

# 大厚度 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头微观组织和力学性能研究

关 峰<sup>1</sup>,倪家强<sup>1</sup>,刘广鑫<sup>2</sup>,侯 琦<sup>1</sup>,刘艳梅<sup>1</sup>,赵泓博<sup>1</sup>

(1. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850;

2. 中国人民解放军驻中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司军代表室, 沈阳 110850)

[摘要] 对 60mm 厚 TC4-DT 钛合金锻件进行电子束焊接。通过对焊接接头显微组织观察,拉伸、冲击、断裂韧性测试,研究了该合金电子束焊接接头的力学性能。结果表明:TC4-DT 钛合金具有良好的焊接工艺性能。焊缝为  $\alpha$  相网篮组织,该合金电子束焊接接头的拉伸强度与基材相当,但冲击韧性与锻件相比略低。同时,该合金焊接接头也具有较好的损伤容限性能,与锻件相比焊接接头的断裂韧性下降约 20%。

关键词: TC4-DT 钛合金; 电子束焊接; 显微组织; 力学性能

## Research of Microstructure and Mechanical Properties of EBW Joint for Large Thickness Titanium Alloy

GUAN Feng<sup>1</sup>, NI Jiaqiang<sup>1</sup>, LIU Guangxin<sup>2</sup>, HOU Qi<sup>1</sup>, LIU Yanmei<sup>1</sup>, ZHAO Hongbo<sup>1</sup>

(1. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China;

2. Representative Office of the PLA of China, AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] Electron beam welding(EBW) of a 60mm thick TC4-DT titanium alloy is carried out. The properties of EBW joint for the titanium alloy are researched by means of the microstructure, tension testing, impact testing and fracture toughness testing. The results indicate that the welding performance of TC4-DT titanium alloy is excellent. The EBW joint of TC4-DT titanium alloy is composed by the basketweave structure  $\alpha$ , compared with the matrix, the EBW joints of TC4-DT titanium alloy has similar tension strength. The impact toughness of the EBW joints is less than that of the forgings. The fracture toughness performance of the EBW joints is excellent, but the fatigue crack propagation of the EBW joints is 20% less than that of the forgings.

**Keywords:** TC4-DT titanium alloy; EBW; Microstructure; Mechanical property

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.03.074

钛合金具有强度高、刚性好、抗蠕变性能好、耐高温性能好以及良好的焊接性能等,在飞机、火箭、舰船、战车、汽车等上得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。在航空制造中,钛合金材料使用的比例逐渐增加。同时,电子束焊接作为高能束焊接方法为航空工业提供了强有力的技术保障。随着电子束焊接技术的发展和钛合金用量的增加,钛合金零部件的电子束焊接制造不断增多<sup>[4]</sup>。

TC4 钛合金对应的国际牌号 Ti-6Al-4V 合金是一种用途广泛的双相钛合金<sup>[5]</sup>,主要用于飞机发动机叶片、风扇及飞机中的梁、框等承力构件的制造。

Lee 等<sup>[6-7]</sup>对比了 TC4 合金等轴组织和双态组织的动态变形行为和弹道冲击性能,试验研究表明,双态组织的最大剪应力和剪切破坏应变较等轴组织相比具有较好的性能。

TC4-DT 钛合金是一种通过成分设计优化、纯净化熔炼和  $\beta$  相热加工等技术制得的高强度、高断裂韧性的高损伤容限型双相钛合金,性能与国外 Ti-6Al-4V ELI 合金性能相近,ELI 级别的 TC4 合金变形行为应避免在  $\beta$  转变温度区附近,研究结果表明,在  $\beta$  转变温度区附近,在低应变速率下,该型钛合金易存在孔洞形

核和边缘裂纹萌生行为<sup>[8]</sup>。TC4-DT 未来有望成为飞机用整体框、梁等关键承力构件的主要材料,满足飞机大尺寸结构零件的需要<sup>[9-11]</sup>。

本文是对大厚度 TC4-DT 钛合金采用高压电子束进行焊接,通过拉伸、冲击、断裂韧性等性能检测,对包括损伤容限等性能在内的力学性能进行研究。

## 1 试验方法

本文采用 TC4-DT 合金试板尺寸为 200mm × 100mm × 60mm,其主要化学成分 Al 为 5.6%~6.35%, V 为 3.6%~4.4%, Fe ≤ 0.25%,其余为 Ti 等。焊前采用酸洗方法清理试板表面及焊接位置,采用氩弧焊点焊对接试板。试验采用 ZDI50-30C CV65M 焊机沿试板长度方向进行电子束焊接,焊接参数见表 1,焊后采用 730℃ 进行真空退火处理。

表1 焊接参数

加速电压 $U/\text{kV}$	聚焦电流 $I_f/\text{mA}$	电子束流 $I_b/\text{mA}$	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	扫描频率 $F/\text{Hz}$
150.0	2175	160	6.0	300

针对电子束焊缝,采用光学显微镜进行焊缝形貌组织观察,制备接头拉伸、焊缝冲击及断裂韧性试件并测试,通过扫描电镜进行断口观察分析。

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 焊缝宏观形貌

焊缝的几何特征如图 1 所示,焊缝呈典型平行焊缝,焊缝的钉尖嵌入工艺垫板,在接头的有效厚度里面焊缝近似平行焊缝。平行焊缝的优点在于焊缝两侧的熔合线近似平行,从上到下焊缝的组织均匀性优于锥形、钉形等其他类型焊缝。因其组织均匀,故焊接接头的各部分性能差别较小,是电子束焊接的理想接头形式。

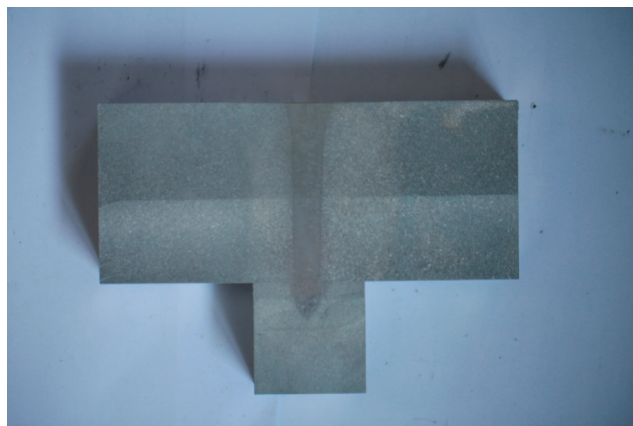


图1 焊缝宏观组织形貌  
Fig.1 Weld morphology

### 2.2 电子束焊接接头微观组织形貌

#### 2.2.1 TC4-DT 锻件的显微组织

TC4-DT 组织为片层状组织,组织为粗大的原始  $\beta$  晶粒和  $\alpha$  相,如图 2 所示,在原  $\beta$  晶界内析出了多组  $\alpha$  层片束, $\alpha$  层片束交叉分布。在锻造过程中,部分被击碎的  $\alpha$  片层组织散落在  $\beta$  晶粒中。

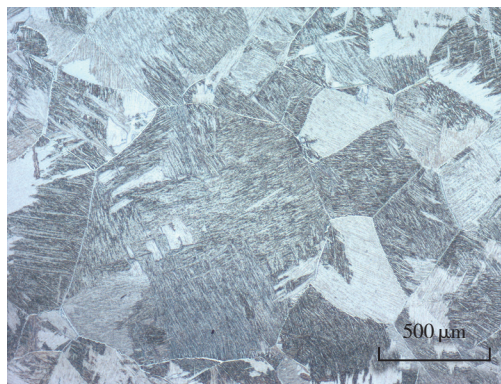


图2 基材组织

Fig.2 Microstructure of base metal

#### 2.2.2 TC4-DT 焊缝的显微组织

TC4-DT 电子束焊缝基体为  $\alpha$  片层集束组织,在 730℃ 保温 3.5h 去应力退火时, $\alpha$  相没有转化成  $\beta$  相而被保留下来, $\alpha$  片层和  $\beta$  晶界有所长大如图 3 (a) 所示;在结晶温度以上,原始  $\beta$  晶粒再结晶析出针状  $\alpha'$  组织。

热影响区由原始  $\alpha$  组织、原始  $\beta$  组织和细小的  $\alpha'$  马氏体等组织组成,主要是由于热影响区的温度较焊接接头温度低, $\alpha$  相发生了不完全转变,少量  $\alpha$  相经历较短的高温时间转变为淬硬的针状  $\alpha'$  马氏体如图 3 (b) 所示;焊缝金属经历了熔化、快速冷却凝固,转变为针状  $\alpha'$  马氏体,马氏体集束交叉分布,形成网状组织如图 3 (c) 所示。

### 2.3 接头常规力学性能研究

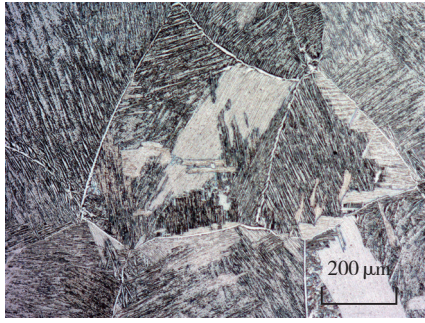
#### 2.3.1 静态拉伸

电子束焊接接头室温拉伸性能如表 2 所示。接头  $R_m$  (抗拉强度)、 $R_{p0.2}$  (屈服强度)与基材相当,但断后伸长率略低于基材,为基材的 82%,焊缝接头性能呈现高强低塑特性。电子束焊接试件拉伸断裂位置位于远离焊缝的基材处,断口呈锯齿状。

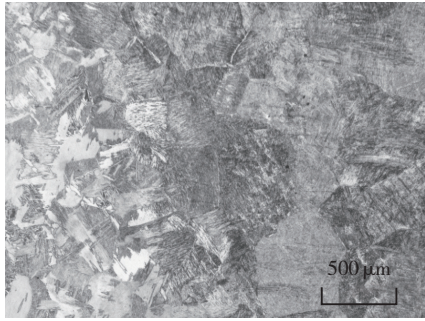
电子束焊缝以马氏体组织为主,淬硬性和强度均高于基材;接头拉伸试样焊缝在中央,两侧为基材,属于高匹配接头;在拉伸过程中基材金属先发生屈服、断裂,因此接头强度基本与母材相当<sup>[12]</sup>。

#### 2.3.2 焊缝冲击性能

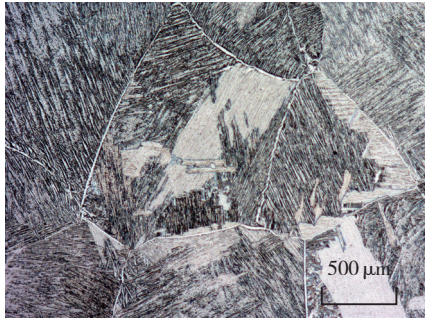
电子束焊缝室温冲击性能如表 3 所示。与基材相比,电子束焊缝冲击韧性略低。断口形貌如图 4 所示,



(a) 基体



(b) 热影响区



(c) 焊缝中心

图3 焊缝微观组织

Fig.3 Weld microstructure

表2 试件室温拉伸试验结果

试件	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	断裂位置
EBW 1	910	841	9.3	24.0	基材
EBW 2	906	830	9.3	23.6	基材
EBW 3	908	836	9.2	25.0	基材
基材	894	833	11.7	27.3	—
基材	885	835	12.7	27.7	—

表3 试件室温冲击韧性试验结果

试件	$a_{Kd}$ / (J·cm <sup>-2</sup> )
EBW 1	43.5
EBW 2	41.8
EBW 3	44.3
基材	46.2
基材	46.8

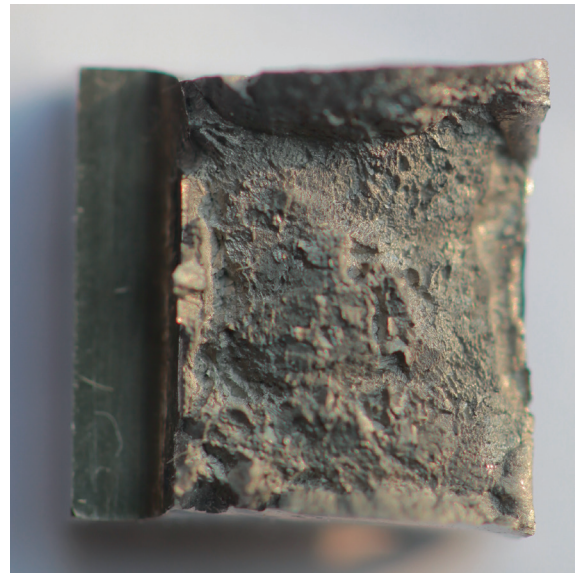
由纤维区、放射区、剪切唇 3 部分组成,侧面的剪切唇较大,缺口附近纤维区较小;中央大部分为放射区,存在大量密集的等轴初窝,为典型的韧性断裂。

### 2.3.3 断裂韧度性能检测

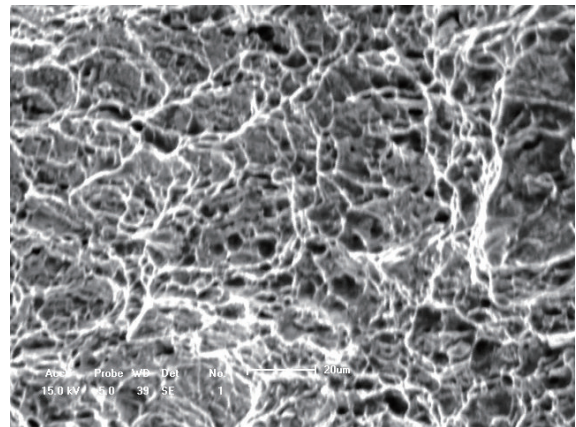
对焊接接头进行室温断裂韧度测试,断裂韧度值如表 4 所示,与 TC4-DT 钛合金锻件的断裂韧度相比,焊接接头的断裂韧性下降约 20%。

表4 试件室温断裂韧性试验结果

试件	$K_{IC}$ / (MPa·m <sup>1/2</sup> )
EBW 1	82.1
EBW 2	83.5
基材	102.6
基材	100.9



(a) 断口宏观形貌



(b) 断口微观形貌

图4 TC4-DT电子束焊接冲击韧性及断裂形貌

Fig.4 Impact specimens morphology of TC4-DT EBW joints

从焊缝的显微组织观察可以发现,焊缝中大量的长针状马氏体交错排布形成致密的网篮状组织;在断裂扩展中,这种网篮组织阻碍了裂纹的扩展,增加了能量的损耗,同时裂纹在扩展过程中,穿过晶粒内不同方向的马氏体时,由于马氏体组织阻碍裂纹的扩展及改变裂纹扩展的方向,导致裂纹扩展的路径变长<sup>[13]</sup>。

在退火过程中,真空炉由于对合金保温时间较长,晶粒和针状马氏体均能够有所长大,长大的 $\beta$ 晶粒的塑性区能够有效阻止裂纹扩展,同时变大的马氏体能够有效的延缓裂纹的扩展,在去除焊接残余应力的同时,也有助于提高断裂韧性<sup>[14-16]</sup>。因此,TC-DT电子束焊接接头具有良好的损伤容限性能,能够有效满足航空需要。

### 3 结论

(1) TC4-DT钛合金具有优良电子束焊接工艺性能,选用优化的焊接工艺能够获得平行型的焊接接头。

(2) 焊缝形成针状马氏体网篮组织,热影响区为细小的 $\alpha$ 片层组织+针状马氏体组织。

(3) 电子束焊接接头拉伸强度、焊缝冲击韧性等力学性能与基材相当,焊缝断裂韧性也达到了基材的80%以上。

### 参考文献

- [1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(S1):4-11.
- CAO Chunxiao. The change of material selection criterion and the development of high damage tolerance titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002,38(S1):4-11.
- [2] 姚小飞, 谢发勤, 韩勇, 等. 温度对TC4钛合金磨损性能及摩擦系数的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012,41(8):1463-1466.
- YAO Xiaofei, XIE Faqin, HAN Yong, et al. Effects of temperature on wear properties and friction coefficient of TC4 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012,41(8): 1463-1466.
- [3] 许鸿吉, 尹丽香, 李晋玮, 等. TC4钛合金电子束焊接接头的组织与性能[J]. 焊接学报, 2005,26(11):43-46.
- XU Hongji, YIN Lixiang, LI Jinwei, et al. Microstructures and properties of TC4 alloy joints welded by the electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005,26(11):43-46.
- [4] 刘川, 张建勋, 牛靖. 数值模拟和实验研究Ti6Al4V合金熔透焊接残余应力[J]. 稀有金属材料与工程, 2009,38(8):1317-1320.
- LIU Chuan, ZHANG Jianxun, NIU Jing. Numerical and experimental analysis of residual stresses in full-penetration laser beam welding of Ti-6Al-4V alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009,38(8):1317-1320.
- [5] 李成功, 傅恒志, 于翹, 等. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- LI Chenggong, FU Hengzhi, YU Qiao, et al. Aerospace materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [6] LEE D G, KIM Y G, NAM D H, et al. Dynamic deformation behavior and ballistic performance of Ti-6Al-4V alloy containing fine  $\alpha$  2 (Ti3Al) precipitates[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 39(1): 221-234.
- [7] LEE D G, YOU H L, LEE S, et al. Dynamic deformation behavior and ballistic impact properties of Ti-6Al-4V alloy having equiaxed and bimodal microstructures[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(10):3103-3112.
- [8] SESHACHARYULU T, MEDERIOS S C, MORGAN J T, et al. Hot deformation and microstructural damage mechanisms in extra-low interstitial(ELI) grade Ti-6Al-4V[J]. Materials Science & Engineering A, 2000,279(1):289-299.
- [9] 祝力伟, 朱知寿, 王新南, 等. 不同层片组织对TC4-DT钛合金裂纹扩展行为的影响[J]. 航空材料学报, 2011,31(S1):164-167.
- ZHU Liwei, ZHU Zhishou, WANG Xinnan, et al. Influence of lamellar microstructure on fatigue crack propagation behavior of TC4-DT of damage tolerance[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011,31(S1):164-167.
- [10] 张纪奎, 郦正能, 邱志平, 等. 钛合金结构损伤容限设计可行性研究[J]. 航空学报, 2009,30(4):763-767.
- ZHANG Jikui, LI Zhengneng, QIU Zhiping, et al. Feasibility study on damage tolerance design of titanium[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009,30(4):763-767.
- [11] 李辉, 赵永庆, 曲恒磊, 等. 损伤容限型TC4-DT合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007,36(6):963-967.
- LI Hui, ZHAO Yongqing, QU Henglei, et al. Fatigue crack growth behavior of TC4-DT alloy in damage tolerance type[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007,36(6):963-967.
- [12] 薛蕾, 陈静, 林鑫, 等. 激光快速修复Ti-6Al-4V合金的显微组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007,36(6):989-993.
- XUE Lei, CHEN Jing, LIN Xin, et al. Microstructures and mechanical properties of laser rapid repaired Ti-6Al-4V alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007,36(6):989-993.
- [13] 袁鸿, 余槐, 王金雪, 等. TC4-DT钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能[J]. 材料工程, 2007(8):17-19.
- YUAN Hong, YU Huai, WANG Jinxue, et al. The damage tolerance of the EBW joint for TC4-DT titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(8):17-19.
- [14] 马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 等. 钛合金 $\beta$ 晶粒生长规律及晶粒尺寸对损伤容限性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009,38(6):976-981.
- MA Yingjie, LIU Jianrong, LEI Jiafeng, et al.  $\beta$ -Grain growth and influence of its grain size on damage-tolerance property in titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009,38(6):976-981.
- [15] BOWEN P, CHAVE R A, JAMES A W. Cyclic crack growth in titanium aluminides[J]. Materials Science and Engineering A, 1995,192-193(95):443-456.
- [16] LUTJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ( $\alpha$  +  $\beta$ ) titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243(1):32-45.

通讯作者: 关峰, 工程师, 研究方向为高能束焊接工艺研究及焊接技术管理, Email: guanfeng1986713@126.com.

(责编 杏霖)