

陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室 20 周年专辑

焊前及焊后热处理对 TC11 钛合金线性摩擦焊接头组织性能的影响

王新宇, 李文亚, 马铁军, 杨夏炜

(西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究焊前及焊后热处理 (950 °C+1 h+AC/540 °C+6 h+AC) 对 TC11 钛合金线性摩擦焊接头组织演变和力学性能的影响。**方法** 采用光镜、扫描电镜、显微硬度及拉伸试验对不同热处理条件下的接头进行了组织分析和力学性能测试。**结果** 金相结果表明, 焊前热处理对焊接过程中接头的组织演变影响较小。在焊态和焊前热处理接头的焊接中心区域 (WCZ) 观察到类似的马氏体组织, 但明显的热影响区域只能在焊前热处理接头中找到。焊后热处理后, WCZ 中的马氏体组织转变为篮筐组织, 热力影响区 (TMAZ) 的初生 α 和转变 β 晶粒均有一定程度的长大。力学性能结果表明, 焊前热处理可以提高整个接头的显微硬度, 但硬度分布趋势与焊态接头的分布趋势相似。**结论** 焊后热处理可以降低 WCZ 和 TMAZ 的显微硬度, 但母材的显微硬度有所提高。焊前和焊后热处理都可以提高接头抗拉强度, 但会降低接头伸长率, 特别是在焊前热处理条件下。

关键词: 线性摩擦焊; 钛合金; 热处理; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.001

中图分类号: TG406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0001-07

Effects of Pre- and Post-weld Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties of Linear Friction Welded TC11 Titanium Alloy Joints

WANG Xin-yu, LI Wen-ya, MA Tie-jun, YANG Xia-wei

(Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the effects of pre- and post-weld heat treatments (950 °C+1 h+AC/540 °C+6 h+AC) on the microstructure evolution and mechanical properties of linear friction welded TC11 titanium alloy joints. Optical microscope, scanning electron microscope microhardness test and tensile test were adopted for structure analysis and mechanical property test of joints under different heat treatment conditions. The metallographic results indicated that the pre-weld heat treatment had a less effect on the microstructure evolution of joint during the welding process. A similar martensite microstructure was observed at the weld center zone (WCZ) in both the as-welded (non-heat-treated) and pre-weld heat-treated joints, but an obvious heat affected zone can only be found in the pre-weld heat-treated joint. After post-weld heat treatment, the martensite microstructure in WCZ transformed to basket-weave structure, and both primary α and transformed β grains in thermomechanically affected zone (TMAZ) grew to some extent. Mechanical properties results showed that pre-weld heat treatment can improve the microhardness in the whole joint, but the distribution tendency

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51675435)

作者简介: 王新宇 (1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为钛合金的线性摩擦焊接。

通讯作者: 李文亚 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为冷喷涂和摩擦焊接。

was similar to that in the as-welded joint. Post-weld heat treatment can reduce the microhardness in WCZ and TMAZ, but lightly increase the microhardness in base material. Both pre- and post-weld heat treatments can improve the tensile strength, but reduce the joint elongations, especially in the pre-weld heat-treated condition.

KEY WORDS: linear friction welding; titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

线性摩擦焊是一种固相焊接技术,通过两工件之间的摩擦产生热量将界面金属软化,并在轴向压力作用下实现焊合^[1-3]。焊接接头不会产生氧化、气孔等熔焊缺陷,其焊接工件运动方式的特殊性,使得该方法可以焊接复杂截面的焊件。近年来随着高推重比航空发动机的发展,线性摩擦焊已成为整体叶盘制造与维修的关键技术之一^[4-6]。

TC11 是一种马氏体型 $\alpha+\beta$ 双相钛合金,是仿照苏联 BT9 钛合金发展而来。在工作环境低于 500 °C 时具有较好的热强性能(高温强度、蠕变抗力等),同时室温强度较高。近年来,该合金逐渐替代 TC4 钛合金,用于飞机结构件以及航空发动机的鼓筒、叶片、压气机盘等零件中,其使用量在逐年上升^[7-8]。然而对于 TC11 钛合金的线性摩擦焊,目前的研究仍然较少。郎波等^[9]研究了焊态 TC11 钛合金的组织特征,发现焊缝区和飞边组织均发生了动态再结晶,而热力影响区并未发生动态再结晶。李文亚等^[10]在对 TC11 钛合金进行线性摩擦焊试验时发现,当焊接热输入不足时,焊缝区将会出现球状的 α 相组织,该组织会严重降低接头的力学性能,并且无法通过焊后热处理完全消除。

钛合金在不同的加热和冷却速度下会发生不同

的组织转变,得到性能各异的显微组织^[11-12]。考虑到整体叶盘制造及修复过程会涉及到热处理这一工序,文中就热处理顺序对于 TC11 钛合金线性摩擦焊接头的组织性能开展了试验研究。

1 材料与方法

选用材料为国产的 TC11 钛合金,其化学成分如表 1 所示。TC11 母材金相组织如图 1 所示,为典型的双态组织: β 转基体上分布着不连续的初生 α (α 初+针状 $\alpha+\beta$),其中 α 相有两种形态,一种为等轴的初生 α 相(含量不超过 50%),另一种为转变 β 组织中的层片状 α 相。

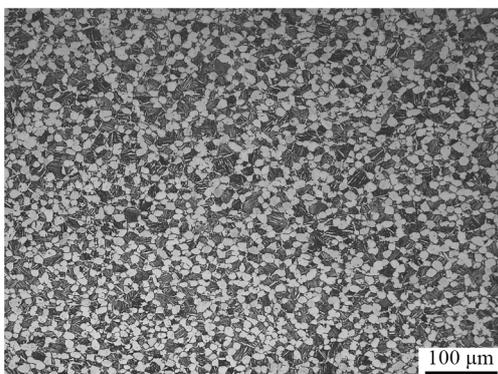
试件的焊接试验在自制的 XMH-250 型线性摩擦焊机上进行。焊接试样尺寸为 15 mm×30 mm×70mm。考虑到 TC11 钛合金的力学性能及热物理参数与 TC4 比较接近,故在先期进行的 TC4 线性摩擦焊工艺试验^[13]的基础上,经过工艺试验确定了表 2 所示的 TC11 焊接参数,获得了焊合率 100%的焊接接头。

为研究热处理顺序对接头组织性能的影响,采用了相同的热处理工艺(950 °C+1 h+AC/540 °C+6 h+AC),

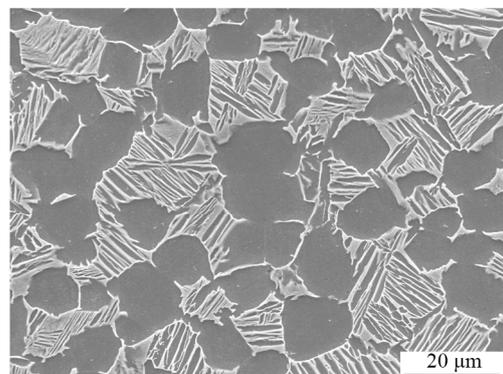
表 1 TC11 钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC11 titanium alloy

元素	Ti	Al	Mo	Zr	Si	O	Fe	C	N	H
质量分数/%	余量	6.51	3.51	1.58	0.27	0.1	0.072	0.012	0.013	0.0007



a 光镜图像



b 扫描电镜图像

图 1 TC11 母材组织

Fig.1 Microstructure of the TC11 base metal

表 2 TC11 钛合金线性摩擦焊接参数
Tab.2 LFW parameters of the TC11 titanium alloy

振动 频率/Hz	振幅/ mm	摩擦 压力/MPa	顶锻 压力/MPa	焊接 时间/s
25	2	45	90	4

仅改变了热处理顺序。设置了 3 组试样开展研究,其中 1#试样为焊前热处理试样,2#试样为焊态试样(不进行热处理),3#试样为焊后热处理试样。

对 3 组试样利用光镜(型号 OLYMPUS PMG3)和扫描电镜(型号 TESCAN MIRA3 XMU)开展了金相检测,并利用 Instron 3382 电子万能试验机开展了拉伸性能测试,利用 SHIMADZU HMV-G20 显微硬度计开展了显微硬度测试。

2 结果及分析

2.1 接头组织特征

图 2 为经过热处理后的母材组织,与初始母材相比,热处理态的母材晶粒尺寸明显减小,其中的二次 α 板条也更加细小。

3 种状态的焊接接头宏观组织形貌如图 3 所示。根据不同位置组织特征的差异,一般将 LFW 接头分为 3 个区域:焊缝区,热力影响区,母材区^[2]。部分文献中也会在热力影响区和母材区之间再划分出一个热影响区。本次试验中,同样将接头分为 4 个区域,但在较低的放大倍数下观察,仅有 1#试样可以观测到明显的热影响区,如图 3a 所示,而 2#和 3#试样的热影响区在当前倍数下并不能和母材有明显的区分,如图 3b 和 3c 所示。

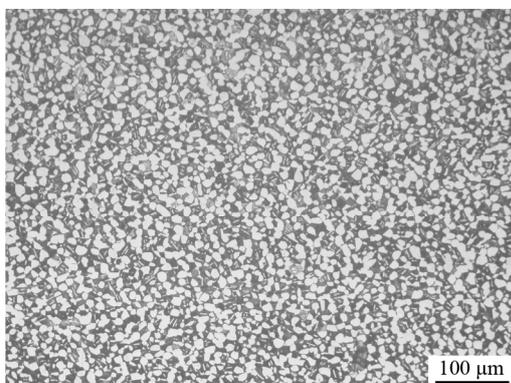
3 种状态的接头焊缝区组织如图 4 所示。可以看出,焊前热处理态和焊态接头的焊缝组织均为马氏体和针状 α 组织,如图 4a 和 4b 所示。此外,两种状态下的初生 α 晶粒已完全消失。焊缝区这种组织特

征表明在焊接过程中,该区域发生了完全的 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ 相变^[14]。与母材相比,焊缝中的初生 β 晶粒发生细化,平均尺寸约为 $8.4 \mu\text{m}$,晶界弯曲,表明焊缝中的 β 相在高应变速率和高温下经历了动态再结晶。

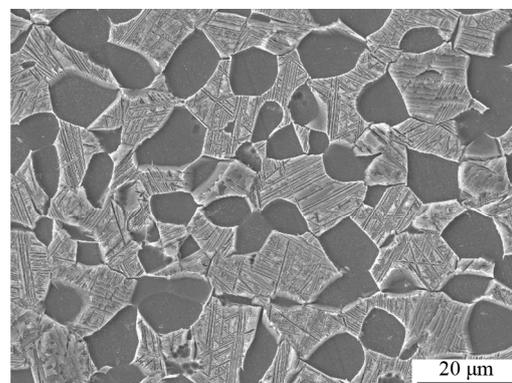
图 4c 显示了焊后热处理接头的焊缝区组织特征。与焊态及焊前热处理态相比,可以看出马氏体组织完全消失,只能清楚地识别出粗针状 α 板条和转变 β 相,并且晶界 α 相也发生了球化和粗化。这表明在焊后热处理过程中马氏体结构已转变为针状 α 相。

3 种状态的接头热力影响区组织如图 5 所示。该区域金属在低于相变点温度的条件下受到热力耦合作用,产生了剧烈的变形,从图 6 可以看出,TMAZ 中的晶粒沿焊接方向被拉长。由于在该区域中,温度仅略低于 β -转变温度,因此大多数初生 α 相将转变为 β 相,只有少数初生 α 晶粒能够保留下来。在较高温度下,残余的初生 α 相和 β 相的变形阻力均明显降低,因此发生了剧烈的变形。在冷却过程中,针状 α 板条从变形的 β 晶粒中沉淀出来,如图 5a 和 5b 所示。经历了焊后热处理后,变形的 α 晶粒和针状 α 板条的尺寸均有明显增加,变形的 α 和变形的 β 之间的边界变得清晰(见图 5c),与 3#试样焊缝区组织特征相似(见图 4c),但由于热力影响区温度较低,该区域中针状 α 板条的厚度比焊缝区的薄。

由于在光镜下无法观测到热影响区的组织特征,因此使用扫描电镜检测该区域微观结构变化,结果如图 6 所示。与母材相比,热影响区中的初生 α 晶粒几乎没有发生变化,但转化 β 相变化很大。从图 6a 和 6b 可以看出,层状次生 α 和 β 相之间的边界变得模糊,次生 α 的比例减少。这可归因于该区域中的温度引起的 β 稳定化元素的扩散。然而,在热处理之后,层状二级 α 和 β 相之间模糊的边界再次变得清晰,并且大部分层状次生 α 变得细小,伴随着一些大的 α 板条,其尺寸类似于母材中次生 α 的尺寸,如图 6c 所示。



a 光镜图像



b 扫描电镜图像

图 2 热处理态 TC11 母材组织

Fig.2 Microstructure of the TC11 base metal after heat treatment

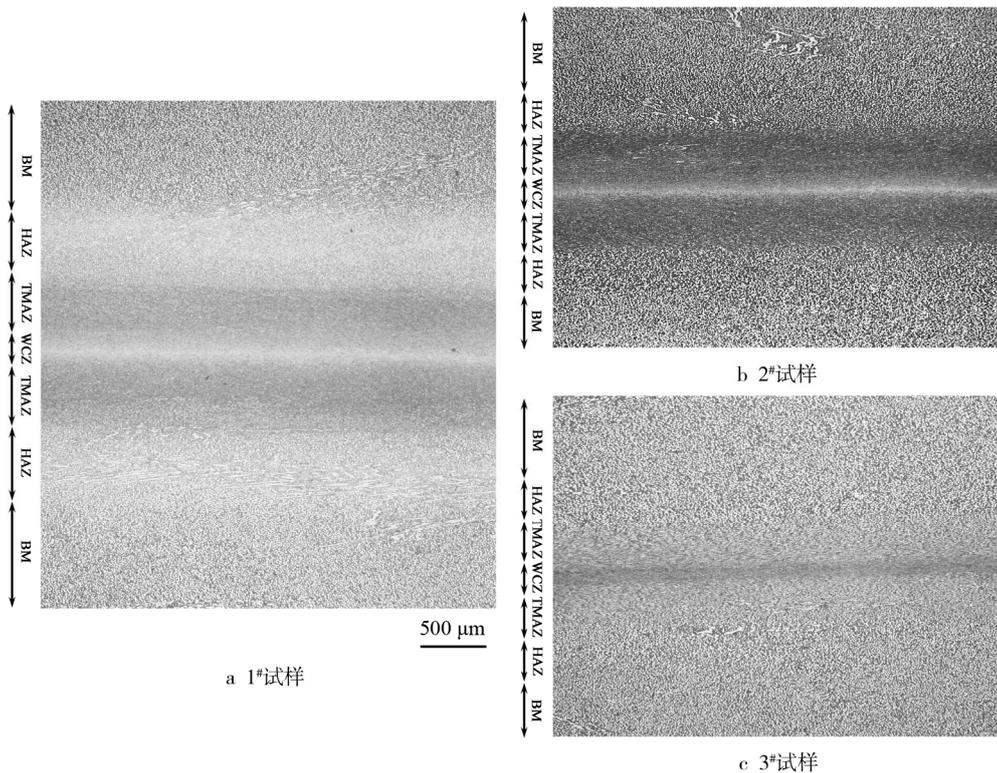


图3 接头宏观组织形貌
Fig.3 macrostructure of joints

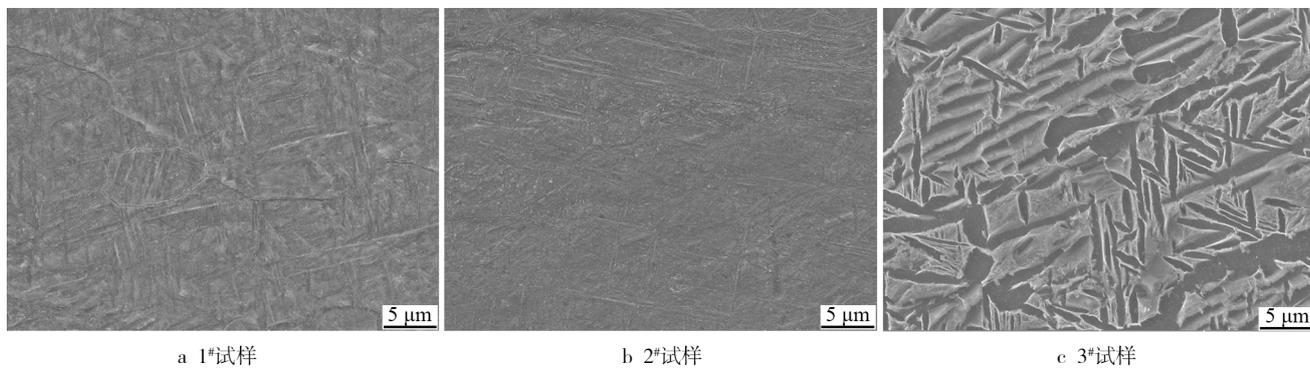


图4 接头焊缝区组织形貌
Fig.4 Microstructure in WCZ of joints

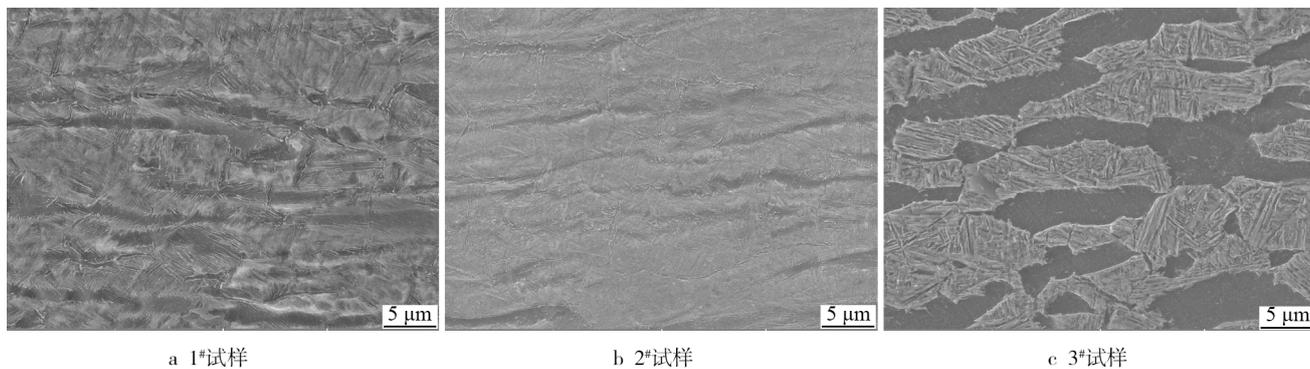


图5 接头热力影响区组织形貌
Fig.5 Microstructure in TMAZ of joints

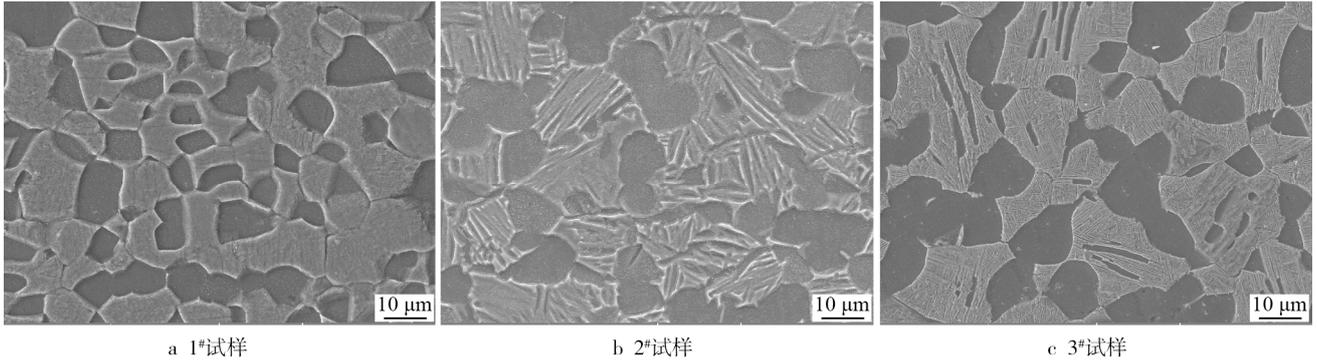


图 6 接头热影响区组织形貌
Fig.6 Microstructure in HAZ of joints

比较 1#接头和 2#接头的组织特征，可以得出结论，由于 LFW 过程中较高的焊接温度和应变速率，焊前热处理不能改变接头焊缝区和热力影响区的最终微观组织。换句话说，在不改变元素组成的条件下，不同原始组织对线性摩擦焊接头高温区最终组织的形成影响较小。然而，在 1#试样中获得明显的热力影响区，这表明热处理态的母材在较低的温度范围是敏感的。比较 2#接头和 3#接头的组织特征，可以得出结论，焊后热处理可以改变 LFW 接头中所有 3 个区域的最终微观结构。在焊缝区和热力影响区中， α 晶粒（晶界 α 和层状次生 α ）粗化，但在热影响区中，大多数次级 α 板条变细。这可能归因于焊缝区和热力影响区晶粒在 LFW 期间严重变形，从而拥有较高的变形能。

2.2 接头力学性能

可以预见，接头各个区域不同的组织特征将影响接头的显微硬度分布。图 7 为 3 种状态的接头沿轴向压力方向的硬度分布，可以看出，3 个接头的显微硬度分布是不同的，因此将分别讨论。

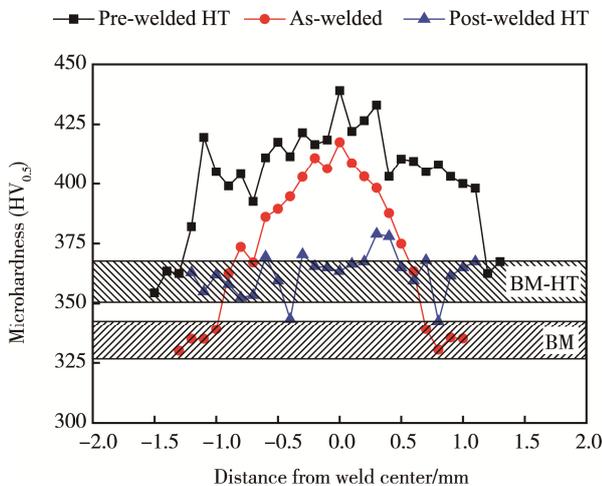


图 7 接头显微硬度分布
Fig.7 Microhardness distribution of joints

对于焊态接头（2#试样），沿着焊缝中心向母材方向，硬度逐渐下降，这种分布特征是由于各个区域组织特征差异造成的。在焊缝中心，晶粒尺寸细小，同时由于焊接变形严重导致该位置应力集中，引起硬度上升。在热力影响区，剧烈的塑性变形导致位错堆积，越靠近焊缝，变形越剧烈，位错的密度也越高^[15]。对于焊前热处理接头（1#试样），其显微硬度分布特征与 2#试样相似，但各个区域的硬度值要高于焊态接头，特别是在热影响区位置，其硬度达到了 HV_{0.5}410 左右，原因在于 1#试样母材经过热处理后初始相和次生相晶粒尺寸均减小，这使得晶界数量增加，能够有效阻碍位错滑移，从而提高接头强度。而一般来说，材料的强度和硬度是正相关的^[16]，因此焊前热处理会提高接头各个区域硬度。对于焊后热处理接头，其焊缝区和热力影响区硬度均出现下降，但母材硬度上升。这是由于焊后热处理使得焊缝区和热力影响区的马氏体相分解，细小的 α 板条长大，同时残余应力得到释放。

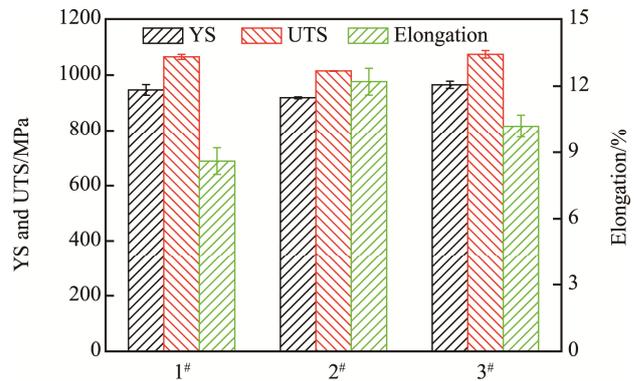


图 8 接头拉伸性能
Fig.8 Tensile properties of joints

3 种状态接头拉伸性能如图 8 所示。可以看出，焊前热处理和焊后热处理的接头屈服强度和抗拉强度均高于焊态接头，但同时接头的伸长率均低于焊态接头。接头拉伸性能的差异与接头硬度的分布有

着一定的联系。对于 2#试样,焊缝和热力影响区的显微硬度值高于母材的显微硬度值,如图 7 所示,因此,可以推断焊缝和热力影响区中的材料强度将高于母材的材料强度。一旦拉伸试验中施加的力达到母材的屈服强度,在该区域会发生塑性变形,但焊缝和热力影响区的材料可能仍处于弹性变形状态。换句话说,焊缝和热力影响区的材料比母材的材料更难变形。然而,由于焊缝和热力影响区占整个接头的比例很小,因此母材是影响接头拉伸性能的主要因素,因此,接头强度将主要受接头软区(母材)强度的影响,接头伸长率主要受硬区(焊缝和热力影响区)宽度的影响,硬区宽度越宽,关节伸长率越低。如上所述,热处理后母材中的次生 α 相的细化增加了晶界并且阻碍了位错的滑移,因此,热处理增加了母材强度,1#试样强度增加,并且由于硬区宽度的增加,接合伸长率降低。

焊后热处理后,接头焊缝区和热力影响区由于组织变化发生软化,因此显微硬度值降低,与母材硬度相近,如图 7 所示,因此接头在拉伸试验期间的变形变得均匀,换句话说,接头各个区域都参与了拉伸引起的塑性变形,因此,3#试样的伸长率高于 1#试样。同时,由于 3#试样母材与 1#试样相同,因此这两个样品的屈服强度和抗拉强度是接近的,均高于 2#试样。

3 结论

通过对接头组织特征和力学性能的测试,研究了焊前和焊后热处理对线性摩擦焊 TC11 接头的影响。从这项研究中可以得出以下结论。

1) 焊态和焊前热处理接头中焊缝区和热力影响区的组织特征相似。在焊缝区中形成马氏体和针状 α 相,并且在 TMAZ 中形成严重变形的残余初生 α 相和转变 β 相组织,但是,明显的热影响区只能在焊前热处理接头中找到。

2) 焊后热处理可以改变 LFW 接头中所有 3 个区域的最终微观结构。在焊缝区和热力影响区中,晶界 α 和层状次生 α 发生粗化,但在热影响区中,大多数次生 α 板条变细。

3) 焊前热处理可以提高整个接头的显微硬度,尤其是热影响区的显微硬度。焊后热处理可以降低焊缝区和热力影响区的显微硬度,但母材的显微硬度有所提高。

4) 焊前和焊后热处理均可提高抗拉强度,但接头伸长率降低,特别是在焊前热处理条件下。

参考文献:

[1] LI W Y, VAIRIS A, PREUSS M, et al. Linear and Rotary

Friction Welding Review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71—100.

[2] MCANDREW A R, COLEGROVE P A, BÜHR C, et al. A Literature Review of Ti-6Al-4V Linear Friction Welding[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 225—257.

[3] BHAMJI I, PREUSS M, THREADGILL P L, et al. Solid State Joining of Metals by Linear Friction Welding: a Literature Review[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(1): 2—12.

[4] GARCÍA A M M. BLISK Fabrication by Linear Friction Welding[J]. Advances in Gas Turbine Technology, 2011: 411—434.

[5] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 航空制造技术, 2006(4): 1—8.

HUANG Chun-feng. Modern Aeroengine Integral Blisk and Its Manufacturing Technology[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2006(4): 1—8.

[6] 史耀耀, 段继豪, 张军锋, 等. 整体叶盘制造工艺技术综述[J]. 航空制造技术, 2012, 399(3): 26—31.

SHI Yao-yao, DUAN Ji-hao, ZHANG Jun-feng, et al. Blisk Disc Manufacturing Process Technology[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012, 399(3): 26—31.

[7] ZHOU Y G, ZENG W D, YU H Q. A New High-Temperature Deformation Strengthening and Toughening Process for Titanium Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 221(1/2): 58—62.

[8] CHEN H, CAO C X, LING G U O, et al. Hot Deformation Mechanism and Microstructure Evolution of TC11 Titanium Alloy in β Field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(5): 1021—1027.

[9] LANG B, ZHANG T C, LI X H, et al. Microstructural Evolution of a TC11 Titanium Alloy during Linear Friction Welding[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(22): 6218—6224.

[10] LI W, SUO J, MA T, et al. Abnormal Microstructure in the Weld Zone of Linear Friction Welded Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si Titanium Alloy Joint and Its Influence on Joint Properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 599: 38—45.

[11] LÜTJERING G. Influence of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of $(\alpha+\beta)$ Titanium Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243(1/2): 32—45.

[12] WANJARA P, DALGAARD E, GHOLIPOUR J, et al. Effect of Pre-and Post-weld Heat Treatments on Linear Friction Welded Ti-5553[J]. Metallurgical and Materials

- Transactions A, 2014, 45(11): 5138—5157.
- [13] LI W Y, MA T, ZHANG Y, et al. Microstructure Characterization and Mechanical Properties of Linear Friction Welded Ti-6Al-4V Alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(1/2): 89—92.
- [14] GENG L, XU B, LI Y T, et al. Characterization of $(\alpha+\beta)/\beta$ Transformation in a TC11 Titanium Alloy[J]. Solid State Phenomena, 2014, 127(6): 91—96.
- [15] WANG S Q, MA T J, LI W Y, et al. Microstructure and Fatigue Properties of Linear Friction Welded TC4 Titanium Alloy Joints[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(3): 177—181.
- [16] 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.