

TB18 钛合金 β 热处理后组织特征与力学性能的关系研究

周伟¹, 辛社伟¹, 刘向宏^{1,2}, 张新全³, 王晓¹, 闫康¹, 王涛²

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710021)

(3. 中国航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089)

摘要: 以 TB18 钛合金工程应用为目标制定最佳 β 热处理工艺, 研究了 β 热处理后的组织特征对力学性能的影响。研究表明, TB18 钛合金 β 热处理后晶粒尺寸较小 ($\leq 100 \mu\text{m}$) 时, 合金具有优异的强度和塑性, 增大晶粒尺寸, 合金强度和塑性均降低。当晶粒尺寸约为 $200 \mu\text{m}$ 时, 合金具有较好的强度-塑性-韧性匹配。TB18 钛合金经 β 相区固溶处理缓慢冷却会形成连续晶界 α 相 (α_{GB}), 严重降低塑性, 建议 TB18 钛合金大锻件的整体 β 热处理应采用相应的快速冷却手段, 避免形成连续 α_{GB} 。TB18 钛合金析出强化效应随析出相含量的增加而提高, 随析出相尺寸的增大而降低, 合金塑性呈现相反的变化趋势。当 β 热处理后析出相充分析出, 并保持一定的片层尺寸时, TB18 钛合金能够获得良好强度-塑性-韧性匹配。

关键词: 高强钛合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)03-008-06

Study on Relationship between Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of TB18 Titanium Alloy after β Heat Treatment

Zhou Wei¹, Xin Shewei¹, Liu Xianghong^{1,2}, Zhang Xinquan³, Wang Xiao¹, Yan Kang¹, Wang Tao²

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

(2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

(3. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: The influence of microstructure characteristics on mechanical properties of TB18 titanium alloy after β heat treatment was investigated. The results show that TB18 titanium alloy has excellent strength and plasticity when the β grain size is small ($\leq 100 \mu\text{m}$). However, both strength and plasticity of the alloy are reduced with the grain size increases. When the grain size is approximately $200 \mu\text{m}$, the alloy has a good strength-plasticity-toughness matching. The continuous grain boundary α phase (α_{GB}), observed after β solution treatment with slowly cooling, significantly reduces ductility. Furthermore, the current work suggests that the overall β heat treatment of large TB18 titanium alloy forgings should adopt corresponding rapid cooling processes to avoid the formation of continuous α_{GB} and the reduction of performance. The precipitation strengthening effect of TB18 titanium alloy is enhanced with the increase of precipitated phase content, and decreases with the increase of precipitated phase size. But the plasticity shows an opposite law. By optimizing the content of precipitated phases and maintaining the sheet size after β heat treatment, TB18 titanium alloy can obtain a good strength-plasticity-toughness matching.

Keywords: high strength titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性能优异、无磁等特点, 被广泛应用于航空、航天、舰船、生物医疗等

领域^[1-2]。与 α 型和 $\alpha+\beta$ 型钛合金相比, β 型钛合金具有更高的比强度、良好的可加工性以及抗裂纹扩展能力, 作为航空结构材料替代高强钢能够取得良好的减重效果^[3]。

轻量化是航空领域永恒的主题, 材料选择是轻量

收稿日期: 2024-11-21

通信作者: 周伟 (1978—), 女, 正高级工程师。

化设计的重要环节。TB18 钛合金是近年来开发的一种 1300 MPa 级超高强钛合金^[4]。与其他高强钛合金相比, TB18 钛合金具有更高的强度 (≥ 1300 MPa) 和韧性 ($60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 匹配以及良好的淬透性, 同时具有较宽的热加工窗口, 特别适合用作飞机横梁、起落架等重要承力部件, 以实现更大的减重效果。

随着飞机设计理念由静强度向损伤容限设计^[5]的转变, 要求航空结构材料不仅具有高的强度, 同时具有高韧性。钛合金 β 相区热处理获得的片层组织具有比等轴组织和双态组织更高的断裂韧性和抵抗裂纹扩展能力^[6-7], 这一组织特点可满足现代钛合金高损伤容限性能的需求。虽然片层组织对合金的强韧性有利, 但是对于 TB18 这类高强钛合金来说, 当强度达到 1300 MPa 水平时, 与强度匹配的塑性成为制约合金推广应用的关键性能指标, 目前关于 TB18 钛合金 β 热处理后片层组织形态与强塑性的关系研究较少。为此, 针对 TB18 钛合金开展 β 热处理研究, 通过调整固溶温度、冷却方式、时效温度和时效时间等热处理参数, 设计出具有不同晶粒尺寸、晶界形态、片层尺度的组织类型, 依据显微组织特征分析和力学性能测试结果, 研究 TB18 钛合金 β 热处理后的显微组织特征对力学性能的影响, 以期为工程用 TB18 钛合金热处理工艺的制定提供参考。

1 实验

实验材料为西部超导材料科技股份有限公司提供

的 $\phi 400$ mm TB18 钛合金棒材, 其 α/β 相转变温度为 $(800\pm 5)^\circ\text{C}$, 主要化学成分 (质量分数, %) 为: Al 4.2, Mo 5.72, V 4.75, Cr 5.72, Nb 1.06, Fe 0.18, 其余为 Ti。

TB18 钛合金棒材原始组织为典型的 β 钛合金 $\alpha+\beta$ 相区锻态组织 (图 1), 等轴或短棒状 α 相细小均匀, 弥散分布在 β 基体上, 局部存在破碎晶界遗留痕迹。

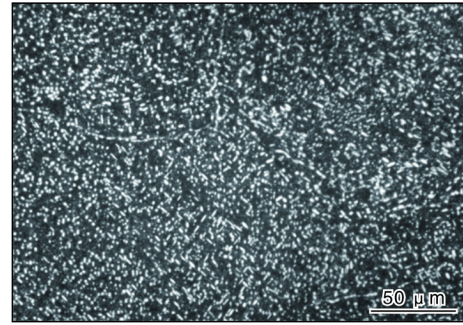


图 1 TB18 钛合金棒材锻态组织

Fig.1 As-forged microstructure of TB18 titanium alloy

沿棒材纵向切取 $\phi 13 \text{ mm}\times 80 \text{ mm}$ 拉伸试样, 然后分组进行 β 热处理, 不同热处理实验方案对应不同的实验目的, 具体方案见表 1。采用万能试验机对热处理后的试样进行室温拉伸性能测试。采用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对试样进行显微组织表征。

表 1 TB18 钛合金棒材热处理实验方案

Table 1 Heat treatment experimental schemes of TB18 titanium alloy

No.	Solution treatment		Aging treatment		Contrast microstructure features
	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Cooling method	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Time/h	
1	800–1000	AC	525	4	Grain size
2	870	AC or FC	525	4	Grain boundary morphology
3	870	AC	350–650	4	Precipitate phase volume content
4	870	AC or WQ	525	4–6	Lamella size

2 结果与分析

2.1 晶粒特征对力学性能的影响

2.1.1 晶粒尺寸

众所周知, 原始 β 晶粒尺寸是片层组织的主要特征参数, 也是影响强度和塑性的主要因素^[8]。为了获得不同晶粒尺寸, 根据实验方案 1, 分别在 800、870、940、1000 $^\circ\text{C}$ 下对 TB18 钛合金棒材进行固溶处理, 处理后的金相照片如图 2 所示。从图 2 可知, 随着固溶温度的升高, TB18 钛合金棒材的晶粒尺寸增大, 800 $^\circ\text{C}$

时晶粒尺寸约为 100 μm , 870 $^\circ\text{C}$ 时晶粒尺寸约为 200 μm , 940 $^\circ\text{C}$ 时晶粒尺寸约为 300 μm , 1000 $^\circ\text{C}$ 时晶粒尺寸约为 400 μm 。图 3 为不同晶粒尺寸的 TB18 钛合金棒材的室温拉伸性能。从图 3 可以看出, 晶粒尺寸为 100 μm 时, 合金具有最高的强度 (抗拉强度达到 1422 MPa), 同时延伸率超过 7%; 当晶粒尺寸增大到 200 μm 时, 合金强度约降低 60 MPa, 延伸率为 7%; 晶粒尺寸进一步增大到 300 μm 时, 合金强度变化不大, 但延伸率降低至 6.5%; 当晶粒尺寸达到 400 μm 后, 合金塑性大幅降低, 延伸率仅为 2.5%。

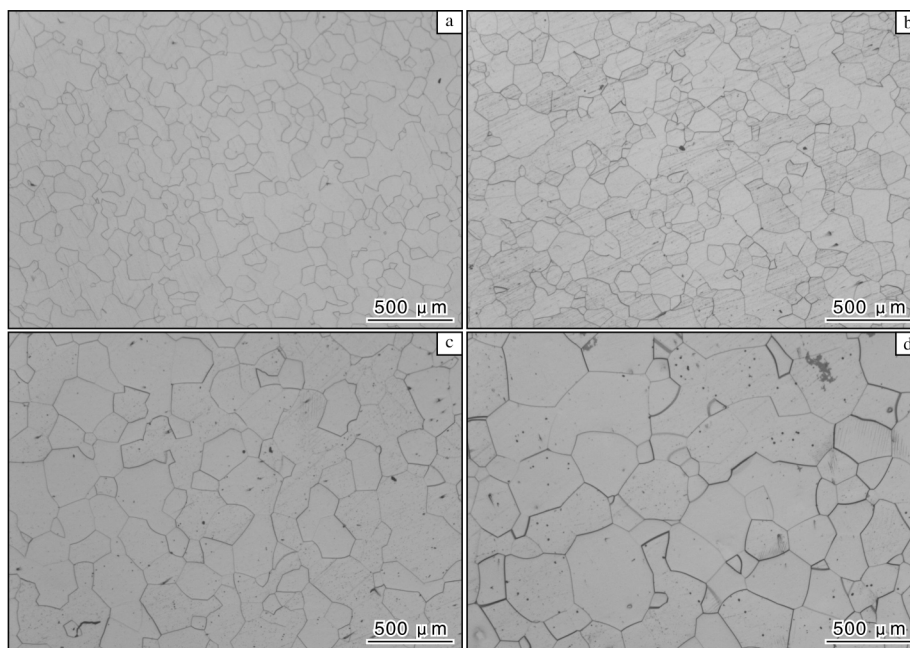
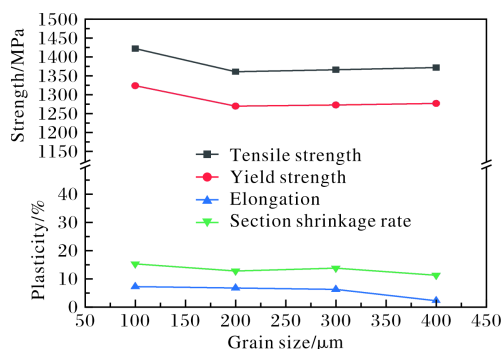
图 2 不同固溶温度下 TB18 钛合金棒材的 β 晶粒形貌Fig.2 Morphologies of β grain of TB18 titanium alloy at different solution temperatures: (a) 800 °C; (b) 870 °C; (c) 940 °C; (d) 1000 °C

图 3 TB18 钛合金棒材晶粒尺寸对室温拉伸性能的影响

Fig.3 Influence of grain size on room-temperature tensile properties of TB18 titanium alloy bar

根据 Hall-Petch 公式^[9], 晶粒越细小, 晶界面积越大, 阻碍位错移动的能力越强, 从而使合金强度增加。同时, 晶粒越细小, 单位体积内的晶粒数量越多, 可以明显减少金属在发生塑性变形过程中的应力集中, 使合金在断裂之前能够承受较大的变形量, 增加合金塑性。

图 4 为不同晶粒尺寸的 TB18 钛合金棒材的冲击性能。从图 4 可以看出, TB18 钛合金棒材冲击性能随着 β 晶粒尺寸的增大先升高后降低。晶粒尺寸由 100 μm 增大到 300 μm 时, 冲击韧性值由 19 J/cm^2 升高到 22 J/cm^2 。晶界虽然是裂纹萌生和扩展的薄弱环节, 但在晶内和晶界析出物等影响因素较小的前提下, 增大晶粒尺寸可以减少单位体积内的晶界表面积, 从而减少冲击载荷作用下裂纹沿晶界萌生和扩展的几率, 宏

观表现为冲击韧性升高^[10]。当晶粒尺寸增大到 400 μm 时, 合金冲击韧性降低至 14.5 J/cm^2 。这是由于当晶粒尺寸增大到一定程度时, 材料塑性变差, 冲击载荷作用下吸收塑性变形功的能力降低, 导致冲击韧性降低。综合考虑拉伸性能和韧性认为, 当晶粒尺寸约为 200 μm 时, TB18 钛合金棒材具有较好的强度-塑性-韧性匹配。

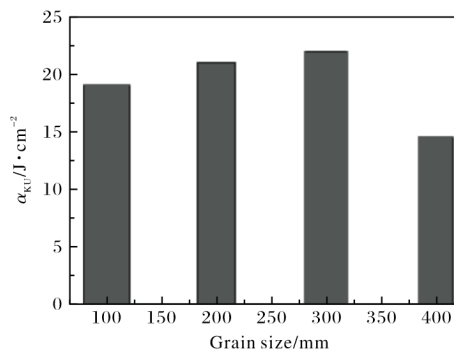


图 4 TB18 钛合金棒材晶粒尺寸对冲击性能的影响

Fig.4 Influence of grain size on impact performance of TB18 titanium alloy bar

2.1.2 界面形貌

晶界 α 相 (α_{GB}) 是钛合金中对力学性能尤其是塑性不利的组织。 α_{GB} 的形成主要受合金成分和冷却速度等因素的影响^[11]。为了获得不同的晶界形态, 实验方案 2 开展了固溶后不同冷却条件下的热处理研究。图 5 为 TB18 钛合金棒材固溶后不同冷却方式下的晶

界形貌。从图 5 可以看出, 固溶后以空冷方式冷却, 冷却速度快, 晶界连续且平直, 宽度约 50 nm (图 5a); 固溶后以炉冷方式冷却, 冷却速度慢, 晶粒内部析出极少量的颗粒状 α 相, 由于 α_{GB} 连续析出, 显著粗化且略有曲折, 宽度约为 1 μm (图 5b)。在固溶空冷条

件下, 时效组织为典型的魏氏组织, 晶界狭长平直, 晶界 α 集束呈 45° 平行向晶内生长 (图 5c)。在固溶炉冷条件下, 时效后在 β 晶界处或附近形成的 α_{GB} 惯习面有明显平行于晶界平面的趋势 (图 5d)。 α_{GB} 的取向与晶界和惯习面两侧 β 晶粒的取向有关^[12]。

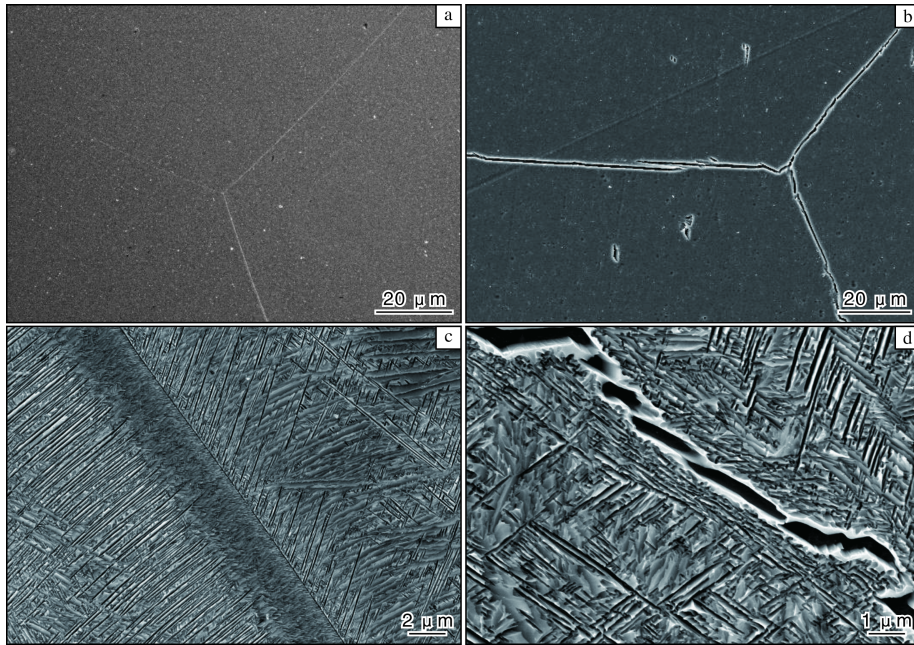


图 5 TB18 钛合金棒材在不同冷却条件下的晶界形貌

Fig.5 Grain boundary morphologies of TB18 titanium alloy bar at different cooling conditions: (a) solution followed by AC; (b) solution followed by FC; (c) solution followed by AC and aging; (d) solution followed by FC and aging

不同冷却条件下 TB18 钛合金棒材的力学性能如图 6 所示。从图 6 可以看出, 固溶后缓慢冷却虽然会导致晶界发生粗化, 但由于 β 相基体具有优异的变形协调能力, 合金的强度、塑性均未发生明显改变。时效后合金塑性明显降低, 延伸率由 7% 下降到 2.5%。这是因为时效后连续 α_{GB} 伴有的软质 α 相无沉淀区与 β 转变基体之间的屈服强度差异显著, 易导致晶间断

裂, 故延展性降低^[13]。基于此, 在 TB18 钛合金大型锻件热处理过程中需关注冷却速率的控制。为避免因连续 α_{GB} 组织的产生而引发性能劣化, 应在工艺设计中尽可能提高冷却速度, 确保获得理想的微观组织和优异的综合力学性能。

2.2 析出相特征对力学性能的影响

2.2.1 析出相形貌和体积分数

析出强化是提升金属材料力学性能的重要手段, 析出相通过钉扎或阻碍位错运动从而实现强化作用。钛合金的强化效果由析出相尺寸、体积分数、形貌等因素决定^[14]。为了获得不同含量的析出相, TB18 钛合金经 β 相区固溶处理后分别在 450、490、500、510 $^\circ\text{C}$ 下进行时效处理, 析出的次生 α 相形貌见图 7。从图 7a 可知, 时效温度较低时, β 相转变成 α 片层的动力不足, 极少 α 相以点状颗粒析出。当时效温度较高时, α 相呈长针状析出, 部分区域大量 α 相聚集呈“黑斑”状, 其他区域 α 相析出出现连点成线现象, 析出相含量增多 (图 7b)。次生片层充分析出并长大后形成具有一定宽度的 α 片层组织, 并且析出相明显增多 (图 7c)。

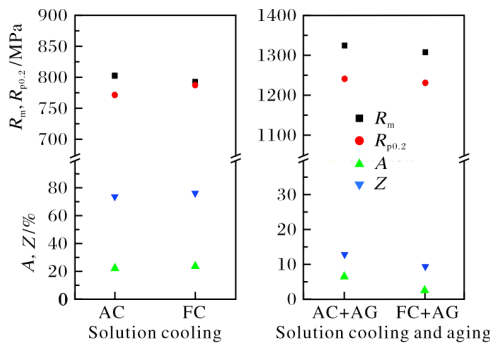


图 6 不同冷却条件下 TB18 钛合金棒材的力学性能
Fig.6 Mechanical properties of TB18 titanium alloy bar at different cooling conditions

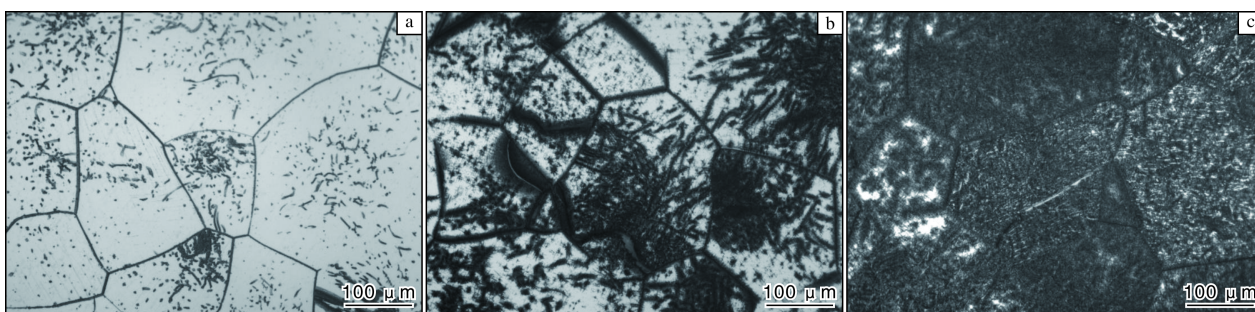


图 7 不同时效温度下 TB18 钛合金棒材的析出相形貌

Fig.7 Morphologies of precipitated phases of TB18 titanium alloy bars at different aging temperatures:

(a) 450 °C; (b) 490 °C; (c) 510 °C

TB18 钛合金棒材经固溶及不同温度时效后的力学性能如图 8 所示。从图 8 可以看出，当时效温度较低时，由于析出相较少，析出强化效果微弱，合金强度和塑性与固溶状态相差不大。随着时效温度的升高，

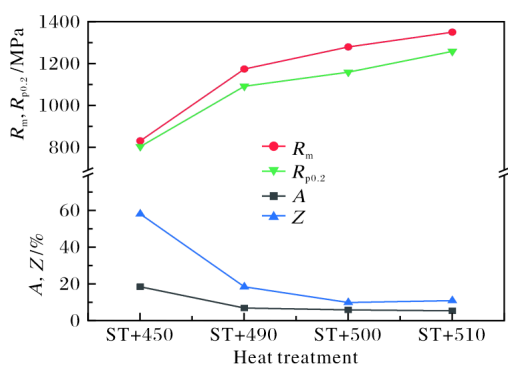


图 8 TB18 钛合金棒材经固溶及不同温度时效后的力学性能
Fig.8 Mechanical properties of TB18 titanium alloy bar after solution and aging at different temperatures

析出相含量增加，合金强度大幅度提高，由 800 MPa 级提升至 1200 MPa 级。时效温度升高至 510 °C 时，析出相含量进一步增加，合金强度虽然继续提高，但提高幅度变缓。通常，材料的强度越高，塑性越差，合金析出强化的同时合金塑性明显降低，断后伸长率由 18.5% 降低到 5.5%，与强度变化呈现明显的倒置性关系。

2.2.2 析出相尺寸

作为典型的析出强化材料，析出相尺寸对 TB18 钛合金的力学性能有直接影响。固溶后的冷却速度和时效时间均对析出相尺寸有所影响。TB18 钛合金经不同条件热处理后得到的析出相形貌如图 9 所示。从图 9 可以看出，A 工艺（870 °C/1 h/WQ+525 °C/4 h/AC）处理后析出的次生 α 相尺寸细小、弥散，呈短棒状，长宽比较小。相比之下，B 工艺（870 °C/1 h/AC+525 °C/4 h/AC）和 C 工艺（870 °C/1 h/AC+540 °C/4 h/AC）处理后析出相片层粗大，并且随着时效温度的升高，片层尺寸增大。

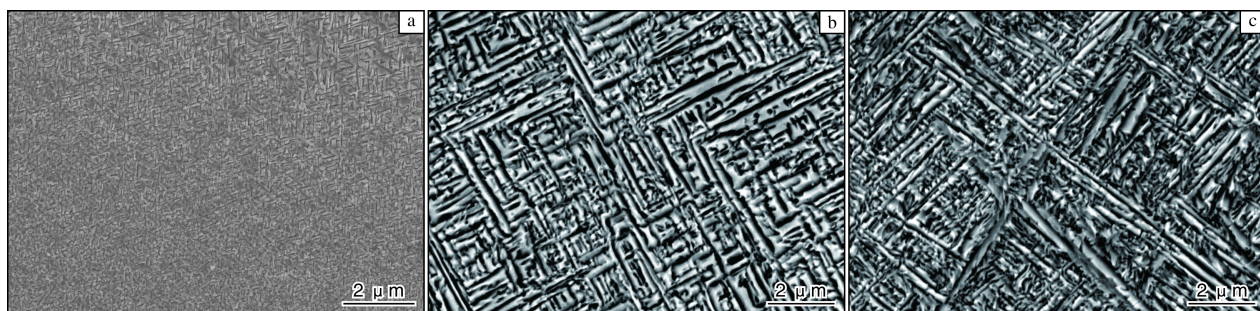


图 9 TB18 钛合金棒材经不同工艺热处理后的析出相形貌

Fig.9 Morphologies of precipitated phases of TB18 titanium alloy bars by different heat treatment processes:

(a) process A; (b) process B; (c) process C

TB18 钛合金棒材在不同热处理工艺下获得不同尺度的析出相，其力学性能如图 10 所示。从图 10 可以发现，随着析出相尺寸的增大，合金强度降低，塑性和韧性升高。从几何学角度分析，相同体积下，析

出相长宽比越大，表面积占比越高，相界面增加^[15]。界面塑性机制与界面上的各种缺陷特征密切相关^[16]。

综合分析认为，TB18 钛合金经 β 热处理工艺优化后可获得优异的综合力学性能，具体工艺参数为：在

840~920 °C温度区间进行固溶处理, 保温 1 h 后空冷, 随后于 520~540 °C温度范围进行时效处理, 保温 4 h 后空冷。该工艺通过精确调控 β 相晶粒尺寸与析出相弥散分布状态, 可使合金获得 1250~1350 MPa 的高强度, 同时实现塑性与韧性的良好匹配, 满足工程应用对性能的需求。

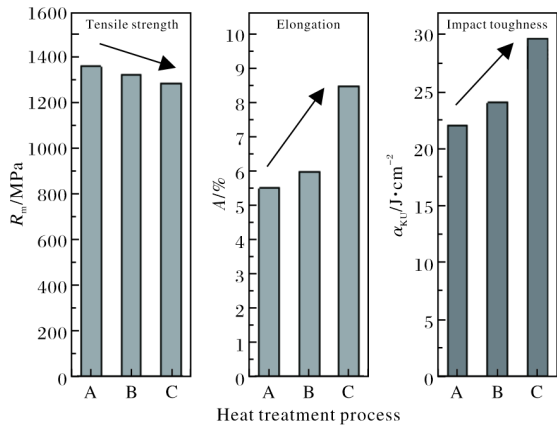


图 10 不同热处理工艺下 TB18 钛合金棒材的力学性能

Fig.10 Mechanical properties of TB18 titanium alloy bar by different heat treatment processes

3 结 论

(1) TB18 钛合金经 β 热处理后, 其晶粒尺寸较小 ($\leq 100 \mu\text{m}$) 时, 具有优异的强度和塑性, 增大晶粒尺寸, 合金强度和塑性均降低。综合考虑认为, 当晶粒尺寸约为 $200 \mu\text{m}$ 时, 合金具有较好的强度-塑性-韧性匹配。

(2) TB18 钛合金在 β 相区固溶处理缓慢冷却后会形成连续晶界 α 相, 严重降低合金塑性。对 TB18 钛合金大型锻件进行热处理时, 应尽量提高冷却速度, 避免形成具有连续晶界 α 相组织而造成材料性能降低。

(3) TB18 钛合金析出强化效应受析出相形貌、尺寸及体积含量的影响。合金强度随着析出相含量的增加而提高, 随着析出相尺寸的增大而降低, 合金塑性呈现相反的变化规律。

(4) TB18 钛合金采用 840~920 °C固溶, 保温 1 h 后空冷, 随后 520~540 °C时效, 保温 4 h 后空冷的 β 热处理工艺, 可获得 1250~1350 MPa 强度水平, 同时具有适合应用的塑性和韧性匹配。

参考文献 References

[1] Ma X L, Kazuhiro M, Shang Z F, et al. Design of α -type titanium alloys with improved corrosion resistance and tensile properties[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024,

53(4): 947-953.

- [2] 辛社伟, 刘向宏, 张思远, 等. 钛合金低成本化技术的研究与发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(11): 3981-4001.
- [3] Ye C, Zhang P, Mo D H, et al. Dynamic response and microstructure evolution of titanium alloy plates under low-velocity impact[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 180: 1-15.
- [4] 李少强, 胡生双, 弓站朋, 等. TB18 钛合金热变形行为及动态再结晶机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(9) : 3045-3051.
- [5] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(S1): 4-11.
- [6] 张旺峰, 曹春晓, 李兴无, 等. β 热处理 TA15 钛合金对力学性能的影响规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(7): 768-770.
- [7] 董显娟. 片状组织 TA15 钛合金 $\alpha+\beta$ 相区塑性变形特性及等轴化行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [8] 丁伟杰, 崔霞, 姜建飞, 等. β 相区固溶处理对新型 TB17 钛合金晶粒尺寸及均匀性的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(10): 50-57.
- [9] 邹章雄, 项金钟, 许思勇. Hall-Petch 关系的理论推导及其适用范围讨论[J]. 物理测试, 2012, 30(6): 13-17.
- [10] 陈国胜, 王庆增, 周奠华, 等. 三种高温合金晶粒尺寸和晶界析出相对冲击韧性的影响[C]//第十一届中国高温合金年会, 上海: 中国金属学会, 2007: 284-288.
- [11] Liu C M, Y Lu, Tian X J, et al. Influence of continuous grain boundary α on ductility of laser melting deposited titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 4(20): 145-151.
- [12] Xu J W, Zeng W D, Zhu Z S, et al. Morphology evolution and orientation characteristics of precipitate of ultra-high strength titanium alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 7(36): 106619.
- [13] Lütjering G, Albrecht J, Sauer C, et al. The influence of soft, precipitate-free zones at grain boundaries in Ti and Al alloys on their fatigue and fracture behavior[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 468-470: 201-209.
- [14] 刘向宏, 赵宁, 王涛, 等. 固溶处理对 TB18 钛合金微观组织和力学性能影响规律研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(11): 3101-3110.
- [15] 康聪, 杨佩, 李菁. 显微组织对 TC11 钛合金锻件力学性能的影响[J]. 世界有色金属, 2020(23): 129-130.
- [16] 郑士建, 闫哲, 孔祥飞, 等. 纳米金属层状材料强塑性的界面调控[J]. 金属学报, 2022, 58(6): 709-725.