

# Ti/Al 异种金属微电阻点焊接头的形成过程及形成机理研究

高原, 邓怀波, 陈玉华

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063)

**摘要:** 目的 对 0.2 mm 厚的 TC4 和 2A12 薄板进行微电阻点焊研究, 分析其接头的形成过程及形成机理。方法 通过 EDS 以及微区 XRD 等测试手段对熔核与母材界面各区域进行分析, 研究界面处的元素扩散以及成分分布。结果 对熔核与界面进行 EDS 线扫描可以发现, 熔核内部区域 Ti, Al 含量比较均匀, 说明熔核内部的元素扩散较为充分。熔核与铝侧母材界面处的针状化合物经过分析, 推测其主要成分为 Ti-Al 金属间化合物。熔核内部的主要成分为  $\text{Al}_3\text{Ti}$  金属间化合物。熔核与 Ti 侧母材界面处生成了  $\text{AlTi}_3$  和  $\text{AlTi}_2$  金属间化合物。结论 熔核内部以及熔核与母材交界处均生成了 Ti-Al 系金属间化合物。接头形成过程基本可以分为“固相连接”、“钎焊连接”、“熔化连接”、“熔核的形成与长大”4 个阶段。

**关键词:** 异种金属; 微电阻点焊; 机理研究

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.05.008

**中图分类号:** TG206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)05-0050-04

## Formation Process and Mechanism of Ti/Al Dissimilar Metal Joint Welded by Micro-resistance Welding

GAO Yuan, DENG Huai-bo, CHEN Yu-hua

(National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,  
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study micro-resistance welding of TC4 alloys and 2A12 sheets at the thickness of 0.2 mm and analyze the formation process and mechanism of joint. The element diffusion and composition distribution at the interface between the nugget and the base metal were studied by means of EDS and XRD. EDS line scanning of the nucleation and interface showed that the content of Ti and Al in the inner region of the nugget was more uniform, which indicated that the element diffusion in the nugget was more adequate. It was found that the needle-like compounds at the interface between the nugget and the aluminum side base metal were mainly Ti-Al intermetallic compounds.  $\text{Al}_3\text{Ti}$  intermetallic compound was the main component in the nugget.  $\text{AlTi}_3$  and  $\text{AlTi}_2$  intermetallic compounds were formed at the interface between the nucleation and Ti side base metal. Intermetallic compounds of Ti-Al were formed at the junction of the nugget and the junction of the nucleus and the base metal. The forming process of the joint can be divided into four stages: "solid phase connection", "brazing connection", "melting connection" and "formation and growth of nugget".

**KEY WORDS:** dissimilar metal; micro-resistance welding; mechanism study

收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(51265042); 江西省优势科技创新团队建设专项计划(20171BCB24007); 航空科学基金(2017ZE56010); 江西省青年科学家培养计划(20153BCB23038)

作者简介: 高原(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微连接。

通讯作者: 陈玉华(1979—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为新材料及异种材料焊接、电弧增材制造等。

铝合金和钛合金由于具有比强度高、耐腐蚀和耐高温等优良性能而被广泛应用于汽车制造、航空航天工业等领域<sup>[1]</sup>。钛和铝的物理性质如导热系数、熔点、晶体结构差别很大,另外钛在加热和冷却时易发生脆化,使用常规的熔焊方法实现 Ti 和 Al 的焊接有很大的难度<sup>[2]</sup>。

如今研究 Ti/Al 异种金属焊接工艺较先进的研究机构有乌克兰巴顿焊接研究所和美国国家航空航天局<sup>[3]</sup>。国外钛铝复合构件已在航空航天领域上得到广泛应用,然而我国至今还没有较为成熟的 Ti/Al 异种金属的焊接工艺。目前国内外学者分别采用超声波焊技术<sup>[4-5]</sup>、激光焊技术<sup>[6-7]</sup>、搅拌摩擦焊技术<sup>[8]</sup>、扩散焊技术<sup>[9-10]</sup>和真空钎焊技术<sup>[11-12]</sup>等手段实现了钛/铝异种金属的焊接。

微电阻点焊一般应用于电子元器件以及医疗器械等方面<sup>[13]</sup>。文中通过研究 Ti/Al 异种金属微电阻焊接工艺参数对接头组织性能和接头形成机理的影响,对微电阻点焊的研究具有一定的学术价值。

## 1 实验

实验材料选用的 2A12 铝合金为 0.2 mm 薄片, TC4 钛合金为 0.2 mm 退火态薄片。TC4 钛合金含有

质量分数为 6.0% 的 Al, 4.0% 的 V, 0.026% 的 Fe, 0.015% 的 C, 0.008% 的 N, 0.007% 的 H, 余量为 Ti。2A12 铝合金含有质量分数为 4.8% 的 Cu, 1.2% 的 Mg, 0.3% 的 Zn, 0.9% 的 Mn, 0.15% 的 Ti, 0.1% 的 Ni, 余量为 Al。TC4 合金与 2A12 铝合金的微电阻点焊采用搭接的方式进行焊接。实验中焊接电流为 3.5~4.5 kA, 焊接时间为 8~12 ms, 电极压力为 120~200 N。借助金相观察、EDS、XRD 等方法,对接头元素扩散以及成分分布进行研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 点焊接头界面成分分析

为了深入研究 Ti/Al 微电阻点焊接头的形成机理,对最佳焊接工艺参数下的点焊接头进行了 EDS 分析。点焊接头的元素线扫描能谱分析见图 1a,线扫描选择从铝侧母材向熔核内部深入。

线扫描曲线见图 1b,可以看出,Al 侧母材与熔核界面处能够观察到 Ti 元素,同时对比 Ti 和 Al 元素的比例,可以得出界面处有 Ti-Al 金属间化合物的生成。另外观察熔核内部的元素分布情况,可以看出 Ti 元素和 Al 的分布曲线在熔核内部分布较为均匀,说明熔核内部元素扩散较为充分。

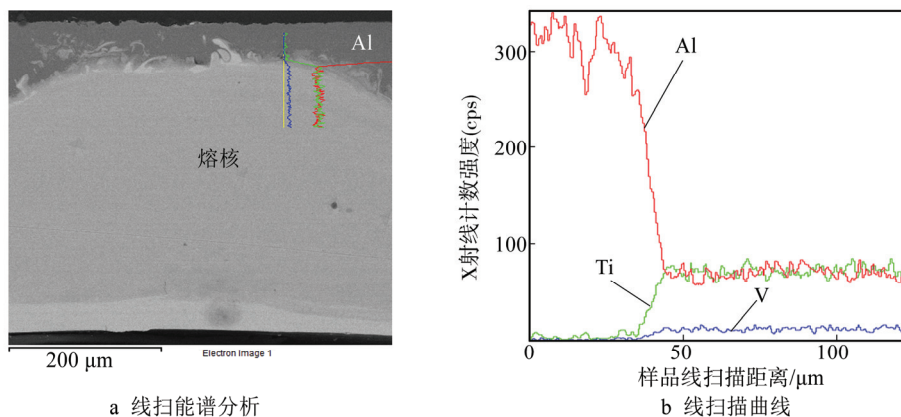


图 1 线扫描能谱分析及曲线

Fig.1 Energy spectrum analysis and curve of line scanning

熔核中心区域的点扫能谱分析见图 2,对应的各个点的点扫 EDS 分析结果见表 1。图 2a 为 EDS 分析选取区域示意图。由表 1 可以得出,区域“1”熔核中心区域“月牙”状组织中, Ti 元素原子数分数为 85.02%, Al 元素原子数分数仅为 11.54%。由此能够推测出该区域包含了进入熔核内部破碎的 TC4 颗粒和少量 Ti-Al 金属间化合物。区域“2”是熔核内颗粒状组织,由表 1 中 Ti 和 Al 的原子比例,以及图 2b 微区 XRD 分析能够推测出该区域的主要成分为 TiAl 金属间化合物。区域“3”为熔核基体组织,根据表 1 中可以得出 Ti 元素原子数分数为 21.03%, Al 元素原子

数分数为 78.1%。结合图 2b 的微区 XRD 分析能够推测出熔核基体的主要成分为  $Al_3Ti$  金属间化合物。

熔核/Ti 侧界面交界处的 EDS 点扫能谱分析见图 3,对应各点的点扫 EDS 分析结果见表 2。图 3a 为 EDS 分析选取区域示意图。区域“1”是破碎的熔核颗粒与 Al 侧母材交界区域。由表 2 分析结果得出,该区域的 Al 元素原子数分数为 53.5%, Ti 元素原子数分数为 45.04%, V 的原子数分数为 1.47%。根据以上 3 种元素的原子比例能够推断出该区域生成了 Ti-Al 金属间化合物。区域“2”为熔核与 Ti 侧母材界面生成的颗粒状化合物。由表 2 的分析结果可以得出,该处

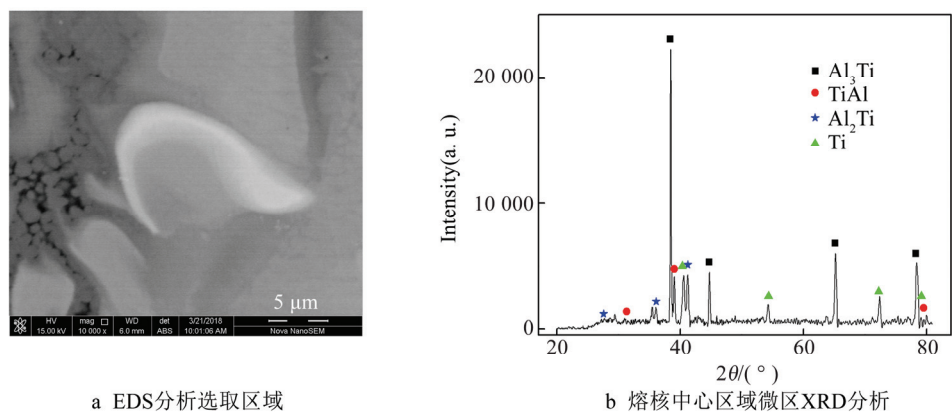


图 2 熔核中心区域的点扫能谱分析  
Fig.2 Spot scanning energy spectrum analysis on central region of a nugget

表 1 熔核中心区域元素 EDS 分析结果  
Tab.1 Results for EDS analysis on elements in the central region of nugget %

| 元素 | 区域1   |       | 区域2   |       | 区域3   |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 质量分数  | 原子数分数 | 质量分数  | 原子数分数 | 质量分数  | 原子数分数 |
| Al | 6.83  | 11.54 | 36.38 | 50.44 | 66.7  | 78.1  |
| Ti | 89.33 | 85.02 | 60.76 | 47.46 | 31.89 | 21.03 |
| V  | 3.84  | 3.44  | 2.87  | 2.1   | 1.41  | 0.87  |

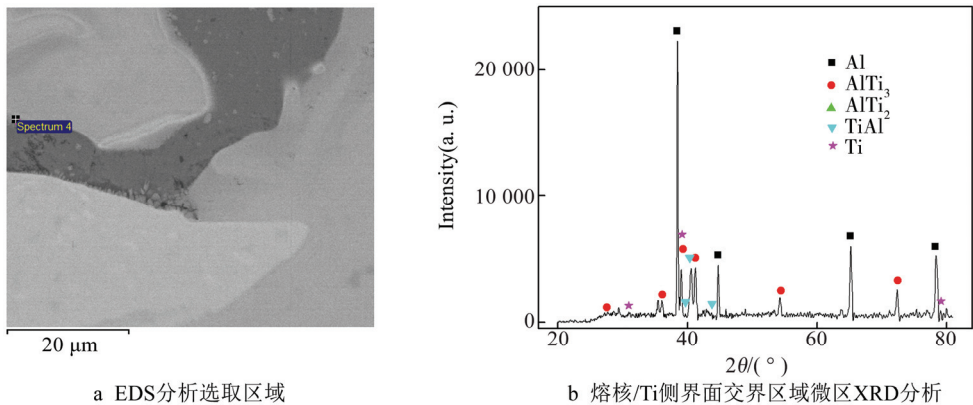


图 3 熔核/Ti 侧界面交界处的 EDS 点扫能谱分析  
Fig.3 EDS spot scanning energy spectrum analysis at the interface of nugget/Ti side

表 2 熔核/Ti 侧界面交界处 EDS 分析结果  
Tab.2 Results for EDS analysis on interface of nugget/Ti side %

| 元素 | 区域1   |       | 区域2   |       | 区域3   |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 质量分数  | 原子数分数 | 质量分数  | 原子数分数 | 质量分数  | 原子数分数 |
| Al | 39.27 | 53.5  | 71.42 | 81.61 | 26.58 | 39.18 |
| Ti | 58.69 | 45.04 | 28.58 | 18.39 | 70.75 | 58.74 |
| V  | 2.03  | 1.47  | 0     | 0     | 2.66  | 2.08  |

Al 元素原子数分数为 81.61%，Ti 元素原子数分数为 19.39%。结合图 3b 的微区 XRD 分析能够推测出该区域存在少量的金属间化合物。区域“3”为破碎的熔核颗粒，由表 2 的分析结果能够得出，该区域的 Al 元素原子数分数为 39.18%，Ti 元素原子数分数为 58.74%，V 的原子数分数为 2.08%。结合微区 XRD

分析，推测出该区域生成了 AlTi<sub>3</sub> 和 AlTi<sub>2</sub> 金属间化合物。

2.2 接头形成过程

基于研究结果分析可得，接头形成过程基本可以分成以下 4 个阶段。

第1阶段:在接触电阻提供的析出热量下,由于Al板和铜电极的导热作用,Ti板中心区域温度最高并形成熔核。此时Ti/Al界面处的温度未超过Al的熔点,熔核在Ti板中心区域长大,界面未发生熔化,此时两板为固相连接。

第2阶段:随着析出热量的提高,当界面处的温度高于Al的熔点时,界面附近的Al侧母材开始熔化,并在Ti板上润湿铺展,形成钎焊连接。

第3阶段:固/液界面处固相的钛合金内部结合键被破坏,晶格结构发生分解,同液态的铝合金中的铝原子结合产生新键,由此在界面处发生溶解的现象。在浓度梯度的作用下,界面处发生溶解的原子能够通过固/液界面进行扩散。

第4阶段:当界面处溶解的原子在液态铝中溶解度超过饱和固溶度时,界面处发生冶金反应生成Ti-Al金属间化合物。金属间化合物能够在界面处固相的钛合金表面发生异质形核,Ti-Al金属间化合物在钛合金表面形核长大。当界面区域生成的反应物连成一片时,Ti原子经由界面处的反应层向液态铝合金的熔核内部扩散,从而导致界面层的进一步生长。

### 3 结论

1) 对熔核与母材界面各区域进行EDS以及微区XRD分析可以推断出,熔核与铝侧母材界面处的针状化合物经过分析推测其主要成分为Ti-Al金属间化合物。熔核内部主要成分为 $Al_3Ti$ 金属间化合物。熔核与Ti侧母材界面处生成了 $AlTi_3$ 和 $AlTi_2$ 金属间化合物。

2) 接头形成过程基本可以分成“固相连接”、“钎焊连接”、“熔化连接”、“熔核的形成与长大”4个阶段。

#### 参考文献:

- [1] 李亚江,王娟. 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, 15(2): 206—210.  
LI Ya-jiang, WANG Juan. Study on Vacuum Diffusion Welding and Interface Structure of Ti/Al Dissimilar Materials[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(2): 206—210.
- [2] 陈树海. Ti/Al 异种合金激光熔钎焊工艺与连接机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
CHEN Shu-hai. Laser Brazing Technology and Bonding Mechanism of Ti/Al Dissimilar Alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [3] 张文毓. 异种金属的焊接研究进展[C]. 中国北方焊接学术会议, 2008.  
ZHANG Wen-yu. Research Progress on Welding of dissimilar Metals[C]. North China Welding Conference, 2008.
- [4] CHEN Yu-hua, NI Quan, HUANG Chun-ping. Microstructure of Titanium/Aluminum Dissimilar Metal Friction Stir Welded Lap Joint[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 73—76.
- [5] XU Chun-rong, HUANG Yong-de. Effect of Surface Roughness on the Properties of Beryllium Bronze Micro-resistance Spot Welding Joint[J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2007, 21(2): 63—66.
- [6] ZHU Zheng-qiang, WANG Xiao-long. Ultrasonic Welding of Dissimilar Metals, AA6061 and Ti6Al4V[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(3): 569—574.
- [7] ZHANG C Q, ROBSON J D, CIUCA O, et al. Microstructural Characterization and Mechanical Properties of High Power Ultrasonic Spot Welded Aluminum Alloy AA6111-TiAl6V4 Dissimilar Joints[J]. Materials Characterization, 2014, 97(5): 83—91.
- [8] MÖLLER F, THOMY C. Combined Laser Beam Welding and Brazing Process for Aluminium Titanium Hybrid Structures[J]. Physics Procedia, 2011, 12(A): 215—223.
- [9] YAO Wei, WU Ai-ping, ZOU Gui-sheng, et al. Structure and Forming Process of the Ti/Al Diffusion Bonding Joints[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(4): 700—704.
- [10] JIANG Shu-ying, Li Shi-chun. Calculation of Valence Electron Structure and Interfacial Reaction Prediction of Ni-Al System Intermetallics[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(6): 983—986.
- [11] TAKEMOTO T, NAKAMURA H, OKAMOTO I. Aluminum Brazing Filler Metals for Making Aluminum to Titanium Joints in a Vacuum[J]. Transactions of Japanese Welding Research Institute, 1990, 19(1): 3944.
- [12] CHANG S Y, TSAO L C, LEI Y H, et al. Brazing of 6061 Aluminum Alloy/Ti-6Al-4V Using Al-Si-Cu-Ge Filler Metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 8—14.
- [13] 莫秉华, 郭钟宁. 微型电阻焊技术的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(12): 85—88.  
MO Bing-hua, GUO Zhong-ning. Research Progress of Micro Resistance Welding Technology[J]. Materials Review, 2009, 23(12): 85—88.