

# PA66GF30与GFREP激光透射连接工艺参数建模与优化

胡建民, 顾杰, 王霄\*

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2023年2月24日; 录用日期: 2023年5月1日; 发布日期: 2023年5月8日

## 摘要

针对热固性聚合物与热塑性聚合物的连接需求, 采用纳秒脉冲激光连接系统对热固性玻纤增强环氧树脂与热塑性纤维增强尼龙进行激光透射连接。为了提高连接强度, 利用激光对热固性聚合物进行表面织构预处理, 然后再进行两者激光连接。基于响应曲面法对两者的激光透射连接建立激光功率、连接速度、表面织构预处理各工艺参数与连接强度及预处理时间的数学模型, 分析各工艺参数的交互式影响, 并通过粒子群算法求解得出最优参数组合。结果表明对连接强度的交互式影响较为显著的是孔间距 - 扫描次数、连接速度 - 孔间距、激光功率 - 连接速度。试验所建模型在设定工艺参数内的任一点的预测结果与实验结果具有较高的一致性。

## 关键词

激光透射连接, 热固性与热塑性聚合物, 表面织构, 响应面法, 参数优化

## Modeling and Optimization of Process Parameters for Laser Transmission Connection of PA66GF30 and GFREP

Jianmin Hu, Jie Gu, Xiao Wang\*

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Feb. 24<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 1<sup>st</sup>, 2023; published: May 8<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

According to the connection requirements of thermosetting polymers and thermoplastic poly-  
\*通讯作者。

文章引用: 胡建民, 顾杰, 王霄. PA66GF30 与 GFREP 激光透射连接工艺参数建模与优化[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 1793-1806. DOI: 10.12677/mos.2023.123166

mers, a nanosecond pulsed laser connection system is used for laser transmission connection of thermosetting glass fiber reinforced epoxy resin and thermoplastic fiber reinforced nylon. In order to improve the connection strength, the surface texture pretreatment of the thermosetting polymer is carried out by laser, and then the two kinds of material are connected with laser. Based on the response surface methodology, a mathematical model of laser power, connection speed, surface texture pretreatment, various process parameters, connection strength and pretreatment time was established for the laser transmission connection of the two, and the interactive influence of each process parameter was analyzed. The algorithm solves the optimal parameter combination. The results show that the most significant interactive effects on connection strength are hole spacing-scan times, connection speed-hole spacing, laser power-connection speed. The prediction results of the model built in the experiment at any point within the set process parameters are in high consistency with the experimental results.

## Keywords

Laser Transmission Connection, Thermosetting Polymers and Thermoplastic Polymers, Surface Texture, Response Surface Methodology, Parameter Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在热塑性聚合物连接的研究过程中, 激光透射连接由于具有能量集中、定位准确, 可重复性高、灵活性好、几乎无残余应力、易于实现自动化连接等优点, 逐步成为热塑性聚合物之间最具潜力的新型连接方法之一。从国内外的研究现状可知, 国内外在关于热塑性聚合物的激光透射连接方面研究较为深入 [1] [2] [3] [4], 但有关热固性聚合物的激光透射连接的研究极少。而热固性聚合物与热塑性聚合物之间也存在连接需求, 但当前这方面知识缺乏, 限制了其应用。Amend [5]等人对 GFREP 与 PC 进行了激光透射连接研究, 其中上层选用 GFREP 作为透光材料, 下层选用炭黑填充的 PC 作为吸光材料, 成功实现了两者的连接。当前关于激光透射连接热固性聚合物与热塑性聚合物的研究尚未形成一个完整的知识体系 [6]。基于热固性与热塑性聚合物之间的连接需求, 本文选用玻璃纤维环氧树脂与玻璃纤维尼龙两种应用广泛的聚合物复合材料, 进行两种材料之间的激光透射连接试验。

本文选用热塑性玻璃纤维增强尼龙(PA66GF30)作为上层材料, 热固性玻璃纤增强环氧树脂(吸光 GFREP)作为下层材料。本文对两者进行激光透射连接实验, 并针对两者直接进行透射连接的强度较低的情况, 提出在吸光 GFREP 进行激光表面织构处理来提高连接强度, 并对激光透射连接性能与连接工艺参数建模与优化进行研究。

## 2. 试验方案与性能分析

### 2.1. 试验材料与设备

本文在试验中所用的热固性聚合物材料为吸光玻璃纤维增强环氧树脂, 热塑性材料为玻璃纤维增强尼龙(PA66GF30)。其中玻璃纤维增强环氧树脂常见为透光性材料, 吸光 GFREP 是在透光材料的制备过程中添加黑色素以获得, 使得它在激光透射连接中仅能作为下层吸收材料。玻璃纤维增强环氧树脂是由

环氧树脂和玻纤热固形成，玻璃纤维含量为 30%，试样尺寸为 50 mm × 20 mm × 1 mm。

对吸光 GFREP 进行表面微结构所使用的设备为苏州德龙激光股份有限公司的皮秒激光器。其脉宽约 12 ps，波长 1064 nm，频率 0.4~50 Mhz，激光输出功率 6~70 W，光斑直径小于 20 μm。激光透射连接采用纳秒脉冲激光连接系统，最大功率为 20 W，波长为 1064 nm，光斑直径为 30 μm，脉宽为 100 ns，频率为 20 kHz。采用 UTM4104 型电子万能试验机对接头进行拉伸实验。

## 2.2. 连接方案分析

对于热塑性聚合物而言，形成良好连接的前提是上层材料对红外激光的透射率达到 50%以上。本文使用紫外-可见-近红外分光光度计测试 PA66GF30 材料的激光透射率。通过测试可知，PA66GF30 的反射率为 16%，透射率为 65%。由于 PA66GF30 对近红外激光的透射率在 50%以上，因此适合作为上层透光材料。

经过实验验证后发现，在相同的激光功率和连接速度下，使用螺旋路径连接得到的接头质量要比直线路径要好，因此在实验过程中选择了激光螺旋扫描连接[7]。

经过一系列实验后发现 PA66GF30/GFREP 可以连接但是连接强度不高。在激光功率为 9 W、12 W、15 W、18 W、21 W 时，对应得到的连接强度依次为 120.00 N、135.48 N、151.85 N、140.50 N、93.74 N。产生这种连接强度不高的原因是由于下层吸光 GFREP 通过界面传热至上层 PA66GF30 使其熔化，该过程存在热量损失，导致连接强度较低。为了进一步提高连接强度，本文采用在吸光 GFREP 的连接面做表面微结构处理的方案以提高 PA66GF30 和吸光 GFREP 的接头强度以满足应用需求。

## 2.3. 表面微结构处理

在进行金属与聚合物的激光透射连接时，有研究表明，在金属表面进行微造型以获得不同尺寸和密度的凹槽，可以增大连接界面的接触面积，增强界面处的机械铆接，同时减少热量积聚，从而提高连接质量[8] [9] [10]。受此研究启发，对吸光 GFREP 表面进行激光微结构造型，先加工出具有一定规则的微结构，再进行激光连接。对吸光 GFREP 进行表面微结构处理使用的是皮秒激光微加工系统，使用该系统在吸光 GFREP 表面制备微孔结构，微孔区域为 20 mm × 3 mm，所用设备及微结构处理示意图如图 1 所示。

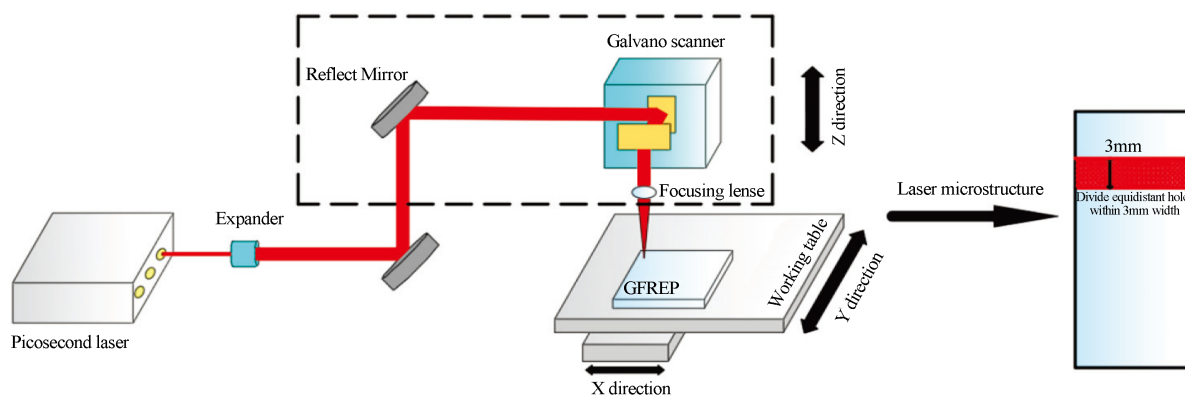


Figure 1. Schematic diagram of picosecond laser texturing on the surface of light-absorbing GFREP

图 1. 吸光 GFREP 表面皮秒激光微结构处理示意图

实验选择的微孔类型，孔间距(d)和微孔扫描次数(N)为选定的预处理工艺参数，选定孔的外径为 0.24 mm 不变。

## 2.4. 激光透射连接原理

图 2 给出了 PA66GF30 与基于表面织构处理的吸光 GFREP 的透射连接示意图。热固性聚合物的表面经过织构后能够让更多熔融态聚合物流入表面织构槽内，织构后的连接过程可以分为以下三步：

- 1) 激光束穿透上层透光热塑性聚合物试样到达连接界面，下层吸光热固性聚合物上表面吸收激光束并转化为热能，以界面传热的方式传递给上层，使上层聚合物熔化；
- 2) 上层聚合物充分熔化后在夹紧力和激光移动的作用下排出槽内空气，扩散流入热固性聚合物表面的织构孔槽中；
- 3) 热塑-热固性聚合物紧密贴合在一起，待冷却后，熔融态聚合物在槽内凝固，与热固性聚合物形成机械铆接。

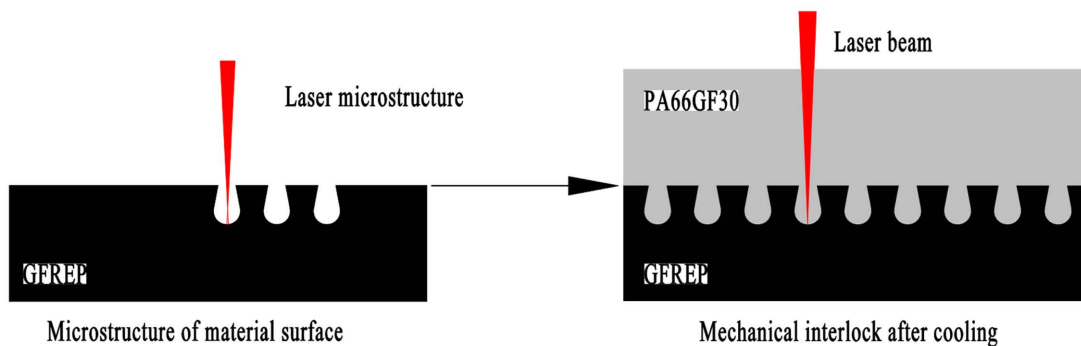


Figure 2. Schematic diagram of connection between PA66GF30 and light-absorbing GFREP

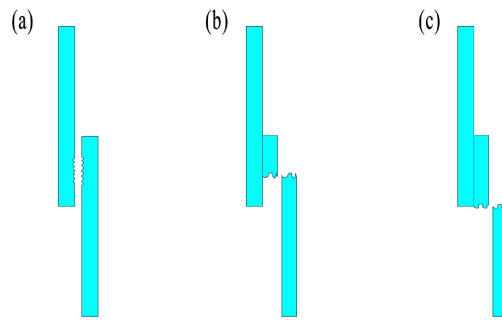
图 2. PA66GF30 与吸光 GFREP 连接示意图

## 2.5. 性能测试与分析

使用电子万能试验机对未做织构的试样进行拉伸强度测试，所使用的激光功率依次为 9 W、12 W、15 W、18 W、21 W，对应得到的连接强度依次为 120.00 N、135.48 N、151.85 N、140.50 N、93.74 N。在相同的参数下，表面织构处理后连接强度经试验测得接头连接强度依次为 158.30 N、199.23 N、220.18 N、209.40 N、138.50 N，证明表面织构处理可有效提高接头的连接强度。

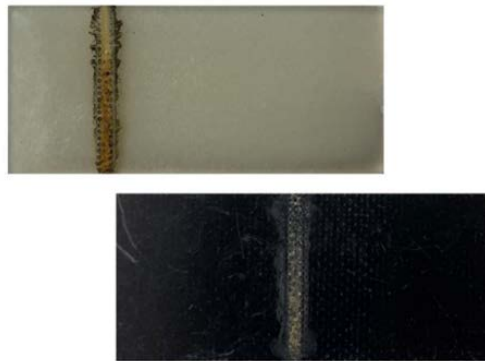
由试验结果可知，随着激光功率的增大，接头的连接强度也随之增大，当激光功率增至 15 W 时，连接强度达到最大值，而当激光功率继续增大时，接头的连接强度呈下降趋势。这是由于在激光功率较低条件下，吸光 GFREP 吸收到的能量较小，通过界面传热方式传递到上层 PA66GF30 的热量不足，致使 PA66GF30 不能充分熔化并扩散流动至吸光 GFREP 表面的织构孔槽内，无法形成稳固可靠的接头，仅有表面由粗糙度引起的机械连接，从而导致接头的连接强度并不大；随着激光功率提高时，下层传递到上层 PA66GF30 的热量足够，可以充分熔化并扩散流入织构孔槽内，虽然会被吸光 GFREP 内部的长玻璃纤维阻隔流入，但已能流入大部分，同时形成连续均匀的小气泡，因此接头的连接强度也更大；当激光功率超过 15 W 时，激光功率的持续增大破坏了吸光 GFREP 表面的孔槽织构，过多的传热也会使 PA66GF30 热分解，在焊缝区域产生较大的气泡，大气泡的存在使得接触面积缩小，同时也容易产生应力集中，这是接头连接强度降低的原因。

连接件的失效可以分为三种形式：连接界面失效、连接界面处连接件断裂和连接件未连接处断裂[11][12]，如图 3 所示。当发生如图 3(a)所示失效形式时，说明接头处的连接强度低于两被连接材料的拉伸强度，若失效形式如图 3(b)或图 3(c)所示时，则说明接头连接强度较大，导致连接件断裂。



**Figure 3.** Connection failure mode  
**图 3.** 连接件失效形式

对吸光 GFREP 表面织构处理前后的连接试样分别进行拉伸实验, 拉伸后发现二者间的失效均发生在连接界面处。如图 4 所示, 可以看到, 剥离后的 PA66GF30 材料表面有大量 GFREP 材料的组织残留, 同时, GFREP 的表面亦含有 PA66GF30 残留组织。试验结果说明铆接效应虽然提高了连接强度, 但连接接头处连接强度仍小于 PA66GF30 与 GFREP 材料自身的抗拉强度。



**Figure 4.** Tensile failure diagram after texture treatment  
**图 4.** 织构处理后的拉伸失效图

### 3. 基于响应曲面法的激光透射连接工艺参数建模

#### 3.1. 实验设计

在该试验中采用 4 因素 5 水平的中心复合设计进行实验参数设计。影响接头质量的主要因素有激光功率、连接速度、孔间距、扫描次数, 根据前期的单因素实验可以确定出各工艺参数大致的取值范围。工艺参数的取值范围如表 1 所示。

**Table 1.** Value range of process parameters  
**表 1.** 工艺参数的取值范围

Code	Parameter	Unit	Level				
			-2	-1	0	+1	+2
A	Laser power	W	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
B	Connection speed	mm/s	10	15	20	25	30
C	Hole spacing	mm	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
D	Scanning times	N	1	2	3	4	5

利用 Design-Expert 软件对表 1 数据进行方案设计即可生成对应的实验设计方案, 并将作为响应值的接头强度与预处理时间两项实验结果填入实验设计数据表中。

### 3.2. 结构预处理时间的方差分析和数学模型

根据实验设计数据表中的结果对结构预处理时间这个响应值进行方差分析, 并创建各工艺参数与响应值之间的数学模型[13]。由方差分析表中的数据可以获知, 预处理时间模型的 F 值为 33.84, P 值的大小可以反映出模型的可靠性, 若  $P < 0.0001$  则说明该模型的拟合效果比较显著。另外, 从表中还可以看出模型的拟合度为 0.9693, 拟合修正系数为 0.9407, 预测拟合系数为 0.8232。Adj.  $R^2$  和 Pred.  $R^2$  相差不大且均接近于 1, 说明模型拟合度较高且充分有效。该模型信噪比为 19.3149, 信噪比大于 4 说明该模型的预测性较好。

通过 Design Expert 软件中进行分析拟合得到其二阶非线性响应面多项式[14], 预处理时间( $T_{\text{pre-time}}$ )的编码方程和实际方程如式(1)和式(2)所示:

编码方程:

$$T_{\text{per-time}} = 23 - 6.38 * C + 6.46 * D - 1.81 * C * D + 0.5729 * A^2 + 0.5729 * B^2 + 1.32 * C^2 + 0.5729 * D^2 \quad (1)$$

实际方程:

$$T_{\text{pre-time}} = 70.25 - 2.46667 * A - 0.75 * B - 135.41667 * C + 12.70833 * D - 0.005 * A * B - 0.25 * A * C - 0.025 * A * D - 0.125 * B * C - 0.0125 * B * D - 18.125 * C * D + 0.091667 * A^2 + 0.022917 * B^2 + 132.29167 * C^2 + 0.572917 * D^2 \quad (2)$$

图 5 显示了预处理时间数学模型预测结果和实验结果的关系对比图, 从图中可明显观察到, 实验数据与相应的模型预测值相差较小, 说明该模型对实验结果有良好的预测效果。为进一步验证所构建的预处理时间数学模型的精度, 从实验设计数据表中随机抽取 3 组工艺参数, 将工艺参数值带入模型, 将模型预测结果与实验数据进行比较。如表 2 所示, 很明显两者之间的误差较小, 且小于 6%, 说明该模型具有足够高的精度[15]。

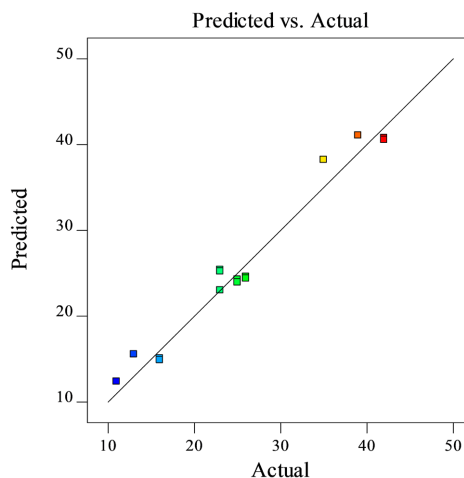


Figure 5. Relationship between experimental value and predicted value of pretreatment time

图 5. 预处理时间的实验值和预测值的关系



**Table 2.** Accuracy test of pretreatment time model  
**表 2.** 预处理时间模型的精度检验

NO.	A/W	B/mm/s	C/mm	D/N	Pretreatment time/s		
					Actual	Predicted	Error /%
1	12.5	15	0.4	4	42	40.7083	3.1
2	15.0	20	0.5	3	23	23.3750	1.6
3	12.5	15	0.6	2	16	15.0417	5.9

### 3.3. 连接强度的方差分析和数学模型

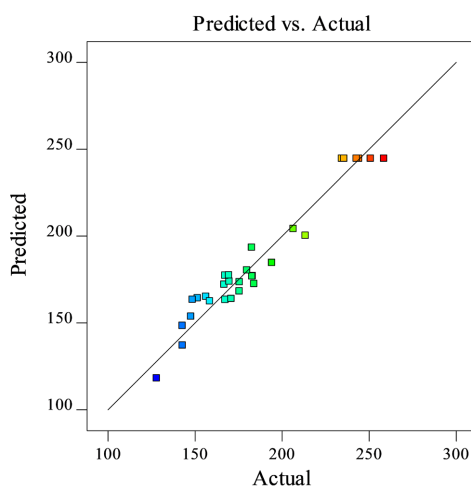
A 表示激光功率, B 表示连接速度, C 表示孔间距, D 表示织构扫描次数。从连接强度的方差分析表中可知, 连接强度模型的 F 值为 18.55, P 值的大小可以反映出模型的可靠性, 若  $P < 0.0001$  则说明该模型的可靠性较高[16]。另外, 从表中还可以看出模型的拟合度为 0.9454, 拟合修正系数为 0.8944, 预测拟合系数为 0.7349。Adj.  $R^2$  和 Pred.  $R^2$  相差不大且均接近于 1, 说明模型拟合度较高且充分有效。信噪比大于 4 说明该模型具有较高的可靠性, 而该模型信噪比为 15.4234, 模型的可靠度较高[15]。通过 Design Expert 软件中进行分析拟合得到其二阶非线性响应面多项式, 连接强度的编码方程和实际方程如式(3)和式(4)所示:

1) 编码方程:

$$\begin{aligned} \text{Joint strength} = & 244.53 + 3.05 * A + 3.98 * B + 2.67 * C + 0.23 * D \\ & - 14.20 * A * B - 3.76 * A * C + 6.68 * A * D - 8.74 * B * C \\ & + 0.9750 * B * D + 7.70 * C * D - 18.37 * A^2 - 14.81 * B^2 \\ & - 21.42 * C^2 - 20.44 * D^2 \end{aligned} \quad (3)$$

2) 实际方程:

$$\begin{aligned} \text{Joint strength} = & -1802.1325 + 111.59567 * A + 49.67633 * B + 2513.19167 * C \\ & + 40.34250 * D - 1.13590 * A * B - 15.045 * A * C + 2.6735 * A * D \\ & - 17.475 * B * C + 0.195 * B * D + 77 * C * D - 2.93853 * A^2 \\ & - 0.592233 * B^2 - 2142.33333 * C^2 - 20.43583 * D^2 \end{aligned} \quad (4)$$



**Figure 6.** Relationship between experimental value and predicted value of joint strength  
**图 6.** 连接强度实验值和预测值的关系

图 6 显示了连接强度的预测值与实际值之间的对比图，从图中可明显观察到，两者之间的误差较小，说明该模型对实验结果有良好的预测效果[17]。为进一步验证连接强度模型的精度，从实验设计数据表中随机抽取 3 组参数，将工艺参数值带入模型，把得到的模型预测结果与实验数据进行比较，发现两者之间的误差小于 5%，说明该连接强度模型具有足够高的精度[18]。

## 4. 工艺参数对预处理时间和连接强度的交互式影响分析

### 4.1. 工艺参数对预处理时间的影响

图 7 显示了织构扫描次数及其孔间距的大小对预处理时间的影响。图 7(a)分别体现了各工艺参数对预处理时间的影响变化，对于连接时所用参数激光功率(A)和连接速度(B)，织构预处理时间不随其水平变化而变化，所以呈现一条水平直线。从图 7(b)所示的响应曲面图可以看出织构预处理时间会随着织构扫描次数的增多而变长，相反织构孔间距越大织构预处理时间就会越小。

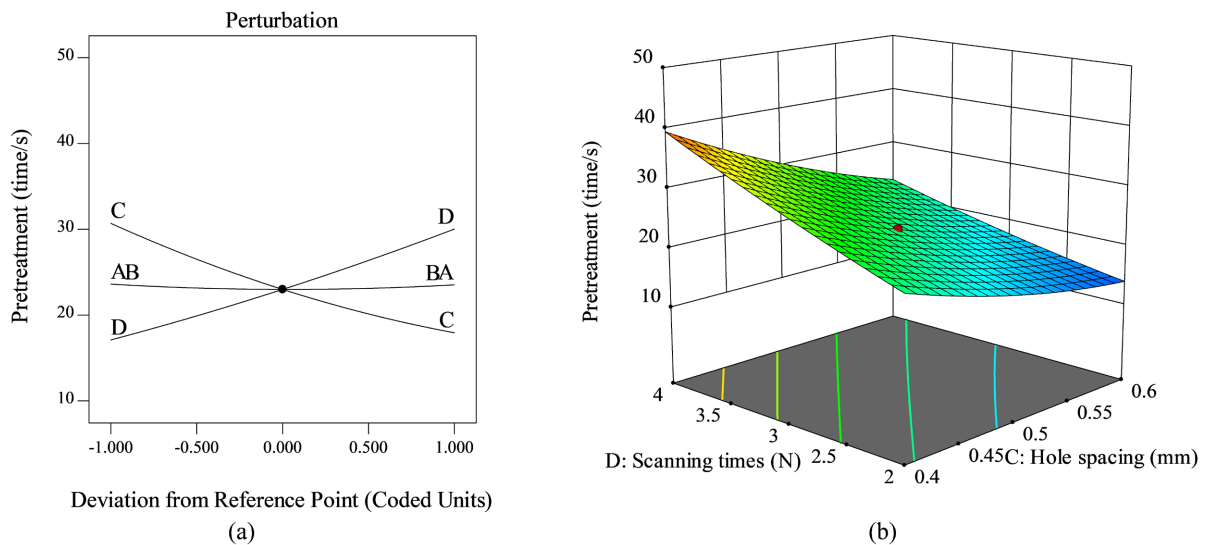


Figure 7. The influence of process parameters on pretreatment time: (a) Trend graph; (b) Response surface graph

图 7. 工艺参数对预处理时间的影响: (a) 趋势图; (b) 响应曲面图

### 4.2. 工艺参数对连接强度的影响

由激光功率(A)、连接速度(B)、孔间距(C)和扫描次数(D)作为参数输入并且连接强度作为响应所建立的数学模型可以看出，四个工艺参数对连接强度的影响存在交互性。四个因素两两组合共有 6 组，根据连接强度模型的方差分析表可以看出对连接强度的交互式影响较为显著的是孔间距 - 扫描次数、连接速度 - 孔间距、激光功率 - 连接速度这三组参数组合。由此下文对这三组的交互影响分别进行讨论。

从图 8 中的变化曲线可以看出各工艺参数对连接强度的影响趋势。从图中可以看出，激光功率、连接速度、孔间距和织构扫描次数这四个工艺参数对连接强度的影响较为一致。连接强度都是随着工艺参数的增加而先大幅度增强再大幅度降低。

图 9 给出了激光功率和连接速度对接头强度的交互式影响结果，由图可知，在激光功率为 15 W，连接速度为 20 mm/s 附近所得的接头连接强度最高。当激光功率从 10 W 增大至 15 W、连接速度从 30 mm/s 降低至 20 mm/s 时，接头强度随之逐渐增加；当激光功率从 15 W 增大至 20 W、连接速度从 20 mm/s 降低至 10 mm/s 时，接头连接强度呈现下降趋势。这是因为当激光功率增大、连接速度减小时，下层传递



到上层 PA66GF30 的热量足够, 使其充分熔化并扩散流入织构孔槽内, 形成机械铆接, 两者间的连接强度因此越来越大。但当激光功率过高以及连接速度过低时, 单位面积内的能量过大, 不仅破坏了吸光 GFREP 表面的孔槽织构, 而且过多的传热会使 PA66GF30 热分解, 从而产生大气泡致使连接强度降低。

图 10 给出了连接速度和织构孔间距对接头强度的交互式影响结果, 由图可知, 在连接速度为 20 mm/s, 孔间距为 0.5 mm 附近所得的接头连接强度最高。当连接速度从 30 mm/s 减小至 20 mm/s、孔间距从 0.3 mm 增大至 0.5 mm 时, 接头强度随之增加; 当连接速度从 20 mm/s 减小至 10 mm/s、孔间距从 0.5 mm 增大至 0.7 mm 时, 接头连接强度呈现下降趋势。这是因为当孔间距减小时, 即织构的密度在增大, 吸光 GFREP 与 PA66GF30 之间的接触面积在增大, 材料之间的机械铆接更强, 并且随着连接速度的减小, PA66GF30 的熔化更为充分, 在压紧力的作用下流入孔槽内, 使得机械铆接变得更强。但当孔间距过小时, 由于连接速度持续减小, 单位面积的热积累过多[19], 不仅会对孔槽产生破坏, 而且会导致 PA66GF30 热分解, 降低接触面积, 致使连接强度下降。

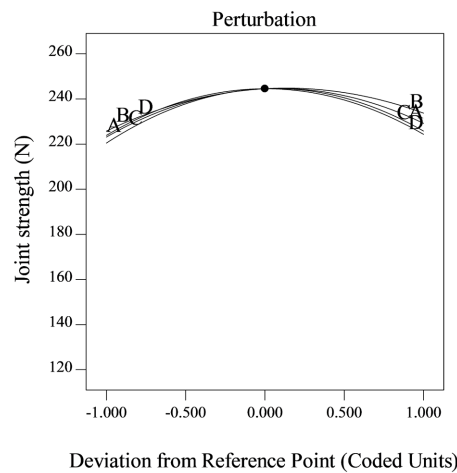


Figure 8. The influence curve of each process parameter on the joint strength  
图 8. 各工艺参数对接头连接强度的影响曲线

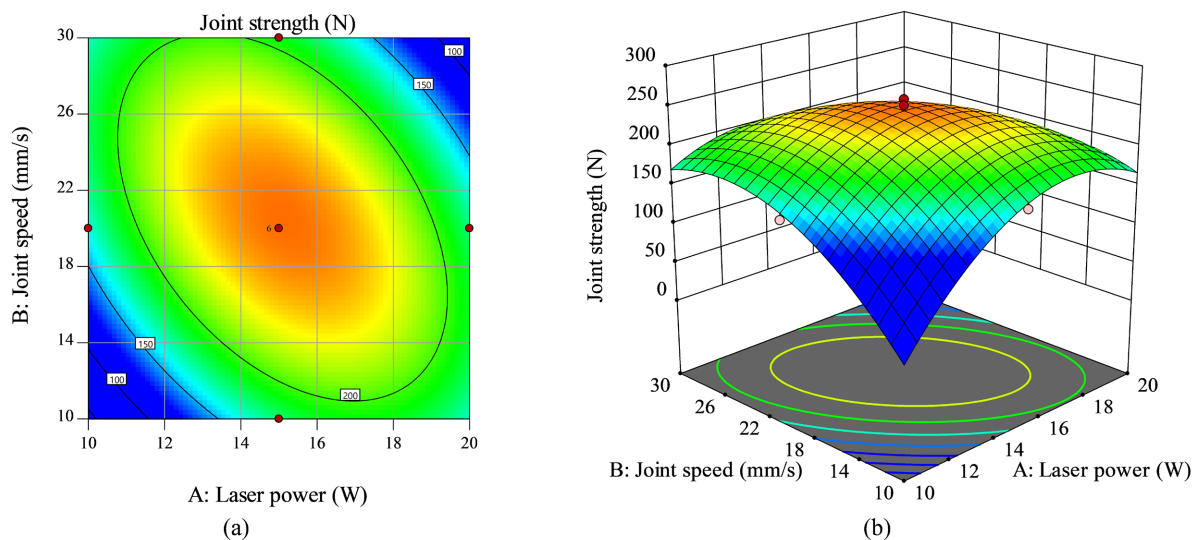
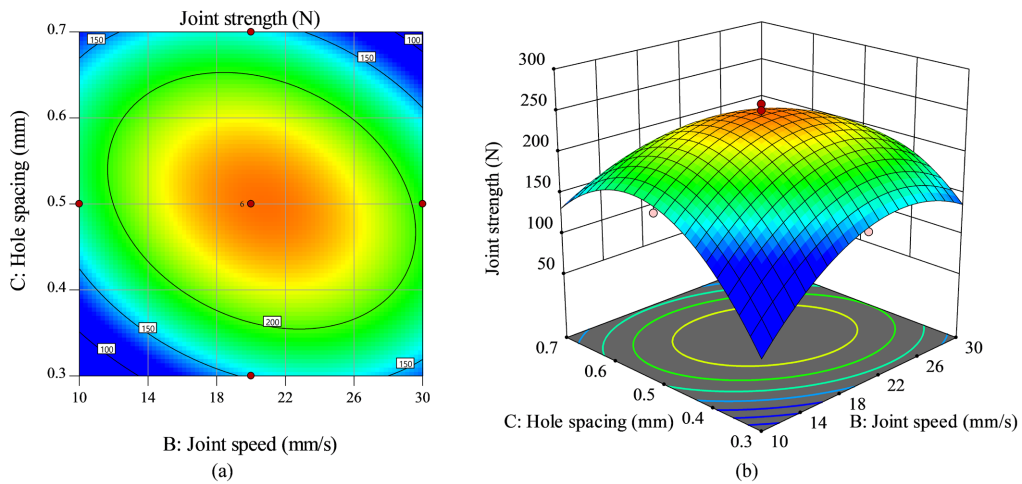


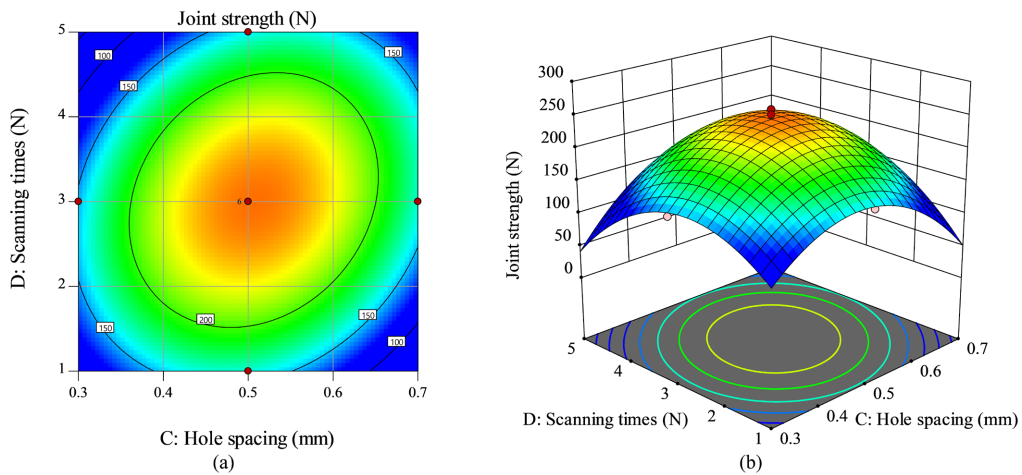
Figure 9. Interaction effect of laser power and connection speed on the joint strength: (a) Contour plot; (b) Response surface  
图 9. 激光功率和连接速度对连接强度的交互式影响: (a) 等高线图; (b) 响应曲面



**Figure 10.** Interaction effect of connection speed and hole spacing on the joint strength: (a) Contour plot; (b) Response surface

**图 10.** 连接速度和孔间距对连接强度的交互式影响: (a) 等高线图; (b) 响应曲面

图 11 给出了织构孔间距和织构扫描次数对接头强度的交互式影响结果, 由图可知, 在孔间距为 0.5 mm, 织构扫描次数为 3 次附近所得的接头连接强度最高。当孔间距从 0.3 mm 增大至 0.5 mm、织构扫描次数从 1 次增加至 3 次时, 接头强度随之增加; 当孔间距从 0.5 mm 增大至 0.7 mm、织构扫描次数从 3 次增加至 5 次时, 接头连接强度呈现下降趋势。这是因为当扫描次数为 3 次时, PA66GF30 受热熔化后能够流入孔槽内, 长玻纤的阻流作用小, 两者充分接触, 此时接头连接强度最大。当扫描次数超过 3 次时, 孔深接近极限, PA66GF30 熔化后能流入孔槽的量很多, 但冷却后易形成大气泡, 同时该深度下长玻纤的阻流作用较大, PA66GF30 熔化流入其中的量虽大, 然而并不足以完全填入, 孔槽内存有空腔, 并且由于孔间距在增大, 即织构密度在减小, 吸光 GFREP 与 PA66GF30 之间的接触面积在减小, 材料之间的机械铆接减弱, 致使连接强度下降。而当扫描次数为 1、2 次时孔槽并不深, 织构在激光的照射下被完全破坏, 虽然上层的 PA66GF30 有熔化并流入吸光 GFREP 内, 但流入量并不多, 同时由于织构被破坏, PA66GF30 与吸光 GFREP 的接触变小, 因此接头连接强度不大。



**Figure 11.** Interaction effect of hole spacing and scanning times on the joint strength: (a) Contour plot; (b) Response surface

**图 11.** 孔间距和织构扫描次数对连接强度的交互式影响: (a) 等高线图; (b) 响应曲面

## 5. 激光透射连接工艺参数优化

### 5.1. 优化求解方法

粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)模仿鸟类觅食的行为特征[20], 使用无质量和体积属性的粒子(搜索个体)来代表“觅食鸟群中的鸟类个体”, 每个粒子仅具备速度和位置两个属性, 将在迭代时获得的个体极值(pbest)与粒子群内的其他粒子共享, 最优的个体极值作为粒子群在此次迭代过程获得的全局极值(gbest), 随后粒子群中的所有粒子根据已找到的那个共享的全局极值和当前的个体极值来调整自身的速度和位置, 逐代向着最终的全局最优解靠近。

粒子群算法优化步骤主要分为: 1) 初始化粒子群; 2) 计算适应值; 3) 寻找个体极值; 4) 寻找全局最优解; 5) 修改粒子的速度和位置。在粒子群算法中, 各粒子通过式(5)和式(6)来更新每一次迭代时的速度和位置:

$$V_i = V_i + C_1 \text{random}()(\text{pbest}_i - X_i) + C_2 \text{random}()(\text{gbest}_i - X_i) \quad (5)$$

$$X_i = X_i + V_i \quad (6)$$

其中,  $V_i$  为第  $i$  个粒子的速度;  $X_i$  为粒子位置; pbest 与 gbest 分别为粒子的个体极值和全局极值;  $C_1$ 、 $C_2$  为学习因子, 一般取值为 2; random() 为区间[0, 1]之间的随机常数。

为了保证算法的收敛效果, 1998 年, Shi 等人以上面两个公式为基础, 形成了 PSO 的标准形式[21]:

$$V_i = \omega V_i + C_1 \text{random}()(\text{pbest}_i - X_i) + C_2 \text{random}()(\text{gbest}_i - X_i) \quad (7)$$

$$\omega^{(t)} = (\omega_{ini} - \omega_{end})(G_k - g)/G_k + \omega_{end} \quad (8)$$

其中,  $\omega$  为惯性因子, 其值为正, 对  $\omega$  采用线性递减权值策略能够调整  $\omega$  的全局和局部搜索能力;  $G_k$  表示最大迭代次数;  $\omega_{ini}$  为初始权重值,  $\omega_{end}$  为最终权重值, 一般  $\omega_{ini} = 0.9$ ,  $\omega_{end} = 0.4$ 。

本文使用响应面法建立工艺参数数学模型, 然后通过 MATLAB 软件实现粒子群优化算法, 从而解决激光透射连接工艺参数的优化问题。

### 5.2. 优化求解与验证

为了连接质量能够进一步提高, 采用粒子群算法对创建的连接强度模型进行工艺参数优化, 即在数值优化过程中寻觅一个优化效果最好的点。为了使实验获得在不同准则要求下的最佳工艺参数, 采用了两种不同的优化准则进行优化。优化准则 I: 以获得最大的连接强度为目的, 不考虑其他条件; 优化准则 II: 在保证预处理时间较少的基础上, 获得最大的连接强度。

设置初始种群数目为 300, 惯性权重取 0.9, 学习因子取  $C_1 = C_2 = 1.5$ , 最大迭代次数为 50, 得到迭代次数与最大连接强度之间的关系如图 12 所示, 迭代 20 次左右, 粒子寻得最优结果, 此时最佳连接强度的工艺参数为: 激光功率 15.108 W; 连接速度 20.500 mm/s; 孔间距 0.505 mm, 扫描次数 3 次, 此时预测的连接强度为 244.861 N, 预处理时间为 22.831 s。

上述过程为选择优化准则 I 的单目标粒子群优化算法, 即不考虑其他工艺参数条件, 只求获得最大的连接强度。

当选择优化准则 II 时, 需要建立如下的目标函数用于多目标优化:

$$\max(Z_1) = \omega_1 f(\text{Strength}) / (\text{Strength})_{\max} - \omega_2 f(\text{Time}) / (\text{Time})_{\min} \quad (9)$$

其中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别是分配给连接强度和预处理时间的权重值, 权重值  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , 此处更强调连接强度, 分配  $\omega_1 = 0.8$ ,  $\omega_2 = 0.2$ , 将多目标问题转化为单目标进行求解, 设置参数与优化准则 I 相同。得到的迭

代次数与多目标函数值的关系如图 13 所示。算法预测当激光功率 14.895 W、连接速度 20.069 mm/s、孔间距 0.544 mm 和扫描次数 2 次时，预处理时间为 17.873 s，连接强度为 235.184 N。

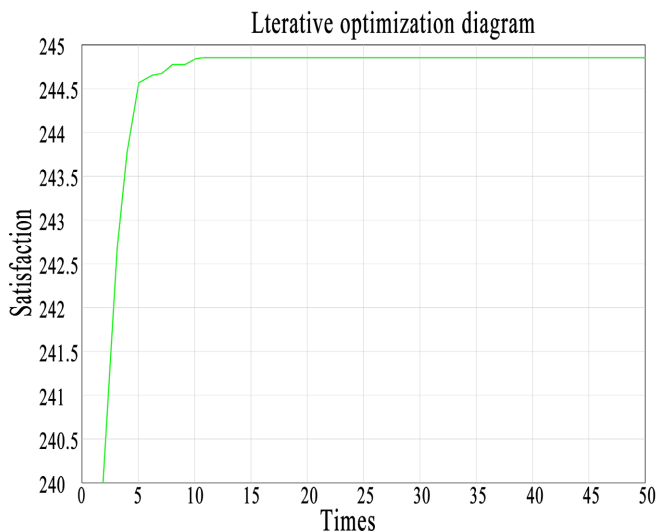


Figure 12. Iterative optimization diagram of optimization criterion I

图 12. 优化准则 I 的迭代优化图

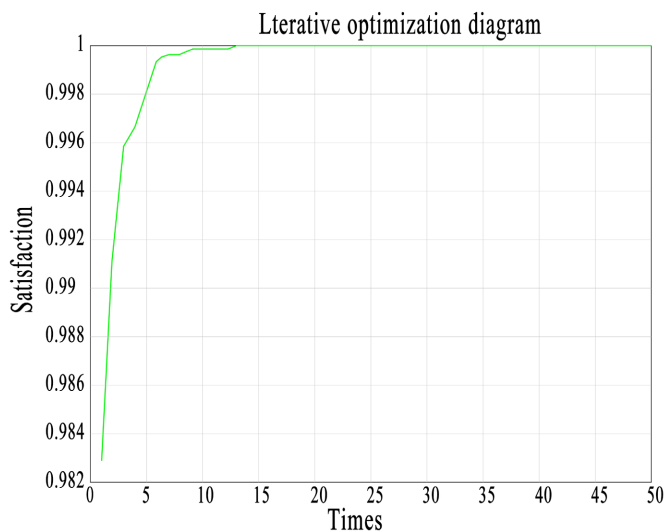


Figure 13. Iterative optimization diagram of optimization criterion II

图 13. 优化准则 II 的迭代优化图

对使用粒子群优化算法得到的优化后工艺参数结果进行实验验证，将实验结果列于表 3 和表 4 中，从表中可以看出，预测值与实验值较为接近。在基于第一种优化准则所得到的最佳工艺参数的条件下，连接强度为 244.684 N，与之相对应的工艺参数分别为：激光功率(A)为 15.108 W，连接速度(B)为 20.500 mm/s，孔间距(C)为 0.505 mm，织构扫描次数(D)为 3 次[12]，此时预处理时间为 22.751 s。在第二种优化准则所得到的最佳工艺参数的条件下，连接强度为 235.270 N，与之相对应的工艺参数分别为：激光功率(A)为 14.895 W，连接速度(B)为 20.069 mm/s，孔间距(C)为 0.544 mm，织构扫描次数(D)为 2 次，此时预处理时间为 17.905 s。

**Table 3.** Result verification of optimization criterion I  
**表 3.** 优化准则 I 的结果验证

No	A/W	B/mm/s	C/mm	D/N	Preprocessing time/s		Strength/N	
					Actual	Predicted	Actual	Predicted
1	15.108	20.500	0.505	3.023	22.751	22.831	244.684	244.861

**Table 4.** Result verification of optimization criterion II  
**表 4.** 优化准则 II 的结果验证

No	A/W	B/mm/s	C/mm	D/N	Preprocessing time/s		Strength/N	
					Actual	Predicted	Actual	Predicted
1	14.895	20.069	0.544	2.516	17.905	17.873	235.270	235.184

## 6. 结论

1) 在进行激光透射焊接前,对玻璃纤维增强环氧树脂进行表面织构处理能够有效提高接头的连接强度。

2) 当激光功率为 15 W,连接速度为 20 mm/s,孔间距为 0.5 mm,打孔扫描次数为 3 次时接头的连接强度最高。四个工艺参数两两组合中激光功率 - 连接速度、连接速度 - 孔间距、孔间距 - 扫描次数对连接强度的交互式影响最大。

3) 进行参数优化后,接头的连接强度得到一定提高。在第一种优化准则所得到的最佳工艺参数的条件下,连接强度为 244.684 N,与之相对应的工艺参数分别为:激光功率为 15.108 W,连接速度为 20.500 mm/s,孔间距为 0.505 mm,织构扫描次数为 3 次。在第二种优化准则所得到的最佳工艺参数的条件下,连接强度为 235.270 N,与之相对应的工艺参数分别为:激光功率为 14.895 W,连接速度为 20.069 mm/s,孔间距为 0.544 mm,织构扫描次数为 2 次。

## 参考文献

- [1] Wang, C.Y. and Shen, X.X. (2015) Research on Laser Transmission Welding Technology and Properties of Polypropylene. *Laser and Optoelectronics Progress*, **52**, 177-182.
- [2] Wu, J., Lu, S., Wang, H.-J., et al. (2021) A Review on Laser Transmission Welding of Thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **116**, 2093-2109. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07519-z>
- [3] Wang, X., Liu, B.G., Liu, W., et al. (2017) Investigation on the Mechanism and Failure Mode of Laser Transmission Spot Welding Using PMMA Material for the Automotive Industry. *Materials*, **10**, Article No. 22. <https://doi.org/10.3390/ma10010022>
- [4] Acherjee, B. (2020) Laser Transmission Welding of Polymers—A Review on Process Fundamentals, Material Attributes, Weldability, and Welding Techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, **60**, 227-246. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.017>
- [5] Amend, P., Pillach, B., Frick, T. and Schmidt, M. (2012) Laser-Based Hot-Melt Bonding of Thermosetting GFRP. *Physics Procedia*, **39**, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.024>
- [6] Goncalves, L.F.F.F., Duarte, F.M., Martins, C.I. and Paiva, M.C. (2021) Laser Welding of Thermoplastics: An Overview on Lasers, Materials, Processes and Quality. *Infrared Physics & Technology*, **119**, Article ID: 103931. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103931>
- [7] Jia, S.H., Jia, J.P., Jiao, J.K., et al. (2019) Experimental and Simulation Study on Laser Stir Welding of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composite/Aluminum Alloy. *Chinese Journal of Lasers*, **46**, 109-117. <https://doi.org/10.3788/CJL201946.0702006>
- [8] Rodríguez-Vidal, E., Sanz, C., Lambarri, J. and Quintana, I. (2018) Experimental Investigation into Metal Micro-Patterning by Laser on Polymer-Metal Hybrid Joining. *Optics & Laser Technology*, **104**, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.003>

- 
- [9] Heckert, A. and Zaeh, M.F. (2014) Laser Surface Pre-Treatment of Aluminium for Hybrid Joints with Glass Fibre Reinforced Thermoplastics. *Physics Procedia*, **56**, 1171-1181. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.032>
- [10] Zhou, Z., Tan, X.-H., Jing, Z. and Shan, J.-G. (2018) Suppression of Shrinkage Porosity in Laser-Joining of CFRP and Steel Using a Laser Surface Modification Process “Surfi-Sculpt<sup>®</sup>”. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **85**, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.06.013>
- [11] Liu, F.C., Liao, J. and Nakata, K. (2014) Joining of Metal to Plastic Using Friction Lap Welding. *Materials & Design*, **54**, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.056>
- [12] Li, J. (2018) Study on Mechanism, Technology and Numerical Simulation of Laser Transmission Connection between Polystyrene and Titanium. Jiangsu University, Zhenjiang.
- [13] Montgomery, D.C. (2007) Experimental Design and Analysis. Posts and Telecommunications Press, Beijing.
- [14] Liu, B.G., Wang, X., Liu, W., *et al.* (2016) Process Optimization of Laser Transmission Spot Welding Using Material PMMA for Automotive Industry. *Chinese Journal of Lasers*, **43**, 53-62.
- [15] Benyounis, K.Y., Olabi, A.G. and Hashmi, M.S.J. (2005) Effect of Laser Welding Parameters on the Heat Input and Weld-Bead Profile. *Journal of Materials Processing Technology*, **164-165**, 978-985. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.060>
- [16] Liu, B.G. (2017) Experimental Study and Numerical Simulation of Laser Transmission Spot Welding of PMMA for Vehicle. Jiangsu University, Zhenjiang.
- [17] Chen, G.C. (2016) Study on Mechanism, Technology and Numerical Simulation of Laser Transmission Connection of Incompatible Polymers. Jiangsu University, Zhenjiang.
- [18] 刘保光. 车用材料 PMMA 的激光透射点焊实验研究及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [19] Liu, M.Q., Ouyang, D.Q., Li, C.B., Ruan, S.C. and Sun, H.B. (2018) Experimental Research on 2  $\mu\text{m}$  Laser Non-Absorbent Welding of Transparent PET/White PP. *Applied Laser*, **38**, 610-617.
- [20] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, Perth, 27 November-1 December 1995, 1942-1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [21] Shi, Y. and Eberhart, R. (1998) A Modified Particle Swarm Optimizer. 1998 *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, Anchorage, 4-9 May 1998, 69-73.