

# ZTC4 合金电子束焊接接头显微组织及力学性能研究

赵 桐, 李晋炜, 唐振云, 吴 冰

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;  
2. 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

**[摘要]** 以 ZTC4 钛合金电子束焊接接头为研究对象, 通过显微硬度试验、金相分析以及常规力学性能试验, 讨论了电子束焊接接头不同位置的组织、形态差异, 探究显微组织与接头显微硬度的相关性, 以及电子束焊接接头的拉伸性能和冲击性能。通过组织分析及显微硬度测试发现, ZTC4 合金电子束焊缝微观组织由原始  $\beta$  相转变为针状  $\alpha'$  相, 即针状马氏体, 其热影响区组织为片状  $\alpha$  相与原始  $\beta$  相的混合物, 且焊缝处显微硬度最高, 热影响区其次, 母材最低。通过力学性能测试发现, 电子束焊接接头的拉伸和冲击性能与母材相当, 说明采用电子束焊接 ZTC4 可以得到力学性能良好的焊接接头。

**关键词:** ZTC4 合金; 电子束焊接; 显微组织; 力学性能; 显微硬度

## Study on Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welding Joint of ZTC4 Alloy

ZHAO Tong, LI Jinwei, TANG Zhenyun, WU Bing

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;  
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Processes, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** The difference of organization in different location of the ZTC4 electron beam welding joint was discussed through the microscopic hardness test, metallographic analysis and conventional mechanical property test. The correlation between microscopic hardness and microstructure of EBW joint and the tensile and impact performance of EBW joint were also studied. Study found that the microstructure of ZTC4 EB weld changed from original  $\beta$  to acicular  $\alpha'$ , and the microstructure of HAZ was composed of a mixture of flaky  $\alpha$  and original  $\beta$ . The microscopic hardness of EBW joint was higher than base metal and HAZ, and tensile and impact performance of EBW joint were equivalent to the base metal. By studying the difference of performance characteristics between ZTC4 EBW joint and base metal, the foundation of research was provided for ZTC4 EBW application, and the wider and wider application in aerospace industry was promoted for large-scale titanium alloy casting and welding structure.

**Keywords:** ZTC4 alloy; Electron beam welding; Microstructure; Mechanical properties; Microhardness

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.088

钛合金铸造作为一种低成本的制造方法, 已经在航空航天等领域得到较广泛应用<sup>[1-2]</sup>。随着精密铸造技术、热等静压和特种热处理等工艺的应用, 铸造钛合金的质量和性能已接近其变形件的水平, 并且由于可实现复杂结构的精确成形, 拥有比强度高、塑性好、加工性能优异等其他材料无法比拟的使用性能<sup>[3-5]</sup>。由于尺寸等因素的限制, 无法实现大规格零部件的铸造和热等静压等工艺, 这也就直接限制了 ZTC4 合金的应用。而通过电子束焊接, 可以实现大规格 ZTC4 合金零部件的制造, 同时焊接技术具有加工成本低、周期短、生产效率高、材料利用率高等优点<sup>[6-8]</sup>。因此, 开展 ZTC4 合金电子束焊接接

头力学性能研究是很有必要的。

目前, 国内外已经开展了较多关于轧制 ZTC4 合金的显微组织和力学性能特征的研究, 但对 ZTC4 合金电子束焊接接头显微组织、力学性能及其与常规热加工 ZTC4 合金焊接接头的差异方面的研究工作很少, 有关 ZTC4 合金电子束焊接的文献更少。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

ZTC4 合金由北京航空材料研究院提供, TC4 轧板由宝钛提供, 化学成分参见表 1。

## 1.2 试验方法

本试验采用相同电子束焊接工艺参数焊接 20mm 厚 ZTC4 合金试板和轧制 TC4 合金试板,目的是通过对比,从组织差异性方面描述 ZTC4 的母材与电子束焊接接头的组织特征。电子束焊接设备为 ZD150-15A 型高压电子束焊机,焊接参数为:加速电压为 150kV、焊接电流 150mA、焊接速度 15mm/s。之后通过线切割取得电子束焊缝处试块,将焊缝的横截面作为研究对象,制成金相试样,金相试样制备采用 CitoPress-20 热镶嵌机和 TegraPol-31 自动磨抛机。采用 Leica DM6000M 光学显微镜及 LeicaS6D 体式显微镜在不同放大倍数下观察从母材到焊缝中心的组织变化,并进行拍摄。利用 DMH-2 型显微硬度计进行显微硬度测试,载荷 200g。

室温拉伸采用 Instron D880 型拉伸试验机,室温冲击采用 JBS-300B 型冲击试验机,性能测试试样尺寸见图 1,保证焊缝位于试样中心处,冲击试样缺口开在焊缝正面中心处并垂直于板面。分别对 ZTC4 合金母材与电子束焊接接头试样进行室温拉伸和室温冲击性能测试,测量抗拉强度、屈服强度、延伸率、断面收缩率和冲击吸收能量。

## 2 结果与讨论

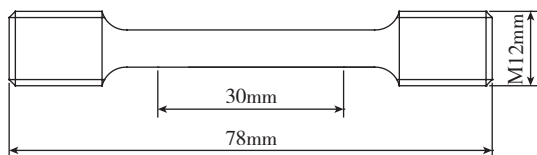
### 2.1 ZTC4母材与电子束焊接接头组织特征

#### 2.1.1 ZTC4与轧制TC4母材组织特征对比

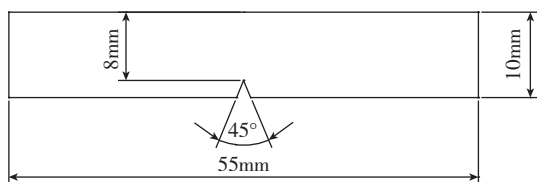
ZTC4 和轧制 TC4 母材组织如图 2 所示。可以看出,ZTC4 合金母材组织中初始  $\beta$  晶粒十分粗大, $\alpha$  相集束分布其中。由于  $\beta$  相取向各异,不同取向的  $\beta$  晶粒

表1 ZTC4和轧制TC4合金化学成分(质量分数) %

| 种类     | Al   | V    | Fe   | Si   | C     | N     | H     | O    | Ti |
|--------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|----|
| ZTC4 板 | 6.40 | 3.98 | 0.06 | 0.02 | 0.014 | 0.006 | 0.002 | 0.17 | 余量 |
| TC4 轧板 | 6.42 | 3.91 | 0.07 | 0.02 | 0.014 | 0.008 | 0.002 | 0.20 | 余量 |



(a) 室温冲击



(b) 试样尺寸

图1 室温拉伸试样尺寸

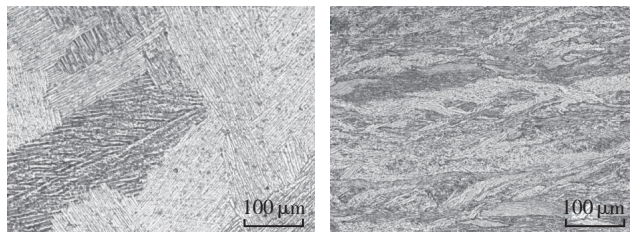
Fig.1 Specimens size of room temperature tensile test

的  $\alpha$  集束交替排列,但每个  $\beta$  晶粒内的  $\alpha$  花纹相同;轧制 TC4 合金母材组织为在  $\alpha + \beta$  区变形的魏氏组织,平行于金属流动方向的晶内  $\alpha$  片层以及沿晶界分布的  $\alpha$  镶边被拉长、压扁,而垂直于金属流动方向的片层被拉成弯曲的树纹状。由于原材料变形程度较小或在  $\alpha + \beta$  相区的变形温度范围较宽,造成  $\alpha$  片呈区段交替排列。这种微观不均匀性的产生,是由于在变形过程中,原  $\beta$  晶粒周围的  $\alpha$  镶边发生变形后,新析出的  $\alpha$  相才开始变形造成的。

#### 2.1.2 ZTC4电子束焊接接头组织特征

为了更好地说明 ZTC4 电子束焊接接头组织特征,采用相同焊接工艺对 ZTC4 和轧制 TC4 试板进行电子束焊接,焊接接头截面形貌如图 3 所示。相同焊接工艺下,ZTC4 试板背面已焊透,而轧制 TC4 试板背面为临界点透状态。ZTC4 电子束焊缝的截面形貌接近平行焊缝,焊缝中部熔宽约 2mm;而轧制 TC4 电子束焊缝呈锥形,焊缝中部熔宽与 ZTC4 相近,约为 2mm。ZTC4 焊接接头的热影响区不明显,而轧制 TC4 焊接接头的热影响区清晰可见,相对于焊缝两边对称,单边宽度约为 1mm。

产生这种现象的原因与两种材料的母材组织特性相关。从图 2 和图 3 可以看出,ZTC4 母材组织中存在大量粗大的晶粒,而轧制 TC4 中的晶粒已经在轧制过程中受挤压而破碎,形成了更多的晶粒与晶界。因此,当电子束

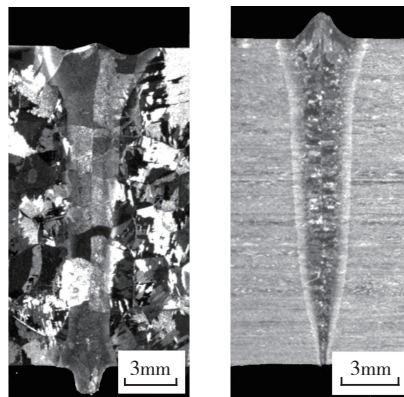


(a) ZTC4 母材组织

(b) 轧制 TC4 母材组织

图2 ZTC4和轧制TC4母材组织

Fig.2 Microstructure of base metal of ZTC4 and rolling TC4



(a) ZTC4

(b) 轧制 TC4

图3 ZTC4和轧制TC4电子束焊接焊缝形貌

Fig.3 Weld appearance of ZTC4 and rolling TC4

能量穿过轧制 TC4 试板时,由于存在大量晶界,阻碍了能量继续向下穿透,从而使得能量衰减较大,焊缝形貌呈锥形;而 ZTC4 由于晶粒较粗大,晶界较轧制 TC4 少,因此能量更容易穿过,焊缝上、下部分的形貌一致性较好,呈平行状态。同时,当能量穿透 ZTC4 时,多余的能量通过匙孔底部流失,从而导致焊缝中部熔宽较轧制 TC4 小。

图 4 为 ZTC4 和轧制 TC4 合金电子束焊接接头各区域显微组织照片。在熔化焊过程中,输入能量决定  $\beta$  晶粒的大小,而凝固速度决定  $\alpha$  相的特征。因此在电子束焊接过程中,输入能量较大,冷却速度较快,焊缝组织出现大量针状  $\alpha'$  相。由于存在温度梯度,从焊缝到热影响区再到母材冷却速度降低, $\alpha$  相片层厚度逐渐增加。

在热影响区,部分区域温度在相变点以上,部分区域在相变点以下,凝固过程中既存在固态相变过程,又存在再结晶过程。母材受热后部分  $\alpha$  片溶解,而在快速冷却过程中, $\beta$  晶粒垂直于熔合线生长并发生再结晶,原始  $\beta$  晶界保留下来,并在相界上析出大量的  $\alpha$  相,使得组织  $\alpha$  片层厚度比母材有所减少。其热影响区组织则表现为靠近焊缝处有少量针状  $\alpha$ ,远缝处为片状  $\alpha$ ,并保留了母材变形  $\alpha$  片层的形态。

### 2.1.3 显微硬度分析

图 5 所示为 ZTC4 和轧制 TC4 合金电子束焊接接头显微硬度分布图,可以清楚地看出,中间区域为焊缝,其硬度值远高于两侧的母材区域,而两区域间呈陡坡过渡,曲线近似成“ $\Omega$ ”形分布。焊缝与母材硬度的差异,主要与其组织状态相关,从焊缝区到母材区,冷却速度逐渐降低,显微组织由针状  $\alpha'$  逐渐过渡到片层  $\alpha$ ,晶界减少,硬度因此降低<sup>[9-10]</sup>。从硬度分布情况可以推断出,存在陡坡的过渡区即为热影响区,靠近焊缝一侧硬度较高,而靠近母材一侧硬度较低,而且,可以看出 ZTC4 热影响区较窄,约为 0.5~0.8mm,而轧制 TC4 热影响区约为 1.3mm。可以看到,ZTC4 焊接接头的显微硬度比轧制 TC4 的硬度稍高。钛合金显微硬度应满足 Hill 公式(1)和 Marsh 公式(2),即

$$HV \cong 3Y, \text{ if } E/HV > 44.3 \quad (1)$$

$$HV/Y \cong 0.065 + 0.6 \ln(E/Y), \text{ if } E/HV < 44.3 \quad (2)$$

式中: $Y$  为屈服强度, $E$  为杨氏模量, $HV$  为显微硬度,单位为  $\text{kg}/\text{mm}^2$ 。这表明显微硬度与屈服强度近似成正比,硬度值大的合金强度也就越高。

一般来说,铸造合金中存在冶金缺陷,其塑性和强度要低于轧制和锻造合金。但随着铸造工艺的不断进步,铸件与轧制和锻造材料的相关性能指标越来越接近。又由于接头中未见气孔、未焊合等焊接缺陷,因此其硬度值、强度和塑性的不同是由显微组织变化造成的。

ZTC4 和轧制 TC4 焊缝组织与均为针状  $\alpha + \beta$  转变

体,如图 4 (b)和(d)所示,通过比较可以发现,ZTC4 合金焊缝区域针状  $\alpha'$  厚度较薄,分布更为细密,因此其显微硬度更高。

## 2.2 力学性能

### 2.2.1 室温拉伸

图 6 为 ZTC4 合金电子束焊接接头与母材的各项拉伸性能的对比如。可以看到,ZTC4 合金电子束焊接接头的抗拉强度  $R_m$  略高于母材,屈服强度  $R_{p0.2}$  高于母材约 50MPa,且数据分散性小于母材;延伸率  $A$  和断面收缩率  $Z$  方面焊缝区域略低于母材,达到母材 90% 以上,数据分散性基本与母材相当;并且焊接接头拉伸试样的断裂部位均在母材上。这主要是由于电子束焊接冷却速度较快,析出的  $\alpha$  相来不及扩散而使得焊缝处形成针状马氏体组织,这种马氏体组织实际上是一种过饱和固溶体,通过固溶强化作用使焊缝位置的强度增加,塑性降低<sup>[11]</sup>。使得焊接接头室温拉伸时断裂发生在母材上。

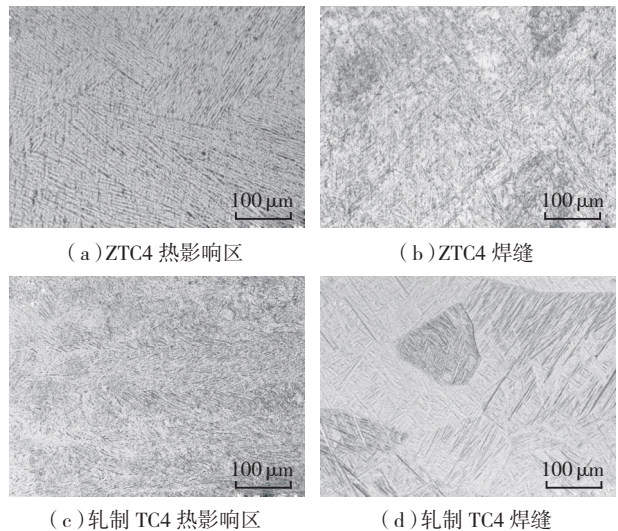


图4 焊接接头显微组织  
Fig.4 Microstructure of welding joints

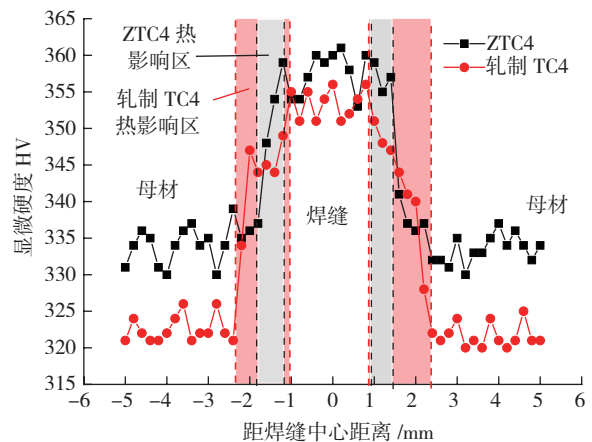


图5 焊接接头显微硬度  
Fig.5 Microhardness of welding joints

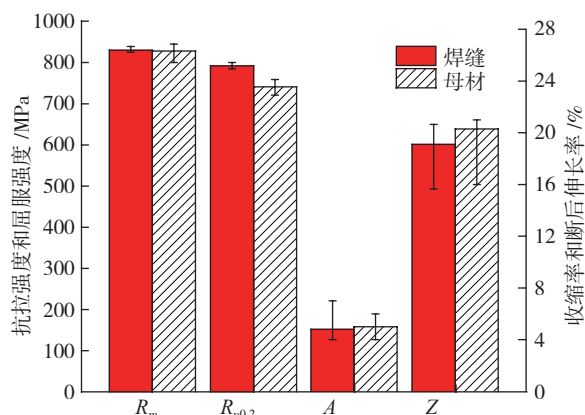


图6 电子束焊接接头与母材的拉伸性能平均值

Fig.6 Average tensile properties of electron beam welded joints and base metal

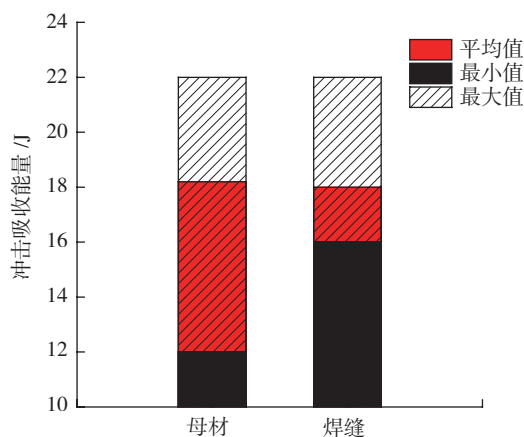


图7 ZTC4母材与电子束焊接接头冲击吸收能量

Fig.7 KV<sub>2</sub> of electron beam welded joints and base metal of ZTC4

上述试验说明采用电子束焊接 ZTC4 合金可获得室温拉伸性能良好的焊接接头。

### 2.2.2 室温冲击

采用夏比冲击试验评估 ZTC4 合金母材和电子束焊缝冲击性能,冲击吸收能量平均值对比见图 7。焊接接头冲击吸收能量在 16~22J 之间,平均值为 18J,与母材 18.2J 的测试结果接近,而母材 V 型冲击数据在 12~22J 之间波动,分散性比接头大。说明采用电子束焊接 ZTC4 合金,可以达到母材冲击性能的 95% 以上。

## 3 结论

(1) 由于冷却速度快, ZTC4 和轧制 TC4 电子束焊接焊缝均为针状  $\alpha$  + 原始  $\beta$  晶界,热影响区组织为片状  $\alpha$  + 原始  $\beta$  晶界。ZTC4 焊缝区  $\alpha$  排列更为细密,显微硬度更高。

(2) 拉伸和冲击试验结果表明, ZTC4 合金电子束焊接接头的强度、冲击韧性等力学性能与母材相当,具有较好的强度和韧性。

## 参考文献

- [1] WU B, LI J W, TANG Z Y. Study on the electron beam welding process of ZTC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2014, 43(4): 786-790
- [2] 王强,张治民,张星,等. ZTC4 钛合金温变形力学行为研究[J]. 稀有技术材料与工程, 2007, 36(3): 616-619.  
WANG Qiang, ZHANG Zhimin, ZHANG Xing, et al. Investigation on warm-forming mechanical behaviour of ZTC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 616-619.
- [3] 刘茜珂,刘昌奎,彭楚峰,等. ZTC4 钛合金精铸件电子束焊接接头组织与疲劳行为研究[J]. 失效分析与预防, 2008, 3(3): 32-36.  
LIU Qianke, LIU Changkui, PENG Chufeng, et al. Study on microstructure and fatigue behavior of electron-beam welding joints of ZTC4 titanium alloy investment castings[J]. Failure Analysis and Prevention, 2008, 3(3): 32-36.
- [4] 陆业航,张杰,吴冰,等. 铸造 TC4 钛合金电子束焊接残余应力测试[J]. 理化检验:物理分册, 2013, 49(11): 711-713.  
LU Yehang, ZHANG Jie, WU Bing, et al. Residual stress measurement for cast TC4 alloy by electron beam welding[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2013, 49(11): 711-713.
- [5] 陈新民,耿雅辉,何迎春,等. 异种状态 TC4 钛合金电子束焊接性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(2): 39-43.  
CHEN Xinming, GENG Yahui, HE Yingchun, et al. Property of electron beam welded joints in different states of TC4 alloy plates[J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(2): 39-43.
- [6] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.  
ZHOU Yanbang. Casting conspectus of titanium alloys[M]. Beijing: Aerospace Industry Press, 2000.
- [7] 张国宝,冯芝华,张强,等. 时效处理对 ABST 态 ZTC4 合金力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(5): 35-37.  
ZHANG Guobao, FENG Zhihua, ZHANG Qiang, et al. Effect of aging treatment on mechanical properties of ZTC4 alloy after  $\alpha$  and  $\beta$  phase solution treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(5): 35-37.
- [8] 娄贯涛. 后处理对 ZTC4 铸造钛合金材料组织及性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(3): 8-10.  
LOU Guantao. Influence of treatment after casting on the mechanical properties and microstructure of ZTC4 cast titanium alloy[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(3): 8-10.
- [9] 温锦志,卜文德,李建萍,等. 厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2016(17): 66-69.  
WEN Jinzhi, BU Wende, LI Jianping, et al. Study on microstructure and properties of thick TC4 alloy joints welded by electron beam[J]. Hot Working Technology, 2016(17): 66-69.
- [10] SENKOV O N, VALENCIA J J, SENKOVA S V, et al. Effect of cooling rate on microstructure of Ti-6Al-4V forging [J]. Materials science and technology, 2002, 18: 1471-1478.
- [11] 侯琦,倪家强,刘胜男,等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头性能研究[J]. 机械制造文摘焊接分册, 2014(4): 17-20.  
HOU Qi, NI Jiaqiang, LIU Shengnan, et al. Research of the properties of EBW joint of TC4-DT titanium alloy[J]. Machinery Manufacturing Abstract Welding Booklet, 2014(4): 17-20.

通讯作者: 赵桐, 工程师, 主要研究方向为电子束加工技术, E-mail: tongzhao111@126.com。

(责编 大漠)