

建筑用玻璃与钛合金TC4的激光封接工艺及性能研究

刘 星¹ 陈长军¹ 王晓南² 张 敏¹ 陈 凯² 杨兆华¹

¹苏州大学机电工程学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021

²苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021

摘要 钛合金因具有强度高、质量轻、耐腐蚀性强等优良性能, 其与玻璃的连接被广泛应用于新型建筑物屋顶、幕墙、窗户等。以建筑用玻璃和钛合金TC4为实验材料, 利用300 W Nd:YAG毫秒级脉冲激光器采用透射焊接方式对两者进行连接。利用万能拉伸试验机测量焊接件拉断力, 用扫描电子显微镜观察玻璃断口及焊缝截面形貌。研究了工艺参数(功率、脉宽、频率、离焦量)对焊缝成形、焊接件拉断力及玻璃断口形貌的影响, 讨论了激光作用下玻璃与钛合金的连接机理。研究表明, 毫秒级脉冲激光可实现玻璃与TC4的可靠封接, 封接件拉断力最大可达140.76 N。界面处形成的玻璃钛合金镶嵌结构对两者的连接起主要作用, 激光辐照区周边形成的粘附物对连接起辅助作用。

关键词 激光光学; 透射焊接; 拉断力; 玻璃; 钛合金

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0403003

Study on Process and Performance of Architectural Glass-to-Titanium Alloy TC4 with Laser Welding

Liu Xing¹ Chen Changjun¹ Wang Xiaonan² Zhang Min¹ Chen Kai² Yang Zhaohua¹

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

²Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract The bonding of glass and titanium alloy is widely applied in roof, curtain wall, windows due to its excellent performance such as high strength, light weight and corrosion resistance. An experimental study of welding of dissimilar materials between transparent architectural glass and titanium alloy (TC4) using a pulsed mode 300 W Nd:YAG laser is reported. The process is achieved when the joint is irradiated from the glass side. The test of breaking strength is conducted by universal tensile test machine. The fracture morphology on glass side and microstructure of weldment are analyzed using scanning electron microscopy. The influence of process parameters (power, pulse duration, pulse repetition rate, defocus distance) on weld seam formability, breaking strength and fracture morphology are studied. The results indicate that a good glass-to-TC4 joint can be obtained using millisecond pulsed laser. The maximum breaking strength of the weldment is 140.76 N. The mixed structure of glass and TC4 at the interface plays an important role in connecting the two materials, and adhesion particles play a subsidiary role.

Key words laser optics; transmission welding; breaking strength; glass; titanium alloy

OCIS codes 140.3538; 160.2750; 160.3900

收稿日期: 2014-10-14; 收到修改稿日期: 2014-11-19

基金项目: 科技部重大合作项目(2010DFB3100)、国家自然科学基金(51172221)、苏州市科技计划(应用基础研究计划)(SYG201419)

作者简介: 刘 星(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事玻璃与金属激光封接方面的研究。E-mail: liuxing0423@sohu.com

导师简介: 陈长军(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光制造与再制造等方面的研究。

E-mail: chjchen2001@aliyun.com(通信联系人)

1 引言

由于钛合金具有低密度、高强度、高熔点等优良性能,已成为高科技产品的热点材料。又因其加工性、焊接性能好,抗腐蚀性能好,热膨胀系数低,无环境污染等优点,能完全满足建筑材料的许多性能要求,因而倍受建筑师和建筑业的青睐。目前玻璃与金属的连接主要为机械连接、胶接、钎焊、超声波摩擦焊等^[1-4],激光封接^[5-8]相对于其他封接技术具有无需添加第三种材料、快速高效、能实现大块玻璃封接等优点。目前关于钛合金与玻璃激光封接研究方面的报道很少,其中大部分研究集中在与玻璃材料接近的玻璃陶瓷与钛合金的连接。研究发现采用活性钎焊 TiZrNiCu^[9]和 AgCuTi^[10]均可实现 SiO₂玻璃陶瓷和 TC4 钛合金的真空钎焊连接,且接头形成良好。王连军等^[11]制备了以硅硼酸盐玻璃陶瓷为主的保护功能涂料,发现钛合金在热处理过程中能被涂层很好的润湿,从而起到防氧化的作用。伍本德等^[12]认为采用混合陶瓷作过渡层是提高 A-W 活性玻璃陶瓷(以 SiO₂-MgO-CaO 为基添加适量 P、F 构成)-TC4 复合界面结合强度的最有效途径,且影响结合强度的主要因素是混合陶瓷的中性玻璃含量、烧结温度、基体表面粗糙度和基体表面氧化膜厚度。Quintino 等^[13]用飞秒激光实现了 NiTi 合金薄片与玻璃薄片的结合,发现沉积在玻璃表面的 NiTi 呈细微的颗粒结构,浅凹型表面结构可以起到较好的连接作用。李赞等^[14]研制了一种钼酸盐系玻璃,发现其与 TC4 钛合金有良好的润湿性,能实现匹配封接,在大气气氛下封接件的强度高于惰性气体保护下的强度。

综上所述,关于建筑用玻璃与钛合金激光封接方面的研究鲜有报道。激光可实现快速高效封接,因此开展这方面研究具有重要意义。本文着重研究了焊接工艺参数对玻璃与钛合金 TC4 焊缝成形、拉断力及玻璃断口形貌的影响,对两者的结合机理作了初步探究,为建筑工程上实现大块玻璃与钛合金的激光封接提供了一定的理论基础和实验数据。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

所用的材料为钛合金和建筑用玻璃,钛合金即 TC4(Ti-6Al-4V),所含成分的质量分数为 Fe 0~0.3%,C 0~0.10%,N 0~0.05%,H 0~0.015%,O 0~0.20%,Al 5.5%~6.8%,V 3.5%~4.5%,其余为 Ti,钛合金板材的尺寸为 30 mm×30 mm×3 mm。建筑用玻璃的质量分数为 SiO₂ 70%~73%,Al₂O₃ 0~3%,CaO 6%~12%,MgO 0~4%,Na₂O 12%~16%,尺寸为 30 mm×30 mm×5.7 mm。

2.2 实验方法

钛合金样品首先利用超声波清洗器用乙醇清洗,然后将样品放入 SX2-10-1 型管式高温电阻炉中进行预氧化处理,工艺为 700 ℃保温 10 min 后随炉冷却。本实验所用的激光器为 SD-MD300 型 Nd:YAG 毫秒脉冲激光器,激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 0.1~20 ms,最高重复频率 500 Hz,最大平均功率 300 W,光斑直径 0.2~2.0 mm,聚焦镜焦距为 75 mm。

激光封接钛合金与玻璃选用透射焊接方式,如图 1(a)所示,实验中进行了 3 道焊接,焊线长 20 mm,每道焊线之间的间距为 0.3 mm。焊接所需的压力由专用夹具提供,焊接后实物如图 1(b)所示。研究了激光功率 P 、脉宽 T 、重复频率 f 、离焦量 h 等主要工艺参数对焊缝成形的影响(固定焊接速度为 3 mm/s,定义激光聚焦在玻璃与钛合金界面处离焦量为 0 mm,经过前期探索,确定功率范围为 105~125 W,脉宽 0.5~3.5 ms,频率 5~

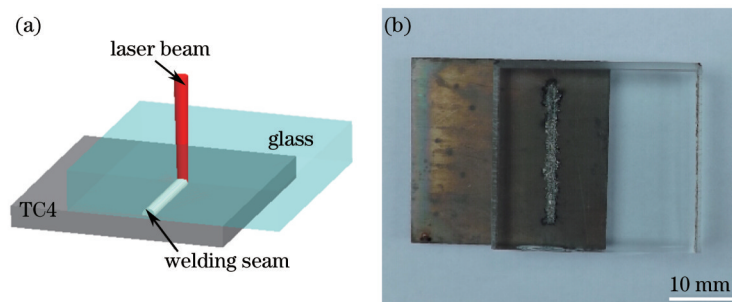


图 1 玻璃与钛合金激光焊接图。(a) 示意图;(b) 实物图

Fig.1 Photos of glass-to-TC4 joining with laser. (a) Schematic diagram; (b) real product

20 Hz, 离焦距 $-2\sim+2$ mm)。利用万能拉伸试验机测量钛合金与玻璃焊接件拉断力,用S-4700冷场发射扫描电镜观察焊接截面及玻璃侧断口微观形貌,用能谱分析(EDS)进行元素变化分析。

3 实验结果及分析

3.1 工艺参数对焊接件拉断力的影响

图2给出了不同因素对拉断力的影响规律。图2(a)为功率对拉断力的影响($f=10$ Hz, $h=0$ mm),由图可见,拉断力随功率的增加先升高后降低,不同脉宽下趋势不尽相同。如当脉宽为0.5 ms时功率从105 W增至115 W拉断力从24.66 N增至54.72 N,当功率增至120 W时则降为34.02 N。而脉宽为2.5 ms功率从115 W增至120 W时拉断力继续升高,从62.10 N增至92.52 N,当功率增至125 W时降低为48.96 N。

图2(b)为脉宽与拉断力的关系曲线($f=10$ Hz, $h=0$ mm),可见拉断力随脉宽的增加基本呈上升趋势,如当功率为105 W时,脉宽从0.5 ms增至3.5 ms,对应的拉断力从24.66 N增至52.74 N。但当功率120 W脉宽从2.5 ms增至3.5 ms时拉断力有所降低,此时玻璃已出现部分开裂。分析原因,脉宽主要影响熔深,进而影响强度,当脉宽增加时,脉冲能量也随之增加,在一定范围内,焊点熔深和直径也增加。当脉宽超过一定的值后,可能会因热能的累积对材料造成一定损伤,因此脉宽也不宜过高。

图2(c)展示了频率与焊接件拉断力之间的关系($P=120$ W, $h=0$ mm),可见随频率的增加拉断力先增大后减小,如当脉宽为1.5 ms时,频率从5 Hz增至20 Hz,拉断力在15 Hz时出现了最大值133.38 N,而5 Hz和20 Hz时分别为32.40 N、41.58 N,因此频率太低或太高都不利于玻璃与钛合金的焊接。

图2(d)描述了拉断力随离焦距的变化规律($P=120$ W, $f=10$ Hz),由图可见当离焦距从 -2 mm升至 0 mm再升至 $+2$ mm时,拉断力呈现明显的上升趋势,如当脉宽为2.5 ms时,随着离焦距的增加拉断力从34.02 N增至92.52 N再增至127.80 N。在焊接工艺参数 $P=120$ W, $T=1.5$ ms, $f=10$ Hz, $h=+2$ mm下,拉断力达到最大值140.76 N。

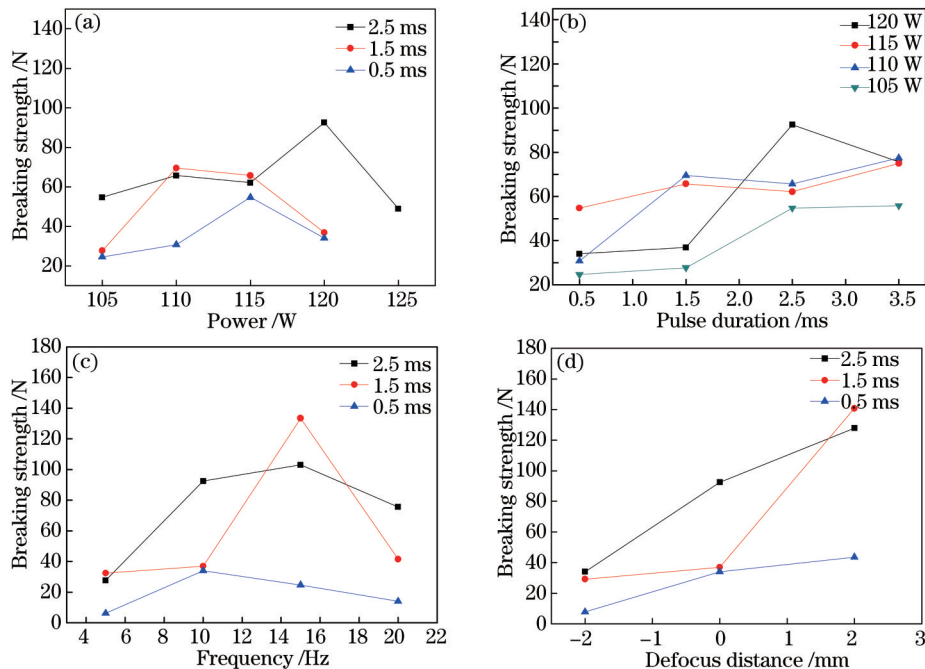


图2 工艺参数对拉断力的影响。(a) 功率; (b) 脉宽; (c) 频率; (d) 离焦距

Fig.2 Influence of process parameters on breaking strength. (a) Power; (b) pulse duration; (c) pulse repetition rate; (d) defocus distance

3.2 工艺参数对焊缝成形的影响

频率对焊缝形貌有很大影响,固定其他参数($P=120$ W, $T=1.5$ ms, $h=0$ mm),改变频率值进行实验,结果如图3所示。由图3(a)可见当频率为5 Hz时,每道焊线上焊点之间有间隙,整条焊缝成不连续状,激光辐照区周边有片状粘附物,焊缝形状不规则。频率增加到10 Hz时辐照区周边粘附物急剧减少,每道焊线的焊点之间已观察不到明显间隙,如图3(b)。频率为15 Hz、20 Hz时除起始段外其余焊缝基本成规则带状,如图3(c)、

(d)所示。不同频率下焊缝的初始段都出现了大量粘附物,是由于脉冲的不平稳造成的,一般开始时激光脉冲的能量相对较大。5 Hz时出现大量粘附物,频率增加粘附物逐渐减少,分析其原因是,脉冲激光单脉冲能量与频率的关系为 $P=E_{pf}$ 。当平均功率 P 一定的情况下,频率越低单脉冲能量 E_p 则越高,材料熔化的越多。因此,频率为5 Hz时激光辐照区周边出现了大量粘附物。

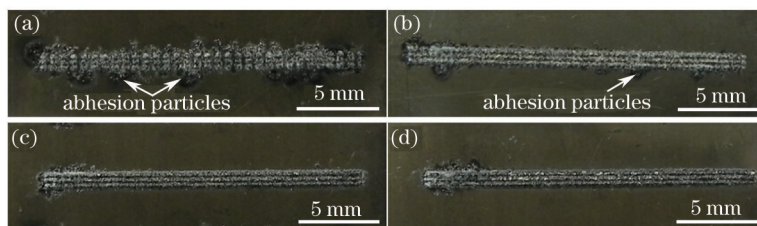


图3 不同频率下的焊缝形貌(120 W, 1.5 ms, 0 mm)。 (a) 5 Hz; (b) 10 Hz; (c) 15 Hz; (d) 20 Hz

Fig.3 Photos of welding seam under different frequencies (120 W, 1.5 ms, 0 mm). (a) 5 Hz; (b) 10 Hz; (c) 15 Hz; (d) 20 Hz

采用EDS对粘附物进行微区成分的区域分析,图4为测量区域及元素峰分布情况。因玻璃样品扫描电镜(SEM)时需喷金处理,图表中出现了Au元素。EDS结果表明粘附物为钛合金和玻璃混合物。

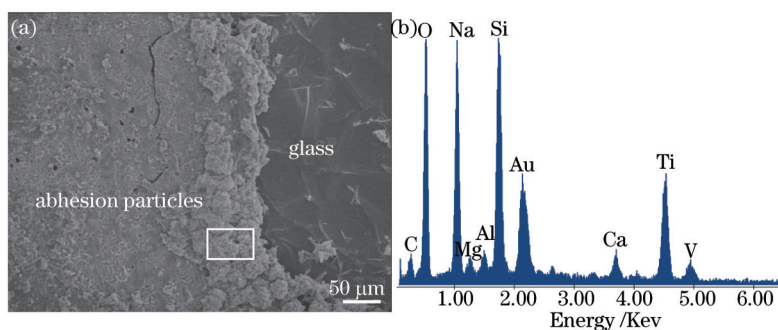


图4 粘附物的显微照片及EDS能谱图。(a) SEM照片; (b) 能谱图

Fig.4 EDS analysis of adhesion particles. (a) SEM image; (b) EDS analysis

保持其他参数不变($P=120\text{ W}$, $T=2.5\text{ ms}$, $f=10\text{ Hz}$),选取离焦量 -2 mm 、 0 mm 、 $+2\text{ mm}$ 进行实验,对焊缝的表面形貌及玻璃的侧面形貌观察,结果如图5所示。当离焦量为 -2 mm 时焊缝成整齐带状,激光辐照区周边没有观察到粘附物,从玻璃侧面可见玻璃层熔化的部分极浅,如图5(a)、(b)所示。离焦量为 0 mm 时,激光辐照区周边出现了少许粘附物,玻璃层熔化的深度有所增加,如图5(c)、(d)所示。离焦量为 $+2\text{ mm}$ 时激光辐照区周边出现了大量的粘附物,侧面观察可见玻璃熔化的部分显著增加,靠近界面的部分已形成新的结构不再为透明状,如图5(e)、(f)所示。结合离焦量对拉断力的影响规律[图2(d)],可知玻璃熔化的部分越多,粘附物的含量越多,焊接件所能承受的拉断力越大。但是,离焦量并非越大越好,当离焦量过大时将会导致玻璃侧熔化量降低,反而降低焊接件所能承受的拉断力^[15]。

固定其他参数($P=120\text{ W}$, $f=10\text{ Hz}$, $h=0\text{ mm}$),调节脉宽值进行试验,发现改变脉宽焊缝基本成规则带状,

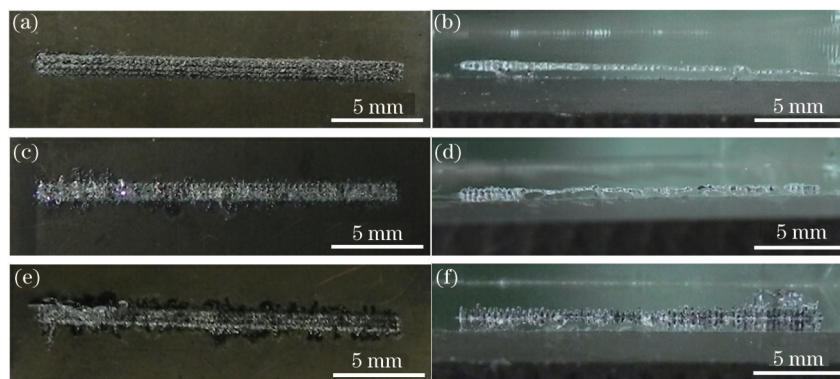


图5 离焦量对焊缝形貌的影响($P=120\text{ W}$, $T=2.5\text{ ms}$, $f=10\text{ Hz}$)。 (a),(b) -2 mm ; (c),(d) 0 mm ; (e),(f) $+2\text{ mm}$

Fig.5 Photos of welding seam under different defocus distances ($P=120\text{ W}$, $T=2.5\text{ ms}$, $f=10\text{ Hz}$). (a), (b) -2 mm ; (c), (d) 0 mm ; (e), (f) $+2\text{ mm}$

测量焊缝宽度,结果如图6(a)所示,由图可见随着脉宽的增加焊缝宽度增加。图6(b)为焊缝宽度随功率的变化曲线($T=2.5\text{ ms}$, $f=10\text{ Hz}$, $h=0\text{ mm}$),可见随着功率的增加,焊缝宽度大致呈线性增长。脉宽和功率增加时焊缝宽度都有所增加,分析原因是当脉宽、功率增加时,脉冲能量增加,界面处玻璃及钛合金吸收的热量增加,材料出现了更多的熔化,因此焊缝宽度增加。

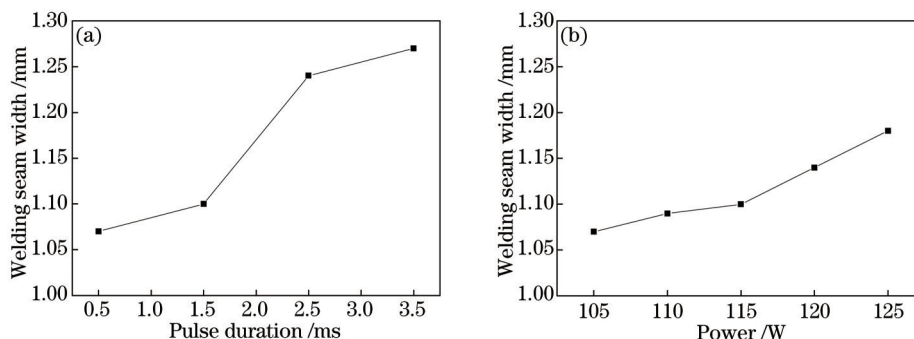


图6 脉宽及功率对焊缝宽度的影响。(a) 脉宽(120 W, 10 Hz, 0 mm); (b) 功率(2.5 ms, 10 Hz, 0 mm)

Fig.6 Influence of pulse duration and power on welding seam width. (a) Pulse duration (120 W, 10 Hz, 0 mm);

(b) power (2.5 ms, 10 Hz, 0 mm)

3.3 工艺参数对断口形貌的影响

玻璃与钛合金焊接件在完成拉断力测量时玻璃与钛合金会分离,图7为不同参数下的玻璃断口形貌。图7(a)为功率为105 W、脉宽0.5 ms时的形貌,可以看出激光辐照区周边出现了片状粘附物,辐照区则观察到整齐排列的圆形光斑图案,该区域较基体略低,分析其原因是,当能量较小时熔融的材料少,因此观察的脉冲点很明显。图7(b)为功率120 W、脉宽2.5 ms时的形貌,可见当激光能量增大后,玻璃层被熔化的部分显著增加,拉断后激光辐照区呈深沟状,辐照区周边出现了少数粘附物。比较图7(b)、(c)、(d)分析离焦量对焊接形貌的影响,当离焦量为-2 mm时,靠近辐照区出现了细窄的粘附物,辐照区相对较平整,由于离焦量的改变光斑直径变大,脉冲点图案呈现部分重叠。当离焦量为+2 mm时激光辐照区周边区域粘附物量向外延伸的距离较大,厚度也有所增加,这与宏观图所观察的大量粘附物相符,辐照区表面出现比较明显的凹凸不平坑,并且可以观察到一些孔洞。

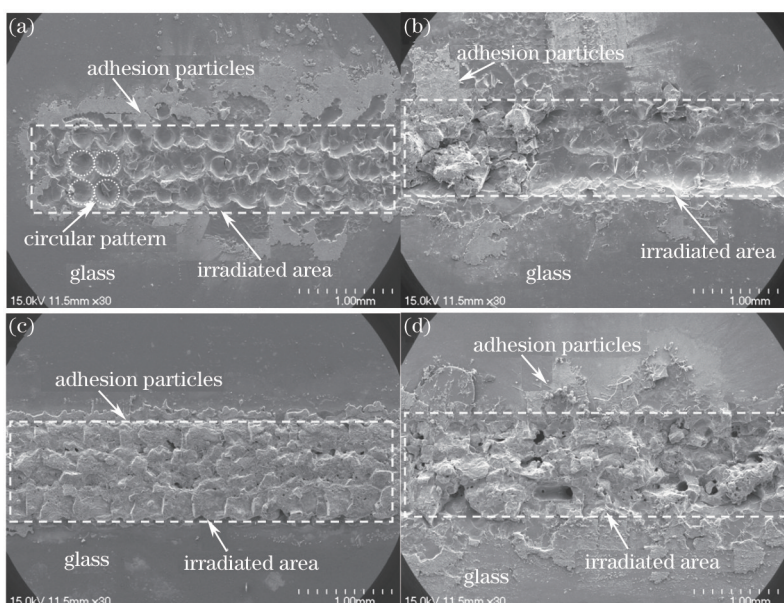


图7 不同工艺参数下玻璃断口微观形貌。(a) 105 W, 0.5 ms, 0 mm; (b) 120 W, 2.5 ms, 0 mm; (c) 120 W, 2.5 ms, -2 mm; (d) 120 W, 2.5 ms, +2 mm

Fig.7 Influence of process parameters on microstructure of glass fracture. (a) 105 W, 0.5 ms, 0 mm; (b) 120 W, 2.5 ms, 0 mm; (c) 120 W, 2.5 ms, -2 mm; (d) 120 W, 2.5 ms, +2 mm

4 讨论

玻璃与钛合金的焊接采用透射焊接,激光照射到玻璃上,尽管光会发生反射,透射光中还有一部分被玻璃吸收,但是建筑用玻璃的透射率约0.8,因此大部分能量会传递到玻璃与钛合金的界面上转化为热能。常温下钛合金TC4的导热系数为 $6.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而玻璃的导热系数约 $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,可见两种材料的导热系数都较低。因此激光转化的热能大部分用于加热界面处的钛合金和玻璃使之熔化形成熔池,熔池内液态玻璃与钛合金发生混合。激光作用下的冲击波会驱使熔池内的液体向辐照区周边飞溅^[13],形成了激光辐照区周边的粘附物。激光辐照区形成的玻璃钛合金镶嵌结构及粘附物是玻璃与钛合金能连接在一起的原因。

实验中发现焊接工艺参数对焊接件拉断力影响很大,如 105 W , 0.5 ms 时拉断力仅为 24.66 N , 120 W , 2.5 ms 时则增至 $92.52 \text{ N}(f=10 \text{ Hz}, h=0 \text{ mm})$;而改变离焦量($P=120 \text{ W}, T=2.5 \text{ ms}, f=10 \text{ Hz}$)对拉断力也影响显著, $+2 \text{ mm}$ 时拉断力为 127.80 N , -2 mm 时仅为 34.02 N 。为研究其原因对承受拉断力为 127.8 N 的典型焊接件取垂直于扫描方向截面观察焊缝形貌,图8(a)为焊缝截面SEM宏观形貌,图8(b)为焊缝中部区域放大形貌。从图8(a)中可以看出,辐照区周边玻璃与钛合金界面处出现了一层物质,分析其为粘附物。钛合金表面出现三块明显的凹陷,其为扫描时采用3道焊线所致,熔融的玻璃则会填补这部分凹陷,而熔化的钛合金由于熔池内的液体流动及激光作用下物质的反向迁移作用溶入到玻璃中^[16],部分在界面处凝固形成较大颗粒,界面处有一大的孔洞,其为试样制备过程中TC4金属颗粒脱落造成。从局部放大图8(b)中,可以发现较大的TC4颗粒附近出现了一些玻璃与钛合金掺杂的混合颗粒。当焊接件受到水平向的拉力时,金属颗粒、混合颗粒、玻璃构成的硬质颗粒嵌入界面的这种镶嵌结构可以起到抵御外力破坏的作用。如果激光能量较小或者离焦量位置不合适,玻璃吸收的能量较少,不能进行充分的流动^[17],绝大部分仍为固态,钛合金无法向上迁移与玻璃充分混合[断口如图7(a)、(c)所示],则焊接件能承受的拉断力较低。

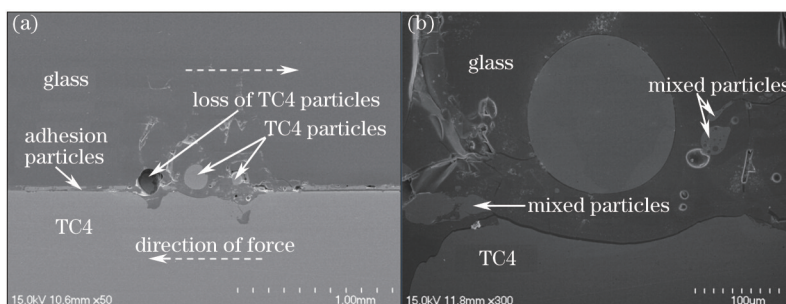


图8 焊接件截面SEM照片。(a)宏观图;(b)局部放大图

Fig.8 SEM cross section photos of weldment. (a) Macrograph; (b) morphology of special area at high magnification

从玻璃断口形貌中可以发现,当激光能量增加,界面处材料熔化较多,辐照区周边的粘附物量增加,部分粘附物从玻璃表面被剥离,说明其起到了一定的连接作用。粘附物对玻璃与钛合金的连接作用没有激光辐照区玻璃钛合金镶嵌结构的作用大,结合图3及图2(c)可以发现,图3(a)中的粘附物量较图3(b)及(c)中要多,而激光辐照区熔化的部分较少,其焊接件所承受的拉断力也相对较小,因此粘附物在玻璃与钛合金结合中起辅助连接作用。

5 结论

1) 随着焊接频率的增加,激光辐照区周边粘附物逐渐减少,当激光能量较大,材料熔化较多时,玻璃与钛合金形成的镶嵌结构越明显,增大功率及脉宽焊缝宽度有所增加。

2) 当离焦量为 $+2 \text{ mm}$ 时,玻璃层熔化的部分相对不离焦、负离焦时增加,钛合金与玻璃能充分混合,有助于提高两者封接件的拉断力。所得封接件拉断力最大可达 140.76 N ,对应的工艺参数为功率 120 W ,脉宽 1.5 ms ,频率 10 Hz ,离焦量 $+2 \text{ mm}$ 。

3) 激光作用下界面处形成的玻璃钛合金镶嵌结构是两者能实现连接的主要原因,辐照区周边形成的粘附物对连接起辅助作用。

参 考 文 献

- 1 R Lennon, R Pedreschi, B P Sinha. Comparative study of some mechanical connections in cold formed steel[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(3): 109-116.
- 2 Xing Ya, Cao Yunhong. Modern adhesive bonding technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2002, (5): 58-61.
邢 娅, 曹运红. 现代胶接技术[J]. 飞航导弹, 2002, (5):58-61.
- 3 M Overend, Q Jin, J Watson. The selection and performance of adhesives for a steel-glass connection[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011, 31(7): 587-597.
- 4 E Roeder, G Wagner. Ultrasonic welding of glass and glass-ceramic to metals[J]. Welding and Cutting, 1993, 4: 279-286.
- 5 Tu Ye, Ji Linfei, 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.
- 6 A Utaumi, T Ooie, T Yano, *et al.* Direct bonding of glass and metal using short pulsed laser[J]. JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2007, 2(2): 133-136.
- 7 S Richter, S Nolte, A Tünnermann. Ultrashort pulse laser welding—a new approach for high stability bonding of different glasses[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 556-562.
- 8 A Fortunato, G Cuccolini, A Ascari, *et al.* Hybrid metal-plastic joining by means of laser[J]. Int J Mater Form, 2010, 3(1): 1131-1134.
- 9 D Liu, L X Zhang, J C Feng, *et al.* Microstructure and fracture behavior of SiO₂ glass ceramic and TC4 alloy joint brazed with TiZrNiCu alloy[J]. J Cent South Univ Technol, 2009, 16: 0713-0718.
- 10 H B Liu, L X Zhang, L Z Wu, *et al.* Vacuum brazing of SiO₂ glass ceramic and Ti-6Al-4V alloy using AgCuTi filler foil[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 498(1-2): 321-326.
- 11 Wang Lianjun, Meng Changgong, Liu Changhou, *et al.* The study of protective coating for titanium alloys at high temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(2): 151-153.
王连军, 孟长功, 刘长厚, 等. 钛合金高温玻璃-陶瓷保护涂料的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(2): 151-153.
- 12 Wu Bende, Hou Xueling, Pang Wei, *et al.* Study on the bonding strength of the composite interface of a bioactive glass ceramics-TC4 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1992, 21(3): 37-41.
伍本德, 侯雪玲, 庞 薇, 等. 生物活性玻璃陶瓷-TC4 钛合金复合界面结合强度的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 1992, 21(3): 37-41.
- 13 L Quintino, L Liu, R M Miranda, *et al.* Bonding NiTi to glass with femtosecond laser pulses[J]. Materials Letters, 2013, 98(1): 142-145.
- 14 Li Zan, Zhu Xun, Feng Sheng. Research on preparation and performance for lead-free glass used for glass-to-titanium and titanium alloy seals[J]. Titanium, 2013, 30(1): 35-37.
李 赞, 朱 训, 冯 生. 钛及钛合金封接用无铅玻璃的制备及封接性能初探[J]. 钛工业进展, 2013, 30(1): 35-37.
- 15 Wang Xiao, Xue Guochun, Li Pin, *et al.* Investigation on melt pool in transmission laser bonding of silicon and glass[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603007.
王 霄, 薛国春, 李 品, 等. 激光透射连接硅与玻璃熔池研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603007.
- 16 M Flury, C Pedri. Laser induced reverse transfer with metal and hybrid material prepared with sol-gel process used on glass substrate[J]. Applied Surface Science, 2013, 278(1): 142-145.
- 17 Zhang Wei, Zhang Qingmao, Guo Liang, *et al.* Research on the properties of through transmission laser welding of polycarbonate[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703001.
张 卫, 张庆茂, 郭 亮, 等. 激光透射焊接聚碳酸酯接头性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703001.

栏目编辑: 张浩佳