

TIG 熔钎焊工艺对铝/钢异种金属焊接接头组织的影响

王海林^{1,2} 黄华伟³ 王金凤¹ 张元好¹

(1. 湖北汽车工业学院汽车材料学院, 十堰 442002; 2. 湖北汽车工业学院先进轻合金材料十堰市重点实验室, 十堰 442002; 3. 湖北东峻储能科技有限公司, 十堰 442002)

摘要 采用直径为 1.2 mm 的 ER4043 焊丝, 通过不同 TIG 熔钎焊工艺, 实现了 5A02 铝合金和 Q235 钢异种接头有效连接。通过使用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS), 观察熔钎焊接头宏观形貌、界面特征。结果表明, 未涂覆金属粉末的接头试样在焊缝区出现晶间裂纹, 预置涂覆金属粉末试样焊缝成形性能优于未涂覆金属粉末的试样; 铝合金侧热影响区受热后晶粒有粗大倾向, 焊缝区组织为 α -Al 等轴晶和 Al-Si 共晶组织, Al-Si 共晶均匀分布在 α -Al 晶界上; 界面区附近 Al 和 Fe 原子沿着界面层相互扩散, 形成多种 Fe-Al 金属间化合物, 靠近钢侧主要为 FeAl 化合物, 靠近铝侧以 FeAl₃ 化合物为主。

关键词 铝/钢异种金属; 熔钎焊; 金属间化合物; 显微组织

中图分类号 TB331; TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.Y20250011

Effects of TIG Welding-brazing Process on Microstructure of Aluminum and Steel Dissimilar Welded Joints

WANG Hailin^{1,2}, HUANG Huawei³, WANG Jinfeng¹, ZHANG Yuanhao¹

(1. School of Automotive Materials, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002; 2. Shiyan Key Laboratory of Advanced Light Alloy Materials, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002; 3. Hubei Dongjun Energy Storage Technology Co., Ltd., Shiyan 442002)

Abstract: ER4043 welding wire with a diameter of 1.2 mm was selected to achieve effective connection of dissimilar joints between 5A02 aluminum alloy and Q235 steel through different TIG melt-brazing processes. The macro morphology and interfacial characteristics of brazed joint were observed by metallographic microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The results indicate that intergranular cracks are observed in the fusion zone of joint specimens without metal powder coating, and the weld formation of specimens pre-coated with metal powder is superior to that of ones without metal powder coating. The heated grains in the heat-affected zone on the aluminum alloy side tend to coarsen. The weld zone is composed of α -Al equiaxed grains and Al-Si eutectics structure, and the latter one is uniformly distributed on α -Al grain boundaries. Al and Fe atoms near the interface region are diffused along the interface layer, leading to various Fe-Al intermetallic compounds, where FeAl compounds are generated near the steel side, and FeAl₃ compounds are generated near the aluminum side.

Key Words: Aluminum/steel Dissimilar Metals, Welding-brazing, Intermetallic Compounds, Microstructure

铝合金以其加工性能好、耐腐蚀、密度低及延展性好等特点, 在制造业中被广泛应用^[1-3], 尤其是在汽车轻量化方向。铝合金常和钢连接, 形成铝/钢复合结构, 降低工件的质量, 减少能源和材料消耗, 对于推动节能减排, 实现碳达峰和碳中和目标具有重要的意义。随着“铝+钢”金属结构产品在造船、航天和武器装备及汽车等领域的需求日益增加, 实现两者的可靠连接技

术备受关注^[4-5]。铝、钢在理化性能方面差异较大, 焊接时极易生成大量硬而脆的 Al-Fe 金属间化合物(IMCs)^[6-8], 如 FeAl, FeAl₃, Fe₂Al₅ 等, 使焊接接头的力学性能恶化, 这增加了铝/钢异种金属焊接的难度。

目前, 国内外研究者对铝/钢焊接的研究主要集中在熔化焊接^[9-10]、固相焊接^[11-13]和熔钎焊^[14-15]等方面, 其中电弧熔钎焊由于焊接温度在高熔点母材和低熔点母

收稿日期: 2025-05-12; 修订日期: 2025-06-13

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划指导性资助项目(B2022370); 先进轻合金材料十堰市重点实验室开放基金(SYZDK42026A03)

第一作者: 王海林, 男, 1988 年出生, 实验师, E-mail: 1353906413@qq.com

通信作者: 王金凤, 女, 1978 年出生, 教授, E-mail: 79101120@qq.com

引用格式: 王海林, 黄华伟, 王金凤, 等. TIG 熔钎焊工艺对铝/钢异种金属焊接接头组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(6): 866-870.

WANG H L, HUANG H W, WANG J F, et al. Effects of TIG welding-brazing process on microstructure of aluminum and steel dissimilar welded joints[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 866-870.

材熔点区间内,使低熔点母材、低熔点母材与异种母材间的夹层金属同时熔化,并在高熔点母材表面润湿铺展,形成兼具钎焊和熔焊特征的接头,能够有效控制金属间化合物层(IMC)的生长^[16-17],因而备受关注。

TIG(钨极氩弧焊)电弧熔钎焊方法操作简单、焊接效率高、成本低、接头形式灵活,且具有较低的焊接热输入,可控制电弧中心加热部位来避免高熔点母材钎焊界面的过度反应,适合铝/钢结构的焊接。基于此,本研究以ER4043焊丝作为填充材料,对5A02铝合金和Q235低碳钢板进行手工填丝交流TIG熔钎焊进行初步试验,研究不同工艺下熔钎焊接头的形貌、界面特征与成分分

布,以期为铝/钢电弧熔钎焊工艺的研究提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用Q235钢板,尺寸为140 mm×20 mm×1 mm,5A02铝合金尺寸为60 mm×45 mm×2.5 mm,焊丝为ER4043(Al-5Si),直径为 ϕ 1.2 mm,3种材料的化学成分见表1。Al-5Si焊丝中Si元素会在界面层聚集,参与界面层的反应,减缓Al与Fe的反应生成Al-Fe金属间化合物,同时Si在一定程度上能降低焊丝熔点,增强液态焊丝在钢材表面的润湿铺展,提高焊接接头界面综合性能。

表1 焊接母材与焊丝的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of base metals and welding wire

牌号	w_B										
	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al	C	S
5A02	≤0.1	1.8~2.6	0.2~0.6	≤0.4	≤0.4	≤0.2	≤0.05	≤0.1	余量	—	—
Q235	—	—	0.3~0.5	余量	≤0.3	—	—	—	—	0.14~0.2	≤0.03
ER4043	≤0.3	≤0.05	≤0.05	≤0.8	4.5~6.0	≤0.1	—	≤0.2	余量	—	—

采用WSM-315逆变式交直流方波脉冲氩弧焊机,焊接过程采用交流氩弧焊。自动焊接时采用AW-DB1焊接自动小车。采用光学显微镜(BM-4XD)与扫描电镜(JSM-6510LV)对接头结合情况、微观形貌进行观察,用扫描电镜附带的能谱仪(EDS)对结合区进行线、点扫描,分析界面元素分布特征。

1.2 试验过程

对铝/钢熔钎焊,在焊接面添加合金粉末,利用钎料控制元素变化调控界面组织性能,据相关文献报道^[18,19],Mn能够固溶于Al-Fe化合物中,改善化合物性能,以提高焊缝强度,同时降低热裂纹萌生倾向,改善焊接性能,抑制晶粒粗化。Zn能够降低液态钎料与钢之间的界面张力,提高钎料在钢表面的润湿铺展,在钎接区形成对应元素的二元化合物,调控界面组织。Cr能够起到降低铝在钢中的扩散系数、抑制IMC的生长、有效控制IMC层厚度、细化晶粒的作用^[18-19]。因此试验中设计单独添加ER4043 Al-Si焊丝和同时添加自配MnZnCr混合粉末和ER4043焊丝两种方案。自配金属粉末按 $w(Mn):w(Zn):w(Cr)=4:4:2$ 称取后均匀混合,添加适量水玻璃,搅拌均匀,将配好的混合金属粉末均匀涂覆在碳钢侧。

焊接前预使用机械清理与化学清理的方式去除铝合金和碳钢表面的氧化膜及污渍,用钢丝刷刷去铝合金板上的氧化膜,再用丙酮将钢板、铝合金板清理干净。焊接时采用钢板位于铝板下方的搭接方式,搭接长度为10 mm。焊接过程中,焊接电流为85~95 A,氩气流量为8 L/min,焊枪喷嘴离工件的距离约为5 mm,

焊接速度为100~150 mm/min,钨棒直径为1.6 mm,钨棒伸出喷嘴长度约为3 mm。图1为焊接示意图,焊丝与焊接方向夹角保持在45°~60°,焊丝送入方向与焊接方向相反,在加填充丝时,不可一直填送焊丝,避免焊缝成形不良,余高过大;钨棒偏钢侧2 mm,提前在钢板上引弧,可以提前预热钢板,同时钨棒偏钢侧对铝合金的热输入相对较少,避免铝合金的过度熔化。焊后在垂直焊缝的方向上截取金相试样,用砂纸由粗到细进行打磨,用抛光剂进行抛光处理,钢侧用体积分数为4%的硝酸酒精溶液腐蚀10 s,铝侧采用Keller试剂(HF、HCl、HNO₃、H₂O体积比为1:1.5:2.5:95)腐蚀20 s,自来水冲洗后用滤纸吸干,最后用吹风机吹干。在钢侧试样腐蚀时,为了能同时将焊缝组织与碳钢母材组织腐蚀,在腐蚀时先用硝酸酒精腐蚀试样,再用氢氟酸溶液腐蚀焊缝组织。

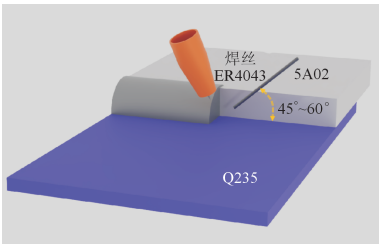


图1 焊接示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding

2 试验结果与分析

2.1 外观形貌

图2为铝/钢TIG熔钎焊接头焊缝整体形貌。可以

看出,焊接试样接头成形良好,焊缝光泽度好、表面光滑、连续均匀无明显缺陷。添加金属粉末试验中的碳钢板侧发黄、发暗,这是由于保护气不足,同时在加入了金属粉末后金属粉末高温下发生变化。



图2 铝/钢焊缝成形图

Fig.2 Formation image of aluminum/steel welding joint

图3为铝/钢 TIG 焊接头截面宏观形貌。可以看出,接头具有明显的熔焊与钎焊双重特征,由于铝合金和钢的熔点存在较大差异,铝母材明显熔化,与焊缝金属为熔焊结合,钢母材没有熔化,与焊缝金属为钎焊结合。上层铝母材与填充材料(焊丝与金属粉末)在电弧加热下发生熔化后在钢母材表面润湿铺展良好,无未钎透区域。铝/钢熔钎焊接头整体可分为焊缝区和界面区。

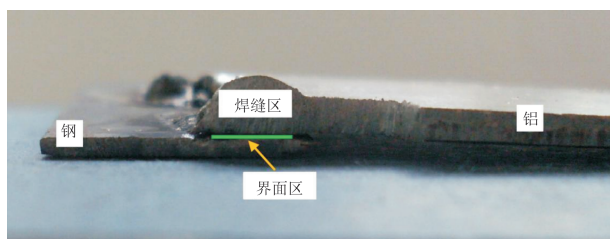


图3 铝/钢焊缝截面形貌

Fig.3 Cross sectional morphologies of aluminum/steel welding joint

2.2 微观组织及界面特征

图4是焊接电流为85 A,焊接速度为100 mm/min时添加金属粉末前后焊接试样钢侧接头的显微组织(钎焊区)。可以看出,钢侧钎焊界面均连接良好,界面因异种材料连接,熔合线明显,呈白亮色带状,有微小起伏。在焊缝区出现细小针状组织,钢母材热影响区中生成魏氏体组织。添加金属粉末后,铝/钢 TIG 熔钎焊接头 IMC 层更薄,与钢侧界面连接致密,这可能是由于添加金属粉末熔融后在铝/钢界面铺展效果更佳,抑制 Al-Fe 金属间化合物的形核生长,细化晶粒并形成细小的金属间化合物,从而提高铝/钢接头的性能。

图5和表2为未添加金属粉末未焊接试样钢侧界面的点扫描位置及结果。可以看出,界面熔合区内成分主要是 Al、Fe、Si 元素,形成 Fe-Al、Al-Fe-Si 系金属间化合物。此外,焊缝侧中有很多微裂纹,并沿熔合区

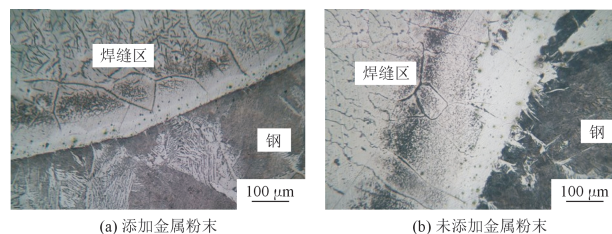


图4 不同焊接工艺钢侧界面组织

Fig.4 Interfacial microstructure of specimen on steel side with different welding processes

晶界断裂,严重影响了焊缝的质量,降低接头的力学性能,而添加金属粉末的几组试样中均未发现这种晶间裂纹,侧面说明添加金属粉末进行铝钢熔钎焊可改善焊接接头的力学性能。

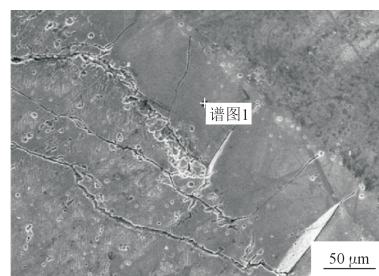


图5 未添加金属粉末焊接试样钢侧界面点扫描位置

Fig.5 Interface point scanning of welded specimen on steel side before metal powder addition

表2 未添加金属粉末焊接试样钢侧界面点扫描结果

位置	x_B			%
	Al	Fe	Si	
谱图1	35.13	58.37	6.50	

图6为不同焊接参数下焊接接头碳钢与焊缝熔合区的显微组织。可以明显观察到熔合区呈亮色的带状,钢侧有部分组织熔化,但总体呈平直的曲线,说明铝钢焊接中在碳钢侧属于钎焊。从图6a和图6b可以看出,焊接速度一致、焊接电流变化时,焊接试样组织基本相同,在焊缝侧均形成了含有较多针状组织的脆性化合物的较大晶胞,碳钢母材热影响区部分形成了魏氏体组织。结合图6c可以看出,焊接速度变大时,树枝晶生长方向与散热最快方向一致,形成了具有明显方向性的树枝晶,在熔合区仍能清楚看到一条光亮带。

对添加金属粉末的焊接接头焊缝界面区进行线扫描,结果见图7。可以看出,Al与Fe发生相互扩散,沿着扫描路径(钢侧-界面区-铝侧),(质量分数,下同)Fe含量逐渐降低,而Al元素分布正好相反,其他元素含量相对稳定。界面区点扫描位置和分析结果见表3。可以看出,Al、Fe元素在界面处有明显的渐变过程,说明Al、Fe在界面处发生了明显的扩散, A_2 、 A_3 处元素含量相差不

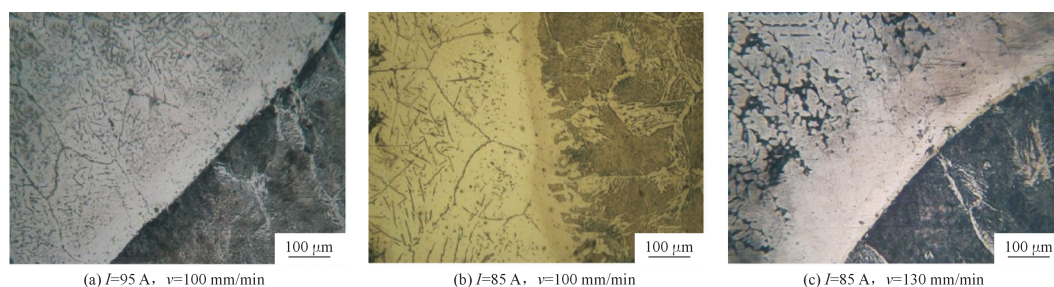


图6 不同焊接参数钢侧界面组织

Fig.6 Microstructure of specimen on steel side with different welding parameters

大,均含有Mn,而在 A_1 与 A_4 处未检出Mn元素,说明添加的金属粉末中的Mn较好地熔到焊缝组织中,且主要聚集于焊缝的熔合区。同时,在焊缝中只检测到了Mn元素,未检出Zn、Cr,分析可能是由于Zn的挥发温度很低($906\text{ }^{\circ}\text{C}$),在电弧热的作用下挥发损耗较大,导致留存于焊缝中的量较少。Cr熔点较高($1\ 867\text{ }^{\circ}\text{C}$),未熔于焊缝组织。Si在点 A_1 处摩尔分数较高,在界面过渡层有微小变化。

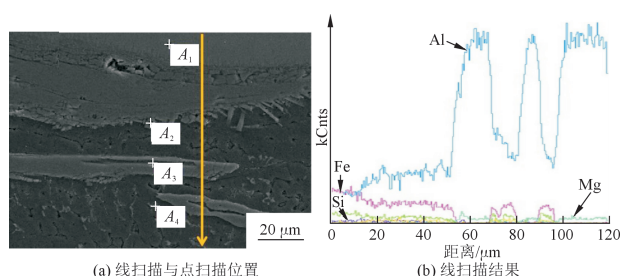


图7 接头界面元素扫描位置及能谱结果

Fig.7 Scanning positions and EDS results of joint interface

表3 图7中点扫描结果EDS分析

Tab.3 EDS point scanning results in Fig.7

位置	x_B							
	Al	Fe	Si	Mg	Mn	O	C	Ag
A_1	44.79	45.28	3.5	—	—	—	6.43	—
A_2	59.08	18.19	0.59	—	0.18	17.78	4.19	—
A_3	59.23	17.87	0.29	—	0.29	19.85	1.65	—
A_4	92.73	0.94	0.76	1.23	—	3.46	0.71	0.18

由Fe-Al二元相图和相关热力学知识可知,在电弧熔钎焊的过程中铝钢界面可能生成的化合物为 Fe_3Al 、 FeAl 、 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 。各种化合物能否生成,取决于其反应条件下吉布斯自由能 ΔG 值变化。当 $\Delta G < 0$ 时,该物质才可能自发生成,在电弧熔钎焊时,由于熔池温度等条件的限制, Fe_3Al 的 $\Delta G > 0$,故不会自发生成 Fe_3Al 相,而 FeAl_2 是一种亚稳态相,生成后会立即与Al反应,从而转变为 Fe_2Al_5 ,该相也不可能存在,因此界面可能存在的相为 FeAl 、 Fe_2Al_5 、 FeAl_3 〔5〕。

根据分析界面点扫描结果中Al、Fe元素的摩尔分数,推测 A_1 区域主要由 FeAl 相组成, A_2 、 A_3 区域主要组成相为 FeAl_3 、 Al-Fe-Si ; A_4 区域主要元素为Al,含有少量的Fe、Si、Mg,推测是Al与 $\alpha\text{-Fe}$ 形成的固溶体。界面

靠近钢侧主要为 FeAl 化合物,一方面是靠近钢侧Fe浓度较高,另一方面由于TIG熔钎焊焊接时,热输入量相对较低,熔化的液态金属冷却速度快,Fe和Al原子相互扩散时,Al易与Mn、Mg、Zn、Si等元素结合,没有足够的Al与Fe形成含Al元素较多的化合物;越靠近Al侧,Al浓度越高,Al含量低的化合物与Al结合生成Al含量更高的化合物,即 FeAl 与Al反应生成 FeAl_3 化合物。

图8为铝合金侧焊缝与母材侧熔合线附近微观组织,图8a中左上侧为焊缝填充金属组织,右下侧为铝母材,在TIG电弧热的作用下接头附近铝母材发生熔化与液态填充金属一起形成熔焊焊缝。对比可知,铝侧焊接熔合区域明显,在焊接电弧热的作用下,液态铝合金以未熔化的铝母材热影响区表面为核心重新形核,并沿着垂直于界面的方向快速生长,形成柱状晶组织。热影响区主要是等轴晶组织,铝母材组织未发生变化,但是受到热作用晶粒粗化。在焊缝区,填充金属中Al和Si原子受热循环作用,与熔化的铝母材形成 $\alpha\text{-Al}$ 和Al-Si共晶组织,Al-Si共晶组织均匀地分布在 $\alpha\text{-Al}$ 等轴晶上。

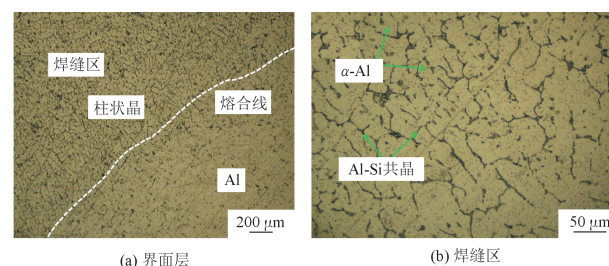
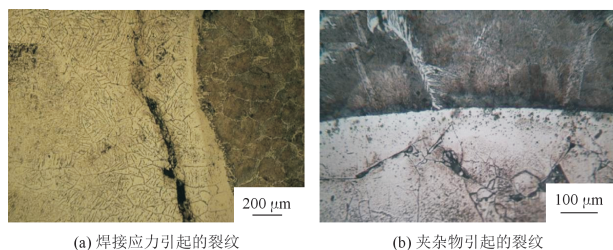


图8 铝侧熔合区微观组织

Fig.8 Microstructure of fused zone on the aluminum side

2.3 焊接裂纹缺陷

图9为焊接接头中产生的裂纹。由图9a可知,在平行于两母材界面处产生了较大的裂纹,分析原因一方面可能是铝合金与钢的线膨胀系数相差过大导致冷却后产生较大应力,裂纹容易在接头薄弱区域即界面处 FeAl 脆性金属化合物层内萌生及扩展,另一方面是焊缝区Zn的挥发会形成孔洞缺陷并产生微裂纹扩展,从而形成较深的裂纹。图9b中的裂纹可能是由于焊前清理不充分或者是保护气不足,导致母材表面的金属



(a) 焊接应力引起的裂纹 (b) 夹杂物引起的裂纹

图9 不同条件引起的焊接缺陷

Fig.9 Welding defects from different conditions

氧化物杂质混入焊缝中,形成裂纹源。

焊缝中的氧化夹杂在扫描电镜下的形貌见图10,各区域的点扫描结果见表4。 B_3 、 B_4 、 B_5 形貌外观基本相同,在黑色部分外延有亮色的金属光泽,元素含量相差不大,且具有较高的O含量,而 B_1 和 B_2 处并未检测出O元素,推断夹杂物主要是由于焊前清理不到位或者保护气不足所形成的含Fe、Al的氧化物。

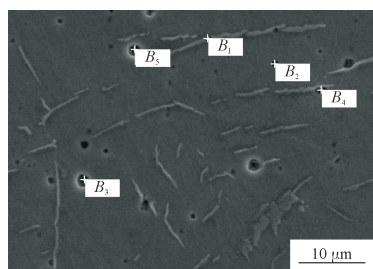


图10 焊缝区点扫描位置

Fig.10 Point scanning positions at welding zone

表4 图10中焊缝区点扫描结果

Tab.4 Point scanning results of welding zone in Fig.10 %

位置	x_B					
	Al	Fe	Si	C	Mn	O
B_1	21.87	70.29	1.75	6.09	—	—
B_2	21.56	71.99	1.64	4.80	—	—
B_3	16.36	70.30	0.34	1.20	0.34	11.16
B_4	25.14	57.97	0.71	1.42	—	14.74
B_5	24.92	57.46	0.97	1.59	—	15.04

3 结 论

(1)采用TIG焊铝钢,焊接电流为85~95 A,氩气流量为8 L/min,焊枪喷嘴离工件的距离约为5 mm,焊接速度为100~130 mm/min,钨棒直径为 $\phi 1.6$ mm,钨棒伸出喷嘴长度约为3 mm,可以实现铝合金与碳钢的有效连接,焊接过程稳定,获得较好的宏观形貌,填充金属与铝合金发生熔化焊,与钢发生钎焊,形成典型的熔钎焊接头。根据接头组织形态特征,可由焊缝区、热影响区、界面区组成。

(2)在相同的焊接参数下,在铝合金上预置涂覆一层自配金属粉末后能够实现铝/钢熔钎焊接头的连接,接头连续、美观、无缺陷;未涂覆金属粉末的接头试样

形成的焊缝区内出现晶间裂纹,焊缝质量不如预置涂覆金属粉末的焊缝。

(3)铝合金侧热影响区受热后晶粒变粗大,焊缝区组织主要为Al-Si共晶和 α -Al等轴晶,反应生成Al-Si共晶组织,均匀地分布在 α -Al等轴晶上;界面区形成了Fe-Al金属间化合物,靠近钢侧主要生成FeAl化合物,靠近铝侧以FeAl₃化合物为主。

参 考 文 献

- [1] 尹孝辉,朱正英,陈凯,等.22MnB5/6061异种金属CMT+A+P熔钎焊界面特征及性能研究[J].过程工程学报,2023,23(7):1 073-1 080.
- [2] 李亚江.轻金属焊接技术[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 贾剑平,詹志平.铝钢熔钎焊工艺及腐蚀性能研究进展[J].热加工工艺,2020,49(11):1-5.
- [4] 丛伟,韩世伟,罗展,等.焊接电流对铝合金和不锈钢电弧熔钎焊接头性能的影响[J].热加工工艺,2022,51(23):19-23.
- [5] 余腾义,李伟,喻高扬,等.CMT熔钎焊工艺对铝/钢异种金属焊接接头组织及性能的影响[J].钢铁钎焊,2023,44(5):188-194.
- [6] 冯菲玥,陈云霞.铝/钢异种金属焊接技术的研究现状[J].焊接技术,2021,50(1):1-8.
- [7] POURANVARI M, ABBASI M. Dissimilar gas tungsten arc weld brazing of Al/steel using Al-Si filler metal: Microstructure and strengthening mechanisms [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2018, 749: 121-127.
- [8] 张佳琪,刘云祺,何绍雄,等.超声振动钢/铝对接接头激光-MIG复合熔钎焊工艺研究[J].中国激光,2022,49(16):106-114.
- [9] 闫飞,周一凡,唐本刊,等.铝钢异种材料激光搭接焊接头组织与性能研究[J].应用激光,2023,43(2):65-69.
- [10] 殷志敏,楼平,章旭泳,等.铝/钢异种金属准连续激光焊接工艺研究[J].应用激光,2023,43(8):78-84.
- [11] 张昌青,史煜,王烨,等.Ag对热电偶合作用下铝/钢摩擦焊接头界面组织演变的影响[J].精密成形工程,2022,14(11):163-169.
- [12] 张昌青,史煜,王烨,等.冷喷涂沉积Si中间层对铝钢连续驱动摩擦焊接头组织与性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2024,53(9):2 524-2 534.
- [13] 王元一,乔柯,张婷,等.Cu和Ni中间层对铝/钢异种金属搅拌摩擦搭接焊接头界面微观组织及剪切性能的影响[J].塑性工程学报,2024,31(3):214-221.
- [14] 周勇,孙有平,何江美,等.激光功率对铝/钢激光对接熔钎焊接头组织与性能的影响[J].机械工程材料,2023,47(7):22-30.
- [15] 王秋影,邱培琨,孙进发,等.超声振动辅助铝/钢激光-MIG熔钎焊外观成形、组织以及拉伸性能研究[J].精密成形工程,2023,15(5):123-130.
- [16] 谭攀,韩世伟,蒋晓,等.焊接电流对铝/钢电弧熔钎焊接头组织及性能的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(12):107-112.
- [17] 杨宗辉,沈以赴,李晓泉,等.钨和钢TIG熔钎焊接头的微观组织及力学性能[J].中国有色金属学报,2019,29(3):579-585.
- [18] WEN Z L, YU G Y, LIS Q, et al. Influence of Ni/Zn double coating on the steel on penetration welding-brazing by CMT arc-laser hybrid heat source[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106 602.
- [19] 吴玮,殷相杰,蒋启明,等.中合金粉末对铝/钢熔钎焊接头组织性能影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(3):147-154.

(编辑:彭瑾)