

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.05.019

## 基于热熔法的铺丝用预浸纱含胶量控制

徐挺 李勇 还大军 闫西涛 肖军

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,210016)

**摘要:**针对轨道飞行器用高模量碳纤维复合材料品种多、批量小、质量要求高的特点,研究自动铺丝用预浸纱制备的质量控制方法。研究了直接热熔法中不同工艺参数对预浸纱含胶量的影响规律,运用正交试验定量分析了诸因素的影响程度,研究结果表明:限位辊与擦胶辊间隙对含胶量的影响最大,其次分别为收卷速率、树脂温度、差速比、放纱张力;制备 HS40/CY-10W 高模量碳纤维/氰酸酯预浸纱的最优工艺参数为:两辊间隙 0.15 mm、收卷速率 12.56 m/min、树脂温度 100 °C、差速比 60%、放纱张力 13 N。制备的预浸纱宽度稳定、含胶量为 34.0 ± 1.0%、离散系数 ≤ 0.79%,满足铺丝用精密预浸纱要求。

**关键词:**自动铺丝;热熔法;预浸纱;含胶量

**中图分类号:**V258; TB332 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)05-0745-07

## Resin Content Control of Prepreg Tow for AFP Based on Hot-Melt Method

Xu Ting, Li Yong, Huan Dajun, Yan Xitao, Xiao Jun

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

**Abstract:** The high modulus carbon fibre is usually used in orbiting craft due to its properties of multi-variety, small quantities and high quality. Quality control of prepreg tow for automated fibre placement (AFP) is discussed. With the help of the hot-melt impregnation winding method, the resin content of the fiber bundle under different processing parameters is analyzed. And the orthogonal experiment is designed to explore the influence degree of each factor. The result shows that: the most important influence factor is the gap between limiting roller and impregnation roller, and the winding speed, resin temperature, speed ratio, and unreeling fibre tension are successively important. The optimal combination of process parameters to prepare HS40/CY-10W high modulus carbon fibre prepreg tow is determined: The gap between two rollers is 0.15 mm, the winding speed is 12.56 m/min, the resin temperature is 100 °C, the speed ratio is 60%, and the unreeling fibre tension is 13 N. Under the optimal combination of processing parameters, the prepreg prepreg tow is stable and continuous with resin content as 34.0 ± 1.0% and coefficient of variability equal or less than 0.79%, which can meet the requirement for AFP.

**Key words:** automated fiber placement(AFP); hot-melt method; prepreg tow; resin content

自动铺丝成形技术(Automated fiber placement, AFP)是近年来发展最快、最有效的自动

化成形制造技术之一。该技术是将 3~25 mm 的预浸纱,分别独立输送、压实、切断,并由铺丝

**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;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:**2015-07-05;**修订日期:**2015-08-20

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

头将数根预浸纱在压辊下集束成一条宽度可变的预浸带,沿设计的轨迹铺设至芯模表面,加热软化成形<sup>[1-4]</sup>。高质量、高精度以及高可靠性的特性,使其成为发达国家成形大型飞机、卫星等各类航空航天飞行器中复合材料结构件的重要方法。

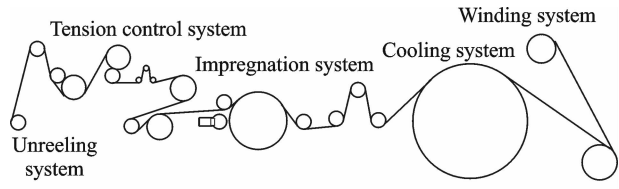
高模量碳纤维复合材料具有比刚度高和热膨胀系数非常小的突出特点,对轨道飞行器具有特殊的意义<sup>[5]</sup>:不仅可以有效减轻结构质量、增加有效载荷,而且可以保证具有更高的结构刚度、满足大型/超大型结构对基频的要求。轨道飞行器结构用高模量碳纤维复合材料批量小、质量高、品种多,适于采用自动铺丝自动化、数字化成形技术。

国外早期铺丝用预浸纱采用直接热熔法制备,因其含胶量控制难度大、生产效率低,逐渐被宽幅预浸料<sup>[6]</sup>分切法替代,分切法特别适合于大批量制备铺丝预浸纱而广泛用于航空及航天运载领域。但对于轨道飞行器结构而言,复合材料批量小、品种多,分切法经济性差,直接热熔法虽有小批量制备的优势,但必须解决含胶量及宽度精确控制问题。直接热熔制备预浸纱的研究甚少,相关窄带预浸料研究的报道主要有:天津工业大学杨涛<sup>[7-8]</sup>等人对窄带预浸料制备工艺及装备技术中放纱张力和恒张力收卷部分进行了研究,但未对制备工艺参数进行讨论;北京航空材料研究院<sup>[9-10]</sup>针对窄带预浸料的制造工艺,分析了胶液温度、纤维运行速度、纤维张力对预浸料质量的影响,着重探究了纤维的浸透性,但并未系统分析含胶量的参数控制。因此含胶量精确调控问题亟待解决。本文利用热熔浸胶实验系统研究不同工艺参数对含胶量的影响,在此基础上进行正交试验研究,为高模量碳纤维预浸纱工业化生产提供参考和指导。

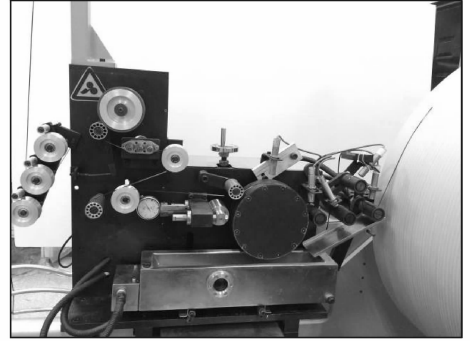
## 1 预浸纱制备实验

### 1.1 实验设备

预浸纱制备系统主要包括放纱系统、展纱系统、张力控制系统、浸胶系统、辊筒冷却系统及二次收卷覆膜系统,具体如图1所示。工艺过程如下:将一束或多束纤维纱筒置于纱架及导纱装置上,经过展纱系统使纤维束展宽变薄,进入浸胶系统浸胶,采用擦胶式差速浸胶法,使熔融树脂在一定的温度、速度、张力作用下均匀浸渍纤维束;然后经过辊筒冷却系统冷却预浸纱;最后采用二次收卷覆膜系统完成收卷。



(a) 制备原理图



(b) 实验系统实物照片图

图1 预浸纱制备系统

Fig. 1 Preparation system of prepreg tow

实验系统可调参数及范围如表1所示。其中,纤维张力  $F$  通过可编程控制器闭环控制、精度  $\pm 0.5$  N。差速比  $k$  为擦胶辊线速度  $v_r$  与收卷线速度  $v_s$  的比值  $k = v_r/v_s$ 、由控制系统设置(跟随误差小于1%)。两辊间隙  $d$  即限位辊与擦胶辊间隙,采用机械式调节、百分表测量精度 0.02 mm,用于调节擦胶辊上胶膜的厚度  $h$ 。

表1 设备参数

Tab. 1 Device parameter list

参数	Tension/N	Gap/mm	Temperature/°C
数值范围	3~20	0.08~0.50	$\leq 150$
参数	Speed ratio/%	Velocity/( $m \cdot \min^{-1}$ )	
数值范围	50~150	$\leq 50$	

### 1.2 实验材料

基于轨道飞行器结构材料要求,选用日本三菱公司的典型高模量碳纤维 HS40,其性能参数如表2所列。

表2 HS40 碳纤维基本物理性能参数

Tab. 2 Physical properties of carbon fiber HS40

参数	Number	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa
数值	12 000	4 610	455
参数	Linear density/( $g \cdot km^{-1}$ )	Density/( $g \cdot cm^{-3}$ )	
数值	429	1.85	

树脂选用型号为 CY-10W 的氰酸酯树脂,其粘-温特性曲线如图 2 所示,Cogswell<sup>[11]</sup>的研究结果表明熔融树脂黏度小于 10 Pa·s 时方可直接浸渍纤维束,为此初选浸胶温度窗口为 80~120 ℃。

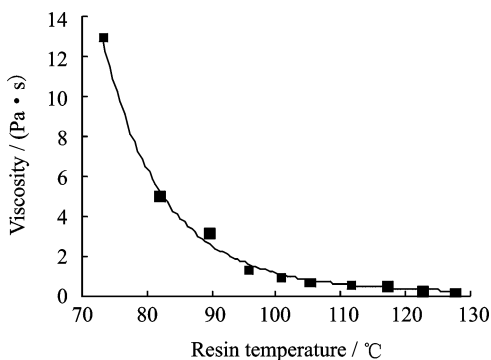


图2 CY-10W 树脂黏-温特性曲线

Fig.2 Curve of viscosity-temperature of CY-10W

### 1.3 研究方法

首先分析单个工艺参数对含胶量的影响机理,然后采用单因素轮换法研究两辊间隙、树脂温度、放纱张力、差速比以及收卷速率对预浸纱含胶量的影响。最后结合正交试验确定工艺参数对预浸纱含胶量影响的显著程度,确定制备 HS40/CY-10W 预浸纱工艺参数的优水平以及实验范围内的最优组合,并进行工艺稳定性验证。预浸纱含胶量采用称重法测量。

## 2 结果与分析

### 2.1 两辊间隙对预浸纱含胶量的影响

对于所研究的中低黏度树脂、可在擦胶辊上良好成膜,两辊间隙  $d$  直接控制擦胶辊上胶膜厚度  $h$ ,是浸胶系统调节的关键参数。间隙越大,擦胶辊上胶膜越厚,可供浸渍的树脂越多,含胶量也就越高,为确定合适的间隙区间,实验研究了两辊间隙对含胶量的影响,结果如图 3 所示。

实验结果表明含胶量随间隙增加线性增长(线性相关系数  $L^2$  为 0.995 67)。另一方面,在设定实验条件下,发现间隙低于 0.1 mm 时,预浸纱表面浸渍不充分,存在干纱的现象;而当间隙超过 0.2 mm 时,含胶量过高,因此限位辊与擦胶辊间隙窗口应控制在 0.1~0.2 mm。

### 2.2 工艺参数对预浸纱含胶量的影响

纤维束与熔融树脂的浸渍过程中,树脂沿纤维方向的流动和垂直纤维方向的流动同时发生,属于多孔介质的熔体流动,浸渍深度  $H$  可以通过 Darcy 定律确定。

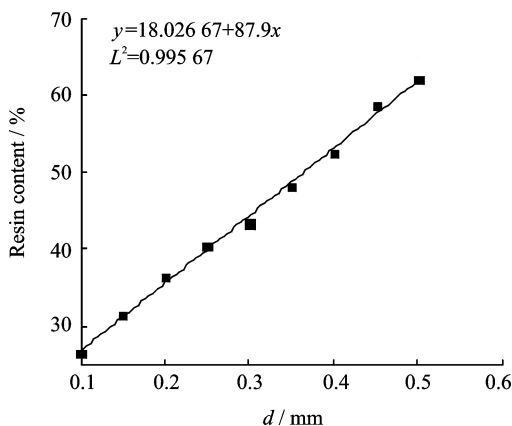


图3 两辊间隙对含胶量影响曲线

Fig.3 Plot of resin content against gap between two rollers

$$H = \sqrt{\frac{2K\Delta Pt}{\eta}} \quad (1)$$

式中:  $H$  为浸渍深度;  $K$  为渗透系数;  $\eta$  为熔融树脂的黏度;  $t$  为浸渍时间;  $\Delta P$  为沿浸渍深度方向的压力差。

在浸渍过程中,纤维束浸渍熔融树脂浸渍深度越大,则浸渍程度越高,预浸纱含胶量越高。预浸纱含胶量  $\omega_r$  与浸渍深度关系为

$$\omega_r \propto H \propto \sqrt{\frac{\Delta Pt}{\eta}} \quad (2)$$

各工艺参数对含胶量影响的主要因素:(1)浸渍过程的浸渍驱动压力;(2)树脂自身的黏度;(3)纤维束与树脂接触的浸渍持续时间。浸渍驱动压力受放纱张力影响,树脂自身的黏度受温度影响,浸渍持续时间受纤维收卷速率和差速比影响。

#### 2.2.1 放纱张力对含胶量影响

在树脂浸渍纤维束过程中,放纱张力提供浸渍驱动压力<sup>[12-14]</sup>为

$$p = F/r \quad (3)$$

式中:  $F$  为纤维张力;  $r$  为胶辊半径。

理论分析和实验结果都表明:张力较小时浸渍驱动力不足,浸渍不充分,同时实验过程中还发现张力过小情况下纤维束展开困难。但高模量纤维极脆,张力过大则易引起纤维损伤断丝及毛丝。图 4 为放纱张力对预浸纱含胶量的影响,根据曲线,放纱张力工艺窗口应为 3~15 N。

#### 2.2.2 树脂温度对含胶量的影响

氰酸酯树脂的黏温关系符合阿伦尼乌斯方程<sup>[15-16]</sup>,即

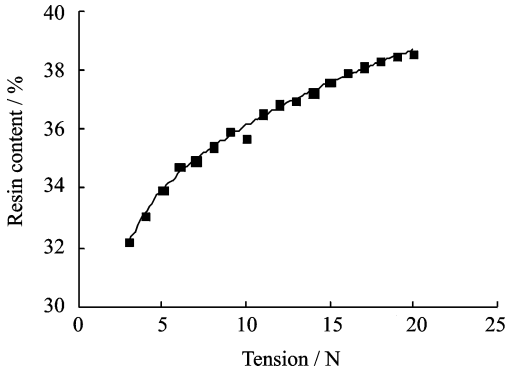


图4 放纱张力对含胶量的影响曲线

Fig. 4 Plot of resin content against unreeling fibre tension

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{\Delta E}{RT}} \quad (4)$$

式中： $\eta_0$  为树脂特征黏度； $\Delta E$  为粘流活化能； $T$  为绝对温度； $R$  为气体常数。

随着温度升高，树脂黏度降低，利于树脂浸渍纤维束，提高含胶量；但当温度进一步升高超过 120 °C 时，树脂表观黏度过低 ( $\leq 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )，难以稳定附着于擦胶辊表面成膜，使树脂胶膜厚度  $h$  低于间隙设定值  $d$  且不可控，最终致使含胶量显著降低，实验结果如图 5 所示。另一方面，温度过高会加速树脂固化反应过程，降低树脂的适用期。图 6 为 110 °C 下树脂的黏度适用期图。结合图 6 可知，110 °C 下树脂适用期大于 8 h，满足浸胶要求。结合图 2 树脂黏-温曲线，温度应控制在 90~110 °C。

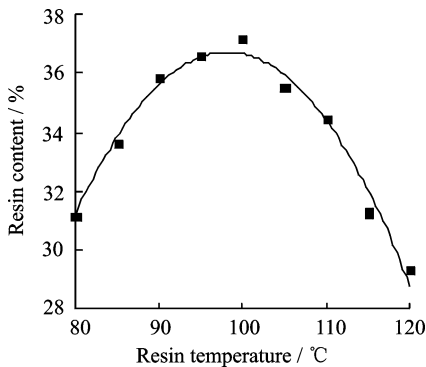


图5 CY-10W 树脂温度对预浸纱含胶量的影响曲线

Fig. 5 Plot of resin content against CY-10W resin temperature

### 2.2.3 收卷速率与差速比对含胶量影响

收卷速率大小直接影响纤维在擦胶辊上浸渍持续时间为

$$t = s/v_s \quad (5)$$

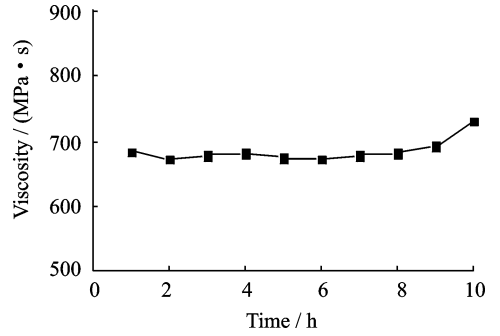


图6 110 °C 下树脂黏度适用期

Fig. 6 Plot of resin applicable period at 110 °C

式中  $s$  为浸胶长度，由浸胶包角确定。

随着收卷速率增加，纤维束在擦胶辊上浸渍停留时间减少，不利于浸透树脂，导致含胶量降低。反之收卷速率越低，浸渍时间越长，浸渍越充分，纤维束含胶量也就越高，但生产效率较低。

在收卷速率  $v_s$  确定的情况下，差速比  $k = v_r/v_s$  控制了擦胶辊速度  $v_r$ ，进而决定了浸胶时间内擦胶辊上树脂供应量  $w$  为

$$w = \omega v_r t d = \omega v_r s d / v_s = \omega s r d \quad (6)$$

式中  $\omega$  为擦胶辊宽度。

分析式(6)可知：差速比增加，即擦胶辊速度增加，使得树脂供应量加大，进而含胶量增加。

图 7 是不同收卷速率和差速比的含胶量实验结果，收卷速率和差速比的窗口分别是 6.28~12.56 m/min 和 50%~100%。

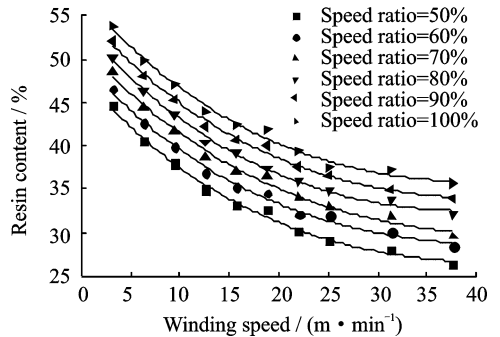


图7 差速比、速率对含胶量的影响

Fig. 7 Plot of resin content and winding speed at different speed ratios

### 2.3 正交试验分析

2.2 节通过对工艺参数与含胶量间关系的分析，确定了工艺参数窗口和单因素的影响趋势及典型试验值，为确定各参数影响的显著水平以及制备 HS-40/CY-10W 预浸纱最优组合进

行正交试验研究。本实验选择 5 个因素为:放纱张力、两辊间隙、差速比、收卷速率以及树脂温度,分别编号为 A, B, C, D, E;每个因素定 4 个水平,分别编号为 1, 2, 3, 4, 因素水平如表 3 所列。

表 3 预浸纱制备实验因素水平表

Tab. 3 Factor level table of prepreg tow preparation experiment

因素 水平	因素				
	A	B	C	D	E
	Tension/ N	Gap/ mm	Speed ratio/ %	Velocity/ (m·min <sup>-1</sup> )	Temperature/ °C
1	3	0.10	50	6.28	80
2	8	0.15	60	12.56	90
3	13	0.20	80	18.84	100
4	15	0.25	100	25.12	110

此实验为 5 因素 4 水平实验,不考虑交互作用,选 L16(4<sup>5</sup>)最合适,不含空列,设计重复实验进行误差分析。实验结果分析如表 4 所示,表中  $K_{ij}$  表示第  $j$  个因素第  $i$  个水平的含胶量实验指标之和, $k_{ij}$  表示各因素在同一水平的平均值,极差  $R$  表示该因素在其取值范围内实验指标变化的幅度,根据极差大小,判断各因素影响的主次顺序, $R$  越大,表示该因素的水平变化对实验指标的影响越大,因素越重要。

由极差分析表可以得出  $R_B > R_D > R_E > R_C > R_A$ , 因此两辊间隙对含胶量的影响最大,其次分别为收卷速率、树脂温度、差速比和放纱张力。预浸纱含胶量优水平选取原则为保证浸透前提下含胶量为  $34 \pm 2\%$ , 以间隙(B)为例,  $K_{1B} = 220.24$ ,  $K_{2B} = 282.08$ ,  $K_{3B} = 297.36$ ,  $K_{4B} = 320.84$ ,  $k_{1B} = 27.53$ ,  $k_{2B} = 35.26$ ,  $k_{3B} = 37.17$ ,  $k_{4B} = 40.11$ , 极差

表 4 正交试验结果分析表

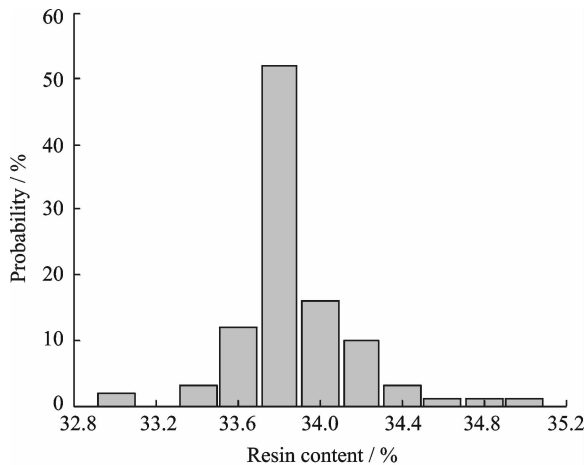
Tab. 4 Orthogonal analysis of experimental results

实验	A	B	C	D	E	Resin content/%		Sum/ %	
	Tension/N	Gap/mm	Speed ratio/%	Velocity/(m·min <sup>-1</sup> )	Temperature/°C	I	II		
1	3	0.10	50	6.28	80	26.42	26.72	53.14	
2	3	0.15	60	12.56	90	35.06	34.58	69.64	
3	3	0.20	80	18.84	100	37.54	38.20	75.74	
4	3	0.25	100	25.12	110	38.16	37.98	76.14	
5	8	0.10	60	18.84	110	25.97	26.67	52.64	
6	8	0.15	50	25.12	100	34.02	34.76	68.78	
7	8	0.20	100	6.28	90	40.05	39.59	79.64	
8	8	0.25	80	12.56	80	40.97	40.13	81.10	
9	13	0.10	80	25.12	90	26.87	27.89	54.76	
10	13	0.15	100	18.84	80	35.86	35.26	71.12	
11	13	0.20	50	12.56	110	35.96	34.90	70.86	
12	13	0.25	60	6.28	100	41.42	42.52	83.94	
13	15	0.10	100	12.56	100	29.63	30.07	59.70	
14	15	0.15	80	6.28	110	35.88	36.66	72.54	
15	15	0.20	60	25.12	80	35.07	36.05	71.12	
16	15	0.25	50	18.84	90	39.52	40.14	79.66	
$K_{1j}$	274.66	220.24	272.44	289.26	276.48				
$K_{2j}$	282.16	282.08	277.34	281.30	283.70				
$K_{3j}$	280.68	297.36	284.14	279.16	288.16				
$K_{4j}$	283.02	320.84	286.60	270.80	272.18				
$k_{1j}$	34.33	27.53	34.06	36.16	34.56				
$k_{2j}$	35.27	35.26	34.67	35.16	35.46				
$k_{3j}$	35.08	37.17	35.52	34.89	36.02				
$k_{4j}$	35.38	40.11	35.83	33.85	34.02				
$R$	1.05	12.58	1.77	2.31	2.00				
顺序						$R_B > R_D > R_E > R_C > R_A$			
最优水平						$B_2, D_2, C_2, E_3, A_3$			

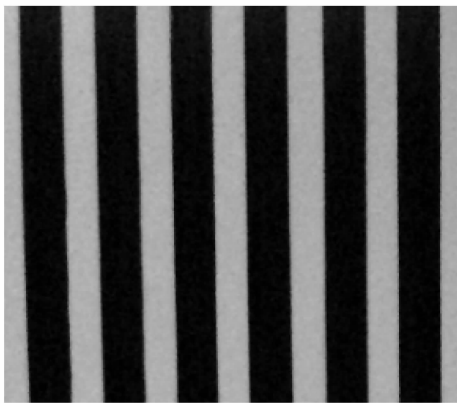
$R=12.58$ 。因为  $k_{1B}$  最小,且小于含胶量最低要求 30%,故不选取  $B_1$  为优水平, $k_{2B}$  值 35.26 可以满足预浸纱含胶量要求,因此选取  $B_2$  作为优水平参数,同理选则  $D_2$ ,  $C_2$ ,  $E_3$ ,  $A_3$  为优水平,所以制备 HS40/CY-10W 预浸纱的最优工艺参数组合为放纱张力 13 N、两辊间隙 0.15 mm、差速比 60%、收卷速率 12.56 m/min、树脂温度为 100 °C。

#### 2.4 工艺稳定性验证

根据 2.3 节正交试验结果进行工艺稳定性验证,制备预浸纱 300 m,每隔 3 m 取样测量并计算含胶量。预浸纱含胶量直方图如图 8(a)所示,图 8(b)为制备预浸纱实物图,最终计算得出优化后预浸纱含胶量为  $34.0 \pm 1.0\%$ ,含胶量离散系数为 0.79%,不超过 1%,说明确定的预浸纱制备工艺参数合理、稳定,制备的预浸纱满足铺丝用精密预浸纱含胶量指标要求。



(a) 直方图



(b) 实物图

图 8 预浸纱含胶量直方图和实物图

Fig. 8 Bar graph and picture of real products of prepreg tow

### 3 结 论

本文以日本三菱 HS40 高模量碳纤维和 CY-10W 氰酸酯树脂为实验材料,研究了两辊间隙、树脂温度、放纱张力、差速比以及收卷速率对含胶量的影响,得出如下结论:

(1) 通过机理分析和实验,确定了各因素对含胶量的影响规律:在实验范围内,两辊间隙和差速比与含胶量呈正线性关系;树脂温度对含胶量的影响呈现先上升后下降的趋势;放纱张力与含胶量呈正相关关系;随收卷速率的增加,含胶量呈下降趋势。

(2) 通过正交试验得出:预浸纱含胶量受两辊间隙影响最为显著、其次分别为收卷速率、树脂温度、差速比、放纱张力。

(3) 结合机理分析和正交试验进一步优化,制备出连续、稳定、含胶量低于 35% 的 HS40/CY-10W 预浸纱,对应工艺参数为:放纱张力 13 N、两辊间隙 0.15 mm、差速比 60%、收卷速率 12.56 m/min、树脂温度为 100 °C。基于直接热熔浸胶法制备预浸纱工艺稳定性较好,制备的预浸纱满足空间级精密预浸纱要求。

#### 参考文献:

- [1] Marsh G. Automating aerospace composites production with fibre placement [J]. Reinforced Plastics, 2011, 55(3): 32-37.
- [2] 李勇,肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用[J]. 纤维复合材料, 2002(3): 39-41.  
Li Yong, Xiao Jun. The technology and application of fiber placement[J]. Fiber Composites, 2002(3): 39-41.
- [3] 钟小丹,陈普会. 复合材料自动铺带工艺工时估算及软件开发[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1): 38-43.  
Zhong Xiaodan, Chen Puhui. Process time estimation model for composite automated tape laying and its code development[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(1): 38-43.
- [4] 严飙,肖军,文立伟. 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. Prepreg tows auto-splicing method and system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(2): 250-254.
- [5] 房海军,涂彬. 碳纤维复合材料卫星天线反射型面精度稳定性分析[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28

- (1): 67-71.
- Fang Haijun, Tu Bin. Stability analysis of CFRP reflecting surface in satellite antenna [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, 28(1): 67-71.
- [6] 刘宝锋, 李佩兰, 张凤翻, 等. 热熔法预浸料制备工艺研究[J]. *高科技纤维与应用*, 2000, 25(4): 38-48.
- Liu Baofeng, Li Peilan, Zhang Fengfan, et al. Study on the technogy of hot-melt prepregs [J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2000, 25(4): 38-48.
- [7] 杨涛, 高殿斌, 杨公源, 等. 宽幅预浸料用胶膜制备技术研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2008(4): 33-35.
- Yang Tao, Gao Dianbing, Yang Gongyuan, et al. Manufacture process of wide tape resin film for prepreg [J]. *Fiber Reinforced Plastic/Composites*, 2008(4): 33-35.
- [8] 杨涛, 高殿斌, 杨公源, 等. 窄带预浸料制备工艺及装备技术研究[C]//第十五届全国复合材料学术会议论文集. 哈尔滨:[s. n.], 2008:16-18.
- Yang Tao, Gao Dianbing, Yang Gongyuan, et al. Manufacture process and equipment to 30 mm glass fiber resin tape prepreg [C]// 15<sup>th</sup> National Conference on Composite Materials. Harbin:[s. n.], 2008: 16-18.
- [9] 刘宝锋, 沈超, 李佩兰, 等. 窄带预浸料制备工艺研究[J]. *热固性树脂*, 2003, 18(6): 16-18.
- Liu Baofeng, Shen Chao, Li Peilan, et al. Research on the manufacture process of narrow tape prepreg [J]. *Thermosetting Resin*, 2003, 18(6): 16-18.
- [10] 孙超英, 王峰. 窄带预浸料预浸工艺参数与质量控制[C]//第十三届全国复合材料学术会议论文集. 北京:[s. n.], 2004:861-865.
- Sun Chaoying, Wang Feng. Process parameters and quality control of prepreg tape [C] // 13<sup>th</sup> National Conference on Composite Materials. Beijing:[s. n.], 2004:861-865.
- [11] Cogswell F N, Hezzell D J, Williams P J. Fiber-reinforced compositions and methods for producing such compositions [P]. USA: United States Patent 5019450, 1992-05-27.
- [12] Gaymans R J, Wevers E. Impregnation of a Glass Fiber roving with a polypropylene melt in a pin assisted process [J], *Composites-Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998, 16(5): 363-369.
- [13] Rong-guo W, Fan Y. Optimizing processing parameters of pin-assisted-melt impregnation of fiber-reinforced plastics by numerical simulation [J]. *Journal of Thermoplastic Composite*, 2012, 31(11): 731-737.
- [14] Maureen F. Modeling the effect of fiber diameter and fiber bundle count on tow impregnation during liquid molding processes [J]. *Journal of Composite Materials*, 2005, 39(12): 1045-1065.
- [15] Weustink T N. Development of a rapid thermoplastics impregnation device [D]. Netherlands: Delft University, 2008.
- [16] Lahteenkorva P P. The influence of melt impregnation parameters on the degree of a polypropylene/glass fiber prepreg [J]. *Journal of Thermoplastic Composite*, 1992, 5(4): 318-343.

