

# 双重退火对近 $\alpha$ 钛合金组织及力学性能的影响

杨瑞泽<sup>1</sup>, 栾超<sup>1,2</sup>, 贺文轩<sup>3,4</sup>, 李徐庆<sup>1</sup>, 郭逸丰<sup>1,2\*</sup>, 徐斌<sup>3,4</sup>, 孙明月<sup>1,3,4</sup>

(1. 集萃新材料研发有限公司, 江苏 苏州 215131; 2. 苏州国家实验室, 江苏 苏州 215123; 3. 中国科学院金属研究所, 核材料安全与评估重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 4. 中国科学院金属研究所, 沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** Ti6321 合金作为我国自主研制的近  $\alpha$  型钛合金, 凭借高强度、高韧性及优异耐海水腐蚀性能成为海洋工程关键结构材料。然而常规热处理下其强度与塑性难以兼顾, 限制了在深海极端环境中的应用。以舰船用 Ti6321 钛合金为研究对象, 通过设计退火(970、980、990、1000 °C 保温 2 h 空冷)与双重退火(980 °C 保温 2 h 空冷后, 再经 550 °C 或 600 °C 保温 2 h 空冷)工艺, 结合光学显微镜(OM)观察及力学性能测试, 系统探究了退火工艺对合金组织及力学性能的影响规律。结果表明: 退火时, Ti6321 合金呈现  $\alpha+\beta$  两相区组织演变特征, 980 °C 时强韧性匹配最优; 双重退火通过在  $\beta$  转变组织晶内及晶界析出次生  $\alpha$  相实现组织细化, 其中 980 °C+550 °C 处理可显著提升强度和韧性。研究为海洋工程用 Ti6321 合金热处理工艺优化提供了理论依据。

**关键词:** 钛合金; 双重退火; 双态组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG166

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0055-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Effect of double annealing on microstructure and mechanical properties of near- $\alpha$ titanium alloys

YANG Ruize<sup>1</sup>, LUAN Chao<sup>1,2</sup>, HE Wenxuan<sup>3,4</sup>, LI Xuqing<sup>1</sup>,  
GUO Yifeng<sup>1,2\*</sup>, XU Bin<sup>3,4</sup>, SUN Mingyue<sup>1,3,4</sup>

(1. JITRI Advanced Materials R&D Co., Ltd., Suzhou 215131, Jiangsu, China; 2. Suzhou National Laboratory, Suzhou 215123, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 4. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

**Abstract:** Ti6321 alloy, a near- $\alpha$  titanium alloy independently developed in China, has become a key structural material for marine engineering because of its high strength, high toughness and outstanding seawater-corrosion resistance. Nevertheless, under conventional heat treatment its strength and ductility are difficult to balance, restricting its use in deep-sea extreme environments. In this work, ship-grade Ti6321 alloy was subjected to single annealing (970, 980, 990, 1000 °C for 2 h, air cooled) and duplex annealing (980 °C for 2 h, air cooled, then 550 °C or 600 °C for 2 h, air cooled). The effects of these an-

收稿日期: 2026-01-26; 修回日期: 2026-03-04; 接受日期: 2026-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3714200)。

作者简介: 杨瑞泽, 1997 年出生, 男, 山西临汾人, 硕士, 长期从事特种金属成形及热处理等方面的基础研究工作, E-mail: yang546813766@163.com; \*通信作者: 郭逸丰, 1990 年出生, 男, 河南驻马店人, 长期从事特种合金均质化制备, E-mail: guoyf@szlab.ac.cn。

nealing routes on microstructure and mechanical properties were systematically investigated by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and mechanical testing. The results revealed that single annealing produced the typical  $\alpha+\beta$  two-phase microstructural evolution, with the best strength-toughness combination obtained at 980 °C. Duplex annealing refined the microstructure by precipitating secondary  $\alpha$  phases within and along the boundaries of the  $\beta$ -transformed structure, annealing treatment at 980 °C + 550 °C markedly increased both strength and toughness. This study provides a theoretical basis for optimizing the heat treatment process of Ti6321 alloy for marine engineering applications.

**Key words:** titanium alloy; double annealing; dual-phase microstructure; mechanical properties

## 0 引言

钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性和生物相容性,在航空航天、海洋工程、医疗器械等高端制造领域发挥着不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。其中,Ti6321合金是我国自主研发的一种近 $\alpha$ 型钛合金,名义成分为Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo,具有高强度、高韧性、良好焊接性能和优异的耐海水腐蚀性能,已成为舰船耐压系统、深海探测装备和海洋化工设备的关键结构材料<sup>[4-6]</sup>。

随着海洋工程技术的快速发展,对Ti6321合金的综合性能提出了更高要求。特别是在深海极端环境下服役的构件,不仅需具备高比强度以满足轻量化设计的要求,还需兼具优异的塑性与冲击韧性,以确保在复杂海洋载荷下的结构安全<sup>[7-8]</sup>。然而,Ti6321合金在常规热处理条件下往往面临强度与塑性难以兼顾的矛盾,这限制了其在关键结构件中的进一步应用。

热处理作为调控钛合金组织性能的必要手段,可通过改变热处理参数得到不同形态的 $\alpha$ 相,进而优化合金的力学性能<sup>[9-10]</sup>。传统退火工艺虽然能够获得等轴组织,但在强度和韧性的匹配上仍存在不足。双重退火作为一种关键的热处理工艺,通过高温与低温两步处理得到强韧性匹配良好的组织<sup>[11-12]</sup>。尽管双重退火在TC4、TC11等钛合金中的应用已有报道<sup>[13-14]</sup>,但针对Ti6321合金的系统性研究仍相对缺乏。Ti6321合金独特的化学成分和相变特性决定了其组织演变规律的特殊性,双重退火工艺参数(如高温温度、低温温度、保温时间等)对最终组织性能的影响机制尚不清楚<sup>[15]</sup>。此外,海洋工程应用对Ti6321合金在复杂环境下的服役行为提出了特殊要求,如何通过双重退火工艺调控获得最佳的强韧性匹配,仍是当前亟需解决的关键科学问题。

以舰船用Ti6321合金为研究对象,系统研究了

双重退火工艺对其显微组织演变和力学性能的影响规律。通过设计不同的双重退火工艺方案,结合光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和力学性能测试,阐明双重退火对 $\alpha$ 相形态、含量及分布的影响机制,建立了工艺参数-微观组织-力学性能之间的定量关系,为海洋工程用Ti6321合金构件的热处理工艺优化提供了理论依据和技术支撑。

## 1 试验方法

### 1.1 材料成分

材料为Ti6321环件取下的样品,其化学成分如表1所示,该合金相变温度 $T_p$ 约为1013 °C<sup>[16]</sup>。

表1 Ti6321合金成分  
Table 1 The composition of Ti6321 alloy

Al	Nb	Zr	Mo	Fe	Si	Ti
6.22	3.15	2.17	1.20	0.03	<0.03	balance

### 1.2 试验方法

从Ti6321环件上分别从径向(RD)、轴向(AD)和切向(TD)取11 mm×11 mm×60 mm的性能试样,取样方案如图1所示。取下的性能试样分别进行单道次退火和双道次退火试验,试验方案如图2所示。图2(a)为单退火工艺流程,样品经过5 °C/min升温至试验温度(970、980、990、1000 °C)保温2 h后空冷(AC)。图2(b)为双退火工艺流程,样品经过5 °C/min升温至980 °C保温2 h后空冷至室温,随后再次以同样的升温速率升至低温退火段(550、600 °C)保温2 h后空冷。

### 1.3 检测方法及仪器

将热处理后的试样经打磨、抛光后,用1 mL HF+2 mL HNO<sub>3</sub>+47 mL H<sub>2</sub>O溶液进行腐蚀,采用ZEISS Axio Imager M2m金相显微镜进行显微组织观察。使用image-pro plus图像分析软件对 $\alpha_p$ 和 $\alpha_s$ 相面积占比以及 $\alpha_s$ 宽度进行统计,根据 $\alpha$ 相尺寸统一放大倍数确保 $\alpha_p$ 相、 $\alpha_s$ 相的形貌完整、边界清晰。

试样随机选取 5 个代表性观测区域, 每个区域拍摄 1 张显微图像, 每组共获得不少于 5 张有效图像, 用于后续定量表征分析, 并取平均值为相应面积百分数和  $\alpha_s$  宽度。

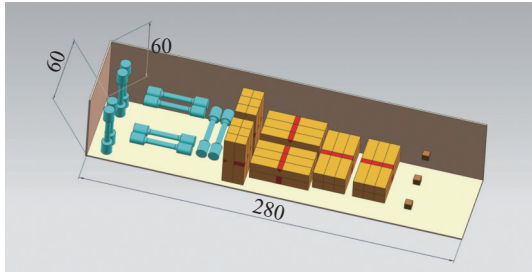


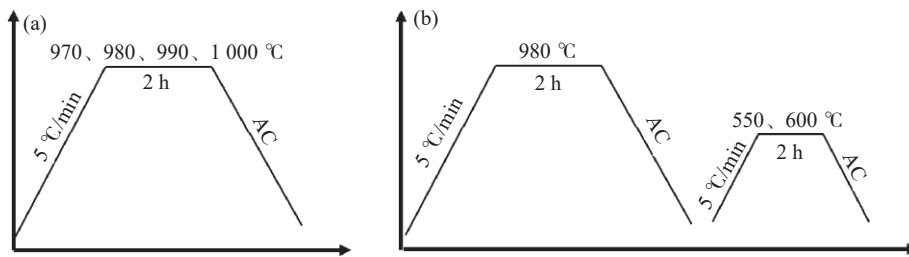
图 1 取样方案示意(单位:mm)  
Fig. 1 Sample plan diagram

将热处理后的试验按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》加工成

尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的标准圆截面试样, 并在 CMT5105 型电子万能试验机上进行拉伸试验。按照 GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》加工成尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$  的标准夏比 V 型缺口试样, 并在 JB-300B 型摆锤式冲击试验机上进行冲击试验。将测试后的力学性能结果取平均值后分析。

## 2 试验结果与讨论

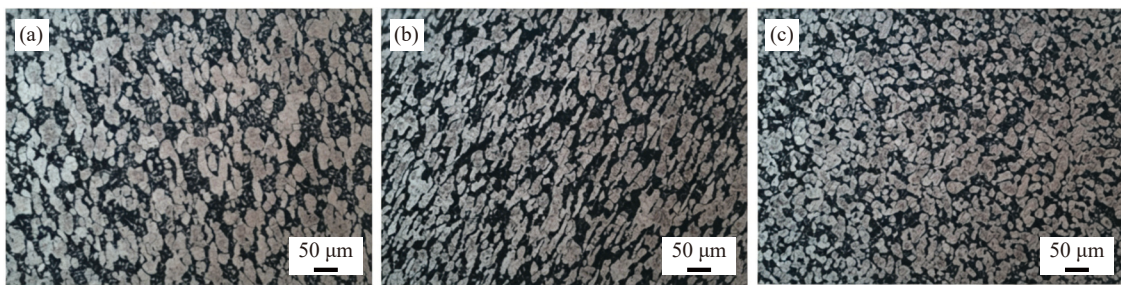
通过 OM 对样品初始组织进行观察, 发现样品为等轴组织, 其轴向与径向可以明显看出拉长的初生  $\alpha$  相 ( $\alpha_p$ ) 晶粒。在轧环过程中, 环件受到非对称三向应力, 等轴的初生  $\alpha$  相晶粒被迫沿主应变方向(轴向 AD 与径向 RD)发生塑性伸长<sup>[17]</sup>, 如图 3 所示。



(a) 单退火; (b) 双退火

图 2 热处理工艺方案

Fig. 2 Heat treatment process



(a) 轴向 AD; (b) 径向 RD; (c) 切向 TD

图 3 样品各个方向初始组织形貌

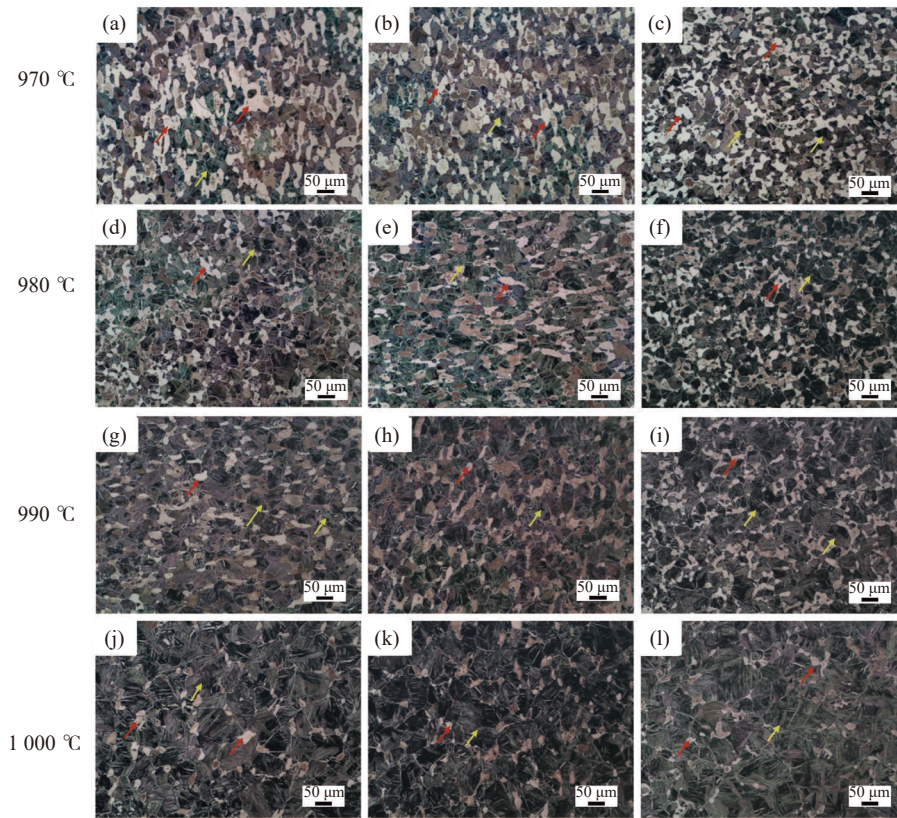
Fig. 3 Initial microstructure of the sample in different directions

### 2.1 单道次退火对钛合金组织及力学性能的影响

样品经过一次退火后的组织如图 4 所示。在 970 ~ 1 000 °C 单退火条件下, Ti6321 钛合金呈现典型的  $\alpha + \beta$  两相区组织演变规律: 970 °C 时, 组织以等轴  $\alpha$  相和网篮状  $\beta$  转变组织为主, 等轴  $\alpha$  相(图 4 中红色箭头所示)占比较高, 晶粒细小且分布相对均匀, 不同方向存在轻微各向异性, 其中径向组织最为均匀, 轴向  $\alpha$  相略有拉长; 980 ~ 1 000 °C 时, 随着温度接近  $\beta$  转变温度(1 013 °C), 等轴  $\alpha$  相占比显著减

少,  $\beta$  转变组织(图 4 中黄色箭头所示)成为主导,  $\alpha$  相沿晶界呈断续网状或条状分布。

图 5 为不同退火温度下样品的相组分图。随着退火温度接近  $\beta$  转变温度(1 013 °C),  $\beta$  相区占比扩大, 初生  $\alpha$  相发生溶解, 同时  $\beta$  相冷却过程中析出的次生  $\alpha$  相数量随高温段  $\beta$  相含量增加而增多; 当温度升至 1 000 °C(接近  $T_\beta$ )时, 初生  $\alpha$  相大量溶解,  $\beta$  相占比快速上升, 次生  $\alpha$  相析出量则因  $\beta$  相稳定性增强而增长趋缓<sup>[18]</sup>。



(a)(d)(g)(j) RD; (b)(e)(h)(k) AD; (c)(f)(i)(l) TD

图 4 970 ~ 1000 °C 不同温度退火后不同方向组织形貌

Fig. 4 Microstructures after annealing at different temperatures (970-1000 °C)

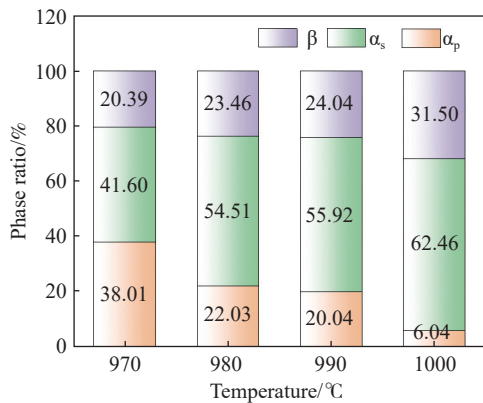


图 5 970 ~ 1000 °C 不同温度退火相组成

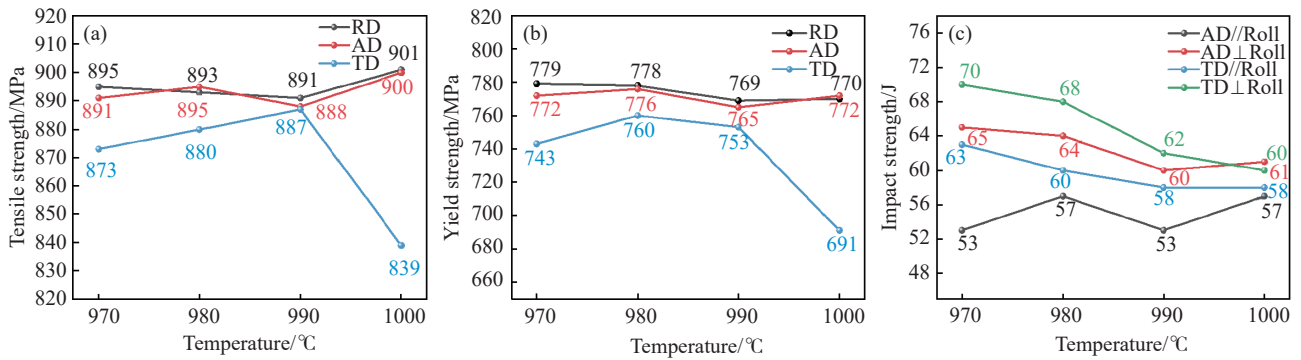
Fig. 5 Phase composition at different annealing temperatures (970-1000 °C)

图 6 为不同退火温度下样品的力学性能, 图 6(a) 为样品在 970 ~ 1000 °C 退火后不同方向的抗拉强度, 结果显示, 径向抗拉强度随着退火温度的升高先下降后上升。而切向的抗拉强度则随温度升高先上升后下降, 先从 873 MPa 升至 887 MPa, 然后降至 839 MPa。图 6(b) 为样品退火后不同方向的屈服强度, 径向屈服强度随着退火温度的升高逐渐下降; 轴向和切向的屈服强度

在 980 °C 最高 (轴向 776 MPa、切向 760 MPa), 990 °C 时有所下降。图 6(c) 为三个方向的冲击功, 从图中可以看出随着退火温度的升高, 冲击功离散程度逐渐下降。

Ti6321 环件经非对称三向应力轧环加工, 其在轧制过程中受到轴向、径向的主压应力和切向的剪切应力作用,  $\alpha_p$  晶粒沿主应变方向 (轴向、径向) 发生塑性伸长, 形成明显的织构特征; 而切向为次应变方向, 晶粒变形程度最小, 未形成明显的择优取向, 且切向组织中晶界滑移阻力显著低于轴向、径向。单退火过程中, 这种由轧环工艺引入的组织各向异性未完全消除, 导致切向在受力时, 位错运动的阻碍作用较弱, 晶间变形更易发生<sup>[17]</sup>, 因此其抗拉强度、屈服强度均为三个方向中最低。

综合组织、相组分与力学性能分析, 980 °C 退火呈现最佳强韧性匹配。在该温度退火保留的等轴  $\alpha$  相保证了基体强度, 而  $\beta$  转变组织提供的多重相界面和层状  $\alpha$  相赋予了材料良好的裂纹偏转能力和塑性变形协调机制。当温度进一步升高至 990 ~ 1000 °C 接近  $T_\beta$  时, 等轴  $\alpha$  相含量减少, 导致强度下降且各向异性减弱, 但韧性储备可能不足<sup>[18-20]</sup>。



(a) 抗拉强度; (b) 屈服强度; (c) 冲击功

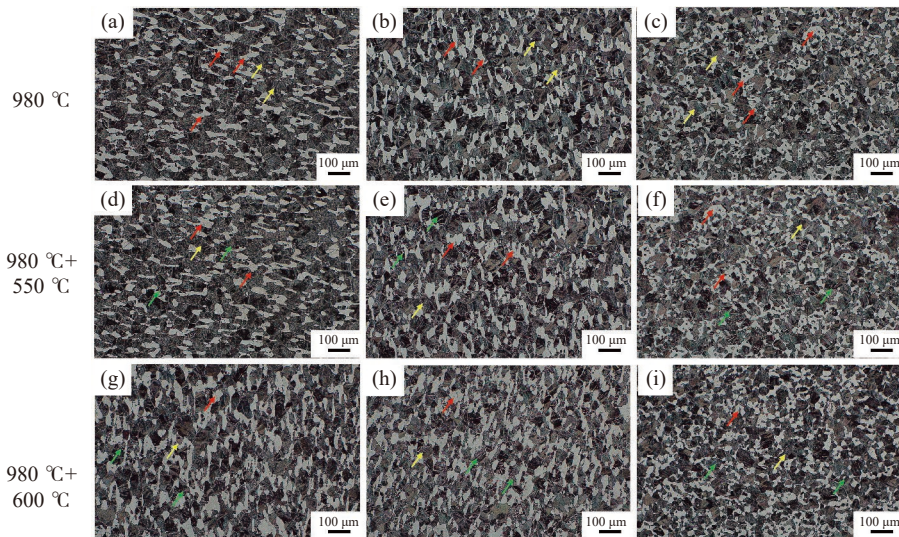
图 6 970 ~ 1000 °C 不同温度退火力学性能

Fig. 6 Mechanical properties after different annealing temperatures (970-1000 °C)

2.2 双重退火对钛合金组织及力学性能的影响

样品经过两次退火后的组织如图 7 所示。980 °C 单退火时, 合金形成由等轴  $\alpha$  相(图 7 中红色箭头所示)和网篮状  $\beta$  转变组织(图 7 中黄色箭头所示)构成的双态结构, 不同方向存在各向异性, 其中切向组织最为均匀, 径向和轴向  $\alpha$  相略有拉长。经 980 °C+550 °C 双退火处理后, 在原  $\beta$  转变组织的晶内及晶界处析出大量细小的次生  $\alpha$  相(图 7 中绿色箭头所示), 使组织整体细化程度提升, 均匀性得到改善, 各向异性略有缓解。当二次回火温度提升至 600 °C 时, 次生  $\alpha$  相的析出量进一步增加且尺寸有所增大, 呈现更清晰的针状或片状分布, 同时轴向与径向的组织各向异性因次生  $\alpha$  相的定向排列而再次凸显。

如图 8(a)~(c) 所示, 在 980 °C 单退火条件下, Ti6321 合金的典型组织为等轴  $\alpha$  相与  $\beta$  转变组织的双态结构, 其中等轴  $\alpha$  相呈弥散分布,  $\beta$  转变组织以网篮状形貌为主, 且不同取样方向存在明显的组织各向异性: 径向组织最为均匀, 轴向  $\alpha$  相呈现轻微拉长特征, 切向组织均匀性介于两者之间。经 980 °C+550 °C 双退火处理(图 8(d)~(f))后, 在原  $\beta$  转变组织的晶内及晶界处析出大量细小的次生  $\alpha$  相, 使组织整体细化程度提升, 均匀性得到改善; 当二次回火温度升至 600 °C(图 8(g)~(i))时, 次生  $\alpha$  相的析出量进一步增加且尺寸有所增大, 同时轴向与径向的组织各向异性因次生  $\alpha$  相(图中红色箭头所示)的定向排列而更为显著。



(a)(d)(g): RD; (b)(e)(h): AD; (c)(f)(i): TD

图 7 980 °C 单次退火和不同双重退火条件下各方向组织形貌

Fig. 7 Microstructural morphology in various orientations under single annealing at 980 °C and different double annealing conditions

980 °C 单道次退火时, 合金形成由等轴初生  $\alpha$  相和片层次生  $\alpha$  相构成的双态结构, 不同方向

存在轻微各向异性, 其中径向组织最为均匀, 轴向  $\alpha$  相略有拉长。经 980 °C+550 °C 双退火处理

后,在原 $\beta$ 转变组织的晶内及晶界处析出大量细小的次生 $\alpha$ 相,使组织整体细化程度提升,均匀性得到改善,各向异性略有缓解。此时相组分统计显示, $\alpha$ 相(初生+次生)占比约78%, $\beta$ 转变组织占比约22%。当二次回火温度升至600℃时,次生 $\alpha$ 相的析出量进一步增加,且如图9(b)所

示,其尺寸从0.906 $\mu\text{m}$ 持续增大至0.939 $\mu\text{m}$ ,呈现更清晰的针状或片状分布;同时轴向与径向的组织各向异性因次生 $\alpha$ 相的定向排列而再次凸显;相组分也发生相应变化:初生 $\alpha$ 转变组织占比升至26.37%,次生 $\alpha$ 相占比微升至55.12%, $\beta$ 相占比降至18.51%。

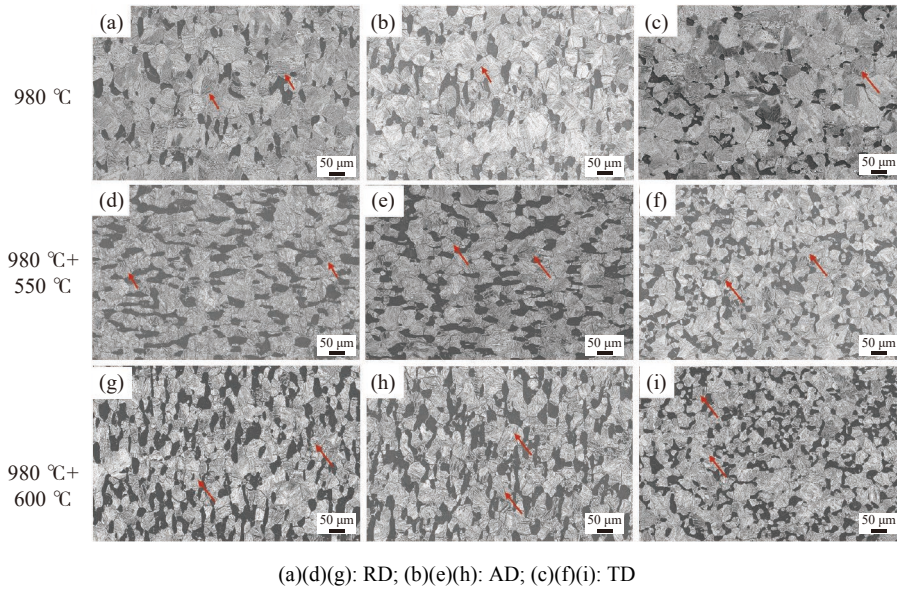
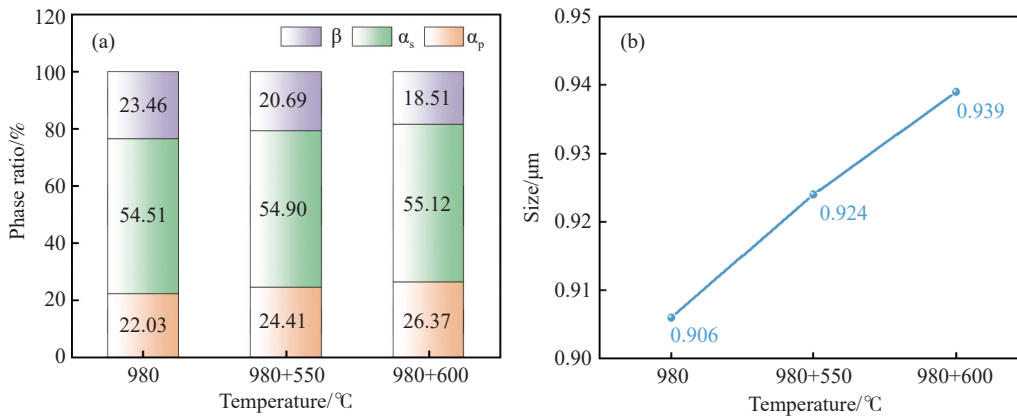


图8 980 °C 单次退火和不同双重退火条件下不同方向组织 SEM 图

Fig. 8 SEM images of microstructures in different orientations under single annealing at 980 °C and various double annealing conditions



(a) 相组分图; (b) 次生 $\alpha$ 相尺寸

图9 双重退火相组分

Fig. 9 Dual annealing phase composition diagram

图10为980℃单次退火和双重退火样品的力学性能屈服强度与抗拉强度均随二次回火温度升高而持续上升:轴向抗拉强度从895MPa升至937MPa,屈服强度从980℃单退火的776MPa升至980℃+600℃的824MPa;径向与切向也呈现相似增长趋势。大部分冲击功呈现先升后降的

趋势,在980℃+550℃双退火时达到峰值,980℃+600℃时回落。轴向//轧面冲击功则从57J降至50J。

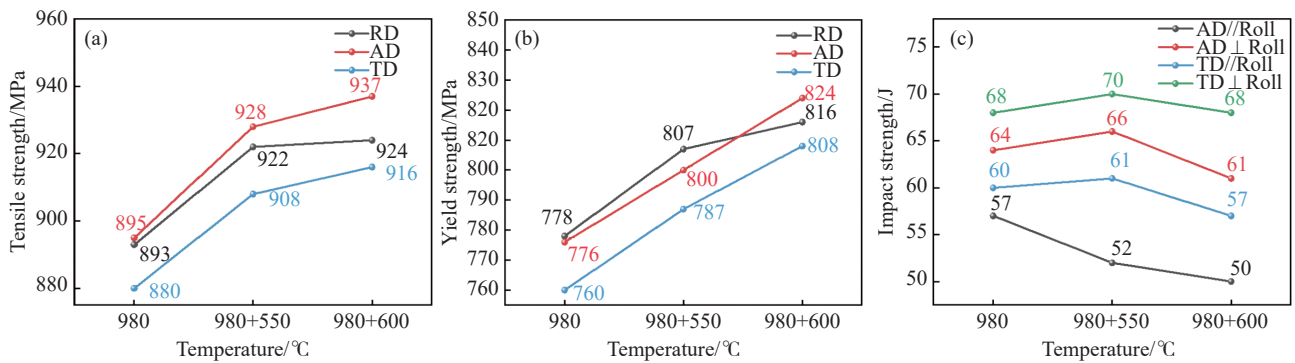
组织演变的差异会直接影响力学性能,单退火状态下,强度与塑性的调控主要依赖于等轴 $\alpha$ 相与 $\beta$ 转变组织的协同作用;双退火工艺则通过次生 $\alpha$

相的析出强化效应, 有效提升合金的屈服强度<sup>[17-18]</sup>。对比两种双退火工艺, 980 °C+550 °C 处理因次生  $\alpha$  相更细小, 强度和冲击韧性均有所提升。

2.3 双重退火组织演变机理

双重退火组织演变机理如图 11 所示, 初始态 Ti6321 合金为近  $\alpha$  钛合金, 以等轴  $\alpha_p$  为主要组成相,  $\alpha$  相之间由细小晶界分隔, 此时  $\beta$  相占比较低, 组织呈均匀的等轴形态。980 °C 处于 Ti6321 合金的  $\alpha+\beta$  两相区, 此温度下部分等轴  $\alpha$  相发生  $\beta$  相变, 形

成  $\beta$  转变组织( $\beta_{trans}$ ); 未转变的  $\alpha$  相保留为  $\alpha_p$ , 最终组织为“ $\alpha_p$ +少量  $\alpha_s$ + $\beta_{trans}$ ”,  $\beta_{trans}$  替代了初始的等轴  $\alpha$  组织, 为后续  $\alpha_s$  相的析出提供了  $\beta$  基体。当 550 °C 二次退火时, 在  $\beta$  基体的晶内、晶界处析出大量  $\alpha_s$ , 最终组织  $\beta$  相减少,  $\alpha_s$  略微加粗, 为“ $\alpha_p$ + $\beta$ + $\alpha_s$ ”的复合结构。当  $\alpha_s$  细小且密集时, 位错被大量细小  $\alpha_s$  阻碍, 强度显著提升; 同时等轴的  $\alpha_p$  可分散应力集中, 避免裂纹快速扩展, 为合金提供基础韧性, 最终实现了强度与韧性的调控<sup>[18-21]</sup>。



(a) 抗拉强度; (b) 屈服强度; (c) 冲击功  
图 10 单次退火和不同双重退火温度力学性能

Fig. 10 Mechanical properties of single annealing and different double annealing temperatures

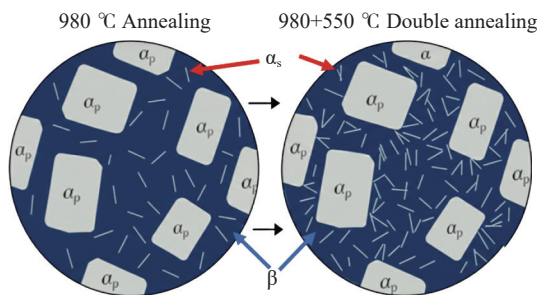


图 11 双重退火组织演变机理

Fig. 11 Mechanism diagram of dual annealing microstructure evolution

980 °C 高温退火为相结构预调控阶段, 该温度处于 Ti6321 合金的  $\alpha+\beta$  两相区, 部分等轴  $\alpha$  相发生向  $\beta$  相的转变, 同时仍保留一定量的  $\alpha_p$ 。随后在空冷过程中, 由于冷却速率较快、原子扩散时间有限, 高温形成的  $\beta$  相难以在冷却过程中充分按平衡相变路径分解并转变为稳定的  $\alpha+\beta$  组织, 因此部分  $\beta$  相以过饱和固溶体的形式被保留下来。该过饱和  $\beta$  基体为后续  $\alpha_s$  析出提供了富含 Al 等  $\alpha$  稳定元素

的母相条件。与此同时, 高温退火后的空冷过程中,  $\beta$  基体内部形成大量均匀分布的晶格缺陷, 这些缺陷成为低温退火时  $\alpha_s$  析出的形核核心。低温退火阶段原子扩散能力有限,  $\alpha$  相形核速率远大于长大速率, 大量细小的  $\alpha_s$  在  $\beta$  基体的晶内、晶界处快速形核, 且因原子扩散距离短, 晶粒无法充分长大, 最终形成尺寸细小、分布均匀的  $\alpha_s$ <sup>[22-23]</sup>。

3 结论

- 1) 单退火工艺中, Ti6321 合金在 970 ~ 1 000 °C 呈现典型  $\alpha+\beta$  两相区组织演变, 力学性能随温度变化呈现特定规律, 980 °C 时强韧性匹配最优。
- 2) 双重退火工艺通过二次低温处理析出次生  $\alpha$  相, 提升了组织细化程度与均匀性, 并缓解了各向异性, 550 °C 二次退火强化效果更显著。
- 3) 经过 980 °C+550 °C 双重退火后 Ti6321 合金次生  $\alpha$  相比例及尺寸均有所增加, 进而提升了强度和冲击韧性。

参考文献

[ 1 ] CHANG H, DONG Y C, DAN Z H, *et al.* Current status and development trends of titanium alloys for marine engineering in China[J]. Materials China, 2020, 39(S1): 585-590.

- (常辉,董月成,淡振华,等.我国海洋工程用钛合金现状和发展趋势[J].中国材料进展,2020,39(S1):585-590.)
- [2] LIN J H, DAN Z H, LU J F, *et al.* Research progress and prospects of marine corrosion of titanium alloys in deep-sea corrosive environments[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 1090-1099.  
(林俊辉,淡振华,陆嘉飞,等.深海腐蚀环境下钛合金海洋腐蚀的发展现状及展望[J].稀有金属材料与工程,2020,49(3):1090-1099.)
- [3] YANG Y L, LUO Y Y, ZHAO H Z, *et al.* Research and application status of titanium alloys for naval ships in China[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 538-544.  
(杨英丽,罗媛媛,赵恒章,等.我国舰船用钛合金研究应用现状[J].稀有金属材料与工程,2011,40(S2):538-544.)
- [4] JANG H Y. Additive forging and structure-properties manipulation of TA31 alloy heavy forgings for marine engineering[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.  
(江海洋.海洋工程用TA31合金大锻件构筑成形及组织性能调控[D].合肥:中国科学技术大学,2023.)
- [5] JIANG H Y, JIANG F Q, XIE B J, *et al.* Effects of the cooling rate on mechanical properties and microstructure of near- $\alpha$  Ti-6Al-3Zr-2Nb-Mo alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 195: 112529.
- [6] JIANG H Y, ZHANG J Y, XIE B J, *et al.* Impact toughness anisotropy of TA31 titanium alloy cylindrical shell after ring rolling[J]. Materials, 2020, 3(19): 4332.
- [7] QUAN S J, SONG K X, ZHANG B B, *et al.* Effect of heat treatment process on microstructure of Ti80 alloy[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2018, 39(5): 44-52.  
(权思佳,宋克兴,张斌斌,等.热处理工艺对Ti80合金显微组织的影响[J].材料热处理学报,2018,39(5):44-52.)
- [8] JIANG H Y, JIANG F Q, XIE B J, *et al.* Effects of the cooling rate on mechanical properties and microstructure of near- $\alpha$  Ti-6Al-3Zr-2Nb-Mo alloy[J]. Materials Characterization, 2023, 195.
- [9] LI P Q, SHEN L H, LI J, *et al.* Effect of annealing cooling rate on residual  $\beta$  phase transformation behavior and mechanical properties of Ti80 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(11): 284-288.  
(李培强,沈立华,李静,等.退火冷却速度对Ti80合金残留 $\beta$ 相转变行为与力学性能的影响[J].金属热处理,2025,50(11):284-288.)
- [10] LIU X H, WU C, HE W P, *et al.* Study on the mechanism of strengthening and toughening of Ti80 alloy based on microstructure control[J]. Materials Development and Application, 2024, 39(4): 28-37.  
(刘向宏,吴聪,和卫平,等.基于显微组织调控的Ti80合金强韧化机理研究[J].材料开发与应用,2024,39(4):28-37.)
- [11] TANG Y X, WANG J, CUI M L, *et al.* Effect of dual annealing process on microstructure and properties of quasi- $\beta$  forged TC18 alloy forgings[J]. Metal Heat Treatment, 2024, 49(11): 262-266.  
(汤育玺,王进,崔明磊,等.双重退火工艺对准 $\beta$ 锻TC18合金锻件组织和性能的影响[J].金属热处理,2024,49(11):262-266.)
- [12] WANG Y Q, ZHANG M Y, ZHAI X J, *et al.* Study on microstructure and tensile properties of TC6 titanium alloy in a double-annealed condition[J]. Nonferrous Metals Processing, 2025, 54(4): 28-31.  
(王永强,张明玉,翟欣姣,等.双重退火态TC6钛合金微观组织与拉伸性能的研究[J].有色金属加工,2025,54(4):28-31.)
- [13] LONG W, XIA Q F, ZHANG S, *et al.* Effect of double annealing on microstructure and properties of deformed TC4 titanium alloy[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2019, 36(5): 50-54.  
(龙玮,夏麒帆,张松,等.双重退火对形变TC4钛合金组织与性能的影响[J].贵州大学学报(自然科学版),2019,36(5):50-54.)
- [14] HAO Y B, HUANG Y L, ZHAO K, *et al.* Research on the microstructure and mechanical properties of double-annealed laser melting deposition TC11 titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 150, 107983.
- [15] HE W, LUAN C, HE C, *et al.* Effect of heat treatment temperatures on the microstructure and mechanical properties of marine engineering titanium alloy ring components[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 39: 3444-3455.
- [16] WANG J, ZHAO Y Q, ZHAO Q Y, *et al.* In-situ study on tensile deformation and fracture mechanisms of metastable  $\beta$  titanium alloy with equiaxed microstructure[J]. Materials 2022, 15, 1325.
- [17] LIU B H, LI K E, ZHAO P C, *et al.* Effect of hot rolling on  $\alpha$  phase precipitation behavior and mechanical properties of Ti55531 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(9): 76-85.  
(刘斌华,李可尔,赵鹏程,等.Ti55531钛合金热轧对 $\alpha$ 相析出行为及力学性能的影响[J].金属热处理,2025,50(9):76-85.)

- [ 95 ] YANG D, LIU Z Q. Surface topography analysis and cutting parameters optimization for peripheral milling titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 51: 192-200.
- [ 96 ] YUAN Y F, CHEN W Y, ZHANG W Y. Experimental study on tool wear in cutting titanium alloy Ti6Al4V[J]. Advanced Materials Research, 2011, 239-242: 2011-2014.
- [ 97 ] RASHID R A R, SUN S, WANG G, *et al.* An investigation of cutting forces and cutting temperatures during laser-assisted machining of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al beta titanium alloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 63: 58-69.
- [ 98 ] JIANG Y J, KONG F S, WANG W, *et al.* Research on new cutting tool technology for new high-strength titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2024, 58: 106-109.  
(姜怡君, 孔繁锦, 王伟, 等. 新型高强度钛合金切削刀具技术研究[J]. 工具技术, 2024, 58: 106-109.)
- [ 99 ] JIANG Z H, WANG L L, SHI L, *et al.* Study on tool wear mechanism and characteristics of carbide tools in cutting Ti6Al4V[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50: 178-184.  
(姜增辉, 王琳琳, 石莉, 等. 硬质合金刀具切削 Ti6Al4V 的磨损机理及特征[J]. 机械工程学报, 2014, 50: 178-184.)
- [ 100 ] WANG Z G, RAHMAN M, WONG Y S. Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys[J]. Wear, 2005, 258: 752-758.
- [ 101 ] SU Y S. Research on machining of titanium alloy using cutting tool with surface texture[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.  
(苏永生. 表面织构刀具切削钛合金的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.)
- [ 102 ] ZHOU X K, XU Z F, WANG K, *et al.* One-step Sinter-HIP method for preparation of functionally graded cemented carbide with ultrafine grains[J]. Ceramics International, 2014, 42: 5362-5367.
- [ 103 ] ZHOU X K, WANG K, XU Z F, *et al.* Effect of powder particle size on gradient formation and grain growth in ultrafine crystalline gradient cemented carbide[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 56: 63-68.

编辑 邓淑惠

(上接第 62 页)

- [ 18 ] XUE Q, PENG W, ZENG W D. Effect of alpha phase morphology and content on properties of TA15 titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32 (2): 13-16.  
(薛强, 彭雯, 曾卫东,  $\alpha$  相形态与含量对 TA15 钛合金力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 32(2): 13-16.)
- [ 19 ] ZHANG H Y, WANG C, LIU D, *et al.* Effects of secondary  $\alpha$  phase on strength and ductility of Ti-6Mo-5V-3Al-2Fe-2Zr alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(6): 2137-2143.  
(张浩宇, 王川, 刘丹, 等. Ti-6Mo-5V-3Al-2Fe-2Zr 合金中次生  $\alpha$  相对强度和塑性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6): 2137-2143.)
- [ 20 ] ZHAI X J, ZHANG M Y, YUE X, *et al.* Effect of dual annealing on microstructure and tensile properties of TA10 titanium alloy[J]. Heat Treatment, 2024, 39(1): 28-31.  
(翟欣姣, 张明玉, 岳旭, 等. 双重退火对 TA10 钛合金组织与拉伸性能的影响[J]. 热处理, 2024, 39(1): 28-31.)
- [ 21 ] JU Z F, MIAO Y, QI H, *et al.* Effect of dual annealing process on microstructure and properties of TC21 titanium alloy plates[J]. Metal World, 2022(1): 66-69.  
(巨朝飞, 苗阳, 齐航, 等. 双重退火工艺对 TC21 钛合金板材组织和性能的影响[J]. 金属世界, 2022(1): 66-69.)
- [ 22 ] LIANG S X, LIU K Y, SHI Y D, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of the Ti-Mo double harmonic alloy after annealing treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 894, 146191.
- [ 23 ] MA Y J, LIU J R, LEI J F, *et al.* Effect of multiple heat treatments on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy[J]. Journal of Materials Research, 2008, 22(5): 555-560.  
(马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 等. 多重热处理对 TC4 合金的组织 and 力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2008, 22(5): 555-560.)

编辑 唐肖