

基于NSGA-II算法的缠绕过程多目标工艺参数优化

韩宇泽 刘雁鹏 任中杰 任明法

Multi-objective process parameter optimization for winding process based on NSGA-II algorithm

HAN Yuze, LIU Yanpeng, REN Zhongjie, REN Mingfa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231218.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化

Multi-response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relational analysis and response surface methodology

复合材料学报. 2019, 36(12): 2822–2832 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190304.003>

基于遗传算法的碳纤维增强树脂复合材料层合板单搭胶接结构的多目标优化

Multi-objective optimization of adhesively bonded single-lap joints of carbon fiber reinforced polymer laminates based on genetic algorithm

复合材料学报. 2021, 38(6): 1847–1858 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200824.001>

基于多场耦合方法的厚截面复合材料固化过程的多目标优化

Multi-objective optimization for curing process of thick composite based on multi-physics coupling method

复合材料学报. 2021, 38(2): 526–535 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200603.004>

不同厚度碳纤维布/环氧树脂复合材料孔隙率超声衰减模型

Ultrasonic attenuation model of porosity of carbon fiber cloth/epoxy resin composites with different thicknesses

复合材料学报. 2020, 37(4): 877–885 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190620.001>

纤维体积分数对W纤维/Zr基非晶合金复合材料压缩性能的影响

Effect of fiber volume fraction on the compressive properties of the W fiber/Zr-based metallic glass composites

复合材料学报. 2017, 34(8): 1833–1838 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161116.003>

内埋中空纤维法制备复合材料孔隙率标准试块的超声衰减特性

Ultrasonic attenuation characteristics of composites void contents standard test block with embedded hollow fiber

复合材料学报. 2017, 34(1): 91–95 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160330.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20231218.005

基于 NSGA-II 算法的缠绕过程多目标工艺参数优化



分享本文

韩宇泽^{1,2}, 刘雁鹏², 任中杰², 任明法^{*1,3,4}

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学 工程力学系, 大连 116024; 3. 高性能精密制造全国重点实验室, 大连 116024; 4. 辽宁省先进复合材料高性能制造重点实验室, 大连 116024)

摘要: 基于复合材料缠绕成型工艺过程, 采用响应面法设计湿法缠绕成型试验, 以缠绕制品的层间剪切强度、孔隙率为关键性能指标, 根据试验结果建立缠绕张力、胶辊间隙、缠绕速度对缠绕制品性能的多元回归预测模型, 并验证回归模型的准确性。结合回归模型与 Morris 法进行不同缠绕制品性能表征参数对各工艺参数的敏感度排序, 并得到各工艺参数的相对稳定区间, 通过缠绕成型试验验证敏感度分析的有效性。以缠绕制品的层间剪切强度大、孔隙率小为目标, 通过主成分分析 (PCA) 得到层间剪切强度的贡献率为 60.9%、孔隙率的贡献率为 39.1%, 利用 NSGA-II 算法获得工艺参数最优解集: 缠绕张力为 65.1 N、胶辊间隙为 0.12 mm、缠绕速度为 0.17 m/s, 缠绕制品的层间剪切强度为 54.4 MPa、孔隙率为 1.24%、纤维体积分数为 74.13vol%。

关键词: 复合材料; 纤维缠绕; 层间剪切强度; 孔隙率; 纤维体积分数; NSGA-II 算法; 多目标参数优化

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)10-5622-12

Multi-objective process parameter optimization for winding process based on NSGA-II algorithm

HAN Yuze^{1,2}, LIU Yanpeng², REN Zhongjie², REN Mingfa^{*1,3,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. National Key Laboratory of High Performance Precision Manufacturing, Dalian 116024, China; 4. Liaoning Provincial Key Laboratory of Advanced Composite Materials High Performance Manufacturing, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the composites winding molding process, the response surface methodology was used to design the wet winding molding test. Taking the interlayer shear strength and porosity of the winding products as the key performance indexes, the multivariate regression prediction model of winding tension, the gap between squeezer rollers and winding speed on the performance of winding products was established based on the experimental results, and the accuracy of the regression model was verified. Combining the regression model and Morris method for ranking the sensitivity of different winding product performance characterization parameters to each process parameter, the relative stability intervals of each process parameter were obtained and the validity of sensitivity analysis through the winding molding test was verified. Taking the large interlayer shear strength and small porosity of the winding products as the target, the dedication rate of interlayer shear strength is 60.9% and the dedication rate of porosity is 39.1% through the principal component analysis, and the optimal solution set of the process parameters is obtained by using the NSGA-II algorithm: The winding tension is 65.1 N, the gap between squeezer rollers is

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2023-12-01; 录用日期: 2023-12-10; 网络首发时间: 2023-12-19 11:01:45

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231218.005>

基金项目: 国家自然科学基金 (12272078); 科技领军人才团队专题 (DUT22LAB503); 大连市科技创新基金项目 (2020JJ25CY011)

National Natural Science Foundation of China (12272078); Science and Technology Leading Talent Team Theme (DUT22LAB503); Dalian Science and Technology Innovation Fund Project (2020JJ25CY011)

通信作者: 任明法, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料压力容器 E-mail: renmf@dlut.edu.cn

引用格式: 韩宇泽, 刘雁鹏, 任中杰, 等. 基于 NSGA-II 算法的缠绕过程多目标工艺参数优化 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5622-5633.

HAN Yuze, LIU Yanpeng, REN Zhongjie, et al. Multi-objective process parameter optimization for winding process based on NSGA-II algorithm[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10): 5622-5633(in Chinese).

0.12 mm, and the winding speed is 0.17 m/s. The interlayer shear strength of the winding product is 54.4 MPa, the porosity is 1.24%, and the fiber volume fraction is 74.13vol%.

Keywords: composite material; fiber winding; interlayer shear strength; porosity; fiber volume fraction; NSGA-II algorithm; multi-objective parameter optimization

纤维缠绕工艺作为一种复合材料成型工艺，由于其制造工艺简单、生产周期短、成本低等优点，被广泛应用于导弹外壳、发动机壳体、压力容器等军事和民用产业^[1-5]。根据树脂基体状态差异，纤维缠绕工艺分为干法缠绕、湿法缠绕、半干法缠绕 3 种^[6-7]。其中，湿法缠绕具有纤维排列平行度好、强度转化率高、成本较低等优点，使其在复合材料成型领域受到越来越多的关注与使用^[8]。

随着复合材料缠绕制品的使用需求增加，人们对其性能的关注度也逐渐提高。在缠绕成型工艺中，选取不同的工艺参数，缠绕制品的性能也具有一定的差异。因此，探究不同工艺参数对缠绕制品性能的影响机制，并针对缠绕制品的性能表征进行工艺参数优化至关重要。目前，针对带缠绕成型工艺中工艺参数对缠绕制品性能的影响机制的研究已经取得了一些成果。史耀耀等^[9]基于复合材料缠绕成型工艺过程研究，提出影响复合材料缠绕制品质量的关键工艺参数为缠绕温度、缠绕压力和缠绕张力，并利用响应面法建立工艺参数耦合模型，针对缠绕制品的层间剪切强度进行工艺参数优化；Schledjewski 等^[10-12]针对预浸带铺放过程，开发了面向纤维增强复合材料仿真工具，研究铺放速度、温度和压力对铺放制品质量的影响；Zu 等^[13]采用等效降温法模拟缠绕张力施加过程，以等预应力为目标，通过有限元模型研究了最佳缠绕张力制度；俞涛^[14]基于预浸带缠绕成型工艺制备海军军械实验室 (Naval ordnance laboratory, NOL) 环形试样，测得缠绕制品的层间剪切强度与孔隙率，利用响应面法建立多参数耦合经验模型，并针对不同工艺参数进行敏感度分析，获得带缠绕成型工艺窗口；洪旗等^[15]以预浸带缠绕过程中残余应力、孔隙率、层间剪切强度为优化目标，结合灰色关联分析与主成分分析将多目标优化问题转化为单目标优化问题，确定各工艺参数的优化方案；Blachut 等^[16]结合有限元模型与实验探讨缠绕张力对金属内胆缠绕气瓶爆破压力的影响，结果表明缠绕张力增加会对金属内胆产生挤压应力，使气瓶的爆破压力有所提

高。近几年针对缠绕成型工艺参数对缠绕制品的影响机制，面向干法缠绕工艺与预浸带缠绕工艺已经较为成熟。然而相对操作简便、成本低、使用更为广泛的湿法缠绕，目前仍缺乏系统的研究。此外，缠绕制品具有多个性能表征，往往需要兼顾多个缠绕质量指标，如何选取合理、准确的多目标优化方法，对湿法缠绕成型过程进行工艺参数优化，仍是目前分析缠绕成型工艺过程的关键。

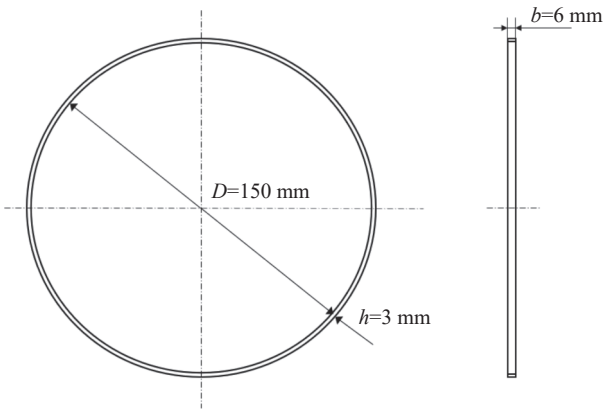
本文选取缠绕张力、胶辊间隙、缠绕速度作为湿法缠绕过程的主要工艺参数，依据响应面法进行缠绕成型试验，测试不同工艺参数下制备的 NOL 环的层间剪切强度、孔隙率与纤维体积分数，结合实验数据建立多参数耦合经验模型，进行缠绕制品不同的性能表征参数对工艺参数的敏感度分析，并以层间剪切强度最大、孔隙率最小为目标，采用 NSGA-II 算法对缠绕过程进行多目标工艺参数优化。

1 试验设计与结果

选用的纤维材料为东丽 T700 (24K)，树脂体系由高强度环氧树脂 CYDAM-130A 和韧性固化剂 CYDAM-130B 以 10 : 1 的质量比混合组成。缠绕制品固化制度采用 80℃ 保持 2 h，100℃ 保持 6 h。

湿法缠绕成型设备为湖南江南四棱数控机械有限公司生产的 SLW01.S-50-4/3-4500-CNC 四轴龙门式 III/IV 型气瓶数控缠绕机。根据国标 GB/T 1458—2008^[17]的规定制得 NOL 环形试样。NOL 环试样尺寸如图 1 所示。经芯模缠绕制得的 NOL 环如图 2 所示，对制得的 NOL 环在 3 个不同方向进行取样，试样长度为 20 mm。

在湿法缠绕工艺中，若缠绕张力大于 80 N，碳纤维在缠绕过程中频繁断带，导致缠绕过程极不稳定；若缠绕张力小于 20 N，纤维在缠绕到芯模上时层间无法压实，次品率较高。若缠绕速度过快，容易导致缠绕过程中胶液飞溅，纤维浸胶不均匀，现场环境恶劣，国标 GB/T 1458—2008^[17]规定湿法缠绕速度不得超过 0.47 m/s。胶辊间隙的选择根据树脂黏度、环境温度、树脂状态而有所差异。胶辊间隙小于 0.05 mm 时胶刀距离胶辊较近，经过胶辊后纤维表面附着胶液较少，接近



D —NOL ring diameter; h —NOL ring thickness; b —NOL ring width

图1 海军军械实验室(NOL)环尺寸示意图

Fig.1 Schematic of naval ordnance laboratory (NOL) ring dimensions

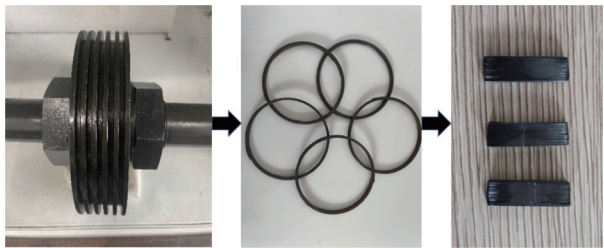


图2 NOL环试样获取

Fig.2 NOL ring specimen acquisition

于干丝状态，不利于纤维与基体之间的结合；胶辊间隙大于0.15 mm时胶刀距离胶辊较远，无法刮去纤维表面的浮胶。基于对缠绕成型过程的分析并结合实际生产经验，工艺参数选取区间与水平如表1所示。

表1 复合材料湿法缠绕工艺参数水平表

Table 1 Horizontal table of parameters of composite wet winding process

Level	t/N	$v/(m \cdot s^{-1})$	d/mm
-1	20	0.1	0.05
0	50	0.25	0.1
1	80	0.4	0.15

Notes: t —Winding tension; d —Gap between squeezer rollers; v —Winding speed.

复合材料成型过程中，选取不同的工艺参数使缠绕制品的质量存在差异。如果在缠绕成型过程中纤维层间的结合效果较差，由于层间性能一般明显弱于层内性能^[18]，容易导致复合材料结构件在服役使用阶段发生纤维与基体之间的层间破坏，致使结构件失效^[18-20]；此外，在成型过程中由于气泡残留、压实不足等原因，复合材料内部

存在一定的孔隙，对缠绕制品的力学性能产生不利影响，导致损伤过程中裂纹萌生与扩展^[21-23]。因此，本文选择缠绕制品的层间剪切强度和孔隙率作为评价缠绕制品性能的表征参数，并对不同工艺参数下缠绕制品的纤维体积分数进行测量。

根据国标 GB/T 1458—2008^[17]，在每个 NOL 环径向切取 3 个弧形剪切试样，每组工艺参数从 3 个 NOL 环中选取 9 个试样进行短梁剪切试验，测定缠绕试件的层间剪切强度。根据国标 GB/T 3365—2008^[24] 的规定，在每个 NOL 环径向切取 3 个弧形观测，每组工艺参数从 2 个 NOL 环中选取 5 个试样，使用由日本株式会社日立高新技术公司生产的 SU5000 电子显微镜对缠绕制品的孔隙率和纤维体积分数进行检测。利用电子显微镜观测缠绕制品孔隙率与纤维体积分数的图像如图 3、图 4 所示，利用 Image-J 对观测图像进行后处理，得到二值化图像，计算缠绕制品的孔隙率与纤维体积分数。

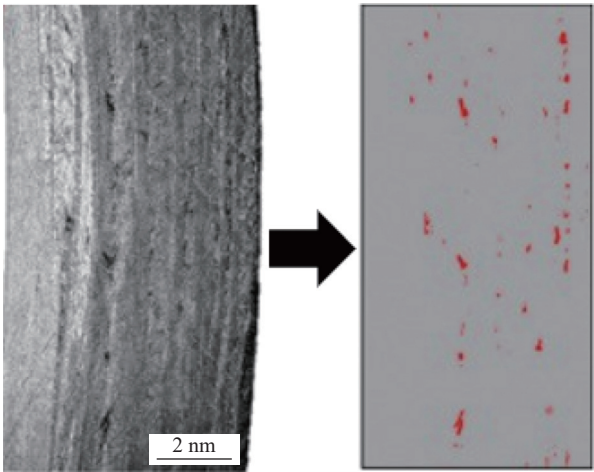


图3 观测缠绕制品孔隙的显微照片

Fig.3 Photomicrographs for observing the porosity of winding products

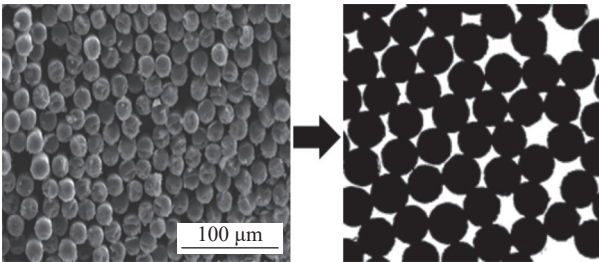


图4 观测缠绕制品纤维体积分数的显微照片

Fig.4 Photomicrographs for observation of fiber volume fraction of entangled products

试验基于响应面法^[25]设计的 3 个工艺参数组

合进行 NOL 环制备，其中有 5 组中间水平的重复性试验，目的为对拟合结果进行中心点重复实验，对模型的拟合误差进行考察，验证数据与建模的合理性。试验设计与结果如表 2 所示。

表 2 NOL 环缠绕试验设计方案及试验结果

Table 2 NOL ring winding test design and test results								
t/N	$v/(m \cdot s^{-1})$	d/mm	τ_s/MPa	$CV/\%$	$V_C/\%$	$CV/\%$	$V_f/vol\%$	$CV/\%$
80	0.4	0.1	38.11	1.72	1.54	1.88	75.71	0.38
50	0.25	0.1	52.64	0.23	2.3	0.58	75.71	0.18
50	0.4	0.05	41.98	1.14	3.52	2.54	77.36	0.59
20	0.4	0.1	30.12	1.63	3.73	1.82	62.74	0.84
80	0.1	0.1	50.71	0.52	0.4	0.64	75.15	0.54
20	0.1	0.1	35.42	0.98	2.84	0.29	62.60	0.45
20	0.25	0.15	32.14	1.04	2.62	1.38	61.24	1.12
50	0.1	0.15	45.82	0.58	0.38	0.28	67.24	0.95
50	0.25	0.1	54.89	0.38	2.3	0.68	73.23	0.22
80	0.25	0.05	47.99	0.88	2.38	2.42	77.68	0.37
50	0.4	0.15	48.65	0.64	1.4	1.33	69.83	0.57
50	0.1	0.05	48.27	0.79	2.94	0.92	73.03	1.22
50	0.25	0.1	51.98	0.31	2.2	0.61	73.46	0.31
80	0.25	0.15	48.04	1.38	0.27	0.95	75.06	1.34
50	0.25	0.1	53.09	0.45	2.4	0.42	71.98	0.19
50	0.25	0.1	51.7	0.28	2.1	0.59	72.55	0.25
20	0.25	0.05	33.14	0.81	4.28	0.35	65.91	1.04

Notes: τ_s —Interlayer shear strength; V_C —Porosity; V_f —Fiber volume fraction; CV —Coefficient of variation.

利用数学模型对表 2 中的试验数据进行二次回归函数拟合，得到缠绕张力、缠绕速度、胶辊间隙与层间剪切强度、孔隙率、纤维体积分数之间的回归模型，如下列各式所示：

$$\begin{aligned} \tau_s = & 12.88742 + 1.11824t - 31.36147v + \\ & 221.73056d - 0.146504tv - \\ & 0.828075td + 208.35067vd - \\ & 0.00893t^2 + 22.16111v^2 - 855.456d^2 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} V_C = & 5.38347 - 0.043806t + 5.975v - \\ & 23.44167d + 0.013889tv - \\ & 0.075td + 14.66667vd + \\ & 0.000108t^2 - 10.22222v^2 + 12d^2 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} V_f = & 53.60087 + 0.519104t + 38.18172v - \\ & 30.17955d + 0.02325tv + \\ & 0.342667td - 57.82333vd - \\ & 0.003462t^2 - 54.40844v^2 - 119.946d^2 \end{aligned} \tag{3}$$

式中： τ_s 为层间剪切强度； V_C 为孔隙率； V_f 为纤维体积分数； t 为缠绕张力； v 为缠绕速度； d 为胶辊间隙。

为验证多元回归模型的准确性与显著性，对建立的 3 个耦合模型进行残差分析、方差分析、预测值与实际值对比。图 5 为 NOL 环的层间剪切强度、孔隙率、纤维体积分数的试验数据的残差正态概率分布图，从图中可以看出，各点基本处于一条直线；图 6 为残差运行图，各点分散且没有出现特定分布，试验数据服从常态分布且无异常状态[26-27]；图 7 为预测值与实际值对比，可以看出，缠绕制品性能表征参数的预测值与试验值基本一致，表明多元回归模型可以准确预测缠绕制品不同的质量参数。

2 工艺参数敏感度分析

敏感度分析是以数学模型为基础，通过计算系统参数的变化对系统输出响应值的影响程度，而得出系统参数的不确定性对系统输出结果的影响[28]。在缠绕过程中，对工艺参数的敏感度分析可以综合反映缠绕制品不同的性能表征参数对不同工艺参数的敏感程度，为实际生产中工艺参数

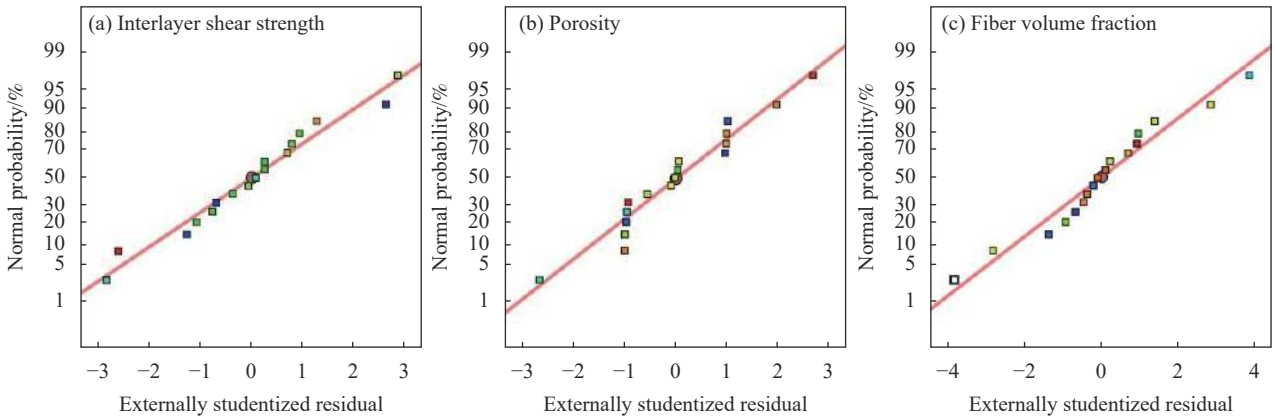


图 5 预测模型残差正态概率分布图

Fig. 5 Residual normal probability distribution diagram of predictive model

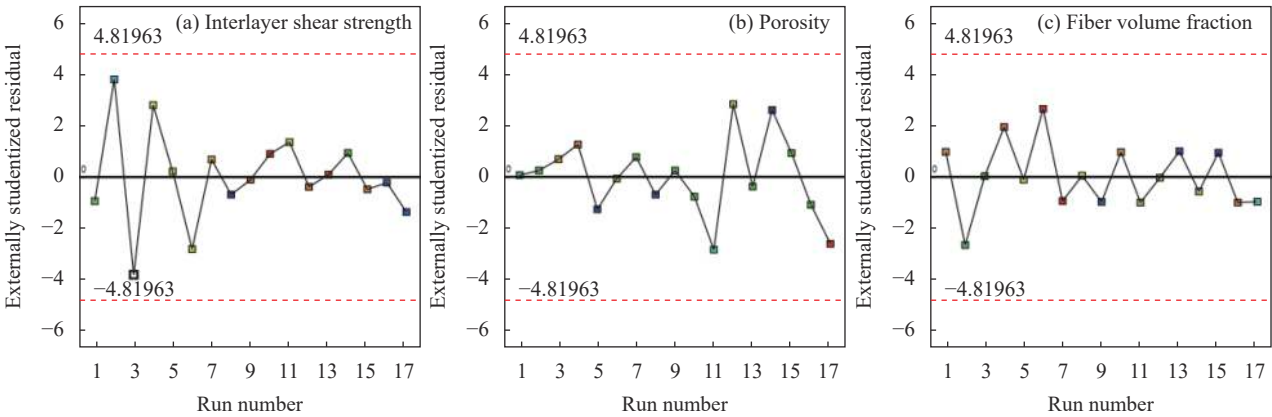


图6 预测模型残差运行图

Fig.6 Residual train diagram of predictive model

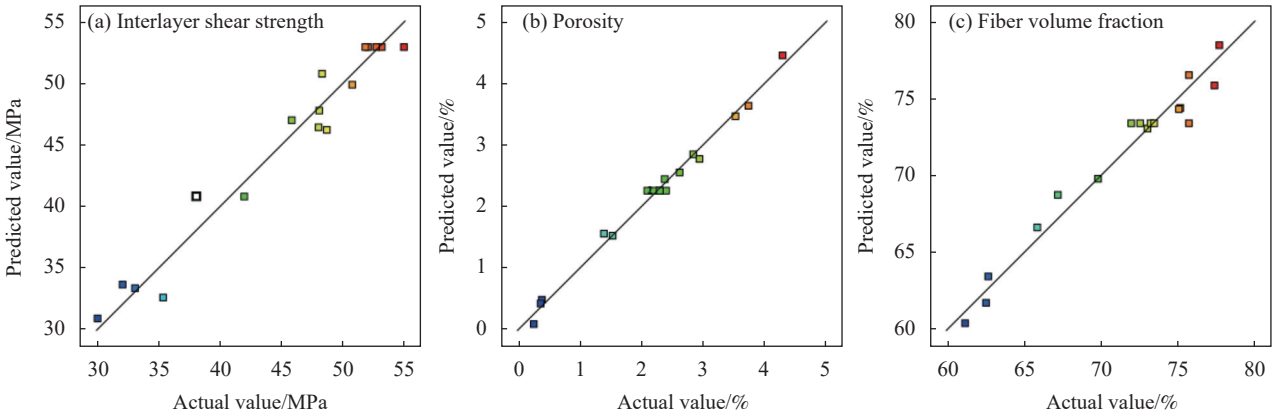


图7 预测值与实际值对比

Fig.7 Compare the predicted value with the actual value

的稳定区间选择提供依据。**Morris** 敏感度分析法是一种基于设计变量的全局敏感度分析方法^[29-30]。该方法对于其他敏感度分析法的优点在于，其计算量较为适中，可以对数学模型中不同工艺参数对表征参数的敏感度进行排序，并且可以观测到同一工艺参数的相对敏感区间与不敏感区间。**Morris** 法的敏感度系数计算表达式为

$$S_i = \frac{(\eta_i - \eta) / \eta}{\Delta_i} \tag{4}$$

$$\Delta_i = \frac{X_i - X_0}{X_0} \tag{5}$$

式中： S_i 为敏感度系数； η_i 为参数变化后的输出值； η 为参数变化前的输出值； X_i 为变化后设计变量值； X_0 为初始设置的设计变量值； Δ_i 为设计变量的变化幅度。

本文 3 个工艺参数变化前的输出值均选取中间值，即缠绕张力 50 N、缠绕速度 0.25 m/s、胶辊间隙 0.1 mm。各个变量的变化幅度为 -60%~

60%，变化幅度步长为 10%。

2.1 面向层间剪切强度的敏感度分析

不同工艺参数对层间剪切强度的平均敏感度系数如图 8 所示，对缠绕制品层间剪切强度最敏感的参数为缠绕张力，其次是缠绕速度，层间剪切强度对胶辊间隙最不敏感。

图 9 为层间剪切强度对不同工艺参数水平的敏感度系数变化。如图所示，随着缠绕张力、胶辊间隙、缠绕速度增加，其对于层间剪切强度的敏感度皆为先下降后上升，这说明极端工艺参数水平对缠绕制品质量影响较大。此外，从图中可以看出，缠绕制品的层间剪切强度对张力小、速度快的工艺参数水平比较敏感，这是由于在缠绕张力过小的情况下，纤维层间接触较为松弛，其对层间剪切强度的负面影响较大。随着缠绕速度增加，纤维的浸胶时间以及缠绕到芯模上所受张力的时间减少，对缠绕制品的层间结合质量同样影响显著。

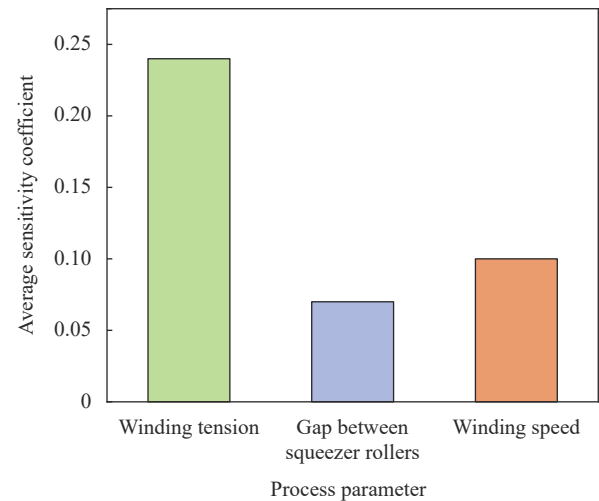


图8 层间剪切强度对工艺参数的平均敏感度系数

Fig. 8 Average sensitivity coefficient of interlayer shear strength to process parameters

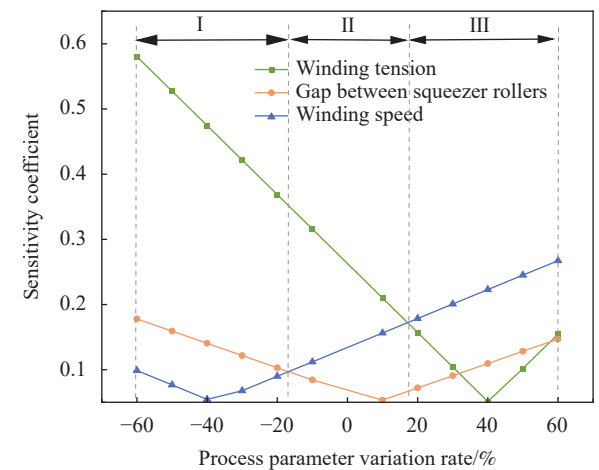


图9 层间剪切强度对工艺参数的敏感度系数变化

Fig. 9 Variation of sensitivity coefficients of interlayer shear strength to process parameters

基于工艺参数敏感度系数的变化情况，将工艺参数水平分为3个区间。如图9所示，在区间I内，缠绕速度为最不敏感的工艺参数，且敏感度系数在区间I内达到最小值，说明在这个区间内调节缠绕速度，对最终缠绕制品的层间剪切强

度影响并不明显，即区间I为缠绕速度面向层间剪切强度的相对稳定区间。以此类推，区间II、区间III分别为胶辊间隙、缠绕张力的相对稳定区间。选取相应的稳定区间中的工艺参数，对NOL环试样进行层间剪切强度测试，并与敏感区间进行对比，如表3所示。可以看出在相对稳定区间内，NOL环的层间剪切强度变化幅度较小。

2.2 面向孔隙率的敏感度分析

不同工艺参数对孔隙率的平均敏感度系数如图10所示。如图所示，对缠绕制品孔隙率最敏感的参数从大到小依次为胶辊间隙、缠绕张力、缠绕速度。

图11为基于孔隙率的不同工艺参数水平的敏感度系数变化。如图所示，随着缠绕张力、胶辊间隙的增加，其对于孔隙率的敏感度逐渐下降。这是由于在张力较小且胶辊间隙较大这两个工况下，层内的树脂流动性较差，且纤维层间的结合程度不够紧密，很难通过挤压排出层内的气泡，导致缠绕制品孔隙率较大。随着缠绕张力升高，胶辊间隙增大，层间结合质量提高，纤维层内的气泡通过张力挤压排出，且随着缠绕张力与胶辊间隙的持续增加，通过挤压与树脂填充而减少的孔隙数量达到稳定状态，敏感度逐渐降低。高速缠绕不利于缠绕过程中孔隙的排出，逐渐减小缠绕速度，缠绕制品的孔隙率有明显降低。继续减小缠绕速度，即便施加张力的时间增多，但是因为挤压排出的孔隙数量趋于饱和，所以即便减小缠绕速度，对缠绕制品孔隙率的改善效果并不明显，随着缠绕速度减小，敏感度逐渐下降。

相较于层间剪切强度，孔隙率的工艺参数敏感度系数的变化规律较为单一。从图中可以看出，孔隙率对缠绕张力与胶辊间隙的敏感度变化幅度较小，对工艺参数水平全域都较为敏感。因此，选择各工艺参数敏感度系数低于其平均敏感度系数的区间作为其工艺参数相对稳定区间，以区间

表3 基于层间剪切强度的工艺参数相对稳定区间

Table 3 Relative stability intervals for process parameters based on interlayer shear strengths

Parm	Interval	Range of process parameter	Range of interlayer shear strength variation/MPa	Magnitude of change/MPa
<i>t</i>	Stable	[55 N, 75 N]	[51.5, 53.8]	2.3
	Sensitive	[20 N, 40 N]	[39.8, 51.2]	11.4
<i>d</i>	Stable	[0.08 mm, 0.12 mm]	[52.1, 52.8]	0.7
	Sensitive	[0.05 mm, 0.09 mm]	[47.7, 52.6]	4.9
<i>v</i>	Stable	[0.1 m/s, 0.22 m/s]	[51.1, 52.9]	1.8
	Sensitive	[0.28 m/s, 0.4 m/s]	[46.2, 52.2]	6.0

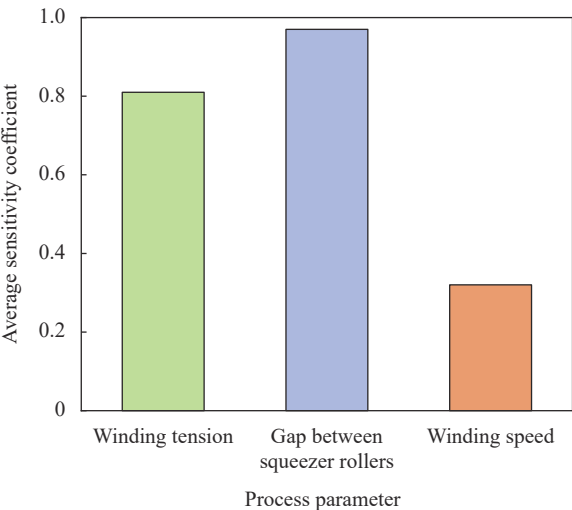


图 10 孔隙率对工艺参数的平均敏感度系数

Fig. 10 Average sensitivity coefficient of porosity to process parameters

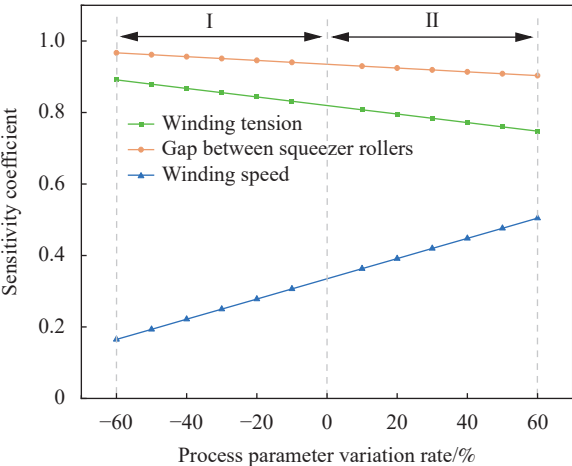


图 11 孔隙率对工艺参数的敏感度系数变化

Fig. 11 Variation of sensitivity coefficients of porosity to process parameters

I 为缠绕速度相对稳定区间，区间 II 为缠绕张力、胶辊间隙的相对稳定区间。选取相应的稳定区间中的工艺参数，对 NOL 环试样进行孔隙率检测试验，并与敏感区间进行对比，如表 4 所示。可以看出在相对稳定区间内，NOL 环的孔隙率变化幅度较小。

2.3 面向纤维体积分数的敏感度分析

不同工艺参数对纤维体积分数的平均敏感度系数如图 12 所示。如图所示，对缠绕制品纤维体积分数最敏感的参数从大到小依次为缠绕张力、胶辊间隙、缠绕速度。

图 13 为基于纤维体积分数的不同工艺参数水平的敏感度系数变化。如图所示，胶辊间隙与缠绕速度的敏感度系数均小于 0.1，其对纤维体积分

表 4 基于孔隙率的工艺参数相对稳定区间
Table 4 Relative stability intervals of process parameters based on porosity

Parm	Interval	Range of process parameter	Range of porosity variation/%	Magnitude of change/%
<i>t</i>	Stable	[55 N, 80 N]	[1.24, 1.88]	0.64
	Sensitive	[20 N, 55 N]	[1.88, 3.31]	1.43
<i>d</i>	Stable	[0.1 mm, 0.15 mm]	[1.02, 1.92]	0.80
	Sensitive	[0.05 mm, 0.1 mm]	[1.92, 3.35]	1.43
<i>v</i>	Stable	[0.1 m/s, 0.25 m/s]	[1.27, 1.85]	0.58
	Sensitive	[0.25 m/s, 0.4 m/s]	[1.85, 2.68]	0.83

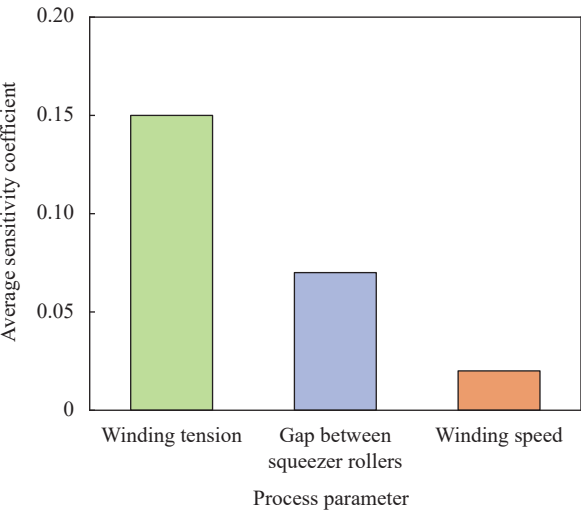


图 12 纤维体积分数对工艺参数的平均敏感度系数

Fig. 12 Average sensitivity coefficient of fiber volume fraction to process parameters

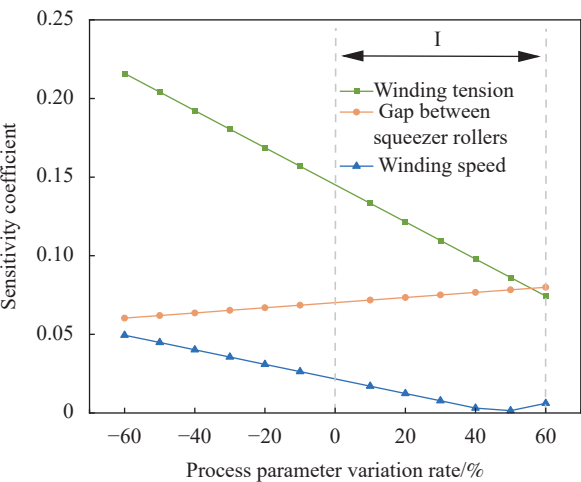


图 13 纤维体积分数对工艺参数的敏感度系数变化

Fig. 13 Variation of sensitivity coefficients of fiber volume fraction to process parameters

数的影响很小。随着缠绕张力的增加，纤维体积分数对缠绕张力的敏感度逐渐下降。这是由于缠

绕张力通过将树脂挤出的方式使缠绕制品的纤维体积分数增加，而随着缠绕张力继续增加，富余的树脂已经被排出，剩余的较少胶液难以从相互接触的层间界面挤出，缠绕张力继续增加对缠绕制品的纤维体积分数提高的效果并不明显。

选择各工艺参数敏感度系数低于其平均敏感度系数的区间作为其工艺参数相对稳定区间。选取相应的稳定区间中的工艺参数，对 NOL 环试样进行纤维体积分数测试试验，并与敏感区间进行对比，如表 5 所示。可以看出在相对稳定区间内，NOL 环的纤维体积分数变化幅度较小。

表 5 基于纤维体积分数的工艺参数稳定区间

Table 5 Relative stability intervals of process parameters based on fiber volume fraction				
Parm	Interval	Range of process parameter	Range of fiber volume fraction variation/%	Magnitude of change/%
<i>t</i>	Stable	[50 N, 80 N]	[74.4, 76.5]	2.1
	Sensitive	[20 N, 50 N]	[63.6, 74.4]	10.8
<i>d</i>	Stable	[0.05 mm, 0.1 mm]	[74.4, 75.8]	1.4
	Sensitive	[0.1 mm, 0.15 mm]	[70.2, 74.4]	4.2
<i>v</i>	Stable	[0.1 m/s, 0.25 m/s]	[73.8, 74.4]	0.6
	Sensitive	[0.25 m/s, 0.4 m/s]	[74.4, 75.7]	1.3

通过敏感度分析得到了面向层间剪切强度、孔隙率和纤维体积分数的多工艺参数敏感度，如图 14 所示。可以看出，缠绕张力与胶辊间隙对缠绕制品的不同性能表征参数影响较大，因此在湿法缠绕过程中，应该优先对缠绕张力与胶辊间隙进行选取。

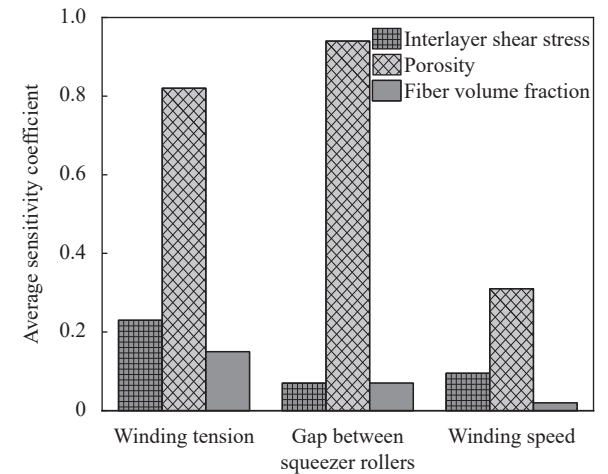


图 14 工艺参数平均敏感度

Fig. 14 Average sensitivity of process parameters

3 缠绕过程多目标工艺参数优化

通过对 NOL 环试验数据进行拟合，获得层间

剪切强度、孔隙率及纤维体积分数与不同工艺参数间的经验模型，且通过数据分析验证其可靠性，便可分别对层间剪切强度和孔隙率进行工艺参数优化，并得到相应最优表征参数下的纤维体积分数，得到基于不同性能表征参数的工艺参数组合，优化结果如表 6 所示。

表 6 单目标工艺参数优化

Table 6 Single-objective process parameter optimization

Characterization parameter	<i>t</i> /N	<i>d</i> /mm	<i>v</i> /(m·s ⁻¹)	<i>V_f</i> /vol%	Optimum value
<i>τ_s</i>	61	0.09	0.2	74.97	56.6 MPa
<i>V_C</i>	48	0.15	0.12	65.76	0.01%

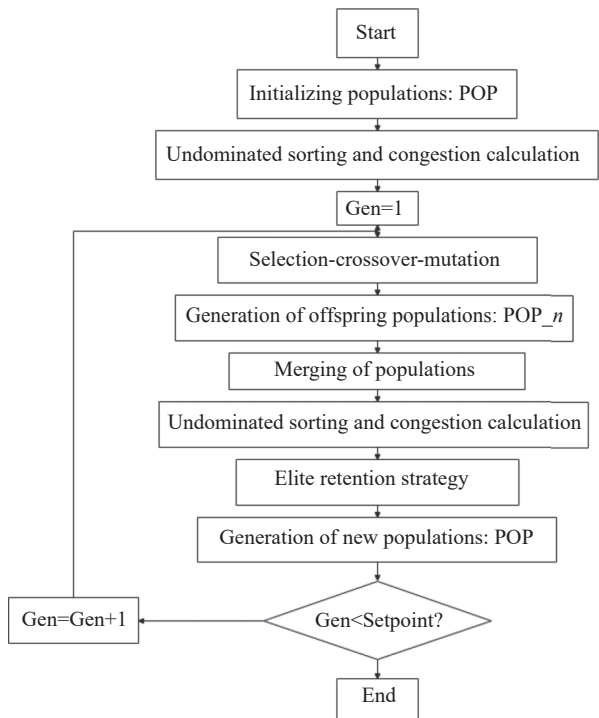
由试验数据与单目标优化结果可以看出，层间剪切强度和孔隙率这两个表征参数往往无法同时达到最优。如何在兼顾这两个性能表征参数的基础上，对工艺参数进行优化，是实际缠绕工艺成型中必须考虑的问题。基于上述情况，我们需要考虑不同表征参数的属性，通过加权或者算法，进行多目标的工艺参数优化。

针对以上多目标优化问题，本文引入 NSGA-II 优化算法^[31-32]。NSGA-II 算法是在第一代遗传算法的基础上引进了非支配排序与聚集距离的理念，非支配排序是在同一个面上运用支配的概念对各个点进行择优排序形成非支配集，而非支配集必须满足^[33]：

$$\begin{cases} M_{x \in \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}} Q = P \\ \forall i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \text{ and } i \neq j \\ x_1 > x_2 > x_3 > \dots > x_n \end{cases} \quad (6)$$

式中：*P*为非支配集合；*M*为种群；*Q*为子代在空间中的位置；*x_k*为任意因子。

NSGA-II 算法的流程如图 15 所示^[34]，首先初始化种群 POP 后进行非支配排序和拥挤度计算得到进化代数 Gen=1；然后对种群进行选择-交叉-变异操作生成子代种群 POP_{*n*}；接着将父代种群 POP 与子代种群 POP_{*n*} 合并后进行非支配排序和拥挤度计算，运用精英策略保留优秀个体生成新的父代种群 POP；最后判断遗传代数是否满足设定值，若不满足则重复选择-交叉-变异等操作，若满足则进化完成。NSGA-II 算法中的选择-交叉-变异方法与传统遗传算法无异，其特殊之处在于引进了非支配排序法降低算法的计算复杂度，采用拥挤度的方法保证了种群中个体的多样性，并使用精英策略保证优秀的个体能够有更大的概率被保留。



POP—Populations
图 15 NSAG-II 算法流程图
Fig. 15 NSAG-II algorithm flowchart

以 NSGA-II 算法对湿法缠绕工艺参数进行优化，最优个体系数为 0.3，种群大小为 200，迭代次数为 300，适应度函数偏差为 10^{-10} 。通过 NSGA-II 算法得出的优化解集如图 16 所示。在迭代了 300 次后，共得出 57 个非支配解。

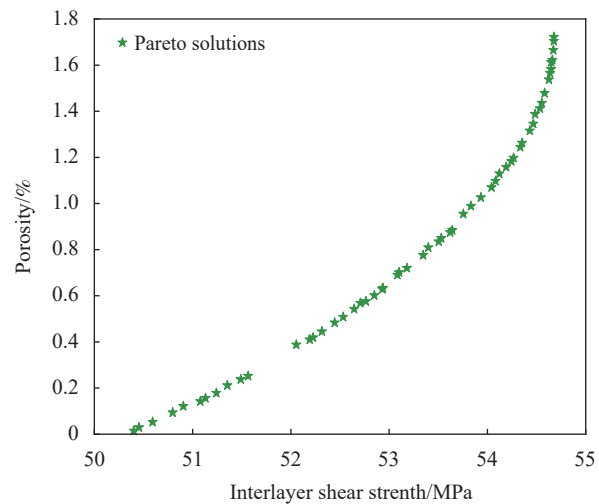


图 16 基于 NSGA-II 算法的最优解集
Fig. 16 Optimal solution set based on NSGA-II algorithm

从图中可以看出，当层间剪切强度达到 50.42 MPa 后，继续对层间剪切强度进行优化，会

使相应的孔隙率最优解逐渐增大，导致无法在 Pareto 最优解集中得到使两个表征参数同时达到最优的解。因此，需要根据不同的权重选择一组最合适的方案。本文利用主成分分析法，得出两个表征参数的综合贡献率，获取各表征参数的影响权重。主成分分析法是一种利用降维的思想，把多元素简化为主要元素，把多维空间转为低维空间的多元统计方法^[35]。其核心思想就是在不同指标中挑选出对整体影响最大的主要成分。在分析过程中，计算两两指标之间的相关性系数及指标的特征值和主成分贡献率，进而获得相应性能参数的权重。主成分分析法的具体步骤可见其他文献^[35-36]，本文不再赘述。主成分分析结果如表 7 所示。

表 7 主成分分析结果
Table 7 Results of principal component analysis

Principal component	Eigenvalue	Principal component contribution ratio/%
τ_s	1.2176	60.9
V_C	0.7824	39.1
Total	—	100

根据主成分分析得出的层间剪切强度与孔隙率的主成分贡献率，则对应权重分别为 0.6 与 0.4。结合 NSGA-II 的前沿解集，得出基于 NSGA-II 与主成分分析法的多目标最优工艺参数组合如表 8 所示。

表 8 基于 NSGA-II 与主成分分析法的多目标优化结果
Table 8 Multi-objective optimization results based on NSGA-II with principal component analysis

t/N	d/mm	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_f/\%$	τ_s/MPa	$V_C/\%$
65.1	0.12	0.17	74.13	54.4	1.24

为验证工艺参数优化方法的准确性，根据优化得到的工艺参数进行缠绕成型试验，并测试缠绕制品的相应表征参数，对比结果如表 9~表 11 所示。从表中可以看出，层间剪切强度的预测值与实际值的平均相对误差为 2.3%，孔隙率的预测值与实际值的平均相对误差为 4.2%，预测值与实际值的平均相对误差为 1.3%。理论预测值与实际值基本吻合，说明多参数耦合模型能够较为准确预测缠绕制品的性能表征，并且选取的工艺参数优化方法合理可靠，对复合材料湿法缠绕成型工艺中的工艺参数选取具有一定的指导意义与参考价值。

表 9 层间剪切强度的理论值与实际值对比
Table 9 Comparison of theoretical and actual values of interlayer shear strength

No.	<i>t</i> /N	<i>d</i> /mm	<i>v</i> /(m·s ⁻¹)	τ_s /MPa		Relative error/%
				Predict	Actual	
1	65.1	0.12	0.17	54.4	56.5	3.8
2	65.1	0.12	0.17	54.4	53.2	2.2
3	65.1	0.12	0.17	54.4	55.6	2.2
4	65.1	0.12	0.17	54.4	53.4	1.8
5	65.1	0.12	0.17	54.4	55.3	1.7

表 10 孔隙率的理论值与实际值对比
Table 10 Comparison of theoretical and actual values of porosity

No.	<i>t</i> /N	<i>d</i> /mm	<i>v</i> /(m·s ⁻¹)	Porosity/%		Relative error/%
				Predict	Actual	
1	65.1	0.12	0.17	1.24	1.32	6.5
2	65.1	0.12	0.17	1.24	1.21	2.4
3	65.1	0.12	0.17	1.24	1.22	1.6
4	65.1	0.12	0.17	1.24	1.15	7.3
5	65.1	0.12	0.17	1.24	1.28	3.2

表 11 纤维体积分数的理论值与实际值对比
Table 11 Comparison of theoretical and actual values of fiber volume fraction

No.	<i>t</i> /N	<i>d</i> /mm	<i>v</i> /(m·s ⁻¹)	<i>V_f</i> /vol%		Relative error/%
				Predict	Actual	
1	65.1	0.12	0.17	74.13	73.28	1.1
2	65.1	0.12	0.17	74.13	74.8	0.9
3	65.1	0.12	0.17	74.13	75.09	1.3
4	65.1	0.12	0.17	74.13	75.88	2.4
5	65.1	0.12	0.17	74.13	74.64	0.7

4 结论

(1) 根据响应面法设计缠绕成型实验，结合缠绕制品质量表征参数测试结果建立缠绕制品性能多元回归预测模型，通过残差分析以及预测值与真实值对比，验证了回归模型的准确性。

(2) 基于多元回归模型，进行缠绕制品不同的性能表征参数对工艺参数的敏感度分析。分析结果表明：层间剪切强度对工艺参数的敏感程度从大到小依次为：缠绕张力、缠绕速度、胶辊间隙；孔隙率对工艺参数的敏感程度从大到小依次为：胶辊间隙、缠绕张力、缠绕速度；纤维体积分数对工艺参数的敏感程度从大到小依次为：缠绕张力、胶辊间隙、缠绕速度。

(3) 以缠绕制品的层间剪切强度大、孔隙率小为目标，采用 NSGA-II 算法进行多目标工艺参数优化，得到相应的工艺参数解集；利用主成分分

析法，得到层间剪切强度、孔隙率的主成分贡献率分别为 60.9% 和 39.1%，并根据主成分分析结果对优化解集进行加权，得到优化的工艺参数组合：缠绕张力为 65.1 N、胶辊间隙为 0.12 mm、缠绕速度为 0.17 m/s，对应的缠绕制品层间剪切强度为 54.4 MPa，孔隙率为 1.24%，纤维体积分数为 74.13vol%。相应的缠绕成型试验结果表明，理论预测值与实际值基本吻合，表明优化方法准确合理。

(4) 经验证本文所采用的多目标工艺参数优化方法准确可靠，对复合材料湿法缠绕成型工艺中工艺参数的选取具有一定的指导意义与参考价值。

参考文献：

[1] 康超. 预浸带缠绕成型筒形件关键性能建模及其工艺参数优化设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
KANG Chao. Research on key performance modeling and process parameters optimized design for prepreg tape cylinder winding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018(in Chinese).

[2] 邓明, 曹子荷, 王静南, 等. 缠绕张力对干法缠绕复合材料结构残余应力及回弹变形的影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6884-6896.
DENG Ming, CAO Zihe, WANG Jingnan, et al. Investigation on the influence of winding tension on residual stress and spring-in deformation of dry wound composite structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(12): 6884-6896(in Chinese).

[3] AZEEM M, YA H H, KUMAR M, et al. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 49: 103468.

[4] 杨斌, 胡超杰, 轩福寅, 等. 多壁碳纳米管界面传感器及其在纤维缠绕压力容器原位监测中的应用 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 336-344.
YANG Bin, HU Chaojie, XUAN Fuzhen, et al. Multi-walled carbon nanotube interfacial sensor and its application in in-situ monitoring of the filament wound pressure vessel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(2): 336-344(in Chinese).

[5] YIN D, LI B, XIAO H. Analysis for the residual prestress of composite barrel for railgun with tension winding[J]. Defence Technology, 2020, 16(4): 893-899.

[6] PARK Y, HWANG T K, CHUNG S, et al. Recent research trends in carbon fiber tow prepreg for advanced composites[J]. Journal of the Korean Society of Propulsion, 2017, 2(21): 94-101.

[7] 祖磊. 先进复合材料成型技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2021: 4-5.

- ZU Lei. Advanced Composite Molding Technology[M]. Beijing: Science Press, 2021: 4-5(in Chinese).
- [8] 李梦颖. 面向湿法缠绕成型的 T700/环氧复合材料微波固化机理及工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- LI Mengying. Study on microwave curing mechanism and process of T700/epoxy composites by wet filament winding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021(in Chinese).
- [9] 史耀耀, 俞涛, 何晓东, 等. 复合材料带缠绕成型工艺参数耦合机制及优化[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(3): 831-839.
- SHI Yaoyao, YU Tao, HE Xiaodong, et al. Mechanism and optimization of process parameters coupling for composite tape winding[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(3): 831-839(in Chinese).
- [10] SCHLEDJEWSKI R, LATRILLE M. Processing of unidirectional fiber reinforced tapes-fundamentals on the way to a process simulation tool (ProSimFRT)[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(14): 2111-2118.
- [11] 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.
- [12] KHAN M A, MITSCHANG P, SCHLEDJEWSKI R. Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic tape placement process[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 47(4): 485-499.
- [13] ZU L, XU H, ZHANG Q, et al. Investigation on mechanical behavior of composite electromagnetic gun barrel based on the high tension winding[J]. *Composite Structures*, 2020, 248: 112521.
- [14] 俞涛. 带缠绕工艺参数耦合对制品性能影响机制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- YU Tao. Research on the influence mechanism of parameters coupling on product performance for tape winding process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018(in Chinese).
- [15] 洪旗, 史耀耀, 路丹妮, 等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(12): 2822-2832.
- HONG Qi, SHI Yaoyao, LU Danni, et al. Multi-response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relational analysis and response surface methodology[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2822-2832(in Chinese).
- [16] BLACHUT A, WOLLMANN T, PANEK M, et al. Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite pressure vessels[J]. *Composite Structures*, 2023, 304: 116337.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 纤维缠绕增强塑料环形试样力学性能试验方法: GB/T 1458—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for mechanical properties of filament wound reinforced plastics annular specimens: GB/T 1458—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).
- [18] 李稳, 陈蔚, 汤立群, 等. 基于纤维束增强树脂基复合材料测试的单向层合板层间剪切性能的预估方法[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2793-2803.
- LI Wen, CHEN Wei, TANG Liqun, et al. A prediction method of interlaminar shear strength of unidirectional laminates based on fiber bundle reinforced polymer composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2793-2803(in Chinese).
- [19] 谭翔飞, 何宇廷, 冯宇, 等. 航空复合材料加筋板剪切稳定性及后屈曲承载性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(2): 320-331.
- TAN Xiangfei, HE Yuting, FENG Yu, et al. Stability and post-buckling carrying capacity of aeronautic composite stiffened panel under shear loading[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(2): 320-331(in Chinese).
- [20] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 56-57.
- Chinese Aeronautical Establishment. Composite structural design manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 56-57(in Chinese).
- [21] GAO M, GUO E, CHEN Z, et al. Revealing the role of micro-pore defects in tensile deformation of a B₄Cp/Al composite using an actual three-dimensional model[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 3146-3155.
- [22] HAUSHERR J M, WAGNER L, GORYWODA M. Fabrication of artificial defects and their effect on the mechanical properties of C/C-SiC[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(3): 636-641.
- [23] 李步伟, 尧军平, 陈国鑫, 等. SiC/AZ91D 复合材料中孔隙缺陷对裂纹萌生和扩展行为的影响[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(3): 1554-1566.
- LI Buwei, YAO Junping, CHEN Guoxin, et al. Effect of porosity defects on crack initiation and propagation behavior in SiC/AZ91D composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(3): 1554-1566(in Chinese).
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法: GB/T 3365—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Carbon fiber reinforced plastics—Determination of void content and fiber volume content: GB/T 3365—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in

Chinese).

[25] LIU Y, CHAI J C, CUI X, et al. Multi-objective optimization of air dehumidification membrane module based on response surface method and genetic algorithm[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 2201-2212.

[26] AKKAYA G K, ERKAN H S, SEKMAN E, et al. Modeling and optimizing Fenton and electro-Fenton processes for dairy wastewater treatment using response surface methodology[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(5): 2343-2358.

[27] BAI H, SHI L, AOUES Y, et al. Estimation of probability distribution of long-term fatigue damage on wind turbine tower using residual neural network[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 190: 110101.

[28] 黄晓婷. 基于 Morris 法的液压互联悬架关键参数灵敏度分析及优化 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

HUANG Xiaoting. Sensitivity analysis and optimization of key parameter of hydraulically interconnected suspension based on Morris[D]. Changsha: Hunan University, 2015(in Chinese).

[29] 程强, 崔磊鑫, 张涛, 等. 基于 Morris 法的滚珠丝杠副传动效率多因素分析 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2023(6): 128-131.

CHENG Qiang, CUI Leixin, ZHANG Tao, et al. Multi-factor analysis of transmission efficiency of ball screw pair based on Morris method[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023(6): 128-131(in Chinese).

[30] VAN RENSBURG A J, VAN SCHOOR G, VAN VUUREN P A. Stepwise global sensitivity analysis of a physics-based battery model using the Morris method and Monte Carlo experiments[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 25: 100875.

[31] ZHANG Z, CHENG X, XING Z, et al. Pareto multi-objective optimization of metro train energy-saving operation using improved NSGA-II algorithms[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2023, 176: 114183.

[32] CHEN L, CAO L, WEN Y, et al. A knowledge-based NSGA-II algorithm for multi-objective hot rolling production scheduling under flexible time-of-use electricity pricing[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 69: 255-270.

[33] 王燕燕, 李家豪, 舒林森, 等. 基于 RSM 与 NSGA-II 算法的激光熔覆参数多目标优化 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(7): 185-191.

WANG Yanyan, LI Jiahao, SHU Linsen, et al. Multi-objective optimization of laser cladding parameters based on RSM and NSGA-II algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 185-191(in Chinese).

[34] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.

[35] 李海君, 徐廷学. 基于主成分分析的区域装备保障能力评估方法 [J]. *火力与指挥控制*, 2022, 47(3): 35-39.

LI Haijun, XU Tingxue. Evaluation method of regional equipment support capability based on principal component analysis[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(3): 35-39(in Chinese).

[36] UGWOKÉ R E, UBACHUKWU A A, URAMA J O, et al. Principal component analysis of ground level enhancement of cosmic ray events[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23(3): 155-169.