

钛合金/铝合金搅拌摩擦焊接头的显微组织

陈玉华¹, 董春林², 倪 泉¹, 柯黎明¹

(1. 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;

2. 北京航空制造工程研究所 中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

摘 要: 采用搅拌摩擦焊对 TC1 钛合金和 LF6 铝合金异种金属进行焊接, 采用金相、扫描电镜和能谱观察分析焊接接头的组织。结果表明: 搅拌摩擦焊接头中, 钛合金母材与焊核的界面凹凸不平, 边界处存在白亮颗粒, 而铝合金母材与焊核的界面光滑、平整; 焊核区铝合金基体上分布大小不等的颗粒, 这种颗粒有两种类型, 一种颗粒的尺寸较小、呈细长条状, 另一种颗粒尺寸较大, 整体呈暗灰色、边缘有少量发亮的条带。两种颗粒中均有 Ti-Al 金属间化合物存在; 钛合金/铝合金异种材料焊接时, 搅拌头的磨损很严重, 在焊核和铝合金母材的边界存在搅拌头磨损后脱落的颗粒。

关键词: 钛合金; 铝合金; 异种合金; 结构; 搅拌摩擦焊; 显微组织

中图分类号: TG 456.9

文献标志码: A

Microstructure of friction stir welding joint between titanium and aluminum dissimilar alloys

CHEN Yu-hua¹, DONG Chun-lin², NI Quan¹, KE Li-ming¹

(1. National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. China Friction Stir Welding Center, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute,

Beijing 100024, China)

Abstract: The dissimilar metals of TC1 titanium alloy and LF6 aluminum alloy were jointed by friction stir welding (FSW), and the microstructure of welded joint was studied by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and energy disperse spectroscopy (EDS). The results show that, in the welded joint, the interface between titanium alloy base metal and nugget is rough and uneven, and there are bright particles on the boundary. The interface between aluminum alloy base metal and nugget is smooth. Many particles with different grain size on the aluminum alloy base metal varying sizes on it. The particles in nugget can be divided into two types, one type is long narrow and small, the other type is relative large, dimmed and with several alight band on the edge. Ti-Al intermetallic compounds exist in the two types of particles. The pin tool is worn seriously and there are particles worn from pin tool in the interface between aluminum alloy base metal and nugget.

Key words: Ti alloy; Al alloy; dissimilar alloys; structure; friction stir welding; microstructure

减轻质量、提高推重比和增加有效载荷一直是航空发动机和飞机结构设计追求的目标, 钛合金由于具有质轻、比强度高以及抗冲击等优点而成为航空航天

重点发展的新材料之一^[1]。而铝合金是目前航空航天、武器装备等高新技术领域中广泛应用的金属材料^[2], 因此, 将钛合金与铝合金连接形成复合结构可以最大

限度地利用材料各自的优点, 获得更好的经济效益, 因而, 在航空航天、武器装备等领域具有广阔的应用前景。然而, 钛合金与铝合金都是活性、极易氧化的金属, 两者熔点、热导率、热膨胀系数以及晶体结构等物理性能差异很大, 采用常规的焊接方法难以获得满足使用性能要求的焊接接头, 如熔化焊接时, 两种金属液相混合将生成大量脆性金属间化合物, 接头强度很低。目前, 国内外采用电弧熔钎焊^[3]、激光熔钎焊^[4]、固态扩散焊^[5-6]和液相扩散焊^[7]等方法对钛和铝异种材料的焊接进行了研究。搅拌摩擦焊是一种固态扩散焊接方法, 基本不受材料的物理化学性能和力学性能、晶体结构等的影响, 对克服不同材料性能差异带来的焊接困难具有极大的优势, 能够避免熔化焊的一些缺陷、减少脆性金属间化合物的形成, 比较适合于异种材料的连接。本文作者采用搅拌摩擦焊方法对钛合金/铝合金异种金属进行连接, 研究接头的组织结构特征, 以便进一步改进工艺, 提高焊接件的使用性能。

1 实验

实验材料为 LF6 铝合金和 TC1 钛合金, 试板厚度均为 2.0 mm, 其化学成分和力学性能分别如表 1 和 2 所列。试验采用的搅拌头用高温合金制成, 搅拌头轴肩直径为 18 mm, 探针直径为 5 mm。用自制的焊接夹具在铣床改装的搅拌摩擦焊机上进行焊接实验, 搅拌头的旋转速度为 750 r/min、焊接速度为 118 mm/min, 搅拌头倾角为 2°。搅拌摩擦焊时, 将钛合

表 1 LF6 铝合金的化学成分和力学性能
Table 1 Chemical composition and mechanical property of LF6 Al alloy

Mass fraction/%						Mechanical property	
Mn	Mg	Si	Cu	Fe	Zn	σ_b /MPa	δ /%
0.6	5.8	0.3	0.1	0.3	0.15	320	15

表 2 TC1 钛合金的化学成分和力学性能
Table 2 Chemical composition and mechanical property of TC1 Ti alloy

Mass fraction/%							Mechanical property	
Al	Mn	Fe	Si	C	O	N	σ_b /MPa	δ /%
2.0	1.8	0.1	0.15	0.1	0.15	0.05	650	20

金置于前进边, 铝合金置于返回边, 搅拌针偏移量为 0.5 mm, 即搅拌针边缘与钛合金-铝合金对接缝的距离为 0.5 mm。

焊后沿垂直于焊缝横截面方向制备金相试样, 采用 Kroll 试剂(2 mL HF + 4 mL HNO₃ + 94 mL H₂O)对铝合金一侧接头进行侵蚀; 采用 NaOH 水溶液(2 g NaOH+100 mL H₂O)对钛合金一侧接头进行侵蚀; 采用 Leica 图像分析仪、Quanta-200 型扫描电镜观察界面区的微观组织结构; 采用能谱仪分析界面区的元素分布。

2 结果与讨论

图 1 所示为焊接接头的显微组织。由图 1 可看出, LF6 铝合金母材为轧制的条状组织(见图 1(b)), 钛合金母材的组织为 α + β 相(见图 1(c))。钛合金母材与焊核的界面(见图 1(d), 即图 1(a)中 M 区)凸凹不平、边界线处存在白亮的颗粒, 而铝合金母材与焊核的界面(见图 1(e), 即图 1(a)中 P 区)光滑、平整, 结合良好; 焊核区组织为铝合金基体上分布着大小不等的颗粒(见图 1(f), 即图 1(a)中 N 区)。

采用扫描电镜在较高倍数下观察接头的微观组织并进行能谱分析, 其结果如图 2 所示。从图 2(a)中可知, 焊核区铝合金基体上分布的颗粒有两种类型, 一种颗粒的尺寸较小, 呈细长条状, 颗粒中间局部发亮(如图 2(a)中的区域 1); 另一种颗粒尺寸较大(如图 2(a)中的区域 2), 整体呈暗灰色, 边缘有少量发亮的条带(如图 2(a)中的区域 3), 对区域 3(即发亮的条带)进行进一步放大, 发现是由黑色条带(如图 2(b)中的区域 4)和白亮条带(如图 2(b)中的区域 5)间隔组成。

对图 2 中区域 1、2、3、4 和 5 分别进行能谱分析, 其结果如表 3 所列。区域 1 中 Ti 和 Al 元素的摩尔比接近 2:1, 且含有 Mn 元素, 但不含 Mg 元素, 说明区域 1 不含铝合金基体, 因此区域 1 可能是 Ti-Al 金属间化合物或者钛合金母材和 Ti-Al 金属间化合物的混合物。区域 2 的元素含量和钛合金母材的接近, 因此应该是钛合金母材的颗粒被搅入了焊核。区域 3 中 Ti 和 Al 元素的摩尔比接近 1:1, 且含有 Mg 元素和 Mn 元素, 可能是 Ti-Al 金属间化合物和钛合金母材、铝合金母材的混合物, 其黑色条带(即区域 4)为 Ti-Al 金属间化合物和钛合金母材的混合物, 白亮条带(即区域 5)为 Ti-Al 金属间化合物和铝合金母材的混合物。

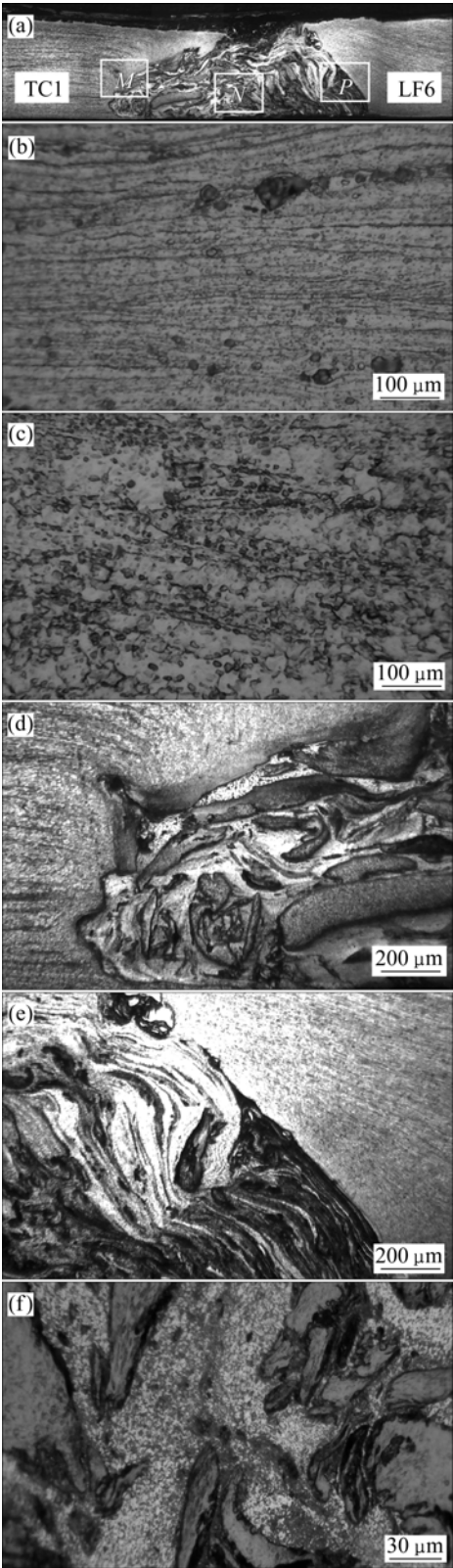


图 1 钛/铝搅拌摩擦焊接头的显微组织

Fig.1 Microstructures of Ti/Al FSW joint: (a) Whole morphology of joint; (b) Microstructure of LF6 base metal; (c) Microstructure of TC1 base metal; (d) Microstructure of interfacial zone between TC1 base metal and nugget; (e) Microstructure of interfacial zone between LF6 base metal and nugget; (f) Microstructure of nugget

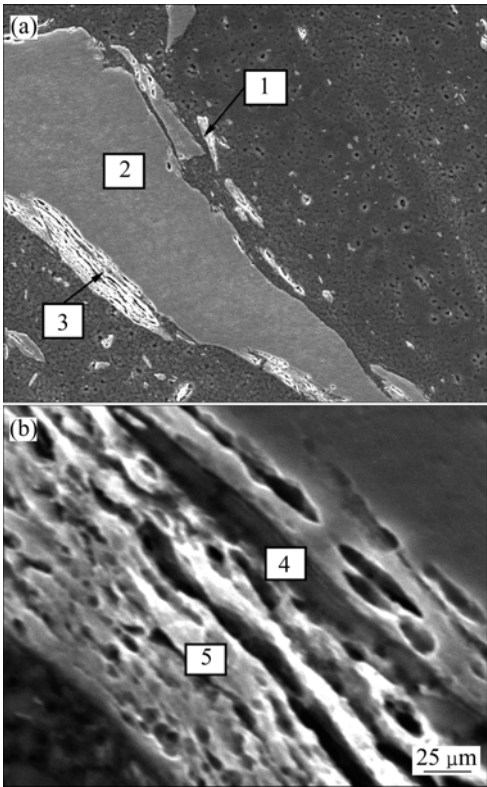


图 2 钛/铝搅拌摩擦焊接头的 SEM 像

Fig.2 SEM images of Ti/Al FSW joint: (a) Morphology of particles in nugget; (b) Morphology of zone 3 in Fig.2(a) under high magnification

表 3 钛/铝搅拌摩擦焊接头焊核区不同位置的元素含量

Table 3 Chemical composition of different interfacial zone in Ti/Al FSW joint (mole fraction, %)

Zone	Ti	Al	Mg	Mn
1	64.73	34.39	—	0.88
2	95.39	3.66	—	0.95
3	50.21	45.99	3.09	0.72
4	86.21	12.86	—	0.93
5	40.03	58.29	1.68	—

由上述分析可知，钛合金/铝合金异种金属搅拌摩擦焊时在焊核区形成了 Ti-Al 系金属间化合物。这是由于 Ti 和 Al 均是活性元素，搅拌摩擦焊时，搅拌头与工件间的摩擦热提高焊缝温度，同时，焊缝区的 Ti 与 Al 在搅拌头的作用下混合，并经历剧烈的塑性变形，二者的综合作用使焊缝在固态下形成 Ti-Al 金属间化合物。脆性的金属间化合物会使接头性能变差，当接头中形成数量较多的金属间化合物时，焊接接头变脆，在焊接应力作用下有可能导致焊缝开裂。

在焊核和铝合金母材边界还观察到磨损后脱落的颗粒(见图3)。对颗粒进行能谱分析,发现其主要成分为 62.09%Fe、17.03%Cr、6.79%Ni、6.92%Ti 和 6.44%Al(质量分数),这与搅拌头所用高温合金材料的成分接近,因此,这种颗粒是搅拌头磨损后脱落的颗粒,说明钛合金/铝合金异种材料焊接时搅拌头的磨损很严重。

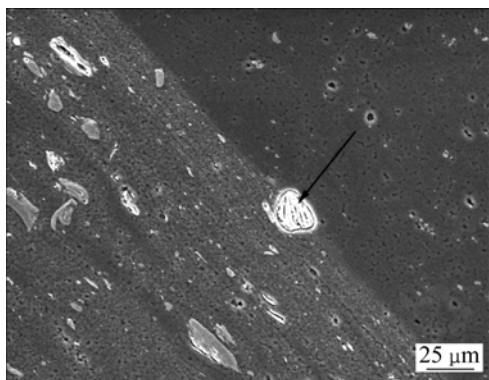


图3 搅拌头磨损后脱落的颗粒形貌

Fig.3 Microstructure showing particle exfoliated from stirring head after welding

因此,对于钛合金/铝合金异种材料的搅拌摩擦焊接,一方面要通过调整工艺减少焊接接头中金属间化合物的数量,另一面要研制耐磨损的搅拌头才有可能进一步提高接头性能。

3 结论

1) TC1 钛合金与 LF6 铝合金异种材料搅拌摩擦焊接头中,钛合金母材与焊核的界面凹凸不平,而铝合金母材与焊核的界面光滑、平整,两者结合良好。

2) 焊核区微观形貌为铝合金基体上分布着大小不等的颗粒,颗粒有两种类型:一种颗粒尺寸较小,

呈细长条状,中间局部发亮;另一种颗粒尺寸较大,整体呈暗灰色,边缘有少量发亮的条带。两种颗粒中均有 Ti-Al 金属间化合物存在。

3) 钛合金/铝合金异种材料焊接时搅拌头的磨损很严重,在焊核和铝合金母材的边界存在搅拌头磨损后脱落的颗粒。

REFERENCES

- [1] EYLON D, SEAGLE S R. Titanium technology in the USA—An overview[J]. *Journal of Material Science and Technology*, 2001, 17(4): 439–443.
- [2] 颜鸣皋, 吴学仁, 朱知寿. 航空材料技术的发展现状与展望[J]. *航空制造技术*, 2003(12): 19–25.
YAN Ming-gao, WU Xue-ren, ZHU Zhi-shou. Recent progress and prospects for aeronautical material technologies[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2003(12): 19–25.
- [3] KORENYUK Y M. Interaction of liquid aluminium and solid titanium in fusion welding[J]. *Welding Production*, 1975, 22(6): 3–5.
- [4] 倪加明, 李俐群, 陈彦宾, 封小松. 铝/钛异种合金激光熔钎焊接头特性[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(4): 617–622.
NI Jia-ming, LI Li-qun, CHEN Yan-bin, FENG Xiao-song. Characteristics of laser welding-brazing joint of Al/Ti dissimilar alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(4): 617–622.
- [5] REN Jiang-wei, LI Ya-jiang, FENG Tao. Microstructure characteristics in the interface zone of Ti/Al diffusion bonding[J]. *Materials Letters*, 2002, 56(5): 647–652.
- [6] WILDEN J, BERGMANN J P. Manufacturing of titanium/aluminum and titanium/steel joints by means of diffusion welding[J]. *Welding and Cutting*, 2004, 3(5): 285–290.
- [7] SOHN W H, BONG H H, HONG S H. Microstructure and bonding mechanism of Al/Ti bonded joint using Al10Si1Mg filler metal[J]. *Material Science and Engineering A*, 2003, 355(1/2): 231–240.

(编辑 龙怀中)