

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.12

钛合金电子束焊接接头组织和性能分析

李晓强, 宋晓娇, 高 健, 夏 灵, 何明桓

上海航天动力技术研究所, 上海 201100

摘要: 针对航空航天领域广泛应用的 $\alpha+\beta$ 双相钛合金TC11,为摸索双重退火态下电子束焊接接头的微观组织演化规律及其对力学性能的影响机制,本研究通过优化焊接工艺参数,对壁厚4.8 mm的筒体试验件开展真空电子束焊接试验。采用扫描电镜、显微硬度测试及拉伸试验表征焊接接头的组织与性能。研究结果表明,热影响区内初生 α 相形状开始变得不规则,且此区域的焊接温度可能在 $\alpha\rightarrow\beta$ 转变点附近,因此开始析出 β 相;熔合区多为粗大的条状转变 β 相,呈竹篮结构,粗大的晶界上存在宽窄不均的 α 相。微观组织的不同导致在焊缝显微硬度比母材高约16.7%,且拉伸试验断裂在母材。TC11 M真空电子束焊接可以获得无裂纹、无气孔,强度大于1 030 MPa的I级焊缝。该研究为中等壁厚钛合金构件的电子束焊接工艺设计提供了理论依据与参考。

关键词: 钛合金; 真空电子束焊; 微观组织; 力学性能; 相变行为

中图分类号: TG456.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0089-05

Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloy Electron Beam Welded Joints

LI Xiaoqiang, SONG Xiaojiao, GAO Jian, XIA Ling, HE Minghuan

Shanghai Space Propulsion Technology Research Inst., Shanghai 201100, China

Abstract: To investigate the microstructural evolution of electron beam welded joints in dual-aged TC11, an $\alpha+\beta$ dual-phase titanium alloy widely used in aerospace applications, and its influence on mechanical properties, this study conducted vacuum electron beam welding experiments on cylindrical specimens with a wall thickness of 4.8 mm through optimized process parameters. The microstructure and mechanical properties of the welded joints were systematically characterized using scanning electron microscopy (SEM), microhardness testing, and tensile testing. Results revealed that the primary α phase in the heat-affected zone (HAZ) exhibited irregular morphology due to thermal cycling near the $\alpha\rightarrow\beta$ phase transformation temperature, accompanied by β -phase precipitation. The fusion zone predominantly consisted of coarse lamellar transformed β -phase with a bamboo basket structure, characterized by unevenly distributed α -phase along grain boundaries. The distinct microstructural features resulted in a 16.7% increase in weld microhardness compared to the base metal, while tensile fractures consistently occurred in the base metal, indicating superior weld integrity. The optimized TC11 M vacuum electron beam welding process successfully achieved defect-free Class I welds with a tensile strength exceeding 1 030 MPa. This study provides theoretical insights and practical references for electron beam welding process design of medium-thickness titanium alloy components.

Keywords: titanium alloy; vacuum electron beam welding; microstructure; mechanical properties; phase transformation

引用格式: 李晓强, 宋晓娇, 高健, 等. 钛合金电子束焊接接头组织和性能分析[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 89-93.

Citation: LI Xiaoqiang, SONG Xiaojiao, GAO Jian, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloy Electron Beam Welded Joints [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 89-93.

收稿日期: 2024-09-04 修回日期: 2025-01-27

作者简介: 李晓强(1991—),男,硕士,工程师,主要从事材料制造研究。E-mail: lxq826088571@163.com。

0 引言

TC11 属于 $\alpha+\beta$ 型钛合金,在力学性能上具有高强度,良好的韧性、塑性等特性;在物理和化学性能方面具有低密度、低导热和耐腐蚀性;在工艺性能上可实现锻造、焊接和各种形式的机加工。凭借其优异的材料性能,是航空航天领域关键结构件的首选材料^[1]。在某些特定结构机加工限制的条件下,焊接是一种高效、节约材料、可靠性高、热影响小的快速加工工艺。钛对大气的亲和力较高,因此钛合金仅适合在惰性气体或高真空中焊接,其中真空电子束焊接是获得高性能焊缝的优选工艺方法^[2]。

在进行 1.2 mm 薄板 TC4 钛合金脉冲电子束焊接工艺试验时^[3],随频率的增加,焊缝咬边和背部余高减小,同时高频脉冲电子束提升了焊接接头的塑性和显微硬度。张宇鹏^[4]和房卫萍^[5]等研究了厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头性能,结果表明在热影响区存在较显著的组织不均匀性且超厚板焊缝在海水中的应力腐蚀敏感性增加。部分研究专注于异种钛合金焊接接头性能分析,高福洋^[6]等研究结果证明高温钛合金 Ti60 和 Ti700sr 铸件电子束焊接接头可获得优质接头,闫泰起^[7]等在轧制+增材 TC4 合金电子束焊接试验中发现轧制侧热影响区合金组织形态变化要大于增材一侧。在研究焊接接头性能的同时,相关研究还探索了热处理对钛合金电子束焊接接头组织和性能的影响,马权^[8]等的研究表明 Ti300 合金的焊接后热处理对焊缝中 β 晶粒的形态和尺寸几乎没有影响,但是可以调节焊缝区 α 相含量、尺寸和形态,其对焊缝有明显的强化作用。

本文对中等壁厚、较大直径 $\alpha+\beta$ 双相钛合金壳体进行电子束焊接试验,明确焊接前后处理方法对焊缝质量评价的影响,提出定位+深熔+修饰组合焊接方式,分析焊接接头微观组织与力学性能之间的联系,为 TC11 钛合金电子束焊接应用提供参考。

1 试验设计

1.1 试验件状态和规格

试验材料为符合 GB/T16598—2013 的 TC11 M

(Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si) 钛合金,其成分和组织如表 1、图 1 所示,双重退火态的 TC11 母材由分布均匀、等轴状的初生 α 相和转变 β 组成,而转变 β 由片状 $\alpha+\beta$ 组成,片状 α 被 β 相隔离,属钛合金典型组织形貌。焊接试验件规格为 $\varnothing 425\times\delta 4.8\times 80$ 的筒体试验件,焊缝形式为 I 形焊缝。

表 1 TC11 钛合金化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of titanium alloy (wt. %)

Al	Mo	Zr	Si	Ti	Fe、O、C 等	其他 (单一)	其他 (总和)
6.5	3.0	1.4	0.26	余量	≤ 0.217	≤ 0.1	≤ 0.4

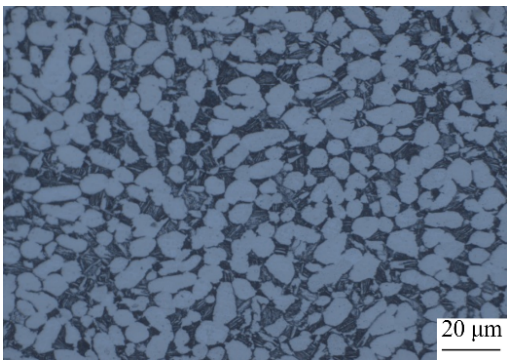


图 1 TC11 母材显微组织

Fig. 1 Microstructure of TC11 base metal

1.2 试验参数和过程

焊接设备采用 KL-133 乌克兰真空电子束焊机,正交试验后电子束焊接工艺参数如表 2 所示,工作距离为 250 mm,加速电压为 60 kV,真空度为 $\leq 6.3\times 10^{-2}$ Pa。焊接之前通过打磨去除表面氧化膜,然后用无水乙醇擦拭焊缝对接接头,去除加工表面残留的油渍等多余物并确认对接面无磕碰。

焊接完成后进行射线检测,确认焊缝内部缺陷可控,然后采用线切割对焊接接头取样分析,试样经过打磨抛光后用腐蚀液(HF:HNO₃:H₂O=5:10:85, vol.%)腐蚀约 8 s。采用 FEI Quanta TM 250 扫描电镜进行观察,然后采用 VH1202 显微维氏硬度计测试接头截面硬度。

表 2 真空电子束焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of vacuum electron beam welding

焊接方式	焊接电流 /mA	聚焦束流 /mA	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)
定位焊	15	580	25
深熔焊	60	615	20
修饰焊	50	670	30

2 结果与分析

2.1 焊接接头外观和内部质量分析

目视检查焊缝外观质量,由图2所示,TC11真空电子束焊接焊缝形态饱满,圆滑过渡至母材金属且表面为银白色,焊接接头表面无裂纹、烧穿、焊瘤、气孔及夹杂物等目视缺陷,焊缝背面有少量细小飞溅,可通过机械方式去除。环焊缝整体宽度均匀,焊缝正面宽度约为5.3 mm,正面余高 $\leq 20\%t$ 、背部余高 $\leq 25\%t$,其外观质量满足GJB1718A-2005 I级焊缝要求。

通过X射线检测考核焊缝内部质量,图3为焊缝打磨前和打磨后射线检测底片,焊缝打磨前射线检测底片表明,焊缝内部无气孔、裂纹和夹杂物等缺陷,焊缝根部存在局部收缩,在底片上呈现出两侧黑色阴影,可能影响到焊缝质量的判别,在经过机械加工或打磨处理后根部收缩去除。

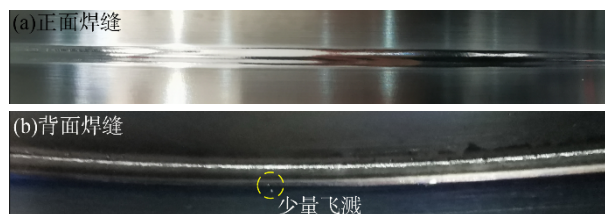


图2 焊接接头外观质量

Fig. 2 Appearance quality of welded joint

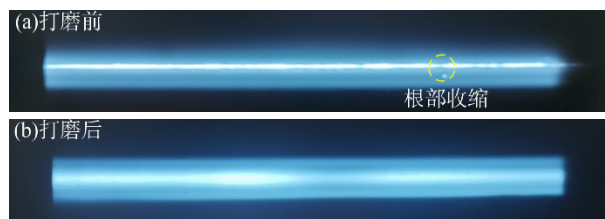


图3 焊接接头射线检测

Fig. 3 X-ray testing of welded joint

2.2 焊接接头微观组织分析

焊接接头微观组织如图4所示。图4a中焊接接头中母材、热影响区和焊缝的界限明晰,其中母材

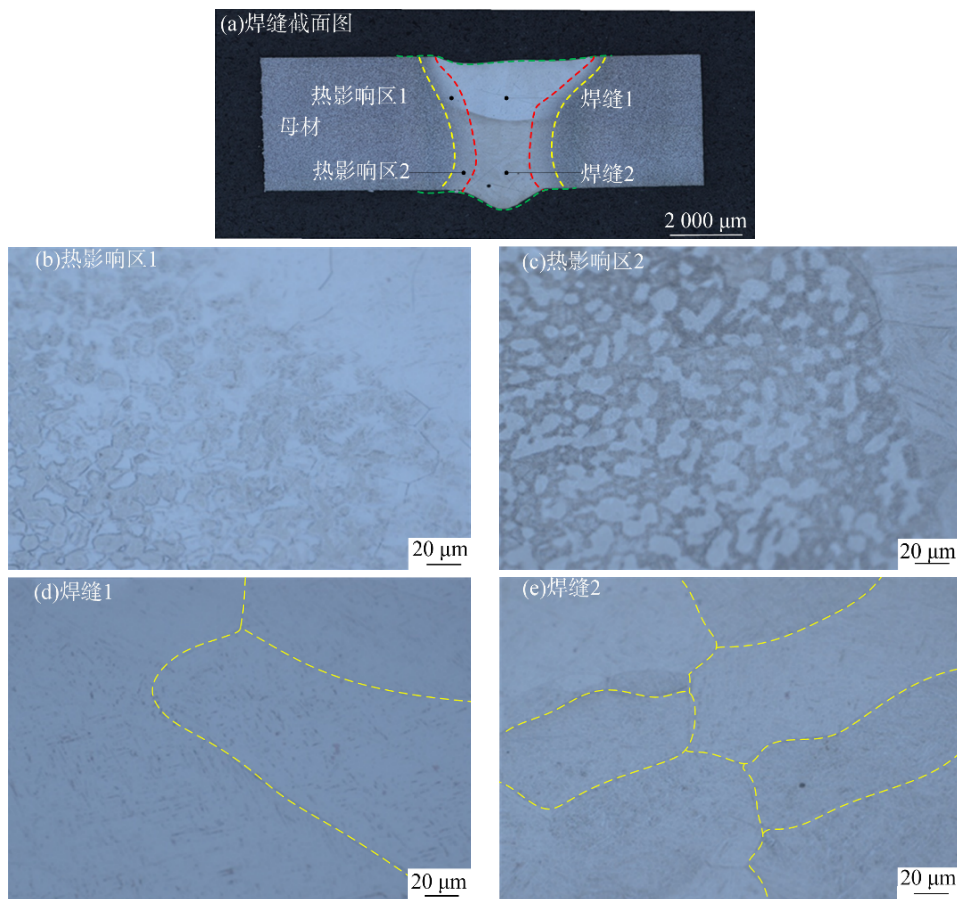


图4 焊接接头的显微组织

Fig. 4 Microstructure of welded joint

及热影响区为细小的等轴晶,焊缝区则为粗大的柱状晶组织。图4b、4c显示焊接接头热影响区内初生 α 相形状开始变得不规则,由于在此区域的加热温度可能在 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变点附近,开始析出 β 相,所以 β 相含量对比母材区含量有所增加。同时由于高温停留时间比焊缝区要短,过冷度大,故 β 相向 α' 相的转变被抑制。

图4d、4e显示焊接过程中,焊缝金属联生结晶于熔合线位置处的半熔化母材晶粒表面,以柱状晶的形式由母材向焊缝中心生长,且TC11钛合金导热性能较差,焊接时容易在熔池产生过热,利于粗大的柱状晶的生长,故焊缝多为粗大的条状转变 β 相,同时熔池上部温度较高,过冷度相对较小, β 相 $\rightarrow \alpha'$ 相的转变更为充分,针状 α' 相弥散分布在 β 相中。熔池底部的热输入低于熔池上部,焊缝宽度较窄,导致靠近焊缝背部一侧的 β 晶粒没有足够的时间和空间生长,因此熔池由上而下, β 晶粒尺寸依次减小,同时 α' 相由于过冷度大以更加细小、致密的形态分布于 β 相中。

2.3 焊接接头力学性能分析

焊接接头显微硬度分布图如图5所示,整个焊缝显微硬度呈马鞍形分布。其中焊缝中心线位置硬度最大,平均值达到420HV,约高出母材16.7%,而靠近母材的热影响区硬度略低于焊缝中心,平均值达到385 HV。靠近熔合区和焊缝位置多为粗宽针状的 β 相, β 相的增加能够提高钛合金的强度、硬度、热稳定性和抗疲劳性能,且 β 相较 α 相要致密^[9]、硬度更高。在焊缝中心位置与电子束流输入方向一致取不同的点进行测试,发现熔池上部的显微硬度要略大于底部。熔池上部高温停留时间较长,马氏体转变更为充分,体心立方晶格 β 相转变为密排六方晶格的马氏体,即 α' 相, α' 相位错密度高, α' 相百分比越大,材料硬度越大^[10],因此相对熔池底部,熔池上部析出的 α' 相更充分,显微硬度相对较高。

焊接拉伸试验件的位移-载荷曲线如图6所示,试验件的拉伸强度均不小于1 030 MPa,拉伸断裂位置为母材,钛合金性能主要通过 α 相、 β 相、 α' 相微观结构进行调控,随着 α 相 $\rightarrow \beta$ 相 $\rightarrow \alpha'$ 相不断转变,材料的抗拉强度也随之增加, β 相相滑移系统较多,更容易承受塑性变形,细小针状的 α' 相均匀地分布

在 β 相中更能提高材料的抗拉强度,越靠近焊缝中心, α' 相含量越多,材料的强度越高,因此在室温拉伸试验中,母材位置发生明显的塑性断裂。

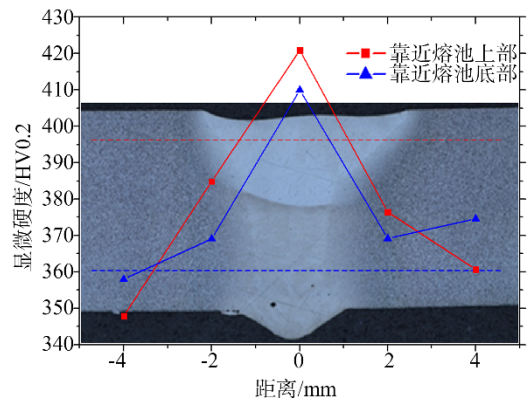


图5 焊接接头显微硬度

Fig. 5 Microhardness of welded joint

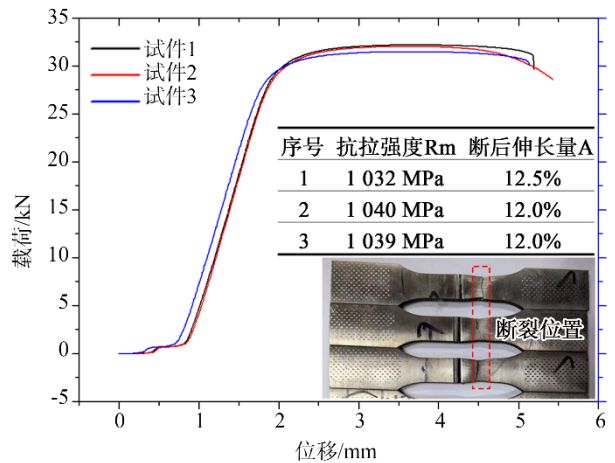


图6 焊接拉伸试验图像和断裂位置

Fig. 6 Welding tensile test and fracture location diagram

3 结论

(1)双重退火态TC11钛合金采用电子束焊接,可以获得正面余高 $\leq 20\%$ 、背部余高 $\leq 25\%$ 、无裂纹、无气孔和强度大于1 030 MPa的GJB1718A-2005 I级焊缝,且焊缝强度大于母材。焊缝显微硬度表明,整个焊缝硬度呈马鞍形分布,受焊接温度影响,焊缝上部的硬度要略高于底部。

(2)热影响区只有一部分组织发生了相变重结晶,靠近母材一侧为多为等轴状的初生 α 相,靠近焊缝一侧多为粗宽针状的 β 相,热影响区组织为初生 α 相+ β 相+少量 α' 相,焊缝处多为粗大的条状转变 β

相以及细小的针状 α' 相, α' 相对合金材料的强化效果较为明显,所以焊缝的抗拉强度高于母材。

参考文献:

- [1] 刘畅,邓彩艳,龚宝明,等.组织不均匀性对TA15钛合金电子束焊接接头热影响区应变集中的影响[J].焊接学报,2019,40(12):121-129.
LIU C, DENG C Y, GONG B M, et al. Effects of microstructure inhomogeneity on strain concentration of heat affected zone of TA15 titanium alloy electron beam weld joint[J]. Transactions of the China welding Institutions, 2019, 40(12): 121-129.
- [2] 王利发,刘建中,胡本润. TA15钛合金电子束焊接接头力学性能[J]. 焊接学报,2007,28(1):97-100.
WANG L F, LIU J Z, HU B R. Mechanical properties of TA15 titanium alloy electron beam welding joint[J]. Transactions of the China welding Institutions, 2007, 28(1): 97-100.
- [3] 范霖康,齐铂金,李晓鹏,等.薄板TC4钛合金脉冲电子束焊接技术研究[J].稀有金属材料与工程,2019,48(12):4026-4034.
FAN J K, QI B J, LI X P, et al. Research on TC4 Titanium Alloy Sheet Welded by Pulsed Electron Beam Welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(12): 4026-4034.
- [4] 张宇鹏,丁来法,Valerii Bilous,等.厚板TC4钛合金电子束焊接接头组织演变及力学性能[J].电焊机,2022,52(6):87-92.
ZHANG Y P, DING L F, Bilous Valerii, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Joint of Thick Plate TC4 Titanium Alloy [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(6): 87-92.
- [5] 房卫萍,肖铁,张宇鹏,等.超厚板TC4钛合金电子束焊接接头应力腐蚀敏感性[J].焊接学报,2019,40(12):121-129.
FANG W P, XIAO T, ZHANG Y P, et al. Stress corrosion crack sensitivity of ultra-thick TC4 titanium alloy electron beam welding joints [J]. Transactions of the China Welding Institutions, 2019, 40(12): 121-129.
- [6] 高福洋,高奇,韩林举,等.异种高温钛合金电子束焊接接头组织与性能[J].焊接学报,2020,41(8):73-78.
GAO F Y, GAO Q, HAN L J, et al. Microstructure and properties of electron beam welded joints of dissimilar high temperature titanium alloys [J]. Transactions of the China welding Institutions, 2020, 41(8): 73-78.
- [7] 闫泰起,程序,李安,等.轧制+增材TC4合金电子束焊接接头组织与性能[J].焊接学报,2019,40(6):112-117.
YAN T Q, CHENG X, LI A, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints in different state of TC4 [J]. Transactions of the China welding Institutions, 2019, 40(6): 112-117.
- [8] 马权,辛社伟,宋凯,等.热处理对Ti-1300高强钛合金电子束焊接组织和力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2019,48(8):2723-2728.
MA Q, XIN S W, SONG K, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-1300 Alloy by Electron Beam Weldment [J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(8): 2723-2728.
- [9] 李炯辉,林德成.金属材料金相图谱[M].北京:机械工业出版社,2006:1865-1900.
- [10] 王世清,刘金合,温国栋,等.10 mm厚TC11钛合金电子束焊接组织性能和残余应力[J].稀有金属材料与工程,2013,42(6):1151-1153.
WANG S Q, LIU J H, WEN G D, et al. Microstructure Mechanical Properties and Residual Stress of Electron Beam Welded TC11 Alloy Joint of 10 mm Thickness [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(6): 1151-1153.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>