

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.015

机械展纤中横向振动的碳纤维展纤理论与实验研究

徐硕¹, 潘益鹏¹, 何亚东^{1,2}, 信春玲^{1,2}, 任峰¹

(1.北京化工大学机电工程学院,北京 100029; 2.教育部高分子材料加工装备工程研究中心,北京 100029)

摘要:在熔融浸渍法制备预浸带的过程中,纤维束展纤效果是决定树脂浸渍效率和预浸带质量的关键因素。纤维束的展纤效果包括纤维束展纤宽度、纤维束的断裂率和纤维束的均匀度。针对机械展纤效果不理想的问题,本文提出了一种机械展纤与横向振动展纤相结合的方法,并通过理论建模与实验验证相结合的方式开展研究。通过力学分析与动态迭代的方法,构建了纤维展纤理论模型,包括纤维展宽模型和纤维断裂模型,系统分析了工艺参数对纤维展宽效果的影响规律。利用自主搭建的振动装置,对展纤理论模型进行实验验证与分析。结果表明,纤维张力是影响纤维展纤效果的主要因素,纤维张力从4 N增至10 N时,纤维展宽提升约41%,但同时纤维断裂率由0.22%增至0.57%。在此基础上,提高横向振动辊振动幅度能够在不增加纤维断裂的情况下,使纤维展宽进一步提升30%。经理论验证和实验优化,该装置可将12K碳纤维展宽至15.2 mm,纤维均匀度稳定在95.3%,纤维断裂率控制在0.43%,为高质量碳纤维预浸带的制备提供了可靠的技术方案。

关键词:预浸带;纤维展宽;横向振动辊;纤维断裂;展纤理论

中图分类号: TQ343, TQ327.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0122-08

Theoretical and experimental research on carbon fiber spreading based on transverse vibration in mechanical fiber spreading

XU Shuo¹, PAN Yipeng¹, HE Yadong^{1,2}, XIN Chunling^{1,2}, REN Feng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Polymer Processing Equipment Engineering Research Center, Ministry of Education, Beijing 100029, China)

Abstract: In the melt impregnation process for the preparation of prepregs, the fiber spreading performance of fiber tows is a key factor determining resin impregnation efficiency and the quality of prepregs. The spreading performance is mainly characterized by the spreading width, fiber breakage rate, and fiber uniformity. To address the limited effectiveness of conventional mechanical spreading, a method combining mechanical stretching of fibers with lateral vibration for stretching is proposed in this study, and the research is carried out through a combination of theoretical modeling and experimental validation. Based on mechanical analysis and a dynamic iterative approach, a fiber spreading theoretical model was established, including a fiber spreading width model and a fiber breakage model, to systematically analyze the influence of process parameters on fiber spreading behavior. The proposed model was experimentally validated using a self-developed vibration-assisted spreading apparatus. The results indicate that the tensile tension is the dominant parameter affecting fiber spreading performance. As the tensile tension increases from 4 N to 10 N, the spreading width increases by 41%, while the fiber breakage rate rises from 0.22% to 0.57%. Furthermore, increasing the vibration amplitude of the transverse vibrating roller further enhances the spreading width by approximately 30% without significantly increasing fiber breakage. After theoretical verification and experimental optimization, the proposed apparatus is capable of stably spreading 12K carbon fiber tows to a width of 15.2 mm, achieving a fiber uniformity of 95.3% while maintaining the fiber breakage rate at 0.43%. These results provide a reliable technical solution for the high-quality preparation of carbon fiber prepregs.

Keywords: prepreg tape; fiber spreading; horizontal vibrating roller; fiber fracture; fiber spreading theory

基金项目: 中石油与北京化工大学新能源与新材料创新联合体项目(PRIKY23107),中石油石油化工研究院碳纤维复合材料加工及应用技术开发项目(PRIKY24021)

通信作者: 任峰,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为树脂基复合材料

收稿日期: 2025-12-29

引用格式: 徐硕,潘益鹏,何亚东,等.机械展纤中横向振动的碳纤维展纤理论与实验研究[J].工程塑料应用,2026,54(3):122-129.

XU Shuo, PAN Yipeng, HE Yadong, et al. Theoretical and experimental research on carbon fiber spreading based on transverse vibration in mechanical fiber spreading[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 122-129.

连续纤维增强复合材料因力学性能优异,具有广阔的市场前景^[1-2]。预浸带作为连续纤维增强复合材料制品的关键原料,其制备质量直接影响最终产品性能。在熔融浸渍法制备预浸带的过程中,展纤工艺是影响纤维浸渍效果、预浸带质量及制备成本的关键环节,其工艺方式和参数选择对预浸带性能具有重要影响^[3-4]。

目前,常用的展纤工艺主要包括机械展纤法^[5]、振动展纤法^[6-7]、气流展纤法^[8-9]和超声展纤法等^[10]。其中,机械展纤法和振动展纤法因结构简单、成本低、易于工业化,所以得到广泛应用;气流展纤法和超声波展纤法虽能实现纤维束分散,但其装置结构复杂、能耗较高,因此工艺稳定性和参数控制难度较大。纤维束展宽过程中,纤维展宽模型的建立对于展宽装置结构参数与工艺参数的优化具有指导意义。

Wilson^[11]建立了纤维束横向展宽的数学模型,从理论层面揭示展宽过程的力学本质,明确影响展宽效果的关键因素,为后续展宽工艺优化与设备设计提供理论基础。Irfan等^[12]在Wilson理论模型的基础上,研究了展纤辊的数量、角度和辊子间距对纤维展宽的影响。冯一川等^[13]对通过模拟的方法对Wilson模型进行优化,对纤维束在曲型辊上的展宽进行模拟并验证。结果表明,纤维在曲型辊子上展纤效果优于直型辊子。高心玥等^[14]通过雷诺方程,对纤维束气流展纤装置内部流场进行了数值模拟,分析了不同风速、牵引速度及风槽数量对展纤效果的影响。王明欢等^[15]分析不同展纤形式优劣势,确定了在垂直振动展纤过程中引入喷吹气流展纤,搭建振动喷吹展纤装置,基于流体力学原理推导展宽预测模型。通过多展纤参数正交实验优化,结果表明,最优参数下纤维束展宽提升了50%。徐然^[16]根据展宽过程中能量守恒角度建立机械辊展纤理论,相比于Wilson模型,能够更好地预测纤维束的展开宽度。现有研究主要围绕机械辊结构优化或气流辅助展纤开展,对机械展纤过程中横向振动作用机理及其对纤维束展宽行为的影响缺乏系统的理论模型与实验验证。

目前,关于展纤理论的研究仍集中在机械展纤宽度的分析与预测方面,且模型中较少考虑纤维单丝间摩擦与相互作用等关键因素。现有研究主要基于Wilson模型对机械展纤的宽度进行预测。为解决上述问题,本文分析了纤维绕辊摩擦力、纤维

单丝间作用力以及纤维张力等因素对纤维展宽的影响,构建了机械展纤与横向振动展纤协同作用的复合式纤维展纤工艺。其中振动辊沿垂直于纤维运动方向施加周期性振动,以增强纤维单丝间的相对滑移和分散效果。并对振动展宽模型进行研究,通过力学分析与动态迭代方法,构建纤维展纤理论,为连续纤维增强复合材料预浸带制备提供理论指导。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维:T700SC,直径7 μm ,线密度1 200 tex,初始宽度7 mm,日本东丽公司。

1.2 主要仪器及设备

可控张力放纤架:FX-6,南京创博机械设备有限公司;

张力传感器:WFTG-100N,烟台羿沅传感测控技术有限公司;

牵引机:LFT-6,南京创博机械设备有限公司;

电子天平:JA5003,上海恒平科学仪器有限公司;

高速摄像机:SL200 KB,上海梭伦信息科技有限公司;

横向振动展纤装置:自制。

1.3 实验方案

设置固定参数为:展纤辊温度150 $^{\circ}\text{C}$ 、任意两辊之间间距150 mm、辊子半径25 mm。纤维展宽工艺流程如图1所示。

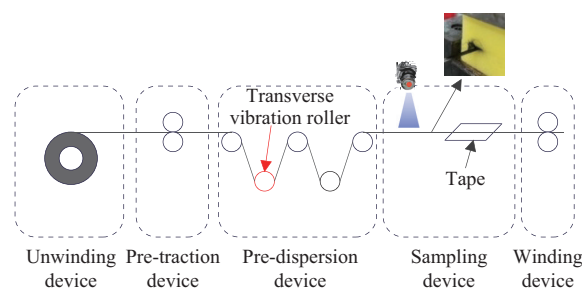


图1 纤维展宽工艺流程图

Fig. 1 Fiber tow spreading process flow diagram

纤维束经展宽装置处理后,采用高速摄影机对展宽后的纤维形态进行拍摄,用于后续纤维展宽均匀度的测试与分析。展宽过程中,纤维束会发生断裂并产生毛纤,在纤维束上下方放置海绵以收集断纤,并据此计算纤维断裂率。纤维束展宽均匀后,在其上下表面粘贴胶带以固定展宽形态,用于后续展宽性能测试。

1.4 测试与表征

1.4.1 纤维展宽表征

将制得的纤维束展宽试样用卡尺测量展宽宽度。每组测量五次,取平均值。

1.4.2 纤维分散均匀度表征

纤维分散均匀度以展宽后纤维单丝间隙的标准差进行表征。由于单根纤维束中纤维根数较多,难以直接统计单丝间隙分布,本文基于比尔-朗伯定律(Beer-Lambert law),利用光透过非均匀介质后产生的光强差异,并结合 Image J 软件对展宽后纤维束图像进行灰度处理^[17],从宏观尺度对纤维束的分散均匀度进行表征,纤维均匀度计算见式(1)。

$$E = \left(1 - \frac{\sum L_i}{L_w}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为纤维均匀度; L_w 为纤维束宽度; L_i 为第*i*处纤维束缺陷的宽度。

1.4.3 纤维断裂率表征

将收集断纤前后的海绵进行称重,通过海绵前后质量差计算断纤质量。结合原始纤维束的初始质量,计算纤维断裂率,见式(2)。

$$P_\sigma = \frac{M_t - M_s}{L_{ef} \rho_L} \quad (2)$$

式中: P_σ 为纤维断裂率; M_t 为海绵与断纤总质量; M_s 为海绵初始质量; L_{ef} 为通过海绵纤维长度; ρ_L 为纤维线密度。

2 结果与讨论

2.1 横向振动展纤模型建立

纤维束通过固定机械辊与横向振动机械辊实现展宽,其横向振动是指振动方向垂直于纤维束运动方向,其过程如图2所示。由于展宽过程中纤维单丝运动行为复杂,为便于对展纤机理进行分析,对实际过程进行合理简化,提出如下假设。

(a)在纤维束展宽过程中,纤维束截面呈标准矩

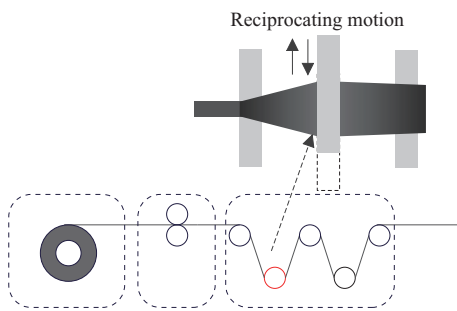


图2 横向振动展纤流程图

Fig. 2 Transverse vibration-assisted tow spreading process flow diagram

形变化,纤维单丝排布紧密。

(b)每根纤维单丝处于同样的运动状态。

通过受力分析可知,纤维束在横向振动辊作用下沿展宽方向主要受到三种力:其一为横向振动辊位移对纤维沿振动辊轴向的摩擦力,该力为纤维展宽的主要驱动力;其二为纤维单丝之间的摩擦力及残留上浆剂引起的缠结阻力,该阻力沿纤维展宽相反方向收缩,抑制纤维展宽;其三为纤维在展宽过程中,由于展宽方向与纤维张力之间存在夹角而产生的张力分力。

根据运动方程纤维束经过单次振动展纤宽度的计算见式(3)。

$$W_1 = W_0 + \frac{1}{2}at^2 \quad (3)$$

式中: W_1 为纤维展宽; W_0 为纤维初始宽度; a 和 t 为纤维所受加速度和时间。

通过对振动辊上纤维束受力分析结合牛顿第二定律可得式(4)。

$$F_{f1} - F_{q1} - F_{T1} = ma \quad (4)$$

式中: F_{f1} 为纤维单丝所受沿振动辊轴向摩擦力; F_{q1} 为纤维单丝所受缠结阻力; F_{T1} 为纤维单丝所受张力分力; m 为纤维质量。

2.1.1 振动辊与纤维束之间的摩擦力分析

基于王伟民等^[18]提出的绳绕圆柱体摩擦模型,对纤维束绕展纤辊过程中的摩擦力进行分析,振动辊与纤维束之间的摩擦力分析如图3所示。

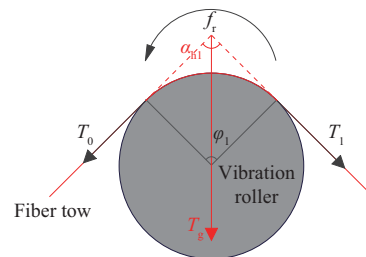


图3 纤维束受力分析

Fig. 3 Force analysis of the fiber tow

纤维束绕辊后所受纤维张力 T_1 与纤维初始张力 T_0 的关系见式(5)。

$$\begin{aligned} T_1 &= T_0 + f_r = T_0 + \int_0^{\varphi_1} df = \int_0^{\varphi_1} \mu_1 T_0 e^{\mu_1 \theta} d\theta \\ &= T_0 + T_0(e^{\mu_1 \varphi_1} - 1) = T_0 e^{\mu_1 \varphi_1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: μ_1 为纤维束与机械辊之间的摩擦因数; φ_1 为纤维束绕辊包覆角; f_r 为纤维绕辊摩擦力。

纤维单丝所受沿振动辊轴向摩擦力 F_{f1} 计算见式(6)。

$$F_{\Pi} = \mu_1 T_g = \mu_1 (T_0 + T_1) \cos \frac{\alpha_{h1}}{2}$$

$$= \mu_1 [T_0 (e^{\mu_1 \varphi_1} + 1)] \cos \frac{(\pi - \varphi_1)}{2} \quad (6)$$

式中: α_{h1} 为纤维绕辊包覆角的互补角; T_g 为纤维束张力在竖直方向上对纤维束的压力。

2.1.2 横向振动纤维束所受缠结阻力分析

根据王明欢^[15]对纤维束缠结阻力的理论推导与实验验证,纤维束缠结阻力主要与缠结阻力系数和纤维束绕辊长度有关,见式(7)。

$$F_{q1} = f_{q1} \varphi_1 r_1 \quad (7)$$

式中: f_{q1} 为单位长度纤维单丝的缠结阻力; r_1 为横向振动辊半径。

2.1.3 展纤过程中纤维束受张力分力

图4为纤维展宽示意图,如图4所示,纤维在展宽过程中,由于展宽方向与纤维张力之间存在夹角,所以会产生阻碍纤维展宽的力。且随着纤维展宽的增加,展宽方向与纤维张力之间夹角会变大。

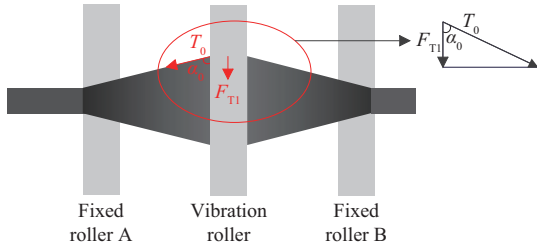


图4 纤维展宽示意图

Fig. 4 Schematic of fiber tow spreading

为了方便计算,假设位移三角形的斜边纤维束长度近似为两辊之间间距。因此在展宽阶段,纤维束最外层纤维单丝与辊子之间的夹角 α_0 的 $\cos$ 值为纤维束展宽减去振动幅度与振动辊和固定辊B之间的距离的比值。随着展宽进行,夹角随着展宽变化。因此可类比推导纤维束所受力,见式(8)。

$$F_{T1} = T_z \cos \alpha_0 = \frac{(W_{s1} - A)}{L_1} T_z \quad (8)$$

式中: W_{s1} 为纤维束经过振动展宽稳定后的宽度; T_z 为纤维束经过振动后的纤维张力; A 为振动辊的振动幅度; L_1 为振动辊和固定辊B之间的距离。

2.1.4 纤维束受振动展宽时间分析

纤维在振动展宽存在展宽叠加效应,即多次展宽效果是单次振动展宽效果的累加。一次单向振动展宽时间满足式(9)。

$$t_1 = \frac{1}{2f_1} \quad (9)$$

式中: f_1 为振动辊的振动频率; t_1 一次单向振动展宽时间。

振动次数 N 为纤维束绕辊经过的时间 T 与振动一个周期的时间 t 的比值,振动次数计算见式(10)。

$$N = \frac{T}{t} = \frac{\varphi_1 r_1 f_1}{V_q} \quad (10)$$

式中: V_q 为纤维束牵引速度。

在纤维束绕辊周期内,纤维束受 N 次振动,通过多次迭代,纤维束经过振动展宽宽度 W_{s1} 的计算见式(11)。

$$W_{s1} = W_{N-1} + \left(\frac{1}{2f_1}\right)^2 \times$$

$$\frac{\mu_1 T_0 (e^{\mu_1 \varphi_1} + 1) \cos \frac{\alpha_{h1}}{2} - f_{q1} \varphi_1 r_1 - \frac{(W_{s1} - A)}{L} T_z}{N_i \rho L \varphi_1 r_1} \quad (11)$$

式中: N_i 为纤维束单丝根数。

2.2 纤维断裂率预测模型推导

在纤维展宽过程中,纤维束表面纤维与辊子直接接触过程中,其内部受力情况十分复杂,因此对纤维展纤过程进行合理的简化:辊子与纤维束接触产生的作用力只作用在表层纤维。依据上述纤维在展宽过程的受力情况进行分析。纤维断裂主要受到以下的作用力:纤维绕辊摩擦力、辊子对纤维的轴向摩擦力、纤维弯曲所受的力、纤维受到的张力。

根据拉应力公式推导出纤维绕辊摩擦应力 σ_1 的计算公式见式(12)。

$$\sigma_1 = \frac{4(f_{N1} + f_{N2} + \dots + f_{Nn})}{\pi N_c d_f^2} \quad (12)$$

式中: f_{Ni} 为纤维绕第 i 个辊摩擦力, $i=1, 2, \dots, n$; N_c 为辊子接触的表层纤维根数。

辊子对纤维的轴向摩擦应力 σ_2 计算见式(13)。

$$\sigma_2 = \frac{3F_f}{2N_c \frac{\pi d_f^2}{4}} \quad (13)$$

式中: F_f 为纤维束通过所有辊所受纤维轴向摩擦力。

考虑纤维单丝直径 d_f 远小于横向振动辊半径 r_1 的几何特征,可将纤维束在辊子表面的运动简化为较大曲率弯曲过程。故纤维束在辊子上弯曲处纤维弯曲应变 ε_1 计算见式(14)。

$$\varepsilon_1 = \frac{(r_1 + d_f)\theta_1 - (r_1 + 0.5d_f)\theta_1}{(r_1 + 0.5d_f)\theta_1} = \frac{d_f}{2r_1 + d_f} \approx \frac{d_f}{2r_1} \quad (14)$$

式中: θ_1 为单个辊子处纤维包覆角。

因此纤维绕辊的弯曲应力 σ_3 计算见式(15)。

$$\sigma_3 = E(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \cdots + \varepsilon_n) \quad (15)$$

张力对纤维的拉应力 σ_4 计算见式(16)。

$$\sigma_4 = \frac{4(T_1 + T_2 + \cdots + T_n)}{\pi N_f d_f^2} \quad (16)$$

式中: T_i 为过*i*个辊后纤维所受的张力。

结合 Weibull^[19]分布函数预测纤维束断裂率 P_σ , 公式见式(17)。

$$P_\sigma = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m} \quad (17)$$

式中: σ 为纤维所受应力; σ_0 为尺度参数; m 为形状参数。

纤维束在横向振动辊上经过多次振动,故纤维所受摩擦力对纤维的断裂产生累积作用。

结合 Weibull 函数公式计算出单次摩擦力所影响的纤维断裂率 P_{σ_2} ,经过多次振动纤维束断裂率 $P_{N\sigma_2}$ 的计算见式(18)。

$$P_{N\sigma_2} = NP_{\sigma_2} = N \frac{N_c}{N_f} \left[1 - e^{-\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0}\right)^m} \right] \quad (18)$$

纤维断裂率的计算见式(19)。

$$P_\sigma = \frac{2N_c}{N_f} \left[1 - e^{-\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma_4}{\sigma_0}\right)^m} \right] + \frac{(N_f - 2N_c)}{N_f} \left[1 - e^{-\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_4}{\sigma_0}\right)^m} \right] + P_{N\sigma_2} \quad (19)$$

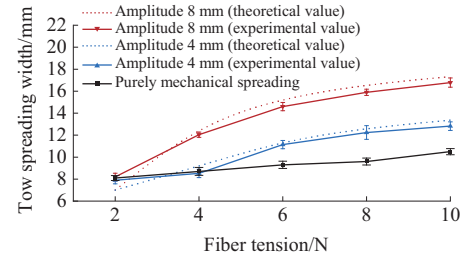
2.3 工艺参数对展宽的影响

图 5a 展示了不同展纤方式下纤维束展宽宽度随张力变化的规律。固定振动频率为 8 Hz, 振动辊包角为 60°, 牵引速度为 2 m/min。结果表明, 随着纤维张力的增加, 纤维束展宽宽度整体呈现增加趋势。相较于纯机械展纤方式, 引入横向振动后展宽能力显著提高, 振动幅度为 4 mm, 纤维张力从 4 N 增至 10 N 时, 纤维展宽提升约 41%。进一步提高振动幅度至 8 mm 后, 纤维展宽进一步提升 30%, 理论模型预测结果与实验数据整体吻合良好。

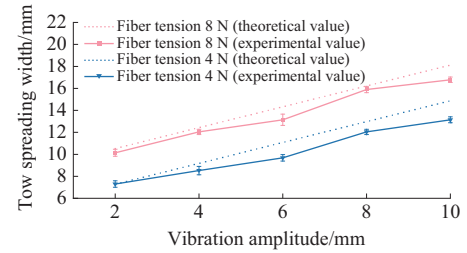
图 5b 为不同振动幅度对纤维展宽的影响。固定振动频率为 8 Hz, 振动辊包角为 60°, 牵引速度为 2 m/min。随着振动幅度的增加, 无论在纤维张力 4 N

和纤维张力 8 N 的情况下, 纤维展宽的模型理论预测值和实验值均呈现上升趋势。这是因为随着振动幅度的增加, 纤维束在振动辊上的相对位移增加, 进而能够增加纤维束的展宽空间。此外, 提高振动幅度也能帮助纤维更好地克服纤维与振动辊之间的静摩擦, 进而促进纤维的展宽。

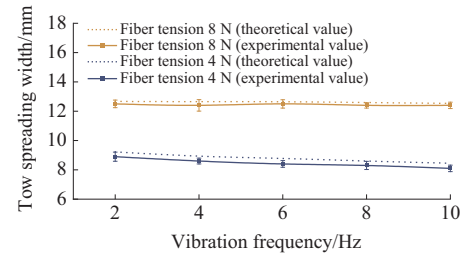
图 5c 为振动频率对纤维展宽的影响。固定振



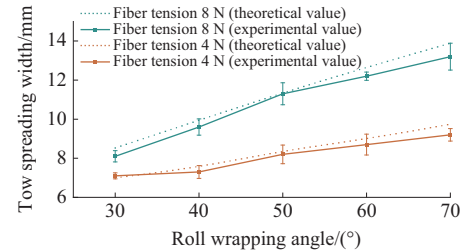
(a) Variation of tow spreading width with tension



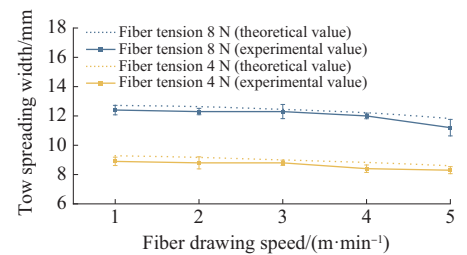
(b) Variation of tow spreading width with vibration amplitude



(c) Variation of tow spreading width with vibration frequency



(d) Variation of tow spreading width with roller wrap angle



(e) Variation of tow spreading width with take-up speed

图 5 工艺参数对纤维展宽的影响

Fig. 5 Effect of process parameters on fiber tow spreading

振动幅度为 8 mm, 振动辊包角为 60° , 牵引速度为 2 m/min。随着振动频率的增加, 纤维展宽宽度缓慢降低。其原因在于虽然振动频率的增加会使纤维受到横向作用次数增加, 纤维能够经过多次横向振动, 但纤维总振动时间不变, 纤维在一个横向振动周期内作用时间减少, 两者的共同作用下使得纤维展宽减小。

图 5d 为辊振动辊包角对纤维展宽的影响, 由图可知, 固定振振动幅度为 8 mm, 振动频率为 8 Hz, 牵引速度为 2 m/min。随着包角的增大, 纤维展宽的模型理论值和实验值都呈现不断增大趋势, 因为随着包角的增大, 虽然纤维的缠结阻力提高, 但纤维束受到的沿振动辊轴向摩擦力提高, 且绕辊长度增加, 这使纤维受到横向振动次数增加, 因此纤维整体展宽增加。

通过展宽理论模型和实验验证不同牵引速度对展宽的影响, 如图 5e 所示, 固定振振动幅度为 8 mm, 振动频率为 8 Hz, 振动辊包角为 60° 。随着牵引速度的增加, 纤维展宽幅度呈现缓慢减小的趋势。这是因为牵引速度提高, 纤维横向振动次数减少, 纤维展宽累积效应降低, 纤维展宽减小。

2.4 工艺参数对纤维束断裂率的影响

通过实验发现, 工艺参数中对展宽影响最大的为纤维张力, 本文主要讨论横向振动辊对展纤的影响, 故在绕辊包角为 60° 和牵引速率为 2 mm/min 条件下探究纤维张力和振动参数对纤维断裂的影响。

图 6a 为纤维张力对断裂率的影响, 如图所示, 固定振动频率为 8 Hz 时, 纯机械展纤在相同张力条件下表现出更高的纤维断裂率, 且在高张力区间差异更加明显。这表明, 单纯依靠张力和机械摩擦实现展纤时, 纤维束内部应力集中更为显著, 易诱发单丝断裂。随着纤维张力的增加, 不同展纤方式下纤维断裂率均呈现逐渐升高的趋势。这是由于张力增大后, 纤维在绕辊过程中的摩擦力、纤维所承受的拉应力以及在振动辊表面的接触摩擦力均增大, 从而提高了纤维发生断裂的概率。当振动幅度分别为 4 mm 和 8 mm 时, 纤维断裂率整体接近, 由 0.22% 增至 0.57%, 横向振动幅度的变化对纤维断裂影响有限。图 6b 为不同振幅对断裂率的影响, 如图所示, 固定振动频率为 8 Hz 时, 在纤维张力分别为 4 N 和 8 N 条件下, 随着横向振动幅度由 4 mm 增加至 8 mm, 纤维断裂率整体变化较小。这是因为横向

振动主要改变纤维束在振动辊轴向的横向位移和单丝重排行为, 而并未显著改变纤维所承受的主导断裂的应力, 因此对纤维断裂率影响有限。

图 6c 为振动频率对纤维断裂率的影响, 如图所示, 固定振动幅度为 8 mm, 结果表明随着振频的变化, 对纤维断裂率影响较小, 这是因为, 频率变化并不会改变纤维的受力状态, 因此断裂率变化不明显。

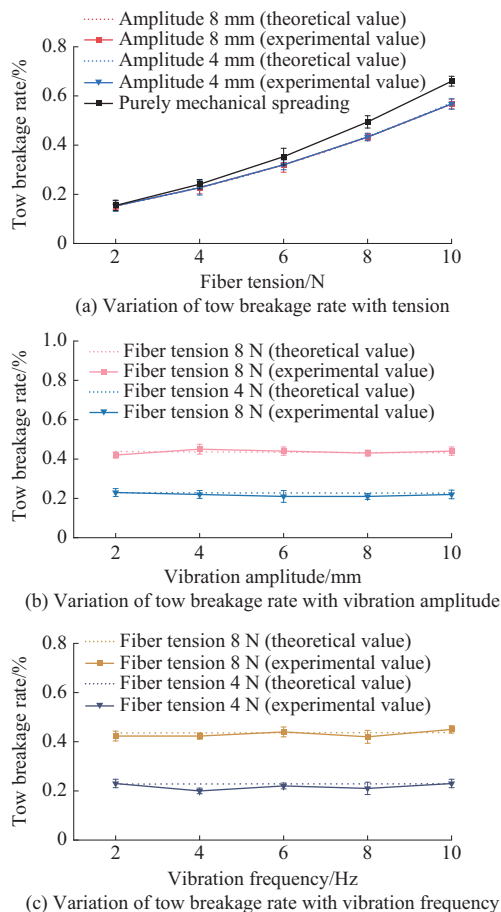


图 6 工艺参数对纤维断裂的影响

Fig. 6 Effect of process parameters on fiber breakage

2.5 振动参数对纤维束均匀度的影响

通过理论推导和实验验证发现, 振动参数对纤维断裂几乎没有影响, 故在绕辊包角为 60° 和牵引速率为 2 mm/min 条件下进一步探究纤维张力和振动参数对纤维均匀度的影响。

图 7a 为纤维张力对纤维均匀度的影响, 如图所示, 固定振动频率为 8 Hz 时, 不同展纤方式下纤维均匀度随纤维张力变化的规律存在明显差异。整体来看, 随着张力的增加, 纤维均匀度呈现逐渐提高的趋势。在低张力区间, 纯机械展纤由于单丝间摩擦和缠结作用显著, 均匀度较低; 引入横向振动

后,纤维束内部单丝能够在横向扰动作用下充分重排,均匀度显著提高,其中8 mm振动幅度的提升效果最为明显。随着张力进一步增大,均匀度逐渐趋于饱和,不同展纤方式之间的差异逐渐缩小。

图7b为振动幅度对纤维均匀度的影响,如图所示,固定振动频率为8 Hz时,无论是纤维张力为4 N还是8 N,纤维均匀度均随振动幅度的增大呈现先上升后下降的变化趋势。这是因为在较低的振幅条件下,纤维展宽较小,适当提高振幅能够促进纤维展宽,在一定程度上能够提高纤维均匀度;而当振动幅度过高时,纤维展宽增加,纤维变薄,纤维单丝之间易出现开裂现象,降低纤维均匀度。

图7c为横向振动频率对纤维均匀度的影响,如图所示,固定振动幅度为8 mm时,随着振动频率增加纤维均匀度呈现上升的趋势,这是因为在相同时间内,振动频率越高,横向振动辊的往复运动次数越多,纤维层在往复运动中能够更容易填补到纤维束的开裂处,提高纤维均匀度。同时,在纤维张力为8 N时纤维均匀度整体上要高于纤维张力4 N时纤维均匀度,这是因为在较大张力时能够更好地抵抗纤维之间的缠结力,促使纤维束内单丝实现有序

排布,高张力条件下纤维束抗偏移能力提高,因此纤维均匀度较高。

综合考量纤维展宽、断裂率与纤维均匀度三项指标,确定纤维张力8 N、振动幅度7 mm、振动频率8 Hz为最佳工艺参数;该参数下可将12K碳纤维束稳定展宽至15.2 mm,纤维均匀度达95.3%,纤维断裂率控制在0.43%以内。

2.6 纤维束展纤效果对树脂浸渍行为的影响

以上结果表明,横向振动参数对纤维束展宽宽度、断裂率及分散均匀度均具有显著影响。然而,纤维束展纤效果最终体现在树脂浸渍效率和预浸带质量上。为验证不同展纤方式下纤维束展纤效果对树脂浸渍行为的影响,本文进一步对比分析了纯机械展宽与机械—横向振动协同展宽条件下纤维束的浸渍形貌。

图8a为未引入横向振动条件下,仅通过机械方式展宽后的纤维束浸渍后的预浸带截面形貌。可以观察到,纤维束内部仍存在明显未浸渍区域,纤维中部存在较大孔隙现象,且纤维分布不均匀。相比之下,图8b为引入横向振动后纤维束浸渍后的预浸带截面形貌。在机械展宽基础上引入横向振动后,纤维单丝分散更加充分,树脂能够有效渗透至纤维束内部,未浸渍区域显著减少。

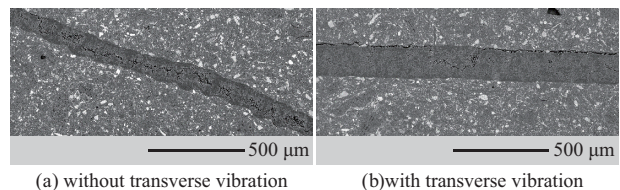


图8 预浸带横截面的SEM照片

Fig. 8 Cross-sectional SEM photos of prepreg tape

3 结论

(1)通过力学分析与动态迭代方法,构建了包含纤维展宽模型和纤维断裂模型的振动展纤理论。模型综合考虑了绕辊摩擦力、纤维单丝间作用力以及纤维张力等因素,为描述振动展纤过程中纤维束的受力提供了理论依据。

(2)纤维张力是影响展纤效果的主导因素,提高张力可显著促进纤维展宽,但也会导致纤维断裂率明显增加;在此基础上,引入横向振动可在不显著增加纤维断裂的前提下进一步提升纤维展宽效果,其中振动幅度主要影响展宽宽度,振动频率对纤维分散均匀度具有显著改善作用。

(3)通过自主搭建的振动展纤实验装置对理论

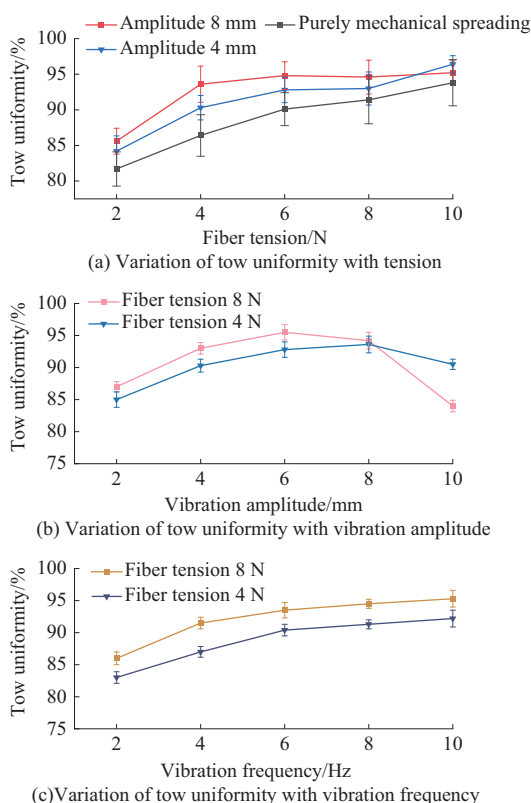


图7 振动参数对纤维均匀度的影响

Fig. 7 Effect of vibration parameters on fiber tow uniformity

模型进行了验证。结果表明,所建立模型能够较好地反映振动展纤过程中纤维束展宽、均匀度及断裂的变化趋势。经工艺参数优化后,12K碳纤维束可稳定展宽至15.2 mm,纤维均匀度达到95.3%,纤维断裂率控制在0.43%以内。

(4)与传统纯机械展纤方式相比,机械-振动展纤方法在相同纤维断裂水平下可实现更大的展宽宽度和更高的纤维分散均匀度,且拓宽了工艺窗口,降低了单纯依赖高张力实现展宽所带来的断纤风险。

参考文献

- [1] ZHUO P, LI S G, ASHCROFT I A, et al. Continuous fibre composite 3D printing with pultruded carbon/PA6 commingled fibres: Processing and mechanical properties[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 221. DOI: 10.1016/J.COMPOSITECH.2022.109341.
- [2] YUAN J J, SHEN D J. Seismic performance of corroded reinforced concrete columns strengthened with basalt fiber sheets[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(11). DOI:10.3390/APP12115611.
- [3] CHOI W S, KIM K H, KIM S Y. Optimized mechanical properties of carbon fiber reinforced thermoplastics by tuning polymer chain length based on quad-screw extrusion[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(16):15 228–15 235.
- [4] KIRCHHOFF J, GHATTAS O, TEHRANI M. Resin percolation and intimate contact in fast processing of thermoplastic composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 182. DOI:10.1016/J.COMPOSITESA.2024.108145.
- [5] CHEN Y L, HUI Y B, ZHU D J, et al. Study on thin lamination of carbon fiber based on mechanical broadening[J]. *Materials*, 2024, 17(5). DOI:10.3390/MA17051103.
- [6] YANG X B, ZHAN L H, PENG Y F, et al. Interface controlled micro-and macro-mechanical properties of vibration processed carbon fiber/epoxy composites[J]. *Polymers*, 2021, 13(16). DOI: 10.3390/POLYM13162764.
- [7] MORADI A, SUN C Z, GUAN Z W, et al. Technology for lateral spreading of fibre bundles for applications in manufacturing thermoplastic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 167. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2022.107422.
- [8] 牛雪娟, 徐妍慧. 气流展纤工艺中不同压差和送丝速度对碳纤维展宽的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2023, 53(4):97–102.
NIU Xuejuan, XU Yanhui. The influence of different pressure difference and feeding speed on the expansion of carbon fiber in the process of air flow spreading[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2023, 53(4):97–102.
- [9] 谭晶, 万凯, 吴雪松, 等. 碳纤维气流展纤工艺研究及均匀性分析[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(7):100–104, 128.
TAN Jing, WAN Kai, WU Xuesong, et al. Research on carbon fiber airflow spreading technology and uniformity analysis[J]. *Composites Science and Engineering*, 2024(7):100–104, 128.
- [10] 束静, 廖文和, 郑侃, 等. 旋转超声加工碳纤维复合材料研究现状与展望[J]. *航空学报*, 2024, 45(13):108–132.
SHU Jing, LIAO Wenhe, ZHENG Kan, et al. Review on rotary ultrasonic machining of carbon fiber composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(13):108–132.
- [11] WILSON S D R. Lateral spreading of fibre tows[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 1997, 32(1):19–26.
- [12] IRFAN M S, MACHAVARAM V R, MAHENDRAN R S, et al. Lateral spreading of a fiber bundle via mechanical means[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(3):311–330.
- [13] 冯一川, 傅增祥, 曹兵妥, 等. 纤维束展宽宽度的理论计算[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(7):1 489–1 491, 1 507.
FENG Yichuan, FU Zengxiang, CAO Bingtuo, et al. Theoretical calculation of fibre bundle spreading width[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(7):1 489–1 491, 1 507.
- [14] 高心玥, 蒋金华, 陈南梁. 大丝束碳纤维展纱技术研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(8):17–27.
GAO Xinyue, JIANG Jinhua, CHEN Nanliang. Research progress of large tow carbon fiber spreading technology[J]. *Technical Textiles*, 2024, 42(8):17–27.
- [15] 王明欢, 刘袁媛, 徐然, 等. 振动喷吹展纤工艺参数对碳纤维展纤效果影响的研究[J]. *中国塑料*, 2023, 37(12):47–53.
WANG Minghuan, LIU Yuanyuan, XU Ran, et al. Effect of vibration blow spreading process parameters on spreading effectiveness of carbon fiber[J]. *China Plastics*, 2023, 37(12):47–53.
- [16] 徐然, 许文翀, 王明欢, 等. 机械辊子上纤维束展宽模型的建立[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(5):2 704–2 712.
XU Ran, XU Wenchong, WANG Minghuan, et al. Establishment of fiber tow spreading model on mechanical rollers[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2024, 41(5):2 704–2 712.
- [17] ZHOU Q H, WU G Z, WANG Z X, et al. Analysis and prediction of the width of spreading carbon fiber tow based on gray system theory[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(12). DOI:10.1002/app.50069.
- [18] 王伟民. 绳绕圆柱体的摩擦力分析[J]. *物理教师*, 2014, 35(10):65–66.
WANG Weimin. Friction analysis of rope around cylinder[J]. *Physics Teacher*, 2014, 35(10):65–66.
- [19] NAITO K, NAGAI C, KAWASAKI S. Tensile properties and weibull modulus of polymeric-fiber-reinforced epoxy-impregnated bundle composites[J]. *Journal of Composites Science*, 2024, 8(10). DOI:10.3390/JCS8100390.