

自动铺丝用预浸窄带的质量分析及其影响因素

李敏 王奇丹 顾轶卓 王绍凯 崔影 李庆辉 张佐光

Quality analysis of prepreg tow for automated fiber placement and its influencing factors

LI Min, WANG Qidan, GU Yizhuo, WANG Shaokai, CUI Ying, LI Qinghui, ZHANG Zuoguang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220908.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铺放工艺参数对预浸料丝束曲线铺贴质量的影响

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

复合材料学报. 2021, 38(6): 1795–1808 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200826.004>

热塑性复合材料自动铺放工艺参数分析与优化

Analysis and optimization of the processing parameters for automated fiber placement of thermoplastic composites

复合材料学报. 2018, 35(5): 1149–1157 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170712.003>

复合材料自动铺丝工艺参数对应力波传播特征的作用机制

Mechanism of effect of processing parameters on stress wave propagation characteristics during automated fiber placement

复合材料学报. 2019, 36(5): 1200–1209 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180713.001>

自动铺放工艺制备罐外固化复合材料的力学行为

Mechanical performance of out-of-autoclave composites manufactured by automated fiber placement

复合材料学报. 2018, 35(5): 1095–1104 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170706.002>

液体垫片对复合材料单搭接螺栓接头力学性能的影响

Influences of the liquid shim on the mechanical properties of single-lap composite bolted joint

复合材料学报. 2018, 35(1): 50–60 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170412.004>

铺层顺序对预成型体搭接复合材料拉伸性能影响的仿真与验证

Simulation analysis and verification of the effect of stacking sequence on tensile properties of preform laminated composites

复合材料学报. 2018, 35(10): 2745–2752 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180115.007>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220908.001

自动铺丝用预浸窄带的质量分析
及其影响因素



分享本文

李敏^{*1}, 王奇丹¹, 顾轶卓², 王绍凯¹, 崔影¹, 李庆辉¹, 张佐光¹

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院, 北京 100191)

摘要: 近年来随着自动铺丝技术的快速发展和应用, 对预浸窄带的需求量增加, 但国内研究人员对有关预浸窄带质量的评价体系和分析方法尚未形成统一共识。本文采用多种方法对预浸窄带的质量进行了全面分析。通过图像法及称重法分析发现, 国产窄带的宽度均匀性、接头处纤维平齐度、边缘断丝情况等分切质量均控制较好。研究了间歇式热压工艺和连续式辊压工艺对窄带接头质量的影响, 通过拉剪强度和剥离强度分析发现, 压接工艺温度和时间是影响其力学的关键因素, 对比而言辊压工艺制得的接头性能较热压工艺具有更好的稳定性。同时, 接头性能也受测试环境影响, 其中环境湿度的作用大于温度。随着室温储存时间延长, 窄带接头的力学性能先上升后下降, 通过差热分析和红外光谱分析发现, 这与界面处树脂的化学反应和固化程度增长密切相关。最后, 对接头反复过辊后的疲劳损伤分析表明, 接头处的拉剪强度随过辊温度、张力及圈数增加而下降。

关键词: 自动铺丝; 预浸料分切窄带; 搭接接头; 力学性能; 理化性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)09-4420-11

Quality analysis of prepreg tow for automated fiber placement and its influencing factors

LI Min^{*1}, WANG Qidan¹, GU Yizhuo², WANG Shaokai¹, CUI Ying¹, LI Qinghui¹, ZHANG Zuoguang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development and application of automated fiber placement (AFP), the demand for prepreg tow has increased considerably. However, no consensus has been achieved on the evaluation system including the analysis method of the quality of prepreg tows in domestic. In this paper, the quality of prepreg slitting tows had been comprehensively analyzed by systematic methods. It was found that the slitting qualities of the domestic prepreg tows, including the width uniformity, the paralleling degree of fibers at the joint and the fiber fracture at the edge were all well controlled by using image and weight analysis. Effect of preparation methods, namely discontinuous hot-press process and continuous rolling process, on the quality of tow joint was investigated through the tensile-shear strength and peeling force testing. The results show that the process temperature and the time of duration are the key factors. In contrast, the joints made by continuous rolling process have more stable mechanical properties than those prepared by hot-press process. Meanwhile, the joint performance is impacted by the environmental conditions, wherein the humidity has more significant influence than the test temperature. With the prolongation of storage at room temperature, the mechanical properties of the joints first increased and then decreased. The DSC and IR characterization indicates that the property changes relate closely to chemical reactions and increasing curing degree of the resin matrix at the interface. The fatigue performance of the joint was tested by repeated roller passing and subsequent damage analysis. It reveals that the tensile-shear

收稿日期: 2022-06-09; 修回日期: 2022-08-22; 录用日期: 2022-09-05; 网络首发时间: 2022-09-08 17:09:20

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220908.001>

基金项目: 民用飞机专项科研 (MJ-2019-F-01)

通信作者: 李敏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进树脂基复合材料 E-mail: leemy@buaa.edu.cn

引用格式: 李敏, 王奇丹, 顾轶卓, 等. 自动铺丝用预浸窄带的质量分析及其影响因素 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4420-4430.

LI Min, WANG Qidan, GU Yizhuo, et al. Quality analysis of prepreg tow for automated fiber placement and its influencing factors[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4420-4430(in Chinese).

strengths of the fatigued joints decrease with increasing roller temperature, higher tension and more turns.

Keywords: automated fiber placement; prepreg slitting tows; lap joint; mechanical properties; physical-chemical properties

自动铺丝 (Automated fiber placement, AFP) 技术是由铺放头将数根预浸料丝束或是干纤维集束成一条宽度可变的料带, 并利用柔性压辊和辅助加热装置, 将其铺放到模具表面, 实现加热压实定型的一种复合材料自动化成型技术。AFP 采用宽度为 3.2~12.7 mm 的预浸料丝束 (亦称预浸窄带) 为原材料^[1], 可同时铺放凹型面、凸型面等不规则外形, 并实时增减预浸窄带数量, 满足复合材料制件的局部开口、区域补强、自适应边界等具体铺放要求^[2]。与自动铺带 (ATL) 技术相比, AFP 的铺放轨迹自由度更大, 可连续变角度铺放, 在变曲率复杂型面构件的自动化制造方面优势显著, 产品质量更高, 成本更低。同时 AFP 的废料率 (3%~8%) 更低, 辅助材料消耗量更少, 工人的劳动强度大幅降低, 因此近年来得到了快速发展。

AFP 用预浸窄带的制备方法主要有直接熔融法和分切法。其中, 直接熔融法是将干态纤维丝束或窄带织物直接浸渍熔融树脂, 并通过整型制备而成。该方法对设备要求不高, 可以很方便地获得连续的预浸窄带, 但是难以对其树脂含量和丝束宽度进行精确控制, 波动较大, 且相邻预浸窄带间易产生搭接或间隙, 不利于制备高质量的复合材料构件^[3-6]。分切法是指在传统预浸料的基础上, 对宽幅预浸料进行精确分切的一种制备方法。该方法可精确控制其中的树脂含量和窄带宽度, 但分切时很难做到分切刀片与纤维纵向的完全平行, 可能引起预浸窄带产生毛边或断丝缺陷, 这种方法对分切和复绕设备都提出了较高要求^[7]。从国内外的研究成果和应用状况来看, 熔融法制备的预浸窄带主要用于预浸/缠绕成型工艺技术^[8], 很少应用于 AFP。分切窄带能够更好地控制含胶量和精度, 更适用于 AFP 工艺, 但其分切质量是影响 AFP 成型制件质量的关键因素之一^[9-11]。

预浸料分切后窄带的宽度精度及边缘质量是影响其质量的重要因素, 这是由于分切会造成窄带的宽度波动, 若宽度精度小, 会引起间隙、重叠等问题, 从而影响制件质量。同时分切过程中, 由于机架产生机械振动、走纱路径较长、施加的张力不稳定等因素, 会造成预浸料在分切时发生偏移, 导致部分纤维不能保证完全平行^[12], 进而

造成纤维损伤, 导致分切后窄带边缘不齐、断丝较多。断丝会在 AFP 设备上出现缠辊现象, 对设备造成损害。若断丝过于细碎, 会在铺丝头处聚集形成纤维团, 造成导丝槽堵塞或是被拖至制件表面, 影响制件成型质量^[13]。由于 AFP 工艺对预浸窄带的宽度和边缘质量要求较高, 需研究预浸料分切的最佳工艺参数, 并对窄带的分切质量进行有效评测。

一般情况下, 完成一个 AFP 复合材料制件需要的预浸料长度通常超过 1 000 m, 为提高铺丝效率, 减少由于更换料轴所消耗的时间, 需要对预浸料进行续接^[14]。在初期应用中预浸料的续接主要依靠传统的手工缝合方法, 而手工流程存在许多缺点, 如产品搭接头的均匀性差、产生的针孔会导致应力集中等, 对产品性能不利^[15-16]。严飙等^[17]设计了一套预浸带自动快速热压接系统, 分析了时间、温度及搭接长度对预浸带续接处的拉伸剪切强度的影响。Shi 等^[18]提出了一种预浸胶带热压拼接技术, 并设计了配套的装置及控制系统, 研究了热压续接过程参数 (温度、压力、时间) 对接头质量的影响。上述制备工艺利用预浸料自身树脂的黏性, 通过对搭接处加热加压以续接预浸料, 提高了成型效率, 使搭接头处具有均一性和稳定性^[19]。

为了获得高质量的 AFP 制件, 预浸窄带需要具备独特的物理特性, 主要包括预浸窄带的宽度精确度、树脂含量的控制精度、适宜的黏性、刚性及卷筒窄带长度等。其中宽度精度的控制主要是指预浸窄带的宽度尺寸与铺放设备相匹配, 既保证铺放工艺中预浸窄带有效通过, 又能避免铺放窄带间出现搭接或间隙过大等问题。树脂含量的控制精度对预浸窄带的树脂浸透性提出了更高要求, 为防止窄带在分切过程中产生断丝、毛边等缺陷, 其母料预浸料必须浸透性良好, 避免出现干纱。此外, AFP 用预浸窄带还需要同时具备良好的黏性和刚性, 如为了适应自动化输送的需求, 在纱箱和铺丝头压辊之间运行时应保持高刚性, 当预浸窄带输送到铺丝头压辊下时, 在铺丝头前端加热系统的作用下黏性应迅速提升到较高水平, 以便实现铺层间的有效压实。

黄晓川等^[20]探究分析了分切宽度精度、搭接头强度及分切窄带边缘损伤等情况的影响。由于预浸窄带在应用过程中会受到铺丝头的加热加压作用,有大量针对窄带黏性的研究^[21-23],但是对窄带其他性能的研究报道较少。目前正值预浸窄带国产化的关键阶段,针对国产预浸窄带分切质量和性能的系统研究,可为我国 AFP 技术体系的发展提供重要参考。

本文通过多种表征方法,系统测试评价了预浸窄带的分切质量和窄带接头的续接质量。其中通过图像法和称量法表征了窄带宽度、接头纤维平齐度和边缘断丝程度。通过拉剪试验和剥离试验测试了窄带接头的力学性能,并对比分析了间歇式热压工艺和连续式辊压工艺两种方法不同条件所制的接头质量,为工艺条件优化提供参考。在此基础上,测试分析了接头力学性能随环境温湿度、室温存放时间等的变化规律,结合断口显微分析、DSC 及红外光谱等,对其微观结构和变化进行了深入分析。最后对接头的过辊疲劳性能进行探索研究,测试了温度、张力、圈数等疲劳

条件对接头疲劳损伤和拉剪性能保留率的影响。研究结果对预浸窄带质量的系统科学评价和工艺优化具有一定指导意义。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

研究所用的材料为中航复材(北京)科技有限公司生产的国产 T800 级碳纤维/环氧树脂预浸窄带,其分切宽度为 6.40 mm,单层平均厚度为 0.24 mm。

1.2 窄带接头制备方法

实验所用预浸窄带接头是采用如图 1(a)所示的间歇式热压工艺和连续式辊压工艺两种方法制备而成。其中,间歇式热压工艺是将分切后的窄带试样放入固定模具中,然后整体放入压机,通过压机压力与温度压制而成。

连续式辊压工艺是将预浸料的一端放入两个加热辊之间,通过辊的转动带动料带前进,并对试样施加温度和压力,具体由中航复材(北京)科技有限公司制备。相关工艺条件如表 1 所示。

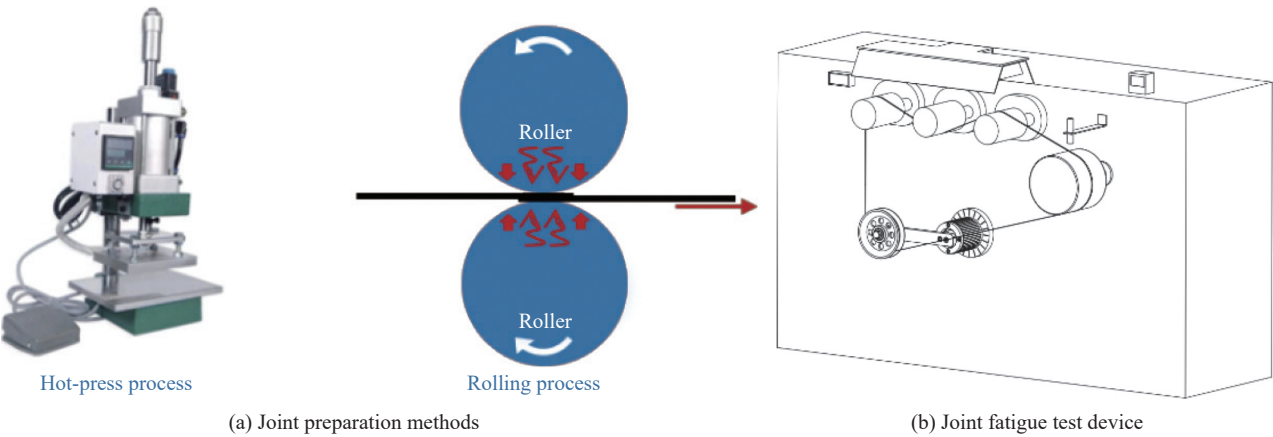


图 1 窄带接头制备方法 (a) 和接头疲劳性能测试装置示意图 (b)
Fig. 1 Schematic diagram of joint preparation methods (a) and joint fatigue test device (b)

表 1 不同接头制备工艺的工艺参数设置

Table 1 List of different parameters from different methods for the fabrication of prepreg joint

Process	Group set	Time/min	Temperature/℃	Pressure/MPa
Hot-press process	Constant temperature and pressure	1, 2, 3, 4, 5	70	0.6
	Constant time and pressure	2	50, 60, 70, 80, 90	0.6
	Constant time and temperature	2	70	0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8
Rolling process	Constant temperature and pressure	2,5	70	0.6
	Constant time and pressure	2	50, 60, 70, 80, 90	0.6
	Constant time and temperature	2	70	0.4, 0.5, 0.6

1.3 窄带形貌表征方法

预浸窄带的表面质量、分切宽度、边缘形貌及接头两端的纤维平齐度(即偏转角)均采用日本基恩士公司的 VHX-6000 超景深三维显微系统,放大 200 倍进行观察。

窄带宽度可通过直接测量方法测试得到,但考虑到分切边缘的波纹度和边缘纤维切断情况,推荐采用对一段试样测试平均宽度方法,即使用面积法间接计算窄带的宽度。为统计试样的离散情况,同一窄带试样中每隔 10 m 取一段长 10 cm 的样品,共取 6 组试样进行测试。将得到的六组子样的真实宽度求平均值,即为该批次样品的宽度。面积法计算公式及修正公式如下:

$$b = \frac{S}{l} \tag{1}$$

其中: b 为面积法选区矩形宽度 (mm); S 为面积法选区矩形面积 (mm²), l 为矩形区域长度 (mm)。

$$d = b - \frac{h_1 + h_2}{2} \tag{2}$$

其中: d 为窄带计算宽度 (mm); h_1 、 h_2 分别为窄带上下边缘因分切导致的松散结构波峰高点与波峰低点之间的垂直距离 (mm)。

纤维平齐度的取样方法如下: 每一组接头取 6 个试样, 且每个试样均拍摄正反面的照片, 每张照片需在搭接上下层随机各取 20 根纤维, 测量其偏转角, 求平均值, 记为该试样的纤维偏转角。

为对比预浸窄带在分切工艺条件下边缘的起毛情况, 实验采取半定量的测试方法以表征窄带边缘的起毛量。取长度为 30 cm 的试样作为测试对象, 用夹子夹持两端固定在玻璃皿上; 倒入二氯甲烷洗涤预浸窄带, 拍摄边缘断丝在溶剂中漂浮的状态, 并收集洗下来的断丝, 将窄带边缘漂浮但未脱离窄带进入溶剂的断丝取 1 cm 剪下, 用

滤网收集断丝; 重复洗纤维带 3 次, 直至溶液澄清; 将每次洗涤下的断丝用滤网收集, 烘干并称重断丝 m_1 (mg) 和剩余纤维束 m_2 (mg), 计算断丝量占比纤维束的质量百分比, 即为预浸窄带断丝量 $W(\%)$:

$$W = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\% \tag{3}$$

使用超景深拍摄洗涤完全后的纤维丝束, 检验确认纤维表面树脂完全洗净。取 6 个子样作重复组, 求其平均值, 即为该组样品的断丝含量。

采用 Mettler Toledo 公司 DSC-1 差示扫描量热仪进行 DSC 测试。在接头处取约 10 mg 样品, 测试温度区间为 -30~300℃, 升温速率为 10 K/min, 在 N₂ 气氛下进行测试。采用 Nicolet iS50 型 FTIR 进行红外测试, 将待测预浸料上的树脂涂覆于 KBr 薄片, 在 4 000~400 cm⁻¹ 范围内收集红外光谱, 分辨率为 4 cm⁻¹。

1.4 接头力学测试

对于预浸窄带接头, 采用拉剪和剥离试验来测试其力学性能, 试验在美国英特斯的 INSTRON 3344 电子万能材料试验机上进行。

窄带接头的拉剪性能参照标准 ASTM D3165^[24] 进行测试。其试样形式如图 2(a) 所示, 其中搭接处的长度按照设计可调节(一般为 2~6 cm), 两侧夹持段的试样长度为 20 cm。测试记录最大拉伸破坏载荷, 计算得到接头处的拉剪强度。

窄带剥离性能参照标准 ASTM D1876^[25] 和 ASTM F2256^[26] 进行测试。其试样形式如图 2(b) 所示, 其中搭接头长度为 6 cm, 夹持段的试样长度为 20 cm。测试过程记录载荷-位移曲线, 取载荷-位移曲线中的平稳段的载荷取平均值, 计算得到其平均剥离力, 进而得到窄带接头的剥离强度。

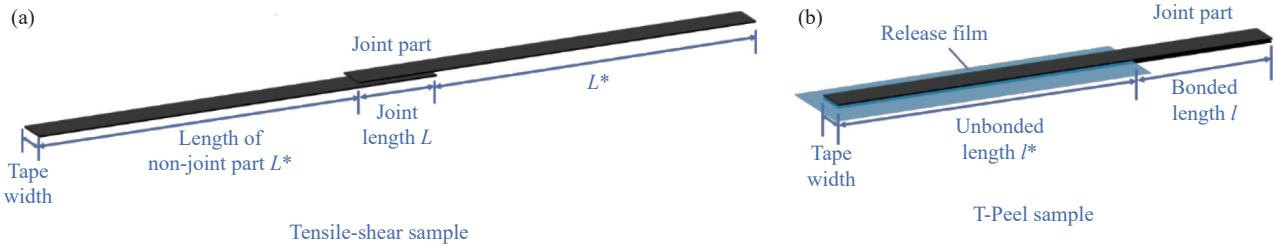


图 2 窄带拉剪试样 (a) 和 T 型剥离试样 (b) 的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the tensile-shear joint sample (a) and the t-peel joint sample (b)

1.5 窄带接头疲劳特性测试

本文设计制作了用于接头疲劳性能测试的设

备, 模拟 AFP 工艺中预浸窄带的走纱形式, 如图 1(b) 所示。将带有接头的样品裁切取样, 首尾压接成

为闭环，压接处力学强度高于接头强度。启动设备，待试样过辊一定圈数后，观察分析接头处的损伤情况，并测试其拉剪强度。

2 结果与讨论

2.1 预浸窄带的分切质量及其影响因素

首先，通过分切后预浸料样品的形貌分析窄带宽度、边缘纤维切断情况等，由此对不同的预浸料分切工艺条件进行评价和优化。如图 3(a) 所示，可以通过直接测量窄带宽度或使用面积法间接计算窄带局部的平均宽度。图 4(a) 给出了国产预浸窄带的宽度测试数据分布图，宽度测试的结果为 (6.41 ± 0.09) mm，可以看出样品的宽度数值离散度较小，均在目标宽度 6.40 mm 左右。特别值得注意的是，经过分切工艺优化后，国产预浸窄带的宽度稳定性得到进一步提高。

对分切法制备的预浸窄带，其边缘纤维被切断是较难避免的事情，如图 3(c)、图 3(d) 所示，国产预浸窄带的边缘偶有断丝情况。为了分析不同分切工艺条件下窄带边缘的断丝情况，特将其断丝剪下，并进行称量，分析断丝质量的占比，进而可以对窄带分切工艺参数进行优化分析。由

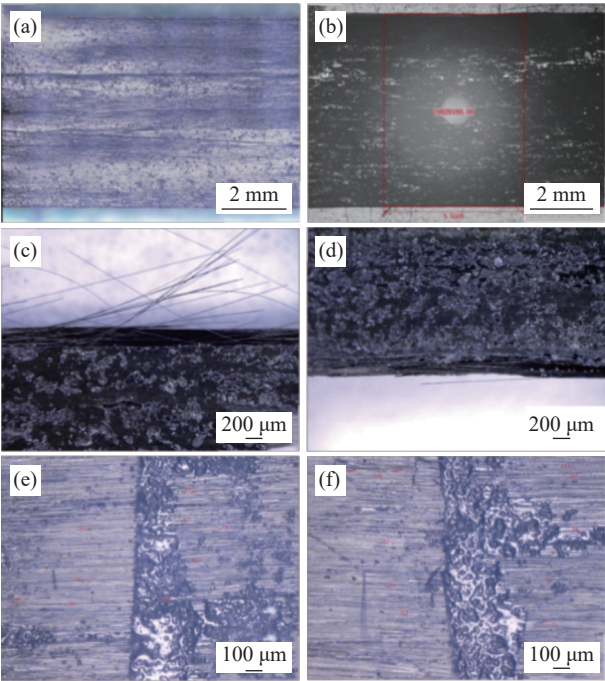


图 3 窄带分切质量的超景深显微图像：((a), (b)) 窄带宽度；((c), (d)) 边缘切断情况；((e), (f)) 接头处纤维偏转角

Fig. 3 Ultra depth of field microscopic images for characterizing the prepreg slitting quality: ((a), (b)) Width analysis of the prepreg tow; ((c), (d)) Fracture fibers at the tow edge; ((e), (f)) Deflection angles between fibers at the joints

图 4(c) 可以发现，采用最苛刻的剪丝方法得到的窄带断丝率测试单值均低于 0.5%。并且由图 4(d) 不同工艺参数形成的断丝率对比，包括衬膜、分切张力、分切速率、刀深。可以发现，工艺中分切速率变化对断丝量的影响较为敏感，衬膜和分切张力的影响其次，刀深的影响最不敏感。

为了提高 AFP 工艺制备复合材料制件的工作效率，减少更换丝轴所消耗的时间，预浸窄带需通过头尾搭接的方式增加其连续长度。但搭接处两端预浸料中纤维的取向角是否保持一致，即接头处纤维平齐度，是分切工艺质量评价中关注的另一个方面。图 3(e)、图 3(f) 给出了在国产预浸窄带搭接处正反面测试纤维偏转角的超景深图像，从中可以看出纤维方向的一致性很好。其中可以观察到个别取向紊乱的纤维，应该是制样过程中为充分裸露纤维，对表面树脂进行溶解处理时造成的。典型不同拼接工艺制备的窄带接头纤维偏转角样本数据如图 4(b) 所示，可见接头两端纤维间的夹角均较小，全样本中单根纤维间的夹角绝对值基本不超过 5°，包括了制样过程可能引入的影响。实际上，按照图 4(b) 所示测试单值对同一样本进行统计分析发现，接头两侧纤维的取向角平均值不超过 2.20°。

2.2 制备工艺对接头力学性能的影响

采用拉伸剪切和剥离性能表征窄带接头的力学特性，通过对比间歇式热压工艺和连续式辊压工艺，考察了不同制备工艺条件对其接头力学性能的影响规律。

2.2.1 间歇式热压工艺条件的影响

采用热压制备方法考察了温度、压力和时间对预浸窄带接头力学性能的影响，其结果如图 5 所示。为了方便对比接头制备工艺条件对其性能影响的敏感性，以对标试样的拉剪强度 6.06 MPa 和剥离强度 $969\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 为参照，对不同条件下实验获得的窄带接头力学性能进行归一化处理 and 讨论。由图 5(a) 可知，随着热压温度升高，窄带接头的拉剪强度显著增大，在 90℃ 条件下制备的接头拉剪强度是 50℃ 条件的 2.4 倍。这与树脂的流动性变化密切相关，较高温度下，树脂分子的热运动能力提升，对上下层窄带间的粘接作用提升。但是，过高的温度历程容易引发树脂的化学反应，进而对预浸料的柔韧性、黏性和铺覆性产生负面影响，严重时甚至会导致窄带接头变硬。压力对接头拉剪强度的影响也比较显著，但相比温度作

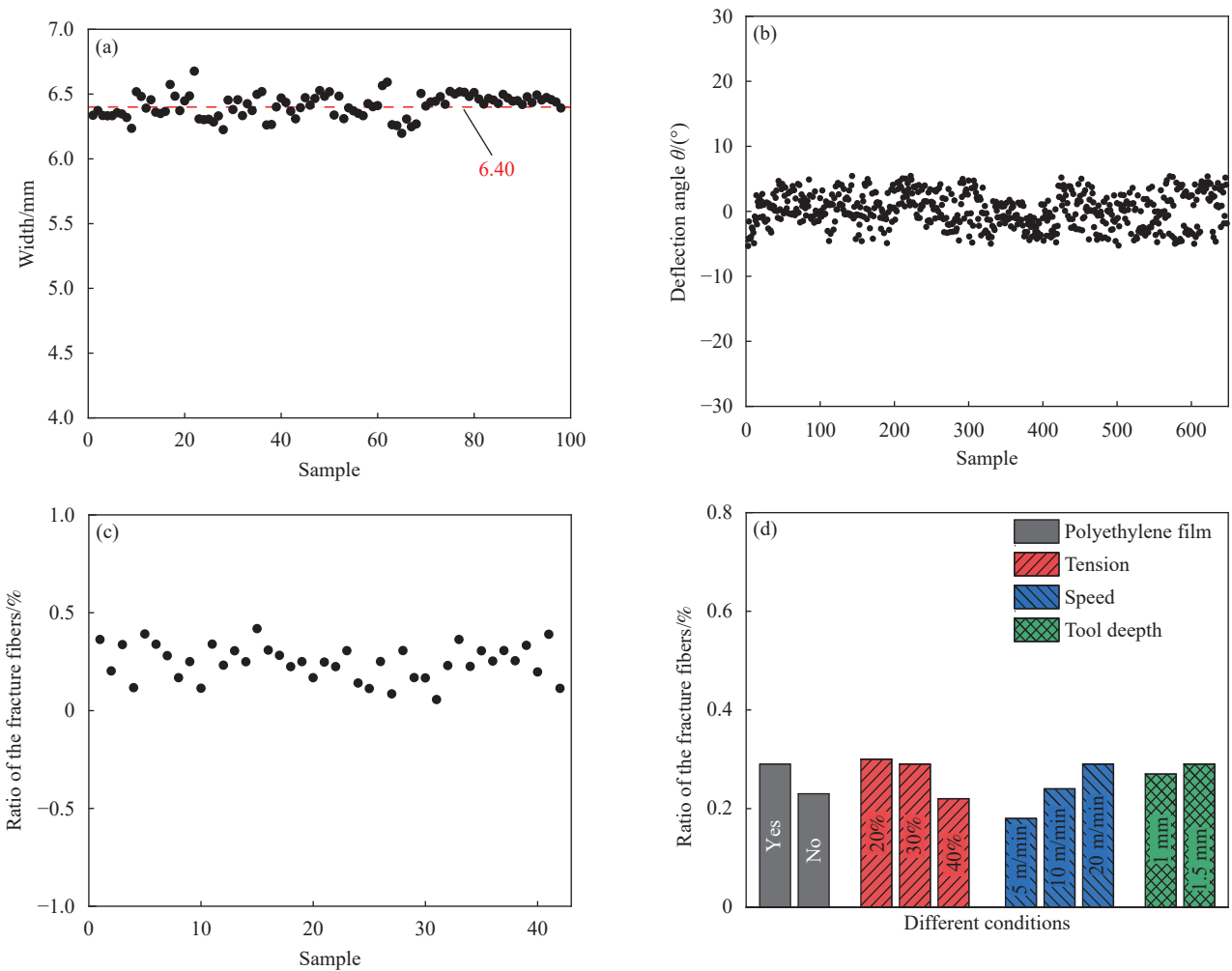


图4 窄带宽度 (a)、接头纤维偏转角 (b) 和断丝量 ((c), (d)) 的典型测试结果

Fig. 4 Typical test data of prepreg tow width (a), deflection angles between fibers at the joint (b), and fracture content of fibers at edges ((c), (d))

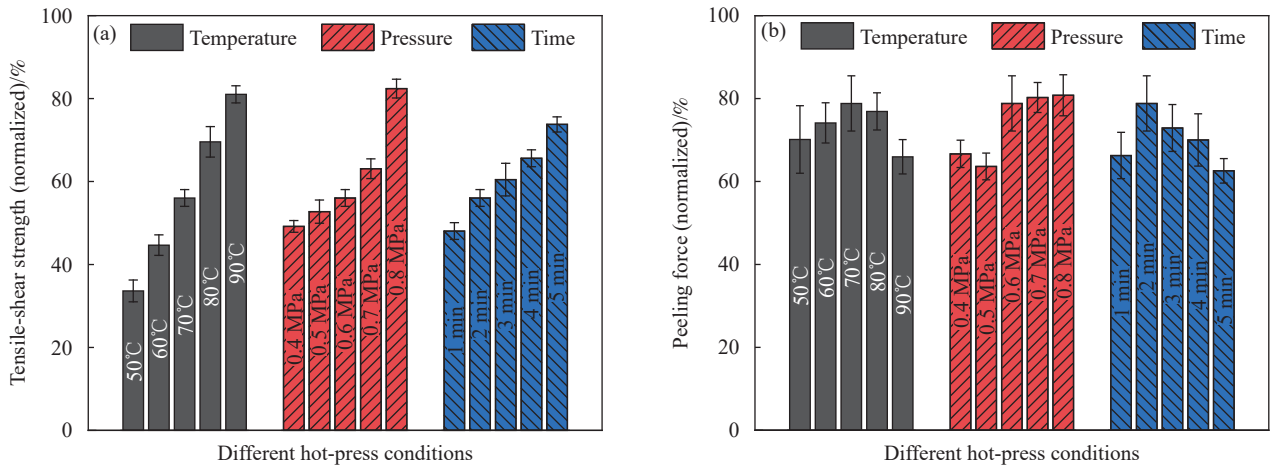


图5 间歇式热压工艺不同条件制备的接头力学性能

Fig. 5 Mechanical property of the prepreg joint made by different hot-press conditions

用的敏感性略低，在 0.4-0.7 MPa 的实验范围内，接头拉剪性能变化幅度较小，只在压力达到 0.8 MPa 时，其拉剪性能明显增大。在 0.8 MPa 压力作用

下，接头处树脂充分浸透到纤维间，有利于树脂与纤维间的载荷传递，此时接头的破坏形式由常规的界面脱粘转变为界面脱粘和纤维断裂的混合

模式。由图 6 断口形貌观察可知，随着压接压力的增加，窄带接头的拉剪破坏形式由图 6(a)、图 6(b) 所示的粘接界面失效为主转变为图 6(c) 所示的界面脱粘和纤维断裂混合的失效模式为主。另外，在相同的热压温度和压力条件下，窄带接头的拉剪强度随热压时间延长而线性增大。由此可见，

在实验范围内通过热压温度和时间可以较好地调控窄带接头的拉剪性能，相对而言，压力的调节作用敏感度较低。图 6 对比了不同条件制备的接头的拉剪后接头断口中心处的形貌，可见断口处纤维的开裂程度随压接压力的增加而变大，说明所需破坏载荷增加，这与拉剪强度测试结果保持一致。

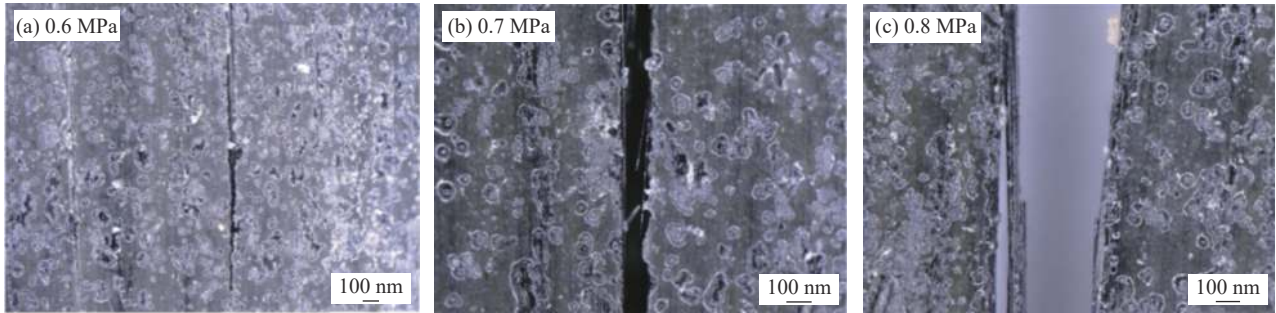


图 6 不同压力制备接头的拉剪后断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of the prepreg joint prepared by different pressure after tensile-shear test

接头的剥离强度随不同工艺条件的变化规律如图 5(b) 所示。可以看出，接头剥离性能随热压温度和时间的增长均为先上升后下降的趋势，其中最佳热压温度是 70℃，最佳热压时间是 2 min。接头剥离性能随压力的增加而普遍增加，只是在压力超过 0.6 MPa 后，其剥离强度的增加幅度变得不显著。这一研究结果表明，预浸料层在接头处受张开力作用时，其自身的柔韧性和粘接处的层间树脂含量均影响窄带接头的剥离性能。当温度和时间超过最佳条件后，过多的树脂流动会减少预浸料层间的树脂含量，对接头的剥离性能影响显著，但对其拉剪性能的影响较不明显。同时，过长的热压时间容易引发树脂发生化学变化，进而降低预浸料的柔韧性，对其剥离性能产生不利影响。

图 7 对比了 0.4 MPa 与 0.8 MPa 压力条件下接头剥离后的表面形貌。观察可知，0.4 MPa 压力下的预浸料搭接头中树脂分布较为均匀，而在 0.8 MPa

的压力作用下，由于制备过程两段预浸料之间的压接更为紧密，树脂流动充分渗透进入预浸料中心层的纤维束内，因此其破坏后的接头表面呈现出更多裸露纤维，显示纤维间树脂富余程度明显减少。

2.2.2 连续式辊压工艺制备条件的影响

连续式辊压制备工艺中不同温度、压力和时间因素对窄带接头拉剪性能的影响如图 8(a) 所示，所得数据同样经过归一化处理。可以看出，在辊压工艺中随着温度的升高和时间的延长，其制备的接头拉剪强度基本呈单调上升趋势，随压力的增加则是先上升后下降，即存在最佳辊压压力。这一规律与间歇式制备工艺的影响规律略有不同，并且相较于间歇式热压制备工艺，同一工艺条件下连续式辊压制备工艺所制得的接头拉剪强度更高，受工艺条件的影响更小。这是由于连续式工艺中只在对辊处加压，树脂在辊的作用下发生剪切流动和压实分布，并且辊压工艺中较低的温度可以通过较高的辊压压力补偿，制得拉剪强度较高的窄带接头。由图 8(b) 可知，连续式工艺制备的接头剥离性能均明显高于间歇式的热压工艺，并且其剥离强度随辊压温度、压力和时间变化幅度很小，只有过低的辊压压力不利于获得有效的剥离强度。由上可见，在工业用连续化工艺的动态加温加压条件下，预浸料接头间的树脂融合程度更高。

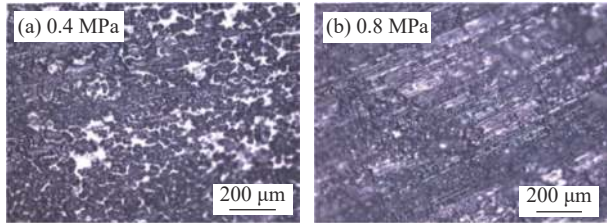


图 7 不同压力制备的窄带接头剥离测试后的表面形貌

Fig. 7 Surface topography of joint prepared by different pressure after peeling test

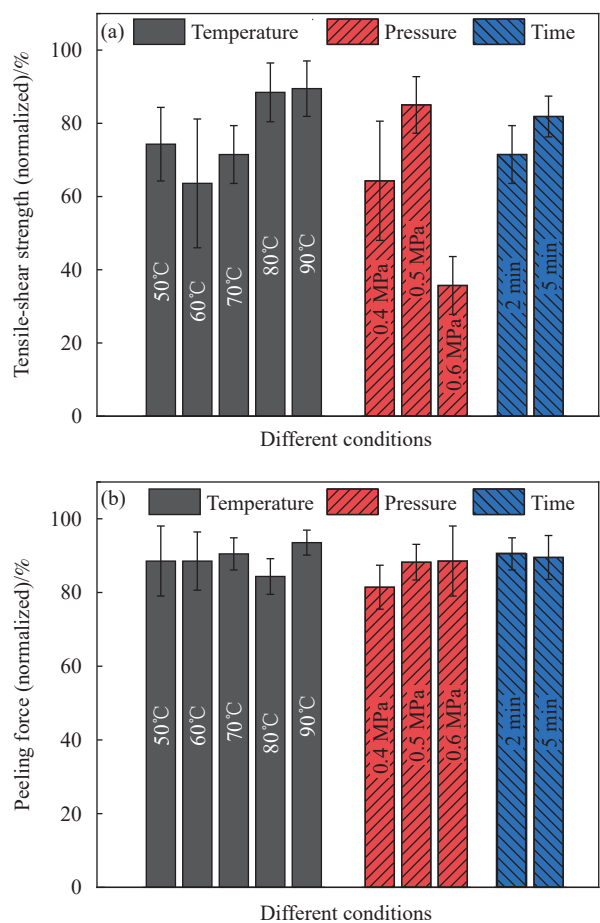


图 8 不同连续式辊压工艺条件制得的预浸料接头的归一化拉伸剪切强度 (a) 和剥离力 (b)

Fig. 8 Normalized tensile shear strength (a) and peeling force (b) of the prepreg joint made by continuous rolling process with different conditions

2.3 其他因素对接头力学性能的影响

以国产预浸窄带为原料,研究了 0°、5°、10°、15°不同偏转角度对接头拉剪和剥离性能的影响,其中窄带接头两端纤维间的取向夹角示意如图 3(e)、图 3(f)所示。由图 9 可知,随着接头处纤维平齐度变差,即纤维的偏转夹角增加,接头拉剪强度与剥离强度均缓慢上升。纤维偏转角度增大,树脂受热受压过程中与纤维的接触更充分,浸润性更好,因此搭接头的强度更高。随着偏转角度的增加,接头平均剥离载荷呈缓慢上升的趋势。但接头纤维平行度低会导致窄带边缘纤维切断程度更加严重,影响 AFP 制备复合材料的力学性能转化。

预浸料中由于树脂的存在,其制备和加工过程中需要控制温湿度,否则会对预浸料的工艺性和复合材料中孔隙缺陷等产生不可忽略的影响。因此,实验研究了经过不同温度、湿度环境条件处理 3 h 后接头拉剪和剥离性能的变化,结果如

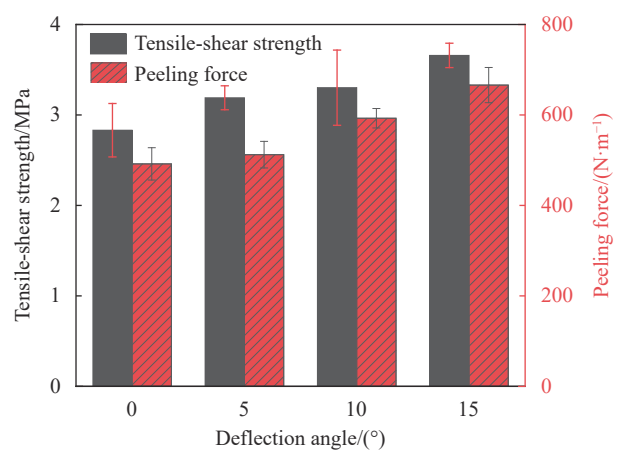


图 9 接头力学性能随不同纤维偏转角的变化

Fig. 9 Mechanical properties of joints change with different deflection angles

图 10 所示。

可以看出,低于室温时,接头拉剪强度随温度升高呈现逐步增加的趋势,随后出现大幅波动。其剥离强度随温度的变化呈现出明显的波动性,但变化幅度相对较小。相对而言,环境温度变化对接头拉剪强度的影响作用较大。由图 10(b)可知,在 30 RH%~70 RH% 的实验范围内,随着环境湿度增加,接头的拉剪强度和剥离强度均呈下降趋势,其中拉剪强度的下降程度更大。相较于 30 RH% 的条件,接头的拉剪强度下降了 58.4%,剥离强度下降了 32.9%。这是由于树脂的吸湿率随环境湿度增加而增大,尤其当湿度大于 50 RH% 后,预浸料的吸湿量增长显著,进而导致其接头力学性能出现明显下降。因此,预浸料分切、铺叠等加工过程均需在标准的控温控湿环境下进行,否则预浸料吸收水汽将导致窄带的铺放工艺性变差,并且在复合材料层板中容易产生孔隙缺陷,影响制品质量。

预浸料中的树脂在室温状态下容易发生缓慢的化学变化,进而影响其黏性、柔韧性等可加工性能。以国产预浸窄带为对象,研究了室温 25℃ 存放时间对接头力学性能的影响,如图 10(c)所示。结果表明,随室温存放时间的延长,窄带接头拉剪破坏载荷呈现较为显著的先上升后下降的趋势,其中拉剪强度最大可达 5.81 MPa。与此相对,窄带接头剥离强度随室温存放时间的延长而逐渐上升。在存放时间超过 3 周之后,窄带接头处变脆,进行剥离试验时断口易沿着纤维方向开裂,无法产生有效的界面剥离。这是由于在一定时间内,

存放时间延长会导致树脂固化度增加，对提升接头的拉剪性能有利。随着储存时间继续延长，树脂的流动性降低，黏性下降，层间贴合程度随之降低，导致接头力学性能下降。

对预浸料初始样品与室温储存 4 周后试样进行 DSC 测试，结果如图 11(a) 所示。依据 DSC 曲线中的台阶取切线，测得其玻璃化转变温度由初

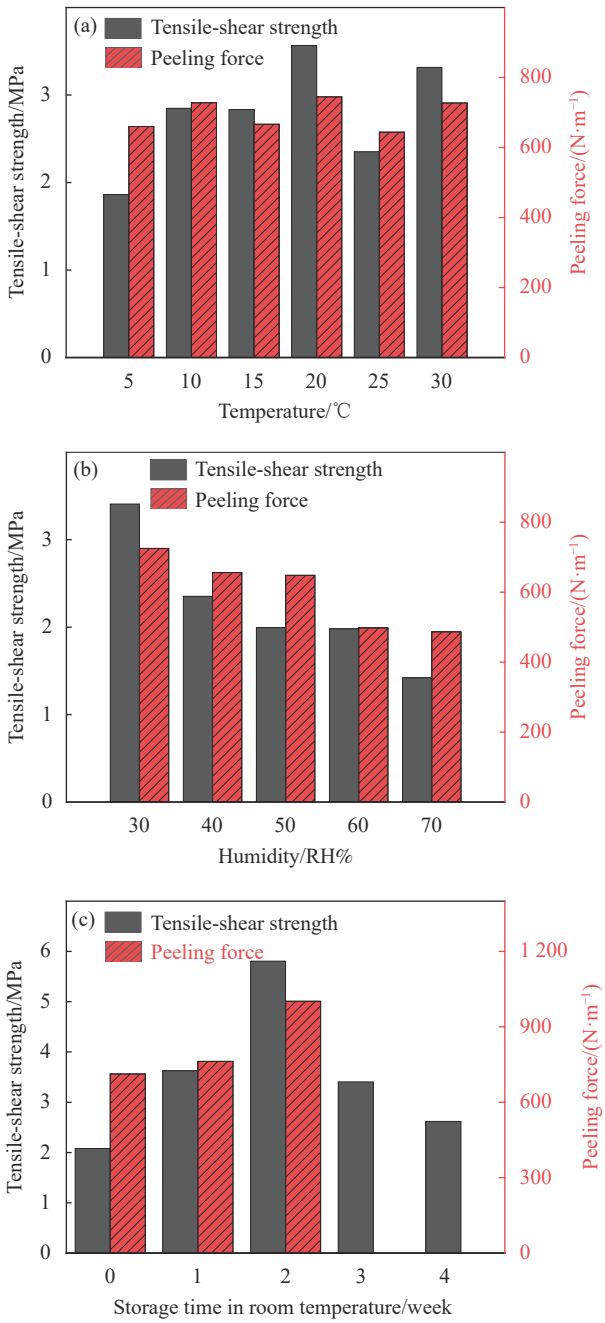
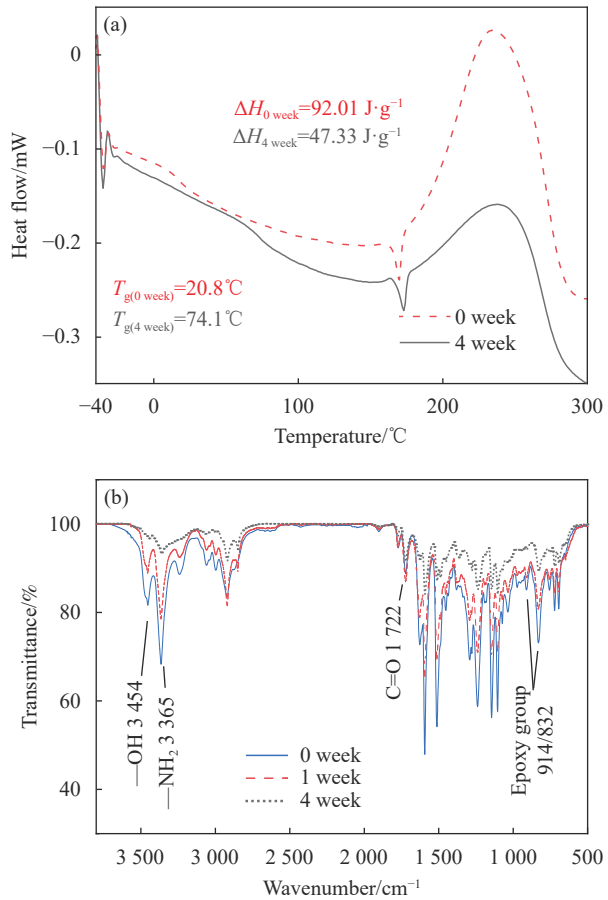


图 10 环境因素对接头力学性能的影响：
(a) 温度；(b) 湿度；(c) 室温存放时间

Fig. 10 Plot of prepreg joint properties with the environmental factors:
(a) Temperature; (b) Humidity; (c) Storage time at room temperature

始的 20.8℃ 增加至 4 周后的 74.1℃，表明预浸料中树脂的分子量增长明显。对固化放热峰积分，结果发现室温存放 4 周后的预浸窄带的反应放热量下降为初始样品的近一半，即其固化度提升了 48.6%。这说明在室温存放的过程中，树脂存在缓慢的化学反应，特别是当存放时间超出适用期后，其固化度增加，分子量增大，此时预浸窄带表面变得干硬，柔韧性下降明显，对 AFP 铺放工艺的适用性变差。

进一步通过红外光谱分析窄带在室温存放后树脂的固化情况，结果如图 11(b) 所示。初始窄带样品的 FTIR 图谱中在 3 454 cm⁻¹ 处含有—OH 伸缩峰，在 3 364 cm⁻¹ 处有反对称—NH₂ 伸缩峰，在 914 cm⁻¹、832 cm⁻¹ 处含有环氧基团特征峰。待试样储存 4 周后，3 454 cm⁻¹ 处的—OH 伸缩峰和 3 365 cm⁻¹ 处的—NH₂ 伸缩基本消失，环氧基团含量明显下降，这表明室温存放 4 周后窄带中环氧



ΔH—Enthalpy of curing reaction; T_g—Glass transition temperature
图 11 在室温存放不同时间后接头处 DSC 曲线 (a) 和 FTIR 图谱 (b)

Fig. 11 DSC curves (a) and FTIR spectra (b) of joint after different storage time at room temperature

树脂发生了明显的化学反应,其固化度提高,与DSC测试结果一致。

2.4 窄带接头的疲劳特性研究

为了分析 AFP 铺放工艺条件下预浸窄带接头频繁过辊后的疲劳受损情况,设计搭建了一种用于模仿多包角反复过辊的实验测试装置,通过分析接头过辊后的损伤和拉剪强度保留率,以评估各种输送条件下预浸窄带接头处的疲劳特性。

接头经过疲劳过程后的拉剪强度结果如图 12 所示。随着疲劳经历由 100 圈增加至 150 圈,接头过辊的次数相应增多,接头处出现了树脂软化、窄带边缘起毛等现象,其拉剪强度略有下降。随着牵引张力增大,接头的拉剪强度下降更加明显,经 6 N 和 8 N 牵引疲劳作用后,其拉剪强度分别为 2.18 MPa 和 1.70 MPa,相较于 4 N 时分别下降了 28.3%、44.1%。这是由于张力增大时,在疲劳过程接头间树脂受到的剪切应力变大。同时,过辊时接头受到辊的法向应力作用,随牵引张力越大其承担的法向应力越大,容易使接头产生开裂。实验还发现,随着疲劳测试温度升高,接头的拉剪性能下降幅度最为显著,30℃ 和 35℃ 测试时接头拉剪强度分别下降至 1.63 MPa、0.88 MPa,相较于 25℃ 时分别下降了 46.4% 和 71.1%。这是由于过辊温度升高,窄带中的树脂受热软化,分子间作用力降低,从而导致接头界面处的粘结性降低,反复过辊对接头处造成的破坏更加严重,疲劳后其拉剪性能大幅下降。由上可知,过辊温度是影响窄带疲劳性能最重要的因素,其次是张力和圈数。

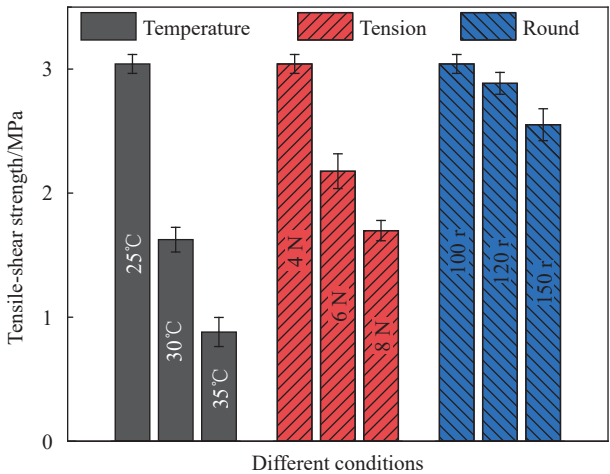


图 12 接头经过不同条件疲劳后测得的拉剪强度

Fig. 12 Tensile-shear strength of join after different conditions for fatigue tests

3 结论

采用了多种方法对自动铺放用国产预浸窄带的分切质量及其影响因素进行了全方面评估和研究,得到结论如下:

(1) 通过图像法和称重法对预浸窄带的分切质量进行了评估。分切后的国产窄带宽度波动小,窄带边缘有少量断丝情况,且纤维切断程度受分切速率等影响,窄带接头处存在一定的偏转角;

(2) 研究了不同制备方法和条件下窄带接头力学性能的变化规律。在间歇式热压制备工艺中,接头拉剪强度随温度升高、压力增大、时间延长而提高,其中 90℃ 压制得到的窄带接头拉剪强度是 50℃ 条件制得的 2.4 倍。相比于热压工艺,连续式辊压工艺制备的接头的剥离强度较高,随不同条件的变化较小,其拉剪强度随不同条件的变化复杂;

(3) 实验发现,窄带接头的力学性能随其纤维偏转角增大而增大,但对纤维取向一致性不利。接头力学性能随测试环境温度升高而上升,随环境湿度升高而下降;随着室温存放时间延长,接头的拉剪强度呈先上升后下降的趋势,这与树脂的化学反应和固化度增长密切相关;

(4) 通过自制的接头疲劳测试设备,可以分析窄带接头反复过辊疲劳后的损伤情况和拉剪性能保留率。结果表明,随着过辊温度、张力及圈数的增加,接头的拉剪强度均呈下降趋势,其中环境温度和张力的影响较为显著。

参考文献:

[1] QURESHI Z, SWAIT T, SCAIFE R, et al. In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: Potential and possibilities[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 66: 255-267.

[2] ZHANG L, WANG X, PEI J, et al. Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(3): 7121-7155.

[3] SUN S Z, HAN Z Y, FU H Y, et al. Defect characteristics and online detection techniques during manufacturing of FRPs using automated fiber placement: A review[J]. Polymers, 2020, 12(6): 1337.

[4] LI X Q, HALLETT, STEPHEN R W, et al. Modelling the effect of gaps and overlaps in automated fibre placement (AFP)-manufactured laminates[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2015, 22(2): 115-129.

[5] SREEHARI R, MICHAEL A S, SUBRAMANI S, et al. Simulations and experiments for automated fiber placement of prepreg slit tape: Wrinkle formation and fundamental

- observations[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 201: 108287.
- [6] KERMANI N N, GARGITTER V, SIMACEK P, et al. Gap filling mechanisms during the thin ply automated tape placement process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 147(3): 106454.
- [7] 徐建, 李峰, 闫鸿琛, 等. 不同纤维面重预浸丝束分切工艺探索及优化[C]//第二十一届全国复合材料学术会议(NCCM-21)论文集. 呼和浩特: 中国航空学会, 2020: 79-82.
- XU Jian, LI Feng, YAN Hongchen, et al. Research on slitting of prepreg with different fiber areal weights and preparation optimization of prepreg tow[C]//National Conference on Composite Materials-21. Huhhot: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2020: 79-82(in Chinese).
- [8] MATSUMOTO T. Manufacture of tow prepreg for manufacture of pressure vessel, involves impregnating resin to tow using metering pumps to drive tow, hardening agent in preset content rate, and resin having preset viscosity at specified temperature: Japan, C08 J, JP2015098556[P]. 2018-07-17.
- [9] 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(23): 131-136, 140.
- ZHANG Yang, ZHONG Xiangyu, BAO Jianwen. Research status and future trend of automated fiber placement technology for advanced polymer matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(23): 131-136, 140(in Chinese).
- [10] 丁韬. 自动纤维铺放机[J]. *航空制造技术*, 2007(9): 60-64.
- DING Tao. Automatic fiber laying machine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2007(9): 60-64(in Chinese).
- [11] 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(16): 66-70, 81.
- 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(16): 66-70, 81(in Chinese).
- [12] WEN L W, ZHU T F, QIN L H, et al. Deviation-rectifying control of carbon fiber prepreg slitting and winding machine[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 35(3): 547-555.
- [13] 陈思阳, 贾艳荣, 刘佳, 等. 自动化铺放材料的工艺性评价1-定性评价[J]. *纤维复合材料*, 2021, 38(3): 52-55.
- CHENG Siyang, JIA Yanrong, LIU Jia, et al. The process properties evaluation of automatic laying materials 1- Qualitative evaluation[J]. *Fiber Composites*, 2021, 38(3): 52-55(in Chinese).
- [14] TINO O. Fiber placement machine platform system having interchangeable head and creel assemblies: USA, US20090095410A1[P]. 2012-04-10.
- [15] 黄志军, 王显峰, 戴振东, 等. 自动铺放过程双马树脂预浸料温度与黏度[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(3): 49-53.
- HUANG Zhijun, WANG Xianfeng, DAI Zhendong, et al. Temperature and viscosity of bismaleimide resin prepreps in automated tape laying process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(3): 49-53(in Chinese).
- [16] GUTOWSKI T G, BONHOMME L. The mechanics of prepreg conformance[J]. *Journal of Composite Materials*, 1988, 22(3): 204-223.
- [17] 严飙, 肖军, 文立伟, 等. 预浸带的快速热压接技术及其搭接性能研究[J]. *航空学报*, 2012, 33(8): 1554-1560.
- YAN Biao, XIAO Jun, WEN Liwei, et al. Study on hot-press fast-bonding technology for prepreg winding and its lap jointing performance[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(8): 1554-1560(in Chinese).
- [18] SHI Y, TAO Y, ZHANG Y, et al. Research on hot-press splicing technology for composite prepreg tape[C]//International Conference on Innovative Design & Manufacturing. Montreal: IEEE, 2014: 143-148.
- [19] 史耀耀, 赵盼, 俞涛, 等. 一种基于滚轮的复合材料预浸胶带热压搭接装置: 中国, CN 201310188183. X[P]. 2013-08-14.
- SHI Yaoyao, ZHAO Pan, YU Tao, et al. Composite material pre-impregnation rubber belt hot-pressing and lapping device based on rollers: China, CN 103240877A[P]. 2013-08-14(in Chinese).
- [20] 黄晓川, 张建宝, 赵文宇, 等. 网格铺丝用预浸丝分切性能研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(4): 75-78, 86.
- HUANG Xiaochuan, ZHANG Jianbao, ZHAO Wenyu, et al. Research on slitting property of prepreg tow applied in automated fiber placement for grid[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(4): 75-78, 86(in Chinese).
- [21] RAJAN S, SUTTON M A, WEHBE R, et al. Characterization of viscoelastic bending stiffness of uncured carbon-epoxy prepreg slit tape[J]. *Composite Structures*, 2021, 275(5): 114295.
- [22] BUDELMANN D, SCHMIDT C, MEINERS D, et al. Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41: 3440-3458.
- [23] CROSSLEY R J, SCHUBEL P J, WARRIOR N A, et al. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(3): 423-434.
- [24] ASTM. Standard guide for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies: ASTM D3165[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- [25] ASTM. Standard test method for peel resistance of adhesives (T-peel test): ASTM D1876[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [26] ASTM. Standard test method for strength properties of tissue adhesives in T-peel by tension loading: ASTM F2256[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2003.