

TC4-DT 钛合金线性摩擦焊接头组织和力学性能分析

刘 颖,张传臣,张田仓

(中国航空制造技术研究院航空焊接与连接技术航空科技重点实验室,北京 100024)

[摘要] 针对飞机用典型的 TC4-DT 钛合金线性摩擦焊接头,开展组织及接头的拉伸、冲击和低周疲劳等力学性能测试。结果表明:TC4-DT 钛合金线性摩擦焊接头经过 700℃ + 保温 3h 的热处理后,接头的室温和高温抗拉强度达到母材的 97% 以上,室温和低温冲击性能略高于母材,室温低周疲劳性能与母材相当,具有良好的综合力学性能。

关键词: TC4-DT 钛合金;线性摩擦焊;力学性能

Microstructure and Mechanical Properties of LFW Joint for TC4-DT Titanium Alloy

LIU Ying, ZHANG Chuanchen, ZHANG Tiancang

(Key Laboratory of Aeronautical Technology for Welding and Joining Technology,
AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The Microstructure, tensile strength, impact property and low-cycle fatigue testing properties were studied for TC4-DT liner friction welded (LFW) joint of the aircraft. Test results show that an excellent properties of weld joint can be obtained after post-weld heat treatment (temperature: 700℃, longtime: 3h). The room and high tensile strengths of TC4-DT LFW joint can reach more than 97% of TC4-DT base metals, and the impact property of the weld joint is slightly higher than the base metal, the low-cycle fatigue property is close to the TC4-DT base metals.

Keywords: TC4-DT titanium alloy; Linear friction welding; Mechanical property

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.22.083

TC4-DT 钛合金是为了满足新一代飞机对长寿命、高损伤容限和良好耐久性的设计需求,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,改善合金损伤容限性能,使其成为具有 900MPa 强度级别和高断裂韧性的损伤容限型两相钛合金^[1]。TC4-DT 钛合金的断裂韧性超过 90 (MPa·m^{1/2}),性能与美国第四代战机 F-22 上用量最大的损伤容限型钛合金 Ti-6Al-4V ELI 相当,适合制造大型整体化框、梁和接头等航空构件,是未来飞行器主承力结构的重要选择材料之一^[2-3]。航空器主承力结构具有尺寸大、结构复杂的特点,传统的铸造、锻造和机加手段难以直接制造此类结构。因此,亟须发展一种高效的焊接与连接技术,利用多个部分分体制造 + 整体焊接的手段,实现航空飞行器主承力结构的制造。

线性摩擦焊是近年来发展起来的一种新工艺,焊接过程中无须气体保护和真空条件,可实现大尺寸、大截面构件的焊接,并且接头的综合力学性能优良,能够满足高可靠性部件的使用要求^[4]。在航空领域中,线性摩擦焊

对大多数飞机结构材料具有良好的焊接适应性,尤其适用于承力构件所选用的高强度金属材料焊接过程^[5]。

本文针对 TC4-DT 钛合金材料,开展其线性摩擦焊接头的组织分析和力学性能测试,为 TC4-DT 钛合金材料在飞机构件线性摩擦焊制造技术的应用中奠定技术基础。

1 试验方法

试验所用材料为 TC-DT 钛合金材料,其主要化学成分质量分数为: Al 5.6%~6.5%, V 3.4%~4.5%,其余为 Ti; 试件尺寸为 130mm × 20mm × 75mm,焊接面积为 1500mm²。在自行研制的线性摩擦焊设备上焊接,焊后进行接头的去应力退火处理,热处理温度为 T=700℃,保温 3h。

采用光学显微镜 JENAPHOT2000 对母材及接头金相组织进行观察,并按照国家标准对 TC4-DT 母材和线性摩擦焊接头进行拉伸、冲击和低周疲劳性能试验,在 Hitachi S-3400N 扫描电镜下对性能断口进行观察。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

图1为TC4-DT线性摩擦焊接试样,可以看出,焊接试样的飞边颜色呈现铁锈色,飞边从接头的四周挤出,沿着试件振动方向的飞边(纵向飞边)长度较长,且飞边呈现波纹状的纹理;垂直于振动方向的飞边(横向飞边)呈现更细微的纹理。

图2为TC4-DT钛合金线性摩擦焊接头的低倍组织形貌,可以看出,焊后两块试样的原始界面消失,接头

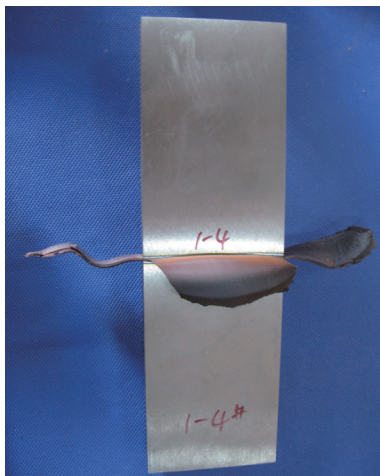


图1 焊接试样外形照片

Fig.1 Figuration of a sample after welding

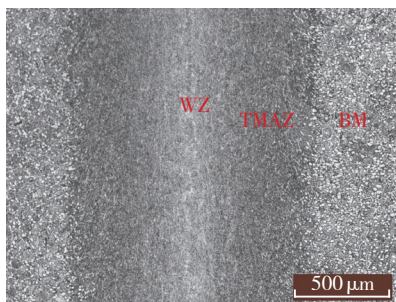


图2 TC4-DT线性摩擦焊接头显微组织

Fig.2 Microstructure of the TC4-DT LFW joints

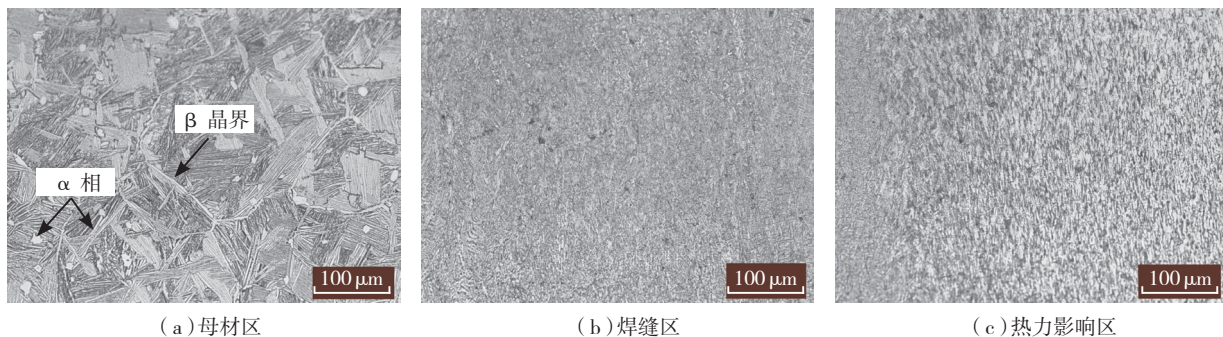


图3 TC4-DT线性摩擦焊接头各区域显微组织

Fig.3 Regional microstructure of the TC4-DT LFW joints

分为3个明显区域:母材区(BM)、热力影响区(TMAZ)及焊缝区(WZ)。图3为TC4-DT线性摩擦焊接头各区域的显微组织。从图3(a)可以看出,TC4-DT钛合金母材的显微组织为片状组织,具有粗大的 β 晶粒和较完整的晶界 α 相。其中 α 相有两种形态,一种为等轴的初生 α 相,另一种为 β 晶粒内存在位向不同的 α “集束”(片晶团),同一“集束”内有很多大致平行的 α 条,且 α 条也具有一定的长度^[6]。TC4-DT的线性摩擦焊接头焊缝以及热力影响区非常狭窄,焊缝区为细小的层片状 α 相和一些弥散分布细小等轴 α 相以及残留的亚稳态 β 晶粒,其晶粒尺寸与热力影响区相比较小。摩擦焊接过程中界面温度超过基体材料的相变温度,焊缝组织发生相变再结晶。热力影响区晶粒严重拉长,拉长的方向沿着试样摩擦的方向,其组织由高度变形的晶粒组成^[7]。

2.2 力学性能测试结果

表1为TC4-DT母材和接头在室温、400℃高温拉伸测试结果。可以看出,TC4-DT钛合金线性摩擦焊接头的室温、高温抗拉强度和屈服强度略低于母材,抗拉强度达到母材的97%以上,延伸率与母材相当。高温拉伸试验时,TC4-DT母材和线性摩擦焊接头的拉伸强度和屈服强度较室温试验低,延伸率较室温试验高。

表2为TC4-DT母材和线性摩擦焊接头的低温(-70℃)和室温冲击性能测试结果。可以看出,在低温和室温条件下,TC4-DT线性摩擦焊接头各区域的冲击性能均达到母材水平,室温冲击性能高于低温冲击性能。

图4对比了TC4-DT母材和线性摩擦焊接头低周疲劳性能曲线,其中红色线为TC4-DT线性摩擦焊接头的低周疲劳曲线,黑色线为TC4-DT母材低周疲劳曲线。可以看出,两条曲线基本重合,表明TC4-DT线性摩擦焊接头的低周疲劳性能与母材相当。

2.3 试验断口分析

图5为TC4-DT线性摩擦焊接头的拉伸断口形貌,断裂位置为母材。从图5(a)、(c)中可以看出,在相同

表1 拉伸性能测试结果

状态	试验温度 / °C	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率 A /%
母材	23	917.6	843.9	9.9
	400	561.3	455	11.5
线性摩擦 焊接头	23	902.9	828.2	9.8
	400	550	454	11.6

表2 冲击性能测试结果

状态	试验温度 / °C	缺口位置	冲击韧性 A_{KV} / ($J \cdot cm^{-2}$)
母材	-70	试样中间	32.5
	23		49.1
线性摩擦焊接头	-70	焊缝区	33.8
		热力影响区	33.2
	23	焊缝区	52.4
		热力影响区	50.6

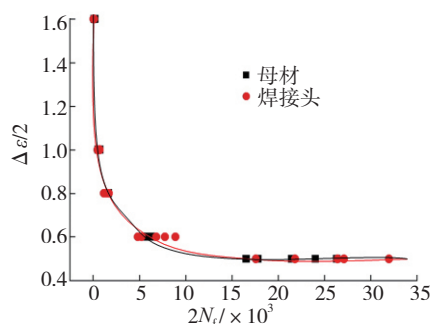
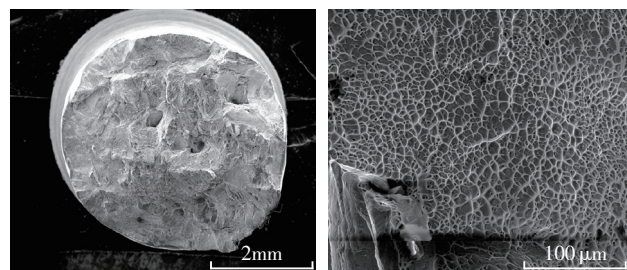


图4 TC4-DT母材和线性摩擦焊接头低周疲劳性能曲线(应变-循环周次)对比

Fig.4 Comparison of the low-cycle fatigue curves ($\Delta\epsilon/2-2N_f$) for TC4-DT base metal and LFW joints

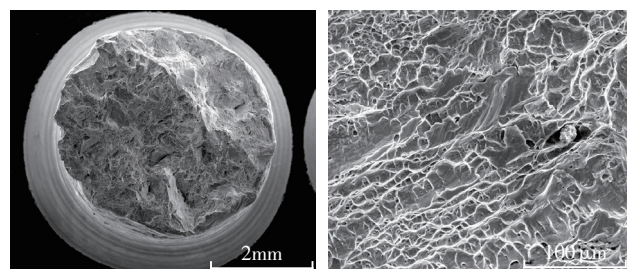
倍数下,随着试验温度的升高,断口横截面积减小。从图5(b)、(d)中可以看出,TC4-DT线性摩擦焊接头的拉伸断口含有大量的韧窝,断裂形式为韧性断裂。随着试验温度的升高,材料中的晶界和相界对位错的阻碍作用减弱,使得试样强度下降,延伸率上升,断口周围的颈缩现象更加明显。

图6为TC4-DT母材和线性摩擦焊接头冲击断口纤维区形貌。可以看出,在不同的试验温度条件下,母材和接头断口纤维区都可以观察到大量的韧窝存在,断裂方式为韧性断裂。-70°C试验条件下,断口韧窝尺寸与韧窝深度略小于23°C条件下的断口,且存在较多的撕裂棱,撕裂棱周围存在大量由细小韧窝构成的区域,说明在-70°C试验条件下,试样出现一定脆性。由于线性摩擦焊接头的焊缝区和热力影响区组织相对母材细小,在相同冲击试验温度条件下,焊缝区和热力影响区的韧窝形貌较母材细小^[8]。



(a) 宏观断口 23°C

(b) 剪切唇 23°C

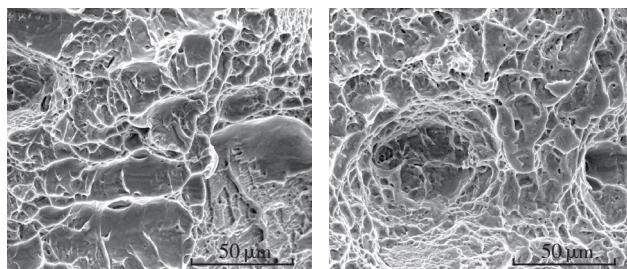


(c) 宏观断口 400°C

(d) 剪切唇 400°C

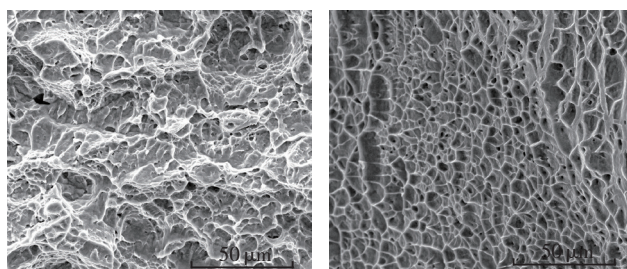
图5 TC4-DT线性摩擦焊接头拉伸断口形貌

Fig.5 Fracture surface of the tensile samples for TC4-DT LFW joints



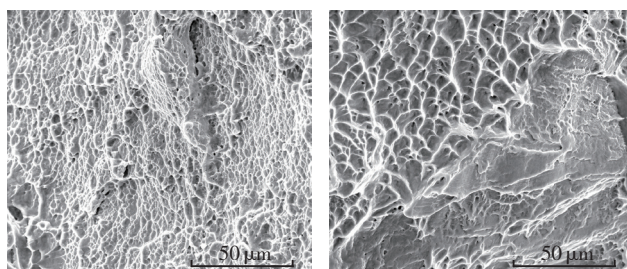
(a) 母材 -70°C

(b) 母材 23°C



(c) 焊缝区 -70°C

(d) 焊缝区 23°C



(e) 热力影响区 -70°C

(f) 热力影响区 23°C

图6 TC4-DT母材和线性摩擦焊接头冲击断口形貌

Fig.6 Fracture surface of the impact properties for TC4-DT alloy and LFW joints

图7为TC4-DT线性摩擦焊接头低周疲劳试样断口形貌,断裂位置为母材。图7(a)所示为低周疲劳断口的宏观形貌,从中可以分辨出疲劳裂纹扩展区和瞬断区;图7(b)所示为裂纹从试样的表面或近表面萌生,向试样中部扩展,扩展区较平整;图7(c)所示为裂纹扩展区断口的微观形貌,为典型的疲劳断口,断口中存在明显的细小疲劳条纹和二次裂纹^[9];图7(d)所示为试样发生断裂时的剪切唇形貌,剪切唇存在着拉长韧窝和等轴韧窝两种形态,表明其受到了剪切力和拉伸力的交互作用^[10]。

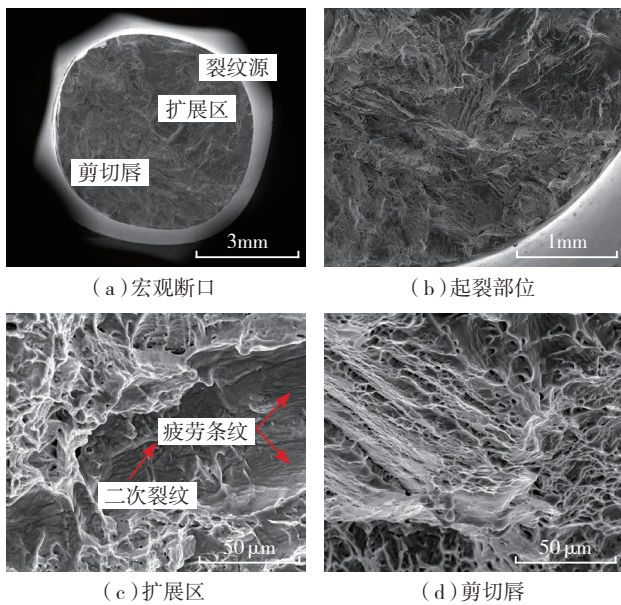


图7 TC4-DT线性摩擦焊接头低周疲劳试样断口

Fig.7 Fracture surface of low-cycle fatigue for TC4-DT LFW joint

3 结论

(1) TC4-DT线性摩擦焊接头可明显观察到3个区域:母材区(BM)、热力影响区(TMAZ)和焊缝区(WZ)。母材区为粗大的 β 晶粒和片状 α 相,焊缝区为细小的层片状 α 相和一些弥散分布细小等轴 α 相以及残留的亚稳态 β 晶粒,热力影响区晶粒严重拉长。

(2) TC4-DT钛合金线性摩擦焊接头具有良好的综合力学性能,其室温和高温(400℃)抗拉强度达到母材的97%以上;在低温(-70℃)和室温条件下,TC4-DT线性摩擦焊接头冲击性能与母材相当;室温条件下接头的低周疲劳性能与母材相当。

(3) TC4-DT线性摩擦焊接头在拉伸试验、冲击试验和低周疲劳试验中均表现为韧性断裂。

参考文献

[1] 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 properties of the EBW joint for TC4-DT titanium alloy[J]. Materials Engineering, 2007(8): 17-19.

[2] 王新南,朱知寿,童路,等. 锻造工艺对TC4-DT和TC21损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 稀有金属快报, 2008(7): 12-16.

WANG Xinnan, ZHU Zhishou, TONG Lu, et al. The influence of forging processing on fatigue crack propagation rate of damage-tolerant titanium alloy[J]. Rare Metal Letters, 2008(7): 12-16.

[3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 第4卷. 钛合金、铜合金、粉末冶金及无机涂层材料[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

Editorial Board of China Aviation Materials Handbook. China aviation materials handbook. Volume 4. Titanium alloy, copper alloy powder, metallurgical and inorganic coating materials[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

[4] VAIRIS A, FROST M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 292(1): 8-17.

[5] 刘颖,张田仓,张传臣. 热处理制度对TA15线性摩擦焊接头组织和性能的影响[J]. 航空制造技术, 2013(16): 85-86.

LIU Ying, ZHANG Tiancang, ZHANG Chuanchen. Effects of heat-treatment on mechanical properties of TA15 linear friction welded joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16): 85-86.

[6] 周伟,曲恒磊,赵永庆,等. TC4-DT合金不同热处理后的组织与性能[J]. 金属热处理, 2006, 31(6): 56-57.

ZHOU Wei, QU Henglei, ZHAO Yongqing, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4-DT alloy after different heat treatments[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(6): 56-57.

[7] 朱知寿,马少俊,王新南,等. TC4-DT损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展特性的研究[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6):10-13.

ZHU Zhishou, MA Shaojun, WANG Xinnan, et al. Study on fatigue crack propagation rate of TC4-DT damage tolerance titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(6): 10-13.

[8] 马铁军,张学军,杨思乾,等. TC4钛合金线性摩擦焊接头的冲击韧性及断口特征[J]. 航空材料学报, 2007, 27(6): 40-44.

MA Tiejun, ZHANG Xuejun, YANG Siqian, et al. Impact toughness and fracture characteristics of linear friction welded TC4 joint[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(6): 40-44.

[9] 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): 963-965.

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): 963-965.

[10] WANJARA P, JAHAZI M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(8): 2149-2164.

通讯作者: 刘颖,高级工程师,研究方向为结构完整性及线性摩擦焊接工艺, E-mail: liuying-lsh@163.com。

(责编 逸飞)