

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.23

TC4钛合金T形接头双光束激光焊接组织与力学性能研究

吴 晗, 周忠智, 赵忠华, 付和国, 史吉鹏

沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 开展了1.5 mm×2 mm组合的TC4钛合金T形接头双光束激光焊接工艺试验, 旨在研究该T形接头的微观组织与力学性能。结果显示, T形接头焊缝区主要为网篮状组织, 在上部热影响区的交叉区为少量的针状 α' 相以及初生 α 相, 下部热影响区交叉区为 α 相等轴组织。接头力学性能显示, 抗拉强度与母材相当, 平均弯曲角度为33.1°。完成了典型件的焊接, 接头内部没有裂纹与气孔等缺陷, 为轻量化构件制造提供了有效的焊接工艺。

关键词: TC4钛合金; T形接头; 双光束焊接; 组织演变; 力学性能优化

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0154-05

Study on the Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy T-joint by Dual Laser Welding

WU Han, ZHOU Zhongzhi, ZHAO Zhonghua, FU Heguo, SHI Jipeng

Technology Research Institute Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China

Abstract: A dual beam welding process experiment was conducted on the TC4 titanium alloy T-joint with a combination of 1.5 mm to 2 mm. The metallographic structure of the joint was observed, and the tensile and bending properties of the joint were tested. The results show that due to the influence of different welding thermal cycles, the microstructure area of the titanium alloy joint welded by dual beam laser can be divided into three parts: the base metal area, the heat affected area, and the weld seam area. The weld seam is mainly a basket like structure, with a small amount of needle like structure in the intersection area of the upper heat affected area α' Appearance and Primacy α The intersection area of the lower heat affected zone is α Equal axis organization. The mechanical properties of the joint show that the tensile strength is equivalent to that of the base material, with an average bending angle of 33.1°. Finally, the welding of typical components was completed, and the internal quality of the joint was free of defects such as cracks and pores.

Keywords: TC4 titanium alloy; T-joint; double beam welding; microstructure; mechanical property

引用格式: 吴晗, 周忠智, 赵忠华, 等. TC4钛合金T形接头双光束激光焊接组织与力学性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 154-158.

Citation: WU Han, ZHOU Zhongzhi, ZHAO Zhonghua, et al. Study on the Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy T-joint by Dual Laser Welding[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 154-158.

0 引言

随着航空飞行器的迭代升级, 对飞行高度和飞行速度等飞行性能提出了更高的要求, 因此对构件

轻量化、长寿命的要求也越来越高^[1-2]。蒙皮类结构作为航空飞行器中重要的构件, 常安装于飞行器的表面, 其型面尺寸与刚度等性能都要具备较高的性能。在轻量化方面, 钛合金具有比强度高、耐腐蚀

收稿日期: 2023-09-18 修回日期: 2023-10-31

作者简介: 吴 晗(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事钛合金加工成形的研究。

通讯作者: 史吉鹏(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事先进连接技术的研究。E-mail: shi_jipeng@126.com。

性强以及加工工艺性好等特点,在航空航天领域得到了广泛的应用。同样,在蒙皮制造领域特别是高温工作区的蒙皮构件原材料选取时,都将钛合金作为首选材料^[3-4]。在蒙皮构件的轻量化设计方面,为了在提高蒙皮构件刚度的同时还能减小构件质量,常在蒙皮内侧设置内置加强筋结构,传统的内置加强筋采用铆接连接工艺,由于铆接连接需要在加强筋底部形成弯边,因此,铆接形式内置加强筋的制造使构件的质量增加^[5]。针对构件减重的需求,科研工作者提出了一种T形接头的熔焊工艺,即在T形接头修配完成后,在壁板外侧施焊,采用壁板氩弧穿透焊工艺完成蒙皮与加强筋的连接,从而替代了铆接工艺,实现了构件的减重^[6]。然而,当下随着航空器对外表面质量要求的逐渐提升,壁板穿透焊技术破坏了壁板结构的整体性,并且熔焊过程较大的热输入使得构件的变形量也有所增加。

针对内置加强筋铆接增重以及壁板穿透焊破坏蒙皮整体性的问题,研究者采用高能量密度的激光热源,提出了在加强筋两侧角接处激光焊接的双光束激光焊接工艺。与传统焊接工艺相比,双光束激光焊接工艺焊接速度快、变形量小,特别是在蒙皮内侧双光束施焊,避免了壁板整体性的破坏,提高了接头的品质^[7-9]。然而,接头的力学性能与组织特点是确保接头能否安全可靠使用的决定性因素。一些学者对钛合金接头的焊接工艺做了研究,更多的集中在焊缝成形,而对薄壁件的相关报道较少^[10-11]。因此,本研究以TC4钛合金双光束激光焊T形接头为对象,分析了接头的组织与力学性能,这对于T形接头的双光束激光焊接技术在轻量化构件制造领域的推广和应用具有重要意义。

1 试验材料及方法

试验母材选用TC4钛合金薄板,接头形式为1.5 mm厚的加强筋与2 mm厚的底板通过双光束激光焊接形成T形接头。TC4化学成分如表1所示,其组织形貌如图1所示,母材原始组织为 α 相与 β 相组成的等轴晶,在组织内部能明显看到经轧制后形成的具有明显方向性的纤维层。为满足后续力学性能试片的制作,底板尺寸为300 mm×200 mm,且

沿200 mm长度的方向为纤维方向,加强筋尺寸为20 mm×200 mm,同样沿200 mm长度的方向为纤维方向。选择直径1.0 mm的同牌号TC4焊丝。采用沿焊接方向的送丝在前、激光在后的空间分布,且激光入射方向轴线与底板之间的夹角为25°~35°。焊前24 h内对待焊试片进行酸洗以去除表面油污,并用防尘布进行包裹防止灰尘污染,焊前2 h用有机溶剂擦拭接头待焊区域10 mm内区域。焊接时使用与激光入射方向同轴的管状惰性气体保护罩,在罩内以25 L/min流量通入纯度为99.99%的氩气对高温区域进行适时保护。激光焊接参数为:激光功率3 000 W,焊接速度8 000 mm/min,离焦量2 mm,送丝速度6 000 mm/min。

表1 TC4钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical Composition of TC4 (wt. %)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Si	Ti
5.9	4.2	<0.25	0.028	0.004 2	0.001 1	0.003 95	<0.026	余量

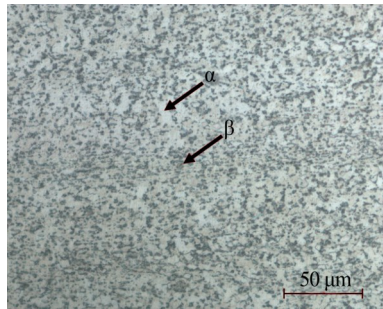


图1 TC4母材显微组织

Fig. 1 Microstructure of TC4

试验采用的焊接路径控制设备为六轴机械手臂,在机械手臂末端固定有激光焊接头,激光焊接头与激光发生器之间通过柔性光纤连接,用于激光能量传输,且在激光头上还集成有填丝用的送丝嘴,送丝嘴与送丝机之间通过送丝管连接,其中激光器为IPG YLS-4000-ECO型光纤激光器,焦距为300 mm,送丝机为Fronius Kd7000型送丝机。

焊接完成后,采用线切割方法制取拉伸测试与弯曲测试等力学性能试样,拉伸和弯曲试样尺寸如图2所示。沿焊道制取底板尺寸为15 mm×20 mm的金相试样,在自动磨抛机上依次采用400#、800#、1500#以及2000#的水砂纸进行金相试样磨抛,之后采用10%HF+30%HNO₃+60%H₂O的金相组织液腐蚀焊缝组织,时长为30 s。

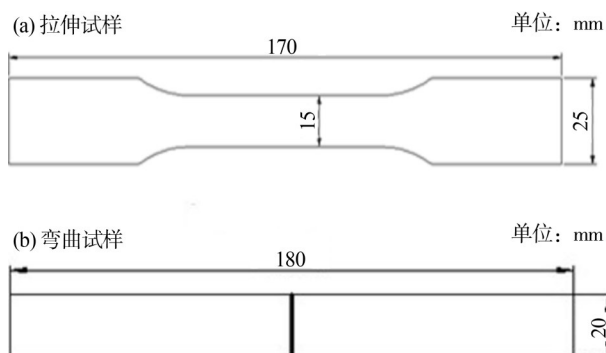


图2 拉伸、弯曲试样

Fig. 2 Sample cutting location and dimensions

2 试验结果分析

2.1 焊接接头微观组织成因与分析

双光束激光焊 TC4 合金 T 形接头宏观形貌如图 3 所示。可以看出,焊接接头成形良好,T 形接头两侧的焊道在焊道底部形成了有效搭接,且接头未出现未熔合、气孔和咬边等缺陷。接头可分为焊缝区、热影响区以及母材区三个区域。由于激光热源能量密度集中度高、焊接速度较快,T 形接头两侧各自的焊缝均呈现出深而窄的接头形貌,其焊缝区宽度约为 1~1.5 mm,焊缝组织加强筋侧热影响区宽度约为 250 μm ,底板侧的热影响区厚度约为 200 μm 。



图3 TC4 钛合金焊缝接头形貌

Fig. 3 Morphology of TC4 titanium alloy weld joint

T 形接头焊缝区的高倍金相组织形貌如图 4 所示。焊缝熔化区主要由粗大的等轴晶组成,且等轴晶内部是以 α 相为基体以及在基体上呈网篮状分布的少量针状马氏体 α' 相,此外,还有少量的 $\alpha+\beta$ 相。

这主要是由于焊缝区为接头的熔化区,直接接收到热源的热输入,焊接能量较高。同时针状马氏体 α' 相的形成需要有较快的冷却条件,在快速冷却过程中高温的 β 相来不及均匀化转变为 α 相,而发生扩散切变形成 α' 相。然而熔化区高的热输入减缓了 β 相的转变速度,降低了 α' 相的形核能力,形成 α 相。而在 β 相转变形成 α 相的同时,仍然会有部分高温 β 相发生快速冷却形成 α' 相,而所形成的 α' 相在高温的作用下逐渐长大。

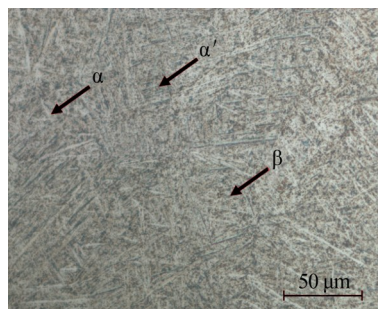


图4 焊缝区组织形貌

Fig. 4 Microstructure of the welded area

接头整体组织形貌、接头上部焊缝交叉处与下部焊缝交叉处的热影响区以及接头母材区的组织形貌如图 5 所示。从接头整体组织形貌(见图 5a)可以看出,随着距焊缝中心距离的增加,接头组织的晶粒尺寸逐渐减小。相较于原始母材组织形貌(见图 5d),图 5a 中 B 区所对应的接头上部交叉区热影响区组织发生了组织转变,这是由于该区组织受到焊接热循环的作用,该区域温度远高于钛合金的组织转变温度(980~995 $^{\circ}\text{C}$)而发生 β 转变,在热源离开后的熔池凝固过程中,该区域热量相对于焊缝处热量较小,冷却速度较快,因此最终形成由少量的针状 α' 相和初生 α 相的组织特点。C 区对应的接头下部交叉区热影响区相较于上部交叉处的热影响区,其组织晶粒尺寸明显增加,且 α 相明显增加, α' 相明显减少,这主要是由于下部交叉处热影响区受到两次焊接热循环的影响,且激光焊接的能量密度较高,向焊缝熔深方向所传递的热量远远大于向四周传递的热量,因此相对于上部交叉部的热影响区,在下部交叉部位的热影响区所获得的焊接热量也较大,因此晶粒组织较大,且抑制了 α' 相生成,结果形成大量的 α 相等轴组织。

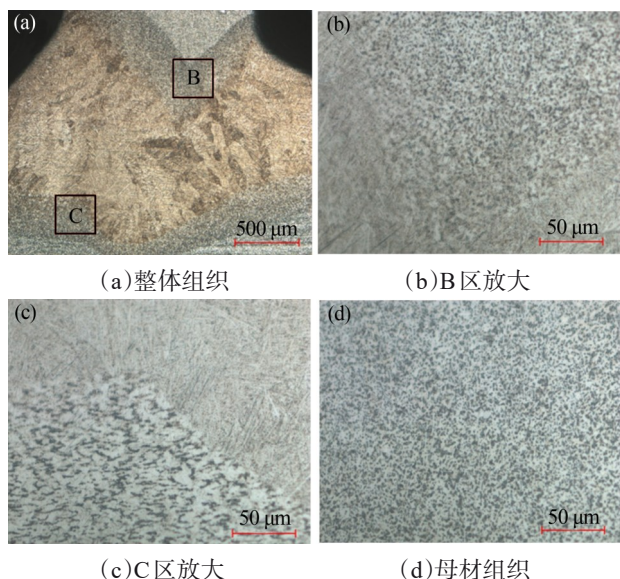


图5 热影响区不同区域微观组织形貌

Fig. 5 Microstructure morphology of different zones in HAZ

2.2 力学性能分析

焊接接头力学性能的测试结果如表2所示,接头的测试断裂位置如图6所示。可以看出接头拉伸试验均断裂于母材区,对各力学性能测试结果求平均值,抗拉强度均值为1 001 MPa,与母材相当,屈服强度均值为963 MPa,弯曲角度均值为33.1°。从测试结果可以看出,接头的力学性能均可满足其使用性能,接头性能可靠。

表2 接头力学性能测试数值

Table 2 Mechanical Property Test Values of the Joint

序号	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	弯曲/(°)
1	1 009	966	33.1
2	1 001	962	30.2
3	993	957	32.6
4	988	959	31.8
5	1 006	964	34.8
6	1 011	969	35.8
平均	1 001	963	33.1

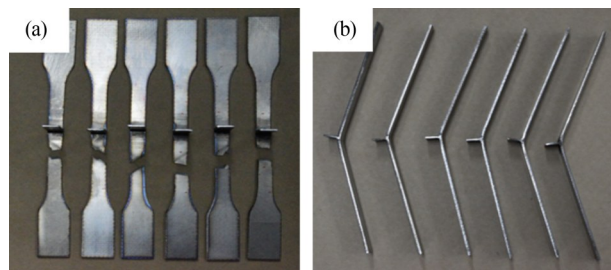


图6 接头力学性能测试断裂试样

Fig. 6 Fracture sample for mechanical property test of joint

2.3 典型件焊接

基于上述1.5 mm×2 mm的TC4钛合金T形接头双光束焊接工艺试验结果,采用相同工艺参数对1.5 mm×2 mm组合的钛合金典型验证构件进行焊接,焊前采用与试片同样的去污去杂处理,典型构件如图7所示。之后对典型件接头进行X光检测,结果如图8所示,可以看出接头内部质量良好,没有产生裂纹与气孔等缺陷,满足产品的使用要求。

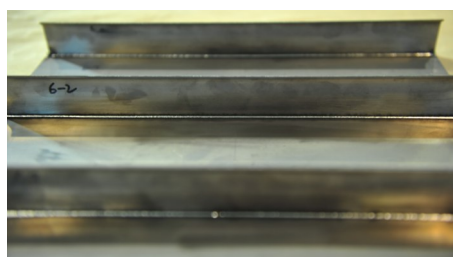


图7 典型件的试片

Fig. 7 Typical witness

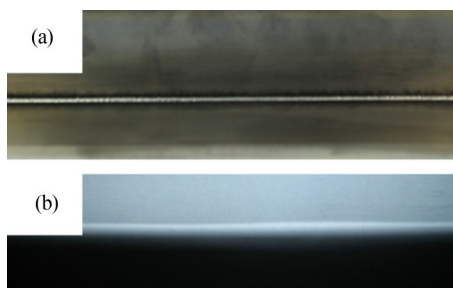


图8 焊接接头X光底片

Fig. 8 X-ray film of welded joint

3 结论

(1)TC4钛合金T形接头经过双光束焊接后接头可以分为母材区、热影响区、焊缝区三部分。

(2)接头的微观组织显示,焊缝区域主要为以 α 相为基体以及在基体上面呈网篮状分布的少量针状马氏体 α' 相,在上部热影响区交叉区为少量的针状 α' 相以及初生 α 相,下部热影响区交叉区为 α 相等轴组织。

(3)接头力学性能显示,抗拉强度与母材相当,平均弯曲角度为33.1°,典型件焊接头内部质量没有裂纹与气孔缺陷。

参考文献:

- [1] 杨清福,曾才有,张宇鹏,等. 大厚度TC4钛合金窄间

- 隙焊接接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 8-15.
- YANG Q F, ZENG Y C, ZHANG Y P, et al. Effect of Large-Thickness TC4 Titanium alloy Narrow Gap Weld Structure on Mechanical Properties of Joint[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 8-15.
- [2] 邹吉鹏, 黄瑞生, 武鹏博, 等. TC4 钛合金低真空 20kW 激光焊接特性研究[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 28-35.
- ZOU J P, HUANG R S, WU P B, et al. Study on Low Vacuum 20kW Laser Welding Characteristics of TC4 Titanium Alloy [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 28-35.
- [3] 赵晓龙, 王彬, 巩水利, 等. 2.0 mm 厚 TC4 钛合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 209-211.
- ZHAO X L, WANG B, HE E G, et al. Effect of multiple heat treatments on the microstructure and properties of TC4 titanium alloy laser welding joint[J]. Applied Laser, 2020, 40(5): 831-835.
- [4] 陈素明, 赵安安, 姜毅, 等. TC4 钛合金激光填丝工艺参数对焊缝宏观成形的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 74-80.
- [5] 史吉鹏, 刘艳梅, 黄成杰, 等. 钛合金薄壁 T 型件双作用激光焊接填丝状态对焊缝成形的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(11): 30-34.
- SHI J P, LIU Y M, HUANG C J, et al. Effect of filler wire state on weld formation during double-laser welding of titanium alloy thin-wall T joint[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(11): 30-34.
- [6] 王红阳, 张永操, 祝美丽, 等. 钛合金 T 形结构激光-电弧复合焊接成形工艺[J]. 电焊机, 2016, 46(3): 14-18.
- WANG H Y, ZHANG Y C, ZHU M L, et al. Laser-arc hybrid welding of titanium alloy T-shaped joint appearance[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(3): 14-18.
- [7] 马旭颐, 段爱琴, 芦伟, 等. Ti-6Al-4V 合金双光束激光焊接 T 形接头拉伸过程特征[J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 91-97.
- MA X Y, DUAN A Q, LU W, et al. Characteristics of tensile process in double-sided laser beam welded T-joints of Ti-6Al-4V alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 91-97.
- [8] 王祥贺, 史吉鹏, 韩颖杰, 等. 钛合金 T 形件双激光焊接力学性能与组织研究[J]. 应用激光, 2023(1): 1-6.
- WANG X H, SHI J P, HAN Y J, et al. Study on the mechanical properties and microstructure of double laser welding of titanium alloy T-joint [J]. Applied Laser, 2023(1): 1-6.
- [9] 占小红, 赵艳秋, 陈帅, 等. 轻合金 T 型结构双激光束双侧同步焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(11): 20-31.
- ZHAN X H, ZHAO Y Q, CHEN S, et al. Research progress on double laser-beam bilateral synchronous welding of T-joints for light alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(11): 20-31.
- [10] 王学东, 何恩光, 陈俐, 等. 拘束条件对薄板 T 形接头双光束激光焊接变形的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(3): 101-105.
- WANG X D, HE E G, CHEN L, et al. Influence constraint on welding deformation of T joint welded by dual-beam laser [J]. Transactions of the china welding institution, 2016, 37(3): 101-105.
- [11] 马旭颐, 段爱琴, 芦伟, 等. Ti-6Al-4V 合金双光束激光焊接 T 形接头拉伸过程特征[J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 91-97.
- MA X Y, DUAN A Q, LU W, et al. Characteristics of tensile process in double-sided laser beam welded T-joint of Ti-6Al-4V alloy [J]. Transactions of the china welding institution, 2019, 40(2): 91-97.