

T700/PPS 热塑性复合材料激光辅助缠绕工艺参数优化

陈雷鹏

南京航空航天大学, 中国·江苏 南京 210016

摘要: 本文基于激光辅助加热缠绕成型设备, 以碳纤维增强聚苯硫醚为原料制备样品, 以层间剪切强度 (ILSS) 为优化目标。利用响应曲面法分析了缠绕温度 A、缠绕速度 B、缠绕张力 C 三个工艺参数对 ILSS 的影响规律及耦合作用。分析表明: A, B 对 ILSS 的影响非常显著, C 影响显著。显著性强弱顺序为 A>B>C, 得到了最佳工艺参数, 并进行试验验证, 测得 ILSS 为 56.34MPa, 为该种材料缠绕构件工艺参数选取提供了支撑。

关键词: 热塑性复合材料; 工艺参数优化; 层间剪切强度; 最优工艺参数

Optimization of laser-assisted winding process parameters for T700/PPS thermoplastic composite materials

Chen Leipeng

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China Jiangsu Nanjing 210016

Abstract: In this paper, based on the laser-assisted heating winding and forming equipment, carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide is used as the raw material to prepare the samples, and the interlayer shear strength (ILSS) is taken as the optimization target. The response surface method was used to analyze the influence of three process parameters, namely, winding temperature A, winding speed B and winding tension C, on ILSS and their coupling effects. The analysis shows that the effects of A and B on ILSS are very significant, and the effect of C is significant. The order of significance is A>B>C. The optimum process parameters are obtained and verified experimentally, and the ILSS is measured to be 56.34MPa, which provides support for the selection of process parameters for winding members of this kind of material.

Keywords: Thermoplastic composite materials; Process parameter optimization; Interlayer shear strength; Optimal process parameters

0 引言

传统热塑性复合材料成型工艺由手糊成型、拉挤成型、热压罐成型等, 传统工艺技术虽已成熟且应用广泛, 但生产效率低下^[1]。与传统的手工铺层技术相比, 纤维缠绕技术提供了更高的自动化与精度^[2], 更高的生产效率。因此该技术已被广泛应用于各种成型件, 但使用纤维缠绕技术制作成型件的成本较高, 碳纤维占据了其中大部分费用。

国外关于热塑性复合材料纤维缠绕工艺的研究开展更早。Carpenter^[3]等首次提出将单辊热塑性缠绕原位固结的半经验模型, 将固结过程分为三个阶段: 本体固结, 基体流动与纤维床变形, 得到了缠绕速度与压实载荷的耦合作用对制品内部空隙的影响规律。其半经验模型被后续研究广泛应用。而国内对热塑性复合材料缠绕成型工艺研究相对较少, 目前研究多集中在热固性复合材料的缠绕与铺放工艺研究, 对于热塑性复合材料工艺研究, 宋清华^[4]用响应

曲面法分析热压温度、热压辊压力及冷压辊压力各工艺参数及其耦合作用对层合板力学性能的影响。由此可见当前针对激光加热原位固结纤维缠绕工艺的研究较少。在复合材料缠绕制品制造过程中, 探究各工艺参数对制品性能的影响规律, 精准把控工艺参数, 探究最优工艺参数组合, 有助于提高制品性能, 降低制造成本。

本文基于当前背景, 针对 T700/PPS 热塑性复合材料的缠绕成型工艺开展参数优化研究, 利用激光辅助加热原位固结缠绕试验系统, 采用 T700/PPS 预浸料制备 NOL (Naval Ordnance Laboratory) 环试样, 以层间剪切强度为评价指标, 结合该材料缠绕工艺特点, 运用响应面法中的 Box-Behnken 设计试验方案, 研究缠绕温度, 缠绕速度, 缠绕张力对层间剪切性能的作用规律, 并借助二阶响应模型对实验数据进行回归拟合, 基于拟合方程生成响应曲面, 分析各工艺参数之间的交互效应与耦合影响, 进一步通过模型求解得出最优工艺组合, 并开展验证实验以检验预测

结果的准确性。

1 试样与试验

1.1 材料与样品制备

T700/PPS 预浸料采用亨博复合材料有限公司生产，其基本物性参数如下表 1 所示

表1 T700/PPS预浸料物理性能

纤维面密度 /gsm	纤维体积含量/wt%	单层厚度/mm	预浸料拉伸强度/MPa	密度/(g/cm ³)
150	33	0.15	2150	1.6

试样采用激光辅助加热缠绕原位固结成型，采用卧式缠绕机缠绕，激光器提供缠绕成型所需的温度，依据 GB/T1458-2023^[5]《纤维缠绕增强复合材料环形试样力学性能试验方法标准》中的试样标准尺寸，所有铺层方向均为 0°，缠绕完成后，将环从模具上脱模，切割，打磨，得到 18mm×6mm×3mm 的试样。

1.2 测试与表征

层间剪切试验在 LF5000 型万能试验机（上海力试公司）进行，试验开始后，压辊以 1mm/min 的恒定速率向下对试样施加均匀且连续的载荷，随着压辊向下，载荷持续升高，当载荷突然降低时，视为材料发生破坏，并记录破坏载荷。试样表面出现压痕。为保证试验的合理性，每组测试试样数不少于 3 个，层间剪切强度计算公式如下 (1)。

$$\tau_s = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h} \tag{1}$$

式中， τ_s 为层间剪切强度，MPa; P_m 为试验测得的最大载荷，N; b 为试样宽度测量值，mm; h 为厚度测量值，mm。

2 结果与讨论

2.1 多因素对层间剪切性能的影响

首先研究了单一因素对 T700/PPS 复合材料环层剪性能的影响，每次只更改一个因素其他因素的大小选取中间值。以此确定出响应曲面法的因素水平。根据 BBD 响应曲面法，设计三因素三水平总计 17 组试验。分析各工艺参数对层间剪切强度的影响，压辊压力固定设置为 1MPa，设计水平表如下表 2 所示。这 17 组设计及结果如下表 3 所示

表2 T700/PPS复合材料环试验因素及水平

因素	水平		
	-1	0	1
A/°C	300	340	380
B/(mm/min)	360	1080	1800
C/MPa	75	287.5	500

注: A—缠绕温度; B—缠绕速度; C—缠绕张力。

表3 T700/PPS复合材料环BBD设计及结果

运行	A	B	C	层间剪切强度 /MPa	运行	A	B	C	层间剪切强度 /MPa
1	0	0	0	53.91	10	0	0	0	53.82
2	0	-1	-1	52.88	11	0	0	0	54.9
3	1	-1	0	52.63	12	0	1	1	43.4
4	-1	0	-1	40.67	13	0	0	0	54.93
5	-1	1	0	34.22	14	0	-1	1	53.22
6	1	1	0	50.34	15	0	0	0	54.4
7	-1	-1	0	47.83	16	-1	0	1	41.43
8	0	1	-1	40.88	17	1	0	-1	49.69
9	1	0	1	52.79					

获得软件对数据进行分析所得的二次回归方程，见下式 (2)。

$$R = 54.39 + 5.16A - 4.72B + 0.84C + 2.38AB + 0.585AC + 0.545BC - 4.79A^2 - 3.34B^2 - 3.45C^2 \tag{2}$$

式中: R 为层间剪切强度, A、B、C 分别为缠绕温度、缠绕速度、纤维张力的编码值。

表4 方差分析

源	平方和	F值	P值
模型	647.24	89.11	< 0.0001
A	213.21	264.19	< 0.0001
B	177.85	220.37	< 0.0001
C	5.64	6.99	0.0332
AB	32.04	39.69	0.0004
AC	1.37	1.70	0.2340
BC	1.19	1.47	0.2644
A ²	96.75	119.88	< 0.0001
B ²	47.07	58.32	0.0001
C ²	50.22	62.22	< 0.0001
残差	5.65		
失拟	4.54	5.47	0.0671
Pure Error	1.11		
Cor Total	659.76	16	
Std.Dev.	0.8498	R ²	0.9915
Mean	44.89	校正R ²	0.9806
C.V.%	1.99	预测R ²	0.8883
		信噪比	30.4301

注: C. V. —Variable coefficient

方差分析如表 4 所示，模型的 P 值代表各变量对响应值影响的大小，P<0.0001 时为非常显著，0.0001 ≤ P < 0.05 时为显著，P ≥ 0.05 时为不显著，模型的 F 值为 89.11，而 P 值 <0.0001, 说明该模型非常显著，仅有小于 0.01% 的概率会因噪点而产生如此大的 F 值。模型中 A, B 是对响应值有非常显著影响的因素，而 C 和交互作用 AB 有显著影响，关于缠绕工艺参数对 NOL 环层间剪切强度的影响程度，A>B>C。交互作用 AC,BC 对响应值有影响但不显著。信噪比也是判断模型是否精确的一种方法，当信噪比大于 4 时，代表模型具有良好的辨识度，本模型的

信噪比为 30.4301, 符合条件。R2 的预测值与校正值之差为 0.0109, 小于 0.2, 说明模型与测试数据拟合良好。拟合度不足 F 值为 5.47, 这意味着拟合度不足相对于纯误差并不显著。

2.2 工艺参数耦合作用对层间剪切性能的影响及优化

利用 Design Expert 软件生成响应面和等高线图, 研究了 A、B 和 C 中每两个因素对 NOL 环层间剪切性能的影响。这些曲线图直观地表示了工艺因素间的相互作用效果。响应面图越陡, 响应变量对响应值的影响越强, 而响应面图越平滑, 影响越弱。相互作用效应的重要性可以通过检查等高线图案来确定。更接近于椭圆形图案意味着更重要的交互作用。

在缠绕过程中, 缠绕温度 (A) 是保证树脂达到合适加工黏度的关键, 当温度低时, 树脂粘度高, 分子链运动能力弱, 扩散缓慢, 导致成型难度增大, 温度过高时, 容易导致树脂产生热降解, 降低构件的成型质量。缠绕速度 (B) 低时, 原料在加热区时间与辊压时间都被延长, 聚合物分子链扩散充分, 界面间的气泡可以充分排出, 构件成型质量提高。但过低的缠绕速度导致生产效率低。当缠绕速度高时, 原料在加热区时间与辊压时间都被缩短, 导致界面间的气泡不能充分排出, 聚合物分子链还未发生扩散, 因此会导致结合质量的降低。图 1 (a) 是缠绕温度和缠绕速度对层间剪切强度的耦合影响曲面图, 当缠绕速度一定时, 层间剪切强度随缠绕温度增加呈现先增后减的趋势。当缠绕温度一定时, 随缠绕速度变慢, 层间剪切强度升高。图 1 (b) 显示等高线形状为椭圆形, 表明 A 与 B 具有显著的交互作用。A 附近的轮廓线比 B 的更为密集, 说明 A 对层间剪切强度影响大于 B。

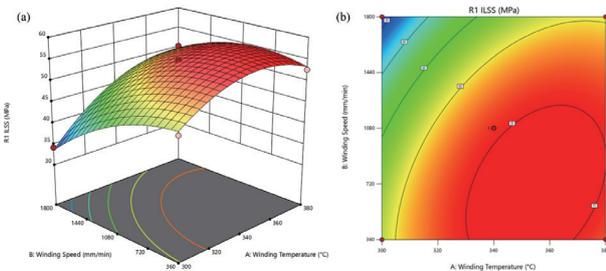
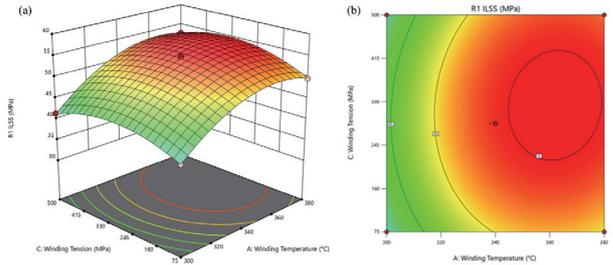


图1 缠绕温度和缠绕速度对层间剪切强度的影响。

(a)响应面, (b)等值线图

缠绕张力 (C) 是影响热塑性复合材料缠绕构件成型质量的关键因素之一, 如下图 2 (a) 所示, 温度不变, 施加适宜的缠绕张力有助于形成适宜的成型压力, 从而增强

层间结合紧密性, 减少孔隙缺陷。但当张力过大时, 在与温度的耦合作用下, 材料内部会产生过高的残余应力, 导致力学性能的下降。在一定的张力条件下, 随温度升高, 层间剪切强度先增后减, 树脂在高温下流动性明显增强, 在张力作用下树脂更容易被挤出, 因而降低了构造质量。图 2 (b) 显示轮廓形状趋近于圆形, 表明 A 与 C 之间的交互作用并不显著。

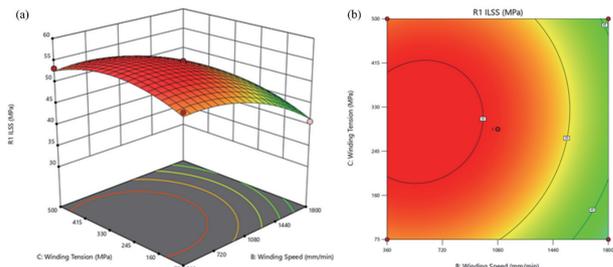


(a)响应面

(b)等值线图

图2 缠绕温度和缠绕张力对层间剪切强度的影响

图 3(a) 为 B 和 C 对层间剪切强度的耦合影响曲面图, 如图 3(a) 所示, 缠绕速度一定时, 层间剪切强度随缠绕张力的增加先增后减, 而缠绕张力一定时, 层间剪切强度随缠绕速度提高始终下降。图 3 (b) 显示轮廓形状为趋近于圆形, 表明 B 与 C 之间的交互作用并不显著。



(a)响应面

(b)等值线图

图3 缠绕速度和缠绕张力对层间剪切强度的影响

通过对二阶回归方程 (2) 进行极值点的求解, 求取缠绕温度 (A)、缠绕速度 (B) 和缠绕张力 (C) 的一阶偏导数, 并令其等于零, 可建立方程组以求解极大值点, 并确定极值点为最值点, 可得出层间剪切强度达到最大值时所对应的各工艺参数取值。最佳工艺参数组合为: 缠绕温度 355.52°C, 缠绕速度 696.96mm/min, 缠绕张力 315.51MPa, 层间剪切强度预测值为 56.69MPa, 使用求得的最佳工艺参数进行缠绕制样并测试, 得到的实际层间剪切强度为 56.34MPa, 与预测值相近, 证明了模型的准确性。

3 结语

响应曲面法可以快速且系统的分析 T700/PPS 复合材

料激光辅助缠绕过程中各工艺参数对 NOL 环层间剪切性能的影响。方差分析结果显示: 缠绕温度 A, 缠绕速度 B 是对响应值具有非常显著影响, 而缠绕张力 C 和交互作用 AB 有显著影响, 关于缠绕工艺参数对 NOL 环层间剪切强度的影响程度, $A>B>C$ 。交互作用 AC, BC 呈现不显著影响。

基于二次回归模型优化得到的最佳工艺参数组合为: 缠绕温度 355.52℃, 缠绕速度 696.96mm/min, 缠绕张力 315.51MPa。

层间剪切强度预测值为 56.69MPa, 实际试验值为 56.34MPa, 与预测值相差小, 证明了模型的准确性, 对实际激光辅助加热缠绕原位固结成型有参考价值。

参考文献:

[1] 高竹青, 刘彬, 白永平. 碳纤维增强复合材料加工成型工艺[J]. 塑料助剂, 2025,(03):77-81.

[2] A. Air, M. Shamsuddoha, B.G. Prusty. A review

of Type V composite pressure vessels and automated fibre placement-based manufacturing[J]. Compos. B. Eng. 253 (2023): 110573.

[3] C.E. Carpenter, J. S. Colton. On-line consolidation mechanisms in thermoplastic filament winding[J]. Polymer Composites, 1994, 15(1): 55.

[4] 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[C]. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2017: 248-261.

[5] GB/T 1458-2023, 纤维缠绕增强复合材料环形试样力学性能试验方法[S].

[6] GB/T 3365-2008. 碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法[S].

作者简介: 陈雷鹏 (2001.06-), 男, 汉族, 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 研究方向: 热塑性复合材料成型方向。