

● 试验研究 Experimental Research ●
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.6054

固溶处理对 TB18 合金晶粒长大行为及硬度的影响

高慧贤^{1,2}, 李科², 刘伟², 赵燕茹², 刘向宏^{1,2}, 罗文忠^{1,2}, 冯勇^{1,2}

(1. 西北工业大学材料学院, 陕西西安 710072; 2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西西安 710018)

摘要: 亚稳 β 钛合金因兼具优异韧性、高比强度、良好耐腐蚀性与强抗疲劳性等综合性能, 成为航空航天领域大型结构件的理想选材, TB18 作为 Ti-5Al-5Mo-5V-6Cr-1Fe/Nb 系新型亚稳 β 钛合金, 其固溶处理后的 β 晶粒尺寸与亚稳相析出是调控合金力学性能的核心因素, 而该合金 β 相区晶粒长大行为及析出对硬度的作用规律尚未明确。为明晰 TB18 合金固溶处理下的 β 晶粒长大机制, 揭示其硬度调控的内在规律, 研究了 TB18 钛合金在 β 相区的晶粒长大行为及其对硬度的作用规律。结果表明, 经 840~990 °C 等温热处理后, TB18 钛合金 β 晶粒的等温长大曲线符合指数关系, 其 β 晶粒长大指数 n 取值范围为 0.12~0.16。动力学因素在 β 晶粒长大过程中占据主导作用, 但其影响效应随保温时间的延长逐渐减弱。TB18 钛合金 β 相晶粒长大激活能为 49.53~56.68 kJ/mol。该合金硬度的提升主要源于原子完全固溶所引发的晶格畸变程度增大, 以及 ω 相析出行为的促进效应。

关键词: 晶粒长大行为; 硬度; TB18 合金; 固溶处理

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)06-0681-06

Grain Growth Behavior and Its Effect on the Hardness of TB18 Alloy after Solution Treatment

GAO Huixian^{1,2}, LI Ke², LIU Wei², ZHAO Yanru², LIU Xianghong^{1,2}, LUO Wenzhong^{1,2}, FENG Yong^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The growth behavior of β grains in a TB18 titanium alloy during heat treatment and its impact on hardness were investigated. The results indicate that when subjected to isothermal heating at 840~990 °C, the isothermal growth curve of β grains in the TB18 titanium alloy follows an exponential relationship, with a β grain growth index (n) ranging from 0.12 to 0.16. Dynamic factors play a dominant role in β grain growth, although their influence diminishes with prolonged holding time. The activation energy for β grain growth of the TB18 titanium alloy ranges from 49.53 to 56.68 kJ/mol. The increase in the hardness of the TB18 alloy is attributed primarily to the increase in lattice distortion resulting from complete atom dissolution and the promotion of ω -phase precipitation.

Key words: grain growth behavior; hardness; TB18 alloy; solution treatment

亚稳 β 钛合金兼具优异韧性、高比强度、良好耐腐蚀性与强抗疲劳性等, 在航空航天领域受到广泛关注与应用^[1-3], 使其成为大型航空结构件的理想选材, 可替代部分超高强度的结构材料。TB18 合金是一种新型钛合金, 属于 Ti-5Al-5Mo-5V-6Cr-1Fe/Nb 系, 其独特的 β 相基元成分赋予合金优良的强度、

韧性与硬度综合特性^[4]。

固溶强化是提升钛合金力学性能的关键工艺, 该工艺通过将合金加热至特定温度, 使组织中特定相充分溶解, 再经快速冷却使这些相以过饱和状态保留于基体中^[5]。此过程不仅能消除热加工环节中动态效应造成的组织不均匀性, 有效调控初生 α 相

收稿日期: 2026-03-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52431001)

作者简介: 高慧贤, 1981 年生, 博士生, 高级工程师。研究方向为钛合金材料开发与检测。Email: gaohuixian@c-wst.com

通信作者: 刘向宏, 1967 年生, 博士, 教授级高级工程师。主要从事钛合金及高温合金材料开发研究。Email: 15754303726@163.com

引用格式: 高慧贤, 李科, 刘伟, 赵燕茹, 刘向宏, 罗文忠, 冯勇. 固溶处理对 TB18 合金晶粒长大行为及硬度的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(6): 681-686.

GAO H X, LI K, LIU W, ZHAO Y R, LIU X H, LUO W Z, FENG Y. Grain growth behavior and its effect on the hardness of TB18 alloy after solution treatment[J]. Foundry Technology, 2026, 47(6): 681-686.

的含量;还能让固溶热处理后的 β 基体在后续时效过程中, α 稳定元素逐渐偏聚并诱发合金相变,析出细小弥散的强化型 α 相,显著提升合金强度^[6-7]。锻态 β 型钛合金中,初生 α 相多以粗大球状或拉长短棒状与 β 基体共存,导致材料综合力学性能不佳;而经固溶处理后,通过调控冷却速率可获得单一 β 相组织,此时后形成的 β 晶粒尺寸成为影响合金性能的核心因素,一般而言,晶粒越细小,合金的强度与硬度表现越优异^[8]。值得关注的是,钛合金中特定条件下析出的 ω 相对材料性能的调控作用,近年来已成为钛合金领域的研究热点。1954年,Frost和Parri首次在Ti-Cr与Ti-Mo合金中发现了 ω 相的存在^[9]。亚稳 β 型与近亚稳 β 型钛合金中,通常会添加Mo、V、Nb、W、Ta、Fe、Cr等 β 相稳定元素,其目的是确保合金从高温 β 相区固溶淬火后,能在室温下获得单一的 β 相组织。但当合金中 β 相稳定元素处于临界浓度附近时,合金经高温淬火后会析出无热 ω 相,该相的形成使合金强度和硬度急剧提升,而塑性则大幅下降^[10]。对于 β 相稳定元素含量较高的合金,淬火过程中虽不会形成无热 ω 相,但会在后续时效处理中析出等温 ω 相^[11]。由此可见,近 β 钛合金的强化效果主要取决于 β 晶粒尺寸及亚稳相的类型、数量与成分。因此,探究热处理过程中 β 晶粒与第二相的演变规律,明晰TB18合金固溶处理后的 β 晶粒长大行为与相析出行为,对揭示该合金强度与韧性的内在作用机制具有重要意义^[12-13]。

本文系统阐明TB18合金固溶处理后的 β 晶粒长大行为、相析出行为及其对合金硬度的影响规律,深化对TB18合金固有力学行为的理解,为其热处理工艺设计与优化提供重要理论指导,研究结果也可从事钛合金研发的工程技术人员与材料科学工作者提供参考,助力提升该类钛合金在严苛航空航天应用场景中的服役性能。

1 实验材料与方法

实验所用TB18合金由西部超导材料科技股份有限公司锻造成400 mm规格的坯料。原始组织为 $\alpha+\beta$ 两相区加工组织,转变 β 基体上分布着等轴的初生 α 相。采用金相法测定该合金的 β 相变温度为 $(810\pm3)^\circ\text{C}$,其原始组织和化学成分如图1和表1所示。

采用电火花线切割在锻造坯料的0.5R位置切取试样,随后将试样置于控温精度为 $\pm 3^\circ\text{C}$ 的电阻炉中进行热处理试验。热处理温度分别设置为840、870、900、930、960、990 $^\circ\text{C}$,保温时间依次为0.5、1、

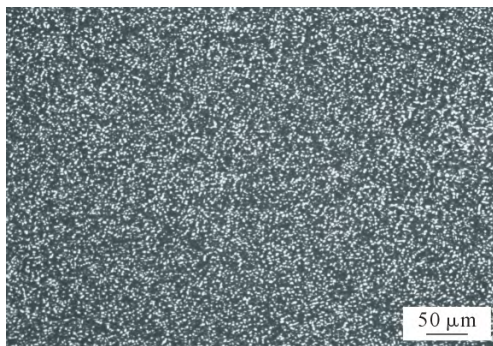


图1 TB18合金原始显微组织

Fig.1 Original microstructure of the TB18 alloy

表1 TB18合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the TB18 alloy
(mass fraction/%)

Element	Al	Mo	V	Cr	Nb	Ti
Content	4.94	4.92	4.89	5.82	0.94	Bal.

2、4、8 h,保温结束后对试样进行水淬处理。对制备试样进行抛光,并采用Kroll试剂进行腐蚀。借助光学显微镜(OM, ZEISS AXIO VERT.AI)、扫描电子显微镜(SEM, FEI Helios G4 CX)及透射电子显微镜(TEM, Thermo Fisher Talos F200X)对TB18合金显微组织进行表征。依据GB/T 6394,采用截点法并结合Image-Pro Plus软件完成晶粒尺寸的测定。硬度测试采用维氏硬度(Zwick ZHV10),试验载荷约为50 N,保载15 s,每个试样测5个点,剔除异常值后取算术平均值作为最终硬度。

2 实验结果及讨论

2.1 TB18合金的 β 晶粒长大行为

不同温度下保温0.5 h热处理后试样的显微组织如图2所示。随着固溶温度升高,TB18合金的 β 晶粒尺寸逐步粗化;当温度达到930 $^\circ\text{C}$ 时, β 晶粒的长大速率显著加快。在保温0.5 h的不同固溶温度条件下,TB18合金的 β 晶粒平均尺寸依次为182、220、231、257、298和387 μm 。900 $^\circ\text{C}$ 下经不同时长保温处理的TB18合金BSE像如图3所示。随保温时间延长,该合金的等轴 β 晶粒发生明显粗化。在900 $^\circ\text{C}$ 、不同保温时间下,TB18合金的 β 晶粒平均尺寸分别为235、262、293、321和348 μm 。

图4a和b分别为 β 晶粒尺寸与保温时间、固溶温度的关系曲线。由图可知,固溶温度是晶粒长大的主要决定因素,较高的固溶温度会促进晶界迁移和晶粒粗化,原子的快速扩散会驱动晶界快速迁移,进而加速晶粒长大。低温固溶处理时,固溶原子的扩散速率缓慢,会抑制晶界运动,阻碍晶粒长大;而当温度超过930 $^\circ\text{C}$ 后,固溶原子获得充足的激活能以实现迁移,由此加速晶界移动,最终使晶粒长大行

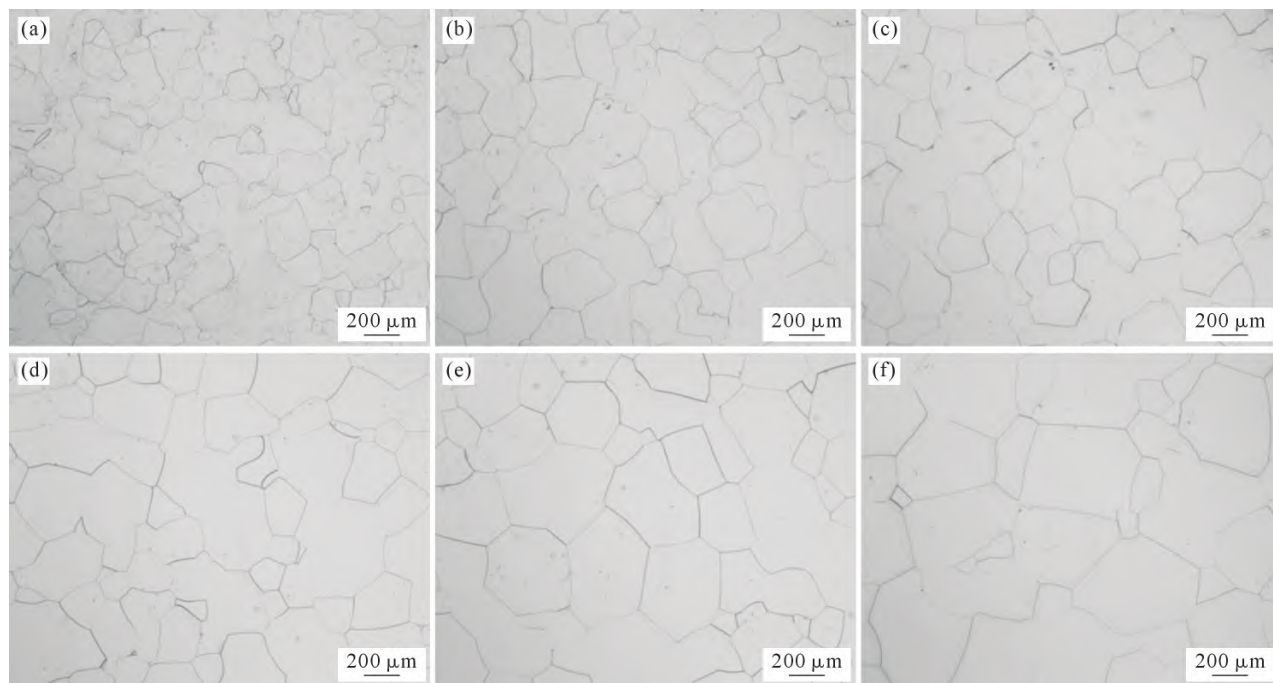


图2 不同温度下保温 0.5 h 的 TB18 合金固溶处理后显微组织:(a) 840 °C;(b) 870 °C;(c) 900 °C;(d) 930 °C;(e) 960 °C;(f) 990 °C
Fig.2 Microstructures of the TB18 alloy samples after solution treatment at different temperatures for 0.5 h: (a) 840 °C; (b) 870 °C; (c) 900 °C; (d) 930 °C; (e) 960 °C; (f) 990 °C

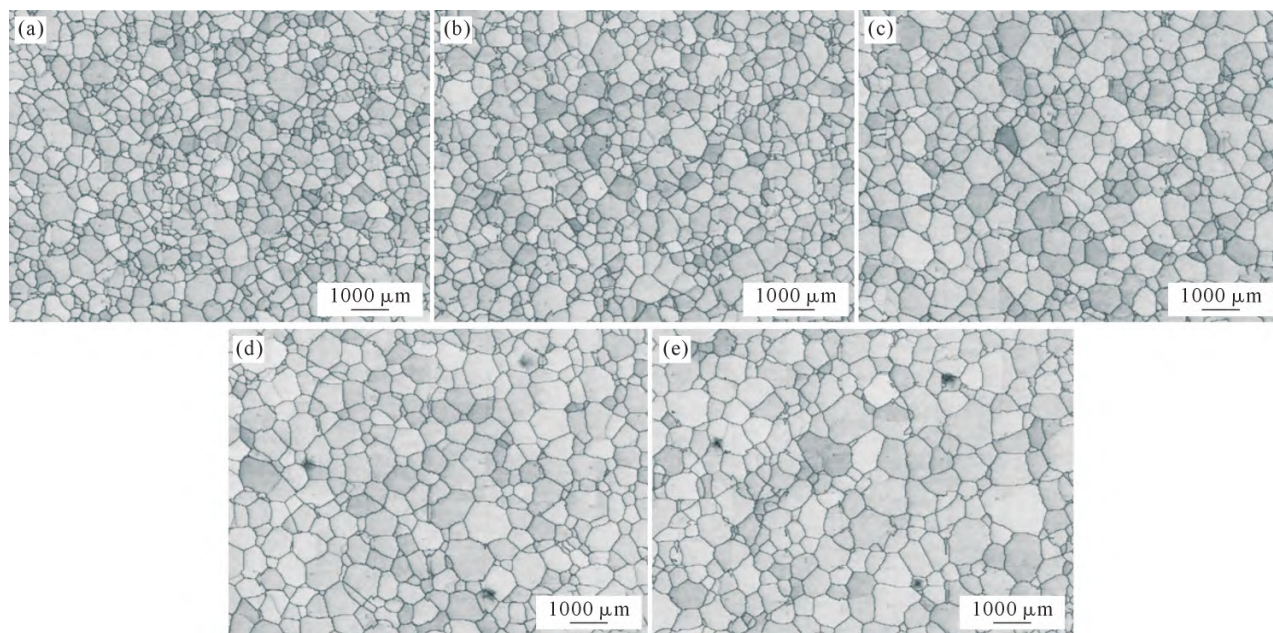


图3 900 °C下不同保温时间的 TB18 合金背散射电子图像:(a) 0.5 h;(b) 1 h;(c) 2 h;(d) 4 h;(e) 8 h
Fig.3 BSE images of the TB18 alloy held at 900 °C for different durations: (a) 0.5 h; (b) 1 h; (c) 2 h; (d) 4 h; (e) 8 h

为显著增强。

钛合金晶粒的等温长大过程中,晶粒尺寸与加热时间的关系近似符合幂函数规律,可用 Beck 方程^[14]描述:

$$D=kt^n \quad (1)$$

式中, D 为平均晶粒尺寸; t 为等温退火时间; n 为晶粒长大指数; k 为与合金成分和温度相关的长大系数。将式(1)取对数可得:

$$\ln D = \ln k + n \ln t \quad (2)$$

图 4c 为不同固溶温度下 TB18 合金的 $\ln D$ 与 $\ln t$ 关系曲线。在各固溶温度下, $\ln D$ 与 $\ln t$ 均呈现良好的线性关系,且不同固溶温度下的 β 晶粒长大指数 n 介于 0.13~0.16 之间,远低于纯钛的晶粒长大指数(0.5)。该差异源于溶质拖拽、晶体织构、自由表面影响,以及材料内部的位错亚结构等对晶粒长大的综合作用。此外,晶界处的晶内吸附作用会使合金元素原子在晶界富集。晶界迁移过程中,溶质原子发生体扩散,而体扩散速率远慢于晶界扩散,因此溶质原

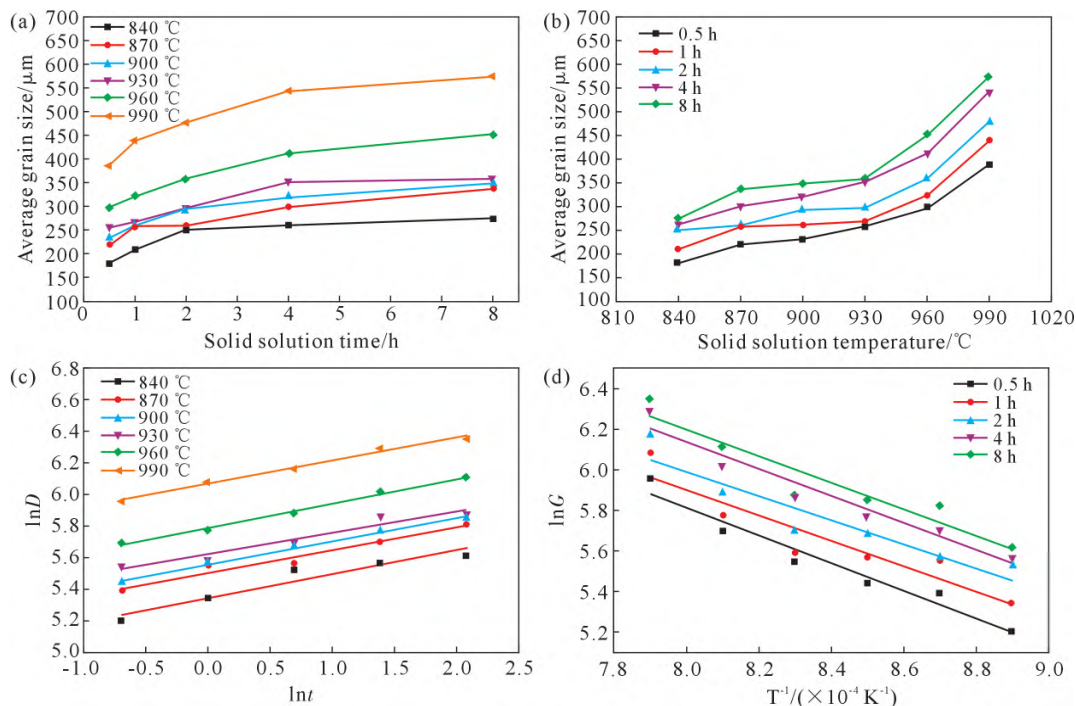


图4 β 晶粒尺寸与保温时间、固溶温度的关系曲线:(a) β 晶粒尺寸与固溶时间的关系;(b) β 晶粒尺寸与固溶温度的关系;(c) 不同固溶温度下 TB18 合金的 $\ln D$ 与 $\ln \tau$ 关系;(d) 不同保温时间下 TB18 合金的 $\ln G$ 与 T^{-1} 关系

Fig.4 Relationships of β grain size with solid solution time and temperature: (a) relationship of β grain size with solid solution time; (b) relationship of β grain size with temperature; (c) relationship between $\ln D$ and $\ln \tau$ of the TB18 alloy after solution treatment at different temperatures; (d) relationship between $\ln G$ and T^{-1} of the TB18 alloy after solution treatment for different durations

子会对晶界产生一定的“钉扎”作用,降低晶界运动的驱动力,阻碍晶界迁移。相同保温时间下,加热温度对晶粒长大的影响可用 Arrhenius 方程^[15]描述:

$$G = G_0 \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \quad (3)$$

式中, G_0 为与合金成分相关的长大系数; Q 为晶界迁移激活能; R 为气体常数, 取值 8.314 J/mol ; T 为绝对温度, K 。将式(3)两边取对数可得:

$$\ln G = \ln G_0 - \frac{Q}{RT} \quad (4)$$

图 4d 为不同保温时间下 TB18 合金的 $\ln G$ 与 T^{-1} 关系曲线。由图可知, 各保温时间下二者均呈现良好的线性关系, 据此计算得到 TB18 合金 β 相晶粒长大激活能为 $49.53 \sim 56.68 \text{ kJ/mol}$ 。该值仅为 β 型钛合金体扩散激活能(166 kJ/mol)的 $30\% \sim 35\%$, 亦显著低于同系列近 β 钛合金 Ti55531 的 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变热激活能 188.04 kJ/mol ^[16]。这一特征直接表明, TB18 合金的晶界迁移并非由体扩散主导, 而是以晶界短程扩散为主要方式。事实上, TB18 合金的晶界迁移行为本质上依赖于晶界处的短程扩散过程, 晶界界面作为缺陷富集区域, 原子迁移活性更强, 使得晶界迁移所需克服的能垒显著降低, 这也是其晶粒长大激活能远低于体扩散激活能的核心原因。固体扩散领域的经典研究结论亦证实, 晶界扩散等短程扩散方式的激活能仅为体扩散的 $1/3 \sim 1/2$, 与本研究

TB18 合金激活能为 β 型钛合金体扩散激活能 $30\% \sim 35\%$ 的实验结果高度契合。而 Contieri 等^[15]针对纯钛再结晶与晶粒长大的研究, 进一步验证了钛及钛合金中晶界迁移的核心驱动力为晶界短程扩散。由此佐证了晶界短程扩散主导 TB18 合金晶界迁移, 进而导致其 β 相晶粒长大激活能显著偏低的结论。此外, TB18 合金对温度升高表现出明显的敏感性, 该特征在 β 相区加热条件下尤为显著。

2.2 TB18 合金固溶处理后的硬度

如图 5a 所示, TB18 合金的硬度表现出明显的温度与时间依赖性: 在保温时间恒定的条件下, 硬度随固溶温度的升高呈稳步递增趋势; 而在固定固溶温度下, 硬度随保温时间的延长亦持续增大。这可归因于当 TB18 合金在 β 相变点以上进行热处理时, 原子扩散能力显著增强, 合金元素快速向基体间隙位置固溶。这种过饱和固溶过程引发了剧烈的晶格畸变, 破坏了基体原有的点阵周期性, 从而产生显著的固溶强化效应, 直接提升了材料抵抗塑性变形能力, 进而使材料硬度提升。图 5e 为 TB18 合金在 900°C 下经不同保温时间处理后的 XRD 谱。数据分析显示, 保温 0.5 、 2.0 、 8.0 h 的试样中, β 相(110)晶面的晶格常数分别为 1.7128 、 1.7152 、 1.7178 nm 。随着保温时间延长, 晶格常数呈逐渐增大的趋势, 这反映了合金元素在基体中固溶度的进一步提升, 也印证

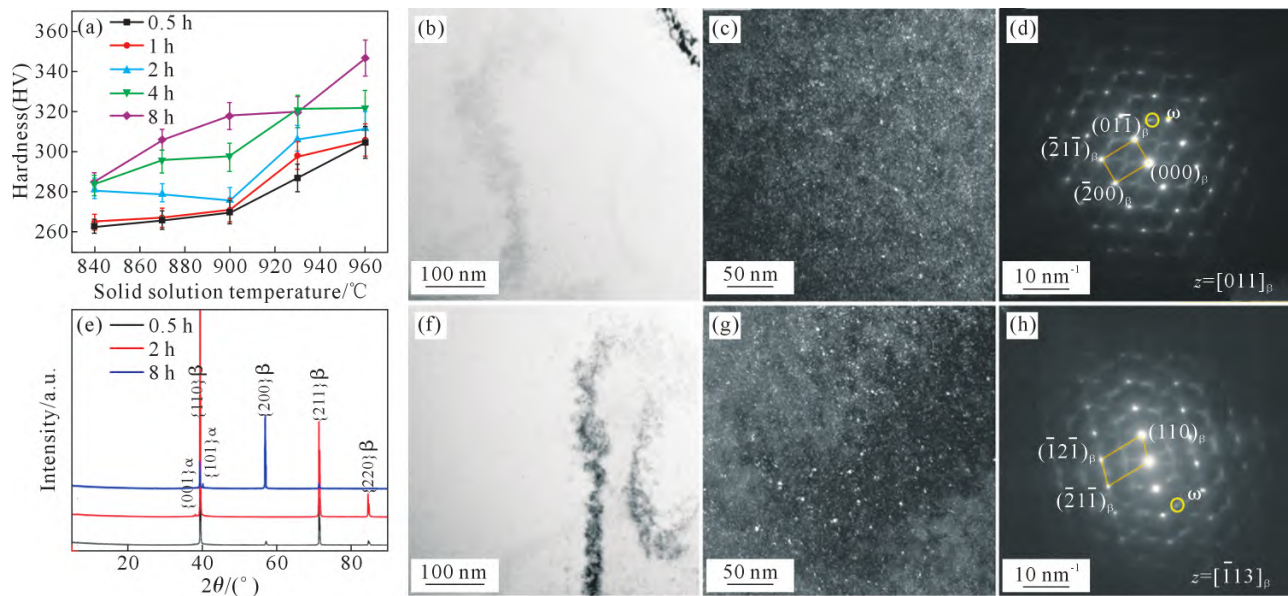


图5 TB18合金固溶处理后的硬度、TEM照片及XRD谱:(a)硬度与固溶温度及固溶时间的关系;(b~d)900℃保温2h合金明场像、暗场像及衍射斑点谱;(e)900℃下保温0.5、2、8h的合金XRD谱;(f~h)900℃保温8h合金明场像、暗场像及衍射斑点谱
Fig.5 Hardness, TEM images and XRD patterns of the TB18 alloy after solution treatment: (a) relationship between the hardness and solution temperature and solution time; (b~d) bright field image, dark field image and diffraction spot pattern of the alloy treated at 900 °C for 2 h; (e) XRD patterns of the alloy after heat treatment at 900 °C for 0.5, 2, and 8 h; (f~h) bright field image, dark field image and diffraction spot pattern of the alloy treated at 900 °C for 8 h

了晶格畸变随时间累积的演化规律。

此外,Zhang等^[17-18]的研究指出,将亚稳态 β 钛合金在 β 相变温度以上加热一段时间后,经空冷或水冷处理,基体内部极易发生亚稳相变,析出具有高硬度的 ω 相。对TB18合金微观组织的精细表征(图5b~d与f~h)证实了这一推测,在900℃保温2h(图5b)和900℃保温8h(图5f)明场像中,可观察到均匀分布的球形颗粒,而在900℃保温2h(图5c)和900℃保温8h(图5g)暗场像中,这些颗粒呈现出明显的亮衬度特征。结合900℃保温2h(图5d)和900℃保温8h(图5h)选区电子衍射花样中沿 $\langle 011 \rangle_\beta$ 及 $\langle -113 \rangle_\beta$ 轴带出现的清晰额外斑点,可明确判定该球形析出相为 ω 相。值得注意的是,随固溶温度升高与保温时间延长,合金的 β 晶粒发生明显粗化,根据霍尔-佩奇公式^[9],晶粒粗化会降低晶界对位错滑移的阻碍作用,带来材料软化的固有趋势。然而,当前实验条件下,晶粒粗化的软化效应,被合金元素充分固溶带来的固溶强化、以及纳米 ω 相析出带来的析出强化的叠加效应完全覆盖,因此宏观上仍表现为硬度随固溶温度升高、保温时间延长持续增大。

综上,TB18合金硬度的升高与其晶粒尺寸增大呈正相关,这一现象是固溶强化与析出强化共同作用的结果。

3 结论

(1)TB18合金 β 晶粒尺寸随固溶温度升高、保

温时间延长持续增大,930℃为晶粒长大速率显著提升的临界温度。该合金晶粒长大指数 n 为0.13~0.16, β 相晶粒长大激活能为49.53~56.68 kJ/mol。

(2)在固溶温度为840~990℃、保温时间为0.5~8.0 h的工艺区间内,合金硬度表现出显著的温度与时间依赖性:相同保温时间下,硬度随固溶温度升高呈稳步递增趋势;相同固溶温度下,硬度随保温时间延长持续增大,其中固溶温度是调控合金硬度的核心工艺变量。

(3)TB18合金固溶后的硬度提升,是固溶强化与纳米 ω 相析出强化协同作用的结果。一方面,随固溶温度升高和保温时间延长,合金元素充分固溶引发 β 基体晶格畸变持续加剧,产生显著的固溶强化效应;另一方面,过饱和 β 基体在淬火过程中析出纳米级硬质 ω 相,通过钉扎位错、阻碍位错滑移产生强析出强化效应,二者的叠加效应完全覆盖了晶粒粗化带来的软化趋势,最终实现合金硬度的持续提升。

参考文献:

- [1] FU Y, PENG H B, WANG H, WANG H L, CHENG J, WEN Y H, XIAO W L, ZHAO X Q, MA C L. Engineering omega phase enables a wide temperature range Elinvar effect in metastable β -Ti alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 225: 159-164.
- [2] DU Z H, CHENG J, RAN X, WANG Z, HE Y X, ZHANG X H, ZHU X Y, ZHANG J Z, XU W, LU X. Effects of feedstock powder

- on wear, corrosion, and tribocorrosion performances of Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V fabricated by additive manufacturing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 177748.
- [3] WANG Z, ZHANG H Y, WANG S Y, CHENG J, WANG C, ZHOU G, ZHANG S Q, CHEN L J. A machine learning method based on TPE-XGBoost model for TRIP/TWIP near- β titanium alloy design[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110309.
- [4] SU G Y, CHANG J Q, ZHAI Z R, WU Y N, MA Y J, YANG R, ZHANG Z B. On the role of grain morphology in the mechanical behavior of laser powder bed fusion metastable β titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 909: 146844.
- [5] CHEN W T, HUANG S J, WANG K H, WEN Z H, ZHAO J, LIU G. Effects of solution treatment on microstructure and properties of Ti-5.7Al-3.9Sn-0.91Mo-3.4Zr-0.40Si-0.38Nb-0.95Ta titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 918: 147439.
- [6] 周伟, 辛社伟, 刘向宏, 冯军, 李少强, 张新全, 王凯旋, 王涛, 杨晶. BASCA 热处理对 TB18 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2023, 40(5): 15-20.
- ZHOU W, XIN D W, LIU X H, FENG J, LI S Q, ZHANG X Q, WANG K X, WANG T, YANG J. Effect of BASCA heat treatment on microstructure and mechanical properties of TB18 titanium alloy[J]. *Titanium Industry Progress*, 2023, 40(5): 15-20.
- [7] 刘向宏, 赵宁, 王涛, 杨晶, 李少强, 杜予恒, 康家瑞, 任晓龙. 固溶处理对 TB18 钛合金微观组织和力学性能的影响规律[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(11): 3101-3110.
- LIU X H, ZHAO N, WANG T, YANG J, LI S Q, DU Y H, KANG J R, REN X L. Effect of solid solution heat treatment on the microstructure and mechanical properties of TB18 titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(11): 3101-3110.
- [8] WANG Z M, LU J, SONG Y L, YU Y Q, WU Y H, XIE L C, HUA L. Mechanical properties improvement of titanium alloy and its grain boundary dislocation evolution mechanism by novel electroshock treatment[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 1437-1448.
- [9] FROST P D, PARRIS W M, HIRSCH L L, DOIG J R, SCHWARTZ C M. The isothermal transformation of titanium-chromium alloys[J]. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1954, 46: 231.
- [10] 赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 曾卫东, 王磊. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
- [11] 张廷杰. 钛合金相变的电子显微镜研究(IV): 钛合金中的 ω 相变[J]. *稀有金属材料与工程*, 1989(5): 77-82.
- [12] HUANG D Y, LIAN Z H, ZHAO Z Y. Isothermal β grain growth kinetics and mechanical properties of Ti-351 titanium alloy[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40: 109896.
- [13] ZHANG B G, YANG K, SHEN L, DUAN X Y, ZHAO S Y, GAO W B, XU C Y, WANG J. Development, exploration and optimization of porous titanium and titanium alloys: A review[J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2025, 10(2): 100863.
- [14] SADEGHPOUR S, JAVAHERI V, BRUSCHI S, KÖMI J, KARJALAINEN P. Strain rate and mechanical stability in determining deformation behavior of beta Ti alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 798: 140274.
- [15] CONTIERI R J, ZANOTELLO M, CARAM R. Recrystallization and grain growth in highly cold worked CP-titanium[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527: 3994-4000.
- [16] 王广楠, 张晓冰, 李志友, 周科朝. Ti55531 合金连续升温过程相变行为[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24 (7): 1771-1777.
- WANG G N, ZHANG X Y, LI Z Y, ZHOU K C. Phase transformation of Ti55531 alloy during continuous heating process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(7): 1771-1777.
- [17] ZHANG F, FENG J, XIANG W, QIANG F, WU H Y. Enhanced mechanical properties in metastable β titanium alloy via ω -assisted nucleation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 858: 144082.
- [18] ZHANG Y, XIANG S, TAN Y B, JI X M. Study on ω -assisted α nucleation behavior of metastable β -Ti alloys from phase transformation mechanism[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 890: 161686.
- [19] CHONG Y, DENG G Y, GAO S, YI J H, SHIBATA A, TSUJI N. Yielding nature and Hall-Petch relationships in Ti-6Al-4V alloy with fully equiaxed and bimodal microstructures[J]. *Scripta Materialia*, 2019, 172: 77-82.

(责任编辑:李亚敏)