

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.014

工艺参数对CCF/PEEK预浸料单束铺放尺寸的影响

包蒙哲^{1,2}, 任永新^{1,2}, 刘晓军^{1,2}, 邹爱玲^{1,2}, 姜稀腴^{1,2}

(1.北京机科国创轻量化科学研究院有限公司,北京 100083;

2.机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备全国重点实验室,北京 100044)

摘要: 热塑性预浸料铺放过程中单丝束尺寸对整体构件铺放质量有重要影响,为提高连续碳纤维增强聚醚醚酮(CCF/PEEK)复合丝材铺放成型质量,研究了工艺参数对其在铺放过程中的单束宽度和厚度的影响规律,并根据实验结果建立拟合模型。首先设计正交实验,研究了铺放速度、铺放压力、加热温度等铺放工艺参数对CCF/PEEK预浸料宽度和厚度变化的影响规律,并由上述研究所得的影响宽度和厚度的最显著工艺参数,分别开展单因素实验研究。正交研究结果表明,各工艺参数对丝束宽度的影响显著程度依次为加热温度>铺放速度>铺放压力,对丝束厚度的影响显著程度依次为铺放压力>加热温度>铺放速度。单因素实验结果表明,在丝束不发生失效的工艺参数范围内,丝束宽度随加热温度的升高而增大,随铺放速度的提高而减小,随铺放压力的增大而增大。丝束厚度随铺放压力的增大而减小。采用多元线性回归方法对各工艺参数综合影响丝束宽度进行拟合,验证计算结果表明,建立的模型拟合效果较好。

关键词: 自动铺丝;正交实验;连续碳纤维;聚醚醚酮;复合材料;工艺参数

中图分类号: TH145.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0083-08

Effect of process parameters on the lay-up size of single bundle of CCF/PEEK preregs

BAO Mengzhe^{1,2}, REN Yongxin^{1,2}, LIU Xiaojun^{1,2}, ZOU Ailing^{1,2}, JIANG Xibin^{1,2}

(1. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment of China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract : The single filament bundle size during the lay-up process of thermoplastic prepreg has an important influence on the lay-up quality of the overall component. In order to improve the lay-up molding quality of continuous carbon fiber reinforced polyether ether ketone (CCF/PEEK) composites, the influence laws of the process parameters on the width and thickness of the lay-up process were investigated, and the fitting model was established based on the experimental results. Firstly, orthogonal experiments were designed to study the influence laws of lay-up process parameters such as laying speed, compaction force, and heating temperature on the changes of width and thickness of CCF/PEEK prepreg, in addition, the most significant process parameters affecting width and thickness obtained from the above studies were subjected to single-factor experimental studies respectively. The results of orthogonal study show that the significant degree of influence of each process parameter on the width of the filament bundle is heating temperature>laying speed>compaction force, and the significant degree of influence on the thickness of the filament bundle is compaction force>heating temperature>laying speed. The results of the single-factor experiments show that within the range of process parameters where no defect occurs, the width of prepreg increases with the increase of heating temperature, decreases with the increase of laying speed, and increases with the increase of compaction force. The thickness of prepreg decreases with increasing compaction force. Multiple linear regression method is used to fit the comprehensive effect of each process parameter on the width of the prepreg, and the validation calculation results show that the established model has a good fitting effect.

Keywords : automated fiber placement ; orthogonal experiment ; continuous carbon fiber ; polyether ether ketone ; composite materials ; process parameter

基金项目: 国防科技基础加强计划项目,中国机械科学研究总院集团有限公司技术发展基金项目(332201Q9,332301Q9)

通信作者: 任永新,博士,研究员,研究方向为复合材料成形技术及装备

收稿日期: 2024-02-01

引用格式: 包蒙哲,任永新,刘晓军,等.工艺参数对CCF/PEEK预浸料单束铺放尺寸的影响[J].工程塑料应用,2024,52(3):83-90.

BAO Mengzhe, REN Yongxin, LIU Xiaojun, et al. Effect of process parameters on the lay-up size of single bundle of CCF/PEEK preregs [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 83-90.

复合材料的成型方法主要包括热压罐成型、缠绕成型以及自动铺放成型等技术^[1-3],其中自动铺放成型技术当中的自动铺丝技术为近年来发展最快的成型技术,其装置原理如图1所示。在自动铺丝过程中,铺丝头接收来自纱架装置的不定数量的预浸丝束并将其传送到内部的导向机构,在内部剪切机构及夹紧重送机构的配合下灵活控制每根预浸丝束的输送及切断,随后将丝束送至铺放压辊下集合成为一条宽度可变的复合材料预浸带,按照预先规划的铺放路径经热源加热后铺放到模具表面,由铺放压辊进行压实从而完成预浸带的成型,以实现对各种形状模具表面的铺放。相较于传统的复合材料成型技术,自动铺丝技术成型过程的自动化程度及灵活性更高,在加工制造大型复材零部件、降本增效等方面具有巨大的潜力,因而成为一个充满前景的研究方向。

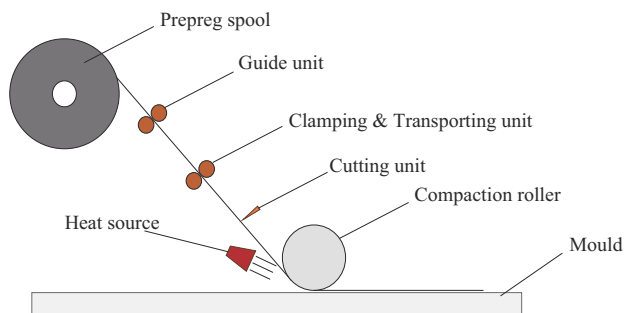


图1 自动铺丝工艺装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of automated fiber placement device

应用自动铺放成型技术制造的复合材料构件,其成型质量很大程度上受铺放工艺影响,其中,成型温度、铺放压力、铺放速度等工艺参数的影响尤为重要^[4]。相关学者已针对铺放工艺参数对成型效果的影响开展一系列研究,Venkatesan等^[5]基于红外辅助加热自动铺放系统研究了压实力、加热温度及压辊材料对于铺放样品力学性能及热性能的综合影响,并得到了不同材料压辊对应的最优成型工艺参数。Heider等^[6-7]分析了铺放温度、铺放速度、铺放压力、模具温度等对铺放效果的影响机理,建立了相关的数学模型并基于神经网络分析预测了最优的工艺参数,随后进行了实验验证。Khan等^[8]探究了加热温度、模具温度、铺放速度及固结力等参数对铺放样品力学性能的影响,并结合数学模型及实验验证对相关工艺参数进行了优化。宋清华等^[9]基于响应曲面法的理论分析探究了不同加热温度、热压辊压力、冷压辊压力的单独及交互作用对试件

层间剪切强度的影响,并经过实验分析得到了最优层间剪切强度的工艺参数组合。徐建等^[10]以碳纤维增强环氧树脂基预浸料为研究材料,探究铺放压力、铺放温度两种工艺参数对于预浸丝束宽度的影响,并得到适配于实验装置的最优铺放工艺参数。

复合材料在自动铺放过程中,预浸丝束在热源加热及压辊施压的条件下会发生变形。理想情况下,铺放的相邻丝束之间应既没有间隙又不产生重叠,这样能够保证铺层厚度一致、树脂分布均匀,有利于提高铺放制品的成型质量,其在数学上表示为预浸丝束宽度 w 与相邻两条预浸丝束中心距离 d 的关系为 $w=d$,如图2a所示。而在实际的铺放过程中,不同的铺放工艺参数会使预浸丝束产生不同程度的变形,从而使 w 与 d 之间的大小关系发生变化。当 $w<d$ 时,相邻两丝束间的空隙严重影响铺放制品力学性能,如图2b所示。当 $w>d$ 时,丝束间出现搭接缺陷,如图2c所示。相邻两丝束间的搭接虽在局部加强了铺放制品强度,但也由此导致铺层厚度不均,使得搭接丝束周围伴随产生间隙,由此形成富树脂区及贫树脂区。当铺放构件承受较大载荷时,贫树脂区处出现应力集中,从而也会影响铺放制品的力学性能^[11-13]。因此,预浸丝束在铺放过程中的宽度和厚度的尺寸变化会极大影响铺放质量。对复合材料自动铺丝工艺参数对预浸料宽度、厚度变化的影响进行研究,有利于选择合适的工艺参数,调控丝束铺放过程的宽度、厚度变化,从而减小最终复合材料构件的应力集中,提高铺放制品成型质量,也可为铺放装置的设计,为相邻两丝束送丝间距的设定提供参考,具有重要的理论与实用价值。

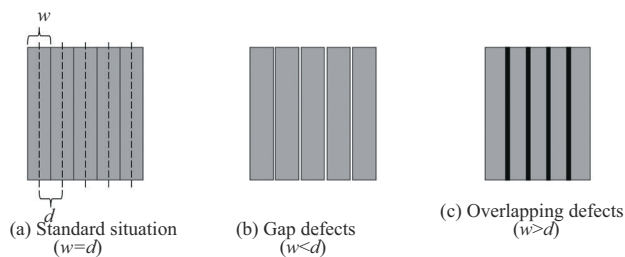


图2 丝束宽度 w 与丝束中心距离 d 不同情况对比

Fig. 2 Comparison of different cases of width of prepreg and center distance of prepreg

前人对预浸丝束铺放变形的研究多集中在热固性复合材料,而热塑性复合材料具有对铺放温度的敏感性更强、铺放适宜工艺窗口更小等特点,相关研究较少。聚醚醚酮(PEEK)基连续纤维增强复

合材料作为热塑性复合材料的一种,具有耐高温、抗疲劳、力学性能好、韧性及耐化学腐蚀性好等优势。其连续使用温度可超过260℃,负载热变形温度可达316℃,在医疗器械、航空航天等领域均得到了广泛应用^[14-16]。

基于有关铺放丝束尺寸影响因素的研究较少并且缺乏工艺参数对丝束变形影响显著程度的对比,笔者以连续碳纤维(CCF)/PEEK复合丝材为研究材料,通过理论分析与正交实验测试的方式研究了加热温度、铺放速度、铺放压力等铺放工艺参数对CCF/PEEK预浸丝束在铺放到模具后的宽度、厚度等铺放尺寸变化情况的影响,并设置单因素实验探究了不同工艺参数对CCF/PEEK预浸丝束宽度变化的影响趋势。该研究成果可对CCF/PEEK复合丝材原位铺放成型过程的变形进行合理预测,为控制或减少构件的应力集中提供理论基础,为铺丝机构的送丝间距设计及铺放工艺与铺放路径的协同控制提供理论指导,具有重要的工程意义。

1 实验部分

1.1 实验材料与装置

1.1.1 实验材料

实验采用的预浸丝束为江苏亨博复合材料有限公司生产的6.35 mm宽HB90-T700型CCF/PEEK预浸丝,采用模具为45°钢材质平面模具,实验预浸丝束的性能列于表1。

表1 CCF/PEEK性能

Tab. 1 Properties of CCF/PEEK

Parameter	Value
Specific heat capacity (C)/[J·(kg·°C) ⁻¹]	1 425
Density (ρ)/(kg·m ⁻³)	1 560
Resin content by weight/%	33
Melting point (T _m)/°C	343
Width (d)/mm	6.35
Thickness (h)/mm	0.18

1.1.2 实验装置

热塑性复合材料自动铺丝原理样机:总体结构包含丝束导送模块、丝束剪切模块、丝束夹紧重送模块、加热模块和施压冷却模块,加热模块采用的加热方式为热风加热,北京机科国创轻量化科学研究院有限公司;

六自由度机械臂:IRB-6700,瑞士ABB公司;

压力传感器:HZC-H1-100KG,蚌埠思诺传感器有限公司;

超声波位置传感器:LGCB1000-18GM-D1-

V15,浙江罗姆智能科技有限公司;

热电偶温度传感器:K,上海松导加热传感器有限公司;

数据采集卡:USB-1252A,北京思迈科华技术有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验参数确定

为了研究热塑性复合材料自动铺丝工艺参数对预浸料宽度\厚度变化的影响,保证实验参数的准确性,需要对铺放速度、铺放压力、加热温度等铺放工艺参数进行测量。

速度测量:固定在铺丝头上的超声波位置传感器随铺丝头整体沿铺放路径运动,用于铺放速度的测量。通过数据采集卡利用计算机实时采集铺丝头的位置信息,将位置变化曲线取微分即可得到铺放速度信息。

压力测量:依据铺放过程中铺放压力与来自模具的支撑力沿模具表面法线方向为一对相互作用力的特点,在平面模具下方布设压力传感器,测量其在铺放过程中压力的变化差值,得到铺放压力。

温度测量:实验所采用的加热温度为读取的热风机设定加热温度。然而在实际铺放过程中,热风机吹出的热气在接触预浸丝束前要经过一段与空气的热交换,因此预浸丝束处的温度峰值相较于热风机设定温度会有衰减。为分析正在铺放的预浸丝束处的温度峰值是否处于合适的区间,同时选取合适的热风机设定温度,搭建了图3所示的温度测量装置进行铺放温度测试实验。设定热源加热温度 x 后,热电偶所测得的温度最大值 y 可视为加热温度为 x 时的预浸丝束处的温度峰值。更改加热温度 x 进行多次实验分别得到对应的预浸丝束处的温度峰值 y ,并将数据点进行线性拟合,得到铺放温度测量结果函数图像如图4所示,根据线性拟合结果,加热温度 x 与预浸丝束处的温度峰值 y 的关系为 $y=0.866\ 5x-8.109\ 9$,可以以该线性公式基于热风机设定温度得到预浸丝束处的近似温度。

1.2.2 正交实验设计

采用正交实验法研究铺放工艺参数对预浸丝束变形的影响。选取热塑性复合材料自动铺丝工艺过程中具有代表性的几个工艺参数:铺放压力(A)、铺放速度(B)、加热温度(C),以这些参数作为因素变量,每个因素下设置5个不同水平,以 $L_{25}(5^3)$ 形



图3 铺放温度采集装置

Fig. 3 Acquisition device of laying temperature

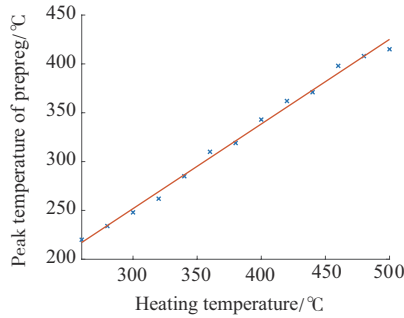


图4 铺放温度测量结果

Fig. 4 Measurement results of simulated laying temperature

式正交表进行正交实验,正交实验设计列于表2。

表2 正交实验设计表

Tab. 2 Orthogonal experiment design table

Levels	A/N	B/(mm·s ⁻¹)	C/°C
1	50	5	340
2	100	10	380
3	150	15	420
4	200	20	460
5	250	25	500

2 实验结果及分析

2.1 正交实验结果分析

根据正交实验表设计的不同工艺参数组合下 CCF/PEEK 丝材铺放后的宽度与厚度利用数显千分尺测量得到结果列于表3。

实验结果表明不同的铺放压力、铺放速度及加热温度的工艺参数组合会影响铺放后的丝束宽度及铺层厚度。在根据正交实验表设计的参数组合中,当铺放压力为 250 N,铺放速度为 5 mm/s,热源加热温度为 500℃时,预浸丝束的宽度最大、厚度最薄,即拥有最大的变形量,表明此时树脂基体在铺放过程中的流动性更好,有利于提高铺放制件的层间性能,此时丝束宽度为 7.021 mm,厚度为 0.149 mm。

2.2 工艺参数对丝束宽度影响分析

2.2.1 工艺参数对丝束宽度影响的极差分析

对正交实验结果进行极差分析。丝束宽度正

表3 正交实验结果

Tab. 3 Results of orthogonal experiments

Experiment number	A	B	C	Width of prepreg/mm	Thickness of prepreg/mm
1	1	1	1	6.385	0.172
2	1	2	2	6.406	0.170
3	1	3	3	6.427	0.167
4	1	4	4	6.481	0.165
5	1	5	5	6.422	0.168
6	2	1	2	6.420	0.167
7	2	2	3	6.493	0.165
8	2	3	4	6.527	0.163
9	2	4	5	6.532	0.163
10	2	5	1	6.362	0.171
11	3	1	3	6.553	0.160
12	3	2	4	6.604	0.159
13	3	3	5	6.652	0.158
14	3	4	1	6.398	0.170
15	3	5	2	6.393	0.170
16	4	1	4	6.754	0.156
17	4	2	5	6.869	0.151
18	4	3	1	6.395	0.167
19	4	4	2	6.438	0.161
20	4	5	3	6.397	0.168
21	5	1	5	7.021	0.149
22	5	2	1	6.440	0.160
23	5	3	2	6.502	0.158
24	5	4	3	6.521	0.156
25	5	5	4	6.446	0.160

交实验极差分析列于表4。极差分析可判断正交实验中各个因素的主次关系。单一因素不同水平下,丝束宽度的极差越大,则表明该因素对丝束宽度的影响越显著。

表4 丝束宽度正交实验极差分析表

Tab. 4 Polar analysis table for orthogonal experiments on the width of prepreg

Parameter	A/N	B/(mm·s ⁻¹)	C/°C
k_1	6.424	6.627	6.396
k_2	6.467	6.562	6.432
k_3	6.520	6.501	6.478
k_4	6.571	6.474	6.562
k_5	6.586	6.404	6.699
R	0.162	0.223	0.303

Note: k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 is average value of k_i ; R is polar deviation.

由极差分析结果可知,各铺放工艺参数对丝束宽度的影响显著程度依次为:加热温度>铺放速度>铺放压力。

根据极差分析结果,可得到使得铺放后预浸丝束宽度最大的工艺参数组合为 A5B1C5,即铺放压力为 250 N,铺放速度为 5 mm/s,加热温度为 500℃。

2.2.2 加热温度对丝束宽度影响的单因素分析

根据正交实验及极差分析的结果,按照影响显著程度由大到小,对影响预浸丝束宽度的各工艺参数进行单因素实验研究。笔者设置单因素实验,固定其他参数研究加热温度对预浸丝束宽度的影响规律。为进一步研究加热温度对预浸丝束宽度变化的影响,在正交实验中选择丝束宽度最大情况对应的其余工艺参数进行加热温度的单因素实验研究,即铺放压力 250 N,铺放速度 5 mm/s,单因素温度实验区间设置为 340 ~ 540 °C。不同加热温度下预浸丝束铺放后的宽度情况如图 5 所示,由图可看出,固定其他工艺参数的情况下,在热风机设定的温度区间内,随着加热温度提升,丝束宽度逐渐增大。其影响原理为,铺放过程中预浸丝束在压辊施压和热源加热的情况下变宽,其变形过程包含树脂基体的流动变形及内部纤维增强材料的弹性变形,其中树脂基体的流动变形对丝束变宽占主导作用。热塑性材料的树脂基体对温度变化较为敏感,温度升高时,树脂黏度降低,流动性增强,更易在压辊的压力作用下沿宽度方向流动使得丝束变宽,成为了影响铺放过程丝束宽度的最主要因素。根据 2.2.1 节中对于温度参数测量的拟合分析结果,加热温度 540 °C 对应预浸丝束处温度峰值约为 459.8 °C,未达到 PEEK 树脂热分解温度。丝束宽度达到最大值 7.154 mm,相较于初始宽度增大了 12.7%。

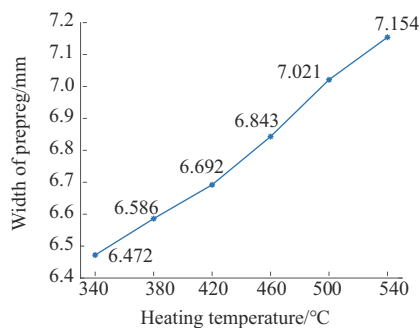


图5 丝束宽度随加热温度变化情况

Fig. 5 Variation of width of prepreg with heating temperature

2.2.3 铺放速度对丝束宽度影响的单因素分析

为进一步研究铺放速度对预浸丝束宽度变化的影响,在正交实验中选择最大丝束宽度的工艺参数进行铺放速度的单因素实验研究,即铺放压力为 250 N,铺放温度为 500 °C,单因素速度实验区间设置为 5 ~ 30 mm/s。不同铺放速度下预浸丝束铺放后的宽度情况如图 6 所示,由图 6 可看出,固定其他工艺参数的情况下,在设定的铺放速度区间内,随

着铺放速度提高,丝束宽度逐渐减小。

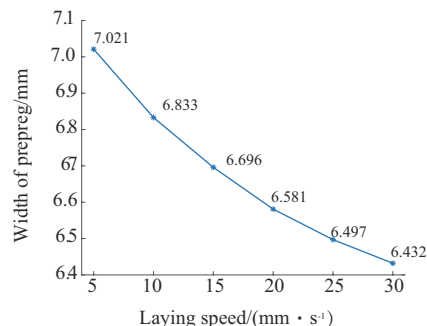


图6 丝束宽度随铺放速度变化情况

Fig. 6 Variation of width of prepreg with laying speed

2.2.4 铺放压力对丝束宽度的单因素影响

为进一步研究铺放压力对预浸丝束宽度变化的影响,在正交实验中选择最大丝束宽度的工艺参数进行铺放压力的单因素实验研究,即铺放速度 5 mm/s,铺放温度为 500 °C,单因素压力实验区间设置为 50 ~ 300 N。不同铺放压力下预浸丝束铺放后的宽度变化情况如图 7 所示,由图 7 可看出,固定其他工艺参数的情况下,在设定的铺放压力区间内,随着铺放压力增大,丝束宽度逐渐增大。当铺放压力增大到 300 N 时,丝束表面因压力过大而出现缺陷,如图 8 所示,此时丝束失效无法满足正常铺放要求,因此,实际铺放过程的铺放压力应小于 300 N。

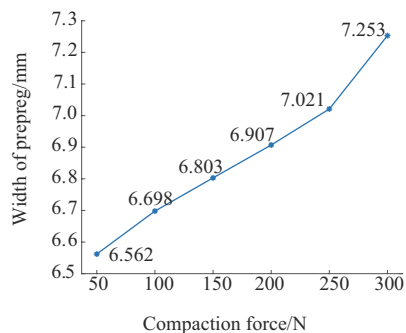


图7 丝束宽度随铺放压力变化情况

Fig. 7 Variation of width of prepreg with compaction force

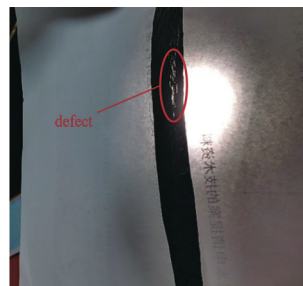


图8 铺放压力 300 N 时丝束表面出现缺陷

Fig. 8 Defects on the surface of the prepreg at a compaction force of 300 N

2.2.5 多参数对丝束宽度影响回归分析

为面向工程应用,为铺放路径与铺放工艺的协同规划提供理论基础,为多丝束铺丝头的丝束传送装置设计提供参考,需综合考虑各工艺参数对丝束宽度的影响,因此笔者基于铺放工艺参数对丝束宽度变化进行预测。采用多元线性回归方法针对铺放压力(A),铺放速度(B),加热温度(C)等不同铺放工艺参数对丝束宽度 w 的影响进行拟合。建立拟合公式见式(1):

$$\hat{w} = k_1 A + k_2 B + k_3 C + k_4 \quad (1)$$

基于最小二乘法进行回归分析,即寻找合适的参数 k_1, k_2, k_3, k_4 ,使得 D 达到最小值。

$$D = \sum_{i=1}^{25} [w_i - \hat{w}_i]^2 \quad (2)$$

式中: w_i 是实测值; $\hat{w}_i$ 是估计值。

为了寻找合适的参数 k_1, k_2, k_3, k_4 ,需将 D 对 k_1, k_2, k_3, k_4 分别求偏导,并令其分别等于0,得到见(3)式的方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial D}{\partial k_1} = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial k_2} = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial k_3} = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial k_4} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

利用Matlab软件编写计算程序对该方程组进行求解,计算得到参数 k_1 的数值为0.000 85, k_2 的数值为-0.010 7, k_3 的数值为0.001 8, k_4 的数值为5.771 5,即得到铺放工艺参数对丝束宽度 w 变化影响的近似表达公式为:

$$\hat{w} = 0.00085A - 0.0107B + 0.0018C + 5.7715 \quad (4)$$

对拟合公式进行检验,丝束宽度测量结果和由拟合公式计算得到的丝束宽度计算结果的对比情况如图9所示。计算得到拟合优度 $R^2=0.815\ 73$,由对比图像及拟合优度计算结果可看出,拟合效果较好,因此该多元线性回归模型可较好体现不同参数组合下的丝束铺放宽度。

2.3 工艺参数对丝束厚度影响分析

2.3.1 工艺参数对丝束厚度影响的极差分析

对丝束厚度同样进行极差分析得到结果列于表5的极差分析表。由极差分析结果可知,各铺放工艺参数对厚度的影响显著程度依次为:铺放压力

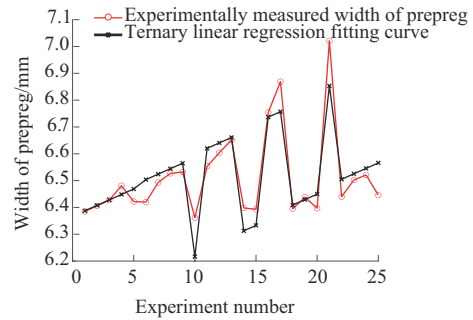


图9 丝束宽度测量结果与拟合计算结果对比图

Fig. 9 Comparison of width of prepreg measurements and fitting calculations

>铺放温度>铺放速度,且铺放压力与铺放温度的影响显著程度较为接近。根据极差分析结果,可得到使得铺放后预浸丝束厚度最小的工艺参数组合为A5B1C5,即铺放压力为250 N,铺放速度为5 mm/s,加热温度为500 °C。

表5 丝束厚度正交实验极差分析表

Tab. 5 Polar analysis table for orthogonal experiments on the thickness of prepreg

Parameter	A	B	C
k_1	0.168	0.161	0.168
k_2	0.166	0.161	0.166
k_3	0.163	0.163	0.163
k_4	0.161	0.164	0.161
k_5	0.157	0.167	0.158
R	0.011	0.006	0.010

2.3.2 铺放压力对丝束厚度的单因素影响

由于铺放压力对丝束厚度的影响最为显著,故设置单因素实验进一步研究铺放压力对丝束厚度的影响规律。固定铺放速度为5 mm/s,加热温度为500 °C,单因素铺放压力的实验区间为50 ~ 250 N。不同铺放压力下预浸丝束铺放后的厚度情况如图10所示,由图10可知,固定其他工艺参数的情况下,在设定的铺放压力区间内,随着铺放压力增大,丝束厚度逐渐减小。其影响原理分析如下:铺放压力通过在丝束厚度方向直接施加外力对丝束进行挤压,使得预浸丝束树脂基体向其他部分流动或沿厚度方向被“压实”,从而对丝束厚度产生影响。挤压压力越大则丝束在厚度方向的变形量越大,丝束沿厚度方向越薄,因此成为了影响丝束厚度的最显著因素。除此之外,铺放压力的影响显著程度与加热温度的显著程度非常接近,其原因是加热温度通过影响树脂基体黏度进而影响其流动性。在温度较高时,树脂因流动性增强极易流动到其他位置,导致丝束沿厚度方向的树脂量减少,其厚度也随之减

小。当铺放压力为250 N时,丝束厚度达到最小值

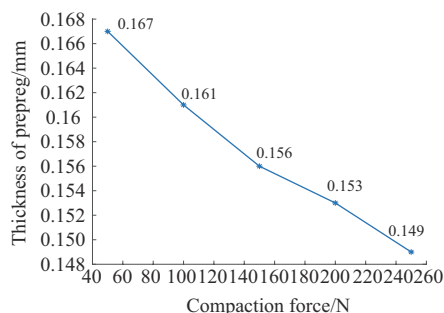


图10 丝束厚度随铺放压力变化情况

Fig. 10 Variation of thickness of prepreg with compaction force

0.149 mm,相较于初始厚度缩小了17.2%。

同时,利用丝束铺放后的宽度及厚度变化结果对铺放过后丝束的横截面积进行计算。结果表明,在加热及压辊压力的作用下,铺放后丝束的横截面积相较于未铺放时减小,其原因一方面是树脂基体黏度的减小使其沿丝束长度方向同样出现了流动,另一方面是压辊对树脂基体及纤维增强材料的“压实”作用使得丝束横截面积减小。对丝束的变形进行分析时不可简单认为丝束的横截面积在铺放前后保持不变。

3 结论

(1)设计实验研究铺放工艺参数对CCF/PEEK预浸料铺放后宽度厚度等铺放精度变化的影响,结果表明不同的铺放压力、铺放速度及加热温度的工艺参数组合会显著影响预浸丝束铺放后的丝束宽度及厚度。各工艺参数对丝束铺放后宽度与厚度的影响程度不同,对于丝束宽度,影响显著程度依次为加热温度>铺放速度>铺放压力,对于丝束厚度,影响显著程度依次为铺放压力>铺放温度>铺放速度。

(2)在丝束不发生失效的工艺参数范围内,丝束宽度随铺放温度的升高而增大,随铺放速度的提高而减小,随铺放压力的增大而增大。影响丝束宽度的最显著工艺参数为温度,其单因素实验结果表明,当加热温度为540℃时(固定铺放速度为5 mm/s,铺放压力为250 N),丝束宽度达到最大值7.154 mm,相较于初始宽度增大了12.7%。

(3)影响丝束厚度的最显著工艺参数为压力,其单因素实验结果表明,当铺放压力为250 N时(固定加热温度为500℃,铺放速度为5 mm/s),丝束厚度达到最小值0.149 mm,相较于初始厚度缩小了17.2%。

(4)采用多元线性回归方法针对铺放压力、铺放速度、加热温度等工艺参数对丝束宽度的影响进行拟合,验证计算结果表明建立的模型拟合效果较好,可合理体现并用于预测CCF/PEEK复合丝材原位铺放成型下的宽度变形程度,为铺丝机构的送丝间距设计及铺放工艺与铺放路径的协同控制提供理论指导与数据基础。

参考文献

- [1] 张杰,邓砚泽,张翰,等.一种玄武岩纤维缠绕复合管成型装置[J].高科技纤维与应用,2020,45(1):68.
ZHANG Jie, DENG Yanze, ZHANG Han, et al. A pipe forming device for basalt fiber winding composite[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2020, 45(1):68.
- [2] 苏鹏,崔文峰.先进复合材料热压罐成型技术[J].现代制造技术与装备,2016(11):165-166.
SU Peng, CUI Wenfeng. Molding technology of advanced composites pressing[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016(11):165-166.
- [3] LUKASZEWICZ D H-J A, WARD C, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup:History, present and future [J]. Composites Part B, 2012, 43(3):997-1 009.
- [4] 柯映林,曲巍巍,李江雄,等.碳纤维复合材料结构件自动铺放技术与装备研究进展[J].机械工程学报,2023,59(20):401-435.
KE Yinglin, QU Weiwei, LI Jiangxiong, et al. Researches on automated placement technologies and equipment for carbon fiber reinforced composites:a state-of-the-art review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20):401-435.
- [5] VENKATESAN C, ZULKIFLI F, SILVA A. Effects of processing parameters of infrared-based automated fiber placement on mechanical performance of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite[J]. Composite Structures, 2023, 309. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116725.
- [6] HEIDER D, PIOVOSO M J, GILLESPIE Jr J W. Application of a neural network to improve an automated thermoplastic tow-placement process[J]. Journal of Process Control, 2002, 12(1): 101-111.
- [7] HEIDER D, PIOVOSO M J, GILLESPIE Jr J W. A neural network model-based open-loop optimization for the automated thermoplastic composite tow-placement system[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(8):791-799.
- [8] KHAN M A, MITSCHANG P, SCHLEDJEWSKI R. Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process[J]. Advances in Polymer Technology, 2010, 29(2):98-111.
- [9] 宋清华,刘卫平,肖军,等.热塑性复合材料自动铺放工艺参数分

- 析与优化[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 149–157.
- SONG Qinghua, LIU Weiping, XIAO Jun, et al. Analysis and optimization of the processing parameters for automated fiber placement of thermoplastic composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2018, 35(5): 149–157.
- [10] 徐建, 桂佳俊, 宋守成, 等. 自动铺放过程中预浸丝束宽度变化研究[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(4): 120–124.
- XU Jian, GUI Jiajun, SONG Shoucheng, et al. Research on the change of prepreg tow width during automatic fiber placement process[J]. *Fiber Composites*, 2022, 39(4): 120–124.
- [11] BLOM A W, SETOODEH S, HOL J M A M, et al. Design of variable-stiffness conical shells for maximum fundamental eigenfrequency[J]. *Computers Structures*, 2008, 86(9): 870–878.
- [12] FAYAZBAKSH K, NIK M A, PASINI D, et al. Defect layer method to capture effect of gaps and overlaps in variable stiffness laminates made by automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2013, 97: 245–251.
- [13] LAN M, CARTIÉ D, DAVIES P, et al. Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on the microstructure and shear and compression properties of carbon-epoxy laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 82: 198–207.
- [14] RINALDI M, CECCHINI F, PIGLIARU L, et al. Additive manufacturing of polyether ether ketone (PEEK) for space applications: a nanosat polymeric structure[J]. *Polymers*, 2020, 13(1): 11. DOI: 10.3390/polym13010011.
- [15] CHENG J, ZHAO D, LIU K, et al. Modeling and impact analysis on contact characteristic of the compaction roller for composite automated placement[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(23): 1418–1432.
- [16] ZANJANIJAM A R, MAJOR I, LYONS J G, et al. Fused filament fabrication of peek: a review of process-structure-property relationships[J]. *Polymers*, 2020, 12(8). DOI: 10.3390/polym12081665.