

针刺预制体成型参数与 C/C 复合材料多目标力学性能响应模型研究

郑金煌¹, 王毅², 李贺军¹, 崔红^{1,2}, 邓海亮², 殷忠义², 张晓虎², 王坤杰²

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 西安航天复合材料研究所, 陕西 西安 710025)

摘要: 基于响应曲面法, 采用 Design-expert 系统研究了预制体针刺成型参数与 C/C 复合材料多目标性能的相关性, 构建了响应曲面数学模型。分析结果表明, 针刺 C/C 复合材料的抗拉强度、剪切强度、压缩强度、增强预制体密度、抗拉强度与剪切强度比值各响应模型的显著性水平 P 均小于 0.05, 且各复相关系数平方和均大于 0.82, 模拟值与实测值吻合程度较高, 可应用于针刺 C/C 复合材料各项目标性能的设计与预测。当针刺密度为 12.18 针/cm²、针刺深度 11.68 mm、网胎面密度 90.55 g/m² 时, 增强预制体密度可达 0.42 g/cm³, 针刺 C/C 复合材料的综合力学性能最佳, 其抗拉强度为 116.49 MPa、抗弯曲强度 121.84 MPa、抗剪切强度 19.41 MPa、抗压缩强度 160.88 MPa。

关键词: 针刺预制体; C/C 复合材料; 力学性能; 响应曲面法; 模型

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)11-3420-06

针刺成型碳纤维预制体(针刺预制体)既克服了二维铺层结构层间结合差的缺点, 又避免了多维编织预制体成型工艺复杂的弱点, 其具有孔隙结构及分布均匀性高、可设计性强、易致密等优点, 因而成为美、法等国家优先发展的一种预制体成型技术^[1,2]。除了作为固体火箭发动机喷管、航空刹车盘碳/碳(C/C)复合材料的增强体外, 针刺预制体逐步扩展应用于各类高性能液体冲压发动机燃烧室、空天飞行器襟翼前缘等热结构及热防护复合材料, 以及发热体、隔热屏、坩埚等民用复合材料领域^[3-8], 呈现出广阔的应用前景。

针刺预制体作为 C/C 复合材料的增强体, 其结构与成型工艺参数直接决定了针刺预制体及其增强 C/C 复合材料的性能。然而, 针刺预制体及其增强 C/C 复合材料性能设计还处于经验为主的阶段, 尚未构建起针刺成型工艺参数(针刺成型参数)-预制体性能-C/C 复合材料性能的关联体系, 不能有效指导针刺 C/C 复合材料的制备, 也难以体现出针刺 C/C 复合材料性能可设计性强的优势, 主要原因在于: 一方面, C/C 复合材料性能的关联因素多, 包括碳纤维种类、针刺规格、针刺密度、针刺深度、网胎面密度、碳布类型和碳纤维排布方式等^[9,10]; 另一方面, C/C 复合材料在不同工程应用中, 通常需要对抗拉强度、抗弯强度、抗

剪切强度、抗压缩强度等性能进行综合设计。因此, 针刺成型参数与针刺 C/C 复合材料性能相关性研究涉及了多个变量因素及多个响应目标性能之间的复杂关联性^[11,12], 加之针刺预制体成型与致密化工艺波动大、C/C 复合材料性能测试离散性高, 导致针刺预制体的经验型设计方式及材料性能难以适应 C/C 复合材料应用发展需求。

本工作主要研究针刺预制体主要针刺成型参数与针刺 C/C 复合材料抗拉强度、抗剪切强度、抗弯强度、抗压缩强度等多个响应目标之间的关联关系, 将针刺 C/C 复合材料的性能要求转化为对预制体针刺成型参数的设计, 获得针刺 C/C 复合材料多目标性能的最优工艺条件, 实现对针刺 C/C 复合材料多目标性能的优化。

1 实验

构建针刺成型参数与其增强 C/C 复合材料性能之间的多变量因素-多目标性能相关性关系, 既要解决多变量因素-多目标性能相关性试验设计, 又要解决试样制备稳定性及性能测试准确性问题, 由于 C/C 复合材料特性, 工艺波动与性能离散不可避免, 科学的试验设计及结果分析尤为关键, 需要综合运用数学方法、数理统计结合试验研究, 才能构建出针刺成型参数与

收稿日期: 2017-11-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(613184); 国家自然科学基金(51202233); 装备预研基金(9140A12060514HT43190)

作者简介: 郑金煌, 男, 1973 年生, 博士生, 高级工程师, 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072, 电话: 029-83601331, E-mail: zjh114@sohu.com

C/C 复合材料性能之间的数学关联关系,从而分析 C/C 复合材料性能演变趋势,进而了解针刺成型参数对 C/C 复合材料各项性能的影响规律,对 C/C 复合材料的选用具有积极意义。

常用的试验设计方法有单因素试验法、全面试验法、正交试验法、均匀设计法和响应曲面法^[13-16]。响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM) 是一种实验条件寻优的方法,适宜于解决非线性数据处理的相关问题,根据得到的响应模型回归方程,通过绘制响应曲面、等高线等图形,可方便地求出对应于各变量因素的目标响应值,且可以寻找目标响应最优值以及相应的变量因素,也可采用方程求解的方法,获得目标响应最优值。

本研究采用响应曲面法中的 Box-Behnken 设计方法进行试验设计, Box-Behnken 设计可以评价目标响应和因素间的非线性关系,无需连续进行多次试验。在预制体针刺成型参数中,针刺密度、针刺深度和网胎面密度可通过改变预制体的密度、Z 向纤维引入量和纤维损伤程度、纤维间缠结度,影响预制体的力学性能,从而调控针刺 C/C 复合材料的力学性能。为满足材料应用中的动态性能需求,从影响 C/C 复合材料力学性能的主要因素中选取针刺密度、针刺深度和网胎面密度 3 个针刺成型参数作为变量因素,构建多变量因素—多目标力学性能响应模型,其中针刺密度区间为 8~16 针/cm²,针刺深度区间为 10~16 mm,网胎面密度区间为 50~150 g/m²,应用 Design-expert 系统

设计了三因素、三水平工艺试验^[17,18],如表 1 所示。

根据表 1 获得的 17 种针刺成型参数组合试验方案见表 2,其中第 13~17 组为重复的中心点试验,用于考察模型误差。

按照表 2 的针刺成型参数组合,在仿形芯模上以 12 K 的 T700 聚丙烯腈基无纬布交替进行轴向铺放、纬向卷缠,并分别通过 12 K 的 T700 聚丙烯腈基碳纤维网胎进行针刺成型,共完成 17 件筒形针刺预制体成型,其尺寸为内径 232 mm、高 150 mm、厚 20 mm;对筒形针刺预制体采用化学气相沉积方法以高温裂解丙烯致密,得到密度为 1.64~1.66 g/cm³ 的针刺 C/C 复合材料筒形件,在针刺 C/C 复合材料筒形件上机加取样,采用 SANS5304-20KN 型万能试验机进行 C/C 复合材料轴向抗拉强度(简称抗拉强度)、轴向抗弯曲强度(简称弯曲强度)、轴向抗剪切强度(简称抗剪切强度)、径向抗压强度(简称抗压强度)测试,针刺 C/C 复合材料的多目标响应性能测试结果数据列于表 2。

表 1 Box-Behnken 设计因素与水平表

Table 1 Design factors and levels by Box-Behnken

Design factors	Levels		
	-1	0	1
X_1 : Needling density/pin·cm ⁻²	8	12	16
X_2 : Needling depth/mm	10	13	16
X_3 : Non-woven density/g·m ⁻²	50	100	150

表 2 针刺参数设计表及试验结果

Table 2 Needling parameters and the corresponding experimental results

No.	X_1 / pin·cm ⁻²	X_2 / mm	X_3 / g·m ⁻²	Tensile strength/ MPa	Bending strength/ MPa	Shear strength/ MPa	Compression strength/ MPa	Preform density/ g·cm ⁻³	Ratio of tensile/shear strength
1	8	10	100	113.00	98.66	14.30	143.36	0.37	7.90
2	16	10	100	80.06	145.42	15.15	166.56	0.40	5.28
3	8	16	100	70.96	111.8	10.87	177.32	0.36	6.53
4	16	16	100	45.34	68.2	10.65	179.80	0.39	4.26
5	8	13	50	70.80	119.68	10.46	174.00	0.42	6.77
6	16	13	50	69.44	158.8	16.82	206.8	0.39	4.13
7	8	13	150	79.44	110.6	8.56	120.55	0.39	9.28
8	16	13	150	62.12	83.70	9.19	159.16	0.40	6.76
9	12	10	50	119.00	81.94	11.90	151.60	0.42	10.00
10	12	16	50	61.46	124.72	14.13	175.80	0.42	4.35
11	12	10	150	86.72	151.40	14.93	148.20	0.39	5.81
12	12	16	150	73.90	82.90	10.67	123.75	0.41	6.93
13	12	13	100	117.00	119.00	19.44	163.00	0.42	6.02
14	12	13	100	124.00	130.00	21.52	168.00	0.42	5.76
15	12	13	100	100.00	116.94	18.32	155.60	0.42	5.46
16	12	13	100	107.00	125.00	19.12	161.80	0.42	5.6
17	12	13	100	101.00	105.00	18.24	158.00	0.42	5.54

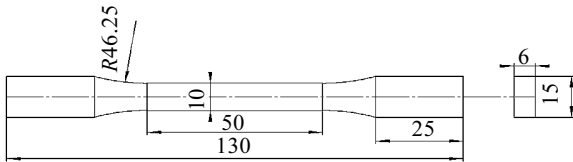


图 1 拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of the tensile sample

拉伸试样尺寸与形状如图 1，标距段长度为 50 mm；采用三点弯曲试验测试 C/C 复合材料弯曲强度及剪切强度，弯曲试样的尺寸为 55 mm×10 mm×4 mm，剪切试样的尺寸为 20 mm×6 mm×3 mm；压缩强度试样的尺寸为 $\Phi 10$ mm×10 mm，试样个数为 7~10。

2 模拟结果与讨论

应用 Design-expert 系统对所述多目标性能数据进行分析处理，通过回归分析确定一次和二次相关系数，构建出针刺成型参数与 C/C 复合材料多目标性能的相关性响应模型，并对响应模型进行显著性分析，以样本复相关系数和方差分析表评价模型拟合程度的优劣^[17-19]，并优化出综合性能最优的针刺成型参数。

2.1 响应模型构建

根据 Box-Behnken 设计获得二次响应模型方程的通式为：

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

式中， Y 为响应目标； β_0 为截距； β_i 为一次模型系数； β_{ii} 为二次模型系数； β_{ij} 为交互作用系数； X_i 为独立变量。

因此，由 Design-expert 系统对表 2 数据分析获得抗拉强度 Y_1 、抗弯强度 Y_2 、抗剪切强度 Y_3 、抗压缩强度 Y_4 、预制体体密度 Y_5 、抗拉强度与抗剪切强度比值 Y_6 等各项性能与 3 个变量因素（针刺密度 X_1 、针刺深度 X_2 、网胎面密度 X_3 ）的相关性响应模型可分别表示为式(2)~式(7)的二次多项式非线性方程。

$$Y_1 = -121.39167 + 33.05875X_1 + 10.06667X_2 + 0.48097X_3 + 0.15250X_1X_2 - 0.019950X_1X_3 + 0.074533X_2X_3 - 1.47750X_1^2 - 0.98000X_2^2 - 6.28400 \times 10^{-3}X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = -672.93550 + 37.11537X_1 + 67.90600X_2 + 3.13094X_3 - 1.88250X_1X_2 - 0.082525X_1X_3 - 0.18547X_2X_3 - 0.16291X_1^2 - 1.17350X_2^2 + 6.45400 \times 10^{-4}X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = -100.98828 + 7.42079X_1 + 8.06322X_2 + 0.51789X_3 - 0.022292X_1X_2 - 7.16250 \times 10^{-3}X_1X_3 - 0.010817X_2X_3 - 0.25736X_1^2 - 0.27419X_2^2 - 1.58110 \times 10^{-3}X_3^2 \quad (4)$$

$$Y_4 = -50.24833 - 7.65802X_1 + 29.41458X_2 + 1.09858X_3 - 0.43167X_1X_2 + 7.26250 \times 10^{-3}X_1X_3 - 0.081083X_2X_3 + 0.64906$$

$$X_1^2 - 0.54500X_2^2 - 2.61500 \times 10^{-3}X_3^2 \quad (5)$$

$$Y_5 = +0.021819 + 0.031979X_1 + 0.043903X_2 - 1.58917 \times 10^{-3}X_3 + 8.33333 \times 10^{-5}X_1X_2 + 5.50000 \times 10^{-5}X_1X_3 + 3.16667 \times 10^{-5}X_2X_3 - 1.55469 \times 10^{-3}X_1^2 - 1.84722 \times 10^{-3}X_2^2 + 1.95000 \times 10^{-6}X_3^2 \quad (6)$$

$$Y_6 = +36.55358 - 0.63310X_1 - 2.01550X_2 - 0.21322X_3 + 7.29167 \times 10^{-3}X_1X_2 + 1.50000 \times 10^{-4}X_1X_3 + 0.011283X_2X_3 + 8.71875 \times 10^{-3}X_1^2 + 0.019667X_2^2 + 3.67800 \times 10^{-4}X_3^2 \quad (7)$$

2.2 响应模型显著性分析

对二次响应模型方程进行回归方差分析，判定数学模型的拟合效果^[13,17,18]：方差分析结果中若模型显著性水平 $P \leq 0.05$ 说明模型拟合显著，方程具有 95% 以上的可靠性；若 $P \leq 0.01$ 说明模型拟合极显著；若 $P > 0.05$ 说明模型拟合不显著；方程拟合性质由复相关系数平方和 (R-Squared) 表达，它代表在因变量的方差中用模型能够解释部分的占比，其越趋近于 1，则说明该方程的预测效果越好。

各响应模型方程的方差分析见表 3。由表 3 可以看出抗拉强度、抗剪切强度、抗压缩强度、预制体体密度、抗拉强度与剪切强度比值响应模型的显著性水平 P 均小于 0.05，模型拟合显著，且各复相关系数平方和均大于 0.82，说明模型预测值与实测值吻合程度较高，模型可以比较准确的反映针刺成型参数对各响应的的影响规律，能够较好地对各响应进行预测。抗弯强度响应模型的显著性水平 $P=0.0802$ ，介于 0.05~0.10 之间，复相关系数平方和及修正的复相关系数平方和均大于 0.5，说明抗弯曲强度响应模型还在一定程度上能够反映针刺成型参数对抗弯曲强度的影响规律。

2.3 多目标性能综合优化

响应曲面法的优点是可以评价各变量因素与响应之间的关系并预测一定条件下的响应值，而且通过优化计算能够获得多目标的最优条件。表 4 为各单一响应目标的优化结果，其中当针刺密度为 11.7 针/cm²、针刺深度为 10 mm 且网胎面密度为 79.82 g/m² 时，抗

表 3 方差分析表

Table 3 Variance analysis

Source	F value	FP-value	R-Squared	Adj -Squared
Tensile strength	9.13	0.0041	0.9215	0.8205
Bending strength	3.01	0.0802	0.7946	0.5305
Shear strength	6.73	0.0100	0.8963	0.7631
Compression strength	5.15	0.0210	0.8688	0.7001
Preform density	3.70	0.0491	0.8264	0.6032
Ratio of tensile/shear strength	4.28	0.0342	0.8462	0.6484

表 4 单目标响应优化结果

Table 4 Optimization results of single response target

No.	Response target	Optimization value	Needling density/ pin·cm ⁻²	Needling depth/ mm	Non-woven density/ g·m ⁻³
1	Tensile strength/ MPa	Max	123.29	11.7	10
		Min	30.54	16	16
2	Bending strength/ MPa	Max	147.61	16	10
		Min	24.35	16	16
3	Shear strength/ MPa	Max	19.62	12.59	12.36
		Min	3.93	16	16
4	Compression strength/MPa	Max	203.32	16	16
		Min	122.27	10.39	16
5	Preform density/ g·cm ⁻³	Max	0.43	11.5	12.57
		Min	0.36	8	10
6	Ratio of tensile/shear strength	Max	10.40	8	10
		Min	2.71	16	16

拉强度达到最大值 123.29 MPa；当针刺密度为 12.59 针/cm²、针刺深度为 12.36 mm 且网胎面密度为 93.0 g/m² 时，抗剪切强度达到最大值 19.62 MPa；当针刺密度为 16 针/cm²、针刺深度为 16 mm 时，相应抗拉强度、抗弯曲强度、抗剪切强度都为最小值，这是由于针刺密度与针刺深度取较高值时，两者的交互作用导致的纤维损伤对力学性能不利影响起主导作用。

对于针刺 C/C 复合材料，抗拉强度和抗剪切强度是面内与层间的主要力学性能目标，按表 5 设定抗拉强度等响应目标的优化条件，优化结果如表 6 所示，其中抗拉强度和抗剪切强度 2 项响应目标的综合优化值为 118.27 MPa 和 19.22 MPa，对应针刺密度、针刺深度、网胎面密度分别取 11.9 针/cm²、11.36 mm、100 g/m²；抗拉强度、抗弯曲强度、抗剪切强度、抗压缩强度及预

式中：

$$[Y] = [Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ Y_4 \ Y_5]^T; [X] = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_1 X_2 \ X_1 X_3 \ X_2 X_3 \ X_1^2 \ X_2^2 \ X_3^2]^T;$$

$$B = [-1.21 \times 10^2 \ -6.73 \times 10^2 \ -1.01 \times 10^2 \ -50.2 \ 2.18 \times 10^{-2}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 33.1 & 10.1 & 4.81 \times 10^{-1} & 1.53 \times 10^{-1} & -2.00 \times 10^{-2} & 7.45 \times 10^{-2} & -1.48 & -9.80 \times 10^{-1} & -6.28 \times 10^{-3} \\ 37.1 & 67.9 & 3.13 & -1.88 & -8.25 \times 10^{-2} & -1.85 \times 10^{-1} & -1.63 \times 10^{-1} & -1.17 & 6.45 \times 10^{-4} \\ 7.42 & 8.06 & 5.18 \times 10^{-1} & -2.23 \times 10^{-2} & -7.16 \times 10^{-3} & -1.08 \times 10^{-2} & -2.57 \times 10^{-1} & -2.74 \times 10^{-1} & -1.58 \times 10^{-3} \\ -7.66 & 29.4 & 1.10 & -4.32 \times 10^{-1} & 7.26 \times 10^{-3} & -8.11 \times 10^{-2} & 6.49 \times 10^{-1} & -5.45 \times 10^{-1} & -2.62 \times 10^{-3} \\ 3.20 \times 10^{-2} & 4.39 \times 10^{-2} & -1.59 \times 10^{-3} & 8.33 \times 10^{-5} & 5.50 \times 10^{-5} & 3.17 \times 10^{-5} & -1.55 \times 10^{-3} & -1.85 \times 10^{-3} & 1.95 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

由式 (8) 可预测给定针刺成型参数下的目标响应性能，以及逆推设计出特定目标响应要求下的针刺成型参数，与实测值对比进行验证。从表 7 可以看出，当针刺密度、针刺深度、网胎面密度分别取 12 针/cm²、10 mm、50 g/m²

表 5 多目标响应优化要求

Table 5 Optimization requirements of multiple response targets

Response	Tensile strength	Bending strength	Shear strength	Compression strength	Preform density
Target	Max	Max	Max	Max	Max
Weights	1	0.2	1	0.5	0.5
Importance	*****	***	*****	****	****

表 6 多目标响应综合优化结果

Table 6 Comprehensive optimization results of multiple response targets

$X_1/$ pin·cm ⁻²	$X_2/$ mm	$X_3/$ g·m ⁻²	Tensile strength/ MPa	Bending strength/ MPa	Shear strength/ MPa	Compression strength/ MPa	Preform density/ g·cm ⁻³
11.91	11.36	93.59	118.27	-	19.22	-	-
12.18	11.68	90.55	116.49	121.84	19.41	160.88	0.42

制体体密度综合优化结果表明，针刺密度为 12.18 针/cm²、针刺深度为 11.68 mm 且网胎面密度为 90.55 g/m² 时，预制体体密度可达 0.42 g/cm³，针刺 C/C 复合材料综合力学性能最佳，相应抗拉强度达 116.49 MPa，抗弯曲强度达 121.84 MPa，抗剪切强度达 19.41 MPa，抗压缩强度达 160.88 MPa。

2.4 模拟结果验证

根据得到的抗拉强度 Y_1 、抗弯曲强度 Y_2 、抗剪切强度 Y_3 、抗压缩强度 Y_4 、预制体体密度 Y_5 等各响应模型的二次方程，可以构建以下矩阵方程：

$$[Y] = [A] \cdot [X] + [B] \tag{8}$$

时，抗拉强度、抗压缩强度、预制体体密度预测值相对误差小于 2%，抗剪切强度与抗弯曲强度预测值相对误差分别为 15.8% 与 22.91%，其相对于预制体及其增强 C/C 复合材料成型工艺所引起的误差，仍具有指导意义。

表 7 设计与预测验证结果

Table 7 Verification results of design and prediction

Verification item	Needling density/ pin·cm ⁻²	Needling depth/ mm	Non-woven density/ g·m ⁻²	Tensile strength/ MPa	Bending strength/ MPa	Shear strength/ MPa	Compression strength/ MPa	Preform density/ g·cm ⁻³	
Prediction of performances	12	10	50	119 117.16 1.55%	81.94 100.71 22.91%	11.9 13.78 15.80%	151.60 151.37 0.15%	0.415 0.413 0.48%	Actual Predicted Error
Design of needling parameters	8.00	10	100	113	98.66	14.30	143.36	0.371	Actual
	8.72	10.00	99.6	113	97.75	14.33	143.36	0.386	Design
	8.74	10.01	100	113	98.21	14.38	143.36	0.386	
	≤9.25%	≤0.1%	≤0.4%	0	≤0.86%	≤0.56%	0	≤4.04%	Error

针刺密度、针刺深度、网胎面密度分别取 12 针/cm²、10 mm、50 g/m² 时，抗拉强度、抗弯曲强度、抗剪切强度、抗压缩强度、预制体体密度实测值分别为 113 MPa、98.66 MPa、14.30 MPa、143.36 MPa、0.371 g/cm³，以其作为设计目标，可获得两组相近的针刺参数组合设计值，并依据式(8)进一步获得各项性能预测值，对照实测值，针刺密度设计值误差≤9.25%，预制体体密度设计值误差≤4.04%，其余设计值误差<1%，验证了响应模型方程设计及预测高可靠性，表明其能够较好地反映针刺 C/C 复合材料多目标力学性能与针刺成型参数之间的关系。

3 结 论

1) 应用响应曲面法构建出关键的针刺成型参数与 C/C 复合材料多目标性能相关性响应模型，针刺 C/C 复合材料的抗拉强度、抗剪切强度、抗压缩强度、增强预制体体密度、抗拉强度与剪切强度比值各响应模型的显著性水平 *P* 均小于 0.05，且各复相关系数平方和均大于 0.82，模型预测值与实测值吻合程度较高，可以较好地应用于针刺 C/C 复合材料多目标性能设计与预测。

2) 单一响应目标的优化结果表明，针刺密度为 11.7 针/cm²、针刺深度为 10 mm 且网胎面密度为 79.82 g/m² 时，抗拉强度达到最大值 123.29 MPa；当针刺密度为 12.59 针/cm²、针刺深度为 12.36 mm 且网胎面密度为 93.0 g/m² 时，抗剪切强度达到最大值 19.62 MPa。

3) 多个响应目标的优化结果表明，针刺密度为 12.18 针/cm²、针刺深度为 11.68 mm、网胎面密度为 90.55 g/m² 时，增强预制体体密度可达 0.42 g/cm³，针刺 C/C 复合材料的综合力学性能最佳，其抗拉强度达到 116.49 MPa、抗弯曲强度达到 121.84 MPa、抗剪切强度达到 19.41 MPa、抗压缩强度达到 160.88 MPa。

参考文献 References

[1] Fitzer E, Manocha L M. *Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites*[M]. Springer Pub, 1998
 [2] Lacombe A, Lacoste M, Pichon T. AIAA 2008-5236[R].

Hartford, CT American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2008
 [3] Montaudon M. AIAA-95-3016[R]. San Diego, CA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1995
 [4] Ellis R A. AIAA-88-3361[R]. Boston, Massachusetts: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1988
 [5] Lacombe A, Pichon T, Lacoste M. AIAA 2009-2678[R]. Palm Spring, CA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2009
 [6] Boury D, Filipuzzi L. AIAA 01-3438[R]. Salt Lake City, Utah: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2001
 [7] Cao Yunhai(曹云海). *Aviation Precision Manufacturing Technology*(航空精密制造技术)[J], 1995, 31(2): 32
 [8] Su Junming, Xiao Zhichao, Liu Yongqiong *et al. New Carbon Materials*[J], 2010, 25(5): 329
 [9] Li Fei, Liu Jianjun, Cheng Wen *et al. Carbon*[J], 2004(1): 52
 [10] Ji Alin, Cui Hong, Li Hejun *et al. New Carbon Materials*[J], 2011, 26(2): 11
 [11] Zhang Xiaohu(张晓虎), Li Hejun(李贺军), Hao Zhibiao(郝志彪) *et al. Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报)[J], 2007, 22(5): 963
 [12] Su Junming(苏君明), Cui Hong(崔红), Li Ruizhen(李瑞珍) *et al. New Carbon Materials*(新型炭材料)[J], 2000, 15(2): 11
 [13] Xu Xianhong(徐向宏), He Mingzhu(何明珠). *Test Design and the Application of Design-Expert, SPSS*(试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用)[M]. Beijing: Science Press, 2010
 [14] Banerjee P K. *Journal of Fiber Textile Research*[J], 2000(3) : 214
 [15] Georgiou S D, Stylianou S, Aggarwal M *et al. Computational Statistics and Data Analysis*[J], 2014, 71(3) : 1124
 [16] Adeleke A O, Latiff A A, Al-Gheethi A A *et al. Chemosphere*[J], 2017, 174: 232
 [17] Liu L, Wang X, Zou H *et al. Polymer Testing*[J], 2017, 59: 355
 [18] Talib N A A, Salam F, Yusof N A *et al. Journal of Electroanalytical Chemistry*[J], 2017, 787: 1
 [19] Xu Ying(徐颖), Li Mingli(李明利). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2001, 30(6): 428

Response Surface Models on the Needling Processing Parameters and the Multiple Mechanical Performances of C/C Composites

Zheng Jinhuang¹, Wang Yi², Li Hejun¹, Cui Hong^{1,2}, Deng Hailiang², Yin Zhongyi², Zhang Xiaohu², Wang Kunjie²

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Xi'an Aerospace Composite Research Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: The mathematical models on the needling processing parameters and the multiple mechanical performances of needling C/C composites were established based on response surface methodology by the Design-expert system. The results show that the response surface models of tensile strength, shear strength, tensile strength and shear strength ratio, compression strength and preform density have high fitting degree, P of which is less than 0.05 and R-Squared of which is higher than 0.82. These response surface models are able to design and predict the needling processing parameters and the mechanical performances of needling C/C composites with reasonable accuracy. The comprehensive optimization results of multiple response targets of needling C/C composites show that when the needling density is 12.18 Pin/cm², the needling depth is 11.68 mm and the non-woven density is 90.55 g/m², the comprehensive mechanical performances of needling C/C composites are the best. At this point, the tensile strength is 116.49 MPa, the bending strength is 121.48 MPa, the shear strength is 19.41 MPa, the compression strength is 160.88 MPa, and the preform density is 0.42 g/cm³.

Key words: needling perform; C/C composites; mechanical performances; response surface methodology; model

Corresponding author: Li Hejun, Professor, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, E-mail: lihejun@nwpu.edu.cn