

文章编号:1001-5078(2017)05-0527-07

· 激光应用技术 ·

# 铝/钢 Nd : YAG 激光封边焊接头力学性能及界面组织

陈从胜, 李 鹤, 杨 瑾, 李玉龙

(南昌大学机电工程学院江西省机器人及焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)

**摘要:**对 316 L 不锈钢和 6061 铝合金进行了 Nd : YAG 激光封边焊接, 优化了焊接工艺参数, 观察分析了接头裂纹、金属间化合物、显微硬度及拉剪断口形貌。结果表明: 当焊接电流为 110 A, 脉宽 4 ms, 频率 10 Hz, 焊接速度 200 mm/min 时, 接头质量较好, 单位长度最大抗拉剪力为 19.79 N/mm。熔合线附近裂纹两侧硬度较高, 最大硬度达到 Hv701; 金属间化合物存在块状和针状两种形式, 主要分布于熔合线附近, 其铁元素含量随熔深的增加而逐渐减小。拉剪实验中, 接头断裂形式为脆性断裂, 局部表现出塑性断裂特征。

**关键词:** YAG 激光焊; 裂纹; 金属间化合物; 断口形貌

**中图分类号:** TG456.7; TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.002

## Mechanical properties and interfacial structure of aluminum/steel alloy welding joint by Nd : YAG laser sealing side

CHEN Cong-sheng, LI He, YANG Jin, LI Yu-long

(Key Lab for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Sealing side welding parameters of 6061 aluminum alloy and 316 L stainless steel welded by Nd : YAG laser were optimized, and welding cracks, intermetallic compounds, microhardness and fracture morphology were observed and analyzed. Results show that the quality of welding joint is good when welding current is 110 A, laser pulse width is 4 ms, laser frequency is 16 Hz, welding speed is 200 mm/min, and the maximum shear force per unit length is 19.79 N/mm. The field near the crack has higher vickers hardness than other areas, and the maximum hardness is Hv701; the forms of the intermetallic compounds which mainly distributed in near the fusion line are nubby and acicular, and its iron contents decreases with the increase of the depth of fusion. Fracture mode shows the brittle characteristics with some local areas of plastic fracture in shear experiment.

**Key words:** YAG laser welding; crack; intermetallic compounds; fracture morphology

### 1 引言

铝/钢异种金属复合结构兼顾了前者重量轻、耐腐蚀和后者强度高、塑性好等优点, 目前已广泛应用于航空航天、汽车、轮船等行业<sup>[1]</sup>。在铝/钢异种金属复合结构焊接中, 封边焊接头常见于水箱、气缸等对密封性要求较高壳体容器中。为保证接头力学性能和密封性能, 这类接头往往要求

装配精度高, 熔深大, 热影响区较小<sup>[2]</sup>。根据这一特点, 生产过程中常选用激光作为热源来焊接这类接头。然而, 激光加热、冷却迅速, 接头熔池反应剧烈, 铝/钢异种金属焊接时容易生成脆性 IMC (金属间化合物) 及裂纹, 从而导致接头质量不易控制<sup>[3]</sup>。为解决上述问题, 国内外学者对封边焊接特性和铝/钢异种金属激光焊接理论进行了系

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 51265035); 江西省自然科学基金 (No. 2015BAB206042); 江西省教育厅重点项目 (No. GJJ500020) 资助。

**作者简介:** 陈从胜 (1992 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光焊接。

**通讯作者:** 李玉龙, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: l.yulong@ncu.edu.cn

**收稿日期:** 2016-09-05

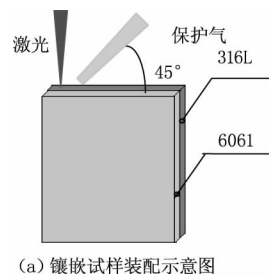
列研究。G. Sierra 等<sup>[4]</sup>人使用激光深熔焊对 6000 铝合金和低碳钢进行搭接焊(低碳钢在上),研究发现,熔深在 500  $\mu\text{m}$  以下时,可以得到无缺陷的焊缝;焊接接头的脆性物质分布在熔合线附近 5 ~ 20  $\mu\text{m}$  之间的区域。L. Rodriguez 等<sup>[5]</sup>人用 ZnAl - 15 作为填充材料对 A - 6016 和 AISI1020 镀锌钢板进行激光封边焊,发现封边接头结构能影响铝/钢钎焊界面化合物的形成,接头最终抗拉剪强度可达 200MPa 以上。国内王少军等<sup>[6]</sup>人用光纤激光器对继电器产品的晶体罩(底座为铁镍合金,上盖为铜)进行了封边焊接,发现光纤激光焊接密封效果比脉冲激光好,产品泄漏是由于封边焊接时产生了裂纹。另外,凌伟等<sup>[7]</sup>人分析了 1Cr17Ni2 马氏体不锈钢和 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢封边接头失效形式,发现失效是两种母材膨胀系数不同,使接头产生焊接应力,在外加反复载荷作用下,接头疲劳产生裂纹,最终发生脆断。

以往的研究表明脆性 IMC 是影响封边接头强度的一个重要因素,除此之外,焊接接头质量还取决于其他诸如焊缝形貌、焊接线能量和裂纹等多种因素<sup>[8]</sup>,研究它们之间相互作用很有必要。正交试验法是一种通过合理设计正交表来研究多因素多水平的设计方法,可以减少试验次数<sup>[9]</sup>,本文运用这种方法优化了铝/钢异种金属封边焊接参数,研究了焊接线能量、焊接裂纹、脆性等对铝/钢接头质量的影响规律,为改善铝/钢封边接头质量提供了一定的理论依据。

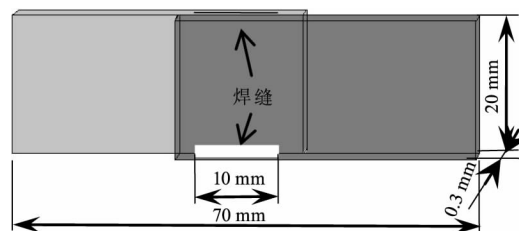
## 2 试验材料、方法及设备

本次试验所用材料为 316 L 不锈钢和 6061 铝合金,尺寸均为 20 mm  $\times$  15 mm  $\times$  0.3 mm,其中,316 L 的化学成分质量分数如下:碳  $\leq$  0.03%,硅  $\leq$  1.0%,锰  $\leq$  2.0%,磷 + 硫  $\leq$  0.065%,铬 = 18.0%,镍 = 14.0%,铁为余量。6061 的化学成分质量分数为:硅 = 0.4 ~ 0.8%,镁 = 0.8 ~ 1.2%,锰 = 0.15%,铬 = 0.04 ~ 0.35%,铜 = 0.15 ~ 0.4%,锌 = 0.25%,铁 = 0.7%,铝为余量。

试验采用零离焦量,高纯度氩气(99.99%)作保护气体,气体流量为 25 L/min,入射角为 45°;焊接设备为楚天 JHM - 1GY - 300F 型激光焊接机,最大功率为 300 W,光束入射角为 90°。每组参数所焊式样分别用作金相观察和抗拉剪测试求接头平均强度,镶嵌试样及拉剪试样如图 1(a)、图 1(b)所示。



(a) 镶嵌试样装配示意图



(b) 拉剪试样装配示意图

图 1 焊接及拉剪式样装配示意图

Fig. 1 Diagram of the welding sample

焊前用 800#、1200# SiC 砂纸打磨 316 L 不锈钢待焊部位,再用丙酮浸泡 20 min,吹干待用。6061 铝合金焊前清理为:先用质量分数为 5% NaOH 溶液浸泡 2 min,再用质量分数为 30% 的硝酸浸泡 1 min,之后流水清洗,吹干待用。选取焊接电流,激光脉宽,频率,焊接速度为试验的 4 个因素,每个因素取 3 个水平,如表 1 所示。根据正交试验原理,试验应采用 L9(3<sup>4</sup>) 正交表,共进行 9 次试验。

表 1 正交实验因素水平表

Tab. 1 Factors and levels of the orthogonal experiment

因素水平	A 电流 $I/A$	B 脉宽 $J/ms$	C 频率 $f/Hz$	D 速度 $v/(mm/min)$
1	130	4	16	250
2	110	3	13	200
3	90	2	10	150

抗拉剪力测试采用 GTM2500 型微机控制电子万能材料试验机(拉伸速度 30 mm/min),焊接接头形貌采用 GX71F 型奥林巴斯显微镜观察,S - 3200 - NHITACHI 型扫描电镜分析界面处元素分布和金属间化合物的形成情况。

## 3 试验结果分析

### 3.1 激光输入线能量计算

焊机输入的线能量  $q$  是影响焊接强度的重要参数,本文对其进行了计算,并确定以单位长度的抗剪切力(以下简称抗拉剪强度)  $F_1$  的大小为接头强度评定标准<sup>[10]</sup>,其计算过程分别如下:

(1) 抗剪切力定义<sup>[11]</sup>:

$$F1 = \frac{F}{S} \tag{1}$$

式中,  $F$  为试样断裂载荷,单位为 N; $S$  为焊缝长度,单位是 mm。

(2)焊机输入线能量:激光焊机功率厂家给定计算如下:

$$P = 0.72I + 16.14T_p + 3.70 P_w \tag{2}$$

式中,  $I$  为焊接电流,单位为 A; $T_p$  为脉宽,单位为 ms; $P_w$  为频率,单位为 Hz。

依据定义,输入线能量可表述为:

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{Pt}{S} = \frac{P}{S} \frac{S}{v} \tag{3}$$

结合式(2)可得:

$$q = \frac{(0.72p + 16.14T_p + 3.70P_w) \times 60}{v} \tag{4}$$

式中,  $Q$  为输入到熔池的总能量,单位为 J; $t$  为焊接时间,单位为 s; $v$  为焊接速度,单位为 mm/s。

### 3.2 抗拉剪测试结果及分析

线能量计算及拉剪测试结果如表 2 所示。结果显示接头抗剪力最大的是 d 号件,为 19.79 N/mm。由实验结果可以推测,铝/钢异种金属激光封边焊接的优水平为 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub>,即焊接电流 110 A,激光脉宽 4 ms,激光频率 16 Hz,焊接速度 200 mm/min。

表 2 焊接接头单位长度的抗剪切力极差表

Tab.2 Shearing force of the unit length of the welded joints

实验编号	焊接参数			计算及结果		
	A 电流 I/A	B 脉宽 J/ms	C 频率 f/Hz	D 速度 v/(mm/min)	焊接线能量 q (J/mm)	抗拉剪力 N/mm
a	130	4	13	150	82.50	11.14
b	130	3	10	250	42.96	7.66
c	130	2	16	200	55.52	16.70
d	110	4	10	200	54.23	19.79
e	110	3	16	150	74.73	15.63
f	110	2	13	250	38.30	4.43
g	90	4	16	250	45.25	8.03
h	90	3	13	200	48.40	16.08
i	90	2	10	150	53.63	18.05
T <sub>1</sub>	14.29	16.33	16.95	13.78		Σ = 117.51
T <sub>2</sub>	14.72	13.45	8.94	14.63		
T <sub>3</sub>	10.17	9.39	13.28	10.76		
优水平	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>		
优组合	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>					

图 2 显示了抗拉剪强度与激光输入线能量之间的关系。由此可知,随着激光输入线能量增大,抗拉剪强度呈现先增大后减小的趋势。分析认为,当输入线能量很小时,焊缝基本无缺陷,随着输入线能量的增大,焊缝的熔深、熔宽随之增加,抗拉剪强度也相应的增大;当输入线能量增大至本次试验最佳值时,焊缝的抗拉剪强度达到最大值 19.79 N/mm;继续增大输入的线能量时,焊缝金属中合金元素烧损严重,焊接应力显著增加,与此同时,焊缝中脆性 IMC 的激增,同时还可能会产生裂纹<sup>[12]</sup>,使接头力学性能降低。

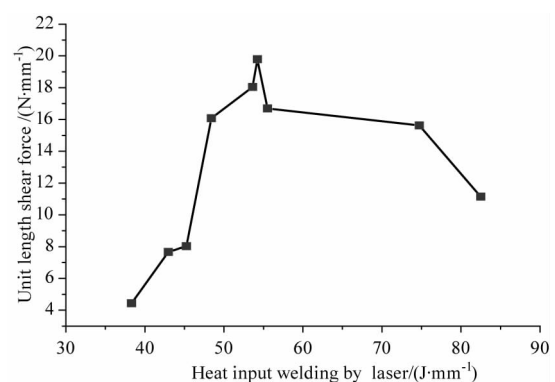


图 2 抗拉剪强度随输入线能量变化

Fig.2 Unit length shear force changes with the heat input welding

### 3.3 接头形貌分析

为验证图2中分析,将不同参数下的焊接接头进行标准金相制样,截面金相照片如图3所示。图中可见熔深随输入线能量的增加而增大。不锈钢先于铝熔化,熔池由钢一侧逐步向铝扩展,焊缝区域的熔合线与母材之间的缝隙逐渐呈“Y”型,分析认为其原因是铝合金高的导热性和对激光的高反射率,钢更多的嵌入到铝合金中。a、d、g和h号接头成形较好,未发现气孔、裂纹等缺陷,c和e熔合线附近或焊缝中出现裂纹。观察结果与图2中分析较为吻合。

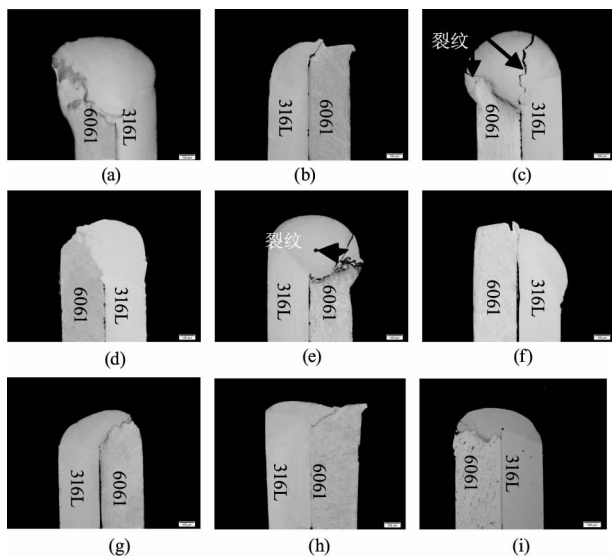


图3 不同参数下接头横截面形貌图

Fig. 3 Cross section morphology of the welded joints under different parameters

图4所示为e号试样裂纹放大图,从中可以明显看出裂纹呈现“树枝状”,沿熔合线方向扩展。由于激光焊能量密度高,加热迅速,当输入热量较大时焊缝熔合线附近会产生脆性IMC,而且铝/钢热膨胀系数差别大,焊接过程中在熔合线附近产生较大热应力<sup>[13]</sup>,当应力值超过材料可承受的临界应力时,铝/钢熔合区附近便产生该裂纹。

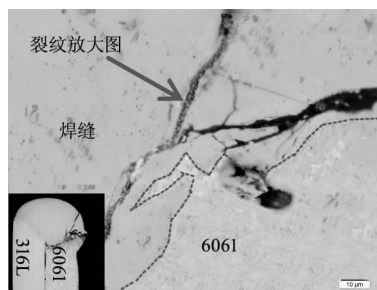


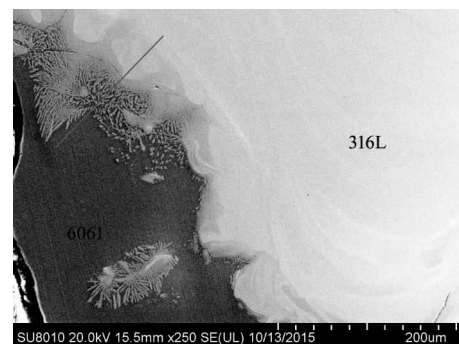
图4 e#试样“树枝状”裂纹

Fig. 4 Magnification of the "dendrite" crack in the e# sample

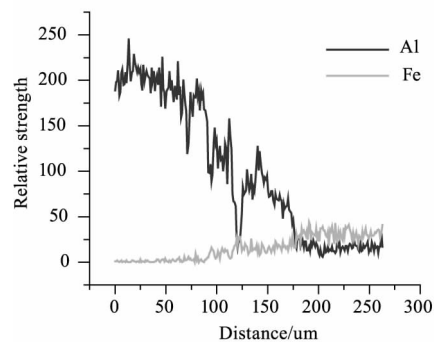
### 3.4 接头界面处能谱分析

铝/钢异种金属焊接界面反应较复杂,如图5(a)所示,接头界面处同时存在块状和针状两种反应相,裂纹分布于块状金属间化合物邻近部位。

为分析熔合线附近元素分布,试验对铝/钢接头界面处进行能谱线扫描。由图5(b)可知,界面处铁铝元素相互扩散,形成Fe-Al反应相。进一步分析元素、组织分布情况,对界面附近部分区域进行了能谱点扫描,如图6所示。



(a) 线扫描位置



(b) 各元素分布曲线

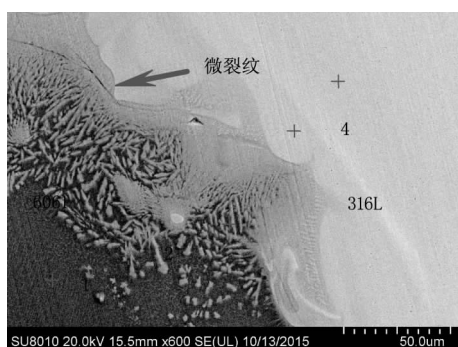
图5 焊缝EDS线扫描图

Fig. 5 EDS line scan of the weld

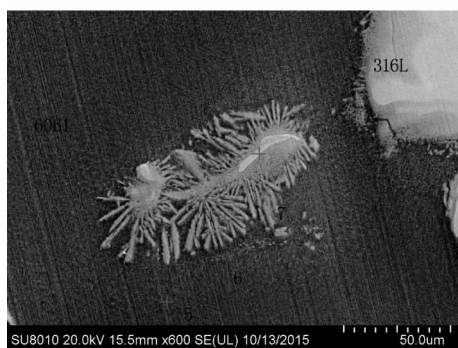
各元素原子分数比例如表3所示,区域1 Al的原子分数占到98.12%,主要为(-Al固溶体;区域2 Fe、Cr、Ni和Al原子比约1:1,推测为(Fe, Cr, Ni)Al;区域3 Fe、Cr、Ni和Al原子比为1:2.4,推测为(Fe, Cr, Ni)<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>;区域4的Fe、Cr、Ni原子分数为82.3%,推测为(-Fe固溶体;区域5、6 Al的原子分数所占比例大,主要为(-Al固溶体;区域7的Fe、Cr、Ni和Al原子比约3:1,推测为(Fe, Cr, Ni)<sub>3</sub>Al。可见,铝/钢接头界面处IMC主要分布于熔合线附近,其铁元素含量随熔深的增加而逐渐减小。这与G. Sierra的描述及线扫描结果一致。

表3 能谱分析结果  
Tab.3 Energy spectrum analysis

元素	Fe	Al	Cr	Ni	可能相
1	1.3	98.12	0.58	-	$\alpha$ -Al
2	31.62	55.81	7.84	4.73	(Fe, Cr, Ni)Al
3	21.61	70.90	5.01	2.47	(Fe, Cr, Ni) <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>
4	59.1	17.7	15.6	7.6	$\alpha$ -Fe
5	0.99	99.01	-	-	$\alpha$ -Al
6	11.56	84.94	1.96	1.55	$\alpha$ -Al
7	18.74	75.18	4.28	1.80	(Fe, Cr, Ni) <sub>3</sub> Al



(a) 界面处扫描位置



(b) 针状化合物扫描位置

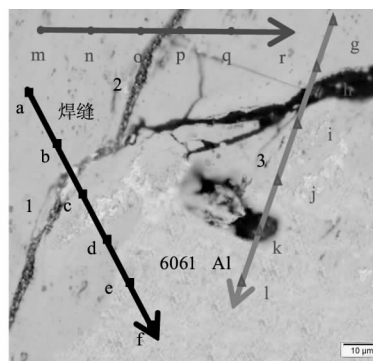
图6 界面反应层点扫描测试位置

Fig.6 Position of point scanned in the interface reaction layer

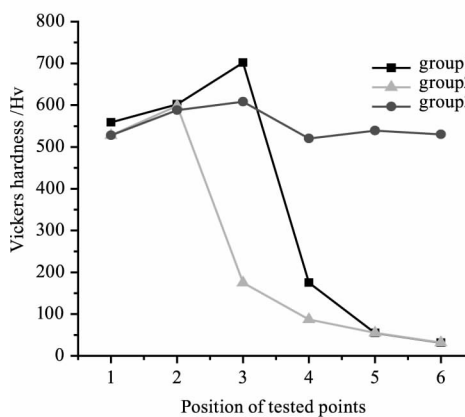
### 3.5 接头硬度测试结果及分析

硬度是衡量焊接接头力学性能的重要指标, 试验采用显微硬度计测试了铝/钢接头界面处的硬度, 其测量位置(测量顺序沿箭头方向)及结果如图7(a)、图7(b)所示。从图7(b)中可以看出, 最大硬度为 Hv701, 分布于接头界面处; 最小硬度位于6061 铝合金母材, 为 Hv31.3。裂纹1、2号部位附近测量的硬度值都是由焊缝中心向铝合金基体呈现先增加后减小趋势, 贴近裂纹两侧部位硬度值较高。结合图5(b)可以推断: 随着测量位置

由焊缝向铝基体移动, 测量位置铁铝元素含量比例逐渐降低, 这就导致了测量位置硬度值的降低; 表3表明界面处会形成硬度较高的脆性相, 因此该处硬度值高于焊缝中心部位。裂纹3号部位两侧显微硬度值大致相同, 贴近裂纹两侧部位硬度值略高于远离其两侧的位置, 这可能由于该裂纹离熔合线较远, 两侧铝铁含量比例相近; 而凝固过程中成分偏析导致合金元素富集于贴近裂纹两侧位置<sup>[14]</sup>, 这些合金元素对焊缝金属有固溶强化作用, 因此该处硬度值较高。



(a) 显微硬度测试点位置



(b) 显微硬度值随变化规律

图7 焊接接头显微硬度测量结果

Fig.7 Microhardness of the welded joints

### 3.6 接头断裂形貌分析

图8(a)、图8(b)为接头f和d的断裂形貌。图8(a)所示断口呈现明显的河流花样, 为解理断裂, 是典型的脆性断裂; 河流花样由解理面和解理台阶组成, 解理面之间形成了大量的撕裂岭, 表现出准解理断裂特征<sup>[15]</sup>, 因此, 整个接头断口呈现解理与准解理相混合的断裂形式。图8(b)所示拉剪断口表面粗糙, 高差较大, 明显可见沿相界面断裂的特征, 属于沿晶脆性断裂。在断裂面上有少许韧窝, 局部

表现出塑性断裂特征。

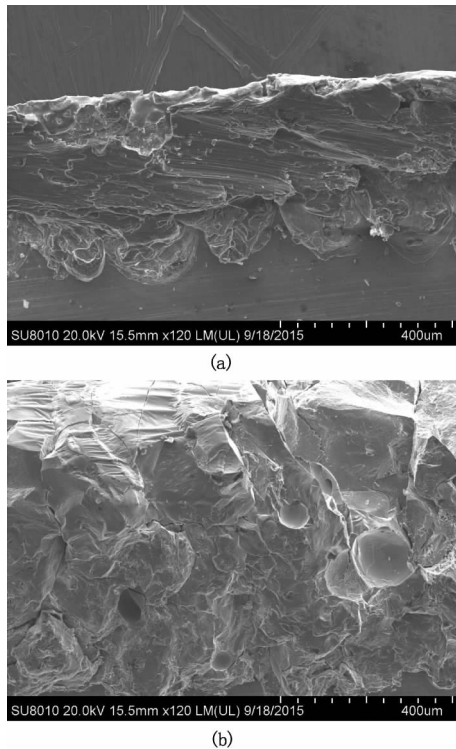


图 8 接头断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of the welded joints

#### 4 结 论

(1) 采用正交试验法设计试验参数,结果表明:当焊接电流为 110 A,激光脉宽为 4 ms,激光频率为 10 Hz,焊接速度为 200 mm/min 时,接头成型较好,无气孔、裂纹等缺陷,单位长度抗剪切力可达 19.79 N/mm。

(2) 铝/钢接头存在块状和针状两种 IMC,主要分布于熔合线附近,其铁元素含量随熔深的增加而逐渐减小。

(3) 铝/钢接头界面处硬度呈现由焊缝中心向铝合金基体先增大后减小的趋势,其中最大硬度为 Hv701,位于熔合线附近靠近熔池的一侧;最小硬度为 Hv31.3,位于铝合金基体。

(4) 铝/钢焊接接头的拉剪断裂形式主要是脆性断裂,局部表现出塑性断裂特征。

#### 参考文献:

- [1] S Meco, G Pardal, S Ganguly, et al. Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, (67): 22 - 30.
- [2] ZHANG Yanhua. Design and application of welding structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)  
张彦华. 焊接结构设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [3] NAN Mao. Mechanical properties and organization research of 316L stainless steel welding joint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 1 - 74. (in Chinese)  
毛楠. 316L 不锈钢焊接接头的组织和力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 1 - 74.
- [4] G Sierra, P Peyre, F Deschaux-Beaume. Steel to aluminium key-hole laser welding[J]. Material Science and Engineering A, 2007, 447: 197 - 208.
- [5] L Rodriguez, A Mathieu. Controlling phase formation during aluminium/steel Nd: YAG laser brazing[J]. Rev. Metal. Madrid, 2006, 42(6): 463 - 469.
- [6] WANG Shaojun, XI Jie, WANG Yu. Laser seal welding technology research[J]. Mechanical and Electrical Components, 2014, 2(1): 20 - 22. (in Chinese)  
王少军, 许捷, 王瑜. 激光封焊技术研究[J]. 机电元件, 2014, 2(1): 20 - 22.
- [7] LING Wei, GE Liaohai, REN Zhenan, et al. Martensite and austenite stainless steel TIG welding edge joint failure analysis[J]. Journal of Welding, 2008, 28(5): 90 - 92. (in Chinese)  
凌伟, 葛辽海, 任振安, 等. 马氏体和奥氏体不锈钢 TIG 焊端接头失效分析[J]. 焊接学报, 2008, 28(5): 90 - 92.
- [8] MA Ke, CHEN Shuhai, et al. Stainless steel/aluminum alloy laser deep welding joint microstructure and mechanical properties[J]. Applied Laser, 2010, 30(6): 493 - 497. (in Chinese)  
马柯, 陈树海, 等. 不锈钢/铝合金激光深熔焊接头微观组织与力学性能[J]. 应用激光, 2010, 30(6): 493 - 497.
- [9] XING Zhen, GU Yuanhai, GUO Chuanjun, et al. Q245R submerged arc welding parameter optimization[J]. Journal of thermal processing, 2012, (11): 202 - 203. (in Chinese)  
辛政, 谷源海, 郭传军, 等. Q245R 埋弧焊焊接工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2012, (11): 202 - 203.

- [10] ZHOU Shiquan, REN Fanjie, ZHAO Yi. Laser lap welding technology research of high strength galvanized steel used in car body [J]. Journal of automotive technology and materials, 2011, (4): 1-7. (in Chinese)  
周世权, 任方杰, 赵轶. 汽车车身用高强度镀锌钢板的激光搭接焊工艺研究[J]. 汽车工艺与材料, 2011, (4): 1-7.
- [11] MEI Lifang, CHEN Genyu, JIN Xiangzhong. Automotive aluminum alloy fiber laser lap welding research [J]. China laser, 2010, 37(8): 2091-2097. (in Chinese)  
梅丽芳, 陈根余, 金湘中. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091-2097.
- [12] ZHU Lihong. Impact study of laser heat input of welding on stainless steel joint organization and mechanical properties [D]. Changchun: Jilin University, 2014: 33-40. (in Chinese)  
朱立红. 激光焊接线能量对不锈钢接头组织及性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 39-40.
- [13] LI Yulong, LI He, ZHAO Cheng. Aluminum/steel dissimilar metal small power YAG laser welding process [J]. Applied laser, 2015, 35 (4): 456-459. (in Chinese)  
李玉龙, 李鹤, 赵诚. 铝/钢异种金属小功率 YAG 激光焊接工艺[J]. 应用激光, 2015, 35(4): 456-459.
- [14] BAI Jing, CHEN Diqing, ZHAO Zhongfu, et al. Low carbon high sulfur steel continuous casting composition segregation test analysis [C]//2012 micro alloy steel continuous casting crack control technology symposium, 2012: 189-191. (in Chinese)  
白静, 陈迪庆, 赵中福, 等. 低碳高硫钢连铸成分偏析的试验分析[C]//2012年微合金钢连铸裂纹控制技术研讨会论文集, 2012: 189-191.
- [15] YANG Xudong. Effect of Cu foil on laser butt welding quality of aluminum/steel dissimilar metals joint [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 143-149. (in Chinese)  
杨旭东. 铜箔中间层对铝/钢异种金属激光对接接头质量的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 147-148.