

铝合金/碳钢激光-TIG 复合热源熔钎焊工艺 与接头显微结构分析

李 猛， 陈树海， 杨磊磊， 黄继华
(北京科技大学 材料科学与工程学院,北京 100083)

摘 要: 文中提出了一种激光-TIG 复合热源熔钎焊新方法,实现了铝合金与碳钢的对接熔钎焊,并研究了焊接工艺对接头特性的影响. 采用扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)和电子材料试验机对接头显微结构与力学性能进行研究. 结果表明,接头最大抗拉强度为 83.6 MPa,断裂发生在钢/焊缝界面,断裂形式为脆性断裂. 钢/焊缝界面不同位置处界面层厚度不同,在 3~12 μm 之间. 界面层由两部分组成,即靠近钢一侧为 η -Fe₂Al₃,靠近焊缝一侧为 τ_3 -Al_{7/2}Fe₂Si;远离界面层的焊缝区主要由 α -Al 基体和 Al-Si 共晶相组成.

关键词: 铝合金/碳钢; 激光-TIG 复合熔钎焊; 焊接工艺; 显微结构

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)12-0021-04

0 序 言

随着经济社会的发展,世界各国都倾向于实现产品的轻量化. 铝/钢复合结构既能减轻产品重量,又能满足产品的结构要求,因此受到越来越多的关注^[1]. 然而两者物理性能差别较大,特别是焊接过程中极易生成脆性的金属间化合物,从而导致接头力学性能下降^[2,3],传统的钎焊、摩擦焊、爆炸焊等虽然能抑制金属间化合物的生成,但受限于接头形式与尺寸^[4].

近年来,熔钎焊已成为铝/钢异种金属焊接的研究热点. 在熔钎焊过程中高熔点的钢侧为钎焊过程,低熔点的铝侧为熔化焊过程^[5]. 目前,实现铝/钢熔钎焊的热源类型主要由电弧、激光、激光-电弧 3 种,其中激光-电弧复合热源因为能够同时兼顾电弧与激光的双重优势而受到人们的关注^[6]. 但是当前的钢/铝异种金属激光-电弧复合热源熔钎焊仅限于激光-MIG 复合,激光-TIG 复合尚未见报道. 此外,由于不锈钢具有较高的线膨胀系数,就缓解焊接过程热应力的角度,人们普遍选择不锈钢作为钢/铝异种金属熔钎焊的母材,而碳钢尚不多见.

为此,文中提出一种铝合金/碳钢异种金属激光-TIG 复合热源熔钎焊新方法,对铝合金/碳钢的激光-TIG 复合热源熔钎焊进行试验,研究焊接工艺对

接头形貌和力学性能的影响,在此基础上,对接头界面层结构特点、组成物的种类进行深入分析.

1 试验方法

试验母材为 100 mm×50 mm×2 mm 的 5052 铝合金与 ST12 碳钢,主要化学成分如表 1 所示,钎料选用 4047Al-Si 药芯焊丝,焊丝成分如表 2 所示. 焊接设备为最大额定功率 4 kW 的 LANCE 系列轴快流 CO₂ 激光器和数字化 IGBT 逆变式交/直流脉冲焊机.

表 1 试验材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of experimental materials

材料	C	Si	Fe	Mo	Mn	Mg	Cr	Al
5052	—	0.10	—	—	≤0.10	2.46	0.22	余量
ST12	≤0.10	—	余量	—	≤0.50	—	—	—

表 2 4047 药芯焊丝成分(质量分数,%)

Table 2 Compositions of 4047 flux-cored wire

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
4047	12.0	0.80	0.30	0.15	0.10	0.20	0.15	余量

焊接前,工件对接端面开 V 形坡口,坡口角度为 45°;用砂纸研磨去除焊件表面与坡口端面的氧化膜、油污等,并用丙酮擦拭表面;焊接时,CO₂ 激光器离焦量设定为 +40 mm,焊接过程如图 1 所示. 焊后

收稿日期: 2014-12-24
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575040);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-15-004A3)

对接头线性切割,制作金相试样,使用金相显微镜分析接头宏观特性,并用 SEM,EDS 分析接头微观组织特性。

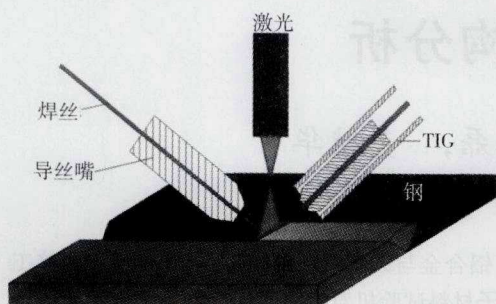


图1 激光-TIG 复合熔钎焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-TIG hybrid welding-brazing

2 试验结果与分析

2.1 焊接工艺对焊缝成形的影响

焊接电流、激光功率及焊接速度是焊接过程中对焊缝成形具有较大影响的工艺参数,这些参数直接影响焊缝区热输入的大小,而热输入的大小决定了熔化钎料在钢表面的润湿铺展和界面层的厚度,进而影响接头力学性能^[7]。

图2为保持激光功率1500 W,焊接速度0.5 m/min,焊接电流对焊缝成形的影响。当焊接电流较低时,因焊接热输入低,钎料在钢侧底部未润湿铺展,存在未钎合等缺陷,如图2a,b所示;随着电流增加,达到50 A时,钎料在钢表面润湿铺展良好,焊缝成形优良,如图2c所示;然而当焊接电流进一步提高,达到60 A时,因热输入较高,碳钢部分熔化,焊缝/钢界面出现了裂纹,如图2d所示。

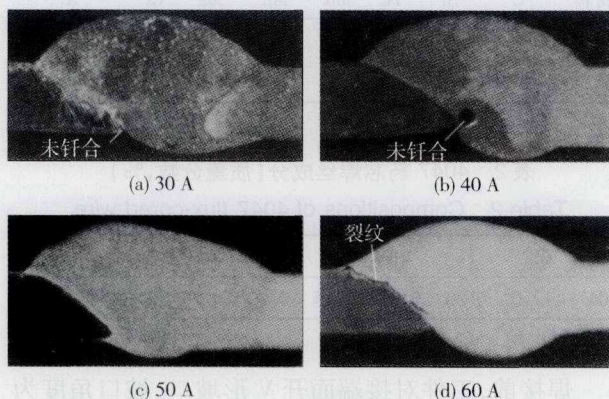


图2 不同焊接电流下的接头形貌

Fig. 2 Morphology of joint under different welding current

图3为保持焊接电流50 A,焊接速度0.5 m/min,激光功率对焊缝成形的影响。当激光功率为1500 W时,因热输入低,焊丝与铝母材未熔合,如图3a所示;当激光功率为2000~2500 W,液态钎料在钢底部铺展,但在顶部铺展效果略差,如图3b,c所示;当激光功率进一步升高,液态钎料在钢侧润湿铺展良好,如图3d所示。

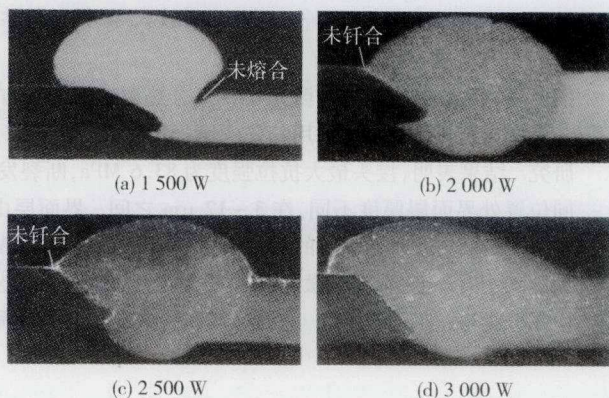


图3 不同激光功率下的接头形貌

Fig. 3 Morphology of joint under different laser power

图4为焊接电流80 A、激光功率2500 W时,焊接速度对焊接接头的影响。当焊接速度为0.7 m/min时,因焊接速度慢,焊缝区热输入大,沿钢界面开裂,如图4a所示;焊接速度为1 m/min时,焊缝成形和钎料润湿铺展良好,如图4b所示;焊接速度提高到1.2 m/min时,因热输入低,钎料在钢侧底部未完全润湿铺展,接头成形能力较差,如图4c所示。

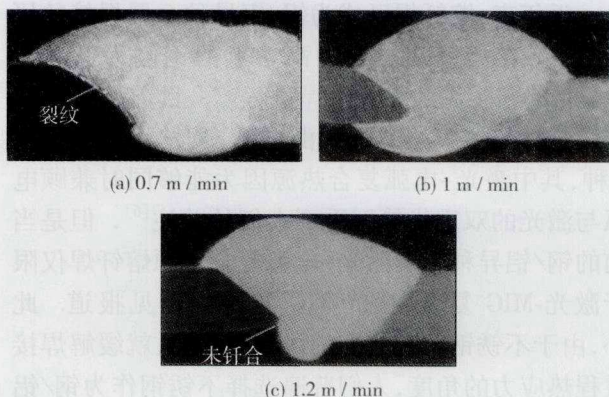


图4 不同焊接速度下的接头形貌

Fig. 4 Morphology of joint under different welding speed

2.2 焊接工艺对接头力学性能的影响

异种金属对接接头的抗拉强度是反映接头力学性能的重要参数,不同焊接参数下得到的抗拉强度如图5所示,从图中可以看到在激光功率为1500 W

时,随焊接电流的增加,抗拉强度降低,主要是因为电流增加,焊缝处热输入量增大,导致 IMCs 厚度增加;在 50 A 焊接电流下,抗拉强度随激光功率的增加而降低,这主要是因为该焊接电流下,能量密度已经很大,激光功率进一步增加,导致能量密度过大,铝合金大量熔化,大量 Fe 元素进入到熔池中,形成各类 IMCs,且 IMCs 厚度急剧增加,甚至产生裂纹,接头抗拉强度降低。图 5 中,当激光功率为 3 000 W,焊接电流为 30 A 时,抗拉强度为 83.6 MPa,达到铝母材强度的 40%。由此可见,在较高激光功率较低焊接电流条件下可以获得较高的接头抗拉强度。

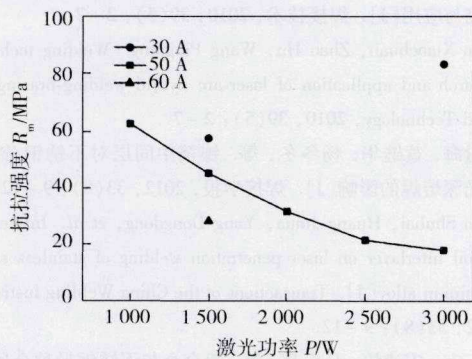


图 5 不同焊接参数下的抗拉强度

Fig. 5 Tensile strength under different welding parameters

图 6a 所示为最大抗拉强度下的宏观断口形貌,可以看出断裂发生在钢/焊缝界面层,表明该处是熔钎焊的薄弱部位,图 6b 为 a 局部放大图像,可以看到断口表面非常光滑,基本上观察不到韧窝,表明断裂形式主要为脆性断裂。

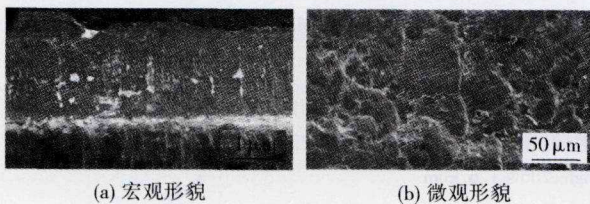


图 6 断口形貌

Fig. 6 Macromorphology of cross section

2.3 界面微观结构

铝合金/碳钢激光-TIG 复合熔钎焊对接接头宏观形貌如图 7a 所示。从图 7 中可以看到,液态钎料在钢表面润湿铺展良好,焊缝区域不存在孔洞等缺陷。

图 7b ~ 图 7d 为 a 中 I-III 区域的界面层 SEM 图像,从图 7 中可以看到,界面处从顶端到底部因加

热温度与时间的不同,IMCs 厚度也不一样。坡口顶端因加热时间长,部分铁进入熔池中,形成 IMCs,其厚度在 5 ~ 7 μm;坡口中部因加热时间短且温度低,IMCs 比较薄,厚度约为 3 μm;而坡口底部因电弧直接加热,温度较高且分布不均匀,IMCs 厚度在 4 ~ 12 μm 范围内变化。试验结果的界面金属间化合物虽然很薄,但是接头力学性能不高,可能与界面相成分以及残余应力较大有关,需进一步研究。

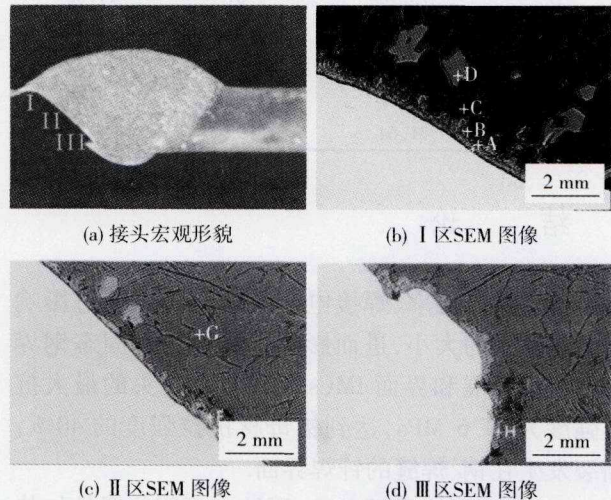


图 7 接头形貌

Fig. 7 Morphology of joints

对图 7b ~ 图 7d 焊缝/碳钢界面不同区域的组织成分进行能谱分析,结果列于表 3。从表中可以看到从钢母材到焊缝,铝含量升高,而铁含量降低,硅在不同区域含量不同,这说明硅参与了化合物的生成。根据 Al-Fe-Si 三元合金相图和 Al-Fe-Si 三元固相的特征^[8],图 7b ~ 图 7d 中靠近钢侧(A 点,E 点)的反应层主要成分为 η -Fe₂Al₃ 相,靠近焊缝(B 点,F 点,H 点)呈锯齿状或片状的界面层由 τ_5 -Al_{7.2}Fe₂Si 相组成,而据先前研究表明^[9],靠近焊缝区的 IMCs 主要是二元合金 FeAl₃,但因焊丝中含 12% Si 元素,且 Al-Fe-Si 三元相的形成自由能比 Al-Fe 二元相低,故在界面 τ_5 相具有更大的形成趋势。远离界面层的焊缝区,其中白色块状(D 点)也是由 τ_5 -Al_{7.2}Fe₂Si 相组成,焊缝中可以看到部分区域呈沟壑状(G 点),该区域主要成分为 Al-Si 共晶相。而沟壑状周围的灰色块状(C 点)主要成分为 α -Al 相。

分析原因,主要是在焊接过程中,固态钢与高温液态钎料相互作用时,固态钢发生溶解,Fe 原子进入到液态钎料的界面附近;同时,Al 和 Si 原子向钢母材扩散,形成 η 相,其厚度随时间的增加逐渐长大。在冷却过程中,Al,Fe,Si 元素将发生三元反应,

沿界面非均匀形核析出锯齿状的 τ_5 相,在远离界面处,只能进行均匀形核,析出游离态的 τ_5 相。

表 3 界面化合物 EDS 分析结果(原子分数,%)
Table 3 EDS results of interfacial compound

点	Al	Si	Fe
A	65.77	4.07	30.17
B	72.92	8.64	18.44
C	97.65	1.85	0.49
D	73.90	9.07	17.03
E	61.70	3.52	34.79
F	73.51	8.60	17.89
G	84.37	13.57	2.06
H	71.64	8.97	19.39

3 结 论

(1) 激光功率、焊接电流及送丝速度通过影响焊缝热输入的大小,进而影响熔化钎料在固态钢界面的润湿铺展和界面 IMCs 的厚度。接头的最大抗拉强度为 83.6 MPa,达到铝母材抗拉强度的 40%,断裂发生在钢/焊缝的钎焊界面。

(2) 钢/焊缝界面 IMCs 因坡口不同位置处加热温度不同,其厚度也不相同,坡口顶端可以达到 5 ~ 7 μm ,中间部位最薄为 3 μm ,底部分布不均匀,厚度在 4 ~ 12 μm 之间。

(3) 钢/焊缝界面层靠近焊缝一侧主要由 τ_5 - $\text{Al}_{7.2}\text{Fe}_2\text{Si}$ 组成,靠近钢一侧主要由 η - Fe_2Al_5 组成;远离界面层的焊缝中主要成分为 α -Al 和 Al-Si 共晶相。

参考文献:

[1] Mathteu A, Shabadi R, Deschamps A, *et al.* Dissimilar material joining using laser(aluminum to steel using zinc-based filler wire) [J]. *Optics&Laser Technology*, 2007, 39(3): 652 - 661.

[2] Song J L, Lin S B, Yang C L, *et al.* Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to stainless steel[J]. *Materials Science and En-*

gineering A, 2009, 509(1/2): 31 - 40.

[3] Peyre P, Sierra G, Deschaux-Beaume F, *et al.* Generation of aluminium - steel joints with laser-induced reactive wetting[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 444(1/2): 327 - 338.

[4] El-Sayed M H, Naka M. Structure and properties of carbon steel-aluminum dissimilar joints[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, 10(1): 27 - 31.

[5] 宋建岭, 林三宝, 杨春利, 等. 特种钎剂辅助铝/钢异种合金 TIG 熔钎焊[J]. *焊接学报*, 2010, 31(2): 45 - 48.

Song Jianling, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* TIG welding-brazing of special flux assisted aluminum-steel dissimilar alloys[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(2): 45 - 48.

[6] 袁小川, 赵 虎, 王平平. 激光-电弧复合熔钎焊焊接技术的研究与应用[J]. *焊接技术*, 2010, 39(5): 2 - 7.

Yuan Xiaochuan, Zhao Hu, Wang Pingping. Welding technology research and application of laser-arc hybrid welding-brazing[J]. *Weld Technology*, 2010, 39(5): 2 - 7.

[7] 陈树海, 黄继华, 杨冬冬, 等. 镍箔中间层对不锈钢/铝合金激光深熔焊的影响[J]. *焊接学报*, 2012, 33(8): 9 - 12.

Chen Shuhai, Huang Jihua, Yang Dongdong, *et al.* Influence of Ni-foil interlayer on laser penetration welding of stainless steel to aluminium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(8): 9 - 12.

[8] 林三宝, 宋建岭, 马广超, 等. 铝合金与不锈钢异种金属硅铝药芯焊丝 TIG 熔钎焊接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2009, 30(7): 9 - 12.

Lin Sanbao, Song Jianling, Ma Guangchao, *et al.* Microstructure and properties of dissimilar metals TIG welding-brazing joint of aluminum alloy to stainless steel using Al-Si flux-cored wire [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(7): 9 - 12.

[9] 国旭明, 汪建梅, 徐荣正. 纯铝与镀锌钢板 MIG 熔-钎焊工艺研究[J]. *航空材料学报*, 2013, 33(4): 32 - 36.

Guo Xuming, Wang Jianmei, Xu Rongzheng. MIG arc brazing of dissimilar metals between pure aluminum and zinc-coated steel [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2013, 33(4): 32 - 36.

作者简介: 李 猛,男,1990 年出生,硕士研究生. 主要研究方向为钢/铝异种金属激光熔钎焊工艺与固/液界面反应机理. Email: menglee206@126.com

通讯作者: 陈树海,男,副教授. Email: shchenhit@gmail.com