

建筑用玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金激光焊接机理研究

邹涛^{1,2} 陈长军^{1*} 张敏¹ 刘星¹

¹苏州大学机电工程学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021

²库卡工业公司, 江苏 苏州 215300

摘要 开展了玻璃/不锈钢和玻璃/钛合金的激光焊接试验研究,重点分析了焊缝的断口形貌、截面形貌及焊缝处物相的差异。结果表明,玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金焊接的机理类似,焊缝中玻璃与金属形成的镶嵌结构及分布在界面处的粘附物是两者能连接的主要原因;玻璃与钛合金的线膨胀系数差异较小是玻璃/钛合金焊接件拉断力高的主要原因;激光作用下玻璃与钛合金形成化学结合,生成化合物 Ti_5Si_3 ,而玻璃与不锈钢主要为机械混合。

关键词 激光技术;透射焊接;拉断力;玻璃;不锈钢;钛合金

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0902002

Study on Laser Welding Mechanisms of Glass/Stainless-Steel and Glass/Titanium-Alloy Materials

Zou Tao^{1,2} Chen Changjun¹ Zhang Min¹ Liu Xing¹

¹Laser Processing Research Center, School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

²KUKA Industry Company Limited, Suzhou, Jiangsu 215300, China

Abstract An experimental study on the laser welding of glass/stainless-steel and glass/titanium-alloy materials is conducted, and the differences in fracture morphology, sectional shape, and weld phase of welding parts are emphatically analyzed. The results indicate that, as for the glass/stainless-steel and glass/titanium-alloy materials, their welding mechanisms are similar, and the mosaic structure in the welds of glass/metal material and the adhesion substance at the interface play major roles in connecting these two kind of materials. The linear expansion coefficient of glass/titanium-alloy material is small, which is the main reason why the breaking strength of welding parts between titanium-alloy and glass is high. Chemical adhesion takes place in laser welding of glass/titanium-alloy material, which produces Ti_5Si_3 compound. In contrast, as for the glass/stainless-steel material, mechanical mixing occurs mainly.

Key words laser technique; transmission welding; breaking strength; glass; stainless steel; titanium alloy

OCIS codes 140. 3538; 160. 2750; 160. 3900

1 引 言

激光辅助连接中的透射焊接技术已广泛应用到塑料与塑料、塑料与金属、玻璃与玻璃、玻璃与金属等焊接领域^[1-3]。目前玻璃与金属的连接所用的激光主要为短脉冲、超短脉冲激光^[4-6],这类激光脉宽短、热影响区小。Flury 等^[7]利用激光诱导产生反向迁移技术,实现了在玻璃基体上制备金属格子。Itoh 等^[8]利用飞秒激光对铜基体和热膨胀系数相差 3.6 倍的硼硅酸盐玻璃进行焊接,焊后进行拉伸强度测量,发现焊接件接

收稿日期: 2016-04-08; 收到修改稿日期: 2016-05-16

基金项目: 苏州市工业基础项目(SYG20119)

作者简介: 邹涛(1977—),男,本科,主要从事机器人、自动化和激光加工等方面的研究。

E-mail: 13818809291@126.com

* 通讯联系人。E-mail: chjchen2001@aliyun.com

合牢固。Utsumi 等^[9]利用短脉冲激光对直径仅为 100~150 μm 的铜球与硼硅酸盐玻璃进行微焊接,发现剪切强度随着激光脉冲能量的增加先升高后降低,剪切强度则一直降低,玻璃与铜球的剪切强度最大值为 0.69 MPa。Quintino 等^[10]利用飞秒激光实现了 NiTi 薄片与玻璃的连接,沉积的颗粒在刻痕测试中没有完全从表面脱落,表明了其与玻璃基体形成了良好的接合。涂冶等^[11]利用掺镱单模光纤激光对高硼硅玻璃与可伐合金进行焊接,结果表明金属表面形成的氧化物在二者连接的过程中起到关键作用,精确控制氧化层的厚度及成分才能实现可靠的连接。

综上所述,目前对玻璃与金属激光焊接的研究主要集中在连接的可行性,而对两者的界面结构、连接机理等研究不够深入。焊接工艺参数对焊接件拉断力的影响在前期试验中已有初步研究^[12],本文主要分析玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金的连接机理及激光作用下两种金属材料与玻璃焊接的差异。

2 试验材料及方法

试验所采用的玻璃为建筑用普通玻璃,组成物质(质量分数)为 SiO_2 (70%~73%), Al_2O_3 (0~3%), CaO (6%~12%), MgO (0~4%), Na_2O (12%~16%), 金属材料为 304 奥氏体不锈钢和钛合金 Ti-6Al-4V (6%, 4% 分别指对应组分所占的质量分数)。

试验所用的激光器为 Nd:YAG 激光器(MD300, 福克斯激光科技有限公司, 中国), 激光波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 0.1~20 ms, 最大平均功率为 300 W。试验采用图 1(a)所示的透射焊接搭接方式, 焊接道数为 3。玻璃厚度和金属片厚度相差较大, 在焊后焊接件拉断力测试中需要在金属侧固定垫块, 在玻璃外围套金属部件, 使两端的厚度保持一致, 如图 1(b)所示。利用冷场发射扫描电子电镜(SEM, S-4700, 日立公司, 日本)观察玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金典型焊接件断口及截面形貌, 采用 X 射线衍射仪(XRD, X'Pert-Pro MPD, 帕纳科公司, 荷兰)观测焊缝物相。

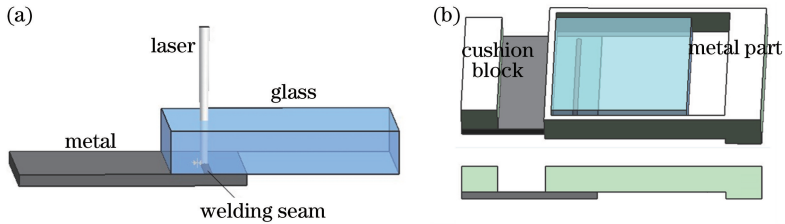


图 1 试验方案。(a) 焊接; (b) 拉断力测定

Fig. 1 Experimental schemes. (a) Welding ; (b) tensile test

3 试验结果及分析

3.1 焊缝断口形貌

玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金焊接的焊接参数为功率 120 W、脉宽 2.5 ms、频率 10 Hz、离焦量 0 mm, 玻璃/不锈钢焊接件焊缝的断口形貌如图 2 所示。图 2(a)所示为焊接件玻璃侧断口形貌, 从图中可见激光辐照区呈现明显的三道焊线。脉冲激光器出光的不连续性导致每道焊线上可观察到不连续的圆形光斑, 且激

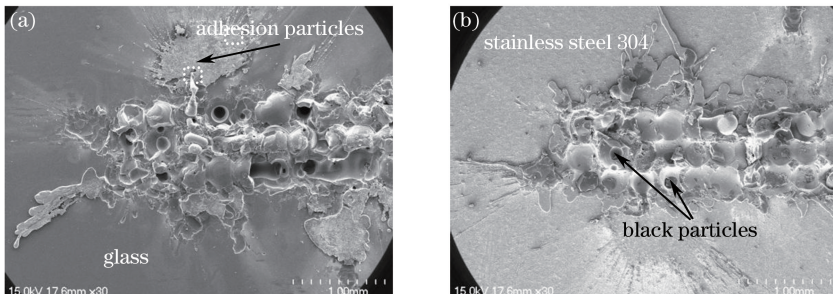


图 2 玻璃/不锈钢焊接件断口形貌。(a) 玻璃侧面; (b) 不锈钢侧面

Fig. 2 Fracture morphology of glass/stainless-steel welding part. (a) Glass fracture; (b) stainless-steel fracture

光辐照区为凹凸不平状,部分孔洞呈很规则的圆形。激光辐照区周边出现了大小及分布无明显规律的不规则片状粘附物,部分粘附物被剥离时形成较浅的凹陷。图 2(b)所示为焊接件不锈钢侧断口形貌,不锈钢表面也呈现凹凸不平,附有一定量的粘附物。激光辐照区有一些黑色颗粒物,仔细观察发现其与玻璃表面的孔洞对应,表明这部分物质在拉断时是从玻璃侧脱离并粘附到不锈钢侧,因此玻璃表面形成了孔洞。从断口形貌中可发现玻璃侧凸起部分多,不锈钢侧凹陷部分多,说明焊接件大部分是在不锈钢母材焊缝接合处或焊缝中发生断裂。

玻璃/钛合金焊接件焊缝的断口形貌如图 3 所示,图 3(a)所示为焊接件玻璃侧断口形貌,可见激光辐照区呈现深沟状,辐照区周边出现片状粘附物。图 3(b)所示为焊接件钛合金侧断口形貌,激光辐照区整体呈山脊状,三道焊线及脉冲点的痕迹较模糊。由图 2、3 可知,玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金焊接件断口形貌有明显区别,玻璃/不锈钢焊接件大部分是在焊缝与不锈钢母材接合处附近或焊缝中部发生断裂,而玻璃/钛合金焊接件是在焊缝与玻璃母材接合处发生断裂,钛合金一侧较完整。

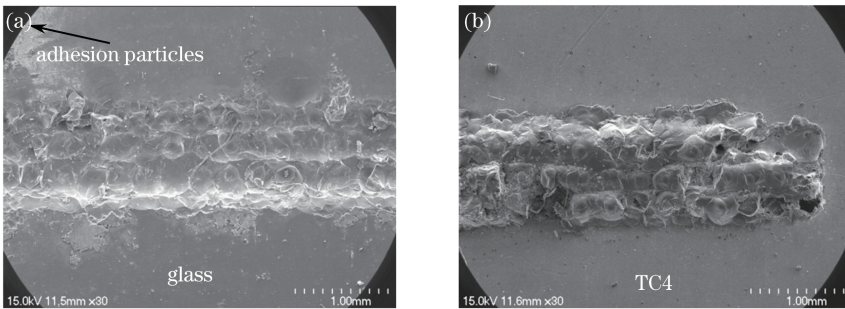


图 3 玻璃与钛合金焊接件断口形貌。(a) 玻璃侧; (b) 钛合金侧

Fig. 3 Fracture morphology of glass/titanium-alloy welding part. (a) Glass fracture; (b) titanium-alloy fracture

3.2 焊缝截面分析

将玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金焊接件沿垂直于焊缝方向剖开,所得截面如图 4 所示。由图 4(a)可见,玻璃与不锈钢在激光作用下都出现了熔化,玻璃熔入不锈钢表层的深度及玻璃层熔化的厚度约为 $150\ \mu\text{m}$;同时可以观察到截面颗粒脱落造成的大孔洞;界面处有金属色泽颗粒,一半嵌在玻璃层,另一半嵌在不锈钢层。图 4(b)所示为玻璃与钛合金焊接件截面形貌,玻璃与钛合金发生了相互掺杂渗透。玻璃熔入到钛合金层致使玻璃与金属混合颗粒超出了界面线,并且观察到焊缝与钛合金母材接合紧密。由于玻璃层与焊缝的接合较弱,所以断裂发生在焊缝与玻璃母材接合处,即观察到玻璃断口呈深沟状而钛合金侧呈山脊状。从图中也可看出,只有部分玻璃与部分金属发生了相互渗透。这点与激光透射焊接塑料明显不同,由于塑料之间物理化学特性差异小,所以焊接件焊缝很均匀^[13-14]。玻璃与金属性质的不同造成了长脉冲激光焊接玻璃与金属难度更大,焊接件抗拉应力不高。

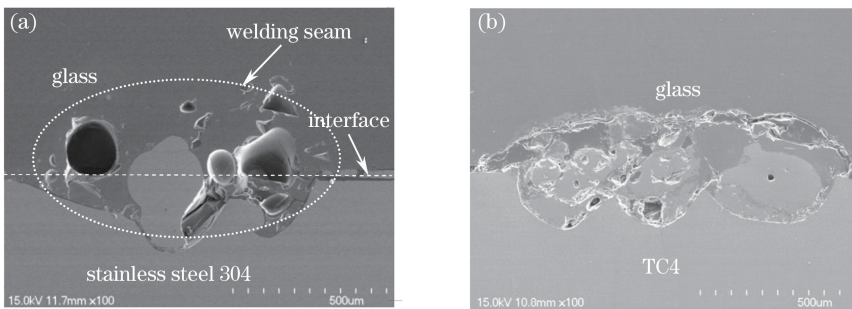


图 4 焊接件截面形貌。(a) 玻璃/不锈钢; (b) 玻璃/钛合金

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of welding parts. (a) Glass/stainless-steel; (b) glass/titanium-alloy

分别选取玻璃的主要元素 O、Si 和不锈钢的主要元素 Fe、Cr 及钛合金的主要元素 Ti、Al,对焊接件焊缝与这两种母材接合处进行元素线扫描,结果如图 5、6 所示。图 5(a)所示为玻璃与不锈钢母材接合处放大图,由图可见玻璃与不锈钢接触的轮廓呈弧形,玻璃进入到不锈钢层中。图 5(b)表明接合处有一过渡区,过

渡区包含有 O、Si、Fe、Cr 元素,说明玻璃与不锈钢在焊缝与金属母材接合处出现元素稀释与互溶,过渡区的长度约为 $2.5\ \mu\text{m}$ 。图 6 (a)所示为玻璃与钛合金母材接合处放大图,可见玻璃与母材接合处也呈现因激光作用而形成的凹陷状。图 6(b)表明在接合处含有 Ti 元素的区域中同时含有一定量的 Si、O 元素,元素在接合处发生了扩散互溶,过渡区的长度约为 $7\ \mu\text{m}$,比玻璃与不锈钢焊接件的过渡区距离要长。

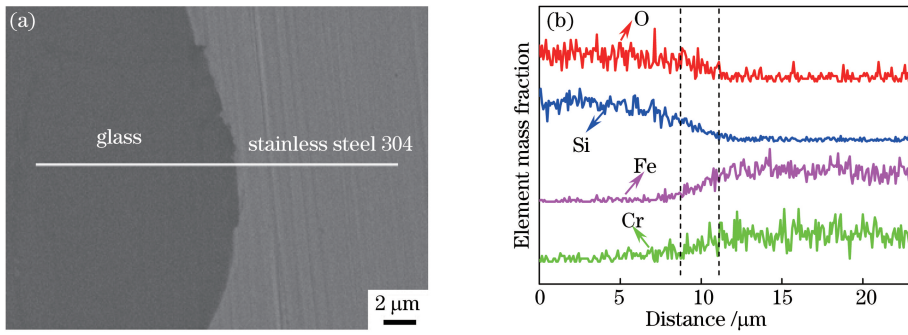


图 5 玻璃与不锈钢母材接合处元素线扫描。(a) 界面; (b) O、Si、Fe、Cr 元素分布

Fig. 5 Line scanning of elements at glass/stainless-steel interface. (a) Interface;

(b) element distribution of O, Si, Fe and Cr

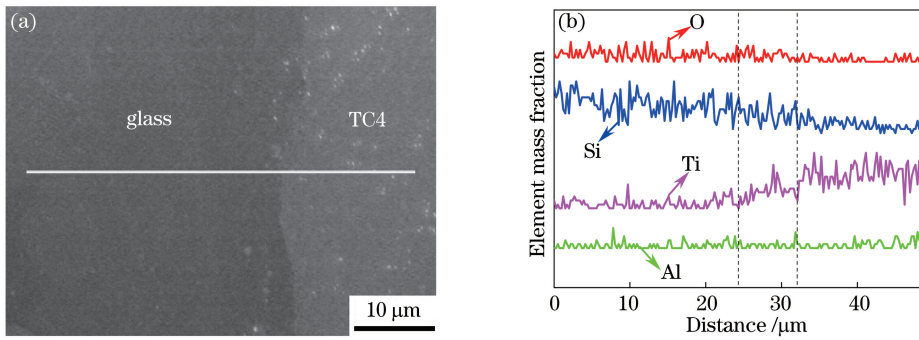


图 6 玻璃与钛合金母材接合处元素线扫描。(a) 界面; (b) O、Si、Ti、Al 元素分布

Fig. 6 Line scanning of elements at glass/titanium-alloy interface. (a) Interface;

(b) element distribution of O, Si, Ti and Al

3.3 物相分析

焊接试样拉断后的玻璃侧粘附有焊缝中的物质,分别对玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金焊接试样拉断后的玻璃侧进行 XRD 测试,所得结果如图 7 所示。图 7(a)所示为玻璃与不锈钢焊接件玻璃侧物相,可知图中宽化的衍射峰为玻璃的非晶衍射峰,此外图中还出现了 5 个主要衍射峰^[15],分析其为 304 不锈钢的奥氏体及马氏体相。由于激光的快速加热快速冷却特性,部分奥氏体不锈钢快速熔化后又急速冷却,因此出现了马氏体相。在激光焊接玻璃与不锈钢过程中,虽然玻璃与不锈钢熔化后出现扩散互溶,但 XRD 图谱未表明两者发

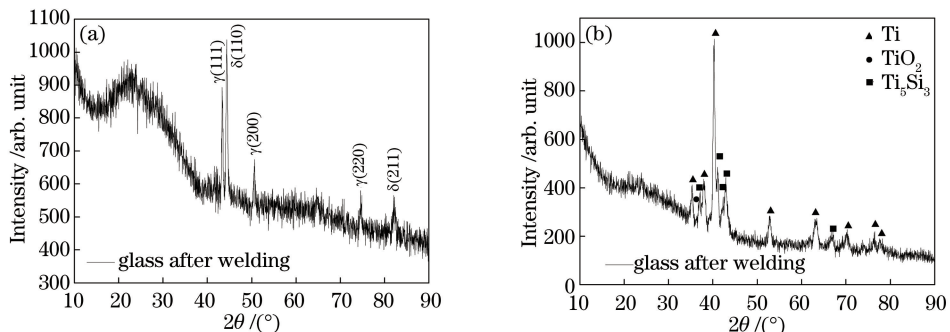
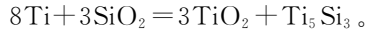


图 7 玻璃侧 XRD 图谱。(a) 玻璃/不锈钢焊接件; (b) 玻璃/钛合金焊接件

Fig. 7 XRD patterns at glass interface. (a) Glass/stainless-steel welding part; (b) glass/titanium-alloy welding part

生化学反应形成新的物相。图 7(b)所示为玻璃与钛合金焊接件玻璃侧 XRD 图谱,除了钛合金本身含有的 Ti 元素及热处理形成的 TiO_2 相,图中还出现了新的物相,分析其为 Ti_5Si_3 [16]。因此在激光作用下玻璃与钛合金不仅熔化后发生扩散互溶,还形成了新物相 Ti_5Si_3 。结合检测到的物相及高温下玻璃与钛合金的相互作用,推测在激光作用下玻璃与钛合金可能发生了如下反应



4 讨 论

在长脉冲激光作用下,玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金都能实现焊接,并且焊接件能承受一定大小拉断力;分析显示,激光辐照区周边都形成了片状粘附物,其在抵御破坏时起到一定作用;分析截面形貌可知,玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金焊接件在界面处都形成了玻璃与金属相互渗透的镶嵌结构,这种结构可以有效阻止玻璃与金属的相对运动。激光作用下的玻璃与两种金属的焊接机理基本相同。

前期研究发现,玻璃与不锈钢焊接件最大拉断力只有 67.3 N,而钛合金与玻璃焊接件最大拉断力可达 140.7 N,为前者的两倍多。由断口及截面形貌可看出,玻璃与不锈钢的焊接件在焊缝与不锈钢母材接合处附近发生断裂,如图 8(a)所示。玻璃与钛合金的焊接件在焊缝与钛合金母材处接合紧密,在接合处附近没有出现断裂,当拉力达到一定程度时会在接合薄弱处出现开裂,如图 8(b)所示。裂纹沿图 8(b)所示方式扩展时,路径曲折需要消耗更多能量,而沿图 8(a)所示方式扩展则相对容易。经分析可知,造成玻璃与不锈钢焊接件易形成裂纹的主要原因是两者的线膨胀系数差异大。建筑用普通玻璃的线膨胀系数为 $7.729 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6} K^{-1}$,而 304 奥氏体不锈钢的线膨胀系数为 $17.2 \times 10^{-6} K^{-1}$,约为玻璃的两倍,因此在快速熔化快速冷却过程中易出现应力集中而形成裂纹。钛合金的线膨胀系数为 $7.89 \times 10^{-6} K^{-1}$,与玻璃的基本相同,激光作用下焊缝中不会因线膨胀系数差异而出现应力集中,焊缝中玻璃与金属接合相对牢固。

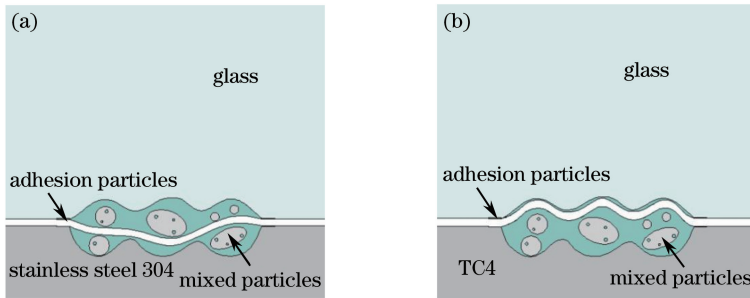


图 8 焊接件裂纹扩展方式。(a) 玻璃/不锈钢焊接件;(b) 玻璃/钛合金焊接件

Fig. 8 Crack extension mode of welding parts. (a) Glass/stainless-steel welding part;
(b) glass/titanium-alloy welding part

钛合金比较活泼,在高温下除了自身的氧化还与玻璃发生化学反应形成硅钛化合物,试验中玻璃与钛合金在激光作用下通过化学结合形成了 Ti_5Si_3 。在高温下玻璃/不锈钢主要发生的是金属的氧化及玻璃的晶化,两者之间难以发生化学反应;XRD 分析没有检测到不锈钢/玻璃激光焊接件中有新物质形成,激光作用下玻璃与不锈钢的接合主要为机械混合。

5 结 论

通过激光焊接方法开展了建筑用玻璃与不锈钢、钛合金这两种材料的焊接试验研究。长脉冲激光能实现玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金的连接,玻璃与两者的连接机理基本类似,焊缝中玻璃与金属熔化后相互渗透形成的镶嵌结构及界面处的粘附物是两者能够实现连接的主要原因。钛合金与玻璃的线膨胀系数差异较小是造成玻璃与钛合金焊接件拉断力高于玻璃与不锈钢焊接件的主要原因,选取线膨胀系数相近的玻璃与金属进行焊接有助于提高焊接可靠性。此外,激光作用下玻璃与钛合金焊接件为化学结合,焊接过程中生成新物质 Ti_5Si_3 ,而玻璃与不锈钢焊接件主要为机械混合。

参 考 文 献

- 1 Rodriguez-Vidal E, Quintana I, Gadea C. Laser transmission welding of ABS: Effect of CNTs concentration and process parameters on material integrity and weld formation[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 57: 194-201.
- 2 Hussein F I, Akman E, Oztoprak B G, *et al.* Evaluation of PMMA joining to stainless steel 304 using pulsed Nd:YAG laser[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 49: 143-152.
- 3 Richter S, Nolte S, Tunnermann A. Ultrashort pulse laser welding—A new approach for high-stability bonding of different glasses[C]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 556-562.
- 4 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 nm[J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10460-10468.
- 5 Dai Ye, Qiu Jianrong. Research progress of single beam femtosecond laser direct writing self-organized nanogratings in fused silica[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 120002.
戴 晔, 邱建荣. 单光束飞秒激光诱导石英玻璃内部纳米光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(12): 120002.
- 6 Fan Wenzhong, Zhao Quanzhong. Recent progress in ultrashort pulsed laser microwelding of glasses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080001.
范文中, 赵全忠. 超短脉冲激光微焊接玻璃进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080001.
- 7 Flury M, Pedri C. Laser induced reverse transfer with metal and hybrid material prepared with sol-gel process used on glass substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 278: 142-145.
- 8 Itoh K, Tamaki T. Ultrafast laser microwelding for transparent and heterogeneous materials[C]. *SPIE*, 2008, 6881: V8810.
- 9 Utsumi A, Ooie T, Yano T, *et al.* Direct bonding of glass and metal using short pulsed laser[J]. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2007, 2(2): 133-136.
- 10 Quintino L, Liu L, Miranda R M, *et al.* Bonding NiTi to glass with femtosecond laser pulses[J]. *Materials Letters*, 2013, 98: 142-145.
- 11 Tu Ye, Ji Lingfei, Bao Yong, *et al.* Joining behavior and interface analysis of pyrex glass-to-KOVAR alloy with fiber laser[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(1): 12-14.
涂 冶, 季凌飞, 鲍 勇, 等. 高硼硅 3.3 玻璃和可伐合金的激光封接界面研究[J]. *应用激光*, 2011, 31(1): 12-14.
- 12 Liu Xing, Chen Changjun, Wang Xiaonan, *et al.* Study on process and performance of architectural glass-to-titanium alloy TC4 with laser welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0403003.
刘 星, 陈长军, 王晓南, 等. 建筑用玻璃与钛合金 TC4 的激光封接工艺及性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0403003.
- 13 Sekou Singare, Chen Shenggui, Lin Yongzhou. Experimental investigation on laser transmission welding of thermoplastic [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051404.
四 库, 陈盛贵, 林勇州. 激光透射焊接塑料实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 051404.
- 14 Wang Chuanyang, Shen Xuanxuan. Techniques and performance research on laser transmission welding of polypropylene plastics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 021403.
王传洋, 沈璇璇. 聚丙烯激光透射焊接工艺及性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 021403.
- 15 Yan J, Gao M, Zeng X Y. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(4): 512-517.
- 16 Li W B, Zhu S L, Wang C, *et al.* SiO₂-Al₂O₃-glass composite coating on Ti-6Al-4V alloy: Oxidation and interfacial reaction behavior[J]. *Corrosion Science*, 2013, 74: 367-378.