

激光焊缝间距和焊接道次对玻璃与铝合金封接性能的影响及其机理研究

李创业¹ 张 敏² 陈长军² 王晓南³ 陈文刚¹

¹西南林业大学机械与交通学院, 云南 昆明 650224

²苏州大学机电工程学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021

³苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021

摘要 利用 300 W Nd:YAG 毫秒量级脉冲激光器对 6061 铝合金与玻璃进行激光透射焊接实验。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横截面形貌。研究焊接道次和焊缝间距对焊接件拉断力、焊缝形貌以及断口形貌的影响。研究表明,利用毫秒级脉冲激光可实现玻璃与铝合金的可靠焊接,焊接件拉断力最大可达 159.93 N。焊缝间距为 0.8 mm 时,铝合金与玻璃能充分混合,获得较好的焊接。

关键词 激光技术; 焊缝间距; 拉断力; 玻璃; 铝合金

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0702005

Effect of Laser Weld Spacing and Multipass Welding on Performance of Glass Sealing with Aluminium Alloy and Underlying Mechanism

Li Chuangye¹ Zhang Min² Chen Changjun² Wang Xiaonan³ Chen Wengang¹

¹School of Mechanical and Transport, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China

²Laser Processing Research Center, School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

³School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract An experimental study on laser transmission welding of transparent glass and 6061 aluminium alloy by a millisecond pulsed 300 W Nd:YAG laser is reported. The test of breaking strength is conducted by a universal tensile test machine, and the glass fracture morphology and weld sectional microstructure are analyzed by scanning electron microscopy. The effect of multipass welding and weld spacing on weld seam morphology, breaking strength, and fracture morphology is studied. The results indicate that a good glass-to-aluminium joint can be obtained if a millisecond pulsed laser is used. The maximum breaking strength of weldments is 159.93 N. When the distance between the welding seams is 0.8 mm, the aluminium alloy and glass can obtain good sealing.

Key words laser technique; weld spacing; breaking strength; glass; aluminium alloy

OCIS codes 140.3538; 160.2750; 160.3900

1 引 言

金属与玻璃封接被广泛用于航空、船舶、汽车、电器、电子等有真空气密性要求的场合。铝合金与玻璃的焊接件具有耐久性高、气密性好、电绝缘、耐腐蚀、质量轻稳以及透明性优良等优点,在光电、电信、汽车、感应器及

收稿日期: 2016-01-26; 收到修改稿日期: 2016-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(51172221)、苏州市工业基础项目(SYG201419)

作者简介: 李创业(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: 505734391@qq.com

导师简介: 张 敏(1978—),女,博士,副教授,主要从事激光再制造与焊接及多孔材料方面的研究。

E-mail: mzhang@aliyun.com(通信联系人)

高安全性电子工程等产业中的电晶体封装、石英玻璃封装、光二极管封装、混合封装、二极真空管封装、汽车引擎、汽车控制器、安全气囊开关、电力传输系统以及感应器封装等应用中都用到了此项技术^[1-3]。

传统的封接方式有胶封接、密封圈封接、钎焊封接、热压封接和场致扩散焊(阳极焊)等。现有研究大部分集中在使用阳极键合进行铝与玻璃封接^[4-8]以及使用钎焊封接进行铝与玻璃封接^[9-11]方面。随着社会的发展,传统的封接方式出现了很多弊端,如密封性差等。与传统的封接方式不同,激光封接^[12-13]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,铝合金作为一种有色金属广泛应用在建筑工程上,将激光技术应用到铝合金与玻璃的焊接上,对实现结构/功能一体化玻璃与金属激光焊接的实际应用具有指导意义。

研究表明,焊缝间距和焊接道次对封接质量有着较大的影响,在相同激光工艺参数,不同焊缝间距、焊接道次条件下的焊接件剪切强度差别很大。为了获得较好的封接质量,迫切需要对焊缝间距、焊接道次的影响进行研究。采用 300 W Nd:YAG 脉冲激光器对 6061 铝合金与玻璃进行激光透射焊接,着重研究焊接道次、焊缝间距对玻璃与 6061 铝合金焊缝质量和焊缝形貌的影响。通过对比焊接强度的变化规律,对焊接件截面和金属与玻璃断面进行微观分析,初步探讨其封接机理。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

实验材料为 6061 铝合金和建筑用玻璃,6061 铝合金成分如表 1 所示,板材尺寸为 50 mm×60 mm×2 mm,铝合金线膨胀系数为 $25.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。建筑用玻璃成分如表 2 所示,尺寸为 60 mm×50 mm×4.6 mm,玻璃的线膨胀系数为 $4.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

表 1 6061 铝合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminium alloy (mass fraction, %)

Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Si	Fe	Al
0.15~0.4	0.15~0.17	0.8~1.2	0.25	0.04~0.35	0.4~0.8	0.7	Bal.

表 2 玻璃化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of glass (mass fraction, %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
70~73	0~3	6~12	0~4	12~16

2.2 实验方法

为了消除或减少铝合金表面反射光,实验前需对铝合金表面进行黑化处理,经除油、碱蚀、水洗后,将铝合金试片置于水笔墨水中约 4 min,取出干燥。实验所用激光器为 Nd:YAG 毫秒量级脉冲激光器(SD-MD300,苏州福克斯激光股份有限公司,中国),激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 0.1~20 ms,最高重复频率为 500 Hz,最大平均功率为 300 W,光斑直径为 0.2 mm,聚焦镜焦距为 75 mm。

由于玻璃与铝合金的热传导系数差异较大,玻璃无法吸收足够的能量来熔化,因此不宜采用对接方式。玻璃属透明材料,光能够透过,而经黑化处理后的铝合金对激光的吸收率较高,可以作为吸收层,所以玻璃与铝合金的焊接采用搭接方式,如图 1(a)所示。焊接时需要使用夹具对焊接件施加一定的夹紧力,此处设计

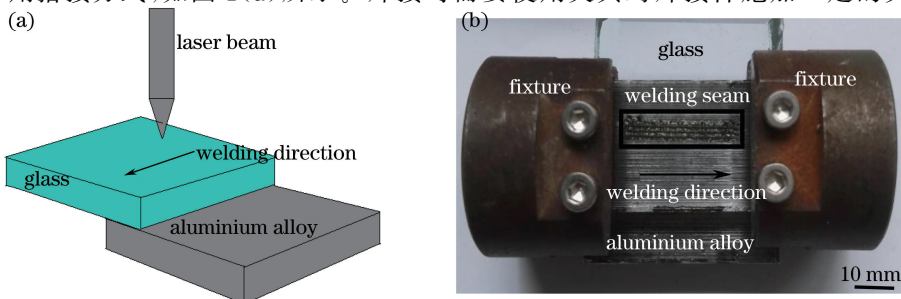


图 1 玻璃与铝合金激光焊接图。(a) 示意图; (b) 实物图

Fig. 1 Diagrams of laser welding of glass and aluminium alloy. (a) Schematic diagram; (b) photo

了图 1(b)所示的夹具,通过控制 4 个螺栓对焊接件实现夹紧作用,焊接后实物如图 1(b)所示。经过前期探索实验获得最佳工艺参数:激光功率 150 W,脉宽 3.0 ms,重复频率 6 Hz,焊接速率 3 mm/s。为了保证焊接部位只受到一个方向上的力,针对玻璃与金属焊接件的特点,设计了图 2(a)所示的拉断力测量方案。焊接件放在两个推块中间,通过缓慢控制手柄推动焊接件来完成拉伸实验。实验时拉伸速率为 0.1 mm/min,记下玻璃与铝合金焊接件被破坏时的拉力。为了减小测量误差,每组参数测量 5 次取平均值作为其实际拉断力,拉断后的玻璃与金属断面实物图如图 2(b)所示。用冷场(S-4700,日立公司,日本)发射扫描电镜(SEM)观察焊接截面及金属和玻璃侧断口的微观形貌,用能谱仪(EDS)进行元素变化分析。

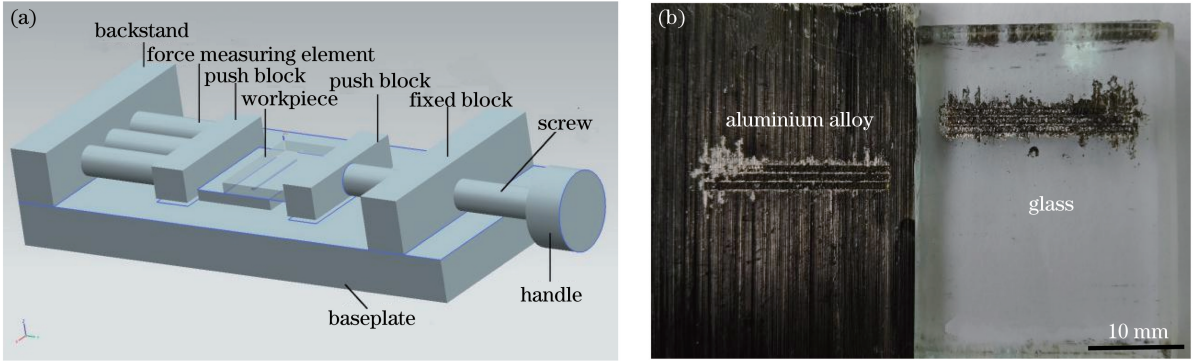


图 2 (a) 玻璃与铝合金拉断力测量示意图; (b) 玻璃与金属断面实物图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of measuring breaking strength of glass and aluminium alloy;
(b) photos of glass fracture and metal fracture

3 实验结果及分析

3.1 焊接道次和焊缝间距对焊接件拉断力的影响

在前期实验获得的最佳工艺参数下,焊缝条数与焊接件拉断力之间的关系曲线如图 3(a)所示,其中焊缝间距为 0.6 mm,可看到随焊缝条数的增加拉断力呈上升趋势,但拉断力增幅变小,单一焊缝所承受的拉断力变小。随着焊缝条数的增加,所需的焊接面积增大,这对焊接件形状和尺寸有了更高要求,势必影响其应用的广泛性。

采用三道焊接时不同焊缝间距与焊接件拉断力之间的关系曲线如图 3(b)所示,可见随焊缝间距的增加拉断力先增大后减小,其中焊缝间距从 0.5 mm 增至 0.6 mm 时,拉断力从 80.55 N 增加到 137.79 N,增幅最大,当焊缝间距为 0.8 mm 时,拉断力取得最大值 159.93 N。随着焊缝间距的继续增大,拉断力反而降低。当间距为 1.2 mm 时,拉断力减少至 84.18 N。

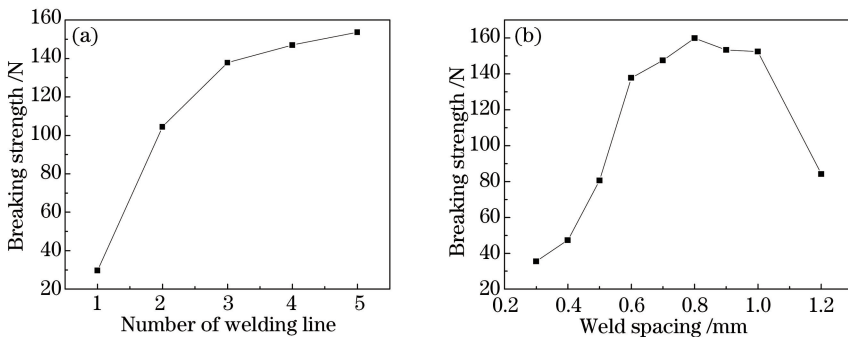


图 3 (a) 焊接道次和(b)焊缝间距对焊接件拉断力的影响

Fig. 3 Influence of (a) multipass welding and (b) weld spacing on breaking strength

3.2 焊接道次接合界面分析

为研究焊缝条数影响拉断力的原因,取焊接件垂直于扫描方向的截面观察焊缝形貌,如图 4 所示。图 4 (a)为利用扫描电子显微镜对焊缝截面进行观察得到的宏观形貌。从图 4(a)可以看出,后一道焊缝的熔深

比前一道熔深大,第三条焊缝形成最大熔深。熔池的深宽比与焊接件的剪切强度有一定的关系^[14],在很大程度上影响连接质量。为了进一步了解焊缝熔池的变化,对焊缝 1、2、3 的形貌进行放大观察,分别如图 4 (b)~(d)所示。可以看到,焊缝 1 的熔宽为 0.42 mm,熔深为 0.07 mm,深宽比为 0.17,随着焊接的继续,焊缝 2 的熔宽和熔深变大,熔宽增至 0.56 mm,熔深增至 0.11 mm,深宽比为 0.20;焊缝 3 的熔宽和熔深进一步变大,熔宽增至 0.78 mm,熔深增至 0.22 mm,深宽比为 0.28。深宽比随焊缝条数的增加呈增加的趋势。

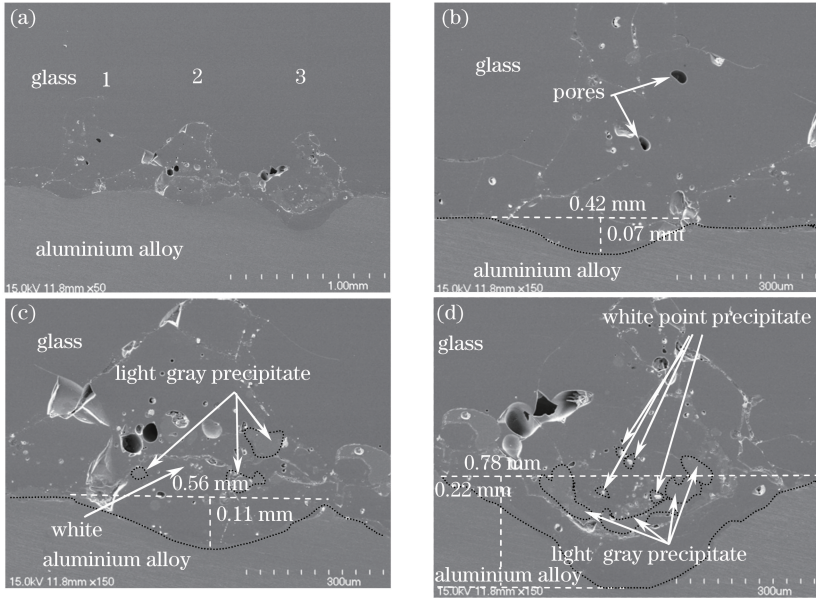


图 4 三条焊缝横截面的 SEM 照片。(a) 宏观形貌; (b) 焊缝 1 放大形貌; (c) 焊缝 2 放大形貌; (d) 焊缝 3 放大形貌
Fig. 4 SEM cross-section images of weldment with three welding lines. (a) Macro-morphology; (b) magnified morphology of No.1 weld seam; (c) magnified morphology of No.2 weld seam; (d) magnified morphology of No.3 weld seam

在焊接过程中由于热量的输入及传播,被焊金属所经历的加热、熔化以及随后的凝固和连续冷却的过程,称之为焊接的热过程。在焊接过程中热源沿着焊件移动时,焊件上某一点的温度随时间从低到高到达最大值,又从高到低的变化过程称为焊接的热循环。铝合金具有良好的导热性,在激光焊接时,前一道焊缝焊接时产生的大量热量使焊件表面温度快速升高,为下次焊接作了预热处理,焊缝的熔深、熔宽随着预热温度的升高而迅速增大^[15]。由于焊缝间距较小,可获取窄热循环,前一道焊缝对后一道焊缝具有热处理的作用,所以后一道焊缝熔融的铝合金比前一道焊缝多,深宽比增加。熔池的深宽比对焊接件的拉断力影响较大,如果只对焊件进行一道焊接,焊缝形成的深宽比较小,拉断力较小;随着焊缝条数的增加,后一道焊缝的深宽比增幅较大,这使得两道焊缝的拉断力比一道焊缝的拉断力大得多。当深宽比较大时,该范围内的激光能量密度较大,附近的玻璃变得脆弱而断裂,这使得拉断力快速减小^[14]。所以当焊缝条数大于三道时,拉断力增幅减小。

从图 4(b)~(d)可以看出,接头整体连接良好,反应层与铝合金接合紧密。由图 4(b)可以看出,焊缝中铝合金与玻璃的熔合区较小,玻璃侧熔解现象不明显,熔合区出现气孔。由于铝合金黑化的水笔墨水含有大量有机物,如图 5 和图 6 中的 EDS 分析结果所示,在焊缝中部 C 元素含量较高,这表明水笔墨水参与了反应,而有机物在高温下易析出氢,这可能是焊缝产生气孔的原因^[16]。由于铝合金具有较高的热导率,铝合金激光焊接时,熔池冷却凝固速度极快。同时铝合金的比重轻,不利于氢气泡的上浮和逸出,容易形成氧化膜气孔。由图 4(c)可以看出,玻璃与铝合金的熔合区变大,熔合区出现较多气孔,焊缝中部出现浅灰色析出物和白色点状析出物。图 4(d)表明,熔合区进一步增大,焊缝中部浅灰色和白色点状析出物增多,由图 5 和图 6 中的 EDS 分析结果可知,浅灰色析出物中 O 的原子数分数为 51.45%,Al 为 4.41%,Si 为 22.71%,C 为 10.56%,Na 为 5.47%,Ca 为 2.77%,其中 O 和 Si 的原子数分数的比值近似为 1:3。根据文献^[17]报道的玻璃与铝合金的相关反应,推测浅灰色析出物为 Al_2SiO_3 、 Na_2SiO_3 、 $CaSiO_3$ 等硅酸盐化合物。析出物中出现 C 元素的原因是铝合金表面黑化的水笔墨水含有大量的 C 元素。白色点状析出物中 Al 元素、O 元素的原

子数分数较高,分别为 32.41%和 22.58%,所以可推断析出物为 Al_2O_3 。这是因为,熔深越大,激光焊接时高能激光使表面的铝合金熔化越多,熔融的玻璃会填补这部分凹陷,而熔化的铝合金由于熔池内的液体流动以及激光作用下的物质反向迁移作用溶入到玻璃中^[18],其中一部分在界面处凝固形成较大颗粒。当焊接件受到水平方向的拉力时,金属颗粒、混合颗粒和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^[19]。

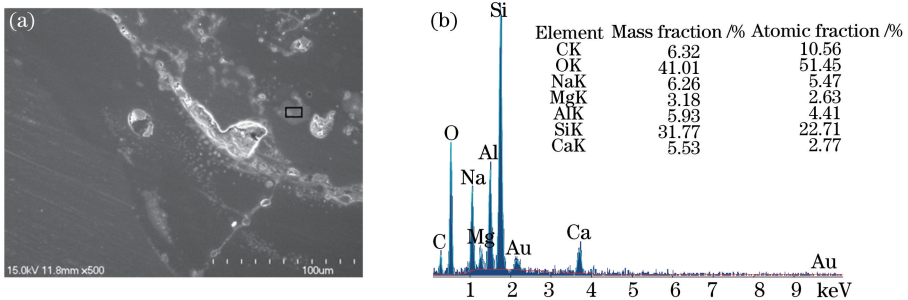


图 5 浅灰色析出物的 (a) 显微照片及 (b) EDS 分析图

Fig. 5 (a) Micrographic image and (b) EDS analysis of light gray precipitate

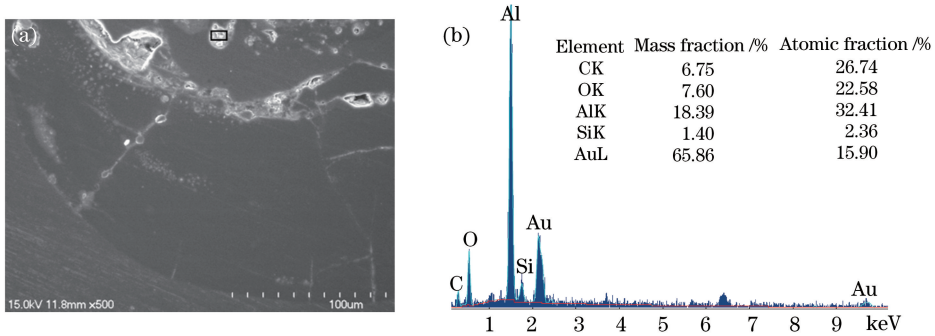


图 6 白色点状析出物的 (a) 显微照片及 (b) EDS 分析图

Fig. 6 (a) Micrographic image and (b) EDS analysis of white point precipitate

3.3 焊缝间距对金属和玻璃断口形貌的影响

为了解焊缝间距对拉断力的影响,利用 SEM 和能量色散 X 射线探测器(EDX)对不同焊缝间距的玻璃拉断面进行分析。图 7 所示为使用 SEM 观察的不同焊缝间距的玻璃断口的微观形貌,可以看到激光辐照区周边出现了大量的粘附物。焊缝间距为 0.3 mm 时,每道焊线之间观察不到明显间隙,玻璃断面焊缝出现较大重合,焊缝成形较差,如图 7(a)所示。分析认为,由于激光光斑直径为 0.2 mm,焊接时铝合金表面形成较大的熔宽,当焊缝间距为 0.3 mm 时,相邻的焊缝之间重合较大,同一焊接区域被重复焊接了两次而导致过度焊接,拉断力较小。由图 7(b)可知,随着焊缝间距的增加(0.6 mm),焊缝间的重合率减小,玻璃断面出现较多粘附物。焊缝间距为 0.8 mm 时,两条相邻的焊缝间距恰好紧密相接,材料各部分吸收的激光能量均匀,焊接强度较高,如图 7(c)所示。焊缝间距为 1.2 mm 时,激光扫描路径呈深沟状,焊缝间隙轮廓明显,间隙上只有少许的粘附物,焊缝中部分生成物出现脱落,如图 7(d)所示。随着焊缝间距的增大,两条相邻的焊缝间的距离也在增大,材料各部分吸收的能量不均匀,部分玻璃不能充分渗入到合金多孔表面。当玻

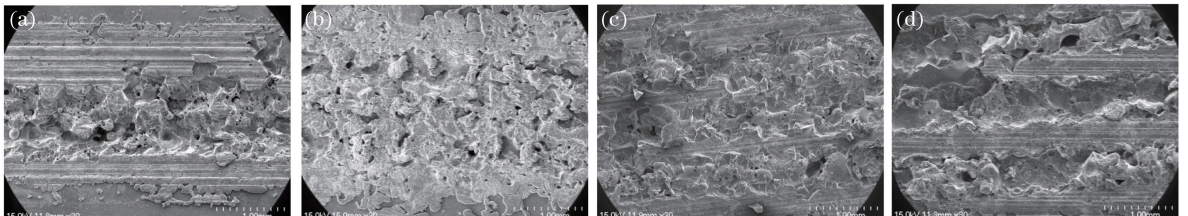


图 7 不同焊缝间距下的玻璃断面。(a) 0.3 mm; (b) 0.6 mm; (c) 0.8 mm; (d) 1.2 mm

Fig. 7 Microstructure of glass fractures at different welding spaces. (a) 0.3 mm; (b) 0.6 mm; (c) 0.8 mm; (d) 1.2 mm

璃与金属氧化物互溶减少时,氧化物溶解于玻璃内呈现不饱和状态,很难形成强的化学键,粘附性降低^[20],这导致了拉断时生成物容易脱落,因此焊接强度随着焊缝间距的增大而降低。

在玻璃与铝合金激光焊接中,几乎全部焊后试样的剪切断口都产生于过渡区近玻璃侧的区域,如图 8 所示。这是由于铝的热膨胀系数约为玻璃的 5 倍,材料焊接时这种差异引起玻璃侧出现较大的拉应力而产生微裂纹[图 4(a)],裂纹在脆性的玻璃体中扩展,最终出现断裂。

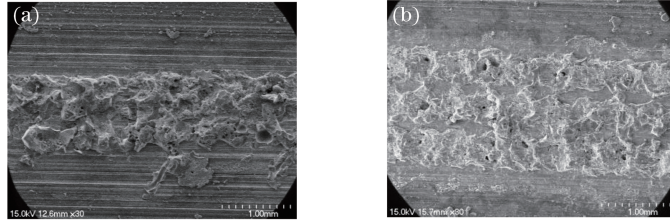


图 8 不同焊缝间距下的金属断面。(a) 0.3 mm;(b) 0.8 mm

Fig. 8 Microstructure of metal fractures at different welding spaces. (a) 0.3 mm; (b) 0.8 mm

利用 EDS 分析玻璃断面粘附物,结果如图 9 所示,可见粘附物含有大量的 Si 元素。分析认为,随着重合率减小,玻璃层被熔化的部分显著增加,下层玻璃吸收激光过多而使熔融的玻璃增加,冷凝后与玻璃和铝合金的混合物一起吸附在玻璃侧断面上。为了解焊缝间隙的元素变化和焊缝成型情况,对焊缝间距为 0.8 mm 的焊缝间隙进行 EDS 分析。图 10 为图 7(c)所示的焊缝间隙局部放大图。由图 10 可知,激光辐照区与粘附物形成紧密的机械嵌合,焊缝间隙界面大致可分为三个区域:铝合金与玻璃受热发生熔融反应形成熔池区(A)、浅黑色反应层(B)和白灰色中间层(C)。从 EDS 分析结果可知,A 层主要含有 Al、Mg、Si 和少量的 O 元素,其中 Al 元素含量较高。分析认为,焊接时焊件受热形成熔池,熔融的玻璃向熔池底部扩散,部分熔融的玻璃与熔池底部的液态铝合金发生了混合。B 层主要含有 O、Si、Al 和 Na 元素,且 O 元素和 Si 元素含量明显提高,铝合金与玻璃发生剧烈反应,生成硅酸盐与氧化物。分析认为,在进行激光焊接时,激光辐射加热工件表面,表面热量通过热传导向内部扩散使铝合金和玻璃熔化形成熔池,熔池内液态玻璃与铝合金

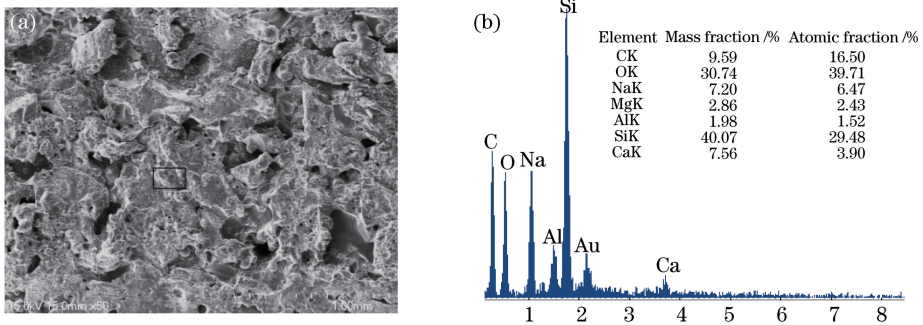


图 9 粘附物的 (a) 显微照片及 (b) EDS 分析图

Fig. 9 (a) Micrography image and (b) EDS analysis of adhesion particles

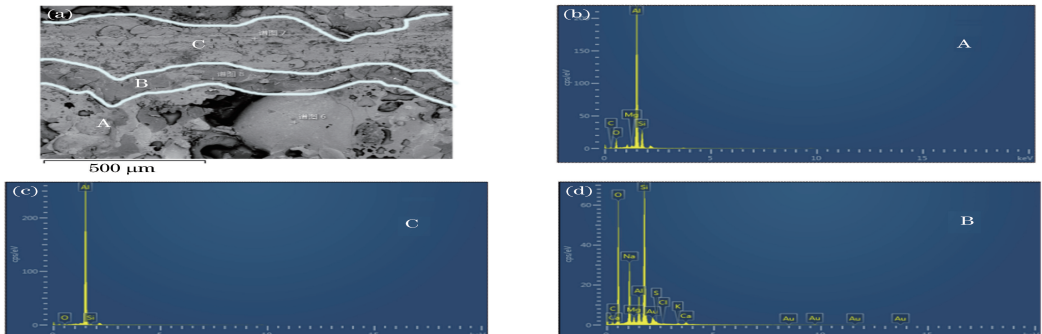


图 10 焊缝界面的(a)微观形貌和(b)(c)(d)不同区域的元素分布谱

Fig. 10 (a) Microstructure and (b)(c)(d) elements distribution in different areas of welding seam interface

发生混合。激光作用下的冲击波驱使熔池内的液体向辐照区周边飞溅,形成了熔池旁的浅黑色反应层,玻璃与铝合金连接在一起。C层主要含有Al和Si,且Al的含量较高,Si的含量较低,可见玻璃并没有与铝合金发生反应,出现这种现象的原因主要是6061铝合金的熔点为580~650℃,熔点较低,激光焊接时生成的大量热使间隙铝合金表面熔化,冷却后吸附在玻璃表面。

4 结 论

实验研究了焊接道次和焊缝间距对铝合金与玻璃焊接质量的影响。通过改变参数,可以使铝合金与玻璃形成良好的封接,结论如下。

1) 随着焊缝条数的增加,拉断力增大,焊缝为两条时,焊件拉断力从29.63 N增至104.47 N,增幅最大。继续增加焊缝,拉断力增幅减小。焊缝条数的增加使所需的焊接面积增大,进而影响焊接件的工艺性,取三条焊缝焊接效果最佳。

2) 焊缝间距对焊缝强度有一定的影响,激光作用下界面处激光辐照区与粘附物形成紧密的机械嵌合是铝合金与玻璃能实现连接的主要原因。随焊缝间距的增加拉断力先增大后减小,通过对玻璃断口进行SEM分析,当焊缝间距为0.8 mm时,铝合金与玻璃能充分混合,这有助于提高焊接件的拉断力,此时拉断力取得最大值159.93 N。

参 考 文 献

- 1 Yang Shanshan. Development of the glass to metal sealing product[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 6-18.
杨珊珊. 玻璃与金属封接产品的开发[D]. 天津: 天津大学, 2013: 6-18.
- 2 Liu Xing, Chen Changjun, Wang Xiaonan, *et al.*. The research of glass and metal sealing[J]. Welding Technology, 2014, 43(5): 1-6.
刘 星, 陈长军, 王晓南, 等. 玻璃与金属封接研究进展[J]. 焊接技术, 2014, 43(5): 1-6.
- 3 Liu Wei, Tao Deqing, Zhang Ruihong, *et al.*. The sealing experimental study of the laser welding of vacuum plate glass [J]. Journal of Yangzhou University, 2014, 17(1): 42-45.
刘 伟, 陶德清, 张瑞宏, 等. 真空平板玻璃激光焊接的封边试验[J]. 扬州大学学报, 2014, 17(1): 42-45.
- 4 Knapkiewicz P, Cichy B, Posadowski W, *et al.*. Anodic bonding of glass-to-glass through magnetron sputtered nanometric silicon layer[J]. Procedia Engineering, 2011, 25: 1629-1632.
- 5 Xing Q F, Sasaki G. Nanostructured gamma-alumina formed during anodic bonding of Al/glass[J]. Solid State Ionics, 2007, 178(3-4): 179-185.
- 6 Lu Xiaoying, Liu Cuirong, Meng Qingsen, *et al.*. The interface microstructure and mechanical property of the multi-layer wafer of pyrex glass and Al by the common anode bonding process[J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(9): 1466-1469.
鲁晓莹, 刘翠荣, 孟庆森, 等. Pyrex玻璃/铝多层阳极键合界面结构与力学分析[J]. 功能材料, 2008, 39(9): 1466-1469.
- 7 Van Helvoort A T J, Knowles K M, Fernie J A. Nanostructures at electrostatic bond interface [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2003, 86(10): 1773-1776.
- 8 Yu Ping, Meng Qingsen, Xue Jin. Study of anodic bonding between Al and K₄ Glass [J]. Material Opening and Application, 2003, 18(1): 24-27.
喻 萍, 孟庆森, 薛 锦. 金属铝与K₄玻璃阳极焊的研究[J]. 材料开发与应用, 2003, 18(1): 24-27.
- 9 Liu H B, Zhang L X, Wu L Z. Vacuum brazing of SiO₂ glass ceramic and Ti-6Al-4V alloy using AgCuTi filler foil [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 49(8): 321-326.
- 10 Koebel M M, Hawi N E, Lu J, *et al.*. Anodic bonding of activated tin solder alloys in the liquid state: A novel large-area hermetic glass sealing method [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(11): 3001-3008.
- 11 Reuter M, Roeder E. Ultrasonic welding of glass and glass-ceramics to metal [J]. Schweissen und Schneiden, 1993: E-62.
- 12 Liu Bili, Xie Songjing, Yao Jianhua. Application and development trend of laser welding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(9): 43-47.
刘必利, 谢颂京, 姚建华. 激光焊接技术应用及其发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 43-47.

- 13 Akihiro U, Toshihiko O, Tetsuo Y, *et al.*. Direct bonding of glass and metal using short pulsed laser[J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2007, 2(2): 133-136.
- 14 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.
- 15 Li Yongqiang, Zhao Xihua, Zhao He, *et al.*. Effect of preheating temperature on weld shaping and microstructure for laser lap welding of aluminum alloy[J]. Journal of Jilin University, 2008, 38(5): 1065-1068.
李永强, 赵熹华, 赵 贺, 等. 预热温度对铝合金搭接激光焊缝成形及组织的影响[J]. 吉林大学学报, 2008, 38(5): 1065-1068.
- 16 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe, *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar 36 alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1773-1777.
吴东江, 尹 波, 张维哲, 等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1773-1777.
- 17 Liu C R, Zhao J F, Liu X Y, *et al.*. Field-assisted diffusion bonding and bond characterization of glass to aluminum[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(15): 5076-5082.
- 18 Flury M, Pédrri 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.
- 19 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.
- 20 King B W, Tripp H P, Duckworth W H. Nature of adherence of porcelain enamels to metals[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1959, 42(11): 504-525.