

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.12

不同焊丝下TC4钛/5A06铝脉冲MIG熔钎焊接头组织性能

常 鸿, 魏守征*, 程 璇, 李志勇, 张英乔

中北大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030051

摘要: 采用纯铝、Al-Si5、Al-Mg5 三种焊丝对 TC4 钛和 5A06 铝进行脉冲 MIG 熔钎焊, 研究焊丝成分对接头 Ti/Al 界面特性及力学性能的影响。结果表明: 采用纯铝焊丝时, 钛与铝基焊缝通过形成芽状界面反应层单层结构实现冶金结合, 接头上部反应层宽约 3 μm , 接头根部反应层宽约 0.5 μm 。采用 Al-Si5 焊丝时, 接头上部钛与焊缝之间形成均匀层+芽状反应层双层结构实现结合, 宽约 5 μm ; 接头根部形成芽状反应层单层结构, 宽约 1 μm 。采用 Al-Mg5 焊丝时, 接头上部钛与焊缝之间形成宽约 5 μm 的均匀层+芽状反应层双层结构, 接头根部仅形成宽约 0.5 μm 的芽状反应层单层结构。拉伸测试中, 采用纯铝焊丝制备的接头抗拉强度为 92~94 MPa, 接头断裂于铝基焊缝, 呈韧性断裂方式; 采用 Al-Mg、Al-Si 焊丝时, 所获接头抗拉强度分别为 196 MPa、230 MPa, 接头均断裂于 Ti/Al 界面附近, 呈脆性+韧性混合断裂方式。实施钛与铝熔钎焊时, 应选择熔敷金属强度较高、韧性较好的 Al-Mg/Al-Si 系合金焊丝作为填充金属。

关键词: 焊丝成分; 钛合金; 铝合金; 熔钎焊; 界面特性; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0088-08

Microstructure and Mechanical Properties of Pulsed MIG Welded-Brazed Ti-TC4 /Al-5A06 Joints Using Different Fillers

CHANG Hong, WEI Shouzheng*, CHENG Xuan, LI Zhiyong, ZHANG Yingqiao

School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract: Pure aluminum, Al-Si5 and Al-Mg5 wires were used for pulse MIG brazing of TC4 titanium and 5A06 aluminum. The effect of wire composition on the Ti/Al interfacial characterizations and joint mechanical properties was investigated. When pure aluminum wire was used, titanium and aluminum-based weld were metallurgical bonded by the formation of a bud-shaped interfacial reaction layer, the width of the layer is about 3 μm at the joint upper part and 0.5 μm at the root part. When Al-Si5 wire was used, a double-layer structure with a width of 5 μm containing a homogeneous layer and a bud-shaped layer was formed between titanium and weld at the upper part of the joint. However, only a bud-like reaction layer with the width of 1 μm was formed at the root part. When Al-Mg5 wire was used, similarly, a double-layer structure with a width of 5 μm containing a homogeneous layer and a bud-shaped layer was formed at the upper part of the joint. a bud-like reaction layer with the width of 0.5 μm was formed at the root part. The tensile strength of the joint fabricated using pure aluminum wire was 92~94 MPa, the joint was fractured in the aluminum-based weld and taking the plastic fracture mechanism. However, When Al-Mg and Al-Si wires were used, the tensile strength of the joints was 196 MPa and 230 MPa, respectively. The joints were fractured near the Ti/Al interface and taking the brittle + plastic mixed fracture mode. When implementing titanium and aluminum melting brazing, the filler metal with higher strength and better toughness of the Al-Mg/Al-Si alloy welding wire should be selected as the filling metal.

收稿日期: 2024-02-21 修回日期: 2025-01-03

基金项目: 山西省自然科学基金(202303021211159); 山西省自然科学基金(202203021222036)

作者简介: 常 鸿(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事异种金属的特种焊接研究。

通讯作者: 魏守征(1984—), 副教授, 主要从事异种金属特种焊接、有色金属增材制造技术研究。E-mail: wszweishouzheng@126.com。

Keywords: filler wire composition; titanium alloy; aluminum alloy; welding-brazing; interfacial feature; mechanical properties

引用格式:常鸿,魏守征,程璇,等. 不同焊丝下 TC4 钛/5A06 铝脉冲 MIG 熔钎焊接头组织性能[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 88–95.

Citation:CHANG Hong, WEI Shouzheng, CHENG Xuan, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Pulsed MIG Welded–Brazed Ti–TC4 / Al–5A06 Joints Using Different Fillers[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 88–95.

0 引言

钛/铝复合结构凭借其轻量化和高比强度的优势,在汽车^[1]、航空航天^[2]等工业中应用前景非常广泛^[3]。然而钛和铝的物理化学性质差异较大,焊接时高温下易反应生成 Ti–Al 脆性金属间化合物(IMCs)^[4],会使得焊接接头性能急剧下降,进而影响钛/铝焊接构件的性能。

近年来,钛与铝的熔钎焊受到越来越多的关注。熔钎焊是利用钛熔点(1 668 °C)和铝熔点(660 °C)相差较大的特点,使铝侧母材熔化与焊缝形成熔焊结合,钛侧未熔化与焊缝形成钎焊结合,从而避免了钛和铝的直接熔化混合,减少 Ti–Al 脆性金属间化合物生成^[5]。焊丝成分是影响熔钎焊接头性能的关键因素。国内外研究人员采用不同成分的焊丝,针对钛与铝开展了激光熔钎焊^[6]、TIG 熔钎焊^[7]、MIG 熔钎焊^[8]等研究。采用 Al–Si12 焊丝分别对 TC4 钛和 5A06 铝进行激光填丝熔钎焊^[9]和 CO₂ 激光熔钎焊^[10],分别获得了平均抗拉强度约为 298 MPa 和 278 MPa 的钛/铝熔钎焊接头。文献[11]通过在纯铝焊丝中引入 La、Zr、B 和 Si 元素对 TC4 钛和 5A06 铝进行 TIG 电弧熔钎焊,研究发现,引入不同的元素获得的钛/铝熔钎焊接头抗拉强度不同,B 元素和 Si 元素作用下的接头抗拉强度得到了大幅度提升,约为 280 MPa。文献[12]以 Al–Mg3 焊丝对 TC4 钛和 5052 铝进行 TIG 熔钎焊,获得了同时具有熔焊和钎焊双重特征的接头,最高抗拉强度达到 185 MPa。文献[13]以 Al–Si5 焊丝对 6061 铝合金和 TA2 纯钛进行 CMT 熔钎焊,所获熔钎焊接头最高抗拉强度达到了 197.5 MPa。文献[14]采用 Al–Si5 焊丝对 TA2 纯钛和 6061–T6 铝合金进行 CMT 搭接试验,实现了纯钛和焊缝金属之间钎焊连接,接头最高抗拉强度为 322.7 MPa。文献[15]采用 Al–Mg5 焊丝进行 Ti6Al4V/5A05Al 异种金属 MIG 熔钎焊,配合合适的焊接工艺,实现了良好的钎焊结合,接

头最高抗拉强度为 243 MPa。文献[16]采用 Al–Mg5 焊丝对 TA2 钛和 5A06 铝合金进行了双面冷弧 MIG 组合焊接,接头最高抗拉强度可达 355 MPa。

综上,采用不同的焊丝进行钛与铝熔钎焊时,所获接头的力学性能存在明显差异,即焊丝成分对熔钎焊接头的力学性能存在重要影响。研究焊丝成分对 Ti/Al 界面特性和力学性能的影响规律,对实现钛与铝复合结构的可靠焊接具有重要意义。然而迄今为止,未检索到关于焊丝成分对钛/铝熔钎焊接头界面特性及力学性能影响规律的研究或报道。

文中采用纯铝、Al–Si5、Al–Mg5 三种不同成分的焊丝对 TC4 钛和 5A06 铝进行脉冲 MIG 熔钎焊,通过分析 Ti/Al 界面附近显微组织特征,研究焊丝成分对 Ti/Al 界面特性的影响;通过对比分析接头的抗拉强度,研究焊丝成分对接头力学性能的影响。此外,对不同焊丝成分下所获熔钎焊接头的拉伸断裂机理进行分析。研究内容及结果可为实现钛与铝异种金属可靠熔钎焊,推动钛/铝复合焊接构件在航空航天等工业中的应用提供数据支持和理论基础。

1 试验材料及方法

试验母材为 150 mm×100 mm×2.5 mm 的 TC4 钛合金和 5A06 铝合金,焊接材料分别为 $\varnothing$ 1.2 mm 的纯铝、Al–Si5、Al–Mg5 焊丝。试验母材及焊丝的名义化学成分见表 1。试验前,需要对试验母材进行焊前清理,以去除试板表面的油污和氧化膜。TC4 钛合金的清理方式为:先使用钢丝刷对试板表面进行打磨,随后使用 5 vol.% HF、40 vol.% HNO₃ 和水的混合溶液酸洗 3~5 min;5A06 铝合金的清理方式为:先使用 40~70 °C、6 wt.%~10 wt.% NaOH 溶液碱洗 5~8 min,然后使用 30 vol.% HNO₃ 溶液酸洗 2 min,最后用无水乙醇冲洗所有试板,晾干待焊。

采用日本 OTC–DP400 全数字逆变控制脉冲焊接设备,采用不同成分焊丝对 TC4/5A06 进行异种

金属脉冲 MIG 熔钎焊试验,如图 1 所示。采用前期研究优化后的脉冲 MIG 熔钎焊焊接参数,见表 2。在钛侧单侧开 45°坡口以增加钛和铝的结合面积,提高焊缝中熔融液态金属在钛母材上的润湿性。

焊接时焊丝正对试板间隙,焊丝干伸长度为 12 mm。焊缝正面采用 20 L/min 混合气体保护(80%Ar+20%He),背面采用 16 L/min 工业纯氩(99.9 vol.%)气体保护。

表 1 母材及不同焊丝的名义化学成分(质量分数,%)

Table 1 Nominal chemical composition of base metal and different welding wire (wt. %)

试验材料	Al	Ti	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	C、H、O、N	其他
TC4 钛	5.5~6.8	余量	—	—	—	—	—	—	—	0.35	0.4
5A06 铝	余量	5.8~6.8	0.40	0.40	0.10	0.5~0.8	5.8~6.8	0.20	—	—	0.10
纯铝	余量	—	≤0.9	≤0.9	0.05~0.20	0.05	—	0.10	—	—	0.10
Al-Si5	余量	0.20	4.5~6.0	0.80	0.30	0.05	0.05	0.10	—	—	0.15
Al-Mg5	余量	0.15	0.40	0.40	0.10	0.5~1.0	4.3~5.2	0.25	0.05~0.25	—	0.15

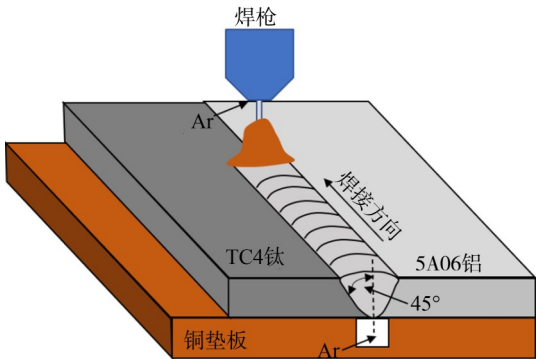


图 1 焊接示意

Fig. 1 Schematic for the welding process

表 2 脉冲 MIG 熔钎焊焊接参数

Table 2 Parameters of pulsed MIG welding-brazing

焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	保护气体流量 /(L·min ⁻¹)	平均电流 /A	平均电压 U/V	热输入 E/(kJ·cm ⁻¹)
60	16	70~76	16.6~18.0	1.16~1.37

焊接试验完成后,垂直于焊缝方向获取接头试样,采用 Teneo Hivac 场发射扫描电子显微镜及 OXFORD X-MAX^N50 电制冷能谱仪对 Ti/Al 界面附近显微组织及拉伸断口形貌进行分析。使用美国英斯特朗公司 EMSYS 电子万能材料试验机对 Ti/Al 脉冲 MIG 熔钎焊接头进行拉伸强度测试。

2 结果与讨论

2.1 钛/铝熔钎焊接头成形特征

采用三种不同成分焊丝获得的熔钎焊接头宏观成形如图 2 所示。纯铝焊丝熔点相对较高,在相同热输入条件下,母材及焊丝熔化形成的熔池液态金属较少,仅形成宽约 5 mm 正面焊缝,成形良好;

但接头根部热输入不足,熔深较小,形成宽约 1 mm 的背面焊缝,成形不均匀,部分区域存在未焊透和气孔缺陷。Al-Si5 焊丝熔点相对较低,母材及焊丝熔化形成的熔融金属增加,且 Si 的加入使熔池流动性增加,熔池液态金属在重力和电弧力作用下自下而上填充到坡口间隙中,接头正背面焊缝饱满,正面焊缝宽约 7 mm,背面焊缝宽约 3.5 mm,成形均匀连续。Al-Mg5 焊丝熔点与 Al-Si5 焊丝相近,但熔池流动性较差,熔融的液态金属未完全沿钛侧坡口铺展,形成宽约 7 mm 的正面焊缝和宽约 1.5 mm 的背面焊缝。正背面焊缝成形均匀连续,焊接过程中飞溅较大,如图 2a 所示。

2.2 焊丝成分对 Ti/Al 界面显微组织特性的影响

对采用三种不同成分焊丝(纯铝、Al-Si5、Al-Mg5)获得的熔钎焊接头进行 Ti/Al 界面显微组织分析,结果如图 3 所示。

(1)纯铝焊丝。钛与铝基焊缝通过形成单层芽状界面反应层实现冶金结合。接头上部反应层宽约 3 μm,如图 3a 所示;接头根部反应层宽约 0.5 μm,如图 3d 所示。纯铝焊丝熔点较高,较多的热输入用于熔化焊丝,用于界面冶金反应的热输入相对较少。在低热输入条件下,Ti/Al 界面冶金反应不充分,仅形成单层芽状界面反应层实现冶金结合。接头上部与根部由于热输入差异形成了不同宽度的芽状界面反应层单层结构。

(2)Al-Si5 焊丝。接头上部 Ti 与焊缝形成宽约 5 μm 的均匀层+芽状反应层双层结构,如图 3b 所示;接头根部形成宽约 1 μm 的芽状反应层单层结构,如图 3e 所示。Al-Si5 焊丝熔点较低,熔化焊丝

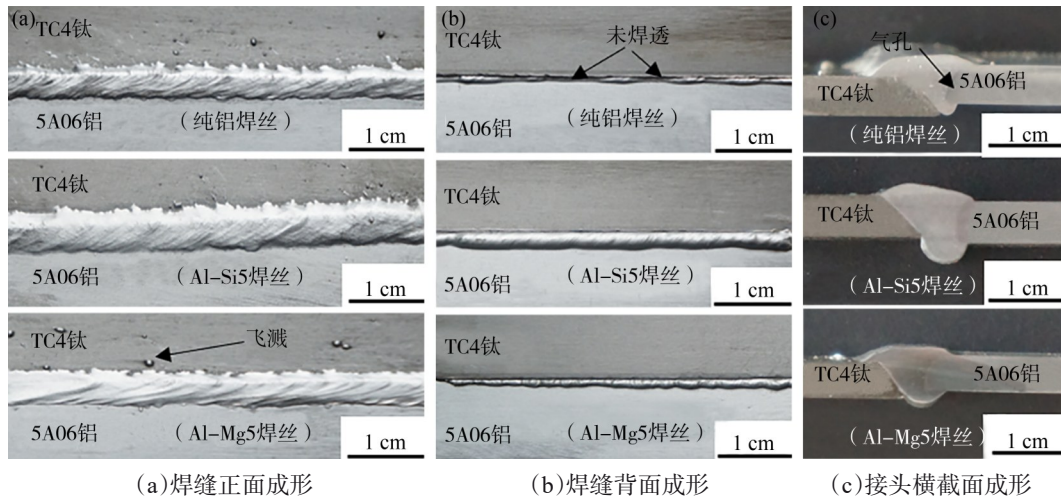


图2 不同焊丝成分钛/铝接头宏观成形

Fig. 2 Macroforming of Ti/Al joints with different wire compositions

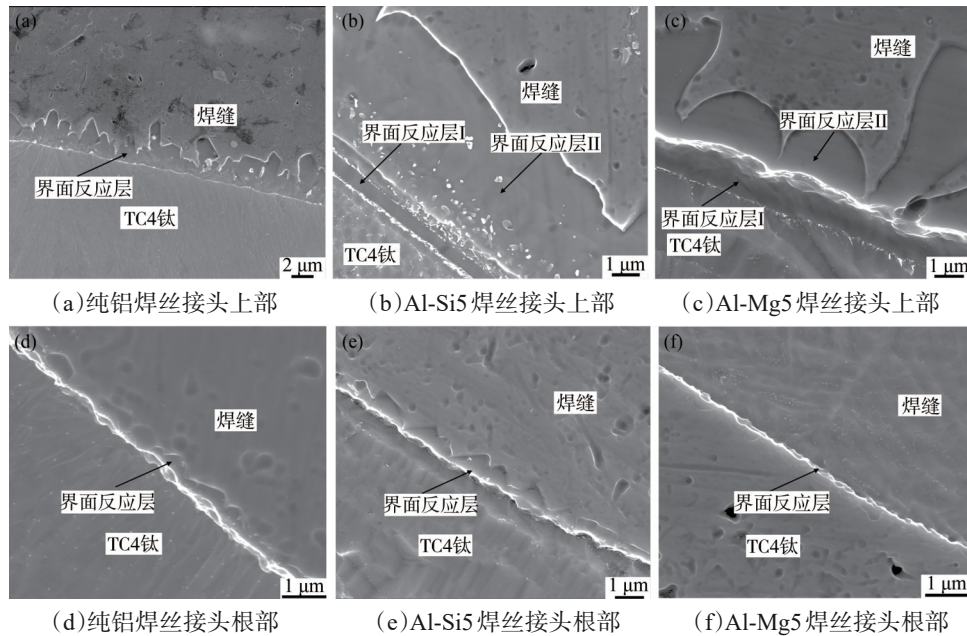


图3 不同焊丝成分 Ti/Al界面显微组织

Fig. 3 Microstructure of Ti/Al interface with different wire compositions

所需热输入较少,用于界面冶金反应的热输入较大。此外,Si元素的加入提高了熔池流动性,使熔融液态金属沿钛侧坡口完全铺展,界面冶金反应充分。接头上部热输入较高,形成了均匀层+芽状反应层的双层结构。大多文献^[13,16]认为均匀层是含一定Si的 Ti_3Al ,而芽状层主要成分为含一定Si的 $TiAl_3$ 。由于钛未发生熔化,仅有界面处的Ti在电弧作用和液态金属的传热作用下发生熔解扩散,聚集在界面附近。由于焊缝中Si浓度相对较低,界面附近Ti优先与Al反应,在近焊缝侧形成一层芽状

$TiAl_3$;高温焊接过程中焊缝中的Al也向钛侧发生扩散,形成过固溶 $\alpha-Ti(Al)$,Al在钛中的固溶度在冷却过程中不断下降,进而发生固相转变: $\alpha-Ti(Al) \rightarrow Ti_3Al$,在近钛侧形成一层均匀的金属间化合物 Ti_3Al ^[13]。由于Ti和Si之间亲和能力较大,少量Si由焊缝向界面反应层发生“上坡扩散”并固溶于其中^[13],形成含一定Si的均匀 Ti_3Al +芽状 $TiAl_3$ 双层结构;接头根部距离电弧较远,热输入较小,仅形成了宽约1 μm 的芽状 $TiAl_3$ 单层结构。

(3)Al-Mg5焊丝。接头上部Ti与焊缝通过形

成宽约 $5\ \mu\text{m}$ 的均匀层+芽状反应层双层结构实现冶金结合,如图 3c 所示;接头根部仅形成芽状反应层单层结构,宽约 $0.5\ \mu\text{m}$,如图 3f 所示。Al-Mg5 焊丝熔点与 Al-Si5 焊丝相近,但相同温度下熔融液态金属流动性相对较差,导致 Ti/Al 界面冶金反应较使用 Al-Si5 焊丝时不够充分,在高温焊接过程中,接头上部焊缝中的 Al 扩散至钛侧,形成过固溶 $\alpha\text{-Ti}$ (Al),并在焊后冷却过程中发生固相转变,生成一层均匀的金属间化合物 Ti_3Al ;扩散至焊缝中的 Ti 与 Al 发生反应,形成一层芽状 TiAl_3 层^[16]。接头根部在低热输入条件下仅形成宽约 $0.5\ \mu\text{m}$ 的芽状 TiAl_3 单层结构。根据 Ti-Mg 二元合金相图,Mg-Ti 为不反应体系^[17],而且焊缝中 Mg 含量较少,因此 Mg 应未参与界面冶金反应。

综上,纯铝焊丝熔点高,界面反应层较薄,冶金结合较弱,接头部位热输入差异导致不同宽度;Al-Si5 焊丝熔点低,界面反应充分,Si 元素促进了均匀层+芽状层双层结构的形成,根部热输入少,仅形成芽状层;Al-Mg5 焊丝界面反应不如 Al-Si5 充分,形成双层结构,根部形成单层结构,Mg 未参与界面反应。

2.3 焊丝成分对钛/铝熔钎焊接头力学性能的影响

为了分析焊丝成分对钛/铝熔钎焊接头力学性能的影响,对采用三种不同成分焊丝获得的钛/铝熔钎焊接头分别进行抗拉强度测试。获得的钛/铝熔钎焊接头拉伸测试曲线如图 4 所示,采用纯铝焊丝所获接头的抗拉强度为 92~94 MPa;采用 Al-Mg、Al-Si 焊丝时,所获接头的抗拉强度分别为 196 MPa、230 MPa。

进一步对拉伸断口形貌进行分析。采用纯铝

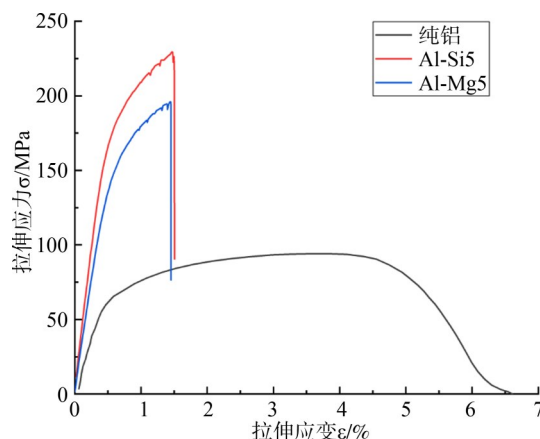


图 4 不同焊丝所获钛/铝接头抗拉强度

Fig. 4 Tensile strength of titanium/aluminum joints obtained with different wires

焊丝时,接头全部断裂于焊缝中部,宏观断口如图 5a 所示,由椭圆形纤维区、“人字形”放射区以及剪切唇区组成,呈典型的韧性断裂方式。分析认为,焊缝内部主要为 $\alpha\text{-Al}$ 基体,具有良好的韧性,接头中部首先发生断裂,断裂面粗糙且存在少量气孔,存在大量撕裂韧窝,形成较大的纤维区,如图 5b 所示;裂纹继续沿着宽度和厚度方向扩展,在纤维区周围形成“人字形”放射区;最终焊缝边缘处在正应力和剪切应力的合力作用下发生快速剪切断裂,形成剪切唇区,如图 5c 所示。

采用 Al-Si5 焊丝时,接头主要断裂于 Ti/Al 钎焊界面附近,宏观断口形貌如图 6a 所示。接头根部断裂于钎焊界面,接头中上部断裂于焊缝。C 区为钎焊界面形貌,局部放大如图 6b 所示,断裂面光滑平整,呈脆性断裂方式;EDS 分析(见表 3,点 A)显示断裂发生于 $\alpha\text{-Ti}$ 层附近,Ti 含量高达 86.61%,表明裂纹沿 Ti/Al 界面扩展。D 区为焊缝断裂面形貌,

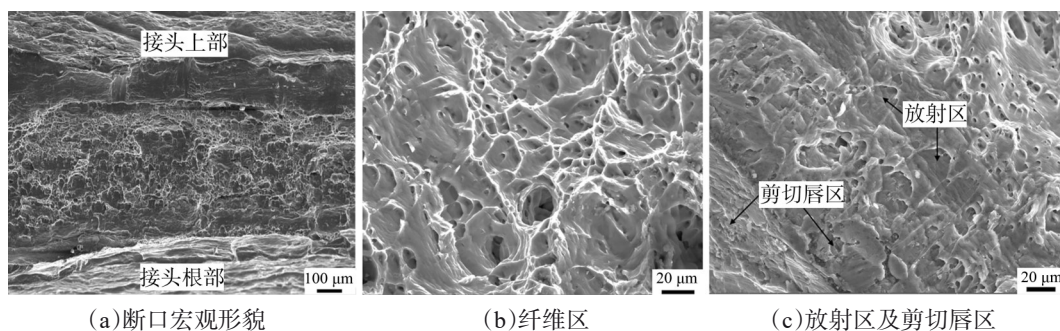


图 5 纯铝焊丝接头拉伸断口形貌

Fig. 5 Tensile fracture morphology of pure aluminum wire joints

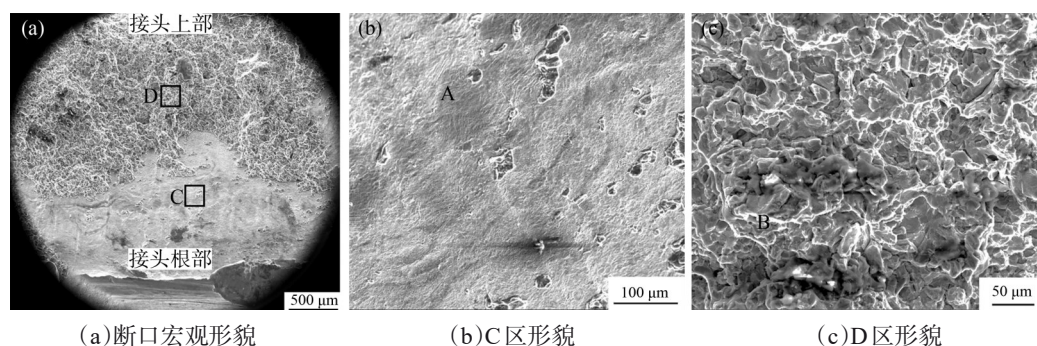


图6 Al-Si5焊丝接头拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphology of Al-Si5 wire joints

局部放大如图6c所示,断裂面粗糙且存在大量椭圆形韧窝,呈韧性断裂方式。EDS分析(见表3,点B)显示断裂面主要为 α -Al, Si含量为14.53%。综上,采用Al-Si5焊丝时接头断裂模式为脆性+韧性混合断裂。根据前文分析,接头根部Ti/Al反应层较薄,冶金结合较弱,裂纹首先在界面处启裂并沿界面快速扩展;中上部以均匀层+芽状层双层结构形成结合,且界面反应层较厚,冶金结合强度较高,裂纹扩展受到阻碍后偏转进入焊缝中。

表3 EDS元素分析结果(原子分数,%)

Table 3 EDS results for A, B in Fig. 6 (at. %)

位置	Al	Ti	Si
A	13.39	86.61	—
B	85.47	—	14.53

采用Al-Mg5焊丝时,接头断裂于Ti/Al钎焊界面附近,宏观断口形貌如图7a所示。接头根部断裂于钎焊界面,接头中上部断裂于焊缝。E区为钎焊界面形貌,局部放大如图7b所示,断面光滑平整,呈脆性断裂方式;F区为焊缝断裂面形貌,局部放大如图7c所示,断裂面粗糙且存在大量椭圆形韧窝,呈韧性断裂方式。分析认为,接头根部仅形成宽约0.5 μm 的单层芽状界面反应层,钛与焊缝界面反应层较薄,冶金结合强度相对较低。在进行拉伸测试时,在拉伸应力作用下接头根部Ti/Al钎焊界面处首先产生裂纹;接头根部形成的单层芽状反应层为金属间化合物 TiAl_3 ,与两侧钛母材和铝基焊缝晶体结构差异较大,且界面反应层较薄,冶金结合强度较低,裂纹易于沿Ti/Al界面反应层扩展。当裂纹扩展至接头中上部时,由于接头中上部以较厚的均匀层+芽状反应层双层结构实现冶金结合,结合强度

相对较高,裂纹沿界面反应层进一步扩展受到阻碍,裂纹转而偏转至塑性较好的焊缝中,焊缝内部主要为 α -Al,通过塑性变形形成大量撕裂韧窝,呈韧性断裂方式。

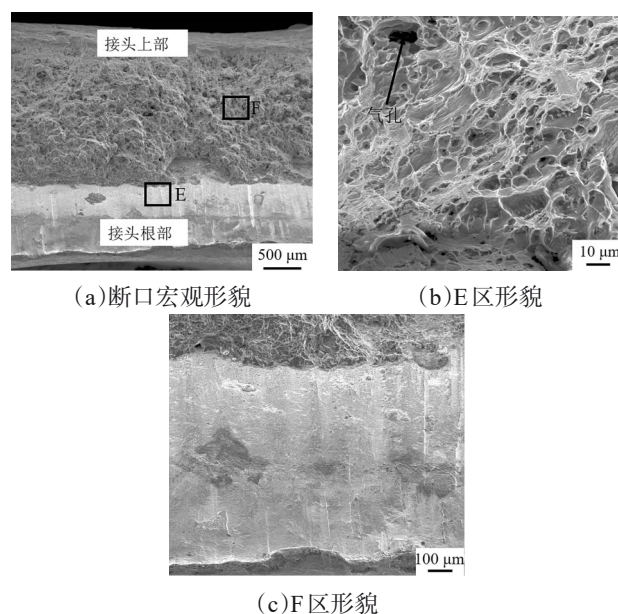


图7 Al-Mg5焊丝接头拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphology of Al-Mg5 wire joints

3 结论

采用纯铝、Al-Si5、Al-Mg5三种不同成分焊丝对TC4钛和5A06铝进行脉冲MIG熔钎焊,研究焊丝成分对接头Ti/Al界面特性及力学性能的影响。

(1)采用纯铝焊丝、Al-Si5、Al-Mg5三种不同成分焊丝均可实现TC4钛和5A06铝的脉冲MIG熔钎焊。填充纯铝焊丝时,正面焊缝成形较好,但部分区域存在未焊透和气孔缺陷;填充Al-Si5、Al-Mg5

焊丝时,正、背面焊缝均饱满连续、尺寸均匀一致,未发现成形缺陷。

(2)填充纯铝焊丝时,接头上部和根部钛与焊缝通过形成不同宽度的单层芽状界面反应层实现冶金结合。填充 Al-Si5 和 Al-Mg5 焊丝时,接头上部均形成均匀层+芽状反应层双层结构实现冶金结合,接头根部形成单层芽状界面反应层实现结合;采用 Al-Mg5 焊丝时,接头根部芽状界面反应层相对较窄。实施钛与铝熔钎焊时,在保证钛不发生熔化的前提下,应尽量提高焊接热输入,促进 Ti/Al 界面冶金反应;而且应采取促进 Ti/Al 界面组织结构均匀化,提高界面结合强度。

(3)采用纯铝焊丝制备的接头抗拉强度为 92~94 MPa,断裂于铝基焊缝中,呈韧性断裂方式;采用 Al-Mg、Al-Si 焊丝时,所获接头抗拉强度分别为 196 MPa、230 MPa,接头均断裂于 Ti/Al 界面附近,呈脆性+韧性混合断裂方式。实施钛与铝熔钎焊时,应选择熔敷金属强度较高,韧性较好的 Al-Mg/Al-Si 系合金焊丝作为填充金属。

参考文献:

- [1] 闫蕴琪,王文生,张振祺,等. TiAl 基金属汽车部件的开发[J]. 航空制造技术,2000,5(03):35-37.
YAN Y Q, WANG W S, ZHANG Z Q, et al. Applications of TiAl-Based Alloys in Automobile Parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2000, 5(03): 35-37.
- [2] 王江,曹庭玮,陈超越,等. 激光增材制造钛铝系金属间化合物的研究现状[J]. 航空制造技术,2022,65(17):14-32.
WANG J, CAO T W, CHEN C Y, et al. Research status of laser additive manufacturing of titanium-aluminum intermetallic compounds [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 14-32.
- [3] 黄永宪,吕宗亮,万龙,等. 钛/铝异质金属搅拌摩擦焊接技术研究进展[J]. 航空学报,2018,39(11):6-17.
HUANG Y X, LV Z L, WAN L, et al. Review of dissimilar friction stir welding between titanium and aluminum [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(11): 6-17.
- [4] 陶辉锦,彭坤,谢佑卿,等. Ti-Al 金属间化合物脆性问题的研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2007,12(06):330-336.
- TAO H J, PENG K, XIE Y Q, et al. Research advance on brittleness of Ti-Al intermetallics [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2007, 12(6):330-336.
- [5] 魏守征,王志英,饶文姬,等. Al-Mg 焊丝的 Ti6Al4V/5A05Al 熔钎焊接接头的组织性能[J]. 材料热处理学报,2019,40(1):149-154.
WEI S Z, WANG Z Y, RAO W J, et al. Microstructure and properties of Ti6Al4V/5A05Al welded-brazed joint using Al-Mg filler [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(1): 149-154.
- [6] RIBEIRO A C, DE S R, DE L M, et al. Improvement weldability of dissimilar joints (Ti6Al4V/Al6013) for aerospace industry by laser beam welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(3):1053-1070.
- [7] Lv S X, Jing X J, Huang Y X, et al. Investigation on TIG arc welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys with Al based fillers[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 17(7):519-524.
- [8] Wei S Z, Rao W J, Wang J, et al. Cold Arc MIG Welding of Titanium Ti6Al4V to Aluminum 5A05Al Using Al-Mg5 Filler[J]. Metals and Materials International, 2020, 26(10):1555-1561.
- [9] 朱宝华. Al/Ti 异种合金的激光熔钎焊工艺及接头组织性能研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2006.
ZHU B H. Laser Welding-Brazing Process and Microstructure Property of Al/Ti Joint[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [10] 陈树海. Ti/Al 异种合金激光熔钎焊工艺与连接机理[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2009.
CHEN S H. Research on Technology and Mechanism of Laser Welding-Brazing for Ti/Al Dissimilar Alloys [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [11] 敬小军. Ti/Al 异种合金 TIG 电弧熔钎焊工艺及界面特征研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2012.
JING X J. Research on technology of TIG arc welding brazing and interfacial characteristic of Ti/Al dissimilar alloys [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [12] 王勇,王敬. Al/Ti 异种金属 TIG 熔钎焊接头的显微组织及力学性能[J]. 金属热处理,2017,42(02):44-48.
WANG Y, WANG J. Microstructure and mechanical properties of TIG welded-brazed joint of dissimilar Al/Ti alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(2):

- 44-48.
- [13] 孙军浩,曹睿,陈剑虹. 铝/钛异种金属冷金属过渡熔钎焊接头分析[J]. 焊接学报,2015,36(03):51-54.
SUN J H, CAO R, CHEN J H. Analysis of welding-brazing joints of Ti/Al dissimilar metals obtained by cold metal transfer method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(03): 51-54.
- [14] 李军兆,刘一搏,孙清洁,等. 钛/铝异种金属CMT搭接熔钎焊接头机理[C]//2016年全国计算机辅助焊接工程学术研讨会摘要集,2016.
- [15] 魏守征,王志英,饶文姬,等. Al-Mg焊丝的Ti6Al4V/5A05Al熔钎焊接头的组织性能[J]. 材料热处理学报,2019,40(01):149-154.
WEI S Z, WANG Z Y, RAO W J, et al. Microstructure and properties of Ti6Al4V/5A05Al welded-brazed joint using Al-Mg filler[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(01): 149-154.
- [16] 宋琳玲,魏守征,李志勇,等. 钛/铝双面冷弧MIG组合熔钎焊接头组织和性能[J]. 焊接学报,2021,42(02):63-68+101.
SONG L L, WEI S Z, LI Z Y, et al. Microstructure and properties of Ti/Al joint using double-sided cold arc MIG welding-brazing [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2021, 42(02): 63-68+101.
- [17] 高明娟,王树奇,杨子润,等. Mg-Al-Ti体系原位合成Al3Ti/Mg[J]. 中国有色金属学报,2008,18(04):583-588.
GAO M J, WANG S Q, YANG Z R, et al. Al3Ti/Mg developed by in situ synthesis of Mg-Al-Ti system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(04): 583-588.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>
-
- ☞ 上接第76页
- 145-148+167.
MAO Z D, WU S L, LIU X S. Formation and microstructure of ultrasonic-assisted friction stir lap welding dissimilar Al/Ti alloys [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2019, 40(02): 145-148+167.
- [9] 耿培皓,秦国梁,马宏,等. 铝/钢异种金属搅拌摩擦搭接传热与材料流动行为[J]. 电焊机,2023,53(03):1-14.
GENG P H, QIN G L, MA H, et al. Heat Transfer and Material Flow in Friction Stir Lap Welding of Al Alloy/Steel [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(03): 1-14.
- [10] Wu A, Song Z, Nakata K, et al. Interface and properties of the friction stir welded joints of titanium alloy Ti6Al4V with aluminum alloy 6061 [J]. Materials & Design, 2015, 71: 85-92.
- [11] 张鑫,陈玉华,王善林. 工艺参数对Ti/Zn/Al异种金属搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(01):247-251.
ZHANG X, CHEN Y H, WANG S L. Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Ti/Zn/Al Joint Welded by Friction Stir Welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(01): 247-251.
- [12] Choi J W, Liu H, Fujii H. Dissimilar friction stir welding of pure Ti and pure Al [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 730: 168-176.
- [13] Zhao H, Yu M, Jiang Z, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Ti dissimilar joints fabricated via friction stir welding [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 139-149.
- [14] 张哲,张利国,肖增华,等. 钛/铝异种合金FSLW接头的成形与组织研究[J]. 热加工工艺,2018,47(17):190-192.
ZHANG Z, ZHANG L G, XIAO Z G, et al. Forming and Microstructure of Ti/Al Dissimilar Alloys FSLW Joint [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(17): 190-192.
- [15] Li B, Shen Y, Luo L, et al. Effects of processing variables and heat treatments on Al/Ti-6Al-4V interface microstructure of bimetal clad-plate fabricated via a novel route employing friction stir lap welding [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 658: 904-913.
- [16] Reza-E-Rabby M, Ross K, Overman N R, et al. Joining thick section aluminum to steel with suppressed FeAl intermetallic formation via friction stir dovetailing [J]. Scripta Materialia, 2018, 148: 63-67.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>