

基于响应曲面法的激光透射连接硅与玻璃的工艺研究

薛国春 刘会霞 李 品 蒋 涛 高阳阳 严 长 王 霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 采用 Nd:YAG 脉冲激光器对硅与玻璃进行激光透射连接实验。阐述了激光透射连接硅与玻璃的连接机理。采用旋转中心复合设计进行实验规划,使用响应曲面法(RSM)建立了激光透射连接工艺参数与剪切强度、熔池宽度的数学模型,进行了方差分析、实验模型的验证,讨论了激光透射连接工艺参数对剪切强度、熔池宽度的交互影响趋势,运用满意度函数对工艺参数进行优化,并对优化结果进行验证。结果表明,所建立的模型能够较好地反映各响应与工艺参数之间的关系,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具有很好的指导意义。

关键词 激光技术;激光透射连接;响应曲面法;硅;玻璃;工艺参数优化

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0303004

Process Study on Laser Transmission Bonding of Silicon with Glass via Response Surface Methodology

Xue Guochun Liu Huixia Li Pin Jiang Tao Gao Yangyang Yan Zhang Wang Xiao

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

Abstract A study on transmission laser bonding of silicon with glass by Nd:YAG pulse laser is conducted. The mechanism of transmission laser bonding of silicon with glass is expounded. Combined with a central composite rotatable experimental design, response surface methodology (RSM) is employed to establish mathematical models of relationships among various welding process parameters and lap-shear strength as well as bond width. Then the analysis of variance is checked and these mathematical models are validated. Effects of different bonding parameters on lap-shear strength and bond width are discussed. Based on this, desirability function is introduced to optimize the parameters of the bonding process and the result of optimal experiments is verified. The results obtained indicate that the developed mathematical models can be used to show the relationship between responses and parameters. Predicted results of parameters optimization developed by desirability function are consistent with experimental results. Therefore, this study provides an effective direction to enhance the bond quality and minimize the bond cost.

Key words laser technique; transmission laser bonding; response surface methodology; silicon; glass; optimization of process parameters

OCIS codes 140.3538; 160.2750; 160.6000; 350.3390

1 引 言

硅与玻璃是微机电制造系统(MEMS)技术中应用最广泛的组合材料,二者间的局部连接和封装成本占 MEMS 装置总制造费用的比例高达 70%^[1],在 MEMS 制造过程中占据十分重要的地

位^[2]。硅与玻璃连接的传统方法主要包括:阳极键合、热键合与共溶键合。这些连接方法存在诸多缺陷:阳极键合对外界环境要求比较高,需要强电场(400~1500 V)和较高的温度(200~500 °C)^[3]。此外,在接合过程中,玻璃中碱性离子的移动会损坏内

收稿日期: 2012-09-24; 收到修改稿日期: 2012-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)和江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201105)资助课题。

作者简介: 薛国春(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: xuegc321@163.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,博士,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn(通信联系人)

部电路,既影响元件的性能,又导致装置尺寸与复杂性的增加;热键合过程需要在高温(800 °C~1100 °C)^[4]下操作较长时间(5~24 h)^[5,6],电路易损伤;采用共溶键合时,由于接合过程中有较高的能量输入,粘结剂易变形,难以保证封装的精确性。此外,粘结剂化学稳定性差制约了其在生物医学传感器中的广泛应用^[7]。为了克服这些缺点,研发了低温接合硅与玻璃的新技术——激光透射连接技术,与传统连接方法相比,该技术对工作环境要求低,在连接过程中使用无碱玻璃,不使用粘结剂,能够进行局部连接与整体封装,具有很高的加工柔性。此外,利用激光透射连接硅与玻璃接头宽度小,能够满足MEMS系统小型化的需求。目前有关激光透射连接硅与玻璃的研究主要集中在以下几个方面:不同种类激光器^[8]、不同中间层材料^[9~11]进行硅与玻璃连接的可行性研究;分析连接特性、探讨连接作用机理^[12~14];建立连接过程热效应的数学模型^[15];以及运用建立的有限元模型对连接温度场进行数值模拟^[16]等。有关单工艺参数对激光透射连接硅与玻璃连接质量的影响^[17]也有一些报道,但是有关多因素对连接质量的交互影响还缺乏充分的分析,尚不能对工艺参数进行合理的优化。因此,迫切需要根据硅与玻璃连接质量对连接过程工艺参数进行优化。

本文采用响应曲面法(RSM)对1 mm厚高硼硅玻璃与0.525 mm厚单晶硅片进行激光透射连接工艺参数研究。建立可以预测剪切强度和熔池宽度的

数学模型,研究工艺参数(电压、频率、离焦量、扫描速度)对剪切强度和熔池宽度的交互影响,优化工艺参数,提高连接质量,满足实际生产需求。

2 方 法

响应曲面法是数学方法和统计方法结合的产物^[18],可用于建立激光透射连接过程工艺参数和连接质量之间的关系模型,进而分析工艺参数对连接质量的交互影响。

满意度函数即通过数学转化的方法,将多响应问题转变为单个响应的问题^[18]。本实验在利用响应曲面法建立起来的剪切强度和熔池宽度的数学模型的基础上,利用满意度函数对激光透射连接硅与玻璃的工艺参数进行优化。

3 实 验

3.1 材料和实验装置

实验材料为10 mm×20 mm硅与高硼硅玻璃3.3,硅的厚度为(525±10) μm,高硼硅玻璃的厚度为(1000±20) μm。激光透射连接与阳极氧化技术类似,对零件表面质量要求较高^[2]。硅片选用半导体清洗剂(RCA)进行清洗,依次使用RCA1溶液和去离子水对玻璃进行清洗^[1]。硅与高硼硅玻璃3.3的光学特性^[1,19]分别如图1(a)、(b)所示。实验使用波长为1064 nm的Nd:YAG脉冲激光器,图2为实验原理图,其中夹紧力为0.5 MPa。

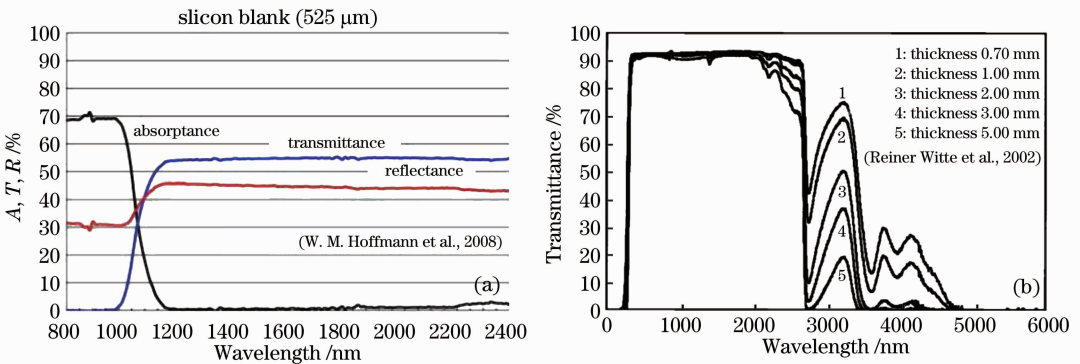


图1 硅与高硼硅玻璃3.3的光学特性。(a)硅的吸收率、透射率及反射率图;(b)玻璃的透射率图

Fig. 1 Optical properties of silicon and high borosilicate glass 3.3. (a) Absorbance (A), transmittance (T) and reflectance (R) spectra of silicon; (b) transmittance spectra of high borosilicate glass

3.2 实验设计

实验是基于4个因素在5种水平全响应的旋转中心复合设计^[18]。选取了4个独立的激光透射连接的输入变量:电压、频率、离焦量、扫描速度。在单因素范围的界定过程中,实验采取了对分法,即中点

取点法,各工艺参数的取值范围,如表1所示。利用统计学软件 Design-Expert V7.1 建立了工艺参数组合表,如表2所示。

3.3 实验结果

采用德国蔡司生产的AxioCamERc5s型体视

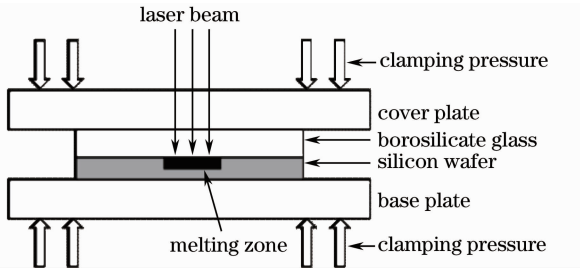


图2 实验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment

显微镜测量连接试样的熔池宽度,图 3(a)、(b)分别表示硅与玻璃连接区域的宏观、微观形貌及熔池宽度。

使用 UTM4140 微机控制电子万能试验机进行拉伸试验。图 4(a)、(b)分别为连接件在拉伸试验前后的宏观图。剪切强度与熔池宽度的实验结果如表 2 所示。剪切强度的计算公式可表示为

$$p = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{W \times L}, \quad (1)$$

式中 p 为剪切强度, F_{\max} 为极限力, S 为接头面积, W 为熔池宽度, L 为连接长度。

表1 实验参数范围

Table 1 Process control parameters and limits

Parameters	Units	Notations	Limits				
			-2	-1	0	+1	+2
Voltage	V	A	440.00	450.00	460.00	470.00	480.00
Frequency	Hz	B	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
Stand-off distance	mm	C	-5.75	-1.96	1.83	5.61	9.40
Scanning speed	mm/min	D	10.00	95.00	180.00	265.00	350.00

表2 实验设计数据与结果表

Table 2 Design matrix and measured experimental responses

No.	Parameter level				Output	
	A / V	B / Hz	C / mm	D / (mm/min)	Lap-shear strength / MPa	Bond width / μm
1	470	40	5.61	265	2.74	570.16
2	460	30	1.83	350	4.50	592.59
3	450	20	-1.96	265	3.95	655.80
4	470	20	5.61	95	4.39	579.82
5	470	40	-1.96	95	5.81	573.31
6	460	30	1.83	180	4.01	650.34
7	470	40	-1.96	265	4.74	736.72
8	450	40	5.61	265	3.56	612.21
9	460	50	1.83	180	4.30	518.35
10	450	20	5.61	265	4.50	667.53
11	480	30	1.83	180	5.35	730.14
12	460	30	9.40	180	3.53	737.15
13	460	30	1.83	180	4.04	632.16
14	470	20	5.61	265	3.22	730.61
15	460	30	1.83	10	4.45	652.35
16	470	40	5.61	95	4.37	545.36
17	450	40	5.61	95	3.37	730.14
18	450	20	5.61	95	4.84	703.10
19	460	30	-5.75	180	3.41	780.39
20	450	20	-1.96	95	1.75	658.05
21	460	10	1.83	180	2.20	587.10
22	470	20	-1.96	265	2.55	789.64
23	450	40	-1.96	265	5.06	647.11
24	460	30	1.83	180	4.10	605.38
25	460	30	1.83	180	4.24	609.64
26	450	40	-1.96	95	3.57	662.79
27	460	30	1.83	180	4.05	658.04
28	460	30	1.83	180	4.22	630.12
29	440	30	1.83	180	4.70	648.89
30	470	20	-1.96	95	2.41	735.55

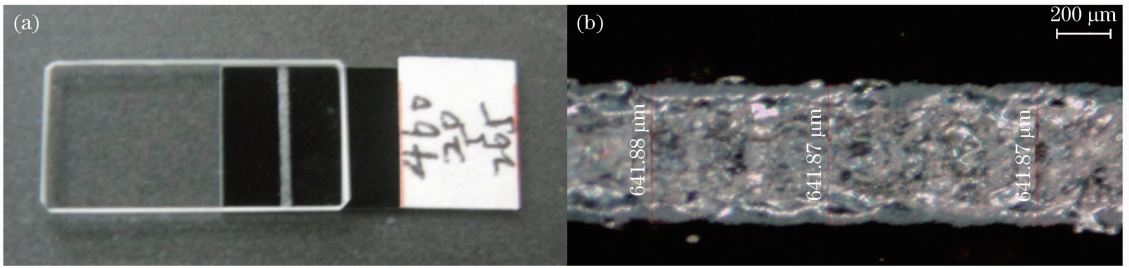


图 3 硅与玻璃连接件形貌图。(a)宏观形貌;(b)微观形貌

Fig. 3 Silicon/glass bonded sample morphology. (a) Macrograph; (b) micrograph

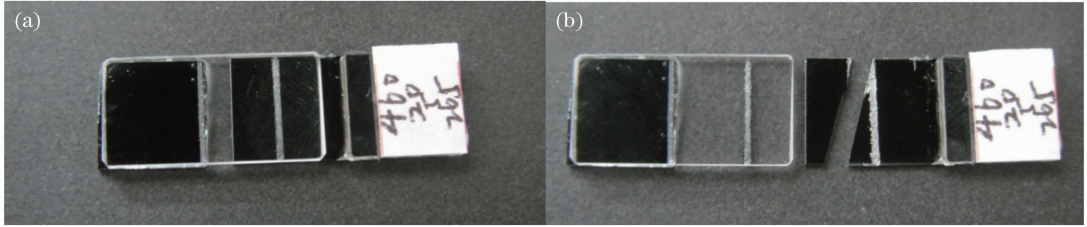


图 4 硅与玻璃连接件在拉伸实验中的宏观图。(a)拉伸前;(b)拉伸后

Fig. 4 Macrograph of the silicon/glass bonded sample in lap joint geometry. (a) Before lap-shear testing; (b) after lap-shear testing

3.4 激光透射连接硅与玻璃的连接机理

激光透射连接硅与玻璃的连接机理包括 Si-O 键的形成及材料的熔融两个过程。高硼硅玻璃 3.3 主要由 80.4% (质量分数,下同)的 SiO₂, 12.7%的 B₂O₃, 2.4%的 Al₂O₃, 4.2%的 Na₂O 与 K₂O 组成。硅与玻璃激光透射连接过程中原子的扩散情况以及化学键的形成已被 Park 等^[17]所证实,使用电子能谱仪(AES)分析表明硅受激光辐射使得界面处的温

度上升到硅的熔点,导致硅原子、氧原子的扩散;使用 X 射线光电子能谱(XPS)分析表明温度的升高导致玻璃中的氧化物向接合面处扩散,其中氧原子与硅原子在玻璃与硅的接合面处形成 Si-O 键,而且,在一定范围内硅吸收的能量越高,温度越高,可以导致更多的原子扩散(即材料的熔融),形成更多的 Si-O 键,获得更为明显的连接形貌,从而增加剪切强度。

表 3 剪切强度的方差分析

Table 3 ANOVA for the lap-shear strength model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	P-value	
Model	23.53484	11	2.139531	17.98539	<0.0001	Significant
A	0.036981	1	0.036981	0.310871	0.5840	
B	3.998542	1	3.998542	33.61266	<0.0001	
C	0.076541	1	0.076541	0.643418	0.4329	
D	0.000128	1	0.000128	0.001074	0.9742	
AB	1.363013	1	1.363013	11.4578	0.0033	
AD	3.387322	1	3.387322	28.4746	<0.0001	
BC	8.302326	1	8.302326	69.79125	<0.0001	
CD	1.959779	1	1.959779	16.47435	0.0007	
A ²	0.890373	1	0.890373	7.484678	0.0136	
B ²	1.976368	1	1.976368	16.6138	0.0007	
C ²	1.240587	1	1.240587	10.42866	0.0047	
Residual	2.141269	18	0.118959			
Lack of fit	2.09	13	0.16	16.52	0.0618	Not significant
Pure error	0.048728	5	0.009746			
Cor total	25.67611	29				
R ² = 0.916				Pred R ² = 0.7052		
Adj R ² = 0.8656				Adeq precision: 15.077		

4 结果与讨论

4.1 数学模型

4.1.1 剪切强度的数学模型与方差分析(ANOVA)

根据方差分析表 3 所示,剪切强度模型遵循的 F 分布的检验统计量的值为 17.99。剪切强度模型的 p 值小于 0.001(p 值小于 0.05 表示该模型显著)。失拟值为 0.0618。拟合度 R^2 为 0.9166,表明该模型只有 8.34% 的总变异无法解释。Adep precision 为 15.077(表示模型的信噪比,其值大于 4 表示建立的模型是满意的^[20])。预测拟合系数 $\text{Pred. } R^2 = 0.7052$ 也与修正拟合系数 $\text{Adj. } R^2 = 0.8656$ 基本吻合。这些数值表明该模型符合要求。以下为 Design Expert 软件所确定剪切强度的编码因素与实际因素的最终数学模型:

(a) 编码方程

$$P = 4.17 + 0.039A + 0.41B + 0.056C - 2.307 \times 10^{-3}D + 0.29AB - 0.46AD - 0.72BC - 0.35CD + 0.18A^2 - 0.27B^2 - 0.21C^2, \quad (2)$$

(b) 实际值方程

$$P = 370.0633 - 1.62677A - 1.10767B + 0.83472C + 0.25096D + 2.9187 \times AB - 5.41314 \times 10^{-4}AD - 0.019019BC - 1.08711 \times 10^{-3}CD + 1.78323 \times 10^{-3}A^2 - 2.65678 \times 10^{-3}B^2 - 0.014673C^2. \quad (3)$$

4.1.2 熔池宽度的数学模型与方差分析

方差分析表 4 所示的数值表明建立的熔池宽度模型符合要求。以下为 Design Expert 软件所确定熔池宽度的编码因素与实际因素的最终数学模型:

(a) 编码方程

$$W = 629.88 + 4.04A - 22.91B - 17.35C + 3.84D - 24.24AB - 29.28AC + 37.16AD + 15.96A^2 - 18.24B^2 + 33.28C^2, \quad (4)$$

(b) 实际值方程

$$W = 33759.49482 - 145.63983A + 120.15212B + 342.57091C - 20.06372D - 0.2424AB - 0.77309AC + 0.043715AD + 0.15963A^2 - 0.18235B^2 + 2.31973C^2. \quad (5)$$

表 4 熔池宽度的方差分析

Table 4 ANOVA analysis for the bond width model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	P-value	
Model	116932.4	10	11693.24	10.45953	<0.0001	Significant
A	391.4292	1	391.4292	0.350131	0.5610	
B	12594.94	1	12594.94	11.2661	0.0033	
C	7228.635	1	7228.635	6.465971	0.0199	
D	353.6088	1	353.6088	0.316301	0.5804	
AB	9400.854	1	9400.854	8.409008	0.0092	
AC	13717.73	1	13717.73	12.27043	0.0024	
AD	22091.13	1	22091.13	19.76038	0.0003	
A ²	7134.704	1	7134.704	6.381951	0.0206	
B ²	9310.851	1	9310.851	8.328501	0.0095	
C ²	31005.8	1	31005.8	27.73451	<0.0001	
Residual	21241.06	19	1117.95			
Lack of fit	19021.21	14	1358.66	3.06	0.1115	Not significant
Pure error	2219.849	5	443.9698			
Cor total	138173.5	29				
$R^2 = 0.8463$			$\text{Pred } R^2 = 0.5660$			
$\text{Adj } R^2 = 0.7654$			Adeq precision: 14.253			

4.2 模型的验证

图 5(a)与(b)分别表示剪切强度和熔池宽度的预测值与实验所得实际值之间的关系,实测值与预测值能够很好地吻合。为了验证剪切强度与熔池宽度数学模型的准确性,从实验结果中随机抽取 3 组数据与在该实验条件下数学模型所预测的结果进行对比以及相对误差的计算。验证实验的实际值、预测值以及相对误差如表 5 所示,结果表明所建立的

数学模型能够准确地预测剪切强度和熔池宽度。

4.3 工艺参数对连接质量的影响

4.3.1 剪切强度的影响

图 6 表明了电压和频率对剪切强度的交互作用。从图中可以看出在电压(470~480 V)与频率(30~50 Hz)的剪切强度较高。激光器功率由电压、频率与脉宽共同控制,脉宽为常数(1 ms),此时功率较高,导致更多的材料熔融以及 Si-O 键的形

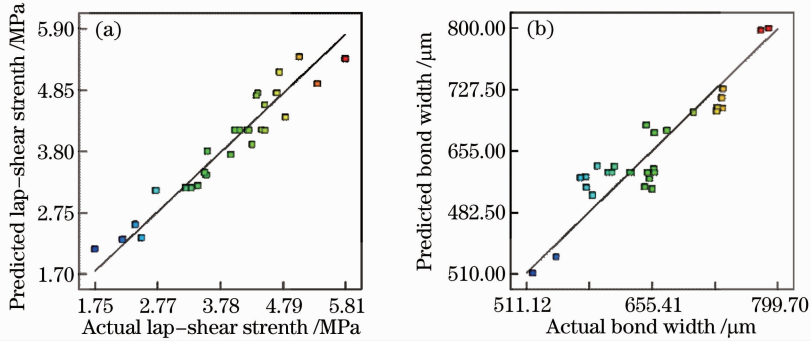


图 5 实验值和预测值对比。(a)剪切强度;(b)熔池宽度

Fig. 5 Plot of the experimental data against the predicted results. (a) Lap-shear strength; (b) bond width

表 5 数学模型验证结果

Table 5 Validation test results of mathematical models

No.	A / V	B / Hz	C / mm	$D / (\text{mm}/\text{min})$	Lap-shear strength / MPa		Bond width / μm
1	460	30	9.40	180	Actual	3.526	737.153
					Predicted	3.437	728.280
					Error	2.52%	1.20%
2	450	40	5.61	95	Actual	3.310	730.140
					Predicted	3.173	703.424
					Error	4.14%	3.66%
3	470	20	-1.96	265	Actual	2.507	789.633
					Predicted	2.318	799.704
					Error	7.54%	1.28%

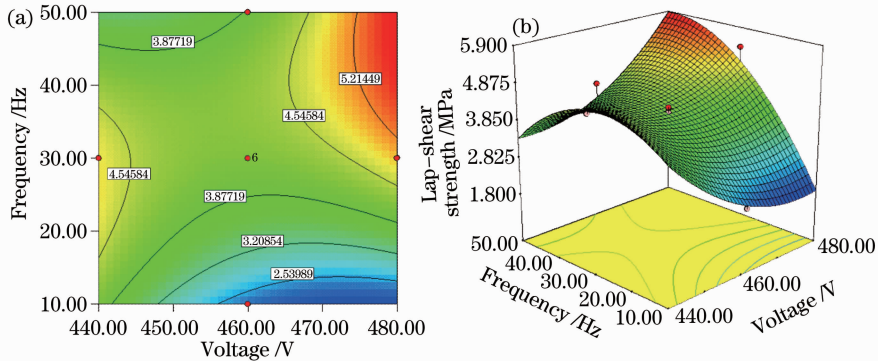


图 6 电压和频率对剪切强度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 6 Effect of voltage and frequency on the lap-shear strength. (a) Contours plot; (b) response surface plot

成,产生较大的熔深提高了剪切强度。从图 7 可以看出电压和扫描速度对剪切强度的交互影响。在电压为 470~480 V 和扫描速度为 10~180 mm/min 时的剪切强度较高,原因同上。在电压 440~450 V 和扫描速度 265~350 mm/min 时的剪切强度也较高,这是由于此时连接件的表面能够形成较为细密的微观形貌,表面成形性好。

图 8 显示了频率和离焦量对剪切强度的交互影响。从图中可以看出,离焦量 -5.75~-1.96 mm 与频率 40~50 Hz 时的剪切强度较高,主要由于离焦量

-5.75~-1.96 mm 为负离焦,按照几何光学理论,当正负离焦量相等时,工件表面的激光功率密度相等,但获得的熔池形状不同,在入焦(负离焦)的情况下可获得更大的熔深^[21]。从图 9 中可以看出离焦量和扫描速度对剪切强度的交互影响。当离焦量为 5.61~9.4 mm 与扫描速度为 10~95 mm/min 时的剪切强度较大,主要是由于扫描速度的降低会增加作用在零件表面上的线能量,硅吸收的能量的增加提高了硅与玻璃之间的剪切强度。

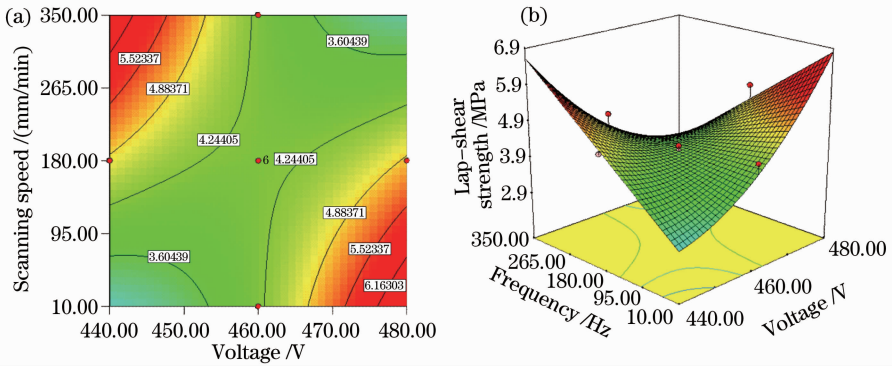


图 7 电压和扫描速度对剪切强度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 7 Effect of voltage and scanning speed on the lap-shear strength. (a) Contours plot; (b) response surface plot

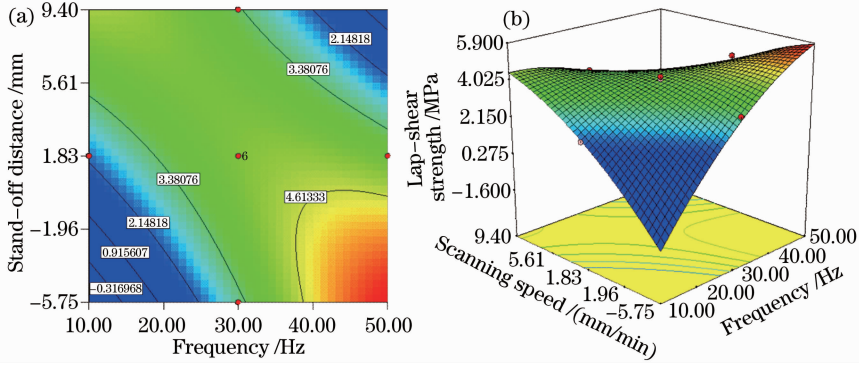


图 8 频率和离焦量对剪切强度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 8 Effect of frequency and stand-off distance on the lap-shear strength. (a) Contours plot; (b) response surface plot

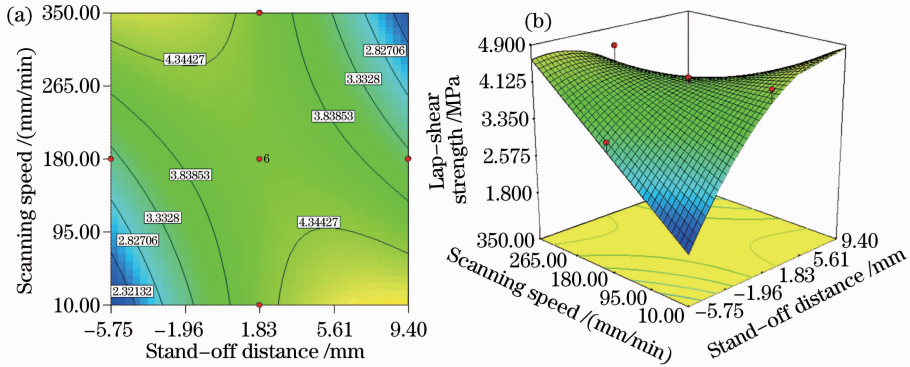


图 9 离焦量和扫描速度对剪切强度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 9 Effect of stand-off distance and scanning speed on the lap-shear strength. (a) Contours plot;

(b) response surface plot

4.3.2 熔池宽度的影响

图 10 表示电压和频率对剪切强度的交互影响:在频率为 10~30 Hz 与电压为 470~480 V 时的熔池宽度较大,这主要是因为此时的功率较大,线能量提高,硅吸收的能量增加,硅表面的熔化区域增加,熔池宽度增加。图 11 表示电压和离焦量对熔池宽度的交互影响:电压为 440~450 V 与离焦量为 5.61~9.40 mm、电压为 460~480 V 与离焦量为 -5.75~-1.96 mm 时的熔池宽度较大,从离焦量与

光斑直径的关系图中可以看出:采用正、负离焦时,激光辐射在硅表面的光斑直径增大,增加熔化区域,熔池宽度增加。图 12 表示电压和扫描速度对熔池宽度的交互影响:电压为 440~450 V 与扫描速度为 10~95 mm/min、电压为 470~480 V 与扫描速度为 265~350 mm/min 时的熔池宽度较高,这主要是因为降低速度和升高电压增加了线能量,使更多的材料熔融,从而宽度增加。

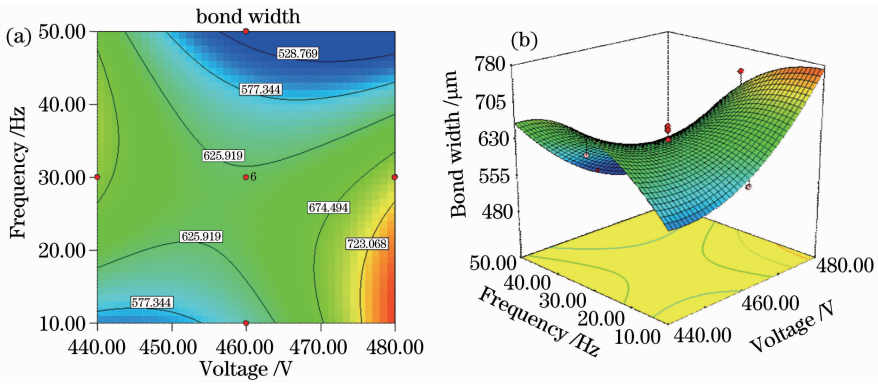


图 10 电压和频率对熔池宽度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 10 Effect of voltage and frequency on bond width. (a) Contours plot; (b) response surface plot

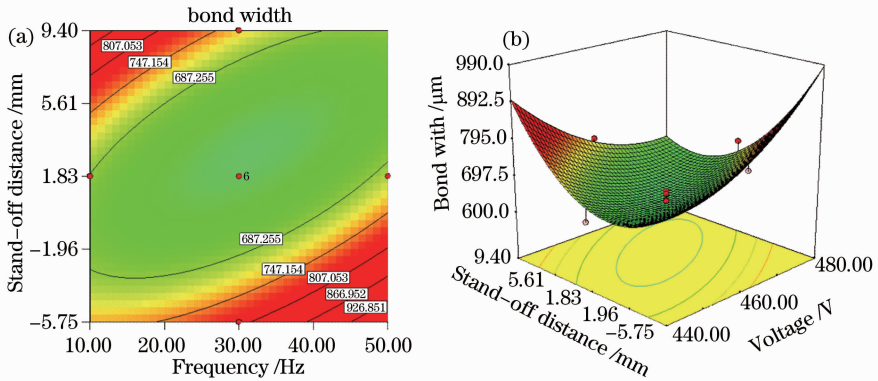


图 11 电压和离焦量对熔池宽度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 11 Effect of voltage and stand-off distance on bond width. (a) Contours plot; (b) response surface plot

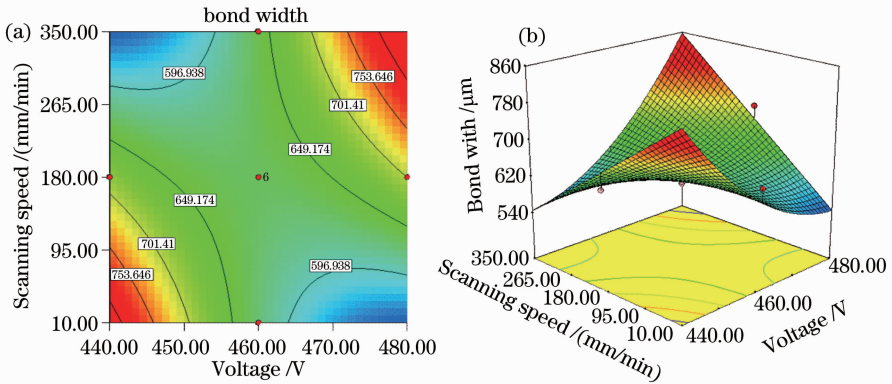


图 12 电压和扫描速度对熔池宽度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面

Fig. 12 Effect of voltage and scanning speed on bond width. (a) Contours plot; (b) response surface plot

4.4 工艺参数优化

4.4.1 优化

优化分为数值优化和图解优化。在数值优化过程中,将采用两种优化准则。第一种优化准则是为了获得最大的剪切强度,不限制熔池宽度和各工艺参数的范围。第二种优化准则是为了获得最大的剪切强度和最小的熔池宽度,并且要求连接成本最低,因此设置最小的激光功率和最大的扫描速度。表 6 显示数值优化的两种准则。在这两种优化准则的基

础上使用 Design-Expert V7.1 得到两组优化结果,表 7 和表 8 列举了满意度最大的 5 组工艺参数。在图解优化过程中,使用和数值优化相同的优化准则,图 13(a)、(b)分别表示在第一、第二优化准则情况下的图解优化图,通过图解优化图可以方便地找到满足剪切强度和熔池宽度要求的最优工艺参数范围,两组等高线相交区域即为最优工艺参数范围。

根据第一准则的优化结果表明最佳工艺参数:电压为 450~470 V,频率为 20~40 Hz,离焦量为

0~5.61 mm,扫描速度为 95~265 mm/min,根据 450 V,频率为 20 Hz,离焦量为 0~5.61 mm,扫描第二准则的优化结果表明最佳工艺参数:电压为 速度为 265 mm/min。

表 6 优化准则

Table 6 Optimization criteria

Parameter or response	Limits		Importance 1	First criterion	Importance 2	Second criterion
	Lower	Upper				
Voltage /V	450	470	3	in range	3	Minimize
Frequency /Hz	20	40	3	in range	3	Minimize
Stand-off distance /mm	0	5.6125	3	in range	3	in range
Scanning speed /(mm/min)	95	265	3	in range	3	Maximize
Lap-shear strength /MPa	1.75214	5.80738	5	Maximize	5	Maximize
Bond width / μm	518.352	789.637	3	in range	5	Minimize

表 7 第一准则的优化结果

Table 7 Optimal results based on the first criterion

No.	A /V	B /Hz	C /mm	D /(mm/min)	Lap-shear strength /MPa	Bond width / μm	Desirability
1	470	40.00	0.17	95.04	5.37591	570.429	0.894
2	470	40.00	0.00	102.29	5.35731	577.222	0.889
3	470	40.00	0.65	95.00	5.35724	561.244	0.889
4	470	40.00	0.00	106.07	5.34427	579.041	0.886
5	470	40.00	0.00	107.47	5.33938	579.726	0.885

表 8 第二准则的优化结果

Table 8 Optimal results based on the second criterion

No.	A /V	B /Hz	C /mm	D /(mm/min)	Lap-shear strength /MPa	Bond width / μm	Desirability
1	450	20.00	2.69	265.00	4.46686	593.353	0.826
2	450	20.00	2.75	265.00	4.47244	593.855	0.826
3	450	20.00	3.03	265.00	4.49547	596.119	0.825
4	450	20.00	1.93	265.00	4.39232	589.278	0.825
5	450	20.00	3.24	265.00	4.51103	598.054	0.825

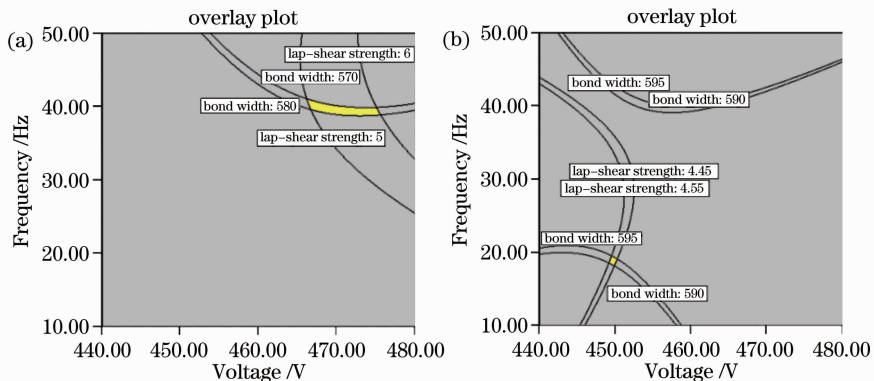


图 13 等高线的相交区域表示最佳工艺参数范围。(a)第一准则,离焦量为 0.13 mm,扫描速度为 95.00 mm/min;

(b)第二准则,离焦量为 2.69 mm,扫描速度为 265.00 mm/min

Fig. 13 Interaction area of graph contours shows optimal process limits. (a) The first criterion at stand-off distance of 0.13 mm and scanning speed of 95.00 mm/min; (b) the second criterion at stand-off distance of 2.69 mm and scanning speed of 265.00 mm/min

4.4.2 优化结果验证

在两种优化准则下,分别对满意度函数值最大的工艺参数优化结果进行激光透射连接验证实验,验证结果如表 9 所示,实际结果与预测结果较为吻合。

表 9 优化实验验证结果
Table 9 Verification results of optimal experiments

No.	A /V	B /Hz	C /mm	D /(mm/min)		Lap-shear strength /MPa	Bond width / μm
1	470	39.98	0.13	95	Actual	5.187	579.037
					Predicted	5.376	570.429
					Error	3.64%	1.49%
2	450	20	2.69	265	Actual	4.511	553.272
					Predicted	4.467	593.353
					Error	0.98%	7.24%

5 结 论

根据实验数据建立了基于响应曲面法的剪切强度和熔池宽度的数学模型,通过以上实验结果和响应曲面法分析,得出以下结论:

1) 电压、频率、离焦量与扫描速度对剪切强度和熔池宽度有着较大的交互影响,这些参数控制连接区域的能量输入和连接质量;

2) 通过方差分析可以看出,频率对剪切强度和熔池宽度的影响最大,其次为离焦量、电压次之,扫描速度最低;

3) 根据不同的优化准则,利用数值优化可以得出相应的最优工艺参数组合,利用图解优化可以方便的找出最佳工艺参数范围;

4) 运用响应曲面法建立的数学模型能够较好地反映连接质量与工艺参数之间的关系。模型的预测结果和优化实验的验证结果较为吻合,说明利用该模型对工艺参数进行优化具有实际利用价值。

参 考 文 献

- 1 R. Witte, H. Herfurth, S. Heinemann. Laser joining of glass with silicon[C]. *SPIE*, 2002, **4637**: 487~495
- 2 A. Giliner, M. Wild, R. Poprawe. Laser bonding of micro optical components[C]. *SPIE*, 2003, **4941**: 112~120
- 3 M. Madou. Fundamentals of Micro Fabrication: the Science of Miniaturization (2nd Edition) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2002
- 4 A. A. Tseng, J. S. Park. Mechanical strength and interface characteristics of transmission laser bonding [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2006, **29**(3): 191~201
- 5 Tong Qinyi, G. Cha, R. Gafiteanu. Low temperature wafer direct bonding [J]. *Microelectro Mechanical Systems*, 1994, **3**(1): 29~35
- 6 Xiao Zhixiong, Wu Guoying, Li Zhihong *et al.*. Silicon glass wafer bonding with silicon hydrophilic fusion bonding technology [J]. *Sensors and Actuators*, 1999, **72**(1): 46~48
- 7 I. Bauer, U. A. Russek, H. J. Herfurth. Laser micro-joining of dissimilar and biocompatible materials [C]. *SPIE*, 2004, **5339**: 454~464
- 8 T. Tamaki, W. Watanabe, K. Itoh. Laser micro-welding of

- silicon and borosilicate glass using nonlinear absorption effect induced by 1558-nm femtosecond fiber laser pulses[C]. *SPIE*, 2007, **6460**: 181~187
- 9 Luo Cheng, Lin Liwei. The application of nanosecond-pulsed laser welding technology in MEMS packaging with a shadow mask [J]. *Sensors and Actuators*, 2002, **97-98**: 398~404
- 10 U. M. Mescheder, M. Alavi, K. Hiltmann. Local laser bonding for low temperature budget[J]. *Sensors and Actuators*, 2002, **97-98**: 422~427
- 11 N. Lorenz, M. D. Smith, D. P. Hand. Wafer-level packaging of silicon to glass with a BCB intermediate layer using localized laser heating [J]. *Microelectronics Reliability*, 2011, **51**(12): 2257~2262
- 12 A. Horn, I. Mingaev, A. Werth. Joining of thin glass with semiconductors by ultra-fast high-repetition laser welding [C]. *SPIE*, 2008, **6880**: 68800A
- 13 M. J. Wild, A. Gillner, R. Poprawe. Locally selective bonding of silicon and glass with laser[J]. *Sensors and Actuators*, 2001, **93**(1): 63~69
- 14 E. Haberstroh, W. M. Hoffmann, R. Poprawe *et al.*. Laser transmission joining in microtechnology[J]. *Microsyst Technol.*, 2006, **12**(7): 632~639
- 15 S. Theppakuttai, D. B. Shao, S. C. Chen. Localized laser transmission bonding for microsystem fabrication and packaging [J]. *J. Manufacturing Processes*, 2004, **6**(1): 24~31
- 16 A. Dhorajiya. Mechanical and Heat Transfer Finite Element Modeling of Transmission Laser Micro Joining[D]. Michigan: Wayne State University, 2008. 25~34
- 17 J. S. Park, A. A. Tseng. Transmission laser bonding of glass with silicon wafer [C]. Proceedings of 2004 JUSFA, 2004, UL-073
- 18 D. C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments[M]. Fu Juesheng, Zhang Jian, Wang Zhenyu Transl. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2009. 347~397
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. 347~397
- 19 F. Sari, W. M. Hoffmann, E. Haberstroh. Applications of laser transmission processes for the joining of plastics, silicon and glass micro parts [J]. *Microsyst. Technol.*, 2008, **14**(12): 1879~1886
- 20 K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, M. S. J. Hashmi. Effect of laser welding parameters on the heat input and weld bead profile [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2005, **164-165**: 978~985
- 21 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, 惠松晓. 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