

# 钛-铝异种材料的点焊技术研究新进展

刘浩<sup>1,2</sup>, 陈玉华<sup>1,2</sup>, 季迪<sup>1,2</sup>, 许明方<sup>1,2</sup>

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063;  
2. 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330063)

**摘要:** 钛合金和铝合金的应用在航空航天及汽车制造领域都在逐步增加, 而 Ti/Al 异种金属复合结构中搭接连接无疑是不可避免的连接形式, 因此对于钛/铝异种金属点焊技术的研究是非常必要的。由于 Ti/Al 两种材料的物理和化学性质存在巨大差异, 导致两者的焊接尤为困难, 目前能实现钛铝异种材料的高质量焊接的方法研究较少。先从钛和铝材料的本身特性入手, 阐述目前 3 种常用的点焊技术: 电阻点焊、搅拌摩擦点焊和超声波点焊的研究现状。主要涉及点焊接头成形、焊接参数、接头的组织特征以及力学性能, 探究了各个方法的优缺点, 并指出 Ti/Al 异种金属焊接质量的关键主要在于对金属间化合物的有效控制。为 Ti/Al 异种结构的连接提供合适的设计思路, 并为新的连接方法提供借鉴思路。

**关键词:** 钛/铝异种材料; 接头成形; 力学性能; 连接机制

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.009

**中图分类号:** TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0063-08

## New Progress in Spot Welding Technology of Titanium-Aluminum Dissimilar Materials

LIU Hao<sup>1,2</sup>, CHEN Yu-hua<sup>1,2</sup>, JI Di<sup>1,2</sup>, XU Ming-fang<sup>1,2</sup>

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
2. Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**ABSTRACT:** The application of titanium alloy and aluminum alloy in aerospace and automobile manufacturing is gradually increasing and lap bonding in Ti/Al dissimilar metal composite structure is undoubtedly an inevitable form of bonding, so it is very necessary to study the spot welding technology of titanium/aluminum dissimilar metal. Because of the great difference in physical and chemical properties between Ti and Al materials, it is very difficult to weld the two materials. At present, there is little research on the method of high quality welding of titanium-aluminum. Therefore, this paper started with the properties of titanium and aluminum materials to expound resistance spot welding, friction stir welding and ultrasonic spot welding. It mainly dealt with the forming of spot welding joints, welding parameters, microstructure characteristics and mechanical properties of the joints, and explored the advantages and disadvantages of each method. It is pointed out that the key to the welding quality of Ti/Al dissimilar metals lies in the effective control of intermetallic compounds. It provides a suitable design idea for the connection of Ti/Al heterogeneous structure, and provides a reference for the generation of new connection methods.

**KEY WORDS:** Ti/Al dissimilar material; joint forming; mechanical property; connection mechanism

收稿日期: 2019-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51865035); 江西省杰出青年基金(2018ACB21016); 江西省优势科技创新团队项目(20171BCB24007)

作者简介: 刘浩(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为先进材料连接技术。

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

钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性、耐热性好等一系列优点,经过多年的发展,已在航空航天、海洋工程、汽车和化工等多个领域得到了越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。目前,美国、欧洲和俄罗斯的钛材主要用于大型民航客机、航天火箭、舰船、装甲火炮、化工、汽车等领域。美国钛总产量的80%主要用于航空航天领域,用于制造机身、机翼、蒙皮以及一些承载结构,民用的B757和DC10飞机中钛用量分别达到5%和10%左右,军用的F-15战斗机钛合金用量占27%,而F-22战斗机钛合金用量占41%<sup>[3-4]</sup>。在航空制造领域中,产品的研发通常要求高性能、低重量和低成本,而钛合金满足低密度和高强度的要求,但其价格高昂。基于此,国内外学者提出将同样低密度且价格低廉的铝合金与钛合金组成复合结构应用在产品设计中,在保证产品性能的前提下降低其制造成本。目前,应用于航空领域的Ti/Al复合结构包括机舱散热片、机翼蜂窝结构和座位导轨等<sup>[5]</sup>。

一架战斗机的机翼包括300多个零部件,大概23000多个紧固件,如果采用铆接或者螺栓连接需要大概1~1.5年的装配时间,如果采用点焊技术进行连接,不但可以节约装配时间,而且可以很大程度上减轻飞机的重量<sup>[6]</sup>,因此,钛/铝异种金属的点焊技术已成为研究的热点。

钛和铝的热物理性能和晶体结构存在较大的差

异,钛在铝中的溶解度低,极易形成脆硬的Ti-Al系金属间化合物,脆性相的生成以及材料热物理性能差异使得焊缝在热应力作用下产生裂纹等缺陷,接头力学性能很低<sup>[7-8]</sup>。近十年,少量合适的焊接方法已应用于铝/钛异种金属的连接,包括超声波焊、电阻点焊、钎焊、搅拌摩擦焊等技术。文中对各种焊接方法下的研究做了总结工作,为后期的钛/铝异种金属的研究提供借鉴。

## 1 铝/钛异种金属的焊接性

Ti与Al的物理性能参数见表1。根据表1可以明显看出两种材料的熔点相差很大,有1000℃左右,在较低热输入的情况下很难实现两种材料的同时熔化;两种金属的密度相差近乎1倍,会直接导致熔池中的元素分布不均匀,从而产生元素偏析和夹渣等问题;此外,两种金属的热导率和弹性模量也存在很大的区别,在焊接过程中很容易由于焊接残余应力的存在导致焊接裂纹的大量产生,因此,要实现钛/铝异种金属的焊接就必须选用合适的焊接方法。Ti-Al二元相图见图1,由图1可知,Ti/Al发生化学反应时,会产生多种金属间化合物,如TiAl<sub>3</sub>,TiAl<sub>2</sub>,Ti<sub>3</sub>Al,TiAl,由于大部分金属间化合物都是脆性相,会严重影响接头的力学性能,所以在焊接时尽量避免大量金属间化合物的产生<sup>[9]</sup>。

表1 Ti和Al的主要物理性能参数

Tab.1 Main physical property parameters of titanium and aluminum

元素	密度 $\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	熔点/℃	沸点/℃	热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	电阻率 $R$ ( $\times 10^{-8}$ )/( $\Omega$ ·m)	弹性模量 $E$ /GPa
Ti	4.5	1668	3560	15.24	10	107
Al	2.7	660	2327	237	2.83	70

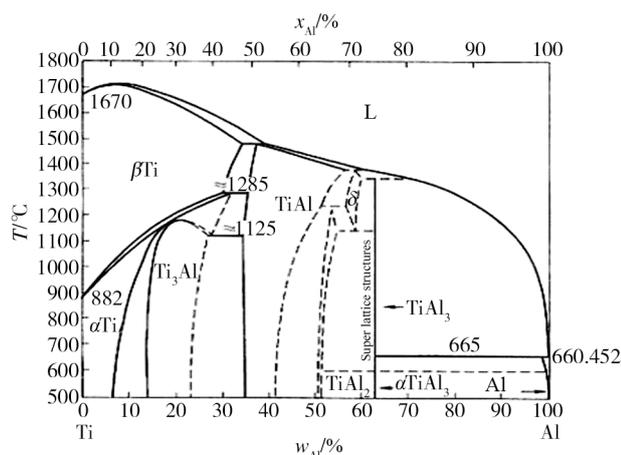


图1 Ti-Al二元相图

Fig.1 Ti and Al binary diagram

## 2 铝/钛异种金属的超声点焊

超声波焊接是通过施加压力和超声震动来实现

同种材料或者异种材料的固态连接技术,在焊接过程中,被焊金属没有受到高温热源的作用,而是受施加于工件上的静压力及高频超声振动共同作用,将弹性振动所产生的能量转化成为焊接界面的摩擦功及热能<sup>[10]</sup>,其中超声震动可以有效去除金属界面的氧化膜以及其他杂质,为界面金属的反应提供有利的条件。

C. Q. Zhang等<sup>[11-12]</sup>对25 mm×75 mm×0.93 mm的6111-T4铝合金和25 mm×75 mm×1 mm的Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V钛合金进行搭接超声波点焊,焊接示意图如图2。研究了焊接时间和时效时间对拉剪强度峰值的影响以及对界面断裂能的影响,并对焊后钛铝界面是否产生金属间化合物进行了分析。结果表明,通过对0.93 mm的6111-T4铝合金与1 mm的Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V钛合金进行超声波焊接,当焊接时间低于0.6 s时无法实现良好的冶金结合,焊接时间为0.8 s时拉剪强度最高为3.1 kN,此强度接近同种铝合金的搭接超声波焊接强度。随着焊接时间的增加,拉剪强度逐渐增加,拉剪的断裂形式会出现界面断裂和“纽扣”装断裂两种。对界面

进行微观组织分析,并没有发现金属间化合物层的存在。分析认为由于超声波焊接是固相焊接方法,其热输入较低,相对于电阻点焊仅为 2%左右,对于搅拌摩擦点焊为 30%左右;此外,超声波点焊的焊接时间非常短,一般不超过 1.4 s,很难达到金属间化合物形成所需的活化能。

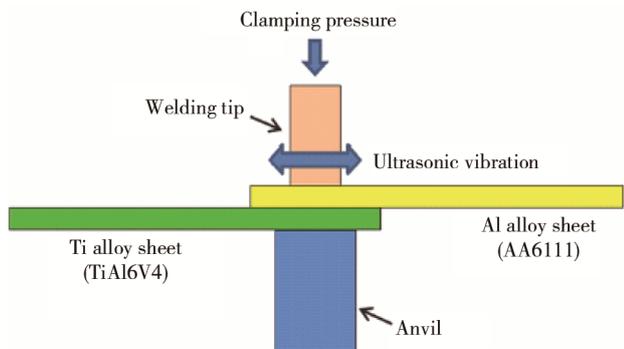


图 2 超声波点焊示意图<sup>[11]</sup>  
Fig.2 Diagram of ultrasonic spot welding

L. Zhou 等<sup>[13]</sup>对 65 mm×20 mm×1.5 mm 的 AA6061 铝板和 65 mm×20 mm×1 mm 工业纯钛板进行超声波点焊,采用控制变量的方法研究焊接时间为 0.6~1.4 s 时,不同焊接时间对接头微观组织、力学性能以及界面温度的影响。随着焊接时间的增加,接头的峰值载荷出现先增加后降低的趋势,焊接时间过大或过小都不利于接头的力学性能,图 3 为不同焊接时间下界面微观图,在焊接时间为 1 s 时,没有出现明

显缺陷,拉伸剪切试验测得接头的峰值载荷达到 5128 N。分析认为,当焊接时间小于 1 s 时,钛铝界面的氧化膜不能完全破裂,无法达到冶金结合所需的能量;然而,当焊接时间超过 1.2 s 时,超声波振动时间太长,在较高的焊接时间下,超声波焊头尖端穿透软化后的 AA6061Al 合金薄板,使截面变薄;另一方面,会导致接头铝侧产生疲劳裂纹,从而降低了接头拉剪载荷。随着焊接时间的延长,焊接温度峰值先升高,最终达到上限温度为 365.6 °C。对界面进行观察,发现即使在最长的焊接时间 1.4 s 下,没有产生金属间化合物或明显的界面反应层。分析认为,由于 Al-Ti 的扩散活化能(250~300 kJ/mol)高于其他异种金属的扩散活化能如 Al-Mg(60~70 kJ/mol)和 Al-Fe(190 kJ/mol)等<sup>[14]</sup>,而超声波焊接的特点是焊接时间短热输入低,因此很难形成明显的界面反应层。

S. Q. Wangd 等<sup>[15]</sup>对 50 mm×10 mm×1.5 mm 的 Al5754 和 50 mm×10 mm×1 mm 的 Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V 进行超声波焊接,研究了 Al5754 与 Ti-6Al-4V 合金在添加纯 Al 中间层的固态超声点焊异种接头的组织、硬度和拉伸性能,并与无铝夹层的接头进行对比,如图 4 与图 5 所示。纯 Al 中间层的添加没有对焊缝中心的界面反应层产生明显的影响,从图 4 和图 5 可以看出,Al 和 Ti 合金之间存在一个清晰的边界。在焊接能量为 1000 J,添加 Al 箔厚度为 75 μm 的条件下,对焊后接头界面进行剥离,发现中间层的添加导致在钛侧产生许多灰色“岛屿”状的粘连层。对界面处的钛侧和

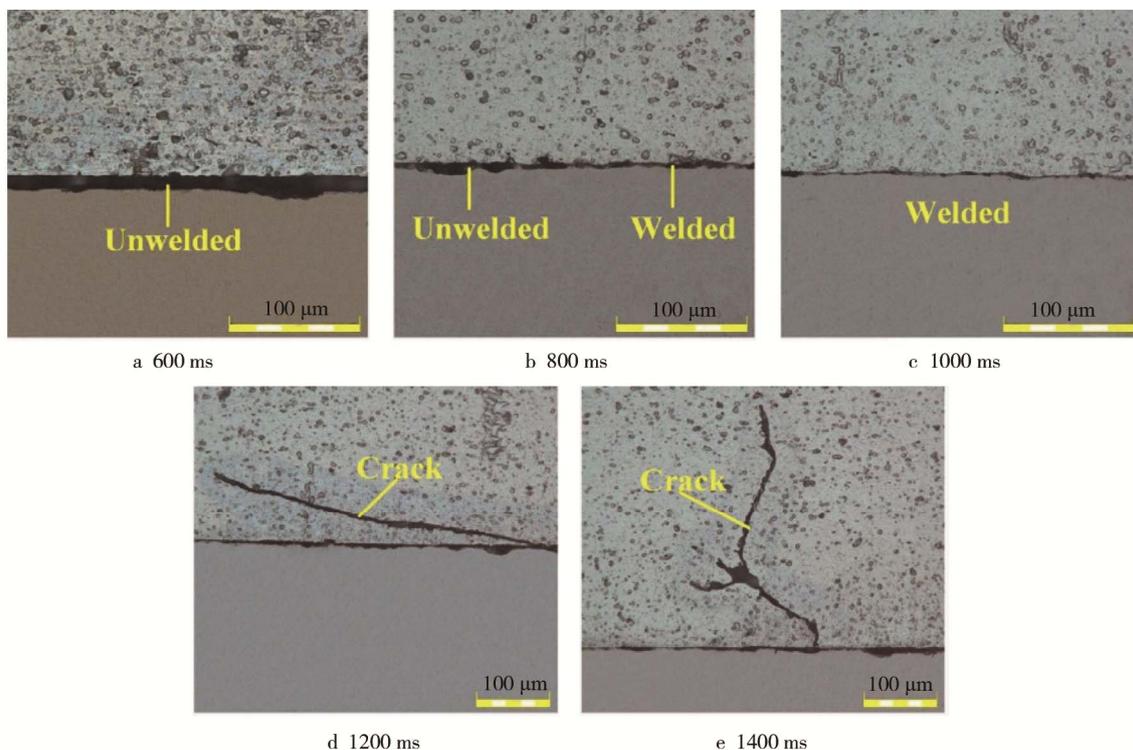


图 3 不同焊接时间的界面微观组织<sup>[13]</sup>  
Fig.3 Interface microstructure in different welding time

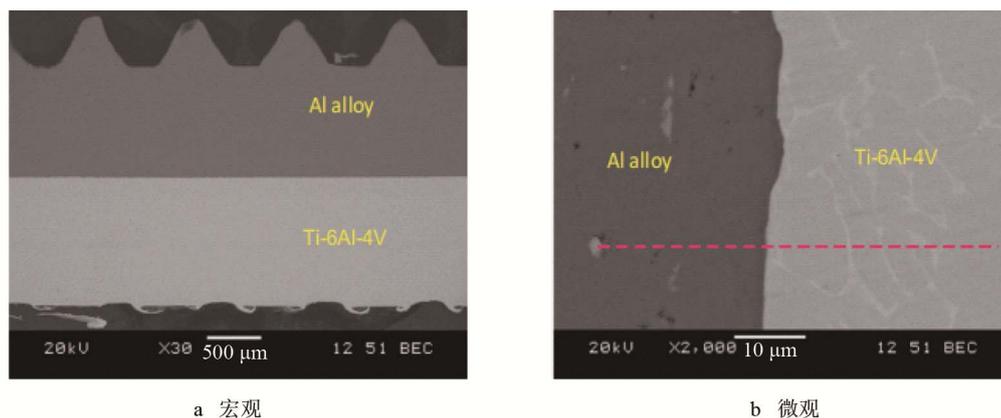


图4 添加中间层界面 SEM<sup>[15]</sup>  
Fig.4 SEM of interface with middle layer

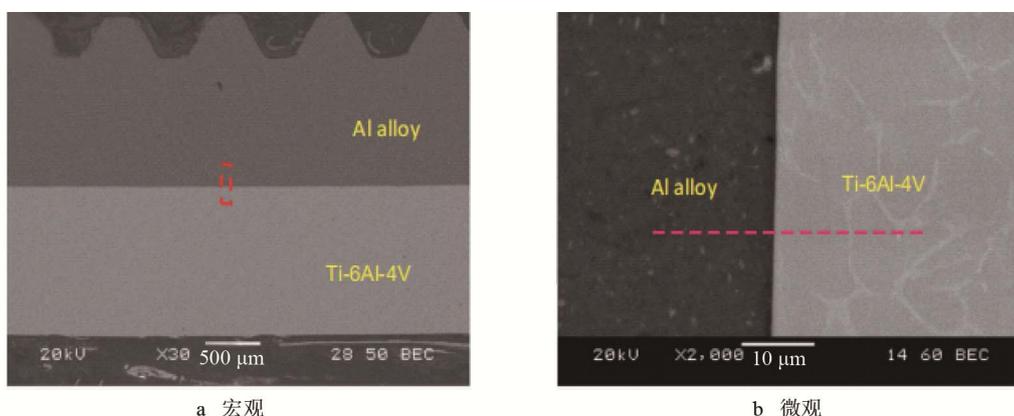


图5 未添加中间层界面 SEM  
Fig.5 SEM of interface without middle layer

铝侧进行 XRD 分析,发现钛侧和铝侧都有  $TiAl_3$  相的生成且 Ti 侧的  $TiAl_3$  峰多于 Al 侧的  $TiAl_3$  峰。分析认为,  $TiAl_3$  相的生成自由能相对较低,因此在较低的温度下,  $TiAl_3$  相很容易优先形成。S. Q. Wang 等认为焊接开始时,界面处的超声波振动产生热量使界面温度迅速上升,并熔化纯铝中间层,在界面附近铝合金片也可能被熔化在此温度下,最终 Ti-6Al-4V 固态合金溶解到液态 Al 中而形成金属间化合物。

Zhu Zhengqiang 等<sup>[16]</sup>对 150 mm×10 mm×0.3 mm 的 6061 铝合金和 Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V 钛合金进行超声波焊接得出了最佳的焊接工艺参数焊接时间为 170 ms、焊接压力为 0.4 MPa,并对接头的微观组织和力学性能以及界面成分扩散情况进行了分析研究。焊接时间在 90~200 ms 时,接头拉剪强度出现先增大后减小的趋势,170 ms 时强度最高,分析认为一方面由于时间过短,被焊金属表面的氧化膜来不及破除,另一方面由于热输入不够,无法使焊件达到塑性状态;但焊接时间过长,上板铝会因为受热加剧,使超声波焊头压痕过深,导致焊点处铝板横截面变薄,最终削弱接头强度。对焊点界面区域进行 EDS 分析,发现界面处存在 Ti 和 Al 两种元素的扩散,但是由于焊接热输入较低,此扩散区域较窄大约为 4 μm。在接近焊缝区域 Ti 和 Al 金属

的硬度都出现增高的趋势,分析认为由于超声波的震动使金属材料发生塑性变形,从而产生大量位错,由于位错密度的增加导致该区域的硬度值增大。

### 3 铝/钛异种金属的搅拌摩擦点焊

搅拌摩擦点焊是在搅拌摩擦焊技术上衍生出来的一种焊接技术,可以很好地实现两种金属材料的搭接接头。由于在焊接过程中对接头的热输入较低,因此对于 Ti/Al 异种金属的焊接具有很好的效果。搅拌摩擦点焊可分为很多种,根据焊接时搅拌头是否可以回抽,分为可回抽式与不可回抽式;根据搅拌头是否有针,分为有针点焊与无针点焊;根据是否在被焊金属间添加钎料,分为搅拌摩擦点焊-钎焊复合焊接等。这些点焊方法对于 Ti/Al 异种金属的焊接都有所研究,并且都成功实现了对两种材料的有效连接。

A. H. Plaine 等<sup>[17]</sup>进行了 2 mm 厚的 5754 铝合金与 2.5 mm 厚的 Ti-6Al-4V 合金的可回抽式搅拌摩擦点焊,焊接示意图如图 6,研究了不同焊接时间对接头界面处形成的金属间化合物层特性的影响。随着焊接时间从 2 s 增加到 5 s,反应层厚度明显增加,从 0.5 μm 增加到了 1.5 μm。在 Ti-Al 化合物体系中,形成化合

物  $TiAl_3$  所需自由能最小相对于  $Ti_3Al$  和  $TiAl$ <sup>[18]</sup>。当反应温度低于 Al 熔点时,  $TiAl_3$  相是唯一的过渡相。在 FSPW 中焊接时间的微小变化显著影响着接头处 Al/Ti 的扩散过程, 从而改变  $TiAl_3$  金属间相的厚度。 $TiAl_3$  界面处产生的 IMC 层厚度是决定铝钛摩擦焊缝接头力学特性的主要因素。结果显示, 随着焊接时间的增加, 接头拉剪强度出现先增大后减小的趋势, 当焊接时间为 2 s 时拉剪强度最大为 7.4 kN, 进一步说

明当焊接时间为 2 s 时, IMC 的厚度为相对较好。分析认为,  $TiAl_3$  的形成和生长分为两个阶段: Al 和 Ti 原子的相互扩散, 界面上出现了大量的  $TiAl_3$  形核晶粒; 然后,  $TiAl_3$  晶粒生长并随后在 Ti/Al 界面处聚结形成连续层。由于相邻晶粒阻碍了  $TiAl_3$  晶粒的横向生长, 其中部分  $TiAl_3$  晶粒垂直于界面向铝片方向生长。在 Al/Fe 金属间化合物存在的区域,  $TiAl_3$  晶粒的生长受到限制, 形成细晶结构。

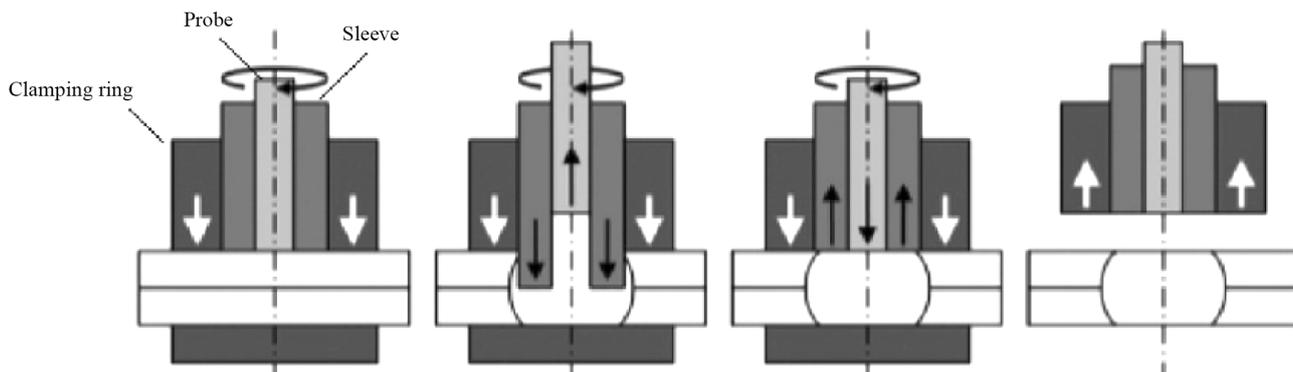


图 6 回抽式搅拌摩擦点焊示意图<sup>[17]</sup>  
Fig.6 Diagram of withdrawing type friction stir spot welding

YANG Xia-wei 等<sup>[19]</sup>采用没有搅拌针的搅拌头如图 7, 对 2 mm 厚的 TC4 钛合金和 1.5 mm 厚的 2A12 铝合金进行无针搅拌摩擦点焊, 焊接形式采用铝板在上钛板在下的方式, 接头宏观如图 8 所示。在无针搅拌头的压力以及高速旋转产生的热量下, 位于上部的铝板焊后焊点区域的组织发生了明显变化, 可以分为 3 个区域: 搅拌区 (SZ)、热机械影响区 (TMAZ) 和热影响区 (HAZ), 与传统的 FSW 接头相似。位于下部的钛板, 钛表面仍处于原始状态或轻微变形。拉剪试验的结果表明, 随着焊接时间和搅拌头旋转速度的增加, 接头的拉剪强度都在升高, 当转速为 1500 r/min, 停留时间为 15 s 时, 接头的最大载荷为 1.79 kN。分析认为, 增加焊接时间和搅拌头旋转速度,

都是增加接头的热输入, 热输入不足, 金属不能完全软化, 无法提供金属的流动能力, 就不能有效促进界面金属的冶金结合。显微硬度测试结果显示, 接头 Al 侧的硬度值呈典型的“W”分布并沿接头中心线对称。分析认为, 接头 Al 侧变形硬化是由金属流动和挤压引起的, 最终导致显微硬度增大。

Cao Wenming 等<sup>[20]</sup>通过搅拌摩擦点焊-钎焊技术对 Ti/Al 异种金属进行焊接, 通过改变钎料的加入方式, 研究低熔点钎料与钛合金润湿性; 分析渗铝后的复合接头界面的显微结构、组织特征, 探讨界面的结合机理。搅拌摩擦点焊-钎焊技术基于搅拌摩擦点焊和钎焊的原理提出的新型复合焊接方法, 一方面通过搅拌头轴肩与上板摩擦产生热量, 使钎料熔化从而与母材实现扩散连接; 另一方面通过搅拌头的旋转挤压作用使搅拌头周围金属达到塑化状态, 在热-机联合作用下形成致密的金属间结合<sup>[21]</sup>。直接添加 Zn 箔钎料的 FSSW-S 接头在轴肩区域未能形成钎焊连接, 中间层钎料与铝合金结合良好, 但是与钛表面没有实现冶金结合。分析认为阻止钎料与钛合金发生反应的主要因素是钛合金表面的氧化膜。为了形成钎焊区域, 最终对钛合金表面进行渗铝处理, 在温度为 780 °C、渗铝时间为 25 min 的条件下能在钛合金表面形成 200 μm 厚的渗铝层, 渗铝层中均匀分布着  $TiAl_3$  金属间化合物颗粒。渗铝后的钛板与铝板进行搅拌摩擦点焊-钎焊复合焊接, 得到了力学性能很高的焊接接头, 抗拉剪力达到最高为 13.87 kN, 是相同焊接条件下常规 FSSW 焊接接头的最大抗拉剪力 (6.58 kN) 的 2.1 倍。Ti/Al 异种金属 FSSW-S



图 7 无针搅拌头<sup>[19]</sup>  
Fig.7 Pinlessstir head

复合焊接接头的形成过程如图 9 所示，可以分为 3 个阶段：第 1 阶段为搅拌针旋转挤压形成“Hook”阶段；第 2 阶段为搅拌头轴间高速旋转摩擦产热挤压上板使钎料熔化挤出阶段；第 3 个阶段为钎焊接头形成阶段，即未被挤出钎料在两板间的溶解扩散，形成无缺陷的钎焊界面。

### 4 铝/钛异种金属的电阻点焊

不论是航空业还是汽车制造业，对于电阻点焊的需求都是必不可少的，飞机上的钛合金和铝合金的搭接接头经常采用电阻点焊的方式。由于电阻点焊生产效率高、热量集中、无污染以及操作方面等优点，目前已经成为研究的重点。关于钛铝异种金属的电阻点焊国内外也做了大量研究，但目前主要是薄板的焊接。

Y. Li 等<sup>[22]</sup>采用电磁辅助电阻点焊的方法对 2 mm

厚的 6061 铝合金和 1 mm 厚的 TA1 钛合金进行焊接。研究了电磁搅拌 (EMS) 对 Al/Ti 电阻点焊接头组织和力学性能的影响。如图 10 所示，与传统的 Al/Ti 电阻点焊相比，在 EMS 效应下形成的焊缝具有更大的结合直径、更大的拉伸剪切力和更高的能量吸收能力。外加磁场引起的电磁搅拌促进了金属熔体的旋转产生离心运动，促进熔核沿径向生长，导致 Al/Ti 接头连接直径的增大。传统的 Al/Ti 接头组织由部分熔化区、柱状晶粒区和过渡结构组成。在 EMS 的作用下，Al/Ti 接头形成了细小的球形晶粒组织。分析认为，EMS 会在初生结晶过程中破坏生长的柱状枝晶，这些过程限制了柱状枝晶的生长，促进了柱状枝晶向等轴晶的转变。在焊缝中，这种显微组织接近球状晶粒，因此这一区域被称为球状晶粒区。研究发现在使用电磁辅助时，当焊接电流为 12 kA 时可以达到传统电阻点焊电流为 14 kA 的相同效果，从而降低了功耗以及电极磨损。



图 8 接头宏观图<sup>[19]</sup>  
Fig.8 Macroscopic diagram of welding joint

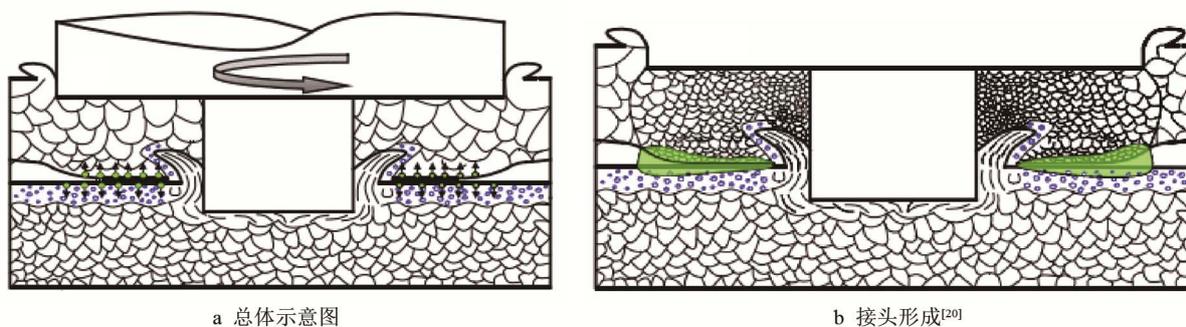


图 9 复合接头形成阶段示意图  
Fig.9 Diagram of composite joint in forming stage

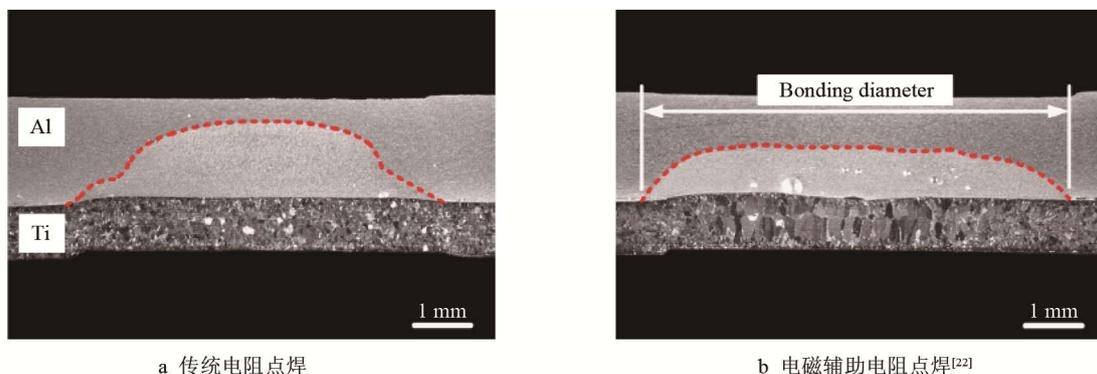


图 10 电阻点焊接头宏观  
Fig.10 Macroscopic diagram of resistance spot welding joint

Liu Dongya 等<sup>[23]</sup>通过采用电阻点焊技术连接 2 mm 厚 TC4 钛合金和 2A12 铝合金。研究工艺参数对接头性能影响的内在因素, 揭示 Ti/Al 异种金属电阻点焊接头的连接机理, 并采用随机热处理的方法对焊点进行焊后处理, 观察其对接头性能的影响。结果表明, 硬规范条件下, 界面反应层厚度相对于软规范小幅增加且接头拉剪力最大, 为 6.59 kN。分析认为, 硬规范参数下, 随着焊接电流的增大, 钛合金侧熔核体积与铝合金侧熔核体积均明显增加, 焊接时发生的飞溅对于清理焊件表面的氧化膜有一定的作用, 能够使焊件表面接触更加紧密, 促进了界面的反应, 所以得到的焊点的拉剪力具有大幅度提升。随机热处理对 Ti/Al 点焊接头的表面质量影响较大, 但对点焊接头焊核形貌的影响不显著, 且经随机热处理的接头界面反应层厚度增加。在界面处, 铝合金在电阻热和热传导的共同作用下发生熔化, 熔化后的液态铝合金在固态钛合金表面润湿铺展, 然后固态钛合金向铝合金液态熔核中溶解并发生原子的互扩散, 从而实现 Ti/Al 界面反应层的产生及长大。XRD 分析结果显示, Ti/Al 异种金属电阻点焊接头的界面反应产物为  $TiAl_3$ 。

目前, 对于钛铝异种材料的电阻点焊的研究仅限于工艺方面, 虽然有对电阻点焊成核特点以及界面结合机理的研究, 但还是不够深入。对于焊接过程中出现的一些焊接问题没有很好地做出解释和进一步研究, 如软规范条件下, 铝侧熔核内部及界面区域均存在裂纹、缩孔等宏观缺陷; 硬规范条件下会出现 Ti/Al 界面区较为粗糙, 在铝焊核内部发现了较大的钛颗粒等问题。后期对于钛铝电阻点焊的研究还应该从提升焊点质量入手, 为钛铝电阻点焊的应用奠定基础。

## 5 结论与展望

钛合金和铝合金的应用占比在航空航天领域逐渐增大, 对于两种材料的搭接点焊连接是不可避免的, 由于钛铝两种材料本身的特性, 决定了这两种材料的焊接会存在很多问题。比如易产生脆性的金属间化合物和接头强度低等问题。针对不同的点焊方法, 已经做了详细的描述, 尽管 Ti/Al 点焊技术已经取得了阶段性的成果, 但对于点焊界面处的金属间化合物在焊接热输入的影响下是如何分布、形核以及长大的分析还不够透彻, 可以采用理论建模和数值模拟的方法开展研究, 进一步提高 Ti/Al 异种金属接头的性能也是未来的发展方向。

### 参考文献:

[1] 张健, 董春林, 李光, 等. 搅拌摩擦点焊在航空领域的应用[J]. 航空制造技术, 2009, 18(16): 70—73.  
ZHANG Jian, DONG Chun-lin, LI Guang, et al. Application of Friction Stir Spot Welding in Aviation Industry

[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2009, 18(16): 70—73.

[2] 冯颖芳. 世界钛及钛合金的应用研究进展[J]. 世界有色金属, 2012(4): 54—57.  
FENG Ying-fang. Advances in the Application of Titanium and Titanium Alloys in the World[J]. World Non-ferrous Metals, 2012(4): 54—57.

[3] MOLLER F, GRDEN M, THOM Y C, et al. Combined Laser Bead Welding and Brazing Process For Aluminium Titanium Hybrid Structures[J]. Physic Procedia, 2011, 12: 215—223.

[4] 陈玉华. 铝/钛异种金属焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2012, 417(21): 42—45.  
CHEN Yu-hua. Research Progress of Welding Technology of Dissimilar Metals Between Titanium and Aluminum[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012, 417(21): 42—45.

[5] PLAINE A H, SUHUDDIN U F H, AFONSO C R M, et al. Interface Formation and Properties of Friction Spot Welded Joints of AA5754 and Ti6Al4V Alloys[J]. Materials & Design, 2016, 93: 224—231.

[6] 张宝柱, 孙洁琼. 钛合金在典型民用飞机机体结构上的应用现状[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 275—280.  
ZHANG Bao-zhu, SUN Jie-qiong. Recent Applications of Titanium Alloys in Typical Commercial Aircraft Fuselage Structure[J]. Advances in Aviation Engineering, 2014, 5(3): 275—280.

[7] 陈玉华, 倪泉, 黄春平. Ti/Al 异种金属搅拌摩擦搭接接头的组织结构[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 73—76.  
CHEN Yu-hua, NI Quan, HUANG Chun-ping. Microstructure of Ti/Al Dissimilar Alloys Lap Joint Made by Friction Stir-Welding[J]. Journal of Welding, 2011, 32(9): 73—76.

[8] ZHOU Xing-wen, CHEN Yu-hua, LI Shu-han. Friction Stir Spot Welding Brazing of Al and Hot-Dip Aluminized Ti Alloy with Zn Interlayer[J]. Metals, 2018, 8(11): 922.

[9] CHEN Yu-hua, DENG Huai-bo, LIU Hao, et al. A Novel Strategy for the Reliable Joining of Ti6Al4V/2A12-T4 Dissimilar Alloys via Friction Melt-Bonded Spot Welding[J]. Materials Letters, 2019, 253: 306—309.

[10] 赵玉津, 张慧敏, 罗震, 等. 焊接能量对铝/钛超声波焊接接头性能的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017(1): 47—52.  
ZHAO Yu-jin, ZHANG Hui-min, LUO Zhen, et al. Effect of Welding Energy on the Performance of Aluminum/Titanium Ultrasonic Welding Joints[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 2017(1): 47—52.

[11] ZHANG C Q, ROBSON J D, PRANGNELL P B. Dissimilar Ultrasonic Spot Welding of Aerospace Aluminium Alloy AA2139 to Titanium Alloy TiAl6V4[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 382—388.

[12] ZHANG C Q, ROBSON J D, CIUCA O, et al. Micro-

- structural Characterization and Mechanical Properties of High Power Ultrasonic Spot Welded Aluminum Alloy AA6111-TiAl6V4 Dissimilar Joints[J]. *Materials Characterization*, 2014, 97: 83—91.
- [13] ZHOU L, MIN J, HE W X, et al. Effect of Welding Time on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Ti Ultrasonic Spot Welds[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 33: 64—73.
- [14] PANTELI A, ROBSON J D, BRROUG H I, et al. The Effect of High Strain Rate Deformation on Intermetallic Reaction During Ultrasonic Welding Aluminium to Magnesium[J]. *Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, 2012, 556: 31—42.
- [15] WANG S Q, PATEL V K, BHOLE S D, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonic Spot Welded Al/Ti Alloy Joints[J]. *Materials & Design*, 2015, 78: 33—41.
- [16] 朱政强, 曾纯, 张义福, 等. 铝钛异质材料超声波焊接研究[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(7): 118—120.  
ZHU Zheng-qiang, ZENG Chun, ZHANG Yi-fu, et al. Ultrasonic Welding of Aluminum Titanium Heterogeneous Materials[J]. *Thermal Processing*, 2011, 40(7): 118—120.
- [17] PLAINEAH, SUHUDDIN U F H, CRMAFONS O, et al. Interface Formation and Properties of Friction Spot Welded Joints of AA5754 and Ti6Al4V Alloys[J]. *Materials & Design*, 2016, 93: 224—231.
- [18] 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]. *Material & Design*, 2015, 71(6): 85—92.
- [19] 杨夏炜, 冯武渊. 2A12 铝合金与 TC4 钛合金无针搅拌摩擦点焊组织及性能[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(12): 3075—3084.  
YANG Xia-wei, FENG Wu-yuan. 2A12 Aluminum Alloy and TC4 Titanium Alloy Pinless Blend Friction Spot Welding Organization and Performance[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(12): 3075—3084.
- [20] 曹文明. Ti/Al 搅拌摩擦点焊-钎焊复合焊接接头组织性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.  
CAO Wen-ming. Ti/Al Stir Friction Spot Welding Study on the Organizational Performance of Brazing Composite Welding Joints[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [21] CHEN Y, YU L, NI Q. Influence of Zinc on the Microstructure and Brittle Phases of Friction Stir Welded Joint of Al/Ti Dissimilar Alloys[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 413: 439—443.
- [22] LI Y, ZHANG Y, BI J, et al. Impact of Electromagnetic Stirring Upon Weld Quality of Al/Ti Dissimilar Materials Resistance Spot Welding[J]. *Materials & Design*, 2015, 83: 577—586.
- [23] 刘东亚. Ti/Al 异种金属电阻点焊工艺及接头形成机理研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.  
LIU Dong-ya. Study on Ti/Al Heterogeneous Metal Resistance Spot Welding Process and Joint Formation Mechanism[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.