

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.07

12 mm厚TC11钛合金电子束焊接接头组织及力学性能研究

刘海坤¹, 赵健¹, 韩柯², 刘航天¹, 王群³

1. 上海工程技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201620

2. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

3. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900

摘要: 采用高压真空电子束焊机对12 mm厚TC11钛合金板进行焊接, 利用X射线检测仪对焊缝内部质量进行检测, 使用超景深显微镜对焊接接头显微组织进行观察, 分析不同组织的分布规律, 通过拉伸试验、显微硬度对力学性能进行测试, 借助扫描电镜对显微组织与拉伸断口形貌进一步观察。结果表明, 真空电子束焊接接头成形良好, TC11钛合金母材组织有两种不同尺寸的等轴 α 相镶嵌在 β 基体, 焊缝熔合线附近交替分布着针状马氏体 α' , 在焊缝中出现不同角度的片状 α 相, 等轴 β 相与片状 α 相组成的亚稳态组织, 以及出现一条由亚微米级等轴 β 相组成的细晶带; 焊缝与热影响区显微硬度略高于母材区, 焊缝中部硬度略高于焊缝上部与下部; 拉伸试样均断裂于焊缝处, 抗拉强度低于母材; 断口形貌为韧窝状, 为典型的韧性断裂。

关键词: TC11钛合金; 电子束焊接; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG456.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0058-07

Research on Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Joints of 12 mm Thick TC11 Titanium Alloy

LIU Haikun¹, ZHAO Jian¹, HAN Ke², LIU Hangtian¹, WANG Qun³

1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

3. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 62190, China

Abstract: The 12 mm thick TC11 titanium alloy plate was welded by electron beam welding machine, and the internal quality of the weld was examined by X-ray detector, the welded joint was observed by super depth-of-field microscope to analyze the distribution pattern of different tissues, and the mechanical properties were tested by tensile test and microhardness, and further observed by scanning electron microscope on the microstructure and fracture morphology. The results show that the welded joint are well formed, the TC11 titanium alloy base metal organization has two different sizes of equiaxial α -phase embedded in the β matrix, the fusion line near the alternating distribution of acicular martensite α' , in the weld appears at different angles of the lamellar α -phase, equiaxial β -phase and lamellar α -phase composed of the metastable state microstructure, as well as the emergence of a sub-micron level equiaxial β -phase composed of a fine crystalline band; welded seam zone and heat-affected zone microhardness Slightly higher than the base metal area, welded seam middle hardness is slightly higher than the weld upper and lower; tensile specimens are fractured in the welded seam, the tensile strength is lower than the base material; The fracture morphology is tough fossa-like, typical of toughness fracture.

Keywords: TC11 titanium alloy; electron beam welding; microstructure; mechanical properties

引用格式: 刘海坤, 赵健, 韩柯, 等. 12 mm厚TC11钛合金电子束焊接接头组织及力学性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 58-64.

收稿日期: 2024-06-14 修回日期: 2024-12-11

基金项目: 上海市III类高峰学科—材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造)

作者简介: 刘海坤(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事高能束焊接研究。

通讯作者: 赵健(1984—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事增材制造、异种金属焊接及表面改性技术研究。E-mail: 05160001@sues.edu.cn。

Citation:LIU Haikun, ZHAO Jian, HAN Ke, et al. Research on Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Joints of 12 mm Thick TC11 Titanium Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 58–64.

0 引言

钛合金以其优异的比强度、耐腐蚀性和低密度等特殊性能成为关键材料。其中,TC11 钛合金(名义成分 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr0.3Si)作为一种典型的 $\alpha+\beta$ 双相合金,以其出色的高温强度与抗蠕变性能,被广泛用于航空航天、汽车、生物医学等领域^[1]。

电子束焊接(Electron Beam Welding, EBW)是一种在真空环境中具有高能量密度的熔合连接工艺。与其他焊接方法相比,电子束焊接几乎无气孔产生,而钛合金焊接存在气孔缺陷,因此电子束焊接是钛合金连接的最有效的方法之一^[2-4]。这种精确且受控的工艺能够形成高质量的焊缝,能最大限度地减小热影响区,从而减轻对基材独特性能的影响。目前,国内外研究者主要从焊接工艺出发,对钛合金焊接接头组织及力学性能进行了大量试验研究及理论分析。文献[5]研究了不同振荡激光扫描路径对 TC11 钛合金焊接组织性能的影响,采用余弦和圆形振荡扫描激光焊接方法均可以抑制焊缝的气孔率和提升焊缝强度,进而提升 TC11 高温钛合金焊缝的质量,其中以圆形振荡效果更优。王世清^[6]等通过对 10 mm 厚 TC11 钛合金的 EBW 研究表明,焊缝及热影响区的显微硬度高于母材,接头的冲击韧性比母材提高 20%,而抗拉强度为母材的 98%左右。在熔合区,发现了细小马氏体 α' 的典型柱状晶体,而在热影响区,等轴 α 和马氏体 α' 分散在转化的 β 中。方乃文^[7]等采用激光填丝焊接方法进行 96 mm 厚 TC4 钛合金板超窄间隙焊接,分析接头组织发现,焊接接头上中下 3 部分热影响区宽度、焊缝区域中 α' 马氏体板条宽度和位错密度呈递减趋势,焊接接头下部焊缝区域的 α' 马氏体晶界取向差在 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 的大角度晶界分布较中部和上部焊缝区域组织中略少一些;陈晓辉^[8]等通过对 40 mm 厚 TC11 钛合金板电子束焊接接头微观组织研究发现,电子束接头焊缝显微组织为针状 α' 相,随着焊缝深度增加,形成的针状 α' 更细更短。

目前,针对 12 mm 厚 TC11 钛合金电子束焊接,

一次高质量单面焊双面成形工艺还具有研究空间,另外,采用电子束圆形摆动焊接的方式来减小深熔焊常见孔洞缺陷的工艺还需进行探索。本文主要研究 12 mm 厚 TC11 钛合金板材电子束焊接接头的显微组织和力学性能,采用各种表征技术和机械测试方法来深入了解焊接接头的行为,并为优化焊接参数和提高接头的力学性能提供有价值的参考。

1 试验方法

1.1 试验设备及材料

试验设备为 ProbeamK110 型高压真空电子束成套设备。母材为厚 12 mm 的锻造 TC11 钛合金,为 $\alpha+\beta$ 两相钛合金,尺寸 220 mm $\times$ 90 mm $\times$ 12 mm,其化学成分见表 1,其显微组织如图 1 所示,母材区主要为双套组织,该组织的基体 β 相镶嵌着两种不同尺寸的等轴 α 相。

表 1 TC11 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of TC11 titanium alloy (wt. %)									
Al	Mo	Zr	Si	Fe	O	C	N	H	Ti
6.08	3.5	1.54	0.3	≤ 0.23	≤ 0.065	≤ 0.06	≤ 0.0075	≤ 0.0019	剩余

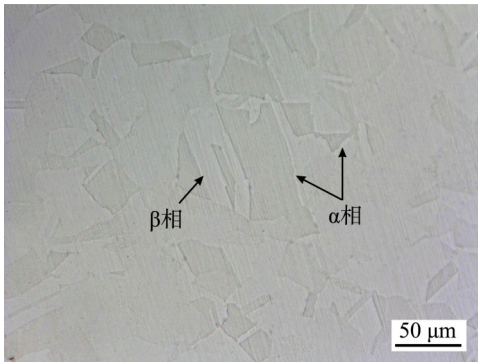


图 1 TC11 钛合金母材显微组织

Fig. 1 Microstructure of TC11 titanium alloy base metal

1.2 焊接工艺及检测

经优化的焊接工艺参数为:焊接电压 130 kV,焊接束流为 30 mA,焊接速度为 15 mm/s,聚焦束流 2 010 mA,摆动幅度 X 、 Y 均为 0.4 mm。试验采用平板对接方式,电子束焊接试验在真空室内进行,真空度低于 9×10^{-2} Pa。焊前采用机械打磨的方法去

除焊缝接口附近氧化层,并用无水乙醇去除污染物。用MG450型X射线检测仪对焊缝质量进行X射线检测,检测依据标准GJB1187A—2001进行,管电压175~180 kV,管电流10 mA,曝光时间3 min。要求对长度为220 mm范围内的焊缝进行100%探伤检测。射线检测结束后,对焊缝进行评定,检测报告中缺陷分类条件依据GB/T 37910.1—2019。

1.3 显微组织观察

在焊接试件上用电火花线切割的方法切割金相试样,分别用800#、1000#、1200#、2000#的砂纸对试样表面由粗到细逐步进行打磨。配制10 mL HF+20 mL HNO₃+70 mL H₂O溶液进行腐蚀,腐蚀时间15 s。用型号VHX-600超景深显微镜对焊缝截面金相组织特点进行观察,采用扫描电子显微镜(SEM)进一步观察焊缝微观组织和拉伸断口形貌。

1.4 力学性能测试

采用型号HXD-1000TMSC/LCD硬度计对接头显微硬度分布规律进行表征,测试载荷为500 g,负载时间为15 s。焊接接头金属拉伸试验所用设备为AG-25TA型电子万能材料试验机,焊接接头抗拉强度检验标准按GB/T 228.1—2021规定执行。如图2所示,取三组焊接接头拉伸试样进行力学性能测试,每组拉伸试样分别取焊缝上、中、下三个位置,标距45 mm,试验前做好标记,为了减少误差,测试三根位置相同试样取平均值拉伸试样尺寸如图3所示。

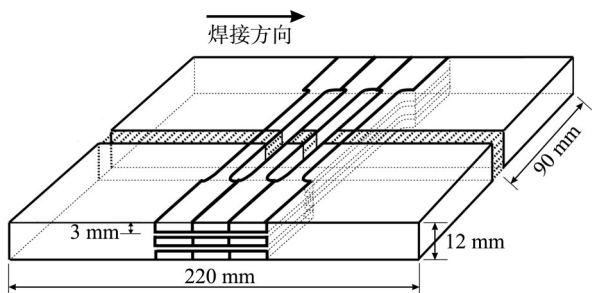


图2 拉伸试样取样位置

Fig. 2 Sampling position of tensile specimen

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌

TC11钛合金板材对接电子束熔焊焊缝的宏观

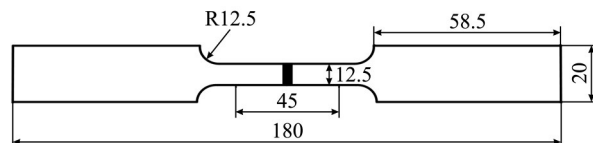
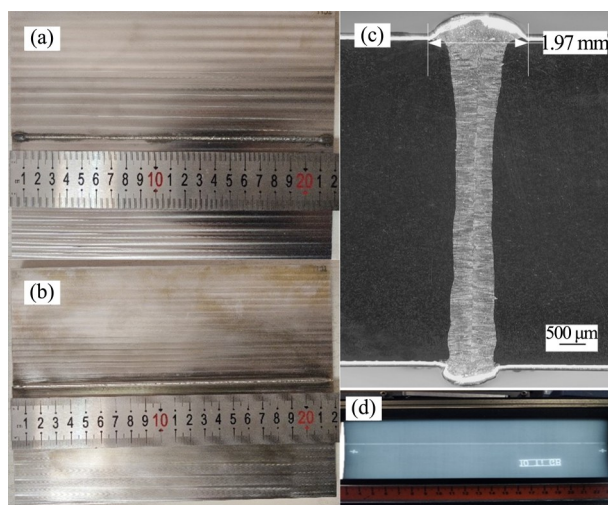


图3 拉伸试样尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Dimensions of tensile specimen(Unit: mm)

形貌和横截面形貌如图4所示。由图4a、4b可知,焊缝表面与背面成形质量良好,焊缝光滑、平整、连续,无焊接缺陷,表明焊接接头成形良好。由图4c中可知,焊缝截面形貌接近钟罩形,均有一定程度的余高,测量焊缝的熔宽为1.97 mm。焊缝截面成形质量良好。对焊接试样进行X射线探伤,实测底片如图4d所示,检测结果显示无裂纹、缩孔、气孔、夹渣、未熔合等缺陷,这表明此焊接工艺参数下获得的焊接接头质量成形美观,满足验收技术条件规定要求。



(a)焊缝表面形貌;(b)焊缝背面形貌;(c)焊缝截面形貌;(d) X射线探伤底片

图4 接头表面成形、截面形貌及探伤结果

Fig. 4 Surface molding of welded joint, cross-sectional morphology and results of X-ray inspection

2.2 微观组织

TC11钛合金焊接接头的金相组织如图5所示,可以看出焊缝为典型的铸态组织。图5a为焊缝截面左侧金相组织,其热影响区极窄,焊缝熔合线处交替分布着细长的柱状晶粒与等轴晶粒,这是由于EBW能量密度高度集中,但高温时间短,冷却速度较快,这在毫米级宽度的焊缝范围内造成了极大的温度梯度^[9],同时焊接过程中, α 相转变为高温 β 相,

在快速的冷却过程中, β 相析出针状 α 相, 但由于凝固速度过快, 亚稳态 β 相出现切变形成大量的针状马氏体 (α'), 其生长方向为散热最快方向, 即与熔池结晶等温面相垂直的方向。图 5b 焊缝中部分布着大量等轴 α 相, 以及较大横纵比且成不同角度的集束。

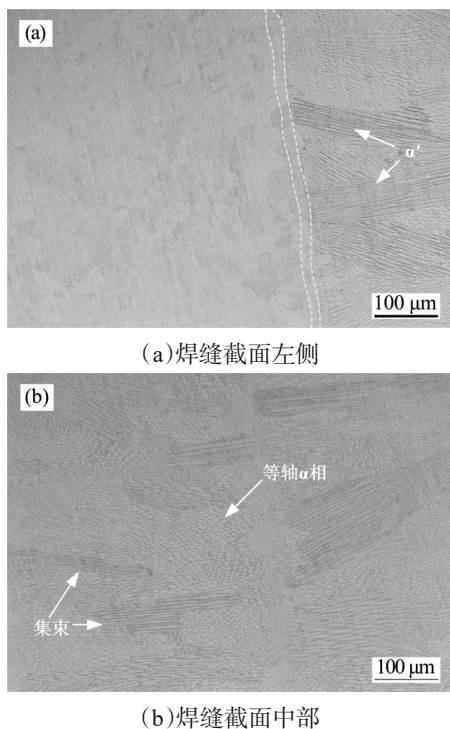


图5 焊缝区金相组织

Fig. 5 Metallographic organization of the weld zone

图 6 为扫描电镜下不同倍数 TC11 钛合金接头的微观组织, 在焊缝中部由于热量积累高且散热能力差, 成为最后的凝固区, 因此保留了一部分 β 相, 在中心位置形成一条细晶带。细晶带垂直方向有片状 α +等轴 β 的一种亚稳态的微观组织。

2.3 显微硬度测试结果

图 7 为 TC11 钛合金电子束焊接接头显微硬度分布。图 7a 为接头水平方向硬度分布, 从整个接头看, 主要分为焊缝区、极小的热影响区和母材区。从测试结果可知, 焊缝区硬度均值为 203.65 HV, 母材区硬度均值为 188.32 HV, 显微硬度逐渐下降。热影响区附近的硬度略高于焊缝区, 这是由于熔合区与热影响区是针状马氏体 α' 生长聚集处, 因此会出现硬度略高的情况, Huang^[10] 研究发现马氏体含量在材料硬度强化方面比晶粒细化起着更重要的

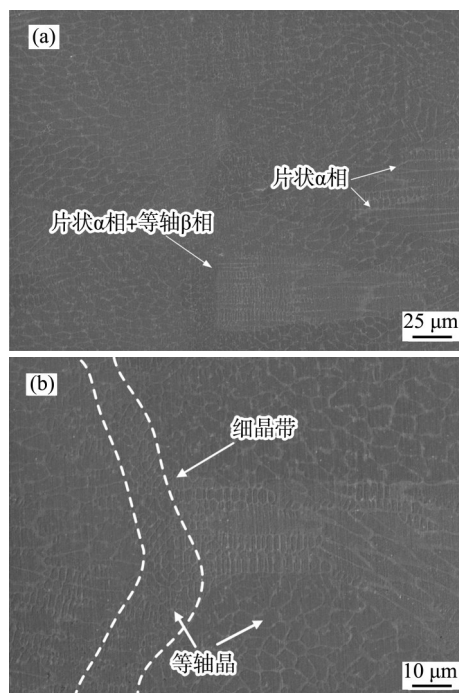


图6 扫描电镜下不同倍数焊缝区金相组织

Fig. 6 Metallographic organization of the weld zone at different magnifications under scanning electron microscope

作用。焊缝区硬度有波动, 推测是由于在焊缝中心的细晶带有亚稳态 β 相的缘故。图 7b 为接头焊缝中心垂直方向硬度分布。可以看出焊缝中部硬度低于焊缝的上部与下部, 这是由于焊缝中部热量积累, 散热速度相对上下部较慢, 因此形成的马氏体 α' 相粗大, 由文献^[8,11]可知, 接头中的更细马氏体获得更高的显微硬度。

2.4 拉伸性能测试结果

如图 8 所示, 拉伸制备试样均在焊缝处断裂, 文献^[12]指出, 这是由于钛合金焊缝区存在大量位错缠结马氏体, 增加了硬度。另外, 针状马氏体的存在导致大量相界, 阻碍了滑移变形, 使得塑性下降。表 2 为拉伸试样的力学性能结果 (断后伸长率、抗拉强度和屈服强度)。组别 1, 组别 2, 组别 3 中的三组数据分别为垂直于焊缝方向同一平面内上, 中, 下三个位置。三组数据中焊缝中部的拉伸试样抗拉强度都是最低的, 观察图 6b 可知, 焊缝中出现不同大小、尺寸的等轴晶粒, 这是由于焊缝中部相对于与空气接触的上部和下部不同, 焊缝中部有热量积累, 出现因冷却过慢、而未及时转化为针状马氏体的亚微米级等轴 β 相, 焊缝中产生不均匀的微观组

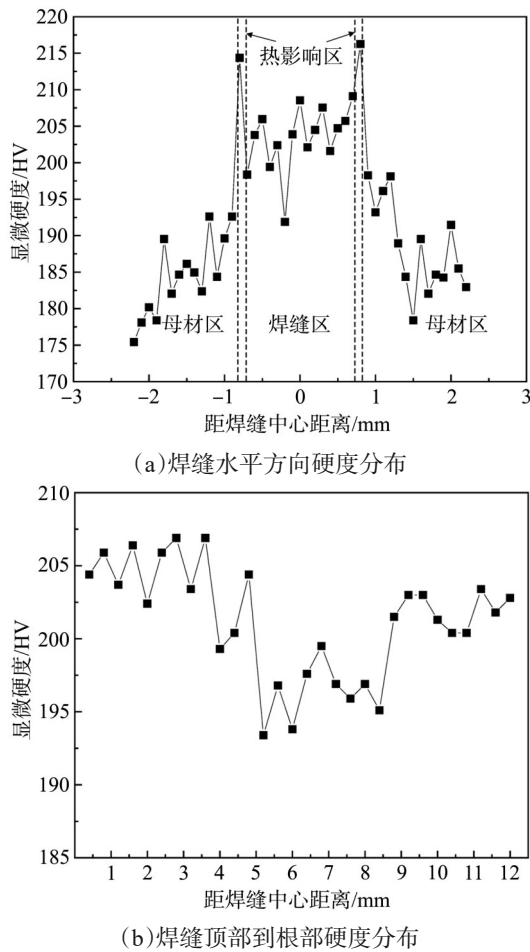


图7 焊缝截面显微硬度测试位置及分布规律

Fig. 7 Test position and distribution of microhardness of weld section

织将降低钛合金的抗拉强度^[13],与没有连续 α 晶粒的柱状 β 晶粒相比,等轴 β 晶粒更容易沿着晶界形成裂纹^[12,14],因此焊缝中部的抗拉强度最低。由文献^[15]知,可通过焊前或焊后热处理和用钎料焊接来改善接头的应力状态和不均匀性,从而提高力学性能。焊接接头的伸长率平均值在9.1%~11.2%之间,波动范围不大,符合典型的韧性断裂特征。焊接接头的抗拉强度变化并不显著,最低抗拉强度为766.7 MPa,最高为811.8 MPa,平均抗拉强度在787.9~794.9 MPa之间。不同组别拉伸试样平均屈服强度变化不明显,在701.1~717.9 MPa之间。

2.5 断口形貌

观察断裂表面可以用于表征焊接试样在拉伸试验过程中的失效机理^[16]。图9为焊接接头拉伸断口在扫描电镜下不同倍数的图像,可以看出形貌为韧窝断口,为典型的韧性断裂特征。在拉伸正应力

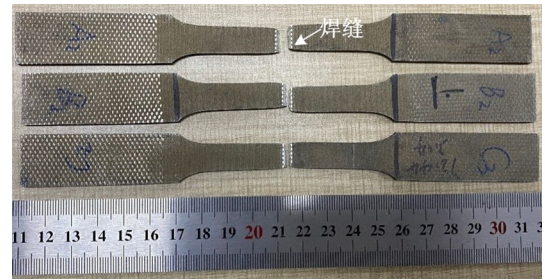


图8 拉伸试样断裂位置

Fig. 8 Fracture position of tensile specimen

表2 拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results

组别	伸长率/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
1	11.1, 10, 6.2	802.3, 766.7, 811.8	724.0, 686.0, 743.8
	(平均9.1)	(平均793.6)	(平均717.9)
2	12.5, 12.2, 7.8	791.2, 772.4, 800.1	725.8, 694.3, 732.2
	(平均10.8)	(平均787.9)	(平均717.4)
3	13.3, 11.1, 10	805.8, 774.9, 803.9	727.4, 662.6, 713.3
	(平均11.2)	(平均794.9)	(平均701.1)

的作用下形成等轴韧窝,韧窝的数量多且尺寸较小。这是由于焊缝中部分别聚集着大量尺寸不同的等轴组织,在拉伸过程中,亚微米级等轴 β 相处更容易发生沿晶断裂。由文献^[9,17]知,沿着等轴 α 相与 β 相晶界以及片层 α 相的断裂都可以形成韧窝,而沿着等轴 α 相界面断裂产生的韧窝尺寸相对较大。

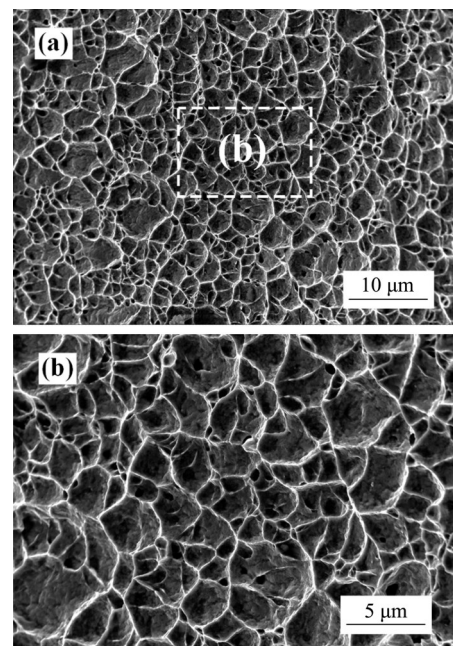


图9 拉伸断口形貌

Fig. 9 Morphology of tensile fracture.

3 结论

本文系统研究了电子束焊接工艺对12 mm厚TC11钛合金接头微观组织与力学性能的影响。通过优化焊接参数(焊接电压130 kV、焊接束流为30 mA、聚焦束流2 010 mA、焊接速度为15 mm/s、摆动频率200 Hz、摆动幅度X、Y均为0.4 mm),成功实现了无缺陷、成形良好的焊接接头,并得出以下主要结论:

(1)焊缝区主要由针状 α' 马氏体、片状 α 相及亚稳态 β 相组成,熔合线附近形成粗大柱状晶粒,而焊缝中心存在亚微米级等轴 β 相组成的细晶带。快速冷却过程抑制了 β 相的完全分解,导致 α' 马氏体主导的非平衡组织形成。这一组织特征与电子束焊接的高能量密度和陡峭温度梯度密切相关。

(2)焊缝区与热影响区的平均显微硬度(203.65 HV)高于母材(188.32 HV),主要是由于针状马氏体 α' 生长于此提高了硬度。焊缝中部硬度略低于上、下部,是由于该区域马氏体粗化及亚稳态 β 相的局部富集。

(3)焊接接头平均抗拉强度为787.9~794.9 MPa,略低于母材,断裂位置均位于焊缝区。拉伸断口呈现韧窝形貌,为韧性断裂。焊缝中部因等轴 β 相晶界处的应力集中,抗拉强度均较低于上部和下部。接头的断后伸长率(9.1%~11.2%)与母材(约14%)相比略有下降。

本研究仅对电子束自熔焊接头成形后的组织与性能做了定量分析,后续工作将侧重于深入研究接头力学性能的提升,以及加入接头耐腐蚀性能的测试。未来将探索改进焊接工艺,并使用高熵合金作为中间层,以增强TC11钛合金接头性能。

参考文献:

- [1] 隋楠,周毅,张明达,等. Ti6242钛合金电子束焊接接头组织和力学性能[J]. 航空制造技术,2022,65(15): 103-110.
SUI N, ZHOU Y, ZHANG M D, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti6242 Titanium Alloy Joints by Electron Beam Welding[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022, 65(15): 103-110.
- [2] Grigoryev V V, Muravev V I, Bakhmatov P V, et al. The study of the specific defects occurrence at electron-beam welding (EBW) of titanium alloys[J]. Welding International, 2022, 36(5): 1-6.
- [3] WANG D H, WANG S G, ZHANG W. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Ti70/TA5 Dissimilar Joint[J]. Journal of Engineering Materials and Technology-transactions of The Asme, 2021, 143(4): 20-1047.
- [4] 雷小伟. 铸造Ti-Al-Mo-Zr钛合金电子束焊接接头组织与性能[J]. 电焊机, 2017, 47(12): 24-27.
LEI X W. Microstructure and mechanical property of the 14 mm-thickness cast state Ti-Al-Mo-Zr alloy welded joint by the electron beam welding technique[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(12): 24-27.
- [5] 罗灿,张臣,赵志远,等. 振荡激光扫描路径对TC11钛合金焊接组织性能的影响[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 9-18.
LUO C, ZHANG C, ZHAO Z Y, et al. Effects of Beam Oscillating Path on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded TC11 Titanium Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(3): 9-18.
- [6] 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(06): 1150-1153.
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(06): 1150-1153.
- [7] 方乃文,黄瑞生,谢吉林,等. 大厚度TC4钛合金超窄间隙激光填丝焊接接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(06): 25-34.
FANG N W, HUANG R S, XIE J L, et al. Study on Properties and Microstructures of Large Thickness TC4 Titanium Alloy Welded Joint by Ultra-Narrow Gap Laser Welding Using Filler Wire[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(06): 25-34.
- [8] 陈晓晖,张佳,程序,等. TC11钛合金厚板电子束焊接组织及性能[J]. 焊接, 2018(6): 25-28.
CHEN X H, ZHANG J, CHEN X, et al. Electron beam welding organization and properties of TC11 titanium alloy thick plate[J]. Welding & Joining, 2018(6): 25-28.
- [9] 王聪. TC11钛合金微观组织调控及其对力学性能的影响研究[D]. 江苏:中国矿业大学, 2022.
WANG C. Study on Microstructure Regulation and Its Influence on Mechanical Properties of TC11 Titanium

- Alloy [D]. Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2022.
- [10] Huang T T, Gou R B, Dan W J, et al. Strain-hardening behaviors of dual phase steels with microstructure features [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, (8):88-97.
- [11] Wencel Z, Wiewiórowska S, Wiecek P, et al. Electron Beam Welding Process for Ti6Al-4V Titanium Alloy [J]. Materials, 2023, 16(14):5174.
- [12] GAO F Y, LI P Y, JIANG P, et al. The effect of constraint conditions on microstructure and properties of titanium alloy electron beam welding [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 721(4):117-124.
- [13] LU W, SHI Y W, LEI Y P, et al. Effect of electron beam welding on the microstructures and mechanical properties of thick TC4-DT alloy [J]. Materials & Design, 2012, 34(2):509-515.
- [14] WU Z, KOU H, LI J, et al. Crack initiation mechanism of a silicide-containing high-strength Ti-5Al-7.5V alloy under low-cycle fatigue loading [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 865:144654.
- [15] Sergey Kolokolnikov, Anatoly Dubov, Oleg Steklov. Assessment of welded joints stress-strain state inhomogeneity before and after post weld heat treatment based on the metal magnetic memory method [J]. Welding in the World, 2016, 60(4):665-672.
- [16] WANG T, WANG H, LI N, et al. Microstructural and Mechanical Heterogeneity of Electron Beam Welded Thick Pure Titanium/Q235B Steel Bimetallic Plate Joint [J]. Journal of Materials Engineering and Performance volume, 2023, 32(10):5273-5282.
- [17] TAN C S, FAN Y D, Sun Q Y, et al. Improvement of the Crack Propagation Resistance in an $\alpha + \beta$ Titanium Alloy with a Trimodal Microstructure [J]. Metals, 2020, 10(8):1058.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第6页

- and other aircraft engine components [EB/OL]. (2024-06-01) [2024-10-11] <https://optomec.com/blisk-repair/>.
- [8] 蒋其麟, 曹凯强, 陈龙, 等. 涡轮叶片气膜孔的纳秒-飞秒双波段激光加工 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(18):53-61.
- JIANG Q L, CAO K Q, CHEN L, et al. Nanosecond-femtosecond dual-wavelength laser processing of turbine blade film holes [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2021, 64(18):53-61.
- [9] Liu J, Dong S, Jin X, et al. Quality control of large-sized alloy steel parts fabricated by multi-laser selective laser melting (ML-SLM) [J]. Materials & Design, 2022, 223:111209.
- [10] Champagne V, Helfrich D. Critical assessment 11: Structural repairs by cold spray [J]. Materials Science and Technology, 2014, 31(6):627-634.
- [11] 樊伟杰, 张勇, 王安东, 等. 基于多机制协同航空自修复涂层关键技术 [EB/OL]. (2022-05-16) [2024-10-11] <http://www.eccor.org.cn/qita/new1/2022-05-16/184319.html>.
- [12] Tan C, Li R, Su J, et al. Review on field assisted metal additive manufacturing [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 189:104032.
- [13] Gäumann M, Bezençon C, Canalis P, et al. Single-crystal laser deposition of superalloys: processing - microstructure maps [J]. Acta Materialia, 2001, 49(6):1051-1062.
- [14] Basak A, Das S. Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing [J]. Annual Review of Materials Research, 2016, 46:125-149.
- [15] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92:112-224.
- [16] 张佩宇, 周鑫, 李应红. 单晶涡轮叶片高能束修复研究进展 [J]. 航空学报, 2022, 43(4):525610.
- ZHANG P Y, ZHOU X, LI Y H. Research progress on high-energy beam repair of single-crystal turbine blades [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4):525610.
- [17] 高杰. 电子束焊接技术的分析与研究 [J]. 中国金属通报, 2023(12):180-182.
- GAO J. Analysis and research on electron beam welding technology [J]. China Metal Bulletin, 2023(12):180-182.
- [18] 康文军, 梁养民. 电子束焊接在航空发动机制造中的应用 [J]. 航空制造技术, 2008, (21):54-56.
- KANG W J, LIANG Y M. Application of electron beam welding in aviation engine manufacturing [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2008(21):54-56.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>