

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0302-04

铝-钛异种合金的激光熔钎焊

封小松, 李俐群, 朱宝华, 陈彦宾

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出了一种连接 Al/Ti 异种合金的新工艺, 即采用激光为热源, AlSi12 为填充材料, 实现了 Ti-6Al-4V 钛合金和 LF6 铝合金的激光熔钎焊连接。激光熔钎焊是一种局部加热焊接过程, 通过调整激光加热参数, 控制填充材料的润湿铺展及界面金属间化合物的形态和数量, 从而控制接头质量。在实验过程中, 填充焊丝实时送入, 通过改变激光功率、间隙大小、光斑尺寸、焊接速度、送丝速度、激光辐照位置等工艺参数, 以获得对接头的不同加热效果。研究了不同参数下的钎缝成形规律、接头界面特点及接头拉伸强度。结果表明, 采用激光熔钎焊工艺连接 Al/Ti 异种合金可以获得成形良好、强度较高的接头, 但焊接过程对工艺参数要求严格; 接头厚度方向不同位置的界面金属间化合物的厚度和形态各不相同; 热输入较低情况下, 钎料与钛合金材料作用不充分, 接头易从界面处断裂; 热输入较高时, 接头容易从铝合金侧熔合区附近断裂。

关键词 激光熔钎焊; Ti-Al 异种材料连接; 焊缝成形; 接头强度

中图分类号 TG454; TN249 **文献标识码** A

Laser Welding-Brazing Al/Ti Dissimilar Alloys with Filler Metal

FENG Xiao-song, LI Li-qun, ZHU Bao-hua, CHEN Yan-bin

(State Key Lab of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A novel method, laser welding-brazing is presented to joint Al/Ti dissimilar alloys, in which filler metal is AlSi12 and base metal are Ti-6Al-4V and LF6. With this method, the desirable spatial and temporal temperature distribution can be obtained, and then the shape and quantity of intermetallic compounds can be controlled. In experiments, the process characteristics were investigated with the butted joint, the influence of laser power, gap length, feeding and welding speed, laser irradiation position on the joint appearance, interface behavior and tensile-strength were assessed. The experimental results indicate that the joints with good appearance and high tensile-strength can be achieved with this joining method, although the process requirements are rigorous. The shape and thickness of intermetallic compound layer at different positions in the same joint are various. The joint fracture accrues at the interface between titanium alloy and weld when the heat input is inadequate.

Key words laser welding-brazing; Al/Ti dissimilar joints; seam appearance; joint strength

1 引 言

在航空航天工业中, 钛合金和铝合金都有密度小、强度高优点而应用广泛, 但铝合金的强度及耐热性较低, 而钛合金密度较大, 造价较高。因此这两种异种合金焊接的复合构件对于降低结构重量和满足特殊的性能要求是必要的。但由于两者的性能差异, Ti 和 Al 室温下的溶解度小及金属间化合物的形成, 使得这两种材料的连接存在困难。Al, Ti 两种金属在焊接过程中容易产生大量的脆性金属间化

合物, 它们在中低温下具有高强度、低延展性、室温塑性和易断裂性能, 这使得 Al/Ti 复合构件的应用受到极大的限制。

国内外对于 Al/Ti 异种材料的连接进行了大量的研究, 但目前还没有成熟的连接工艺的报道。其连接方法主要有真空钎焊、扩散焊、摩擦焊等。对于钎焊工艺主要关注于钎料合金的研制^[1]、界面微观结构特征及连接工艺的改进等^[2]。扩散焊主要关注于工艺的优化^[3]、接头性能的测量和评价及界面对

作者简介: 封小松(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事激光材料连接研究。E-mail: fxsupc@hit.edu.cn

导师简介: 陈彦宾(1962—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工技术基础研究与应用开发。

E-mail: chenyb@hit.edu.cn

接头质量的影响^[4]。需要指出的是,以上的连接方法所获得的接头强度都比较低,界面金属间化合物的形成是限制接头性能的主要因素。此外,整体加热的炉中钎焊对母材性能及构件尺寸有影响,摩擦焊和扩散焊在接头形状、连接效率等方面有限制^[5,6]。

本文提出一种新的 Al/Ti 异种合金的连接工艺,采用激光为热源,AlSi12 为钎料,进行了 Ti-6Al-4V 和 LF6 的激光熔钎焊连接。对焊缝成形、接头微观组织及拉伸强度等方面的特点进行了研究,为改进这一新的连接方法、提高焊接质量提供理论基础。

2 实验过程

实验所用设备主要有 3 kW 扩散冷却 CO₂ 激光器;四轴控制 CNC 数控系统及平面工作台以及自动送丝系统。实验过程示意图如图 1 所示。母材为常用于航空航天工业中的 LF6 铝合金 TC4 钛合金,板厚为 1.5 mm。LF6 属于 Al-Mg 系合金,TC4 钛合金属于(α + β)钛合金,两者在高温下都容易与大气发生反应,在实验过程中施加 Ar 气进行保护。为了除去 LF6 和 TC4 的表面油污及氧化膜,试件需经丙酮去油和化学清洗。

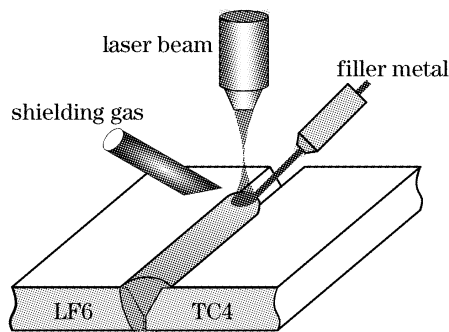


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Sketch for experimental system

接头形式为 Y 型坡口的对接接头,坡口角度大致为 45°。对焊后试件的焊缝成形、横截面形貌进行宏观观察,采用光学显微镜和扫描电镜(SEM)对接头的微观组织及界面情况进行观测,并对接头强度进行拉伸实验。

3 实验结果

激光熔钎焊过程并不像炉中钎焊那样为一均匀稳态的温度场,而是一个随时间和空间变化的非稳态热场。并且在焊接过程中,激光加热速度快,但对钎缝总的热输入较小,这使得激光加热区内的温度

梯度较大,焊接过程温度变化剧烈。本文围绕激光加热这一特点,分别对 Al/Ti 异种合金的激光熔钎焊的焊缝成形、接头界面及拉伸强度进行评价。

3.1 焊缝成形

实验过程中发现,对于 Al/Ti 异种合金的激光熔钎焊连接,影响焊缝成形的因素众多,获得良好成形的工艺范围非常窄,焊缝成形对工艺参数的变化很敏感,焊接过程稳定性需要进一步提高。影响焊缝成形的主要因素有激光功率、接头间隙、光斑加热位置等。

激光功率直接决定了焊缝的热输入,激光功率过小,则与填充材料接触的铝侧母材不完全熔化,填充材料需要对固态铝合金表面进行润湿,这在激光加热的短时间内无法实现,并且接头背面因为温度更低而无法成形。激光功率过大,则填充金属及熔化的铝母材容易坍塌。图 2 为不同功率下的焊缝截面。在焊接速度为 0.4 m/min 时,激光功率低于 1400 W,焊缝成形较差,不能形成有效连接;当功率高于或等于 1400 W 时,焊丝金属的铺展效果得到改善;当功率高于 1600 W 时,容易造成填充材料烧损及焊缝下塌。

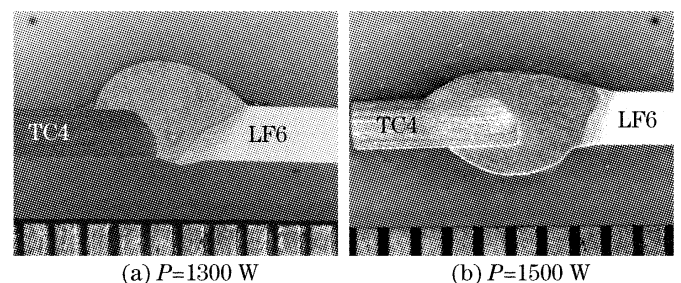


图 2 不同激光功率下的焊缝成形

Fig. 2 Joint cross-section with different laser power

影响焊缝成形的另一个主要因素是对接间隙。在激光熔钎焊过程中,激光直接辐照在填充材料上,对母材的加热主要通过填充材料来进行,间隙大小决定了填入间隙的熔化金属的多少也决定了接头的被加热效果。当接头间隙较小时,接头下部填入的熔化

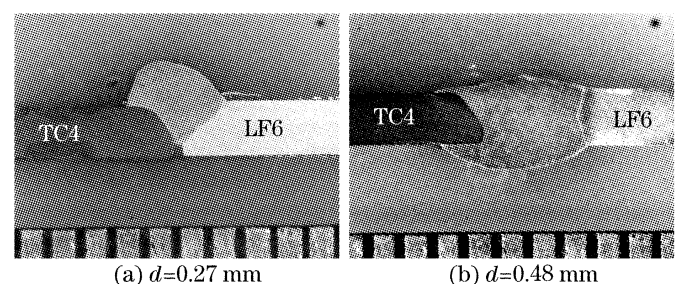


图 3 不同对接间隙下的焊缝

Fig. 3 Joint cross-section with different gap length

材料较少,温度较低,接头背面无法成形;接头下部温度较高,熔化材料的表面张力较低,焊缝容易下塌。图3给出了间隙分别为0.27 mm和0.48 mm的焊缝横截面。实验表明对接间隙在一定的范围内(0.4~0.6 mm)才能获得良好的焊缝成形。

除了激光功率和对接间隙,激光加热位置对焊缝成形也有很大的影响。由于铝合金和钛合金的热传导系数相差很大,激光对中加热,则焊缝两端母材温度分布不对称,在铝侧母材温度较低,填充材料难以熔化或润湿母材。实际焊接过程中,激光加热位置应稍偏铝合金母材一侧。此外,送丝速度和焊接速度的匹配,决定了接头填充量,光斑直径影响加热范围,这两者也对焊缝成形有影响,实验表明,在当前实验系统下,送丝速度与焊接速度的比值在3.5~5.3之间、光斑直径在3~5 mm之间才能获得较好的焊缝成形。

3.2 接头界面特点

由于传统的铝-钛钎焊接头,钎缝界面是薄弱区,为了获得Al/Ti合金激光熔钎焊接头TC4界面处的特征,对典型焊接参数的接头界面进行了金相显微镜和扫描电镜观察。图4给出了激光功率为1600 W,焊接速度为0.35 m/min的接头界面处的金相显微镜照片。为了分析整个接头中金属间化合物的分布,分别选取接头中的4个不同的区域进行扫描电镜分析。

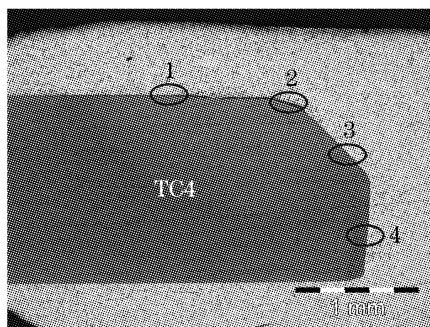


图4 接头中不同的扫描电镜分析区域
Fig. 4 Areas of SEM analysis in a joint

不同接头位置的金属间化合物的分布形态及数量如图5所示。位置2处的金属间化合物层厚度最大,位置1处其次,位置3处的界面层厚度再次之,位置4处的金属间化合物层厚度最薄。从分布形态上来看,除位置2处的金属间化合物层有形成层状连续分布的趋势外,其余位置均为非连续的锯齿状分布。位置1处,金属间化合物还有呈棒状、须状进入焊缝的趋势。金属间化合物层的厚度和形状直接与接头温度分布相关。激光熔钎焊属于局部热源焊接,在激光加热下,热源能量呈高斯分布,对母材、焊

丝或焊缝金属表面进行加热,不仅在焊缝宽度方向上接头温度分布不均匀,在焊缝厚度方向上也存在很大的温度梯度。在接头上部靠近热源中心的位置2处,温度最高;位置1处也能获得激光的加热,温度次之;而位置3和位置4处,激光不能直接加热,只能通过熔化的填充材料的间接加热,温度相对较低,界面反应不充分。

此外,从图5中还可看出,激光熔钎焊下,金属间化合物的厚度可以控制在10 μm以下,分布形态也与其他钎焊工艺获得的金属间化合物不同。真空钎焊获得的金属间化合物是连续层状分布的,对接头性能影响最大,激光熔钎焊工艺获得的金属间化合物大部分位置呈非连续的锯齿状分布,降低了金属间化合物层对接头性能的损害。

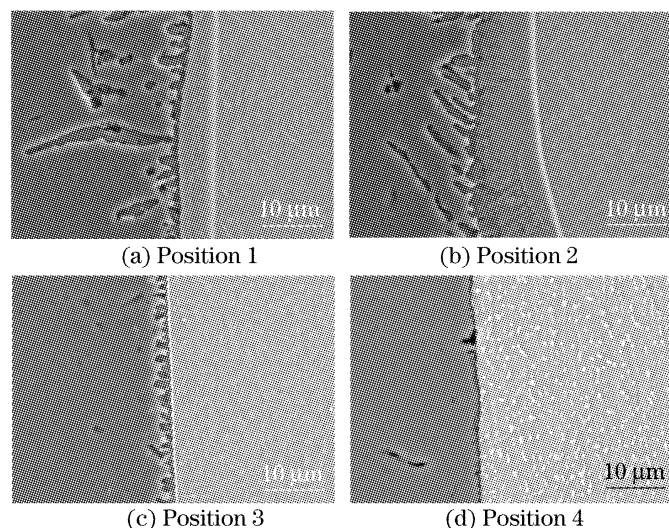


图5 接头中不同区域的金属间化合物的分布形态

Fig. 5 Intermetallic compound at different interface position

3.3 接头强度

为了对激光熔钎焊接头进行评价,对成形较好的接头进行了拉伸实验,结果如表1所示。采用了激光功率与焊接速度的比值,即线能量来评价接头的热输入,获得热输入与接头强度及接头断裂位置的关系。

表1 接头强度及断裂位置

Table 1 Results of joints tensile test

Sample	Heat input /(J/mm)	Tensile-strength /MPa	Cracking position
1	164	326.5	Interface
2	175	301.2	Interface
3	200	295.3	Interface
4	240	309.9	Fusion area
5	257	329.2	Fusion area
6	274	288.4	Fusion area

从表 1 可见,在线能量过小时,断裂易发生在焊缝金属与 TC4 母材的界面,接头界面处为薄弱区域;线能量较大时,拉伸试件基本在靠近 LF6 母材侧的焊缝熔合区处断裂,此时接头界面处的结合较好。

可见与普通的炉中钎焊不同的是,激光熔钎焊接头的失效并不是因为界面形成的脆性金属间化合物过厚而导致的,更多的是因为接头界面反应不充分造成的,这与激光加热和冷却速度快有关。从接头强度来看,与热输入并没有严格的对应规律,对于成形较好的接头,其平均强度在 300 MPa 以上,可达到铝合金母材抗拉强度(350 MPa)的 85% 以上。由此可见,采用激光熔钎焊技术连接 Al/Ti 异种合金具有应用潜力。

4 结 论

1) 采用激光熔钎焊技术连接 Al/Ti 异种合金可以获得成形良好的焊缝,激光功率、接头间隙和激光加热位置是影响焊缝成形的主要因素。单光束填丝熔钎焊过程对焊接参数的变化敏感,获得良好焊缝成形的工艺参数范围较窄,焊接过程稳定性需要进一步提高。

2) Al/Ti 异种合金激光熔钎焊接头界面金属间化合物基本上呈非连续的锯齿状,并且厚度不超

过 10 μm ;在接头的不同位置,界面层的厚度和形状也不相同,接头下部由于温度较低,界面间的反应不充分,结合较薄弱。

3) 线能量较小时,拉伸接头从 TC4 与焊缝的界面处断裂;线能量较大时,拉伸接头从 LF6 母材侧熔合区断裂。成形良好的激光熔钎焊接头平均强度可达到铝合金母材的 85% 以上。

参 考 文 献

- 1 Zhu Ying, Zhao Pengfei, Kang Hui *et al.*. A preliminary study on filler metals for vacuum brazing of Al/ Ti [J]. *China Welding*, 2002, **11**(2): 130~132
- 2 H. Woong Sohn, H. Ha Bong. Microstructure and bonding mechanism of Al/Ti bonded joint using Al-10Si-1Mg filler metal [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, **A355**(1~2): 231~240
- 3 Ren Jiangwei, Li Yajiang, Feng Tao. Microstructure characteristics in the interface zone of Ti/Al diffusion bonding [J]. *Materials Letters*, 2002, **56**(5): 647~652
- 4 Song-Hee Kim, Young-Ik Park. A prediction for fatigue crack growth rate in diffusion bonded Al/Ti interface [J]. *Metals and Materials International*, 2000, **6**(2): 133~138
- 5 A. Fuji. In situ observation of interlayer growth during heat treatment of friction weld joint between pure titanium and pure aluminium [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2002, **7**(6): 413~416
- 6 Masaaki Kimura, Masato Yamashita, Hitoshi Uchida. Corrosion current distribution of pure titanium/type 5083 aluminum alloy friction welded joints in 3.5 percent NaCl solution [J]. *Corrosion Engineering*, 2001, **50**(5): 351~360