

# 铺放工艺参数对预浸料丝束曲线铺贴质量的影响



分享本文

蔡立成<sup>1</sup>, 彭啸<sup>1</sup>, 汪海晋<sup>1</sup>, 丁会明<sup>2</sup>, 徐强<sup>\*1</sup>

(1. 浙江大学 机械工程学院, 杭州 310012; 2. 杭州艾美依航空制造装备有限公司复合材料部门, 杭州 311200)

**摘要:** 为研究铺放工艺参数对复合材料预浸料丝束曲线铺贴质量的影响规律及作用机制, 首先自主设计并搭建了可模拟铺丝机曲线铺贴运动的试验平台, 进行了变铺放工艺参数与变铺放半径的预浸料丝束曲线铺贴试验。通过测量计算有效贴合长度比、褶皱角度及曲率半径比, 并结合变铺放工艺参数的单因素剥离试验对铺放质量进行了表征。结果表明: 曲线铺贴质量与预浸料丝束黏结力及弯曲刚度密切相关; 随铺放温度、压力和张力增大、铺放速率减小, 丝束黏结力上升, 曲线铺贴质量提高; 铺放温度升高引起的丝束弯曲刚度下降可提升曲线铺贴准确性, 但过高的铺放温度会导致丝束黏性下降, 曲线铺贴缺陷显著; 铺放张力会改变丝束的受力状态, 进而影响曲线铺贴路径的准确性; 此外, 曲线铺贴半径越小, 铺放质量对工艺参数的变化越敏感。

**关键词:** 自动铺丝; 工艺参数; 曲线铺贴; 剥离试验; 预浸料; 黏结力行为

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)06-1795-14

## Influence of laying process parameters on curve trajectory placement quality of prepreg tow

CAI Licheng<sup>1</sup>, PENG Xiao<sup>1</sup>, WANG Haijin<sup>1</sup>, DING Huiming<sup>2</sup>, XU Qiang<sup>\*1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China; 2. Department of Composite Materials, Hangzhou AME Aerospace Manufacturing Equipment Corporation Limited, Hangzhou 311200, China)

**Abstract:** In order to study the effect and mechanism of laying process parameters on the curve trajectory placement quality of prepreg tow, an automated fiber placement simulation test platform was designed and built firstly, and the test of curve trajectory placement was carried out by changing the laying process parameters and laying radius. The laying quality was represented by the measurement and calculation of effective tack width ratio, wrinkle angle and curvature radius ratio and also the results of peeling test of variable laying process parameters. The results show that the curve trajectory placement quality is closely related to the tack and bending stiffness of prepreg tow. With the increase of laying temperature, pressure and tension and the decrease of laying velocity, the tack of prepreg tow increases and the curve trajectory placement quality is improved. Due to the increase of laying temperature, the bending stiffness of the prepreg tow decreases, which can improve the accuracy of laying. However, excessive temperature will cause the tack of the prepreg tow to decrease, make the defect of curve placement obvious. The laying tension will change the stress state of the prepreg tow, thus affecting the accuracy of the laying path. In addition, the smaller the curve placement radius is, the more sensitive the placement quality is to the change of process parameters.

**Keywords:** automated fiber placement; process parameter; curve trajectory placement; peel test; prepreg; tack behavior

收稿日期: 2020-06-18; 录用日期: 2020-07-29; 网络首发时间: 2020-08-26 10:03:49

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200826.004>

基金项目: 国家自然科学基金 (51805476)

通信作者: 徐强, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料力学 E-mail: [xuqiang@zju.edu.cn](mailto:xuqiang@zju.edu.cn)

引用格式: 蔡立成, 彭啸, 汪海晋, 等. 铺放工艺参数对预浸料丝束曲线铺贴质量的影响 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1795-1808.

CAI Licheng, PENG Xiao, WANG Haijin, et al. Influence of laying process parameters on curve trajectory placement quality of prepreg tow[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1795-1808(in Chinese).

碳纤维增强复合材料因其优异的性能,被广泛应用于飞机机翼等主承力结构中<sup>[1]</sup>。近年来,自动铺放技术已大规模应用于飞机复合材料结构件制造<sup>[2-3]</sup>。目前,已有学者在研究复合材料构件自动铺丝工艺过程中发现,以顺直铺放预浸丝束的方式提升复合材料构件的力学性能具有一定的局限性<sup>[4]</sup>。相比之下,通过优化曲线铺贴路径制造的变刚度复合材料层合板力学性能提升显著<sup>[5-8]</sup>。此外,曲线铺贴技术还可有效解决复合材料层合板切口与开孔区域应力集中问题<sup>[9-11]</sup>。

铺放工艺参数选取不当易造成预浸料丝束曲线铺贴过程中产生纤维屈曲、丝束角度偏差等铺放缺陷<sup>[12-13]</sup>。这些缺陷随复合材料构件固化成型过程进一步演化,最终在复合材料构件内部形成褶皱、富树脂区等缺陷,严重影响其力学性能<sup>[14-16]</sup>。由此可见,选取适宜的铺放工艺参数是保证曲线铺贴质量的关键<sup>[17]</sup>。

Rajan 等<sup>[18]</sup>通过数字散斑测试技术研究了铺放曲率半径对铺放缺陷的影响,结果发现:随铺放曲率半径减小,褶皱出现频率与尺寸均呈上升趋势,且铺放曲率半径越小铺贴质量越差。黄新杰等<sup>[19]</sup>提出以预浸料丝束的有效贴合长度比“L”来描述曲线铺贴质量,L被定义为横向贴合长度与丝束宽度的比值,通过对比有效贴合长度比发现:曲线铺贴质量随铺放温度升高、铺放速率减小而提高,而铺放压力过大会导致铺放质量下降。然而,上述研究仅局限于单一因素来评价丝束曲线铺贴质量。

另一方面,已有研究工作表明铺放工艺参数对预浸料黏结特性影响显著,曲线铺贴过程中产生的缺陷与预浸料黏结力密切相关<sup>[20-22]</sup>。例如,Bakhshi 等<sup>[12]</sup>通过仿真和试验相结合的方法研究了影响预浸料丝束转向铺贴质量的相关因素,发现纤维导向与贴合面黏结力不足是产生铺放缺陷的主因,通过进一步调整工艺参数并增大转向半径,可获得较好的铺贴质量。方宜武等<sup>[23]</sup>在建立预浸料侧向弯曲变形模型与铺放试验的过程中发现增大铺放温度与铺放压力,同时减低铺放速度,铺放质量可得到显著提升,增加预浸料黏结力可提升预浸料侧向弯曲性能。谢林杉等<sup>[24]</sup>研究了不同工艺参数对纤维屈曲率的影响规律,结果发现黏结力越强,抵抗曲线铺贴缺陷的能力越强,极限转向半径越小。尽管上述研究工作涵盖了预浸料丝束曲线铺贴工艺参数、预浸料黏结力与铺放

缺陷(褶皱、纤维屈曲和横向架桥等)关联机制的研究,然而丝束角度偏差引起的铺放路径与设计路径不匹配的问题却鲜有涉及,在曲线铺贴过程中丝束铺放路径不匹配会引起相邻丝束的间隙与搭接,导致复合材料力学性能下降。因此,铺放工艺参数对曲线铺贴路径和铺放质量的影响机制亟需研究。

综上所述,本文将通过变工艺参数与曲率半径的曲线铺贴试验,探究各个工艺参数的改变对曲线铺贴缺陷及铺放路径准确性的影响。与此同时,在对曲线铺贴质量进行综合表征的基础上,利用剥离试验探究铺放工艺参数对铺放质量的影响机制,为高性能复合材料构件的高质量铺放提供参考。

## 1 试验规划

### 1.1 曲线铺贴试验设计

#### 1.1.1 曲线铺贴装置设计

曲线铺贴试验将在自行设计的铺放台上进行,曲线铺贴台如图1所示,预浸丝束的曲线运动依靠凸轮机构与从动底板间的相对运动实现,改变凸轮半径即可改变曲线铺贴半径,选取半径区间为500~2 500 mm<sup>[19]</sup>。工程中铺丝机在进行曲线铺贴时,铺放头通过旋转运动,保持铺贴曲线的圆心在压辊轴线上。在铺放试验台的设计中,通过设计压辊旋转装置与杠杆机构的配合实现这一功能,不同的曲线铺贴半径需要设置不同的杠杆比例(图中OA与OB的长度比值)以使压辊达到不同的旋转角。不同半径下的长度比如表1所示。在压辊旋转装置上设置有送丝机构,可与压辊一同旋转,不仅可以避免预浸料丝束的扭转,也可以确保送丝方向与压辊线速度方向一致。通过以上设计,试验台可复现铺丝机的曲线铺贴运动。

铺放模具为温控器与热电偶控温的加热垫片,预浸料丝束在垫片上表面的金属面上进行铺放。金属表面温度通过Fluke测温仪标定,表面温度与设定温度误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。铺放压力由气缸调节,使用压力传感器获得试验铺放压力对应的气压值。曲线铺贴速率由伺服电机控制。铺放张力由标准砝码的质量进行控制,铺放张力为砝码重力。

铺放工艺参数取值由铺丝机工作区间及现有研究范围<sup>[25]</sup>的基础上进行选取,如表2所示。

#### 1.1.2 原材料

试验所用热碳纤维增强热固性树脂基复合材

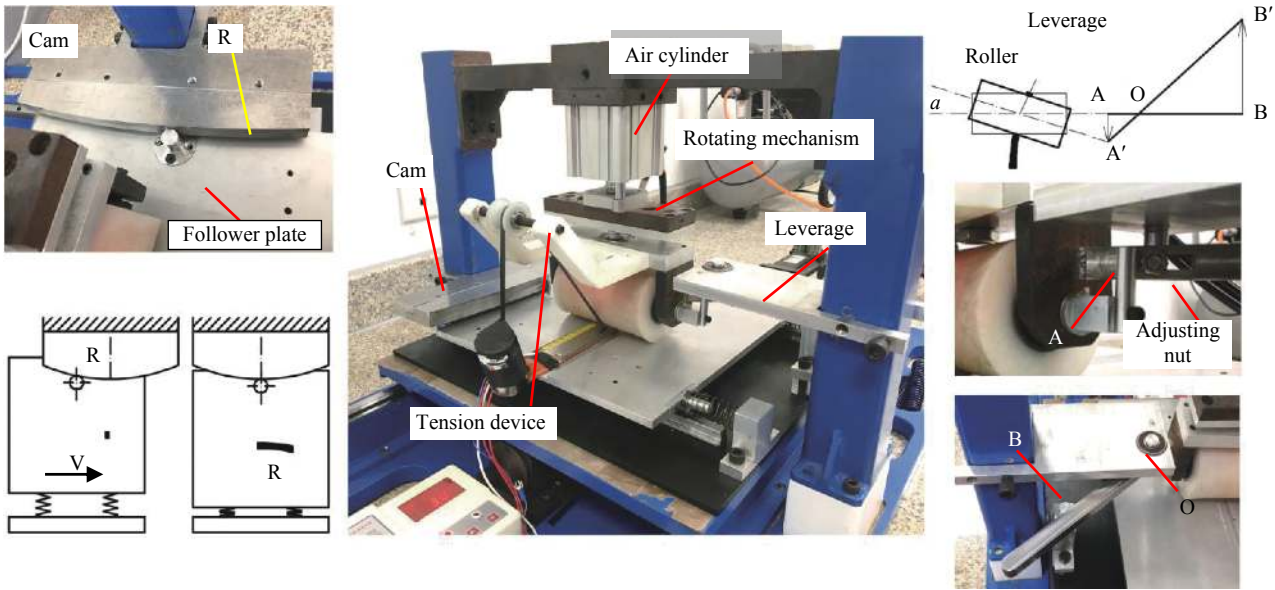


图 1 曲线铺贴台及工作原理示意图  
Fig. 1 Curve placement table and schematic diagrams of operating principle

表 1 不同曲率半径下铺放台尺寸设计

Table 1 Size design of placement table under different curve radius

| Laying radius/mm | 500   | 750   | 1 000 | 1 500 | 2 000 | 2 500 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $L_{OA}/L_{OB}$  | 0.24  | 0.16  | 0.12  | 0.08  | 0.06  | 0.048 |
| $a/\text{rad}$   | 0.190 | 0.130 | 0.100 | 0.067 | 0.049 | 0.040 |

Notes:  $L_{OA}$ —Length of OA;  $L_{OB}$ —Length of OB;  $a$ —Rotation arc of the roller.

表 2 预浸料曲线铺贴工艺参数区间

Table 2 Interval of process parameters for prepreg curve placement

| Group                 | $T/^{\circ}\text{C}$ | $P/\text{N}$ | $V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $F/\text{N}$ |
|-----------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|
| Temperature group     | 20-40                | 600          | 20                                | 4            |
| Pressure group        | 30                   | 200-1 000    | 20                                | 4            |
| Velocity group        | 30                   | 600          | 20-100                            | 4            |
| Tension group         | 30                   | 600          | 20                                | 2-10         |
| Orthogonal test group | 20-35                | 200-800      | 20-80                             | 2-8          |

Notes:  $T$ —Laying temperature;  $P$ —Laying pressure;  $V$ —Laying velocity;  $F$ —Laying tension.

料预浸料由威海光威复合材料有限公司提供，型号为 T700/7901，树脂含量  $(33\pm3)\%$ ，厚度为 0.11 mm。试验铺放预浸料宽度为 6.35 mm，长度为 300 mm。所有试验过程环境温度都将控制在  $(20\pm2)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度控制在  $(50\pm5)\%$ 。

1.1.3 曲线铺贴缺陷与准确性表征

研究表明，在模具与预浸料之间易产生铺放缺陷<sup>[26]</sup>。因此，研究的重点为预浸料丝束与金属模具间的曲线铺贴。

首先，采用有效贴合长度比  $L$  与褶皱角度  $\theta$  相结合的方法对曲线铺贴缺陷进行表征，如图 2(a)

所示。有效贴合长度比  $L$  为横向贴合宽度与丝束宽度之比； $\theta$  定义为褶皱高度所对应的正切角。此外，针对铺层路径与设计路径不匹配的问题，采用曲率半径比  $R'/R$  作为曲线铺贴准确性的表征量，其中  $R'$  为曲率半径的实际值， $R$  为曲率半径的设定值。由于铺放半径远大于丝束宽度，记录时取丝束内侧半径作为铺放后的实际半径  $R'$ 。

如图 2(b) 所示，通过微距摄影仪 (精度为 0.002 mm) 进行尺寸测量。测量宽度与半径时保证模具的放置平台处于水平。摄影仪长度测量的标定通过标准刻度尺进行。



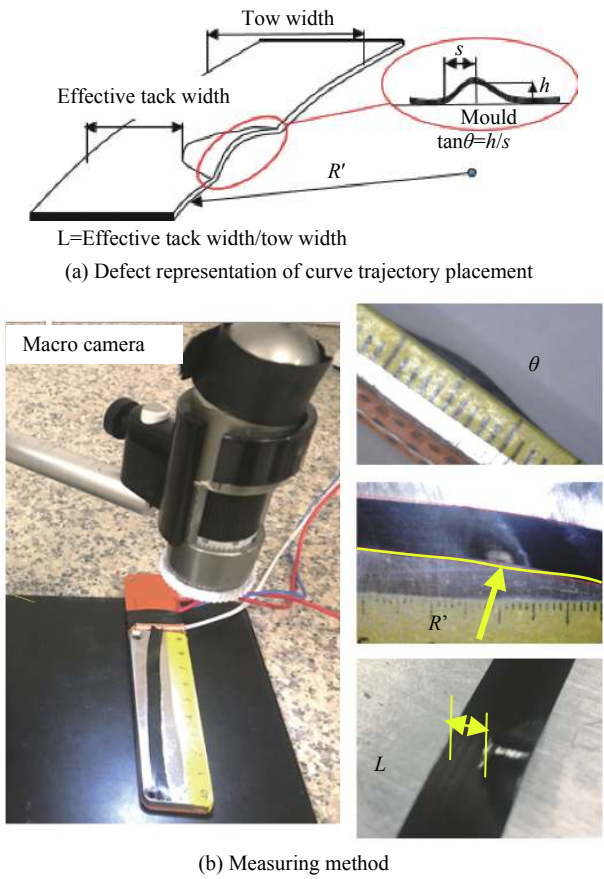


图2 曲线铺贴表征量测量示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the measurement of characteristic quantity of curve placement

1.2 剥离试验方法

本文采用的是分段式剥离试验方法<sup>[27]</sup>，原理如图3(a)所示，其中剥离段Ⅰ的长度为30 mm，预浸料下垫有无黏度薄膜，剥离段Ⅱ的长度为60 mm，无薄膜。在剥离段Ⅰ测得的剥离力为预浸料受弯曲产生的力(下文简称弯曲力)，用以描述丝束弯曲刚度；在剥离段Ⅱ测得的剥离力为黏结力值和弯曲力值的和。保持剥离半径不变的情况下，预浸料弯曲产生的力值在整个剥离过程中保持不变，黏结剥离力值可通过剥离段Ⅱ的力减去剥离段Ⅰ的力，如图3(b)所示。通过剥离试验方法，获取各个铺放工艺参数下的预浸料黏结力及弯曲力的变化情况。

剥离试验在深圳三思纵横 UTM2102 电子试验机上进行，如图4所示。为保持底板平移速度与升降头上升速度一致，从而保持90°的剥离角度，将试验机升降头与剥离底板通过钢绳进行连接。本文使用的预浸料其适宜剥离半径为3~7 mm，因此试验中选取导辊半径为5 mm，剥离速率设置

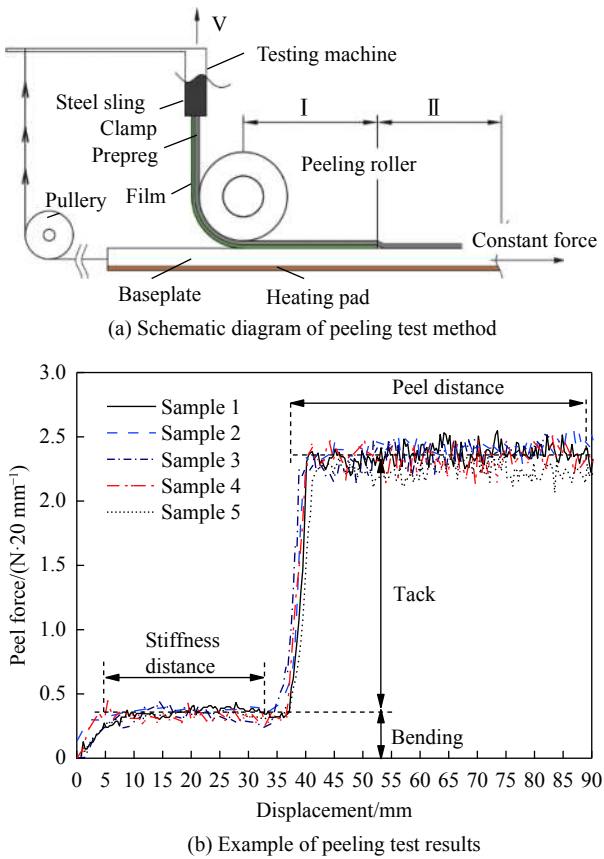


图3 曲线铺贴表征量测量示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the measurement of characteristic quantity of curve placement

为100 mm/min。通过对剥离底板施加稳定的力，可有效遏制导轨的蠕动效应，从而保持剥离试验过程的稳定。

剥离试验试件宽度为20 mm，长300 mm，所用材料与曲线铺贴试验材料、过程控制与铺放试验相同。各工艺参数剥离试验组除变量外，其余铺放工艺参数均与曲线铺贴试验一致，见表2。剥离试验曲线铺贴半径统一为750 mm。

2 结果与讨论

2.1 铺放温度对曲线铺贴的影响

2.1.1 不同铺放温度下曲线铺贴质量的表征

铺放温度是预浸料丝束铺贴成型的关键要素之一。控制铺放温度取值区间为20~40℃完成单因素铺放试验。图5为不同铺放温度下铺放表征量曲线。由图5(a)与图5(b)可看出，随铺放温度升高，预浸料丝束的有效贴合长度比L先升后降，皱褶角度θ先减小后增大。铺放温度取值为30℃时，各曲率半径铺放组有效贴合长度比均趋近于1，同时，皱褶角度趋近于0，曲线铺贴缺陷的产



图 4 剥离试验装置  
Fig. 4 Experimental set-up for peeling test

生得到了有效遏制。此外，随曲线铺贴半径增大，有效贴合长度比逐渐上升，褶皱角度逐渐下降。铺贴半径越大，曲线铺贴缺陷受铺放温度变化的影响就越小。

图 5(c) 为不同铺放温度下的曲率半径比曲线。可见，铺放温度超过 30℃ 时，预浸料曲线铺贴的曲率半径比逐渐接近于 1，曲线铺贴的实际半径逐渐接近于设定半径值，铺贴的准确性逐渐提升。此外，随设定的曲线铺贴半径增大，曲率半径之比趋接近于 1，曲线铺贴准确度不断增大。综上所述，随铺放温度上升，曲线铺贴质量呈现出先升后降的趋势，在铺放温度为 30℃ 时，曲线铺贴质量获得试验组最佳。

2.1.2 铺放温度影响曲线铺贴质量的机制

复合材料预浸料的弯曲刚度与黏结特性受铺放温度的影响显著<sup>[28]</sup>。本节将通过剥离试验探究铺放温度对预浸料黏结力和弯曲力的影响规律，结合试验结果对黏结力和弯曲刚度与曲线铺贴质量间的内在关联进行分析。试验结果见表 3，弯曲力和黏结力均表示为单位宽度的力。

由剥离试验结果可见，随铺放温度升高，预

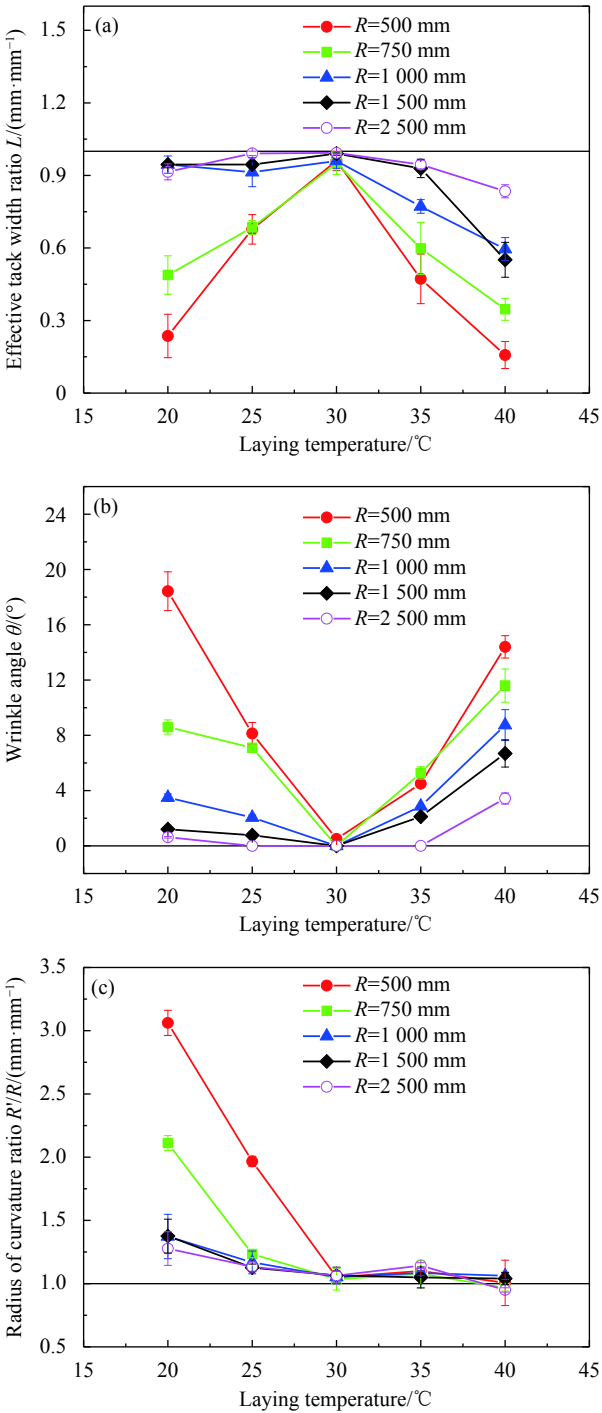


图 5 不同铺放温度下 T700/7901 预浸料有效贴合长度比 (a)、褶皱角度 (b) 与曲率半径比 (c) 测量曲线

Fig. 5 Effective tack width ratio (a), wrinkle angle (b) and radius of curvature ration (c) measurement curves of T700/7901 prepreg tow at different curve trajectory placement temperatures

浸料弯曲力逐渐下降，黏结力先升后降，并在 30℃ 时取得最大值。由图 6 所示预浸丝束微观形貌可知，20℃ 时树脂呈孤岛状，流动性较差，30-40℃ 时树脂流动性增强，浸润于纤维中，致使丝束弯

表 3 铺放温度对 T700/7901 预浸料黏结力及弯曲力的影响

Table 3 Influence of laying temperature on the tack and bending of T700/7901 prepreg

| Laying temperature/℃               | 20    | 25    | 30    | 35    | 40    |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tack/(N·(20 mm) <sup>-1</sup> )    | 1.315 | 1.578 | 2.114 | 1.045 | 0.625 |
| Tack CV/%                          | 6.48  | 5.38  | 4.85  | 9.29  | 13.40 |
| Bending/(N·(20 mm) <sup>-1</sup> ) | 0.513 | 0.427 | 0.374 | 0.208 | 0.139 |
| Bending CV/%                       | 8.42  | 4.41  | 9.80  | 8.31  | 12.20 |

Note: CV—Coefficient of variation.

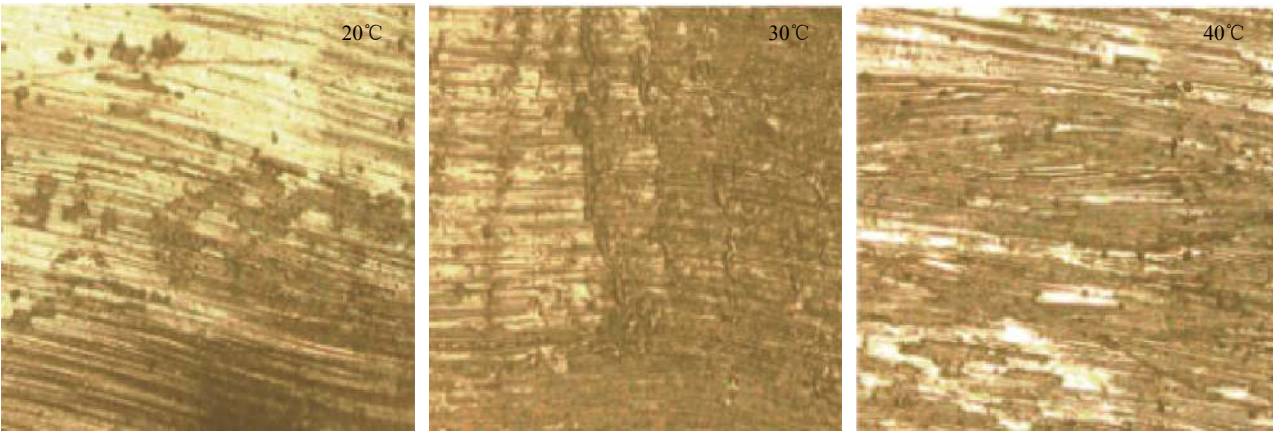


图 6 不同铺放温度下树脂型态分布

Fig. 6 Resin distribution at different laying temperatures

曲刚度下降。但当铺放温度大于 30℃ 时，丝束与模具分离失效形式转变<sup>[29]</sup>，黏结力快速降低。

图 7 为曲线铺贴表征量与预浸丝束黏结力、弯曲力的关系曲线。对比图 7(a) 与图 7(b) 中曲线可见，随铺放温度升高，曲线铺贴的有效贴合长度比与预浸料黏结力呈现出相同的变化趋势，而褶皱角度的变化趋势则与黏结力变化趋势完全相反。这证明铺放温度对曲线铺贴质量的影响是通过改变预浸丝束的黏结力引起的。预浸丝束黏结力越高，有效贴合长度比越接近于 1，褶皱角度则越小，曲线铺贴缺陷的抑制效果越好。使用高黏度丝束进行的曲线铺贴可获得良好的质量。

由图 7(c) 曲线可观察到，曲率半径比与预浸料弯曲力的变化趋势相同，预浸丝束弯曲力越低，曲率半径比越接近于 1。由此可见，减小的预浸料弯曲刚度能够有效提升预浸丝束的侧向弯曲性能，从而使铺放准确性获得提升。除此之外，综合观察图 7 可发现，丝束黏结力与弯曲力值之间的差值越大，曲线铺贴质量越高。铺放温度为 30℃ 的试验组取得了最佳的铺放质量，此时黏结力值与弯曲力值之差为 1.74 N/20 mm，为试验组最大差值，而铺放温度为 20℃ 及 40℃ 时，黏结力值与弯曲力之差较小，铺贴质量较差。

2.2 铺放压力对曲线铺贴的影响

2.2.1 不同铺放压力下曲线铺贴质量的表征

改变铺放压力完成曲线铺贴试验。图 8 为不同铺放压力下曲线铺贴试验结果曲线。由图 8(a) 与图 8(b) 可见，随铺放压力的增大，有效贴合长度比呈上升趋势，褶皱角度呈现减小的趋势。而从图 8(c) 中可见，除曲率半径 500 mm 组外，铺放压力的改变对曲线铺贴的曲率半径之比无显著影响，曲率半径之比均可维持在 1.2 以内，曲线铺贴准确性良好。值得注意的是，当铺放半径取值为 500 mm，铺放压力取值 1 000 N 时，有效贴合长度比急剧下降，褶皱角度同时回升，铺放质量下降严重。

综上所述，铺放压力的合理取值范围为 600~800 N 时，此工艺条件下曲线铺贴产生的缺陷相对较少。除此之外，曲线铺贴半径越小，铺放质量对压力的变化越敏感。

2.2.2 铺放压力影响曲线铺贴质量的机制

本节通过剥离试验探究铺放压力参数对预浸料丝束黏结力和弯曲力的影响，结果如表 4 所示。随铺放压力增大，预浸料黏结力线性增加，弯曲力无显著变化。图 9 为不同铺放压力下曲线铺贴质量与黏结力的关系。



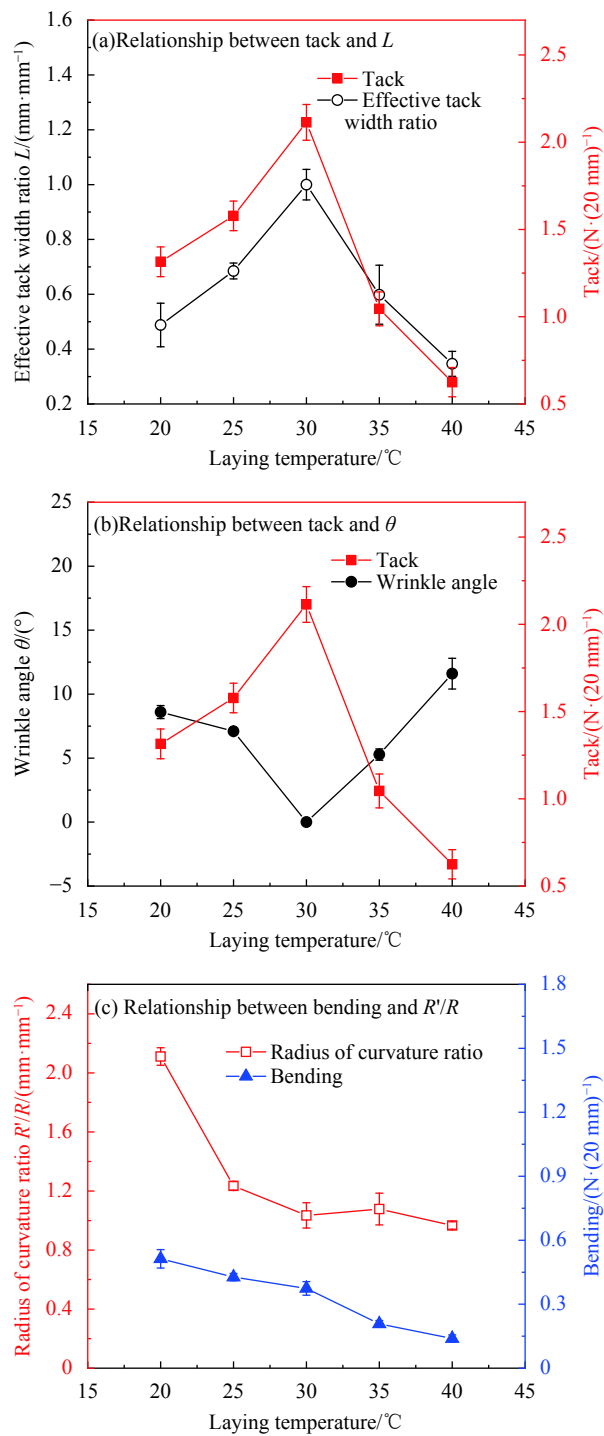


图 7 不同铺放温度下 T700/7901 预浸丝束有效贴合长度比、褶皱角度、曲率半径比与黏结力、弯曲力的关系

Fig. 7 Relationship between effective tack width ratio, wrinkle angle, radius of curvature ratio and tack and bending of T700/7901 prepregtow at different laying temperatures

由图 9 可见，有效贴合长度比随丝束黏结力增大先上升后趋于平稳。褶皱角度则随黏结力的增大呈现出下降的趋势。曲线铺贴的质量随丝束黏结力的增大而得到了改善。随铺放压力增大而

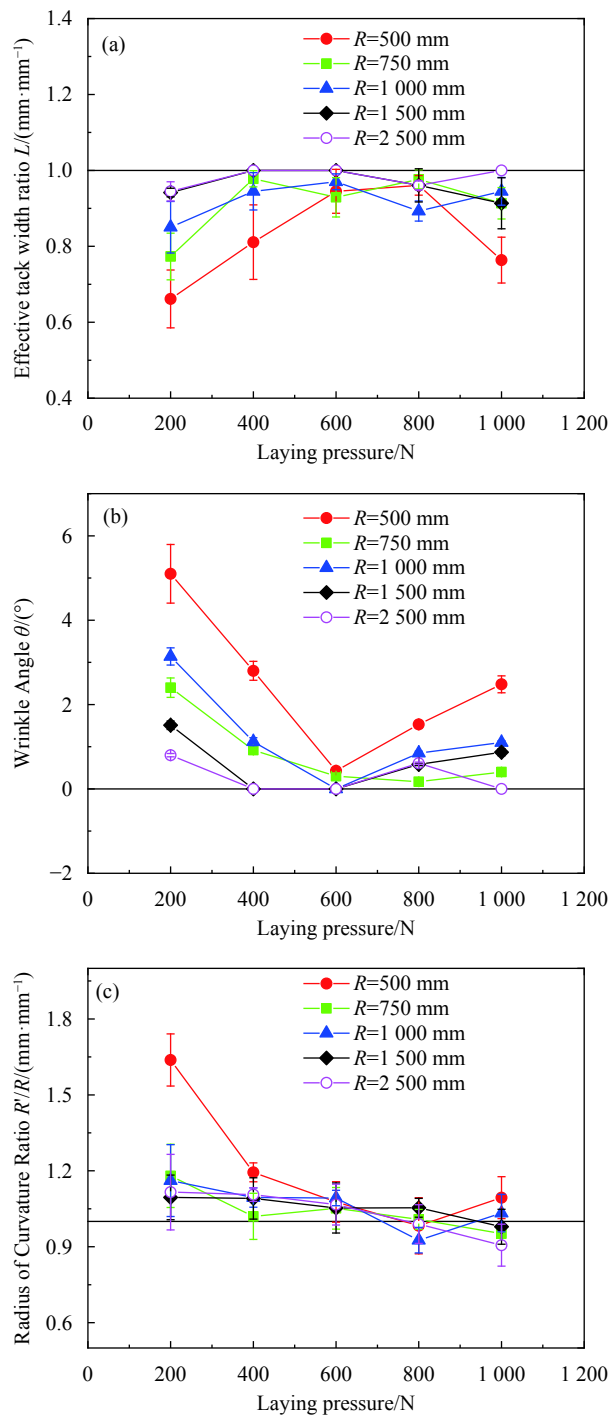


图 8 不同铺放压力下有效贴合长度比  $L$  (a)、褶皱角度  $\theta$  (b) 与曲率半径比  $R'/R$  (c) 测量曲线

Fig. 8 Effective tack width ratio (a), wrinkle angl (b) and radius of curvature ration (c) measurement curves at different curve trajectory placement pressures

增大的黏结力有效抑制了预浸料面外翘曲的产生，从而减少了褶皱缺陷的影响。当铺放压力大于 600 N 时，由有效贴合长度比与褶皱角度表征的铺放质量无显著变化。然而，持续增大铺放压力会降低

表 4 铺放压力对 T700/7901 预浸料黏结力及弯曲力的影响

Table 4 Influence of laying pressure on the tack and bending force of T700/7901 prepreg

| Laying pressure/N                  | 200   | 400   | 600   | 800   | 1 000 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tack/(N·(20 mm) <sup>-1</sup> )    | 1.608 | 1.725 | 2.114 | 2.352 | 2.514 |
| Tack CV/%                          | 6.48  | 3.74  | 4.85  | 6.52  | 9.59  |
| Bending/(N·(20 mm) <sup>-1</sup> ) | 0.384 | 0.410 | 0.374 | 0.365 | 0.395 |
| Bending CV/%                       | 5.52  | 3.58  | 9.80  | 6.55  | 7.11  |

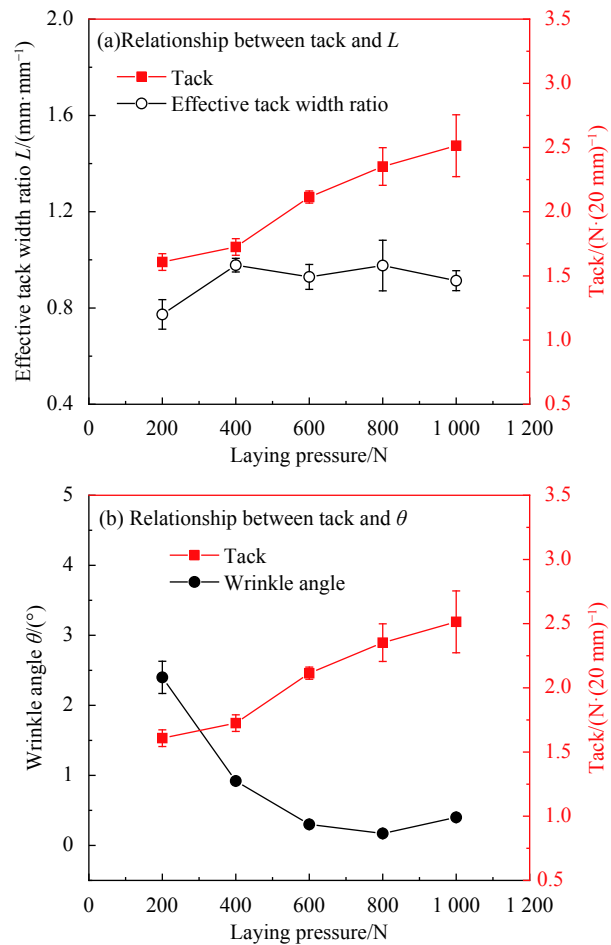


图 9 不同铺放压力下 T700/7901 预浸丝束有效贴合长度比、褶皱角度与黏结力关系

Fig. 9 Relationship between effective tack width ratio, wrinkle angle and tack of T700/7901 prepreg tow at different laying pressures

曲线铺贴质量, 如图 10 所示, 当铺放压力取值为 1 000 N 时, 会出现丝束面内屈曲与横向撕裂的现象, 这是由过大的压辊和预浸料之间的摩擦力导致的。过大的铺放压力使摩擦力急剧上升, 推动局部纤维丝束产生滑移, 从而引起面内缺陷。

### 2.3 铺放张力对曲线铺贴的影响

#### 2.3.1 不同铺放张力下曲线铺贴质量的表征

通过标准砝码质量控制张力大小, 完成 2~10 N 张力下的曲线铺贴试验。图 11 为不同张力下曲线

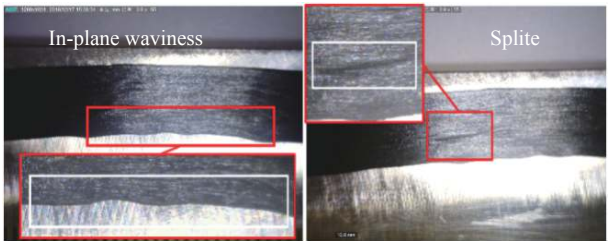


图 10 过大铺放压力下的 T700/7901 预浸料缺陷

Fig. 10 Defects of T700/7901 prepreg under excessive laying pressure

铺贴结果曲线。

由图 11(a) 与图 11(b) 可知, 当铺放张力取值为 2~4 N 时, 随着铺放张力的增加, 曲线铺贴的有效贴合长度比  $L$  趋近于 1, 铺放皱褶角度  $\theta$  逐渐减小, 曲线铺贴质量得到改善。进一步增大的铺放张力, 会引起有效贴合长度比的下降与皱褶角度的增大。这一现象在铺放半径为 500 mm 及 750 mm 的小曲线半径组中更显著。

由图 11(c) 曲线可看出, 曲率半径之比随铺放张力的增大呈现先减后增的趋势。当铺放张力取值为 4~6 N 时, 曲率半径之比均趋近于 1, 曲线铺贴的准确性可得到保证。而在此范围的基础上, 增大或减小铺放张力都会使曲线铺贴准确性下降。与此同时可观察到, 曲线铺贴的半径越大, 曲率半径比则越接近 1, 铺放准确性越高。

#### 2.3.2 铺放张力影响曲线铺贴质量的机制

通过调节张力, 完成预浸料剥离试验。试验结果如表 5 所示。铺放张力 2~6 N 时, 预浸料的黏结力随铺放张力的增加而增大, 当铺放张力大于 6 N 时, 预浸丝束黏结力变化不显著。图 12 为不同铺放张力下铺放质量与黏结力的关系。

由图 12 可知, 铺放张力取值为 2~8 N 时, 随预浸料黏结力增大, 曲线铺贴有效贴合长度比趋于 1, 皱褶角度则趋于 0, 曲线铺贴缺陷的影响减小。较大的铺放张力, 使预浸料丝束更平直, 与模具接触更加充分, 曲线铺贴的贴合程度提高。

当铺放张力取值 2 N 与 10 N 时, 预浸料曲线铺贴半径之比均与 1 存在很大的差距, 这证明实



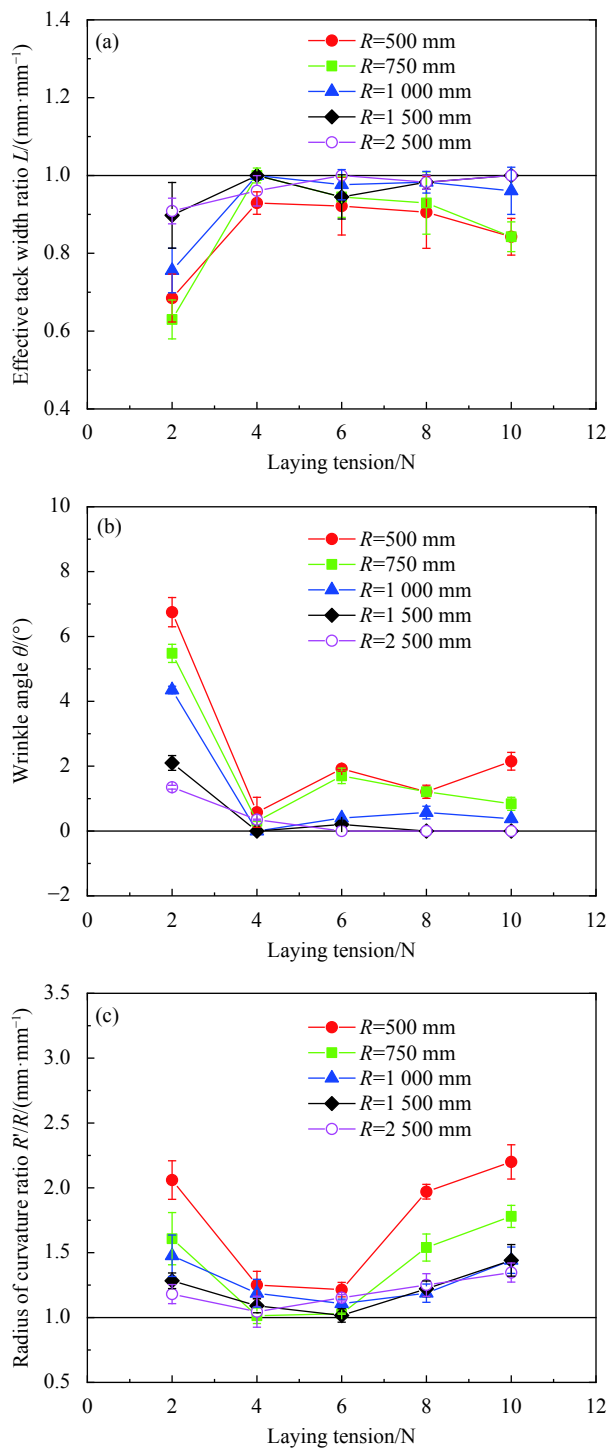


图 11 不同铺放张力下有效贴合长度比(a)、褶皱角度(b)与曲率半径比(c)测量曲线

Fig. 11 Effective tack width ratio (a), wrinkle angle (b) and radius of curvature ration (c) measurement curves at different curve trajectory placement tensions

际铺放路径难以与设定路径匹配。为进一步分析曲线铺贴过程中铺放张力对铺放路径的影响。图 13 为曲线铺贴时预浸料的受力分析示意图。其中，

$F$  为丝束张力； $F_r$  为张力的径向分力； $F_t$  为张力的切向分力； $F_f$  为压辊与预浸丝束间的摩擦力。

通过分析丝束受力状况可得出，铺放张力较小时，预浸料丝束松弛，无法与压辊紧密接触，导致预浸料与压辊间的摩擦力  $F_f$  不足，预浸丝束无法产生设定所需的侧向弯曲变形，从而导致曲线铺贴路径偏移。而当丝束张力过大时，张力的径向分力  $F_r$  大于贴合界面抗剪切力<sup>[30]</sup>，推动丝束产生向设定路径外侧的滑移，导致铺放曲率半径大于设定值，铺放准确性下降。

2.4 铺放速率对曲线铺贴的影响

2.4.1 不同铺放速率下曲线铺贴质量的表征

通过控制伺服电机转速改变曲线铺贴速率，完成不同铺放速率下的预浸丝束曲线铺贴。图 14 为铺放速率组曲线铺贴表征量曲线。

从图 14(a) 与图 14(b) 中可以发现，随着铺放速率的增加，曲线铺贴的有效贴合长度比  $L$  逐渐减小，铺放皱褶角度  $\theta$  逐渐增大，曲线铺贴质量逐渐降低。20 mm/s 的低速铺放可获得良好的铺放质量。铺放速率越大，预浸料丝束的贴合状况就越差，曲线铺贴产生的皱褶越明显。对比不同半径组曲线可观察到，随着设定铺放半径的增加，曲线铺贴质量逐渐提升，对曲线铺贴速率的变化越不敏感。

图 15(c) 为不同铺放速率下的曲率半径之比曲线。不同铺放半径下铺放的预浸料丝束，其曲率半径之比的波动规律截然不同，整体而言，曲率半径比值均可保持在 1~1.2 之间，这说明铺放速率对曲线铺贴的路径准确性的影响较小。此外，对比各组曲线可知，设定半径越大，铺贴半径越接近设定半径，铺贴的准确性越高。

2.4.2 铺放速率影响曲线铺贴质量的机制

在改变铺放速率的前提下完成剥离试件铺放后进行剥离试验，所得数据如表 6 所示。

随铺放速率增大，预浸料丝束的黏结力逐渐下降，造成这一趋势的原因是由于速率增加导致预浸料树脂与模具的接触时间减少，无法充分贴合。铺放速率的变化对预浸料的弯曲力无显著影响。

图 15 为不同铺放速率下曲线铺贴质量与黏结力的关系。可见，随预浸料与模具间的黏结力下降，有效贴合长度比  $L$  呈现下降的趋势，皱褶角度不断增大，曲线铺贴质量逐渐变差。不仅如此，当铺放速率大于 60 mm/s 时，会引起铺放起始段

表 5 铺放张力对 T700/7901 预浸料黏结力及弯曲刚度的影响

Table 5 Influence of laying tension on the tack and bending of T700/7901 prepreg

| Laying tension/N                                 | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    |
|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tack / $(\text{N} \cdot (20 \text{ mm})^{-1})$   | 1.747 | 2.114 | 2.294 | 2.351 | 2.408 |
| Tack CV/%                                        | 7.72  | 4.85  | 5.44  | 8.85  | 9.58  |
| Bending/ $(\text{N} \cdot (20 \text{ mm})^{-1})$ | 0.380 | 0.374 | 0.395 | 0.368 | 0.385 |
| Bending CV/%                                     | 4.53  | 9.80  | 3.48  | 7.56  | 5.16  |

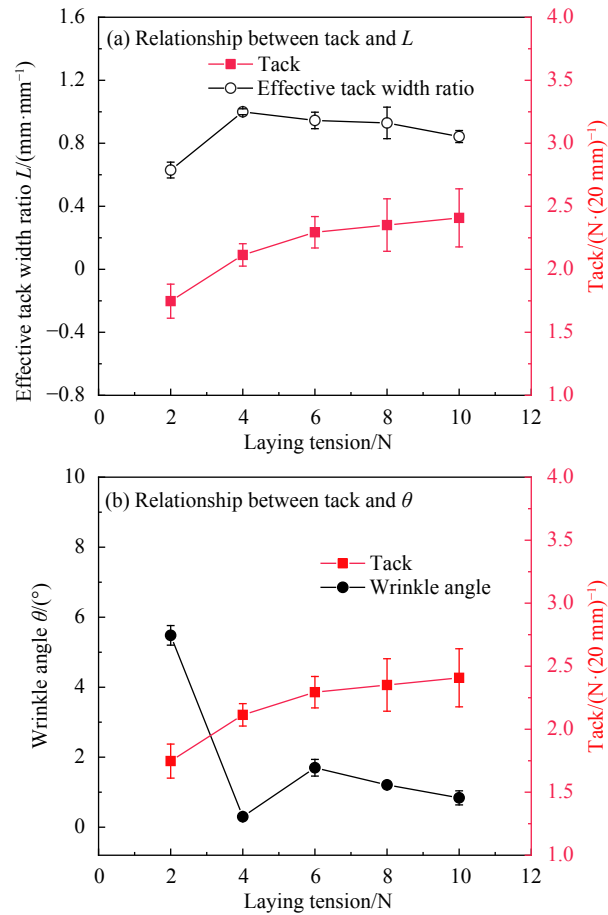


图 12 不同铺放张力下 T700/7901 预浸丝束有效贴合长度比、褶皱角度与黏结力关系

Fig. 12 Relationship between effective tack width ratio, wrinkle angle and tack of T700/7901 prepreg tow at different laying tensions

翘起的现象，铺放质量降低。

2.5 铺放参数的耦合影响分析

曲线铺贴由多个工艺参数之间的耦合作用控制铺放质量，因此在进行单因素铺贴试验分析的同时，使用四因素四水平正交试验探究曲线铺放工艺参数的显著水平，在揭示多工艺参数对铺放质量的影响规律的同时为单一参数的选择调控提供参考。曲线铺贴半径设置为 750 mm，实验结果及数据分析如表 7 与表 8 所示。

从表 7 数据可以发现，当铺放参数取值分别

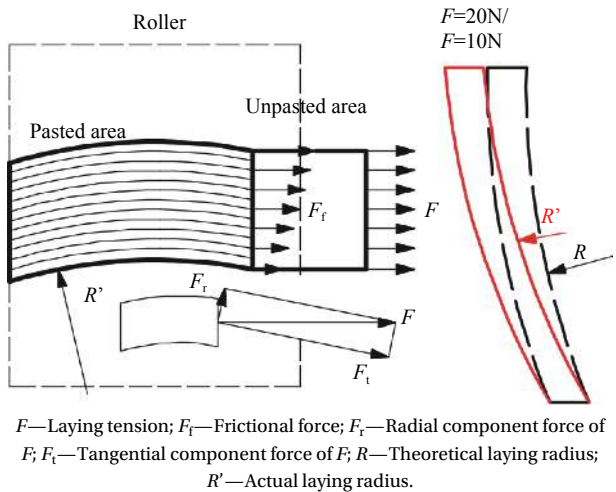


图 13 T700/7901 预浸料曲线铺贴受力示意图

Fig. 13 Schematic diagram of forces on the curve placement of T700/7901 prepreg

为：铺放温度 30℃，铺放压力 600 N，铺放速率 20 mm/s 及铺放张力 4 N 时，曲线铺贴的综合质量最高，这与单一铺放工艺参数研究的推荐取值相符。对比前述各工艺参数的推荐区间与表 7 结果可知：各铺放工艺参数对曲线铺贴质量的影响程度存在差异；良好的曲线铺放质量是各参数合理取值累加所得到的结果,在上述单一参数分析所得推荐区间内进行取值铺放，可有效保证曲线铺贴质量。

通过统计方法计算方差值，分析各参数对曲线铺放表征值的影响程度，根据计算结果可以得出：从表征曲线铺贴缺陷的有效贴合长度比及褶皱角度出发，铺放温度与铺放速率的显著水平较高，铺放压力和铺放张力的影响较小，影响曲线铺贴缺陷的主要因素为铺放温度与铺放速率。而从表征铺放准确性的曲率半径比出发，铺放温度及铺放张力的影响水平更显著。

结合单一参数的机制分析来看，铺放工艺参数对预浸丝束黏结力的影响越大，对曲线铺贴缺陷的显著水平越高，因此铺放温度与速率对曲线铺贴质量的影响更大。而铺放准确性更多的由丝束的侧向弯曲性能与受力状态决定，因此铺放温

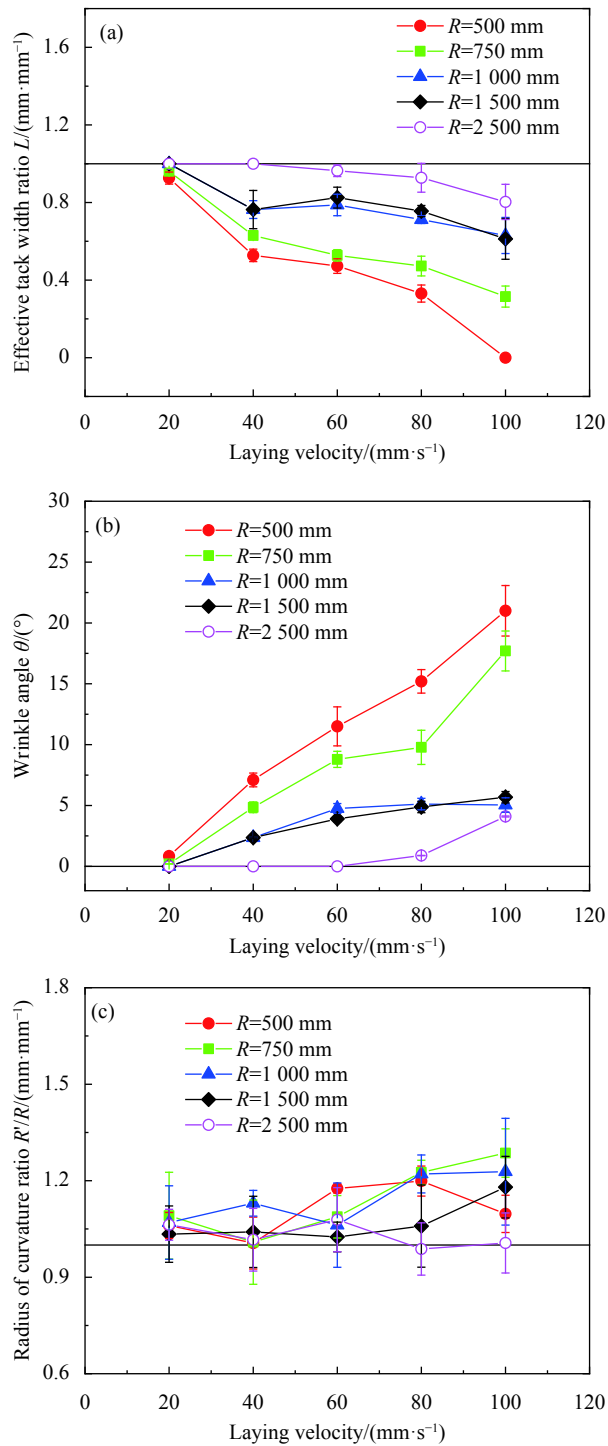


图 14 不同铺放速率下有效贴合长度比 (a)、褶皱角度 (b) 与曲率半径比 (c) 测量曲线

Fig. 14 Effective tack width ratio (a), wrinkle angle (b) and radius of curvature ratio (c) measurement curves at different curve trajectory placement velocities

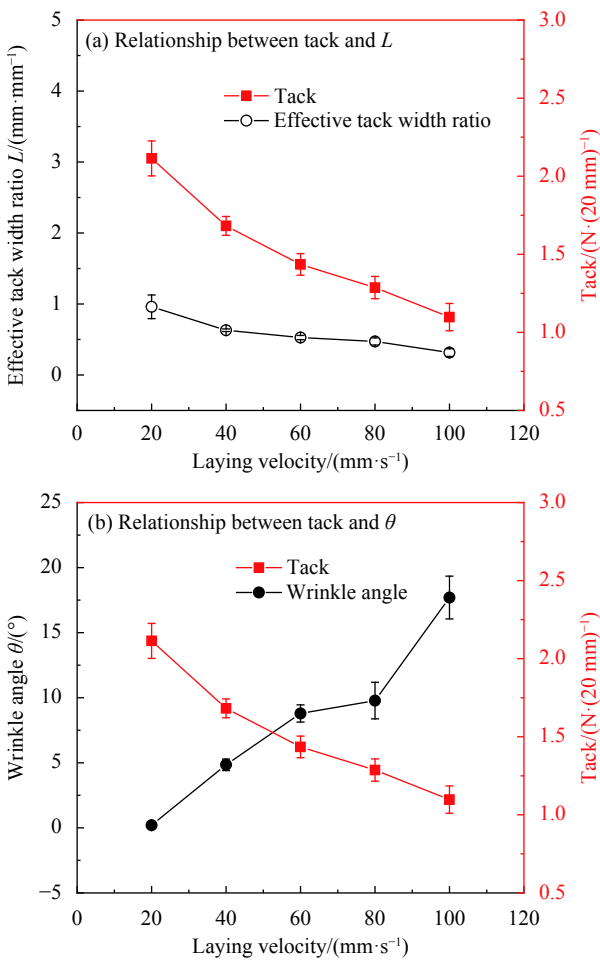


图 15 不同铺放速率下 T700/7901 预浸丝束有效贴合长度比、褶皱角度与黏结力关系

Fig. 15 Relationship between effective tack width ratio, wrinkle angle and tack of T700/7901 prepreg tow at different laying velocities

T700/7901 预浸丝束的黏结力、弯曲刚度及受力状况影响曲线铺贴质量：增大预浸丝束黏结力，可有效减少曲线铺贴缺陷；丝束弯曲刚度越低，受力状况越稳定，曲线铺贴的准确性越高。

(2) 铺放温度对曲线铺贴质量影响最显著。曲线铺贴的有效贴合长度比随铺放温度上升先增后减，褶皱角度先减后增，转折温度为 30℃，曲率半径比随温度升高趋近于 1，铺放准确性逐步提升；增大铺放压力，能够有效增大丝束黏结力，从而减少曲线铺贴缺陷的产生，然而过大的铺放压力易引起面内缺陷，降低曲线铺贴质量。本文所用材料的铺放压力适宜区间为 600~800 N。

(3) 增大铺放速率，减小铺放张力，会减小预浸丝束黏结力，致使铺贴褶皱角度不断增大；铺放张力影响预浸丝束铺贴时的综合受力情况，过大或过小的铺放张力都会使曲线铺贴准确性下降。

3 结论

(1) 铺放工艺参数通过改变热固性复合材料

度与铺放张力的影响更显著。



表 6 铺放速率对 T700/7901 预浸料黏结力及弯曲刚度的影响

Table 6 Influence of laying velocity on the tack and bending stiffness of T700/7901 prepreg

| Laying velocity/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 20    | 40    | 60    | 80    | 100   |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tack/(N·(20 mm) <sup>-1</sup> )       | 2.114 | 1.682 | 1.435 | 1.287 | 1.098 |
| Tack CV/%                             | 4.85  | 3.57  | 4.84  | 5.52  | 7.94  |
| Bending/(N·(20 mm) <sup>-1</sup> )    | 0.374 | 0.385 | 0.368 | 0.378 | 0.395 |
| Bending CV/%                          | 9.80  | 3.52  | 3.44  | 6.53  | 8.19  |

表 7 曲线铺贴正交试验结果

Table 7 Orthogonal test results of curve trajectory placement

| Group | <i>T</i> /℃ | <i>P</i> / <i>N</i> | <i>V</i> /(mm·s <sup>-1</sup> ) | <i>F</i> / <i>N</i> | <i>L</i> | <i>θ</i> | <i>R</i> '/ <i>R</i> |
|-------|-------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|----------|----------|----------------------|
| 1     | 20          | 200                 | 20                              | 2                   | 0.31     | 9.46     | 2.91                 |
| 2     | 20          | 400                 | 40                              | 4                   | 0.24     | 10.59    | 2.23                 |
| 3     | 20          | 600                 | 60                              | 6                   | 0        | 12.85    | 2.58                 |
| 4     | 20          | 800                 | 80                              | 8                   | 0        | 11.31    | 3.24                 |
| 5     | 25          | 200                 | 40                              | 6                   | 0.53     | 9.53     | 1.33                 |
| 6     | 25          | 400                 | 20                              | 8                   | 0.78     | 3.71     | 1.64                 |
| 7     | 25          | 600                 | 80                              | 2                   | 0.31     | 14.73    | 1.88                 |
| 8     | 25          | 800                 | 60                              | 4                   | 0.43     | 10.35    | 1.15                 |
| 9     | 30          | 200                 | 60                              | 8                   | 0.75     | 8.54     | 1.53                 |
| 10    | 30          | 400                 | 80                              | 6                   | 0.42     | 10.9     | 1.12                 |
| 11    | 30          | 600                 | 20                              | 4                   | 1        | 0        | 1.04                 |
| 12    | 30          | 800                 | 40                              | 2                   | 0.84     | 4.21     | 1.20                 |
| 13    | 35          | 200                 | 80                              | 4                   | 0.25     | 10.84    | 1.02                 |
| 14    | 35          | 400                 | 60                              | 2                   | 0.61     | 9.04     | 1.52                 |
| 15    | 35          | 600                 | 40                              | 8                   | 0.71     | 5.34     | 1.67                 |
| 16    | 35          | 800                 | 20                              | 6                   | 0.98     | 2.38     | 1.08                 |

表 8 曲线铺贴正交试验结果分析

Table 8 Analysis of curve trajectory placement orthogonal test results

| Attribute            | Statistics            | <i>T</i> /℃                               | <i>P</i> / <i>N</i> | <i>V</i> /(mm·s <sup>-1</sup> ) | <i>F</i> / <i>N</i> |
|----------------------|-----------------------|-------------------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
| <i>L</i>             | <i>s</i> <sup>2</sup> | 0.27                                      | 0.04                | 0.23                            | 0.038               |
| <i>θ</i>             |                       | 2.37                                      | 1.04                | 3.52                            | 0.98                |
| <i>R</i> '/ <i>R</i> |                       | 0.71                                      | 0.03                | 0.08                            | 0.31                |
| <i>L</i>             | Significance level    | <i>T</i> > <i>V</i> > <i>P</i> > <i>F</i> |                     |                                 |                     |
| <i>θ</i>             |                       | <i>V</i> > <i>T</i> > <i>P</i> > <i>F</i> |                     |                                 |                     |
| <i>R</i> '/ <i>R</i> |                       | <i>T</i> > <i>F</i> > <i>V</i> > <i>P</i> |                     |                                 |                     |

Note: *s*<sup>2</sup>—Statistical variance.

针对本文试验材料，其适宜铺放速率为 20 mm/s，适宜铺放张力区间为 4~6 N。

(4) 预浸料曲线铺贴过程中，曲率半径越小，曲线铺贴质量对铺放工艺参数的变化越敏感。为保证小半径曲线铺贴质量，铺放工艺参数需要进行更严格的控制。

参考文献：

[1] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.  
MA L M, ZHANG J Z, YUE G Q, et al. Application of compo-  
sites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Ma-

teriae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322(in  
Chinese).  
[2] 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(1): 50-53.  
XIAO J, LI Y, LI J L. Automated placement technology ap-  
plication on large airplane composite component manu-  
facture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,  
2008(1): 50-53(in Chinese).  
[3] KROLEWSKI S, GUTOWSKI T. Effect of the automation of  
advanced composite fabrication process on part cost[J].  
Cell Biochemistry & Function, 1986, 25(5): 591-596.  
[4] HYER M W, CHARETTE R F. Use of curvilinear fiber format  
in composite structure design[J]. AIAA Journal, 1991,

- 29(6): 1011-1015.
- [5] LOPES C S, GÜRDAL Z, CAMANHO P P. Variable-stiffness composite panels: Buckling and first-ply failure improvements over straight-fibre laminates[J]. [Computers and Structures](#), 2008, 86: 897-907.
- [6] GÜRDAL Z, OLMEDO R. In-plane response of laminates with spatially varying fiber orientations-Variable stiffness concept[J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(4): 751-758.
- [7] 卫宇璇, 张明, 刘佳, 等. 基于自动铺放技术的高精度变刚度复合材料层合板屈曲性能[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(11): 2807-2815.
- WEI Y X, ZHANG M, LIU J, et al. Buckling performance of high-precision variable stiffness composites laminate based on automatic placement technology[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(11): 2807-2815(in Chinese).
- [8] RIBEIRO P. Non-linear modes of vibration of thin cylindrical shells in composite laminates with curvilinear fibres[J]. [Composite Structures](#), 2015, 122: 184-197.
- [9] 李俊斐, 王显峰, 肖军. 开孔曲面自动铺放轨迹规划算法研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(7): 1716-1723.
- LI J F, WANG X F, XIAO J. Research on trajectory planning method of automated tape laying and automated fiber placement for surface with holes[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(7): 1716-1723(in Chinese).
- [10] 朱伟东, 张笑, 齐德胜, 等. 变刚度复合材料开孔板拉伸行为数值模拟及试验验证[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(3): 599-606.
- ZHU W D, ZHANG X, QI D S, et al. Numerical simulation and experiment validation of variable stiffness composite laminates with open holes under unidirectional tension[J]. *Acta Materialiae Composite Sinica*, 2018, 35(3): 599-606(in Chinese).
- [11] LOPES C S, GURDAL Z, CAMANHO P P. Tailoring for strength of composite steered-fibre panels with cutouts[J]. [Composites: Part A](#), 2010, 41: 1760-1767.
- [12] BAKHSHI N, HOJJATI M. An experimental and simulative study on the defects appeared during tow steering in automated fiber placement[J]. [Composites: Part A](#), 2018, 113: 122-131.
- [13] OROMIEHIE E, PRUSTY B G, COMPSTON P. Automated fibre placement based composite structures: Review on the defects, impacts and inspections techniques[J]. *Composites Structures*, 2019, 224: 1-14.
- [14] SHAMS S S, ELHAJJAR R F. Investigation into the effects of fiber waviness in standard notched composite specimens[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2015, 6(4): 541-555.
- [15] KASHTALYAN M. Application of the boundary shape perturbation method to stress analysis of laminated composites with ply waviness[J]. [Composites Part A: Applied Science and Manufacturing](#), 2005, 36: 137-143.
- [16] MUKHOPADHYAY S, JONES M I, HALLETT S R. Compressive failure of laminates containing an embedded wrinkle: Experimental and numerical study[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 73: 132-142.
- [17] LUKASZEWICZ D H, WARDC, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future[J]. [Composites Part B: Engineering](#), 2012, 43(3): 997-1009.
- [18] RAJAN S, SUTTON M A, WEHBE R, et al. Experimental investigation of prepreg slit tape wrinkling during automated fiber placement process using stereoDIC[J]. [Composites Part B: Engineering](#), 2019, 160: 546-557.
- [19] 黄新杰, 肖军, 赵聪, 等. 工艺参数对平面曲线铺放过程丝束铺放效果的影响[J]. *玻璃纤维*, 2016, 1: 13-18.
- HUANG X J, XIAO J, ZHAO C, et al. The influence of process parameters on result of towpreg during the curve trajectory placement on the plane[J]. *Fiber glass*, 2016, 1: 13-18(in Chinese).
- [20] BUDELMANN D, DETAMPEL H, SCHMIDT C, et al. Interaction of process parameters and material properties with regard to prepreg tack in automated lay-up and draping processes[J]. [Composites Part A: Applied Science and Manufacturing](#), 2019, 117: 308-316.
- [21] 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.
- [22] 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[J]. *航空学报*, 2014, 35(1): 317-322.
- LU N N, XIAO J, QI J W, et al. Experimental research on prepreg dynamic tack based on automated placement process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 317-322(in Chinese).
- [23] 方宜武, 王显峰, 顾善群, 等. 自动铺丝过程中预浸料的侧向弯曲[J]. *材料工程*, 2015, 43(4): 47-52.
- FANG Y W, WANG X F, GU S Q, et al. Lateral bending of prepreg during automated fiber placement[J]. [Journal of Materials Engineering](#), 2015, 43(4): 47-52(in Chinese).
- [24] 谢林杉, 陈浩然, 王浩宇. 面向复杂回转体T700级碳纤维/双马树脂材料铺放适应性[J]. *航空学报*, 2020, 41(4): 423279.
- XIE L S, CHEN H R, WANG H Y. Placement suitability of T700 carbon fiber/bismaleimide resin prepreg for complex rotary bodies in AFP[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(4): 423279(in Chinese).
- [25] 张洋, 钟翔屿, 包建文. 先进树脂基复合材料自动丝束铺放技术研究现状及发展方向[J]. *航空制造技术*, 2013, 443(23-24): 131-140.

ZHANG Y, ZHONG X Y, BAO J W. Research status and future trend of automated fiber placement technology for advanced polymer matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 443(23-24): 131-140(in Chinese).

[26] ZHANG P, SUN R L, ZHAO X Y, et al. Placement suitability criteria of composite tape for mould surface in automated tape placement[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(5): 1574-1581.

[27] 周煦洁, 肖军, 李勇, 等. 面向高速铺放预浸料层间粘结性能研究[J]. *航空科学技术*, 2016, 27(11): 12-18.

ZHOU X J, XIAO J, LI Y, et al. Experimental research on prepreg tack between layers based on highvelocity automated placement process[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27(11): 12-18(in Chinese).

[28] 黄文宗, 孙容磊, 张鹏, 等. 预浸料的铺放适宜性评价(二)铺覆性篇[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013, 8(8): 3-7.

HUANG W Z, SUN R L, ZHANG P, et al. Assessment for placement suitability of prepreg-part of drape[J]. *Fiber Reinforced Plastic/Composite*, 2013, 8(8): 3-7(in Chinese).

[29] 舒展, 彭啸, 李发飞, 等. 基于探针试验的预浸料黏性内聚力模型[J]. *航空学报*, 2018, 39(2): 421416.

SHU Z, PENG X, LI F F, et al. Cohesive zone model for prepreg tack based on probe test[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(2): 421416(in Chinese).

[30] 赵聪, 肖军, 王显峰, 等. 丝束张力对自动铺丝成型工艺的影响[J]. *航空学报*, 2016, 37(4): 1384-1392.

ZHAO C, XIAO J, WANG X F, et al. Effect of tows tension on automated fiber placement process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(4): 1384-1392(in Chinese).