

激光透射点焊车用材料 PMMA 的工艺优化

刘保光 王 霄 刘 伟 郭德晖 仲雪娇 刘会霞

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 针对聚合物在汽车轻量化应用中引发的连接需求,采用 Nd:YAG 脉冲激光器对车用材料聚甲基丙烯酸酯 (PMMA) 进行激光透射点焊实验研究。利用响应曲面法建立工艺参数与最大拉力和熔池直径的数学模型,并进行实验设计优化与分析。分析了作用时间、离焦量、峰值电压、脉冲频率对连接性能和熔池直径的影响,并采用两种优化准则进行优化分析。结果表明,峰值电压和脉冲频率是通过控制激光功率来影响连接性能,且后者对激光透射点焊连接性能影响较大;当激光功率较大时,能量密度较为集中,增加激光作用时间易造成材料烧蚀甚至穿透。工艺优化过程中,预测值与实验值相对误差保持在 8% 以内,优化的预测结果与验证实验的结果较为吻合,对提高连接质量和降低生产成本有很好的指导意义。

关键词 激光技术;激光透射点焊;响应曲面法;热塑性聚合物;工艺参数优化

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0503004

Process Optimization of Laser Transmission Spot Welding Using Material PMMA for Automotive Industry

Liu Baoguang Wang Xiao Liu Wei Guo Dehui Zhong Xuejiao Liu Huixia

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract To quantify the need for the connection of a lightweight polymer in the automotive industry, the study on laser transmission spot welding of material PMMA for vehicle by Nd:YAG pulse laser is conducted. The mathematical model of the process parameters with the maximum tensile force and molten pool diameter is established by the response surface method, and it can be used to optimize and analyze the experimental design. The interaction effects of key parameters including voltage, frequency, stand-off distance, and exposure on the joint performance and the mean weld diameter are analyzed, and the optimization analysis is carried out based on two kinds of optimization criteria. The results show that the voltage and frequency can affect the joint performance by controlling the laser power, and the latter has a significant influence on laser transmission spot joining performance. When the laser power becomes higher, the energy density is more concentrated. In that case, if the laser action time increases, it is easy to initiate ablation or even penetration of samples. In the process of optimization, the relative error between the predicted value and the experimental one is less than 8%, so the predicted results of parameters optimization are consistent with the experimental ones. Above all, this study provides an effective direction to enhance the bond quality and minimize the bond cost.

Key words laser technique; laser transmission spot welding; response surface method; thermoplastic polymer; optimization of process parameter

OCIS codes 140.3538; 160.5470; 120.7000; 350.3390

收稿日期: 2016-01-14; 收到修改稿日期: 2016-02-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51275219)、江苏省高校自然科学研究面上项目 (14KJB460006)、江苏大学工业中心大学生创新实践基金 (ZXJG201594)

作者简介: 刘保光 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: 1490676336@qq.com

导师简介: 王 霄 (1964—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: wx@ujs.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

近年来,随着全球资源与环境保护问题的日趋严峻,研制节能环保和轻量化产品已成为新的发展趋势。尤其在汽车行业,研究者正致力于通过减轻车身自重来缓解日益增长的汽车所带来的能源消耗和尾气污染等问题。热塑性聚合物材料以其重量轻、强度高、密度小、成型方便、成本低、弹性优良、耐腐蚀等优点成为取代车用钢和铸铁的首选^[1-2]。

点焊技术作为一种高效的聚合物连接技术,已被广泛应用于汽车制造中^[3]。传统的聚合物点焊方法主要有搅拌摩擦点焊和超声波点焊等^[4-5]。相比于传统的聚合物点焊技术,激光点焊不仅是非接触式焊接,而且具有焊接质量高、环保、热影响区小等优势^[6-7]。激光点焊技术利用热塑性塑料的透光性实现焊接,是目前以塑代钢趋势下最具潜力的焊接方法,正逐渐应用于各行各业。

在国外文献中,Visco 等^[7]采用 Nd:YAG 脉冲激光器进行聚合物点焊研究,主要对作用时间进行单因素优化,从而获取最优参数;Farazila 等^[8]通过显微镜观测和拉伸试验对激光透射点焊塑料与不同金属间的焊接性能进行研究,通过控制工艺参数得出不同焊接材料间的连接强度差异。但在国内对激光透射点焊不同工艺参数组合对连接质量的交互影响以及工艺优化的研究还未涉及。缺乏科学合理的工艺参数将严重影响激光透射点焊技术在工业应用中的生产效率。

本文以广泛应用于汽车工业中的热塑性聚合物聚甲基丙烯酸酯(PMMA)作为研究对象^[9],采用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器进行激光透射点焊工艺参数研究。采用响应曲面法建立最大拉力和熔池直径的数学模型,分析激光透射点焊工艺参数对最大拉力和熔池直径的交互影响。通过两种优化准则进行优化,获取最优工艺参数,提高焊接质量。

2 实验设计方案

2.1 试样准备与实验设备

实验中所用 PMMA 试样尺寸为 50 mm×20 mm×1.5 mm。激光透射点焊实验所用激光器为波长 1064 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器。采用紫外-可见-近红外吸收光谱仪测得实验所用 PMMA 的透射率为 86.32%,透光性较好。在激光透射点焊过程中,上层材料必须是透明的,而下层材料应具有较高的吸收属性^[10]。在本实验中,上下层材料均为透光性较好的 PMMA,因此实验中需在下层材料上表面处添加吸收剂 Clearweld。

在实验过程中,采用气动夹紧装置,为确保实验过程中夹紧力的均匀性,使用 K9 玻璃作为夹持层。激光透射点焊原理图如图 1 所示。实验中保持夹紧力不变,研究激光器峰值电压、脉冲频率、作用时间和离焦量对最大拉力和熔池直径的交互影响。由于 Nd:YAG 脉冲激光器的激光光束为圆形,过高的脉冲功率会降低材料的热应力,因此实验设计应尽量使用较低的平均功率,作用时间需较长。

采用真彩色共聚焦三维显微镜观察焊点的熔池直径。为得到较好的拉伸实验结果,在用微机控制电子万能实验机进行剪切拉伸实验时拉伸速度应尽量控制在 0.5 mm/min 以内。

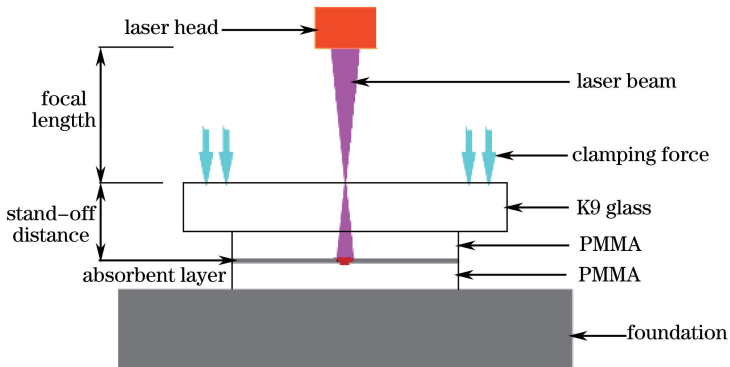


图 1 激光透射点焊原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission spot welding

2.2 实验方法

实验是基于作用时间、离焦量、峰值电压和脉冲频率这 4 个因素在 5 水平全响应的中心旋转组合设计 (CCRD)^[11], 首先进行单因素实验以确定各参数的范围, 如表 1 所示。根据实验设计矩阵和组合, 进行激光透射点焊实验, 并对焊接件进行拉伸测试, 各因素对实验结果的影响和所得最大拉力如表 2 所示。采用真彩色共聚焦三维显微镜进行微观形貌观察, 峰值电压 470 V、脉冲频率 10 Hz、离焦量 -4 mm 和作用时间为 1.4 s 时的焊缝形貌图如图 2 所示。使用该显微镜可测量出连接区域的熔池直径, 即熔池直径大小等于横向直径与共轭直径之和的一半。

表 1 PMMA 焊接条件
Table 1 Welding conditions for PMMA

Code	Parameter	Level				
		-2	-1	0	+1	+2
A	Crest value /V	440	450	460	470	480
B	Pulse frequency /Hz	5	10	15	20	25
C	Stand-off distance /mm	-8	-4	0	4	8
D	Exposure time /s	0.8	1	1.2	1.4	1.6

表 2 实验设计矩阵与结果
Table 2 Test results and design matrix

No.	Parameter				Result	
	A /V	B /Hz	C /mm	D /s	Maximum load /N	Mean weld diameter / μm
1	470	10	-4	1.4	145.74	2609.92
2	460	15	0	0.8	128.02	2062.27
3	450	10	4	1	83.72	2283.65
4	470	20	-4	1	90.23	3262.37
5	450	20	4	1	125.18	2978.21
6	440	15	0	1.2	128.77	2463.64
7	450	10	-4	1.4	101.07	2425.12
8	470	10	-4	1	119.97	2226.82
9	460	15	8	1.2	80.71	3901.89
10	480	15	0	1.2	120.76	2960.52
11	470	20	-4	1.4	140.79	3473.82
12	460	15	0	1.6	171.66	3275.52
13	450	20	-4	1	110.71	2992.63
14	460	5	0	1.2	98.01	1881.89
15	450	10	4	1.4	110.57	2501.08
16	460	15	0	1.2	150.79	2611.11
17	460	15	0	1.2	137.69	2721.62
18	460	25	0	1.2	79.18	3207.74
19	460	15	0	1.2	140.69	2412.27
20	460	15	0	1.2	145.69	2520.05
21	460	15	-8	1.2	77.06	3681.76
22	450	10	-4	1	90.62	2099.81
23	470	20	4	1	92.75	3290.82
24	460	15	0	1.2	175.79	2710.62
25	450	20	-4	1.4	139.61	3178.26
26	470	20	4	1.4	106.82	3382.95
27	470	10	4	1.4	121.62	2570.92
28	460	15	0	1.2	135.78	2701.02
29	450	20	4	1.4	140.02	3269.39
30	470	10	4	1	92.58	2388.26

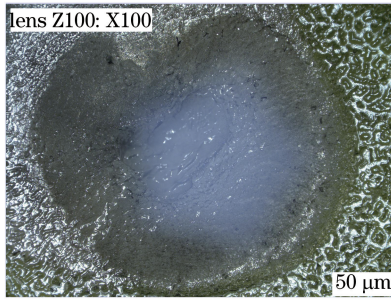


图 2 PMMA 焊缝形貌图

Fig. 2 Morphology of PMMA weld seam

3 结果与讨论

3.1 最大拉力的方差分析和数学模型

采用软件 design expert 对表 2 中数据进行分析,从而得出方差分析表,如表 3 所示。其中 ADJ SS 为平方和,DF 为自由度,ADJ MS 为均方差。最大拉力模型遵循的 F 分布的检验统计量值为 9.18; P 值表示建立模型可靠性的一种统计检验方法,一般认为 $P=0.05$ 是可接受错误的边界水平。显然, P 值小于 0.0001 也表明该模型显著。 R^2 表明模型的拟合度,其值为 0.8955,表明模型有不到 9% 的总变异无法解释。预测拟合系数 $R^2_{\text{PRED}}=0.6209$ 和修正拟合系数 $R^2_{\text{ADJ}}=0.7980$ 基本吻合,说明该模型符合要求。失拟值(lack of fit)为 0.8270(失拟值表示模型预测值与实际值不拟合的概率^[12])。模型的信噪比(adeq precision)为 11.606,大于 4 就表示建立模型满意^[13],这些数据表明该模型符合要求。从而得出最大拉力的编码因素与实际因素的最终数学模型。

a) 最大拉力的编码方程为

$$M = 147.74 - 0.29A + 1.77B - 2.42C + 11.99D - 11.18AB - 6.28AC + 2.40AD + 2.02BC + 1.02BD - 1.93CD - 5.29A^2 - 14.33B^2 - 16.76C^2 + 0.98D^2, \quad (1)$$

b) 最大拉力的实际值方程为

$$M = -12062.28771 + 50.53896A + 119.17692B + 72.96427C - 566.10625D - 0.22357AB - 0.15694AC + 1.20000AD + 0.10106BC + 1.01625BD - 2.41250CD - 0.052885A^2 - 0.57324B^2 - 1.04741C^2 + 24.50521D^2, \quad (2)$$

式中 M 为最大拉力。

3.2 熔池直径的方差分析和数学模型

5 对熔池直径进行方差分析,总结出各组分析数据,如表 4 所示。其信噪比为 18.019, P 值小于 0.0001,说明该模型合适。

a) 熔池直径的编码方程

$$W = 2612.78 + 102.98A + 390.61B + 34.87C + 179.8D + 31.58AB - 17.28AC - 9.39AD - 23.00BC - 20.51BD - 20.13CD + 4.65A^2 - 37.16B^2 + 274.59C^2 - 6.14D^2, \quad (3)$$

b) 熔池直径的实际值方程

$$W = 6313.34760 - 36.35356A - 143.17071B + 254.88734C + 3734.48021D + 0.63151AB - 0.43202AC - 4.69406AD - 1.14984BC - 20.50688BD - 25.16328CD + 0.046534A^2 - 1.48651B^2 + 17.16186C^2 - 153.57031D^2, \quad (4)$$

式中 W 为熔池直径。

表 3 最大拉力的方差分析
Table 3 ANOVA analysis for maximum load

Source	ADJ SS	DF	ADJ MS	F-value	P-value	
Model	19007.78	14	1357.69	9.18	<0.0001	Significant
A	2.05	1	2.05	0.013	0.9077	
B	75.47	1	75.47	0.51	0.4859	
C	141.03	1	141.03	0.95	0.3442	
D	3450.24	1	3450.24	23.33	0.0002	
AB	1999.43	1	1999.43	13.52	0.0022	
AC	630.51	1	630.51	4.26	0.0566	
AD	92.16	1	92.16	0.62	0.4421	
BC	65.36	1	65.36	0.44	0.5162	
BD	16.52	1	16.52	0.11	0.7428	
CD	59.59	1	59.59	0.40	0.5350	
A ²	767.14	1	767.14	5.18	0.0378	
B ²	5633.24	1	5633.24	38.10	<0.0001	
C ²	7703.27	1	7703.27	52.10	<0.0001	
D ²	26.35	1	26.35	0.17	0.6789	
Residual	2217.57	15	147.83			
Lack of fit	1123.52	10	112.35	0.51	0.8270	Not significant
Pure error	1094.05	5	218.81			
Cor total	21225.36	29				
$R^2 = 0.8955$			$R^2_{\text{PRED}} = 0.6209$			
$R^2_{\text{ADJ}} = 0.7980$			Adeq precision: 11.606			

表 4 熔池直径的方差分析
Table 4 ANOVA analysis for mean weld diameter

Source	ADJ SS	DF	ADJ MS	F-value	P-value	
Model	7.046E+006	14	5.033E+005	18.56	<0.0001	Significant
A	2.545E+005	1	2.545E+005	9.38	0.0079	
B	3.622E+006	1	3662E+006	135.06	<0.0001	
C	29175.73	1	29175.73	1.076	0.3160	
D	7.759E+005	1	775941.30	28.62	<0.0001	
AB	15952.32	1	15952.32	0.58	0.4549	
AC	4777.92	1	4777.92	0.17	0.6806	
AD	1410.19	1	1410.19	0.05	0.8227	
BC	8461.70	1	8461.70	0.31	0.5846	
BD	6728.51	1	6728.51	0.25	0.6256	
CD	6483.87	1	6483.87	0.24	0.6319	
A ²	593.95	1	593.95	0.02	0.8843	
B ²	37880.90	1	37880.90	1.39	0.2556	
C ²	2.068E+006	1	2.068E+006	76.28	<0.0001	
D ²	1034.99	1	1034.994	0.038	0.8477	
Residual	4.067E+005	15	27110.97			
Lack of fit	3.287E+005	10	32865.35	2.11	0.2126	Not significant
Pure error	78011.01	5	15602.20			
Cor total	7.453E+006	29				
$R^2 = 0.9454$			$R^2_{\text{PRED}} = 0.7309$			
$R^2_{\text{ADJ}} = 0.8945$			Adeq precision: 18.019			

3.3 工艺参数对最大拉力和熔池直径的影响

3.3.1 工艺参数对最大拉力的影响

图 3(a)、(b)表明峰值电压和脉冲频率对最大拉力的影响是交互作用的。当峰值电压为 455~465 V、脉冲频率为 12~16 Hz 时最大拉力比较大。在一定条件下,随着峰值电压和脉冲频率的增加,功率相应变大,材料单位面积可以吸收的能量密度不断增加,使得聚合物分子之间产生较强的范德瓦耳斯力,提高了材料间连接强度^[14]。但由于采用脉冲激光器,能量是瞬间作用在材料上,功率过高会导致焊接区域烧蚀甚至穿透,使得最大拉力下降。因此,峰值电压和脉冲频率取值不宜过大。

图 4(a)、(b)所示为离焦量与峰值电压对最大拉力的交互影响。在材料焊接过程中,熔深对焊接效果有着重要影响,因此当峰值电压在 455~465 V 范围内时,离焦量在 0 附近可以获得较大的熔深^[15],具有较好的焊接效果。当峰值电压为 470 V 时,脉冲激光能量较大,单位时间内激光能量密度变大,材料发生烧蚀孔洞现象,导致连接强度变低。但从图 4 中可以看出,连接强度的下降幅度很小,这是因为烧蚀虽会减小焊件的连接强度,但在较大的能量密度下,熔池直径会变大,从而抵消了一部分烧蚀带来的影响。实验中,由于上下层材料均为 PMMA,因此当正负离焦量值相等时,最大拉力相差不大。

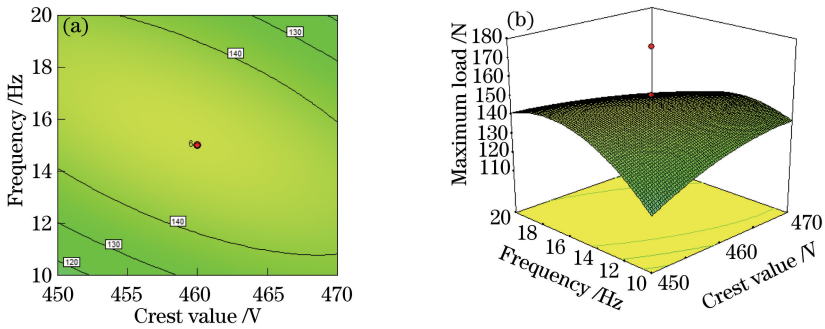


图 3 峰值电压和脉冲频率对最大拉力的影响。(a) 等值线; (b) 三维响应曲面图

Fig. 3 Effect of crest value and pulse frequency on maximum load. (a) Isogram; (b) 3D response surface plot

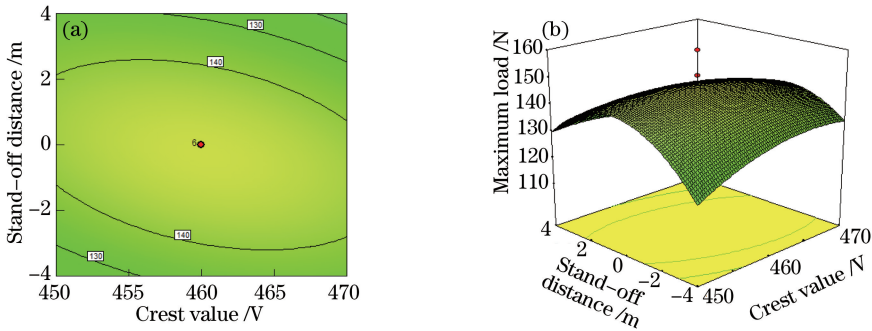


图 4 峰值电压和离焦量对最大拉力的影响。(a) 等值线; (b) 三维响应曲面图

Fig. 4 Effect of crest value and stand-off distance on maximum load. (a) Isogram; (b) 3D response surface plot

图 5(a)、(b)所示为作用时间与脉冲频率对最大拉力的交互影响。从图 5 可以看出,在一定条件下,随着作用时间的增加,最大拉力会变大。同时,脉冲频率对最大拉力的影响更大,这是由于脉冲频率的成倍增加,意味着单脉冲能量在单位作用时间内作用在材料的次数将会成倍增加,从而可以得到更好的连接效果。

3.3.2 工艺参数对熔池直径的影响

熔池直径主要取决于零件所吸收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效果有利于形成可靠性更高的连接接头^[14]。图 6(a)、(b)所示为峰值电压和脉冲频率对熔池直径的交互影响,可以看出脉冲频率对熔池直径的影响较大,且功率受峰值电压和脉冲频率共同作用,因此随着二者的增加,功率持续变大,这样虽然会导致材料烧蚀影响连接强度,但能量的持续增加,仍会导致熔池直径的增大。

图 7(a)、(b)表明了脉冲频率和离焦量对熔池直径的交互影响。脉冲频率的影响已经说明,离焦量对熔池直径也会产生很大影响。无论正负离焦,离焦量的绝对值越大,在相同条件下,作用在材料表面范围更大,

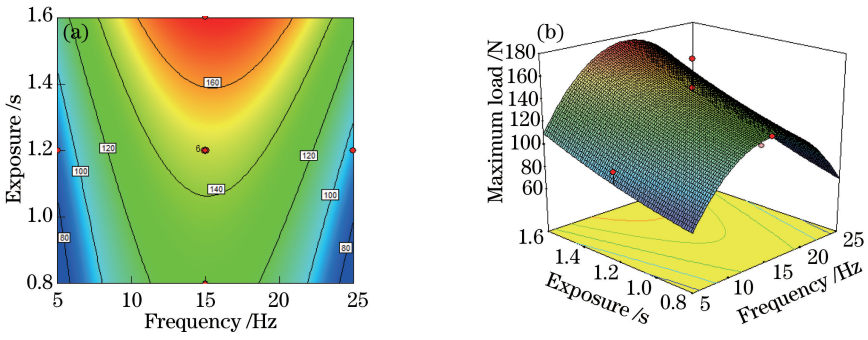


图 5 作用时间和脉冲频率对最大拉力的影响。(a) 等值线；(b) 三维响应曲面图

Fig. 5 Effect of exposure time and pulse frequency on maximum load. (a) Isogram; (b) 3D response surface plot

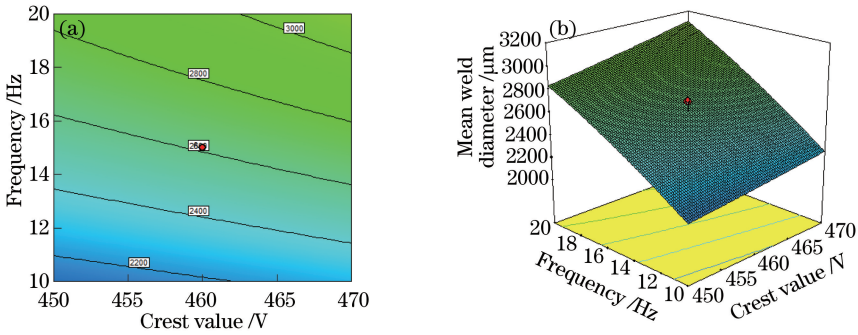


图 6 峰值电压和脉冲频率对熔池直径的影响。(a) 等值线；(b) 三维响应曲面图

Fig. 6 Effect of crest value and pulse frequency on mean weld diameter. (a) Isogram; (b) 3D response surface plot

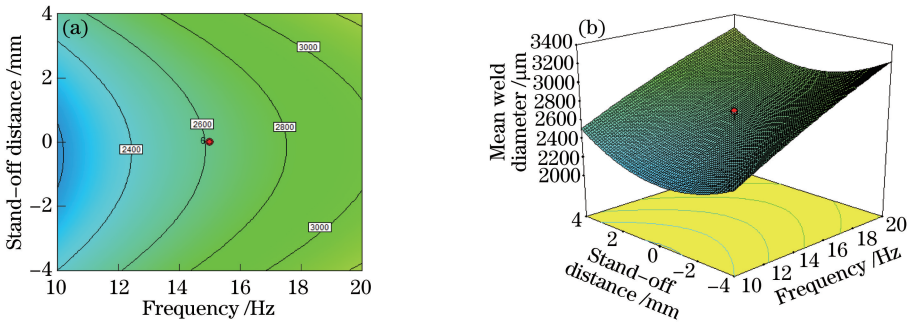


图 7 脉冲频率和离焦量对熔池直径的影响。(a) 等值线；(b) 三维响应曲面图

Fig. 7 Effect of pulse frequency and stand-off distance on mean weld diameter. (a) Isogram; (b) 3D response surface plot

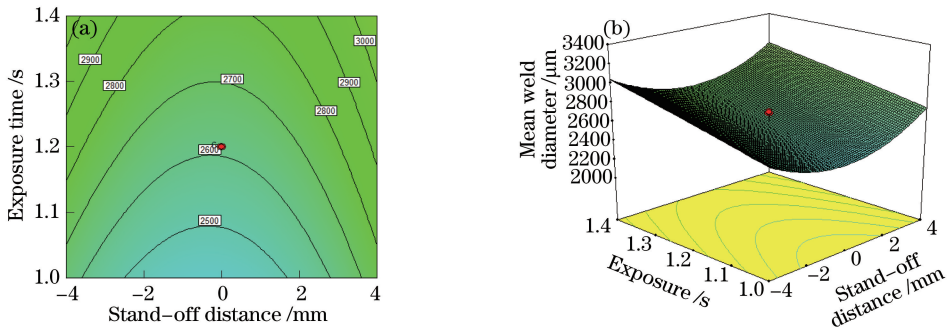


图 8 作用时间和离焦量对熔池直径的影响。(a) 等值线；(b) 三维响应曲面图

Fig. 8 Effect of exposure time and stand-off distance on mean weld diameter. (a) Isogram; (b) 3D response surface plot

形成的热影响区更大,从而更容易获得较大的熔池直径。

图 8(a)、(b)所示为作用时间和离焦量对熔池直径的交互影响。随着作用时间增加,持续作用在材料上的能量不断积累,熔池深度和熔池直径都会不断变大,材料的连接区域不断扩大。但合理的取值也十分重要,过长的作用时间不仅会导致材料穿透,也容易发生事故,造成危险。

3.4 模型验证

图 9 为最大拉力和熔池直径的预测值与实验实际值之间的关系,实验数据靠近直线且分布均匀,说明实验实际值与所建模型的预测值能够很好的吻合。从实验结果中随机抽取 3 组数据进行对比和相对误差计算,如表 5 所示。从表中可以看出,预测值与实验值的相对误差均在 8%以内,结果表明所建立的数学模型与实际符合。

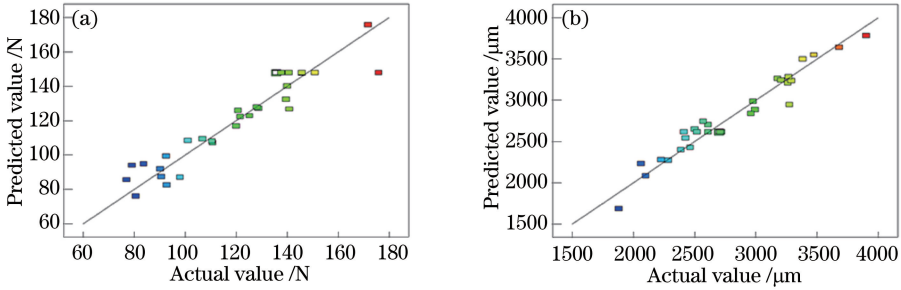


图 9 实际实验值与预测值对照。(a) 最大拉力; (b) 熔池直径

Fig. 9 Predicted results versus actual experimental results. (a) Maximum load; (b) mean weld diameter

表 5 优化实验结果的验证

Table 5 Tests of optimized experimental results

	A /V	B /Hz	C /mm	D /s	Maximum load /N		Mean weld diameter / μm	
					Actual	Predicted	Actual	Predicted
1	470	10	-4	1.4	145.74	142.82	2609.92	2714.31
2	460	15	0	0.8	128.02	121.62	2062.27	2103.51
3	450	10	4	1	83.72	93.12	2283.65	2215.14

3.5 优 化

3.5.1 优化分析

基于二阶多项式模型,可通过响应曲面(RSM)方法进一步实现优化,此处使用两种优化,并对结果进行对比。第一种优化准则是不考虑其他因素下获得最大的拉力值。第二种优化准则是在降低成本的情况下获得最大的拉力值和最小的熔池直径^[16]。表 6 显示了两种准则,在其基础上分别得出几组满意度最大的工艺参数,如表 7 和表 8 所示。图 10(a)、(b)分别表示第一、第二优化准则,通过图解优化可以更方便清晰地找到最优工艺参数范围,即两组等值线相交区域,但实验过程中脉冲频率需取整数。

表 6 工艺参数优化准则

Table 6 Optimization criteria of process parameters

Parameter	Limit		I	First criterion	II	Second criterion
	Lower	Upper				
A /V	450	470	3	In range	3	Minimize
B /Hz	10	20	3	In range	3	Minimize
C /mm	0	8	3	In range	3	In range
D /s	1	1.4	3	In range	3	Minimize
Maximum load /N	135	175.79	3	Maximize	3	Maximize
Mean weld diameter / μm	1881.89	3901.89	3	In range	3	Minimize

3.5.2 优化结果验证

通过两种准则优化,得出对应的优化结果,并分别对两种优化结果中第一组数据进行验证,如表 9 所示,得出实际值与预测值较为吻合。

表 7 优化结果(准则 I)

Table 7 Optimization results (Criterion I)

No.	A /V	B /Hz	C /mm	D /s	Maximum load /N	Mean weld diameter / μm	Desirability
1	461.64	15.17	0.00	1.40	160.928	2814.61	0.636
2	461.89	15.10	0.00	1.40	160.926	2811.55	0.636
3	461.69	15.24	0.00	1.40	160.924	2820.4	0.636
4	461.11	15.28	0.00	1.40	160.919	2817.67	0.635
5	461.17	15.15	0.00	1.40	160.914	2808.6	0.635

表 8 优化结果(准则 II)

Table 8 Optimization results (Criterion II)

No.	A /V	B /Hz	C /mm	D /s	Maximum load /N	Mean weld diameter / μm	Desirability
1	454.27	14.46	0.08	1.19	144.572	2505.68	0.518
2	454.06	14.52	0.24	1.19	144.484	2509.75	0.517
3	454.96	13.83	0.00	1.24	146.075	2508.42	0.512
4	450.78	15.18	0.35	1.19	143.659	2532.71	0.511

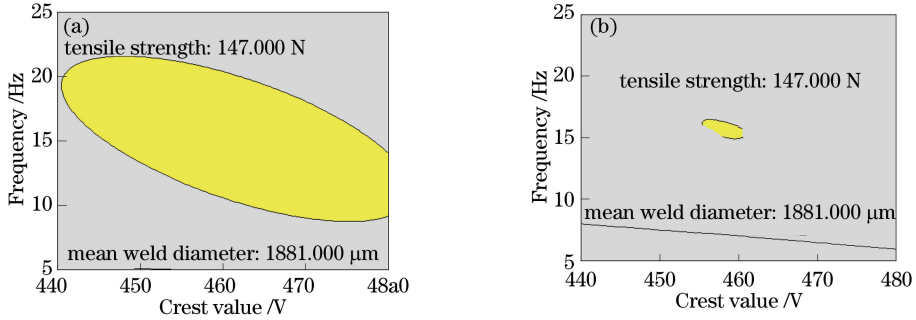


图 10 最优工艺参数范围。(a) 第一准则,离焦量为 0 mm,作用时间为 1.4 s;
(b) 第二准则,离焦量为 0.08 mm,作用时间为 1.19 s

Fig. 10 Optimal process parameter range. (a) Criterion I, stand-off distance is 0 mm, and exposure time is 1.4 s;
(b) Criterion II, stand-off distance is 0.08 mm, and exposure time is 1.19 s

表 9 优化结果

Table 9 Optimization results

No.	A /V	B /Hz	C /mm	D /s	Maximum load /N		Mean weld diameter / μm	
					Actual	Predicted	Actual	Predicted
1	461.64	15.17	0.00	1.40	160.928	152.88	2814.61	2927.21
2	454.27	14.46	0.08	1.19	144.572	147.42	2505.68	2356.38

4 结 论

通过响应曲面法,建立激光透射点焊聚合物 PMMA 的最大拉力和熔池直径的数学模型,分析得出以下结论:

- 1) 峰值电压、脉冲频率、离焦量与作用时间对最大拉力和熔池直径具有显著影响,这些参数控制着连接区域的能量输入;
- 2) 峰值电压和脉冲频率通过共同控制激光功率来影响焊接效果;
- 3) 激光作用时间的增加在一定程度上有利于提高连接质量,但作用时间过长会导致能量持续增加,造成材料烧蚀甚至穿透,使得焊接质量下降;
- 4) 通过方差分析得出对最大拉力和熔池直径影响最大的是脉冲频率,其次是离焦量,然后是作用时间和峰值电压。
- 5) 通过模型验证与优化结果验证得出预测值与实验值较为吻合,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 Zhang Shengyu. Laser welding technology of plastics[J]. World Plastics, 2007, 25(3): 56-62.
张胜玉. 塑料激光焊接技术[J]. 国外塑料, 2007, 25(3): 56-62.
- 2 Cole G S, Sherman A M. Light weight materials for automotive applications[J]. Materials Characterization, 1995, 35(1): 3-9.
- 3 Aslanlar S, Ogur A, Ozsarac U, *et al.*. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding[J]. Materials & Design, 2008, 29(7): 1427-1431.
- 4 Bilici M K, Yukler A I, Kurtulmus M. The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets[J]. Materials & Design, 2011, 32(7): 4074-4079.
- 5 Villegas I F. Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 65: 27-37.
- 6 Tamrin K F, Nukman Y, Sheikh N A. Laser spot welding of thermoplastic and ceramic: An experimental investigation [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(9): 1138-1145.
- 7 Visco A M, Brancato V, Cutroneo M, *et al.*. Nd : YAG laser irradiation of single lap joints made by polyethylene and polyethylene doped by carbon nanomaterials[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 508: 012027.
- 8 Farazila Y, Miyashita Y, Hua W, *et al.*. YAG laser spot welding of PET and metallic materials[J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2011, 6(1): 69-74.
- 9 Lei Jianbo, Wang Zhen, Wang Yunshan, *et al.*. Experiment study of laser transmission welding of polymethylmethacrylate[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103006.
雷剑波, 王 镇, 王云山, 等. 激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103006.
- 10 Haberstroh E, Hoffmann W M, Poprawe R, *et al.*. 3 Laser transmission joining in microtechnology[J]. Microsystem Technologies, 2006, 12(7): 632-639.
- 11 Montgomery D C. Design and analysis of experiments[M]. Fu Juesheng, Zhang Jian, Wang Zhenyu, *et al.*. Transl. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2009: 347-397.
蒙哥马利. 实验设计与分析[M]. 傅珏生, 张 健, 王振羽, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 347-397.
- 12 Rastogi N K, Rashmi K R. Optimisation of enzymatic liquefaction of mango pulp by response surface methodology[J]. European Food Research and Technology, 1999, 209(1): 57-62.
- 13 Benyounis K Y, Olabi A G, Hashmi M S J. Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165: 978-985.
- 14 Jiang Minfeng, Xu Zhenkai, Liu Huixia, *et al.*. Optimization of laser transmission joining process parameters for thermoplastic using response surface methodology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 071408.
姜敏凤, 许贞凯, 刘会霞, 等. 基于响应曲面法的激光透射连接聚合物工艺参数优化[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 071408.
- 15 Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 179-184.
王家淳, 王希哲, 惠松骁. HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 179-184.
- 16 Xue Guochun, Liu Huixia, Li Pin, *et al.*. Process study on laser transmission bonding of silicon with glass via response surface methodology[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303004.
薛国春, 刘会霞, 李 品, 等. 基于响应曲面法的激光透射连接硅与玻璃的工艺研究[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303004.