

TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能

The Damage Tolerance Properties of the EBW
Joint for TC4-DT Titanium Alloy

袁 鸿, 余 槐, 王金雪, 王新南, 朱知寿, 李晓红

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

YUAN Hong, YU Huai, WANG Jin-xue, WANG Xin-nan, ZHU Zhi-shou,
LI Xiao-hong (Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 针对 TC4-DT 钛合金厚截面锻件开展了电子束焊接工艺实验和接头力学性能测试与分析。结果表明, TC4-DT 钛合金不仅具有良好的焊接工艺特性, 而且电子束焊接接头具有高的损伤容限性能。接头的断裂韧性优于母材并且比母材有更高的疲劳裂纹扩展抗力。

关键词: 电子束焊接; 损伤容限; 断裂韧性; 裂纹扩展速率

中图分类号: TG456.3; TG407 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007-08-0017-03)

Abstract: The study on electron beam welding processing of thick-section TC4-DT alloy was carried out and the mechanical properties were valued. It results that TC4-DT alloy is an advanced structure material possessing of excellent EB weldability and outstanding damage tolerance properties of the joint such as the fracture toughness and the resistance to fatigue crack propagation.

Key words: EBW; fracture toughness; fatigue crack propagation; damage tolerance

损伤容限性能已经成为先进飞机和发动机满足结构完整性要求的破损—安全设计概念和选材判据^[1]。TC4-DT 是在 TC4 钛合金基础上通过成分设计优化、纯净化熔炼和 β 热加工工艺等途径改善合金的损伤容限性能, 是具有代表性的 900 MPa 强度级别、高断裂韧性的损伤容限型两相钛合金。其断裂韧度能够超过 $90 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$; 在 $\Delta K = 11 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 时 ($R = 0.1$, da/dN 为 $9 \times 10^{-6} \text{ mm/周}$)。具有高损伤容限性能的 TC4-DT 钛合金是未来飞行器主承力零件的首选结构材料之一, 而且电子束焊接也将成为 TC4-DT 钛合金主承力构件整体制造的关键技术。本工作就 TC4-DT 钛合金的电子束焊接工艺特性和包括损伤容限性能在内的接头力学性能进行了研究。

1 实验方法

实验材料为经相变点以下锻造工艺获得的约 50 mm 厚度 TC4-DT 钛合金锻坯, 经两相区退火处理, 并机加工成厚 45 mm, 长 200 mm, 和宽 60 mm 的焊接试板。工艺实验在中国一航材料院 ELA-30 型真空电子束焊机上进行, 电子束焊接采用“I”形对接接头形式, 对接间隙不大于 0.15 mm。焊后对接头施行 $600^\circ\text{C}/3.5 \text{ h}$ 去应力退火处理, 测试了接头的力学性

能, 并在光学显微镜和 JSM 5600LV 扫描电镜上观察接头金相组织和断口形貌。

2 实验结果及讨论

2.1 TC4-DT 钛合金电子束焊接工艺特性

对 45 mm 厚度的 TC4-DT 钛合金采取电子束下聚焦方式焊接, 通过选择合理的焊接速度、电子束流和聚焦电流等工艺参数和适宜的辅助工艺措施如电子束导引块、垫板、电子束扫描摆动等优化并确定焊接工艺。整个焊接过程, 熔池形成稳定, 无明显飞溅, 工艺性优良。焊后无损检测结果表明, 接头质量符合 GJB1718A 一级焊缝质量的要求。焊缝横截面呈现为平行焊缝, 如图 1 所示。

2.2 接头力学性能

按照标准力学性能试样测试了经焊后退火热处理的 45 mm 厚度 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的常规拉伸和韧性性能, 焊缝位于试样中心, 韧性试样和裂纹扩展试样的缺口均开在焊缝中心。接头性能测试结果见表 1 和表 2。表 1 和表 2 的数据为每组 3 个以上试样的性能测试结果及平均值。

表 1 和表 2 显示, TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的强度和冲击韧性均达到了与母材相当的水平; 塑

性比母材略有降低,也达到了母材的 80%;断裂韧性值还高于母材。图 1 为焊接接头试样的性能测试断裂情况。拉伸试样断裂在基体部位,断裂韧性裂纹扩展途径经过焊缝区,如图 2。

电子束焊接接头与母材的疲劳性能和疲劳裂纹扩展速率(da/dN)对比分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 看出,针对光滑试样($K_t=1$ 的高周(130Hz)疲劳实验,在平均应力约 520MPa 以下时 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的疲劳寿命明显高于母材。

由图 4 可见,在 $\Delta K \geq 11 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 以上区域($R=0.1$),接头的 da/dN 值小于母材,表明在这一区域

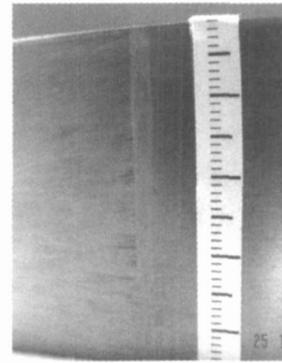


图 1 45mm 厚度的 TC4-DT 钛合金电子束焊缝横截面形状
Fig. 1 The EB weld section of 45mm-thickness TC4-DT titanium alloy

表 1 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头拉伸性能
Table 1 Tensile properties of the TC4-DT EBW joints

Item	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	$\delta_5 / \%$	$\psi / \%$	Fracture location
EBW joint	933	848	13.2	48.8	Base metal
	924	854	14.6	48.6	
	928	846	12.8	48.4	
Base material	934	881	15.9	50.1	49.7
	926	876	15.6	49.7	
	928	878	16.2	49.4	

表 2 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头韧性性能

Table 2 Toughness of the TC4-DT EBW joints

Item	$a_{KU} / \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	$K_{IC} / \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$
EBW joint	57.9	94.79
	57.8	89.37
	58.2	91.56
Base material	58.3	83.61
	58.1	80.28
	58.4	84.81

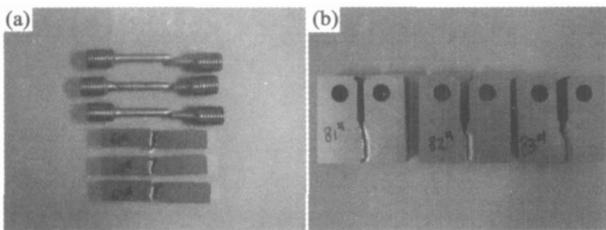


图 2 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头性能试样测试断裂宏观形貌
(a) 拉伸和冲击试样; (b) 断裂韧性试样
Fig. 2 Destroyed specimens morphologies of TC4-DT EBW joints
(a) tensile specimens and impact specimens
(b) fracture toughness specimens

TC4-DT 合金电子束焊接接头具有比母材更高的疲劳裂纹扩展抗力。

2.3 接头组织分析和断口特征观察

TC4-DT 钛合金母材为含有一定量的块状 α 相的

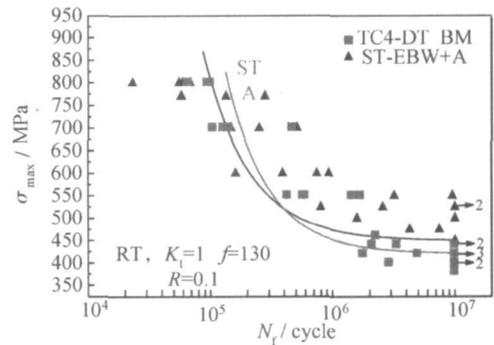


图 3 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头与母材的疲劳性能对比
Fig. 3 Comparison of the S-N fatigue curves for TC4-DT alloy and EBW joint

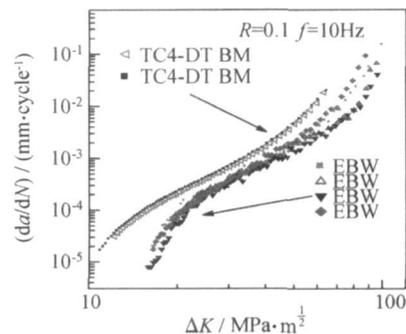


图 4 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头与母材的疲劳裂纹扩展速率对比
Fig. 4 Comparison of the fatigue crack propagation rate for TC4-DT alloy and EBW joint

网篮组织,而电子束焊缝组织为粗大的铸态片状组织,如图 5a 和图 5b。接头静力拉伸断裂于基体部位,拉

伸断口和焊缝区冲击断口形貌显示为良好的塑性和韧性断裂,如图 5c 和图 5d。

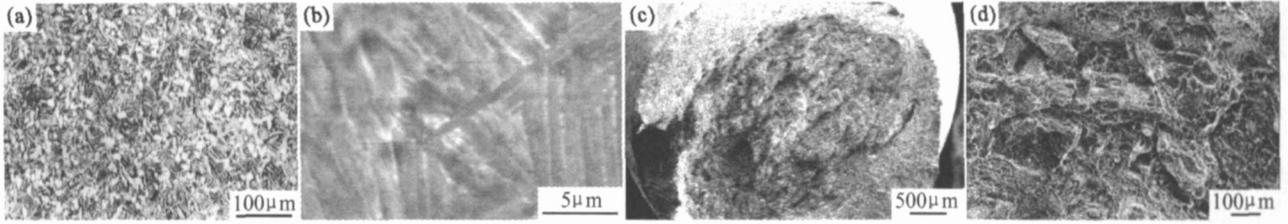


图 5 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头组织和断口特征 (a TC4-DT 钛合金母材组织;

(b 电子束焊缝组织; (c 接头断裂于母材的拉伸断口特征; (d 接头焊缝区冲击断口局部特征

Fig. 5 Microstructure and fracture morphology of the TC4-DT EBW joint (a microstructure of TC4-DT BM;

(b microstructure of EB weld; (c fracture morphology of the tensile sample; (d fracture morphology of the weld impact sample

近 α 型和 $\alpha + \beta$ 型钛合金因变形工艺和热处理工艺不同可以获得四种类型显微组织,即等轴组织、双态组织、网篮组织和片状或魏氏组织。

对钛合金而言,断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率取决于合金的组织形态^[2]。等轴组织具有较高的塑性和疲劳性能,但断裂韧性和裂纹扩展抗力不高;相对而言,片状组织塑性较低,而断裂韧性和裂纹扩展抗力则比较高。片状组织断裂韧性高于等轴或双态组织^[3,4],即晶粒大且塑性低的片层组织,断裂韧性反而高。组织形态对疲劳裂纹扩展速率的影响规律与断裂韧性基本相同^[5]。

TC4-DT 钛合金经相变点以下锻造并在两相区退火处理后获得含有一定数量块 α 相的网篮组织,而电子束焊缝为粗大的铸态片状组织。对焊缝区域的片状组织,原始 β 晶粒的粗化以及 α 片在一定范围内的加厚,使断裂韧性增加和疲劳裂纹扩展速率降低^[6]。因此,TC4-DT 钛合金电子束焊接接头断裂韧性和疲劳裂纹扩展抗力要优于母材。图 2 所示的断裂韧性试样断口宏观表明,断裂裂纹扩展途径经过焊缝区,证实了焊缝断裂韧性与组织的对应关系。

有研究表明^[7,8],在高周疲劳实验中包括 Ti6Al4V 合金在内的近 α 和 $\alpha + \beta$ 合金对平均应力的变化非常敏感。当合金承受低的平均拉伸应力时,双态组织的室温疲劳性能明显低于片状组织。这种对平均应力的反常敏感性是由裂纹萌生所控制^[7]。对 TC4-DT 钛合金而言在约 520MPa 的平均应力以下时,具有片状组织的电子束焊接接头的疲劳寿命明显高于母材。

3 结论

(1 TC4-DT 钛合金具有良好的电子束焊接工艺特性,选择合理的焊接工艺参数和确定适宜的辅助工

艺措施能够获得高质量的焊接接头。

(2 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头强度和冲击韧性均达到了与母材相当的水平,塑性比母材略有降低;针对光滑试样($K_t = 1$)的高周疲劳实验,平均应力约 520MPa 以下时接头的疲劳寿命明显高于母材。

(3 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头具有良好的损伤容限性能。接头断裂韧性优于母材并具有较母材更高的疲劳裂纹扩展抗力。

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(增刊): 4-11.
- [2] BOWEN P, CHAVE R A, JAMES A W. Cyclic crack growth in titanium aluminides[J]. Materials Science and Engineering, 1995, A192/193: 443-456.
- [3] FILP R, KUBIAK K, ZIAJIA W, et al. The effect of microstructure on mechanical properties of two-phase titanium alloys [J]. Materials Processing Technology, 2003, 133: 84-89.
- [4] DING R, GU O Z X. Microstructural evolution of Ti-6Al-4V alloy during β phase processing [J]. Materials Science and Engineering, 2004, A365: 172-179.
- [5] LUTJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of $\alpha + \beta$ titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A243: 32-45.
- [6] 鲍利索娃 E A. 钛合金金相学[M]. 陈石卿译. 北京: 国防工业出版社, 1986. 247.
- [7] LINDERMAN J, WAGNER L. Mean stress sensitivity in fatigue of α , $(\alpha + \beta)$ and β titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1997, A234-236: 1118-1121.
- [8] RITCHIE R O, DAVIDSON D L, BOYCE B L, et al. High-cycle fatigue of Ti-6Al-4V [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure, 1999, 22: 8-19.

收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-06-07

作者简介: 袁鸿(1971—),男,高级工程师,从事航空材料焊接性能研究和复杂构件电子束焊接制造技术研究,联系地址:北京市 81 信箱 20 分箱(100095)。