玻璃的激光焊接研究现状

陈长军[1,2*] 李 雷[1] 唐 建[1] 徐梦璇[1] 张 敏[1]

1. 苏州大学机电工程学院激光加工中心，江苏 苏州 215021
2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150001

[摘要]先进的激光焊接技术应用于焊接玻璃的技术有连续（CW）激光、ns 激光和超快（USP）激光进行了综述。采用连续激光焊接玻璃和玻璃的时候，无裂纹的焊缝较难获得，这是因为熔池具有自由的表面。在采用 USP 激光进行焊接的时候，可以得到无裂纹的玻璃，不管玻璃的热膨胀系数是啥样的，只要玻璃之间的间隙小就行，这是因为超快激光（USP）的非线性吸收过程得到的熔池具有非自由的表面，因此其收缩应力得到了抑制。技术上的努力来增加间隙也一样没有裂纹。USP 激光焊接显示异种材料玻璃/金属或玻璃/Si 之间的焊接也能通过 ns 和 USP 激光焊接来抑制金属（或 Si）熔池的飞溅而实现无裂纹焊接。
[关键词]激光焊接；热应力；裂纹；熔池；自由表面；光学接触；异种材料焊接；机械性能
DOI：10.33142/nsr.v1i2.14021 中图分类号：TQ171.73 文献标识码：A

Research Status of Laser Welding of Glass

CHEN Changjun[1,2*], LI Lei[1], TANG Jian[1], XU Mengxuan[1], ZHANG Min[1]
1. Laser Processing Center, School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu, 215021, China
2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150001, China

Abstract: Advanced laser welding technologies applied to welding glass, including continuous (CW) laser, ns laser, and ultrafast (USP) laser, were reviewed. When using continuous laser welding to weld glass, it is difficult to obtain crack free welds because the molten pool has a free surface. When using USP laser for welding, crack free glass can be obtained, regardless of the thermal expansion coefficient of the glass, as long as the gap between the glasses is small. This is because the molten pool obtained by the nonlinear absorption process of ultrafast laser (USP) has a non free surface, thus suppressing its shrinkage stress. Technical efforts to increase the gap are also without cracks. USP laser welding shows that welding between dissimilar materials such as glass/metal or glass/Si can also achieve crack free welding by suppressing the splashing of metal (or Si) melt pool through ns and USP laser welding.
Keywords: laser welding; thermal stress; crackle; molten pool; free surface; optical contact; welding of dissimilar materials; mechanical performance

引言

玻璃广泛地应用在不同的工业领域当中，如医疗、光学、电子等工业。这是因为玻璃具有优异的物理性能和化学性能。在玻璃的应用实践过程中，对玻璃进行连接（焊接）是不可避免的事情。目前存在多种玻璃的连接方式，如采用胶水进行胶接、阳极键合、采用玻璃粉进行连接、光学接触和共晶结合、扩散连接和焊接等技术[1-5]。然而，这些技术中的大多数都具有不能获得满意的连接接头的弊端，这是因为这些工艺本身固有的缺陷、工艺的弊端、较差的冲击抗力和需要高温加热、有限的空间分辨力等等。传统的连接工艺，存在的问题在于会引起早起失效、容易产生裂纹、漏气、精度差和光漂白等问题。而超快激光焊接则可以克服这些问题，这是因为超快激光具有内在的高峰值强度[6-7]，可以实现直接微连接而不需要添加中间过渡层和对环境没有不利的影响[8-10]，从而满足了日益增长的微型化和环境友好的需求。

最为有效的连接技术在于可以提供一体连接结构的具有高通量和高空间分辨率的焊接工艺。然而，尽管现有的焊接工艺具有非常独特的优势，但在焊接玻璃的时候却存在许多困难，这是因为玻璃焊接的时候，由于玻璃的特性，导致玻璃非常容易由于热应力而产生裂纹。激光焊接获得无裂纹的玻璃封接体非常不容易，这是因为诸如二氧化硅玻璃等的热膨胀系数特别小，而连续激光焊接玻璃液早有报道。

随着超快激光（USP）技术的快速发展，一些革新的基于非线性离子化加工的材料加工技术得到了发展和应用。在玻璃焊接领域，USP 激光技术的应用，也将难以焊接的玻璃变为可以实现焊接的材料。USP 激光焊接玻璃，不仅实现了无裂纹的焊接，还实现了小尺寸的熔融石英玻璃和硼硅酸盐玻璃的焊接。但是，采用 USP 激光焊接时得到无裂纹的脆性玻璃焊接体的背后的机理尚不清楚。目前的解释是用热应力模型来解释的。该模型认为，收缩应力是激光焊接玻璃时产生裂纹的主要原因，如果熔池非线性吸收的 USP 激光焊接时得到非自由表面，收缩应力就会得到抑制。

1 玻璃焊接的模型及机理

玻璃可以使用连续激光焊接，也可以采用超快激光焊接，玻璃是不透明的和透明的材料，如图 1 所示。在连续

的激光焊接玻璃的时候，激光能量作用到不透明的玻璃表面，玻璃表面开始线性地吸收激光能量，从而得到一个自由表面的熔池（见图 1[a，b]），这一点同金属的激光焊接相类似[11]。采用连续激光焊接的时候得到的是宏观的组织，这是因为外部施加的能量导致的温度场是能量在热扩散和连续激光之间的平衡。

热膨胀系数比较小的玻璃中可以得到无裂纹的玻璃焊接体，这是因为基于热应力模型的理论所产生的收缩应力比较小。另外一方面，在此种情况下，即使玻璃之间的间隙比较大的时候也能实现焊接，如添加焊料玻璃就可以实现。这一点在超快玻璃焊接的时候是不行的。连续激光焊接可以分为两种类型：分别为热传导焊接和匙孔焊接，其分类主要取决于熔池表面的温度。热传导焊接的时候表面的温度小于玻璃的沸腾温度，玻璃内部的材料加热是自基材表面的热传导形成的。而匙孔焊接时玻璃表面的温度远远大于玻璃的熔点。在这些过程中，熔池的表面被压缩而由于蒸汽反冲压力而产生一种类似钥匙的形状，这会导致几千倍的体积膨胀，从而从液相向气相转变。

连续激光焊接可以分为两种类型，即热传导焊接图 1（a）和匙孔焊接（b）[11-12]，这主要取决于熔池表面的温度。在热传导焊接的时候，熔池的温度小于玻璃的蒸发温度，此时玻璃内部是以热传导的模式进行的。而在匙孔焊接的时候熔池表面的温度远远高于玻璃的气化温度。在这个时候，熔池的表面由于蒸发反冲压力而产生气孔[13]致其液体到气相体积的成千上万次的膨胀。在这个焊接模式下，玻璃内部的加热是由于激光束的原因，导致可以在一个单道就能实现后玻璃的焊接[13]。

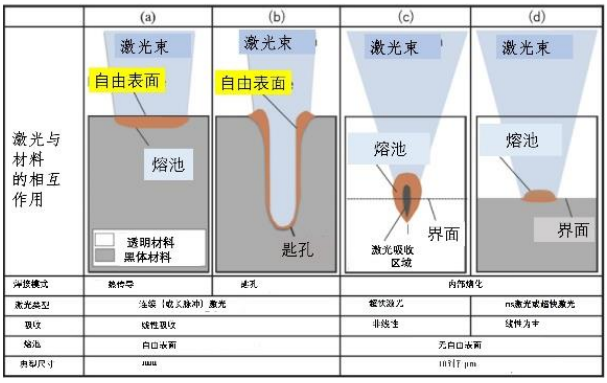

图 1　在激光焊接玻璃的时候激光和材料的相互作用以及典型的焊缝尺寸，此时熔池分别为：（a，b）自由表面；（c，d）非自由表面的熔池

在超快激光焊接玻璃的时候，此时的玻璃是透明的，其对激光能量的吸收为非线性吸收，区域范围在焦点附近。此时的激光能量非常高。足以实现非线性电离。因此就只有界面附近的材料会被选择性地熔化而不需要添加额外的吸收材料。结果就形成了一个非自由表面，见图 1（c）。这明显不同于连续激光焊接时的自由表面。在这一焊接模式下，无裂纹的玻璃焊接就可以在无论玻璃的热膨胀系数是啥样的都可以实现焊接，这是因为此时的应力收缩被激光焊接所抑制[14]。但同连续激光焊接不同的是，此时两个玻璃之间的间隙要求足够的小是避免等离子体消融和在熔池上的自由表面的形成。除了非线性吸收使得焊缝尺寸小于连续激光之外，还使得微焊接技术非常吸引人的注意，尤其是在实验室芯片或微电子封装的领域中的应用备受青睐。

下图 2 所示为采用几种不同的数值孔径的激光进行焊接时得到的从顶部往下观察所得到的熔池[15]。从该图 2 可见，当数值孔径（N.A.）为 0.65 的时候可以得到无裂纹的大尺寸的熔池。然而，裂纹会在熔池的底部生成，熔池的尺寸同数值孔径为 0.45 和 0.65 相比要小。在数值孔径（N.A.）为 0.85 的时候，尽管激光束此时也是高度聚焦的，得到的熔池的尺寸也要比数值孔径为 0.45 和 0.65 的时候要小。

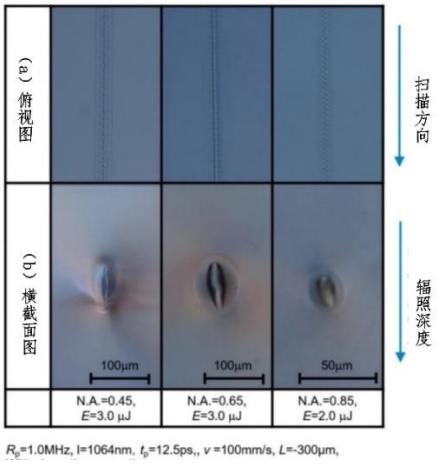

图 2　在不同数值孔径的时候得到的熔池的顶部俯视图和横截面

下图 3 为沿着扫描方向得到的熔池[15]。在实验中，激光束在顶部表面的 300μm 以下进行辐照，数值孔径通过球面像差来校正，脉冲速率为 1.0MH，扫描速度为 100 mm/s。可见数值孔径的变化影响到熔池的面积，尤其是在激光扫描开始的时候。低的数值孔径，如 0.45 会导致熔池区域底部呈现出显著的穗形形状。这是因为吸收从顶部的边缘到底部的熔池显著降低。此外，在最高点的吸收点几乎保持不变。并且在开始的时候熔池区域的高度几乎保持不变。

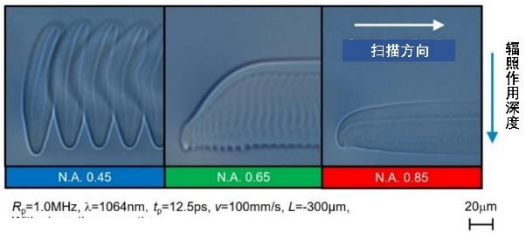

图 3　数值孔径的变化对熔池面积的影响[15]

熔池区域的尺寸和形状取决于激光参数和样品的移动速度。研究人员系统地研究超快激光对材料的改性，激光扫描速度为 0.5 到 20 mm/s，脉冲能量的变化范围为

100nJ 到 5μJ，N.A.值（数值孔径）为 0.40 或 0.55，频率为 1MHz。激光焊接后的横截面比较典型地受到熔化的硅的改性影响，结果见下图 4 所示。该图 4 中，激光脉冲从左到右分别为 0.45、0.37、0.25、0.21 和 0.16μJ，扫描速度是一样的，为 0.5 mm/s。

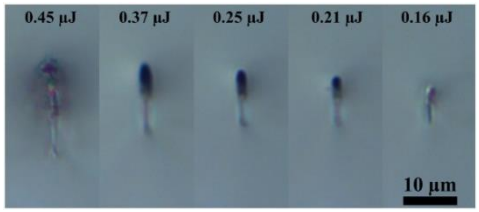

图 4　在不同的激光脉冲作用下，脉冲激光焊接熔融的二氧化硅的横截面的微观形貌，焊接速度均为 0.5mm/s

超快激光可以实现无裂纹的玻璃/玻璃焊接，即使是两者具有较大的热膨胀系数。激光能量在玻璃中的吸收为非线性吸收从而提供了生成二元结构的途径，而在界面附近观察到等温线的不连续性。

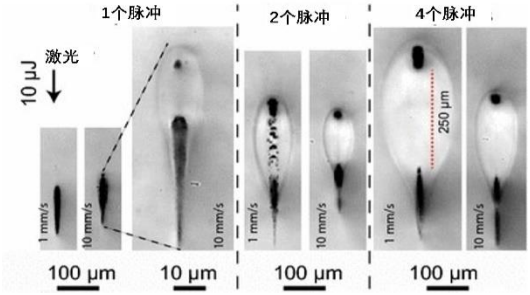

图 5　激光焊接时在脉冲为 10μJ 的时候，在不同扫描速度和脉冲数下得到的焊接结果

激光脉冲对熔池也有一定的影响。研究人员采用激光在不同的脉冲数下和不同的扫描速度下，在激光脉冲能量为 10μJ，离焦量在样品表面之下为 600μm 进行单线扫描，其结果见下图 5 所示[17]。图 5 即为熔池的体积随着脉冲次数的增加而变大的结果。当使用一个单脉冲的时候，激光重复频率只有 200kHz。当激光脉冲数增加的时候熔池的熔化体积是增加的。当使用单脉冲的时候，脉冲重复频率为 200KHz。然而，即使是在脉冲间隔为 5μs 这个情况下，热积累也会由于巨大的脉冲能量而导致玻璃的熔化，其放大图可以见下图 5 所示[17]。当使用 2 个或者 4 个脉冲进行作用的时候，由于非常短的脉冲只有仅仅 20ns 和增加的平均功率，会由于额外的热积累而导致改性的尺寸得到显著的增加。熔池的尺寸也在较低的扫描速度下形成，这是因为此时具有较大的空间脉冲重叠率。在上部的改性终端，可以观察到黑色的点。这些圆形的点含有气泡和中断。这一现象在熔融的二氧化硅中也会观察到这一现象[18]。这一中断主要由激光熔化时所造成的快速淬火效应所形成的。然而，使用 4 个脉冲的时候，几乎整个改性区都不再含有这些中断（长度变为 250μm），而是形成了均匀的熔体和凝固后的材料呈现出较低的内应力，这一特征更适宜进行透明材料的焊接。

图 6 为在玻璃之间的间隙为 4μm 的激光焊接结果。激光诱导的改性区的精确位置定义为在界面处的熔池宽度。当改性的尖端位于界面的时候，如图 6（a）所示，焊缝的宽度非常小。当激光改性的区域稍微往上提（升高）的时候，焊缝的宽度增加。比较有趣的是，改性区域本身的外部形状看起来几乎不受玻璃之间间隙的影响。尽管熔化的材料的宽度在上部区域要比下部区域要小。如果改性的材料的均匀熔化部分（没有呈现出扰乱）位于界面，焊缝几乎同改性本身的区域一样大。

在这一情况下，玻璃之间的间隙在改性的时候得到闭合，如下图 6（b）所示。即使是在诱导改性区域的底部[图 6（a）中的右侧区域]能够填充间隙。然而，这一窄的焊缝不足以拽动周围的间隙。

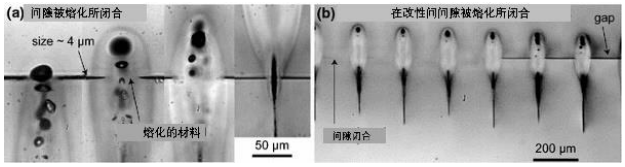

图 6　在不同的离焦量作用下得到的激光焊接玻璃的微观图

2 玻璃焊接的性能及其应用

在相同的焊接参数下，采用两种不同的封接形式来形成封闭的焊接区域，即矩形和圆形。矩形的边长和圆形的直径均为 1mm，圆形的焊缝宽度为 0.3mm，线之间的间距为 0.01mm。焊接后得到的样品实物图见下图 7（a）和（d）所示。将焊接后的样品放入水中进行封接后的气密性测试，结果表明在 1 个小时的时间内气密性均很好。在封接区域没有水渗入进来[图 7（b）和 5（e)]。当浸泡的时间超过 1 小时，矩形焊接的样品中开始出现有水渗入到封接的区域当中，如图 7（c）所示。而圆形的封接区域在超过 1 个星期后依然保持着较好的封接性能，如下图 7（f）所示[19]。

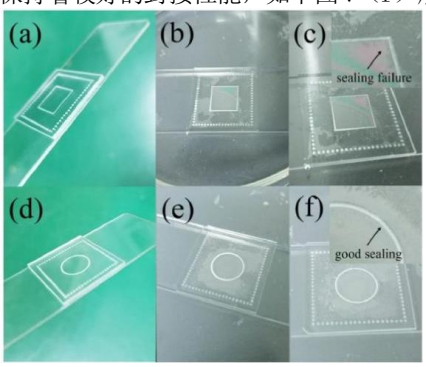

图 7　封接后的性能测试：（a）矩形的激光焊接样品；（b）矩形焊接样品焊接后在水中浸泡 1 下时候的结果；（c）在水中浸泡 1 小时后失效的样品；（d）圆形的激光焊接样品；（e）圆形的激光焊接样品焊接后在水中浸泡 1h 后的结果；（f）圆形焊接样品在焊接后在水中浸泡一个星期后依然保持着良好封接性能的结果

如华南师范大学的学者采用 515nm 的皮秒激光在振镜的作用下，以光学接触来焊接玻璃和硅，得到了无裂纹的焊接体，边缘没有破坏和飞溅，得到的断裂强度为 122MPa。焊接后形成了晶相（SiO_2），并且 Si 和 O 在焊接区域呈现出梯度分布[20]。这一结果显示在激光作用下发生了物质的混合和相互扩散。

波长为 515nm 的皮秒激光采用焦点位于界面之上、位于焦点和位于焦点之下三个位置进行焊接玻璃和硅，两者采用光学接触的方式，采用的焊接参数为 200kHz，示意图见下图 8 中的（c）。超短激光的脉冲能量聚焦在两者材料之间的界面的时候，在玻璃中诱导产生多光子电离，电离的自由电子的速度会在吸收激光的光子能量后得到加速。然后电子同其他的原子相碰撞。电子和光子的耦合是离子和没有离子化的区域的温度升高到材料的熔点，从而实现了材料的成功焊接。如下图 8（b）所示。下图 8（a）显示的为焊接区域得到的泪滴状结构。

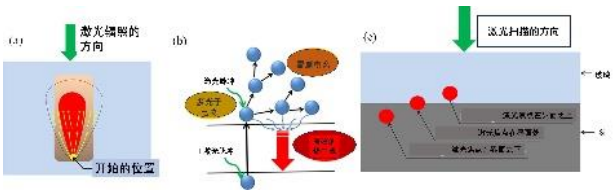

图 8 （a）泪滴结构（Teardrop structur）；（b）超快激光脉冲的非线性吸收；（c）在不同焦点位置进行焊接时，焊接材料实现光学接触的示意图

激光焊接后的样品断裂强度其随着焦点位置、扫描速度和激光功率的变化的结果见下图 8 所示[20]。同材料的原始断裂强度（玻璃和单晶硅）相比较，焊接后样品的断裂强度相对较低，显示原始的材料在激光作用后受到了激光能量的加工的影响。损伤机理和对焊接后性能的影响需要在实验设计的时候作进一步的改善。

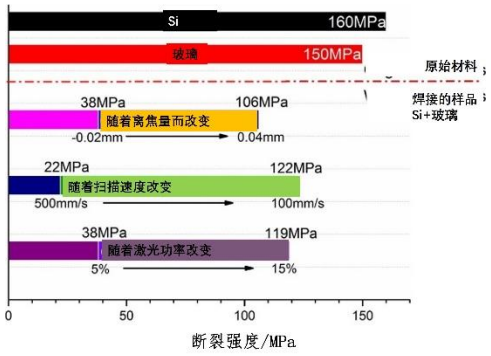

图 9 激光焊接后样品的断裂强度随着焦点位置、扫描速度和激光功率的变化图

为了进一步地测试两种材料焊接后的气密性，对封接后的样品的一个角浸入到水中来看是否会穿透进行封接的区域中。下图 10[21]则显示了样品在激光进行矩形区域的焊接后的样品，将其顶部的左侧放入水中，发现水并不会进入中心区域。这是因为中心区域被矩形的激光焊缝所屏蔽。因为实际应用过程中，封接的区域不会仅仅只有液体，同时还有可能去封接气体。此外，底部表面的玻璃盖板或者是顶部的底部基材具有涂层，采用激光焊接进行了进一步的密封。这些涂层可以在一侧涂覆，也可以在两侧涂覆。这一涂层可以是任何光学透明材料和填充物，这些填充物都是在实际应用过程中需要保护的对象。这样可以在玻璃上施加单一层或者多层甚至是三维的涂层，从而满足了不同的工业应用。

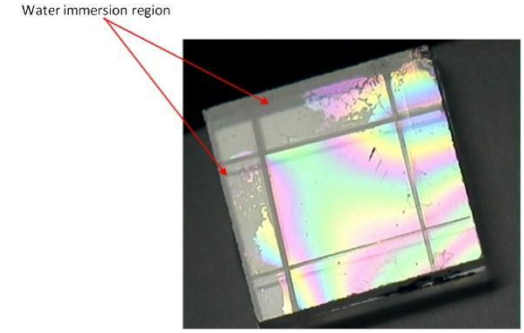

图 10 使用相机拍摄到的采用 USP 激光进行焊接后的样品在浸泡在水中，顶部左侧，由于封接效果好而水并不会浸入中心区域

采用 USP 激光焊接技术对玻璃石英玻璃组装起来形成保护帽已经在德国通快激光公司的激光器中得到应用[22-23]。这一应用是将直径约为 0.1mm 的光纤的末端封闭起来以防止同脏东西接触。以前这个位置是采用胶水进行封接的，采用胶水进行封接的话，存在的问题就是在玻璃的边缘并不干净（胶水的存在的缘故），同时还有可能会有少量的胶水在进行胶水封接的时候而在内壁存在。这一经济的新型的玻璃焊接工艺不仅是光学透明的，而且还不再受到脏东西的污染。这一工艺在 2016 年就已经工业化应用了。这一应用是将光纤使用一个带玻璃盖子的插头，厚度为 6mm 来保护起来，可以传输功率高达 6kW 的激光到机器人上来实现激光焊接和切割金属板。

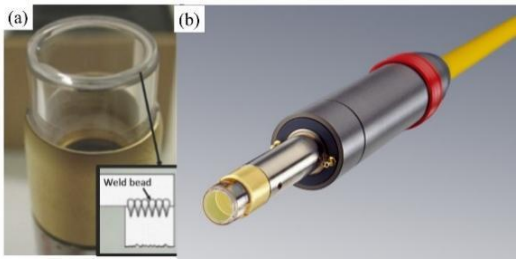

图 11 （a）采用超快激光焊接的玻璃保护罩；（b）焊接后得到的通快激光公司用于自己生产的激光光缆保护帽

3 结束语

采用 USP 激光对光学透明材料进行焊接是非常有优势的。同时封接后具有优异的机械性能和密封性能。这一优异的特性导致其在半导体工业园、精密光学器件的制造以及航空航天等领域具有非常显著的应用。

后续为了促进激光焊接玻璃的应用，在焊接后应力的

评估和激光工艺参数同焊接后性能以及应力之间的关系的研究上非常重要。高重复脉冲频率和脉冲能量，快速的焊接速度和高效的封接效率是在半导体工业和光学器件组装制造领域得到广泛深入应用的关键。

基金项目：江苏省重点研发计划资助，编号：BE2021049，先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金资助，资助编号：AWJ-23Z01。

[参考文献]

[1]C.Iwamoto.Microstructure of aluminum/glass joint bonded by ultrasonic wire welding[J].Metall.Mater.Trans.A,2014(45):1371-1375.

[2]G.Zhang,J.Bai,W.Zhao,et al.Interface modification based ultrashort laser microwelding between SiC and fused silica[J].Optic.Express,2017(25):1702-1709.

[3]A.Tan,F.Tay.Localized laser assisted eutectic bonding of quartz and silicon by Nd:YAG pulsed-laser[J].Sensors and Actuators A,2005(120):550-561.

[4]L.Pohl,P.von.itzendorff,E.Chatzizyrli,et al.CO_2 laser welding of glass: numerical simulation and experimental study[J].International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017(90):397-403.

[5]A.Cozma,B.Puers. Characterization of the electrostatic bonding of silicon and Pyrex glass [J].Journal Of Micromechanics And Microengineering,1995(2):98-102.

[6]A.Horn,I.Mingareev,A.Werth,M.Kachel,U.Brenk.Investigations on ultrafast welding of glass - glass and glass - silicon[J].Applied Physics A,2008,93(1):171-175.

[7]D.Hélie,F.Lacroix,R.Vallée. Reinforcing a direct bond between optical materials by filamentation based femtosecond laser welding[J].Journal of Laser Micro/Nanoengineering,2012,7(3):284-292.

[8]T.Tamaki,W.Watanabe,J.Nishii,et al. Welding of transparent materials using femtosecond laser pulses[J].Japanese Journal of Applied Physics,2005,44(22):687-689.

[9]T.Tamaki,W.Watanabe,K.Itoh. Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at 1558 nm[J].Optics Express,2006,14(22):10460-10468.

[10]H.Tan,J.A.Duan. Welding of glasses in optical and partial-optical contact via focal position adjustment of femtosecond-laser pulses at moderately high repetition rate. [J].Applied Physics A,2017,123(9):481.

[11]I.Miyamoto,and G.A. Knorovsky:"Laser mi-crowelding" in "Microjoining and nanojoining, "ed.by Y.Zhou,[J].Woodhead Publishing,Cambridge,2008,5(10):345.

[12]L. Pohl, P. von Witzendorff, E. Chatzizyrli, O. Suttmann, and L. Overmeyer. CO2 laser welding of glass: numerical simulation and experimental study[J].International Journal of Advanced manufacturing Technology,2017(90):397-403.

[13]Kroos,U.Gratzke,and G. Simon. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding[J].Journal of Physics D:Applied Physics,1993,26(3):474-480.

[14]MIYAMOTO I,CVECEK K,SCHMIDT M.Crack-free conditions in welding of glass by ultrashort laser pulse[J].Optics Express,2013,21(12):14291-14302.

[15]Ouyang,Z.,Okamoto,Y.Ogino,Y,Sakagawa T,Okada,A.Influence of Numerical Aperture on Molten Area Formation in Fusion Micro-Welding of Glass by Picosecond Pulsed Laser [J].Applied Sciences,2019(9):1412.

[16]S.Richter,F.Zimmermann,A.Tünnermann,and S.Nolte. Laser welding of glasses at high repetition rates - Fundamentals and prospects[J].Optics and Laser technology, Laser Tech,2016(83):59-66.

[17]Richter,S,Zimmermann,F,Eberhardt,R. et al.Toward laser welding of glasses without optical contacting[J].Applied. Physics,2015(121):1-9.

[18]K. Cvecek, I. Miyamoto, J. Strauss, M. Wolf, T. Frick, and M. Schmidt. Sample preparation method for glass welding by ultrashort laser pulses yields higher seam strength[J].Applied Optics,2011,50(13):1941-1944.

[19]CHEN Hang,DUAN Jun,YANG Ze-qi,et al.Picosecond laser seal welding of glasses with a large gap[J].Optics Express,2019,27(21):30297-30307.

[20]HUANG Huan,YANG L M,LIU Jian.Ultrashort pulsed fiber laser welding and sealing of transparent materials[J].Applied Optics,2012,51(15):2979-2986.

[21]Elke Kaiser.Laser Welding of Glass Replaces Glueing Procedure[J].Laser Technik Journal,2016,13(3):23-25.

作者简介：陈长军（1976.3—），男，毕业院校：中国科学院金属研究所；专业：材料学；当前就职单位：苏州大学，职称级别：教授从事激光增材制造与再制造和激光焊接的科研与产业化。