

铝/钢微束等离子熔钎焊接头组织及力学性能

樊 丁^{1,2}, 康玉桃², 黄健康¹, 于晓全², 潘 伟²

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 采用微束等离子焊接方法进行 6010 铝合金/镀锌钢对接熔钎焊工艺试验, 在合适的工艺参数下获得成形良好的铝/钢熔钎焊对接接头, 采用金相显微镜、扫描电子显微镜、能谱仪、拉伸试验机等多种测试手段对所得接头形貌、微观组织及力学性能进行分析。结果表明, 所得接头焊缝正、背面铺展良好, 无气孔、裂纹、夹渣等明显缺陷, 为典型的铝/钢熔钎焊对接接头; 接头界面处形成锯齿状的 Fe_2Al_5 金属间化合物, 且金属间化合物层厚度和焊缝铺展宽度共同决定了接头强度, 当焊接电流为 38.5 A 时, 熔钎焊接头抗拉强度为 193 MPa, 为铝母材的 79.8%, 接头断裂形式为脆性混合断裂。

关键词: 微束等离子熔钎焊; 铝合金/钢; 金属间化合物; 铺展宽度; 接头强度

中图分类号: TG 457 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400035

0 序 言

随着节能减排政策的提出, 实现汽车轻量化已成为当前汽车行业关注与研究的重点。铝合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀好等优点, 其中, 6 系铝合金由于高强度和良好的耐腐蚀性被广泛用于汽车车身^[1]。而钢是目前使用最广泛的金属材料, 铝合金/钢复合构件结合了铝合金和钢的优势, 具有质量轻, 强度高特点, 可满足生产成本较低、能源消耗较少的发展要求, 在汽车等行业具有广泛应用前景^[2]。但由于铝合金、钢在物理化学性能等方面存在的巨大差异, 铝合金和钢在焊接过程中容易出现裂纹、气孔、未熔合等问题, 因此如何实现铝合金/钢异种金属的优质连接成为了研究的重点。扩散焊、摩擦焊、钎焊等焊接方法可实现铝合金/钢异种金属的焊接, 但普遍存在生产成本低、焊接效率低、工件尺寸形状受限等问题^[3], 熔钎焊已成为当前实现铝/钢异种金属连接的主要方法。根据焊接热源不同, 铝/钢熔钎焊包括电弧熔钎焊^[4]、激光熔钎焊^[5]、激光+电弧复合熔钎焊^[6]等。北京科技大学 Zhang 等人^[7]通过预置 Al-Si 钎料, 采用 MIG+TIG 双面弧焊的方法实现了铝合金/不锈钢的连接。

Dharmendra 等人^[8]采用 Zn-Al 焊丝通过激光熔钎焊的方法实现镀锌钢/铝合金的搭接, 对接头组织及接头力学性能进行分析, 研究发现, 从钢一侧到焊缝反应层厚度范围为 3~23 μm , 当热输入量在 60~110 J/mm 范围内时, 接头具有较高的抗拉强度, 约 220 MPa, 且失效发生在铝母材一侧。对于铝/钢异种焊接来说, 普通电弧熔钎焊能量密度低、热输入不易精确控制, 激光熔钎焊虽能实现热输入的精确可控, 但对装配夹具要求高, 焊接成本高, 相比之下, 微束等离子熔钎焊具有电弧挺度高、稳定性好、能量密度高、焊后板材残余应力小、焊接成本低等优点^[9], 但目前将其用于铝/钢异种金属连接的研究较少报道。

试验采用微束等离子熔钎焊的方法, 通过在板材表面预置钎料, 实现 6010 铝合金与 ST04Z 镀锌钢的对接连接, 获得成形良好的熔钎焊接头, 并进一步分析了铝合金/镀锌钢接头组织及力学性能。

1 试验方法

试验采用 2 mm 厚的 6010 铝合金板与 1 mm 厚的 ST04Z 镀锌钢板作为试验材料, 其化学成分如表 1、表 2 所示。一定含量的 B 元素对于铝合金可以起到细化晶粒等作用^[10], 故试验采用 Al-B 的混合合金粉末 (Al:B=92:8) 作为预置钎料。

表 1 6010 铝合金化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of 6010 aluminum alloy

Mg	Si	Mn	Cu	Zn	Ti	Fe	Al
0.6 ~ 1.0	0.8 ~ 1.2	0.20 ~ 0.8	0.15 ~ 0.6	≤0.25	≤0.10	≤0.50	余量

表 2 ST04Z 镀锌钢化学成分 (质量分数, %)
Table 2 Chemical composition of ST04Z

C	Mn	Si	P	S	Cu	Zn	Ni
0.08	0.40	≤0.40	0.02	≤0.30	≤0.15	≤0.15	≤0.15

试验前, 将铝合金板与镀锌钢板分别加工成尺寸为 150 mm × 50 mm × 2 mm 和 150 mm × 50 mm × 1 mm 的试样, 采用钢丝刷和砂纸去除铝合金表面及端面的氧化膜, 并用丙酮清洗铝合金与镀锌钢表面及端面以消除板材上的油污. 然后将铝合金板和镀锌钢板置于同一水平面并固定在加工成形槽的焊接夹具上, 使两板对接界面处于成形槽中心, 将 QJ201 铝钎焊溶剂和 Al-B 钎料分别用丙酮调和并依次均匀地涂敷在焊道上表面, 钎料涂覆厚度以盖住板材底部为宜, 待表面的丙酮蒸发后, 采用 LHM-50 精密微束等离子弧焊机进行 6010 铝合金和 ST04Z 镀锌钢的对接熔钎焊工艺试验, 其焊接示意图如图 1 所示.

测试所得试样接头的微观组织形貌及金属间化合物层, 用 SEM 原位测量进行金属间化合物层厚度和焊缝铺展宽度测量, 用 SEM 自带的能谱仪 (EDS) 分析界面不同区域处化合物层的化学成分, 采用 WDW-100KN 的微机控制电子万能试验机对所得接头进行拉伸试验, 拉伸速度为 1 mm/min, 拉伸试样尺寸如图 2 所示.

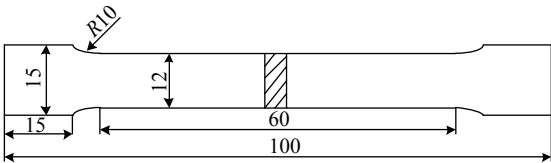


图 2 拉伸试样尺寸 (mm)
Fig. 2 Size of tensile sample

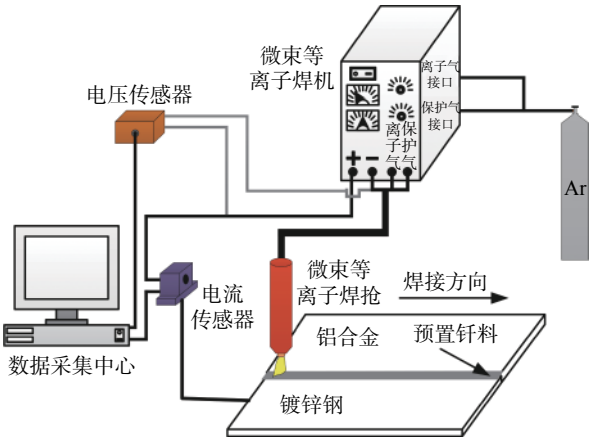


图 1 微束等离子对接熔钎焊示意图
Fig. 1 Schematic drawing of butt welding-brazing welding by micro-beam plasma

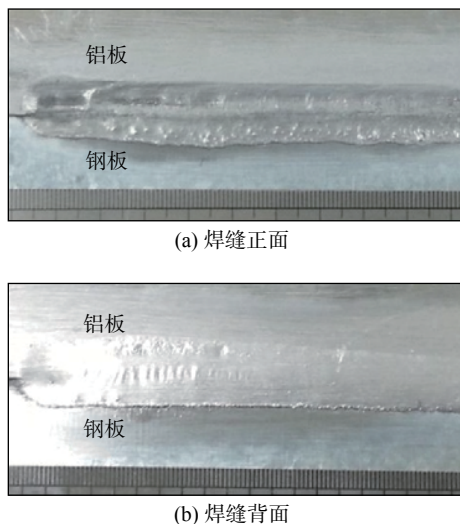
焊接过程中, 将微束等离子电弧偏向铝板一侧, 距焊缝中心 1 ~ 2 mm, 以保证铝合金/钢熔钎焊接头的形成, 并采用纯度为 99.99% 的氩气对熔池进行正面保护. 焊接完成后, 对试样进行切割、打磨、抛光、腐蚀等处理. 通过 MEF-3 广视场万能金相显微镜观察截面形貌, 场发射扫描电子显微镜 (SEM)

2 试验结果与分析

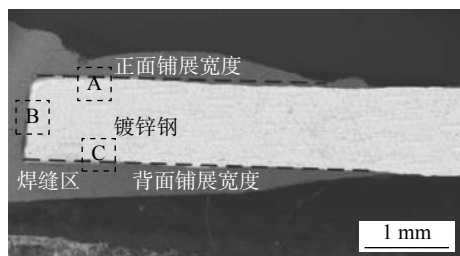
2.1 接头形貌及组织

在焊接速度 80 mm/min, 焊枪导电嘴距母材高度 6 mm, 焊枪离子气流量为 0.4 L/min, 保护气流量为 10 L/min 时, 进行不同焊接电流下的铝合金/钢微束等离子对接熔钎焊工艺试验. 结果表明, 在焊接电流较小时, 铝合金与钢无法实现很好的连接, 但焊接电流太大则会出现焊穿现象, 经试验研究, 确定焊缝成形良好的焊接电流范围为 35.5 ~ 39.5 A. 在焊接电流分别 35.5, 36.5, 37.5, 38.5, 39.5 A 下对铝合金/钢进行微束等离子熔钎焊试验, 分析不同电流下, 焊缝铺展宽度和金属间化合物层厚度的变化及其与抗拉强度的关系. 图 3 为焊接电流 36.5 A 时, 焊缝宏观形貌. 从图 3 可以看出, 在此焊接参数下形成了成形美观、铺展良好的接头.

对焊接电流 36.5 A 下所得对接接头横截面微观形貌进行分析, 如图 4 所示. 由图 4 可知, 镀锌钢

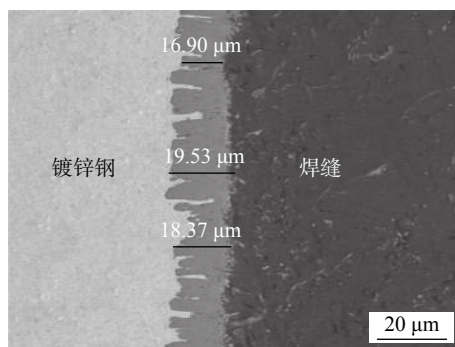
图 3 $I = 36.5$ A 焊缝宏观形貌Fig. 3 Weld appearance of welding seaw with $I = 36.5$ A

未熔化, 铝合金母材及钎料发生熔化, 液态金属在电弧压力、气体吹力、表面张力等的作用下向钢一侧润湿铺展, 获得正、背面皆铺展良好的铝合金/钢熔钎焊接头。定义焊缝铺展宽度为液态金属从界面铺展到钢一侧铺展角的长度, 图 4 中通过 SEM 原位测量, 焊接电流 36.5 A 时焊缝正面铺展宽度为 3.125 mm, 焊缝背面铺展宽度为 3.486 mm, 焊缝背面的铺展要大于焊缝正面的铺展, 这是因为微束等离子焊接速度较小, 使得加热及冷却速度较低, 熔融态维持时间较长, 液态金属在电弧压力、重力、表面张力的作用下, 流向钢侧背面的量增加, 在冷却时间较长的情况下, 获得比正面铺展更大的背面铺展。

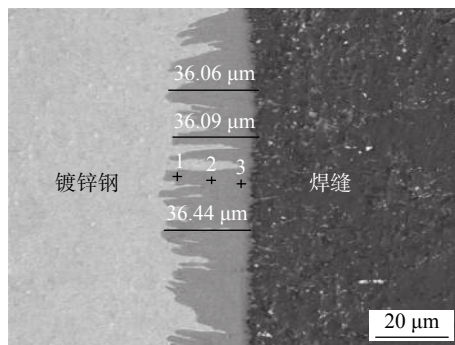
图 4 $I = 36.5$ A 时焊缝横截面微观形貌Fig. 4 Cross-section microscopic morphology of weld joints with $I = 36.5$ A

对图 4 中界面层不同区域进行扫描电镜分析, A, B, C 三个区域微观结构的 SEM 背散射图像如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 界面处形成了锯齿状的 Al-Fe 金属间化合物, 对不同区域的金属间化合物层厚度进行 SEM 原位测量, 每个区域取三个

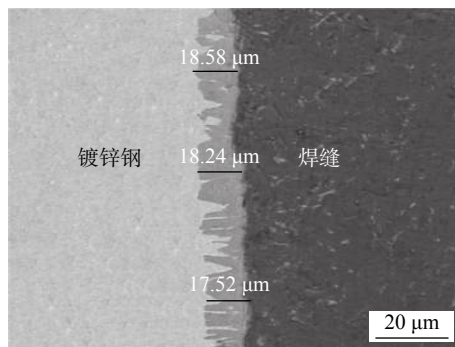
不同位置, 然后求平均值。结果表明, B 区域金属间化合物层厚度最大, A 区域次之, C 区域金属间化合物层厚度最小, 这是因为微束等离子电弧挺度高、热源集中, 在焊接过程中 B 区域受到的温度最高, 液态金属冷却时间最长, 极大地促进了金属间化合物的生长, 焊缝背面受到的热量最少, 焊接过程中温度最低, 液态金属冷却时间短, 金属间化合物的生长慢。为进一步确定界面处 Al-Fe 金属间化合物的类型, 采用场发射扫描电子显微镜自带的能谱仪对图 5 中的 B 区域进行点扫描分析, 扫描结果如表 3 所示, Al, Fe 原子数比约为 5:2。结合 Al-Fe 相图及表 3 中 1, 2, 3 处的点扫描结果, 确定该界面层处形成的金属间化合物为 Fe_2Al_5 。



(a) A 区域微观形貌



(b) B 区域微观形貌



(c) C 区域微观形貌

图 5 界面层不同区域微观形貌

Fig. 5 Cross-section microscopic morphology of different areas of joint interface

表 3 金属间化合物层不同区域点扫描结果 (原子分数, %)
Table 3 Point scanning analysis of different regions of intermetallic compound layer

位置	Al	Fe	Si
1	70.2	29.4	0.4
2	71.7	27.9	0.4
3	71.1	28.7	0.2

2.2 金属间化合物层厚度及焊缝铺展宽度对接头抗拉强度的影响

对铝合金/镀锌钢拉伸试样进行拉伸试验, 根据式 (1)、式 (2) 将试验所得拉伸负荷-变形曲线转化为应力-应变曲线。

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

式中: σ 为单位面积上所受应力; P 为拉伸试验期间某瞬间时施加的的负荷; S 为试件标线间初始截面积; ε 为应变; ΔL 为变形量; L_0 为拉伸前试样的标距长度。图 6 为焊接电流 38.5 A 时, 铝合金/钢微束等离子焊接接头及铝合金母材的应力-应变曲线, 铝合金/钢熔钎焊接头抗拉强度可达 193 MPa, 为铝合金母材抗拉强度的 79.8%。

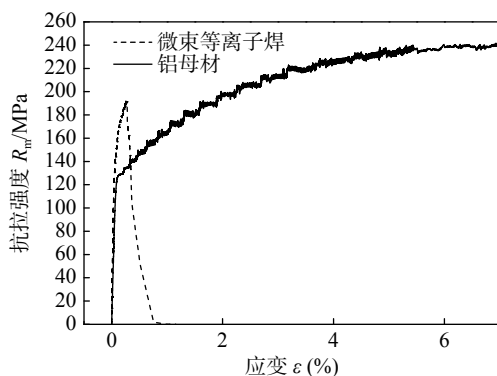


图 6 接头及铝母材应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of joint and aluminum base metal

对熔钎焊对接接头的断裂形貌进行分析, 断裂试样宏观形貌如图 7 所示。从图 7 中可以发现, 断裂位置为铝合金/钢竖直界面及焊缝铺展处, 这主要是因为界面区域生成脆硬金属间化合物层导致的, 另外在接头顶部焊缝区出现撕裂, 结合接头强度判断液态金属在钢一侧的铺展在一定程度上可能对接头的断裂起到了阻碍作用。为进一步分析界面的断裂形式, 对竖直界面及焊缝铺展区断裂界面处进

行 SEM 分析, 如图 8a, b 所示, 竖直界面处的断裂为典型的解理断裂, 焊缝铺展处的断裂为韧窝断裂, 综合分析可知, 接头断裂为韧脆混合型断裂。

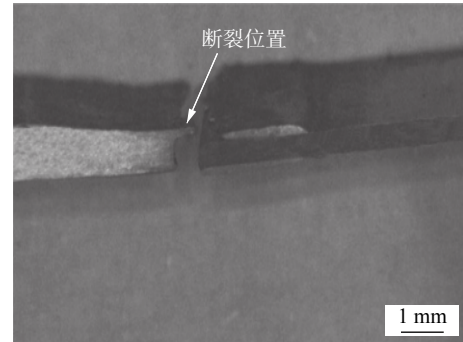
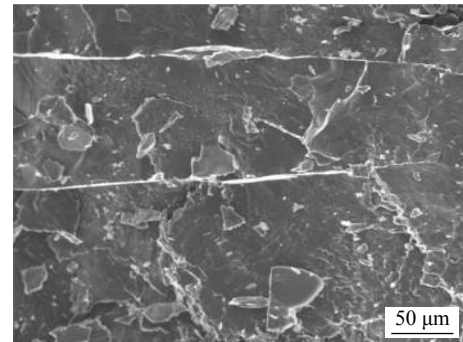
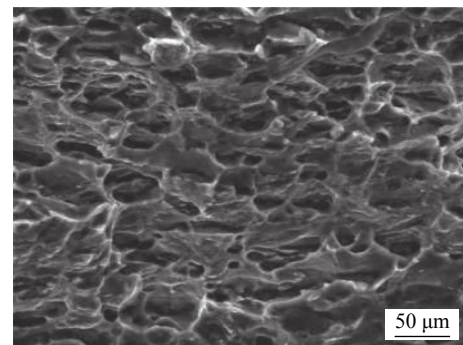


图 7 断裂试样宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic morphology of fracture specimen



(a) 竖直界面断裂形貌



(b) 焊缝铺展处断裂形貌

图 8 断裂接头微观形貌

Fig. 8 Microscopic morphology of fracture joint

根据断裂情况分析, 竖直界面处的断裂与此处金属间化合物层有关, 而金属间化合物层厚度则是影响接头强度的一个重要因素, 另外铺展影响着焊缝处的断裂, 因此对竖直界面处的金属间化合物层厚度与焊缝铺展宽度进行研究。图 9 为不同焊接电流下接头竖直界面处金属间化合物层厚度的变化。

由图 9 可知, 随焊接电流的增大, 金属间化合物层厚度逐渐增加, 这是因为在其它数不变的情况下, 焊接电流增加, 液态金属熔化温度及熔池内部

温度增加, 高温下 Fe 原子及 Al 原子之间的扩散加剧, 进而促进了 Fe 原子及 Al 原子之间的反应, 金属间化合物层厚度增加。

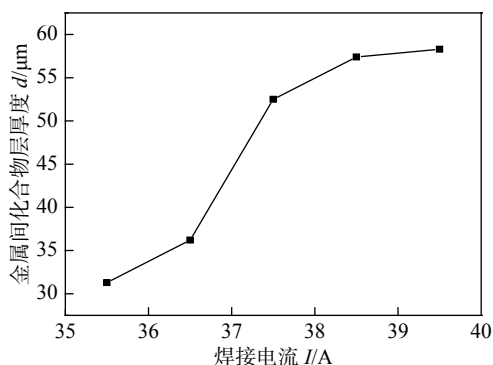


图 9 金属间化合物层厚度随焊接电流变化

Fig. 9 Variation of intermetallic compound layer thickness with welding current

除了金属间化合物层厚度, 焊接电流对焊缝铺展宽度也有显著影响. 图 10 为焊缝正、背面铺展宽度随焊接电流的变化, 从图中可以看出, 随着焊接电流的增大, 焊缝正、背面的铺展宽度皆呈先增大后减小的趋势, 且不同焊接电流下焊缝背面的铺展皆大于焊缝正面的铺展, 38.5 A 时焊缝铺展最大, 正面铺展为 6.102 mm, 背面铺展为 6.742 mm.

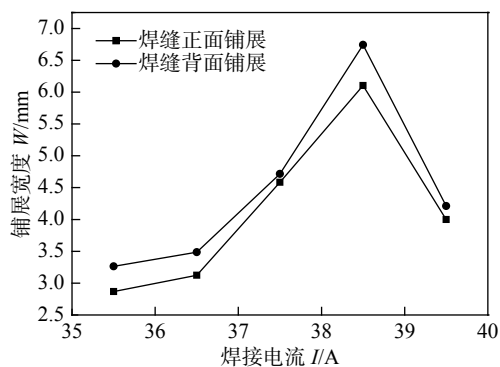


图 10 焊缝铺展宽度随焊接电流的变化

Fig. 10 Variation of weld spreading width with welding current

金属间化合物层厚度变化时, 接头抗拉强度变化如图 11 所示. 从图 11 中可以看出, 随着金属间化合物层厚度的增加, 接头抗拉强度先增大后减小, 且当金属间化合物层厚度变化较大时, 接头抗拉强度随之发生较大变化, 可见金属间化合物层厚度对接头抗拉强度有着重要的影响。

从断裂情况可以发现, 焊缝铺展对于接头断裂起到了一定的阻碍作用. 图 12 为焊缝正面铺展宽度变化时, 接头抗拉强度的变化, 分析发现随着焊

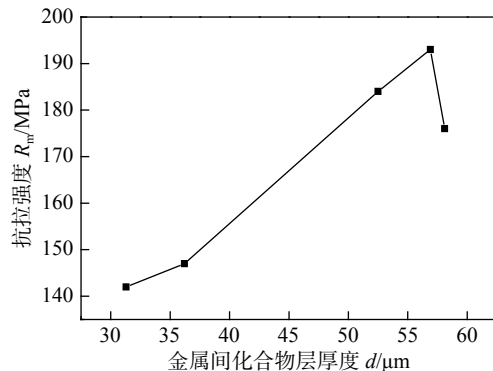


图 11 接头抗拉强度随金属间化合物层厚度变化

Fig. 11 Variation of tensile strength with intermetallic compound layer thickness

缝铺展宽度的增加, 接头抗拉强度随之增大, 这说明焊缝铺展宽度的增加有利于接头抗拉强度的提高. 另外, 焊缝铺展宽度在 2.5 ~ 4.0 mm 范围内时, 随焊缝铺展宽度的增大接头抗拉强度增加明显, 当焊缝铺展宽度大于 4 mm 时, 虽然接头抗拉强度随之增大而增加, 但增加幅度逐渐减缓。

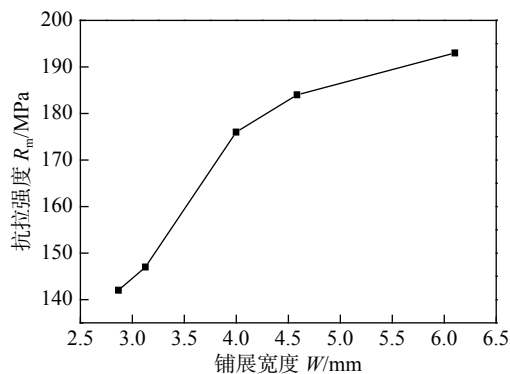


图 12 接头抗拉强度随焊缝铺展宽度变化

Fig. 12 Variation of tensile strength with weld spreading width

采用微束等离子焊的方法可以很好地实现铝合金/钢的对接, 但该方法下所得接头界面处金属间化合物层相对较厚. 普遍认为, 要获得良好的铝合金/钢接头, 界面金属间化合物层厚度不能超过 10 μm^[11], 试验采用微束等离子进行铝合金/钢异种金属焊接, 竖直界面区域金属间化合物平均厚度约为 45 μm, 但由于焊缝处形成良好的铺展, 正、背面铺展宽度皆在 2.5 mm 以上, 仍可获得强度较高的熔钎焊接头, 但这并不是说金属间化合物层厚度对接头强度影响不大. 分析发现, 金属间化合物层厚度和焊缝铺展宽度共同影响着接头强度, 在金属间化合物层厚度小于平均厚度 45 μm 时, 接头强度在很大程度上受到了焊缝铺展宽度的影响, 铺展宽度增大, 接

头强度升高,而一旦金属间化合物层厚度超过 $45\ \mu\text{m}$,焊缝铺展宽度对接头强度影响不大,金属间化合物层厚度对接头强度起决定作用,金属间化合物层厚度的增大使接头强度显著降低,说明金属间化合物层厚度太大对接头强度是不利的,需要将其控制在一个合适的范围内;另外在一定范围内,焊缝铺展宽度对接头强度的影响较大,当铺展宽度超过一定值后,继续增大铺展宽度,对接头强度影响不明显,综合分析可知,要想获得良好的铝合金/钢熔钎焊接头,需同时控制金属间化合物层厚度和焊缝铺展宽度^[12]。

3 结 论

(1) 采用微束等离子进行 6010 铝合金/钢对接熔钎焊试验,所得接头成形美观,焊缝正、背面铺展良好,接头无气孔、裂纹、夹渣等明显缺陷,焊接电流为 $38.5\ \text{A}$ 时,熔钎焊接头抗拉强度可达 $193\ \text{MPa}$,为良好的铝合金/钢熔钎焊接头。

(2) 试样断裂位置为接头竖直界面处及焊缝铺展处,竖直界面处的断裂为解理断裂,焊缝铺展处的断裂为韧窝断裂,综合分析接头断裂为韧脆混合型断裂。

(3) 接头强度的高低由金属间化合物层厚度和焊缝铺展宽度共同决定,要获得良好的铝合金/钢熔钎焊对接接头,需要同时控制金属间化合物层厚度和焊缝铺展宽度。

参考文献:

- [1] 叶 拓,王 冠,姚再起,等. 汽车用 6xxx 系铝合金薄壁件的韧性断裂行为 [J]. 中国有色金属学报, 2014(4): 878 – 887.
Ye Tuo, Wang Guan, Yao Zaiqi, *et al.* Ductile fracture behavior of 6xxx aluminum alloy thin-walled components of automobile[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014(4): 878 – 887.
- [2] Prangnell P, Haddadi F, Chen Y C. Ultrasonic spot welding of aluminium to steel for automotive applications & microstructure and optimisation[J]. Metal Science Journal, 2011, 27(3): 617 – 624.
- [3] El-Sayed M H, Naka M. Structure and properties of carbon steel aluminium dissimilar joints[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2005, 10(1): 27 – 31.
- [4] Ye Z, Huang J, Gao W, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 5052 aluminum alloy/mild steel butt joint achieved by MIG-TIG double-sided arc welding-brazing[J]. Materials & Design, 2017, 123: 69 – 79.
- [5] 赵旭东, 肖荣诗. 铝/钢光纤激光填充粉末熔钎焊接头界面组织与力学性能 [J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 41 – 44.
Zhao Xudong, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy and galvanized steel joints by fiber laser fusion welding-brazing using a rectangular spot with filler powder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 41 – 44.
- [6] Li C L, Fan D, Wang B. Characteristics of TIG arc-assisted laser welding-brazing joint of aluminum to galvanized steel with pre-set filler powder[J]. Rare Metals, 2015, 34(9): 650 – 656.
- [7] Zhang Y, Huang J, Cheng Z, *et al.* Study on MIG-TIG double-sided arc welding-brazing of aluminum and stainless steel[J]. Materials Letters, 2016, 172: 146 – 148.
- [8] Dharmendra C, Rao K P, Wilden J, *et al.* Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(3): 1497 – 1503.
- [9] 张应立. 特种焊接技术 [M]. 北京: 金盾出版社, 2012.
- [10] Auradi V, Kori S A. Influence of reaction temperature for the manufacturing of Al-3Ti and Al-3B master alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2008, 453(1): 147 – 156.
- [11] Lin S B, Song J L, Ma G C, *et al.* Dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to galvanized steel[J]. Frontiers of Materials Science in China, 2009, 3(1): 78 – 83.
- [12] Zarooni M, Eslamifarsani R. Effect of welding heat input on the intermetallic compound layer and mechanical properties in arc welding-brazing dissimilar joining of aluminum alloy to galvanized steel[J]. International Journal of Engineering, 2016, 29(5): 669 – 676.

第一作者简介:樊 丁,男,1961 年出生,教授,博士研究生导师。主要从事焊接物理、焊接方法与智能控制及激光加工等方面的研究。发表论文 200 余篇。Email: fand@lut.cn