

时效处理对 Ti-22Al-25Nb 合金线性摩擦焊接头组织和力学性能的影响

高伟¹, 陈曦^{1,2}, 谢发勤², 李文亚², 郝建民¹, 郝婧淦¹

(1. 长安大学, 陕西 西安 710064)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 对 Ti-22Al-25Nb 合金线性摩擦焊接头进行 840 °C × 2 h 的时效处理, 研究了焊接头的组织和力学性能。结果表明, 焊接头主要分为 3 个区域, 分别是焊缝区、热力影响区和母材区。焊缝区组织以 B2 相为主, α_2 相和 O 相的数量相对较少。热力影响区仅有少量的 α_2 相和 O 相转变为 B2 相, 且 α_2 相形态变化不大。EBSD 分析结果表明, 母材的晶体学取向无法遗传到最终的焊缝组织中。经过 840 °C 时效处理后, 焊缝区发生了动态再结晶并析出了 O 相。在热力影响区, α_2 相的分解并不充分, 可以观察到 rim-O 相围绕 α_2 相析出。母材区 O 相有所长大, 而 α_2 相的形态无明显变化。时效处理之后细晶强化与 O 相的析出强化作用显著提高了焊接头的力学性能。

关键词: Ti-22Al-25Nb 合金; 线性摩擦焊; 时效处理

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2020)04-001-06

Effect of Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Linear Friction Welded Ti-22Al-25Nb Alloy

Gao Wei¹, Chen Xi^{1,2}, Xie Faqin², Li Wenya², Hao Jianmin¹, Hao Jinglu¹

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti-22Al-25Nb alloy were studied after aging at 840 °C for 2 h. The results show that the welded joint can be divided into three parts: weld zone, TMAZ and base metal. The microstructure of weld zone is dominated by B2 phase, while the volume fraction of α_2 and O phase is relatively small. Only a small amount of α_2 and O phase transformed into B2 phase in TMAZ, and the morphology of α_2 phase changes little. The EBSD results show that the crystallographic orientation in base metal cannot be inherited into the final weld structure. After aging at 840 °C, the recrystallization and the precipitation of O phase can be observed in weld zone. The decomposition of α_2 phase is insufficient in TMAZ, while the rim-O phase precipitated around α_2 phase can be observed. In base metal, the O phase has grown up, while the α_2 phase has no obvious change. After the heat treatment, the strengthening of the O phase precipitation and the refined grains significantly increased the mechanical properties of the joint.

Key words: Ti-22Al-25Nb alloy; linear friction welding; aging treatment

采用整体叶盘 (Blisk) 是提高航空发动机推重比的有效手段之一, 而线性摩擦焊接技术是目前国际公认的理想的整体叶盘焊接制造与维修关键技术,

具有制造成本低、可靠性高、缺陷少的优点。目前这种新型固相连接方法已在国际高推重比发动机制造领域成功应用^[1,2]。线性摩擦焊原理是两工件沿平行于连接端面方向上做周期性直线往复运动, 振动工件在振动机构的驱动下以高频、小振幅作往复振动, 非振动工件在压力作用下向振动工件靠近,

收稿日期: 2020-03-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(300102318302)

通信作者: 陈曦(1988—), 男, 讲师。

当两工件接触后,在往复摩擦和轴向压力的作用下,焊接界面上产生摩擦热使得界面及邻近区金属达到粘塑性状态并产生塑性变形,两工件界面之间的金属被挤出,形成飞边。待足量金属被挤出后,待焊工件停止作往复运动,最后在两端施加顶锻力使塑性金属间发生扩散,使两部分焊件紧密地结合在一起^[3,4]。

Ti₂AlNb 合金是在 Ti₃Al 基合金基础上研发的一种新型轻质高温结构材料,该合金具有较高的高温比强度,且抗氧化性和抗蠕变性能好。与其他 Ti-Al 系金属间化合物相比,较高的室温塑性和断裂韧性使其在航空发动机领域拥有更广阔的应用前景^[5,6]。对线性摩擦焊制备的 Ti₂AlNb 合金整体叶盘进行焊后时效处理,可以有效消除残余应力,改善焊接头的组织和性能。本文对 Ti-22Al-25Nb 摩擦焊接试样进行时效处理研究,着重分析焊接态及焊后热处理接头的显微组织及力学性能,为 Ti-22Al-25Nb 合金的进一步应用提供参考。

1 实验

实验材料为西北有色金属研究院钛及钛合金研究所提供的 Ti₂AlNb 合金锻件,名义成分为 Ti-22Al-25Nb,化学成分如表 1 所示。

表 1 Ti-22Al-25Nb 合金的化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of Ti-22Al-25Nb alloy

Ti	Al	Nb	O	N	H
Bal.	10.65	42.68	0.056	0.005 5	0.001 5

焊接试验采用陕西省摩擦焊接重点实验室自制的 XMH-250 型线性摩擦焊机,焊接工艺参数为:摩擦压力 70 MPa,顶锻压力 130 MPa,振幅 3 mm,频率 26 Hz,进给速度 5 mm/s。焊接后的焊接头在 840 °C 进行时效处理,保温 2 h,空冷。

从焊接态接头及时效处理后的焊接头上切割试样。金相试样先用 70#~2000# 水磨性砂纸从粗到细依次打磨,并进行抛光,然后用 3 mL 氢氟酸、30 mL 硝酸和 67 mL 水混合成的腐蚀液浸蚀。采用 VEGA II XMU 型扫描电子显微镜对焊接头进行显微组织观察。采用 SHIMADZU AG-X 试验机进行拉伸试验,拉伸试样依据国标 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》加工,拉伸速率为 1 mm/min。采用 TESCAN MIRA3 XMU 场发射扫描电镜进行电子背散射衍射(EBSD)分析和拉伸断口形貌观察。采用荷兰 Philips 公司的 X'Pert-Pro X 射线衍射仪(XRD)测定焊接头相组成,测量参数为:Cu 靶 K α 射线,管电压 35 kV,管电流 40 mA,2 θ 扫描范围 10°~90°。采用 Duramin-A300 显微硬度仪测量焊接头的显微硬度,测试载荷 200 g,负载时间 10 s,测量点从焊缝区开始间隔 200 μ m,直到母材区结束。

2 结果与分析

2.1 焊接态接头组织特征

根据组织差异,线性摩擦焊接头分为 3 个区域:焊缝区、热力影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)和母材区^[7]。图 1 为 Ti-22Al-25Nb 合金焊接头各区域的微观组织。从图 1a 中可以看出, Ti-22Al-25Nb 合金焊接头母材区组织由 B2 + α_2 + O 相组成,其中黑色的等轴颗粒状组织为 α_2 相,浅灰色的细小针状组织为 O 相,剩余的为基体 B2 相^[8]。从图 1b 可以看出,焊缝区较难腐蚀,表现为白色明亮形貌,组织特征不明显。焊缝区组织主要由 B2 相组成, α_2 相和 O 相的数量相对较少。图 1c 所示热力影响区呈现明显的沿焊接方向流动的特征,反映了材料在焊接过程中的金属流动行为^[9],其组织中可观察到更多细小的针状 O 相,而 α_2 相的形态基本没有变化。

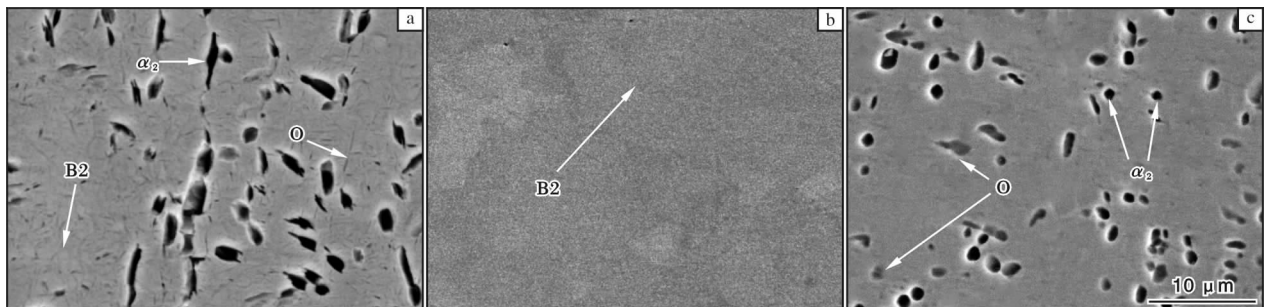


图 1 Ti-22Al-25Nb 合金线性摩擦焊接头不同区域微观组织

Fig. 1 Microstructures of different zones of Ti-22Al-25Nb alloy linear friction welding joint: (a) base zone; (b) weld zone; (c) TMAZ

2.2 焊接态接头组织演变

由于线性摩擦焊接头组织具有关于焊缝中心轴对称的特征, 本次试验仅从焊缝一侧进行选区 EBSD 分析。图 2 为 Ti-22Al-25Nb 合金线性摩擦焊接头的 EBSD 照片与反极图(IPF)。根据焊接头组织特征,

图 2a 从左至右依次包含了母材区、热力影响区和焊缝区。可以看出, 从母材区到焊缝区晶粒尺寸明显减小。图 2b 所示 IPF 图颜色与图 2a 中晶粒颜色对应, 不同颜色代表不同的晶体取向, 其中蓝色、红色和绿色分别代表晶粒取向为(111)、(001)和(101)。

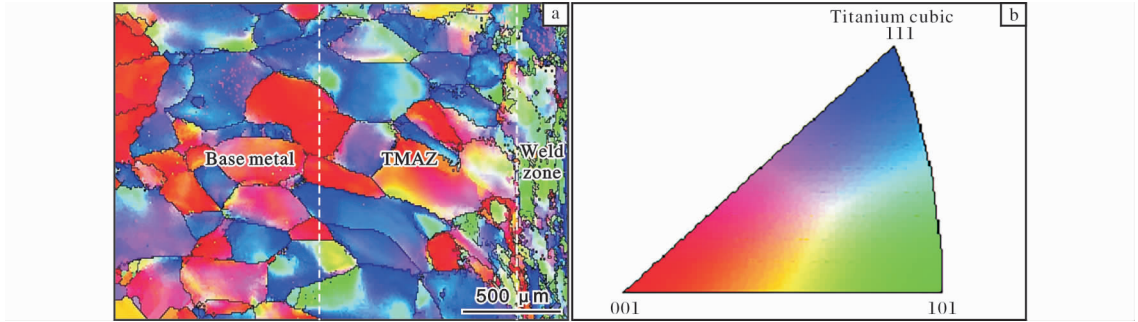


图 2 Ti-22Al-25Nb 合金线性摩擦焊接头 EBSD 照片与 IPF 图

Fig. 2 EBSD image(a) and inverse pole figure(IPF) (b) of Ti-22Al-25Nb alloy linear friction welding joint

运用 EBSD 技术对晶粒结构的取向分析, 得到不同区域对应的 {100}、{110} 和 {111} β 相极图, 如图 3 所示。EBSD 极图中的 Y_0 方向表示焊接摩擦方向,

X_0 方向表示轴向压力方向, Z_0 方向表示垂直纸面方向, 而 $Y_0 - Z_0$ 平面为摩擦平面。本次实验 EBSD 数据均为 Ti-22Al-25Nb 合金中 B2 基体相的取向数据。

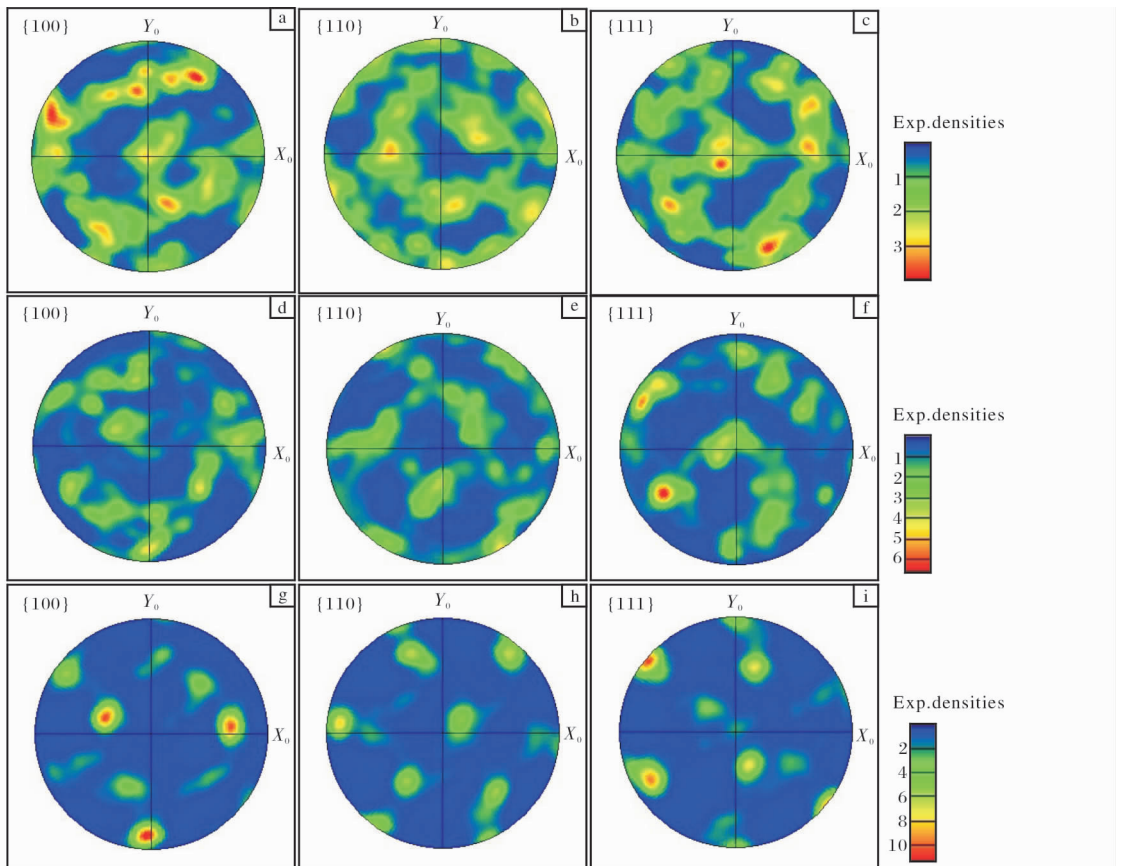


图 3 Ti-22Al-25Nb 合金线性摩擦焊接头各区域极图

Fig. 3 Pole figures of each zone of Ti-22Al-25Nb alloy friction welded joint; (a ~ c) base metal; (d ~ f) TMAZ; (g ~ i) weld zone

从图 2 可以看出, Ti-22Al-25Nb 合金焊接头母材区的晶粒以等轴晶为主, 其 IPF 颜色以红色和蓝色为主。结合母材区极图(图 3a)可知, 该区域部分晶粒的 $\langle 100 \rangle$ 晶向与 Z_0 轴平行, 而另一部分晶粒的 $\langle 111 \rangle$ 晶向与 Z_0 轴平行, 但两种取向的晶粒并未形成较强的织构。靠近热力影响区, 在轴向力与剪切力的作用下, 等轴晶粒沿焊接方向被拉长, 出现弯曲, 这种流线状的组织越靠近焊缝越趋于与焊接界面平行; 而从 IPF 颜色来看, 红色取向的晶粒比例有所减少, 蓝色取向晶粒增加, 这说明在焊接过程中, 不仅是晶粒的形状受力发生变化, 晶粒的取向同样受到力的作用发生了转动^[10]。对比焊接头热力影响区和母材区的极图, 可以看出热力影响区织构强度略有增加, 这表明该区域的晶粒在力的作用下出现了集中取向的趋势。焊缝区受到的热力耦合作用最为强烈, 因此该区域的组织及织构变化也最为明显。从焊缝区极图可以看出, 该区域发生了明显的动态再结晶, 晶粒尺寸与母材相比大幅减小,

而且晶界与母材相比也更为弯曲, 同样反映出动态再结晶的特征^[11,12]。从 IPF 颜色来看, 该区域的晶粒颜色多为绿色, 原先母材中的红色和蓝色晶粒几乎消失, 这说明母材中的晶体学取向在经历了焊接过程后, 可能无法遗传到最终的焊缝组织当中^[13]。结合焊缝区极图(图 3g~i)可知, 焊缝晶粒的 $\langle 110 \rangle$ 晶向与 Z_0 轴平行, $\langle 100 \rangle$ 晶向与 Y_0 轴平行, 呈现出 $\{110\} \langle 100 \rangle$ 织构特征。

2.3 时效处理对焊接头组织演变的影响

Ti-22Al-25Nb 合金的熔点一般在 1 600 °C 左右, 通常热处理温度达到合金熔点的 10% 以上时发生静态回复, 而当热处理温度达到合金熔点的 40% 以上时, 具有一定变形量的合金就可发生再结晶。图 4 为 Ti-22Al-25Nb 合金焊接头经 840 °C 时效处理后的显微组织。经过时效处理后, 焊接头内部储存能释放, 静态回复和再结晶过程促使焊缝区亚晶粒逐渐转变为新的再结晶晶粒, 因此在图 4a 所示焊缝区可观察到等轴的再结晶晶粒生成。

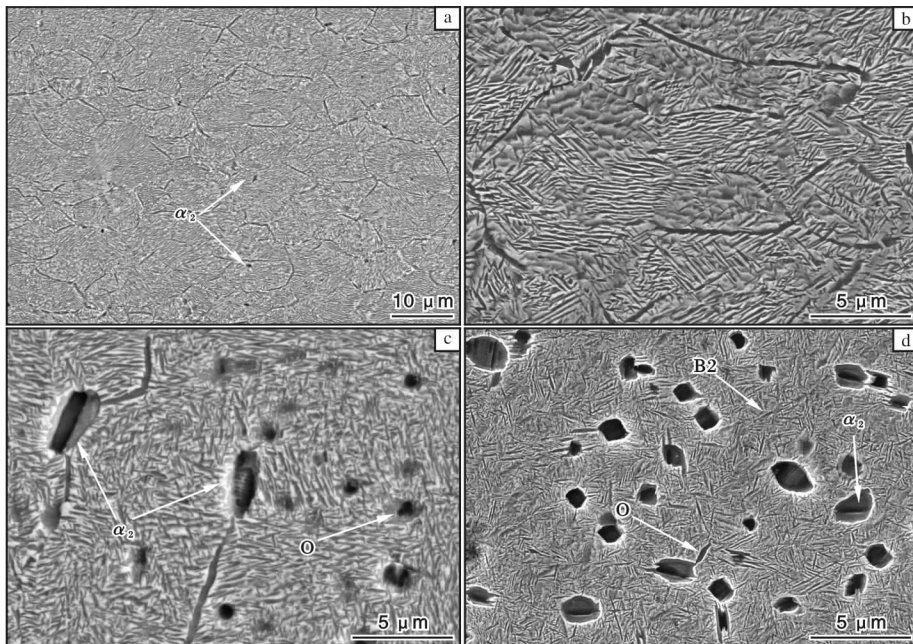


图 4 840 °C 时效处理后焊接头不同区域的显微组织

Fig. 4 Microstructures of different zones of joint after aging treated at 840 °C: (a) weld zone, low magnification; (b) weld zone, high magnification; (c) TMAZ; (d) base metal

与时效前焊接头焊缝区显微组织相比, 840 °C 时效处理后焊缝区显微组织(图 4b)中析出了粗大的 O 相, 分布于 B2 晶粒内和晶界上。时效处理过程析出 O 相的机制为: B2 相通过中间过渡相 O' 相(具有 B19 结构)的有序化排列, 转变成为有序结构的正交

O 相。

从时效处理后热力影响区的显微组织(图 4c)可以看出, α_2 相在 840 °C 时效温度下的分解并不充分, 由于该温度提供了 Nb 元素在 α_2 相中进行扩散的驱动力, 从而使得 α_2 相的边缘处形成富 Nb 区并最终

形成了 rim-O 相, 故从图 4c 中可以观察到围绕 α_2 相析出的 rim-O 相。相较于焊接态, 针状 O 相长大, α_2 相尺寸减小不明显。Xue^[14] 等人研究发现, α_2 颗粒内析出 O 相的多少主要与加热温度与保温时间有关, 而 O 相在 α_2 相边缘处的形核方式类似于逐层形核。由于 α_2 相和 B2 相的界面处具有较高的浓度梯度, 利于元素进行扩散, 因此 O 相更易于从 α_2 相的边缘处开始形核并长大。

从时效处理后母材区的显微组织(图 4d) 可以看出, 840 °C 时效处理后 O 相略有长大, α_2 相的形态无明显变化。

图 5 为焊接态和 840 °C 时效处理后 Ti₂AlNb 合金焊缝区的 XRD 图谱。从图 5 可以看出, 焊接态 Ti₂AlNb 合金焊缝区组织主要由 B2 相组成。经过时效处理后, 焊缝区析出了一定量的 O 相, 该区组织主要由 O 相与 B2 相组成。由于 840 °C 的时效温度相对较高, 其为 Ti₂AlNb 合金 B2→B2 + O 相转变所提供的驱动力相对较大, 因此时效析出的 O 相数量较多。

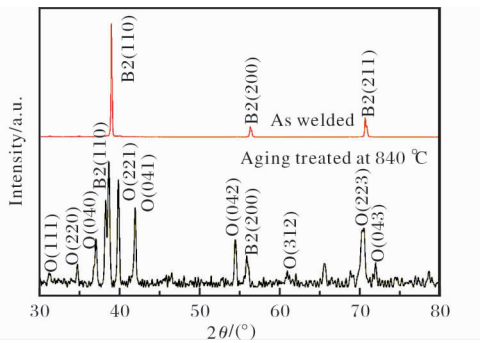


图 5 焊接态与 840 °C 时效处理后焊缝区的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of weld zone as welded and aging treated at 840 °C

对焊接态及时效处理后的 Ti₂AlNb 合金焊接头进行显微硬度测试, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 从母材区到焊缝区, 焊接态接头的显微硬度呈下降趋势, 而经过 840 °C 时效处理后, 显微硬度整体呈上升趋势; 与焊接态相比, 时效处理后焊缝区的显微硬度值提高了约 1 000 MPa, 说明时效处理对焊接头的强化效果非常明显。Wang 等人^[15] 的研究表明, Ti₂AlNb 合金的显微硬度主要受析出相种类和体积分数的影响, 而板条 O 相的厚度对显微硬度的影响很小。因此相比焊接态接头焊缝区, 经 840 °C 时效处理后, 焊缝区析出的 O 相多, 从而具有较高的显微硬度。

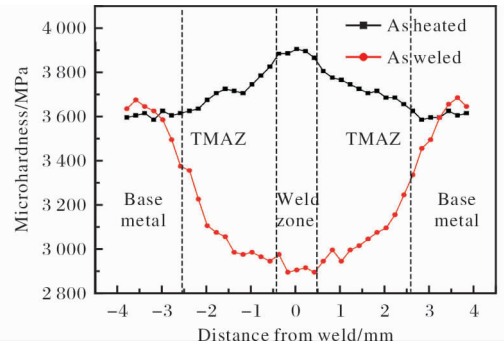


图 6 焊接态与 840 °C 时效处理后的焊接头显微硬度曲线

Fig. 6 Microhardness profiles of the joint as welded and aging treated at 840 °C

图 7 为 840 °C 时效处理后焊接头拉伸试样的断口形貌。从宏观断口(图 7a) 可以看出, 断口呈现出一定的塑性变形——颈缩, 具有明显的剪切唇。从图 7b 中可以观察到深浅不一的韧窝和撕裂棱存在, 断口兼有韧性和脆性断裂特征。

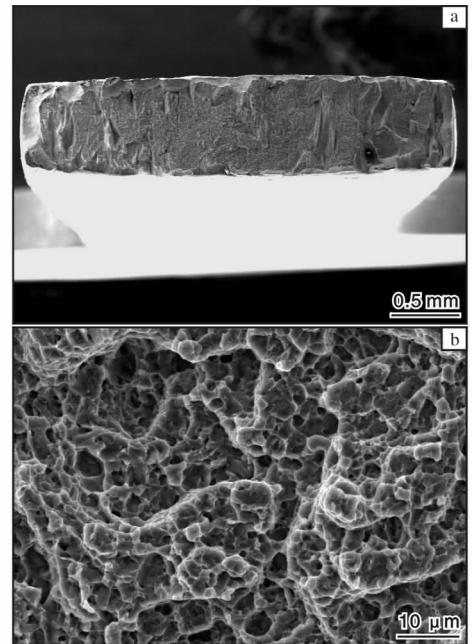


图 7 840 °C 时效处理后焊接头拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 7 SEM fractographs of welded joint after aging treated at 840 °C: (a) macro morphology; (b) micro morphology

表 2 给出了焊接态和 840 °C 时效处理后焊接头的拉伸性能。从表 2 可以看出, 时效处理后焊接头的断裂延伸率、抗拉强度相比于焊接态有明显的升高。焊接头的拉伸性能与其板条 O 相尺寸符合 Hall-Patch 关系^[16,17], 时效处理后发生了再结晶过程并析出了 O 相, 在细晶强化和第二相强化共同作用下,

使得焊接头具有较好的抗拉强度和塑性。

表 2 焊接态与时效处理态焊接头的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of joints as welded and aging treated

Sample	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
As welded	1 036 ± 7	976 ± 26	4.4 ± 0.3
Aging treated	1 109 ± 21	1 004 ± 15	6.8 ± 0.3

3 结 论

(1) Ti-22Al-25Nb 合金线性摩擦焊接头的母材区组织由 B2 + α_2 + O 相组成；焊缝区组织以 B2 相为主， α_2 相和 O 相数量相对较少；热力影响区可以观察到更多细小的针状 O 相， α_2 相的形态基本没有变化。

(2) 线性摩擦焊强烈的剪切作用使得母材晶粒取向沿焊接方向发生转动，因而热力影响区织构强度略有增加，在经历了焊接过程后，母材初始取向无法遗传到最终的焊缝组织中，焊缝区形成了 $\{110\} <100>$ B2 相织构。

(3) 经过 840 °C 时效处理后，焊缝区析出了 O 相，热力影响区中可以观察到 rim-O 相围绕 α_2 相析出，母材区的 O 相有所长大，而 α_2 相形态无明显变化。时效处理后，在细晶强化和第二相强化的共同作用下，焊接头的显微硬度和拉伸性能显著提高。

参考文献

- [1] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004(11): 56–58.
- [2] 朱瑞峰, 白钢, 苏利龙, 等. 线性摩擦焊及其研究应用现状[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9): 100–103.
- [3] Vairis A, Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy[J]. Wear, 1998, 217(1): 117–131.
- [4] 王新宇, 李文亚, 马铁军. 钛合金线性摩擦焊接界面组织研究现状[J]. 航空制造技术, 2015(20): 56–59.
- [5] 黄旭, 李臻熙, 黄浩. 高推重比航空发动机用新型高温钛合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(6): 21–27.
- [6] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 等. Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 基合金的研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1):

336–341.

- [7] 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.
- [8] 陈曦, 谢发勤, 马铁军, 等. Ti₂AlNb 基合金线性摩擦焊研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 6–11.
- [9] Li W Y, Vairis A, Preuss M, et al. Linear and rotary friction welding review [J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71–100.
- [10] Wang X Y, Li W Y, Ma T J, et al. Characterisation studies of linear friction welded titanium joints [J]. Materials & Design, 2017, 116: 115–126.
- [11] Beyerlein I J, Tóth L S. Texture evolution in equal-channel angular extrusion [J]. Progress in Materials Science, 2009, 54(4): 427–510.
- [12] Sakai T, Belyakov A, Kaibyshev R, et al. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions [J]. Progress in Materials Science, 2014, 60: 130–207.
- [13] Yoon S, Ueji R, Fujii H. Effect of rotation rate on microstructure and texture evolution during friction stir welding of Ti-6Al-4V plates [J]. Materials Characterization, 2015, 106: 352–358.
- [14] Xue C, Zeng W D, Wang W, et al. Quantitative analysis on microstructure evolution and tensile property for the isothermally forged Ti₂AlNb based alloy during heat treatment [J]. Materials Science & Engineering, 2013, 573: 183–189.
- [15] Wang W, Zeng W D, Xue C, et al. Quantitative analysis of the effect of heat treatment on microstructural evolution and microhardness of an isothermally forged Ti-22Al-25Nb (at. %) orthorhombic alloy [J]. Intermetallics, 2014, 45: 29–37.
- [16] Boehlert C J, Miracle D B. Part II. The creep behavior of Ti-Al-Nb O + bcc orthorhombic alloys [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1999, 30: 2349–2367.
- [17] Boehlert C J, Bingert J F. Microstructure, tensile, and creep behavior of O + BCC Ti₂AlNb alloys processed using induction-float-zone melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 400–408.