

# 大丝束碳纤维展纱工艺参数对展纱宽度和纤维断裂率的影响

高心玥<sup>a,b</sup> 肖遥<sup>a,b</sup> 蒋金华<sup>a,b</sup> 陈南梁<sup>a,b</sup> 俞建勇<sup>b,c</sup>

东华大学 a. 产业用纺织品教育部工程研究中心;

b. 纺织学院; c. 纺织科技创新中心, 上海 201620

**摘要:**为探究大丝束碳纤维机械辊展纱过程中工艺参数对展纱宽度和纤维断裂率的影响,首先在展纱设备参数调节范围内设计单因素试验,初步探究各工艺参数对展纱宽度的影响,并为响应面分析试验筛选合适的因素并确定参数范围。然后,基于筛选的3个关键因素——纤维包角、振动频率和机速,以展纱宽度和纤维断裂率为响应,设计响应面分析试验,分析和优化机械辊展纱工艺参数。研究发现:纤维包角、振动频率和机速对展纱宽度和纤维断裂率均有显著影响,其中纤维包角对展纱宽度和纤维断裂率的影响最显著;交互作用方面,振动频率和机速的交互作用对展纱宽度的影响显著,纤维包角与振动频率的交互作用对纤维断裂率的影响显著。优化结果显示,在试验设定的参数范围内,纤维包角为35.4°、振动频率为8.4 Hz、机速为4 m/min时,展纱宽度和纤维断裂率同时达到最优。

**关键词:**大丝束碳纤维;机械辊展纱;响应面分析;纤维包角;振动频率;机速;展纱宽度;纤维断裂率

中图分类号:TB 332

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)11-0030-10

## Influence of spreading process parameters for large-tow carbon fibers on spreading width and fiber breakage rate

Gao Xinyue<sup>a,b</sup>, Xiao Yao<sup>a,b</sup>, Jiang Jinhua<sup>a,b</sup>, Chen Nanliang<sup>a,b</sup>, Yu Jianyong<sup>b,c</sup>

a. Engineering Research Center of Technical Textile, Ministry of Education, b. College of Textiles,

c. Innovation Center for Textile Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract:** To investigate the influence of process parameters on spreading width and fiber breakage rate during mechanical roller spreading of large-tow carbon fibers, single-factor experiments were firstly designed within the adjustable range of spreading equipment parameters, to preliminarily assess the effects of each parameter on spreading width, and to screen suitable factors and determine their parameter ranges for subsequent response surface analysis. Subsequently, based on three identified key factors – fiber wrapping angle, vibration frequency, and machine speed – response surface analysis experiments were conducted with spreading width and fiber breakage rate as responses to analyze and optimize the mechanical roller spreading process parameters. The study revealed that fiber wrapping angle, vibration frequency, and machine speed significantly influenced

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3704500);中央高校基本科研业务项目(2232023G-06)

收稿日期:2024-04-18

作者简介:高心玥,女,2001年生,在读硕士研究生,研究方向为纺织复合材料,gaoxinyue0922@163.com

通信作者:陈南梁,教授,研究方向为针织技术、产业用纺织品及纺织复合材料,nlch@dhu.edu.cn

both spreading width and fiber breakage rate, with the fiber wrapping angle exerting the most significant impact. Regarding interactions, the interaction between vibration frequency and machine speed significantly affected spreading width, while the interaction between fiber wrapping angle and vibration frequency notably influenced fiber breakage rate. Optimization results indicated that within the tested parameter ranges, optimal spreading width and fiber breakage rate were simultaneously achieved at the fiber wrapping angle of  $35.4^\circ$ , the vibration frequency of 8.4 Hz, and the machine speed of 4 m/min.

**Keywords:** large-tow carbon fiber; mechanical roller spreading; response surface analysis; fiber wrapping angle; vibration frequency; machine speed; spreading width; fiber breakage rate

按照碳纤维束规格的不同,碳纤维可划分为大丝束碳纤维和小丝束碳纤维两类。其中,碳纤维束中纤维单丝根数在 48 000 根(48K)及以上的称之为大丝束碳纤维<sup>[1]</sup>。20 世纪 60 年代至 90 年代,受生产技术限制,大丝束碳纤维的性能远低于小丝束碳纤维,因此该阶段碳纤维的应用主要以小丝束碳纤维为主<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代中期以后,伴随着生产技术的突破,大丝束碳纤维性能不断提升,其拉伸强度能达到 T300 和 T700 碳纤维级别<sup>[3]</sup>,故而逐渐在部分工业用和民用领域取代了生产成本高、价格昂贵的小丝束碳纤维。大丝束碳纤维所具备的高性价比优势促使其在风力发电、汽车轻量化和轨道交通领域的需求量稳步上升<sup>[4-5]</sup>。

但大丝束碳纤维中纤维单丝根数较多,丝束较厚,这使得预浸料制备和复合材料成型过程中树脂

难以均匀浸润纤维束内部,导致出现树脂富集或贫胶现象,最终造成材料力学性能下降<sup>[6]</sup>。此外,纤维单丝之间存在的聚集、扭曲和偏转等现象会使大丝束碳纤维在编织过程中难以均匀铺展,这将导致织物表面出现空隙大、平整度欠佳,以及局部区域单丝密度较高等缺陷。

针对以上问题,大丝束碳纤维需通过展纱(展纤)工序,促使纤维单丝沿宽度方向铺展,减小纤维束厚度,提高纤维单丝的取向度和排列的有序性,进而提高后道树脂的浸润性、分布均匀度及界面结合强度<sup>[7]</sup>。展纱前后效果如图 1 所示。有研究表明,由薄层碳纤维制备的层压板能够有效地抑制基体开裂和分层现象。因此,针对不同厚度的铺层进行设计,可有效减少层合板剪切破坏时纤维断裂和分层损伤,进而提高复合材料的力学性能<sup>[8-10]</sup>。

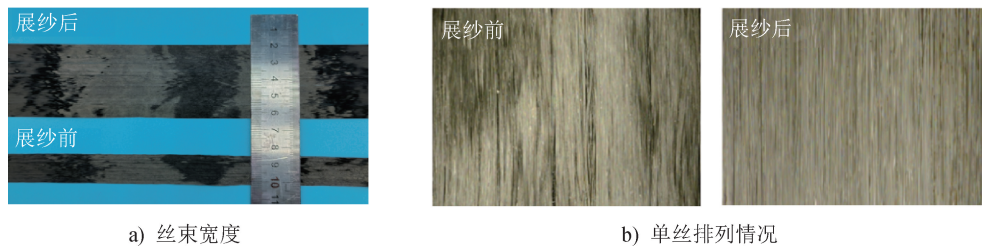


图 1 展纱前后照片  
Fig. 1 Pictures before and after spreading

目前,常用的展纱方法有机械辊展纱<sup>[11]</sup>、气流展纱<sup>[12]</sup>、超声波展纱<sup>[13]</sup>及静电展纱等<sup>[14]</sup>。机械辊展纱通过高温熔化纤维束表面的上浆剂,再利用一系列展纱辊对张紧的纤维束施加挤压、摩擦等作用,促使纤维束在横向分压力的作用下展开。这种展纱方法成本低、操作简单,是企业最常用的展纱方法<sup>[15-16]</sup>。但机械辊展纱对纤维的损伤较大,碳纤维

丝束的展纱质量是影响其后续使用的关键因素<sup>[17]</sup>,因此需在保证碳纤维丝束获得预期展开宽度的前提下,对纤维受损进行控制。目前,有关展纱过程中纤维与展纱辊的包角、振动频率和机速等关键因素的控制及其影响规律尚不明晰,需构建这些展纱关键因素对展纱效果、纱片性能的影响关系。为此,本文在单因素试验的基础上运用响应面分析法,探究机

机械展纱工艺参数及其交互作用对展纱宽度和纤维断裂率的影响,并在试验设定的参数范围内对机械展纱工艺参数进行优化,以期为大丝束碳纤维机械展纱实际生产提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验设备

展纱试验装置(常州市宏发纵横新材料科技股份有限公司)原理如图2所示,其是基于机械展展

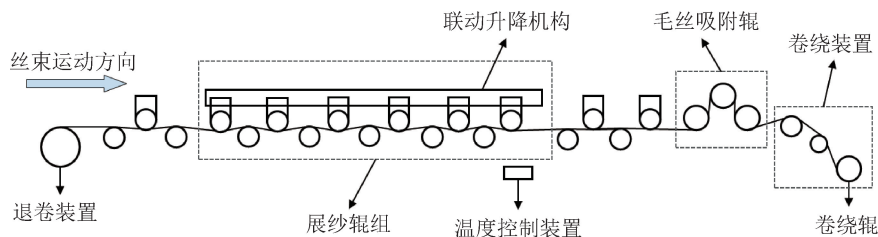


图2 大丝束碳纤维展纱设备示意

Fig. 2 Schematic diagram of large-tow carbon fibers spreading equipment

### 1.2 试验材料

试验选用上海石化 SCF 48K 大丝束碳纤维,纤维束原始宽度为 16 mm,纤维单丝直径为 7 μm,纤维束表面包覆有上浆剂。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 展纱丝束宽度测试

3 根丝束相互间隔地引入展纱区,在卷绕辊前的导辊处使用刻度尺测量丝束宽度,每隔 1 m 测试 1 次,3 个丝束宽度数据为 1 组,并确保有效数据不少于 5 组。最后,取 5 组数据的平均值作为最终的展纱丝束宽度测试结果。

#### 1.3.2 单因素试验设计

展纱过程中,影响展纱宽度的工艺参数有退绕

张力的。该装置主要由退卷装置、展纱辊组和卷绕装置构成。纤维束从退卷装置放出并进入展纱区,在展纱辊组的作用下展开,然后经毛丝吸附辊去除表面毛丝后,被卷绕辊收卷。其中,退卷装置控制纱卷退绕张力不受纱筒直径变化的影响,且始终保持一致;展纱辊组中展纱辊通过左右振动将丝束展开,联动升降机构控制上方展纱辊升降;温度控制装置控制展纱辊温度,并通过高温将纤维束表面的上浆剂熔化;卷绕装置通过提供卷绕张力完成对展纱后丝束纱片的收集。

张力的、机速、振动频率、展纱温度、卷绕张力和纤维包角等。其中,纤维包角是指展纱过程中,纤维束与展纱辊接触时,纤维束在辊表面形成的包围角,如图3所示。本研究根据展纱设备参数的可调节范围设计单因素试验,通过控制单一变量,研究各工艺参数对展纱宽度的影响,并为响应面分析试验筛选出对展纱宽度影响大的因素及其参数范围。单因素试验设计方案如表1所示。

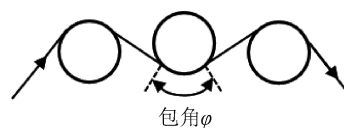


图3 纤维包角示意

Fig. 3 Schematic diagram of fiber wrapping angle

表1 单因素试验设计方案

Tab. 1 Single-factor experimental design scheme

纤维包角/(°)	振动频率/Hz	机速/(m·min <sup>-1</sup> )	展纱温度/°C	退绕张力/cN	卷绕张力/N
20,30,40,50	5.0	6	160	98	88
20	3.3,5.0,6.7,8.4	6	160	98	88
20	5.0	4,6,8,10	160	98	88
20	5.0	6	150,160,170,180	98	88
20	5.0	6	160	88,98,108,118	88
20	5.0	6	160	98	88,108,128,148

### 1.3.3 纤维断裂率测试

展纱过程中,张力和摩擦力的作用会导致单丝断裂。一部分断裂的纤维吸附在展纱辊和传动辊上,一部分在收卷前被毛丝吸附装置<sup>[18-19]</sup>去除,还有一部分未被吸附的断裂纤维残留在纤维束内形成了毛丝。毛丝吸附装置去除断裂纤维的原理如图 4 所示。测试时,取 1 m 长的碳纤维束匀速地从上下叠合的 2 块聚氨酯泡沫块中间通过,同时将 10 N 的砝码放置于上方泡沫块上,用以施加载荷,待碳纤维束完全通过泡沫,毛丝被泡沫块吸附后,用精度为 0.000 1 g 的电子天平称量碳纤维束的质量。利用去除毛丝后的纤维束线密度相对原纤维束线密度的变化率表征展纱过程中的纤维断裂率,其计算方法见式(1):

$$R_b = \left( \frac{T_0 - T_1}{T_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $R_b$  为纤维断裂率;  $T_0$  为原纤维束线密度;  $T_1$  为展纱且去除表面毛丝后的纤维束线密度。

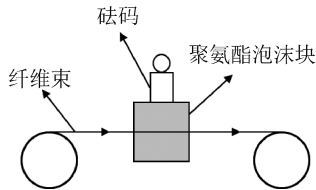


图 4 毛丝吸附装置原理示意

Fig. 4 Schematic diagram of principle of hair filament adsorption device

### 1.3.4 响应面试验设计

根据单因素试验结果优选出关键因素,并以展纱宽度和纤维断裂率为响应,使用 Design Expert 软件设计响应面优化试验,探究工艺参数及工艺参数之间的交互作用对展纱宽度和纤维断裂率影响的显著性,最终得到能够同时满足展纱宽度大、纤维断裂率小的最佳工艺参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 纤维包角对展纱宽度的影响

图 5 反映了纤维包角对展纱宽度的影响,可以看出,在单因素试验过程中,纤维包角与纤维束展纱宽度呈正相关,纤维包角从 20° 增加到 50° 时,展纱

宽度增加了 59.62%。纤维包角为 20° 时,纤维束受到的张力较小,纤维单丝之间的挤压力以及纤维束与展纱辊之间的摩擦力还不足以使纤维束充分展开,展纱宽度相比于原丝束宽度仅增加了 10 mm,展开程度低。随着纤维包角的增大,纤维束受到的张力增大,纤维束与展纱辊之间的摩擦力增大,纤维单丝在振动辊的作用下横向铺展趋势增强。当纤维包角为 50° 时,展纱宽度达到 41.5 mm。但试验过程中发现,纤维包角增大时,展纱辊上残留的断裂纤维明显增多,纤维包角超过 50° 后,纤维束因受到的张力和摩擦力过大,纤维单丝大量断裂,机器无法正常运行。纤维包角对展纱宽度影响大,可通过响应面分析进一步探究纤维包角与其他因素的交互作用对展纱宽度和纤维断裂率的影响,以便选择最佳工艺参数组合。在本研究的后续响应面分析试验中,纤维包角取值 30°、40° 和 50°。

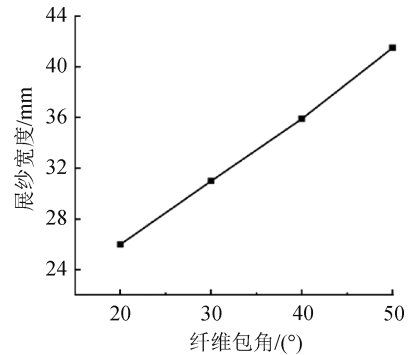


图 5 纤维包角对展纱宽度的影响

Fig. 5 Effect of fiber wrapping angle on spreading width

#### 2.1.2 振动频率对展纱宽度的影响

图 6 反映了振动频率对展纱宽度的影响,可以看出,在单因素试验过程中,振动频率与展纱宽度呈正相关。当振动频率从 3.3 Hz 增加到 8.4 Hz 时,展纱宽度由 23.6 mm 增加到 29.5 mm,增加了 25%。振动辊左右振动时,纤维束底层两侧的单丝受到摩擦力的作用向两侧分散,表层纤维向底层移动,纤维束内单丝层数减少,展纱宽度增大。且振动频率越高,展纱辊每分钟往复运动次数越多,纤维束底层单丝向两侧横向位移的次数增加,展纱宽度增加。但振动频率高于 8.4 Hz 时,单丝会出现“打滑”现象,机器整体也出现了振动,这不利于展纱过程的稳定进行。振动频率对展纱宽度影响较大,可以通过响应面分析试验进一步探究振动频率与其他因素

的最佳数值组合。在后续响应面分析试验中,振动频率取值 5.0、6.7 和 8.4 Hz。

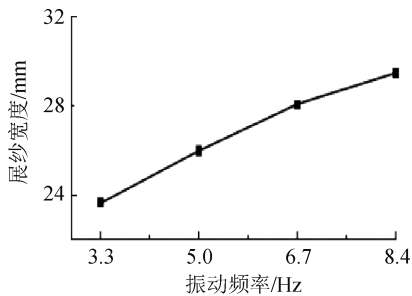


图6 振动频率对展纱宽度的影响

Fig. 6 Effect of vibratin frequency on spreading width

### 2.1.3 机速对展纱宽度的影响

图7反映了机速对展纱宽度的影响,可以看出,机速与纤维束展纱宽度呈负相关。机速从 4 m/min 增加到 10 m/min 时,展纱宽度由 27.8 mm 减小到 23.6 mm,减小了 17.8%。机速减慢,纤维束与展纱辊接触的时间增加<sup>[20]</sup>,单丝在振动辊的摩擦作用下横向运动的次数增加,纤维与振动辊、纤维与纤维之间的作用更充分,展开宽度越大。但机速会直接影响生产效率,故考虑到实际生产需要,机速不宜过慢。机速对展纱宽度影响较大,为了探究展纱宽度大、纤维断裂率小的最佳工艺参数组合,需要进一步对机速进行响应面分析。在后续响应面分析试验中,机速取值 4、6 和 8 m/min。

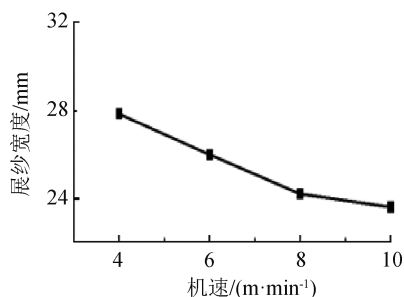


图7 机速对展纱宽度的影响

Fig. 7 Effect of machine speed on spreading width

### 2.1.4 展纱温度对展纱宽度的影响

图8反映了展纱温度对展纱宽度的影响,展纱温度由 150 °C 增加到 180 °C 时,展纱宽度仅增加了 0.9 mm,展纱温度对展纱宽度的影响小,因此不对展纱温度进行响应面分析。纤维束经过展纱区时,展纱辊的高温会通过直接接触传递给纤维束,并使纤维束表面的上浆剂熔化,纤维之间的黏结力减小,

这有利于纤维单丝的分散。但过高的展纱温度可能会对纤维束表面的上浆剂造成破坏,并导致机器能耗增加。结合上述分析,在后续响应面分析试验中,展纱温度固定取值 170 °C。

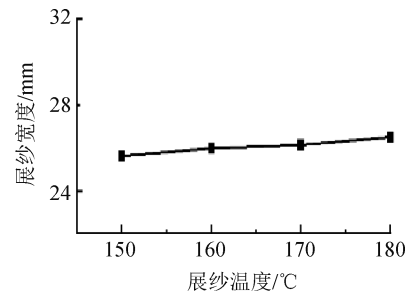


图8 展纱温度对展纱宽度的影响

Fig. 8 Effect of spreading temperature on spreading width

### 2.1.5 退绕张力对展纱宽度的影响

图9反映了退绕张力对展纱宽度的影响。纤维束从纱架处放出,经传动辊引入展纱区时,由于纤维束经过的导辊和展纱辊较多,退绕张力对不同辊之间纤维束张力的影响较小,故对展纱宽度的影响较小。退绕张力主要影响纤维束放出纱筒时的状态。退绕张力大,纤维束进入展纱区之前承受的张力大,单丝之间张力分布不均,单丝之间摩擦力增加,这易造成单丝断裂。在单因素试验过程中,退绕张力从 88 cN 增加到 108 cN 时,展纱宽度在 25.0 mm 和 26.2 mm 之间波动,退绕张力的改变对展纱宽度的影响小,因此不对退绕张力进行响应面分析。在后续响应面分析试验中,退绕张力固定取值 98 cN。

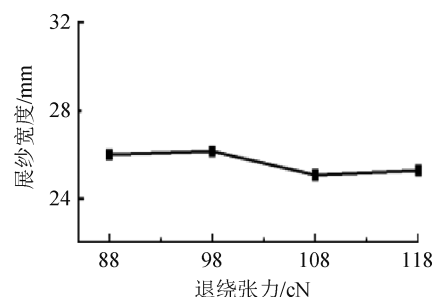


图9 退绕张力对展纱宽度的影响

Fig. 9 Effect of unwinding tension on spreading width

### 2.1.6 卷绕张力对展纱宽度的影响

图10反映了卷绕张力对展纱宽度的影响。卷绕张力对展纱区纤维张力的影响较小,因此对展纱宽度的影响也较小,卷绕张力从 88 N 增加到 148 N 时,展纱宽度在 24.5 mm 和 26.0 mm 之间波动,展

纱宽度较为稳定,因此不选择卷绕张力用于响应面分析。卷绕张力小时,纤维束收卷时未被充分拉紧,单丝易分散,部分区域纤维松弛。卷绕张力大时,纤维束宽度在收卷过程中出现收缩,导致收卷辊上的纤维束宽度小于离开展纱区时的纤维束宽度。且卷绕张力过大时,单丝在收卷过程中受到的张力过大,纤维断裂加剧。结合上述分析,在后续的响应面分析试验中,卷绕张力固定取值 88 N。

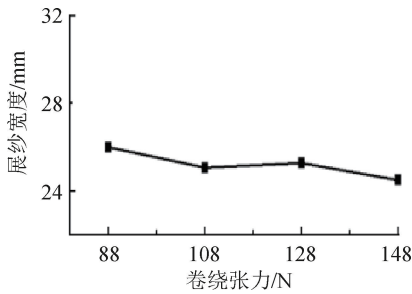


图 10 卷绕张力对展纱宽度的影响  
Fig. 10 Effect of winding tension on spreading width

### 2.1.7 响应面分析试验方案的确定

根据单因素试验结果分析,选择纤维包角、振动频率和机速 3 个因素进行后续响应面分析试验,温度、退绕张力和卷绕张力在响应面分析试验中为固定值,分别设定为 170 °C、98 cN 和 88 N。响应面分析试验设计方案如表 2 所示。

表 2 响应面分析试验设计方案

Tab. 2 Experimental design scheme for response surface analysis

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	纤维包角/(°)	振动频率/Hz	机速/(m·min <sup>-1</sup> )
-1	30	5.0	4
0	40	6.7	6
1	50	8.4	8

## 2.2 响应面分析试验结果

根据表 2 的设计方案,以展纱宽度和纤维断裂率为响应,使用 Design Expert 软件设计响应面分析试验,结果如表 3 所示。

### 2.2.1 工艺参数对展纱宽度的影响

通过 Design Expert 软件对展纱宽度试验数据进行拟合分析,得到的结果如表 4 所示。

由表 4 可知,该二次方模型的  $P$  值 < 0.000 1,失拟项的  $P$  值 > 0.05,说明该模型显著且模型与试验

表 3 响应面分析试验结果

Tab. 3 Experimental results of response surface analysis

序号	因素 A	因素 B	因素 C	响应	
	纤维包角/(°)	振动频率/Hz	机速/(m·min <sup>-1</sup> )	展纱宽度/mm	纤维断裂率/%
1	40	5.0	8	34.7	0.54
2	50	6.7	8	43.1	1.67
3	40	8.4	8	37.0	0.92
4	40	8.4	4	44.7	1.18
5	40	6.7	6	37.0	0.72
6	40	5.0	4	38.1	0.78
7	50	5.0	6	42.9	1.33
8	40	6.7	6	36.0	0.63
9	50	8.4	6	47.0	1.87
10	30	6.7	4	37.1	0.58
11	40	6.7	6	36.5	0.81
12	30	5.0	6	31.5	0.34
13	40	6.7	6	38.0	0.74
14	30	8.4	6	36.2	0.50
15	30	6.7	8	32.0	0.46
16	40	6.7	6	37.2	0.74
17	50	6.7	4	46.5	1.71

数据拟合较好。由二次方函数拟合得到的展纱宽度 ( $W$ ) 的传递函数模型为:

$$W = 36.94 + 5.34 \times A + 2.21 \times B - 2.45 \times C - 0.15 \times AB + 0.425 \times AC - 1.08 \times BC + 1.75 \times A^2 + 0.705 \times B^2 + 0.98 \times C^2$$

由各单因素的  $P$  值大小可知,纤维包角、振动频率、机速对展纱宽度的影响皆非常显著。由  $F$  值大小可知,机械展纱过程中,各单因素对纤维束展纱宽度的影响程度依次为纤维包角 > 机速 > 振动频率。

两因素间的交互作用对展纱宽度的影响规律如图 11 所示,可以看出:纤维包角与振动频率、机速的交互关系  $AB$ 、 $AC$  对展纱宽度的影响不显著,振动频率和机速的交互作用  $BC$  对展纱宽度的影响显著。其中,由图 11c) 可以看出:高机速时,振动频率的增加对展纱宽度的影响较小;低机速时,提高振动频率能显著增大展纱宽度。这是因为低机速时,纤维束在展纱区停留的时间更长,振动辊的振动能量有充足的时间传递到纤维束上,因此低机速时提高振动频率能够进一步促进纤维束的展开。

### 2.2.2 工艺参数对纤维断裂率的影响

通过 Design Expert 软件对纤维断裂率试验数据进行拟合分析,得到的结果如表 5 所示。

表 4 纤维束展纱宽度的二次方模型方差分析

Tab. 4 Quadratic model ANOVA for fiber bundle spreading width

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	341.46	9	37.94	76.33	<0.000 1	非常显著
纤维包角(A)	227.91	1	227.91	458.51	<0.000 1	非常显著
振动频率(B)	39.16	1	39.16	78.78	<0.000 1	非常显著
机速(C)	48.02	1	48.02	96.61	<0.000 1	非常显著
AB	0.090 0	1	0.090 0	0.181 1	0.683 2	
AC	0.722 5	1	0.722 5	1.45	0.267 1	
BC	4.62	1	4.62	9.30	0.018 6	显著
A <sup>2</sup>	12.97	1	12.97	26.09	0.001 4	非常显著
B <sup>2</sup>	2.09	1	2.09	4.21	0.079 3	
C <sup>2</sup>	4.04	1	4.04	8.14	0.024 6	显著
残差	3.48	7	0.497 1			
失拟性	1.21	3	0.402 5	0.708 6	0.595 3	不显著
纯误差	2.27	4	0.568 0			
总差	344.94	16				

表 5 纤维断裂率的二次方模型方差分析

Tab. 5 Quadratic model ANOVA for fiber breakage rate

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3.53	9	0.391 9	77.99	<0.000 1	非常显著
纤维包角(A)	2.76	1	2.76	549.42	<0.000 1	非常显著
振动频率(B)	0.273 8	1	0.273 8	54.48	0.000 2	非常显著
机速(C)	0.054 5	1	0.054 5	10.83	0.013 3	显著
AB	0.036 1	1	0.036 1	7.18	0.031 5	显著
AC	0.001 6	1	0.001 3	0.318 4	0.590 2	
BC	0.000 1	1	0.000 1	0.019 9	0.891 8	
A <sup>2</sup>	0.316 1	1	0.316	62.90	<0.000 1	非常显著
B <sup>2</sup>	0.002 4	1	0.002 4	0.482 6	0.509 7	
C <sup>2</sup>	0.059	1	0.059	11.86	0.010 8	显著
残差	0.035 2	7	0.005			
失拟性	0.015 3	3	0.005 1	1.03	0.470 1	不显著
纯误差	0.019 9	4	0.005 50			
总差	3.56	16				

由表 5 可知,该二次方模型的  $P$  值  $<0.000 1$ ,失拟项的  $P$  值  $>0.05$ ,说明该模型显著且模型与试验数据拟合较好。由二次方函数拟合得到的纤维断裂率( $R_b$ )的传递函数模型为:

$$R_b = 0.712 + 0.587 5 \times A + 0.185 \times B - 0.082 5 \times C + 0.095 \times AB + 0.02 \times AC - 0.005 \times BC + 0.274 \times A^2 + 0.024 \times B^2 + 0.119 \times C^2$$

由各单因素的  $P$  值大小可知,机械辊展纱过程中,纤维包角、振动频率对纤维断裂率的影响非常显著,机速对纤维断裂率的影响显著。由  $F$  值大小可知,机械展纱过程中,各单因素对纤维断裂率的影响

程度依次为纤维包角>振动频率>机速。纤维包角增大,纤维束与展纱辊的接触面积,以及受到的张力和摩擦力增大,一方面这有利于纤维束的展开,底层纤维向外扩散,表层纤维大量向里层塌陷,但另一方面也会导致与展纱辊直接接触的单丝数量增加,断裂的单丝增多。振动频率越大,纤维受到振动辊摩擦的次数越多,单丝断裂数量增加。机速增加,纤维断裂率先减小后增加。机速较小时,纤维束在展纱区停留的时间更长,单丝受到的累积应力更大,纤维断裂数量增加。

两因素间的交互作用对纤维断裂率的影响规律如图 12 所示。纤维包角和振动频率的交互作用  $AB$

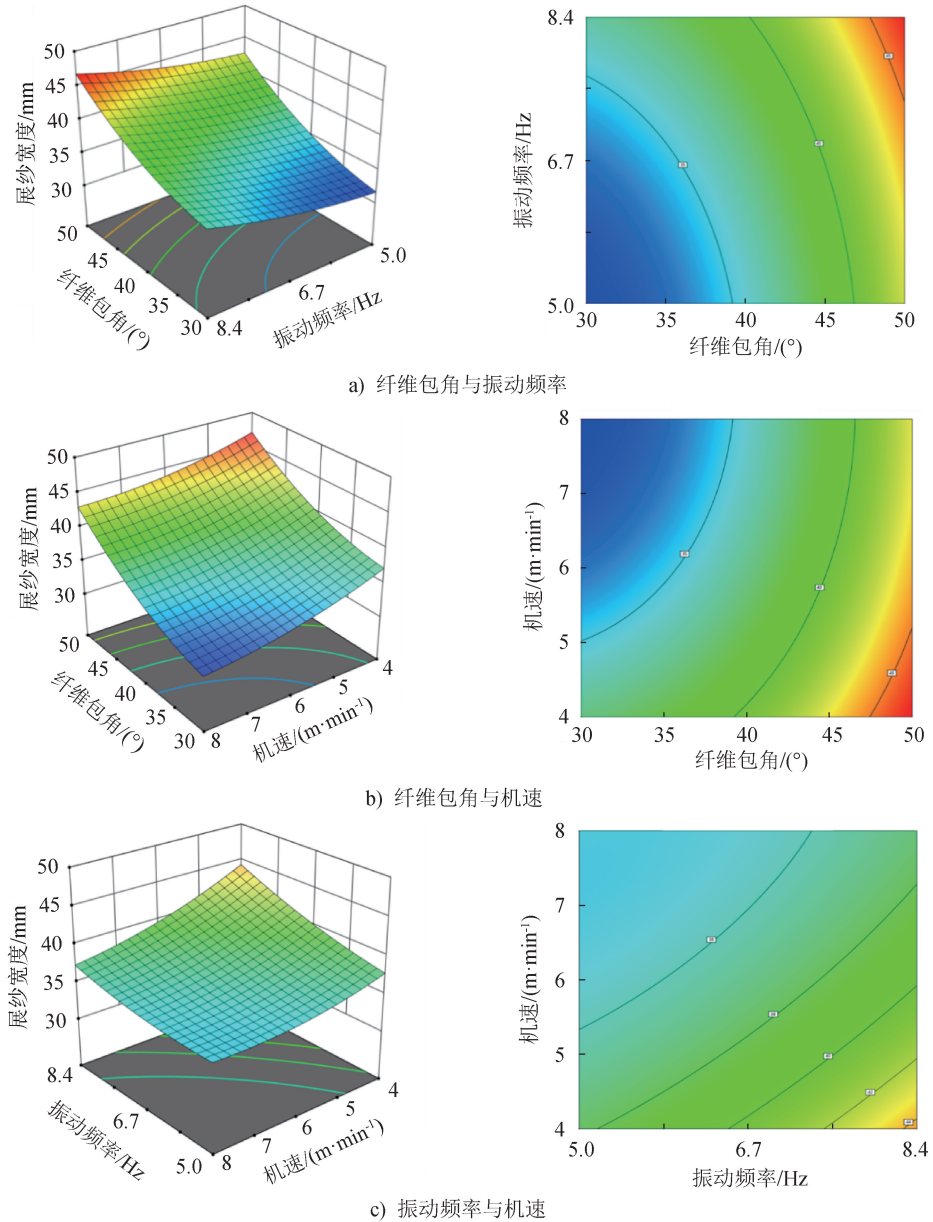


图 11 两因素间的交互作用对展纱宽度的影响

Fig. 11 Effect of the interaction between two factors on the spreading width

对纤维断裂率的影响显著,纤维包角和机速以及振动频率与机速的交互作用  $AC$ 、 $BC$  对纤维断裂率的影响不显著。其中,由图 12a)可知,纤维包角越大,振动频率增大对纤维断裂率的影响越大。纤维包角为  $50^\circ$  时,随振动频率增大,纤维断裂率显著增加。这是因为,大纤维包角条件下,纤维束受到的张力较大,其与振动辊之间的摩擦力大,单丝更易跟随振动辊向两侧运动,单丝形变增加,进一步使得纤维受到的张力和剪切应力增大,纤维更易发生断裂。因此,大纤维包角、高振动频率条件下,纤维断裂率相比于

小纤维包角、高振动频率条件下的提高显著。

### 2.2.3 最优展纱工艺

根据响应面分析结果可知,在纤维包角、振动频率和机速这 3 个关键因素中,纤维包角对展纱宽度和纤维断裂率的影响最大。纤维包角和振动频率与展纱宽度、纤维断裂率呈正相关,而且纤维包角和振动频率的交互作用对纤维断裂率影响显著,纤维包角和振动频率增大都能提高展纱宽度,但纤维断裂率也会增加。因此,实际生产中,提高纤维包角时可适当降低振动频率,以减轻对纤维束的损伤,获得所

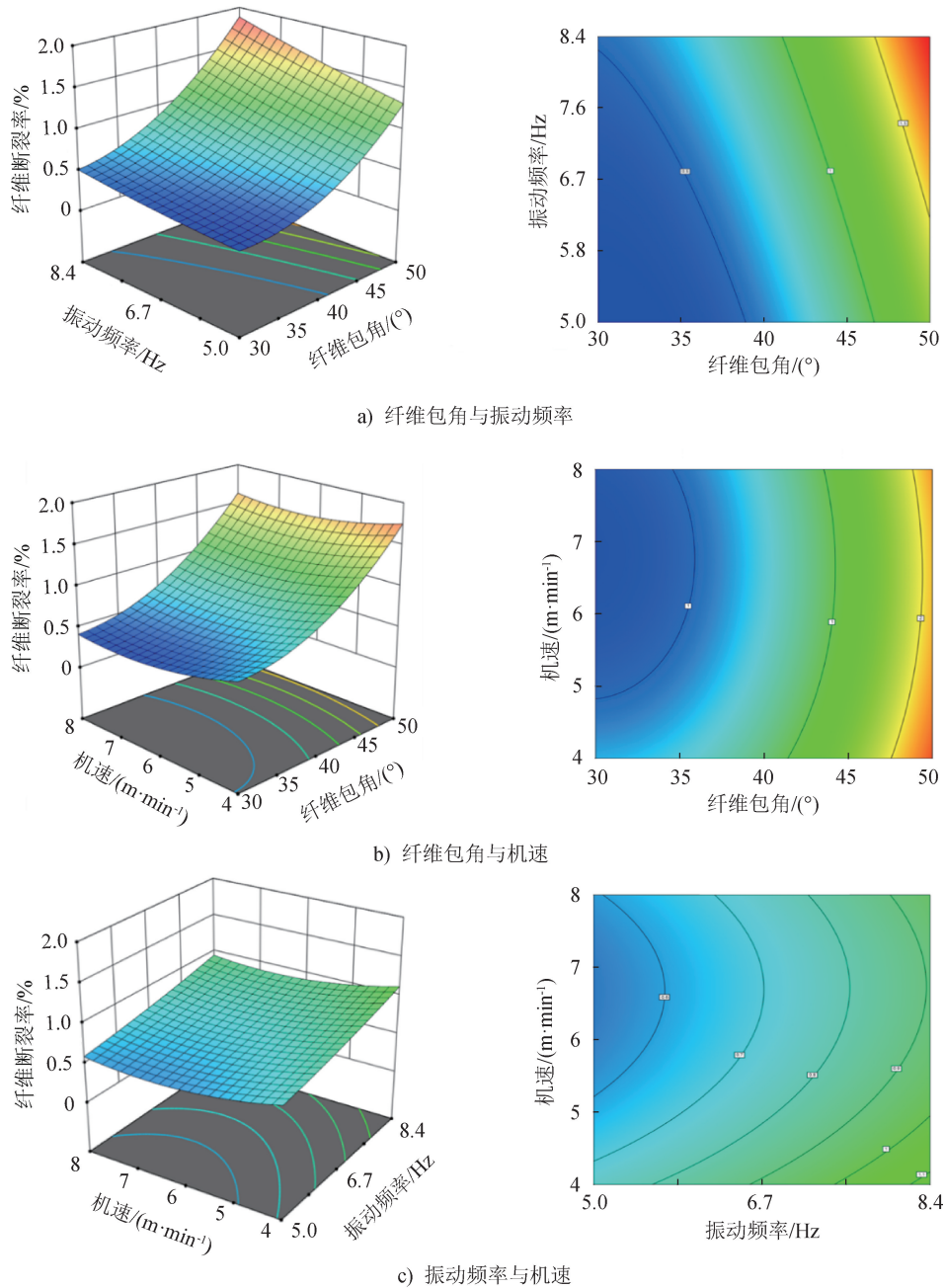


图 12 两因素间的交互作用对纤维断裂率的影响  
Fig. 12 Effect of the interaction between two factors on the fiber breakage rate

需宽度的展纤纱。振动频率和机速的交互作用对展纱宽度影响显著,可根据实际生产需求在调整机速时同步调整振动频率。

总之,根据响应面法对关键因素进行的优化试验可知,在本研究设定的参数范围内,且满足展纱宽度大于 35 mm 的条件下,当纤维包角为 35.4°、振动频率为 8.4 Hz、机速为 4 m/min 时,展纱宽度和纤维断裂率同时达到最优。

### 3 结论

(1) 根据单因素试验结果发现,纤维包角和振动频率与展纱宽度呈正相关,机速与展纱宽度呈负相关。纤维包角、振动频率和机速 3 个因素对展纱宽度的影响大,一定范围内增大纤维包角和振动频率、减小机速有利于提高展纱宽度。展纱温度、卷绕

张力和退绕张力对展纱宽度的影响较小,因此选择纤维包角、振动频率和机速进行响应面分析试验。

(2)根据响应面分析试验结果发现,纤维包角、振动频率及机速对展纱宽度和纤维断裂率均有显著影响,振动频率和机速的交互作用对展纱宽度的影响显著,纤维包角和振动频率的交互作用对纤维断裂率的影响显著。实际生产过程中,可以通过合理地调整 3 个工艺参数以满足生产不同宽度的展纱需要,减少纤维损伤。



期刊采编平台

中国知网下载

### 参考文献

- [ 1 ] 吉用秋,俞成涛,邱睿,等.大丝束碳纤维产业发展现状及面临的问题[J].合成纤维工业,2019,42(3):64-68.
- [ 2 ] 徐爱武,梁燕,蒋玲玲.大丝束碳纤维发展现状及我国技术瓶颈和发展建议[J].合成纤维,2020,49(6):19-23.
- [ 3 ] 彭公秋,李国丽,石峰晖,等.国产聚丙烯腈基大丝束碳纤维发展现状与分析[J].高科技纤维与应用,2021,46(6):11-16.
- [ 4 ] 陈秋飞,林康,刘栋,等.大丝束碳纤维国内外研究现状[J].高科技纤维与应用,2023,48(6):13-17.
- [ 5 ] 高硕,周邦泽,何梦瑶,等.碳纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺[J].产业用纺织品,2023,41(12):6-19.
- [ 6 ] 罗云烽,孙永春,段跃新,等.薄层化大丝束碳纤维复合材料性能研究[J].航空制造技术,2010,50(20):75-78.
- [ 7 ] ZHANG C, LING Y Q, ZHANG X Q, et al. Ultra-thin carbon fiber reinforced carbon nanotubes modified epoxy composites with superior mechanical and electrical properties for the aerospace field[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 163: 107197.
- [ 8 ] BALAGA U K, GARGITTER V, YARLAGADDA S, et al. Influence of ply thickness on transverse cracking onset, damage progression in thin ply composites and impact on mechanical performance [ J ]. Composite Structures, 2025, 354: 118827.
- [ 9 ] ZHENG K D, HU H X, CAO D F, et al. Experimental and numerical studies on the tensile behaviors of thin-ply and thick-ply open-hole laminates [ J ]. Thin-Walled Structures, 2023, 186: 110649.
- [ 10 ] LI X Y, YUAN Y N. Hybrid and gradient design of ultra-thin-ply composite laminates for synergistic suppression of delamination and fiber fracture damage modes [ J ]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 295: 109822.
- [ 11 ] 罗云烽,孙永春,段跃新,等.大丝束碳纤维薄层化技术[J].复合材料学报,2010,27(1):123-128.
- [ 12 ] SIHN S, KIM R Y, KAWABE K, et al. Experimental studies of thin-ply laminated composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(6):996-1008.
- [ 13 ] 徐挺,肖军,闫西涛,等.超声辅助纤维束展纱效果研究[J].玻璃纤维,2015(5):10-14.
- [ 14 ] 刘雪强,张长琦,杨涵,等.一种大丝束连续碳纤维的展纱设备:CN115787167A [ P ]. 2023-03-14.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 郝傲松.碳纤维展纱及展纱织物复合材料制备与性能研究[D].上海:东华大学,2018.
- [ 17 ] 钱小敏,甘学辉,刘香玉,等.基于邻域去噪及图像差分的碳纤维丝束展宽表面缺陷检测[J].东华大学学报(自然科学版),2024,50(6):120-125.
- [ 18 ] 李潭,顾轶卓,王绍凯,等.碳纤维丝束起毛量测试方法[J].材料工程,2017,45(7):84-90.
- [ 19 ] ZHANG X Q, ZHANG C, SUN T, et al. Mechanical properties and failure mechanism of spreading carbon fiber reinforced different lateral dimension of graphene oxide modified epoxy composites [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138332.
- [ 20 ] 李新帅,文立伟,邓朱海,等.一种热熔法制备预浸纱的展开宽度控制方法[J].材料导报,2022,36(6):230-234.

欢迎订阅《产业用纺织品》《国际纺织导报》