

超声辅助钎焊镀锡 TC4/2024 接头组织及性能研究

石丁文, 李一楠*, 袁晓萱, 赫文虎, 彭子龙

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

摘要: 为了实现 TC4 钛合金低温快速连接 2024 铝合金, 采用超声辅助镀锡对 TC4 钛合金进行表面改性, 再通过超声辅助钎焊与 2024 铝合金实现低温连接。结果表明: 在 500 °C 超声辅助镀锡时, 超声促使液态 Sn 能在 TC4 表面产生一层 $Ti_2Sn_3 + \beta-Sn$ 镀层, 镀层厚度随超声时间的延长而增加; 超声辅助钎焊时, 250 °C、超声作用 2 s 即实现镀锡 TC4 与 2024 连接, 钎缝组织为大量 $\beta-Sn$ 与少量 $\alpha-Al$ 。在声场作用下, 铝元素不断在 TC4 镀层表面聚集反应, 反应界面组织演变如下: $Ti_2Sn_3(2\text{ s}) \rightarrow Ti_2Sn_3 + TiAl(5\text{ s}) \rightarrow Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3(8, 11\text{ s})$ 。接头均断裂于该界面, 当反应层为 $Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3(8\text{ s})$ 时接头剪切强度最高为 45 MPa。

关键词: TC4 钛合金; 2024 铝合金; 低温快速连接; 超声辅助镀锡; 超声辅助钎焊

中图分类号: TG456.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)04-0135-08

Study on the structure and properties of TC4/2024 dissimilar alloy joints using ultrasonic-assisted brazing and tinning

SHI Dingwen, LI Yinan*, YUAN Xiaoxuan, HE Wenhui, PENG Zilong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to realize the rapid low-temperature welding of 2024 aluminum alloy with TC4 titanium alloy, ultrasonic-assisted tinning on the surface of TC4 titanium alloy was carried out to achieve the effect of surface modification, and then 2024 aluminum alloy was brazed by ultrasonic-assisted brazing in the low temperature. The results showed that during 500 °C ultrasonic-assisted tinning, the ultrasonic caused liquid Sn to form a layer of $Ti_2Sn_3 + \beta-Sn$ coating on the surface of TC4, and the coating thickness increased with the increase of ultrasonic time. The brazing of tin-plated TC4 and 2024 was realized when the temperature was 250 °C and the ultrasonic worked for 2 s, and the structure of brazing seam was a lot of $\beta-Sn$ and a little of $\alpha-Al$. Under the action of sound field, aluminum element continuously gathered and reacted on the surface of TC4 coating. The structure evolution of the reaction interface was as follows: $Ti_2Sn_3(2\text{ s}) \rightarrow Ti_2Sn_3 + TiAl(5\text{ s}) \rightarrow Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3(8, 11\text{ s})$. The joints were all broken at the interface and the maximum shear strength of the joint was 45 MPa when the reaction layer was $Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3(8\text{ s})$.

Key words: TC4 titanium alloy; 2024 aluminum alloy; low-temperature rapid welding; ultra-

收稿日期: 2023-12-19

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023ME194)

作者简介: 石丁文(1999—), 男, 浙江台州人。硕士, 研究方向为材料连接。E-mail: m13958650463@163.com。

* 通信作者: 李一楠(1980—), 女, 山东淄博人。博士, 教授, 主要从事材料连接方面的研究。E-mail: liyinan@qut.edu.cn。

sonic-assisted tinning; ultrasonic-assisted brazing

钛合金作为轻质金属材料,密度低、比强度高且耐腐蚀性优良,具备稳定的机械性能^[1];同为轻质金属的铝合金易于加工,在航空航天、汽车交通等领域一直作为主要金属用材^[2]。基于工业生产中的轻量化及控制成本等需求,两者进行连接可以有效地在节能减排等方面发挥巨大的优势^[3]。目前,异种金属连接常用的方式有熔焊^[4]、搅拌摩擦焊^[5]、扩散焊^[6]和钎焊^[7-8]等。然而 Ti 和 Al 的热导率和线膨胀系数均相差较大,使得焊缝处在冷却过程中残余应力过大,易出现裂纹^[9]。李亚江等^[10]在 540~610 °C 将去除氧化膜的钛板和铝板在 12.4 MPa 压力作用下进行真空扩散焊,得到存在断续微裂纹的 Ti-Al 扩散层,轻微敲击即断开连接。超声辅助钎焊^[11]工艺通过钎料层控制母材两侧反应物,超声的声空化效应可以降低金属间反应温度,达到大气环境下的快速低温连接,从而避免大量 Ti-Al 系化合物的生成。

许多学者通过添加低温中间层的方式来降低金属材料焊接温度^[12]。如 LI 等^[13]采用 Sn 中间层在 220 °C 温度下实现了 Mg 和 Al 的连接,接头中 Mg 侧形成厚度大约为钎缝宽度 15% 的 Mg₂Sn 组织,避免了 Mg-Al 系金属间化合物的生成;超声的振动作用破除了铝合金表面氧化膜,形成 Al/Sn 界面的冶金结合。Sn 的熔点较低,润湿性能强,加快了界面之间不同元素的扩散和溶解速率,在超声作用下缩短了界面连接所需要的时间,剪切强度最高达到 60 MPa。由于钛合金与 Sn、Zn 等低温钎料反应温度较高,这就需要 TC4 进行表面预处理。LI 等^[14]利用纯 Zn 钎料在 500 °C 温度下超声辅助热浸镀 TC4,在其表面形成了一层含 TiZn₃ 和 TiZn₁₆ 的镀层界面,实现 TC4 表面改性的效果,在 420 °C 温度下采用纯 Zn 中间层形成了钛合金的有效连接。Sn 与 Zn 的性质相近,熔点更低且耐腐蚀性更加优良,可对 TC4 表面进行镀锡处理来进一步降低焊接温度。

为了实现低温快速钎焊 Ti 和 Al 异种金属,本文首先通过超声辅助镀锡工艺对 TC4 钛合金表面进行改性处理,制备适合低温钎焊的镀层,研究超声时间对镀层形貌的影响;其次,利用超声辅助钎焊工艺连接 TC4 与 2024 铝合金,实现 Ti 和 Al 异种金属的低温连接,研究超声时间对反应界面微观组织演变和接头力学性能的影响。

1 试验过程

本文采用的母材为 TC4 钛合金和 2024 铝合金,TC4 化学成分为(质量分数):5.50% Al,3.50% V,0.30% Fe,0.015% H,0.10% C,0.05% N,0.20% O,余量 Ti;2024 化学成分为(质量分数):3.80% Cu,1.20% Mg,0.30% Mn,0.50% Si,0.10% Cr,0.25% Zn,余量 Al。镀锡试验前先将 TC4 钛合金板材加工成 100 mm×20 mm×3 mm 的长条状,用砂纸打磨去除表面氧化膜后使用 HF 和 HNO₃ 的混合酸液去除 TC4 母材表面残余氧化膜,再次打磨后利用丙酮和无水乙醇去除表面油污。切取镀锡处理后的尺寸为 20 mm×20 mm×3 mm 的 TC4 方块作为后续连接试验母材。2024 尺寸为 20 mm×20 mm×3 mm,砂纸打磨后依次放入质量分数均为 20% 的 NaOH 溶液和 HNO₃ 溶液中,最后 TC4 母材和 Sn 箔通过丙酮和无水乙醇清洗待焊。

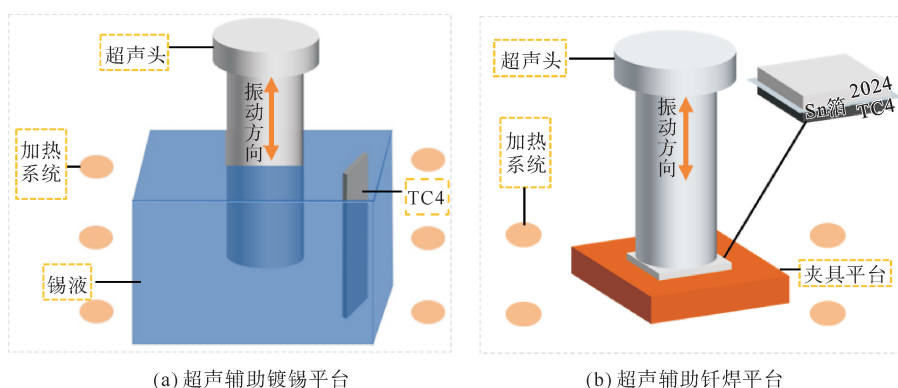


图1 镀锡及焊接平台示意

采用如图 1(a)所示的超声辅助镀锡平台,超声振动频率为 20 kHz,振幅为 7~13 μm ,热浸温度为 500 $^{\circ}\text{C}$,超声时间为 1~8 min;超声辅助钎焊平台如图 1(b)所示,超声振动频率为 30 kHz,振幅为 8~12 μm ,焊接压力为 0.15 MPa,焊接温度达到 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,施加 2~11 s 的超声作用,随后置于空气中冷却。采用 JSM-7800F 型扫描电子显微镜(SEM)观察钎缝并通过 X-MaxN 能谱仪(EDS)分析各相化学成分;采用型号为 WDW-50 kN 的拉伸试验机测试接头剪切强度;采用 Maxima XRD-700 型 X 射线衍射分析仪分析断口物相组成。

2 结果与分析

2.1 预镀锡 TC4 表面镀层微观形貌及组织

图 2 为 500 $^{\circ}\text{C}$ 时对 TC4 钛合金超声辅助镀锡 1~8 min 的组织形貌及 XRD 分析。其中,图 2(a)~(d)为镀层横截面形貌,在 1 min 后 TC4 表面即出现一层浅灰色物相,随着超声时间的增加,该相厚度从 0.54 μm 增加至 2.47 μm 。根据该生成相中的 A 点和 B 点(图 2(b))的元素原子百分比(表 1),发现点 A 中 Ti 含量达到 39.04%,Sn 含量为 60.06%,初步判断该物相为新生成的 Ti_2Sn_3 ,镀层外为 $\beta\text{-Sn}$;图 2(e)为超声 3 min 母材利用硝酸腐蚀去除多余 Sn 钎料后表面形貌,图中大面积为浅灰色相,局部出现块状相,C 点和放大区域的 D 点原子百分比数据与 A 点一致,判断两相均为 Ti_2Sn_3 ,表明镀层在 TC4 表面均匀分布;

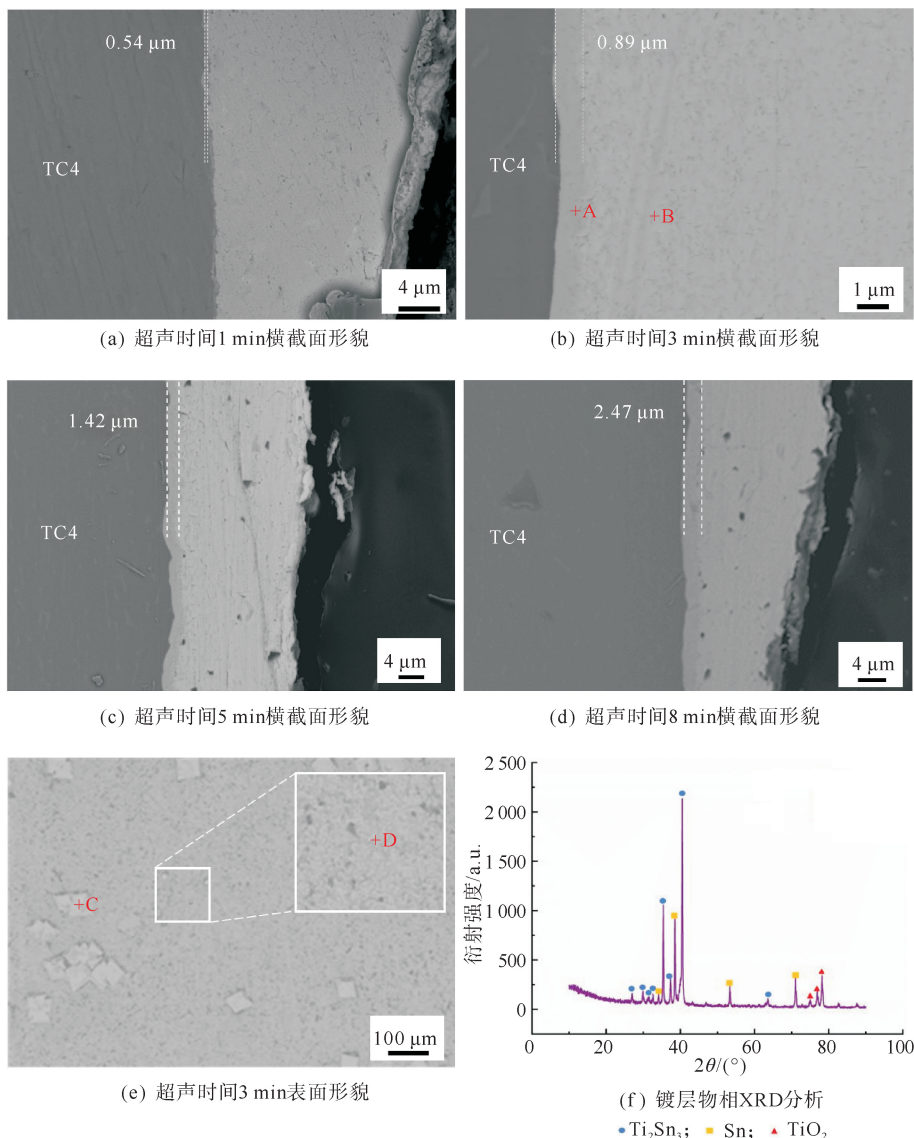


图 2 不同超声时间镀层形貌及镀层物相 XRD 分析

根据图 2(f) 所示的镀层表面 XRD 物相分析, Ti_2Sn_3 的衍射峰强度最高且峰量较多。以上结果表明, TC4 钛合金在 500 °C 条件下通过超声辅助镀锡工艺, 在其表面生成了一层 $Ti_2Sn_3 + \beta-Sn$ 镀层, 且镀层厚度与超声时间成正比; 超声的空化效应和声流作用破除了 TC4 表面的氧化膜, 加速了 Ti 和 Sn 之间的反应速率, 实现了 TC4 钛合金的表面改性处理。

2.2 镀锡 TC4 / Sn / 2024 钎缝的微观组织

图 3 为镀锡时间 5 min 的 TC4 钛合金在 250 °C 采用不同超声时间连接铝合金的钎缝组织形貌。图 4 是 TC4 表面反应层的 XRD 结果。如图 3(a) 所示, 超声时间 2 s 时 TC4 和 2024 即实现连接, 钎缝组织为

表 1 图 2 中所标点元素原子百分比及可能相

| 位置点 | Ti/% | Sn/% | Al/% | 可能相 |
|-----|-------|--------|------|------------|
| A | 39.04 | 60.96 | 0 | Ti_2Sn_3 |
| B | 0.00 | 100.00 | 0 | $\beta-Sn$ |
| C | 35.74 | 64.26 | 0 | Ti_2Sn_3 |
| D | 38.71 | 61.29 | 0 | Ti_2Sn_3 |

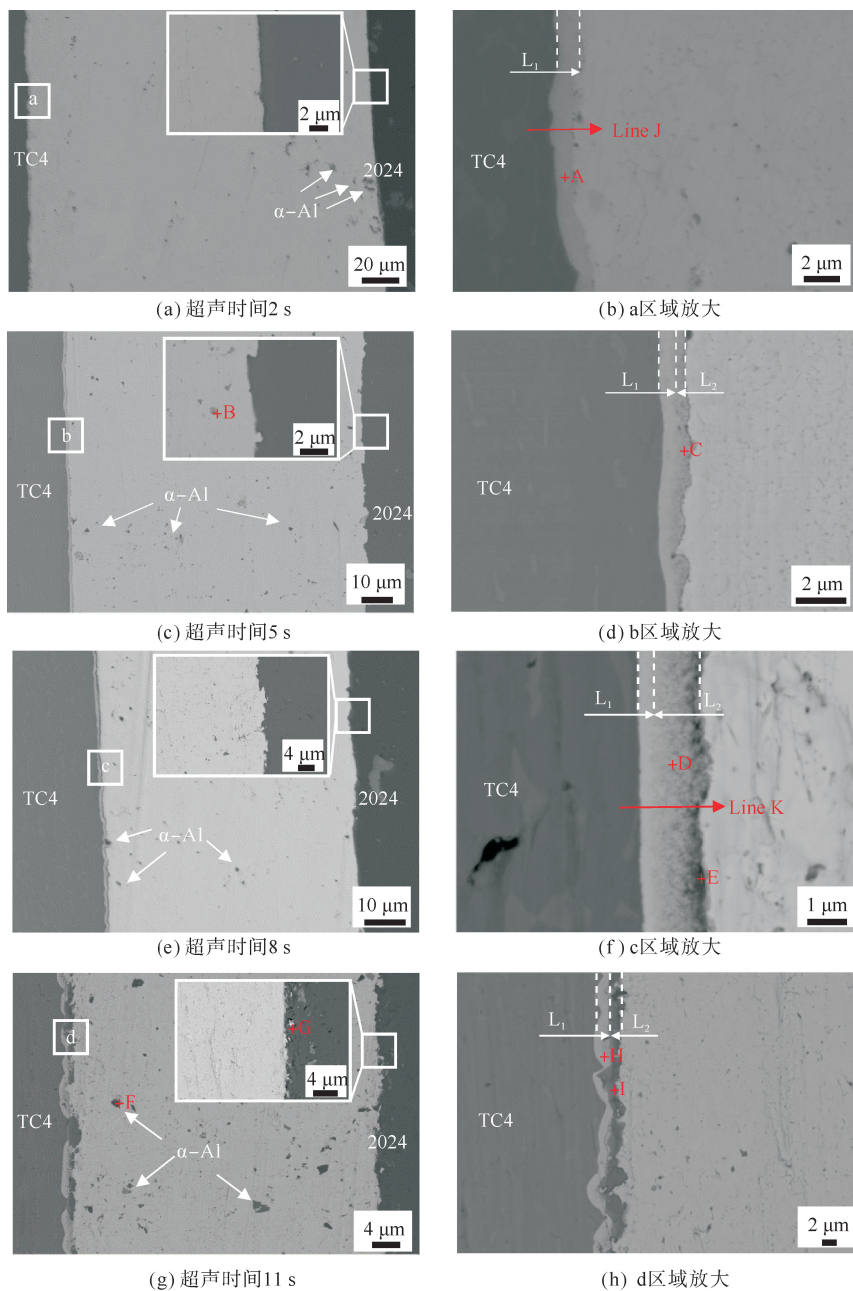


图 3 250 °C 条件下不同超声时间钎缝组织形貌

β -Sn 和极少量的 α -Al(图 5(a));从钎缝/2024 界面可以看出,虽然大部分界面保持平直状态,但是在局部区域有颗粒状 α -Al 存在,这是因为虽然 Sn 在 Al 中的溶解度极低,并不会生成反应物,但是超声作用液态 Sn 可以溶解 α -Al^[15],形成连接;TC4 一侧,其表面的镀层呈现连续分布(图 3(b)),结合 A 点能谱(表 2)看出除了 Ti_2Sn_3 相外还存在 5.9%的 Al 元素,说明 2024 中的 Al 元素超声 2 s 即可扩散到镀层表面,Line J 线扫描结果(图 5(c))显示,反应层 I 区域为 Ti_2Sn_3 层结合区,TC4 中的 Al 元素含量在 II 区域并未上升,表明超声 2 s 时镀层未生成 Ti-Al 相。超声 5 s 时(图 3(c)),颗粒状 α -Al(B 点)逐渐向钎缝中心迁移,钎缝/2024 界面开始变得崎岖不平,说明液态 Sn 在声场作用下促使 2024 表面的 α -Al 继续溶解;扩散过来的 Al 元素聚集在 TC4 镀层表面(图 3(d)),C 点能谱显示 Al 元素含量增加到 28.92%,结合图 4 的 XRD 分析可以看出,焊前 TC4 表面由 $Ti_2Sn_3 + \beta$ -Sn 组成的镀层向焊后 $Ti_2Sn_3 + TiAl$ 组成的反应层转变,将该反应层继续细分为 $L_1: Ti_2Sn_3$ 和 $L_2: Ti_2Sn_3 + TiAl$ 。当超声延长至 8 s 时(图 3(e)),钎缝/2024 界面崎岖度继续增大,说明更多的 α -Al 被溶解;从图 3(f)可知, L_2 层厚增加,说明更多的 Al 元素聚集在此,Line K 线扫描结果(图 5(d))显示 II 区域 Al 含量迅速攀升,直到 III 区域达到顶峰,推测两区域生成了不同的 Ti-Al 系化合物,D 点位于 L_1 与 L_2 的交界处,Al 含量与超声 5 s 时的 C 点成分一致,E 点位于 L_2 层与钎缝交界处,Al 含量为 63.77%,结合图 4 中的 XRD,TC4 表面

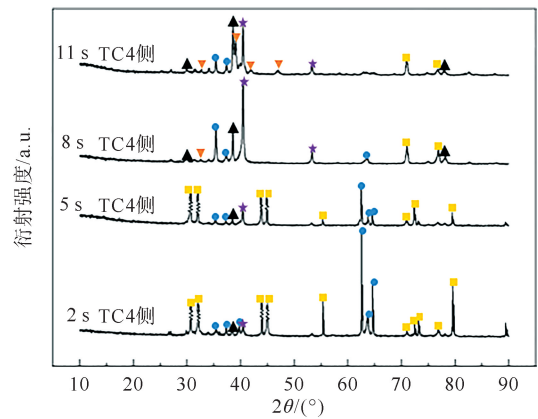


图 4 TC4镀层表面反应层XRD分析

▲TiAl; ▼TiAl₂; ●Ti₂Sn₃; ☆Ti; ■Sn

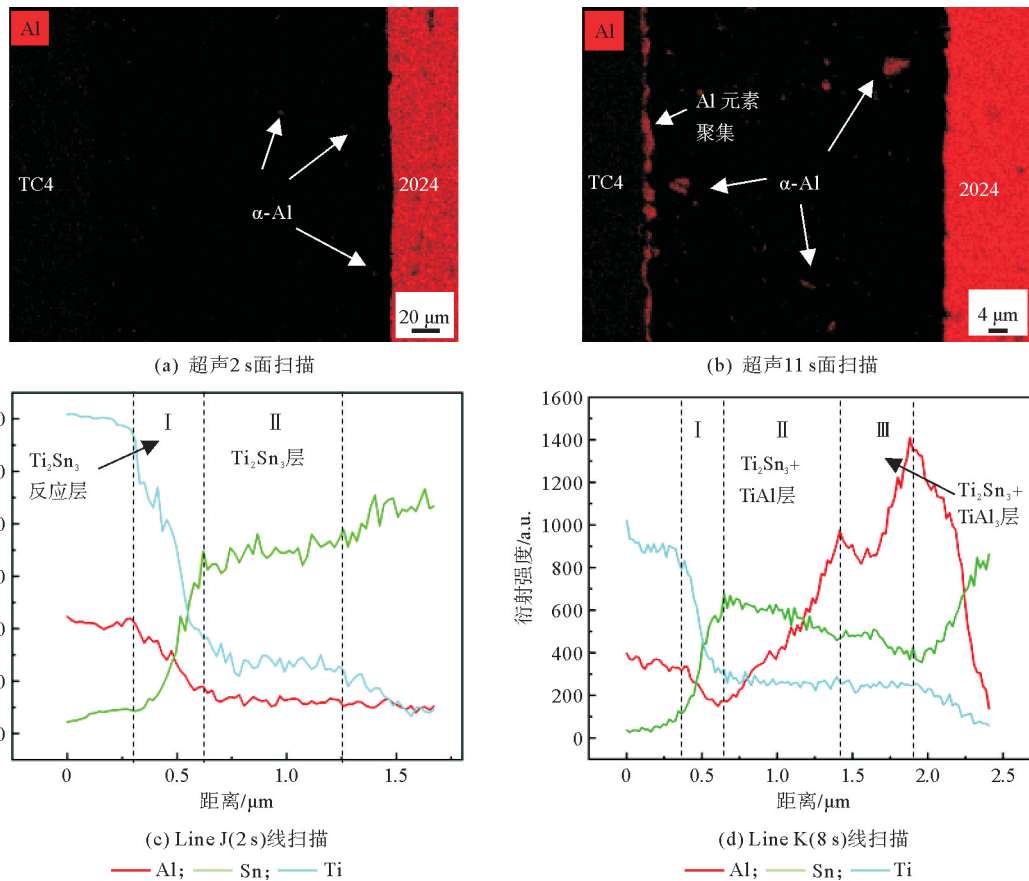


图 5 钎缝镀层线扫描和界面形貌面扫描

反应层除了 Ti_2Sn_3 、 $TiAl$ 外出现了 $TiAl_3$ 。超声 11 s 时(图 3(g)), 钎缝/2024 界面崎岖度继续增大, 还出现了液态 Sn 沿 2024 晶间溶解的现象, 如嵌入在 $\alpha-Al$ 中 G 点所示; 钎缝中出现了大颗粒的 $\alpha-Al$ (F 点), 结合图 5(b) 的 Al 元素面扫描图, Al 元素在钎缝中数量逐渐增多, 并且主要聚集在 TC4 镀层表面; 从 TC4 一侧反应界面(图 3(h)) 可以看出 L_1 、 L_2 均出现断续分布状态, L_1 层仍然为 Ti_2Sn_3 (H 点), L_2 中 I 点位置 Sn 含量为 3.09%, 说明 Ti_2Sn_3 明显减少, Al 含量增加到 73.98%, Ti 含量为 22.93%, 比例为 3:1, 结合图 4 中的 XRD 可知, L_2 层主要是由大量 $TiAl_3$ 、 $TiAl$ 和少量 Ti_2Sn_3 组成。TC4 侧反应层物相变化规律与李亚江等^[10] 利用真空扩散焊接 Ti、Al 的物相反应规律一致。结果表明, 随着超声时间从 2 s 增至 11 s, TC4 表面反应层有以下变化: Ti_2Sn_3 (2 s) \rightarrow $Ti_2Sn_3 + TiAl$ (5 s) \rightarrow $Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3$ (8 s, 11 s); 钎缝由大量 $\beta-Sn$ 与少量 $\alpha-Al$ 组成, $\alpha-Al$ 数量不断增加; 钎缝/2024 界面不断被 Sn 溶解, 由平直转变为崎岖不平。

图 6 为 Ti_2Sn_3 层(L_1) 和 $Ti_2Sn_3 + Ti-Al$ 化合物层(L_2) 厚度随着超声时间变化的情况。随着超声时间增加, L_1 层厚度不断减少, L_2 层厚度不断增加。超声 2 s 时未生成 Ti-Al 化合物层, 因此 TC4 一侧反应层未出现 L_2 层。超声 5 s 时, 反应层中 L_2 由约 0.45 μm 厚的 $Ti_2Sn_3 + TiAl$ 组成, 此时 L_1 层厚度下降得最为显著, 表明 Al 元素不断聚集在反应层中。超声 8 s 时, L_2 转变为 $Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3$ 层, 厚度增幅较大, 推测 $TiAl_3$ 的生成需要更多 Al 元素的扩散进入, 此时 $L_1 + L_2$ 厚度(1.50 μm) 超过预镀层厚度(1.42 μm), 表明 $TiAl_3$ 向钎缝一侧生长。在超声 11 s 时, 部分 TC4 反应层完全转化为 $TiAl_3$ (图 3(g)), 在图 3(h) 中发现的 L_1 层厚度与 8 s 时变化不大, L_2 层主要由 $TiAl_3$ 组成, $TiAl_3$ 层向钎缝一侧断续生长, L_2 厚度大幅度提高, 至少达到 1.22 μm 。结果表明, Ti-Al 化合物随着超声时间延长不断取代 Ti_2Sn_3 预镀层, 并向钎缝一侧生长。

表 2 图 3 中所标点的元素原子百分比及可能相

| 位置点 | Ti/% | Sn/% | Al/% | 可能相 |
|-----|-------|-------|-------|------------------------|
| A | 38.85 | 55.25 | 5.90 | Ti_2Sn_3 |
| B | 0.36 | 25.71 | 73.93 | $\alpha-Al$ |
| C | 29.16 | 41.92 | 28.92 | $Ti_2Sn_3 + TiAl$ |
| D | 30.96 | 41.85 | 27.18 | $Ti_2Sn_3 + TiAl$ |
| E | 22.75 | 13.48 | 63.77 | $Ti_2Sn_3 + TiAl_3$ |
| F | 0.00 | 61.93 | 38.07 | $\beta-Sn + \alpha-Al$ |
| G | 0.52 | 68.38 | 31.10 | $\beta-Sn + \alpha-Al$ |
| H | 37.66 | 58.31 | 4.04 | Ti_2Sn_3 |
| I | 22.93 | 3.09 | 73.98 | $TiAl_3$ |

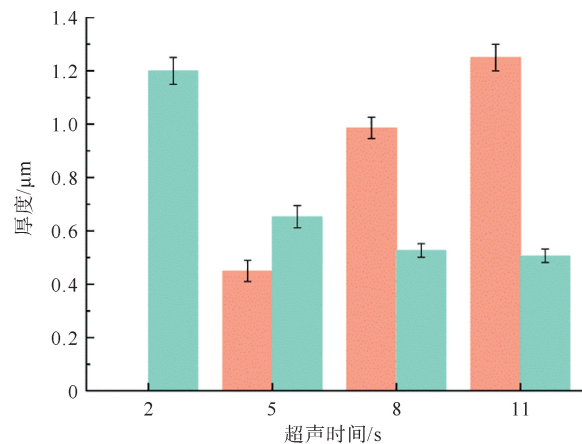


图 6 不同超声时间 L_1 层厚度和 L_2 层厚度变化

■ L_1 层厚度; ■ L_2 层厚度

2.3 TC4 表面反应层物相变化热力学分析

为了更好地解释 Ti-Al 相的生成, 根据 Miedema 模型计算了 250 $^{\circ}C$ (热力学温度 523.15 K) 下二元体系和三元体系的吉布斯自由能(G)(图 7)。如图 7(a) 所示, 在整个二元体系中, Ti-Al 的自由能最低, 说明 Ti-Al 系金属间化合物的反应更容易发生。图 7(b) 为 Ti-Sn-Al 三元体系的吉布斯自由能, X_{Ti} 、 X_{Sn} 、 X_{Al} 分别代表各自元素含量, 图中可见 Ti 元素更倾向于与 Al 元素发生反应。在 250 $^{\circ}C$ 时 G_{Ti} 、 G_{Sn} 、 G_{Al} 均为负值, 说明在此温度下该三元体系中始终存在自发反应; 该体系中二元相自由能最低处位于 TiAl, 说明在 Al 元素与 Ti 元素均充足的条件下, 生成的金属间化合物为 TiAl。在实际焊接过程中, 热浸镀生成的 Ti_2Sn_3 (-53 kJ/mol) 首先转化为 TiAl (-57 kJ/mol), 随着 Al 元素大量扩散进入 TC4 一侧反应层, 发生了 TiAl 向 $TiAl_3$ 的转变。

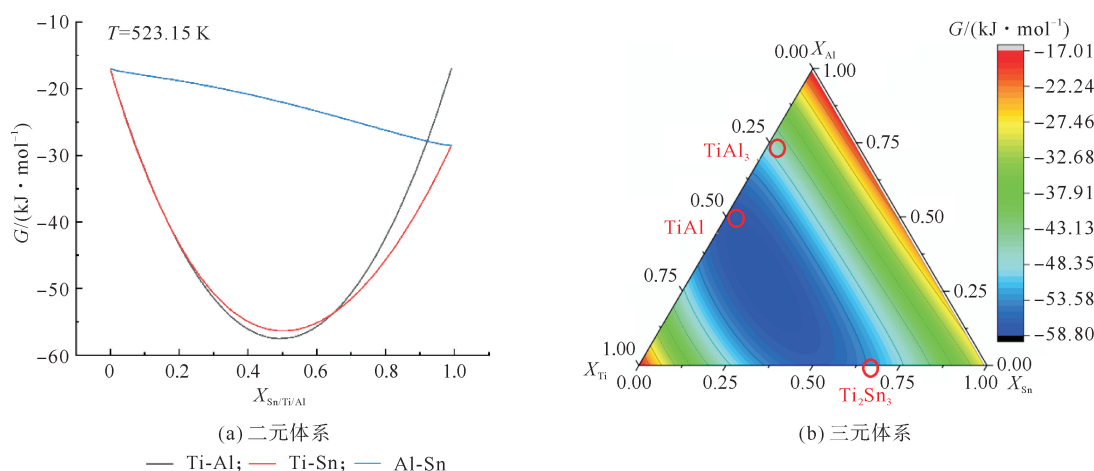


图 7 Ti-Sn-Al二元体系及三元体系热力学计算

2.4 镀锡 TC4/Sn/2024 钎缝力学性能分析

图 8 为不同超声时间接头剪切强度变化及力-位移曲线,接头剪切强度和试验力均呈先上升后下降的趋势;在 8 s 时试验力达到 2.26 kN(图 8(b)),剪切强度最高为 45 MPa(图 8(a))。试验力达到顶点后迅速下降表明接头断裂形式均属于脆性断裂,结合图 8(a)断口形貌,接头强度与 TC4 反应层物质相关。超声 2 s 时强度即可达到 26 MPa,TC4 一侧反应层主要为 Ti_2Sn_3 ,接头中为大量 β -Sn 和少量 α -Al,虽然纯 Sn 的强度较低,但是在较长的超声时间作用下,Al/Sn 界面会析出大量 α -Al,有助于增强焊缝强度,增强接头力学性能^[16],因此 2 s 时接头断裂在 Ti_2Sn_3 层;超声 5 s 时,TC4 一侧反应层出现 TiAl,此时强度提升至 35 MPa,试验力达到 1.75 kN,表明 TiAl 增强了 TC4 反应层的力学性能,接头断裂位置为 $Ti_2Sn_3 + TiAl$ 层;超声 8 s 时,TC4 一侧反应层 TiAl 相变厚且与 β -Sn 结合处出现少量 $TiAl_3$,但是 TC4 反应层内侧仍然为连续、较薄的 Ti_2Sn_3 层,此时接头强度最高达到 45 MPa,结合断口形貌,断裂位置为 TC4 反应层 $Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3$ 一侧;超声 11 s 时,虽然钎缝内出现大颗粒 α -Al,但是 TC4 一侧反应层的 $TiAl_3$ 迅速生长,结合图 6 发现主要为 $TiAl_3$ 的 L_2 层厚度大幅度增加至 $1.22 \mu m$,极大提高了接头的脆性性能,且在部分 TC4 一侧反应层形成了断续连接(图 3(g)),导致接头强度大幅度下降,仅为 10 MPa,接头断裂于该反应层($Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3$)。

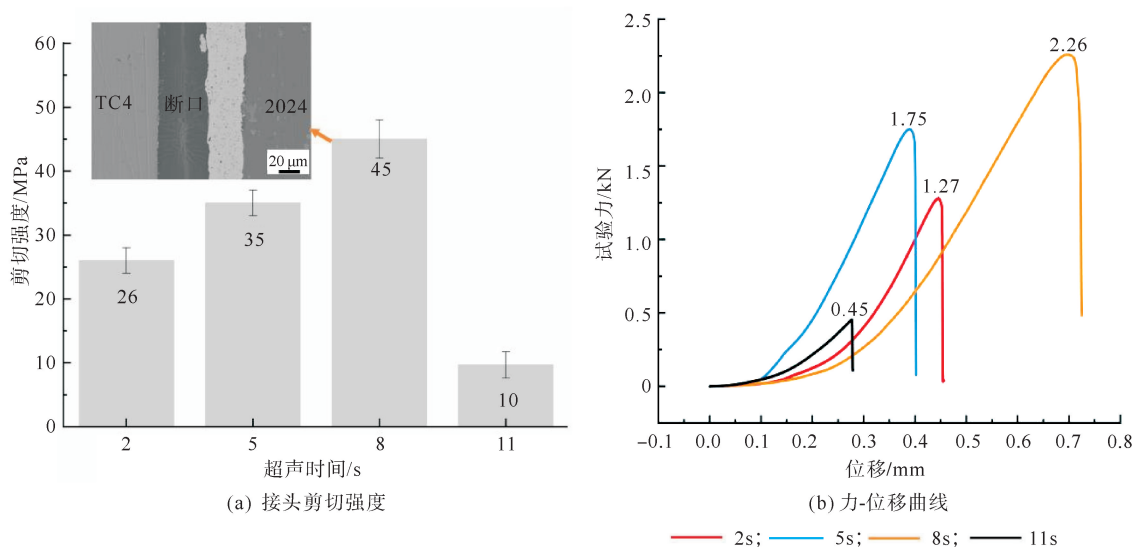


图 8 不同超声时间接头剪切强度及力-位移曲线

3 结论

1) 在 500 °C 时对 TC4 钛合金超声辅助镀锡可以在其表面得到一层 $Ti_2Sn_3 + \beta-Sn$ 镀层,当超声时间为 1~8 min 时,镀层厚度由 0.54 μm 增至 2.47 μm 。

2) 大气环境下,250 °C,超声 2 s 即可实现镀锡 TC4 与 2024 的超声辅助连接。在超声作用下液态 Sn 不断溶解 $\alpha-Al$,除了以颗粒 $\alpha-Al$ 分布在钎缝中,还不断聚集至 TC4 表面镀层中;随着超声时间从 2 s 增加至 11 s,发生 $Ti_2Sn_3(2 s) \rightarrow Ti_2Sn_3 + TiAl(5 s) \rightarrow Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3(8、11 s)$ 的转变。

3) 超声 8 s 时接头剪切强度最高为 45 MPa,试验力达到 2.26 kN,接头断裂位置位于 $(Ti_2Sn_3 + TiAl + TiAl_3)$ 层。

参考文献(References):

- [1] 孙文君,王善林,陈玉华,等. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术,2019,62(18):63-72.
SUN Wenjun, WANG Shanlin, CHEN Yuhua, et al. Development of advanced welding technologies for titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(18): 63-72.
- [2] 王泽荫. 铝合金焊接技术现状研究[J]. 世界有色金属,2021(10):4-5.
WANG Zeyin. Research on status of the aluminum alloy welding technology[J]. World Nonferrous Metals, 2021(10): 4-5.
- [3] 郑德宇,夏玉峰,滕海灏,等. 化学元素在钛铝异种合金焊接增材中的作用研究进展[J]. 材料热处理学报,2021,42(6):11-21.
ZHENG Deyu, XIA Yufeng, TENG Haihao, et al. A review of chemical elements in welding and additive of titanium aluminum dissimilar alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(6): 11-21.
- [4] 陈曦,姜楠,毕江,等. 钛/铝激光熔钎焊接头原位 TEM 拉伸断裂行为[J]. 焊接学报,2021,42(11):22-28.
CHEN Xi, JIANG Nan, BI Jiang, et al. In-situ TEM tensile fracture behavior of titanium/aluminum laser brazing joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(11): 22-28.
- [5] 刘正涛,李忠盛,陈大军,等. 钛/铝异种金属搅拌摩擦焊技术研究现状[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(8):106-111.
LIU Zhengtao, LI Zhongsheng, CHEN Dajun, et al. Research status of friction stir welding of Ti/Al dissimilar metals[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(8): 106-111.
- [6] 李萌,刘德义,任瑞铭. Ti/Al 扩散焊接界面的组织与性能[J]. 大连交通大学学报,2015,36(5):74-78.
LI Meng, LIU Deyi, REN Ruiming, et al. Microstructure and properties of diffusion welding interface of Ti/Al[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(5): 74-78.
- [7] 马志鹏,闫久春,毕凤琴,等. 钎焊时间对钛/铝基复合材料接头组织及性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2014,37(4):58-61.
MA Zhipeng, YAN Jiuchun, BI Fengqin, et al. Effect of brazing time on microstructure and properties of brazed joints of titanium to SiCp/Al composites[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(4): 58-61.
- [8] 饶文姬,王志英,魏守征. 钛/铝异种轻金属熔钎焊研究进展[J]. 热加工工艺,2019,48(21):17-20.
RAO Wenji, WANG Zhiying, WEI Shouzheng. Research progress on welding-brazing of titanium/aluminum dissimilar light-weight alloys[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(21): 17-20.
- [9] 田银宝,申俊琦,胡绳荪,等. 钛/铝异种金属冷金属过渡增材制造[J]. 焊接学报,2019,40(8):13-17.
TIAN Yinbao, SHEN Junqi, HU Shengsun, et al. Ti/Al dissimilar metals fabricated by cold metal transfer additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(8): 13-17.
- [10] 李亚江,GERASIMOV S A,王娟,等. Ti/Al 异种材料真空扩散焊及界面结构研究[J]. 材料科学与工艺,2007(2):206-210.
LI Yajiang, GERASIMOV S A, WANG Juan, et al. A study of vacuum diffusion bonding and interface structure of Ti/Al dissimilar materials[J]. Materials Science and Technology, 2007(2): 206-210.
- [11] 吴志远,崔壮,周韬帅,等. Cu 中间层超声辅助瞬间液相扩散连接 MB8 镁合金机制研究[J]. 青岛理工大学学报,2020,41(6):96-101.
WU Zhiyuan, CUI Zhuang, ZHOU Taoshuai, et al. Study on mechanism of ultrasonic assisted transient liquid phase bonding of MB8 magnesium alloy with Cu interlayers[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(6): 96-101.
- [12] 陈晨,张亮,王曦,等. Zn-Al 系钎焊材料的研究进展[J]. 材料导报,2023,37(22):142-154.
CHEN Chen, ZHANG Liang, WANG Xi, et al. Research progress of Zn-Al brazing materials[J]. Materials Reports, 2023, 37(22): 142-154.
- [13] LI Z, XU Z, ZHU D, et al. Control of Mg_2Sn formation through ultrasonic-assisted transient liquid phase bonding of Mg to Al[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 524-529.