

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.010

复合材料柔性导向三维织造过程纤维损伤预测及工艺优化

王东¹, 单忠德^{1,2}, 刘阳¹, 孙正², 李佳华¹

(1. 机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044; 2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 针对复合材料预制体柔性导向三维织造技术, 为探究织造角度、入针张力和织造速度对织造后纤维起毛量、拉伸强度的影响规律, 设计正交试验, 通过大律法对织造后纤维宏观形貌进行二值化处理, 表征了织造后纤维起毛量, 通过纤维拉伸强度表征了织造后纤维损伤度, 结果表明起毛量随织造角度增加而降低, 随入针张力及织造速度的增加而增加, 拉伸强度与起毛量有相反的变化趋势。基于纤维起毛量与拉伸强度的负相关关系, 设计 Box-Benken Design 响应面试验对纤维拉伸强度进行单目标优化, 建立相应纤维损伤度数学模型并验证了模型的可靠性, 进而优化了工艺参数并进行了试验验证。试验结果表明优化后的纤维损伤度的理论值与实际值仅相差 1.08%, 优化后的纤维损伤度低至 9.97%, 能够满足复合材料三维预制体的高成形质量需求。

关键词: 复合材料; 柔性导向三维织造; 纤维损伤; 起毛量

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0054-07

Fiber Damage Prediction and Optimization of Manufacturing Composites through Flexible Oriented 3D Woven Process

Wang Dong¹, Shan Zhongde^{1,2}, Liu Yang¹, Sun Zheng¹, Li Jiahua¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The orthogonal test was designed for the flexible oriented three-dimensional woven to investigate the effect of weaving angle, tension and velocity on the fuzz mass and tensile strength. Fuzz mass was characterized by binarization of the macroscopic morphology of fiber by Otsu method, the degree of fiber damage after weaving was characterized by fiber tensile strength. The results show that fuzz mass decrease with the increase of weaving angle, increase with the increase of tension and velocity, and the tensile strength has an opposite trend with fuzz mass. Based on the negative correlation between fuzz mass and tensile strength, the BBD response surface optimization test was designed to single objective optimization, the mathematical model of the corresponding fiber damage degree was established and the reliability of the model was verified, the process parameters were optimized and experimentally verified. The results show that the difference between the predicted value and the actual value of the mathematical model is only 1.08%, and the optimized fiber damage degree reaches 9.97%, which can meet the demand of 3D composite preform forming.

Keywords: composite; flexible oriented 3D woven process; fiber damage; fuzz mass

复合材料具有比强度高、比模量高、耐疲劳、耐腐蚀等优点, 广泛应用于航空航天、轨道交通、车辆、船舶等领域^[1-3]。由于抗冲击性能与抗分层性能弱, 限制了二维层合复合材料在关键系统中的应用^[4], 为改善其层间性能, 国内外学者提出了三维机织^[5]、三维编织^[6]、三维缝合^[7]、三维针刺^[8]和柔性导向三

维织造^[9]等成形技术, 用于制备高性能复合材料三维预制体, 通过在厚度方向引入增强纤维, 三维复合材料构件在冲击性能、抗分层性能上表现远好于传统二维层合复合材料, 具有广阔应用前景^[10-11]。

三维复合材料构件由预制体和基体两部分组成^[12]。作为三维复合材料的增强体, 预制体成形质

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51790173), 江苏省基础研究计划 - 前沿引领技术基础研究专项(BK20212007)

通信作者: 单忠德, 院士, 主要研究方向为先进成形技术与装备

收稿日期: 2022-03-28

引用格式: 王东, 单忠德, 刘阳, 等. 复合材料柔性导向三维织造过程纤维损伤预测及工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):54-60, 73.

Wang Dong, Shan Zhongde, Liu Yang, et al. Fiber damage prediction and optimization of manufacturing composites through flexible oriented 3D woven process[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):54-60, 73.

量优劣直接影响了复合材料的最终性能。之前有研究表明,在预制体三维织造成形过程中,受纤维束间、纤维束与设备间的摩擦、剪切等作用力,导致高性能纤维易产生起毛、断裂等缺陷,最终影响复合材料综合性能^[13]。Tourlonias等^[14]通过实验模拟了碳纤维在织造过程中的摩擦行为,发现随着正常负荷增加,碳纤维摩擦系数减小,但不受摩擦频率变化影响。Li等^[15]通过纤维拉伸强度和二值化毛羽图片灰度值分别表征了纤维损伤度和起毛量,探究了工艺参数对纤维损伤影响规律。Archer等^[16]指出由织造损伤引起碳纤维总体拉伸强度减少了9%~10%,3K,6K,12K碳纤维的织造损伤相近。Rudov-Clark等^[17]研究了提花机制备三维复合材料不同阶段的纤维损伤,发现纤维与织机间的磨损造成玻璃纤维拉伸强度降低30%~50%。Lee等^[18]分析了纤维损伤对纤维束及相应复合材料的拉伸强度等的影响,发现纤维损伤程度较大时,复合材料拉伸强度明显下降。焦亚男等^[19]通过复丝拉伸、毛羽测试及扫描电子显微镜方法分析了预制体中经纱、衬经纱和纬纱的织造损伤情况,发现碳纤维织造损伤率随着上浆量的增加而减小。

研究表明三维织造过程必然存在纤维损伤,然而目前缺少对柔性导向三维织造过程中纤维损伤的系统性分析,科学、定量地测试与表征织造过程纤维的损伤程度,对复合材料三维预制体形性调控具有重要意义。笔者针对柔性导向三维织造工艺,通过正交试验探究纤维损伤度的主要影响因素及各因素交互作用,通过二值化毛羽图片表征纤维起毛量,基于正交试验结果,设计响应面优化试验,拟合了纤维损伤预测模型并优化了工艺参数,为柔性导向三维织造工艺参数优化提供建议。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维: T300B-3000, 日本东丽公司。

1.2 主要设备及仪器

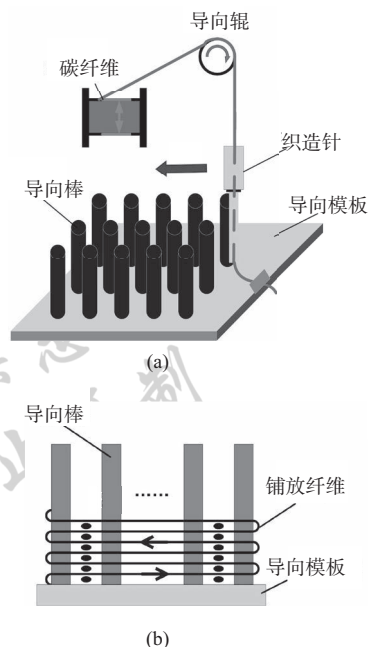
微机控制电子万能试验机: LGS50K 型, 广东鹭工精密仪器有限公司;

全功能显微镜: Olympus sc30 型, 奥林巴斯(中国)有限公司。

1.3 柔性导向三维织造工艺

柔性导向三维织造原理如图1所示, 首先对零件CAD模型进行数字化分层从而得到织造层的几

何参数, 然后根据分层信息布置导向套模板, 碳纤维纱线筒通过各导向结构将纤维输入织造针, 将纤维固定于织造起点后织造针根据设计的预制体结构逐层织造, 将纤维沿着第一层的规划路径织造于导向阵列之中, 纤维以导向棒为节点进行交织, 完成第一个织造层之后, 织造针上升一定的高度, 进行下一层的织造, 直至完成整个预制体的织造工序^[20-23], 经替纱后最终形成三维立体织物。



a—预制体织造; b—预制体压实

图1 柔性导向三维织造工艺

1.4 试验流程

纤维织造过程中受力状态如图2所示, 纤维末端固定于起始织造位置点O, 织造过程中织造针对纤维的拖曳导致纤维在织造针内部受到摩擦力 f , 在织造针与纤维相对运动状态下, 纤维在出针处受到固定点O的拉力 F 及织造针末端的作用力 F_i , 其中 F_i 与织造角度 θ 有关, 在 F 与 F_i 作用下, 出针处纤维受到等效剪力, 由于碳纤维抗剪切性能较差^[24], 该等效剪力成为纤维损伤的主要来源。

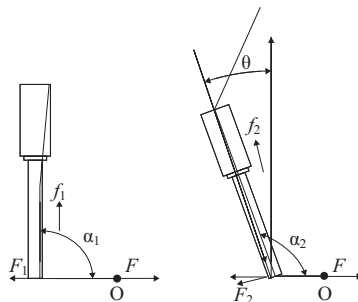


图2 纤维受力状态

通过织造后纤维起毛量及拉伸强度表征纤维成形质量,通过正交试验探究各个工艺参数与响应变量及各响应变量之间的关系,然后基于响应面法拟合各参数与响应变量间的回归方程,并获取最优参数组合,试验流程如图3所示。

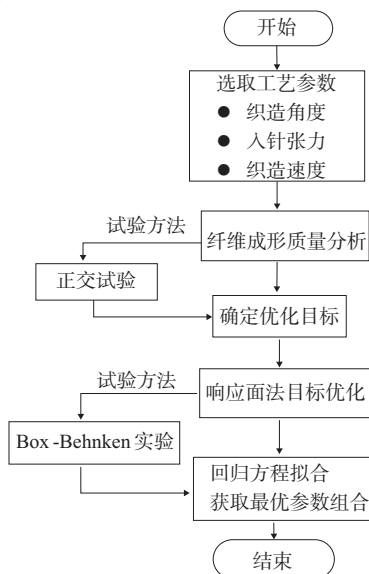


图3 试验流程图

1.5 试件性能测试方法

取250 mm织造于导向阵列中的纤维,按照GB/T 3362-2017制备碳纤维纱线拉伸试样,如图4所示,纱线拉伸试验在LGS50K型微机控制电子万能试验机上进行,试验加载速度设定2 mm/min。

纤维损伤度(FDP)可用经过织造后的纤维拉伸强度和未经织造的纤维拉伸强度之比来评价,其计算公式如下^[25]:

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

其中 T_0 为织造前纤维拉伸强度, T_1 为织造后纤维拉伸强度。

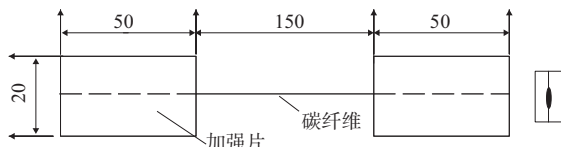


图4 碳纤维拉伸测试样品形状及尺寸

取织造末端纤维观察其宏观形貌,并对其宏观形貌进行二值化处理来清晰地表征起毛量,大律法阈值计算公式如下^[26]:

$$\eta(k) = \sigma_B^2(k) / \sigma_T^2 \quad (2)$$

$$\sigma_B^2(k) = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (3)$$

$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{1 \leq k \leq L} \sigma_B^2(k) \quad (4)$$

式中, $\eta(k)$ 为判别系数, k 为二值化阈值, $\omega(k)$ 和 $\mu(k)$ 分别为 k 级灰度的零阶和一阶矩, μ_T 为整张图片灰度级期望, $\sigma_B^2(k)$ 为类间方差, $\sigma_B^2(k^*)$ 为最大类间方差, L 为图片灰度级。

1.6 响应面试验设计

响应面法(RSM)是一种综合试验设计和数学建模的优化方法^[27],通过对具有代表性的局部各点进行试验,回归拟合全局范围内因素与结果间的函数关系,并取得各因素最优水平值。常用的响应面试验设计方法有Box-Bennken Design (BBD)和Central Composite Design (CCD)^[28]。其中BBD适用于2~5个因素的优化试验,笔者基于BBD试验设计方法对织造角度、入针张力和织造速度3个因素进行考察。针对RSM问题,可采用低阶多项式近似模型表征各变量的响应目标之间的关系,一阶与二阶多项式近似模型基函数分别为:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (5)$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \quad (6)$$

其中, k 为变量个数; Y 为响应值, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ 分别为常数项、线性一次项系数、交互项系数和二次项系数; x_i, x_j 为相互独立的影响因子。

2 纤维成形质量分析

2.1 正交试验设计

按照正交试验规则表 $L_9(3^4)$ 设计三因素三水平正交试验,见表1。

表1 正交试验结果

水平	因素		
	织造角度(A)/°	入针张力(B)/cN	织造速度(C)/(mm·s ⁻¹)
1	0	30	5
2	15	50	8
3	30	70	11

2.2 起毛量表征方法

采用光学显微镜表征织造后的纤维宏观形貌,图5为四组典型织造后纤维样件的宏观形貌。从图5可看出,不同参数下织造后的纤维表面会发生不同程度起毛,并在宽度方向上有一定的展宽,纤维展宽现象归因于纤维出针时剪力作用。以织造角度15°、入针张力30 cN、织造速度8 mm/s参数下织造后纤维为例,采用OTSU算法对织造后纤维宏观形貌图片进行二值化处理,见图6。由二值化图6b可知,毛羽面积远小于纤维面积,因此可通过开操作消

除纤维毛羽,如图 6c 所示,进而从二值化图像中减去无毛羽的纤维图像得到织造后纤维毛羽的二值化图片,如图 6d 所示,毛羽数量及轮廓可清晰呈现。

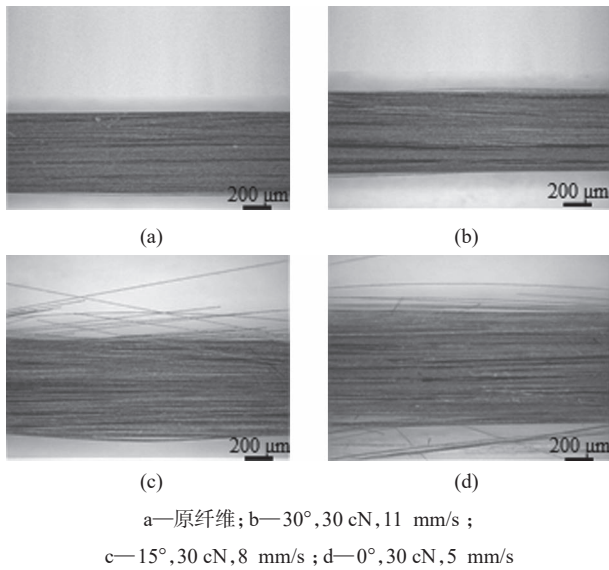


图 5 四组典型织造后纤维宏观形貌

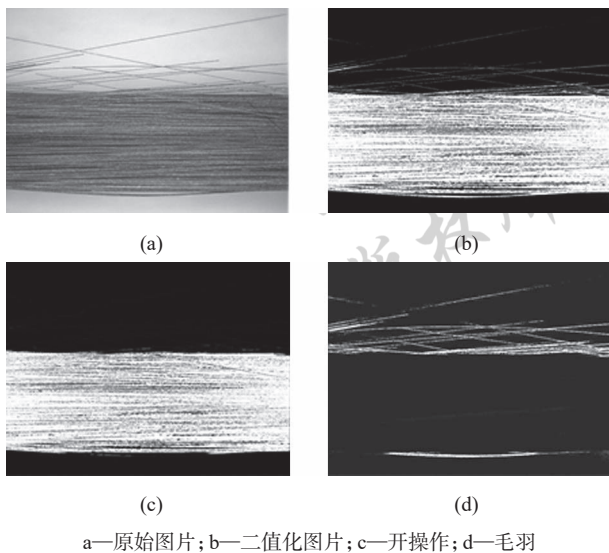


图 6 纤维图像处理

2.3 数据统计与结果

毛羽二值化图片中白色像素点的个数表征了织造后纤维起毛程度^[15],使用 Python 遍历图片得到各参数下的毛羽二值化图片中白色像素点个数,同样参数下测试织造后纤维拉伸强度,得到各响应值(将织造后纤维起毛量和拉伸强度作为响应值表征纤维成形质量)见表 2,其中空列可反映有无更重要的试验因素对试验结果产生影响。

计算正交试验指标 K_i 与极差 R 以探究各因素对试验结果的影响程度,结果见表 3、表 4,其中 K_1 , R_1 , K_2 , R_2 分别对应起毛量试验指标、极差、拉伸强

度试验指标、极差。由 $R_{1B} > R_{1A} > R_{1C} > R_{1\text{空列}}$ 可知对织造后纤维起毛量影响重要程度由强至弱依次为:入针张力、织造角度、织造速度;同理 $R_{2B} > R_{2A} > R_{2C} > R_{2\text{空列}}$ 表明对织造后纤维拉伸强度影响重要程度由强至弱依次为入针张力(B)、织造角度(A)、织造速度(C),空列极差均最小表明无其他更重要因素对试验结果产生影响。

表 2 正交试验结果

试验号	$A/(^\circ)$	空列	B/cN	$C/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	响应值 1 起毛量 / $\times 10^4$ 个	响应值 2 拉伸强度 / MPa
1 [#]	0	1	30	5	3.86	410.11
2 [#]	0	2	50	8	11.18	200.8
3 [#]	0	3	70	11	25.81	0
4 [#]	15	1	50	11	3.35	278.66
5 [#]	15	2	70	5	8.32	242.66
6 [#]	15	3	30	8	2.15	459.46
7 [#]	30	1	70	8	5.22	369.4
8 [#]	30	2	30	11	0.98	671.81
9 [#]	30	3	50	5	2.34	482.11

表 3 起毛量极差分析

指标	A	空列	B	C
K_{1A}	408 480	124 354	69 989	145 237
K_{1B}	138 291	204 807	168 690	185 503
K_{1C}	85 423	303 033	393 515	393 515
R_1	107 685	59 559	107 842	82 759

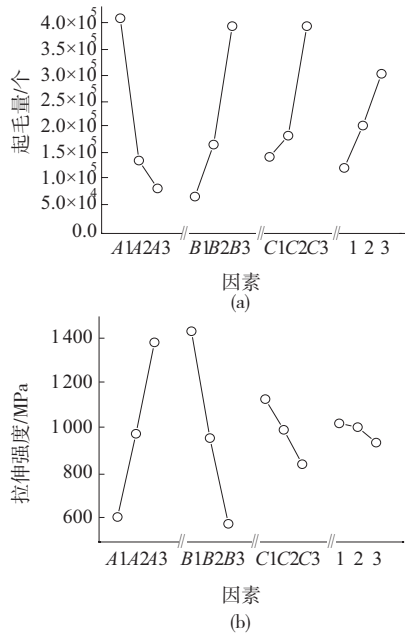
表 4 拉伸强度极差分析

指标	A	空列	B	C
K_{2A}	611	1 027	1 436	1 135
K_{2B}	981	1 010	962	998
K_{2C}	1 387	942	581	846
R_2	259	28	285	96

根据各因素的试验指标绘制正交趋势图,如图 7 所示。由图 7a 可知,织造后纤维起毛量随织造角度的增加而降低,并有继续降低的趋势,其归因于织造针末端处纤维受到的剪力会随织造角度的增加不断降低,直至织造角度成 90° ,此时织造针与铺放纤维平行,纤维在织造过程中仅受摩擦力;另外织造后纤维起毛量与入针张力及织造速度成正比,且随着入针张力及织造速度增加,起毛量有继续增加的趋势;由图 7b 可知,织造后纤维拉伸强度随织造角度的增加而增加,随入针张力及织造速度的增加而减小。

2.4 优化目标选择

根据正交试验结果绘制织造后纤维起毛量 - 拉伸强度散点图如图 8 所示,结果表明,起毛量与拉伸强度呈明显的负相关关系,随着起毛量的增加,纤维丝束内的纤维断裂程度加大,导致纤维拉伸性能降



a—起毛量趋势; b—拉伸强度趋势

图7 正交趋势图

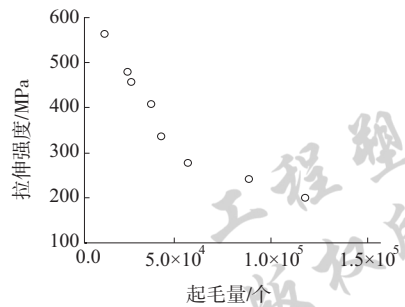


图8 起毛量-拉伸强度散点图

低^[29],基于此结论,将柔性导向三维织造工艺优化目标确立为织造后纤维拉伸强度。

3 响应面回归与优化

3.1 响应面试验及回归模型

基于正交试验结论以织造后纤维拉伸强度为响应值设计响应面优化试验,正交趋势图结果表明织造后纤维拉伸强度随织造角度的增加仍有上升趋势,因此选取参数范围为织造角度 $0 \sim 45^\circ$ 、入针张力 $30 \sim 70$ cN、织造速度 $5 \sim 11$ mm/s,采用 Design Expert 软件中的 BBD 设计方法确定试验方案,共进行 17 次试验。试验规划及结果见表 5。

采用二阶多项式近似模型对表 5 中试验数据进行多元回归拟合,得到织造角度、入针张力、织造速度与织造后纤维拉伸强度之间的预测模型:

$$T=934.478+10.331A-15.718B-42.105C+0.035AB-0.05AC+0.01BC+0.009A^2+0.072B^2+2.675C^2 \quad (7)$$

式中: T 为织造后纤维拉伸强度, A 为织造角度,

B 为入针张力, C 为织造速度,根据式(1)得到纤维损伤度预测模型:

$$FDP=7.007-1.029A+1.566B+4.194C-0.0035AB+0.005AC-0.001BC-0.001A^2-0.0072B^2-0.2664C^2 \quad (8)$$

表5 响应面试验设计及结果

试验号	A/(°)	B/cN	C/(mm·s ⁻¹)	拉伸强度/MPa
1	45	30	8	901.049
2	22.5	70	11	332.533
3	22.5	50	8	433.502
4	45	50	11	716.178
5	0	30	8	348.622
6	45	50	5	711.911
7	22.5	50	8	433.502
8	22.5	50	8	433.502
9	45	70	8	616.347
10	22.5	50	8	433.502
11	0	50	5	200.978
12	22.5	70	5	341.529
13	0	70	8	0
14	22.5	30	11	629.637
15	22.5	30	5	641.049
16	0	50	11	218.844
17	22.5	50	8	433.502

3.2 方差分析及显著性检验

对回归模型进行方差分析及显著性检验,得到表 6 的结果。

表6 方差分析及显著性检验

方差来源	平方和	均方根	F 值	P 值	显著性
模型	7.89E+05	87 671.14	169.77	< 0.000 1	**
A	5.92E+05	5.92E+05	1 147.22	< 0.000 1	**
B	1.89E+05	1.89E+05	366.17	< 0.000 1	**
C	0.37	0.37	0.000 7	0.979 3	
AB	1 021.44	1 021.44	1.98	0.202 4	
AC	46.24	46.24	0.089 5	0.773 5	
BC	1.46	1.46	0.002 8	0.959 1	
A ²	81.39	81.39	0.157 6	0.703 2	
B ²	3 445.42	3 445.42	6.67	0.036 3	
C ²	2 441.26	2 441.26	4.73	0.066 2	
残差	3 614.89	516.41			
失拟项	3 614.89	1 204.96			
$R^2=0.995 4$, Adjusted- $R^2=0.989 6$, C.V.=4.94%					

注:“*”表示模型项显著($P < 0.05$),“**”表示模型项极显著($P < 0.01$), $P > 0.1$ 表明模型项不显著。

初步分析可知,模型 P 值 < 0.01 ,说明该回归模型极显著;织造角度 A 、入针张力 B 的 P 值均小于 0.01 ,说明这两项对回归模型有极显著影响,而织造速度 C 、织造角度与入针张力的交互项 AB 、织造角度与织造速度的交互项 AC 、入针张力与织造速度的交互项 BC 、织造角度的二次项 A^2 、入针张力的二次项 B^2 、织造速度的二次项 C^2 的 P 值均大于 0.05 ,说明这七项对回归模型的影响不显著。决定系数(R^2)及校正决定系数(Adjusted- R^2)均接近 1 ,变异

系数(C.V.)=4.94%,表明该二次项回归模型可靠度高。通过 F 值可判断模型各因子对织造后纤维拉伸强度的影响程度,由此可得出各因子显著性由强至弱依次为 $A, B, B^2, C^2, AB, A^2, AC, BC, C$ 。基于拟合的回归模型绘制拉伸强度预测值与实际值散点图如图9所示,由图可知,模型预测值与实际值分布在直线 $y=x$ 附近,表明模型在所选试验参数范围内有较高可信度,可用于预测试验结果。

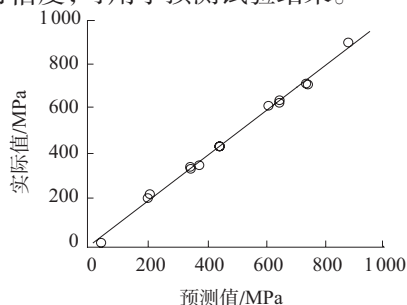
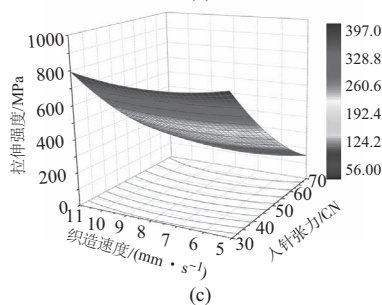
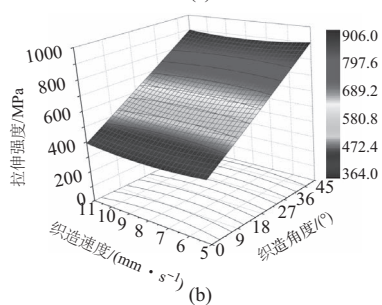
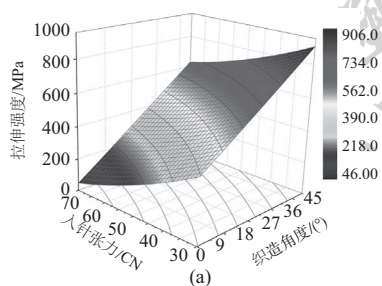


图9 拉伸强度预测值与实际值散点图

3.3 因素间交互作用

通过软件的Modelgraph功能绘制回归模型中各项交互作用与响应值之间的三维响应曲面图,如图10所示。



a—AB交互; b—AC交互; c—BC交互

图10 交互响应曲面

由图10a可知,当固定织造速度不变时,织造后纤维拉伸强度随织造角度的提高而提高,其原因在于三维织造工艺中纤维损伤来源主要为织造针末端与导向棒对纤维施加的剪力,而织造角度的增加使得织造针向着顺应织造方向偏转,进而降低剪切角,最终降低纤维受到的剪力,使得纤维拉伸强度提升;纤维拉伸强度随入针张力的提高而降低,其原因在于在纤维与织造针的相对运动状态下,更大的纤维张力使得纤维受到更大的等效压力,进而增加了剪力,使得纤维磨损更严重。由图10b、图10c可知,无论固定织造角度还是入针张力,纤维拉伸强度几乎不受织造速度改变的影响。各响应曲面对应的等高线曲率反映了各交互作用的强弱,各曲率都较小,表明各因素间的交互作用较弱。

3.4 参数优化与验证

针对纤维损伤度回归模型,以损伤度最小为条件求解模型最优参数,得到结果为织造角度 45° 、入针张力 30 cN 及织造速度 5 mm/s ,将各参数代入式(7),得到织造后纤维理论拉伸强度为 904.26 MPa 。为验证模型准确性,在最优参数条件下进行6组试验,取平均值得到实际拉伸强度为 914.06 MPa ,与预测值仅相差 1.08% ,此时纤维损伤度为 9.97% 。

4 结论

(1) 针对柔性导向三维织造工艺,设计了正交试验探究各因素与响应值之间的影响规律,结果表明,各因素对起毛量影响重要程度由强至弱依次为入针张力、织造角度、织造速度,对拉伸强度而言有同样的影响趋势,起毛量-拉伸强度变化规律表明织造后纤维起毛量和强度损伤度具有负相关关系。

(2) 设计了BBD响应面优化试验,对织造后纤维拉伸强度进行单目标优化,建立了纤维损伤回归模型并验证了模型的可靠性,进而对模型进行参数优化,模型预测结果表明:在织造角度 45° 、入针张力 30 cN 及织造速度 5 mm/s 参数下,纤维损伤度最低,在此参数下进行试验验证,结果表明,优化后的纤维损伤度为 9.97% ,与回归模型拉伸强度预测值仅相差 1.08% 。

(3) 通过正交试验与响应面试验探究了织造角度、入针张力和织造速度对织造后纤维损伤度的影响规律,结果表明,织造角度和入针张力影响显著,织造后纤维损伤度随着织造角度增大而减小,随着入针张力增大而增大;而织造速度及各因素间交互作用并无显著影响,实际织造过程中可适度提升织

造速度提升生产效率。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1):1-12.
- [2] 单忠德, 刘丰. 复合材料预制体数字化三维织造成形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
Shan Zhongde, Liu Feng. Digital 3D weaving of composite preform[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [3] 邢丽英, 包建文, 礼嵩明, 等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7):1 327-1 338.
Xing Liying, Bao Jianwen, Li Songming, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7):1 327-1 338.
- [4] Mouritz A P, Bannister M K, Falzon P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(12):1 445-1 461.
- [5] Wei Jiao, Li Chen, Xie Junbo, et al. Effect of weaving structures on the geometry variations and mechanical properties of 3D LTL woven composites[J]. Composite structures, 2020, 252. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.112756.
- [6] Fang Guodong, Liang Jun, Lu Qi, et al., Investigation on the compressive properties of the three dimensional four-directional braided composites[J]. Composite Structures, 2011, 93(2):392-405.
- [7] 王裕龙, 许希武, 毛春见. 缝合复合材料层板低速冲击损伤数值模拟[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3):715-724.
Wang Yulong, Xu Xiwu, Mao Chunjian. Numerical simulation of low-velocity impact damage on stitched composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3):715-724.
- [8] 马群. 全图案高速多圈高簇绒机控制系统研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
Ma Qun. Study on full pattern & high speed multi-level loop control system of tufting machines[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.
- [9] Sun Zheng, Shan Zhongde, Shao Tianmin. A comparative study for the thermal conductivities of C/SiC composites with different preform architectures fabricating by flexible oriented woven process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120973.
- [10] Padaki, N V, Alagirusamy R, Deopura B L, et al. Studies on preform properties of multilayer interlocked woven structures using fabric geometrical factors[J]. Journal of Industrial Textiles, 2010, 39(4):327-346.
- [11] 邢丽英, 蒋诗才, 周正刚. 先进树脂基复合材料制造技术进展[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2):1-9.
Xing Liying, Jiang Shicai, Zhou Zhenggang. Progress of manufacturing technology development of advanced polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2):1-9.
- [12] 单忠德, 刘阳, 范聪泽, 等. 复合材料预制体成形制造工艺与装备研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(23):2 774-2 784, 2831.
Shan Zhongde, Liu Yang, Fan Congze, et al. Research on forming manufacturing technology and equipment of composite preforms[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(23):2 774-2 784, 2831.
- [13] 张凤翻, 申屠年. 国产碳纤维规模化应用值得注意的工艺问题[J]. 高科技纤维与应用, 2008(3):1-4.
Zhang Fengfan, Shen Tunian. Noteworthy technical problems of carbon fiber in the large scale application[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008(3):1-4.
- [14] Tournonias M, Bueno M. Experimental simulation of friction and wear of carbon yarns during the weaving process[J]. Composites. Part A, Applied science and manufacturing, 2016, 80:228-236.
- [15] Li Siyuan, Shan Zhongde, Du Dong, et al. Effect of processing parameters on friction and damage of carbon yarn during three dimensional weaving[J]. Journal of the Textile Institute, 2021(2):1-10.
- [16] Archer E, Buchanan S, Mcilhagger A, et al. The effect of 3D weaving and consolidation on carbon fiber tows, fabrics, and composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 29(20):3 162-3 170.
- [17] Rudov-Clark, S, Mouritz A P, Lee L, et al. Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites[J]. Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(10):963-970.
- [18] Lee B, Leong K H, Herszberg I. Effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2001, 20(8):652-670.
- [19] 焦亚男, 祁小芬, 吴宁, 等. 上浆量对碳纤维的立体织造损伤及其复合材料拉伸性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(5):1 496-1 502.
Jiao Yanan, Qi Xiaofen, Wu Ning, et al. Effects of sizing amount on carbon fiber three-dimensional weaving damage and tensile properties of its composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(5):1 496-1 502.
- [20] 孙银洁, 胡胜泊, 李秀涛. M40 J 和 T300 碳纤维的微结构[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(2):97-101.
Sun Yinjie, Hu Shengbo, Li Xiutao. Structure and properties of M40 J and T300 carbon fibers[J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(2):97-101.

(下转第 73 页)

- 间界面黏结强度研究[J].中南大学学报:自然科学版,2018,49(7):1 626–1 633.
- Lu Yi, Jiang Bingyan, Fu Liang, et al. Interfacial bonding strength between polypropylene and perform on in-mold hybrid injection molding technology[J]. Journal of Central South University : Science and Technology, 2018, 49(7):1 626–1 633.
- [5] Fiorotto M, Luccheita G. Experimental investigation of a new hybrid molding process to manufacturing high-performance composites[J]. International Journal of Material Forming, 2013, 6(1):179–185.
- [6] Lafranche E, Renault T, Krawczak P. Effect of the interdiffusion at the polymer/polymer interface on the flexural properties of over-moulded short glass fibre/glass fabric reinforced pa6 composites[J]. Key Engineering Materials, 2014, 23(5):821–828.
- [7] 新型·连续纤维增强热塑性复合材料嵌件成为理想的 A 柱结构加强件[J]. 化工新型材料, 2019, 47(11):268.
- New type. Continuous fiber reinforced thermoplastic composite material inserts become ideal A-pillar structural reinforcements[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(11):268.
- [8] Grace. 朗盛 TEPEX 连续纤维增强复合材料用于量产各种轻量化汽车设计的结构部件[J]. 上海化工, 2019, 44(8):15.
- Grace. LANXESS TEPEX continuous fiber reinforced composite materials are used in the mass production of various lightweight automotive design structural components[J]. Shanghai Chemical Industry, 2019, 44(8):15.
- [9] Wang Jian, Wang Sui, Chen Dongjie. Development and characterization of insert injection moulded polypropylene single-polymer composites with sandwiched woven fabric[J]. Composites Science and Technology, 2015, 117(5):18–25.
- [10] Mao Qianchao, Wyatt T P, Chen Jinnan, et al. Insert injection molding of high-density polyethylene single-polymer composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2015, 55(11):2 448–2 456.
- [11] Solorza-Nicolas O, Hernandez-Moreno H, Susarrey-Huerta O, et al. Film-insert injection compression molding for reinforced polycarbonate with woven glass fiber oriented $90/0^\circ \pm 45^\circ$ [J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(2):1–8.
- [12] 苏全亮, 王利霞. 注射速度对微注塑成型充填过程及制品形态结构的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- Su Quanliang, Wang Lixia. Influence of injection speed on the filling process and product morphology structure of microinjection molding[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [13] 姜南南. 聚丙烯单聚合物复合材料嵌件式注射成型过程的数值模拟[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- Jiang Nannan. Numerical simulation for insert injection molding of poly propylene single-polymer composites[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [14] Meister S, Drummer D. Influence of mold temperature on mold filling behavior and part properties in micro injection molding[J]. International Polymer Processing, 2013, 28(5):550–557.
- 东华大学学报: 自然科学版, 2004, 30(5):39–43.
- Zhu Mei, Hu Hong. Fiber damage degree in the process of knitting glass fiber yarns[J]. Journal of Donghua University, Natural Science, 2004, 30(5):39–43.
- [26] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2007, 9(1):62–66.
- [27] 李博, 夏蕊, 王学文, 等. 基于响应面法的多因素交互作用下中部槽磨损试验研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22):2 764–2 771.
- Li Bo, Xia Rui, Wang Xuewen, et al. Experimental study on wear of middle plates under multi factor interactions based on response surface method[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(22):2 764–2 771.
- [28] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8):41–45.
- Li Li, Zhang Sai, He Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8):41–45.
- [29] 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.
- Li Tan, Gu Yizhuo, Wang Shaokai, et al. Measuring method for fuzz mass of carbon fiber tow[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(7):84–90.
- (上接第 60 页)
- [21] Liu Y, Shan Z, Lv Z, et al. Systematic deformation model of a square guide bar array in a flexible oriented 3D woven process[J]. Composite Structures, 2022, 280. DOI.10.1016/j.compstruct.2021.114849.
- [22] 单忠德, 战丽, 缪云良, 等. 复合材料构件数字化精确成形技术与装备[J]. 科技导报, 2020, 38(14):63–67.
- Shan Zhongde, Zhan Li, Miao Yunliang, et al. Digital precision forming technology and equipment for composite materials[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14):63–67.
- [23] 杜悟迪, 刘丰, 单忠德, 等. 碳纤维复合材料三维织造导向阵列变形研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17):182–189.
- Du Wudi, Liu Feng, Shan Zhongde, et al. Study on deformation of three-dimensional weaving guide array of carbon fiber composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(17):182–189.
- [24] 潘月秀, 解锡明, 吴宁, 等. 碳纤维束间的摩擦磨损特性[J]. 复合材料学报, 2019(8):1 838–1 846.
- Pan Yuexiu, Xie Ximing, Wu Ning, et al. Frictional and worn behavior of inter-carbon fiber tows[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019(8):1 838–1 846.
- [25] 朱梅, 胡红. 玻璃纤维纱线编织过程中纤维损伤程度的探讨[J].