

铝 / 钛异种金属焊接技术研究进展*

Research Progress of Welding Technology of Dissimilar Metals Between Titanium and Aluminum

南昌航空大学航空制造工程学院焊接工程系 陈玉华



陈玉华

博士,副教授,硕士生导师,南昌航空大学焊接工程系主任,江西省高校中青年骨干教师,江西省焊接学会副秘书长,江西省船舶行业生产条件资质评价专家。主要从事特种焊接技术(搅拌摩擦焊、激光焊等)、材料焊接性、微连接及金属表面涂层技术方面的研究工作,主持在研国家自然科学基金、江西省自然科学基金、上海航天科技创新基金等课题 5 项,发表 SCI、EI 收录论文 40 余篇。

铝 / 钛异种金属复合结构同时兼有铝合金密度低、经济性好和钛合金强度高、耐腐蚀性好等优点,能够减轻结构重量、节约能源,在航空航天、武器装备、交通运输等领域拥有广阔的应用前景,飞机机舱散热片、机翼蜂窝夹层、座位导轨和高速列车车厢等结构均可采用铝 / 钛复合结构。

异种材料复合构件能够最大限度利用材料各自的优点,起到“物尽其用”的效果,获得更好的经济效益和社会效益^[1]。铝 / 钛异种金属复合结构同时兼有铝合金密度低、经济性好和钛合金强度高、耐腐蚀性好等优点,能够减轻结构重量、节约能源,在航空航天、武器装备、交通运输等领域拥有广阔的应用前景,飞机机舱散热片、机翼蜂窝夹层、座位导轨和高速列车车厢等结构均可采用铝 / 钛复合结构^[2]。特别是近年来,随着航空发动机和飞机结构设计对“减轻重量、提高推重比、增加有效载荷”的要求越来越高,将铝合金与钛合金焊接形成复合结构的需求越来越迫切。

但是,由于铝、钛都是活性金属、极易氧化,且两者之间的物理、机械性能存在较大差别,如两者的熔点相差约 800℃,两者的晶格类型、晶格参数等结晶化学性能差异很大,铝的热导率和线膨胀系数分别是钛的 16 倍和 3 倍。因此铝 / 钛异种金属的焊接性很差,接头的强度不能满足要求,铝 / 钛异种金属的焊接既是热点也是难点,目前还没有一种成熟的工艺可以用于实际生产^[3]。

铝 / 钛异种金属焊接技术现状

目前,国内外主要对铝 / 钛异种金属的钎焊、扩散焊、熔-钎焊、爆炸焊等连接方法进行了探索。康慧

* 国家自然科学基金(51265042)、江西省自然科学基金(20114BAB206006)和江西省教育厅科技项目(GJJ12411)资助。

等^[4]以 Al-11.5Si 合金为基,通过添加不同含量的 Sn 和 Ga 元素配置成 9 种钎料对 LF21 铝合金和 TC4 钛合金进行了真空钎焊,结果表明:在结合界面上生成层状脆而硬的脆性相是铝/钛钎焊时所存在的主要问题;在钎料中加入 Sn 和 Ga 元素可有效抑制脆性相的形成、改善接头性能;当 Sn 和 Ga 元素含量分别为 10% 和 0.2% 时接头的剪切强度达到 67MPa。曲文卿等^[5]采用高频感应钎焊进行了钛合金管与铝合金管的连接,由于加热时间短、脆性相来不及产生,因而获得了力学性能和密封性能较好的接头。吕世雄等^[6]采用交流钨极氩弧焊电弧熔钎焊方法也实现了 TC4 钛合金/LF6 铝合金的连接。

采用扩散焊方法能够在一定程度上克服铝/钛焊接时熔点相差较大的问题,因此国内外学者进行了较多的研究。Yao 等^[7]研究了铝/钛扩散焊接头形成机理和焊接工艺对 LF6 铝合金/TA2 纯钛异种材料扩散焊接头强度的影响规律,接头最高剪切强度为 83MPa。Sohn 等^[8]采用 Al-10Si-1Mg 箔片作为中间层,对纯钛和纯铝进行了液相扩散连接,其界面结构和元素分布如图 1 所示,研究结果发现接头中存在 $Ti_7Al_5Si_{12}$ 连续金属间化合物反应层和不连续的 $Al_{12}Si_3Ti_5$ 金属间化合物,并认为 Si 元素可抑制界面反应、减少金属间化

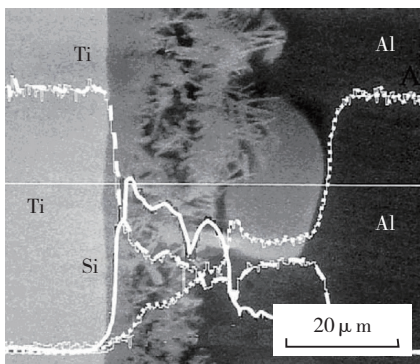


图1 Al/Ti液相扩散连接界面区的元素分布^[8]

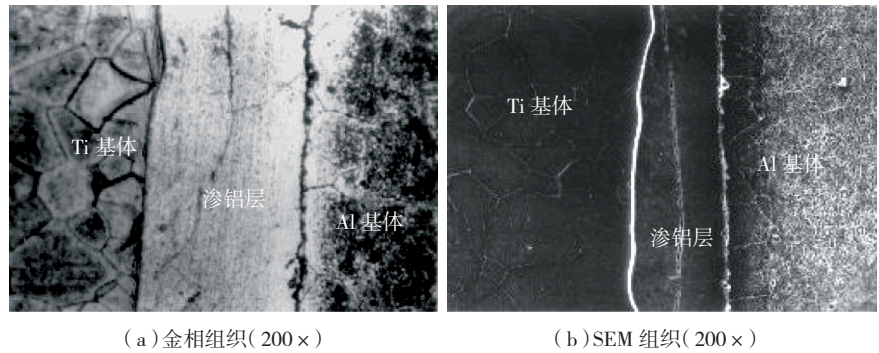


图2 Al/Ti扩散焊接头界面附近的显微组织^[10]

合物,接头剪切强度最高为 80MPa。

Lee 等^[9]采用 Al-10Si-Mg 箔片作为夹层在 580~640℃ 范围内对铝/钛异种金属进行液相扩散连接时发现:接近钛合金一侧的界面反应层为 $Ti_7Al_5Si_{12}$,接近铝合金一侧为 $Ti_9(AlSi)_{23}$,随着温度的升高 $Ti_7Al_5Si_{12}$ 的厚度减小。Ren 等^[10]通过对钛合金表面渗铝的方法实现了铝/钛的扩散连接,接头强度可达 180MPa,图 2 (a)和(b)分别为扫描电镜下观察到的 Ti/Al 扩散焊接头界面附近的显微组织,可见 Ti/Al 扩散焊接头区由钛侧过渡区、渗铝层、铝侧过渡区组成,钛侧过渡区在扩散焊后形成了一层白亮合金层(厚度约 3~10 μm),经判定被认为是 $TiAl_3$ 和 $TiAl$ 金属间化合物。

由于铝/钛异种金属焊接的难度较大,研究者尝试了“熔-钎焊”这种新技术。Nesterow 等^[11]进行了铝合金管与钛合金管对接的电弧熔-钎焊技术研究,解决了热裂纹缺陷的问题。德国不莱梅应用射线研究所采用激光熔-钎焊技术使搭接接头下方的铝合金熔化后与钛合金形成钎焊接头,实现了 0.8mm 厚 Ti-6Al-4V 与 1mm 厚 AlMg0.4Si1.2 铝合金的搭接连接^[12]。哈尔滨工业大学陈彦宾课题组选用 Al-12Si

焊丝作为填充材料对铝/钛异种金属的激光熔-钎焊进行了深入研究,实现了厚度为 1.5mm Ti-6Al-4V 钛合金和 5056 铝合金板材的连接,获得了焊接成形良好的接头(如图 3 所示),其抗拉强度可达铝合金母材的 80%^[13-14]。

北京工业大学的肖荣诗等对铝/钛激光深熔钎焊工艺及接头力学性能进行了研究,可以实现铝/钛异种合金的焊接,但在焊接过程中热输入量的控制较难,易造成焊缝上、下部分的中间钛合金层熔化,与液态的铝合金发生剧烈反应,生成金属间化合物,对接头的力学性能造成一定的负面影响^[15]。

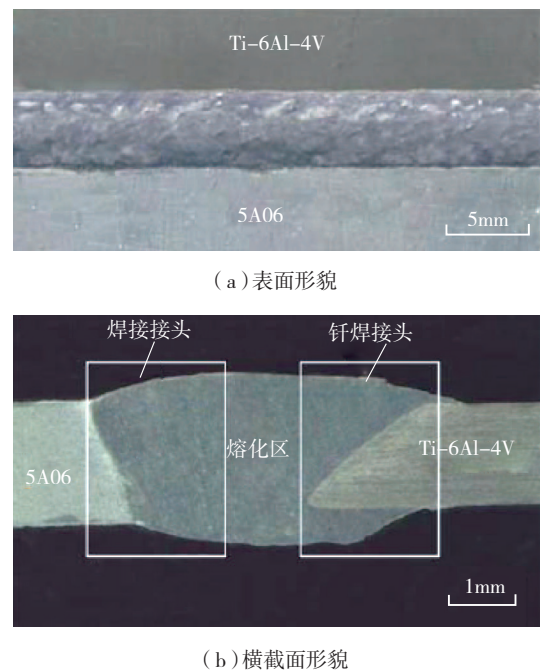


图3 Al/Ti激光熔钎焊接头形貌^[14]

日本大阪大学 Fuji 等对铝 / 钛的惯性摩擦焊率先开展了深入研究,认为脆性相的厚度决定了接头的力学性能,脆性相的最大临界厚度为 $5\mu\text{m}$ ^[16]。西北工业大学傅莉等^[17]采用电磁场作用下的摩擦焊实现了铝 / 钛的连接。此外,研究者还采用激光焊^[18]、电阻焊^[19]等方法对铝 / 钛的焊接进行了探索。

搅拌摩擦焊技术在铝 / 钛异种金属连接中的应用

搅拌摩擦焊是一种新型的固态连接方法,基本不受被焊材料的物理化学性能、机械性能、晶体结构等的影响,对于克服材料性能差异导致的焊接困难具有极大的优势,从 2009 年开始,国外有些学者开始采用搅拌摩擦焊来连接铝 / 钛异种金属。Chen 等^[20]采用搅拌摩擦焊技术实现了纯钛和 Al-Si 合金的搭接连接,观察了接头的微观组织、相结构,测试了接头的性能,结果表明,焊接接头的强度达到 Al-Si 合金母材的 62%,焊接接头界面区形成了 TiAl_3 相。Dressler 等^[21]采用搅拌摩擦焊技术实现了 Ti-6Al-4V 钛合金和 2024-T3 铝合金的对接焊,如图 4 所示,焊接接头的抗拉强度达到铝合金母材的 73%。

本文作者对 LF6 铝合金 / TC1 钛合金

异种材料搅拌摩擦焊搭接和对接接头的微观组织结构和性能进行了研究^[22-23]。采用搅拌摩擦焊对 TC1 钛合金和 LF6 铝合金异种金属进行了搭接连接,当搅拌头旋转速度为 1500r/min、焊接速度为 60mm/min 时,能获得焊缝成形良好、无孔洞和裂纹等缺陷的搭接接头(如图 5 和 6 所示),搭接处铝合金和钛合金充分混合,形成焊核区。焊核两侧进入铝合金中的钛合金在搅拌针的挤压下发生了弯曲,使得钛 / 铝紧密结合。搭接接头中心部位的搭接界面区呈层状组织(见图 7),可分为 3 层:靠近焊核和靠近钛合金母材一侧的均为黑白相间的条带状组织,含有焊接过程中生成的 Ti-Al 金属间化合物;夹在中间的为黑

色片状组织和灰色基体上分布黑色颗粒的条带状组织,分别是被搅入界面区的钛合金母材和钛合金母材与铝合金母材的机械混合物。

对于 TC1 钛合金 / LF6 铝合金异种金属搅拌摩擦焊的对接焊,当搅拌头的旋转速度为 750r/min、焊接速度为 118mm/min、搅拌头倾角为 2° 时能够获得较好的焊缝成形(图 8)。搅拌摩擦焊接头中钛合金母材与焊核的界面凹凸不平、边界线处存在明亮的颗粒,而铝合金母材与焊核的界面光滑、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(图 9)。在扫描电镜下观察,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

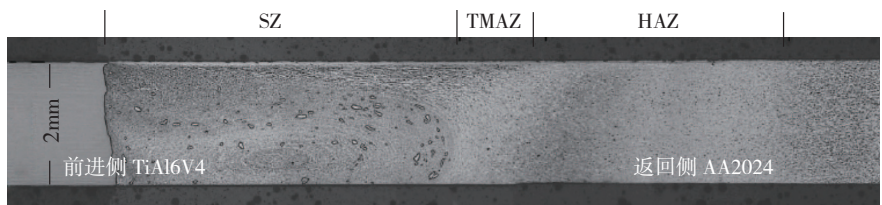


图4 Al/Ti异种金属搅拌摩擦焊接头横截面形貌^[21]



图5 Al/Ti异种金属搅拌摩擦焊搭接接头表面形貌



图6 Al/Ti异种金属搅拌摩擦焊搭接接头横截面形貌

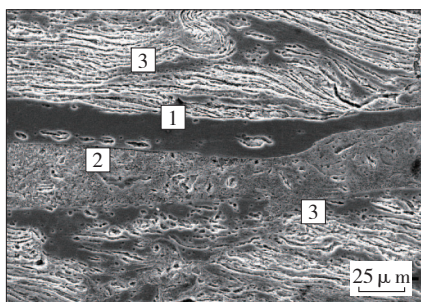
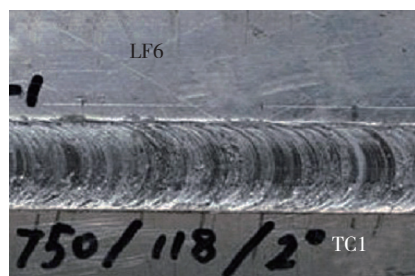


图7 Al/Ti异种金属搅拌摩擦焊搭接接头界面区微观组织结构



(a) 表面成形



(b) 焊接接头横截面形貌

图8 Al/Ti异种金属搅拌摩擦焊对接接头形貌

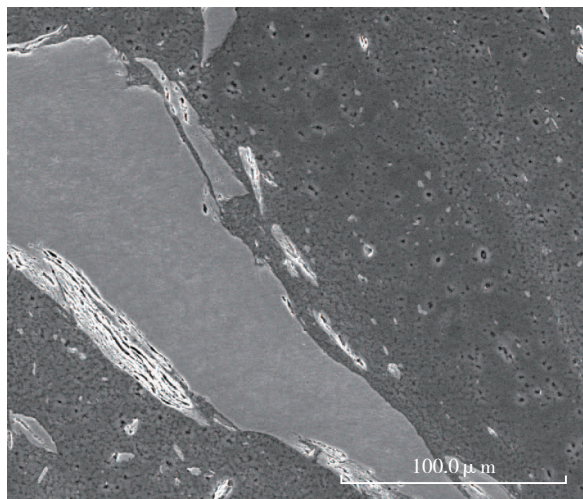


图9 Al/Ti异种金属搅拌摩擦焊对接接头中脆性相颗粒

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。能谱分析结果表明两种颗粒中均有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。

上述研究表明，由于铝、钛的活性均较强，铝/钛搅拌摩擦焊和钎焊、扩散焊类似，在接头中也会形成多种Ti-Al金属间化合物，使得焊缝变脆、强度降低。当工艺参数不恰当时，在焊接过程中会出现开裂。焊接接头中脆性相的硬度较高，一方面对搅拌头造成严重的磨损、影响焊接质量的稳定性和搅拌头寿命；另一方面，焊缝中的缺陷也往往是由于脆性相粘着在搅拌头上、对焊缝塑性金属的流动造成不利影响而产生的。因此，对于铝/钛异种金属的搅拌摩擦焊，目前接头强度还无法实现与铝合金母材等强。但试验中同时发现，搅拌摩擦焊不同于钎焊、扩散焊，脆性相不是处于材料的连接界面上，而是在搅拌针作用下随塑性金属的流动而分布在焊缝的不同位置。

结束语

铝/钛异种金属的焊接性较差，

其焊接既是热点也是难点，目前还没有一种成熟的工艺可以用于铝/钛异种金属的焊接，搅拌摩擦焊作为一种新型的固态连接方法在铝/钛异种金属连接方面具有很好的前景，但焊接过程中也会不可避免地形成脆性相，造成接头性能不高，同时对搅拌头造成严重的磨损、影响焊接质量的稳定性和搅拌头寿命。因此，有必要研究

铝/钛异种金属搅拌摩擦焊接头中脆性相的形成机理、分布规律及其与接头性能的相关性，并采取相应的措施控制脆性相的形成与分布，为提高接头的强度和稳定性奠定基础。

参考文献

- [1] Vaidya W V, Horstmann M, Ventzke V. Structure-property investigations on a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications(Part I: Local gradients in microstructure, hardness and strength). *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 2009, 40(8): 623-633.
- [2] Chen S H, Li L Q, Chen Y B, et al. Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011(509): 891-898.
- [3] Kahramana N, Gulencb B, Findik F. Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti-6Al-4V and Al plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2007(34):1423-1432.
- [4] Zhu Y, Zhao P F, Kang H, et al. A preliminary study on filler metals for vacuum brazing of Al/Ti. *China Welding*, 2002, 11(2):130-132.
- [5] 曲文卿,董峰,齐志刚,等. 异种材料的连接. *航天制造技术*, 2006(3):44-49.
- [6] 吕世雄,许志武,王海涛,等. 铝、钛及其合金异种金属交流钨极氩弧焊电弧微熔钎焊方法. 中国发明专利, CN101015876.

2007.

[7] Yao W, Wu A P, Zuo G S, et al. Formation process of the bonding joint in Al/Ti diffusion bonding. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 480: 456-463.

[8] Sohn H W, Bong H H, Hong S H. Microstructure and bonding mechanism of Al/Ti bonded joint using Al-10Si-1Mg filler metal. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 355: 231-240.

[9] Lee T W, Kim I K, Lee C H, et al. Growth behavior of intermetallic compound layer in sandwich-type Al/Ti diffusion couples inserted with Al-Si-Mg Alloy foil. *Journal of Materials Science Letters*, 1999(18): 1599-1602.

[10] Ren J W, Li Y J, Feng T. Microstructure characteristics in the interface zone of Al/Ti diffusion bonding. *Materials Letters*, 2002, 56(5):64-52.

[11] Nesterov A F, Gordo V P, Plychevskii M I. Special features of producing telescopic titanium-aluminium welded brazed joints. *Welding Production*, 1986, 33(12):15-17.

[12] Korenyuk Y M. Interaction of liquid aluminium and solid titanium in fusion welding. *Welding Production*, 1975, 22(6): 3-5.

[13] Chen S H, Li L Q, Chen Y B, et al. Joining mechanism of Al/Ti dissimilar alloys during laser welding-brazing process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011(509): 891-898.

[14] Chen Y B, Chen S H, Li L Q. Influence of interfacial reaction layer morphologies on crack initiation and propagation in Al/Ti joint by laser welding-brazing. *Materials and Design*, 2010, 31:227-233.

[15] 兰天,董鹏,肖荣诗. 铝/钛异种合金激光深熔钎焊试验分析. *焊接学报*, 2010, 31(8):109-111.

[16] Fuji A, Kokawa H, Kim Y C. Study of stress-strain, acoustic wave velocity and hardness distributions across joint interface of pure Ti/pure Al friction weld joint. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2000, 18(4): 617-627.

[17] 傅莉,杜随更,白建红. TC4钛合金与LD10铝合金感应摩擦焊接头的组织与性能. *中国有色金属学报*, 2007, 17(2): 228-232.

[18] Cabibbo M, Marrone S, Quadri E. Mechanical and microstructural characteristics of laser welded titanium-aluminium joints. *Welding International*, 2005, 19(2):125-129.

本文共有参考文献23篇，因篇幅有限，未能一一列出，如有需要，请向本刊编辑部索取。（责编 深蓝）