

# 激光摆动模式对铝/钢焊接接头成形特征及组织、强度的影响

李军兆<sup>1,2</sup>, 刘一搏<sup>1,2</sup>, 孙清洁<sup>1,2\*</sup>, 陶玉洁<sup>2</sup>, 张清华<sup>2</sup>, 靳鹏<sup>1,2</sup>, 冯吉才<sup>2</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209

**摘要** 铝、钢金属在物理化学性质上的巨大差异使得铝/钢异种接头的优质连接成为焊接领域的难点。采用摆动激光热源实现了 6061 铝合金和 316L 不锈钢搭接接头的良好连接, 研究了激光摆动模式、摆动频率对接头成形质量、界面组织结构及拉剪强度的影响。结果表明: 摆动激光能够增加铝/钢界面的连接面积, 减小接头的熔深, 有效抑制焊缝中的气孔、裂纹等缺陷; 同时, 摆动激光能使界面温度均匀并增强对熔池的搅拌作用, 降低界面处的冶金反应, 有效抑制界面脆硬金属间化合物的产生; 摆动激光焊接接头的界面组织主要为 Fe(Al) 固溶体及少量弥散分布的针状 FeAl<sub>3</sub> 相; 摆动激光焊接接头的最大拉剪强度可达 117.5 N/mm, 相比于常规激光焊接接头提高了约 45%, 接头断裂位置为不锈钢与焊缝交界处。

**关键词** 焊接技术; 摆动激光焊接; 铝合金; 不锈钢; 微观组织; 强度

中图分类号 TG457

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0402010

## Effects of Laser Beam Wobble on Weld Formation Characteristics, Microstructure, and Strength of Aluminum Alloy/Steel Joints

Li Junzhao<sup>1,2</sup>, Liu Yibo<sup>1,2</sup>, Sun Qingjie<sup>1,2\*</sup>, Tao Yujie<sup>2</sup>,  
Zhang Qinghua<sup>2</sup>, Jin Peng<sup>1,2</sup>, Feng Jicai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>2</sup>Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of  
Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

**Abstract** The high-quality welding of aluminum alloy/steel dissimilar alloys is difficult owing to the great variation in their physical and chemical properties. In this work, the laser beam wobble welding process is adopted to achieve good connection between 6061 aluminum alloy and 316L stainless steel. Moreover, the effects of laser wobble mode and wobble frequency on weld formation characteristics, microstructure, and tensile-shear strength have been investigated. The results indicate that laser wobble welding can increase interfacial bonding area, decrease weld penetration, and effectively suppress weld pores and cracks. Laser wobble can make the interfacial temperature uniform and enhance the stirring effect on the weld pool; it also alleviates metallurgical reactions and suppresses the formation of brittle intermetallic compounds. The interfacial microstructures in a welded joint obtained with wobble laser mainly comprise Fe(Al) solid solution and a small amount of FeAl<sub>3</sub> phase; the maximum tensile-shear strength of the joint obtained with the wobble laser can reach 117.5 N/mm, which is 45% more than that of conventional laser welding. Welded joint fractures are also observed at the interface between stainless steel and the weld metal.

**Key words** laser technique; laser wobble welding; aluminum alloy; stainless steel; microstructure; strength

**OCIS codes** 140.3390; 140.3295; 350.3390

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-11-06; 录用日期: 2019-11-26

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0300602)、国家自然科学基金(U1960102, 51705103, 51475104)

\* E-mail: qjsun@hit.edu.cn

# 1 引 言

铝合金为轻质材料,不锈钢为高强材料,它们均已被广泛应用于航空航天、汽车产业等领域。随着产业结构的优化升级和对节能减排的要求,单一结构的构件已不能满足现代产业的发展需求,复合结构的优势逐渐凸显,目前已有大量的铝/钢焊接复合结构被应用于汽车车身制造<sup>[1]</sup>。铝合金具有密度小、耐蚀性好和经济效益高等优点,不锈钢具有强度高、耐蚀性强和生物兼容性好等优点,因此,铝/钢异种金属复合构件同时兼有铝合金和不锈钢的性能优势,可以满足不同工作条件对材质的要求,具有广阔的应用前景。然而,铝和钢在熔点、热导率、线膨胀系数和晶格结构等性能上存在较大差异,焊接性较差,焊接时极易在连接界面上产生脆硬的 Fe-Al 金属间化合物(IMCs),导致接头变脆。此外,由于焊接过程中会产生较大的热应力,故接头中易出现凝固裂纹缺陷,影响接头的使用性能<sup>[2-3]</sup>。

目前,国内外研究人员主要采用熔钎焊<sup>[4-5]</sup>、摩擦焊<sup>[6]</sup>、激光焊<sup>[7]</sup>以及点焊<sup>[8]</sup>等技术实现铝/钢异种金属的连接,并主要围绕着如何有效减少或抑制界面脆性金属间化合物的生长,进而改善焊接接头的力学性能进行研究。相关学者从调控焊接冶金反应出发,主要通过添加辅助元素或优化焊接方法来抑制界面脆性金属间化合物的生成。Yan 等<sup>[9]</sup>认为 Fe-Al 金属间化合物的富集主要与铝合金在钢中的溶解量有关,大量的脆性金属间化合物增加了接头凝固裂纹的敏感性,并得到了界面反应温度对化合物的生长和残余应力分布具有显著影响的结论。

表 1 6061 铝合金母材的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of 6061 aluminum alloy base material

Element	Ti	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Zn	Al
Mass fraction /%	0.15	1.0	0.6	0.25	0.15	0.15	0.25	Bal.

表 2 316L 不锈钢母材的主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of 316L stainless steel base material

Element	C	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
Mass fraction /%	0.02	1.58	0.02	0.45	16.74	12.89	2.05	Bal.

## 2.2 试验方法

本试验采用的焊接设备是最大输出功率为 6000 W 的 YLS-6000 型激光热源,采用 D50 摆动激光头,该激光头可实现不同的摆动路径规划,最大摆动幅度为 2.0 mm,摆动频率为 1000 Hz。焊接结构示意图如图 1 所示,试验采用钢上-铝下的搭接接头

Xia 等<sup>[10]</sup>发现,焊丝金属中的硅元素可以有效减小铝/钢界面化合物层的厚度,促进 Al-Fe-Si 三元化合物的生成。Long 等<sup>[11]</sup>采用预置镍粉、硅粉和锌粉的方法来抑制铝/钢界面的直接反应,使得接头的最高性能达到 165.24 N/mm。Yan 等<sup>[12]</sup>发现,在激光焊接过程中施加外加磁场可以控制界面反应并阻止焊接裂纹的产生。此外,有学者提出,激光焊接时,铝/钢接头的力学性能与成形质量密切相关。Cui 等<sup>[13]</sup>采用双激光光束焊接技术制备了铝/钢异种金属,发现通过控制焊接熔深可以有效抑制焊接气孔、裂纹等缺陷,进而改善接头的性能。Yuan 等<sup>[14]</sup>发现,铝/钢接头连接面积和界面化合物层的厚度均会影响接头的性能,采用双束激光焊接方法可以提高铝/钢界面的润湿性,增大界面的连接面积,进而改善接头的强度。Shah 等<sup>[15]</sup>认为摆动激光焊接可以增大接头连接面积并能降低界面反应。

针对铝/钢异种金属焊接的难点,本文对 6061 铝合金和 316L 不锈钢进行焊接,主要研究了激光摆动焊接参数对接头成形特征、界面元素扩散、冶金反应及断裂行为的影响,实现了铝、钢之间的有效连接,为铝/钢结构件激光焊接的推广应用提供了新思路。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

本试验采用 1 mm 厚的 6061 铝合金和 1 mm 厚的 316L 不锈钢作为试验材料,它们的尺寸均为 100 mm×100 mm,主要化学成分如表 1 和表 2 所示。

形式,搭接距离为 30 mm,采用纯氩气保护,氩气流量为 20 L/min,激光头沿焊接方向偏转 10°。试验参数如表 3 所示,主要研究激光束摆动模式和摆动频率的影响。相比于常规的焊接模式,当采用摆动激光焊接时,激光功率需稍微增大,以保证焊缝的有效连接。

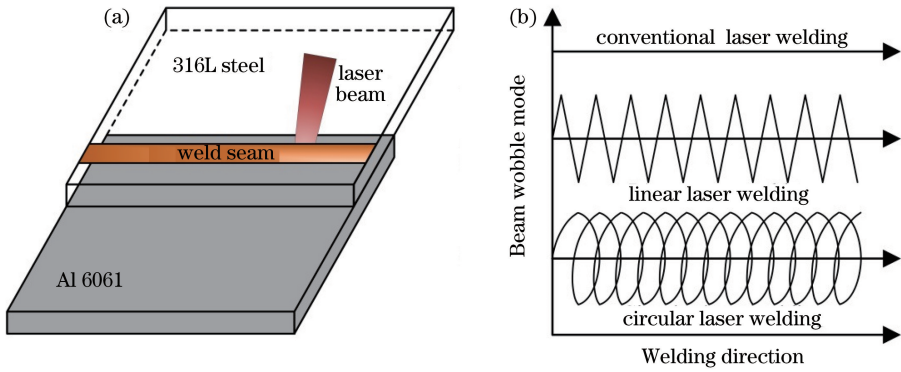


图 1 焊接示意图。(a)铝/钢结构件焊接示意图;(b)激光束运动路径

Fig. 1 Schematics of welding. (a) Schematic of aluminum alloy/steel sample; (b) trajectory of laser beam

焊接前采用钢丝刷清洁铝合金和不锈钢表面,去除表面的氧化膜,并用丙酮进行清洗。焊接结束后,沿垂直于焊缝方向切取金相试件和拉伸试件,试件经研磨和抛光处理后进行组织和性能测试;采用

场发射扫描电子显微镜(SEM)在背散射模式下观察界面的微观组织及成分;采用WDW-50型50 kN万能材料试验机以0.5 mm/min的拉伸速度进行拉伸试验,测试接头的拉剪强度。

表 3 焊接试验参数

Table 3 Welding parameters

No.	Laser power /kW	Wobble frequency /Hz	Wobble mode	No.	Laser power /kW	Wobble frequency /HZ	Wobble mode
1	1	—	—	7	2.5	100	Linear
2	1.5	—	—	8	2.5	200	Linear
3	1.8	—	—	9	1.5	20	Circular
4	2.0	—	—	10	1.8	50	Circular
5	1.5	20	Linear	11	2.5	100	Circular
6	1.8	50	Linear	12	2.5	200	Circular

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 焊缝成形与横截面形貌分析

图 2 所示为常规激光焊接和摆动激光焊接下铝/钢激光深熔焊接头的宏观形貌,可以看出:对于常规

激光焊接,由于激光能量密度集中,光斑作用面积较小,故焊缝表面的熔宽较小(1.5 mm),表面呈暗灰色;而对于摆动激光焊接,焊缝的熔宽显著增大(3.0 mm);在较小的摆动频率下,焊缝呈现“波浪状”断续连接;随着摆动频率增大,焊缝成形连续,表面呈银灰色。

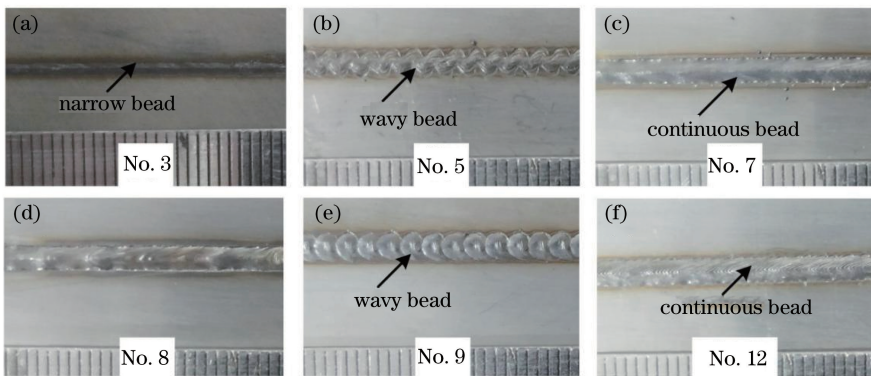


图 2 典型焊接参数下获得的焊缝的宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphology of welds obtained at typical welding parameters

图 3 为典型焊接参数下获得的铝/钢接头的横截面形貌。图 3(a)、(b)为不施加摆动激光时得到的焊缝,可以看出:该焊缝呈典型的激光深熔焊特

点,具有较大的深宽比;随着激光功率增加,焊缝熔深逐渐增大,并且焊接气孔产生的概率也增大。对于常规激光焊接来说,焊缝金属和铝合金母材交界



部位极易产生孔洞、未连接等缺陷,劣化接头的成形质量。图 3(c)、(d)为典型摆动激光焊接下得到的焊缝的横截面形貌,可以看出在较小的摆动频率下,焊缝横截面呈“双角型”。造成这种现象的主要原因是激光热源分布形式的变化,此时,激光能量主要集中于线性摆动拐角处,导致两侧的激光能量高于中间部位,焊缝呈钉扎状态与母材相连。随着摆动频率增大,焊接热源的分布更加均匀,此时焊接熔宽显著增加,熔深降低。相比于常规激光焊接,摆动激光

焊接下得到的焊缝熔宽由  $436\ \mu\text{m}$  增加至  $1714\ \mu\text{m}$ ,熔深由  $854\ \mu\text{m}$  降低至  $608\ \mu\text{m}$ 。对比分析后可知,施加摆动激光后,激光能量向熔宽方向传输,增加了接头的连接面积,这种机械镶嵌连接和冶金连接结合的方式有利于改善铝/钢异种金属激光焊接接头的性能。与此同时还发现,摆动激光可以抑制焊缝中气孔、裂纹等缺陷的产生,优化焊缝的成形质量。相关研究表明,圆形摆动方式可以重熔焊缝中出现的气孔,并可使熔池的流动增强,有利于气泡的逸出<sup>[16]</sup>。

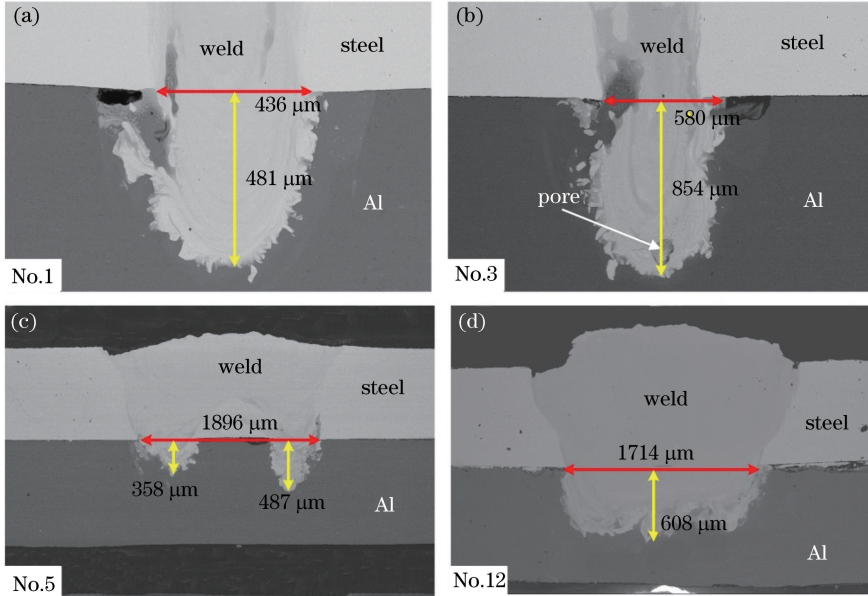


图 3 典型焊接工艺参数下获得的焊缝的横截面形貌

Fig. 3 Cross-sectional morphology of welds obtained at typical welding parameters

### 3.2 铝/钢界面的微观组织结构

典型焊接参数下铝/钢接头界面的微观组织如图 4 和图 5 所示。图 4 为常规激光焊接接头的微观组织,可见,由于受到焊接热源的影响,铁元素向铝母材焊缝中迅速扩散,生成了厚度较大的连续化合物层,

并伴随着明显的裂纹和气孔缺陷。由于常规激光焊接热源主要向板材厚度方向传输,故而在铝合金和不锈钢界面连接处形成了较大的未连接区及凝固裂纹,极易导致接头失效。化合物层主要包括焊缝内部连续层和界面处弥散分布的针状或块状化合物。

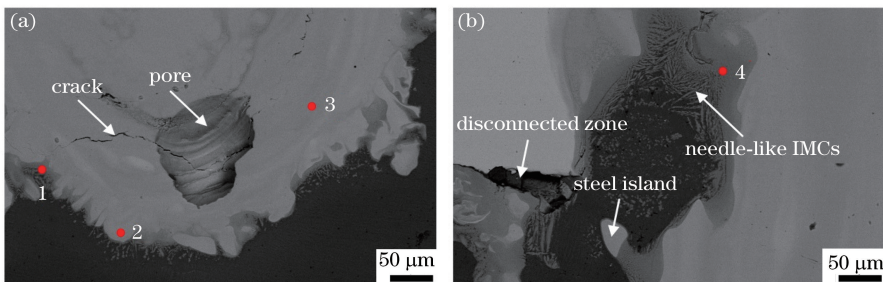


图 4 常规激光焊接接头(No.3)界面的微观组织。(a)界面底部;(b)铝/钢交界处

Fig. 4 Interfacial structure of welded joint obtained with conventional laser welding.

(a) In the bottom of interface; (b) in the aluminum alloy/steel interface

采用摆动激光焊接时,如图 5(a)、(b)所示,热源向熔宽方向传输,此时铁元素的扩散距离有所减小,化合物层减薄,并且铁元素含量在焊缝金属中呈

显著的波浪形变化,如图 6(b)所示,这主要是由于摆动激光对焊接熔池的搅拌使得焊缝元素分布呈现分层现象;此外焊缝界面处出现了较多的“岛屿状”



和“针状” $\text{FeAl}_3$ 化合物。

当摆动频率提高后,如图 5(c)、(d)所示,焊接热源分布得更加均匀,此时界面的成形质量得到了显著改善,气孔、裂纹等缺陷得到了较好的抑制,铁元素的

扩散得到进一步削弱,可以明显观察到元素分层分布的特征,并且熔池的搅拌使得部分化合物被包裹到焊缝内部。熔池的搅拌作用有利于打碎连续的脆性化合物,在铝合金中形成少量的断续状化合物。

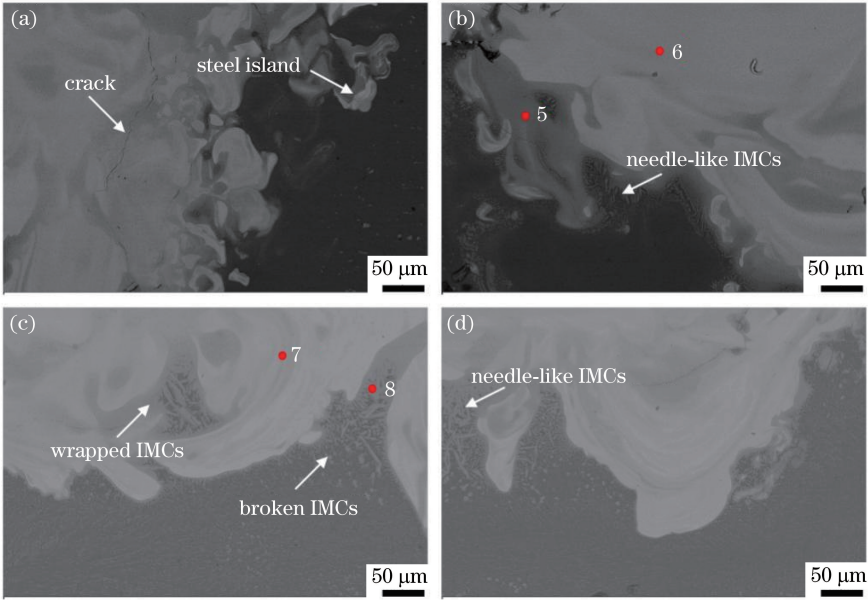


图 5 摆动激光焊接接头界面的微观组织。(a)(b)线性摆动;(c)(d)圆形摆动  
Fig. 5 Interfacial microstructures of welded joints obtained with laser wobble welding.

(a)(b) Linear laser welding; (c)(d) circular laser welding

焊接接头垂直于板厚方向的元素分布如图 6 所示,具体的化合物成分如表 4 所示。可以看出:采用常规激光焊接时,铁元素向铝合金母材中剧烈扩散,形成了厚度为  $600\ \mu\text{m}$  左右的扩散层,在焊缝内部形成了  $\text{Fe}(\text{Al})$  固溶体及少量  $\text{Fe}-\text{Al}$  金属间化合物,在焊缝与铝合金界面处形成了  $\text{FeAl}$  和  $\text{FeAl}_3$  混合的化合物层;当采用频率较小的线性摆动激光焊接时,铝元素和铁元素在焊缝金属中呈波浪状分布,并且扩散距离显著减小,这是由于摆动激光对熔池的搅拌作用使得铝和铁元素在焊缝中弥散分布。此

外,摆动激光使得激光能量向焊缝熔宽方向传输,抑制了其向焊缝熔深方向的传输<sup>[17]</sup>,因此抑制了元素的扩散现象。当摆动频率增加到  $100\ \text{Hz}$  时,焊缝元素的分布相对均匀,并且扩散距离进一步减小。相比于常规激光焊接,采用摆动激光焊接时,焊缝金属中铝的原子数分数由  $30\%$  降低至  $15\%$  左右,说明元素的扩散得到了进一步抑制,削弱了界面反应,此时界面处主要存在  $\text{Fe}(\text{Al})$  固溶体和少量  $\text{FeAl}_3$  相。并且这种断续状的化合物分布有利于抑制裂纹的扩展,改善接头的整体性能。

表 4 图 4~5 中标记位置的主要成分

Table 4 Main components of marked positions in Fig. 4 and Fig.5

Position	Atomic fraction /%					Possible phases
	Al	Si	Cr	Fe	Ni	
1	69.74	0.47	5.87	21.62	2.31	$\text{FeAl}_3$
2	71.28	0.42	4.30	21.81	1.96	$\text{FeAl}_3$
3	32.77	0.72	12.84	48.24	5.42	$\text{Fe}(\text{Al}) + \text{FeAl}$
4	74.28	0.12	4.92	17.95	2.73	$\text{FeAl}_3$
5	73.28	0.38	8.76	13.99	3.59	$\text{FeAl}_3$
6	12.19	0.73	4.96	79.56	2.56	$\text{Fe}(\text{Al})$
7	15.62	0.52	10.25	70.05	3.56	$\text{Fe}(\text{Al})$
8	72.20	0.71	4.20	19.37	3.51	$\text{FeAl}_3$

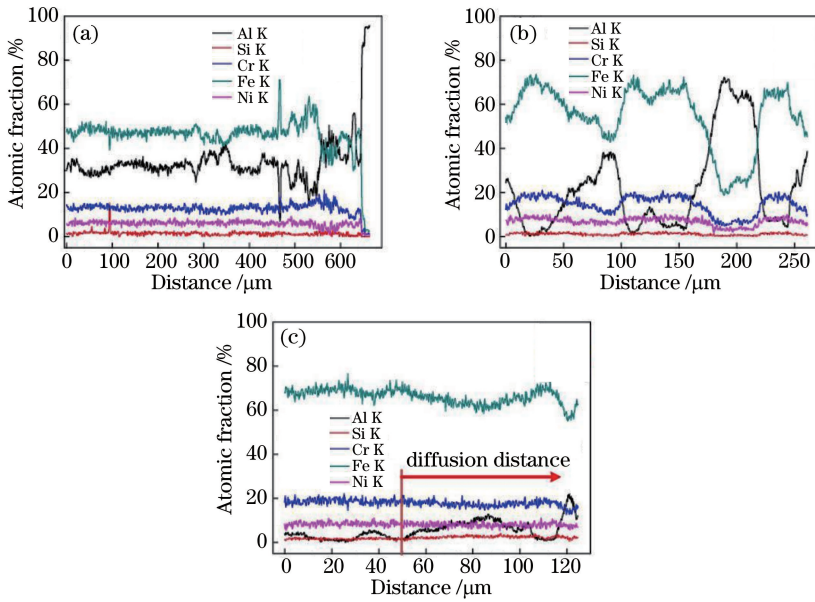


图 6 焊接接头中的元素分布。(a)常规激光焊接接头(No.2);  
(b)线性摆动激光焊接接头(No.5);(c)圆形摆动激光焊接接头(No.12)

Fig. 6 Element distribution in welded joints. (a) Welded joint obtained with conventional laser welding(No.2);  
(b) welded joint obtained with linear laser welding (No.5); (c) welded joint obtained with circular laser welding (No.12)

### 3.3 力学性能与断口分析

图 7 为不同焊接工艺下获得的铝/钢焊接接头的拉伸载荷变化图,可以发现:相比于常规激光焊接铝/钢接头,摆动激光焊接接头的性能得到了显著提高,最大的拉剪强度达到 117.5 N/mm。采用常规激光焊接时,铝/钢焊接接头的性能随着激光功率的增大呈先增大后减小的趋势。当激光功率较小时,焊缝熔深较浅,铝/钢界面的冶金结合效果较差,接头的力学性能较低;随着激光功率增大,界面结合面积和冶金结合层厚度均有所增大(如图 3 所示),接头的强度提高;但是随着激光功率继续增大会形成深熔焊接头,并且会在焊缝中形成大量的脆性 Al-Fe 化合物、气孔及裂纹等缺陷,导致焊接接头易在界面连接处发生断裂。而采用摆动激光之后,一方面大大增加了铝/钢接头的连接区域,使其有效承载面积增加;另一方面降低了焊缝熔深,减少了焊缝中脆性金属间化合物的产生,这种机械连接和冶金连接的综合作用有利于焊接接头强度的提高,使得接头的断裂形式发生显著改变,逐渐转变为钢侧与焊缝交界处。

铝/钢焊接接头典型的断裂位置如图 8 所示。当激光功率较高时,铝合金处于完全焊透的状态,焊缝处的冶金反应比较剧烈,生成了大量的金属间化合物,接头主要断裂于底部铝合金处,如图 8(a)所示;当激光功率较低时,界面成为接头的薄弱环节,

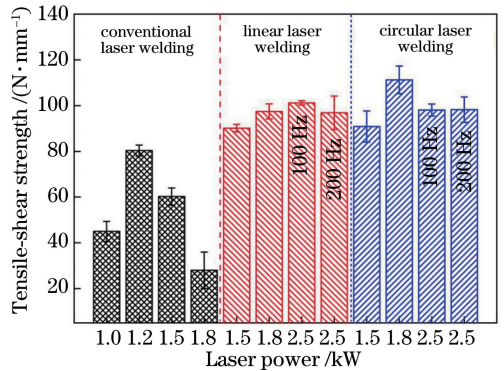


图 7 不同焊接工艺下获得的铝/钢激光焊接接头的拉剪强度  
Fig. 7 Tensile-shear strength of aluminum alloy/steel welded joints obtained at different welding processes

接头主要断裂于界面化合物层,如图 8(b)所示;而采用合适的摆动焊接工艺时,接头主要断裂于钢侧与焊缝交界处,接头强度较高,说明铝/钢界面已经不是接头的薄弱环节,如图 8(c)所示。

## 4 结 论

采用摆动激光热源实现了 6061 铝合金和 316L 不锈钢的良好连接,对比研究了热源模式、摆动频率对搭接接头焊缝成形、微观组织及拉剪强度的影响,结果表明:1)摆动激光焊接可使焊缝宽度增大,焊缝熔深减小,并能抑制接头处的气孔、裂纹等焊接缺陷。2)常规激光焊接时,铝/钢焊接接头界面处的反应比较剧烈,形成了较多的 Al-Fe 脆性相,而摆动激

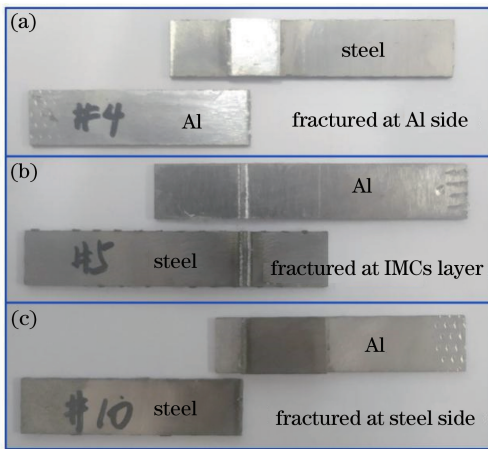


图 8 铝/钢激光焊接接头典型的断裂位置。(a)断裂于铝合金处;(b)断裂于界面处;(c)断裂于钢侧

Fig. 8 Typical fracture positions of aluminum alloy/steel welded joints. (a) Fracture at aluminum alloy side; (b) fracture at the interface; (c) fracture at stainless steel side

光焊接可以抑制界面元素的扩散和化合物的产生,并增大界面的连接面积,对接头性能的提高具有显著效果;随着激光功率增大,接头的力学性能呈先增大后减小的趋势。

采用摆动激光焊接得到的接头的最大拉剪强度可达到 117.5 N/mm,比常规激光焊接结构提高了约 45%,接头断裂位置由常规激光焊接时的铝/钢界面处转变为不锈钢与焊缝交界处。

### 参 考 文 献

[1] Cao R, Yu G, Chen J H, et al. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(10): 1753-1763.

[2] Li J, Huang J K, Jin Q S. Research status of welding-brazing of aluminum/steel dissimilar metals [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(1): 109-114.  
李杰, 黄健康, 靳全胜. 铝/钢异种金属熔钎焊方法研究现状[J]. 电焊机, 2018, 48(1): 109-114.

[3] Huang J K, Wang Z Y, Liu N, et al. Effect of metal coating on microstructure and properties of aluminum/steel laser welding-brazing joint [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(5): 99-105.  
黄健康, 王梓懿, 刘宁, 等. 金属镀层对铝/钢激光熔钎焊接头组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(5): 99-105.

[4] Qin G L, Ao Z Y, Chen Y, et al. Formability behavior of Al/steel MIG arc brazed-fusion welded

joint [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273: 116255.

[5] Cui L Y, Mi G Y, Hu X Y, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welding-brazed aluminum alloy to steel with CuSi3 filler metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(9): 6-12.  
崔凌越, 米高阳, 胡席远, 等. 基于 CuSi3 焊丝的激光熔钎焊钢/铝异种金属工艺分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(9): 6-12.

[6] Huang Y X, Huang T F, Wan L, et al. Research progress of dissimilar friction stir welding between aluminium and steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(1): 23-30.  
黄永宪, 黄体方, 万龙, 等. 铝/钢异种材料搅拌摩擦焊研究进展[J]. 精密成形工程, 2018, 10(1): 23-30.

[7] Ma Y Q, Wang H Y, Liu L M. Aluminum alloy and high-strength steel joint via laser-induced tungsten inert gas hybrid welding based on Ni interlayer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0802002.  
马雨晴, 王红阳, 刘黎明. 基于 Ni 中间层的铝合金与高强度钢激光诱导 TIG 复合焊接[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0802002.

[8] Mortazavi S N, Marashi P, Pouranvari M, et al. Investigation on joint strength of dissimilar resistance spot welds of aluminum alloy and low carbon steel [J]. Advanced Materials Research, 2011, 264/265: 384-389.

[9] Yan F, Fang X, Chen L, et al. Microstructure evolution and phase transition at the interface of steel/Al dissimilar alloys during Nd: YAG laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 193-201.

[10] Xia H B, Zhao X Y, Tan C W, et al. Effect of Si content on the interfacial reactions in laser welded-brazed Al/steel dissimilar butted joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 9-21.

[11] Long J Q, Huang W H, Xiang J W, et al. Parameter optimization of laser welding of steel to Al with pre-placed metal powders using the Taguchi-response surface method [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 97-106.

[12] Yan F, Wang X W, Chai F, et al. Improvement of microstructure and performance for steel/Al welds produced by magnetic field assisted laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 164-170.

[13] Cui L, Chen B X, Chen L, et al. Dual beam laser keyhole welding of steel/aluminum lapped joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256: 87-97.



- [14] Yuan R, Deng S J, Cui H C, et al. Interface characterization and mechanical properties of dual beam laser welding-brazing Al/steel dissimilar metals [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 40: 37-45.
- [15] Shah L H, Khodabakhshi F, Gerlich A. Effect of beam wobbling on laser welding of aluminum and magnesium alloy with nickel interlayer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 212-219.
- [16] Fetzer F, Sommer M, Weber R, et al. Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 108: 68-77.
- [17] Dimatteo V, Ascari A, Fortunato A. Continuous laser welding with spatial beam oscillation of dissimilar thin sheet materials (Al-Cu and Cu-Al): process optimization and characterization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 158-165.