

# 新型 Ti-Al-Mo-Nb 系低温钛合金电子束焊接头组织与性能研究

李典, 李婷, 屈磊, 赵北凯, 孙花梅, 辛社伟

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 研究了两种新型 Ti-Al-Mo-Nb 系低温钛合金 A1 (高 Mo 当量) 及 A2 (低 Mo 当量) 在电子束焊焊接态及退火态下接头的组织分布及力学性能。结果表明, Ti-Al-Mo-Nb 系合金焊接态下热影响区表现为  $\beta$  等轴晶, 焊缝区表现为向焊缝中心对接生长的单一  $\beta$  柱状晶及晶内亚晶, 其中 A1 合金  $\beta$  晶粒呈现出  $\{111\}/ND$ 、 $\langle 110 \rangle /WD$  织构特征, A2 合金  $\beta$  晶存在  $\{111\}/ND$  集中取向。经退火后组织构成仍以  $\beta$  相为主, 仅 A2 合金  $\beta$  晶界处析出极少量  $\alpha$  相, 两种合金热影响区  $\beta$  等轴晶发生晶粒长大, 焊缝区发生再结晶, 晶粒取向分布均匀, 织构特征消失, 材料强度及塑性均得到提升, 其中 A1 合金焊接系数达到 0.99, 获得了较好的焊缝-基体性能匹配。

**关键词:** 钛合金; 电子束焊; 热处理; 力学性能

中图分类号: TG457.19; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)04-001-07

## Research on Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Joints of New Ti-Al-Mo-Nb Low-temperature Titanium Alloys

Li Dian, Li Ting, Qu Lei, Zhao Beikai, Sun Huamei, Xin Shewei

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The microstructure distribution and mechanical properties of two novel Ti-Al-Mo-Nb low-temperature titanium alloys, A1 (high Mo equivalent) and A2 (low Mo equivalent), were investigated in both the as-welded and annealed states. The results show that, in the as-welded state, the heat-affected zone (HAZ) of the Ti-Al-Mo-Nb alloys exhibits equiaxed  $\beta$  grains, while the fusion zone (FZ) shows a single  $\beta$  columnar grain structure with subgrains growing towards the center of the weld. In alloy A1, the  $\beta$  grains exhibit a texture of  $\{111\}/ND$  and  $\langle 110 \rangle /WD$ , while in alloy A2, the  $\beta$  grains have a  $\{111\}/ND$  preferred orientation. After annealing, the microstructure remains primarily  $\beta$  phase, with only a small amount of  $\alpha$  phase precipitated at the  $\beta$  grain boundaries in alloy A2. In both alloys, the  $\beta$  equiaxed grains in the HAZ grow larger, while recrystallization occurs in the FZ, resulting in a more homogeneous grain orientation distribution and the disappearance of texture characteristics. Both the strength and plasticity of the materials are improved, with the welded joint coefficient of alloy A1 reaching 0.99, achieving good weld-to-base material property matching.

**Keywords:** titanium alloy; electron beam welding; heat treatment; mechanical properties

航天器结构件在极端环境下工作时, 要求材料具备优异的综合力学性能及低温环境适应性等特性。相较于不锈钢等传统低温材料, 钛合金在 20 K/77 K 下具有比强度高、热导率低、膨胀系数小等优点, 更适合应用于航天低温领域<sup>[1-3]</sup>。目前, 已有多种低温钛合金如 TC4ELI、TA7ELI、CT20 等成功研制并投入应用,

其中 TC4ELI 及 TA7ELI 通过降低间隙元素含量提升了合金在极低温度下的强度及韧性。TC4ELI 钛合金具有良好的热加工性及低温断裂韧性, 目前主要应用于航天器液氮温区 (77 K) 结构件<sup>[4]</sup>。TA7ELI 钛合金在 20 K 下具有较低的热导率、良好的韧性及缺口敏感性, 已成功应用于液体火箭发动机低温容器、叶轮等<sup>[5]</sup>。CT20 是西北有色金属研究院针对运载火箭发动机液氢管路系统设计的一种近  $\alpha$  型中强低温钛合金, 其在 20 K 下的抗拉强度  $\geq 1200$  MPa, 断后延伸率  $\geq 10\%$ , 同时具

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 陕西省财政厅先进动力专项 (YK22C-6)

通信作者: 李典 (1995—), 男, 工程师。

有良好的冷成形性和焊接性能，已成功应用于运载火箭发动机液氢管路构件的批量制造<sup>[6-8]</sup>。

航天低温管路系统往往通过焊接工艺实现连接，电子束焊因其具有能量密度大、熔透性高、热影响区小、焊接变形小等优点，且在真空条件下能有效保护焊接接头，常常作为钛合金焊接的首选方法<sup>[9]</sup>。低温钛合金电子束焊接头质量受多方面因素影响，杜宇等<sup>[10]</sup>研究了 Mo 元素对 CT20 钛合金焊接接头冲击性能的影响，结果表明没有添加 Mo 的焊接接头具有更高的冲击韧性。王厚勤等<sup>[11]</sup>研究了大厚度 TC4ELI 钛合金板材的电子束焊工艺，发现随着熔深增大，焊接接头晶粒尺寸减小，化学成分及力学性能变化不大。赵彬等<sup>[12]</sup>对 CT20 钛合金电子束焊工艺开展了研究，认为聚焦电流是影响焊缝形状的关键因素，通过优化焊接参数提升了焊接接头的室温/低温力学性能。

目前，低温工程中使用的钛合金主要为近  $\alpha$  型或  $\alpha+\beta$  型钛合金，而在先前的工作中发现，亚稳  $\beta$  钛合金在室温及 20 K 下均能产生相变/孪晶诱发塑性效应，从而获得更为优异的综合力学性能<sup>[13-14]</sup>。同时， $\beta$  稳定元素含量会显著影响亚稳  $\beta$  钛合金的组织形貌及变形机制，进一步改变合金的力学性能，例如在 Ti-Mo 二元合金中，当 Mo 元素含量较高时，变形机制为位错滑移，合金表现出较高的强度；当 Mo 元素含量适当降低时，可在变形过程中激活孪生，合金获得更高的塑性<sup>[15]</sup>。在此基础上，本研究设计了具有不同  $\beta$  稳定元素含量的两种 Ti-Al-Mo-Nb 系亚稳  $\beta$  钛合金，对比两种合金在电子束焊接及焊后热处理过程中的组织形貌、织构特征及力学性能演变规律，探究合金成分对接头焊接性能的影响规律。该研究工作可为相应合金的成分优化、焊接工艺及焊后热处理工艺选择提供重要参考，并为亚稳  $\beta$  钛合金的电子束焊提供借鉴和数据积累。

## 1 实验

实验材料为西北有色金属研究院采用二次真空自耗电弧熔炼 (VAR) 生产的两种  $\beta$  稳定元素含量不同的 Ti-Al-Mo-Nb 系亚稳  $\beta$  钛合金铸锭，其中 A1 合金为高 Mo 当量，A2 合金为低 Mo 当量。铸锭直径为 160 mm，经两次锻造后，线切割加工成 100 mm×40 mm×5 mm 的板状焊接试样。焊前用砂纸将焊接试样的焊接面打磨光亮，并用丙酮溶液清洗试样表面的油污、氧化物等污物。电子束焊工艺参数见表 1，焊后对焊缝进行 X 射线检测，保证无可见的焊接缺陷。焊接结束后，对试样进行 870 °C/2 h/AC 退火处理。焊接接头宏观形貌以及横截面焊缝形状见图 1。从图 1 可以看出，焊接接头分为焊缝区 (FZ)、热影响区 (HAZ) 和母材 (BM)。

表 1 电子束焊工艺参数

Electron beam welding parameter	Value
Accelerate voltage/kV	85
Focusing current/mA	475
Welding current/mA	30
Welding speed/mm·min <sup>-1</sup>	1000

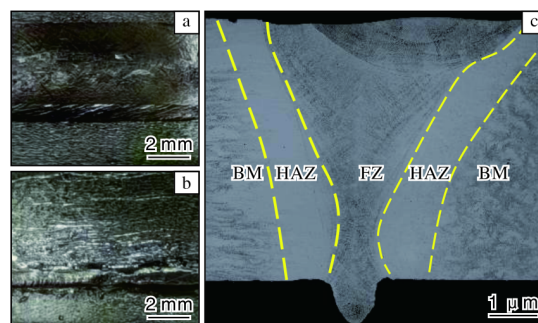


图 1 焊接接头宏观形貌

Fig.1 Macroscopic morphologies of welding joint: (a) front side; (b) back side; (c) cross-section

在焊接接头处垂直于焊缝方向切取拉伸试样，保证焊缝位于试样标距中心，拉伸试样尺寸见图 2。如图 3 所示建立样品坐标系，正交坐标轴方向由焊接方向 (WD)、法向 (ND) 和横截面方向 (TD) 组成，以 ND-TD 截面作为观察面。采用 Axio Vert.A1 光学显微镜进行显微组织观察。采用 HITACHI-SU5000 场发射扫描电子显微镜附带的能谱仪 (EDS) 及电子背散射衍

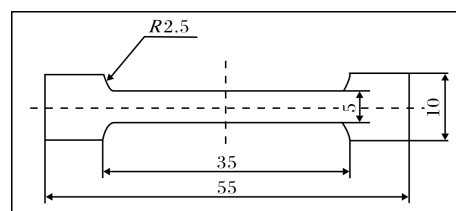


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile specimen dimensions

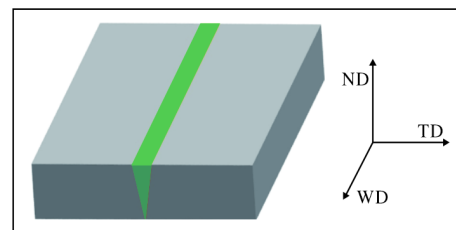


图 3 电子束焊接接头及样品坐标系示意图

Fig.3 Schematic diagram of electron beam welding joint with its sample coordinate system

射 (EBSD) 探头进行成分分析及组织表征。采用 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪 (XRD) 进行物相分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 组织结构

#### 2.1.1 焊接态

图 4 为 A1、A2 合金焊接态接头焊缝区的 XRD 谱图。从图 4 可以看出, A1、A2 合金均表现为单一  $\beta$  相衍射峰, 说明其焊缝区由  $\beta$  相构成, 其中 A1 合金的  $\beta$  相 (110) 衍射峰强度最大, 表明电子束焊过程中  $\beta$  相在  $\langle 110 \rangle$  取向占据主导。研究表明, 采用电子束焊接钛合金, 当 Mo 当量不大于 6% 时, 在焊接熔池冷却过程中  $\beta$  相会发生马氏体相变, 产生细小针状的马氏体  $\alpha'$  及  $\alpha''$ ; 当 Mo 当量不小于 10% 时,  $\beta$  相将从高温冷却中保留下来, 形成亚稳  $\beta$  相, 通过后续热处理可

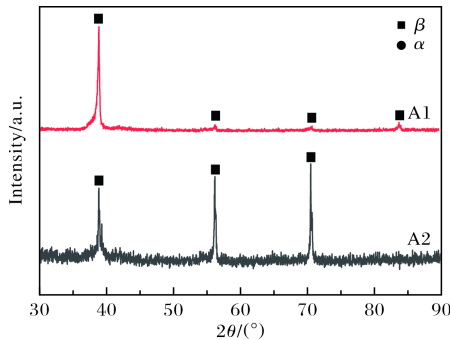


图 4 焊接态接头焊缝区 XRD 谱图

Fig.4 XRD patterns of as-welded joints in FZ

进一步分解为次生  $\alpha$  相<sup>[16]</sup>。依据 Mo 当量公式<sup>[17]</sup>:

$$[\text{Mo}]_{\text{eq}} = [\text{Mo}] + 0.28[\text{Nb}] + 0.22[\text{Ta}] + 0.44[\text{W}] + 1.6[\text{Cr}] + 1.54[\text{Mn}] + 0.67[\text{V}] + 2.9[\text{Fe}] + 1.25[\text{Ni}] \quad (1)$$

式中:  $[\text{Mo}]_{\text{eq}}$  代表 Mo 当量,  $[X]$  代表 X 元素在合金中的质量分数。经计算, A1、A2 合金的 Mo 当量分别为 11.9%、10.6%, 均大于 10%, 这与焊缝区的 XRD 分析结果相符。

图 5 为 A1、A2 合金焊接态接头各区域显微组织。从图 5 可以看出, A1 合金母材组织表现为经锻造后形成的沿纵向分布的拉长  $\beta$  晶, 晶粒宽度约 190  $\mu\text{m}$ , 长度约 400  $\mu\text{m}$ 。热影响区表现为大小不一的  $\beta$  等轴晶, 晶粒尺寸从近母材约 50  $\mu\text{m}$  至近焊缝区约 160  $\mu\text{m}$  逐渐增大, 这是由于焊接过程中的热量输入使得此区域的  $\beta$  晶粒发生再结晶, 新的等轴晶粒完全替代了锻造形成的变形晶粒, 而在靠近焊缝区的部分承受的热影响更大, 使得再结晶晶粒进一步长大。接头焊缝区组织表现为向焊缝中心对接生长的  $\beta$  柱状晶, 柱状晶宽度约 100  $\mu\text{m}$ 。在焊接过程中, 电子束流能量密度集中, 导致焊接熔池中心的温度极高, 当电子束源离开后, 熔池迅速降温, 形成由熔池中心向熔池边缘、由熔池顶端向底端两个方向的温度梯度,  $\beta$  晶粒在熔池边缘固液界面交界处优先形核, 并沿温度梯度方向择优生长形成柱状晶, 最终在焊缝中心处发生凝固。A2 合金接头各区域组织演变规律与 A1 合金相似, 母材为变形  $\beta$  晶, 热影响区的  $\beta$  等轴晶从近母材约 40  $\mu\text{m}$  增大至近焊缝区约 140  $\mu\text{m}$ , 焊缝区  $\beta$  柱状晶宽度约 116  $\mu\text{m}$ 。图 6 为采用 EBSD 得到的 A1、A2 合金焊接态接头焊缝区  $\beta$  相

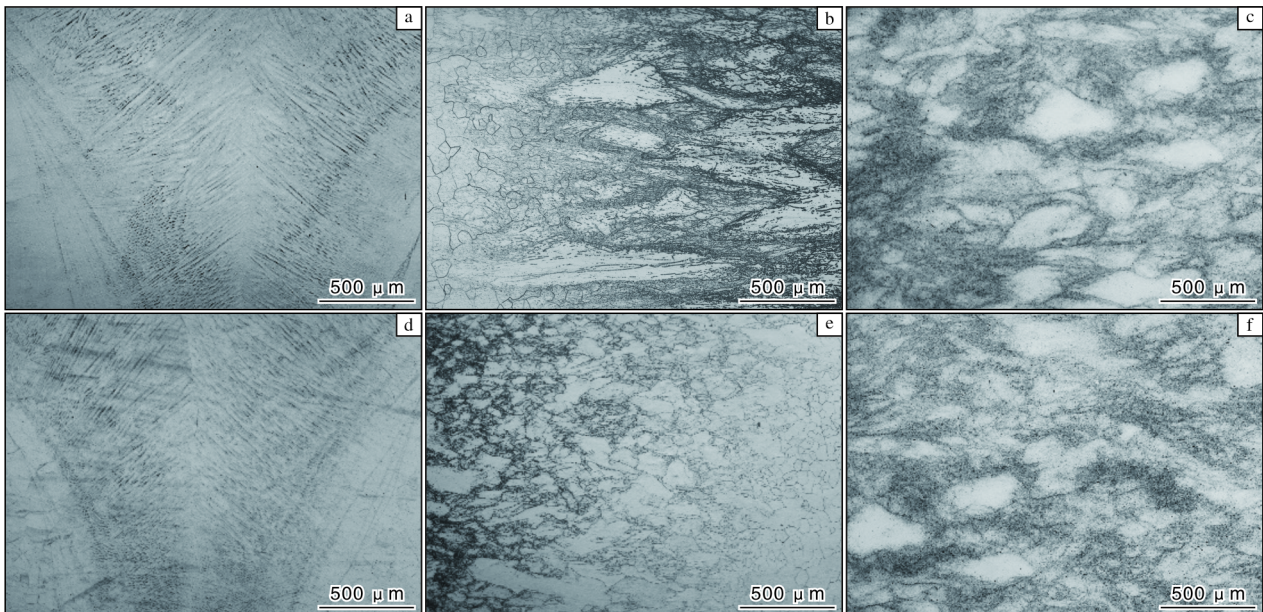
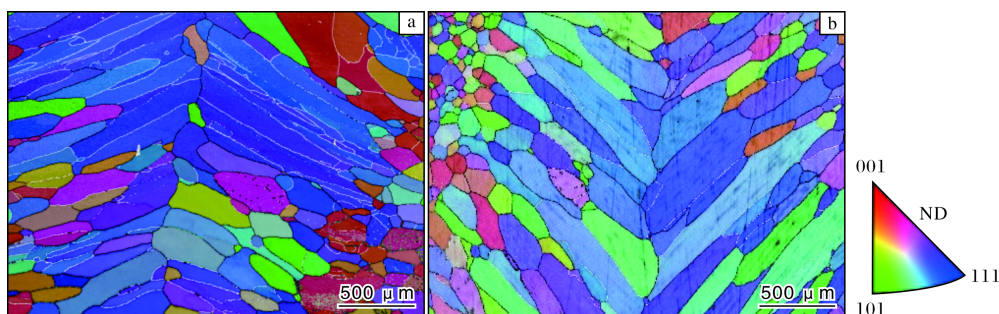


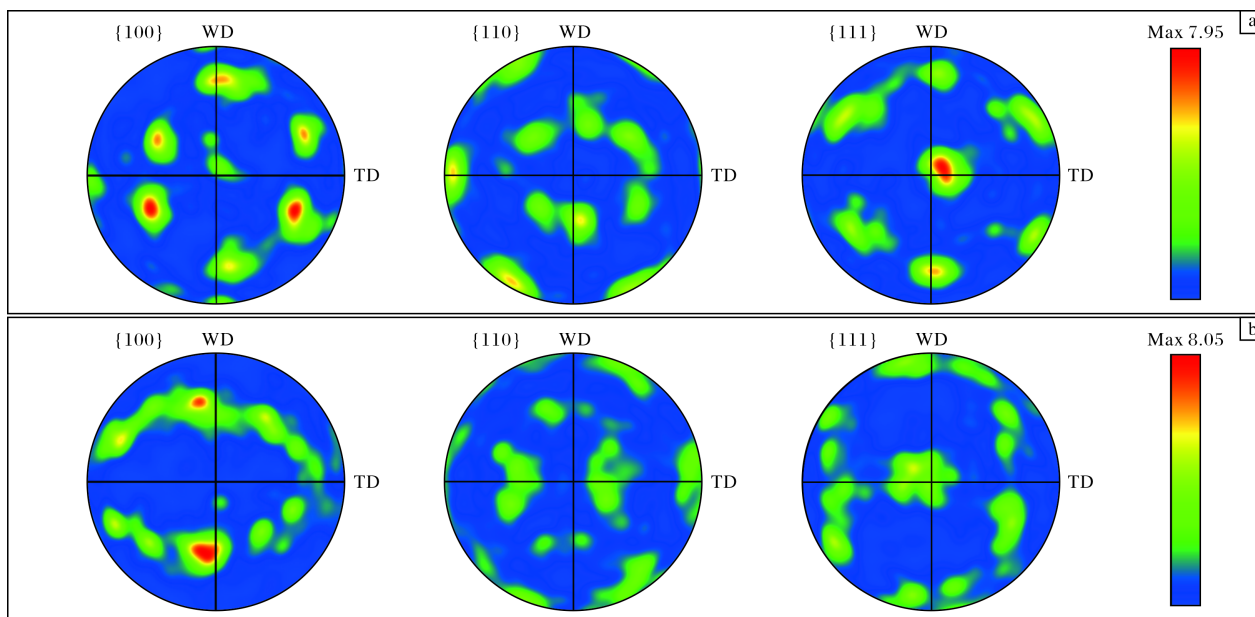
图 5 焊接态接头不同区域显微组织

Fig.5 Microstructures in different zones of as-welded joints: (a) alloy A1 in FZ; (b) alloy A1 in HAZ; (c) alloy A1 in BM; (d) alloy A2 in FZ; (e) alloy A2 in HAZ; (f) alloy A2 in BM

图6 焊接态接头焊缝区 $\beta$ 相IPF取向分布图Fig.6 IPF orientation distribution maps of  $\beta$  phase in FZ of as-welded joints: (a) alloy A1; (b) alloy A2

的IPF取向分布图。图6中将相邻晶粒取向差在 $2^\circ\sim 15^\circ$ 之间的晶界定义为小角度晶界,用白色细线表示。从图6可以看出,在A1、A2合金 $\beta$ 柱状晶内均存在明显取向差,表明这些连续生长的柱状晶并不是稳定晶粒,内部存在大量亚晶界。这主要是由于电子束焊熔池凝固过程中,位错受内应力作用发生移动和积累,从而形成位错墙/位错胞。电子束焊熔池冷却速度极快,可观察到

A1、A2合金焊缝区内的 $\beta$ 柱状晶在ND方向上集中取向,偏离集中取向生长的晶粒受竞争机制影响被淘汰,相邻晶粒间的取向差较小。图7为焊接态接头焊缝区 $\beta$ 相极图。从图7可以看出,A1合金焊接态焊缝区存在 $\{111\}\langle 110\rangle$ 织构,其中 $\{111\}\parallel\text{ND}$ , $\langle 110\rangle\parallel\text{WD}$ ,最大织构密度为7.95;A2合金焊接态焊缝区存在 $\{111\}\parallel\text{ND}$ 织构,最大织构密度为8.05。

图7 焊接态接头焊缝区 $\beta$ 相极图Fig.7 Pole figures of  $\beta$  phase in FZ of as-welded joints: (a) alloy A1; (b) alloy A2

### 2.1.2 退火态

对退火后的A1、A2合金接头焊缝区进行XRD分析,结果见图8。从图8可观察到,A1合金经退火后仍仅出现 $\beta$ 相衍射峰,组织呈现单一 $\beta$ 相,衍射峰强度分布规律与焊接态基本保持一致。A2合金经退火后出现少量 $\alpha$ 相衍射峰,表明A2合金在退火过程中发生了亚稳 $\beta$ 相分解,生成少量 $\alpha$ 相及 $\beta$ 相。此外,A2合金在焊接态下出现的 $\beta(200)$ 峰消失, $\beta(211)$ 峰明显减弱, $\beta(110)$ 峰增强,表明退火过程中晶格向

$\langle 110\rangle$ 方向发生旋转。

图9为经退火后A1、A2合金接头各区域的显微组织。从图9可以看出,退火后A1、A2合金发生了显著的再结晶及晶粒长大。两种合金焊接态母材中变形拉长的 $\beta$ 相消失,形成新的无畸变的等轴 $\beta$ 晶粒,其中A1合金平均晶粒尺寸约为 $320\ \mu\text{m}$ ,A2合金平均晶粒尺寸约为 $280\ \mu\text{m}$ 。在热影响区,退火过程中原子的扩散能力提高,促进了大角度晶界迁移,焊接过程已完成再结晶的 $\beta$ 晶粒长大,A1合金平均晶粒尺寸达到

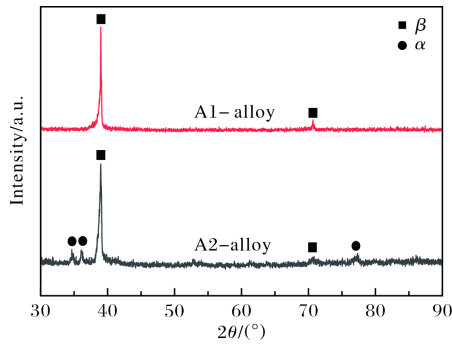


图 8 退火态接头焊缝区 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of annealed joints in FZ

180 μm, A2 合金为 205 μm。图 10 为退火态接头焊缝区 β 相的 IPF 取向分布图。从图 10 可以看出, 经退火后焊接态焊缝区沿温度梯度方向连续生长的柱状晶被分为多个小晶粒, 新晶粒的长宽比相较原始晶粒减小,

晶粒宽度与原始柱状晶宽度相近, A1 合金晶粒平均尺寸约为 98 μm, A2 合金约为 105 μm。可以认为, 焊接态下两种合金焊缝区存在的大量亚晶界为退火再结晶提供了形核核心。A1 合金退火后仍表现为单一 β 相, 而 A2 合金中析出少量的 α 相, 这是由于 A2 合金具有较高的 Mo 当量, 这些少量的 α 相主要集中在 β 晶界处。此外, 退火后接头焊缝区晶粒内仍存在白色线条标识的小角度晶界, 说明退火处理没有完全改变焊缝区的亚晶状态, 部分亚晶界在退火过程中没有转变为稳定晶界或消失。从 IPF 取向分布图可以看出, 各晶粒取向分布较为均匀, 结合退火态接头焊缝区 β 相极图 (图 11) 可知, 经退火后 A1 合金中存在的 {111}<110> 织构消失, 织构强度下降至 5.11, A2 合金沿 {111}//ND 集中取向特征消失, 织构强度下降至 5.65, 极图中各极点相对分散, 可以认为 A1、A2 合金在退火后不存在明显择优取向。

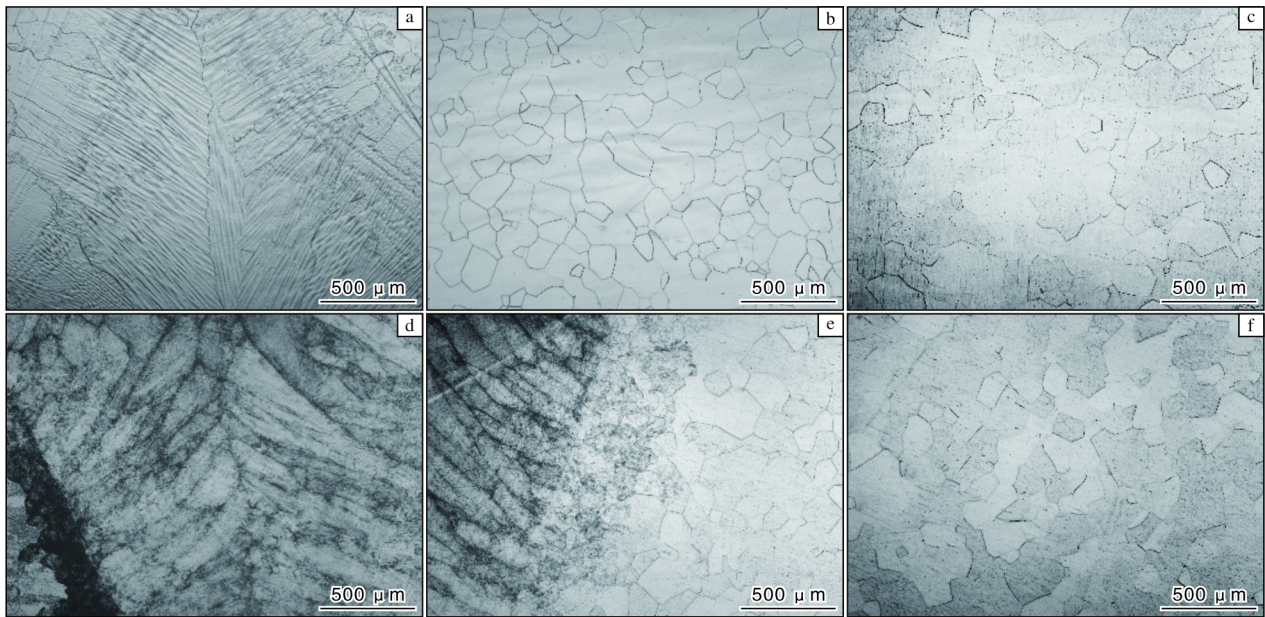


图 9 退火态接头不同区域显微组织

Fig.9 Microstructures in different zones of annealed joints: (a) alloy A1 in FZ; (b) alloy A1 in HAZ; (c) alloy A1 in BM; (d) alloy A2 in FZ; (e) alloy A2 in HAZ; (f) alloy A2 in BM

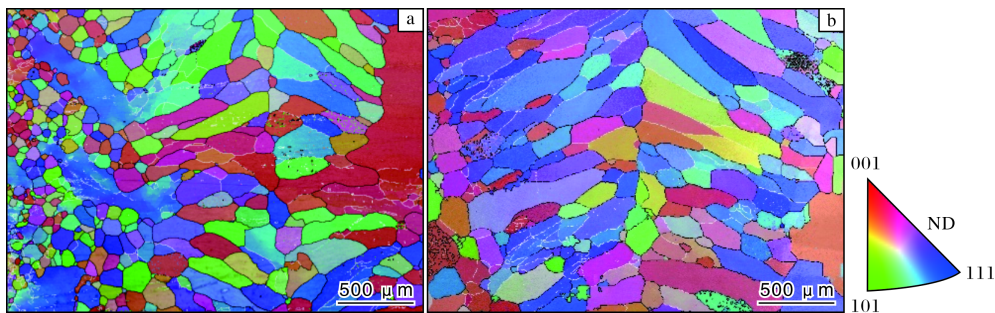


图 10 退火态接头焊缝区 β 相 IPF 取向分布图

Fig.10 IPF orientation distribution maps of β phase in FZ of annealed joints: (a) alloy A1; (b) alloy A2

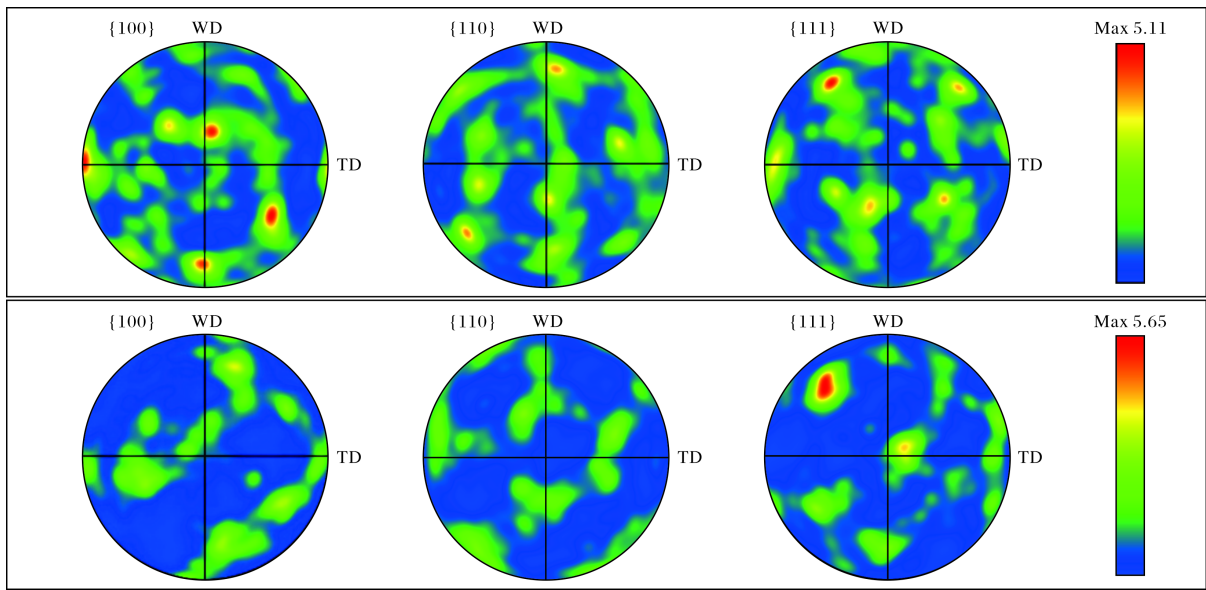


图 11 退火态接头焊缝区  $\beta$  相极图

Fig.11 Pole figures of  $\beta$  phase in FZ of annealed joint: (a) alloy A1; (b) alloy A2

## 2.2 力学性能

对 A1、A2 合金焊接态及退火态接头各区域的化学成分进行测定，结果如图 12 所示。从图 12 可以看出，A1、A2 合金在焊接态及退火态下，主元素 Al、Nb、Mo 在焊缝区、热影响区、母材均呈现均匀分布，未出现因局部熔化或快速冷却导致的元素迁移或偏

聚，表明 A1、A2 合金在焊接过程中均具有良好的成分稳定性。对比退火前后，观察到 A1 合金中 Al、Nb、Mo 元素含量基本保持不变，A2 合金中 Al 元素含量基本不变，Nb、Mo 元素含量略微下降。这是由于 A2 合金焊接态接头中过饱和亚稳  $\beta$  相分解为少量  $\alpha+\beta$  相所致。

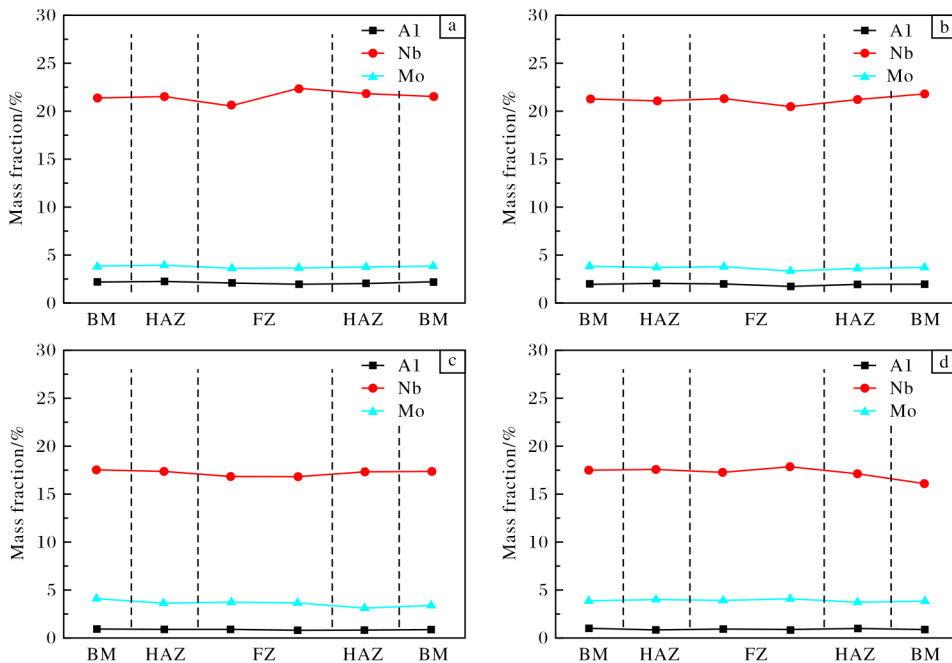


图 12 A1、A2 合金焊接接头成分分布

Fig.12 Composition distribution of welding joints: (a) as-welded alloy A1; (b) annealed alloy A1; (c) as-welded alloy A2; (d) annealed alloy A2

表 2 为 A1、A2 合金基材及接头在不同状态下的力学性能。从表 2 可以看出，具有更高 Mo 当量的 A1 合金在焊接态及退火态下的强度及塑性均优于 A2 合

金。对于焊接态试样，断裂均发生在焊缝区，且抗拉强度和延伸率均低于锻造态，焊接态下 A1 合金的焊接接头系数为 0.87，A2 合金为 0.85，均未能满足 GB

150.1—2011《压力容器 第1部分: 通用要求》中焊接接头系数 $\geq 0.9$ 的要求。对于 Mo 当量 $>10\%$ 的 A1、A2 合金, 焊缝成为整体接头的薄弱区, 裂纹首先在焊缝区萌生及扩展。经退火后, 焊缝区连续生长的柱状晶从中部分解, 转变为多个细小晶粒, 整体晶粒尺寸减小, 在细晶强化的作用下强度及塑性均明显提升, A1 合金焊接接头系数提升至 0.99, A2 合金提升至 0.95。对 A1 合金退火态接头进行低温性能测试, 20 K 下试样抗拉强度为 1403 MPa, 延伸率为 11.5%, 基本达到了基体材料本身的低温力学性能水平, 满足了焊接接头强度及可靠性的要求。

表2 基材及焊接试样力学性能

Table 2 Mechanical properties of base and welded specimens

Specimen	Room-temperature			20 K		
	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$R_m$ /MPa	$A$ /%	
Base	727	511	23.5	1460	10.5	
A1	As-welded	624	497	21.5	—	
	Annealed	709	489	31.0	1403	11.5
A2	Base	689	459	24.5	1424	12.0
	As-welded	588	298	20.5	—	
	Annealed	659	503	24.0	—	

### 3 结论

(1) A1、A2 两种 Ti-Al-Mo-Nb 系低温钛合金采用电子束焊接后, 热影响区均表现为  $\beta$  等轴晶, 焊缝区表现为向焊缝中心对接生长的单一  $\beta$  柱状晶及晶内亚晶。相比 A2 合金, Mo 当量较高的 A1 合金晶粒尺寸更小。经退火后, 热影响区  $\beta$  等轴晶粒长大, 焊缝区发生再结晶, A1 合金仍表现为单一  $\beta$  相, Mo 当量较低的 A2 合金  $\beta$  晶界处析出极少量  $\alpha$  相。

(2) 在电子束焊快速冷却作用下, A1 合金焊接态焊缝区  $\beta$  晶粒表现出  $\{111\}$ //ND、 $\langle 110 \rangle$ //WD 的织构特征, A2 合金  $\beta$  晶存在  $\{111\}$ //ND 集中取向。退火后, A1、A2 合金晶粒取向分布均匀, 织构特征消失。

(3) 通过退火实现了焊缝区晶粒细化, 显著提升了焊接接头的强度及塑性。其中, Mo 当量较高的 A1 合金表现出优异的室温和低温力学性能, 焊接接头系数达到 0.99, 获得了较好的焊缝-基体性能匹配。

#### 参考文献 References

[1] Xu J B, Zhang B W, Qu W T, et al. Advancements and applications of laser surface treatment on titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(5): 1296-1309.

[2] 李典, 陈静, 谭华, 等. 热处理对选区激光熔化 Ti-6Al-4V 合金低周疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(9): 2503-2512.

[3] 杨健, 张开发, 曹江海, 等. VAR 熔炼制备超大规格 TC4 ELI 钛合金铸锭研究[J]. 钛工业进展, 2023, 40(4): 1-5.

[4] 刘伟, 杜宇. 低温钛合金的研究现状[J]. 稀有金属快报, 2007 26(9): 6-10.

[5] Lu Z C, Zhang X H, Ji W, et al. Investigation on the deformation mechanism of Ti-5Al-2.5Sn ELI titanium alloy at cryogenic and room temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 818: 141380.

[6] 刘伟, 杜宇, 卢亚锋, 等. 温度对 CT20 合金孪生变形行为的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(4): 27-30.

[7] 杜宇, 刘伟, 郭获子, 等. CT20 钛合金挤压管坯冷轧过程中的组织演化[J]. 钛工业进展, 2015, 32(2): 28-31.

[8] 杨怡婷, 赵秦阳, 贾致远, 等. 冷轧对 CT20 钛合金微观组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2593-2607.

[9] Arrieta A J, Striz A G. Optimal design of aircraft structures with damage tolerance requirements[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2005, 30(2): 155-163.

[10] 杜宇, 蔡学章, 曹凤华, 等. 焊丝成分对 CT20 合金焊接接头冲击性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(S1): 50-52.

[11] 王厚勤, 甘书赫, 王一帆, 等. 60 mm 厚 TC4ELI 钛合金电子束焊接接头组织与性能研究[J]. 材料开发与应用, 2024, 39(6): 35-43.

[12] 赵彬, 杨英丽, 赵恒章, 等. 低温用 CT20 钛合金的电子束焊接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 838-842.

[13] Zhang Y B, Xin S W, Li T, et al. Investigation of tensile deformation behavior of a TWIP/TRIP metastable  $\beta$  titanium alloy at typical temperature part I: room temperature[J]. Materials & Design, 2024, 248: 113508.

[14] Zhang Y B, Xin S W, Li T, et al. Investigation of tensile deformation behavior of a TWIP/TRIP metastable  $\beta$  titanium alloy at typical temperature part II: 20 K[J]. Materials & Design, 2024, 248: 113509.

[15] Min X H, Tsuzaki K, Emura S, et al. Enhancement of uniform elongation in high strength Ti-Mo based alloys by combination of deformation modes[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13/14): 4569-4578.

[16] 于冰冰, 陈志勇, 赵子博, 等. TC17 钛合金电子束焊接接头的显微组织与力学性能研究[J]. 金属学报, 2016, 52(7): 831-841.

[17] Lütjering G, Williams J C. 钛[M]. 雷霆, 杨晓源, 方树铭, 译. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2011.