

热处理对TC4-DT/TC21钛合金 线性摩擦焊接头组织和性能的影响



高潘^{1,2}, 曾卫东^{1,2}, 张传臣³, 徐建伟^{1,2}

1. 西北工业大学 国防科技工业精密锻造与环轧技术创新中心, 陕西 西安 710072

2. 西北工业大学 陕西省高性能精确成形技术与装备重点实验室, 陕西 西安 710072

3. 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:为进一步提升TC4-DT/TC21线性摩擦焊接头的综合力学性能,对比分析了焊接接头一次退火和双重退火对微观组织和力学性能的影响。结果表明,一次退火后,接头各个区域的组织特征与退火前差异较小,焊缝中心区为细小的再结晶晶粒及针状 α 相,热力影响区呈现沿振荡方向拉长的流线组织。但双重退火后,接头组织发生明显变化,焊缝中心区出现晶粒长大、片层 α 相粗化以及晶界 α 相不连续等现象。热力影响区内 α 相片层粗化且片层间距增加,同时在粗化的片层 α 相周围析出许多长大的短棒状 α 相。母材区内片层 α 相发生粗化且有次生相析出。性能对比显示双重退火明显优于一次退火,其中强度和冲击功分别提升了91MPa和24.4J,塑性仍保持较高水平。

关键词:线性摩擦焊; 焊后热处理; 钛合金; 双重退火; 力学性能

中图分类号: TG166.5

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.09.007

随着飞机设计理念由单纯强度向损伤容限设计原则的转变,钛合金材料也逐步由追求单一高强度向高强度、高模量、高韧性以及低裂纹扩展速率等损伤容限型综合高性能的方向发展^[1-3]。对于先进战机的某些结构部件,不同部位的受力情况不同,对其材料的性能需求也不同,如翼肋,该部件包含耳片和支撑梁两个主要部位,耳片在服役过程中承受较大载荷,对材料的强度和韧性要求较高,高强高韧钛合金TC21可满足使用要求^[4];支撑梁载荷承受较小,对材料的强度要求较低而韧性要求较高,中强高韧钛合金TC4-DT较为合适^[1]。为充分发挥材料性能、提高结构可靠性,使用线性摩擦焊实现TC4-DT和TC21异质材料连接是理想的部件制备方式。

对于上述异质材料的连接可采用线性摩擦焊来进行,该工艺利用两被焊工件接触面在压力作用下相对往复运动摩擦产生热量,从而实现焊件的固态连接^[5-9]。线性摩擦焊目前广泛应用于镍基高温合金、钢以及钛合金的连接^[10-12]。

众多文献研究表明,摩擦焊接头对热处理较为敏感,合适的热处理制度可以改善接头组织、提升接头力学性能。Dorick等^[13]研究了焊后退火处理对TC17线性摩擦焊接头的影响,他们发现焊后退火处理能够使各个区域的微观组织均匀化。Damodaram等^[14]对718合金摩擦焊接头进行固溶时效处理后发现样品表现出较好的断裂性能,这是由焊后热处理使得晶粒组织均质化、适度粗化以及强化沉淀物强的均匀分布所导致的。Tao等^[15]对TC4/TC17异种钛合金线性摩擦焊接头进行焊后热处理,发现热处理可通过粗化组织来增加接头的断裂韧性。Chen等^[16]研究了热处理对Ti₂AlNb合金线性摩擦焊接头组织和性能的影响,发现热处理过程中O相的析出可以显著改善接头力学性能。

综上所述,热处理对线性摩擦焊接头有重要影响。对于TC4-DT/TC21异质钛合金接头,由于两种母材合金在成分、组织、相变点上都有较大差异,为兼顾接头及两侧母材的性能,需要制定合适的热处理制度。本文在充分调研

收稿日期: 2021-04-29; 退修日期: 2021-05-15; 录用日期: 2021-07-09

基金项目: 航空科学基金(201911053001)

引用格式: Gao Pan, Zeng Weidong, Zhang Chuanchen, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of TC4-DT/TC21 titanium alloy linear friction welded joints[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(09): 50-56. 高潘, 曾卫东, 张传臣, 等. 热处理对TC4-DT/TC21钛合金线性摩擦焊接头组织和性能的影响[J]. 航空科学技术, 2021, 32(09): 50-56.

TC4-DT及TC21合金基本性能及热处理影响的基础上,拟对焊后接头采用一次退火和双重退火工艺,对比不同退火制度对接头微观组织的影响,为线性摩擦焊接的翼肋研制提供热处理工艺指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验中所采用的材料为国内自主研制的中强度高损伤容限性钛合金TC4-DT ($R_m \geq 825 \text{MPa}$ 、 $K_{IC} \geq 90 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)及高强度高损伤容限性钛合金TC21 ($R_m \geq 1100 \text{MPa}$ 、 $K_{IC} \geq 70 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$),这两类钛合金的化学成分组成分别见表1、表2。

表1 TC4-DT钛合金的化学成分 (w.t %)

Table 1 Chemical compositions of TC4-DT (w.t %)

Al	V	Si	Fe	C	H	O	Ti
6.22	4.25	0.068	0.03	0.005	0.001	0.11	Bal

表2 TC21钛合金的化学成分 (w.t %)

Table 2 Chemical compositions of TC21 (w.t %)

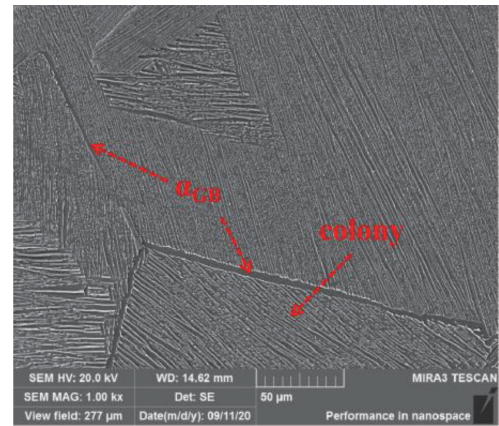
Al	Zr	Sn	Mo	Cr	Nb	Si	Ti
6.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	0.2	Bal

图1为两种母材的扫描电子显微镜(SEM)照片,从图1(a)可以看出,经过区域 β 退火处理的TC4-DT钛合金为魏氏组织形态,即粗大的 β 晶粒内部分布着不同位向 α 相“丛域”,在同一“ α 丛域”内有很多近似平行的细小片状 α 相,此外还可以看到晶界 α 相(α_{GB})较为明显;TC21经过固溶时效后,获得网篮状组织,即棒状的初生 α 相(α_p)互相交错并以网篮状的形态分布在 β 基体上,同时在这些初生 α 相之间无序的分布着呈针状的次生 α 相(α_s),如图1(b)所示。

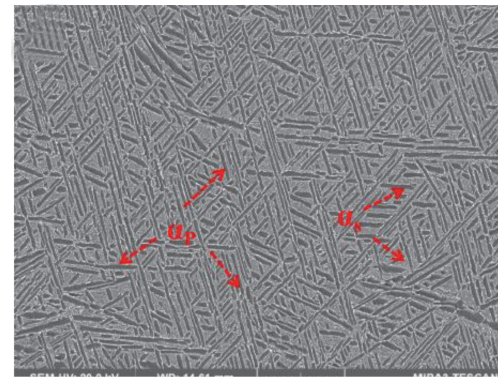
1.2 试验方法

试件尺寸为试样尺寸为75mm×80mm×20mm,焊接面积为75mm×20mm,线性摩擦焊试验是在中国航空制造技术研究院自行研制的15t线性摩擦焊机上进行,线性摩擦焊过程及取样示意图如图2所示。焊接完成以后,去除接头边缘的飞边,在接头中心位置垂直于往复运动平面纵向切割得到尺寸为20mm×20mm×10mm的试样(见图2)。之后对试样进行一次退火和双重退火处理,热处理制度见表3。

对于热处理前以及热处理后的样品,用砂纸和Kroll's试剂(0.5% HF+1.5% HNO₃+2% HCl+96% H₂O)对试样进行研磨、抛光和腐蚀。之后分别利用OLYMPUS-PMG3光



(a) TC4-DT



(b) TC21

图1 母材组织

Fig.1 Microstructure of base metal

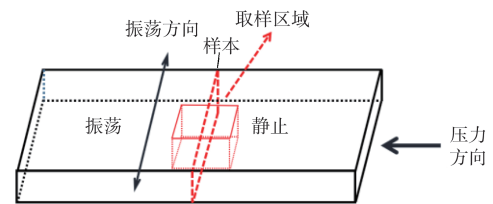


图2 线性摩擦焊过程及取样示意图

Fig.2 Schematic diagram of linear friction welding process and sampling

表3 接头的焊后热处理制度

Table 3 Post-weld heat treatment system of the joints

热处理名称	热处理制度
PWHT 1	700°C/4h, AC
PWHT 2	900°C/1h, AC+510°C/4h, AC

学显微镜(OM)和TESCAN MIRA3 XMU扫描电子显微镜对热处理前后的接头不同区域进行观察和分析。之后,对接头进行室温拉伸和冲击性能测试,以确定焊后热处理对接头性能的影响。

2 试验结果与分析

2.1 宏观组织特征

TC4-DT/TC21 经过线性摩擦焊及热处理后所获得接头的宏观形貌接近,因此本节主要介绍焊后所获得接头的宏观形貌。如图3所示,在焊缝附近没有出现微裂纹或夹杂物等缺陷,且随着与焊缝距离的增大接头可分为三类区域:焊缝中心区(WCZ)、热力影响区(TMAZ)以及母材区(BM)。

对于焊缝中心区,该区域紧靠焊缝两侧,组织细节特征在50倍下几乎观察不到,这主要是因为超细晶的存在。在焊接过程中该区域温度高($T > T_{\beta}$)、应变大^[17], β 相发生了较为剧烈的动态再结晶,并以极其细小的状态保留到室温^[18];对于热力影响区,可以看到 β 晶粒及 α 晶粒沿振荡方向拉长,形成典型的流线组织。这是因为在此区域的材料在焊接过程中沿着振荡方向发生剧烈的塑性变形和流动;对于母材区,该区域的组织较于焊前几乎没有发生任何变化。

2.2 微观组织特征

图4为热处理前后焊缝中心区的SEM照片。如图4(a)所示,在TC4-DT侧,呈细长针状的 α 相以网篮状交错分布,且几乎观察不到 β 相的存在;TC21侧出现较为细小的等轴

β 晶粒,较于TC4-DT侧,该区域的针状 α 相更为细小,此外,在TC21侧的 β 晶粒间分布连续的晶界 α 相(α_{GB})。如此特征的组织可能导致接头强度升高但韧性下降,对其进行热处理将改善其性能。

焊缝中心区经过700°C一次退火后的组织如图4(b)所示,可以看出,经过一次退火后TC4-DT侧的针状 α 相虽然仍保持着网篮状特征,但发生了粗化,这一组织变化特征会显著增加接头处的强度及裂纹扩展阻力。而在TC21侧,组织状态没有发生明显的变化,即在细小的 β 晶粒内部杂乱的分布着大量的细小针状 α 相,同时晶界 α 相仍保持着较为连续的状态。

经过双重退火处理后焊缝中心区的组织特征如图4(c)所示,可以看到,经过双重退火后,该区域的组织特征发生了明显的变化。在TC4-DT侧片状 α 相进一步粗化并开始呈现短棒状特征,还可以注意到部分短棒状 α 在长大过程中互相交截使得被交截的 α 相长度变短;在TC21侧, β 晶粒尺寸增加,以至于在整个视野范围内观察不到完整的晶粒。同样的, β 晶粒内部的针状 α 相也开始长大、粗化,初步分析是因为在高温下合金元素的短程扩散速度加快导致的。上述组织变化都能够有效提升焊接接头阻碍裂纹扩展的能



图3 光学显微镜下的接头组织
Fig.3 OM micrographs of joint cross-section

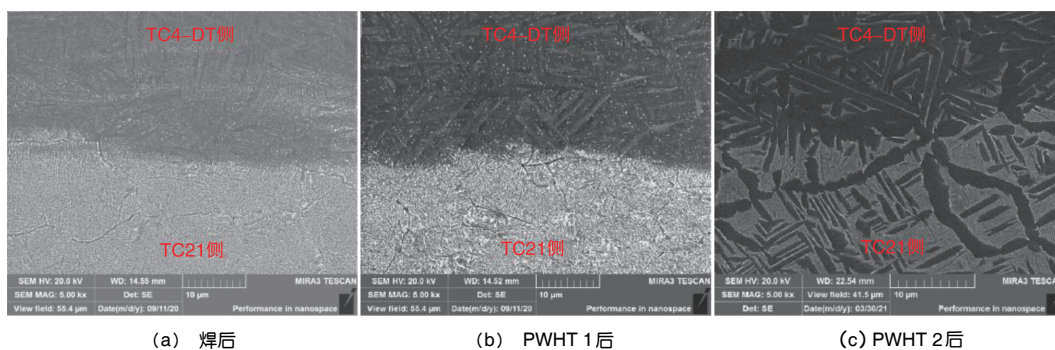


图4 不同状态下焊缝区显微组织
Fig.4 Microstructure of weld zone under different conditions

力。应当指出,原本在晶界连续分布的晶界 α 开始呈现不连续状态,这种不连续的晶界 α 相也能够有效地提升该区域的性能。

热力影响区微观组织的SEM照片如图5所示,该区域温度基本处于相变点以下,在正应力以及切应力作用下晶粒沿振荡方向拉长,只有部分区域发生再结晶。如图5(a)所示,TC4-DT侧晶粒内部的片层 α 相以波纹状沿振荡方向分布;TC21侧(见图5(d)),最明显的特征同样是沿振荡方向分布的初生 α 相,但可以注意到在这些初生 α 相之间分布着许多被剪切且细化为针状的 α 相。

经过700°C一次退火后TC4-DT和TC21侧的热力影响区的显微组织如图5(b)、图5(e)所示。TC4-DT侧的组织没有发生太大变化,但在TC21侧,波纹状的初生 α 相宽度增加、长度变短出现粗化的趋势。这是因为接头内储存能高,球状相界面能小于层片状相界面能,热处理促进片状 α 相向球状 α 相转变,但是分布在片状 α 相之间的针状 α 相没有发生变化。

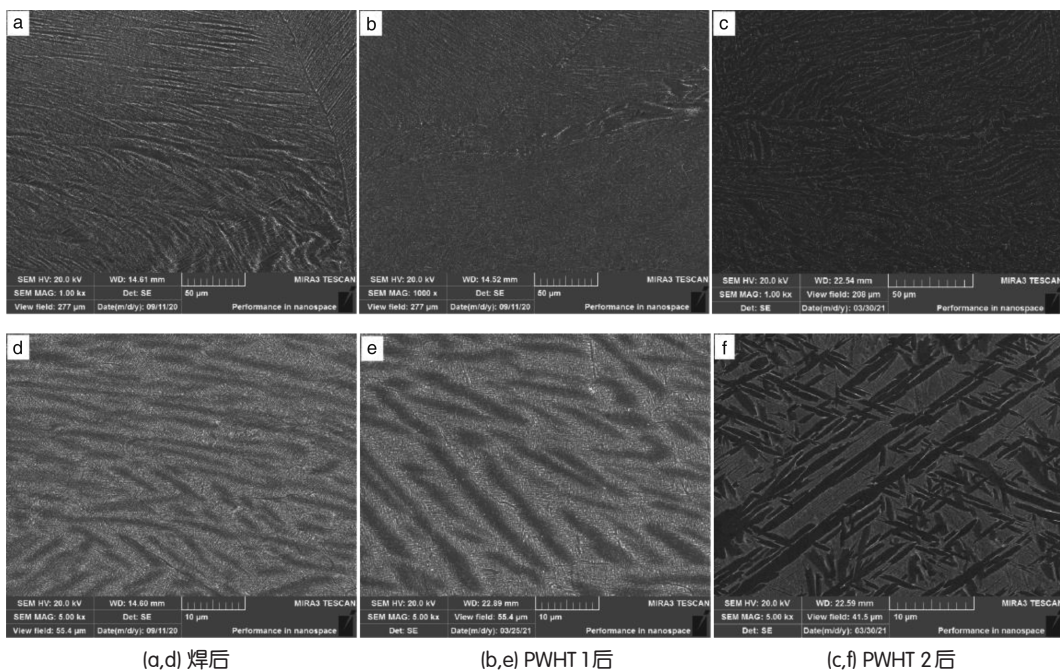
双重退火后,焊缝两侧热力影响区都发生明显变化。如图5(c)所示对于TC4-DT侧热力影响区,尽管初生 α 相仍保持波纹状但其片层间距明显增加,且在片层 α 相之间分布着许多次生 α 相,这主要是因为双重退火过程中加热温度高、元素扩散速度快,促进了片层 α 相的长大,并在之后的时效过程中析出次生 α 相。TC4-DT侧热力影响

区如图5(f)所示,首先可以注意到原本呈波纹状的 α 相的变形程度减小,这是因为发生了回复过程。其次,在这些初生 α 相附近出现许多竹叶状的长大的次生 α 相,这些组织特征变化同样会增加接头的强度以及裂纹扩展阻力。

对于母材区,该区域的组织经过700°C的一次退火后片层 α 相开始有所粗化,但粗化特征不是很明显,同时在 β 相中没有观察到较为明显的次生相析出;经过双重退火以后,TC4-DT和TC21侧的片层 α 相都进一步粗化。进一步可以看出,在TC4-DT侧片层 α 相之间的 β 相中析出大量针状次生 α 相(见图6(c))。如图6(f)所示,片层 α 相的棱角已经消失,且残余 β 相中析出更多细小的次生 α 相。这些细小的针状 α 相有利于增加该区域的强度,但会相应的降低该区域的塑性。

2.3 力学性能

TC4-DT/TC21线性摩擦焊接头的拉伸、冲击试验结果见表4。由表4可见,经过双重退火后接头的强度比一次退火处理后提高近100MPa,这说明经过双重退火中在各个区域析出的次生 α 相强化效果大于组织粗化所造成的弱化效果;双重退火后接头的冲击韧性较于一次退火提高了近三倍,这是因为粗化的片层 α 相以及不连续的晶界 α 的存在增加了冲击裂纹扩展阻力,进而显著提升接头的冲击性能;此外,还可以看到,相比于一次退火,经过双重退后接头的断后伸长率略有降低,但断面收缩率有所升高,说明双重退火



(a,d) 焊后

(b,e) PWHT 1后

(c,f) PWHT 2后

图5 不同状态下热力影响区显微组织

Fig.5 Microstructure of TMAZ under different conditions

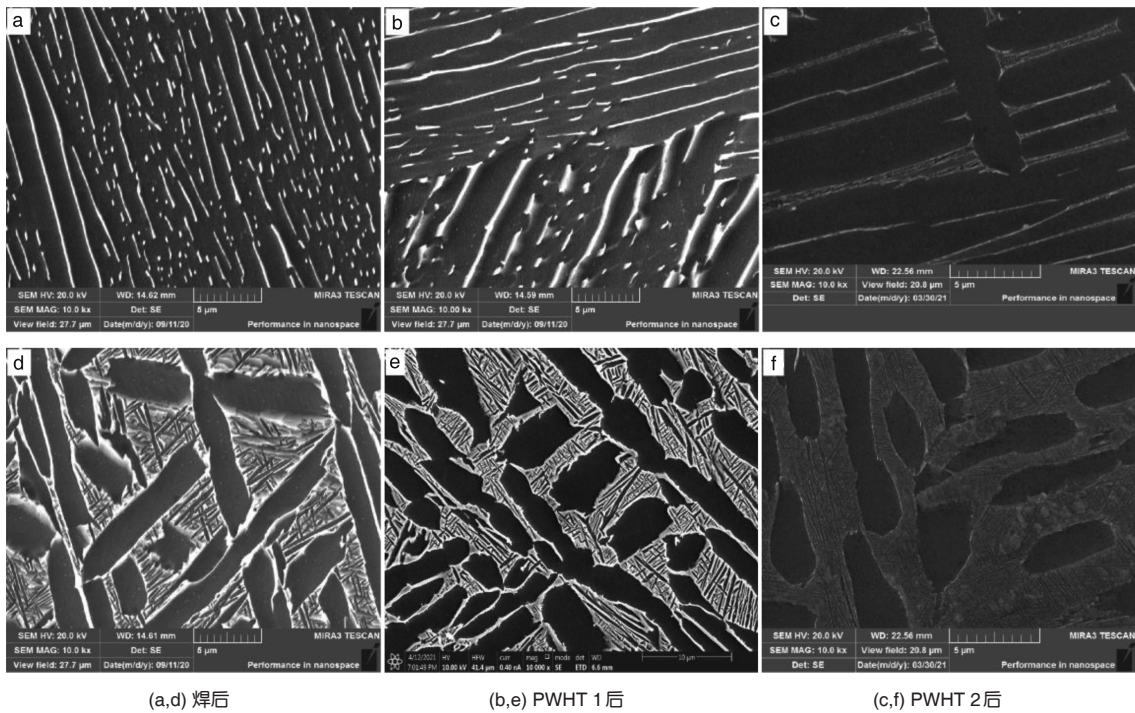


图6 不同状态下母材区显微组织

Fig. 6 Microstructure of BM under different conditions

表4 TC4-DT/TC21 接头的室温拉伸和冲击性能

Table 4 Tensile and impact properties of TC4-DT/TC21 joints at room temperature

焊后热处理状态	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A_5 /%	断面收缩率 Z /%	冲击吸收能量 K_U /J
PWHT 1	819	879	8.0	21	15.9
PWHT 2	897	970	7.0	23	40.3

制度在显著增加接头强度的同时,仍保持着较好的塑性。综上所述,双重退火后得到接头的强度和韧性有了较大的提升,并且塑性仍保持着较高的塑性。

3 结论

通过以上试验分析,可以得出以下结论:

(1) TC4-DT/TC21 线性摩擦焊接头根据组织特征分为母材区、热力影响区和焊缝中心区。WCZ 内存在细小的 β 晶粒以及大量针状 α 相; TMAZ 内 β 晶粒及 α 晶粒沿振动方向被拉长形成流线组织; 母材区组织特征仍保持焊前的状态。

(2) 与一次退火相比,经双重退火后的接头组织发生较为明显的变化: WCZ 内再结晶晶粒长大、片层 α 相粗化且晶界 α 相呈现不连续状态; TMAZ 内片状 α 相因发生回复变形程度减小且片层间距增加,在这些粗化的片层 α 相周围析

出许多长大的次生 α 相。BM 内片层 α 相明显粗化且次生相析出。

(3) TC4-DT/TC21 线性摩擦焊接头双重退火获得的综合力学性能明显优于一次退火处理。较于一退火,经过双重退火后接头的强度和冲击韧性都显著增加,且塑性仍保持着较高的水平。

AST

参考文献

- [1] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
Zhu Zhishou. Research and development of new aviation high-performance titanium alloy material technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 李航航, 阎勇, 尹航. 战斗机新结构应用与新材料需求分析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4): 8-13.

- Li Hanghang, Yan Yong, Yin Hang. New structure application of fighter aircraft and demand analysis of new materials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(4): 8-13. (in Chinese)
- [3] 刘牧东. 金属薄板材料冲击性能研究进展[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(2): 1-6.
- Liu Mudong. Research progress on impact properties of sheet metal materials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2019, 30(2): 1-6. (in Chinese)
- [4] Fei Y, Zhou L, Qu H, et al. The phase and microstructure of TC21 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 494(1-2): 166-172.
- [5] 陈光. 一种整体叶盘的加工方法-线性摩擦焊[J]. *航空工程与维修*, 1999(4): 3-5.
- Chen Guang. A processing method of integral blisk-linear friction welding[J]. *Aeronautical Engineering and Maintenance*, 1999(4): 3-5. (in Chinese)
- [6] Li W, Vairis A, Preuss M, et al. Linear and rotary friction welding review[J]. *International Materials Reviews*, 2016, 61(2): 71-100.
- [7] Guo Y, Jung T, Chiu Y L, et al. Microstructure and microhardness of Ti-6246 linear friction weld[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2013, 562: 17-24.
- [8] Vairis A, Frost M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks[J]. *Materials Science & Engineering: A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2000, 292(1): 8-17.
- [9] 张传臣, 黄继华, 张田仓, 等. 异质钛合金线性摩擦焊接头微观组织与显微硬度分析[J]. *焊接学报*, 2012, 33(4): 97-100.
- Zhang Chuanchen, Huang Jihua, Zhang Tiancang, et al. Analysis of microstructure and microhardness of heterogeneous titanium alloy linear friction welding joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(4): 97-100. (in Chinese)
- [10] Seo W, Suh J, Shim J, et al. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and hardness of P92 steel in IN740H/P92 dissimilar weld joints[J]. *Materials Characterization*, 2020, 160: 110083.
- [11] Rotundo F, Ceschini L, Morri A, et al. Mechanical and microstructural characterization of 2124Al/25vol.%SiCp joints obtained by linear friction welding (LFW)[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(9): 1028-1037.
- [12] Turner R, Gebelin J C, Ward R M, et al. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Modelling and validation[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(10): 3792-3803.
- [13] Dorick B, Salima B, Marion R. Contributions of an innovative post-weld heat treatment to the micro-tensile behavior of two mono-material linear friction welded joints using: The β -metastable Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti17) and the near- α Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti6242) Ti-alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 766: 138334.
- [14] Damodaram R, Ganesh S R S, Satyanarayana D V V, et al. Hot tensile and stress rupture behavior of friction welded alloy 718 in different pre-and post-weld heat treatment conditions[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 612: 414-422.
- [15] Tao B H, Li Q, Zhang Y H, et al. Effects of post-weld heat treatment on fracture toughness of linear friction welded joint for dissimilar titanium alloys[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2015, 634: 141-146.
- [16] Chen X, Xie F Q, Ma T J, et al. Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti2AlNb alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 94: 45-53.
- [17] Ji Y, Chai Z, Zhao D, et al. Linear friction welding of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy with dissimilar microstructure[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4): 979-987.
- [18] 李晓红, 张彦华, 张田仓, 等. 钛合金线性摩擦焊接头动态再结晶规律研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(2): 174-181.
- Li Xiaohong, Zhang Yanhua, Zhang Tiancang, et al. Study on dynamic recrystallization of titanium alloy linear friction welded joints[J]. *Chinese Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(2): 174-181. (in Chinese)

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of TC4-DT/TC21 Titanium Alloy Linear Friction Welded Joints

Gao Pan^{1,2}, Zeng Weidong^{1,2}, Zhang Chuanchen³, Xu Jianwei^{1,2}

1. Defense Technologies Innovation Center of Precision Forging and Ring Rolling, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Shaanxi Key Laboratory of High-Performance Precision Forming Technology and Equipment, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

3. Aviation Technology Key Laboratory of Aviation Welding and Joining Technology, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China

Abstract: In order to further improve the comprehensive mechanical properties of TC4-DT/TC21 linear friction welded joints, the effects of simple annealing and duplex annealing on the microstructure and mechanical properties of welded joints were compared and analyzed. The results show that after simple annealing, the microstructure characteristics of each zone are less different from those before annealing. Namely the weld center zone is composed of fine recrystallized grains and needle-like α phases, and the thermo-mechanical affected zone presents a streamlined structure elongated in the direction of oscillation. However, after the duplex annealing, the joint structure changes significantly, and weld center zone appears grain growth, lamellar α phase coarsening, and grain boundary α phase discontinuity. In the thermo-mechanical affected zone, the α layer is coarsened and the interlaminar spacing increases. At the same time, many long and short rod-like α phases are precipitated around the coarsened lamellar alpha phase. In the base material zone, the lamellar α phase is coarsened and secondary phases are precipitated. Comparison of mechanical properties shows that duplex annealing is significantly better than simple annealing, in which the strength and impact energy are increased by 91MPa and 24.4J respectively, the plasticity remains at a relatively high level.

Key Words: linear friction welding; post-weld heat treatment; titanium alloy; duplex annealing; mechanical properties

Received: 2021-04-29; **Revised:** 2021-05-15; **Accepted:** 2021-07-09

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (201911053001)