

电脉冲调控 TC21 钛合金线性摩擦焊接头强韧化机理研究



赵鹏康¹, 洪振宇¹, 袁启龙¹, 李菊², 张传臣²

1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048

2. 中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空重点实验室, 北京 100024

摘要: 航空结构件在苛刻服役环境下对材料的高质量连接提出了极高要求。高强韧 TC21 钛合金线性摩擦焊接头具有良好的强塑性, 但焊缝区等轴晶和晶内球状弥散颗粒易降低接头韧性。本文采用电脉冲处理方法, 利用电脉冲的焦耳热效应和电子风力非热效应协同调控接头焊缝区的等轴晶, 使其形成双组态交错网篮组织, 并弱化热力影响区的流线状组织特征。经过电脉冲处理后, 接头冲击韧性从 16.7J/cm² 提高至 55.3J/cm², 达到了母材韧性值(61.1J/cm²)的 90.5%。拉伸试样均在母材处发生断裂, 表明经过电脉冲处理后接头获得了优异的强韧性。为钛合金整体结构件高质量制备提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 线性摩擦焊; TC21 钛合金; 电脉冲处理; 热/非热效应; 强韧化机制

中图分类号: TG166.5

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.05.009

飞机制造领域正朝着轻量化、整体化和多载化方向发展。钛合金因其高比强度和优异的耐腐蚀性, 广泛应用于航空航天领域^[1-2]。TC21 钛合金(Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Cr-Nb-S)是我国自主研发的一种 $\alpha+\beta$ 型高损伤容限钛合金, 其在特定热处理下形成的网篮组织具有优异的强度、塑性、韧性及裂纹扩展速率匹配, 广泛应用于航空承力构件, 如大型整体框架、发动机挂架、承力梁及起落架等^[3]。线性摩擦焊(LFW)作为一种高质量固相无缺陷连接技术, 已成为实现 TC21 钛合金高可靠性连接的优选方法^[4-6]。然而, 线性摩擦焊过程中的剪切应力和压应力导致接头焊缝区形成等轴晶组织, 这些等轴晶和晶内球状弥散颗粒促进裂纹萌生和扩展, 进而导致接头发生低韧性解理断裂, 制约了 LFW 技术的广泛应用。因此, 制备具有优良强韧性匹配的钛合金线性摩擦焊接头, 对于先进飞机构件的安全可靠服役具有重要意义^[7-8]。

已有研究表明, 钛合金网篮组织中的裂纹倾向于绕过片层 α 相扩展, 从而形成更为曲折的穿晶裂纹路径, 提升了材料的韧性^[9]。通过不同退火热处理方法研究 TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头的微观组织和断裂机理, 结果表明,

经双重炉冷退火处理后, 接头焊缝区组织更加均匀, 等轴晶部分转变为片状网篮组织, 位错密度显著降低, 韧性大幅提高。片层网篮组织在断裂过程中能吸收更多能量, 从而表现出较高的韧性^[10-11]。

传统热处理方法主要通过热效应调控组织, 效果有限。电脉冲处理(EPT)作为一种快速非平衡局部加热技术^[12], 通过焦耳热效应和电子风力非热效应的协同作用, 能够更有效地调控金属材料的微观组织, 优化材料的力学性能^[13-14]。已有研究表明^[15], 电脉冲处理能够降低钛合金组织中的位错密度, 促进位错的运动与重排, 从而提升材料的综合力学性能。作者前期通过电脉冲方法调控 TC11/TC17 LFW 接头组织, 使接头焊缝区的 TC11 侧和 TC17 侧均转变为针状交错网篮组织, 位错分布更加均匀, 接头韧性显著提高。王琳等^[16]研究表明, 电磁处理能引入额外的相变驱动力, 降低钛合金的位错密度, 减少位错缠结。基于此, 本文拟通过电脉冲处理方法调控 TC21 高强韧钛合金线性摩擦焊接头的组织性能, 探讨不同脉冲处理时间对接头微观组织及强韧性影响的规律。

收稿日期: 2024-09-30; 退修日期: 2024-11-28; 录用日期: 2025-01-21

基金项目: 航空科学基金(202200110T6001); 国家留学基金(202208615069); 教育部数控机床及机械制造装备集成重点实验室开放课题(SKJC-2022-05); 西安市碑林区应用技术研发储备工程项目(GX2447); 校企合作开发项目(2024610002012264)

引用格式: Zhao Pengkang, Hong Zhenyu, Yuan Qilong, et al. Investigation on the mechanism of strength and toughness of linear friction welded joints of TC21 titanium alloy regulated by electrical pulse treatment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(5): 75-80. 赵鹏康, 洪振宇, 袁启龙, 等. 电脉冲调控 TC21 钛合金线性摩擦焊接头强韧化机理研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(5): 75-80.

1 试验材料与方法

本文研究对象是TC21 高强韧钛合金线性摩擦焊接头,线性摩擦焊材料及试验均由中国航空制造技术研究院提供与完成。TC21 是一种 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金,其化学成分见表1,为国内自主研发的高强韧和高损伤容限型钛合金,具有良好的综合力学性能匹配,相变温度约为 $975^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

表1 TC21 钛合金化学成分(单位:wt%)
Table 1 TC21 titanium alloy chemical composition
(Unit:wt%)

材料	Al	Zr	Sn	Mo	Nb	Cr	Si	Ti
TC21	6.47	2.28	2.18	3.23	2.11	1.51	0.11	其余

TC21 钛合金线性摩擦焊接头焊前单侧尺寸为 $65\text{mm}\times 80\text{mm}\times 30\text{mm}$,焊后接头整体尺寸为 $125\text{mm}\times 80\text{mm}\times 30\text{mm}$,接头宏观形貌如图1所示。焊前摩擦界面通过机械打磨处理,焊接工艺参数为:振动频率 50Hz ,振幅 2.5mm ,摩擦压力 50MPa ,顶锻压力 68MPa ,轴向缩短量约为 5mm 。



图1 TC21 钛合金线性摩擦焊接头
Fig.1 TC21 titanium alloy linear friction welding joint

焊后接头经过电脉冲处理,具体处理方法如图2所示。首先,通过机加工制备条状试样。通过前期大量试验得出尺寸为 $90\text{mm}\times 10\text{mm}\times 3\text{mm}$ 的条状试样可充分满足电脉冲设备的功率输出条件,确保获得良好的处理效果,取样位置参见试验示意图。试样表面经过磨床磨削处理,确保加工精度在 0.01mm 以内。使用脉冲电源的正负电极夹具将试样固定在电路中,两电极夹具之间的距离设定为 60mm ,这是在前期大量试验的基础上优化得出的尺寸,可保证试验中电脉冲处理的效果和测温环节的便捷性和安全性。夹具材料为纯铜,尺寸为 $240\text{mm}\times 30\text{mm}\times 3.2\text{mm}$ 。数字存储示波器与脉冲电源的正负电极连接,用于采集电脉冲数据。为了实时监测试样中心区域的温升,采用接触式表面测温仪进行测量。通过调节脉冲时间,精确控制接头组织,最终通过自然空冷获得处理后的样品。

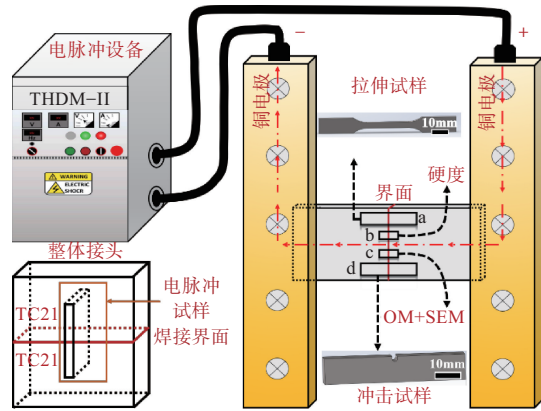


图2 电脉冲处理试验示意图
Fig.2 Schematic diagram of EPT experiment

采用冲击试验机测试不同脉冲时间对EPT接头冲击韧性的影响,基恩士VHX-5000型超景深体式显微镜用于观察接头冲击后宏观裂纹扩展路径,扫描电镜(SEM)用来表征冲击断口形貌。电子万能试验机用于测试接头的强塑性,显微维氏硬度试验机则用于测定接头的显微硬度,保压力设定为 0.5N ,压痕时间为 15s 。表2列出了电脉冲处理的工艺参数,包括脉冲电压为 50V ,脉冲频率为 250Hz ,其中 j_e 为脉冲电流密度的均方根值。

表2 电脉冲处理工艺参数
Table 2 Electricpulse treatment parameters

工艺编号	脉冲电压/V	脉冲频率/Hz	脉冲时间/s	$j_e/(\text{A}/\text{m}^2)$	峰值温度/ $^{\circ}\text{C}$
1#	50	250	40	7.41×10^6	667
2#	50	250	50	7.36×10^6	726
3#	50	250	60	7.36×10^6	744
4#	50	250	70	7.28×10^6	748

2 结果与分析

2.1 接头组织表征

TC21 LFW接头的宏观形貌和微观组织如图3所示。图3(a)展示了接头的宏观形貌,接头分为焊缝区、热力影响区和母材区,焊接界面近似为直线。接头呈现腰鼓状,中间较窄,焊缝区平均宽度约为 1.4mm ;两端接头较宽,焊缝区宽度约为 3.6mm ,接头边缘增加的宽度主要源于飞边热回流效应。图3(b)~图3(e)分别展示了接头母材区、热力影响区和焊缝区的微观组织。由图3(c)可见,TC21母材为针状网篮组织, β 相基体晶界处均匀分布大量长条状初生 α 相,晶内有大量细小片层状次生 α' 相,两相交错分布;图3(d)展示了接头热力影响区的组织,热力耦合作用使该区域呈现出流线状分布特征;图3

(c)表示接头焊缝区组织,等轴晶组织清晰可见,晶界为初生 α 相,晶粒内分布大量球状弥散次生 α' 相。

图4为焊态和两种脉冲时间下接头焊缝区的微观组织。由于线性摩擦焊接头焊接界面温度超过1300°C,导致接头组织发生固态相变,焊缝区组织发生完全动态回复与再结晶,形成等轴组织,如图4(a)所示。图4(b)为50s时EPT接头焊缝区微观组织,等轴晶粒基本消失,残留部分晶界初生 α 相, β 基体中析出大量片层状次生 α' 相,焊缝区部分区域形成致密的网篮组织;图4(c)为70s时EPT接头焊缝区微观组织,晶内 α 相片层结构变得更为致密,晶内球状弥散颗粒完全转变为细小针状次生 α' 相,接头焊缝区形成双组态交错网篮组织。这主要是由于电脉冲焦耳热效应与电子风力非热效应的协同作用。电脉冲处理促进了钛合金形核,脉冲电流引起的非热效应有助于原子运动和位错迁移,电子风力的冲击作用导致组织中小角度晶界和亚晶的增多,有效促进晶粒细化^[17]。晶粒细化使材料能够承受更大的变形,从而大幅提高材料的韧性。张昕等^[18]研究表明,电脉冲处理对TC17线性摩擦焊接头强度和塑性产生异常增强效应。在电脉冲处理产生的局部焦耳热和电子风协同作用下,接头 β 相中稳定元素Mo的扩散得到促进,接头焊缝区和热影响区的 α 相与 β 相比比例接近母材的平衡点,从而使 α 相分布更加均匀,最终实现了接头强度和塑性的提升。如图5和图6所示,经过70s电脉冲处理后,接头热力影响区的流线状组织发生了明显弱化,而母材组织未发生明显变化,这主要归因于母材低能量稳定状态不易受到外部能量的影响^[19]。

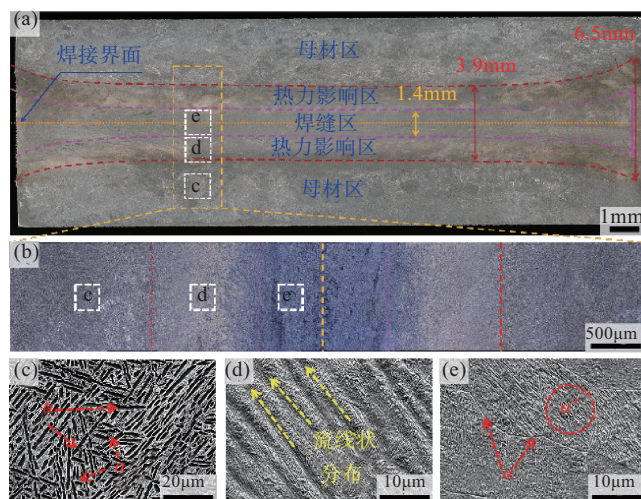


图3 TC21 LFW接头宏观形貌和微观组织

Fig.3 Macroscopic morphology and microstructure of TC21 LFW joint

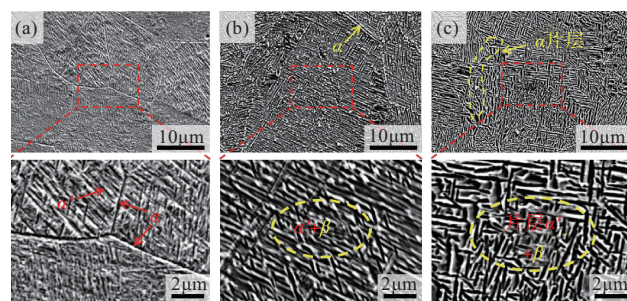


图4 接头焊缝区微观组织

Fig.4 Microstructure of joint weld zone

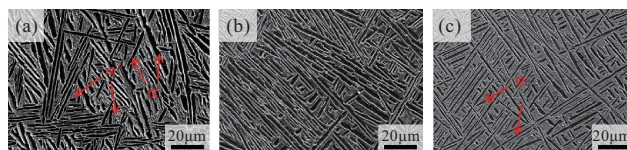


图5 接头母材区微观组织

Fig.5 Microstructure of joint base material zone

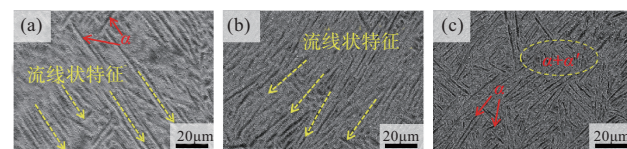


图6 接头热力影响区微观组织

Fig.6 Microstructure of joint thermal impact zone

2.2 力学性能

2.2.1 接头韧性特征

图7表示接头冲击韧性及断口形貌特征。图7(a)为焊态及不同电脉冲时间接头冲击韧性值,焊态接头冲击韧性值($16.7\text{J}/\text{cm}^2 \pm 0.5\text{J}/\text{cm}^2$)仅为母材韧性值($61.1\text{J}/\text{cm}^2 \pm 1\text{J}/\text{cm}^2$)的27%。随着脉冲时间增加,接头冲击韧性值逐渐提高,当脉冲时间增大到70s时,接头冲击韧性值大幅提高,达到 $55.3\text{J}/\text{cm}^2 \pm 1.5\text{J}/\text{cm}^2$,接近TC21母材的90.5%,提高幅度约为231%。图7(b)~图7(d)分别为三种接头的宏观裂纹扩展路径和断口形貌特征。由图7(b)可见,焊态接头冲击裂纹近似沿焊接界面直线扩展,断口形貌呈现清晰的河流花样,为典型的解理断裂特征;50s时EPT接头冲击试样起裂区位于焊接界面附近,裂纹在进入热力影响区后近似呈弧形扩展,裂纹扩展路径明显增加,断口以穿晶断裂为主,如图7(c)所示;70s时EPT接头冲击试样U形缺口发生严重变形,起裂区和剪切唇区均位于焊接界面附近,裂纹沿热力影响区呈曲折扩展,冲击吸收功大幅增加,断口由大量韧窝组成,呈现典型的韧性断裂模式,如图7(d)所示。

2.2.2 接头强度特征

图8表示不同脉冲时间处理后接头的强塑性特征。由

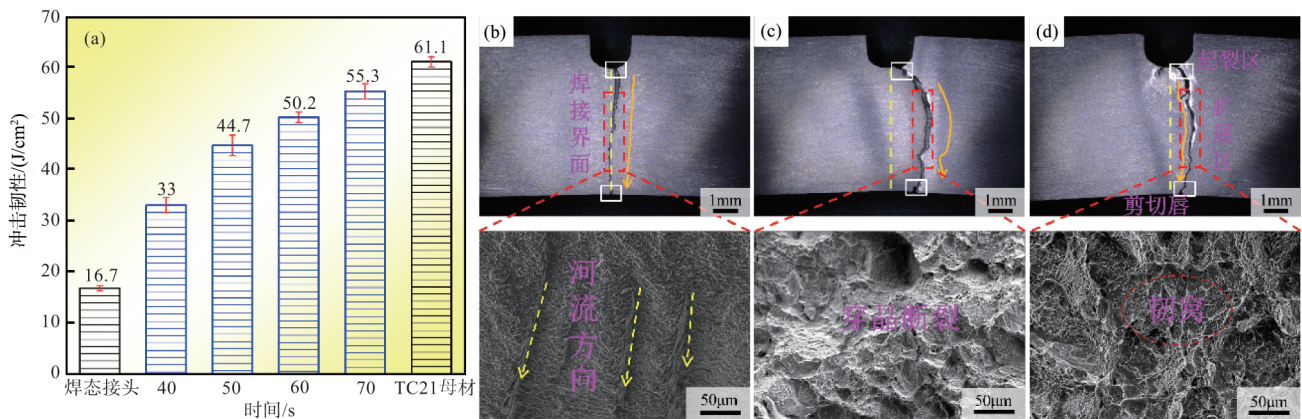


图7 电脉冲处理接头冲击韧性及断口形貌

Fig.7 Impact toughness and fracture morphology of the EPT-joints

图8可见,无论是焊态接头还是经过不同电脉冲时间处理后的接头,拉伸断裂均发生在母材区域,表明焊态及电脉冲处理后的接头强度均高于TC21母材。经过电脉冲处理后,断裂区的强度较原始母材略有降低,但接头的抗拉强度仍达到TC21母材的95%以上,同时延伸率略高于母材,表明整体接头在经过电脉冲处理后仍能保持较高的强塑性。尤其是70s时EPT处理后的接头,其拉伸断裂区的裂纹扩展路径较为曲折,表现出优异的强塑性特征。

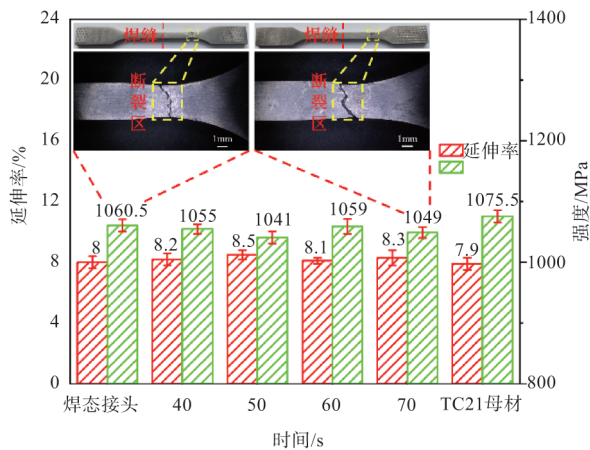


图8 接头拉伸强度及延伸率

Fig.8 Tensile strength and elongation rate of the EPT joints

2.2.3 接头显微硬度

图9表示不同脉冲时间处理后接头的显微硬度分布特征。红色曲线表示原始焊态接头的显微硬度变化趋势,接头焊缝区的显微硬度明显高于两侧母材,且呈现马鞍状分布,波动较大。接头焊接界面附近的显微硬度值在 $460\text{HV}\pm 10\text{HV}$ 范围内波动;进入热力影响区后,显微硬度

值逐渐下降,直到稳定在母材显微硬度值 $370\text{HV}\pm 10\text{HV}$ 范围内。

40s时EPT接头显微硬度变化趋势与原始焊态接头相似,50s时EPT接头的显微硬度波动较40s时EPT接头明显减小,接头焊缝区显微硬度降至 $440\text{HV}\pm 10\text{HV}$ 范围。随着电脉冲处理时间的增加,60s时EPT接头焊缝区显微硬度进一步降低,降至 $420\text{HV}\pm 10\text{HV}$ 范围,平均下降约40HV;70s时EPT接头的显微硬度值呈现近似直线分布,整个接头的显微硬度稳定在 $400\text{HV}\pm 10\text{HV}$ 范围,与母材显微硬度值接近。综上所述,电脉冲处理使接头的组织分布更加均匀,显微硬度值趋于稳定,表明接头的力学性能得到了优化。

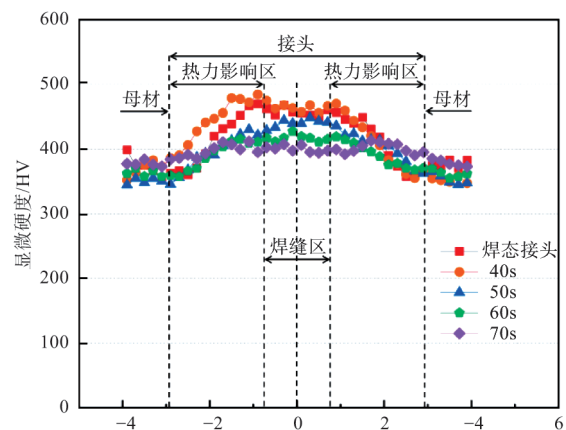


图9 接头显微硬度曲线

Fig.9 Microhardness curve of joints

3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)随着脉冲时间增加,接头焊缝区组织晶粒破碎化程

度提高,组织逐渐变得更加均匀致密,最终形成双组态交错网篮结构;接头热力影响区流线状组织发生明显弱化,而母材组织未发生显著变化。

(2)随着电脉冲处理时间的增加,接头冲击韧性从 $16.7\text{J}/\text{cm}^2$ 提高到 $55.3\text{J}/\text{cm}^2$,达到母材韧性值 ($61.1\text{J}/\text{cm}^2$) 的 90.5%,拉伸试样均断裂于远离接头的母材区,表明接头具有优良的强韧性。

(3)随着电脉冲处理时间的延长,接头焊缝区显微硬度均逐渐降低。当电脉冲处理时间为 70s 时,接头显微硬度呈近似直线下降,稳定在 $400\text{HV}\pm 10\text{HV}$ 范围内,与母材显微硬度值接近。

AST

参考文献

- [1] 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(9): 50-56.
Gao Pan, Zeng Weidong, Zhang Chuanchen, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of TC4-DT/TC21 titanium alloys linear friction welded joints[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 50-56.(in Chinese)
- [2] 刘英航,王乐耘. 基于激光选区熔化的高塑性钛合金设计[J]. 航空科学技术, 2022, 33(9): 84-93.
Liu Yinghang, Wang Legeng. Design ductile titanium alloys for selective laser melting[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(9): 84-93.(in Chinese)
- [3] 何睿,王杰,尹慧,等. 热处理对锻态 TC21 钛合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(4): 201-208.
He Rui, Wang Jie, Yin Hui, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of as-forged TC21 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(4): 201-208.(in Chinese)
- [4] Wen Guangdong, Ma Tiejun, Li Wenya, et al. Strain-controlled fatigue properties of linear friction welded dissimilar joints between Ti-6Al-4V and Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 612: 80-88.
- [5] Li W, Vairis A, Preuss M, et al. Linear and rotary friction welding review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71-100.
- [6] Guo Yina, Jung T, Chiu Yulung, et al. Microstructure and microhardness of Ti-6246 linear friction weld[J]. Materials Science & Engineering: A, 2013, 562: 17-24.
- [7] 董宝昆,张宇航,行登海,等. 超声冲击强化工艺对钛合金表面质量及磨损性能影响研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 43-58.
Dong Baokun, Zhang Yuhang, Xing Denghai, et al. Research on the effect of ultrasonic impact strengthening on the surface property and wear properties of titanium alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 43-58.(in Chinese)
- [8] Zhao Pengkang, Wei Chen, Li Yan, et al. Effect of heat treatment on the microstructure, microhardness and impact toughness of TC11 and TC17 linear friction welded joint[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 803: 140496.
- [9] Shi Xiaohui, Zeng Weidong, Shi Chunling, et al. The fracture toughness and its prediction model for Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr11Fe titanium alloy with basket-weave microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 748-755.
- [10] 周金华,赵超群,齐琪,等. 锥度球头刀加工钛合金 TC4 表面粗糙度建模[J]. 航空科学技术, 2024, 35(8): 79-84.
Zhou Jinhua, Zhao Chaoqun, Qi Qi, et al. Modeling the surface roughness for machining titanium alloy TC4 with taper ball-end cutter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(8): 79-84.(in Chinese)
- [11] Zhao Pengkang, Tao Yifan, Chen Haiyan, et al. Texture characteristics and fracture mechanism of linear friction welded joints of dissimilar titanium alloys after annealing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 866: 144709.
- [12] Shi Lin, Zou Juntao, Sun Lixing, et al. Effect of electropulsing treatment on microstructure and mechanical properties of Cu-20Ni-20Mn alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 855: 143847.
- [13] Ruszkiewicz B J, Grimm T, Ragai I, et al. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect[J]. Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139: 1087-1357.
- [14] Conrad H, Guo Z, Sprecher A F. Effects of electropulse duration and frequency on grain growth in Cu[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1990, 24(2): 359-362.
- [15] Huo Dongmei, Li Shukui, Fan Qunbo, et al. Effects of electric pulse heat treatment on microstructures and dynamic deformation behaviors of Ti6441 alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 530: 161-167.

- [16] 王琳, 刘剑, 杨屹, 等. 电磁处理对TC11合金组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 931-937.
Wang Lin, Liu Jian, Yang Yi, et al. Effects of electromagnetic treatment on microstructures and properties of TC11 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28 (5): 931-937.(in Chinese)
- [17] Ao Dongwei, Chu Xingrong, Yang Yang, et al. Effect of electropulsing treatment on microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V alloy sheet under argon gas protection [J]. Vacuum, 2018, 148: 230-238.
- [18] Zhang Xin, Zhang Junjie, Yao Yunkui, et al. Anomalous enhancing effects of electric pulse treatment on strength and ductility of TC17 linear friction welding joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 203: 155-166.
- [19] Zhao Pengkang, Hu Yingxin, Geng Peihao, et al. Effective toughening of dissimilar Ti alloy friction welded joint by combining electropulsing thermal and athermal effects[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 909: 146864.

Investigation on the Mechanism of Strength and Toughness of Linear Friction Welded Joints of TC21 Titanium Alloy Regulated by Electrical Pulse Treatment

Zhao Pengkang¹, Hong Zhenyu¹, Yuan Qilong¹, Li Ju², Zhang Chuanchen²

1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

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

Abstract: The demanding service environment of aerospace structural components poses extremely high requirements for high-quality material joining. Linear friction welding of high-strength and high-toughness TC21 titanium alloy can produce joints with excellent strength and plasticity. However, the equiaxed grains and intragranular spherical dispersed particles in the weld zone of the joint can easily lead to reduced toughness. In this paper, an electrical pulse treatment(EPT) method was employed to synergistically regulate the equiaxed grains in the weld zone of the joint into a dual-configuration interlaced basketweave structure, utilizing both the Joule heating effect and the non-thermal electron wind force effect of electrical pulse. This approach weakened the flow-line microstructure characteristics in the heat-affected zone. As a result, the impact toughness of the joint after electrical pulse treatment increased from 16.7J/cm² to 55.3J/cm², reaching 90.5% of the base metal's toughness value (61.1J/cm²). Additionally, all tensile specimens fractured in the base metal region, indicating that the joint achieved excellent strength and toughness after electrical pulsing treatment. This research provides theoretical foundations and technical support for the high-quality fabrication of integral titanium alloy structural components.

Key Words: linear friction welding; TC21 titanium alloy; EPT; thermal/athermal effects; mechanism of strength and toughness

Received: 2024-09-30; **Revised:** 2024-11-28; **Accepted:** 2025-01-21

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (202200110T6001); China Scholarship Council (202208615069); Open Project of Key Laboratory of Numerical Control Machine Tool and Mechanical Manufacturing Equipment Integration of the Ministry of Education (SKJC-2022-05); Application Technology Research and Development Reserve Project of Beilin District, Xi'an City (GX2447); School Enterprise Cooperation Development Project (2024610002021264)