

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.09

钛/铝异种金属搅拌摩擦焊搭接界面设计 及组织性能分析

刘金浩, 董吉义*, 尹玉环, 徐磊, 何建利

上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245

摘要: 钛/铝异种金属复合结构可以充分利用不同材料的优势性能并有效减重, 在航空航天、武器装备制造中具有广阔应用前景。本研究对2A14铝合金及TC4钛合金进行搅拌摩擦焊搭接试验, 探讨了不同搭接界面结构对接头微观组织及力学性能的影响机制。结果表明, 在钛/铝搭接界面处发生了材料的塑性变形, 且生成金属间化合物 $TiAl_3$ 相; 平面搭接结构以冶金连接方式为主, 且存在微观机械互锁结构; 矩形结构和榫卯结构均可实现“冶金连接+多尺度机械连接”, 两种结构在拉伸剪切试验中存在二次断裂现象; 三种界面结构中, 榫卯结构接头具有更高的接头强度和伸长率, 榫卯结构相较于平面搭接结构接头强度提升85.05%, 伸长率提升61.92%。

关键词: 钛/铝异种金属; 搅拌摩擦焊; 搭接界面; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0072-05

Interface Design and Microstructure Property Analysis of Ti/Al FSW

LIU Jinhao, DONG Jiayi*, YIN Yuhuan, XU Lei, HE Jianli

Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China

Abstract: The Ti/Al dissimilar metal composite structure can fully utilize the superior properties of different materials and effectively reduce weight, presenting broad application prospects in the manufacturing of aerospace and weapon equipment. In this paper, friction stir welding experiments were conducted on 2A14 aluminum alloy and TC4 titanium alloy, and the influence mechanism of different interface structures on the microstructure and mechanical properties of the joint was explored. The results show that plastic deformation of the material occurs at the titanium/aluminum lap interface, and the intermetallic compound $TiAl_3$ phase is generated. The flat structure is mainly metallurgical and there exist micro-mechanical interlocking structures. Both the rectangular structure and the dovetail structure can achieve "metallurgical connection + multi-scale mechanical connection", and the two structures exhibit secondary fracture in the tensile shear test. Among the three interface structures, the joint of the dovetail structure possesses higher joint strength and elongation. Compared with the joint of the flat structure, the strength of the dovetail structure is increased by 85.05% and the elongation is increased by 61.92%.

Keywords: Al-Mg alloy; friction stir welded; microstructure evolution; corrosion property

引用格式: 刘金浩, 董吉义, 尹玉环, 等. 钛/铝异种金属搅拌摩擦焊搭接界面设计及组织性能分析[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 72-76.

Citation: LIU Jinhao, DONG Jiayi, YIN Yuhuan, et al. Interface Design and Microstructure Property Analysis of Ti/Al Friction Stir Welding[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 72-76.

0 引言

减轻重量同时提高有效载荷是现代工业产品

结构轻量化设计的目标之一。铝合金具有质量轻、密度低和经济性好等优点, 而钛合金具有比强度高、轻质以及抗冲击好等优点, 将钛合金和铝合金

收稿日期: 2024-11-24 修回日期: 2024-12-31

基金项目: 上海市2022年度“科技创新行动计划”启明星项目/启明星培育(22YF1417100)

作者简介: 刘金浩(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事搅拌摩擦焊研究。

通讯作者: 董吉义(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事固相焊接技术研究。E-mail: dongjiyi92@163.com。

连接形成复合结构可以有效地利用材料的各自优点,获得更好的经济效益,在航空航天、武器装备等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。焊接是结构件连接的重要方法之一,在钛/铝异种金属连接中却面临挑战,因为两者均为活泼金属、易氧化,且在热导率、熔点和热膨胀系数等物理化学性质上存在显著差异,常规焊接方法难以获得满足使用性能要求的焊接接头^[4-5]。搅拌摩擦焊(Friction stir welding,FSW)是一种新型的固相连接技术,基本不受材料物化性质的影响,对克服异质材料性能差异带来的焊接困难具有极大的优势,可以有效地消除熔化焊接的气孔等缺陷、抑制脆性金属间化合物的形成,适用于异种材料的连接^[6-9]。

目前国内外对于钛/铝异种金属搅拌摩擦焊的研究相对较少。WU 等^[10]研究了 Ti6Al4V 合金和 6061 铝合金的搅拌摩擦焊对接,发现搅拌头转速对接头质量至关重要,界面处的钛/铝金属间化合物只有连续存在的 TiAl₃,当转速为 750 r/min 时,金属间化合物层较薄,试样断裂于热机影响区和热影响区之间,强度达到铝合金的 68%。张鑫^[11]以 0.05 mm 厚 Zn 薄片为中间层材料,对 3 mm 厚 2A14 铝合金和 TC4 钛合金进行了搅拌摩擦焊对接试验,确定了适宜的焊接参数范围。Choi 等^[12]对纯铝和纯钛异种金属进行了对接搅拌摩擦焊,当转速为 800 r/min 时,接头界面处金属间化合物厚度适中且 Ti 颗粒数量较少,具有最高抗拉强度。相对于对接接头的形式,搭接接头方式在制造与装配时更加简易和灵活。Zhao 等^[13]研究了搅拌针长度对 Ti6Al4V 钛合金和 6061 铝合金搭接接头强度和伸长率的影响。张哲等^[14]以 Ti-6Al-4V 钛合金和 7075-T6 铝合金为对象,将钛合金作为搭接上板,研究了不同搅拌头转速下搭接接头的成形与显微组织。Li 等^[15]对 Al/Ti6Al4V 异种金属复合板进行多道次搅拌摩擦搭接焊,分析了工艺参数和热处理对接头成形、微观组织和力学性能的影响。然而,目前对钛/铝异种金属搅拌摩擦焊搭接接头的研究主要集中在焊接工艺参数对搭接接头力学性能的影响,且搭接界面为单一的平直界面。

在铝/钢异种材料搅拌摩擦焊接中出现了一种新型的搅拌摩擦榫卯(Friction stir dovetailing,FSD)

焊接方式^[16],通过改变搭接接头的结构来提高接头的综合性能,目前 FSD 技术在钛/铝异种金属连接中应用较少。本文采用搅拌摩擦榫卯方法对 TC4 钛合金和 2A14 铝合金进行搭接连接,设计了矩形结构和榫卯结构两种异形搭接界面,将传统单一平直界面转变为多尺度互锁结构,旨在探究不同界面结构对接头性能的影响机制,为钛/铝异种金属搅拌摩擦焊结构在工程应用中提供理论依据和实践参考。

1 试验材料及方法

试验材料为 2A14 铝合金和 TC4 钛合金,厚度均为 5 mm,其化学成分分别如表 1、表 2 所示。

表 1 TC4 钛合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of TC4 Ti alloy (wt. %)

Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	≤5.5~6.8	≤3.5~6.8	余量

表 2 2A14 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of 2A14 Al alloy (wt. %)

Si		Cu		Mg		Zn	
0.6~1.2		3.9~4.8		0.40~0.8		≤0.30	
Mn		Ti		Ni		Fe	
0.40~1.0		≤0.15		≤0.10		≤0.70	
						余量	

在焊接过程中,2A14 铝合金和 TC4 钛合金搭接结构如图 1 所示,搭接接头三种不同搭接界面结构的尺寸参数如表 3 所示,包括平直、矩形和榫卯结构。

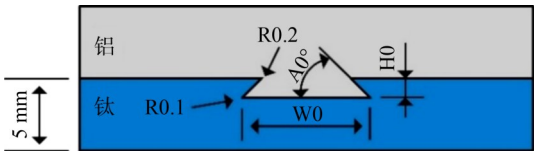


图 1 钛/铝搭接结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Ti/Al lap joint structure

表 3 三种搭接界面结构尺寸参数

Table 3 Dimensional parameters of the three lap interface structures

序号	搭接结构	W0	H0	A0/(°)
1	平直	0	0	0
2	矩形	12.0	1.0	90
3	榫卯	12.0	1.0	60

为减少搅拌头的磨损,试验采用分体式搅拌工具,如图 2 所示。搅拌头主体采用锥形螺纹结构实现常规的搅拌摩擦焊,搅拌头端部采用硬质合金材料,与钛合金形成摩擦界面。

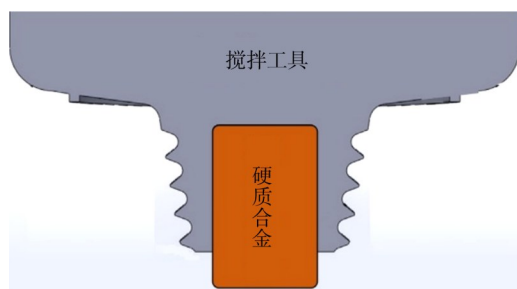


图2 搅拌工具示意

Fig. 2 Stir tool diagram

焊接参数经过大量预试验优化,确定焊接参数为:搅拌针压入钛合金 0.1 mm,搅拌头轴肩直径 24 mm,旋转速度 600 r/min,焊接速度 100 r/min 和搅拌头倾斜角 2.8° 。

焊后沿垂直于焊缝横截面方向制备金相试样和拉伸剪切试样,分别使用 Kroll 试剂 (2 mL HF+4 mL HNO₃+94 mL H₂O) 和 NaOH 水溶液 (2 g NaOH+100 mL H₂O) 对铝合金和钛合金两侧接头进行腐蚀,在金相显微镜上观察焊缝横截面的宏观形貌和金相组织。采用扫描电子显微镜 (FEI NOVA 450, SEM) 和配套的能谱仪 (EDS) 对钛/铝搭接界面的形貌和界面层成分进行了详细分析。拉伸试样取样对称于搅拌摩擦焊焊缝中心,在万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 10 mm/min,每组工艺参数接头进行 3 次拉伸试验取平均值作为测试结果,以确保数据的准确性。

2 试验结果及分析

2.1 搭接接头组织形貌

三种搭接接头界面结构接头横截面宏观形貌如图 3 所示,由图可知在所选焊接工艺参数下,三种界面结构下搭接接头均实现了有效连接。在焊缝中心的焊核区完整且明显,连接界面处致密而均匀;在矩形结构和榫卯结构中,铝合金材料在宏观锁合结构中填充紧密,焊后未出现隧道和裂纹等缺陷,焊缝成形良好。

观察榫卯结构搭接界面金相组织和微观组织形貌,连接界面处金相组织形貌如图 4 所示,可以明显观察到,铝合金材料一侧靠近界面处晶粒明显细化,连接界面变得不完全平直,在铝合金中发现钛

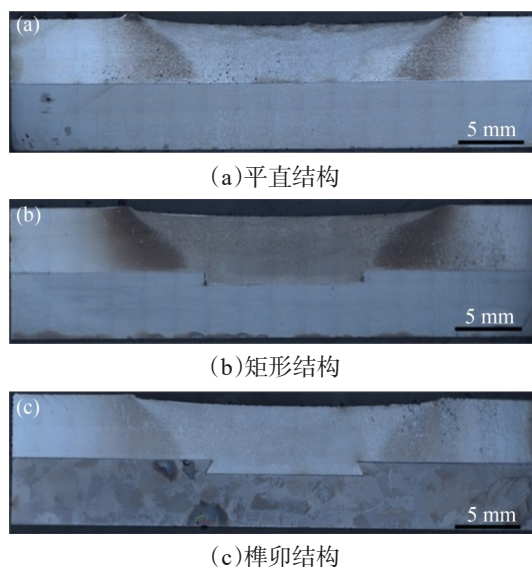


图3 三种不同搭接界面结构焊缝横截面宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of structural joint cross sections at three different lap interfaces

合金被搅入其中,表明铝合金和钛合金在连接界面处出现了微观机械互锁结构。在焊接过程中搅拌针的搅拌剪切变形作用下,晶粒破碎细化。同时高速旋转的搅拌头与材料之间相互作用,产生大量的摩擦热,使焊缝区域材料达到热塑性状态,在搅拌针的强形变驱动作用下,热塑性的钛合金被弯曲、扭转,随搅拌针的旋转和进给运动被搅入铝合金,在平直界面上产生不连续的微观机械互锁结构。

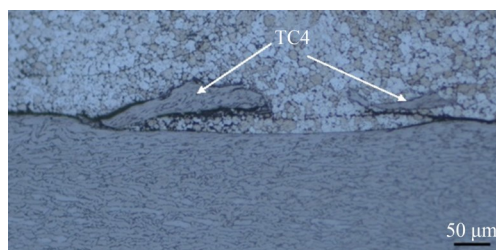


图4 榫卯结构搭接界面处金相组织形貌

Fig. 4 Metallographic structure morphology of dovetail structure at the lap joint interface

钛/铝搭接接头榫卯结构界面微观组织如图 5 所示。从图 5a 可以明显看出在搭接界面呈现出钛/铝微观上互相啮合的形貌,这是由于在搅拌针的搅拌摩擦剪切作用驱动下,铝合金和钛合金产生了塑性变形,原始的平直界面被破坏,二者在界面处发生局部混合形成了微观机械互锁结构。钛/铝界面处的微观机械互锁与搭接结构的宏观异形锁合使接头形成空间上多尺度的机械连接。对榫卯结构

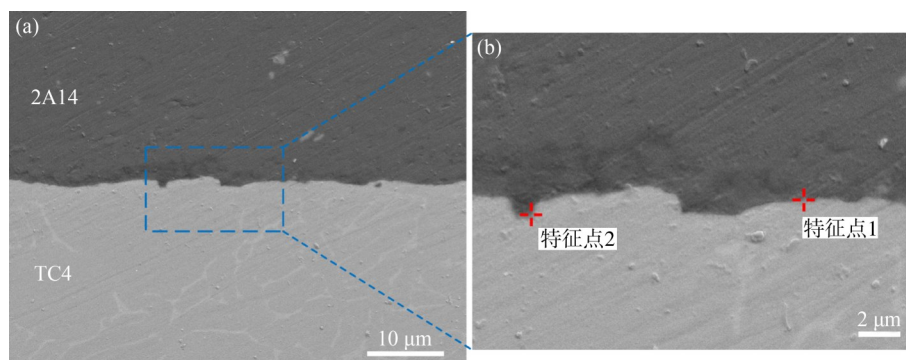


图5 榫卯结构搭接界面处微观组织形貌

Fig. 5 Microstructure morphology of dovetail structure at the lap joint interface

界面层处进行元素成分EDS分析如图5b所示,检测结果如表4所示,从元素分析结果可以看出在钛/铝界面形成了金属间化合物 TiAl_3 相。在搅拌摩擦焊过程中,搅拌头与金属材料相互作用会产生大量的摩擦热,上层的铝合金板和榫卯槽之间形成局部高温的封闭空间,在搅拌头的顶锻压力作用下促使钛/铝界面上的元素发生扩散形成金属间化合物,使钛/铝在界面层发生冶金结合。

表4 EDS分析结果(原子分数,%)

Table 4 Results of EDS analysis (at. %)

特征点	Al	Ti	Cu
1	71.1	20.3	8.6
2	73.7	22.2	4.1

2.2 搭接接头力学性能

三种不同界面结构搭接接头的拉伸剪切试验载荷—位移曲线如图6所示。图6中的载荷—位移曲线显示了三种不同界面结构的搭接接头在拉伸剪切试验过程中经历了不同的失效过程。榫卯结构接头试样在拉伸剪切过程中出现了三个阶段:在曲线的第一阶段,载荷线性增加,此时接头承载力由连接界面处的冶金结合部分和榫卯机械互锁部分共同承载;在第二阶段,载荷达到峰值后,由于连接界面处冶金结合部位脆性断裂失效,承载力急剧下降;在第三阶段,载荷完全由榫卯互锁结构承载,随着力的增加,互锁结构部位最终断裂失效,此时接头达到最大承载力126.92 MPa。矩形结构接头拉伸剪切试样的载荷—位移曲线与榫卯结构相似,同样经历三个阶段,区别是第三阶段接头最大承载力为92.98 MPa。传统的平面搭接结构由于不存在机械互锁结构,在拉伸剪切试验过程中试样

未发生二次断裂,其载荷—位移曲线只呈现出一个阶段,即试样仅以界面处的冶金结合部位承载,达到承载最大值68.59 MPa后,接头直接失效断裂。试验结果表明,榫卯结构接头具有更高的接头强度和伸长率,相较平面搭接结构接头强度提升85.05%,伸长率提升61.92%。

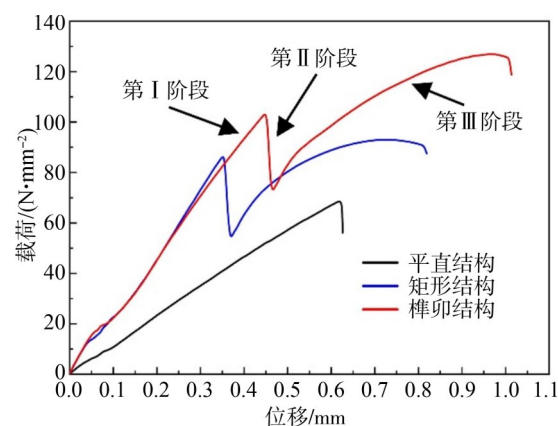


图6 三种界面结构搭接接头载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves for lap joints with three interfacial structures

三种不同界面结构搭接接头拉伸剪切失效后的界面结合部位和横截面形貌如图7所示。由于钛合金和铝合金在连接界面处形成了冶金连接,接头试样断裂失效后,钛合金表面仍附着部分残留的铝合金材料。观察断裂后横截面可以明显发现,在拉伸剪切实验过程中,矩形结构和榫卯结构在第三阶段时,铝合金在槽内的角部位发生了断裂,这是在受力的第三个阶段时,由机械互锁结构承载,当铝合金在槽内的角部位断裂后,导致接头失效分离。三种不同界面结构搭接接头断裂形貌与拉伸实验结果互相印证。

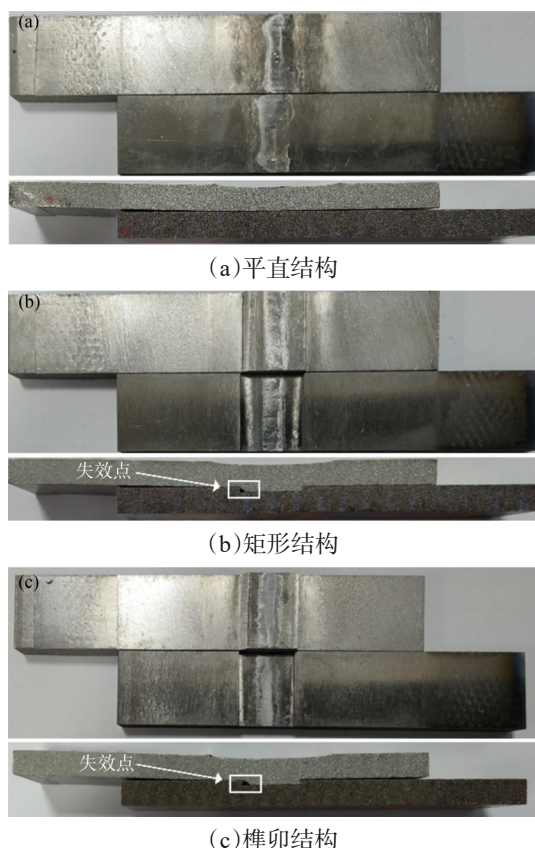


图7 三种界面结构搭接接头拉伸剪切失效后宏观形貌
Fig. 7 Macroscopic morphology of three lap joints with three interfacial structures after tensile shear failure

3 结论

(1)采用搅拌摩擦焊焊接了三种不同界面结构的钛/铝异种金属搭接接头,均可获得成形良好的接头,传统的平面搭接结构连接界面主要是冶金连接的方式,在平直的连接界面上存在不连续的微观机械互锁结构。

(2)矩形结构和榫卯结构均可实现“冶金连接+多尺度机械连接”,两种异形搭接结构在拉伸剪切试验中存在二次断裂现象,载荷—位移曲线可分为三个阶段。

(3)在三种界面结构中,榫卯结构接头具有更高的接头强度和伸长率,榫卯结构相较平面搭接结构接头强度提升85.05%,伸长率提升61.92%。

参考文献:

[1] 黄永德,伍大为,张泽龙,等. 钛合金搅拌摩擦焊搅拌

头磨损机理及其涂层强化[J]. 航空制造技术, 2024, 67(10):45-52.

HUANG Y D, WU D W, ZHANG Z L, et al. Wear mechanism of titanium friction stir welding tool and its coating reinforcement [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(10):45-52.

[2] Haifeng Y, Hongyun Z, Xinxin X, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 2A14-T4 Aluminum Alloy T-joints Prepared by Stationary Shoulder Friction Stir Welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(11):3845-3856.

[3] 陈玉华, 龚资颖, 张体明, 等. 钛/铝异种金属FSW接头的氢扩散试验设计与研究[J]. 电焊机, 2022, 52(06):99-104.

CHEN Y H, GONG Z Y, ZHANG T M, et al. Experimental Design and Research on Hydrogen Diffusion in FSW Joints of Titanium/Aluminum Dissimilar Metals [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(06):99-104.

[4] 吕宗亮, 刘景麟, 韩振宇, 等. 摩擦增材辅助Ti/Al搅拌摩擦搭接接头特征分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(06):69-74+117.

LV Z L, LIU J L, HAN Z Y, et al. Characteristic analysis of friction additive assisted Ti/Al friction stir lap welding [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2022, 43(06):69-74+117.

[5] Tiwari S K, Sharma H, Rao A U. A comprehensive review of the recent developments in friction stir welding of metals, alloys, and polymers: a review of process parameters and properties [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2024:1-24.

[6] 程哲闻, 张可, 吕晓辉, 等. 铝锂合金的搅拌摩擦焊及其改型工艺研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(03):46-53+71.

CHENG Z W, ZHANG K, LV X H, et al. Research Progress in Friction Stir Welding and Its Variant for Joining of Al-Li Alloy [J]. Electric Welding Machine 2023, 53(03):46-53+71.

[7] 孙广达, 闫中宪, 周利, 等. 外加能场辅助搅拌摩擦焊研究现状[J]. 焊接学报, 2024, 45(04):109-119+135-136.

SUN G D, YAN Z X, ZHOU L, et al. Research progress of energy field-assisted friction stir welding [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2024, 45(04):109-119+135-136.

[8] 毛镇东, 吴双连, 刘雪松. 超声辅助铝/钛搅拌摩擦搭接接头的成形和组织[J]. 焊接学报, 2019, 40(02):