

# 基于响应曲面法的激光透射连接聚合物工艺参数优化

姜敏凤<sup>1,2</sup> 许贞凯<sup>2</sup> 刘会霞<sup>2\*</sup> 李品<sup>2</sup> 宋新华<sup>2</sup> 王凯<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 无锡职业技术学院机械技术学院, 江苏 无锡 214121; <sup>2</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 激光透射连接以其快速、精确、柔性、较强环境适应性的局部连接和封装工艺,在工业、医学领域具有良好的应用前景。应用 Dilas 公司 Compact130/140 型半导体激光器对聚碳酸酯薄板进行了激光透射连接实验。使用响应曲面法进行实验设计,建立激光透射连接工艺参数的数学模型,并进行优化与分析。讨论了激光功率、激光扫描速度、模具压紧力、扫描次数等激光加工工艺参数对连接强度和接头连接区域宽度的交互影响趋势。结果表明,激光功率与激光扫描速度交互影响较大;增加激光功率,减小激光扫描速度,增加模具压紧力与扫描次数有利于提高连接质量。

**关键词** 激光技术;激光透射连接;响应曲面;工艺参数;连接质量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.071408

## Optimization of Laser Transmission Joining Process Parameters for Thermoplastic Using Response Surface Methodology

Jiang Minfeng<sup>1,2</sup> Xu Zhenkai<sup>2</sup> Liu Huixia<sup>2\*</sup> Li Pin<sup>2</sup> Song Xinhua Wang Kai<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi, Jiangsu 214121, China)  
(<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** Laser transmission joining process has potential prospects in industry and medical areas because of its speed, precision, flexibility and strong environmental adaptability. Polycarbonate sheets are joined using laser transmission joining technology with Compact130/140 laser diode of Dilas. The joining process is optimized in response surface methodology. The interaction effect of key parameters including laser power, scanning speed, clamp pressure, scanning number on joint quality is researched. The results show that the interaction of laser power and scanning speed is relatively large. Increasing laser power, reducing scanning speed, increasing the mold clamping force and the scanning number can be helpful to the joint quality. The morphology of the joining area is observed with an optical microscope. Based on this research, process parameters of laser transmission joining of polycarbonate are obtained.

**Key words** laser technique; laser transmission joining; response surface; process parameter; joint quality

**OCIS codes** 140.2020; 140.3460; 140.3510; 350.3390

## 1 引言

激光透射连接聚合物的两被连接零件为热塑性聚合物,其中一层材料为透射层材料,能够透过激光光束,而另一层材料为吸收层,能够吸收激光能量。激光束能量穿过透射层材料,在两零件接触面被吸收层材料吸收,形成热作用区;热作用区中的聚合物材料被熔化,熔融状态下的聚合物大分子在模具压紧力的作用下匀相扩散,产生范德瓦耳斯力,在凝固的过程中已熔化的材料形成连接区域,两个零件即被连接起来<sup>[1~3]</sup>。激光透射连接技术具有速度快、精度高、柔性、环境适应性强、热影响区小等优点,为更精密的连接加工工艺提供了条件<sup>[4~7]</sup>。

收稿日期: 2011-03-31; 收到修改稿日期: 2011-05-04; 网络出版日期: 2011-06-20

作者简介: 姜敏凤(1963—),女,学士,副教授,主要从事金属材料、材料成形技术等方面的研究。

E-mail: jiangmf@wxit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: lhx@ujjs.edu.cn

目前已有学者对激光透射连接聚合物材料进行了研究,研究表明激光透射连接零件的强度取决于材料本身的性质(如厚度、透射率、吸收率等)和连接过程的工艺参数<sup>[8~11]</sup>。其中聚合物材料制备中的添加物对材料透射率和吸收率都有影响,如玻璃纤维、添加色素等<sup>[12,13]</sup>,此外材料的厚度以及材料本身的晶体状态对材料的光学性能也有一定的影响<sup>[14~17]</sup>。大部分学者对激光透射连接质量的实验研究集中在单工艺参数对连接质量的影响。近年来,Acherjee等<sup>[13]</sup>应用曲面响应法研究了聚甲基丙烯酸甲酯的激光透射连接工艺,对功率、速度、压力、离焦量等参数以及连接强度和连接区域宽度进行了研究,建立了实验数学模型,讨论了部分实验参数的交互影响趋势。国内对此方面的研究主要集中在单工艺参数对连接质量的影响,对不同工艺参数组合对连接质量的交互影响进行的研究较少。在激光透射连接工艺研究中科学合理的工艺参数选择方法的缺乏将严重制约激光透射连接工艺的实际推广应用。

本文采用响应曲面法(RSM)对1 mm厚聚碳酸酯材料的激光透射连接工艺参数进行研究。研究了激光功率、加工扫描速度、实验压力、扫描次数等主要工艺参数对连接接头尺寸和接头强度的交互影响,并建立数学模型,对工艺参数进行优化。

## 2 响应曲面实验设计方法

RSM是数学方法和统计方法结合的产物,用于对感兴趣的响应受多个变量影响的问题进行建模和分析,以优化这个响应<sup>[18]</sup>。通常认为响应曲面方法包括实验设计、模型拟合和过程优化等环节。在响应曲面问题中,响应和自变量之间的关系是未知的,这样需要求得一个响应值 $y$ 和自变量 $(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k)$ 之间真实函数关系的逼近式

$$y = f(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k) + \epsilon, \quad (1)$$

其中真实响应函数 $f$ 的形式未知, $\epsilon$ 表示系统误差,表示由其他变异来源造成的 $f$ 所无法解释的方差。 $\epsilon$ 包括了各种影响,如响应的测量误差、系统或者过程自身的其他变异来源、其他变量的作用等。 $\epsilon$ 是一种统计意义上的误差,通常假设均值为0,方差为 $\sigma^2$ 。那么

$$E(y) = \eta = E[f(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k)] + E(\epsilon) = f(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k), \quad (2)$$

式中的变量 $(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k)$ 通常是独立变量,因为它们用测量值的自然单位表示,如温度、压力等。在许多响应曲面方法问题中,通常把这些独立变量转化为规范变量 $(X_1, X_2, \dots, X_K)$ ,这些规范变量一般是具有量纲的,均值为0,具有标准方差。在规范化变量的情况下,真实响应函数(2)式可以写为

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_K). \quad (3)$$

响应曲面方法的具体设计方法很多,其中最常用的方法是中心组合设计和Box-Behnken设计。中心组合设计是拟合二阶响应曲面中应用最广泛的实验设计,适合于三因素水平以上的实验设计,能够对分析结果进行优化,建立非线性影响存在时的数学模型。其二阶模型为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon. \quad (4)$$

## 3 实验设计方案

### 3.1 试样准备与实验设备

实验连接材料为1 mm厚聚碳酸酯,试样尺寸均为25 mm×80 mm×1 mm,本文采用的聚碳酸酯为高透光性材料,同时使用了炭黑涂料作为激光能量的吸收剂。连接前使用超声波清洗机对材料进行清洁,最后用酒精轻微擦拭,并放在干燥箱内干燥12 h,以消除聚合物中的水分对连接质量的影响。

实验激光器采用Dilas公司Compact130/140型半导体连续激光器,DL S20P扫描振镜。激光器最大输出功率130 W,输出波长980 nm±10 nm,激光器冷却系统采用内置的风冷系统,工作温度15℃~35℃。采用全程光纤传输模式,光纤的芯径 $D = 400 \mu\text{m}$ ,数值孔径 $d_{\text{NA}} = 0.22 \mu\text{m}$ ;扫描振镜工作范围为140 mm×140 mm,光斑直径为2.8 mm。

### 3.2 实验方法

实验采用搭接方式。影响连接接头质量的主要工艺参数包括:激光器功率,加工速度,夹具夹紧压力,扫

描次数等。本实验中,夹持层采用 K<sub>9</sub> 玻璃,夹具最大夹紧压力选取 1 MPa。对连接接头质量评价指标主要有:1)连接接头强度;2)连接区域宽度;3)美观度等。本实验主要以接头强度和连接区域宽度来评价连接接头质量。按照国家技术标准局颁布的 GB/T 1447-83 标准,采用了微机控制电子万能实验机进行拉伸实验,如图 1 所示;微机控制 WDW-20kN 电子式万能实验机,拉伸速度 0~500 mm/min,负荷分辨力 0.01 N,有效拉伸 650 mm,电源功率 750 W。并采用上海光学仪器厂生产的 XTZ-FG 型体视显微镜进行了接头形貌的观测,在微观形貌下测量了连接区域的宽度,如图 2(a),(b) 所示为连接聚合物零件的宏观与微观形貌及连接区域宽度。

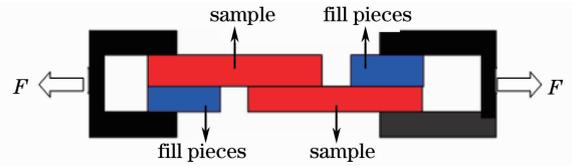


图 1 拉伸实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile test

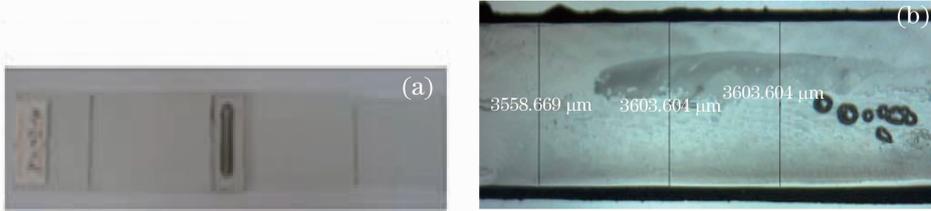


图 2 样件形貌图。(a)宏观形貌;(b)微观形貌

Fig. 2 Sample morphology. (a) Macrography of sample; (b) microgram of sample

在实验的基础上,确定了实验参数的一个合适取值范围,表 1 是实验参数的选择范围,表 2 是实验过程中通过响应曲面法设计的实验参数组合表,以分析各因素之间对实验响应结果的影响。

表 1 实验参数范围

Table 1 Process control parameters and limits

Factor	Unit	Code	Extreme value				
			-2	-1	0	1	2
Power	W	W	9.2	21	31.5	41.6	51.6
Velocity	mm/min	V	120	300	540	780	960
Clamp pressure	MPa	P	0	0.25	0.5	0.75	1
Scanning number	—	N	1	2	3	4	5

表 2 材料实验设计数据表

Table 2 Design matrix and measured responses

Information		Parameter				Result	
Number	Experimental number	W /W	V / (mm/s)	P /MPa	N	Tensile strength /MPa	Width /μm
1	29	20.9	5	0.25	2	36.0733	3347.97
2	25	41.6	5	0.25	2	39.4483	3774.78
3	12	20.9	13	0.25	2	25.8442	2976.35
4	9	41.6	13	0.25	2	30.75	3452.58
5	3	20.9	5	0.75	2	36.3846	3386.26
6	16	41.6	5	0.75	2	42.2542	3786.04
7	6	20.9	13	0.75	2	26.4147	3106.98
8	11	41.6	13	0.75	2	41.7767	3583.90
9	15	20.9	5	0.25	4	36.3108	3470.16
10	4	41.6	5	0.25	4	42.3142	4069.70
11	13	20.9	13	0.25	4	40.51	3240.37
12	24	41.6	13	0.25	4	43.4958	3877.82
13	20	20.9	5	0.75	4	36.9883	3464.53
14	30	41.6	5	0.75	4	41.915	4110.36

(续表 2)

Information		Parameter				Result	
Number	Experiment number	$W / W$	$V / (\text{mm/s})$	$P / \text{MPa}$	$N$	Tensile strength /MPa	Width / $\mu\text{m}$
15	17	20.9	13	0.75	4	30.0792	3157.09
16	26	41.6	13	0.75	4	43.7022	3662.16
17	19	9.2	9	0.5	3	25.2388	2599.35
18	1	51.6	9	0.5	3	36.1117	3814.76
19	23	31.5	2	0.5	3	40.8175	4170.04
20	21	31.5	16	0.5	3	29.7633	3342.91
21	28	31.5	9	0	3	42.3995	3352.48
22	18	31.5	9	1	3	30.93	3578.51
23	27	31.5	9	0.5	1	27.9696	3345.47
24	14	31.5	9	0.5	5	45.0821	3714.53
25	5	31.5	9	0.5	3	43.8272	3514.45
26	7	31.5	9	0.5	3	44.9263	3589.53
27	2	31.5	9	0.5	3	43.7504	3490.43
28	22	31.5	9	0.5	3	45.1525	3532.09
29	8	31.5	9	0.5	3	44.1942	3622.18
30	10	31.5	9	0.5	3	38.0208	3556.25

## 4 实验结果与分析

激光器功率为 27.3 W、加工速度为 540 mm/min 时,所得的样品宏观图片如图 2 所示。从实验样件的宏观与微观形貌图片可以看出,样品成形美观,表面无破损,连接接头均匀平滑、无明显缺陷,实现了聚碳酸酯聚合物之间的激光透射连接。

### 4.1 拉伸强度方差分析与数学模型

通过 Design Expert 软件对表 2 中的实验数据进行分析、计算获得与实验模型最相符的数学模型,通过对计算结果的分析可以得知,对拉伸强度较合适的数学模型为二阶模型。通过对建立模型的方差分析,发现模型 Prob 大于  $F$  的值为 0.0021,其值小于 0.05 表明模型影响显著(Prob 大于  $F$  值的大小表示模型及各个因素的显著水平)。

对拉伸强度进行方差分析(ANOVA),可以得到方差分析数据表 3。通过方差分析表可以看到,连接工艺参数功率  $W$ 、速度  $V$ 、压力  $P$ 、扫描次数  $N$ ,二阶值功率( $W^2$ )、速度( $V^2$ )、压力( $P^2$ )、扫描次数( $N^2$ ),以及交互影响值功率 $\times$ 速度( $W \times V$ )、功率 $\times$ 压力( $W \times P$ )、功率 $\times$ 扫描次数( $W \times N$ )、速度 $\times$ 压力( $V \times P$ )、速度 $\times$ 扫描次数( $V \times N$ )、压力 $\times$ 扫描次数( $P \times N$ )在拉伸强度响应曲面模型中都是有意义的。其信噪比为 10.08085,反映了模型的识别率;失拟值为 2.584649,说明模型选择合适(失拟值表示模型预测值与实际值不拟合的概率<sup>[19]</sup>)。

通过对模型进行拟合,具有相同设计的模型二阶方程式可以表示为代码形式方程式

$$S = 41.62 + 4.98W - 2.32V - 0.24P + 2.98N + 0.86WV + 1.31WP - 0.15WN - 0.17VP + 1.68VN - 1.48PN - 2.19W^2 - 1.79V^2 + 0.26P^2 - 1.53N^2, \quad (5)$$

实际参数形式方程式

$$S = 2.4 + 1.42W - 0.07V - 0.68P + 11.23N + 0.03WV + 0.57WP - 0.02WN - 0.19VP + 0.48VN - 5.92PN - 0.03W^2 - 0.15V^2 + 4.11P^2 - 1.53N^2, \quad (6)$$

式中  $S$  为拉伸强度。

### 4.2 连接区域宽度的方差分析与数学模型

通过 Design Expert 软件对实验数据表 2 进行分析,同样可以得知对拉伸区域宽度较合适的数学模型为二阶模型。通过分析,发现模型 Prob 大于  $F$  的值小于 0.05,表明模型具有显著影响。

对连接接头区域宽度进行方差分析,可以得到方差分析数据表 4。其信噪比为 26.23148;失拟值为 3.468108,说明模型选择合适。

表 3 拉伸强度模型方差分析表

Table 3 ANOVA analysis for tensile strength model

Source	Sum of squares	$d_f$	Mean square	$F$ value	Prob exceeding $F$	
Model	992.5049	14	70.89321	4.89331	0.0021	Significant
W	454.016	1	454.016	31.33786	<0.0001	
V	121.5453	1	121.5453	8.389506	0.0111	
P	35.55465	1	35.55465	2.454113	0.1381	
N	161.845	1	161.845	11.17114	0.0045	
WV	17.13449	1	17.13449	1.182686	0.2940	
WP	30.52928	1	30.52928	2.107243	0.1672	
WN	0.183852	1	0.183852	0.01269	0.9118	
VP	0.25572	1	0.25572	0.017651	0.8961	
VN	54.88495	1	54.88495	3.788361	0.0706	
PN	38.00851	1	38.00851	2.623487	0.1261	
$W^2$	184.3174	1	184.3174	12.72226	0.0028	
$V^2$	61.25543	1	61.25543	4.228076	0.0576	
$P^2$	39.62213	1	39.62213	2.734865	0.1189	
$N^2$	41.95639	1	41.95639	2.895984	0.1094	
Residual	217.3167	15	14.48778			
Lack of fit	182.0912	10	18.20912	2.584649	0.1531	Not significant
Pure error	35.22551	5	7.045102			
Cor total	1209.822	29				
Standard deviation			597.761	$R^2$		0.891481
Mean			38.18151	Adjusted $R^2$		0.790197
Coefficient of variation			7.72061	Predicted $R^2$		0.502342
Predicted residual error of sum of squares			597.761	Adequate precision		10.08085

表 4 PC 连接区域宽度模型方差分析表

Table 4 ANOVA analysis for joining-seam width model

Source	Sum of square	$d_f$	Mean squares	$F$ value	Prob exceeding $F$	
Model	2191779	14	156555.7	67.60363	<0.0001	Significant
W	1066125	1	1066125	460.3724	<0.0001	
V	408677.5	1	408677.5	176.4745	<0.0001	
P	31537.7	1	31537.7	13.61856	0.0022	
N	139646.2	1	139646.2	60.30182	<0.0001	
WV	301.2356	1	301.2356	0.130079	0.7234	
WP	1017.686	1	1017.686	0.439456	0.5174	
WN	12533.25	1	12533.25	5.412088	0.0344	
VP	198.44	1	198.44	0.08569	0.7737	
VN	1687.72	1	1687.72	0.728789	0.4067	
PN	2891.011	1	2891.011	1.248392	0.2814	
$W^2$	69817.61	1	69817.61	30.14853	<0.0001	
$V^2$	91636.65	1	91636.65	39.5704	<0.0001	
$P^2$	8445.607	1	8445.607	3.646969	0.0755	
$N^2$	581.8503	1	581.8503	0.251254	0.6235	
Residual	34736.82	15	2315.788			
Lack of fit	30359.82	10	3035.982	3.468108	0.0912	Not significant
Pure error	4377.001	5	875.4001			
Cor total	2226516	29				
Standard deviation			79.40873	$R^2$		0.970236
Mean			3523	Adjusted $R^2$		0.942456
Coefficient of variation			2.254009	Predicted $R^2$		0.854258
Predicted residual error of sum of squares			463151.7	Adequate precision		26.23148

通过对模型进行拟合,具有相同设计的模型二阶方程式可以表示为代码形式方程式

$$\omega = 3405.5 + 300.02W - 150.64V + 23.9P + 81.27N + 0.69WV - 5.89WP + 33.89WN - 6.65VP - 0.11VN - 35.96PN - 58.21W^2 + 55.37V^2 - 18.29P^2 - 2.17N^2, \quad (7)$$

实际参数形式方程式

$$\omega = 2449.21 + 58.58W - 121.07V + 955.73P + 69.39N + 0.02WV - 2.55WP + 3.66WN - 7.6VP - 0.03VN - 143.85PN - 0.68W^2 + 4.52V^2 - 292.68P^2 - 2.17N^2, \quad (8)$$

式中  $\omega$  为连接区域宽度。

### 4.3 工艺参数对拉伸强度和连接区域宽度的影响

#### 4.3.1 工艺参数对拉伸强度的影响

图3显示实验设计中工艺参数在中心点附近对拉伸强度影响的变化趋势。从图中可以看出,随着速度的增加实验样件拉伸强度不断降低,这是因为在一定条件下连接强度主要取决于吸收层材料所吸收的能量密度(激光能量密度等于激光功率与加工速度的比值),在功率一定的条件下随着速度的不断增加,单位面积材料上可以吸收的能量密度减小,导致连接区域材料吸收能量减少,熔融连接区域变小,内部大分子在压力的作用下互相扩散,产生范德瓦耳斯力较小,从而导致连接强度降低<sup>[20]</sup>。同时随着功率的不断增大,实验样件的拉伸强度也不断变大,在一定条件下随着功率的增加材料单位面积可以吸收的能量密度也不断增加,材料形成的熔融连接区域变大,聚合物分子之间产生较强的范德瓦耳斯力,提高连接强度。压力的变化能够保证两个连接零件之间充分接触,并使两零件在接触面之间形成良好的热传导,能够促使聚合物分子之间产生较强的范德瓦耳斯力,形成较强连接<sup>[20]</sup>。随着扫描次数的增加,两零件在接触面之间吸收的能量不断累积,在搭接区域不断形成熔融连接区域,提高连接强度。

从图4(a)和(b)可以看到,激光功率与扫描速度对连接零件拉伸强度的交互影响。在速度较低、功率较大时,连接样件的拉伸强度较高,这是因为此时作用在吸收层材料上的激光能量密度较高,激光可吸收的能量较多,在连接区域内大分子间产生的范德瓦耳斯力较强,使连接强度提高。当能量密度较低时,材料熔融部分较少,很难产生有效的范德瓦耳斯力,所以连接强度较低或不能形成有效连接。

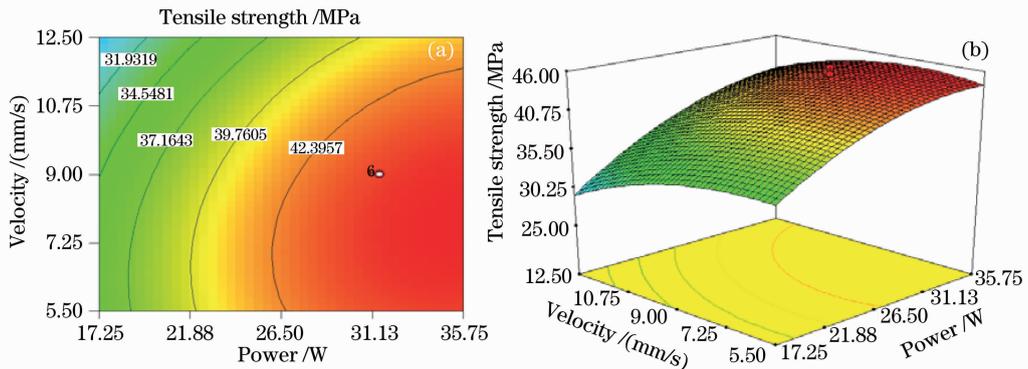


图4 功率与速度对拉伸强度的交互影响。(a)二维云图;(b)响应曲面

Fig. 4 Effect of laser power and velocity on tensile strength. (a) Contours plot; (b) response surface plot

图5(a)和(b)显示了激光器功率与压紧力对连接强度的影响趋势。可以看到在激光功率较高时,随着压力的不断增加,实验样件的连接强度也不断地提高。在恒定的功率密度下,压紧力的增加使两零件之间能

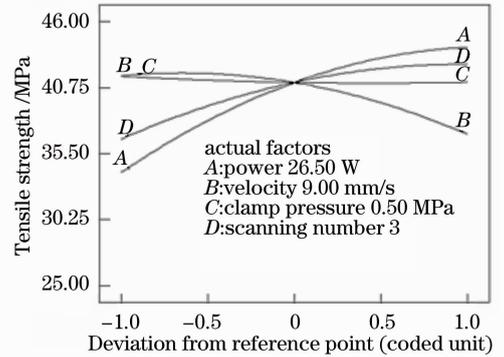


图3 工艺参数对拉伸强度的影响趋势

Fig. 3 Perturbation plot showing the effect of all factors on the lap-share strength

充分接触,材料吸收层吸收的能量能够迅速地传导到透射层材料,使材料透射层吸收热量,形成热熔融区域,两连接材料熔融,提高连接强度。激光透射连接过程中能量的传导对于激光透射连接的形成与连接质量具有重要作用<sup>[21]</sup>,在不破坏材料的前提下较强的压紧力能够促使材料充分接触,形成稳定可靠的热传导,有利于形成较好的连接接头。

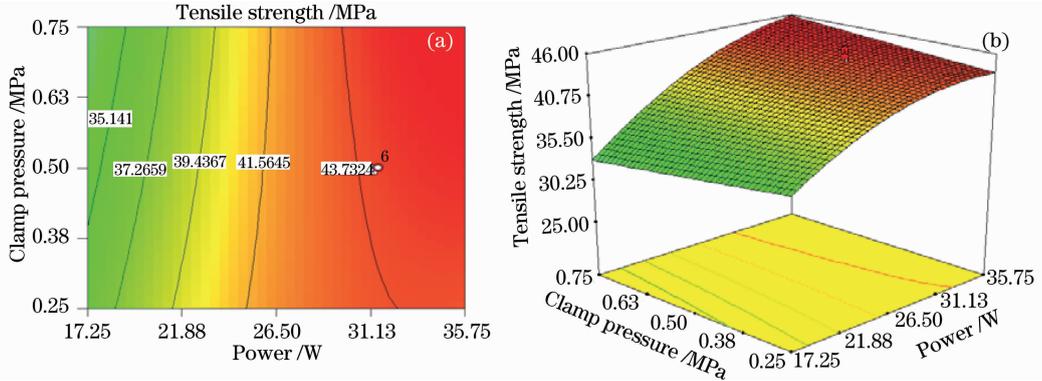


图5 功率与压力对拉伸强度的交互影响。(a)二维云图;(b)响应曲面

Fig. 5 Effect of laser power and clamp pressure on tensile strength. (a) Contours plot; (b) response surface plot

图6(a)和(b)显示激光功率与扫描次数对拉伸强度的影响云图与三维响应曲面图。从图中可以看出,在激光功率较高,扫描次数增多时,连接零件的强度较高。一定的功率密度下,扫描次数越多,材料在连接区域累积吸收的能量愈多,使两连接材料充分融合,形成较强的连接接头。

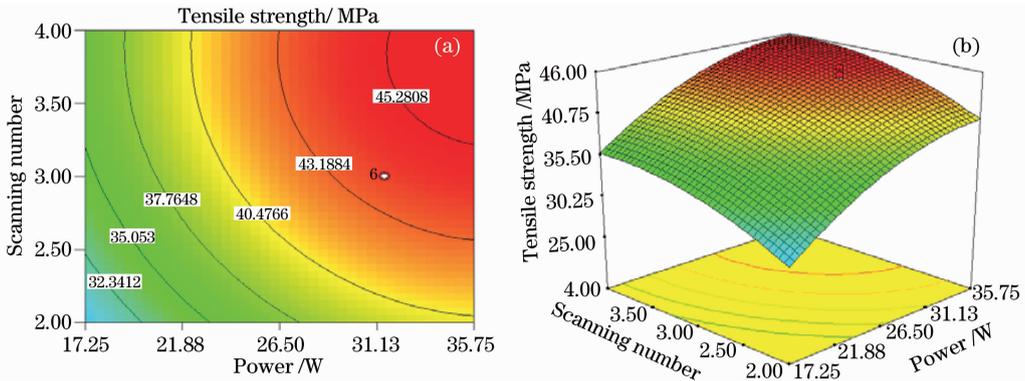


图6 功率与扫描次数对拉伸强度的交互影响。(a)二维云图;(b)响应曲面

Fig. 6 Effect of laser power and scanning number on tensile strength. (a) Contours plot;

(b) response surface plot

图7所示为能量密度过大,聚合物单位面积吸收能量过多,温度不断升高,材料发生烧蚀的连接样件局部视图。图中棕色与深黑色区域为烧蚀部分,实验中发现烧蚀部分聚合物性能大幅降低,黑色部分为聚合物烧蚀碳化后变为黑色粉末。黑色粉末对于激光能量具有较强的吸收能力,因此一旦实验中发生部分烧蚀将可能引起连锁反应,导致整个连接区域的温度过高形成烧蚀带而破坏连接。

#### 4.3.2 工艺参数对连接区域宽度的影响

图8显示了加工工艺参数对连接接头区域宽度的影响趋势。连接区域的宽度主要取决于零件所吸收的能量形成的热作用区的大小,较小的连接区域和较强的连接强度有利于形成可靠性、密封性较好的连接接头。从图8可以看出,压紧力对连接区域宽度的影响较小,扫描速度与激光功率对连接区域宽度的影响最为



图7 烧蚀连接零件微观形貌

Fig. 7 Microgram of the burn-through sample

明显,能量密度一定时,单位时间内吸收较多的能量能够使连接材料充分融合,形成可靠连接。此外扫描次数对于连接宽度也具有重要影响,单位时间内随着扫描次数的增加连接区域的能量不断累积,有利于材料充分吸收能量形成有效连接。

图 9(a)和(b)显示了激光功率与加工速度对连接零件连接接头区域宽度的交互影响。速度较低、功率较大时,单位时间内作用在材料上的激光能量密度较高,热作用区域形成的热影响区较大,连接样件的连接区域较宽。反之,能量密度较低时,在连接区域形成的热作用区域较小,材料熔融部分较少,或者材料吸收的能量不足以转化为足够的热量使材料达到熔点,连接区域宽度较小甚至不能形成有效连接。

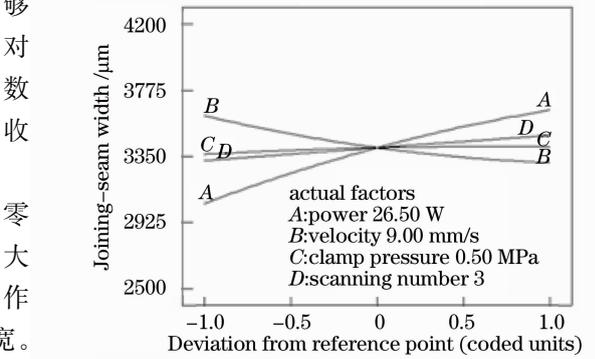
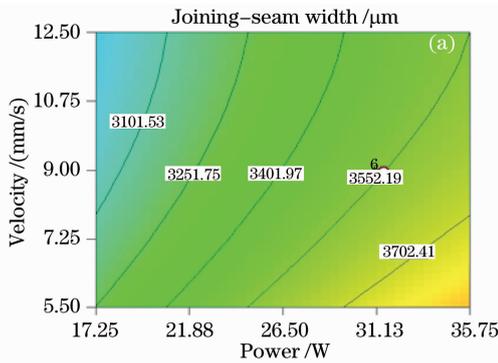


图 8 工艺参数对连接区域宽度的影响

Fig. 8 Effect of all factors on the joining-seam width

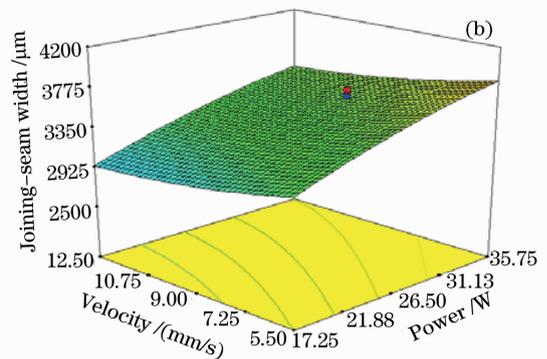


图 9 功率与扫描速度对连接宽度的交互影响。(a)二维云图;(b)响应曲面

Fig. 9 Effect of laser power and velocity on joining-seam width. (a) Contours plot; (b) response surface plot

图 10(a)和(b)显示激光扫描速度与扫描次数对连接接头区域宽度的影响云图与三维响应曲面图。从图中可以看出,在扫描速度较慢、扫描次数较多时,连接样件的连接区域较宽。激光扫描速度的变化引起激光作用于材料上的能量密度的变化,而扫描次数决定了连接区域累积吸收能量的多少,较高的激光能量密度使材料连接区域温度升高,形成较大的热影响区,从而形成宽的连接区域。但是过高的能量密度与能量积累会导致材料发生烧蚀,因此工艺实验中合理选择速度与扫描次数也是十分重要的。

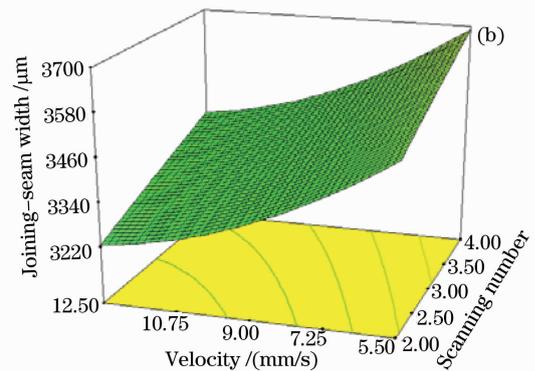
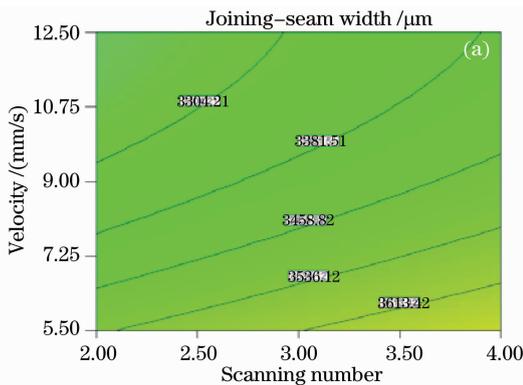


图 10 速度与扫描次数对连接宽度的交互影响。(a)二维云图;(b)响应曲面

Fig. 10 Effect of laser velocity and scanning number on joining-seam width. (a) Contours plot;

(b) response surface plot

#### 4.4 模型验证

为验证所建立的数学模型,从实验分析所得数据中选取 3 组实验数据,利用模型预测出在该实验条件下

连接零件应具有拉伸强度和连接区域宽度,如表 5 所示。从表 5 可以看出,预测值与实验所得的数据的误差较小,相对误差均在 10%以内,证明实验设计所建立的模型与实际相符。图 11(a)和(b)分别显示了拉伸强度和连接区域宽度的预测值与实际值之间的关系,从图中可以看出模型与实际是吻合的。

表 5 实验数学模型优化值与实际值验证数据表

Table 5 Optimization and validation test results

Number	Power / W	Velocity / (mm/s)	Clamp pressure / MPa	Scanning number	Tensile strength / MPa		Joining-seam width / MPa	
					Actual value	Predicted value	Actual value	Predicted value
1	17.25	5.5	0.25	2	35.446	38.629	3071.288	3337.268
2	26.5	9	0.5	3	41.162	37.301	3107.859	3405.5
3	35.75	12.5	0.75	4	39.443	43.695	3149.981	3473.73

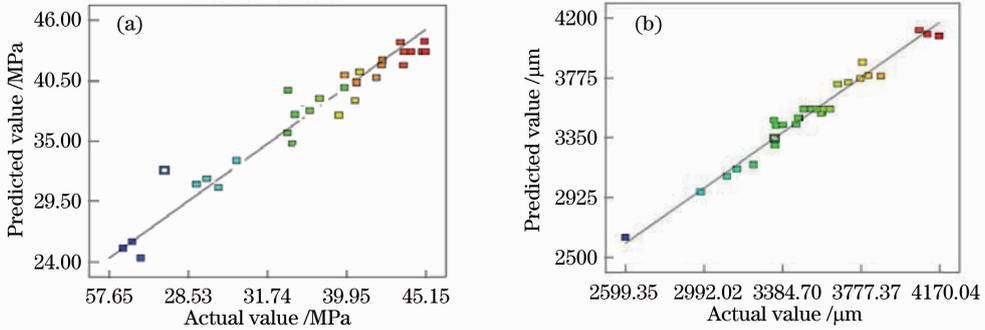


图 11 实验实际值与预测值对照。(a)拉伸强度;(b)连接区域宽度

Fig. 11 Predicted results versus actual results for (a) tensile strength and (b) joining-seam width

## 5 结 论

通过响应曲面法分析,激光透射连接聚合物材料工艺参数(功率、扫描速度、压紧力、扫描次数)与连接强度和连接区域宽度的关系可归纳如下:

- 1) 激光功率增大时,聚合物材料连接强度与连接区域宽度随着功率的增大而增加,而扫描速度的增加则会降低零件的连接强度并减小连接区域宽度。
- 2) 对于不同的激光功率,在不同激光扫描速度下作用到吸收层材料的能量密度是有差异的。当作用到吸收层材料的激光能量密度达到合适的值时,可以得到较强的连接,并形成较好的连接接头形貌。
- 3) 模具的压紧力与材料上转化为热量的能量传导有一定的关系,合适的压紧力有利于材料之间的热传导,并防止气泡的产生,这对于形成较强的连接与较好的接头形貌具有重要的意义。
- 4) 激光扫描次数的增加在一定程度上有利于较强连接接头的形成,当激光能量恒定、扫描速度一定时,扫描次数过多会使材料母体烧蚀,降低连接强度。连接区域宽度与扫描次数成正比。
- 5) 通过方差分析可以看出,激光功率、扫描速度和扫描次数对连接强度和连接区域宽度的影响较大,模具压紧力的影响较小。对于这些参数,需要在前期实验的基础上选择包含最优工艺参数的取值范围。
- 6) 通过验证实验可以看出,实验建立的数学模型的估计值与实际的验证实验所得数值较为吻合,说明建立的响应曲面设计优化模型是有意义的。

## 参 考 文 献

- 1 P. A. Hilton, I. A. Jones, Y. Kennish. Transmission laser welding of plastics[C]. *SPIE*, 2002, **4831**: 44~52
  - 2 Xiao Wang, Pin Li, Zhenkai Xu *et al.*. Laser transmission joint between PET and titanium for biomedical application[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, **210**(13): 1767~1771
  - 3 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 466~471
- 王 霄, 张惠中, 丁国民 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 466~471

- 4 Sultana Taslema. Bond Quality and Failure Mode Assessment for Polymer-Metal and Polymer-Glass Transmission Laser Joints[D]. Detroit: Wayne State University, 2008. 1~20
- 5 Li Pin, Liu Huixia, Xu Zhenkai *et al.*. Laser transmission joining process of PET films and titanium[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1914~1920  
李品, 刘会霞, 许贞凯等. 医用PET薄膜与薄钛板激光透射连接工艺研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1914~1920
- 6 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1081~1087  
刘会霞, 邢安, 张惠中等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1081~1087
- 7 Grewell, Benatar, Park. *Plastics and Composites Welding Handbook*[M]. Lin Xiaolin, Wang Yiqing Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 182~190  
格雷瓦尔, 贝纳特, 帕克. *塑料及其共混物焊接*[M]. 李晓林, 王益庆译. 北京: 化学工业出版社, 2006. 182~190
- 8 Negin Amanat, Cedric Chaminade, John Grace *et al.*. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry[J]. *Mater. Des.*, 2010, **31**(10): 4823~4830
- 9 Ismail Hadriche, Elhem Ghorbel, Neila Masmoudi *et al.*. Investigation on the effects of laser power and scanning speed on polypropylene diode transmission welds[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, **50**(1-4): 217~226
- 10 Elhem Ghorbel, Giuseppe Casalino, Stéphane Abed. Laser diode transmission welding of polypropylene: geometrical and microstructure characterisation of weld[J]. *Mater. Des.*, 2009, **30**(7): 2745~2751
- 11 E. Haberstroh, W. M. Hoffmann, R. Poprawe *et al.*. Laser transmission joining in microtechnology[J]. *Microsyst. Technol.*, 2006, **12**(7): 632~639
- 12 V. A. Kagan, R. G. Bray, W. P. Kuhn. Laser transmission welding of semi-crystalline thermoplastics, part I: optical characterization of nylon based plastics[J]. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2002, **21**(12): 1101~1122
- 13 Bappa Acherjee, Dipten Misra, Dipankar Bose *et al.*. Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(8): 956~967
- 14 V. A. Kagan, G. P. Pinho. Laser transmission welding of semicrystalline thermo-plastics, part II: analysis of mechanical performance of welded nylon[J]. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2004, **23**(1): 95~107
- 15 V. A. Kagan, R. Bray, A. Chambers. Forward to better understanding of optical characterization and development of colored polyamides for the infra-red/laser welding, part I: efficiency of polyamides for infra-red welding[J]. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2003, **22**(6): 533~547
- 16 V. A. Kagan, A. Chambers, R. Bray. Forward to better understanding of optical characterization and development of colored polyamides for the infra-red/laser welding, part II: family of colored polyamides[J]. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2003, **22**(7): 593~603
- 17 D. Grewell, P. Rooney, V. A. Kagan. Relationship between optical properties and optimized processing parameters for through-transmission laser welding of thermoplastics[J]. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2004, **23**(3): 239~247
- 18 Douglas C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments* [M]. Fu Juesheng, Zhang Jian, Wang Zhenyu Transl. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2009. 347~398  
蒙哥马利. *实验设计与分析*[M]. 傅珏生, 张健, 王振羽译. 北京: 人民邮电出版社, 2009. 347~398
- 19 N. K. Rastogi, K. R. Rashmi. Optimisation of enzymatic liquefaction of mango pulp by response surface methodology[J]. *Eur. Food Res. Technol.*, 1999, **209**(1): 57~62
- 20 Zhang Huizhong. *Experiment Research and Numerical Simulation on Laser Transmission Welding of Thermoplastic*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. 16~22  
张惠中. *热塑性塑料激光透射焊接的实验研究与数值模拟*[D]. 镇江: 江苏大学, 2007. 16~20
- 21 S. A. Prahl. Charts to rapidly estimate temperature following laser irradiation[C]. *SPIE*, 1995, **2391**: 499~511