

文章编号: 1001-3806(2018)06-0827-08

## 聚苯乙烯与钛激光透射连接工艺研究

李 静<sup>1</sup>, 刘会霞<sup>1\*</sup>, 谭文胜<sup>2</sup>, 孙跃东<sup>1</sup>, 申 祥<sup>1</sup>, 王 霄<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2. 常州市大型塑料件智能化制造重点实验室, 常州 213164)

**摘要:** 为了解决激光透射难以实现连接聚苯乙烯与钛的问题, 采用氧等离子体处理后的聚苯乙烯与经激光表面处理的薄钛进行了激光透射连接。建立了激光透射连接工艺参量的数学模型, 分析了工艺参量对连接强度的交互式影响, 得到了优化工艺参量。结果表明, 经过处理后的聚苯乙烯与薄钛再进行激光连接时, 其连接强度从 0.5MPa 提高到 6.0MPa 以上, 有效解决了聚苯乙烯与钛的激光透射连接难题; 通过优化工艺参量可获得最优的工艺参量组合。该研究为此工艺的工业应用奠定了基础。

**关键词:** 激光技术; 工艺参量优化; 激光透射连接; 响应曲面法; 氧等离子体处理; 表面处理; 钛; 聚苯乙烯  
**中图分类号:** TG456.7      **文献标志码:** A      **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.019

### Process research of laser transmission connection of polystyrene and titanium

LI Jing<sup>1</sup>, LIU Huixia<sup>1</sup>, TAN Wensheng<sup>2</sup>, SUN Yuedong<sup>1</sup>, SHEN Xiang<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Changzhou Key Laboratory of Large Plastic Parts Intelligence Manufacturing, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that laser transmission was difficult to connect polystyrene and titanium, polystyrene treated with oxygen plasma was used for laser transmission connection with thin titanium treated by laser surface treatment. Mathematical model of laser transmission connection process parameters was established, and interactive influence of process parameters on connection strength was analyzed. The optimized process parameters were obtained. The results show that the bonding strength of polystyrene and thin titanium after treatment increases from 0.5MPa to more than 6.0MPa. Laser transmission connection problem of polystyrene and titanium can effectively be solved. The combination of the optimum process parameters can be obtained by optimizing the process parameters. The research makes the foundation for industrial application of the process.

**Key words:** laser technique; process parameter optimization; laser transmission bonding; response surface method; oxygen plasma treatment; surface treatment; titanium; polystyrene

### 引 言

激光透射连接因具有连接质量好、变形小、效率高、容易操作、非接触式、自动化等优点, 成为具有生物相容性材料的金属和聚合物的连接(封装)工艺, 在医学方面有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

当今对于聚合物与金属的研究有以下几个方面: 对影响连接质量的参量进行优化; 对形成接头的机理进行研究; 采取各种技术提高强度。研究的聚合物与

金属大多是容易实现连接的材料。AHSAN 等人进行了两组材料之间的连接实验, 并分析了连接机理, 两组材料分别是钛和聚酰亚胺 (polyimide, PI), PI 和镀钛玻璃<sup>[4]</sup>。WANG 等人采用激光透射连接的方法研究了聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 和 316L 号不锈钢, 揭示了接头连接质量随工艺参量变化的规律, 并对工艺进行了优化组合<sup>[5]</sup>。GEORGIEV 等人研究发现 Teflon<sup>®</sup> FEP 与 Ti 形成较强连接的原因是在接头处生成了 Ti—F 化学键<sup>[6]</sup>。WANG 等人研究了 PET 和 Ti 之间的激光透射连接, 发现在 PET 和 Ti 之间也形成了化学键 Ti—C<sup>[7-8]</sup>。

ROESNER 等人研究的是多种聚合物材料与金属之间的激光透射连接, 聚合物包括玻纤增强的尼龙 66、尼龙 66 和聚碳酸酯。采用激光烧蚀金属的方法在金属表面加工出凹槽, 在焊接的过程中, 上层的聚合物

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275219); 常州市高新技术研究重点实验室资助项目(CM20153001)

作者简介: 李 静(1992-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: lhx@ujs.edu.cn

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-01-17

会被融化,熔融的聚合物会流进凹槽形成机械铆接,从而提高连接强度<sup>[9]</sup>。BERGMANN 等人研究的是尼龙和钢板之间的激光透射连接,为了提高连接强度,通过在钢板表面进行手工喷砂,制造出较为粗糙的钢板表面,再进行激光透射连接,有效提高了连接强度,还提出表面粗糙度不能作为确定连接强度的标准<sup>[10]</sup>。YUSOF 等人对 PET 和经过表面阳极化处理的 A5052 进行激光透射连接,实验研究发现,连接强度随着热输入和脉冲持续时间的增加而提高,PET 与 A5052 (阳极化处理)和 PET/A5052 (未经处理)在激光透射焊接时都形成了明显的熔池,连接的强度主要受热输入影响而不是脉冲持续时间。同时气泡的产生和熔池的深度也是影响连接强度的两个方面<sup>[11]</sup>。综合上述研究,提高接头连接强度的方法主要是通过金属进行微结构或对金属进行处理,但是对聚合物表面进行处理来提高强度的研究还比较少。

ARAI 等人通过对环烯烃聚合物 (cycloolefin polymer, COP) 和 SUS304 不锈钢进行表面改性处理后再进行激光透射连接,从而解决了 COP 与 SUS304 无法连接的问题<sup>[12]</sup>。本文中对上层材料为聚苯乙烯 (polystyrene, PS)、下层材料为薄钛的板材进行透射连接,聚苯乙烯为非极性材料,发现不经处理的聚苯乙烯与钛连接强度极低,为解决上述问题,本文中借鉴上述对聚合物表面改性和对金属进行表面处理的方法,提出对聚苯乙烯进行氧等离子体改性处理,同时对钛进行激光表面处理<sup>[13]</sup>,然后再进行激光透射连接,解决了聚苯乙烯与薄钛板无法实现连接的问题。重点讨论了连接工艺参量与连接强度的数学模型的建立,并分析了表面处理功率、激光连接速率、表面扫描速率、激光连接功率、氧等离子体处理时间的交互式影响及优化工艺参量组合。

## 1 聚苯乙烯与钛表面处理及连接实验

### 1.1 试样准备

实验中选用的具有生物相容性的材料为薄钛板和聚苯乙烯,试样尺寸均为 50mm × 20mm × 0.1mm。在进行实验之前需要用酒精对钛金属和聚苯乙烯表面进行清洗,并放在干燥箱内干燥 12h,以除去表面的油污和灰尘。

### 1.2 激光表面处理实验

激光表面处理的原理是在大气条件下用激光扫描钛表面,通过加热进行渗氧,在金属表面产生一定厚度的氧化层。激光表面处理的激光能量密度是指钛在单

位时间内单位面积上吸收激光照射的能量<sup>[14]</sup>,公式如下:

$$w = \frac{P}{v d_{\text{spot}}} \quad (1)$$

式中, $P$  是激光功率, $v$  是扫描速率, $d_{\text{spot}}$  是光斑直径。可以发现激光能量密度与功率成正比,而与扫描速率及光斑直径成反比。将光斑直径设定为 2mm,可以得到合适的表面处理区域宽度,约为 2mm 宽,可以使钛样品有足够的处理面积来进行连接实验。

实验中需要通过控制激光器功率、扫描速率、扫描次数以及光斑直径来调整激光能量密度,从而实现在钛表面形成一定厚度的氧化层,并防止出现处理失效的情况。比如能量密度过低,会出现处理效果不明显,氧化层厚度较低;能量密度过高,会出现表面烧蚀现象。

### 1.3 氧等离子体处理实验

聚苯乙烯氧等离子体处理采用的仪器为 HD-1B 型低温等离子体处理仪,装置由真空系统、真空测量计、内平行电极电容耦合圆筒状反应室、SY 型 500W 射频功率源、SG-III 型功率计、SP-II 型射频匹配器 (射频频率为 13.56MHz)、DK800-4 型玻璃转子气体流量控制阀、ZDO-2 型热偶真空测量计等组成。低温等离子体处理仪功率设置为 150W,真空度默认为 40Pa。

### 1.4 激光透射连接实验

实验中采用搭接焊,图 1 为激光透射连接的原理图。激光器采用德国 DILAS 半导体激光器进行激光透射连接实验,输出波长为 (980 ± 10) nm,最小的光斑直径是 700 μm ~ 800 μm,输出功率是 (0 ~ 130) W,工作时温度应保持在 15℃ ~ 25℃ 之间,激光器配备有自冷却系统。控制软件为 DyiT,行程范围是 300mm × 300mm × 200mm,最大速率为 50mm/s。测试连接强度的仪器是 UTM4104 型试验机, $v = 3\text{mm/min}$ 。

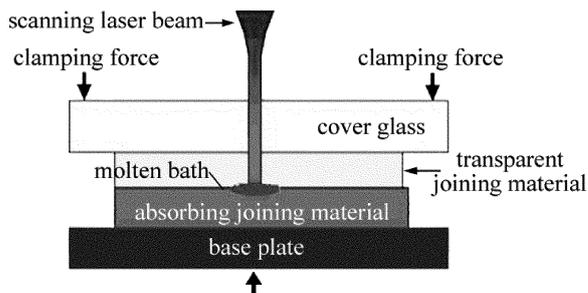


Fig. 1 Schematic of laser transmission bonding

直接进行激光透射连接实验时,试样无法实现连接,而对钛进行表面处理,表面处理功率为 5W,表面处理扫描速率为 2mm/s,表面处理扫描次数为 6 次,同时聚苯乙烯氧等离子体处理时间为 120s,再进行激光

透射连接实验,激光连接功率为 5W,激光连接速率为 2mm/s,离焦量为 1mm,连接件如图 2 所示。连接件效果很好,外形美观,焊缝均匀,无明显缺陷,并且连接强度达到 6.25MPa。上面的实验结果表明,通过激光表面处理的钛和经氧等离子体处理后的聚苯乙烯能够有效提高聚苯乙烯与钛激光透射连接的强度。氧等离子体处理使得聚苯乙烯表面产生了大量含氧官能团<sup>[15]</sup>,激光预氧化处理使钛产生氧化反应,在钛表面产生钛氧化膜<sup>[16]</sup>,而聚合物中的活性官能团(氨基或羧基)能够与金属氧化物发生反应<sup>[17]</sup>,因此,氧等离子体处理和激光预氧化处理能够提高连接的强度。

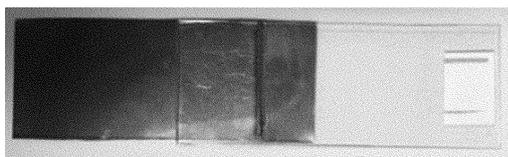


Fig. 2 Diagram of sample connection

## 2 连接工艺参量建模与优化

### 2.1 工艺参量的筛选

影响连接接头质量的工艺参量有激光连接功率  $T_1$ 、激光连接速率  $T_2$ 、离焦量  $T_3$ 、表面处理功率  $T_4$ 、表面处理扫描速率  $T_5$ 、表面处理扫描次数  $T_6$ 、氧等离子体处理时间  $T_7$ 。如果进行响应曲面优化就至少需要 152 次实验,这种方式效率极低,因此在进行工艺优化之前先做筛选实验是很有意义的。

参量实验设计对每个因素取低、中、高 3 个水平。7 个变量之间是互不影响的,表 1 所示是各变量的变化范围。

Table1 Primary process parameters and their ranges

design variables	variable code	initial value	minimum	maximum
laser bonding power/W	$T_1$	5	4	6
laser bonding speed/(mm · s <sup>-1</sup> )	$T_2$	2	1	3
focal shift/mm	$T_3$	0	-1	1
laser sweep power/W	$T_4$	5	4	6
scanning speed/(mm · s <sup>-1</sup> )	$T_5$	2	1	3
scanning frequency $n$	$T_6$	6	4	8
processing time/s	$T_7$	120	90	150

进行 22 次采样实验后,各个变量都会有响应值,输入的各参量和响应值可以通过下式建立回归模型:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_i x_i^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中, $y$  代表响应值, $x_i (i = 1, 2, \dots, k)$  是设计变量, $\beta_0$ ,  $\beta_i (i = 1, 2, \dots, k)$  和  $\beta_{ij} (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, k)$  是

建立的回归模型的系数,然后对(2)式求微分得:

$$y = \sum (\beta_i dx_i) + \sum (2\beta_i x_i dx_i) + \sum (\beta_{ij} x_j dx_i) \quad (3)$$

通过上式可得出  $x_i$  对响应值  $y$  的 1 阶线性主效应:

$$S_{x_i} = \beta_i dx_i \quad (4)$$

2 阶项的主效应为:

$$S_{x_i^2} = 2\beta_i x_i dx_i \quad (5)$$

因为各变量的取值区间不相同,故需要进行归一化处理,然后采用最小二乘法拟合得到模型系数  $S_{x_i}$ ,通过下式可以计算出各变量的贡献率, $N_{x_i}$  可以反映各设计变量对连接强度的影响值:

$$N_{x_i} = \frac{100S_{x_i}}{\sum |S_{x_i}|} \quad (6)$$

各设计变量的 Pareto 图如图 3 所示,通过该图可以直接观察得出各设计变量的影响力大小。

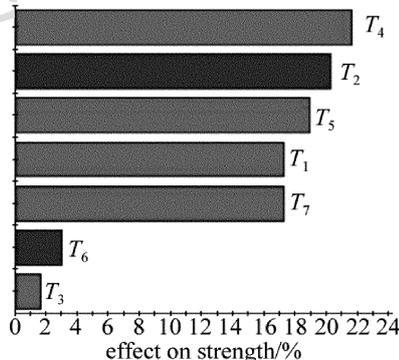


Fig. 3 Pareto diagram of the response of welding parameters to welding strength

通过图 3 中的结果可以得出, $T_3$ ,  $T_6$  这 2 个变量对连接强度的影响较小。因此可以去除这 2 个变量,并得出影响因素相对较大的 5 个实验参量中,其对连接强度的贡献率排序为:表面处理功率 > 激光连接速率 > 表面扫描速率 > 激光连接功率 > 氧等离子体处理时间。以剩余的 5 个设计变量进行下一轮的实验参量优化设计。

### 2.2 实验设计

实验中采用的设计方法是中心复合设计,共 5 个因素,每个因素有 3 个水平。单因素实验可以确定出各影响因素对连接强度的影响规律和大致的工艺参量范围,以此工艺参量范围作为优化设计变量的取值范围。表 2 为工艺参量的范围。

通过在 Design-Expert 中设置表 2 的参量范围可以得到实验设计矩阵,共进行 50 组工艺参量交互式实验,

Table 2 Process parameters and their limits

parameters	limits		
	-1	0	+1
laser bonding power/W	4	5	6
laser bonding speed/(mm · s <sup>-1</sup> )	1	2	3
laser sweep power/W	4	5	6
scanning speed/(mm · s <sup>-1</sup> )	1	2	3
processing time/s	90	120	150

并通过拉伸机测试出相应的连接强度,获得响应值。

响应变量  $y$  和自变量  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  之间的函数逼近式为:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (7)$$

式中,  $y$  代表响应,  $x$  代表变量,  $\varepsilon$  代表系统误差,  $k$  表示取样个数。

2 阶无偏差响应曲面模型为:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

式中,  $\beta_0$  为常数,  $\beta_i$  为线性系数,  $\beta_{ii}$  表示平方项系数,  $\beta_{ij}$  表示交互项系数。其中  $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, k$ 。

### 2.3 数学模型建立

$A, B, C, D, E$  分别代表激光连接功率、激光连接速率、表面处理功率、表面扫描速率、氧等离子体处理时间,通过方差分析 (analysis of variance, ANOVA), 如表 3 所示, 得出  $F$  值为 115.19; 按实验设计理论<sup>[18]</sup>,  $P$  值能够反映出所建立的模型是否可靠, 如果  $P \leq 0.05$  则认为在可接受的误差范围内, 本文中  $P < 0.0001$  显示该模型拟合效果显著。该模型的拟合度为 0.9876, 预测拟合系数值为 0.9690, 修正拟合系数值为 0.9790, 两个数值基本相等。信噪比的值为 25.094, 该值大于 4 则说明该模型对于响应的预测满意<sup>[19]</sup>, 表明模型在使用的工艺范围内可以对响应进行很好的预测。以上分析说明, 通过响应曲面方法建立的数学模型是有意义的。

Table 3 Table of variance analysis for joint with model

source	sum of squares	degree freedom	mean square	$F$ value	probability $> f$	
model	213.46	20	10.67	115.19	<0.0001	significant
$A$	0.022	1	0.022	0.23	0.6316	
$B$	0.19	1	0.19	2.05	0.1631	
$C$	0.058	1	0.058	0.62	0.436	
$D$	$5.77 \times 10^{-4}$	1	$5.77 \times 10^{-4}$	$6.22 \times 10^{-3}$	0.9377	
$E$	$9.86 \times 10^{-3}$	1	$9.86 \times 10^{-3}$	0.11	0.7466	
$AB$	0.038	1	0.038	0.41	0.528	
$AC$	$1.51 \times 10^{-3}$	1	$1.51 \times 10^{-3}$	0.016	0.8992	
$AD$	$8.00 \times 10^{-4}$	1	$8.00 \times 10^{-4}$	$8.63 \times 10^{-3}$	0.9266	
$AE$	0.02	1	0.02	0.22	0.6457	
$BC$	0.014	1	0.014	0.15	0.7043	
$BD$	$1.80 \times 10^{-3}$	1	$1.80 \times 10^{-3}$	0.019	0.8901	
$BE$	$3.20 \times 10^{-3}$	1	$3.20 \times 10^{-3}$	0.035	0.8539	
$CD$	$5.00 \times 10^{-3}$	1	$5.00 \times 10^{-3}$	$5.40 \times 10^{-4}$	0.9816	
$CE$	$3.20 \times 10^{-3}$	1	$3.20 \times 10^{-3}$	0.035	0.8539	
$DE$	$4.51 \times 10^{-3}$	1	$4.51 \times 10^{-3}$	0.049	0.8269	
$A^2$	6.15	1	6.15	66.37	<0.0001	
$B^2$	0.31	1	0.31	3.4	0.0755	
$C^2$	2.55	1	2.55	27.55	<0.0001	
$D^2$	0.41	1	0.41	4.42	0.0444	
$E^2$	4.90	1	4.9	52.87	<0.0001	
residual	2.69	29	0.093			
lack of fit	2.40	22	0.11	2.71	0.0895	not significant
pure error	0.28	7	0.04			
corrected total	216.15	49				

stand deviation: 0.3	$R^2 = 0.9876$
mean: 3.01	adjusted $R^2 = 0.979$
coefficient of variation: 10.11	predicted $R^2 = 0.969$
predicted residual of sum of squares: 6.7	adequate precision: 25.094

使用 Design-Expert 分析实验结果,建立 5 个工艺参量与连接强度  $S$  之间的编码方程,表达式如下:

$$S = 6.25 - 0.025A - 0.075B - 0.041C - 4.118 \times 10^{-3}D - 0.017E + 0.034AB - 6.875 \times 10^{-3}AC - 5.000 \times 10^{-3}AD - 0.025AE - 0.021BC - 7.500 \times 10^{-3}BD + 0.010BE - 1.250 \times 10^{-3}CD + 0.010CE + 0.012DE - 1.58A^2 - 0.36B^2 - 1.02C^2 - 0.41D^2 - 1.41E^2 \quad (9)$$

### 2.4 工艺参量对连接强度影响分析

图 4 显示出中心点处各个工艺参量对连接强度影响的变化趋势。图中  $A, B, C, D, E$  曲线分别代表激光连接功率、激光连接速率、表面处理功率、表面扫描速率、氧等离子体处理时间的影响。随着各个工艺参量的增大,连接强度都是先增大后减小。

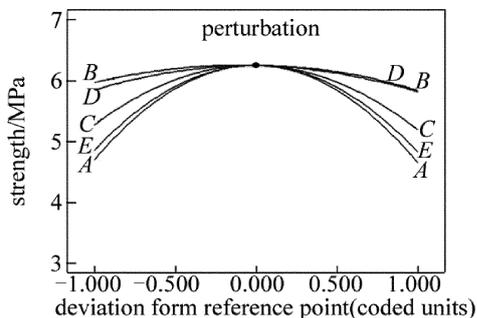


Fig. 4 Relationship between the effect of process parameters and joint strength

图 5 是表面处理功率和表面扫描速率对连接强度的交互式影响趋势。当表面处理功率为 4W ~ 5W 和表面扫描速率为 1mm/s ~ 2mm/s 时,随着表面处理功率和表面扫描速率的增加,连接强度不断提高;当表面处理功率为 5W ~ 6W 和表面扫描速率为 2mm/s ~ 3mm/s 时,随着表面处理功率和表面扫描速率的增加,连接强度逐渐降低。当表面扫描速率低于 2mm/s 时,随着表面处理功率的提高,纯钛表面逐渐形成钛氧化物层和氧扩散层<sup>[13]</sup>,此时钛氧化物层与基体结合较强<sup>[20]</sup>,聚苯乙烯表面的含氧官能团与钛氧化物层发生反应<sup>[17]</sup>,连接强度得到提高;当表面处理功率大于 5W 时,钛氧化膜出现裂纹,甚至从基体脱落,因此连接强度逐渐降低。当表面扫描速率大于 2mm/s 时,由于表面扫描速率较快,钛金属表面吸收能量不足,导致氧化不充分,因此连接强度不高。

图 6 是表面扫描速率和氧等离子体处理时间对连接强度的交互式影响趋势。当表面扫描速率为 1mm/s ~ 2mm/s 和氧等离子体处理时间为 90s ~ 120s 时,随着表面扫描速率和氧等离子体处理时间的增加,连接

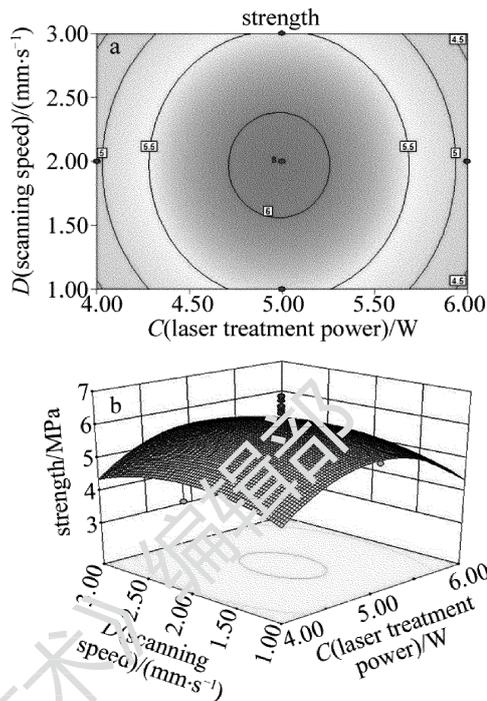


Fig. 5 Interactive effects of laser treatment power and surface scanning speed on welding strength  
a—contours plot b—response surface plot

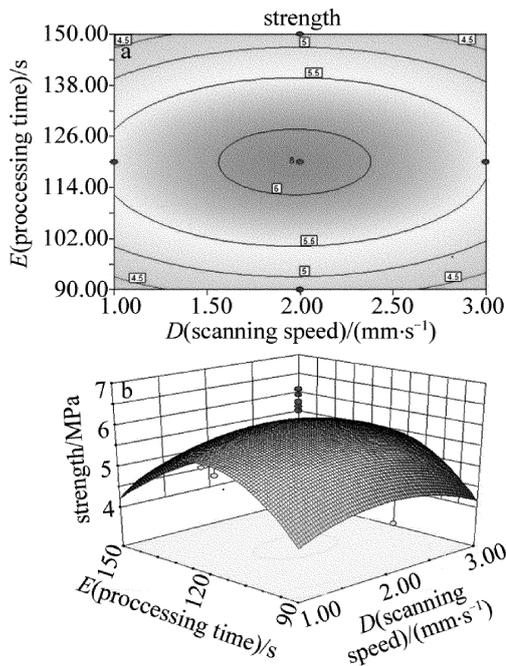


Fig. 6 Interactive effects of scanning speed and processing time on welding strength  
a—contours plot b—response surface plot

强度不断提高;当表面扫描速率为 2mm/s ~ 3mm/s 和氧等离子体处理时间为 120s ~ 150s 时,随着表面扫描速率和氧等离子体处理时间的增加,连接强度逐渐降低。当表面扫描速率低于 2mm/s 时,随着氧等离子体处理时间的增加,聚苯乙烯表面生成了官能团,表面能

提高<sup>[15]</sup>, 聚苯乙烯表面生成了官能团, 表面能提高, 能够与钛表面氧化膜形成更强的连接接头。当氧等离子体处理时间大于 120s 时, 由于过量改性处理导致表面材料降解, 从而连接强度降低。

图 7 是激光连接功率和表面处理功率对连接强度的交互式影响趋势。当激光连接功率为 4W ~ 5W 和表面处理功率为 4W ~ 5W 时, 随着激光连接功率和表面处理功率的增加, 连接强度不断提高; 当激光连接功率为 5W ~ 6W 和表面处理功率为 5W ~ 6W 时, 随着激光连接功率和表面处理功率的增加, 连接强度逐渐降低。当连接功率低于 5W 时, 随着表面处理功率的不断增加, 钛表面氧化膜逐渐增加, 聚苯乙烯的含氧官能团与氧化膜得到充分反应, 因此连接质量得到提高。而当连接功率高于 5W 时, 材料吸收了较多的能量, 产生烧蚀现象, 连接质量较差。

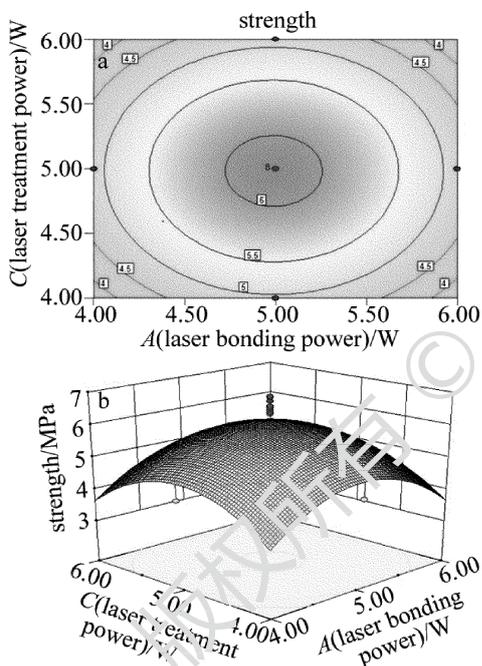


Fig. 7 Interactive effects of laser bonding power and laser treatment power on welding strength  
a—contours plot b—response surface plot

图 8 是激光连接功率和表面扫描速率对连接强度的交互式影响趋势。当激光连接功率为 4W ~ 5W 和表面扫描速率为 1mm/s ~ 2mm/s 时, 随着激光连接功率和表面扫描速率的增加, 连接强度不断提高; 当激光连接功率为 5W ~ 6W 和表面扫描速率为 2mm/s ~ 3mm/s 时, 随着激光连接功率和表面扫描速率的增加, 连接强度逐渐降低。当表面扫描速率低于 2mm/s 时, 钛金属表面得到氧化, 生成一定厚度的氧化膜, 在激光连接功率提高时, 聚苯乙烯受热材料充分融化, 连

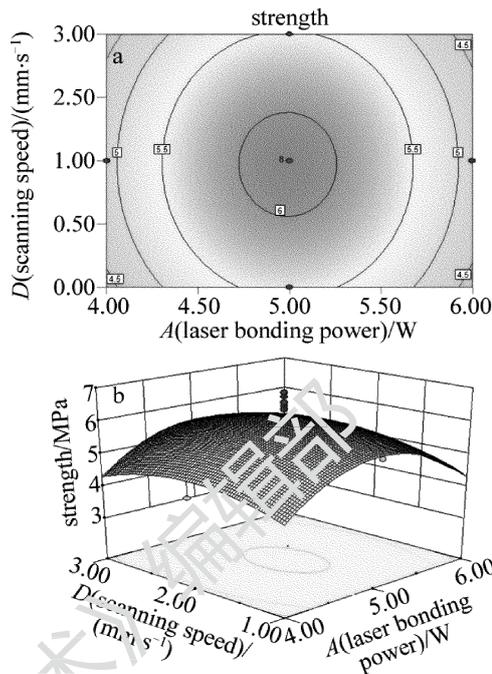


Fig. 8 Interactive effects of laser bonding power and scanning speed on welding strength  
a—contours plot b—response surface plot

接质量较好。当表面扫描速率高于 2mm/s 时, 由于速率过快, 钛金属表面不能充分氧化, 因此连接强度较低。

图 9 是激光连接速率和表面扫描速率对连接强度

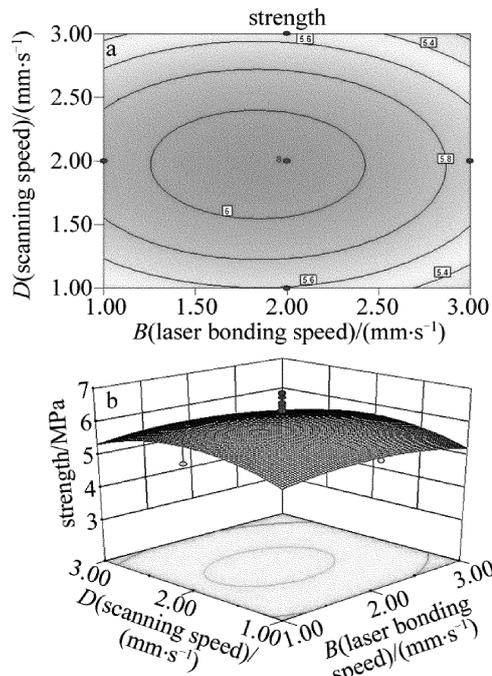


Fig. 9 Interactive effects of laser bonding speed and scanning speed on welding strength  
a—contours plot b—response surface plot

的交互式影响趋势。当激光连接速率为 1mm/s ~ 2mm/s 和表面扫描速率为 1mm/s ~ 2mm/s 时,随着激光连接速率和表面扫描速率的增加,连接强度不断提高;当激光连接速率为 2mm/s ~ 3mm/s 和表面扫描速率为 2mm/s ~ 3mm/s 时,当激光连接功率和表面扫描速率逐渐增加时,连接强度逐渐降低。在较低的激光连接速率和表面扫描速率下,材料受热充分,连接质量较好。

### 2.5 模型验证

图 10 为连接强度的预测值与实际实验值对比。从图中可以看出,所测得的数据与建立的模型预测的数据误差不大<sup>[21]</sup>。表 4 为实验值与预测值的对比。3 组实际实验值与预测值的误差都在 8% 以内,表明所建立的数学模型与实际符合。

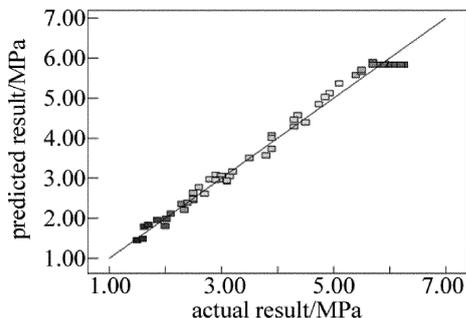


Fig. 10 Comparison of the predicted result and the actual experimental results

Table 4 Verification of mathematical model

A/W	B/ (mm · s <sup>-1</sup> )	C/W	D/ (mm · s <sup>-1</sup> )	E/s	strength/MPa		
					actual	predicted	error
4.5	1	5	2	90	2.02	3.25	5.5%
5	2	5.5	1	120	4.46	4.68	4.9%
5.5	3	6	2	150	3.78	3.98	5.2%

### 2.6 工艺参数优化

通过响应曲面法(response surface methodology, RSM)采用不考虑其它因素获得最大连接强度的优化准则,得出最优工艺参数为:激光连接功率为 4.99W,激光连接速率为 1.89mm/s,表面处理功率为 4.98W,表面扫描速率为 1.99mm/s,氧等离子体处理时间为 119.79s,连接强度为 6.26MPa。通过实验来验证优化准则所对应的优化结果,实验测得的强度为 6.21MPa,得出实际值与预测值较为吻合。

## 3 结论

本文中研究了氧等离子体处理后的 PS 与经激光表面处理的薄钛进行激光透射连接,建立了激光透射

连接工艺参数的数学模型,分析工艺参数对连接强度的交互式影响,得到优化工艺参数。

(1) 针对 PS 与钛难以实现激光透射连接问题,提出了氧等离子体处理 PS 和激光表面处理薄钛从而实现激光透射连接的新方法,该方法使连接强度提高到 6.0MPa 以上,氧等离子体改性后的 PS 表面生成了大量含氧官能团,Ti 经过激光扫描处理后表面生成氧化膜,处理后的 PS 与 Ti 的润湿性变好,有利于连接强度的提高。

(2) 对连接工艺影响相对较大的有 5 个实验参数,其对连接强度的贡献率排序为:表面处理功率 > 激光连接速率 > 表面扫描速率 > 激光连接功率 > 氧等离子体处理时间。激光连接功率和激光连接速率的交互式影响最大。

(3) 中心复合法设计建立的数学模型能够很好地预测实验结果,采用不考虑其它因素获得最大连接强度的优化准则得出最优工艺参数为:激光连接功率为 4.99W,激光连接速率为 1.89mm/s,表面处理功率为 4.98W,表面扫描速率为 1.99mm/s,氧等离子体处理时间为 119.79s,连接强度为 6.26MPa。

### 参 考 文 献

- [1] WANG Q, JIAO J K, WANG F Y, *et al.* Finite element analysis of CFRP and stainless steel laser welding[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(6):853-859 (in Chinese).
- [2] WANG X, LI P, XU Z, *et al.* Laser transmission joint between PET and titanium for biomedical application[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(13):1767-1771.
- [3] LIU W, MENG D D, FAN C L, *et al.* Research of optical properties of nylon 66 in laser transmission welding[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5):716-721 (in Chinese).
- [4] AHSAN M, TASLEMA S, GREG A, *et al.* Bonding mechanisms of laser-fabricated titanium/polyimide and titanium coated glass/polyimide microjoints[J]. *Surface & Interface Analysis*, 2010, 39(6):506-511.
- [5] WANG X, SONG X, JIANG M, *et al.* Modeling and optimization of laser transmission joining process between PET and 316L stainless steel using response surface methodology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(3):656-663.
- [6] GEORGIEV G L, BAIRD R J, MCCULLEN E F, *et al.* Chemical bond formation during laser bonding of Teflon® FEP. FEP and titanium[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(15):7078-7083.
- [7] LI P, LIU H X, XU Zh K, *et al.* Laser transmission joining process of PET films and titanium[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7):1914-1920 (in Chinese).
- [8] WANG X, LI P, LIU H X, *et al.* Temperature field simulation on laser transmission joining PET films and titanium[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5):1391-1397 (in Chinese).
- [9] ROESNER A, SCHEIK S, OLOWINSKY A, *et al.* Laser assisted joining of plastic metal hybrids[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1):

- 370-377.
- [10] BERGMANN J P, STAMBKE M. Potential of laser-manufactured polymer-metal hybrid Joints[J]. *Physics Procedia*, 2012, 39(9): 84-91.
- [11] YUSOF F, YUKIO M, YOSHIHARU M, *et al.* Effect of anodizing on pulsed Nd:YAG laser joining of polyethylene terephthalate (PET) and aluminium alloy (A5052)[J]. *Materials & Design*, 2012, 37: 410-415.
- [12] ARAI S, KAWAHITO Y, KATAYAMA S. Effect of surface modification on laser direct joining of cyclic olefin polymer and stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2014, 59(7):448-453.
- [13] ZHANG K, LUO G X, CHEN G N. Study of laser oxidizing for titanium hardening[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2005, 30(3):8-10 (in Chinese).
- [14] MESCHEDER U M, ALAVI M, HILTMANN K, *et al.* Local laser bonding for low temperature budget[J]. *Sensors & Actuators Physical*, 2002, 97/98(1):422-427.
- [15] ZHANG R F, YU Y L, LIU X Sh, *et al.* Study on plasma treated polystyrene surface structure by XPS[J]. *Macro-molecule Journal*, 1990, 1(2):1-10(in Chinese).
- [16] LIU X. Study on process and performance of glass to stainless steel/titanium alloy with laser welding[D]. Suzhou: Soochow University, 2015;15(in Chinese).
- [17] TAN X H, SHAN J G, REN J L. Effects of Cr plating layer on shear strength and interface bonding characteristics of mild steel/CFRP joint by laser heating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(6): 751-756.
- [18] MONTGOMERY D C. Design and analysis of experiments[M]. 6th ed. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 2009: 51-52(in Chinese).
- [19] 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(10): 978-985.
- [20] YANG Ch, WANG L, PENG X W. Surface oxygen diffusion hardening technology of titanium and titanium alloy[J]. *Modern Machinery*, 2013(2):74-75(in Chinese).
- [21] LIU B G, WANG X, LIU W, *et al.* Process optimization of laser transmission spot welding using material pmma for automotive industry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5):503004(in Chinese).