

高重频飞秒激光焊接石英玻璃

丁腾^{1,3}, 王雪辉², 王关德¹, 钱静¹, 王何宁^{1,3}, 娄孔昱^{1,3}, 王玉莹², 赵全忠¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

²华工激光工程有限责任公司技术中心, 湖北 武汉 430000;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 超短脉冲激光可以直接对玻璃进行焊接,不需要在两片玻璃之间添加吸收介质,也不需要材料进行热处理,应用前景广阔。利用飞秒激光热累积效应成功实现了石英玻璃之间的焊接,研究了激光重复频率和激光功率对玻璃焊接质量的影响。石英玻璃焊接区由 3 部分构成,包括顶部的圆形空腔、中部的熔融区域和底部的线形损伤结构,石英玻璃的焊接强度是 3 部分结构共同作用的结果。实验表明:在保持激光重复频率为 500 kHz 时,熔融区面积随着激光功率的增大而增大,但是焊接强度出现了先增大后减小的趋势;在保持激光功率为 4.14 W 时,熔融区面积和焊接强度随激光重复频率增长而减小。此外,还实现了铝硅酸盐玻璃之间和钠钙玻璃之间的焊接,并对不同成分玻璃的焊接端面形貌进行了对比。

关键词 激光器; 飞秒激光; 玻璃焊接; 热累积; 焊接强度

中图分类号 TG44

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0701007

Welding of Fused Silica by Using High Repetition Frequency Femtosecond Laser

Ding Teng^{1,3}, Wang Xuehui², Wang Guande¹, Qian Jing¹, Wang Hening^{1,3},
Lou Kongyu^{1,3}, Wang Yuying², Zhao Quanzhong¹

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Technology Center, Huagong Laser Engineering Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The ultrashort pulse laser, which has a wide application prospect, can weld the glass directly. It does not need to add the absorbing medium between the two pieces of glass and does not need thermal treatment for the material. The welding of two pieces of fused silica is successfully achieved using the thermal accumulation effect of femtosecond laser pulses. In addition, the dependence of welding quality on laser repetition frequency and power is investigated. The welding zone of fused silica comprises three parts, e. g., the circular cavity on the top, the molten area in the middle and the linear damage structure at the bottom, and all the three parts make contributions to the welding strength of fused silica. The experiments show that with a laser repetition frequency of 500 kHz, the molten zone area increases with the increase of the laser power, but the welding strength increases first and then decreases. When the laser power keeps as 4.14 W, both molten zone area and welding strength decrease with the increase of laser repetition frequency. Furthermore, two pieces of aluminosilicate glass and soda-lime glass are also successfully welded and the welding end surface morphologies of the glass with different components are compared.

Key words lasers; femtosecond laser; glass welding; thermal accumulation; welding strength

OCIS codes 140.3460; 160.2750

收稿日期: 2018-01-24; 收到修改稿日期: 2018-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61675214)、国家重点研发计划(2016YFB1102400)

作者简介: 丁腾(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光与材料相互作用方面的研究。E-mail: dingteng@siom.ac.cn

导师简介: 赵全忠(1974—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用、激光微纳制造等方面研究。

E-mail: zqz@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

玻璃是一种易碎材料,由于其具有优异的物理和化学性质,被广泛应用于光学、通信、电子、微机电系统(MEMS)和生物医学等领域。在这些领域中,经常需要把两片或者多片玻璃连接起来,常见的连接方法有机械装配、胶合和焊接等^[1],但是这些方法都存在一定的缺陷,比如:机械装配依靠外在的力,容易导致玻璃受力不均而碎裂;胶合存在受温度影响较大、老化现象严重的缺点^[2];通过在连接面添加焊料和吸收层实现玻璃的焊接,由于吸收层与基底材料成分不同,存在化学稳定性差的问题^[1,3]。

超短脉冲激光,因其超高的峰值功率密度,在玻璃焊接领域显示出巨大的潜力。将脉宽极短的激光聚焦在两片玻璃的交界面附近,焦点处的高能量激光诱发玻璃材料的多光子电离,被电离的自由电子吸收激光光子能量加速,与其他原子碰撞引发雪崩电离,离子和未电离的部分通过电子、声子的耦合温度升高,达到材料的熔点,实现焊接。由于材料的等离子体激发仅仅发生在激光焦点附近,冷却时间很短(微秒量级),因此,利用热累积效应(热累积速率大于冷却速率)实现玻璃的焊接需使用高重复频率超短脉冲激光(0.1~1 MHz量级)^[4-6]。Tamaki等^[7]使用1 kHz低重复频率脉冲实现了石英玻璃的微焊接,但是存在焊接速度慢、强度低的缺点,而高重复频率利用热累积效应,具有焊接强度大、焊接质量高、速度快的优点。超短脉冲激光玻璃焊接技术不需要额外的介质材料,是玻璃之间的直接熔接,而且永久连接,稳定性好、焊接强度高、空间选择性好^[8-9],在MEMS封装等领域具有广阔的应用前景。

近年来,高重复频率超短脉冲激光焊接技术得到了越来越多的关注和探究。Tamaki等^[10]在研究中使用波长为1558 nm、频率为500 kHz的飞秒激光成功实现了非碱铝硅酸盐玻璃之间、非碱铝硅酸盐与硅片之间的焊接,分别获得了9.87 MPa和3.74 MPa的焊接强度。利用高重复频率飞秒激光,熔融石英玻璃、BK7玻璃、硼硅酸盐玻璃,玻璃与单晶硅之间的焊接相继得到实现。与此同时,影响超短脉冲微焊接玻璃的因素包括脉冲激光的脉宽、重复频率、脉冲能量等激光参数以及加工平台的移动速度等。Roth等^[1]实现了D263玻璃之间和石英玻璃之间的焊接,探究了熔融区面积与焊接扫描速度和焦点位置之间的关系。Miyamoto等^[11-12]从热力学的角度分析了硼硅酸盐玻璃和光敏玻璃非线性吸收与激光功率及重复频率的关系。尽管如此,不同激光参数和扫描参数对焊接质量影响的研究仍存在不足,特别是针对不同材料的实验需要进一步丰富。石英玻璃焊接区域通常会出现3种结构,但是对不同激光参数下3种结构的变化仍然缺乏研究。本文利用高重复频率飞秒激光成功实现了铝硅酸盐玻璃、石英玻璃和钠钙玻璃同种成分之间的焊接,研究了激光功率和激光重复频率对石英玻璃焊接熔融区域结构的影响,通过强度测试,探究了不同参数下玻璃焊接强度的变化,最后对不同成分玻璃焊接端面的形貌进行了对比。

2 实 验

实验装置如图1所示,激光器(Tangerine 178-G型,Amplitude Systemes公司,法国)的波长为1064 nm,脉冲宽度为300 fs,重复频率为175 kHz~2 MHz,激光最大功率为40 W。

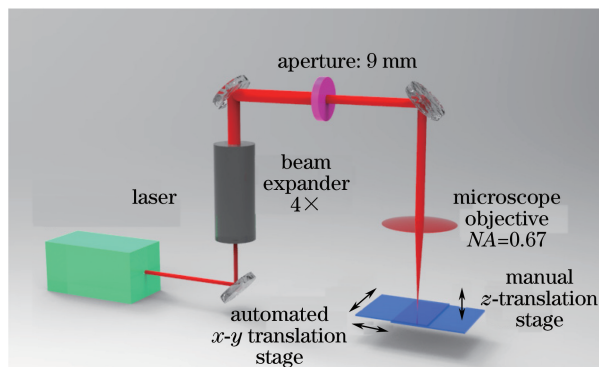


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experiment setup

从激光器出射的激光脉冲,经 90° 反射镜反射进入 4 倍扩束镜,被扩束后的光脉冲再被反射进入一个通光直径为 9 mm 的小孔光阑,消除光斑外围杂散光。最后光束经过显微物镜($\times 50$, $NA = 0.67$)被聚焦,聚焦光斑直径为 $2.6 \mu\text{m}$ 。激光焦点位于两片玻璃的交界面,两片玻璃放在由电机控制的 x - y 运动平台上, z 方向通过手动 z 轴来调节。

实验所用的光学玻璃样品尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,玻璃表面精度为 $\lambda/10$ (λ 为基准波长 632 nm)。在进行玻璃焊接之前,玻璃样品需经过超声波清洗和酒精擦拭,通过外在的按压,两片玻璃可以依靠范德瓦耳斯力贴合在一起,达到光学贴

合的效果^[2,13],如图 2(a)所示。光学贴合要求两片玻璃厚度变化小于 $5 \mu\text{m}$,玻璃表面平坦度变化小于 $30 \mu\text{m}$ ^[14-15]。

把激光焦点聚焦在两片玻璃的交界面,设置好激光参数后,通过 Aerotech 公司 A3200 控制器(德国)控制的 x - y 轴开始加速,加速到设定速度时,激光出光,通过扫描直线的方式实现玻璃的焊接,在匀速扫描结束前,关激光,避免平台加减速对焊接质量的影响。焊接线长度为 10 mm,线间距为 $50 \mu\text{m}$ 。

如图 2(b)所示,在焊接性能测试中,通过对焊接区域纵向切割、抛光处理,在显微镜下观察焊缝的形貌。在万能材料试验机上进行拉伸强度测试,探究不同激光参数对焊接强度的影响。

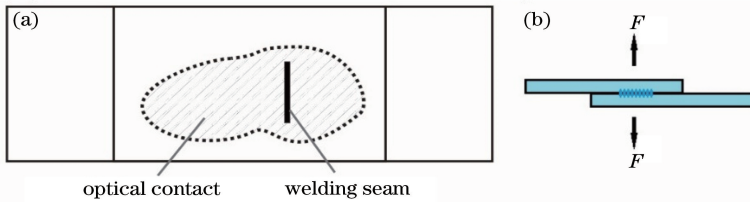


图 2 (a)玻璃光学贴合和焊线示意图;(b)玻璃焊接拉伸强度测试示意图

Fig. 2 (a) Schematic of the layout of optical contact area and the welding seam on glass;
(b) schematic of the welding tensile strength test of glass

3 结果与讨论

石英玻璃焊接的实验参数如表 1 所示,通过调节重复频率和平均功率,探究激光功率和重复频率对焊接的影响,同时保持脉冲宽度、扫描速度和扫描线间距分别为 300 fs 、 20 mm/s 和 $50 \mu\text{m}$ 。

表 1 石英玻璃激光焊接实验参数

Table 1 Experimental parameters of laser welding of the fused silica

Sample	Frequency /kHz	Power /W	Pulse energy / μJ
1	500	3.00	6.00
2	500	4.14	8.28
3	500	4.46	8.92
4	500	5.10	10.20
5	175	4.14	23.70
6	1000	4.14	4.14
7	2000	4.14	2.07

在焊接完成后,利用激光成丝切割对焊接区域进行纵向切割,对端面进行清洗抛光之后在显微镜下得到了焊接形成的焊缝端面图,图 3(a)~(g)分别对应表 1 中样品 1~7 的焊缝端面图,其中 f 和 P 分别为激光重复频率和功率。焊接区域自下而上看,呈现水滴状。水滴状焊接区由 3 部分构成,包括顶部的圆形空腔、中部的熔融区域和底部的微小空

腔构成的线形结构。中部的熔融区域有利于焊接,如图 3(c)中红色椭圆区域所示,顶部和底部的空腔容易产生应力,影响焊接强度,实验中应该尽量减小。飞秒激光在材料交界面形成的水滴状熔融区成功将两片玻璃连接起来,由于实验时线间距较大,还可以断续看到未连接的缝隙,如图 3(d)、(e)中红色方框所示。

当自由电子在焦点处产生时,焦点上方的光强大于下方的光强,因此焦点上方的电离率和自由电子密度高于焦点下方,在热累积效应的影响下,焦点上方的熔融区域大,所以熔融区域呈现水滴状^[15]。熔融区域底部的线性损伤结构是由于激光成丝引起的,在自聚焦和自散焦的共同作用下,在石英内部出现丝状等离子体通道,其轴心区域被严重损伤,周边区域被轻微改性^[16]。对比图 3(a)~(d)可见,激光重复频率为 500 kHz 时,随着功率从 3.00 W 上升到 5.10 W ,焊接熔融区面积逐渐增大,说明随着单脉冲能量的增加,材料吸收的激光光场的能量就越多,相应的热熔化区就越大,同时顶部圆形空腔面积逐渐变大,底部线形损伤结构由于中部熔融区的扩大而缩减。由图 3(e)~(g)和图 3(b)可以看到,激光功率保持 4.14 W 不变,重复频率分别为 175 、 500 、 1000 、 2000 kHz 时,单脉冲能量从 $23.70 \mu\text{J}$ 下

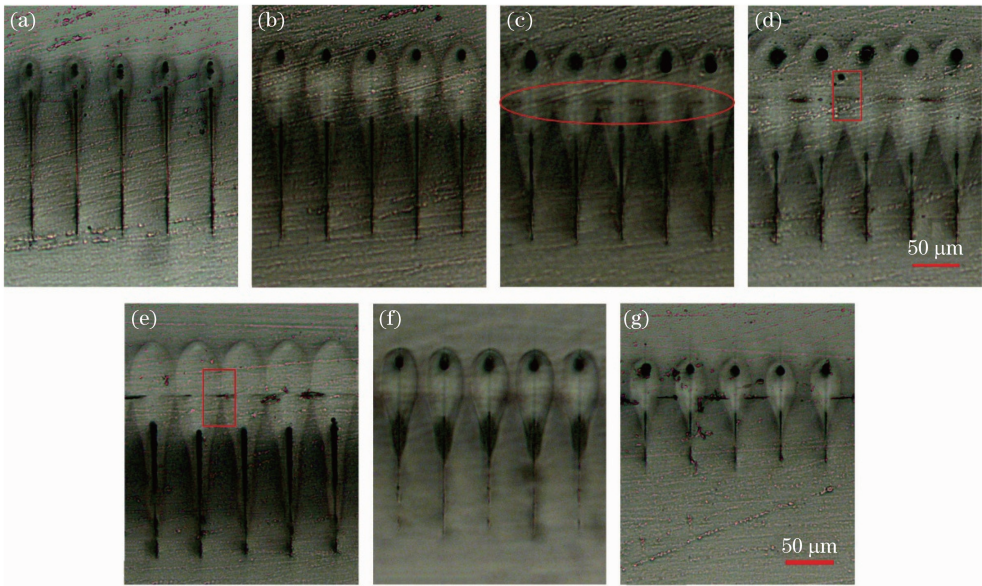


图3 不同激光参数下石英玻璃焊缝端面图,实验参数为(a) $f=500\text{ kHz}, P=3.00\text{ W}$; (b) $f=500\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$; (c) $f=500\text{ kHz}, P=4.46\text{ W}$; (d) $f=500\text{ kHz}, P=5.10\text{ W}$; (e) $f=175\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$; (f) $f=1000\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$; (g) $f=2000\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$

Fig. 3 Cross section of the fused silica welding seam with different laser parameters, the experimental parameter is (a) $f=500\text{ kHz}, P=3.00\text{ W}$; (b) $f=500\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$; (c) $f=500\text{ kHz}, P=4.46\text{ W}$; (d) $f=500\text{ kHz}, P=5.10\text{ W}$; (e) $f=175\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$; (f) $f=1000\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$; (g) $f=2000\text{ kHz}, P=4.14\text{ W}$

降到 $2.07\ \mu\text{J}$, 焊接熔融区域面积也随着单脉冲能量的减小而减小,同时,激光重复频率的增加也使熔融区底部光束成丝损伤减弱。

激光重复频率为 175 kHz 时,熔融区域顶部没有出现圆形空腔[图 3(e)],激光功率保持不变,提高激光重复频率时,圆形空腔出现[图 3(b)、(f)、(g)],所以推断这是由于高重复频率激光脉冲叠加产生的,在激光频率为 500 、 1000 、 2000 kHz 时,圆形空腔均存在,并且空腔面积随着脉冲能量的增加而增大。图 4(a)为熔融区域放大图,从图中可以清楚地看到焊接时产生的内部结构,如图 4(a)中红色箭头所示。Richter 等^[17]对顶部的圆形空腔结构做了进一步的探究,发现其内部其实是由一些微小空腔和快速冷却物质构成。图 4(b)为石英玻璃焊接表面图,可以看到圆形空腔呈现非周期性分布,在空腔处熔融区域的宽度出现了变窄[图 4(b)中 1 号红框所示]甚至中断[图 4(b)中 2 号红框所示]的现象,这些现象经常出现在高重复频率脉冲激光与石英玻璃相互作用的实验中,至今还没有一个确定的理论可以解释该现象,但是一般认为这是由像差引起的。激光热积累效应熔融的物质折射率发生改变,激光通过时产生额外的球差,降低了焦点处的激光强度,当激光强度低于材料的非线性吸收阈值时,

圆形空腔产生,同时空腔会对激光有一定的散射作用,进一步影响激光热积累过程的进行^[17-21]。

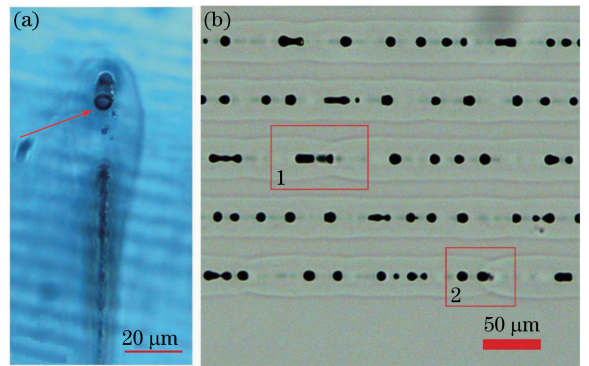


图4 (a)石英玻璃焊缝微观图,焊接参数为 $f=500\text{ kHz}, P=3.00\text{ W}, v=20\text{ mm/s}$ (v 为扫描速度);

(b)石英玻璃焊接表面图,焊接参数为 $f=2\text{ MHz}, P=4.14\text{ W}, v=20\text{ mm/s}$

Fig. 4 (a) Microgram of the fused silica welding seam, the welding parameters are $f=500\text{ kHz}, P=3.00\text{ W}, v=20\text{ mm/s}$ (v is scanning speed); (b) welding surface view of fused silica, the welding parameters are $f=2\text{ MHz}, P=4.14\text{ W}, v=20\text{ mm/s}$

超快激光玻璃焊接需要实现玻璃的光学贴合,目的是保证激光诱导材料产生的等离子体能够保持在材料内部,通过材料的熔融和冷却实现玻璃的焊接。

图 5(a)、(b)分别展示了焊接样品拉裂后上层玻璃和下层玻璃表面的三维形貌图,图中横纵坐标代表焊接区域的宽度和高度,色坐标代表焊接区域平面的高

度,可以看到原来平整的界面出现了凹凸,图 5(a)中凸起的高度大约为120 μm ,这也说明两片玻璃片已经连接在一起。

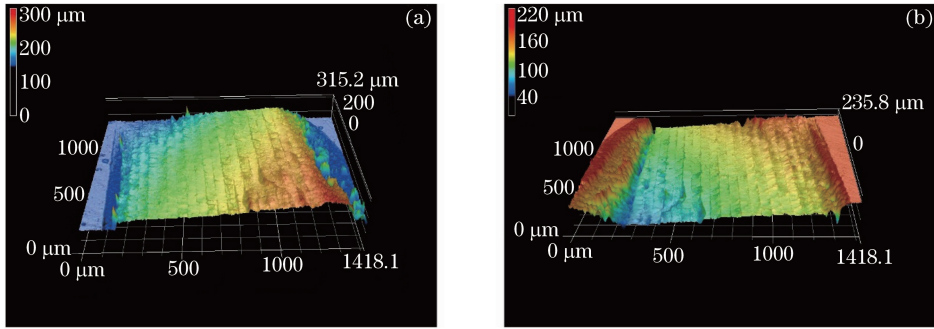


图 5 焊接样品拉裂后交界面的形貌图,焊接参数为 $P=4.46\text{ W}$, $f=500\text{ kHz}$, $v=20\text{ mm/s}$ 。

(a)上层玻璃界面凸起;(b)下层玻璃界面凹陷

Fig. 5 Morphologies of the interface after the crack of the welding sample, the welding parameters are $P=4.46\text{ W}$, $f=500\text{ kHz}$, $v=20\text{ mm/s}$. (a) Upper glass interface bulges; (b) the lower glass interface pits

焊接强度是表征焊接质量的一个重要因素,通过把样品拉裂的垂直拉伸力来表征。把焊接样品的上、下表面固定在万能材料实验机上可以测得垂直拉伸力。材料的焊接强度 σ 可以通过下面公式计算^[22]:

$$\sigma = \frac{F_w}{S_{\text{BEAD}}} = \frac{F_{\text{RUP}} - \sigma_1 S_{\text{OC}}}{S_{\text{BEAD}}}, \quad (1)$$

式中 F_w 为焊接区域拉力, S_{BEAD} 为焊接区域面积, F_{RUP} 为焊接样品的总拉力, S_{OC} 为光学贴合面积, σ_1 为光学贴合强度。实验中测得石英玻璃的光学贴合强度为 0.025 MPa 。

激光功率和激光重复频率对石英玻璃焊接强度

的影响如图 6 所示。如图 6(a)所示,在激光重复频率保持在 500 kHz 时,随着激光功率从 4.14 W 增加到 5.43 W ,焊接强度呈现出先增高后降低的趋势,在激光功率为 5.10 W 时可以达到最大的焊接强度,最大焊接强度为 12.15 MPa 。之后随着激光功率的增加,焊接强度下降,这是因为激光单脉冲能量过大导致在玻璃内部产生了应力和裂纹,同时实验中发现当激光功率低于 3.00 W 时,玻璃不能实现焊接。如图 6(b)所示,在激光功率保持在 4.14 W 时,焊接强度随着激光重复频率的增加而下降,由表 1 中样品 2, 5, 6 可以得到激光重复频率增加导致单脉冲能量下降、材料非线性吸收降低、熔融区面积减小。

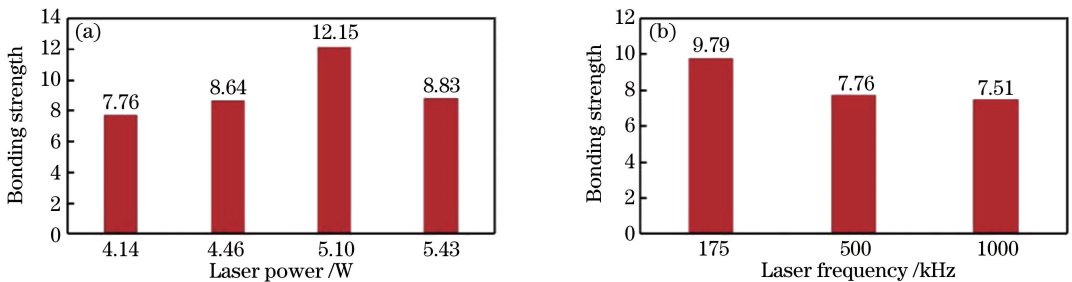


图 6 玻璃焊接强度的测量。(a) $NA=0.67$, $v=20\text{ mm/s}$, $f=500\text{ kHz}$; (b) $NA=0.67$, $v=20\text{ mm/s}$, $P=4.14\text{ W}$

Fig. 6 Measurements of glass welding stress. (a) $NA=0.67$, $v=20\text{ mm/s}$, $f=500\text{ kHz}$;

(b) $NA=0.67$, $v=20\text{ mm/s}$, $P=4.14\text{ W}$

另外,还对生活中常见的钠钙玻璃和铝硅酸盐玻璃进行了实验。实验之前对材料的处理如前所述,两片玻璃光学贴合之后进行超短脉冲激光玻璃焊接实验。因为铝硅酸盐玻璃和钠钙玻璃的热膨胀系数比石英玻璃大,所以选取较小的激光功率成功实现了玻璃之间的焊接,激光重复频率

和扫描速度分别保持在 500 kHz 和 20 mm/s 。如图 7 所示,图 7(a)为铝硅酸盐玻璃之间的焊接,激光功率为 1.28 W ;图 7(b)为钠钙玻璃之间的焊接,激光功率是 1.51 W 。如图所示,熔融区依然呈现水滴状,但是相比于石英玻璃,熔融区域内部没有产生空腔,但是铝硅酸盐玻璃焊接底部依然存在

长度为 $50\ \mu\text{m}$ 左右的缺陷,如图 7(a)中红色椭圆区域所示。图中红色线条指示了玻璃之间缝隙所在的位置。因此,针对不同成分材料,不同激光参

数和微加工参数对焊接质量的影响需要进一步研究和优化,寻找最优工艺参数,实现最大焊接强度。

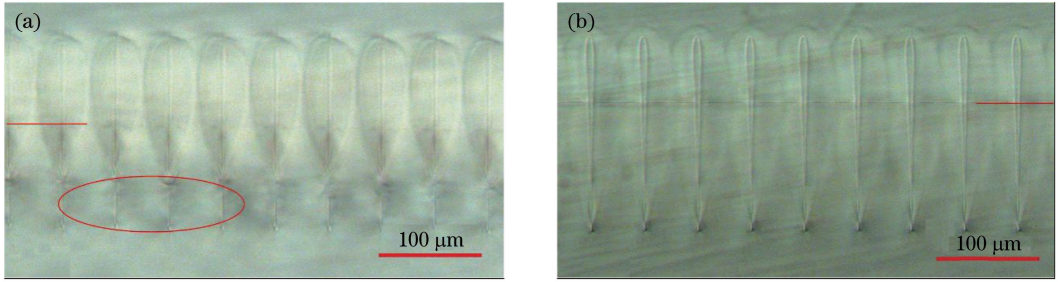


图 7 玻璃焊接焊缝端面图。(a) 铝硅酸盐玻璃($f=500\ \text{kHz}$, $P=1.28\ \text{W}$, $v=20\ \text{mm/s}$, $NA=0.67$);
(b) 钠钙玻璃($f=500\ \text{kHz}$, $P=1.51\ \text{W}$, $v=20\ \text{mm/s}$, $NA=0.67$)

Fig. 7 Cross section of glass welding seam. (a) Aluminosilicate glass ($f=500\ \text{kHz}$, $P=1.28\ \text{W}$, $v=20\ \text{mm/s}$, $NA=0.67$); (b) soda-lime glass ($f=500\ \text{kHz}$, $P=1.51\ \text{W}$, $v=20\ \text{mm/s}$, $NA=0.67$)

4 结 论

本实验中,运用超短脉冲激光在材料内部的热积累效应成功实现了石英玻璃之间、铝硅酸盐玻璃之间和钠钙玻璃之间的焊接。石英玻璃焊接熔融区域呈现水滴状,主要由 3 部分构成,包括顶部由于脉冲累积产生额外相差导致的圆形空腔、中间有利于焊接的熔融区以及底部光束成丝造成的线形损伤。在激光重复频率保持在 $500\ \text{kHz}$ 时,随着激光功率的增加,焊接熔融区域面积变大,焊接强度呈现先升后降的趋势,实验获得的最大焊接强度可以达到 $12.15\ \text{MPa}$ 。在激光功率保持在 $4.14\ \text{W}$ 时,随着激光重复频率的增加,焊接熔融区域面积和焊接强度都逐渐减小。焊接区域顶部空腔面积随着单脉冲能量的增大而增大,底部线形损伤会随着激光重复频率的增加而减弱。相比于石英玻璃之间的焊接,铝硅酸盐玻璃之间和钠钙玻璃之间成功焊接需要的能量较低,熔融区内部没有产生圆形空腔,但是铝硅酸盐玻璃底部仍然出现大约 $50\ \mu\text{m}$ 长的缺陷。对不同材料、不同性质的玻璃,激光参数和微加工参数对焊接质量的影响需要进一步探究和优化。

参 考 文 献

[1] Roth S, Cvecek K, Miyamoto I, *et al.* Glass welding technology using ultra short laser pulses[C]. SPIE, 2011, 7920: 792006.
[2] Richter S, Döring S, Tünnermann A, *et al.* Bonding of glass with femtosecond laser pulses at high repetition rates[J]. Applied Physics A, 2011, 103(2): 257-261.

[3] Bardin F, Kloss S, Wang C H, *et al.* Laser joining of glass to silicon using adhesive for MEMS packaging applications [C]. SPIE, 2006, 6107: 610702.
[4] Alexeev I. Characterization of shear strength and bonding energy of laser produced welding seams in glass[J]. Journal of Laser Micro, 2012, 7(3): 279-283.
[5] Lebugle M, Sanner N, Varkentina N, *et al.* Dynamics of femtosecond laser absorption of fused silica in the ablation regime[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(6): 063105.
[6] Miyamoto I, Cvecek K, Okamoto Y, *et al.* Internal modification of glass by ultrashort laser pulse and its application to microwelding[J]. Applied Physics A, 2014, 114(1): 187-208.
[7] 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.
[8] Richter S, Döring S, Peschel T, *et al.* Breaking stress of glass welded with femtosecond laser pulses at high repetition rates [C]. SPIE, 2011, 7925: 79250P.
[9] Watanabe T, 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.
[10] Tamaki T, Watanabe W, Itoh K. Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at $1558\ \text{nm}$ [J]. Optics Express, 2006, 14(22): 10460-10468.
[11] Miyamoto I, Cvecek K, Schmidt M. Evaluation of

- nonlinear absorptivity in internal modification of bulk glass by ultrashort laser pulses [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10714-10727.
- [12] Miyamoto I, Cvecek K, Okamoto Y, *et al.* Characteristics of laser absorption and welding in FOTURAN glass by ultrashort laser pulses [J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 22961-22973.
- [13] Hélie D, Bégin M, Lacroix F, *et al.* Reinforced direct bonding of optical materials by femtosecond laser welding [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2098-2106.
- [14] Cvecek K, Miyamoto I, Strauss J, *et al.* Sample preparation method for glass welding by ultrashort laser pulses yields higher seam strength [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(13): 1941-1944.
- [15] Luo F F, Song J, Hu X, *et al.* Femtosecond laser-induced inverted microstructures inside glasses by tuning refractive index of objective's immersion liquid [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2125-2127.
- [16] Qian J, Wang C W, Huang Y Y, *et al.* Ultrashort pulsed laser induced heating-nanoscale measurement of the internal temperature of dielectrics using black-body radiation [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(29): 8347-8351.
- [17] Richter S, Döring S, Burmeister F, *et al.* Formation of periodic disruptions induced by heat accumulation of femtosecond laser pulses [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15452-15463.
- [18] Richter S, Zimmermann F, Eberhardt R, *et al.* Toward laser welding of glasses without optical contacting [J]. *Applied Physics A*, 2015, 121(1): 1-9.
- [19] Cvecek K, Alexeev I, Miyamoto I, *et al.* Defect formation in glass welding by means of ultrashort laser pulses [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5(Part A): 495-502.
- [20] Richter S, Tünnermann A, Döring F, *et al.* Formation of disruptions in molten fused silica induced by heat accumulation of ultrashort laser pulses at high repetition rates [C]. *Lasers and Electro-Optics Europe, 2013 Conference on International Quantum Electronics Conference, 2013: CM_6_6.*
- [21] Cvecek K, Miyamoto I, Schmidt M. Gas bubble formation in fused silica generated by ultra-short laser pulses [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15877-15893.
- [22] Miyamoto I, Cvecek K, Okamoto Y, *et al.* Novel fusion welding technology of glass using ultrashort pulse lasers [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5(Part A): 483-493.