

钛合金线性摩擦焊接头焊接缺陷分析

常川川, 李 菊, 李晓红

(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 北京市摩擦焊接工艺与装备工程中心, 北京 100024)

摘 要: 选用几种不同工艺参数对 TC17 钛合金进行线性摩擦焊实验。采用填埋热电偶的方法测量焊接过程中界面温度, 运用光学显微镜、扫描电子显微镜等测试手段对接头焊接缺陷进行深入分析, 利用显微硬度仪测量了振幅 $a=1\text{ mm}$ 和 $a=3\text{ mm}$ 下接头的显微硬度分布。研究表明: 当振幅 $a=1\text{ mm}$ 时, 焊接过程中热输入严重不足, 无法得到良好的焊接接头, 焊接过程中界面最高温度仅达到相变点附近, 而采用 $a=3\text{ mm}$ 焊接时, 界面温度可以达到 $1170\text{ }^\circ\text{C}$ 。振幅 $a=1\text{ mm}$ 得到的 TC17($\alpha+\beta$)/TC17(β) 钛合金线性摩擦焊接头界面会出现孔洞、磨损颗粒、氧化物及夹杂、局部未焊合等焊接缺陷。显微硬度测试结果表明: 在 $a=3\text{ mm}$ 参数下接头焊缝中心显微硬度最低, 相反, 残留氧化物及夹杂的存在使得在振幅 $a=1\text{ mm}$ 时得到的接头焊缝中心显微硬度达到最大。

关键词: TC17 钛合金; 线性摩擦焊; 微观组织; 焊接缺陷; 显微硬度

中图分类号: TG146.23; TG453⁺.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)10-3771-06

钛及钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好等优点, 近年来被广泛地应用于航空航天、汽车等领域^[1,2]。然而 Ti 元素比较活泼, 高温下极易受到氧及氮元素的污染, 因此在焊接钛合金时, 需要有惰性气体或者真空环境保护, 目前焊接钛合金主要有钎焊、高能束流焊接、线性摩擦焊等方法^[3-5]。

线性摩擦焊是 20 世纪末由惯性摩擦焊衍生出的新型固相连接技术。其焊接原理是: 振动工件在垂直方向上高频振动, 顶锻工件在水平方向顶锻力的作用下, 两工件接触做相互往复运动, 界面在高频摩擦下产生热量, 温度升高, 界面附近金属材料发生剧烈的塑性变形直至软化, 当达到一定缩短量后, 振动立刻停止, 对齐回到焊接零点, 施加顶锻压力保压一定时间, 两工件连接为一体, 完成焊接过程^[5-10]。由于线性摩擦焊自身的工艺特点, 焊后接头形成锻造组织, 不会出现熔化焊存在的缩孔、夹杂、气孔等凝固缺陷, 焊后接头热影响区狭窄, 同时焊接过程中不需要真空环境保护, 具有自清理的作用, 绿色环保无污染。钛合金元素活泼并且合金热传导速率较低, 因此线性摩擦焊技术是为钛合金量身定做的成型技术。线性摩擦焊鉴于其独特的工艺特点已经成为航空发动机整体叶盘结构制造及叶片修复的关键技术之一。

线性摩擦焊问世以来得到了飞速发展, 各国研究机

构对不同牌号钛合金、镍基高温合金及铝合金等金属做了大量的基础研究^[11-16]。并且线性摩擦焊技术已经成功地应用于航空发动机整体叶盘的制造。但现有的资料中, 主要针对接头组织演变规律、接头工艺参数与力学性能之间的关系进行分析, 鲜有对钛合金线性摩擦焊接头焊接缺陷的研究。

TC17 钛合金是一种富 β 稳定元素的过渡型 $\alpha+\beta$ 两相钛合金, 名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (质量分数, %), 其强度高、断裂韧性好、淬透深度大、锻造温度范围宽, 能够满足损伤容限设计的需要和高结构效益, 高可靠性的要求, 目前已经广泛应用于航空发动机的涡轮盘、鼓筒及压气机叶片等零部件^[17,18]。本研究选用 4 种不同焊接工艺参数, 针对 TC17 钛合金整体叶盘结构进行线性摩擦焊试验, 分析当热输入不足时出现的常见典型焊接缺陷, 对比了 2 种不同工艺参数下焊接得到的接头之间的差异, 为今后 TC17 同质异态钛合金线性摩擦焊接头缺陷分析及缺陷控制方面提供一定的理论参考依据。

1 实 验

实验选用的材料是由 2 种不同温度下锻造得到的 TC17($\alpha+\beta$ 锻)和 TC17(β 锻)钛合金锻件 (简称为 TC17($\alpha+\beta$)和 TC17(β)), 其主要化学成分如表 1 所示。

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-VII-0005-0098); 国防基础科研计划 (JCKY2018205B026)

作者简介: 常川川, 男, 1994 年生, 硕士, 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: 1137421580@qq.com

表 1 TC17 钛合金主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of TC17 titanium alloys (wt%)

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.

本实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进行,采用几种不同焊接参数对 TC17($\alpha+\beta$)和 TC17(β)钛合金进行线性摩擦焊实验,焊接工艺参数如表 2 所示。根据之前的实验积累,在顶锻端实际缩短量内埋热电偶,当焊接摩擦界面接触到热电偶时,测量焊接过程中界面附近金属温度分布情况。焊接前将 TC17($\alpha+\beta$)、TC17(β)钛合金试件分别安装在线性摩擦焊设备振动端和顶锻端一侧,焊前用乙醇或丙酮擦拭两工件接触面。焊后使用线切割设备将焊后形成的飞边去除,截取金相试样并依次经过打磨、抛光及腐蚀(腐蚀液选用 Kroll 试剂(体积比 $H_2O:HF:HNO_3=17:1:2$)),进行显微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。运用 EDS 手段测量焊缝区域微观区域元素分布情况。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 2.94 N,保压时间为 10 s。

2 结果与讨论

固相焊接接头不会产生类似于传统熔化焊出现的气孔、缩松、偏析等凝固缺陷,一般只有当焊接热输入不足时,接头会出现未焊合或者接头四周拐角局部未连接的现象。图 1 所示为不同焊接参数下线性摩擦焊得到的接头宏观形貌。振幅 $a=1$ mm 时,得到的焊接接头仅在接头中心处有少量飞边挤出,两端均没有飞边形成,表明该焊接工艺参数下,接头无法得到可靠的连接;当振幅 $a \geq 2$ mm 时,得到的焊接接头四周飞边均匀挤出,飞边连续,表面呈波纹状,没有宏观的焊接缺陷,焊接实

际缩短量相差不大。线性摩擦焊接头质量主要受到焊接过程中产生热输入大小的影响,焊接界面的热输入量 PI 如式(1)所示^[19]:

$$PI = \frac{afP}{2\pi A} \tag{1}$$

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。

焊接热输入与振幅成正比,当振幅较小时,焊接热输入不足以使得接头界面附近金属发生较大的塑性变形,因此仅有中心温度较高的区域会有少量的金属被挤出形成飞边。以下针对 $a=1$ mm 和 $a=3$ mm 2 种参数下得到的接头进行深入分析。

2.1 TC17($\alpha+\beta$)/TC17(β)钛合金线性摩擦焊接过程中温度测量

为了获取 $a=1$ mm 和 $a=3$ mm 2 种不同焊接工艺参数下焊接过程中界面最高温度,根据图 1 所示 2 种焊接参数得到的接头实际缩短量选择合适的测温点埋热电偶,埋埋位置如图 2 所示(1、2、3,3 个测量位置分别距离焊接接触面 3.5、0.5、1 mm,其中点 1 测量焊接参数 $a=3$ mm 时的焊接界面温度,点 2、3 测量 $a=1$ mm 时的焊接界面温度)。需要保证测温点在 TC17 钛合金缩短量范围之内,才能准确地获得焊接过程中界面处最高温度值,焊后得到的测温结果如图 3 所示。热电偶记录了 TC17 钛合金线性摩擦焊接过程中界面温度的变化, $a=3$ mm 时,界面最高温度可以达到 1170 °C,远远超过了 2 种 TC17 钛合金材料的相变温度,并且根据测温得到的曲线可以看出焊后冷却速率非常快。而振幅 $a=1$ mm 时,由于焊接实际缩短量非常小,尽管埋埋位置距焊缝中心只有 0.5 mm,但是焊接过程中并没有测量出实际焊接界面的温度,焊后热电偶残留在接头中心挤出飞边根部。由测温结果可以看出,距离端面 0.5 mm 处焊接过程中最高可以达到 880 °C,可以推测出焊接过程中界面中心处温度可以达到相变点附近,而距离摩擦界面距离为 1 mm 时,监测到最高温度只有 460 °C。

2.2 不同焊接工艺参数下接头显微组织形貌

图 4 所示为 2 种焊接工艺参数下焊接接头的光学显

表 2 线性摩擦焊焊接工艺参数

Table 2 Linear Friction Welding (LFW) welding process parameters

Process	Frequency, f /Hz	Amplitude, a /mm	Friction pressure, P /MPa	Forge pressure, P /MPa
LFW-1	40	1	72	72
LFW-2	40	2	72	72
LFW-3	40	3	72	72
LFW-4	40	4	72	72

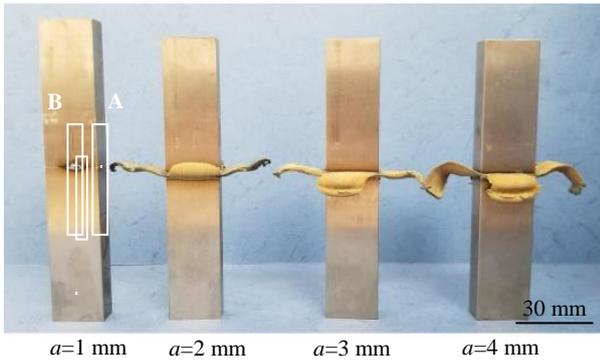


图 1 不同参数下焊接得到的接头宏观照片

Fig.1 Macro photographs of joints under several different welding parameters

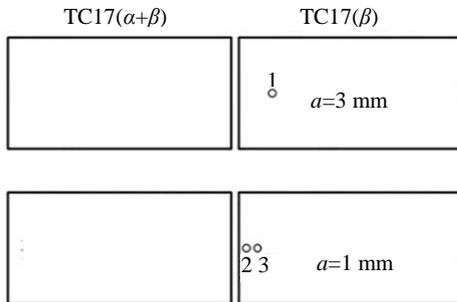


图 2 2 种工艺参数下热电偶埋置位置

Fig.2 Embedded position of thermal couples under two welding parameters

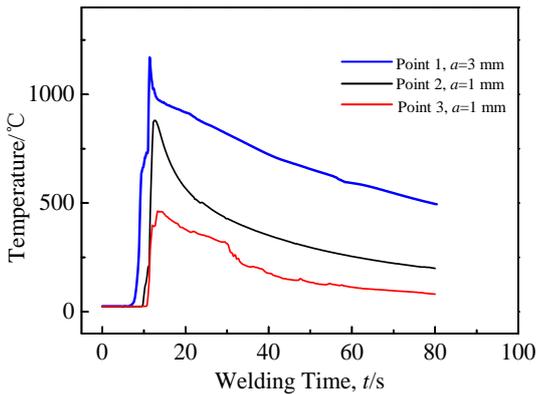


图 3 2 种焊接工艺参数下温度曲线

Fig.3 Temperature curves of joints under two weld parameters

微照片。振幅 $a=3\text{ mm}$ 时，接头明显分为焊缝区、热力影响区和母材区。焊缝区域较难腐蚀，呈现亮白色带状。这是由于焊接过程中界面温度达到相变温度以上，焊后形成了 β 单相区，整个焊接过程经历的时间较短， α 相

无法在接头焊缝处析出，最终在界面呈现亮白色区域。由金相法可以测量出接头变形区域达到 5 mm 以上，焊缝区域宽度约为 1 mm ，两侧热力影响区由于热力耦合的作用，发生了严重的塑性变形，晶粒沿着振动方向不同程度被拉长，并且随着向母材一侧靠近，接头变形程度逐渐降低，焊接过程中受到热和力的影响逐渐降低。而振幅 $a=1\text{ mm}$ 得到的接头只有中心区域局部连接。在中心区域截取金相试样，金相法测量得到接头变形区域仅不到 1 mm ，焊缝区与两侧母材分界线较明显。接头分为焊缝区及热影响区，放大后可以看出，焊缝中心存在漩涡状的带状组织。这是由于焊接过程中，热输入严重不足，无法使得界面附近金属完全达到粘塑性的状态，金属变形能力较差，挤出飞边量非常小，氧化物及夹杂残留在焊缝中心，同时振动幅值较小，因此在焊缝中心形成连续的带状组织。由图 4c 可以看出，虽然没有得到良好的焊接接头，但是接头连接的部位界面温度仍然可以达到相变点以上，变形区主要以相变区域为主，TC17 钛合金强度较高，两侧热影响区受到剪切力的作用较小，仅受到热的影响，次生 α 相溶解，因此接头热力影响区域宽度可以忽略不计。上述表明，该参数下焊接过程中接头热输入严重不足，无法获得良好的焊接接头。只有当热输入量达到临界值以上时，接头界面附近区域才能发生形变，以达到焊接过程需要的粘塑性状态。对比 2 种焊接参数下的金相组织，可以发现，在振幅 $a=1\text{ mm}$ 参数下接头焊接过程中没有发生动态再结晶，因此焊后在界面附近，必然存在大量微观的点、线、面缺陷。

2.3 TC17($\alpha+\beta$)/TC17(β) 钛合金线性摩擦焊接头典型微观焊接缺陷

对 $a=1\text{ mm}$ 得到的接头进行焊接缺陷分析，分别在接头端部与焊缝中心选取 2 个位置截取金相试样进行焊接缺陷分析，取样位置如图 1 中 A、B 所示。图 5 所示为接头 A 区焊接接触表面。可以看出，A 区域完全没有连接，表面有大量粗糙的摩擦痕迹，表明焊接过程中接触面表面只发生了简单的干摩擦，没有发生塑性变形。主要是由于振幅较小，焊接界面产生的热输入量较小，同时两工件在做线性往复运动时，两端会暴露在空气中，摩擦焊产生的热量迅速向空气中辐射，并不足以使得界面附近发生塑性变形，导致焊缝端部区域完全没有连接。Vairis 等人^[10]在文献中说明，当焊接热输入不足时，会导致摩擦界面不会达到 100% 的接触，过渡阶段将不会出现，因此不会得到良好的线性摩擦焊接头。

图 6 所示为 $a=1\text{ mm}$ 下接头中心 B 区域截取的金相试样不同位置下的显微组织形貌。沿着焊缝从端部向焊缝中心选取 5 个不同的区域进行观察，具体位置如图 6a 所示。图 6b 为焊接接头端部，靠近端部区域有较多孔洞

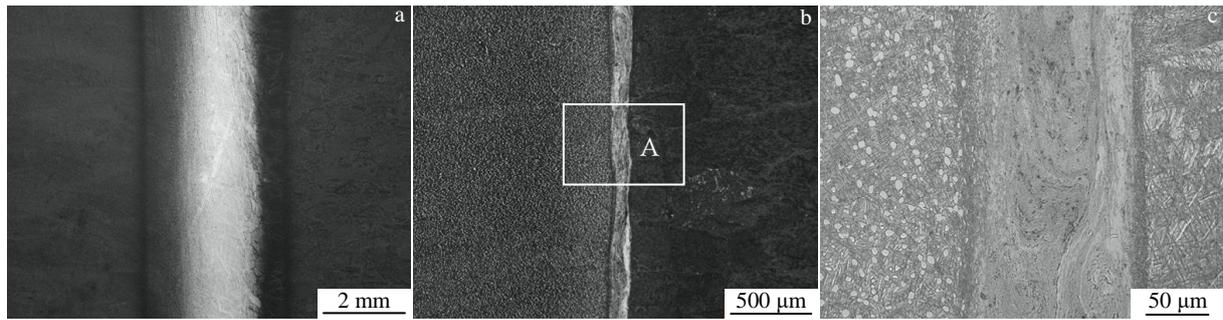


图 4 2 种焊接工艺参数下接头的光学显微镜形貌

Fig.4 OM morphologies of joints under two welding parameters: (a) $a=3$ mm, (b) $a=1$ mm, (c) high magnification of area A marked in Fig.4b

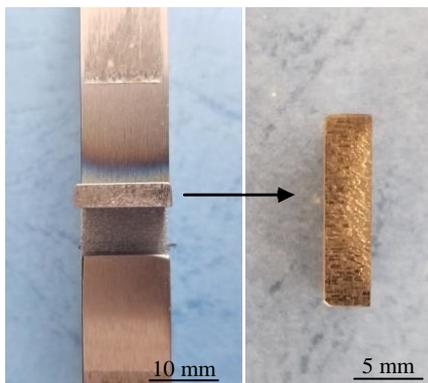


图 5 图 1 中 A 区的接头端部未焊合区域接触表面

Fig.5 Area A contact surface of the end of joint in Fig.1 ($a=1$ mm)

及磨损颗粒。表明在该焊接条件下，焊接接头热输入严重不足，端部区域只发生了干摩擦，界面附近金属没有发生塑性变形使得金属软化，摩擦阶段产生的磨损颗粒没有被挤出摩擦界面，随后在顶锻力的作用下被残留在焊缝中心；如图 6c 所示，向焊缝中心靠近，可以看见仍然有焊接孔洞残留在焊接界面。由图 6 可以看出，随着向焊缝中心靠近，界面附近金属发生塑性变形区域增加，实际焊接结合率逐渐升高。同时在焊缝中心区域同样存在少量局部未焊合缺陷，如图 6d、6e 所示，主要是由于接头界面温度较低，不足以使得焊接界面附近金属达到粘塑性状态，局部无法实现良好的结合，也无法通过形成飞边挤出，最终残留在焊接界面。

从测温结果可以看出，钛合金线性摩擦焊过程中界面温度可以达到 1200 °C 左右，摩擦过程中接触表面金属必然会被氧化，鉴于线性摩擦焊自身的自清理能力，在线性往复及顶锻力的作用下，表面氧化形成的氧化物、本身的氧化膜及未清理干净杂质会随着产生的塑性金属层被挤出形成飞边，因此不需要焊前打磨焊接表面来去除氧化层。但是当振幅为 1 mm 时，由于振幅较低，热输入不足以使得界面附近形成较多的塑性金属层，

焊后仅在焊缝中心处有非常少的飞边挤出，导致焊接过程中焊接表面产生的氧化物、氧化膜及未清理的夹杂残留在焊接界面附近，分别如图 6d、6e、6f 所示。通过采用 EDS 的测试手段，对接头 D 区域焊缝中心点 1、2 进行成分分析，结果见表 3 所示。可以看出，接头连接界面被严重氧化，氧化层的宽度约 100 μm，如图 6e 所示。Wanjara 在文献[20]中报道，当焊接热输入较低时（焊接热输入低于 2.4 kW 时）在 Ti-6Al-4V 线性摩擦焊接头焊缝中心出现氧化物。随着靠近焊缝中心区域，飞边挤出量增加，氧化层厚度明显减少，如图 6f 所示，证明了线性摩擦焊过程中实际缩短量达到较小数值时就可以保证接头的自清理作用。

2.4 线性摩擦焊接头显微硬度分析

图 7 所示为 2 种焊接工艺参数下 TC17($\alpha+\beta$)/TC17(β) 钛合金线性摩擦焊接头显微硬度分布。TC17 钛合金相变温度为 890 °C，在振幅 $a=3$ mm 焊接参数下实际线性摩擦焊过程中界面温度远大于 β 转变温度，接头焊缝区发生了相变。并且由图 3 可以看出，焊接过程中升温及降温速率非常快，接头区域在高温停留的时间较短，因此焊后焊缝区域来不及析出 α 相，主要以亚稳态 β 相的形式保留在接头焊缝区域，缺少 α 相的钉扎作用，接头焊缝区域显微硬度显著下降，达到最低。随着向两侧母材靠近， α 相比比例越来越高，在位错滑移过程中起到钉扎作用，同时由于焊接过程中受到的剪切力作用，使得该区域得到形变强化，因此接头显微硬度明显较焊缝区高。Ji 等人^[21]发现，Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr 合金线性摩擦焊接头焊后在焊缝区域主要形成 β 相和亚稳态的 α' 相，焊态下接头焊缝区中心显微硬度值达到最小值；Dalggaard 等人^[8]发现，在 Ti5553 近 β 钛合金线性摩擦焊接头焊缝中心显微硬度值同样达到最小值。然而在 $a=1$ mm 参数下接头焊缝中心显微硬度达到最大值。这是由于当焊接热输入不足时，焊接过程中界面附近金属难以形成粘塑性金属层，几乎没有飞边形成，线性摩擦焊自清理的效果显著减弱，

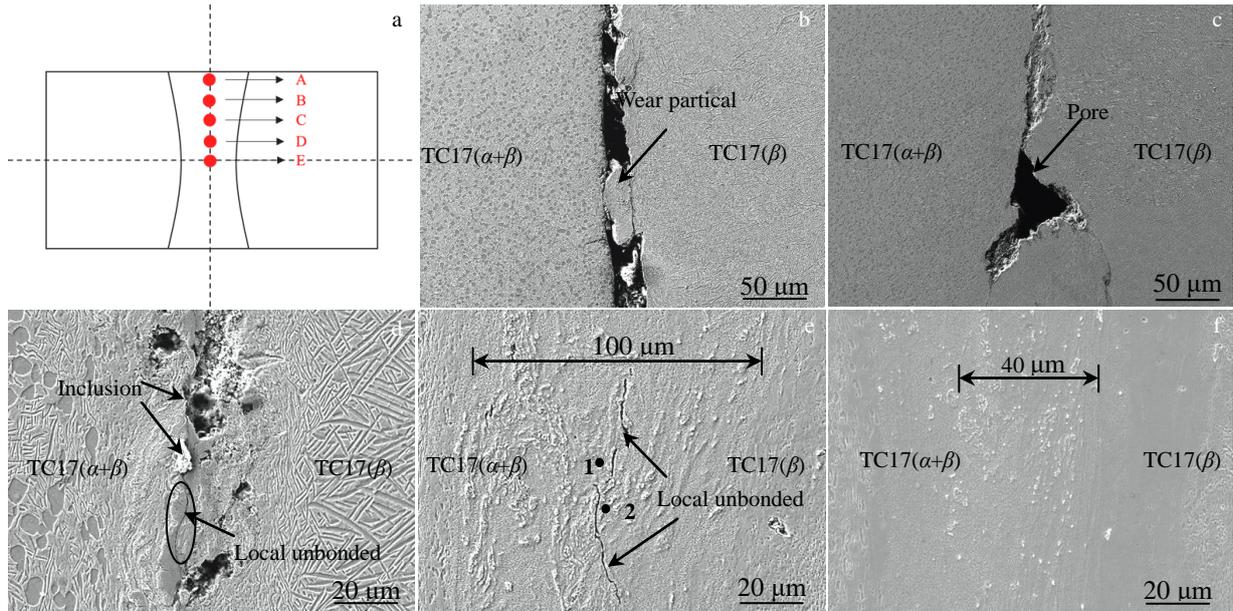


图 6 振幅 $a=1\text{ mm}$ 下接头中心区域微观缺陷

Fig.6 Micro-defects of the joint center with amplitude $a=1\text{ mm}$: (a) observation location; (b) area A; (c) area B; (d) area C; (e) area D; (f) area E

表 3 图 6e 中标识点 1, 2 的 EDS 分析结果

Table 3 EDS results of point 1, 2 marked in Fig.6e ($\omega/\%$)

Location	O	Al	Ti	Cr	Zr	Mo	Sn
Point 1	5.59	4.64	77.54	3.8	2.14	3.8	2.48
Point 2	12.09	4.34	71.83	3.18	-	4.03	4.53

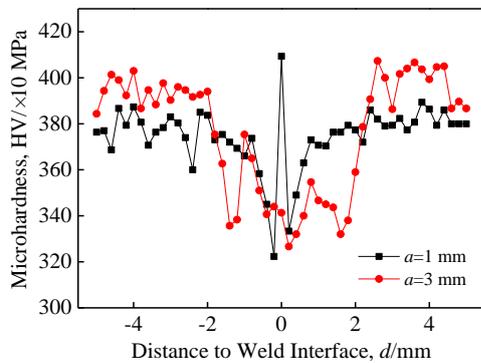


图 7 2 种焊接工艺参数下接头显微硬度分布

Fig.7 Micro-hardness distribution of the joints under two welding parameters

导致在焊接界面附近残留了一定厚度的氧化物及夹杂，显微硬度测试点正好打在界面氧化物及夹杂上，因此显微硬度呈现出最高的水平。随着远离焊缝中心，显微硬度先降低后逐渐升高。焊接过程中界面两侧温度处于 β 单相区，界面金属发生相变，形成亚稳态 β 相，致使显微硬度降低。随着远离焊缝中心，由于 α 相的钉扎作用，

显微硬度逐渐升高。显微硬度分布趋势与 $a=3\text{ mm}$ 得到的接头显微硬度分布相似。如图 7 所示，单侧热影响区的宽度约为 0.6 mm ，结合热电偶测温结果，测温点距焊接界面 1 mm 时，焊接过程中最高温度不到 $500\text{ }^\circ\text{C}$ ，对 TC17 钛合金几乎没有影响，与对应位置显微硬度结果吻合。

3 结论

1) 当振幅 $a=3\text{ mm}$ 时，焊接界面温度最高可以达到 $1170\text{ }^\circ\text{C}$ ，而 $a=1\text{ mm}$ 时，焊接过程中界面温度只能达到 TC17 钛合金相变温度附近，该参数下焊接过程中界面热输入严重不足。

2) 选用 $a=1\text{ mm}$ 时，焊接过程中由于热输入较低，不会形成良好的焊接接头。焊接接头焊缝中心变形区域不到 1 mm ，而 $a=3\text{ mm}$ 下接头变形区域可以达到 5 mm 以上。

3) 焊接热输入不足时，TC17($\alpha+\beta$)/TC17(β)钛合金线性摩擦焊接头会出现孔洞、残留磨损颗粒、残留氧化物及夹杂、局部未焊合等微观焊接缺陷。

4) $a=3\text{ mm}$ 时，TC17($\alpha+\beta$)/TC17(β)钛合金线性摩擦焊接头焊缝区形成亚稳定 β 相，由于没有析出相的钉扎

作用, 其显微硬度明显降低, 而 $a=1$ mm 时, 由于焊后焊缝中心残留的氧化物及夹杂使得显微硬度达到最大值。

参考文献 References

- [1] Leyens C, Peters M. Translated by Chen Zhenhua(陈振华). *Titanium and Titanium Alloys*(钛及钛合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005
- [2] Huang Xu(黄旭), Zhu Zhishou(朱知寿), Wang Honghong(王红红). *Advanced Aeronautical Titanium Alloys and Applications*(先进航空钛合金材料与应用)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012
- [3] Fan Jikang(范霁康), Qi Bojin(齐铂金), Li Xiaopeng(李晓鹏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(12): 4026
- [4] Wang Shiqing, Li Wenya, Jing Ke et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 697: 224
- [5] Choi J W, Aoki Y, Ushioda K et al. *Scripta Materialia*[J], 2021, 191: 12
- [6] Zhang Chuanchuan(张传臣), Zhang Tiancang(张田仓), Ji Yajuan(季亚娟) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2015, 43(11): 39
- [7] 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
- [8] Dalgaard E, Wanjara P, Gholipour J et al. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(2): 770
- [9] Vairis A, Frost M. *Wear*[J], 1998, 217(1): 117
- [10] Vairis A, Frost M. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 271(1-2): 477
- [11] Fratini L, Buffa G, Cammalleri M et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2013, 62(1): 295
- [12] Li Yanmo, Liu Xichen, Yu Liming et al. *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2018, 54(7): 981
- [13] Ma Tiejun(马铁军), Xiao Yao(肖遥), Li Wenya(李文亚) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2016, 37(11): 119
- [14] Lang Bo(郎波), Zhang Tiancang(张田仓), Tao Jun(陶军) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2012, 40(10): 43
- [15] Masoumi F, Shahriari D, Monajati H et al. *Materials & Design*[J], 2019, 183: 108
- [16] Chang Chuanchuan(常川川), Zhang Tiancang(张田仓), Li Ju(李菊). *Transactions of The China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(3): 140
- [17] Li Xiaohong(李晓红), Zhang Yanhua(张彦华), Li Zan(李赞) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2020, 48(1): 115
- [18] Sun Xiaomin(孙晓敏), Liu Dong(刘栋), Tang Haibo(汤海波) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(4): 724
- [19] Vairis A, Frost M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 292(1): 8
- [20] Wanjara P, Jahazi M. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2005, 36(8): 2149
- [21] Ji Yingping, Chai Zhenzhen, Zhao Dalong et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(4): 979

Analysis of Typical Welding Defects of Titanium Alloy Linear Friction Welding Joint

Chang Chuanchuan, Li Ju, Li Xiaohong

(Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, Beijing Friction Welding Technology and Equipment Engineering Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: The linear friction welding experiment was carried out on TC17 titanium alloy by several different welding parameters. The distribution of the interface temperature during the welding process was measured by embedding the thermal couple, and OM and SEM technology was applied to analyze the typical welding defects of the joint, the distribution of the joints' microhardness under $a=1$ mm and $a=3$ mm was measured. The results show that a sound welded joint cannot be obtained on account of the insufficient heat input in $a=1$ mm. The interface temperature could reach only around the phase transition point in a lower amplitude, however, it can reach up to 1170 °C under $a=3$ mm. Additionally, there are welding defects at the interface, such as holes, residual wear particles, oxide layers and inclusions, local unbonded, at $a=1$ mm. The result of the micro-hardness test shows that the microhardness of the joint weld center under $a=3$ mm is the lowest, whereas it reaches the maximum value under $a=1$ mm due to the presence of residual oxides and inclusions.

Key words: TC17 titanium; linear friction welding; microstructure; welding defect; microhardness

Corresponding author: Li Ju, Master, Senior Engineer, Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701343, E-mail: hfutlju@163.com