

TC17 钛合金线性摩擦焊工艺研究及显微组织分析

李菊^{1,2}, 常川川^{1,2}, 李晓红^{1,2}, 陶军^{1,2}, 张传臣^{1,2}

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

(2. 北京市摩擦焊接工艺与装备工程中心, 北京 100024)

摘要: 采用不同焊接频率(20~50 Hz)、振幅(1~4 mm)、摩擦压力(32~96 MPa)对 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金进行线性摩擦焊试验研究, 分析了不同焊接参数对钛合金线性摩擦焊接头质量的影响及接头不同区域显微组织演变规律。结果表明: 热输入不足时, 无法得到良好的焊接接头, 其他焊接工艺参数不变时, 随着单一参数的增加, 热输入量迅速升高, 焊接过程达到稳定状态, 参数对焊接过程及接头质量的影响较小。TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦焊接头焊缝区域在焊接过程中发生了明显的相变及动态再结晶, 形成亚稳定 β 相; 两侧热力影响区由于受到热力耦合的作用, 等轴及板条状 α 相沿着振动方向拉长, 针状次生 α 相完全溶解。

关键词: TC17 钛合金; 线性摩擦焊; 工艺参数; 显微组织

中图分类号: TG453; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)03-0940-07

由于航空发动机长期处于高温和循环负载的服役环境, 整体叶盘在工作时叶片和轮盘所处的温度和应力状态是不同的, 因此叶片及轮盘选用不同材料或者同种材料不同组织状态能够发挥材料更大的优势, 从而保证航空发动机性能^[1-3]。近年来, 设计人员开展了钛合金双性能整体叶盘结构的研制, 双性能整体叶盘具有广阔的应用前景, 但是国内的相关基础研究尚未成熟, 因而加大钛合金双性能整体叶盘结构的研究尤为重要。目前, 双性能整体叶盘的制造方法主要有整体锻造、电子束焊及线性摩擦焊等方法, 整体锻造技术难度较大, 材料利用率较低, 叶片与轮盘过渡区域位置及组织不易控制, 而电子束焊接过程需要有保护措施并且接头区域容易出现凝固缺陷及焊接变形等问题^[4-6]。

线性摩擦焊(linear friction welding, LFW)是一种新型固相焊接技术, 是由一个振动工件及一个静止工件组成的摩擦副, 沿着接触面做相对往复运动。焊接过程中摩擦及变形产生的热量使得界面附近发生塑性变形, 达到粘塑性状态; 当缩短量达到设定值时, 施加一定的顶锻力, 部分塑性金属被挤出形成飞边, 其余塑性金属保留在焊缝中心形成接头; 保压阶段通过再结晶、元素扩散、塑性金属混合机制使得两工件得到良好的结合, 其焊接原理如图 1 所示^[7-11]。线性摩擦焊接过程绿色环保, 无需保护气体, 同时焊接过程中界面温度低于金属熔

点, 因此可以有效地避免传统熔化焊出现的热裂纹、气孔、夹杂等焊接缺陷。焊接触面不受几何形状的约束, 可以是不规则多边形甚至曲边形^[7,10,12]。线性摩擦焊能够实现焊接性较差的钛合金、镍基高温合金、异种金属材料或同质异态材料的可靠连接^[7,13,14]。鉴于线性摩擦焊技术独特的技术优势, 已经逐渐成为航空发动机整体叶盘制造和修复的主要技术手段之一。

目前, 国内外高校及科研院所主要针对不同牌号的钛合金^[15-17]、铝合金^[18,19]及镍基高温合金^[20,21]等进行线性摩擦焊试验, 其研究内容主要围绕着不同合金线性摩擦焊接机制、工艺参数与显微组织及力学性能之间的关系。研究发现^[12]频率、振幅、摩擦压力、缩短量、顶锻压力、保压时间等焊接工艺参数的变化会对线性摩擦焊接头强度及质量产生显著的影响。然而现有的文献资料中, 没有报道不同工艺参数对同质异态钛合金材料线性摩擦焊的研究。因此, 本研究采用不同的焊接频率、振幅、及摩擦压力进行 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)同质异态钛合金线性摩擦焊试验, 通过焊后接头飞边形貌等角度分析不同参数对 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)线性摩擦焊接头成形质量的影响, 优化 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)线性摩擦焊焊接工艺参数, 了解同质异态钛合金线性摩擦焊接头微观组织变化规律, 为 TC17 同质异态钛合金线性摩擦焊在航空发动机双性能整体叶盘的应用提供理论支持。

收稿日期: 2021-03-20

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0005-0098); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2018ZX04010001)

作者简介: 李菊, 女, 1981年生, 硕士, 高级工程师, 中国航空制造技术研究院航空发动机工艺研究室, 北京 100024, 电话: 010-85701343, E-mail: hfutju@163.com

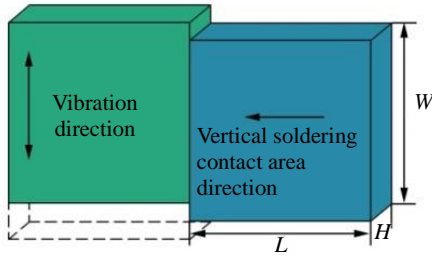


图 1 线性摩擦焊焊接原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of LFW process

1 实验

实验选用的材料是 2 种不同组织状态下的 TC17($\alpha+\beta$ 锻)及 TC17(β 锻)型两相钛合金, 其主要的化学成分如表 1 所示。在 $\alpha+\beta$ 两相区锻造得到 TC17($\alpha+\beta$ 锻)钛合金, 相变温度为 902 °C, 显微组织为典型的双态组织, 初生等轴 α 相直径为 5~8 μm , 其显微组织形貌如图 2a 所示; TC17(β 锻)钛合金在 β 单相区温度下锻造得到, 为典型的网篮状组织, 所有的原始 β 晶界已破碎, 无粗大、平直连续的晶界 α 相, 相变温度为 897 °C, 其显微组织形貌如图 2b 所示。放大倍数较大时, 可以观察到 2 种母材等轴/板条状 α 相与板条/板条状 α 相之间有大量的针状次生 α 相析出。

本试验在中国航空制造技术研究院自主研发的线性摩擦焊设备上, 分别采用不同振动频率(20~50 Hz)、振幅(1~4 mm)及摩擦压力(32~96 MPa)对 TC17($\alpha+\beta$ 锻)和 TC17(β 锻)钛合金进行线性摩擦焊试验, 具体焊接工艺参数如表 2 所示。焊接试验件尺寸为 75 mm (L) \times 25 mm (W) \times 12.5 mm (H), 焊接时将 TC17($\alpha+\beta$ 锻)钛合金锻件装夹在振动端, TC17(β 锻)钛合金锻件装夹在顶锻端, 焊前用丙酮或乙醇擦拭接触表面以去除接触表面残余的油污及灰尘。焊接过程中振动方向沿着 W 方向, 顶锻力沿着 L 方向, 垂直于焊接接触面。

焊后接头去除线性摩擦焊过程中挤出形成的飞边, 截取金相试样依次经过打磨、抛光及腐蚀(腐蚀液选用 Kroll 试剂, $V(\text{H}_2\text{O}):V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3)=17:1:2$)后进行显微

表 1 TC17 钛合金主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of TC17 titanium alloys ($\omega/\%$)

Alloy	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Ti
TC17($\alpha+\beta$)	5.28	2.08	1.85	4.06	3.92	Bal.
TC17(β)	5.12	2.04	1.97	3.89	3.88	Bal.

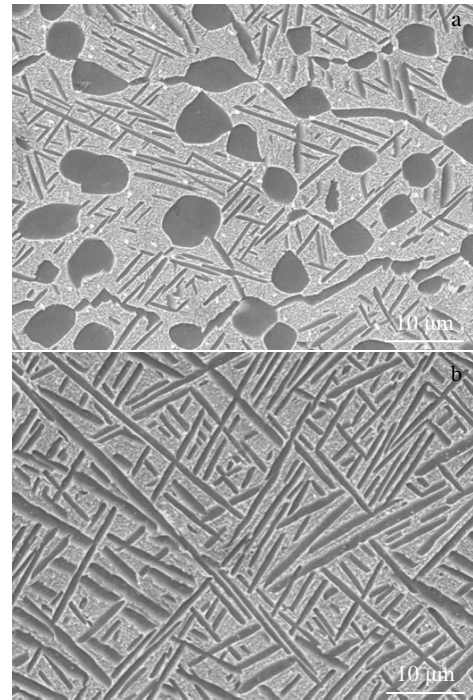


图 2 2 种组织的 TC17 钛合金母材组织

Fig.2 Microstructures of TC17($\alpha+\beta$) (a) and TC17(β) (b) titanium alloys

表 2 线性摩擦焊焊接工艺参数

Table 2 LFW welding process parameters

Parameter	Frequency, f/Hz	Amplitude, a/mm	Friction pressure, p/MPa
Frequency	20	3	64
	30	3	64
	40	3	64
	50	3	64
Amplitude	40	1	64
	40	2	64
	40	3	64
	40	4	64
Friction pressure	40	3	32
	40	3	64
	40	3	96

组织及显微硬度测试。采用 OLYMPUSBX41M 光学金相显微镜(OM)对不同焊接参数下的接头进行观察, 运用 SUPRA55SAPPHIRE 扫描电子显微镜(SEM)进一步对线性摩擦焊接头微观结构进行分析。使用 HXD-100TMC/LCD 显微硬度仪测量接头不同区域的显微硬度分布情况, 压头载荷设置为 0.3 kg, 保压时间为 10 s。

2 结果与讨论

2.1 不同线性摩擦焊焊接工艺参数对接头成形质量的影响
焊接频率、振幅、摩擦压力等工艺参数主要通过影响

焊接热输入的大小来影响线性摩擦焊接头质量。线性摩擦焊接过程中焊接热输入量(PI)如式(1)所示^[11,15], 焊后接头飞边形貌是衡量焊接接头质量的重要指标之一。

$$PI = \frac{afp}{2\pi A} \quad (1)$$

式中, a 为焊接振动幅值, f 为焊接振动频率, p 为焊接摩擦压力, A 为焊接面积。

图 3 为不同焊接工艺参数下接头的宏观形貌。选用 20、30、40、50 Hz 4 种不同振动频率对 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金进行线性摩擦焊接试验, 接头形貌如图 3a 所示。不同频率下焊接接头四周均有飞边形成, 接头焊接质量良好。随着振动频率的增加, 接头挤出飞边量增多, 这是由于焊接过程中频率增加会导致焊接过程中产生的热量升高, 焊接界面附近塑性金属层更厚, 在顶锻阶段更多的塑性金属被挤出形成飞边。同时可以看出振动频率较高时, 焊后飞边颜色深, 是因为焊接频率升高, 焊接过程中界面温度高, 飞边在高温停留时间较长, 使得飞边被氧化的程度增加。

选用 1、2、3、4 mm 4 种不同振幅对 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦焊试验, 焊后接头形貌如图 3b 所示。当振幅为 1 mm 时, 接头两侧明显未焊合, 只有焊缝中心有少量飞边挤出。振幅提高到 2 mm 以上时, 接头焊接良好, 飞边挤出均匀。振幅增加到 4 mm 时, 飞边端部出现张开的现象, 主要是由于焊接过程中振幅较大, 在摩擦阶段塑性金属不能粘合在一起导致张开, 同时振幅过大时, 焊接界面温度较高, 线性往复运动过程中更多的金属暴露在空气中, 会增加界面被氧化的可能性。

选用 32、64、96 MPa 3 种不同摩擦压力对 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦焊试验, 焊后接头形貌如图 3c 所示, 接头成形良好, 均未出现焊接缺陷, 并且随着焊接压力的增加, 焊后挤出飞边量明显增多, 这是由于焊接过程中摩擦压力增加, 焊接过程中热输入量显著增加, 更多的金属发生塑性变形软化, 同时焊接过

程中摩擦压力的增加必然会导致正应力的升高, 因此在平衡阶段中, 当界面产生塑性金属时, 在摩擦压力的作用下会立刻被挤出形成飞边, 因此焊后实际缩短量较大。

2.2 不同线性摩擦焊工艺参数对接头组织及显微硬度的影响

图 4 分别为不同焊接频率、振幅及摩擦压力下接头的金相照片。由图 4a、4b 可知, 能形成良好接头的前提下, 保持其他焊接工艺参数不变, 改变频率及振幅大小对接头变形区域影响不大, 随着焊接频率及振幅的增加, 接头变形区域宽度略有减小。当振幅为 1 mm 时, 接头只有中心局部区域连接, 连接区域取金相试样, 测量接头得到变形区域仅有不到 300 μm , 两侧母材几乎没有受到热和力的耦合作用, 同时发现接头中心区域残留氧化物及夹杂, 是由于热输入不足以使得界面附近达到粘塑性状态, 焊接过程中仅有少量塑性金属产生, 导致界面处氧化物及夹杂没有完全被挤出形成飞边。尽管热输入不足, 焊缝中心区域也仍然发生了相变, 可以推测焊接过程中界面温度可以达到相变点附近(约 900 $^{\circ}\text{C}$)。从金相组织图可以看出, 随着振幅的增加, 接头亮白色区域增宽, 表明对应参数下接头焊接过程中界面附近热输入量高, 发生相变的区域也相应较宽。图 4c 为不同摩擦压力下接头金相照片。通过金相法测量接头变形区域的宽度, 发现摩擦压力对接头变形区域大小影响十分明显, 当摩擦压力为 32 MPa 时变形区域达到 5.5 mm 以上, 随着摩擦压力的增加接头变形区域宽度逐渐变窄, 当摩擦压力为 96 MPa 时, 变形区域大小仅有 3 mm 左右, 这是因为采用较大摩擦压力时, 焊接过程中只要界面处金属达到粘塑性状态, 塑性金属就会立刻被挤出形成飞边, 采用摩擦压力较小时, 摩擦阶段对应的正应力也小, 因此更多的塑性金属保留在焊缝中心形成接头。当摩擦压力大于 64 MPa 时, 接头变形区域宽度变化较小, 再增加摩擦压力可能会导致焊后接头存在较大的残余应力。

图 5 为不同焊接工艺参数下接头不同区域的显微硬度分布。TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦

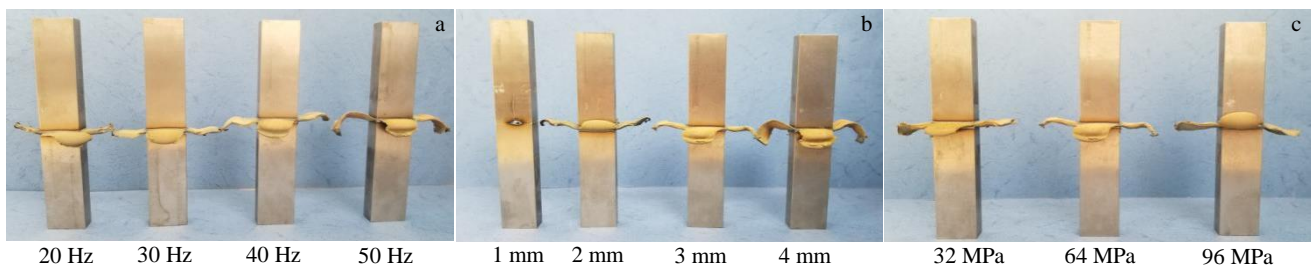


图 3 不同焊接工艺参数下 LFW 焊接接头形貌

Fig.3 Morphologies of LFWed joint under different welding parameters: (a) frequency, (b) amplitude, and (c) friction pressure

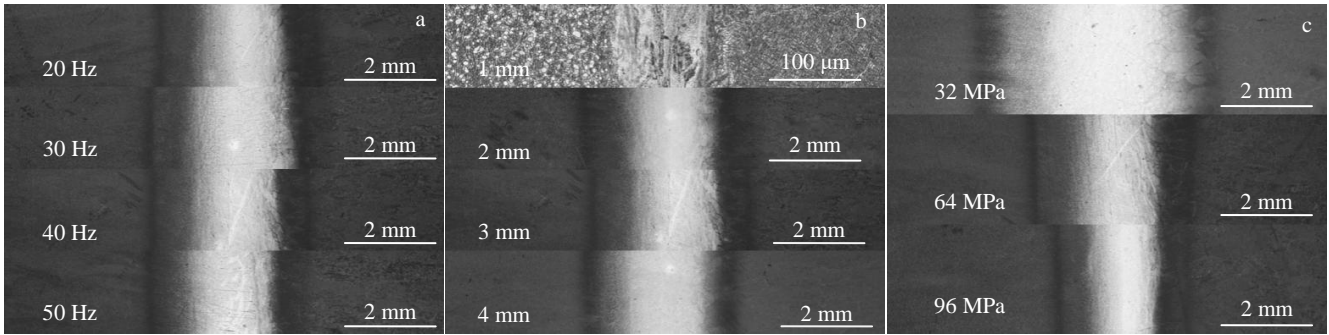


图 4 不同焊接工艺参数下接头金相照片

Fig.4 OM images of LFWed joints under different welding parameters: (a) frequency, (b) amplitude, and (c) friction pressure

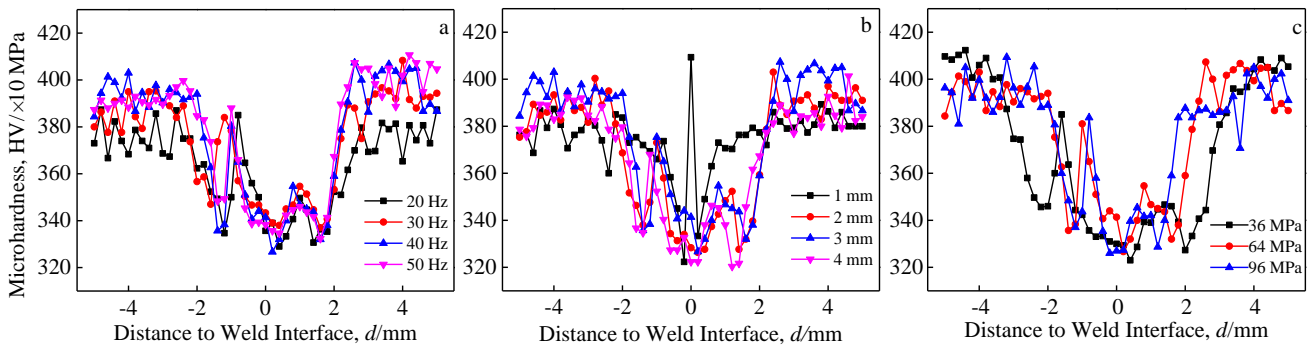


图 5 不同焊接工艺参数下接头区域显微硬度分布

Fig.5 Micro hardness distributions of LFWed joints under different welding parameters: (a) frequency, (b) amplitude, and (c) friction pressure

焊接头焊缝区域显微硬度最低,这是由于焊接过程中焊缝区温度达到了 β 转变温度以上,焊后冷却速率快, α 相来不及在晶界及晶粒内部析出,最终在接头焊缝区域形成了细小的等轴亚稳定 β 相晶粒,没有析出 α 相的钉扎作用,焊缝区显微硬度达到最低,随着向两边的母材靠近,显微硬度逐渐增加。图 5a 中不同焊接频率对接头焊缝区域显微硬度几乎没有影响,各种焊接频率下得到的接头显微硬度重合度较好,当频率为 20 和 30 Hz 时,两侧热力影响区靠近母材一侧的显微硬度较低,表明焊接频率较低时,该区域在焊接过程中受到较小的变形,主要受到热的影响,焊接频率高于 30 Hz 时,该区域温度较高,发生了一定的变形,在应变强化的作用下显微硬度表现高的数值。

图 5b 为不同振幅对应的接头显微硬度分布,当振幅为 1 mm,接头焊缝中心只发生局部少量的塑性变形,根据硬度分布可以看出变形区域只有 1 mm 左右,接头显微硬度分布呈 W 状,焊缝中心显微硬度最高,主要是由于焊后焊接界面仍然残留氧化物和夹杂,显微硬度打点时正好打到氧化物及夹杂的位置。当振幅增加,可以

得到良好的焊接接头时,显微硬度几乎不随参数的变化而变化。

图 5c 为不同焊接摩擦压力下接头显微硬度的分布情况。对比发现摩擦压力对接头显微硬度分布的影响较频率及振幅对接头显微硬度的影响大,不同摩擦压力下接头显微硬度整体的分布规律相似,但接头每个区域宽度差别较大,当摩擦压力为 32 MPa 时,接头受到热影响区域的宽度约为 7 mm,随着摩擦压力的增加,当摩擦压力为 96 MPa 时,接头受到热影响区域的宽度不到 4 mm,随着压力的增加,对应的焊缝区及热力影响区狭窄,显微硬度曲线较陡。相反摩擦压力较小时,焊后更多的高温塑性金属保留至室温,因此焊缝区域呈现出 U 型平滑趋势。

2.3 不同线性摩擦焊工艺参数对摩擦时间的影响

图 6 为不同焊接工艺参数下焊接过程中实际的摩擦时间。图 6a 中焊接频率从 20 Hz 增加到 50 Hz 时,摩擦时间从 2.9 s 降到 0.4 s,摩擦时间和焊接频率几乎呈线性关系,这是由于焊接过程中预设缩短量一定时,根据式(1)可知,随着焊接频率的增加,焊接过程中摩擦

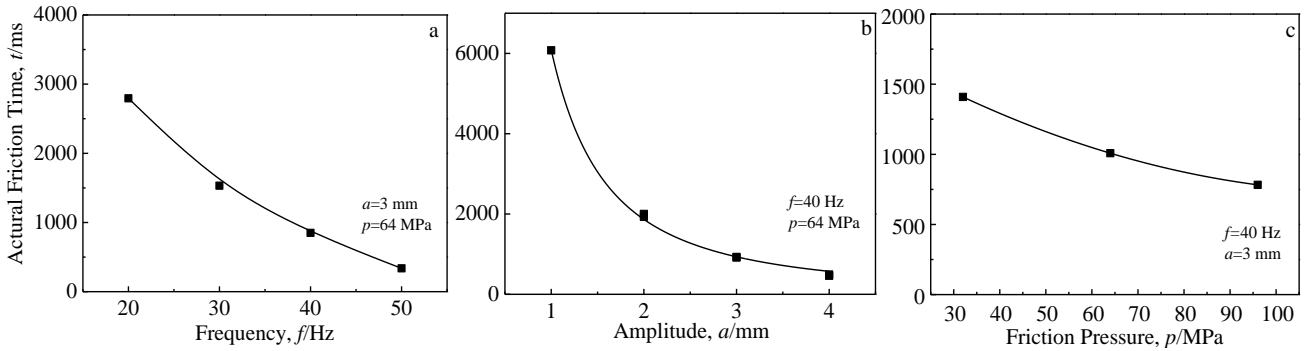


图 6 不同焊接参数下的焊接实际摩擦时间

Fig.6 Actural friction time of welding process under different welding parameters: (a) frequency, (b) amplitude, and (c) friction pressure

界面热输入量显著增加，产生预设缩短量的塑性金属所需的时间减少，所以对应的摩擦时间明显降低。图 6b 为不同振幅下的实际摩擦时间，与焊接频率相似，振动幅值由 1 mm 增加到 4 mm 时，焊接过程中摩擦时间由 6.1 s 下降到 0.5 s，振幅与热输入量呈正比，振幅的增加使得摩擦界面附近金属可以在较短的时间内形成软化的塑性金属层，因此摩擦时间迅速降低，可以看出随着振幅的增加，摩擦时间达到平稳状态，再增加振动幅值对摩擦时间影响较小。图 6c 为不同焊接摩擦压力下焊接摩擦时间，摩擦压力从 32 MPa 升高到 96 MPa，焊接摩擦时间由 1.5 s 降低到 0.8 s，随着摩擦压力的增加，焊

接热输入增加，达到预设缩短量的时间减少，摩擦压力对实际摩擦时间的影响较焊接频率及振幅小。上述结果可以得到，当其他焊接工艺参数不变时，高频、高振幅、高的摩擦压力下均可以大大地提高焊接界面热输入，能够在较短时间内得到良好的焊接接头。焊接摩擦时间与热输入量呈反比，随着单一焊接工艺参数的提高，热输入量迅速升高，导致实际摩擦时间逐渐降低。

2.4 TC17(α+β 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦焊接头显微组织分析

图 7 为 TC17(α+β 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦焊接头不同区域显微组织形貌。TC17(α+β 锻)/TC17(β

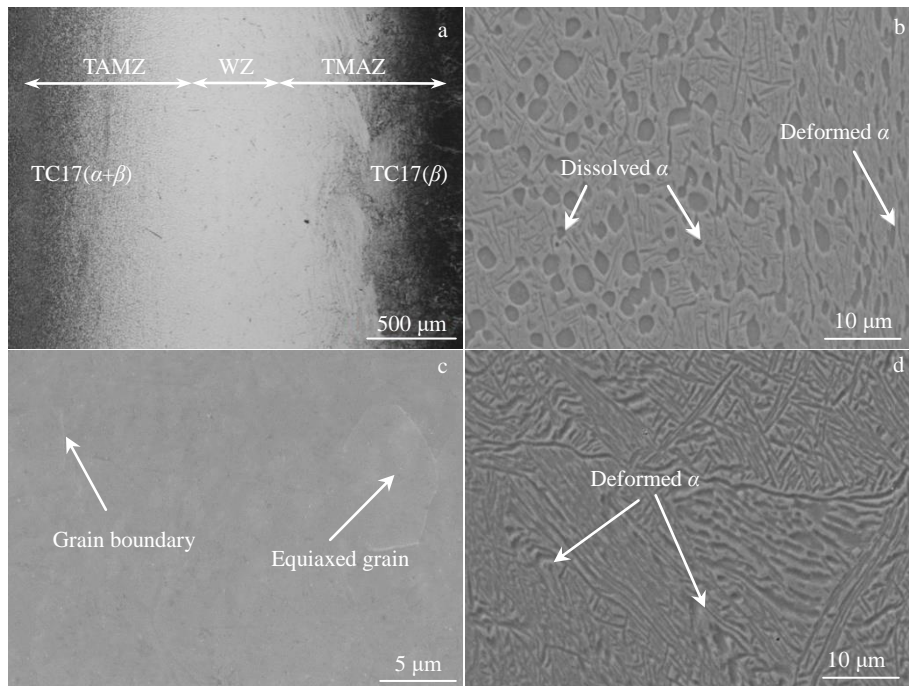


图 7 TC17(α+β)/TC17(β)线性摩擦焊接头不同区域显微组织

Fig.7 Microstructures of TC17(α+β)/TC17(β) LFWed joint: (a) OM image; (b) TC17(α+β)-TMAZ; (c) WZ; (d) TC17(β)-TMAZ

锻)钛合金线性摩擦焊接头明显分为两侧 TC17 母材区 (base material, BM), 两侧热力影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)及焊缝区(weld zone, WZ) 5 个区域, 如图 7a 所示。在光学显微镜下, 与异种材料及异种钛合金线性摩擦焊接头不同的是^[13,22], 接头焊接界面不明显, 焊缝区难以腐蚀, 只能看到亮白色区域, 无法观察到焊缝区组织形貌。和 Ti-6Al-4V 钛合金线性摩擦焊接头相比较^[9,15], Ti-6Al-4V 钛合金接头焊缝区发生相变及动态再结晶, 焊后形成超细等轴的初生 β 晶粒, 晶粒内部析出非常细小的针状 α 相。而 TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦焊接头焊缝区同样发生相变及动态再结晶过程, 但接头焊缝区域宽度较宽, 焊后形成细小的等轴亚稳定 β 相, 仅有非常少量的 α 相在晶界处析出形成, 如图 7c 所示。存在这种明显差异的主要原因是由于 TC4 钛合金相变温度较高(约 1000 °C), TC17 钛合金相变温度点只有 900 °C 左右, 并且 TC17 钛合金中 β 稳定元素含量较高, 同时线性摩擦焊接过程中升温 and 降温速率非常快, 接头区域在高温停留时间较短, 因此焊后 α 相来不及析出, 最终以亚稳定 β 相的形式保留至室温。两侧热力影响区焊接过程中温度处于 $\alpha+\beta$ 两相区, 没有发生相变, 仅发生了部分动态再结晶。TC17($\alpha+\beta$ 锻)侧热力影响区由于受到振动方向剪切力的作用, 等轴 α 相被拉长变成细条状, 等轴 α 相边缘受到温度的影响发生溶解, 晶粒体积变小, 焊后等轴/板条状 α 相之间的次生针状 α 相完全消失, 如图 7b 所示。TC17(β 锻)钛合金侧热力影响区板条状 α 相在剪切力的作用下沿着振动方向重新排列呈纤维状, 部分初生 α 相出现扭曲、折断、球化的现象。板条/板条状之间的次生针状 α 相同样在焊接过程中溶解消失, 如图 7d 所示。由上述可知, TC17($\alpha+\beta$ 锻)/TC17(β 锻)钛合金线性摩擦焊接头不同区域显微组织存在明显的差异。

3 结 论

1) 线性摩擦焊过程中改变工艺参数, 主要是通过影响焊接热输入的大小来影响接头的质量。只有热输入量达到一定值以上, 才能得到良好的焊接接头。

2) 当振幅为 1 mm 时, 焊接热输入严重不足, 不能得到良好的焊接接头, 但焊接界面温度可以达到 TC17 钛合金 β 相转变温度附近, 焊接接头变形区域狭窄, 并且焊缝中心残留氧化物。

3) 当其他焊接参数不变时, 随着某单一焊接参数的增加, 焊接过程中的热输入量迅速升高, 当该参数达到一定数值时, 焊接过程达到稳定状态, 焊接工艺参数对焊接过程及接头的的影响非常小。

4) TC17 钛合金线性摩擦焊接头明显分为焊缝区、

两侧热力影响区及两侧母材区 5 个区域, 焊缝区域形成亚稳定 β 单相区, 两侧热力影响区受到振动剪切力及摩擦变形热的影响显微组织发生严重变形。

参考文献 References

- [1] Ji Yajuan(季亚娟), Liu Yanbing(刘燕冰), Zhang Tiancang(张田仓) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2012, 33(10): 109
- [2] Qin Chun(秦 春), Yao Zekun(姚泽坤), Zhang Dongya(张东亚) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(4): 122
- [3] Cai Jianming(蔡建明), Tian Feng(田 丰), Liu Dong(刘 东) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2018, 46(5): 40
- [4] Wu Yan(吴 言), Xue Pengju(薛鹏举), Wei Qingsong(魏青松) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(2): 360
- [5] Zhang Xueqiu(张学秋). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
- [6] Chu Y D, Li J S, Zhu L et al. *Intermetallics*[J], 2017, 90: 119
- [7] Karadge M, Preuss M, Lovell C et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 459(1-2): 182
- [8] Vairis A, Frost M. *Wear*[J], 1998, 217(1): 117
- [9] Zhang Tiancang(张田仓), Li Jing(李 晶), Ji Yajuan(季亚娟) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2010, 31(2): 53
- [10] Vairis A, Frost M. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 271(1-2): 477
- [11] Vairis A, Frost M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 292(1): 8
- [12] Masoumi F, Shahriari D, Monajati H et al. *Materials & Design*[J], 2019, 183: 108 117
- [13] Zhou Nan(周 楠), Qi Wenjun(戚文军), Song Dongfu(宋东福) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(5): 1255
- [14] Li Ju(李 菊), Zhang Tiancang(张田仓), Guo Delun(郭德伦). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2018, 39(5): 97
- [15] Wanjara P, Jahazi M. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2005, 36(8): 2149
- [16] Dalgaard E, Wanjara P, Gholipour J et al. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(2): 770
- [17] Ma Tiejun(马铁军), Zhang Xiaoqiang(张晓强), Zhang Xuejun(张学军) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2013, 33(6): 33
- [18] Fratini L, Buffa G, Cammalleri M et al. *CIRP Annals*[J], 2013,

- 62(1): 295
- [19] Ma Tiejun(马铁军), Yang Siqian(杨思乾), Zhang Yong(张 勇) *et al. Hot Working Technology(热加工技术)*[J], 2007, 36(11): 19
- [20] Smith M, Bichler L, Gholipour J *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 90(5-8): 1931
- [21] Wanjara P, Dalgaard E, Gholipour J *et al. Materials Science Forum*[J], 2012, 706: 3022
- [22] Zhang Chuanchen(张传臣), Huang Jihua(黄继华), Zhang Tiancang(张田仓) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2012, 33(4): 101

Study on Linear Friction Welding Process and Microstructure Analysis of TC17 Titanium Alloy

Li Ju^{1,2}, Chang Chuanchuan^{1,2}, Li Xiaohong^{1,2}, Tao Jun^{1,2}, Zhang Chuanchen^{1,2}

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

(2. Beijing Friction Welding Technology and Equipment Engineering Center, Beijing 100024, China)

Abstract: Linear friction welding behavior of TC17($\alpha+\beta$)/TC17(β) was investigated by several different processing conditions of frequency (20~50 Hz), amplitude (1~4 mm), friction pressure (32~96 MPa). The influences of different welding parameters on the quality of LFWed joints and the microstructure of different regions of joints were analyzed. The results show that when the heat input is insufficient, a good welding joint can not be obtained. When other welding parameters remain unchanged, with the increase of single parameter, the heat input increases rapidly, the welding process reaches a stable state, and the influences of parameters on the welding process and joint quality are small. It is observed that phase transition and dynamic recrystallization occur in the weld region during the welding process, and finally a metastable β phase forms after welding. The equiaxed and lath α phase are elongated along the vibration direction, and the intergranular needle-like secondary α phase is completely dissolved in both sides of the thermo-mechanically affected zone because of undergoing thermal coupling.

Key words: TC17 titanium alloy; linear friction weld; process parameter; microstructure

Corresponding author: Chang Chuanchuan, Master, Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, P. R. China, E-mail: changcc_nuaa@163.com