

# 微弧氧化铝合金与高铝超薄玻璃的激光 焊接性能及机理

邱兆岭<sup>1</sup>, 陈长军<sup>2</sup>, 张敏<sup>2</sup>, 陈文刚<sup>1</sup>, 张伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西南林业大学机械与交通学院, 云南 昆明 650224;

<sup>2</sup>苏州大学机电工程学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021;

<sup>3</sup>中国科学院金属研究所金属腐蚀与防护实验室, 辽宁 沈阳 110016

**摘要** 利用微弧氧化工艺, 在铝合金表面制备了不同厚度的氧化涂层, 对微弧氧化铝合金和高铝超薄玻璃进行了激光透射焊接。研究了微弧氧化涂层厚度对焊接件的剪切力、焊缝形貌及焊缝结合界面的影响, 并分析了焊缝形成机理。研究表明, 微弧氧化涂层能够有效地充当焊接件的激光能量吸收层和缓冲层, 焊缝处形成的混合镶嵌结构是实现材料连接的主要原因; 微弧氧化涂层越薄, 焊接件的剪切力越大。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 超薄玻璃; 铝合金; 微弧氧化; 剪切力

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1202008

## Performance and Mechanism of Laser Welding of Micro-Arc-Oxidation Aluminum Alloy and High-Alumina Ultrathin Glass

Qiu Zhaoling<sup>1</sup>, Chen Changjun<sup>2</sup>, Zhang Min<sup>2</sup>, Chen Wengang<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanics and Transport, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;

<sup>2</sup>Laser Processing Research Center, School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

<sup>3</sup>Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

**Abstract** By the micro-arc-oxidation process, oxide coatings with different thicknesses are prepared on aluminum alloy surfaces, and the laser transmission welding of the micro-arc-oxidation aluminum alloy and the high-aluminum ultrathin glass is conducted. The effect of micro-arc-oxidation coating thickness on the shear force, the weld morphology and the weld joint interface is investigated and the formation mechanism of welds is also analyzed. The results show that the micro-arc-oxidation coating can effectively act as the laser-energy-absorbing layer and the buffer layer of weldments, and the main reason for realizing the connection between these two materials lies in the mixed mosaic structure formed within welds. The smaller the thickness of the micro-arc-oxidation coating is, the greater the shear force of weldments is.

**Key words** laser technique; laser welding; ultrathin glass; aluminum alloy; micro-arc-oxidation; shear strength

**OCIS codes** 140.3538; 160.2750; 160.3900

收稿日期: 2017-07-20; 收到修改稿日期: 2017-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(51001107)、中科院 STS 计划配套项目(2016T3030)、航天先进制造技术研究联合基金(U153710007)

作者简介: 邱兆岭(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: 978913987@qq.com

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

E-mail: chjchen2001@aliyun.com(通信联系人)

# 1 引 言

高铝超薄玻璃是指厚度小于 1 mm 的玻璃基板<sup>[1]</sup>,具有高强度、高耐磨性<sup>[2]</sup>、高抗划性和高韧性等优良性能<sup>[3]</sup>,是电子信息产业的核心材料<sup>[4]</sup>。铝合金具有比强度高、塑性好、耐腐蚀性强和可循环使用等优点<sup>[5]</sup>,广泛应用于工业和电子产业中,将玻璃与金属进行封接会进一步扩大其应用范围。玻璃与金属异种材料的连接方法<sup>[6]</sup>有匹配封接<sup>[7]</sup>、阳极焊接<sup>[8]</sup>、胶接<sup>[9]</sup>、半固体连接<sup>[10]</sup>等,但这些方法在电子元器件焊接方面具有局限性。激光辅助焊接具有能量密度大、热输入小、热变形小、熔深大和热影响区小等优点<sup>[11]</sup>,能够有效解决电子元器件的焊接问题。Quintino 等<sup>[12]</sup>的研究结果表明,激光辐射在玻璃表面产生的 NiTi 沉积颗粒能够使玻璃与 NiTi 合金实现很好的连接。刘星等<sup>[13]</sup>发现,玻璃与金属之间产生的镶嵌结构是实现 3 mm 厚的建筑用玻璃与 TC4 钛合金有效连接的主要因素。邹涛等<sup>[14]</sup>利用激光焊接技术,实现了厚度较大的建筑用玻璃与不锈钢/钛合金的连接。李创业等<sup>[15]</sup>通过激光焊接技术,完成了 4.6 mm 厚的硅酸盐玻璃与铝合金的连接,发现焊缝条数与焊缝间距对焊接质量和拉断力有重要影响。上述研究基本集中在 3~5 mm 厚的玻璃,关于厚度小于 1 mm 的超薄玻璃的研究鲜有报道。上述方法不适用于高铝超薄玻璃与铝合金激光焊接的主要原因是两者的热膨胀系数存在很大差异,在焊缝处产生的应力集中会对玻璃强度造成破坏<sup>[16]</sup>,且铝合金表面的反射率较高<sup>[17]</sup>,不利于焊接件对激光能量的吸收。为了解决异种材料热膨胀系数差异带来的不利因素,de Pablos-Martina 等<sup>[18]</sup>利用 Ba<sub>2</sub>TiSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub>·3SiO<sub>2</sub> 薄膜作为缓冲吸收层,采用纳秒激光实现了不同热膨胀系数的石英玻璃与蓝宝石玻璃的结合。此外,de Pablos-Martina 等<sup>[19]</sup>利用沉积法,在玻璃表面镀了一层厚度为 50 nm 的钛薄膜以作为吸收层来提升焊接界面质量。然而,缓冲吸收层厚度对焊接件质量的影响鲜有报道。

本文采用微弧氧化工艺,在铝合金表面制备了不同厚度的微弧氧化涂层以作为缓冲吸收层,其热膨胀系数介于玻璃和铝合金之间,可降低铝合金表面反射率,并增强表面对激光能量的吸收率。采用脉冲激光对高铝超薄玻璃与铝合金进行焊接,研究了微弧氧化涂层厚度对焊接件连接质量的影响,对焊接件的焊缝区域进行了显微观察。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

实验材料为 6 系铝合金和经过化学钢化处理的高铝超薄玻璃,其化学成分见表 1 和表 2。玻璃基板的尺寸为 30 mm×25 mm×0.5 mm,热膨胀系数为 $4.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。铝合金基板的尺寸为 30 mm×25 mm×3 mm,热膨胀系数为 $25.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

表 1 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloy (mass fraction, %)

Element	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Cr	Zn	Al
Content	0.9	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	Bal.

表 2 高铝超薄玻璃化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of high-alumina ultrathin glass (mass fraction, %)

Composition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Value	62.5	11.7	10.86	11.78	1.33

### 2.2 微弧氧化膜制备

采用常温除油剂对铝合金基板进行除油处理,清洗干燥后放入电解液中进行微弧氧化处理。实验采用的等离子体电解氧化设备为自制的直流脉冲电源,其总功率为 30 kW,正向和反向调节电压范围为 0~510 V 和 0~100 V,脉冲频率为 600 Hz,正、负向脉冲占空比分别为 50% 和 30%。在质量比为 10:5:3 的 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaH<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 溶液体系中进行铝合金的微弧氧化处理。微弧氧化过程中铝合金基板为阳极,石墨为阴极,整个实验过程中溶液温度保持在 50 °C 以下。设定电流密度为 8 A·dm<sup>-2</sup>,在其他工艺参数不变的情况下,通过改变微弧氧化时间来制备不同厚度的微弧氧化涂层,涂层厚度分别为 2, 5, 12, 16, 22 μm。采用荷兰帕纳科公司生产的 X'-Pert-Pro MPD 型号 X-射线多晶衍射仪(XRD),对经过微弧氧化处

理的铝合金基体表面的涂层进行物相分析,靶材为 Cu(K $\alpha$ )。

### 2.3 激光透射焊接

采用苏州福克斯激光有限公司生产的 SD-MD300 型号 Nd:YAG 毫秒级脉冲激光器进行焊接实验,最大平均功率为 300 W,最大频率为 500 Hz,脉宽为 0.1~20 ms,激光波长为 1064 nm,焦距为 75 mm,光斑直径为 0.2~2.0 mm<sup>[13]</sup>。经过前期对激光焊接工艺参数的正交实验,获得的最佳工艺参数为功率 100 W,频率 10 Hz,脉宽 2.5 ms,离焦量 0 mm,焊接速率 3 mm·s<sup>-1</sup>。

激光垂直照射于焊接件表面,采用搭接的方式对高铝超薄玻璃和铝合金进行激光透射焊接<sup>[20]</sup>,所有焊接件的焊缝长度均为 25 mm,如图 1(a)所示。采用专用夹具对焊接件施加夹紧力,焊接后的实物如图 1(b)所示。采用万能拉伸试验机进行焊接件剪切力测试,利用日本日立公司生产的 S-4700 冷场发射扫描电镜对焊缝断面及截面形貌进行观察,并利用其自带的能谱分析功能进行元素含量分析。

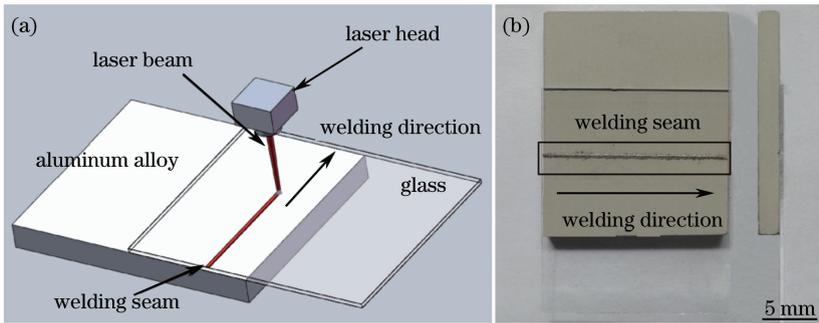


图 1 高铝超薄玻璃与铝合金的激光焊接。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Laser welding of high-alumina ultrathin glass and aluminum alloy. (a) Schematic; (b) physical drawing

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 微弧氧化涂层的形貌及物相分析

通过控制微弧氧化时间得到不同微弧氧化涂层的厚度,见表 3。图 2 所示为各涂层的表面形貌。可以看出,所有的微弧氧化涂层表面均存在放电残留微孔,微孔周围存在着显著的胞状突起结构;微弧氧化涂层的弧度随着微弧氧化时间的增加而逐渐增大,胞状突起结构的尺寸也逐渐增大。微弧氧化是一个放电-击穿-熔融-凝固重构的循环反复过程,胞状突起结构是熔融氧化物冷却凝固的产物。随着微弧氧化时间的增加,在微弧氧化涂层表面放电熔化的氧化物逐渐积累,造成胞状突起结构逐渐增大。

微弧氧化涂层截面形貌如图 3 所示,涂层由靠近基体的致密层和外部疏松层组成。随着涂层厚度的增加,致密层所占的比例逐渐增大。熔融氧化物随着微弧氧化时间的增加而增多,放电微孔会被熔融氧化物填充,微孔的尺寸逐渐变小、数量逐渐增多,形成致密的涂层。

表 3 不同微弧氧化时间得到的涂层厚度

Table 3 Coating thicknesses obtained under different micro-arc-oxidation time

Time /min	5	15	30	90	120
Thickness / $\mu\text{m}$	2	5	12	16	22

铝合金基体表面的 XRD 图谱如图 4 所示。可以看出,经过微弧氧化处理后的涂层出现了较强的  $\gamma$  特征峰,且没有与其他特征峰重叠,表明铝合金表面的微弧氧化涂层主要由  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  组成。同时,在微弧氧化涂层中还检测到了较强铝基体衍射峰,主要原因是制备的微弧氧化涂层较薄,检测时射线容易穿透微弧氧化涂层直接作用到铝合金基体上<sup>[21]</sup>。

### 3.2 微弧氧化涂层厚度对焊接件剪切力的影响

铝合金和高铝超薄玻璃的不规则焊缝形状使得焊缝面积无法准确计算,因此通过剪切力大小评价焊接质量。在相同的激光工艺参数下,不同厚度的微弧氧化涂层对焊接件剪切力的影响如图 5 所示。可以看出,剪切力随涂层厚度的增加呈减小趋势,剪切力从 44.27 N 减小到 21.44 N。这表明在一定范围内,涂层厚度

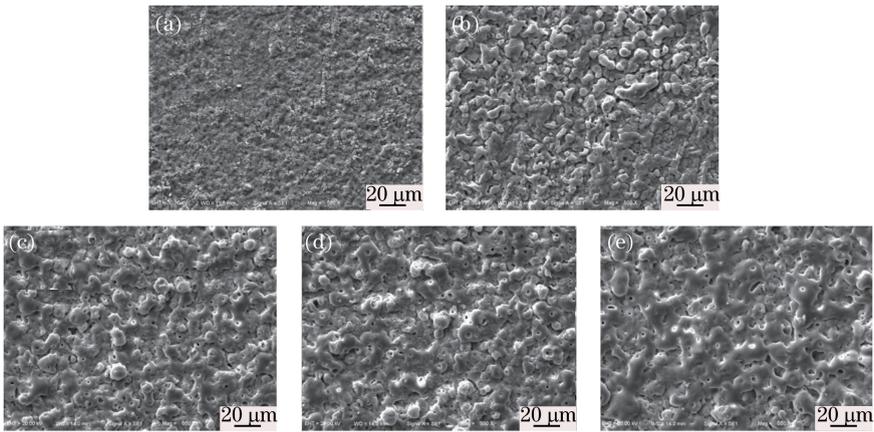


图 2 不同厚度微弧氧化涂层表面形貌。(a) 2 μm;(b) 5 μm;(c) 12 μm;(d) 16 μm;(e) 22 μm

Fig. 2 Surface morphologies of micro-arc-oxidation coatings with different thicknesses.

(a) 2 μm; (b) 5 μm; (c) 12 μm; (d) 16 μm; (e) 22 μm

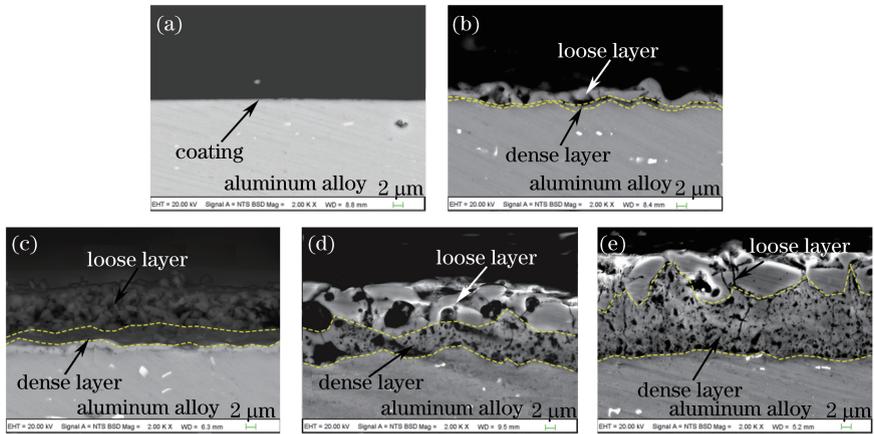


图 3 不同厚度微弧氧化涂层截面形貌。(a) 2 μm;(b) 5 μm;(c) 12 μm;(d) 16 μm;(e) 22 μm

Fig. 3 Sectional morphologies of micro-arc-oxidation coatings with different thicknesses.

(a) 2 μm; (b) 5 μm; (c) 12 μm; (d) 16 μm; (e) 22 μm

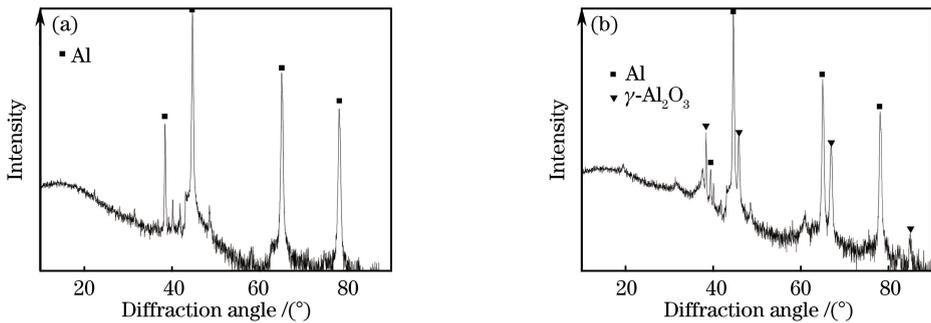


图 4 铝合金基体表面 XRD 图谱。(a)未处理;(b)微弧氧化处理

Fig. 4 XRD patterns of aluminum alloy substrate surfaces. (a) Untreated; (b) treated by micro-arc-oxidation

越小的焊接件,其焊缝的抗剪能力越强。实验所得到的焊接件力学性能相对较差,不利于其在实际中的应用,超薄玻璃自身物理性能和单道焊缝焊接是焊接件力学性能较差的原因。文献[15]表明,通过改变焊缝条数及间距可进一步提高焊接件的力学性能。焊接件的焊缝形貌如图 6 所示,大部分焊接件焊接情况良好,但微弧氧化涂层厚度为 2 μm 的焊接件在长时间放置后会在焊缝处产生垂直裂纹。微弧氧化涂层的热膨胀系数为  $7.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,介于玻璃和铝合金之间。微弧氧化涂层在焊接过程中充当缓冲层时,激光能量向焊接

件的输入及传播会在焊接件表面产生一个快速加热熔化-快速冷却凝固的过程,这个过程会在焊缝处产生应力集中,当应力积累超过玻璃临界阈值时会对玻璃造成破坏。此外,当微弧氧化涂层厚度过小时,涂层起到的缓冲作用效果差,降低了焊接件的可靠性。其他焊接件始终保持良好,表明在铝合金表面制备的微弧氧化涂层有效地起到了吸收和缓冲作用。

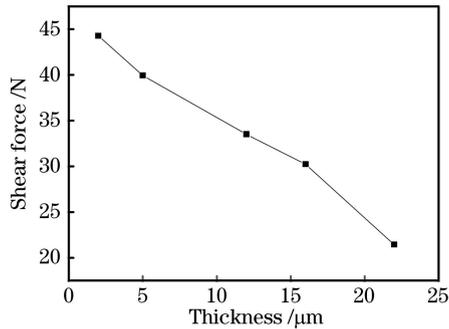


图 5 微弧氧化涂层厚度对剪切力的影响

Fig. 5 Influence of micro-arc-oxidation coating thickness on shear force

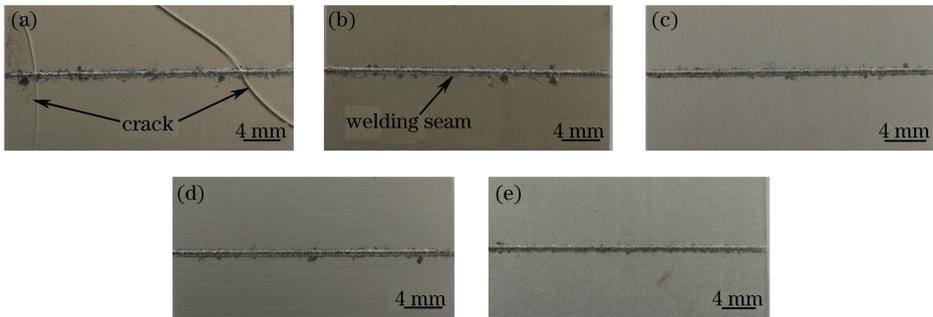


图 6 不同厚度微弧氧化涂层焊接件焊缝形貌。(a) 2  $\mu\text{m}$ ; (b) 5  $\mu\text{m}$ ; (c) 12  $\mu\text{m}$ ; (d) 16  $\mu\text{m}$ ; (e) 22  $\mu\text{m}$

Fig. 6 Weld morphologies of weldments with different thicknesses of micro-arc-oxidation coatings.

(a) 2  $\mu\text{m}$ ; (b) 5  $\mu\text{m}$ ; (c) 12  $\mu\text{m}$ ; (d) 16  $\mu\text{m}$ ; (e) 22  $\mu\text{m}$

### 3.3 焊接件断口形貌

焊缝成型涉及的因素包括<sup>[22]</sup>:1)铝合金基板对激光热量的线性吸收;2)玻璃盖板对激光能量的非线性吸收;3)熔池区域内的元素过渡与元素稀释;4)高铝超薄玻璃与铝合金焊接件的热传导性能;5)熔池内熔化的金属与熔融的玻璃混合物快速凝固形成新的镶嵌结构等。焊接件的铝合金基板和玻璃盖板焊缝断口形貌如图 7 所示。可以看出,在铝合金基板的焊缝处出现了很多玻璃粘附物,但表面粘附物数量随着微弧氧化涂层厚度的增加而逐渐减少,并且出现凹凸不平的现象;玻璃盖板断裂处由平滑逐渐变得粗糙不平,撕裂痕迹明显增加,表明焊接件断裂位置由玻璃处逐渐向焊缝中部转移。

图 8 所示为图 7 中铝合金基板典型的断面局部放大形貌及能谱分析。从图 8(a1)、(a2)中可以看出,粘附物含有大量的 Si、O 等元素,一定量的 Al、K 等元素以及少量的 Na 元素,表明粘附物主要来自于玻璃盖板一侧,断口形貌为河流状的解理特征花样,为典型脆性断裂。从图 8(b1)~(c2)可以发现,除了图 8(a1)、(a2)中的元素外还出现了 Mg 元素,该元素为铝合金的成分,因为此区域断裂位置靠近铝合金基板。图 8(b1)、(b2)所示的断裂形貌和元素含量表明断裂位置发生在焊缝混合区域,受力过程中剪切力对镶嵌结构造成了很大的破坏;图 8(c1)、(c2)中的脉冲点坑说明断裂位置发生在脉冲点坑底部位置。在进行剪切拉伸实验过程中,断裂主要发生在玻璃侧、焊缝混合区域及脉冲点坑部位,表明在一定范围内,微弧氧化涂层越薄,焊缝区域内玻璃与金属混合形成的镶嵌结构的抗破坏能力越强;涂层较厚的焊接件焊缝区镶嵌结构的抗破坏能力较弱,宏观表现为在焊接件结合区域内产生了较大的破坏,这与图 5 中观察到的结果一致。

### 3.4 焊接件结合界面形貌分析

微弧氧化涂层厚度对焊接件剪切力存在影响,取垂直于焊缝方向的结合界面进行观察,焊缝结合界面形

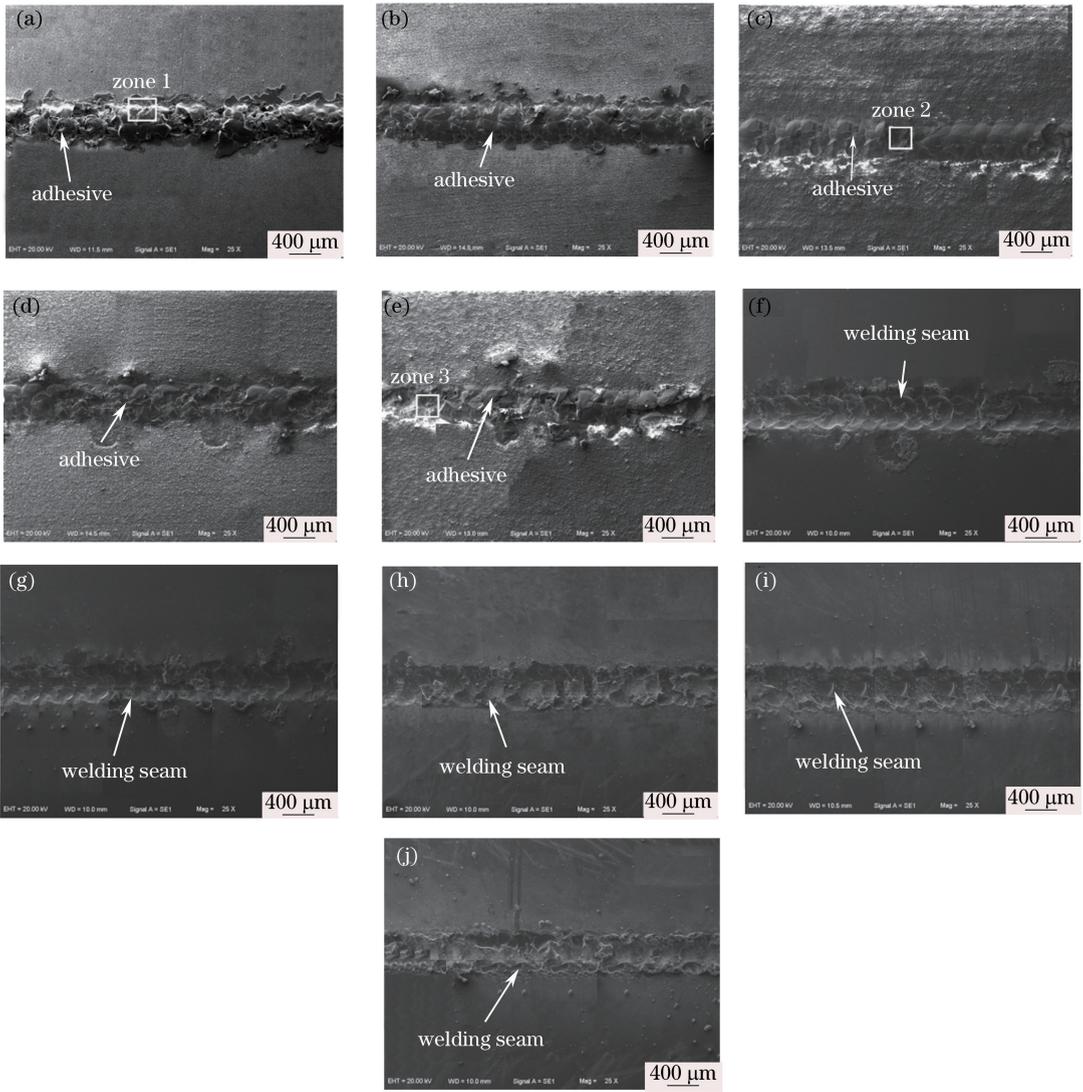


图 7 不同涂层厚度焊接件的铝合金及玻璃断面形貌。(a) 2  $\mu\text{m}$ , 铝合金;(b) 5  $\mu\text{m}$ , 铝合金;(c) 12  $\mu\text{m}$ , 铝合金;(d) 16  $\mu\text{m}$ , 铝合金;(e) 22  $\mu\text{m}$ , 铝合金;(f) 2  $\mu\text{m}$ , 玻璃;(g) 5  $\mu\text{m}$ , 玻璃;(h) 12  $\mu\text{m}$ , 玻璃;(i) 16  $\mu\text{m}$ , 玻璃;(j) 22  $\mu\text{m}$  玻璃  
Fig. 7 Aluminum alloy and glass sectional morphologies of weldments with different thicknesses of coatings.

(a) 2  $\mu\text{m}$ , aluminum alloy; (b) 5  $\mu\text{m}$ , aluminum alloy; (c) 12  $\mu\text{m}$ , aluminum alloy; (d) 16  $\mu\text{m}$ , aluminum alloy; (e) 22  $\mu\text{m}$ , aluminum alloy; (f) 2  $\mu\text{m}$ , glass; (g) 5  $\mu\text{m}$ , glass; (h) 12  $\mu\text{m}$ , glass; (i) 16  $\mu\text{m}$ , glass; (j) 22  $\mu\text{m}$ , glass

貌如图 9 所示。可以看出,几个典型的焊缝结合界面都有部分裂纹及微孔,激光能量积累对焊缝处产生热影响进而造成微小裂纹,而高铝超薄玻璃与焊缝混合界面材质硬且脆,制样过程中的细磨、抛光等过程会对界面产生应力,进而造成裂纹扩展及脱落。减小激光脉宽或者选用脉宽较低的飞秒激光能进一步减少裂纹的产生。在相同工艺参数下,不同厚度的微弧氧化涂层焊接件焊缝所形成的熔池深度随涂层厚度的增加而减少。由图 4 可知,微弧氧化涂层的主要成分是导热系数为  $28 \text{ W} \cdot (\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷,而铝合金的导热系数为  $155 \text{ W} \cdot (\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ ,后者约为前者的 5 倍。在激光能量输入的过程中,微弧氧化涂层和高铝超薄玻璃的导热系数较低,会存在一定的热量积累,导热系数较高的铝合金会将热量向内部传递,经过热量积累后金属蒸发产生的等离子体与熔融玻璃相混合形成熔池。微弧氧化涂层越薄,致密层越少,微孔结构易于吸收激光能量<sup>[23]</sup>,热量在表面积累相对较少,大部分热量传递到铝合金内部,因此较薄微弧氧化涂层焊接件的焊缝形成的熔池较深。同时,微弧氧化涂层过厚会造成热量积累过多,使得焊缝处的玻璃变得脆弱而发生断裂,拉断力迅速减小。从图 9(a)中可以观察到,焊接件的整体连接良好,玻璃与铝合金的结合界面相对紧密。但在图 9(b)、(c)中可以明显地发现,在焊缝区域及焊缝周围存在环氧树脂的黑色物质,微弧氧化涂层

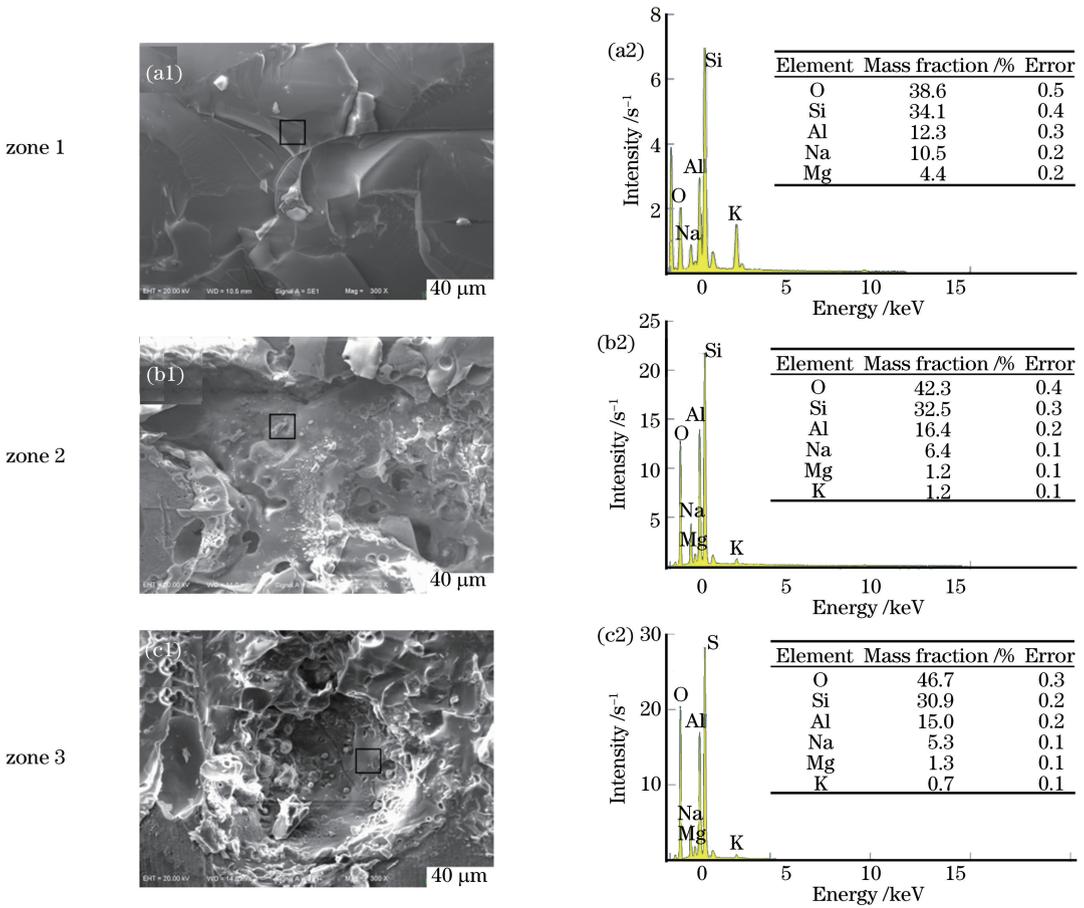


图 8 (a1)(b1)(c1)局部放大形貌及(a2)(b2)(c2)能谱分析

Fig. 8 (a1)(b1)(c1) Locally enlarged morphologies and (a2)(b2)(c2) energy spectral analyses

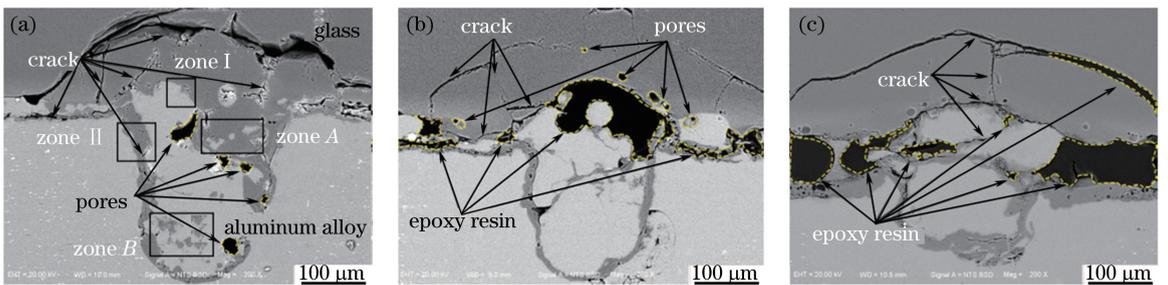


图 9 不同涂层厚度焊接件的横截面形貌。(a) 5 μm;(b) 12 μm;(c) 22 μm

Fig. 9 Cross-sectional morphologies of weldments with different thicknesses of coatings. (a) 5 μm; (b) 12 μm; (c) 22 μm

越厚,玻璃盖板与铝合金基板结合越不紧密,在制样的过程中镶嵌料会流入到焊缝区域及焊缝四周。焊接件结合不够紧密导致其结合力下降,这也进一步解释了微弧氧化涂层厚度与剪切力呈减小趋势的原因。

图 10 所示为图 9(a)中区域 A、区域 B 的局部放大图和能谱分析,可以发现,白色块状颗粒中含有大量的 Al 元素及少量的 O、Si、Mg 等元素,其质量分数分别为 95.7%、2.2%、1.7%和 0.4%。Si 元素含量高于表 1 中基体材料中的含量,而 Mg 元素含量低于基体材料中的含量,表明焊缝在快速加热和快速凝固过程中发生了元素过渡和元素稀释。除此之外,白色块状颗粒中还检测出了 O 元素,推测白色块状析出物为由铝与少量 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷组成的混合物。灰色块状颗粒主要以 Al、O 元素为主,质量分数分别为 37.7%和 32.4%,还有一定的 Si 和 Na 元素,质量分数分别为 13.7%和 12.8%,其中 O 元素和 Si 元素的质量分数比近似为 3:1,可判断灰色的块状颗粒物为由 Al<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>和 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>等硅酸盐化合物组成的混合物<sup>[24]</sup>。因此,由焊缝中的玻璃、金属颗粒和混合物颗粒形成的镶嵌结构是使高铝超薄玻璃与铝合金结合的主要原因,当水平方向的

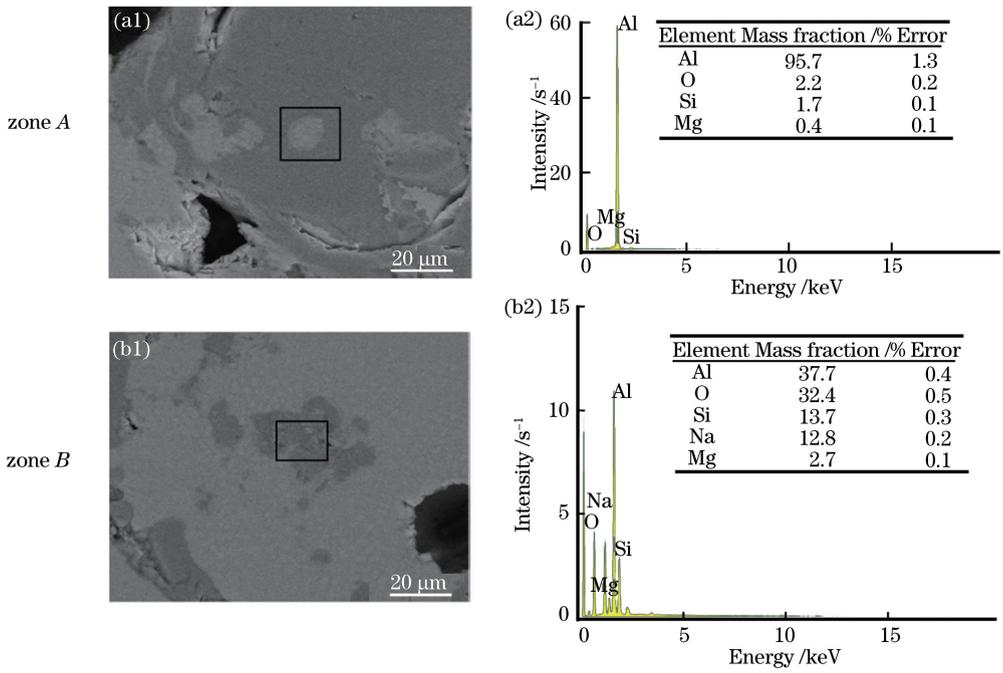


图 10 (a1)(b1)局部放大图及(a2)(b2)能谱分析

Fig. 10 (a1)(b1) Locally enlarged diagrams and (a2)(b2) energy spectral analyses

作用力施加到焊接件时,这种镶嵌结构会起到抵御破坏的作用<sup>[13]</sup>。

利用能谱分析进一步研究了高铝超薄玻璃和铝合金的焊缝混合区域中部[图 9(a)中的区域 I]与边界[图 9(b)中的区域 II]元素过渡的差别,各区域的局部放大图及元素线扫描图谱如图 11 所示。从图 11(a1)、(a2)中可以看出,在浓度梯度作用下,混合区域中部的富 Al 区域元素向右侧迁移,而右侧玻璃的 Si、O 等主要元素在驱动力的作用下向左侧迁移,过渡区域范围为 0~3 μm。从图 11(b1)、(b2)中可以看出,在焊缝混合区域的边缘,同样发生了过渡区域范围为 0~4 μm 的元素迁移。二者元素相互扩散的机理相同,但焊缝中部的元素扩散现象没有边缘明显,主要是因为激光辐射作用下,熔融的玻璃流入脉冲点坑中,在边缘处与铝合金发生接触,随后液态金属部分等离子体与熔融玻璃相互混合,玻璃与铝合金在中部的接触时间比在

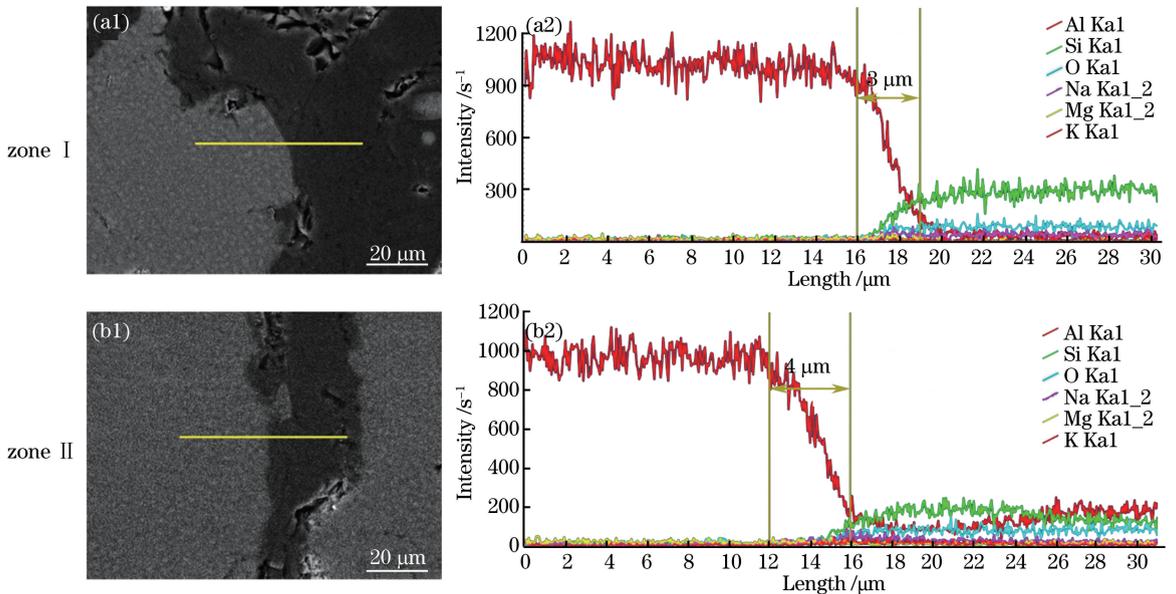


图 11 (a1)(b1)局部放大图及(a2)(b2)元素过渡

Fig. 11 (a1)(b1) Locally enlarged diagrams and (a2)(b2) element transition

边缘处的接触时间短。菲克第二定律为

$$\partial C/\partial t = D(\partial C/\partial x^2), \quad (1)$$

式中  $C$  为物质的浓度,  $D$  为扩散常数,  $t$  为扩散时间,  $x$  为扩散距离。由(1)式可知,当浓度一定时,扩散距离随着扩散时间的增加而增大,因此混合时间较短的区域的过渡区域范围相对较小。

### 3.5 焊接机理分析

焊缝形成过程、焊缝结合界面及焊接件断裂的示意图如图 12(a)~(c)所示。由图 12(a)可知,在第一阶段激光辐射过程中,部分能量被微弧氧化膜吸收,部分能量被玻璃非线性吸收,还有一部分能量被铝合金线性吸收;材料在吸收能量后进入第二阶段,熔化的金属在激光脉冲作用下向上流动,而熔融玻璃在重力作用下向下流动;第三阶段是两种熔化的材料经过短暂混合后形成焊缝,如图 12(b)所示。从图 12(b)可以看出,在相同激光工艺参数作用下,焊缝熔池的深宽比随着微弧氧化涂层厚度的增加而减小。当涂层厚度较小时,铝合金吸收能量较多,基板熔化部分较多,造成熔池深度较深,冷却后在界面处形成的金属及非金属混合物颗粒能够形成良好的镶嵌结构。图 12(c)所示为焊接件受到水平方向的剪切力时,焊缝区域内的镶嵌结构会出现三种不同的断裂模式。模式 1 中熔池深宽比较大,玻璃与焊缝区域结合紧密,焊接件断裂主要发生在相对薄弱的玻璃母材焊缝结合处,此时的抗破坏能力最强。模式 2 中熔池深宽比值中等,焊缝与两种母材的结合相对平衡,焊缝受到横向作用力时在镶嵌结构中产生应力集中,出现裂纹,焊缝中的混合颗粒会改变裂纹走向,消耗更多的能量。模式 3 中熔池深度较浅,熔化材料较少,焊缝受到水平反方向剪切力时,裂纹几乎沿着熔池底部扩展,此时焊缝抗剪能力最小。这与图 8 所观察到的现象一致,进一步阐明了微弧氧化涂层厚度变化对焊接件性能影响的原因。

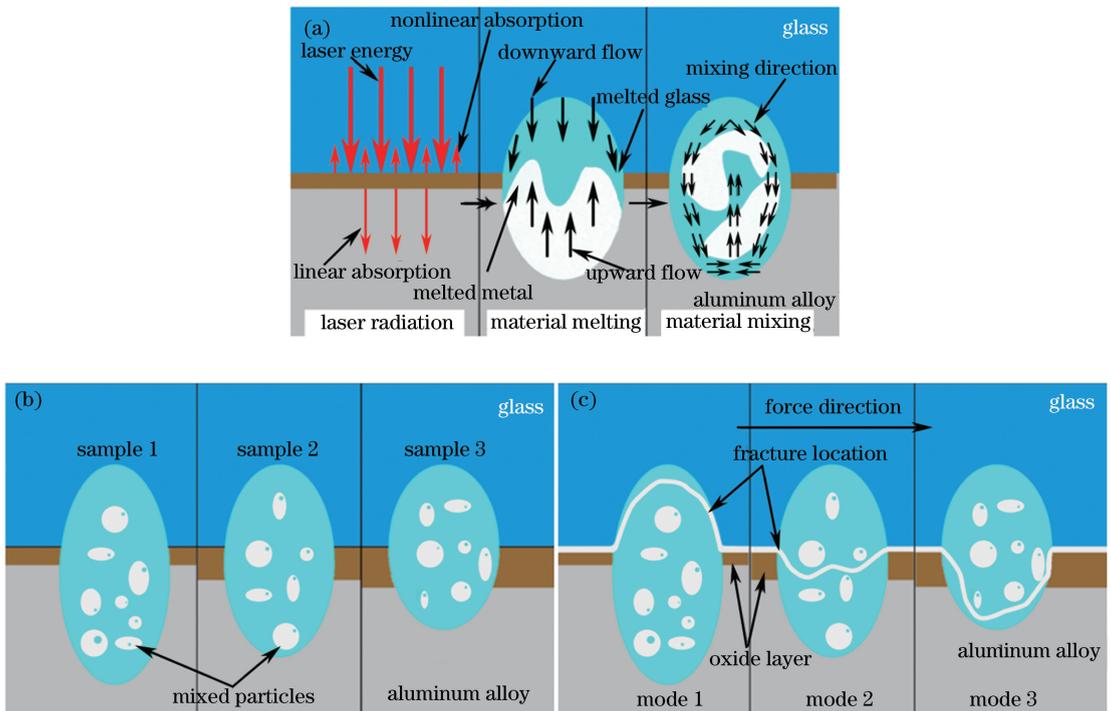


图 12 (a)焊缝形成过程示意图;(b)焊缝界面示意图;(c)焊接件断裂示意图

Fig. 12 (a) Schematic of weld formation; (b) schematic of weld interface; (c) schematic of weld fracture

## 4 结 论

采用微弧氧化工艺,在铝合金表面制备了不同厚度的微弧氧化涂层。通过激光透射焊接技术,对高铝超薄玻璃与铝合金进行封接,研究了不同厚度的微弧氧化涂层对焊接件焊接质量的影响,得到以下结论。

1) 微弧氧化涂层能够有效地充当吸收层和缓冲层,从而实现高铝超薄玻璃与铝合金的有效结合。2) 当铝

合金表面的微弧氧化涂层厚度在一定范围内时,随着涂层厚度的增加,焊接件剪切力减小。当涂层厚度为  $5\ \mu\text{m}$  时,焊接件焊接质量良好,并且抗剪切力性能优良。

## 参 考 文 献

- [1] Xia Suqi, Gu Shaoxuan, Xu Xinyi. Research and development of ultra-thin glass[J]. *The World of Building Materials*, 2015, 36(4): 37-40.  
夏素旗, 顾少轩, 徐心怡. 超薄玻璃的研究和发展[J]. *建材世界*, 2015, 36(4): 37-40.
- [2] Wang Qi, Fan Jinjun. Analysis of chemical properties of two high aluminum glass[J]. *Glass*, 2013(6): 47-48.  
王琦, 樊进军. 两种高铝玻璃化学钢化性能分析[J]. *玻璃*, 2013(6): 47-48.
- [3] Wang Peizhao, Wu Ya, Ding Xiaoye, *et al.* Research on chemical strengthened of ultrathin glass[J]. *Bulletin of the Chinese Society*, 2016, 35(5): 1622-1626.  
王沛钊, 吴亚, 丁小叶, 等. 浮法超薄玻璃化学钢化及性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(5): 1622-1626.
- [4] Chen Fu, Liu Xinming, Wu Lihua, *et al.* Forming process of ultra-thin aluminum electronic glass [J]. *Glass*, 2016(10): 12-15.  
陈福, 刘心明, 武丽华, 等. 超薄高铝电子玻璃的成形方法[J]. *玻璃*, 2016(10): 12-15.
- [5] Zhang Xinge, Li Liqun, Chen Yanbin, *et al.* Study on characteristics of laser-resistance hybrid welding for aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1404-1408.  
张新戈, 李俐群, 陈彦宾, 等. 铝合金激光-电阻复合焊接特性研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1404-1408.
- [6] Li Zhuoran, Xu Xiaolong. Review of bonding technology of glass to metal[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2013, 8(2): 123-130.  
李卓然, 徐晓龙. 玻璃与金属连接技术研究进展[J]. *失效分析与预防*, 2013, 8(2): 123-130.
- [7] Chern T S, Tsai H L. Wetting and sealing of interface between 7056 Glass and Kovar alloy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 104(2/3): 472-478.
- [8] Malfait W J, Klemencic R, Lang B, *et al.* Optimized solder alloy for glass-to-metal joints by simultaneous soldering and anodic bonding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 176-182.
- [9] Oberhammer J, Niklaus F, Stemme G. Sealing of adhesive bonded devices on wafer level[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 110(1/2/3): 407-412.
- [10] Sugiyama S, Kiuchi M, Yanagimoto J, *et al.* Application of semisolid joining—Part 4 glass/metal, plastic/metal, or wood/metal joining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(1/2/3): 623-628.
- [11] 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.
- [12] Quintino L, Liu L, Miranda R M, *et al.* Bonding NiTi to glass with femtosecond laser pulses[J]. *Materials Letters*, 2013, 98: 142-145.
- [13] 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.
- [14] Zou Tao, Chen Changjun, Zhang Min, *et al.* Study on laser welding mechanisms of glass/stainless-steel and glass/titanium-alloy materials[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0902002.  
邹涛, 陈长军, 张敏, 等. 建筑用玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金激光焊接机理研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0902002.
- [15] Li Chuangye, Zhang Min, Chen Changjun, *et al.* Effect of laser weld spacing and multipass welding on performance of glass sealing with aluminum alloy and underlying mechanism[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0702005.  
李创业, 张敏, 陈长军, 等. 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探究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0702005.
- [16] Zhang Zhiqi, Li Weijie, Yang Xiuchun, *et al.* Progress of research on chemically strengthened ultra-thin plate glass[J]. *Glass & Enamel*, 2009, 37(4): 40-49.  
张峙琪, 李伟捷, 杨修春, 等. 超薄玻璃化学钢化的研究进展[J]. *玻璃与搪瓷*, 2009, 37(4): 40-49.
- [17] Hu Mingying, Cai Jinjin, Li Xin. Influence of welding parameters on weld shape in laser deep penetration welding for aluminum alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(13): 149-151.  
胡敏英, 蔡金金, 李昕. 铝合金激光深熔焊接工艺参数对焊缝成形的影响[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(13): 149-151.

- [18] de Pablos-Martina A, Lorenz M, Grundmann M, *et al.* Laser welding of fused silica glass with sapphire using a nonstoichiometric, fresnoitic  $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8 \cdot 3\text{SiO}_2$  thin film as an absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92: 85-94.
- [19] de Pablos-Martina A, Höche T. Laser welding of glasses using a nanosecond pulsed Nd:YAG laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 1-9.
- [20] Liu Wei, Liu Huixia, Meng Dongdong, *et al.* Stress distribution and failure behavior of laser transmission welding parts during tensile process[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0602003.  
刘伟, 刘会霞, 孟冬冬, 等. 激光透射焊接件拉伸过程应力分布和失效行为[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602003.
- [21] Xue Wenbin, Deng Zhiwei, Lai Yongchun, *et al.* Phase distribution and formation mechanism of ceramic coatings formed by microarc oxidation (MAO) on Al alloy[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 1997, 11(2): 169-172.  
薛文彬, 邓志威, 来永春, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷膜的相分布及其形成[J]. *材料研究学报*, 1997, 11(2): 169-172.
- [22] Ciuca O P, Carter R M, Prangnell P B, *et al.* Characterisation of weld zone reactions in dissimilar glass-to-aluminum pulsed picosecond laser welds[J]. *Materials Characterization*, 2016, 120: 53-62.
- [23] Shi Shuang, Sun Mingying, Hao Yanfei, *et al.* Effect of surface treatment technology on laser damage resistance of aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1202001.  
时双, 孙明营, 郝燕飞, 等. 表面处理工艺对铝合金抗激光损伤能力的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202001.
- [24] 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.