苏辉煌. 环氧预浸料的储存老化及印刷电路板的湿热老化研究[D]. 上海: 复旦大学高分子科学系, 2010.  
Su Huihuang. Study on the storage aging of epoxy prepreg and hygrothermal aging of printed circuit board[D]. Shanghai: Department of Polymer Science, Fudan University, 2010.



