

激光焊接参数对有机玻璃与不锈钢接头力学性能的影响

黄怡洁, 高向东, 林少铎

广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 通过对有机玻璃与 304 不锈钢进行异种材料的搭接焊试验,研究了焊接过程中出现的物理现象及焊接缺陷。利用正交试验得到了优化的工艺参数组合,并获得了成形良好的焊接接头。分析了工艺参数对剪切应力的影响。研究表明,激光焊接速度、脉冲宽度、光斑大小和脉冲频率对剪切应力具有较大影响,焊接接头的最大剪切力为 $191 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。焊接缺陷和能量密度是导致焊接接头失效的主要因素。

关键词 激光技术; 激光焊; 塑料与金属; 焊接缺陷; 工艺参数; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1202006

Influences of Laser Welding Parameters on Mechanical Properties of Polymethyl Methacrylate and Stainless-Steel Joints

Huang Yijie, Gao Xiangdong, Lin Shaoduo

School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract By the experiment of the overlap welding of dissimilar materials for the polymethyl methacrylate and 304 stainless steels, the physical phenomena and weld defects during the welding process are analyzed. By the orthogonal tests, the optimized process parameter combination is obtained, and the well-formed weld joints are realized. The influences of the process parameters on the shear stress are analyzed. The study results show that the influences of laser welding speed, pulse width, spot size and pulse frequency on the shear stress are strong, and the maximum shear force of weld joints is $191 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. The key factors determining the failure of weld joints are weld defects and energy densities.

Key words laser technique; laser welding; plastics and metals; weld defects; process parameters; mechanical properties

OCIS codes 140.3538; 350.3390; 160.2750

1 引 言

异种材料的连接方法除了粘接和机械铆接外,有效的微连接技术也备受关注^[1-2]。有机玻璃(PMMA)的热膨胀特性容易造成其在焊接过程中发生碎裂和变形,因此,实现 PMMA 与金属的连接是一个难题。脉冲式光纤激光焊接具有小热影响区、非线性吸收以及非接触式焊接的特点,该方式适合 PMMA 与 304 不锈钢(304 ss)的微焊接^[3]。

PMMA 由聚甲基丙烯酸甲酯单体聚合而成,具有无毒环保、性质稳定、不易脆裂的优点,具有高透射率,并与人体组织有良好的相容性^[4]。不锈钢在常温下的力学性能良好,耐腐蚀性能优异。将不同性能的材料焊接成复合零部件,可减轻零部件重量并降低贵重材料成本。因此,PMMA 与 304 ss 复合材料可广泛应用

收稿日期: 2017-07-05; **收到修改稿日期:** 2017-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51675104)、广东省科技计划(2016A010102015)、广州市科技计划(201510010089)

作者简介: 黄怡洁(1990—),女,硕士研究生,主要从事焊接工艺方面的研究。E-mail: 374382610@qq.com

导师简介: 高向东(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事焊接自动化方面的研究。

E-mail: gaoxid666@126.com(通信联系人)

到中微子探测器、航空、船舶等领域,具有广阔的发展前景^[5]。国外在激光焊接塑料与金属异种材料领域的研究较为系统和深入^[6-8],而国内的相关研究较少^[9-10],一般通过数值模拟仿真来指导试验^[11]。本文通过研究 PMMA 与 304 ss 异种材料的激光焊接,分析了工艺参数对焊接接头剪切应力的影响规律,探索了焊接接头的失效形式,为塑料与金属的激光焊接提供了试验依据。

2 试验材料、方法及设备

2.1 试验材料

试验材料为 304 ss 板和 PMMA 板,尺寸分别为 80 mm×80 mm×1 mm 和 80 mm×80 mm×2 mm,其物理特性参数见表 1。物理参数上的巨大差异导致两者之间的激光焊接有一定的难度。

表 1 PMMA 和 304 ss 物理参数

Table 1 Physical parameters of PMMA and 304 ss

Parameter	PMMA	304 ss
Density / (kg · m ⁻³)	1186-1190	7930
Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	0.194-0.196	14
Melting point / °C	540	1400-1425
Specific heat capacity / (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	1900	500
Elongation at break / %	2-3	40
Tensile strength / MPa	55-77	520

2.2 试验方法及设备

试验前,将 304 ss 表面打磨平整,使用去离子水清洗 PMMA 并风干。在焊接过程中将金属置于上层,PMMA 置于下层,并利用工装夹具夹紧;采用光纤传输焊接机进行顺序式周线热传导搭接焊试验,搭接面积为 80 mm×30 mm。焊接完成后利用金相显微镜对焊缝宽度 D 进行测量,采用万能试验机测试焊接件的剪切应力 σ ,如图 1 所示。选择焊接接头所能承受的最大剪切应力作为焊接工艺参数优化的终极目标。

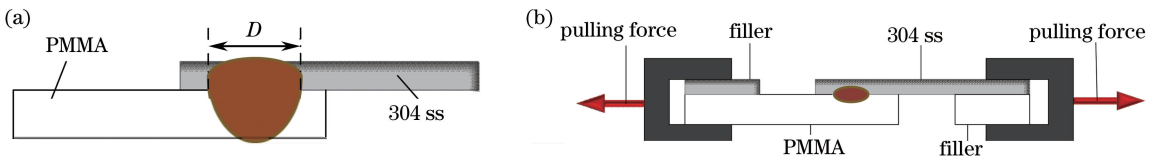


图 1 (a) 焊缝宽度测量示意图;(b) 拉伸试验示意图

Fig. 1 (a) Schematic of measuring weld width; (b) schematic of tensile test

PMMA 对激光的透射率高而吸收率较低,焊接过程中保证 PMMA 对激光能量的吸收是获得 304 ss 与 PMMA 间良好焊接的关键。大的激光光斑照射可以确保焊件对激光能量的吸收,使激光能量分布均匀、熔池熔化的面积增加。激光光路原理图如图 2 所示,通过控制焊接嘴到焊件距离 H 来调节光斑 Φ 的大小。当 H 取 25,30,35,40,45 mm 时,对应的 Φ 分别为 2,4,6,8,10 mm。

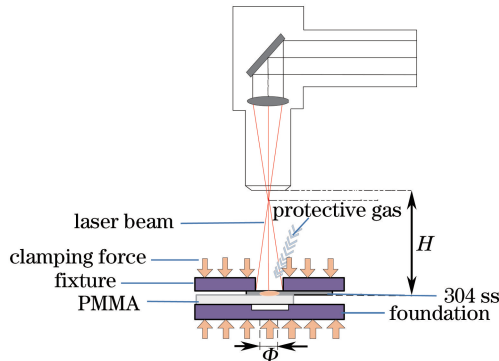


图 2 激光光路原理图

Fig. 2 Schematic of laser light path

对焊接质量产生影响的因素有:激光峰值功率 ω , 焊接速度 v , 光斑大小 Φ , 脉冲频率 f , 脉冲宽度 p , 保护气体流量 q 。在多次单因素试验的基础上确定了各因素取值的水平范围, 见表 2。

表 2 试验影响因素与水平参数

Table 2 Experimental influence factors and level parameters

Sequence number	ω /kW	v /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Φ /mm	f /Hz	p /ms	q /($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
Level 1	2.0	0.5	2	7	5	10
Level 2	2.3	1.0	4	8	6	15
Level 3	2.6	1.5	6	9	7	20
Level 4	2.9	2.0	8	10	8	25
Level 5	3.2	2.5	10	11	9	30

3 试验结果与分析

3.1 焊接过程中的物理现象

在焊接过程中, 较高的激光能量导致下层的 PMMA 燃烧, 产生刺鼻难闻的烟雾。烟雾不能及时排出使得焊缝区结合面不紧密, 将影响焊接精度和强度。当焊接速度减慢、光斑减小、激光峰值功率、脉冲宽度和脉冲频率增大时, PMMA 的熔化量增大, 产生的烟雾增多。因此, 焊接时应选择合适的激光能量密度, 在保证焊接深度的同时, 尽量减小产生的烟雾量, 以保证焊接质量。

3.2 焊接过程中产生的缺陷及预防措施

焊接过程中产生的缺陷主要是 PMMA 的焊缝表面热分解孔洞、凹凸不平、气泡等, 如图 3(a) 所示。激光能量作用于 304 ss 表面时, 金属表面受热熔化并将热量传导至 PMMA, 当热传导温度达到 PMMA 熔融温度时, PMMA 受热熔化形成流动性较差的粘性流体。由于金属表面被加热时局部受热不均匀, 因此两焊件冷却后形成的焊缝在 PMMA 表面处表现为凹凸不平。当热传导温度超过 PMMA 的热分解温度时, PMMA 发生严重热分解而产生孔洞。在焊接过程中, 两焊件的接触面之间有空气混入, 当焊接速度加快时, 空气来不及溢出导致多个无规则的气泡附着在焊缝表面。

减少焊接缺陷的预防措施为: 选择合适的工艺参数范围, 且能量密度 e 不宜过大; 焊接前必须将两工件接触面打磨平整光滑, 以减小两工件的焊接间隙; 选择合适流量的氩气保护, 以控制热分解燃烧。通过优化工艺参数得到了图 3(b) 所示的焊缝背面宏观形貌, 可以看到, 304 ss 与 PMMA 在焊缝处紧密连接, 焊缝间有均匀细小的气泡分布。

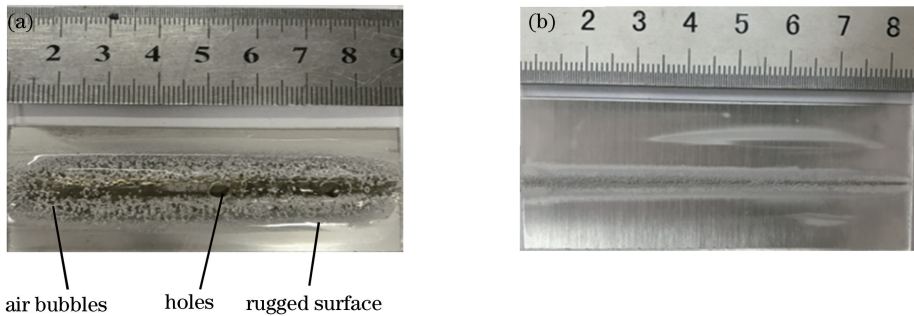


图 3 焊缝成形 PMMA 面的宏观形貌。(a) 优化前; (b) 优化后

Fig. 3 Macro-morphologies of PMMA surfaces after weld formation. (a) Before optimization; (b) after optimization

3.3 工艺参数对焊接接头剪切应力的影响

根据表 2 进行正交试验设计, 得到 25 组焊接参数组合^[12]。焊接试验结束后进行焊缝宽度测量和拉伸试验, 试验设计参数与测试结果见表 3。通过调整焊接工艺参数来改变激光能量输入, 得到严重烧蚀、中度烧蚀、轻微烧蚀、焊缝均匀、焊合但焊缝窄、未焊合等一系列成形焊缝。其中, 以未焊牢、焊接效果最优、焊接效果不好和焊接热分解为代表的四种典型的焊缝形貌见表 4。






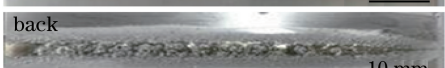


表 3 试验设计参数与测量结果

Table 3 Experimental design parameters and measurement results

Experiment No.	Parameter						Result	
	ω /kW	v /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Φ /mm	f /Hz	p /ms	q / ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	Weld width /mm	Pulling force /N
1	2.0	0.5	2	7	5	10	1.02	138.00
2	2.0	1.0	4	8	6	15	1.52	315.00
3	2.0	1.5	6	9	7	20	1.49	244.00
4	2.0	2.0	8	10	8	25	1.34	638.00
5	2.0	2.5	10	11	9	30	1.88	0
6	2.3	0.5	4	9	8	30	2.37	234.50
7	2.3	1.0	6	10	9	10	2.50	97.35
8	2.3	1.5	8	11	5	15	1.12	167.10
9	2.3	2.0	10	7	6	20	1.99	0
10	2.3	2.5	2	8	7	25	1.12	571.00
11	2.6	0.5	6	11	6	25	3.47	379.25
12	2.6	1.0	8	7	7	30	1.55	70.50
13	2.6	1.5	10	8	8	10	3.52	412.10
14	2.6	2.0	2	9	9	15	1.48	95.45
15	2.6	2.5	4	10	5	25	1.82	949.35
16	2.9	0.5	8	8	9	20	4.28	260.65
17	2.9	1.0	10	9	5	25	2.91	316.35
18	2.9	1.5	2	10	6	30	1.57	276.00
19	2.9	2.0	4	11	7	10	1.83	733.35
20	2.9	2.5	6	7	8	20	1.98	986.15
21	3.2	0.5	10	10	7	15	3.96	306.50
22	3.2	1.0	2	11	8	20	1.74	215.15
23	3.2	1.5	4	7	9	25	1.99	186.41
24	3.2	2.0	6	8	5	30	1.86	522.85
25	3.2	2.5	8	9	6	10	2.11	862.75

表 4 四种典型的焊缝形貌

Table 4 Four typical weld morphologies

Laser energy density /($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$)	Weld morphology	Image
Less than 3.96	No weld	front 
		back 
6.5-12.88	Optimal weld	front 
		back 
3.96-6.5 12.88-22.4	Bad weld	front 
		back 
More than 22.4	Decomposition	front 
		back 

剪切应力的大小反映了搭接接头拉伸时的剪切强度,计算公式为

$$\sigma = \frac{F}{D \times L}, \quad (1)$$

式中 σ 为剪切应力, F 为焊接样品的拉断力, D 为焊缝宽度, L 为焊件厚度。由(1)式获得正交试验下 25 个试样的剪切应力值,如图 4 所示。可以看出,25 组试验的剪切应力分布均匀。各因子在五个水平组合中都有一个相对较优的工艺参数组合,各组最佳参数组合见表 5。

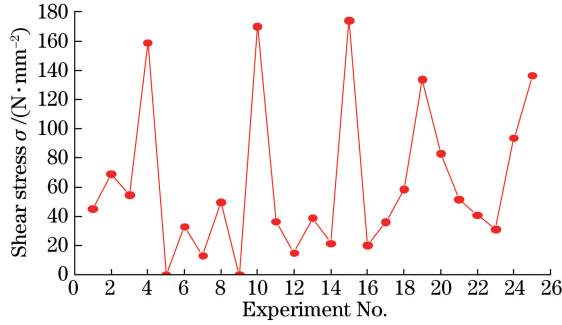


图 4 试验剪切应力结果

Fig. 4 Experimental results of shear stress

表 5 最佳参数组合方案

Table 5 Combination scheme of optimal parameters

Sequence number	w /kW	v / (mm · s ⁻¹)	Φ /mm	f /Hz	p /ms	q / (L · min ⁻¹)	Parameter combination
Level 1	2.0	2.0	8	10	8	25	$w_1 v_4 \Phi_4 f_4 p_4 q_4$
Level 2	2.3	2.5	2	8	7	25	$w_2 v_5 \Phi_1 f_2 p_3 q_4$
Level 3	2.6	2.5	4	10	5	20	$w_3 v_5 \Phi_2 f_4 p_1 q_3$
Level 4	2.9	2.0	4	11	7	10	$w_4 v_4 \Phi_2 f_5 p_3 q_1$
Level 5	3.2	2.5	8	9	6	10	$w_5 v_5 \Phi_4 f_3 p_2 q_1$

最佳参数下的焊缝宏观形貌如图 5 所示,可以看到,焊缝背面有均匀平整的气泡附着在 304 ss 焊接区域,气泡中等偏小、气泡数量离散适中,可增大焊接接头的剪切应力。在塑料与金属的焊接过程中,一定量的气泡附着并扩散,这有利于在塑料与金属间形成抗拉强度大的连接体^[13],离散均匀的气泡有助于提高焊缝连接区域的强度^[14]。

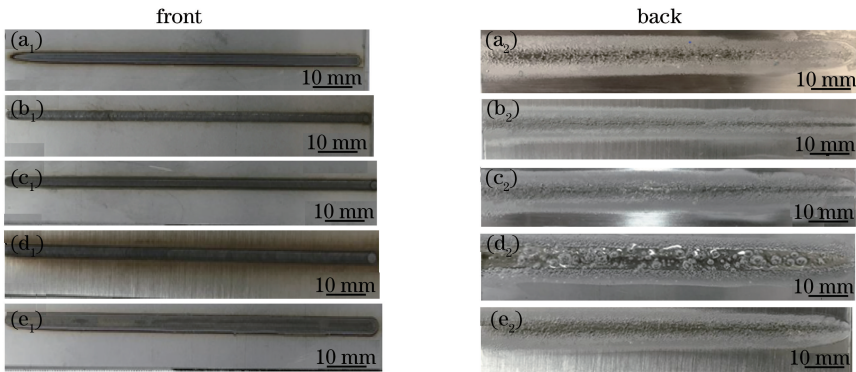


图 5 最佳参数下的焊缝宏观形貌。(a₁)(a₂) Level 1;(b₁)(b₂) Level 2;(c₁)(c₂) Level 3;(d₁)(d₂) Level 4;(e₁)(e₂) Level 5

Fig. 5 Macro-appearances of welds under optimal parameters.

(a₁)(a₂) Level 1; (b₁)(b₂) Level 2; (c₁)(c₂) Level 3; (d₁)(d₂) Level 4; (e₁)(e₂) Level 5

将 5 组在峰值功率为 2.0 kW 条件下取得的剪切应力试验结果累加得到统计量,同理将其他因素在各水平下的试验结果叠加,得到各因素的统计量,对指标剪切应力的影响因素由主到次依次为焊接速度、脉冲宽度、光斑大小、脉冲频率、保护气体流量、峰值功率,各因素与平均剪切应力的关系如图 6 所示。

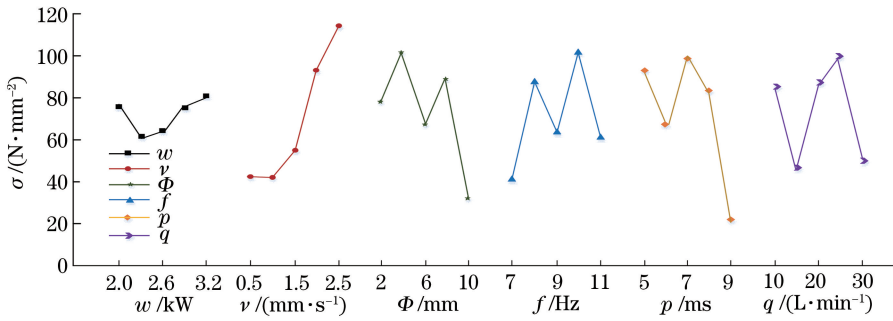


图 6 六因素与平均剪切应力的关系

Fig. 6 Six factors versus average shear stress

根据图 6 可选出指标剪切应力的最优焊接工艺参数组合为 $w_5 v_5 \Phi_2 f_4 p_3 q_4$, 此组合不包含表 5 中五水平参数最佳组合方案。为验证正交结果的准确性, 按照直观分析的预测进行试验。工艺参数为 $w_5 v_5 \Phi_2 f_4 p_3 q_4$ 时, 焊缝宽度为 1.93 mm, 拉断力为 1104.7 N, 代入(1)式得出剪切应力大小为 $191 N \cdot mm^{-2}$, 此剪切应力值高于 25 组正交试验中最大剪切应力。由此确定正交试验设计是一个可靠的数学模型。

3.4 焊接接头失效模式

在测量焊接接头力学性能的过程中, 发现有四种接头断裂失效模式。焊接接头的断裂形式与接头焊缝的宽度及激光能量密度影响下的焊缝成形有关, 能量密度与焊接工艺参数的关系为

$$e = \frac{P_a}{\nu \cdot \phi} = \frac{\int_0^{\omega} \frac{1}{4} \omega^2 f p d\omega}{\nu \cdot \phi} = \frac{1}{2} \omega \cdot f \cdot p, \quad (2)$$

式中 P_a 为激光平均功率。剪切应力与激光能量密度的关系如图 7 所示。

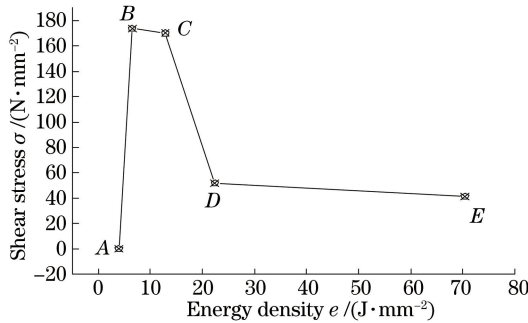


图 7 剪切应力与激光能量密度关系

Fig. 7 Shear stress versus laser energy density

当能量密度低于 $3.96 J \cdot mm^{-2}$ 时, 焊缝宽度较小, 焊缝成形属于未焊牢状态。焊接接头失效形式为焊缝结合面脱离, 焊缝处由较小的范德华力粘合, 焊接接头的剪切应力测试值为零, 如图 7 中 A 点所示。焊缝结合面脱离位置为图 8(a) 中的位置 1, 失效实物如图 8(c) 所示。

当能量密度在 $3.96 \sim 6.5 J \cdot mm^{-2}$ 时, 焊缝宽度为 $1 \sim 1.5 mm$, 焊缝成形属于焊接效果不好状态。PMMA 焊缝结合面凹凸不平, 有较窄的白色焊道, 且中间轻微隆起处分散着零星不规则气泡。焊接接头失效形式为焊缝结合面脱离, 焊接接头的剪切应力测试值为图 7 中 AB 段数值。焊缝结合面脱离位置为图 8(b) 中的位置 1', 失效实物如图 8(d) 所示。

当能量密度在 $12.88 \sim 22.4 J \cdot mm^{-2}$ 时, 焊缝宽度较宽, 焊缝成形属于焊接效果不好状态。焊接过程中作用于不锈钢面的激光能量密度偏高, 不锈钢焊缝表面中度灼烧, PMMA 焊缝面隆起较为明显, 该隆起部分形成的多个不规则熔融气泡脱离了焊缝融合区, 导致 PMMA 焊缝边缘区熔化过快而变薄。在剪切应力测试过程中, 焊件应力严重集中, 首先在焊缝区根部的薄弱位置断裂, 同时隆起处伴随着小裂纹。焊接接头的

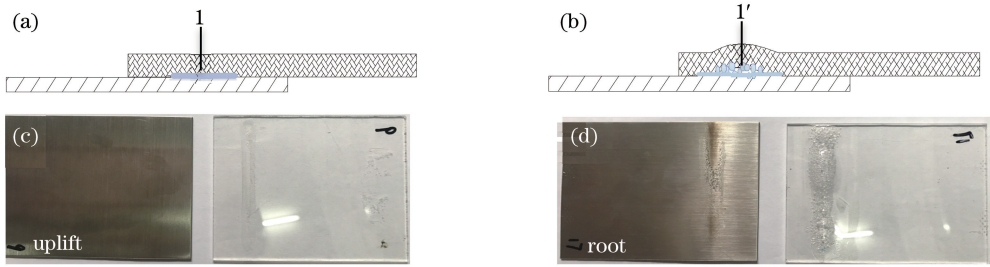


图 8 焊缝结合面处的(a)(b)失效位置示意图和(c)(d)失效接头实物

Fig. 8 (a)(b) Diagrams of failure positions and (c)(d) practical object of failure joint in weld interface

剪切应力测试值为图 7 中 CD 段数值,此时剪切应力的值明显低于 PMMA 本身。焊缝根部断裂位置为图 9(a)中的位置 3,断裂实物如图 9(b)所示。

当能量密度在 $22.4 \sim 70.4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时,焊缝宽度较宽,焊缝成形属于严重热分解状态。焊接过程中作用于不锈钢面的激光能量密度极高,不锈钢焊缝表面严重灼烧,导致 PMMA 焊缝面隆起较高,且焊缝隆起部位产生了严重的热分解孔洞。在剪切应力测试过程中,图 9(a)中的位置 2 处先发生断裂。焊接接头的剪切应力测试值为图 7 中 DE 段数值,焊缝断裂实物如图 9(c)所示。

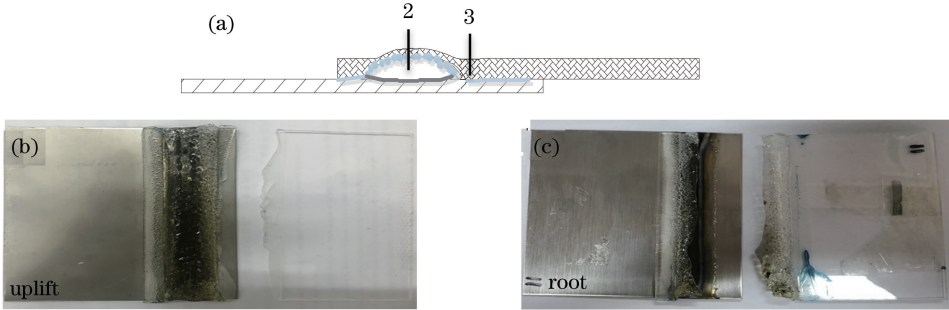


图 9 焊接接头的(a)断裂位置示意图和(b)(c)断裂焊缝实物

Fig. 9 (a) Diagram of fracture positions and (b)(c) practical object of fracture weld of weld joints

当能量密度在 $6.5 \sim 12.88 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时,焊缝宽度为 $1.3 \sim 2.1 \text{ mm}$,焊接效果较优,没有明显的焊接缺陷。在剪切应力测试过程中,PMMA 经过一定的塑性变形后瞬间脆断^[15],焊缝区保持完好形貌。焊接接头的剪切应力测试值为图 7 中 BC 段数值,抗剪切应力均在 $150 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 以上,表明焊缝区强度高于 PMMA 的强度。离焊接接头一侧的 PMMA 板断裂位置为图 10(a)中的位置 4,断裂实物如图 10(b)所示。

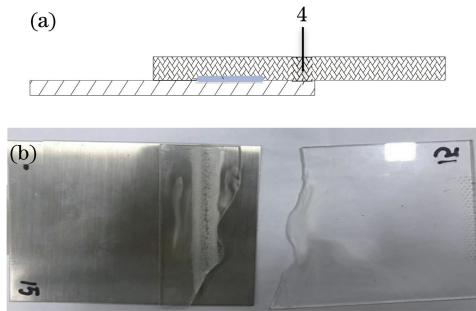


图 10 PMMA 一侧的(a)断裂位置示意图和(b)断裂实物

Fig. 10 (a) Diagram of fracture positions and (b) practical object of fracture at PMMA side

4 结 论

通过对 PMMA 与 304 ss 进行异种材料的激光焊接研究,得到以下结论。

- 1) 焊接过程中产生的烟雾量越大,焊接强度越低,焊缝表面产生热分解孔洞、凹凸不平以及气泡等焊接缺陷。通过优化焊接工艺参数可减少焊接缺陷并提高焊接质量。
- 2) 正交试验得到的最优工艺参数组合为峰值功率 3.2 kW,焊接速度 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,光斑大小 4 mm,脉冲频率 10 Hz,脉冲宽度 7 ms,保护气体流量 $25 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。
- 3) 拉伸试验中出现了四种断裂失效模式,焊接缺陷和能量密度是导致焊接接头失效的主要因素。

参 考 文 献

- [1] Mohid Z, Rosely M A A, Rafai N H, *et al.* Laser micro welding of dissimilar material of aluminum and copper alloys [J]. Materials Science Forum, 2017, 882: 18-22.
- [2] Mohammadi J, Behnamian Y, Mostafaei A, *et al.* Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations[J]. Materials Characterization, 2015, 101: 189-207.
- [3] Fan Wenzhong, Zhao Quanzhong. Recent progress of 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.
- [4] Zhang Geng'e. Application of organic glass in new energy vehicles [J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(5): 50-53.
张更娥. 有机玻璃在新能源汽车中的应用 [J]. 塑料科技, 2016, 44(5): 50-53.
- [5] Seki M, Tanaka S, Miki T, *et al.* Forward extrusion of bulk wood containing polymethylmethacrylate: Effect of polymer content and die angle on the flow characteristics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 140-146.
- [6] 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.
- [7] Jung D J, Cheon J, Na S J. Effect of surface pre-oxidation on laser assisted joining of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and zinc-coated steel [J]. Materials & Design, 2016, 99: 1-9.
- [8] Yusof F, Mutoh Y, Miyashita Y. Effect of pre-oxidized CuO layer in joining between polyethylene terephthalate (PET) and copper (Cu) by using pulsed Nd:YAG laser [C]. Advanced Materials Research, 2010, 129/131: 714-718.
- [9] Wang Zongyi, Wang Yuanqing, Du Xinxi, *et al.* Experimental research on bearing capacity of joint of acrylic and stainless steel [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(1): 105-109.
王综轶, 王元清, 杜新喜, 等. 有机玻璃与不锈钢连接节点承载性能试验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 105-109.
- [10] Lei Jianbo, Wang Zhen, Wang Yunshan, *et al.* Experimental study of laser transmission welding of polymethyl methacrylate [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103006.
雷剑波, 王镇, 王云山, 等. 激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯试验研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103006.
- [11] Chen Hao, Wang Xiao, Liu Huixia, *et al.* Numerical simulation-driven optimization of laser transmission welding process between PET and 304L stainless steel [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403006.
陈浩, 王霄, 刘会霞, 等. 数值模拟驱动的激光透射焊接 PET 与 304L 不锈钢的优化研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403006.
- [12] 吉万良. 正交试验设计和分析方法研究 [J]. 工业, 2015(19): 38.
- [13] Katayama S, Kawahito Y. Laser direct joining of metal and plastic [J]. Scripta Materialia, 2008, 59(12): 1247-1250.
- [14] Wahba M, Kawahito Y, Katayama S. Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1166-1174.
- [15] 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.