

## 钛合金光纤激光焊接接头特征分析

## Characteristics of Titanium Alloy by Fibre Laser Welding

中航工业北京航空制造工程研究所 许飞 巩水利 陈俐  
中航工业第一飞机设计研究院 郭亚飞

**[摘要]** 采用对接焊方法,对比研究了 TC4 钛合金薄板光纤激光焊接和 YAG 激光焊接接头的宏观形状特征,分析了两种焊接热源在焊缝背宽比相同时的接头拉伸性能差异,并获得了焊接热输入对光纤激光焊接接头宏观形状与拉伸性能的影响规律。试验结果表明:光纤激光焊缝背宽比常常大于 YAG 激光焊缝,焊接接头的强度和塑性均高于 YAG 激光焊接接头。在稳定光纤激光全熔透深熔焊接条件下,焊缝背宽比和焊接接头的拉伸性能随焊接热输入的增加呈现先上升再下降的趋势,当焊接热输入为 40J/mm,焊缝背宽比约 0.8 时,光纤激光焊接接头具有最好的拉伸性能,抗拉强度为 1133.72MPa,断后伸长率为 14.32%。

**关键词:** 钛合金 光纤激光焊接 YAG 激光焊接 焊缝背宽比 拉伸性能

**[ABSTRACT]** The fibre laser welding and YAG laser welding experiments of TC4 titanium alloy sheet are carried out by butt welding method. The macrography characteristics of the welded joints are studied. The tensile properties of the joints are also studied with the different heat resources, when the back width to surface width ratio ( $R_w$ ) of the fibre laser welding seam is same as that of the YAG laser welding seam. Meanwhile, the effects of the heat input on macrography and tensile properties of fibre laser welding joints are analyzed. The results show that the weld  $R_w$  of the fibre laser welding is often larger than that of the YAG laser welding, and the strength and plasticity of the former joints are higher than that of the latter joints. With the heat input of the stable full-penetration fibre laser welding increasing, the change tendencies of the weld  $R_w$  and the joint tensile properties are firstly increased and later decreased. When the heat input is 40J/mm and the weld  $R_w$  is about 0.8, the joint of the fibre laser welding has the best tensile properties, including 1133.72MPa of the tensile strength and 14.32% of the elongation after fracture.

**Keywords:** Titanium alloy Fiber laser welding YAG laser welding Weld  $R_w$  Tensile properties

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性和韧性好等优点,是优秀的航空航天结构材料之一<sup>[1]</sup>。激光焊接技术具有能量密度高、热输入低、焊接变形小、接头残余应力低,易于柔性高效作业等优点,已成为航空结构重要的制造技术<sup>[2-3]</sup>。与常规 YAG 激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器比较,光纤激光因其大功率高亮度的显著特点,成为第三代激光技术的代表<sup>[4]</sup>,大大拓展了激光焊接的发展空间。激光亮度即光源在单位面积上向某一方向单位立体角内发射的功率,而光纤激光的亮度可达到 CO<sub>2</sub> 激光和 YAG 激光的数十倍甚至上百倍,且光束质量好,可靠性高,电光转化效率提高至 30%。目前,关于钛合金光纤激光焊接方面的报道相对较少,而焊接接头宏观形状(正面熔宽、背面熔宽和背宽比<sup>[5]</sup>)与接头性能相关性方面的研究更少。其中焊缝背宽比  $R_w$  即焊缝背面熔宽与正面熔宽之比,可表征焊接的全熔透性和热源作用的强弱,同时也可反映穿透性小孔形成的稳定性。利用背宽比定量表征焊缝成形,具有一定的实际意义。陈俐<sup>[5]</sup>研究发现,焊缝背宽比大于 0.4 是获得稳定激光全熔透深熔焊过程的焊缝成形条件,而且焊缝宽度、背宽比影响焊接接头的塑性和疲劳性能。然而,在稳定激光全熔透深熔焊接条件下,焊缝背宽比与接头性能的相关性尚需进一步深入研究。因此,开展典型钛合金光纤激光焊接试验研究,对比分析光纤激光焊接和 YAG 激光焊接接头宏观形状与接头性能的相关性,获得光纤激光焊接的特有规律,可为航空用钛合金的推广应用提供数据参考。

## 1 试验条件和方法

试验材料为 1.5mm 厚 TC4 钛合金轧制板材,板材首先被加工成 200mm × 100mm 的试件,焊前用化学清洗去除试板表面的油污和氧化层。

试验采用由 ABB 机械手控制的激光焊接系统。该系统采用 5kW 的 YLS-5000 型光纤激光器和 3kW 的 HL3006D 型 YAG 激光器,以及自制专用卡具。激光器的主要技术指标如表 1 所示。激光通过光纤传输并反射聚焦于工件表面。焊接过程中工作台静止,由机械手带动激光头相对运动来实现激光焊接,激光头的中轴线

垂直于焊接平面,焊接过程中通入三路纯度为 99.99% 的氩气保护熔池和焊缝高温区的正反面成形。基于前期大量的工艺试验,选取优化的焊接参数如表 2 所示。

表1 激光器的主要技术指标

激光器类型	波长 / $\mu\text{m}$	模式	焦距 $f/\text{mm}$	焦斑直径 / $\text{mm}$
光纤激光器	1.06	多模	150	0.28
YAG 激光器	1.06	多模	223	0.60

表2 钛合金激光焊接工艺参数

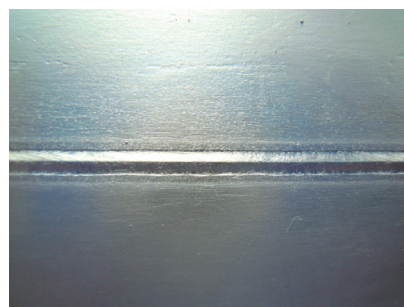
焊接方法	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	激光功率 $P/\text{kW}$	离焦量 $\Delta f/\text{mm}$	热输入 $E/(\text{J}\cdot\text{min}^{-1})$
光纤激光焊	1.5	1.2	+2	48
	3	2	+2	40
	4.5	2.4	+2	32
YAG 激光焊	1	1.5	+0.5	90

焊接试验采用平板对接焊方式,拉伸试验设备为 MTS810 试验机。对比分析了光纤激光焊和 YAG 激光焊接接头形状对接头拉伸性能的影响,也分析了不同焊接热输入条件下的光纤激光焊接接头形状与接头拉伸性能的相关性。

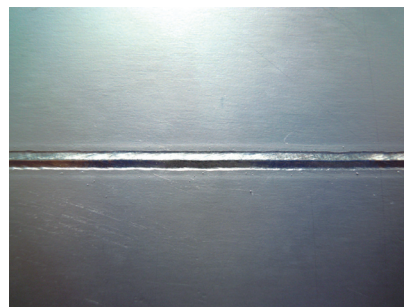
## 2 激光焊接方法对焊缝形状的影响

由于激光焊接过程中的强烈金属汽化,钛合金激光焊缝易产生咬边缺陷,而且很难通过优化工艺参数的方法来消除<sup>[6-7]</sup>。图 1 为 1.5mm 厚 TC4 钛合金光纤激光焊接接头典型宏观形貌。可以发现,接头正面和背面均存在轻微的咬边,深度均小于 0.75mm。由于咬边深度小于板厚的 10%,其对焊接接头的力学性能影响不大<sup>[7]</sup>。虽然通过激光电弧复合焊<sup>[4]</sup>、激光填丝焊<sup>[8]</sup>、激光修饰焊<sup>[9]</sup>等方法可以消除咬边,但为了客观反映接头的焊态特征,本文研究的焊接接头未做消除咬边处理。

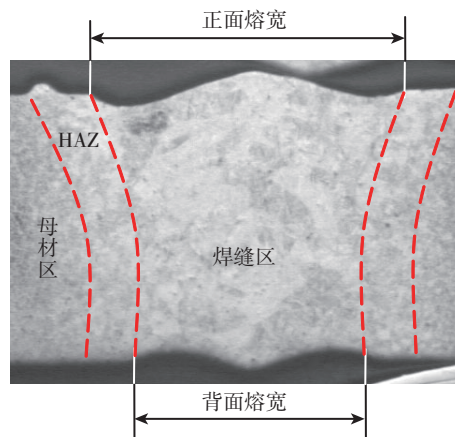
当实现稳定激光全熔透深熔焊接时,光纤激光焊缝和 YAG 激光焊缝的熔宽和背宽比如表 3 所示。这是由光纤激光的高能量密度和低焊接热输入造成的。在所研究的试验条件下,光纤激光的能量密度约为 YAG 激光的 4~5 倍,焊接热输入仅为 YAG 激光的 35%~55%。激光焊接过程中,光纤激光的功率密度和热输入足以使金属汽化,金属在激光作用下急剧熔化并汽化,金属蒸汽克服熔化金属表面张力和液体重力,将熔化金属向四周排开并迅速产生小孔。小孔依靠其内部的金属蒸汽力与液态重力和表面张力间的动态平衡来维持。相对于 YAG 激光,光纤激光产生的金属蒸汽、熔池液体较少,液体的表面张力也较小,因此,光纤激光焊缝的正面熔宽和背面熔宽比 YAG 激光焊缝的熔宽小。光纤激光



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面



(c) 焊缝横截面

图1 激光焊接接头宏观形貌

Fig.1 Macrography of laser welding joint

表3 钛合金激光焊缝熔宽和背宽比

焊接方法	正面熔宽 / $\text{mm}$	背面熔宽 / $\text{mm}$	背宽比
光纤激光焊	1.0~1.8	0.8~1.5	0.5~0.85
YAG 激光焊	1.6~2.3	0.5~0.8	0.4~0.6

焊接的激光能量密度足够大,小孔上方和下方的金属蒸汽 / 等离子体热辐射和熔池对流作用增强,造成焊缝背面熔宽略低于正面熔宽。因此,相对于 YAG 激光焊缝背宽比,光纤激光焊缝的背宽比较大。

## 3 激光焊接方法对焊接接头拉伸性能的影响

分别选取 5 件光纤激光焊接接头和 YAG 激光焊

接头横向拉伸试样(焊缝背宽比相当,未进行表面加工),开展室温拉伸试验,结果如图2所示。可以发现,光纤激光焊接接头的抗拉强度、规定0.2%延伸强度和断后伸长率均高于YAG激光焊接接头。抗拉强度增幅为3%;规定0.2%延伸强度略高;而断后伸长率增幅最大,为85.5%。光纤激光焊接由于热输入低、功率密度高,熔池体积相对更小,液态冷却速度更快,晶粒相对更加细小,相应增加了接头抵抗变形的能力,从而提高了接头的强度和塑性。光纤激光焊接熔池较高的冷却速度,造成熔池中的气孔等焊接缺陷来不及长大,致使焊接接头的塑性比YAG激光焊接接头的塑性增加显著。

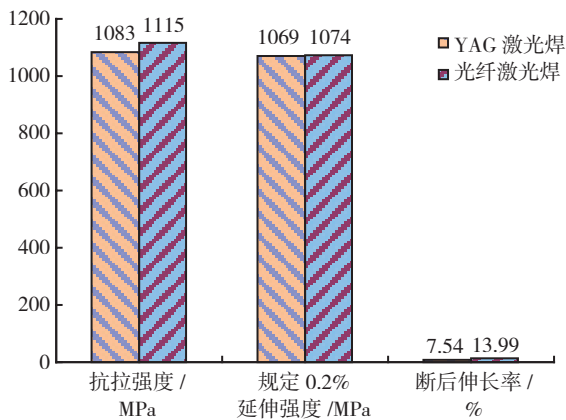


图2 不同焊接方法对接头拉伸性能的影响  
Fig.2 Effects of different welding methods on joints' tensile properties

#### 4 焊接热输入对光纤激光焊缝形状和接头拉伸性能的影响

按照表2中不同焊接热输入条件下的光纤激光焊接参数,开展对接焊接试验。获得光纤激光焊接热输入对焊缝形状和焊接接头拉伸性能的影响如图3和图4所示。其中每组拉伸试验取3件试样,拉伸断裂均发生在熔合区附近。

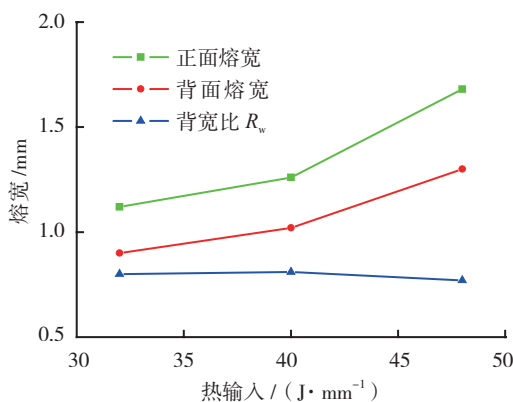


图3 光纤激光焊接热输入对焊缝形状的影响  
Fig.3 Effects of heat input on weld width by fibre laser welding

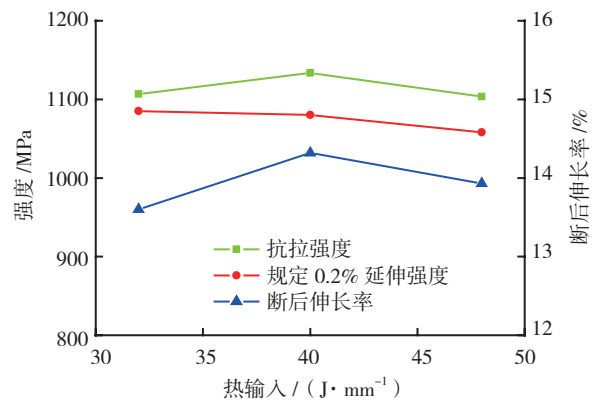


图4 光纤激光焊接热输入对焊接接头拉伸性能的影响  
Fig.4 Effects of heat input on joints' tensile properties by fibre laser welding

在稳定全熔透深熔焊接条件下,当激光功率密度相同时,焊接热输入对光纤激光焊缝形状影响显著。当焊接热输入增加时,焊缝正面熔宽和背面熔宽均相应增加,正面熔宽增加幅度更大,导致焊缝背宽比随焊接热输入的增加呈现先上升再下降的趋势。焊缝背宽比的变化与焊接接头的力学性能存在一定的关系,从图4可以看出,当焊缝背宽比最大时,焊接接头的抗拉强度和断后伸长率也最大。当焊缝形状随焊接热输入变化的同时,焊接接头的拉伸性能也在相应的变化。即焊接接头的拉伸性能也随焊接热输入的增加呈现先上升再下降的趋势。因此,要想获得具有最好拉伸性能的光纤激光焊接接头,应将焊缝的背宽比控制在0.8附近,此时焊接热输入约40J/mm,接头抗拉强度为1133.72MPa,断后伸长率为14.32%。

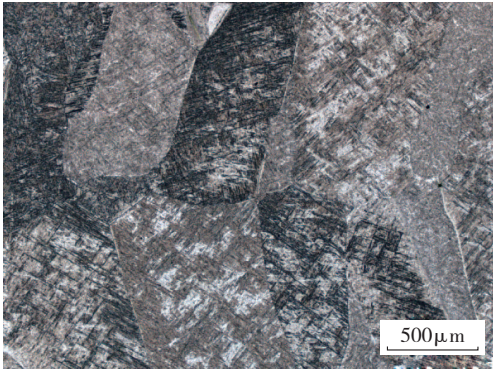
#### 5 结论

- (1) 光纤激光焊缝的正面熔宽和背面熔宽比YAG激光焊缝的熔宽小,而焊缝背宽比却比YAG激光焊缝的背宽比大。
- (2) 当焊缝背宽比相当时,光纤激光焊接接头的抗拉强度和规定0.2%延伸强度略高于YAG激光焊接接头,断后伸长率显著高于YAG激光焊接接头。
- (3) 当激光功率密度相同时,光纤激光焊缝的背宽比、抗拉强度和断后伸长率随焊接热输入的增加呈现先上升再下降的趋势。

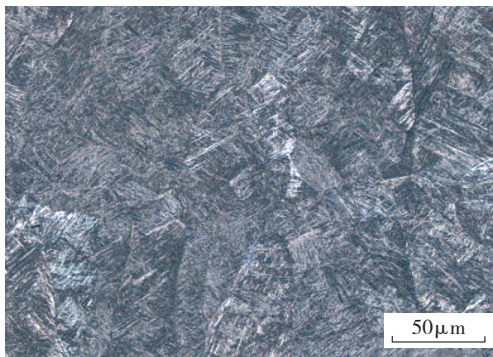
#### 参考文献

[1] 曹春晓, 闫渊林, 黄旭. 我国航空系统钛合金发展与现状. 钛工业进展. 2002, 19(4): 26-29.  
[2] 纪春雨, 李伟创, 李伟红, 等. 激光焊接技术发展及其在航空工业领域的应用. 航空制造技术, 2009(Z): 126-129.

(下转第96页)



(a) 一次退火状态下接头熔合区组织



(b) 双重退火状态下接头熔合区组织

图5 两种状态下接头熔合区组织

Fig.5 Microstructure of weld zone in EBW joint at 2 states

断裂都发生在基体上。经过双重退火后,焊接接头在相变点以上发生了组织转变,熔合区内  $\alpha'$  相全部分解,变成交错排列的、长宽比较大的  $\alpha$  相和相间其中的  $\beta$  相,这种组织状态基本接近母材基体,因此,双重退火后的焊接接头的冲击强度基本上与母材相当(降幅在 10% 以内)。而经过一次退火后的焊接接头组织不发生改变,焊接接头熔合区组织仍为马氏体组织。因此,可以解释一次退火后焊接接头的强度高于双重退火后的焊接接头,而塑性强度低于双重退火后焊接接头。

### 3 结论

(1) 70mm 厚 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头沿焊缝从上至下,焊缝组织具有良好的一致性,同时,焊缝上、中、下 3 层的抗拉强度、屈服强度以及冲击强度基本相当。

(2) 经过 700~750℃ /2~4h, FC 热处理制度退火的焊接接头组织状态未发生转变,熔合区组织仍由针状马氏体相构成;而经过 980℃ /10min, AC +720℃ /2h, AC 热处理制度双重退火的焊接接头在相变点以上发生了组织转变,熔合区内  $\alpha'$  相全部分解,变成交错排列的、长宽比较大的  $\alpha$  相和相间其中的  $\beta$  相,这种组织状态基本接近母材基体,双重退火后的焊接接头的冲击强度

基本上与母材相当(降幅在 10% 以内)。

(3) TC4-DT 钛合金为一种损伤容限钛合金,在工程应用中,为了尽量维持 TC4-DT 钛合金电子束焊接构件具有较高的损伤容限性能,建议在实际应用中优先选用 980℃ /10min, AC +720℃ /2h, AC 的双重退火制度对 TC4-DT 钛合金焊接件进行退火。

### 参考文献

- [1] 王金友. 航空用钛合金. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [2] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展. 金属学报, 2002, 38(Z): 4-6.
- [3] 李成功. 航空材料概论. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 张晓峰. 钛合金的设计方法及其研究进展. 材料导报, 2005, 19(3): 1-3.

(责编 亦非)

(上接第 89 页)

### 参考文献

- [1] 李行志, 胡树兵, 肖建中, 等. TA15 钛合金电子束焊接接头不同区域的疲劳裂纹扩展行为研究. 航空材料学报, 2010, 30(1): 52-56.
- [2] 许鸿吉, 尹丽香, 李晋炜, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头组织和性能. 焊接学报, 2006, 26(11): 43-46.
- [3] 李清华, 胡树兵, 李行志, 等. TC4 钛合金焊接接头组织不均匀性与疲劳性能. 材料工程, 2010, (1): 62-68.
- [4] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. 电子束焊接 Ti-6Al-4V 接头断裂行为机制. 焊接学报, 2004, 25(4): 59-62.
- [5] 刘鹏涛, 赵秀娟, 刘昕, 等. 氢对 TC4 钛合金电子束焊接接头疲劳裂纹扩展速率的影响. 航空材料学报, 2011, 31(3): 52-55.
- [6] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. Ti-6Al-4V 电子束焊接焊缝区域精细组织特征. 航空材料学报, 2005, 25(3): 21-24.

(责编 亿霖)

(上接第 92 页)

- [3] 左铁钊, 肖荣诗, 陈铠, 等. 高强铝合金的激光加工. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 崔丽, 李晓延, 贺定勇, 等. 光纤激光-MIG 复合焊参数对钛合金焊缝成形的影响. 航空制造技术, 2009(9): 120-125.
- [5] 陈俐. 航空钛合金激光全熔透稳定性及焊接物理冶金研究. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [6] Wang S H, Wei M D, Tsay L W. Tensile properties of LBW welds in Ti-6Al-4V alloy at evaluated temperatures below 450 °C. Materials Letters, 2003, 57: 1815-1823.
- [7] Li Z, Gobbi S L, Norris I, et al. Laser welding techniques for titanium alloy sheet. Journal of materials processing technology, 1997, 65: 203-208.
- [8] 陈新松, 姚伟, 巩水利. 钛合金激光填丝焊接. 中国激光, 2007, 34(Z): 235-238.
- [9] 许飞, 杨璟, 巩水利, 等. 铝合金激光修饰焊缝成形特征. 应用激光, 2010, 30(5): 374-377.

(责编 亦非)