

车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究

张明军¹ 陈根余¹ 李时春¹ 梅丽芳² 张 正¹

(¹湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)
²厦门理工学院机械工程系, 福建 厦门 361024)

摘要 采用光纤激光器对 6016 车用铝合金与 DC56D 镀锌钢搭接接头进行了激光焊接试验研究。研究了焊接速度对铝/钢搭接接头熔深、界面金属间化合物和强度的影响, 以及单焊缝与双焊缝两种焊缝布置形式的接头强度差异。采用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)对焊接接头显微结构、金属间化合物成分以及拉伸断裂试样的断口进行了观察测试。结果表明, 选择适当的焊接速度, 控制熔深在合适范围内时, 可获得较高强度的焊接接头。接头界面处生成的金属间化合物主要有 Fe_2Al_5 , FeAl_2 和 FeAl_3 3 种。采用双焊缝布置形式可有效提高焊接接头强度, 接头最大拉剪强度可达 155 N/mm, 约为铝合金母材抗拉强度的 84%, 相对单焊缝布置接头提高了 26%; 拉伸试样断裂在铝合金热影响区处, 断裂属于韧窝断裂。

关键词 激光技术; 强度; 双焊缝搭接焊; 金属间化合物; 车用铝合金; 镀锌钢

中图分类号 TG457 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603010

Experimental Investigation on Fiber Laser Overlap Welding of Automotive Aluminum to Galvanized Steel

Zhang Mingjun¹ Chen Genyu¹ Li Shichun¹ Mei Lifang² Zhang Zheng¹

¹ The State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

² Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China

Abstract Experimental investigation of fiber laser welding of automotive aluminum 6016 to galvanized steel DC56D in an overlap configuration is carried out. The effect of the welding speed on penetration depth and tensile shear strength of the joints are studied experimentally. On the other hand, the comparison of the joint strength of the single-weld and that of double-weld assemblies is investigated. The microstructure of the joint and the chemical composition of the intermetallic compounds and the fracture of the tensile specimen are investigated by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) separately. The results indicate that the joint tensile shear strength is great with limiting the penetration depth under appropriate welding speed. The kinds of the intermetallic layer are Fe_2Al_5 , FeAl_2 and FeAl_3 . The double-weld assembly is contributed to improve the joint strength, and the maximum tensile shear strength is 155 N/mm, about 84% of that of the aluminum substrate, which is 26% higher than that of single-weld assembly. In tensile test, the specimen fracture is in heat-affected zone or substrate of aluminum, and the fracture form of the joint is ductile fracture.

Key words laser technique; strength; double-weld overlap welding; intermetallic compounds; automotive aluminum; galvanized steel

OCIS codes 000.2658; 140.3390; 350.3390; 160.3900

收稿日期: 2011-03-23; 收到修改稿日期: 2011-04-13

基金项目: 国家 863 计划(2007AA042006)、国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2009ZX04007-021)、湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题(6107505)资助课题。

作者简介: 张明军(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光焊接技术方面的研究。E-mail: hnuzmj@163.com

导师简介: 陈根余(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车激光制造研究及激光微细加工等方面的研究。

E-mail: hdgychen@163.com(中国光学学会会员号: S04011719)

1 引 言

随着世界各国节能减排政策的出台,世界各大汽车制造商纷纷采用车身轻量化设计来降低油耗。而实现车身轻量化设计的根本在于采用轻质合金材料,如用铝合金来代替传统的钢材。实现铝合金与钢异种金属的优质连接已成为汽车白车身制造工艺的一部分。铝/钢异种金属连接的主要问题是两者之间的热物理性能差异较大,铁在铝中的溶解度极小。在室温下,铁几乎不溶于铝,所以在焊接冷却过程中会产生 $FeAl_3$ 、 Fe_2Al 、 Fe_2Al_7 、 Fe_2Al_5 、 $FeAl_2$ 等 Fe-Al 金属间化合物,降低接头的塑韧性,甚至引起焊接裂纹^[1]。由于激光束热输入可控性好,可以缩短铝合金与钢之间的反应时间来抑制 Fe-Al 金属间

化合物的生长。因此铝/钢异种金属激光焊接工艺成为国内外学者研究的焦点^[2~15]。

本文针对车用铝合金与镀锌钢异种金属搭接接头连接强度低的难点,采用光纤激光器对车用铝合金与镀锌钢搭接接头进行激光焊接试验研究。实现了 6016 车用铝合金和 DC56D 超低碳镀锌钢异种金属搭接接头的激光焊接,并对得到的焊接接头结构、界面金属间化合物成分及接头强度进行了分析。

2 试验材料与与方法

试验采用 6016 车用铝合金和 DC56D 超低碳镀锌钢,厚度分别为 1.15 mm 和 1 mm,两者化学成分如表 1 所示。

表 1 母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of substrates (mass fraction, %)

Alloy	Element								
	Mg	Si	Cu	Mn	P	S	C	Fe	Al
DC56D	—	0.01	0.3	—	0.03	0.03	0.01	Bal.	0.02
6016	0.25~0.6	1~1.5	0.2	0.2	—	—	—	0.5	Bal.

试验采用 4 kW 光纤激光器,聚焦光斑直径为 0.53 mm,由焊接机器人夹持焊接头实施焊接,试验装置如图 1 所示。试验前用细砂纸打磨去除试件表面氧化膜,并用丙酮去除表面的油污。试验采用镀锌钢置于铝合金上侧的搭接形式,采用氩气(Ar)对焊缝正面和背面同时进行保护,如图 2 所示。

采用线切割把已焊试件切割成标准拉伸试样,如图 3 所示。在 WDW-100 微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验,力的加载速度为 1.0 mm/min。同时,用砂纸对线切割所得焊缝横截面进行打磨与抛光处理,然后分别用凯勒试剂(体积分数为 1% HF、体积分数为 1.5% HCl、体积分数为 2.5% HNO₃ 和 H₂O)和硝酸乙醇溶液(体积分数为 4% HNO₃)对接头中铝合金和钢进行腐蚀处理,在 XTZ-10ST 视频显微镜下观察焊缝横截面,采用

QUANTA 200 环境扫描电子显微镜(ESEM)及其配备的能谱仪(EDS)对接头显微结构和界面层化学成分进行分析。

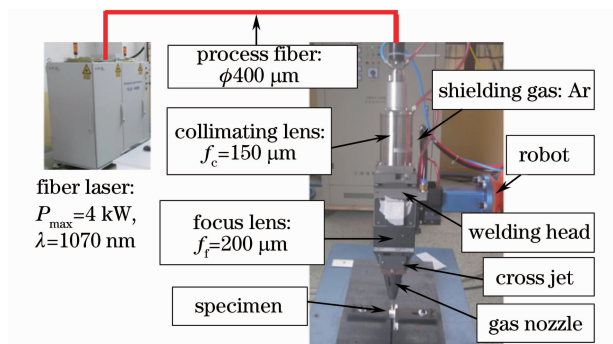


图 1 光纤激光机器人焊接装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of robot fiber laser welding setup

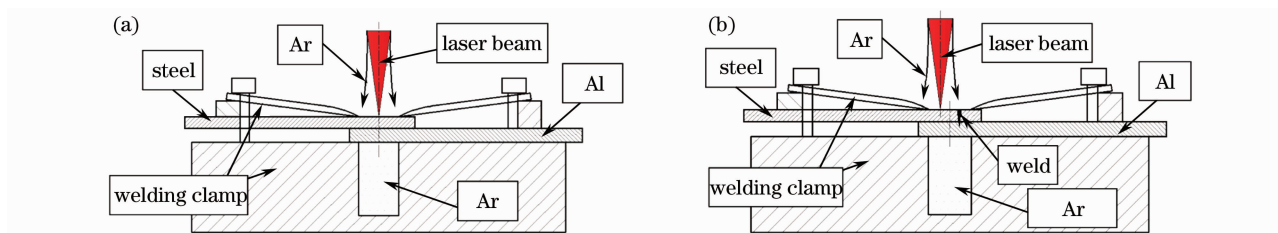


图 2 焊缝布置形式示意图。(a)单焊缝,(b)双焊缝
Fig. 2 Schematic diagrams of joint assembly. (a) single-weld, (b) double-weld

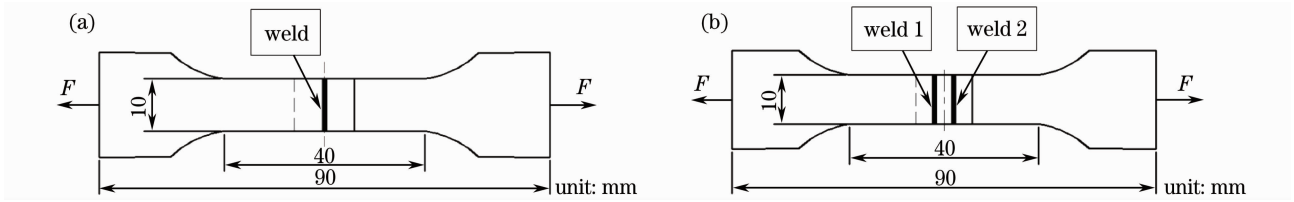


图3 拉伸试验标准试样。(a)单焊缝,(b)双焊缝

Fig.3 Mechanical test specimens. (a) single-weld, (b) double-weld

3 试验结果与分析

3.1 焊接速度对接头性能的影响

对光纤激光搭接焊工艺参数,如激光功率、焊接速度、离焦量和保护气流量进行了优化试验。在优化的工艺参数基础上,通过改变焊接速度,研究了不同焊接线能量输入时铝/钢异种金属搭接接头的性能。

3.1.1 焊接速度对焊缝熔深的影响

对同一试件取3个不同位置处横截面研究焊缝

熔深。图4,5为保持激光功率、离焦量和保护气(氩气)流量不变时,铝合金侧焊缝熔深 h 随焊接速度的变化关系。由图可知,当焊接速度为100 mm/s时,铝合金侧焊缝熔深 h 仅为80 μm 。随着焊接速度的减小,焊缝熔深逐步增大。这是由于在其他参数条件不变时,减小焊接速度,即增大了焊接线能量输入,从而焊接材料的熔化量与蒸发量增大,最终导致焊缝熔深随之增大。

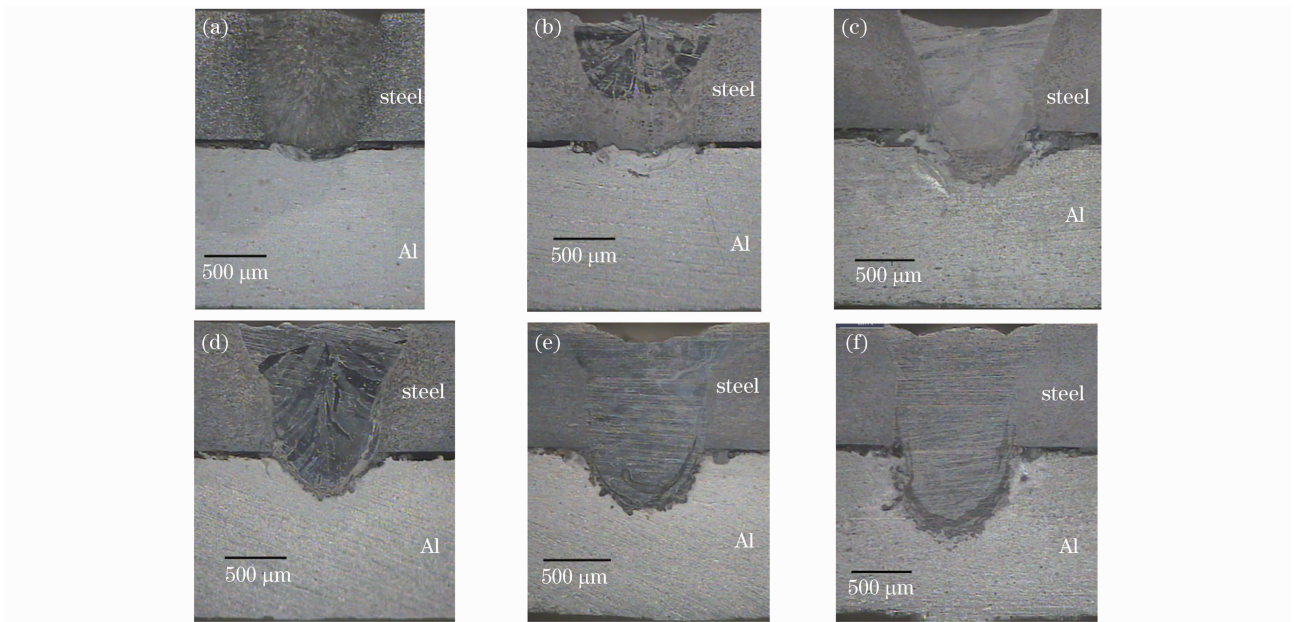


图4 不同焊接速度下的接头横截面。(a) $v=100$ mm/s, $h=80$ μm ; (b) $v=90$ mm/s, $h=170$ μm ; (c) $v=85$ mm/s, $h=200$ μm ; (d) $v=80$ mm/s, $h=250$ μm ; (e) $v=75$ mm/s, $h=380$ μm ; (f) $v=70$ mm/s, $h=650$ μm

Fig.4 Cross-sections of the joints with different welding speeds. (a) $v=100$ mm/s, $h=80$ μm ; (b) $v=90$ mm/s, $h=170$ μm ; (c) $v=85$ mm/s, $h=200$ μm ; (d) $v=80$ mm/s, $h=250$ μm ; (e) $v=75$ mm/s, $h=380$ μm ; (f) $v=70$ mm/s, $h=650$ μm

3.1.2 焊接速度对界面金属间化合物的影响

图6(a)~(d)分别为图4中(c)~(f)所示接头局部结构的SEM背散射图像。由图可知,当焊接速度为85 mm/s时,焊缝与铝合金界面处生成的金属间化合物层约为5 μm 。随着焊接速度的减小,焊缝熔深增大,界面处生成的金属间化合物层厚度不

断增大。对不同焊接速度下接头界面层进行SEM能谱分析测试,结合Fe-Al二元合金相图^[16],推断化学成分及Fe-Al金属间化合物如表2所示。由表可知,界面处金属间化合物层主要由硬而脆的富铝金属间化合物组成。随着焊接速度的减小,界面层先后出现 Fe_2Al_5 、 FeAl_2 和 Fe_2Al_5 、 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 ,

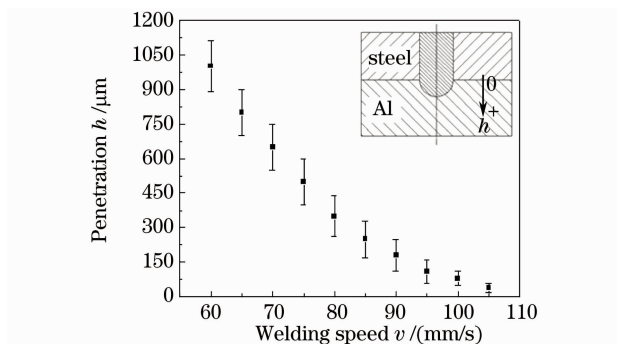


图 5 焊接速度对焊缝熔深的影响

Fig. 5 Influence of welding speed on the penetration depth

化合物中铝含量不断增加。这是由于焊接速度减小,焊接热输入增大,使得铝合金的熔化量增大,同时焊接冷却速度减小,从而焊缝金属中有更多铝与铁发生反应生成富铝化合物相。因此,对于铝/钢异种金属搭接焊,必须在较低热输入(高焊接速度)下进行,严格控制铝合金一侧的熔化量。另外,即使焊接速度变化,接头中始终存在 Fe_2Al_5 ,这说明 Fe_2Al_5 是铝/钢异种金属焊接接头中最容易生成的金属间化合物。界面层还发现有锌存在,这可能是由于镀锌钢板上的锌层没有完全蒸发而混入熔池所致。

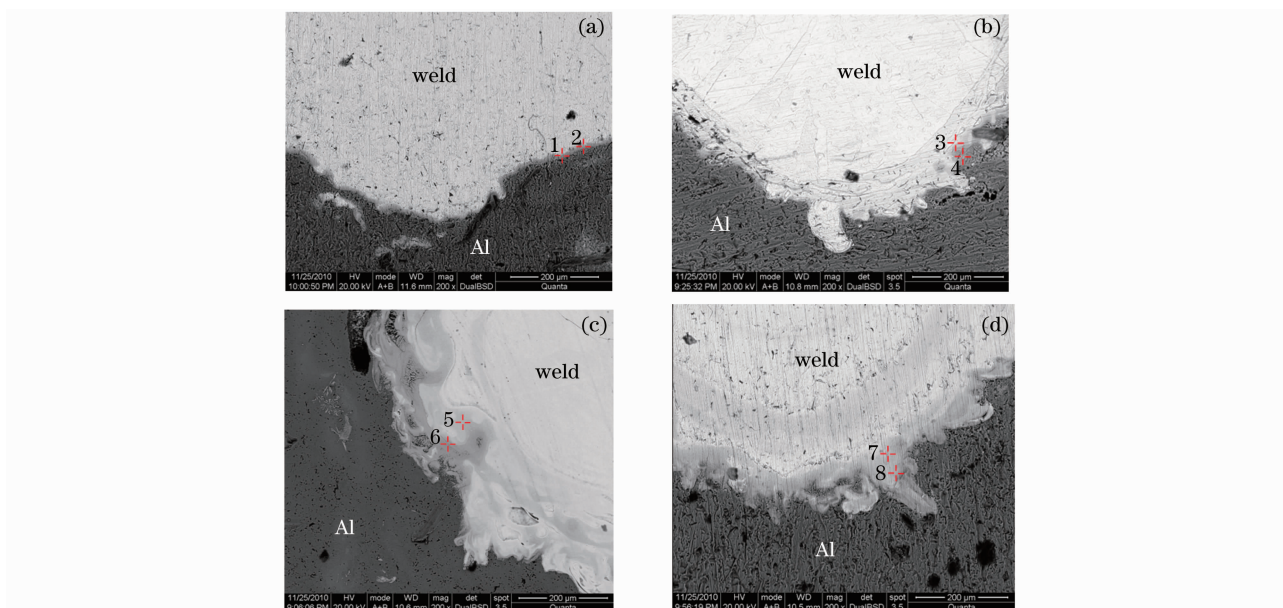


图 6 不同焊接速度下接头的 SEM 背散射图像。(a) $v=85$ mm/s, (b) $v=80$ mm/s, (c) $v=75$ mm/s, (d) $v=70$ mm/s

Fig. 6 Microscopic views of SEM backscattered electron micrographs of the joints with different welding speeds.

(a) $v=85$ mm/s, (b) $v=80$ mm/s, (c) $v=75$ mm/s, (d) $v=70$ mm/s

表 2 接头界面金属间化合物 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of the intermetallic layer

Measured points	Al (atomic fraction /%)	Fe (atomic fraction /%)	Zn (atomic fraction /%)	Intermetallic compounds
1	72.46	23.38	4.16	Fe_2Al_5
2	69.80	28.52	1.68	Fe_2Al_5
3	66.04	30.34	3.62	FeAl_2
4	69.84	28.01	2.15	Fe_2Al_5
5	70.44	27.01	2.55	Fe_2Al_5
6	74.56	23.33	2.11	FeAl_3
7	68.39	28.73	2.88	Fe_2Al_5
8	75.06	23.54	1.40	FeAl_3

3.1.3 焊缝熔深对接头强度的影响

对相同试验参数下所得试件取 3 组拉伸试样研究接头抗拉剪强度。接头抗拉剪强度用线拉剪强度表示,由拉剪试样的最大拉剪力除以焊缝长度所得。图 7 反映了接头线拉剪强度随铝合金侧焊缝熔深的

变化关系。由图可知,当铝合金侧焊缝熔深 h 为 $0\sim 250\ \mu\text{m}$ 时,随着熔深的增大,接头抗拉剪强度不断增大;而当铝合金侧焊缝熔深 h 为 $250\sim 1200\ \mu\text{m}$ 时,随着熔深的增大,接头抗拉剪强度逐渐减小。这是由于当焊缝熔深较小时,随着熔深的增大,铝合金

与镀锌钢搭接处的熔合区增大,从而焊接接头强度增大;而当焊缝熔深增加到一定值时,由前述分析可知,随着焊缝熔深的增大,界面处硬而脆的富铝金属间化合物层厚度不断增大,致使接头强度逐渐减小。

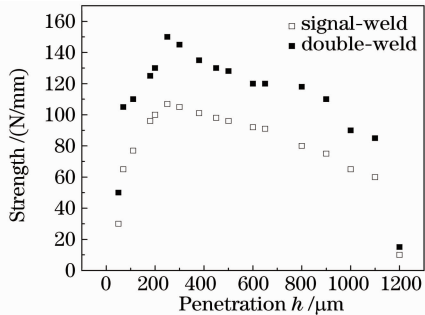


图7 焊缝熔深及焊缝布置形式对焊接接头强度的影响

Fig. 7 Influence of penetration depth and weld assembly style on the joint strength

3.2 焊缝布置形式对焊接接头强度的影响

试验研究了单焊缝和双焊缝两种焊缝布置形式下焊接接头强度的差异,如图7所示。由图可知,双焊缝布置接头的抗拉剪强度比单焊缝布置接头大得

多,单焊缝布置接头的最大拉剪强度为 107 N/mm,仅为铝合金母材抗拉强度的58%左右;而双焊缝布置接头的最大拉剪强度为 155 N/mm,约为铝合金母材抗拉强度的 84%,相对单焊缝布置接头提高了 26%。

观察拉伸破坏的试样发现,单焊缝布置接头断裂主要发生在上下板搭接界面处,如图8(a)所示,是由于上下板搭接界面存在脆性金属间化合物层所致,断口 SEM 形貌分析属于准解理断裂,如图9(a)所示。双焊缝布置接头断裂主要发生在铝合金热影响区处,如图10(a)所示,是由于铝合金热影响区(HAZ)软化所致,断口 SEM 形貌分析属于韧窝断裂,如图9(b)所示。当焊缝熔深很小时,双焊缝布置接头也会剥离于上下板搭接界面处,如图10(b)所示。随着焊缝熔深的增大,单焊缝和双焊缝布置接头均断裂在焊缝与钢的交界处,如图8(b)和图10(c)所示。这是由于铝合金密度比钢大,同时焊接过程中熔池上下流动剧烈导致液态铝在整个焊缝中与液态钢结合产生脆性金属间化合物所致,断

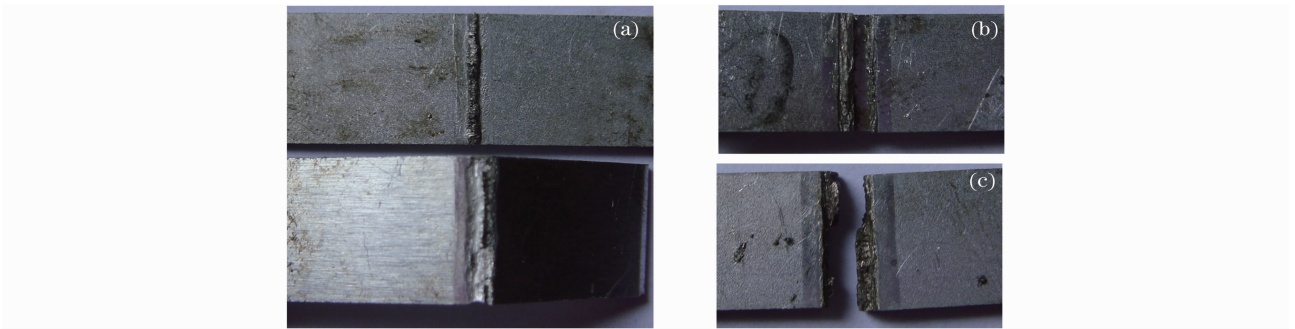


图8 单焊缝布置接头拉剪试样断裂位置。(a)接头剥离破坏于焊缝-铝合金界面处,(b)接头破坏于焊缝-钢界面处,(c)接头破坏于焊缝处

Fig. 8 Fracture positions of the tensile shear specimens in single-weld assembly. (a) decohesion fracture on the weld-aluminium interface, (b) fracture on the weld-steel interface, (c) fracture in the weld

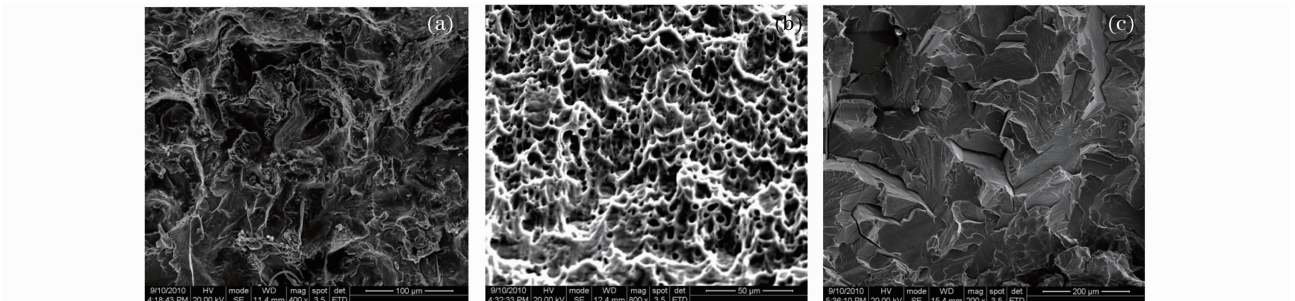


图9 拉剪试样断口 SEM 形貌。(a)接头剥离破坏于焊缝-铝合金界面处,(b)接头破坏于焊缝-铝合金界面并通过铝合金热影响区,(c)接头破坏于焊缝或焊缝-钢界面处

Fig. 9 SEM fractography of the tensile shear specimens. (a) decohesion fracture on the weld-aluminum interface, (b) fracture on the weld-aluminum interface and through the heat affected zone (HAZ) of the aluminum, (c) fracture in the weld and on the weld-steel interface

口 SEM 形貌分析属于沿晶断裂,如图 9(c)所示。全熔透的单焊缝和双焊缝布置接头均断裂在焊缝中心,如图 8(c)和图 10(d)所示。主要是由于液态铁

和液态铝充分反应生成的脆性金属间化合物布满整个焊缝,断口明显呈脆性断裂。

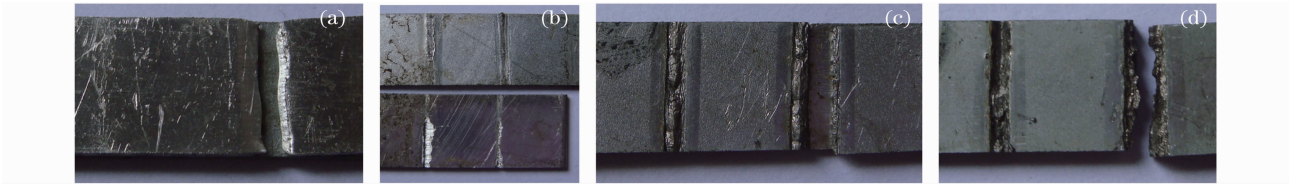


图 10 双焊缝布置接头拉剪试样断裂位置。(a)接头破坏于焊缝-铝合金界面并通过铝合金热影响区,(b)接头剥离破坏于焊缝-铝合金界面处,(c)接头破坏于焊缝-钢界面处,(d)接头破坏于焊缝处

Fig. 10 Fracture positions of the tensile shear specimens in double-weld assembly. (a) fracture on the weld-aluminum interface and through the HAZ of the aluminum, (b) decohesion fracture on the weld-aluminum interface, (c) fracture on the weld-steel interface, (d) fracture in the weld

4 结 论

1) 通过适当焊接速度,控制熔深在合适范围内时,可以实现车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊较高强度的连接。单焊缝布置接头最大拉剪强度为 107 N/mm,约为铝合金母材抗拉强度的 58%;上下板搭接界面是接头的脆弱部位,断口属于准解理断裂。采用双焊缝布置可有效提高搭接焊接头的连接强度。双焊缝布置接头的最大拉剪强度为 155 N/mm,约为铝合金母材抗拉强度的 84%,相对单焊缝布置接头提高了 26%;铝合金热影响区是接头的脆弱部位,断口属于韧窝断裂。

2) 接头界面处生成的金属间化合物主要有 Fe_2Al_5 、 $FeAl_2$ 和 $FeAl_3$ 3 种,其中 Fe_2Al_5 相是铝/钢异种金属焊接接头中最容易生成的金属间化合物。

参 考 文 献

- 1 Li Yajiang. Welding Metallurgy—Weldability of the Material [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. 280~282
李亚江. 焊接冶金学——材料焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. 280~282
- 2 Lei Zhen, Qin Guoliang, Lin Shangyang *et al.*. Fusion-brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminum alloy and zinc-coated steel based on laser-MIG hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(3): 94~98
雷 振, 秦国梁, 林尚扬 等. 基于激光-MIG 复合热源的 5A02 铝合金/镀锌钢熔-钎焊[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(3): 94~98
- 3 Lei Zhen, Qin Guoliang, Lin Shangyang *et al.*. Research and developments of dissimilar metals welding of aluminum and steel [J]. *Welding & Joining*, 2006, (4): 16~20
雷 振, 秦国梁, 林尚扬 等. 铝与钢异种金属焊接的研究与发展概况[J]. *焊接*, 2006, (4): 16~20

- 4 M. J. Rathod, M. Kutsuna. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding[J]. *Welding J.*, 2004, **83**(1): 16~26
- 5 Jianjun Ding, Feiqun Li, Feng Qu *et al.*. Investigation on laser brazing AA6056 Al alloy to XC18 low-carbon steel[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1): 31~34
- 6 G. Sierra, P. Peyre, F. Deschaux-Beaume *et al.*. Steel to aluminium key-hole laser welding[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2007, **447**(1-2): 197~208
- 7 H. C. Chen, A. J. Pinkerton, L. Li *et al.*. Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications[J]. *Mater. Des.*, 2011, **32**(2): 495~504
- 8 G. Sierra, P. Peyre, F. Deschaux-Beaume *et al.*. Which laser process for steel to aluminum joining? [C]. Montpellier: 25th International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics-Congress Proceedings, 2006
- 9 E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry[J]. *J. Mater. Processing Technol.*, 2001, **115**(1): 2~8
- 10 G. Sierra, P. Peyre. Generation of aluminum-steel joints with laser-induced reactive wetting[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2007, **444**(1-2): 327~338
- 11 Huang Pengfei, Lu Zhenyang, Gao Wenning *et al.*. Low energy welding technology in bonding steel with aluminum [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(11): 296~299
黄鹏飞, 卢振洋, 高文宁 等. 钢铝异种金属的低能量焊接法[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(11): 296~299
- 12 H. Laukant, C. Wallmann, M. Müller *et al.*. Fluxless laser beam joining of aluminium with zinc coated steel[J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2005, **10**(2): 219~226
- 13 G. Sierra, P. Peyre. Steel to aluminum braze welding by laser process with Al-12Si filler wire [J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2008, **13**(5): 430~437
- 14 A. Mathieu, R. Shabadib, A. Deschamps *et al.*. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire)[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**(3): 652~661
- 15 M. J. Torkamany, S. Tahamtan, J. Sabbaghzadeh. Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser[J]. *Mater. Des.*, 2010, **31**(1): 458~465
- 16 Yu Jueqi, Yi Wenzhi, Chen Bangdi *et al.*. Binary Alloy Phase Diagrams [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1987. 140~141
虞觉奇, 易文质, 陈邦迪 等. 二元合金状态图集[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 140~141