

网格铺丝用预浸丝分切性能研究

黄晓川, 张建宝, 赵文宇, 刘永佼, 王俊峰, 孙宏杰

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

[摘要] 针对网格铺丝用预浸丝特点, 采用国产 T800/603B 热熔预浸料, 根据网格尺寸分切出适合网格铺丝用宽度的预浸丝, 以分切 5mm 和 10mm 预浸丝为例, 开展网格铺丝用预浸丝制备工艺研究, 并探究分析分切宽度精度、搭接接头强度及分切预浸丝边缘损伤情况对网格铺丝用预浸丝质量的影响。结果表明: 分切出的不同宽度的预浸丝能够满足网格铺丝用预浸丝使用要求。

关键词: 网格铺丝; 预浸丝分切; 分切宽度精度; 搭接接头强度; 分切预浸丝边缘损伤

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.075



黄晓川

工程师, 从事树脂基复合材料成型研究工作。

自动铺丝作为一种先进复合材料自动化制造技术, 近年来得到了迅猛发展, 大幅度提高了大型复合材料构件的成型质量和成型效率。自动铺丝技术在提高大型结构复合材料构件的质量一致性方面显示了巨大的优势^[1-3]。而我国自动铺丝技术的发展尚处于起步阶段, 且其在工程上尤其是航空航天领域的上应用仅停

留在成型尾椎壁板、舱段蒙皮、翼梁、进气道等结构件的研究上, 对于网格、桁条、筋条等结构的铺丝成型尚处于空白, 因此制造出可用于网格铺放、桁条铺放、筋条铺放用预浸丝是目前亟待解决的问题。

预浸丝的制备工艺方法分为湿法和热熔法(干法)两种工艺技术。湿法预浸料的制备工艺是先将树脂基体配成一定浓度的溶液, 碳纤维从溶液中通过, 浸渍了树脂后收卷于滚筒。湿法工艺制备的预浸丝含胶量和宽度受树脂基体的量及其浓度、纤维在树脂中停留时间、纤维所受张力、溶液对纤维浸润能力以及纤维加捻情况等因素有关。因此预浸丝含胶量及宽度难以控制^[4]。而热熔法预浸丝的制备工艺是树脂基体制成胶膜, 一定数量的纤维束经展纱后于胶膜在一定的温度、压力和速度下均匀结合、挤压, 之后通过加膜和加纸装置收卷成宽幅预浸料, 再由预浸丝分切机分切而成^[5]。

由于热熔法预浸丝具有含胶量、宽度稳定等特点, 是目前自动铺丝用预浸丝主要的制备工艺。分切后的预浸丝沿用国外标准 6.35mm

(1/4in)。由于网格槽尺寸不同, 网格铺丝用预浸丝宽度应与网格尺寸相适应, 通常预浸丝宽度范围在 5~10mm 之间。本文以 5mm 和 10mm 预浸丝为例, 研究分切宽度精度、搭接接头强度和分切预浸丝边缘损伤情况对网格铺丝用预浸丝质量的影响, 评价网格、筋条铺丝用预浸丝分切规格和分切质量。

试验

1 原材料

采用国产 T800/603B 高温固化树脂体系预浸料, 由航天材料及工艺研究所自主研制。其主要物理性能如表 1 所示。

2 试验设备

预浸丝分切: 预浸丝由盘带预浸料经预浸料分切机^[6]分切而成, 其分切机原理图和实物图如图 1 所示。盘式预浸料安装于放卷轴, 经过展平后, 由分切刀具对其进行固定丝束宽度分切, 每轮次可同时分切出 8 轴预浸丝。分切好的预浸丝经重新覆膜后收卷。

分切预浸丝边缘微观形貌分析: 通过 FEI SIRION 200 扫描电子显微

镜观察。

3 试样制备

3.1 预浸丝制备

分切预浸丝的宽度由相邻的两个刀垫切槽间距离决定。分别选择5mm和10mm厚度的刀垫进行预浸丝分切。分切后的预浸丝经重新覆膜后按照塔式收卷模式重新卷绕在纸筒表面,成为具有一定形状和容量的圆柱状卷装^[7]。

收卷过程中的预浸丝分切速度与复卷转速比值固定,可实现预浸丝的等螺距收卷。通常复卷导程为丝束宽度5~8mm。复卷5mm宽预浸丝复卷导程选取10mm,复卷10mm预浸丝复卷导程选取18mm。为避免复卷过程中由复卷轴厚度增加导致预浸丝在轴线方向上的往外胀出,产生的塌陷现象。复卷轴的每一层预浸丝宽度应逐层缩小。一般复卷每增加一层,预浸丝收卷宽度减小复卷导程的10%。

采用同一批次国产T800/603B预浸料进行分切,分切5mm宽预浸丝1轮次,共8轴,单轴长度 $\geq 600\text{m}$ 。分切10mm宽预浸丝1轮次,共8轴,单轴长度 $\geq 600\text{m}$ 。其分切后复卷的5mm宽和10mm宽预浸丝如图2所示。

3.2 搭接接头强度试样制备

不同搭接压力的接头强度试样制备:根据预浸料在工程应用中搭接经验,预浸料的搭接通常在 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度下按压5s,搭接接头长度为30mm。分别在分切好的5mm宽和10mm宽的预浸丝中截取长度为230mm的预浸丝各40根。在上述条件下,每10根同种宽度的预浸丝分别以2.5N、5N、7.5N和10N的搭接压力进行两两搭接。制成同种宽度预浸丝的4组不同搭接压力的接头强度测定试样,每种搭接压力包含5个子样。

不同搭接长度的接头强度试样制备:分别在分切好的5mm宽

表1 国产T800/603B单向板物理性能

Table 1 Physical properties of domestic T800/603B laminate

性能	数值
含胶量 / %	34 ± 3
挥发分 / %	≤ 1
面密度 / ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	165 ± 5
常温纵向拉伸强度 / MPa	≥ 2500
常温纵向弯曲强度 / MPa	≥ 1450
常温层间剪切强度 / MPa	≥ 90

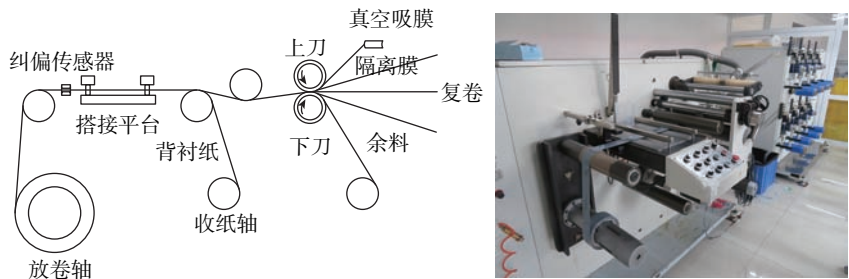


图1 分切机原理图和实物

Fig.1 Schematic and real products illustrations of splitting machine

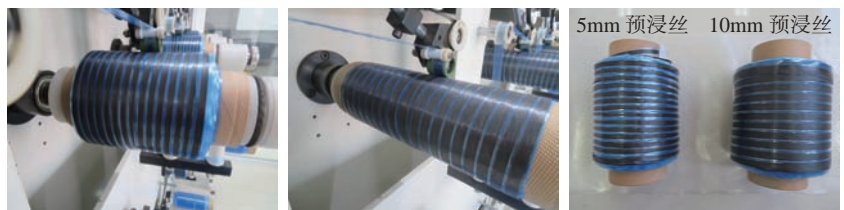


图2 分切后的预浸丝收卷和卷轴

Fig.2 Prepreg scroll after splitting

和10mm宽的预浸丝中截取长度为210mm、220mm和230mm的预浸丝各10根。在 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度下,每10根同种长度、同种宽度的预浸丝分别以10mm、20mm和30mm长的搭接长度以5N的搭接压力按压5s进行两两搭接,每个试样接头两端各富余200mm长度。制成同种宽度预浸丝的3组不同搭接长度的接头强度测定试样,每种搭接长度包含5个子样。

3.3 分切预浸丝边缘损伤分析试样制备

分别在分切好的5mm宽和10mm宽的预浸丝中截取长度为50mm的预浸丝各30根。每10根相同宽度的分切预浸丝以同一方向重叠铺层并压实,制成同种宽度预浸

丝的3组分切预浸丝边缘损伤分析试样。

4 测试方法

4.1 分切宽度精度测量

为保证分切后复卷的8轴预浸丝均满足使用要求,对每轴5mm宽和10mm宽预浸丝每间隔50m进行一次宽度测量并记录。

4.2 搭接接头强度测定

搭接接头强度测定采用悬挂重物的方式。搭接好的试样一端捆绑重物,另一端悬挂提起。试验方法如图3所示。

试验选用的重物包含托盘重100g、100g和10g砝码若干。搭接强度在某一直值下稳定保持5s而接头不断开即认为能够达到当下强度值。测量并记录5mm和10mm宽预浸丝

在不同搭接压力下接头强度的平均值和不同搭接长度下的接头强度。

4.3 预浸丝边缘损伤评价

预浸丝在分切收卷制备过程中,丝束边缘区域的纤维难免因在切割过程和丝束传输过程中存在微观损伤,导致预浸丝边缘的纤维束在分切过程中逐步被切断,致使纤维不连续。使用 SEM 对预浸丝边缘进行微观形貌观察分析。

结果与讨论

1 分切宽度精度

对同时分切的 8 轴 5mm 宽预浸丝和 8 轴 10mm 宽预浸丝进行宽度测量,测量结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,5mm 宽预浸丝的宽度在 4.96~5.04mm 之间,单根丝束宽度最大偏差为 0.05mm,离散度为 1%。10mm 宽预浸丝的宽度在 9.94~10.06mm 之间,单根丝束宽度最大偏差为 0.06mm,离散度为 0.6%。两种宽度预浸丝均满足 $\pm 0.15\text{mm}$ 宽度偏差指标要求,且离散程度较小。

2 搭接接头强度

记录 5mm 宽和 10mm 宽预浸丝在不同搭接压力下的接头强度的平

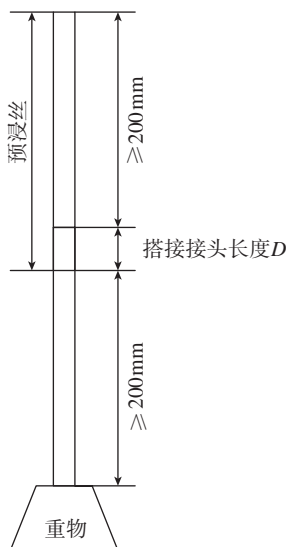


图3 预浸丝搭接接头强度试验示意图
Fig.3 Sketch illustration of prepreg joint strength test

均值,试验结果如表 2 所示。

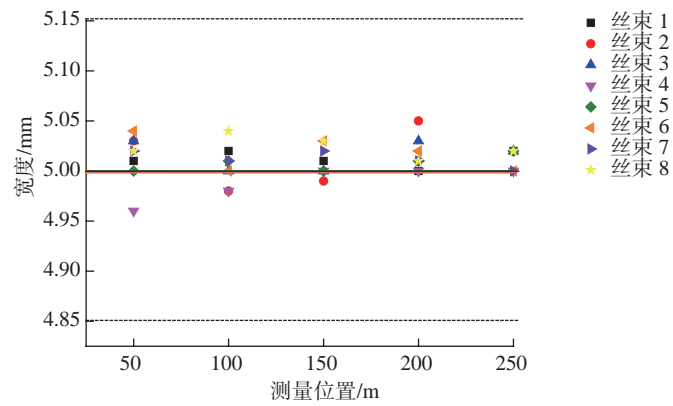
由表 2 可以看出,5mm、10mm 宽预浸丝在 5N 搭接压力下的搭接接头强度较 2.5N 明显提高。当搭接压力大于 5N 时,搭接接头强度不再明显变化。预浸丝搭接压力选取 5N 即可。

5mm 和 10mm 宽预浸丝在不同搭接长度下的接头强度测定结果如表 3 和表 4 所示。

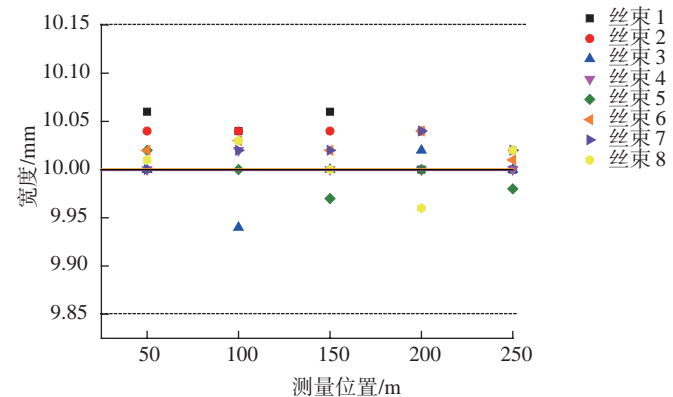
搭接接头强度试验结果表明,当搭接长度为 10mm 时,两种宽度预浸

丝搭接接头强度均已满足自动铺丝过程中实现丝束连续、力的传递所需要最小的要求。此时 10mm 宽预浸丝搭接接头强度约为 5mm 预浸丝的 2 倍,预浸丝宽度对搭接接头强度影响较大。当搭接长度为 20mm 时,5mm 宽预浸丝搭接接头强度较搭接 10mm 时增加了 1 倍,且两种宽度预浸丝搭接接头强度相近。当搭接长度为 $\geq 20\text{mm}$ 时,两种宽度预浸丝的搭接接头强度增幅明显减小。

由于宽幅预浸料单卷长度为



(a) 5mm 预浸丝宽度



(b) 10mm 预浸丝宽度

图4 预浸丝分切宽度范围

Fig.4 Scope of prepreg splitting width

表2 不同搭接压力下接头强度平均值

Table 2 Average value of prepreg joint strength under different pressure N

搭接压力	5mm 宽预浸丝 搭接接头强度	10mm 宽预浸丝 搭接接头强度
2.5	48.77	61.43
5	50.95	63.54
7.5	50.88	63.47
10	50.65	63.98

120m,为保证铺放过程的连续性和丝束面内力的传递,体现出纤维的力学性能,故在丝束端头允许搭接。固化后制品在搭接接头处的剪切破坏载荷不小于拉伸破坏载荷。

拉伸强度为:

$$\sigma_t = \frac{P_t}{b \times d} \quad (1)$$

式中, P_t 为拉伸破坏时最大载荷, b 为试样宽度, d 为试样厚度。

层间剪切强度为:

$$\tau_s = \frac{P_s}{h \times l} \quad (2)$$

式中, P_s 为层间破坏时最大载荷, h 为搭接面宽度, l 为搭接面长度。

根据试验所用预浸料物理性能,理论搭接长度 $\geq 9.6\text{mm}$ 。

实际铺放过程中,预浸丝经过过辊时会发生多次曲折。考虑实际搭接过程中预浸丝的运动、搭接操作灵活性以及搭接温度、搭接压力等条件与试验条件存在差异,搭接接头长度选择3倍最小理论搭接长度,即30mm。

3 预浸丝边缘损伤评价分析

对制备好的分切预浸丝边缘损伤试样进行微观形貌观察分析。预浸丝边缘表面形貌如图5所示。

预浸丝在切割和收卷过程中,纤维受到了明显的损伤,存在一定的断面,但纤维损伤断面未呈明显的阶梯阵列排布。表面纤维虽然受到损伤,但未存在预浸丝中纤维丝束的取向方向与预浸丝分切传输方向的夹角或夹角极小,未致使预浸丝纤维存在阶段性不连续的现象,满足网格铺丝过程中长纤维保持连续的要求。

结论

(1) 使用预浸丝自动分切机,可以实现5mm宽和10mm宽预浸丝的分切和重新复卷。

(2) 单轴分切预浸丝每隔50m测量一次宽度,5mm宽和10mm宽预浸丝分切宽度均满足 $\pm 0.15\text{mm}$ 的偏差要求,且单根丝束

表3 5mm预浸丝搭接接头强度测试结果

Table 3 Result of 5mm width prepreg joint strength test

搭接长度 /mm	搭接接头强度值 /N					平均值 /N
10	23.80	22.80	25.10	25.90	26.00	24.72
20	48.80	44.60	45.00	46.70	44.60	45.94
30	48.80	51.00	50.30	47.50	50.60	49.64

表4 10mm预浸丝搭接接头强度测试结果

Table 4 Result of 10mm width prepreg joint strength test

搭接长度 /mm	搭接接头强度值 /N					平均值 /N
10	50.90	51.20	42.50	45.50	47.80	47.58
20	48.80	55.10	53.00	46.70	49.60	50.64
30	53.60	50.40	53.90	54.20	52.10	52.84

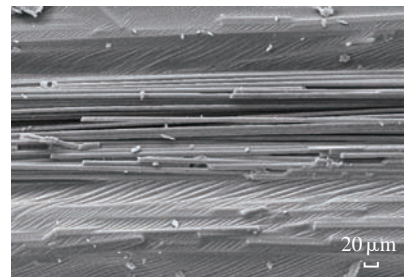
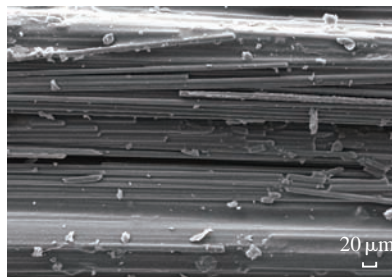


图5 预浸丝分切后边缘微观形貌

Fig.5 Microstructure of prepreg tow edge after splitting

宽度离散程度较小,分切宽度稳定。

(3) 对于避免不了的搭接,为实现丝束的连续和力的传递,预浸丝在 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下,以5N的搭接压力按压5s,搭接接头长度为30mm。

(4) 分切预浸丝边缘纤维在分切过程中受到局部损伤,未致使分切预浸丝断裂,不影响后续网格铺丝过程。

参考文献

[1] BRUCE M. Automating composites fabrication to meet increased throughput required by industries ranging from aerospace to wind energy, automation speeds composite production[J]. Manufacturing Engineering, 2008, 140(4): CT1-CT6.
 [2] 张建设, 赵文宇. 复合材料自动铺放工艺技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2014, 57(16): 80-83.
 ZHANG Jianbao, ZHAO Wenyu. Research status of automated placement processing technology of composites[J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2014, 57(16): 80-83.

[3] 肖军, 李勇, 李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, 51(1): 50-53.

XIAO Jun, LI Yong, LI Jianlong. Application of automatic placement technology in large aircraft composite structure parts manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(1): 50-53.

[4] 徐燕, 李炜. 国内外预浸料制备方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(9): 3-7.

XU Yan, LI Wei. Manufacturing methods of prepreg materia[J]. FRP / Composite, 2013(9): 3-7.

[5] 韩成智, 张艺萌, 凌辉, 等. 热熔预浸料预浸工艺研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(5): 59-63.

HAN Chengzhi, ZHANG Yimeng, LING Hui, et al. Study on the preimpregnation process of hot-melt prepreg[J]. FRP / Composite, 2014(5): 59-63.

[6] 赵聪, 陆楠楠, 闫西涛, 等. 自动铺 (下转第86页)

ASME Adaptive Structures Forum. Washington, 1995.

[20] E S C H E N A U E R H , S C H U H M A C H E R G , K R A M M E R J .

Constructive design models for multidisciplinary optimization of fiber composite structures[C]// Proceedings at the 4th AIAA/USAF/NASA/OAI Multidisciplinary Analysis and Optimization

(MOO) Symposium. Washington, 1992.

通讯作者: 王显峰, E-mail : wangxf@nuaa.edu.cn。

Discussion on Trajectory Design Technology Based on Automated Composites Fiber Placement Process

WANG Xianfeng¹, LIU Weiping², LIANG Wenping¹, JU Xiangwen¹, XIAO Jun¹

(1. School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200210, China)

[ABSTRACT] During the process of automatic fiber placement, aiming at the technological defects such as fiber folding and delamination in laying of resin-based fiber reinforced composites, this paper emphasizes on the advantages and disadvantages of different trajectory design methods (fixed angle, geodesic line, variable curvature) in technological defects. The different trajectory planning methods are compared. Finally, a trajectory design method for different surface characteristics and different wire laying process requirements is given.

Keywords: Composite material; Fiber placement process; Trajectory design; Defect Suppression

(责编 大漠)

(上接第78页)

丝用预浸丝制备工艺研究[J]. 固体火箭技术, 2014(5): 718-723.

ZHAO Cong, LU Nannan, YAN Xitao, et al. Research on the process of preparation of prepreg tow applied in automatic fiber placement[J]. Journal of Solid Rocket

Technology, 2014(5): 718-723.

[7] 孙天峰, 文立伟, 肖军, 等. 碳纤维预浸料自动分切复卷系统设计与研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(16): 66-70.

SUN Tianfeng, WEN Liwei, XIAO Jun, et al. Design and research on automatic slitting and

rewinding mechanism of carbon fiber prepreg[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(16): 66-70.

通讯作者: 黄晓川, E-mail: huangxiaochuan1992@126.com。

Research on Slitting Property of Prepreg Tow Applied in Automated Fiber Placement for Grid

HUANG Xiaochuan, ZHANG Jianbao, ZHAO Wenyu, LIU Yongjiao, WANG Junfeng, SUN Hongjie

(Aerospace Research Institute of Material & Processing Technology, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] According to the characteristic of prepreg tow applied in grid automatic fiber placement, the prepreg by domestic T800/603B is slit into tows which is suitable for mesh laying width according to grid size. Taking slitting width of 5mm and 10mm prepreg tow for example, the preparation technology of which was researched. In addition the accuracy of slitting width, the strength of overlap joint and damage situation of slitting prepreg tow edge were studied. Results showed that different widths of the tows cut out can meet the requirements of prepreg tow applied in grid automated fiber placement.

Keywords: Automated fiber placement into grid; Prepreg tow slitting; Accuracy of slitting width; Strength of overlap joint; Damage situation of slitting prepreg tow edge

(责编 大漠)