

# 不同热处理工艺对 TC20 钛合金棒材组织和力学性能的影响

雷文光, 李建康, 张婷伟, 赵宏礼, 曹宇岩, 岳旭, 叶红川

(新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839100)

**摘要:** 研究了不同热处理工艺对 TC20 钛合金棒材显微组织和力学性能的影响。结果表明: TC20 钛合金经过两相区固溶 + 时效处理后得到双态组织, 通过控制固溶冷却方式以及时效温度可调整初生  $\alpha$  相含量以及次生  $\alpha$  相含量和尺寸, 改善其强度和塑性的匹配。采用 940 °C/1 h/WQ + 700 °C/30 min/AC + 550 °C/6 h/AC 三重热处理工艺, 在保证强塑性较佳匹配的同时, 可以有效解决棒材直线度问题。

**关键词:** TC20 钛合金; 棒材; 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(2022)04-021-04

## Effect of Different Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties of TC20 Titanium Alloy Bar

Lei Wenguang, Li Jiankang, Zhang Tingwei, Zhao Hongli, Cao Yuyan, Yue Xu, Ye Hongchuan  
(Xinjiang Xiangrun New Material Technology Co., Ltd., Hami 839100, China)

**Abstract:** The influence of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of TC20 titanium alloy bar was discussed. The results show that the duplex microstructure is obtained after solution and aging treatment in two-phase region. The cooling method and aging temperature are used to adjust the content of primary  $\alpha$  phase and the content and size of secondary  $\alpha$  phase to improve the matching of strength and plasticity. The problem of straightness can be effectively solved by 940 °C/1 h/WQ + 700 °C/30 min/AC + 550 °C/6 h/AC, and the bar has the best matching of strength and plasticity.

**Key words:** TC20 titanium alloy; bar; heat treatment; microstructure; mechanical properties

钛及钛合金具有密度低、比强度高、无磁性以及优良的耐蚀性能和生物相容性等特点, 广泛应用于航空航天、海洋工程、石油化工、生物医疗等领域<sup>[1,2]</sup>。TC20(Ti-6Al-7Nb)钛合金是瑞士 Sulzer 医学技术公司研制的一种医用钛合金, 其力学性能与 Ti-6Al-4V 合金相当, 且不含对人体有潜在危害的 V 元素<sup>[3-4]</sup>。该合金属于中强钛合金, 兼具  $\alpha$  型钛合金和  $\beta$  型钛合金的优点, 主要用于制造医用器械和人体植入物材料<sup>[5-7]</sup>。研究人员针对 TC20 钛合金的高温变形行为、热加工工艺等方面进行了大量研

究<sup>[8-14]</sup>, 为其应用奠定了一定基础。然而, 在实际工程应用中发现, TC20 钛合金棒材经固溶水淬 + 时效处理后易翘曲变形, 直线度难以满足  $\leq 1$  mm/m 的要求, 采用固溶水淬 + 退火校直处理虽可以解决棒材的直线度问题, 但强度无法满足指标要求。

故以热轧态 TC20 钛合金棒材作为研究对象, 研究不同热处理工艺对合金组织和性能的影响, 并在固溶水淬和时效处理之间加入 700 °C 的短时退火校直处理, 以期获得最佳的热处理强化效果, 从而解决工业化生产中棒材强度与直线度的匹配问题。

## 1 实验

实验材料为经 3 次真空自耗电弧熔炼制备的  $\phi 520$  mm TC20 钛合金铸锭。铸锭经  $\beta$  相区开坯锻造后, 在两相区一火次热轧成  $\phi 45$  mm 的棒材。经测

收稿日期: 2022-04-26

基金项目: 2021 年度新疆维吾尔自治区科技计划创新环境(人才、基地)建设专项—天山创新团队计划项目(2020D14041)

通信作者: 雷文光(1983—), 男, 高级工程师。

量, TC20 钛合金棒材化学成分(质量分数,  $w/\%$ )为: Al 6.14, Nb 6.99, Fe 0.15, C 0.017, O 0.12, N 0.007, H 0.001, 其余为 Ti。金相法测得其相变点为 995 ~ 1000 °C。

TC20 钛合金棒材的原始显微组织如图 1 所示。从图 1 可以看出, TC20 钛合金棒材组织由均匀细小的等轴  $\alpha$  相和短棒状  $\alpha$  相组成, 按照 ETTC2 显微组织评级可达 A5 级。

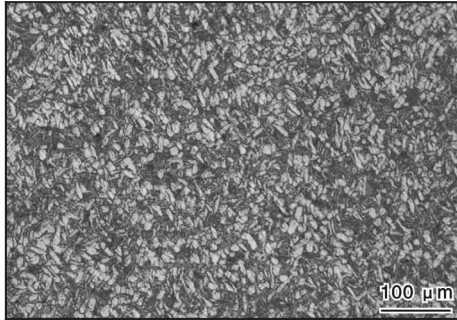


图 1 TC20 钛合金棒材的原始显微组织  
Fig. 1 Original microstructure of TC20 titanium alloy bar

采用箱式马弗炉(控温精度为  $\pm 5$  °C), 按照表 1 所示热处理制度对 TC20 钛合金棒材进行热处理。采用岛津电子万能力学试验机进行室温力学性能测试。采用蔡司光学显微镜进行显微组织观察。

表 1 TC20 钛合金棒材热处理工艺

No.	Heat treatment process
HT1	940 °C/1 h/AC + 550 °C/6 h/AC
HT2	940 °C/1 h/WQ + 550 °C/6 h/AC
HT3	940 °C/1 h/AC + 700 °C/2 h/AC
HT4	940 °C/1 h/WQ + 700 °C/2 h/AC
HT5	940 °C/1 h/AC + 500 °C/6 h/AC
HT6	940 °C/1 h/AC + 600 °C/6 h/AC
HT7	940 °C/1 h/WQ + 700 °C/30 min/AC + 550 °C/6 h/AC

## 2 结果与分析

### 2.1 热处理对显微组织的影响

#### 2.1.1 两相区固溶 + 时效对显微组织的影响

TC20 钛合金棒材在两相区经不同固溶 + 时效处理后的显微组织为典型的双态组织, 由初生的等轴  $\alpha$  相 +  $\beta$  转变组织组成, 如图 2 所示。经两相区固溶后空冷, 获得大量的针状次生  $\alpha$  相及少量残留  $\beta$  相, 在随后的 550 °C 时效过程中, 形成少量时效  $\alpha$  相和  $\beta$  相(图 2a)。经两相区固溶后快速水冷, 可获得大量的马氏体  $\alpha''$  相, 在随后的 550 °C 时效过程中, 形成大量细小弥散的针状时效  $\alpha$  相和  $\beta$  相(图 2b)。当固溶温度相同时, 时效温度对初生  $\alpha$  相含量及尺寸

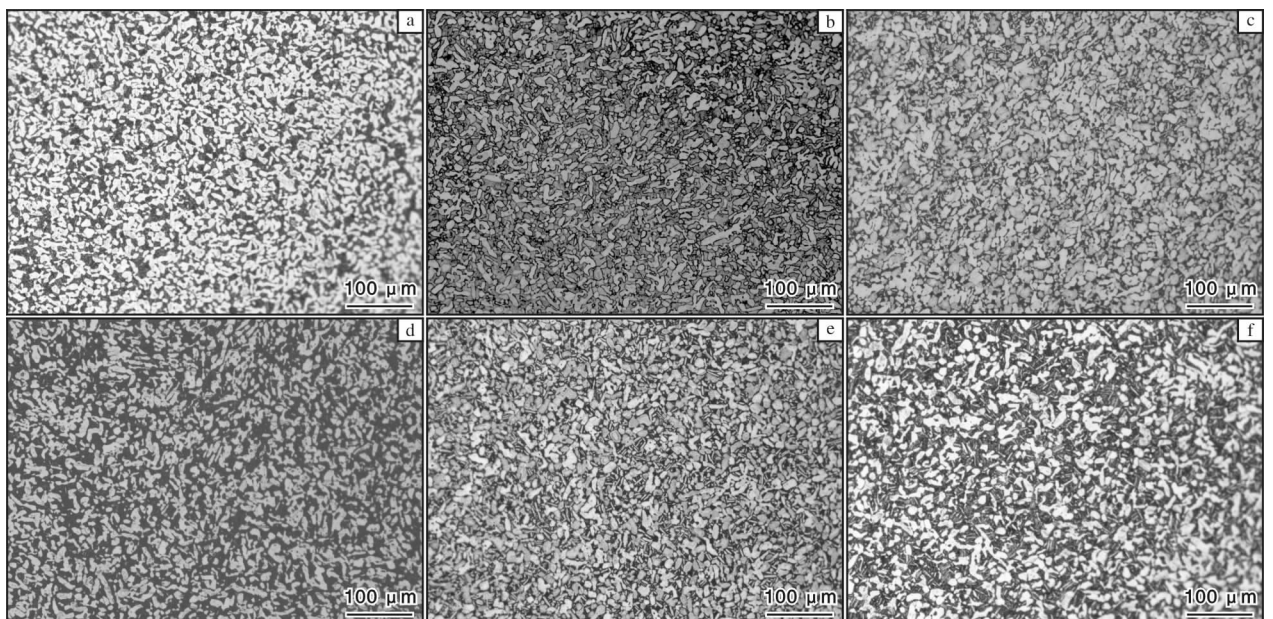


图 2 TC20 钛合金棒材经固溶 + 时效处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TC20 titanium alloy bar after different solution and aging treatments:  
(a) HT1; (b) HT2; (c) HT3; (d) HT4; (e) HT5; (f) HT6

影响不大(图 2a、2e、2f), 但会引起时效  $\alpha$  相数量及尺寸的变化, 随着时效温度的提高, 时效  $\alpha$  相形核速度减慢, 导致时效  $\alpha$  相尺寸增大。

当 940 °C 固溶空冷后, 经过 700 °C 时效处理, 次生片层  $\alpha$  相通过相界迁移与初生  $\alpha$  相合并并长大连成一体, 形成类似晶间  $\beta$  组织(图 2c); 而固溶水冷后生成马氏体  $\alpha''$  相, 经 700 °C 时效处理后,  $\alpha''$  相发生分解生成相对粗大的次生  $\alpha$  相和残留  $\beta$  相, 并且无细小弥散的时效  $\alpha$  相产生(图 2d)。因此, 当时效温度提高至 700 °C 时, 只能起到调整次生  $\alpha$  相尺寸的作用, 并不会发生时效强化作用。

### 2.1.2 三重热处理对显微组织的影响

TC20 钛合金棒材经三重热处理后获得由初生等轴  $\alpha$  相 + 次生针状  $\alpha$  相 +  $\beta$  转变组织组成的三态组织, 如图 3 所示。经第一重高温固溶水淬处理后, TC20 钛合金获得一定含量的初生  $\alpha$  相和大量马氏体  $\alpha''$  相, 随后进行第二重短时退火处理, 马氏体  $\alpha''$  相分解为次生针状  $\alpha$  相并有所长大, 最后进行低温时效处理时, 会析出大量细小弥散的时效  $\alpha$  相, 起到强化基体的作用。

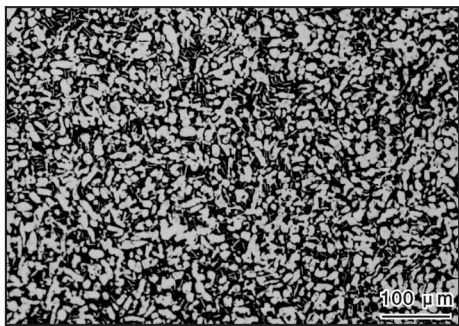


图 3 TC20 钛合金棒材经三重热处理后的显微组织  
Fig. 3 Microstructure of TC20 titanium alloy bar after triple heat treatment

## 2.2 热处理对力学性能的影响

### 2.2.1 两相区固溶 + 时效对力学性能的影响

TC20 钛合金棒材经两相区固溶 + 时效处理后的室温力学性能见表 2。对比 HT5、HT1、HT6 3 种热处理工艺, 在 940 °C 固溶空冷后, 随着时效温度的增加, 合金强度略有下降但变化不大, 塑性也基本保持一致, 说明经固溶空冷处理后, 力学性能对时效温度并不敏感。这主要是由于空冷条件下过冷度不足, 并未产生大量的马氏体  $\alpha''$  相, 大部分为针状次生  $\alpha$  相和残留  $\beta$  相, 在随后的低温时效过程中, 强化效果极其有限。

表 2 TC20 钛合金棒材经不同固溶 + 时效处理后的室温力学性能

Table 2 Room temperature mechanical properties of TC20 titanium alloy bar after different solution and aging treatments

No.	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
HT1	884	802	20.5	51
HT2	936	847	20.0	56
HT3	874	791	18.5	51
HT4	913	809	19.5	52
HT5	893	792	21.0	55
HT6	879	807	20.0	52

分别对比 HT1、HT2 以及 HT3、HT4 工艺, 可以看出在相同固溶温度条件下, 固溶冷却方式由空冷变为水冷时, 合金强度得到显著提高, 塑性变化不大。这主要是由于固溶冷却速度越快, 获得的马氏体  $\alpha''$  相数量越多, 随后时效过程析出的针状  $\alpha$  相也越多, 时效强化效果越显著。此外, 在固溶处理制度相同的情况下, 经 700 °C 时效处理的强化效果低于 550 °C, 这是由于 700 °C 时效时马氏体  $\alpha''$  相发生分解生成相对粗大的次生片状  $\alpha$  相和残留  $\beta$  相, 并无细小弥散分布的针状  $\alpha$  相产生。

两相区固溶 + 时效处理结果表明, TC20 钛合金经 940 °C/1 h/WQ + 550 °C/6 h/AC 处理后具有相对较好的力学性能。

### 2.2.2 三重热处理对力学性能的影响

TC20 钛合金棒材经三重热处理后的力学性能见表 3。从表 3 可以看出, 三重热处理工艺(HT7)可以实现 TC20 钛合金棒材强度和塑性的较佳匹配, 获得优良的综合力学性能。实际生产中, 固溶水淬 + 时效处理(HT5)时无法避免棒材发生翘曲变形, 直线度很难达到  $\leq 1$  mm/m 的要求, 而采用固溶水淬 + 退火校直处理, 虽可以解决棒材的直线度问题, 但是强度水平提高有限, 无法满足指标要求。而在固溶水淬和时效处理之间加入 700 °C 的短时退火校直处理, 可有效解决 TC20 钛合金棒材的直线度问题。

表 3 TC20 钛合金棒材经三重热处理后的室温力学性能  
Table 3 Room temperature mechanical properties of TC20 titanium alloy bar after triple heat treatment

No.	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
HT7	930	855	20.0	55

采用 940 °C/1 h/WQ+700 °C/30 min/AC+550 °C/6 h/AC 工艺对  $\phi 45$  mm 的 TC20 钛合金棒材进行整体热处理, 从棒材头部至尾部共取 30 组试样进行室温拉伸性能测试, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, TC20 钛合金棒材不同部位的抗拉强度均大于 900 MPa, 延伸率均大于 15%, 强度和塑性均匀一致, 稳定性较好。

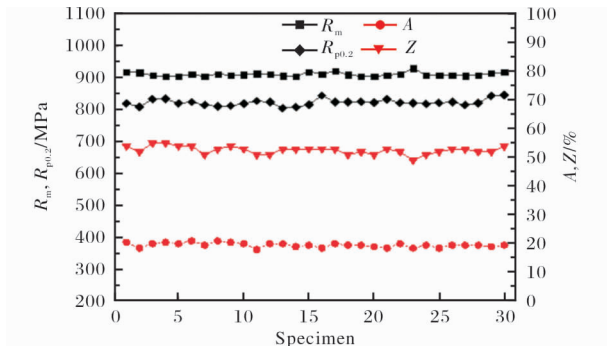


图 4 TC20 钛合金棒材经三重热处理后不同位置的室温力学性能

Fig. 4 Room temperature mechanical properties of TC20 titanium alloy bar at different positions after triple heat treatment

### 3 结论

(1) TC20 钛合金棒材在两相区固溶空冷+时效处理后得到双态组织。固溶空冷后, 大部分组织为针状次生  $\alpha$  相和残留  $\beta$  相, 在随后的时效过程中, 并未析出大量细小弥散分布的时效  $\alpha$  相, 强化效果有限。

(2) 在相同固溶温度下, 固溶冷却速度越快, 马氏体  $\alpha''$  相数量越多, 随后低温时效过程中析出的弥散分布的针状  $\alpha$  相也越多, 时效强化效果越明显, 从而使 TC20 钛合金棒材的强度显著提高。

(3) 在相同固溶水淬条件下, 经 700 °C 时效处理后, 马氏体  $\alpha''$  相发生分解生成相对粗大的次生片状  $\alpha$  相和残留  $\beta$  相, 并无细小弥散分布的  $\alpha$  相产生, 从而导致对 TC20 钛合金棒材的强化效果明显低于 550 °C 低温时效。

(4) TC20 钛合金棒材经 940 °C/1 h/WQ+700 °C/30 min/AC+550 °C/6 h/AC 三重热处理后, 显微组织为初生等轴  $\alpha$  相+次生针状  $\alpha$  相+ $\beta$  转变组织组成的三态组织, 在获得较佳强度-塑性匹配的同时,

可以有效解决棒材直线度的问题。

### 参考文献 References

- [1] 于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. 金属学报, 2017, 53(10): 1238-1264.
- [2] Niinomi M, Nakai M, Hieda J. Development of new metallic alloys for biomedical applications[J]. Acta Biomaterialia, 2012, 8(11): 3888-3903.
- [3] 王桂生, 许国栋, 魏寿庸, 等. 外科植入物用钛合金 Ti-6Al-7Nb 的研究[J]. 稀有金属, 2001, 25(5): 395-397.
- [4] Geetha M, Singh A K, Asokamani R, et al. Ti based bio-materials, the ultimate choice for orthopaedic implants - a review[J]. Progress in Materials Science, 2009, 54(3): 397-425.
- [5] 任军帅, 张英明, 谭江, 等. 生物医用钛合金材料发展现状及趋势[J]. 材料导报, 2016, 30(Z2): 384-388.
- [6] 武秋池, 纪箴, 贾成厂, 等. 钛及钛合金人体植入材料研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(3): 225-232.
- [7] 廖赞, 缪卫东, 马嘉丽. 钛合金在生物医药领域应用现状和展望[J]. 新材料产业, 2017(3): 19-24.
- [8] 牛中杰, 曹继敏, 杨冠军, 等. Ti-6Al-7Nb 钛合金热加工与热处理工艺研究[J]. 钛工业进展, 2006, 23(1): 24-27.
- [9] 刘延辉, 宁永权, 姚泽坤, 等. 热加工工艺对医用 TC20 钛合金显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(19): 1-4.
- [10] 王卫民, 林海峰, 罗斌莉, 等. 外科植入物用 Ti-6Al-7Nb 合金板棒丝材制备及性能表征[J]. 钛工业进展, 2013, 30(2): 11-16.
- [11] 罗锦华, 朱燕丽, 侯峰起, 等. 热处理温度对 TC20 钛合金细晶棒材组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 32(3): 17-20.
- [12] 钟明君, 王克鲁, 鲁世强, 等. 固溶时效对 TC20 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(6): 2149-2154.
- [13] Filip R, Kubiak K, Ziaja W. et al. The effect of micro-structure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133: 84-89.
- [14] Bolzoni L, Ruiz-Navas E M, Gordo E. Evaluation of the mechanical properties of powder metallurgy Ti-6Al-7Nb alloy[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 67: 110-116.