

高速超威弧 MIG 焊下 TC4/5A06 接头 界面组织特性

刘李宾, 魏守征, 王建宏, 李志勇, 张英乔, 李玉新

(中北大学 焊接研究中心, 太原, 030051)

摘要: 采用填充 SAI5183 焊丝和高速超威弧 MIG 焊方法对 TC4 钛合金和 5A06 铝合金进行了熔钎焊, 采用 SEM、XRD 及拉伸测试等分析了焊接热输入 E 对 TC4/5A06 接头组织性能的影响规律. 结果表明, 在试验参数条件下, 热输入 E 对 TC4/5A06 界面显微组织和接头的力学性能具有明显影响: 当热输入 $E \leq 0.93$ kJ/cm 时, 接头根部存在未熔合缺陷, TC4/5A06 界面处形成了一层厚度不足 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 TiAl_3 ; 当热输入 $E \geq 1.20$ kJ/cm 时, 焊缝出现了熔穿缺陷, 接头上部和中部的 TC4/5A06 界面处形成了厚度在 $2.5 \sim 6\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{TiAl}_3 + \text{Ti}_3\text{Al}$ 双层结构, 其它区域则形成一层厚约 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 TiAl_3 ; 热输入 E 在 $1.02 \sim 1.11$ kJ/cm 范围内时, 焊缝成形良好, TC4/5A06 界面处形成厚度在 $0.7 \sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的单层 TiAl_3 . 在选择的工艺范围内, 接头的平均抗拉强度随 E 的增大而逐渐增大, 在不出现成形缺陷的条件下, 抗拉强度最高可达 232 MPa.

创新点: (1) 采用高速超威弧 MIG 焊实现了 TC4 钛/5A06 铝的可靠连接, 揭示钛与铝结合机理为熔钎焊结合.
(2) 通过显微组织结构分析, 揭示了高速超威弧 MIG 焊工艺下接头 Ti/Al 界面的显微组织特性.

关键词: 钛合金; 铝合金; 高速焊; 超威弧 MIG 焊; 显微组织

中图分类号: TG 457.19 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20221214002

0 序言

钛合金由于其高温性能好、耐腐蚀、比强度高的特性被广泛应用在航空航天等领域^[1], 但单一的钛合金材料成本高昂, 限制了钛合金的应用. 铝合金具有低密度, 高比强度, 成本低等优点^[2]. 为了满足工业上对构件综合性能包括轻量化、低成本的要求, 采用钛/铝复合构件是一种可行的方法. 然而钛/铝两种金属的冶金结合很容易产生大量的脆性金属间化合物^[3], 可能会影响焊接构件的性能.

截至目前, 搅拌摩擦焊 (FSW)^[4-5] 和熔钎焊^[6-8] 被证明是实现钛/铝异种金属无缺陷焊接的有效方法. 其中针对钛与铝的熔钎焊研究, 常采用激光焊^[6]、TIG 焊^[7]、MIG 焊^[8] 等方法. 其中 MIG 熔钎焊由于低成本、熔覆效率高在钛/铝异种金属的焊接方面具有一定的优势. 文献 [9-10] 使用

AlSi5 焊丝对钛/铝异种金属进行了冷金属过渡 (CMT)MIG 焊搭接、脉冲电流 MIG 焊对接试验, 均实现了钛与铝的熔钎焊连接. 为了提高 Ti/Al 熔钎焊接头的可靠性, 一系列改进的 MIG 焊接方法被用于钛与铝的后续熔钎焊研究. 文献 [11] 用附加轴向磁场的 CMT 焊接方法对 TA2 纯钛和 6061-T6 铝合金进行了熔钎焊, 利用外加磁场可以改善液态金属的流动性, 细化了焊缝晶粒, 接头力学性能有所提高. 文献 [12] 采用外加旁路电流的 MIG 焊方法对 TC4 钛合金和 6061 铝合金进行了熔钎焊, 结果发现, 旁路电流可以提高焊丝的熔化效率, 改善铝在钛上的润湿铺展行为, 获得接头的剪切强度最高达到 190 MPa, 约为 6061 铝合金的 96%. 文献 [13] 使用双面冷弧 MIG 组合焊对 TA2 钛合金和 5A06 铝合金进行了熔钎焊, 在焊接热输入的影响下, 钛合金与铝合金形成了 $\text{Ti}_{3.3}\text{Al} + \text{TiAl}_3$ 和 TiAl_3 两种不同的钛/铝界面, 接头最高抗拉强度可超过 300 MPa.

综上所述, 采用 MIG 焊技术能够实现钛与铝的可靠熔钎焊, 研究钛合金与铝合金的高速

收稿日期: 2022-12-14

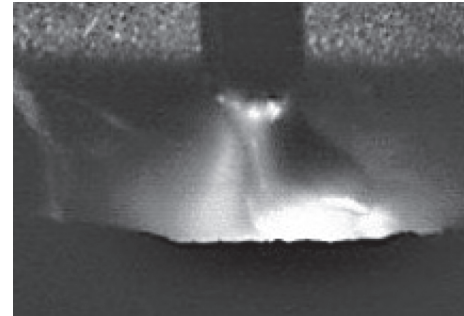
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51805492); 金属凝固控制与精确成形山西省重点实验室基金项目 (MSPM202005).

MIG 熔钎焊, 进一步提高焊接效率具有重要意义. 与普通 MIG 焊相比, 超威弧 MIG 焊技术利用大功率电子开关元件控制输出电信号和瞬时电流增长率 di/dt , 在较小的弧压下实现了熔滴的超短弧喷射过渡, 电弧能量集中, 方向性和稳定性好; 强大的电弧力和熔滴冲击力利于获得大深宽比的焊缝, 适用于材料的高速焊接. 而关于钛与铝高速超威弧 MIG 焊的研究较少, 高速超威弧 MIG 焊下钛/铝界面组织特性尚不明确. 文中采用高速超威弧 MIG 焊对 TC4 钛合金/5A06 铝合金进行了熔钎焊尝试, 研究了焊接热输入对接头的显微组织与力学性能的影响, 重点分析了高速超威弧 MIG 焊工艺下钛/铝界面组织结构特征. 研究内容及结果可为实现钛合金/铝合金的高速、高效焊接提供数据支持和理论基础.

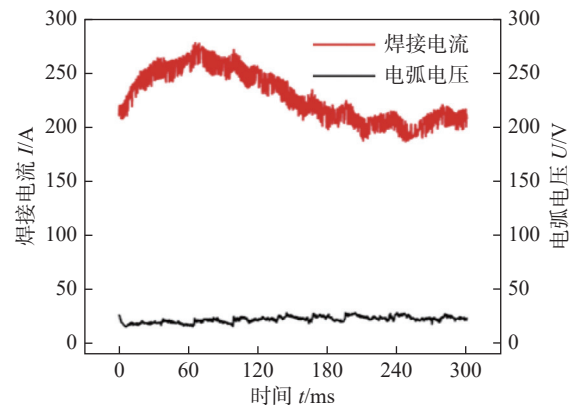
1 试验材料与方法

试验所采用的是超威弧 MIG 焊接的焊接方法, 其焊接过程的熔滴过渡特征和电流电压特征如图 1 所示. 试验所用母材为 TC4 钛合金和 5A06 铝合金, 尺寸为 $100\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 焊丝采用 $\phi 1.2\text{ mm}$ 的 SAI5183(Al-Mg5) 焊丝, 母材及焊丝名义化学成分见表 1. 焊前使用钢丝刷将 TC4 钛合金打磨至光亮, 再使用体积分数为 40% 的 HNO_3 溶

液酸洗 3 min; 对 5A06 铝合金使用 $40 \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 、浓度为 10% NaOH 溶液碱洗 3 min, 再使用体积分数为 40% 的 HNO_3 溶液酸洗 3 min, 以去除表面油污和氧化膜; 最后所有试板用无水乙醇冲洗, 晾干待焊.



(a) 熔滴过渡



(b) 电流电压曲线

图 1 超威弧 MIG 焊

Fig. 1 Force arc MIG welding. (a) droplet transition; (b) real-time curve of current and voltage

表 1 母材及焊丝的名义化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Nominal chemical compositions of base metals and welding wire

试验材料	Al	Si	Fe	Cu	Zn	Mn	Mg	V	Ti	其他
TC4	6.43	—	0.14	—	—	—	—	4.13	余量	≤ 0.2
5A06	余量	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.1	≤ 0.2	0.3 ~ 0.6	4.8 ~ 5.5	—	—	—
SAI5183	余量	0.4	0.4	0.1	0.25	0.5 ~ 1.0	4.3 ~ 5.2	—	0.15	≤ 0.2

采用德国 alpha Q 351 puls MIG/MAG 多功能逆变脉冲水冷直流焊机, 选择超威弧模式进行 TC4 钛合金和 5A06 铝合金的焊接. 为了增加 TC4/5A06 结合面积、促进熔融金属在 TC4 母材上的润湿铺展, TC4 板单侧开 40° 坡口. 焊接时, TC4 板和 5A06 板对接装配, 调节焊丝向铝侧偏移 0.5 mm, 焊丝伸出长度为 12 mm, 焊接速度为 180 cm/min. 其它主要工艺参数见表 2. 焊缝正面采用 20 L/min 的体积分数为 80%Ar + 20%He 的惰性气体保护, 背面采用 15 L/min 的高纯 Ar(体积分数

99.999%) 气体保护.

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters for the welding process

平均焊接电流 I/A	平均电弧电压 U/V	送丝速率 $v_f/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$
130	19.6	7.9	0.85
140	19.9	8.5	0.93
150	20.4	9.1	1.02
161	20.8	9.7	1.11
171	21.1	10.3	1.20

焊接结束后,垂直于焊缝方向获取金相试样.使用 JSM-7001F 热场发射 SEM 观察 Ti/Al 界面处显微组织;使用 X 射线衍射仪分析 Ti/Al 界面附近焊接区物相组成;使用 Oxford X-Max 型大面积电制冷 EDS 进行界面组织的元素分析;使用万能力学试验机测试试样的拉伸力学性能.

2 试验结果

2.1 Ti/Al 接头宏观成形

不同焊接热输入下获得的 TC4/5A06 接头宏观形貌如图 2 所示. 固定焊接速度,在增大热输入的同时,送丝速度同步增大,焊丝填充金属增多,焊缝

更加饱满. 在热输入为 0.93 kJ/cm 时,熔池焊接热循环峰值温度较低,接头根部受热不足,降低了液态铝在钛表面的润湿性,还没有完全铺展到接头根部时已经凝固,形成未熔合缺陷,如图 2a 所示;当热输入增大到 1.11 kJ/cm 时,接头正、背面焊缝更加饱满,成形均匀、连续,背面余高和正面余高均有所增加,焊缝表面及横截面未发现明显的缺陷;热输入增大至 1.20 kJ/cm 时,电弧能量较高,熔池中液态金属过热,流动性增大,在重力和电弧力综合作用下,大量铝液从焊缝背面滴落,形成熔穿缺陷,如图 2c 所示. 相比于之前关于普通 MIG 电弧的 Ti/Al 异种金属焊接的研究^[14],采用超威弧技术电弧能量更加集中,可以在更小的热输入下实现 Ti/Al 异种金属的连接.

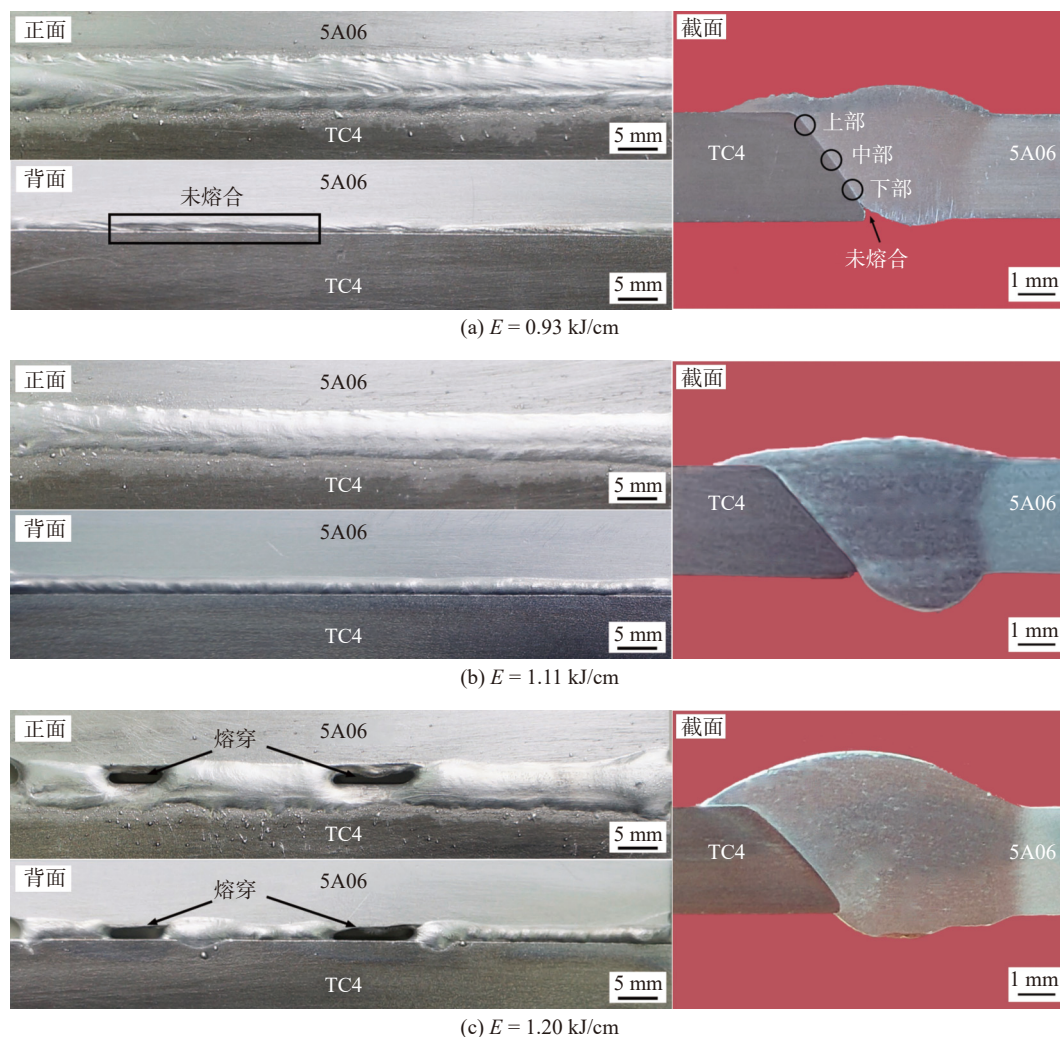


图 2 不同焊接热输入下 TC4/5A06 接头宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of Ti/Al joint with different welding heat input. (a) $E = 0.93 \text{ kJ/cm}$; (b) $E = 1.11 \text{ kJ/cm}$; (c) $E = 1.20 \text{ kJ/cm}$

2.2 Ti/Al 界面显微组织特性分析

为了分析接头 TC4/5A06 界面显微组织特性,

选择接头厚度方向上不同部位进行显微组织分析,如图 2a 所示. 不同热输入下 TC4/5A06 界面显微

组织如图 3 ~ 图 5 所示. 在热输入 $E = 0.93 \text{ kJ/cm}$ 时, 沿接头厚度方向上 TC4/5A06 界面处仅形成了一层厚度不足 $1 \mu\text{m}$ 的牙状界面反应层, 如图 3 所示, 接头上部反应层最厚, 接头下部最薄. 当 $E = 1.11 \text{ kJ/cm}$ 时, 热输入的增大使得熔池温度升高, 界面冶金反应时间变长, 接头各部位反应层厚度增加, 如图 4 所示, 接头上部和中部厚约 $1.5 \mu\text{m}$, 接

头下部厚约 $0.7 \mu\text{m}$. 当 $E = 1.20 \text{ kJ/cm}$ 时, 接头界面存在两种界面结构, 接头上部和中部形成了双层结构: 靠近焊缝侧的厚度为 $1.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 的界面反应层 I 和靠近 TC4 侧的厚约 $1 \mu\text{m}$ 的界面反应层 II, 如图 5 所示, 接头下部仍为单层牙状反应层, 厚度约 $1 \mu\text{m}$. 在高焊接速度和超威弧的作用下, 接头厚度方向上的组织差异较小.

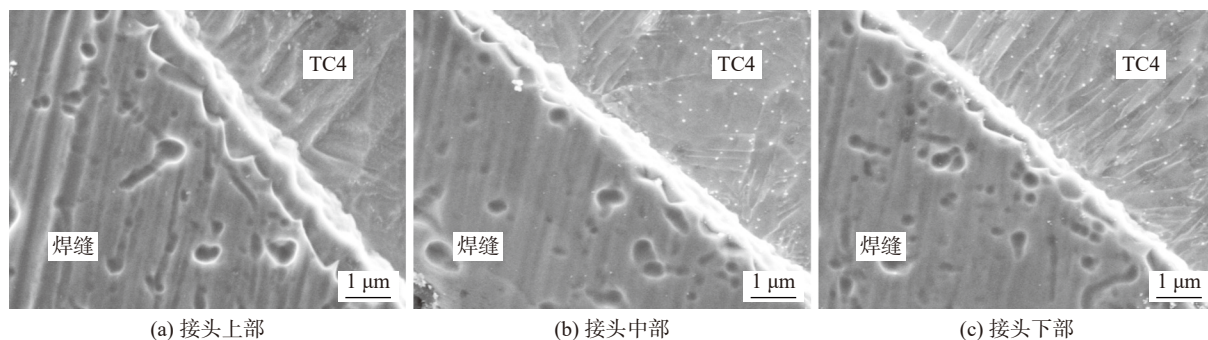


图 3 $E = 0.93 \text{ kJ/cm}$ 时 TC4/5A06 界面显微组织

Fig. 3 Microstructure of TC4/5A06 interface at $E = 0.93 \text{ kJ/cm}$. (a) top of joint; (b) middle of joint; (c) bottom of joint

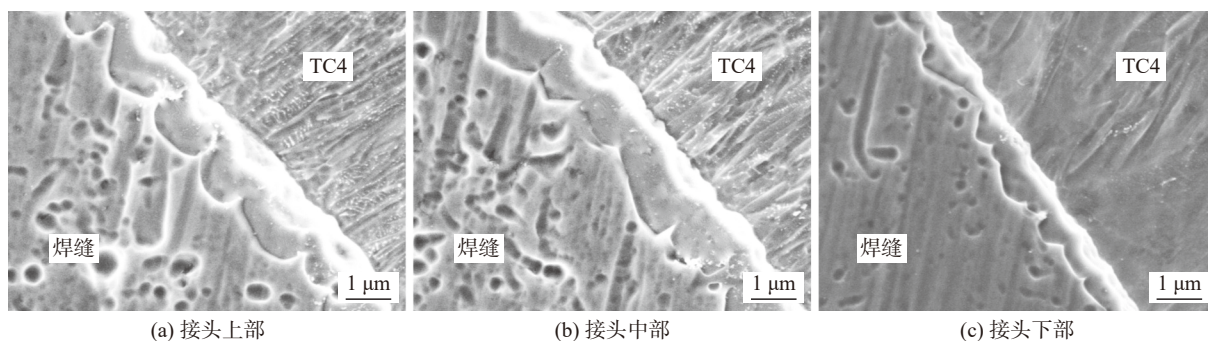


图 4 $E = 1.11 \text{ kJ/cm}$ 时 TC4/5A06 界面显微组织

Fig. 4 Microstructure of TC4/5A06 interface at $E = 1.11 \text{ kJ/cm}$. (a) top of joint; (b) middle of joint; (c) bottom of joint

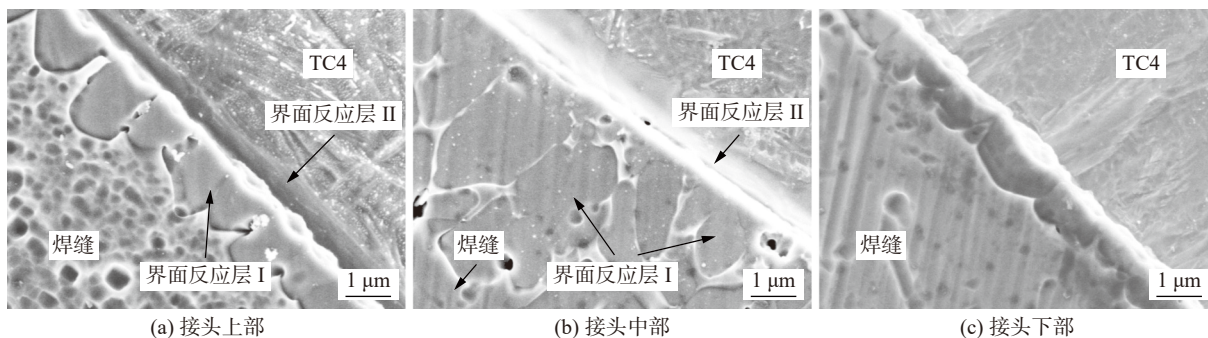


图 5 $E = 1.20 \text{ kJ/cm}$ 时 TC4/5A06 界面显微组织

Fig. 5 Microstructure of TC4/5A06 interface at $E = 1.20 \text{ kJ/cm}$. (a) top of joint; (b) middle of joint; (c) bottom of joint

分析认为, 由于焊接电弧温度场沿 TC4 侧坡口面分布不均匀, 且熔融的液态金属自下而上填充到坡口间隙中, 导致 TC4/5A06 界面沿厚度方向上不

同部位的热输入存在差异, 形成的界面组织在厚度和形态上也有差异^[15]. 接头上部和中部距离电弧较近, 焊接热输入相对较大, 焊接热循环高温停留时

间长, TC4 与 5A06 冶金反应持续时间较长, 形成的界面反应层较厚; 接头下部距离电弧较远, 焊接热输入相对较小, 形成的界面反应层较薄. 当热输入达到 1.20 kJ/cm 时, 接头上部 TC4/5A06 界面附近的峰值温度进一步提高, Ti 与 Al 元素扩散速度加快, 在复杂的冶金反应后形成了双层结构; 而接头下部距离电弧中心较远, 冶金反应不足仅形成单层界面反应层.

2.3 接头拉伸力学性能

对不同焊接热输入下 TC4/5A06 接头的抗拉强度进行测试 (每个接头截取 3 个拉伸试样), 结果如图 6 所示. TC4/5A06 接头抗拉强度随着焊接热输入的增大逐渐增大, 在保证焊缝成型的前提下, 抗拉强度最高可达 232 MPa . TC4/5A06 接头强度主要与 Ti-Al 金属间化合物有关, 而金属间化合物的形成主要与焊接热输入有关. 热输入过低时, 界面反应层厚度整体较薄; 接头根部出现未熔合区域, 界面有效结合面积减小, 且未熔合缺口尖端存在应力集中导致接头强度低. 随着热输入的增加, 界面反应层厚度增加, 接头强度逐渐提高. 当热输入过大时, 界面冶金反应剧烈形成双层结构, 界面反应层厚度进一步增大, 接头强度最高达到 260 MPa , 但由于在此工艺下焊缝存在熔穿缺陷, 不适用于钛与铝的焊接.

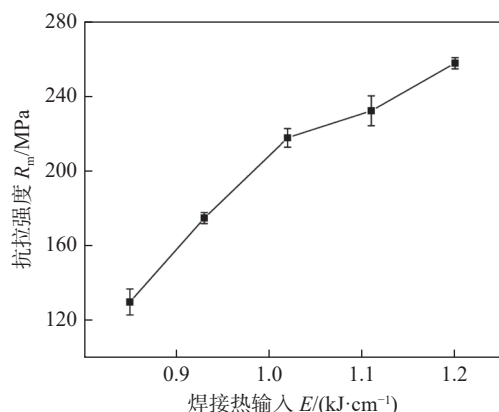


图 6 不同焊接热输入下 TC4/5A06 接头抗拉强度

Fig. 6 Tensile strength of the TC4/5A06 joints with different welding heat input

综合考虑接头成形缺陷和拉伸力学性能因素, 取 $E = 1.11 \text{ kJ/cm}$ 时所获接头进行断裂分析, 断裂路径如图 7 所示. 接头下部断裂在 Ti/Al 界面处, 而上部和中部断裂在焊缝中. 接头低倍断口形貌如图 8a 所示, B 区为 Ti/Al 界面处断裂面形貌, 断面平整光滑, 表现为脆性的解理断裂, 图 8b 是 B 区的

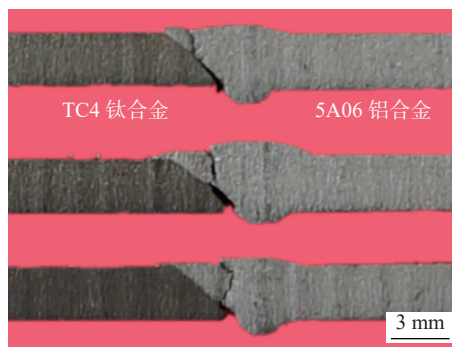
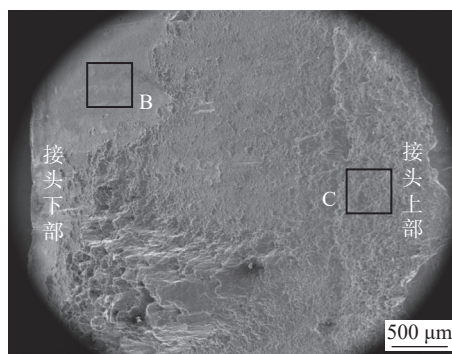
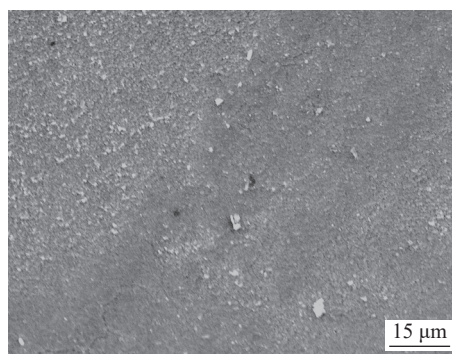


图 7 TC4/5A06 接头拉伸断裂路径

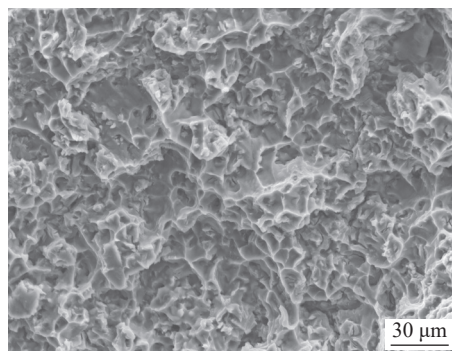
Fig. 7 Fracture locations of the TC4/5A06 joints



(a) 低倍断口形貌



(b) B 区形貌



(c) C 区形貌

图 8 TC4/5A06 接头断口形貌

Fig. 8 Fracture morphologies of the TC4/5A06 joints. (a) Low magnification; (b) High magnification for region B; (c) High magnification for region C

局部放大图, 表面存在大量细小的撕裂痕迹; C 区为焊缝区断裂面形貌, 局部放大 (图 8c) 显示粗糙

的断口存在大量的韧窝,表现为韧性断裂.分析认为,接头下部冶金结合相对不足,形成的反应层较薄,是整个接头的强度薄弱区域,在受到外部的拉伸作用力时,裂纹首先在接头下部产生,并沿着 TC4/5A06 界面延伸;由于界面反应层与两侧材料晶体结构差异大,结合较弱,主要呈脆性断裂.当裂纹到达接头中部时,由于中部反应层较厚,结合强度较高,裂纹扩展受到阻碍,偏转后进入到焊缝中;焊缝内部主要是 α -Al 基体,具有较好的塑性,主要呈韧性断裂.

2.4 TC4/5A06 界面物相分析

根据前文 TC4/5A06 界面显微组织特性分析可知,热输入较大时界面处会形成两种反应层结构.为较为全面地分析 TC4/5A06 界面附近物相组成和 TC4/5A06 界面结合机制,选取热输入为 1.11 kJ/cm 和 1.20 kJ/cm 的两个试样,平行于坡口面打磨至 TC4/5A06 界面处,进行 XRD 分析.热输入为 1.11 kJ/cm 的 TC4/5A06 接头 XRD 分析结果如图 9a 所示,除 Ti、Al 外,在 TC4/5A06 界面附近仅检测到 TiAl_3 一种新相.热输入为 1.20 kJ/cm 的 TC4/5A06 接头 XRD 分析结果如图 9b 所示,除 Ti、

Al 外,界面附近还存在 TiAl_3 和 Ti_3Al 两种新相.

当焊接热输入为 1.11 kJ/cm 时,接头 TC4/5A06 界面处仅形成单层牙状结构,对界面选区进行 EDS 面扫描分析,结果如图 10a 所示.界面处依靠 Ti 和 Al 元素的相互扩散,发生冶金反应形成了一厚度约 1.5 μm 的界面反应层.选择 A 点进行 EDS 点扫描分析,结果见表 3, Ti:Al 元素原子占比约为 1:3,结合 XRD 分析结果,认为该界面反应层为 TiAl_3 相.分析认为,母材中 Ti 通过扩散进入熔池中后,与 Al 反应可能会形成 TiAl 、 TiAl_3 等多种 Ti-Al 金属间化合物,其中 TiAl_3 的生成吉布斯自由能最低, Ti 与液态 Al 首先发生 $\text{Ti} + 3\text{Al} \rightarrow \text{TiAl}_3$ 反应,优先形成 TiAl_3 相;鉴于扩散至熔池中的 Ti 相比与熔池中的 Al 占比很小,因此所有 Ti 与 Al 反应全部形成了 TiAl_3 相,没有形成其它 Ti-Al 金属间化合物.熔池冷却过程中,固-液界面为 TiAl_3 的形成提供了异质形核界面,而 TiAl_3 晶粒优先沿温度梯度方向生长,最终在 TC4/5A06 界面处形成了几乎垂直于界面向焊缝内部延伸生长的

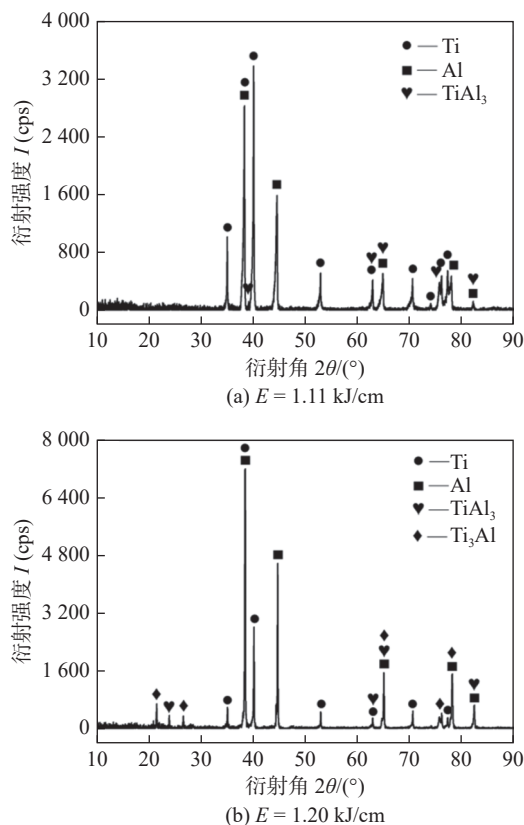


图 9 TC4/5A06 接头 XRD 分析结果

Fig. 9 XRD patterns of TC4/5A06 joint. (a) $E = 1.11 \text{ kJ/cm}$; (b) $E = 1.20 \text{ kJ/cm}$

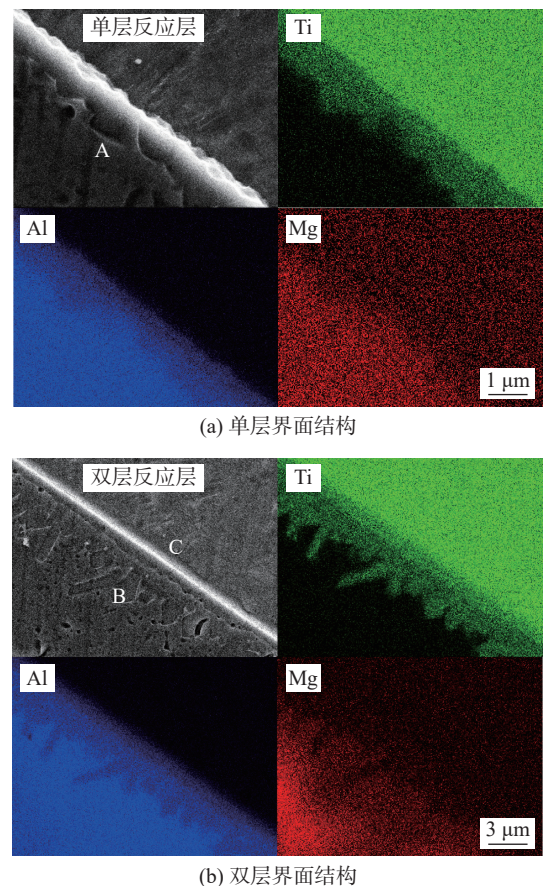


图 10 TC4/5A06 界面面扫描分析

Fig. 10 EDS map scanning of TC4/5A06 interfaces. (a) Single-layered structure; (b) Double-layered structure

TiAl₃ 层.

表 3 EDS 元素分析结果 (原子分数, %)
Table 3 EDS results for spot A-C in Fig. 10

位置	Ti	Al	Mg	V
A	28.33	71.06	0.23	0.38
B	24.16	74.31	0.96	0.57
C	71.38	28.09	0.53	0

焊接热输入达到 1.20 kJ/cm 时, 接头上部和中部 TC4/5A06 界面处形成双层结构, 对该处界面选区进行 EDS 面扫描分析, 如图 10b 所示. 与单层界面反应层相比, 该处界面处存在与母材不同的 2 个明显的浓度梯度层, 靠近焊缝侧的 Al 强度较高, 靠近 TC4 侧的 Ti 强度较高. 在两个反应层处分别取 B、C 点进行 EDS 点扫描分析, 结果见表 3, B 点 Ti:Al 元素原子占比约为 1:3, 结合 XRD 分析结果, 认为此处为 TiAl₃ 相; C 点 Ti:Al 元素原子占比约为 3:1, 认为此处为 Ti₃Al 相. 分析认为, 当焊接热输入较大时, Ti 元素向液态 Al 中的扩散程度加大, 大量的 Ti 扩散到熔池中, 与 Al 基液态金属发生冶金反应, 形成一层较厚的 TiAl₃ 相. 同时, TC4/5A06 界面热循环峰值温度超过了 α -Ti $\rightarrow$ β -Ti 转变温度, 在界面处钛母材侧中形成一薄层 β -Ti; 在高温作用下, Al 元素向 β -Ti 中发生大量扩散, 形成 β -Ti(Al) 薄层; 冷却过程中, 发生 β -Ti(Al) $\rightarrow$ α -Ti(Al) 转变, 形成过固溶的 α -Ti(Al); 随着温度继续下降, Al 在 α -Ti(Al) 中的溶解度下降, 发生 α -Ti(Al) $\rightarrow$ Ti₃Al 反应, 形成一薄层 Ti₃Al 相.

综上, 在 $E \leq 1.11$ kJ/cm 时, 钛与焊缝通过 TC4/5A06 界面处元素扩散形成单层 TiAl₃ 实现钎焊结合. 当 $E \geq 1.20$ kJ/cm 时, 接头上部和中部钛与焊缝通过形成 TiAl₃ 层、Ti₃Al 层双层结构实现钎焊结合; 其它部位钛与焊缝通过形成单层 TiAl₃ 实现钎焊结合. 即在所有试验工艺下, 钛侧均为钎焊结合, 而铝侧均为熔焊结合, 因此是典型的熔钎焊连接.

结合焊缝成形、显微组织及力学性能分析, 在试验参数条件下, 最优的 TC4/5A06 高速超威弧 MIG 焊的焊接热输入范围是 1.02 ~ 1.11 kJ/cm.

3 结论

(1) 填充 SAl5183 焊丝, 采用高速超威弧

MIG 焊接工艺, 可以实现 TC4 钛合金和 5A06 铝合金的有效熔钎焊. 在热输入为 0.93 kJ/cm 时, 接头根部出现未熔合缺陷; 在热输入达到 1.20 kJ/cm 时, 接头出现熔穿缺陷. 在试验参数条件下, 合适的高速超威弧 MIG 焊接热输入范围是 1.02 ~ 1.11 kJ/cm.

(2) 针对 TC4 钛合金和 5A06 铝合金的高速超威弧 MIG 焊, 当热输入 $E \leq 1.11$ kJ/cm 时, Ti/Al 界面处仅形成单层 TiAl₃; 当热输入 $E \geq 1.20$ kJ/cm 时, 接头上部和中部 Ti/Al 界面处形成厚度为 2.5 ~ 6 μ m 的 TiAl₃ + Ti₃Al 双层结构, 接头下部为厚度约 1 μ m 的 TiAl₃ 层.

(3) TC4/5A06 接头抗拉强度随着热输入的增大逐渐增大, 在保证焊缝成形的前提下, 热输入为 1.11 kJ/cm 时, 抗拉强度最高可达 232 MPa. 接头上部和中部断裂在焊缝中, 表现为韧性断裂; 接头下部断裂在 Ti/Al 界面处, 表现为脆性断裂.

参考文献

- [1] Luo G Q, He J Y, Song Z F, *et al.* Influence of effective physical contact area on microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded TC4/1060Al joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(2): 1226 – 1234.
- [2] 李恒, 徐光霁, 张宇辉, 等. 2219/5A06 异种铝合金焊接接头组织与性能相关性 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(9): 8 – 15.
Li Huan, Xu Guangpei, Zhang Yuhui, *et al.* Correlation between microstructure and properties of 2219/5A06 dissimilar aluminum alloy welded joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(9): 8 – 15.
- [3] Chen J, Zong R, Wu C S, *et al.* Influence of low current auxiliary TIG arc on high speed TIG-MIG hybrid welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 243: 131 – 142.
- [4] Chen Z W, Yazdanian S. Microstructures in interface region and mechanical behaviours of friction stir lap Al6060 to Ti-6Al-4V welds[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2015, 634: 37 – 45.
- [5] Rostami H, Nourouzi S, Aval H J. Analysis of welding parameters effects on microstructural and mechanical properties of Ti6Al4V and AA5052 dissimilar joint[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(7): 3371 – 3377.
- [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] 孙军浩, 曹睿, 黄倩, 等. Al6061/TA2 异种金属冷金属过渡焊接性分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 25 – 28.
- Sun Junhao, Cao Rui, Huang Qian, *et al.* Cold metal transfer of dissimilar metals between 6061 aluminum alloy and TA2[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(9): 25 – 28.
- [10] Wei S Z, Li Y J, Wang J, *et al.* Microstructure and joining mechanism of Ti/Al dissimilar joint by pulsed gas metal arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(5-8): 1137 – 1142.
- [11] Sun Q J, Li J Z, Liu Y B, *et al.* Microstructural characterization and mechanical properties of Al/Ti joint welded by CMT method—Assisted hybrid magnetic field[J]. Materials & Design, 2017, 116: 316 – 324.
- [12] Miao Y G, Ma Z W, Yang X S, *et al.* Experimental study on microstructure and mechanical properties of AA6061/Ti-6Al-4V joints made by bypass-current MIG welding-brazing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 260: 104 – 111.
- [13] 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(2): 63 – 68.
- Song Linling, Wei Shouzheng, Li Zhiyong, *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(2): 63 – 68.
- [14] 魏守征, 王志英, 任晓鹏, 等. 坡口角度及焊丝偏移量对钛/铝冷弧 MIG 焊接头显微组织与力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2021, 42(8): 59 – 66.
- Wei Shouzheng, Wang Zhiying, Ren Xiaopeng, *et al.* Influence of bevel angle and wire offset on the microstructure and mechanical properties of Ti/Al joint by cold arc MIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(8): 59 – 66.
- [15] Zhang Y F, Huang J H, Ye Z, *et al.* Influence of welding parameters on the IMCs and the mechanical properties of Ti/Al butt joints welded by MIG/TIG double-sided arc welding-brazing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 764-771.

第一作者: 刘李宾, 1999 年出生, 硕士. 主要从事先进材料的特种连接技术研究. Email: liulibin1215@163.com.

通信作者: 魏守征, 1984 年出生, 博士, 副教授, 硕士生导师. 主要从事先进材料的特种连接技术及增材制造技术研究. Email: wszweishouzheng@126.com.

(编辑: 张基隆)

method for power battery aluminum alloy sheet welding, but the traditional laser welding process is easy to produce spatter, porosity and other defects under the requirement of high welding speed, which will affect the service performance of component. In this paper, the regulation and control of laser lap welding of aluminum alloy sheet with adjustable ring spot are studied, and the influence law of center-ring laser power on weld forming was expounded. On this basis, the high-speed stable welding process window with no spatter, little porosity and large lap surface width was identified. In the range of the process window, the multi-objective optimization of process parameters was further carried out by taking small penetration fluctuation and large bonding width as targets. It has been proved that the welding speed is above 70 mm/s, the welding width of the lap surface is increased by 8.89%, the fluctuation of the welding depth is less than 10%, there is no obvious forming defect, and the forming quality of the weld is further improved.

Highlights: (1) Research on the control of high-speed laser lap welding of aluminum alloy sheet with adjustable ring spot was carried out to clarify the influence law of welding process parameters on weld forming.

(2) Use the adjustable ring spot laser welding technology to realize the high-speed and stable welding of aluminum alloy sheet with no spatter, less porosity and large lap surface width.

(3) The model of relationship between process parameters and welding quality was established, the fluctuation of weld depth and the width of lap surface were further optimized to obtain better combination of process parameters.

Key words: aluminum alloy sheet for power battery; adjustable ring spot; high speed laser lap welding; process control; multi-objective process parameter optimization

Interfacial Microstructure of TC4 /5A06 Al Joint Using High Speed Force Arc MIG Welding

LIU Libin, WEI Shouzheng, WANG Jianhong, LI Zhiyong, ZHANG Yingqiao, LI Yuxin(Welding Research Center, North University of China, Taiyuan, 030051). pp 80-87

Abstract: High speed force arc MIG welding of TC4 Ti to 5A06 Al was carried out using SAI5183 filler. The effect of welding heat input E on the joint microstructures and properties was analyzed by SEM, XRD and tensile test. The results showed that E has a significant influence on the microstructure and mechanical properties under the test process conditions:

lack of fusion occurred at the root part with the E lower than 0.93 kJ/cm, a single TiAl_3 layer with the thickness of less than 1 μm was formed at the Ti/Al interface. Burn through occurred with the E exceeded 1.20 kJ/cm, a $\text{TiAl}_3 + \text{Ti}_3\text{Al}$ double-layered structure with the thickness of 2.5 ~ 6 μm was formed at the top and middle parts, while a single TiAl_3 layer with the thickness of about 1 μm was formed at other parts. When E is in the range of 1.02 – 1.11 kJ/cm, the joint was well formed and a TiAl_3 layer with the thickness of about 0.7 – 1.5 μm was formed at the Ti/Al interface. In the selected processing range, the average tensile strength of the joint increases gradually with the increase of E , the ultimate tensile strength for the joints absent of forming defects can reach 232 MPa.

Highlights: (1) Effective bonding between TC4 Ti and 5A06 Al was achieved by using high speed force arc MIG welding, a welding-brazing bonding mechanism was revealed.

(2)The microstructural characteristics of Ti/Al interface under the high speed force arc MIG welding was revealed by the analysis of the joint microstructures.

Key words: Titanium alloy; Aluminum alloy; High speed welding; Force arc MIG welding; Microstructure

Study on the influence of weld toe radius on the evolution behavior of fatigue short cracks

ZHONG Guangsheng¹, WEI Guoqian^{1,2,3}, YAN Mengyu¹, FENG Zibin²(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3. Precision Manufacturing Institute, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China). pp 88-95

Abstract: The weld toe radius has a significant impact on the fatigue performance of welded structures. By integrating the Voronoi tessellation method and submodeling technique, a two-dimensional microscopic representative volume element (RVE) submodel was constructed at the macroscopic cruciform welded joint weld toe using a viscoplastic rate-related crystal plasticity constitutive model. The average fatigue indicator parameters of the slip band were calculated to determine the nucleation life and extension life of the slip band. The