

紫外激光焊接镀铜玻璃工艺的研究

黄明贺¹, 张庆茂^{1*}, 吕启涛², 张洁娟¹, 郭亮¹

¹华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006;

²大族激光科技股份有限公司, 广东 深圳 518052

摘要 为实现在玻璃基体上直接制造电路的封装技术, 采用真空蒸发法在玻璃上镀涂不同厚度的铜膜; 运用 ANSYS 软件模拟计算镀铜玻璃焊接时的瞬态温度场及瞬态应力场分布; 利用纳秒紫外激光进行焊接实验; 观察测试了焊接接头形貌和力学性能。理论计算表明: 当焊接电流强度为 27 A 时, 焊接样品铜膜的平均温度大约为 3000 °C, 铜膜气化速率缓慢, 焊接效果较好; 热应力集中在铜膜上, 玻璃的热应力小于玻璃的理论强度, 其中焊接速度为 70 mm/s 时, 热应力最小; 铜膜厚度为 80 nm 的焊接样品的抗拉强度最高, 为 14.34 MPa。由此可得到激光焊接的最佳工艺参数: 焊接电流为 27 A, 焊接速度为 70 mm/s, 铜膜厚度为 80 nm。

关键词 激光技术; 激光焊接; 玻璃; 纳秒激光; 有限元; 应力

中图分类号 TN249; TG44; O242.21

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1002007

UV-Laser Welding Process of Copper-Plated Glass

Huang Minghe¹, Zhang Qingmao^{1*}, Lü Qitao², Zhang Jiejuan¹, Guo Liang¹

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Micro Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

²Han's Laser Technology Industry Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518052, China

Abstract Glass was coated with copper films of different thicknesses by the vacuum evaporation method to realize the packaging technology for circuit manufacturing directly on glass substrate. Transient temperature and stress fields during welding of copper-plated glass were calculated using the ANSYS software. Welding experiments were conducted using a nanosecond ultraviolet laser, and the morphology and mechanical properties of welded joints were observed and tested. Theoretical calculations show that when the welding current intensity is 27 A, the average temperature of the copper film of the welding sample is approximately 3000 °C, and the gasification speed of the copper film is slow; therefore, the welding effect is better. Thermal stresses are concentrated in the copper film whereas the thermal stress of glass is less than its theoretical strength. When the welding speed is 70 mm/s, the thermal stresses are the least. A copper film of thickness of 80 nm gives the highest welding sample tensile strength of 14.34 MPa. The optimal parameters of the laser welding process are the welding current intensity of 27 A, welding speed of 70 mm/s, and copper film thickness of 80 nm.

Key words laser technique; optical fabrication; laser welding; glass; nanosecond laser; finite element; stress

OCIS codes 140.3390; 160.2750

1 引言

玻璃具有良好的绝缘性和化学稳定性, 在电子封装、精密仪器等领域有着广泛的应用。由于镀膜

技术的突破, 采用玻璃等脆性材料作为基板直接制造电路板是显示行业、电子行业的新发展趋势^[1-2], 利用镀有金属膜玻璃基板制造的电路板已经开始取代传统的覆铜板。

收稿日期: 2020-04-20; **修回日期:** 2020-04-29; **录用日期:** 2020-06-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104500)、广东省科技资助项目(2016B090917002, 2018B030323017)、广东省科技计划重大项目(2020B090922006)、广东省普通高校毕业生创新人才类项目(2018KQNCX057)、广东省自然科学基金(2016A030313456)、华南师范大学青年学者基金(19KJ13)

* **E-mail:** zhangqm@scnu.edu.cn

传统的玻璃连接方法主要有粘结剂连接、钎焊连接、阳极键合、高温熔融键合等,但这些方法存在着易老化、脱气、光漂白、精度低、连接耗时长等缺点,不能满足日益增长的微型化和环保的要求,因此需要开发全新的焊接技术。超快激光具有高峰值强度特性,无需中间层即可实现玻璃的局部直接焊接,这就很好地解决了上述问题。超快激光焊接技术将替代传统的玻璃粘接方式成为未来主要的连接方式,具有良好的应用前景。

国内外学者相继开展了超快激光焊接玻璃的研究。2005年,日本学者 Tamaki 等^[3]发表了第一篇关于超快激光焊接玻璃的文章; Sugioka 等^[4-5]提出利用双脉冲超快激光辐照提高焊接接头结合强度的策略; Watanabe 等^[6]利用 1 kHz 飞秒激光脉冲实现了不同透明材料、熔融石英和硼硅酸盐玻璃之间的焊接,显示出热膨胀系数不同的材料之间的相互连接具有技术可行性及良好的应用前景。国内的丁腾等^[7]利用飞秒激光热累积效应成功焊接了石英玻璃。此后,超快激光焊接技术得到了快速的发展。

研究表明,超快激光焊接玻璃仍存在焊接接头性能低、透光率低、工艺性能差等难题。此外,超快激光焊接的成本相对较高,工业化推广有一定的困难。为改善玻璃焊接的性能,2017年 de Pablos-Martín 和 Höche^[8]研究了纳秒激光焊接镀涂钛层

硼硅酸盐玻璃,结果表明不添加中间层的焊接界面会产生缺陷,而添加钛膜作为中间层的玻璃焊接界面均匀且无损伤。这种纳秒激光焊接透明材料的工艺与超短脉冲激光焊接相互补充,可满足不同工业应用的需求,具有重大的技术意义。因此,结合市场需求,本研究拟通过在玻璃上直接镀涂铜层,探讨纳秒激光实现玻璃焊接的可能性。

为实现在玻璃基板上直接制造电路,本研究在玻璃基板上镀铜,进行紫外纳秒激光焊接工艺实验,以获得最佳的铜膜厚度和焊接的效果,实现电路直接制造并保证焊接性能。为实现高质量的焊接,利用有限元软件对激光焊接的温度场和应力场进行模拟计算,确定焊接工艺参数;系统分析不同工艺参数对焊接形貌、力学性能等的影响,为下一步直接制备玻璃基的电路板提供密封的激光焊接工艺技术。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料及设备

钠钙玻璃试样的原始尺寸为 70 mm × 25 mm × 1 mm,使用玻璃刀切割成 25 mm × 25 mm × 1 mm 的尺寸进行实验;镀膜的靶材为纯铜。玻璃和铜的典型物理参数如表 1 所示。实验设备包括真空蒸发镀膜机、355 nm 波长的固体激光器和万能材料试验机。

表 1 玻璃、铜的物理参数

Table 1 Physical parameters of glass and copper

Material	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Specific heat capacity / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)	Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)	Young's modulus / (10^{11} Pa)	Poisson ratio	Total heat transfer coefficient / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$)	Thermal expansion coefficient / (10^{-5}°C^{-1})
Cu	8933	385	401	1.1	0.34	5.68	1.8
Glass	2500	750	1.4	0.676	0.24	5.68	0.9

2.2 工艺参数优化

前期镀膜实验结果表明,当铜膜较薄时,铜膜存在着不连续区域,影响焊接效果和铜膜的导电性能^[9],综合考虑,选取铜膜厚度在 60~120 nm 范围进行焊接实验,真空蒸发镀膜机设置梯度为 10 nm。前期预实验结果表明:采用较高的电流强度进行焊接会产生较大的焊接热应力;反之,则达不到焊接玻璃的效果。因此,选取电流强度范围为 26~28 A,梯度为 1 A,所对应的激光平均功率分别为 0.71 W、0.96 W 和 1.25 W。焊接速度过快,将导

致铜膜没有完全熔化;反之,则会损伤玻璃产生裂纹。因此,焊接速度设在 60~80 mm/s 的范围内,梯度为 10 mm/s。激光光斑半径为 15 μm ,考虑热影响区范围和焊接效率,焊接间距设为 0.04 mm。采取大族公司生产的 UV-3C 紫外 355 nm 波长的固体激光器进行镀铜玻璃焊接,激光焊接工艺参数如表 2 所示。

本研究的流程图见图 1,使用 ANSYS 软件进行焊接温度场及应力场的数值模拟与计算,根据计算结果,确定焊接工艺参数后进行系统的焊接实验。

表 2 紫外纳秒激光焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of UV nanosecond laser welding

Wavelength / nm	Pulse width /ns	Spot radius / μm	Repetition frequency /kHz	Welding pitch /mm	Current intensity /A			Welding speed / ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)		
					a	b	c	d	e	f
355	20	15	30	0.04	26	27	28	60	70	80

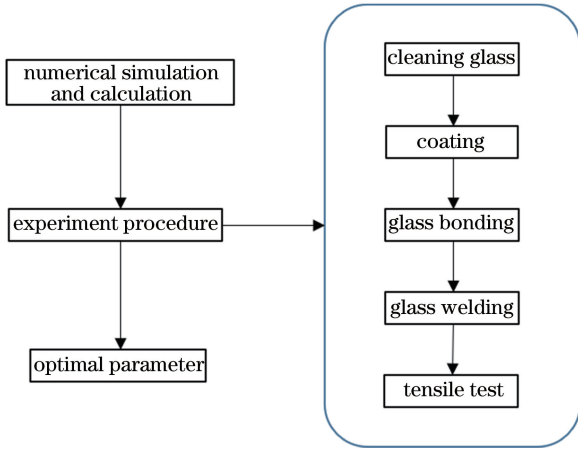


图 1 实验流程图

Fig. 1 Experimental flowchart

3 激光焊接温度场、应力场的模拟与计算

使用 ANSYS Workbench 软件的 Transient Thermal 和 Transient Structural 模块分别对瞬态温度场及瞬态应力场进行模拟与计算。

3.1 网格划分

使用 ANSYS Workbench 软件的 DM 建模模块建立三维有限元镀铜玻璃模型。激光为高斯光束,具有很高的对称性,且镀铜玻璃关于 yz 平面对称,因此只模拟焊缝左半边的单元模型以降低计算量,提高计算效率。有限元模型的尺寸设为 $0.5\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$ 。铜膜厚度较薄,采取扫掠算法(sweep method)进行网格划分;玻璃片采用四面体网格 patch conforming 算法(patch conforming method)进行划分;焊缝处的铜膜与玻璃直接受到脉冲激光的作用,温度等物理参数变化剧烈,可适当降低网格划分尺寸;远离激光作用的区域网格划分逐渐疏松。有限元网格共生成 61409 个节点(nodes),36617 个单元(elements),网格划分见图 2。

3.2 边界条件

焊接传热为瞬态非稳态传热,因此焊接温度场、应力场为非稳态温度场、应力场^[10-11]。非稳态传热微分方程为

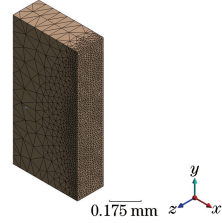


图 2 三维有限元镀铜玻璃模型的网格划分

Fig. 2 Meshing of three-dimensional finite element model of copper-plated glass

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t), t \geq 0, \quad (1)$$

式中: $Q(x, y, z, t)$ 为热源函数; T 为温度分布函数; t 为时间; ρ 为材料密度; c 为材料比热容; λ 为材料热导率。

(1)式为泛定方程,为得出定解,还需要设定微分方程的边界条件和初值条件。假设 β 为边界表面外法线方向, q 为单位面积上的热源输入, α 为表面传热系数, T_w 为周围介质温度, T_f 为材料温度,则焊接模拟与计算有三类边界条件:

第一类边界条件为边界温度变化,即

$$T_w = T(x, y, z, t); \quad (2)$$

第二类边界条件为边界热流密度分布,即

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \beta} = q(x, y, z, t); \quad (3)$$

第三类边界条件为边界上物体与周围介质换热,即

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \beta} = \alpha(T_w - T_f). \quad (4)$$

在模拟与计算中,玻璃、铜膜的初始温度设置为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,单元模型的右边三个面可视为绝热界面,其他与空气接触的 11 个界面的总传热系数为 $5.68\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。

3.3 热源

本研究使用 355 nm 波长的纳秒激光进行玻璃焊接,时间相干的高斯激光脉冲周期函数为

$$q(x, y) = x(t) \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right), \quad (5)$$

$$x(t) = \begin{cases} q_m, & -\frac{3}{10000}C < t \leq \frac{3}{10000}C \\ 0, & -C < t \leq -\frac{3}{10000}C, \frac{3}{10000}C < t \leq C \end{cases}, \quad (6)$$

$$q_m = \frac{3Q}{\tau\pi r^2}, \quad (7)$$

$$Q = \frac{PA}{f}, \quad (8)$$

式中: q_m 为单脉冲能量分布; Q 为单脉冲能量; τ 为脉宽; r 为光斑半径; P 为平均功率; f 为重复频率; A 为材料吸收率; C 为周期。

单脉冲高斯光束模型为

$$q_0(x, y) = \frac{3PA}{f\tau\pi r^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right). \quad (9)$$

使用 MATLAB 软件对纳秒激光单脉冲高斯光束进行模拟与计算, 其脉冲能量分布如图 3 所示。

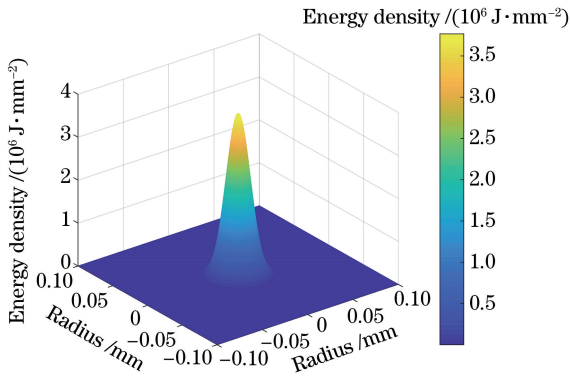


图 3 纳秒激光单脉冲高斯光束的脉冲能量分布
Fig. 3 Pulse energy distribution of monopulse Gaussian beam of nanosecond laser

由于 ANSYS Workbench 软件不能加载分段的热源, 因此对脉冲激光周期函数进行傅里叶级数展开, 再加载至 ANSYS Workbench 软件。

对(6)式进行傅里叶级数展开, 可得

$$\mathcal{F}(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega t) +$$

$$b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + \dots + a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) =$$

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)], \quad (10)$$

$$\omega = \frac{1}{C}, \quad (11)$$

$$a_n = \frac{2}{C} \int_{t_0}^{t_0+C} \mathcal{F}(t) \cos(n\omega t) dt, \quad (12)$$

$$b_n = \frac{2}{C} \int_{t_0}^{t_0+C} \mathcal{F}(t) \sin(n\omega t) dt. \quad (13)$$

因此, (6)式按照傅里叶级数展开后的函数为

$$x(t) = \frac{3PA}{f\tau\pi r^2} \cdot$$

$$\left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \right\}. \quad (14)$$

使用 MATLAB 软件求解(6)式与(14)式, 两者的计算结果如图 4 所示。由图 4 可知, 迭代次数 $n=1000$ 的傅里叶函数已经接近原激光脉冲函数, 考虑到精度与效率, 选择迭代次数 $n=1000$ 的傅里叶函数加载热源。玻璃焊接过程需要加载移动的脉冲高斯热源。激光是从原点出发, 平行于 x 轴向 y 轴的正方向移动, 因此(5)式可转化为

$$q(x, y) = \frac{3PA}{f\tau\pi r^2} \cdot$$

$$\left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \right\} \cdot \exp\left[-\frac{x^2 + (y - vt)^2}{r^2}\right], \quad (15)$$

式中: $n=1000$; v 为激光焊接速度。

使用 ANSYS APDL 经典界面创建脉冲高斯移动热源函数的命令流, 再将 APDL 命令流插入到 ANSYS Workbench 软件中, 运用 SF 命令语句将脉冲高斯移动热源函数加载到铜膜的上表面。

3.4 温度场分析

图 5 为铜膜厚 100 nm, 电流强度为 27 A, 焊接速度为 70 mm/s 时镀铜玻璃模型的瞬态温度场分布云图, 图 6 所示为焊接时间为 7.5×10^{-3} s 时光斑中心周围的温度变化。激光焊接的热影响区域比普通电弧焊接窄, 主要集中在光斑中心 50 μm 以内区域, 玻璃母材的热影响区域较小。同时热影响区域呈椭圆形, 存在拖尾的现象, 这是因为铜的热导率比玻璃高, 玻璃吸收与散失热量的速率较慢, 因此截面的焊接热影响区域更倾向于椭圆形。

图 7 所示为铜膜厚 100 nm, 焊接速度为 70 mm/s 时焊接模型的最高温度随时间的变化趋势。模拟结果表明, 随着电流强度的增大, 焊接温度逐渐上升: 当焊接速度为 70 mm/s 时, 电流强度为 26 A、27 A、28 A 时焊接的最高温度分别为 3465.5 $^{\circ}\text{C}$ 、4854.2 $^{\circ}\text{C}$ 和 6311.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

铜的沸点为 2562 $^{\circ}\text{C}$, 电流强度为 28 A 的模型焊接温度接近 5000 $^{\circ}\text{C}$, 在焊接将近结束时瞬时温度更是达到了 6311.7 $^{\circ}\text{C}$, 此时铜膜已经完全气化并高

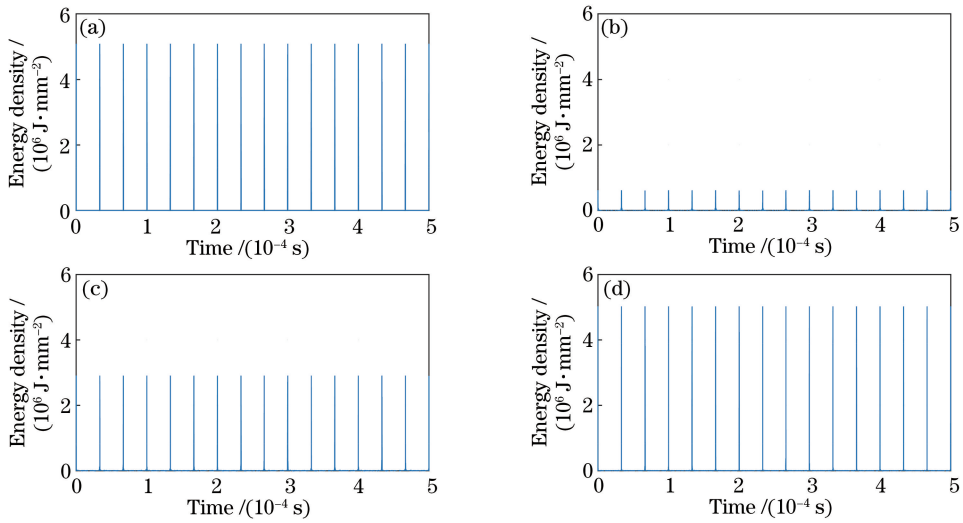


图 4 电流强度为 27 A 时原激光脉冲能量与傅里叶变换后的脉冲能量分布。(a) 原脉冲; (b) $n=100$; (c) $n=500$; (d) $n=1000$

Fig. 4 Original laser pulse energy and Fourier transform pulse energy at current intensity of 27 A.

(a) Original pulse; (b) $n=100$; (c) $n=500$; (d) $n=1000$

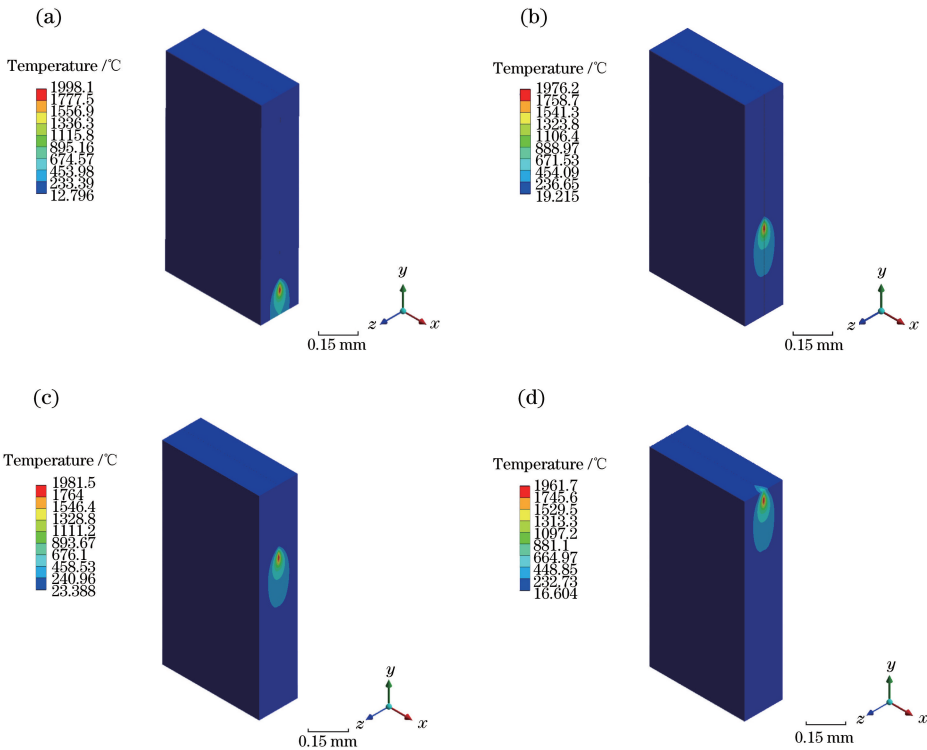


图 5 铜膜厚 100 nm、电流强度为 27 A、焊接速度为 70 mm/s 时,不同焊接时间的镀铜玻璃模型瞬态温度场分布。

(a) 2.0111×10^{-3} s; (b) 6.0111×10^{-3} s; (c) 1.0011×10^{-2} s; (d) 1.4011×10^{-2} s

Fig. 5 Transient temperature field distribution of copper-plated glass model with different welding time when the thickness of copper film is 100 nm, the current intensity is 27 A, and the welding speed is 70 mm/s. (a) 2.0111×10^{-3} s;

(b) 6.0111×10^{-3} s; (c) 1.0011×10^{-2} s; (d) 1.4011×10^{-2} s

速向间隙溅射铜蒸气,导致紧密贴合的玻璃间隙扩大,玻璃出现小裂纹甚至直接开裂。而电流强度为 26 A 的模型焊接温度约为 2500 °C,在焊接将近结束时才达到 3465.5 °C,焊接时铜膜已经液化,但未

到气化的阶段,镀有铜膜的玻璃开始熔化,但未镀铜膜的玻璃与另一玻璃存在间隙,前者温度达不到软化点,焊接的质量较差。电流强度为 27 A 的模型焊接平均温度约为 3000 °C,铜膜气化速率缓慢,铜蒸

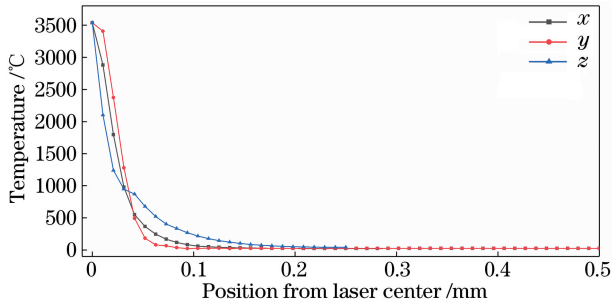


图 6 焊接时间为 7.5×10^{-3} s 时光斑中心周围的温度分布
Fig. 6 Temperature distribution around the center of the light spot when the welding time is 7.5×10^{-3} s

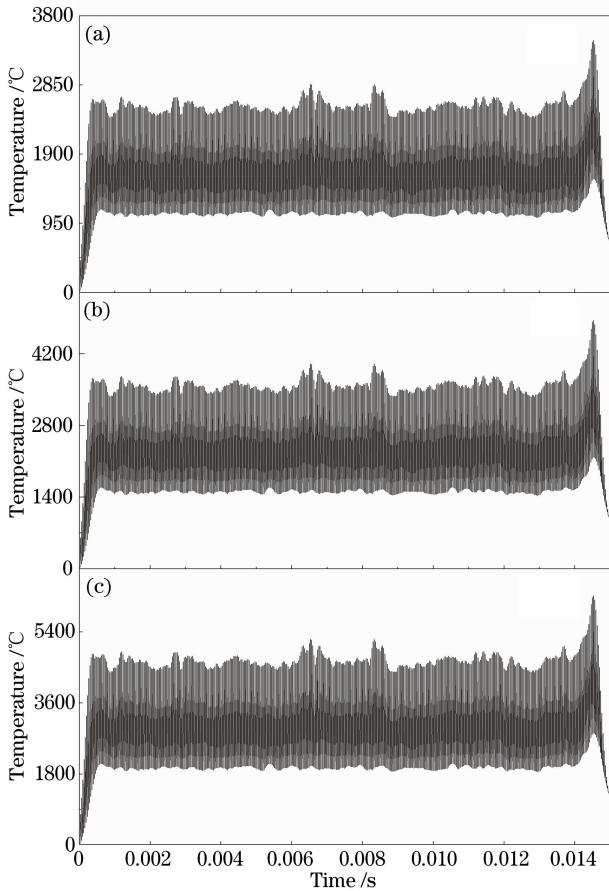


图 7 不同电流强度时焊接模型的最高温度
随时间的变化趋势。(a) 26 A; (b) 27 A; (c) 28 A

Fig. 7 Change trend of maximum temperature of welding model with time at different current intensities.
(a) 26 A; (b) 27 A; (c) 28 A

气蒸发至未镀铜膜的玻璃上,使其软化并与镀有铜膜的玻璃连接在一起,焊接效果较好。

综上所述,电流强度为 27 A 的镀铜玻璃模型焊接效果更佳。

3.5 应力场分析

图 8 为铜膜厚 100 nm、电流强度为 27 A、焊接

速度为 70 mm/s 时镀铜玻璃模型的瞬态应力场分布云图。图 9 所示为焊接时间为 0.0075 s 时垂直于焊缝的热应力分布。热应力主要集中在铜膜上,在光斑中心 $50 \mu\text{m}$ 范围内热应力较高。焊接模型的总热应力为拉应力,在光斑中心处达到最大值 1105.4 MPa; x 轴方向上中间区域的热应力为压应力,中心两侧转为拉应力; y 轴方向上的热应力均为压应力,光斑中心处热应力值为 -1110.1 MPa ; z 轴方向上两侧的热应力均为压应力,光斑中心转变为拉应力。玻璃所受的最大总热应力小于玻璃的理论强度 ($3.38 \times 10^3 \text{ MPa}$)^[12],玻璃基板不会产生应力破坏。

图 10 所示为膜厚 100 nm 的镀铜玻璃模型最大总热应力随焊接速度的变化趋势。当电流强度为 26 A、27 A、28 A 时,最大总热应力都小于玻璃的理论强度 ($3.38 \times 10^3 \text{ MPa}$),都满足应力要求;当焊接速度为 70 mm/s,电流强度分别为 26 A、27 A 时,模型的最大总热应力都比 60 mm/s 和 80 mm/s 的要低,对应为 1079.9 MPa 和 1517 MPa,焊接效果更佳。

4 镀铜玻璃焊接结果分析与讨论

4.1 实验过程

镀铜玻璃焊接的实验步骤如下:

- 1) 钠钙玻璃使用超声波清洗机清洗后放入真空蒸发镀膜机中镀上铜膜;
- 2) 镀铜玻璃与未镀膜玻璃紧密贴合至光学接触;
- 3) 使用紫外纳秒激光对镀铜玻璃平面的 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 区域进行焊接,焊接样品示意图见图 11;

- 4) 焊接样品紧紧贴合在橡胶拉力夹头上,使用量程为 1000 N 的万能材料试验机以 0.5 mm/min 的加载速度对焊接样品进行拉伸试验(图 12),样品断裂后立即停止加载,记录焊接区域断裂时最大拉力 F_{max} 并计算抗拉强度,其计算公式为 $\sigma_s = F_{\text{max}} / (a \cdot b)$,其中 F_{max} 为最大拉力值, a 为焊接区域的长, b 为焊接区域的宽。

4.2 结果分析与讨论

图 13 所示为铜膜厚 100 nm,焊接电流强度为 27 A,焊接速度为 70 mm/s 的激光焊接镀铜玻璃的样品。由图 13 可知,激光焊接区域周围出现明显的薄膜干涉条纹,此区域的两片玻璃紧密连接,获得较好的焊接效果。焊接电流强度为 27 A,焊接速度为

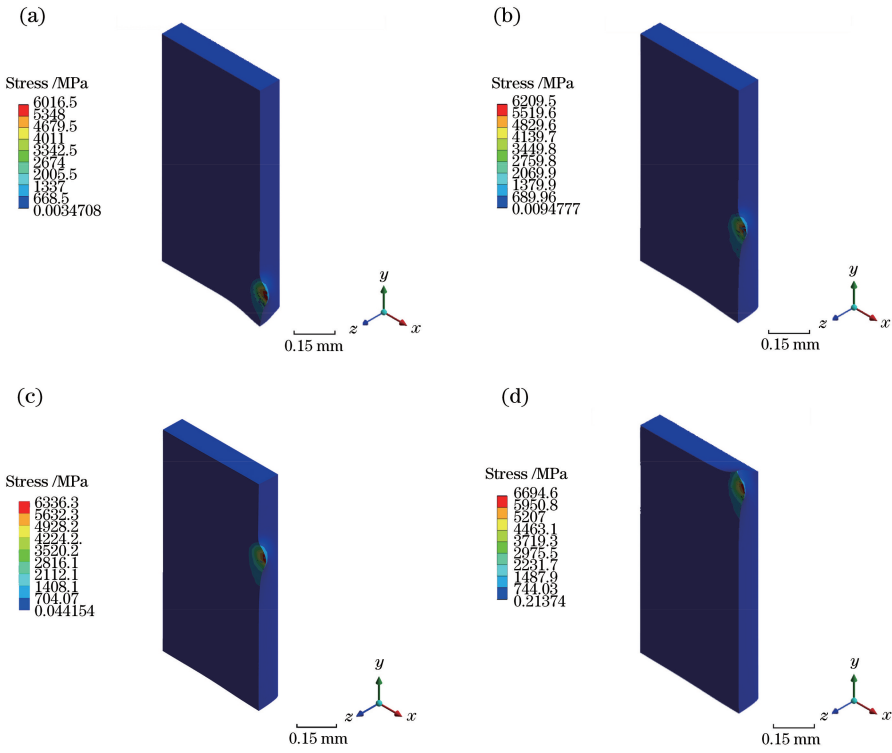


图 8 铜膜厚 100 nm、电流强度为 27 A、焊接速度为 70 mm/s 时,不同焊接时间的瞬态应力场分布。

(a) 2.0111×10^{-3} s; (b) 6.0111×10^{-3} s; (c) 1.0011×10^{-2} s; (d) 1.4011×10^{-2} s

Fig. 8 Distribution of transient stress fields of copper-plated glass model with different welding time when the thickness of copper film is 100 nm, the current intensity is 27 A, and the welding speed is 70 mm/s. (a) 2.0111×10^{-3} s; (b) 6.0111×10^{-3} s; (c) 1.0011×10^{-2} s; (d) 1.4011×10^{-2} s

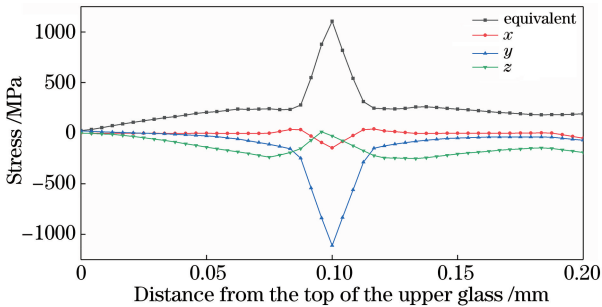


图 9 焊接时间为 7.5×10^{-3} s 时垂直于焊缝的热应力分布图

Fig. 9 Distribution of thermal stress perpendicular to the welding line when the welding time is 7.5×10^{-3} s

70 mm/s 的拉伸试验断裂样品见图 14。

由图 14 可知,样品的断面形貌有两种,一种形貌的焊接区域仍能观察到焊线纹路,出现有序排列的结构[图 14(a)];下层玻璃在焊缝处存在铜膜扩散后的小凹槽,对应上层玻璃具有扩散而来的铜结构。两片玻璃是在焊缝处开始断裂,说明两片玻璃仅仅依靠铜膜的扩散实现连接,焊接效果不理想。另一种形貌的下层玻璃焊接区域断裂后有明显的凹坑,对应的上层玻璃存在突起[图 14(b)],玻璃的断裂发生在下层玻璃母材中,而不是在焊缝处,而且不

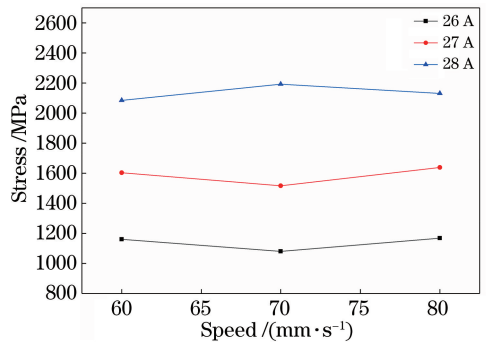


图 10 膜厚为 100 nm 的镀铜玻璃模型的最大总热应力随焊接速度的变化趋势

Fig. 10 Trend graph of maximum total thermal stress of copper-plated glass model changed with weld speed at film thickness of 100 nm

能分辨出焊线纹路,说明玻璃是依靠两者的充分融合连接在一起的,焊接效果较好。

铜膜厚度为 100 nm,焊接电流强度为 27 A,焊接速度为 70 mm/s 时的焊接样品拉伸曲线如图 15 所示,其中 ϵ 为应变, σ 为应力。焊接样品在拉伸试验时没有出现屈服阶段,在拉力最大值处直接断裂,样品的断裂形式为脆性断裂。

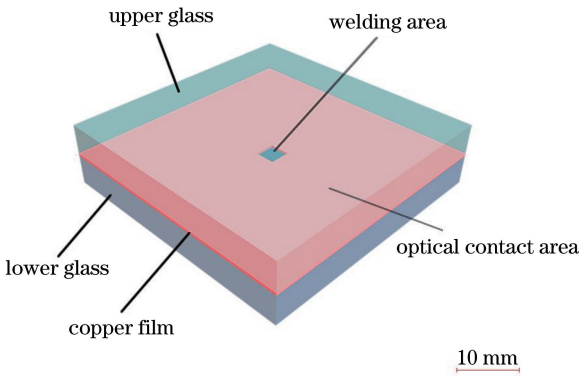


图 11 焊接样品示意图

Fig. 11 Schematic of welding samples

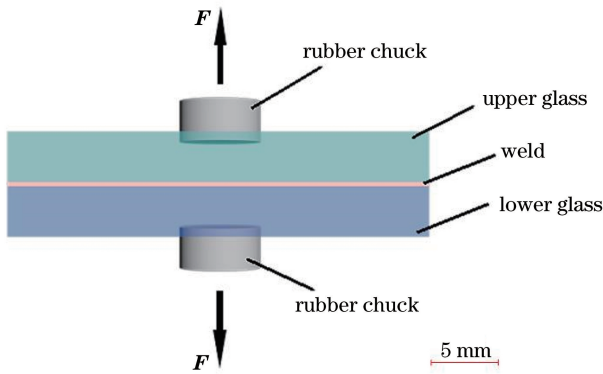


图 12 拉伸试验示意图

Fig. 12 Schematic of tensile test

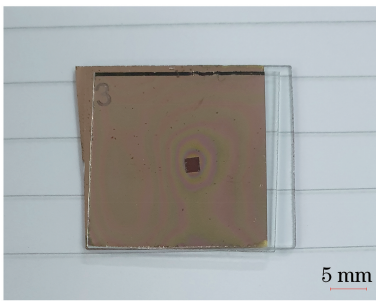


图 13 焊接样品实物图

Fig. 13 Physical drawing of sample after welding

铜膜厚度为 80 nm, 电流强度分别为 26 A、27 A、28 A 的焊接样品抗拉强度随焊接速度的变化趋势如图 16 所示。在镀铜膜层厚度为 80 nm 下, 电流强度为 27 A 时样品的平均抗拉强度为 10.36 MPa, 远大于电流强度为 26 A、28 A 的平均抗拉强度 6.38 MPa、4.14 MPa, 进一步说明紫外纳秒激光焊接镀铜玻璃的最佳电流强度为 27 A。

当电流强度为 28 A 时, 样品抗拉强度呈现先降后升的趋势; 而电流强度为 26 A 和 27 A 的样品与之相反, 当焊接速度为 70 mm/s 时抗拉强度分别达到 7.30 MPa 和 14.34 MPa。结合瞬态应力场对焊

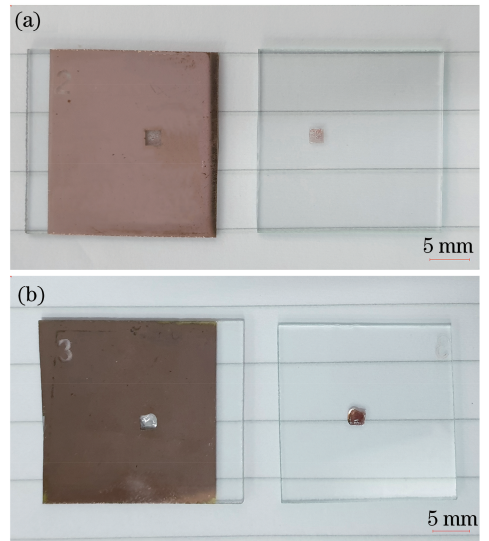


图 14 断裂样品实物图。(a)铜膜厚 60 nm;

(b)铜膜厚 100 nm

Fig. 14 Physical drawings of fractured samples.

(a) Thickness of copper film is 60 nm;

(b) thickness of copper film is 100 nm

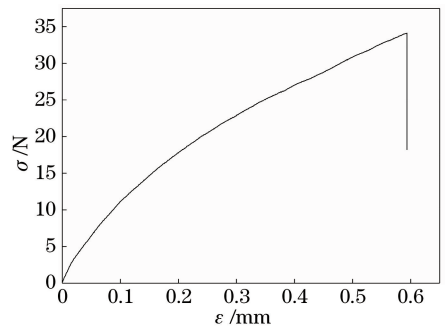


图 15 焊接样品拉伸曲线

Fig. 15 Welding sample tensile curve

接速度进行分析: 当电流强度为 28 A 时, 热应力随焊接速度的变化趋势为先升后降; 而当电流强度为 26 A、27 A 时, 应力值随焊接速度的变化趋势为先降后升。焊接样品的热应力越高, 样品焊接效果越不好, 因此拉伸试验测得的抗拉强度就越低; 而热应力越低, 焊接的效果更佳, 抗拉强度越高。综合分析, 焊接速度为 70 mm/s 的焊接样品的质量最优, 与热应力计算分析得出的结果相符合。

电流强度为 27 A、不同铜膜厚度的焊接样品的抗拉强度随铜膜厚度的变化趋势如图 17 所示。焊接速度为 70 mm/s、80 mm/s, 铜膜厚度为 80 nm 时焊接样品的抗拉强度最高, 分别为 14.34 MPa、12.55 MPa, 镀铜玻璃焊接样品的焊接效果最优。当铜膜层较厚时, 铜膜层不能完全熔化, 玻璃的焊接效果不佳; 当铜膜层较薄时, 尽管铜膜层吸收激光热量后完全熔化, 但玻璃同样会受到激光冲击而产生

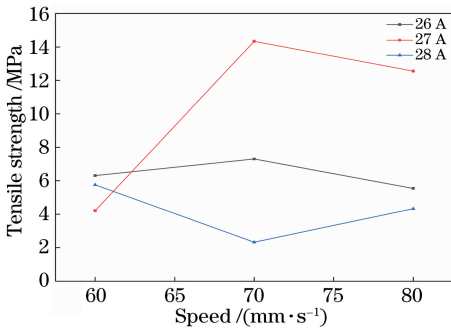


图 16 焊接样品抗拉强度随焊接速度变化的趋势

Fig. 16 Trends in tensile strength of welding samples with welding speed

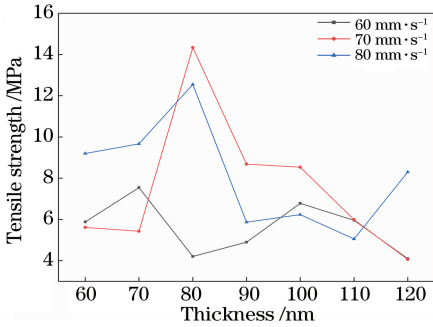


图 17 焊接样品抗拉强度随镀铜膜厚变化的趋势

Fig. 17 Variation of tensile strength of welding samples with copper plating thickness

微裂纹等缺陷,影响焊接质量。综上所述,铜膜厚度为 80 nm 的样品焊接效果最好。

5 结 论

利用 ANSYS Workbench 软件对激光焊接的温度场和应力场进行模拟与计算,系统分析不同工艺参数对样品焊接形貌、力学性能等的影响,确定最优焊接工艺参数。研究结果表明:

1) 采用纳秒激光焊接镀铜玻璃过程中热影响区为椭圆形,其短半轴只有 50 μm,镀铜玻璃的热应力能满足应力要求。

2) 焊接样品的断裂形式为脆性断裂,其断面形貌有两种:一种形貌的焊接区域仍能观察到焊线纹路,断裂面出现在焊缝处,焊接效果不佳;另一种形貌的焊接区域断裂后有明显的凹坑,断裂面为玻璃母材,焊接质量较优。

3) 电流强度为 27 A、焊接速度为 70 mm/s、镀铜膜层厚度为 80 nm 的样品抗拉强度达 14.34 MPa,镀铜玻璃焊接效果最好,与数值模拟得出的结果相符合。

参 考 文 献

[1] Su Z X, Xing C Y, Luo B, et al. Microsystem wafer-

level 3D packaging based on composite glass-silicon substrate[J]. Navigation and Control, 2019, 18(2): 61-68.

苏兆喜,邢朝洋,罗斌,等.基于玻璃-硅复合基板的微系统圆片级三维封装[J].导航与控制,2019,18(2):61-68.

[2] Cheng H, Chen M X, Luo X B, et al. Ceramic substrate for electronic packaging [J]. Advanced Ceramics, 2019, 40(4): 265-292.

程浩,陈明祥,罗小兵,等.电子封装陶瓷基板[J].现代技术陶瓷,2019,40(4):265-292.

[3] Tamaki T, Watanabe W, Nishii J, et al. Welding of transparent materials using femtosecond laser pulses [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(22): L687-L689.

[4] Sugioka K, Iida M, Takai H, et al. Efficient microwelding of glass substrates by ultrafast laser irradiation using a double-pulse train [J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2734-2736.

[5] Wu S Z, Wu D, Xu J, et al. Absorption mechanism of the second pulse in double-pulse femtosecond laser glass microwelding [J]. Optics Express, 2013, 21(20): 24049-24059.

[6] Watanabe W, Onda S, Tamaki T, et al. Space-selective laser joining of dissimilar transparent materials using femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(2): 021106.

[7] Ding T, Wang X H, Wang G D, et al. Welding of fused silica by using high repetition frequency femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0701007.

丁腾,王雪辉,王关德,等.高重频飞秒激光焊接石英玻璃[J].中国激光,2018,45(7):0701007.

[8] de Pablos-Martín A, Höche T. Laser welding of glasses using a nanosecond pulsed Nd:YAG laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 1-9.

[9] Xu Z J. Influence of film thickness and silicon content to conductivity and residual stress of silicon substrate copper film[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 1998, 26(S1): 198-200.

徐子钧.膜厚与硅含量对硅基铜膜的电导率和残余应力的影响[J].陕西师范大学学报(自然科学版),1998,26(S1):198-200.

[10] Belitzki A, Stadter C, Zaeh M F. Distortion minimization of laser beam welded components by the use of finite element simulation and artificial intelligence [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2019, 27: 11-20.

[11] Yang X Y, Yan G Z, Xiu Y F, et al. Welding temperature distribution and residual stresses in thick welded plates of SA738Gr. B through experimental measurements and finite element analysis [J]. Materials, 2019, 12(15): 2436.

[12] Kelly A, Macmillan N H. Strong solids[M]. Basel: Clarendon Press, 1973.