

TC21 钛合金网篮组织特征对力学性能的影响研究

王 哲¹, 刘程程², 李海宾³

(1. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 陕西 咸阳 713801)

(2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

(3. 中航天地激光科技有限公司, 北京 102209)

摘 要: TC21 钛合金是我国自主研发的一种高强高韧损伤容限型钛合金, 分别采用准 β 锻造、准 β 锻造+ $(\alpha+\beta)$ 锻造以及 β 锻造工艺对 TC21 钛合金进行锻造, 采用金相显微镜和扫描电子显微镜研究了锻造工艺对 TC21 钛合金显微组织的影响规律, 以及显微组织与力学性能之间的关系。结果表明: 采用准 β 锻造($T_\beta+15^\circ\text{C}$)后, TC21 钛合金显微组织特征为破碎的 β 晶粒和编织程度较好的网篮组织, 并且该组织具有良好的强度-塑性-韧性匹配; 采用准 β 锻造后再进行 $(\alpha+\beta)$ 相区小变形, 显微组织中部分片层 α 相呈短棒状分布, 且网篮编织程度较差, 强度与塑性与准 β 锻造后相当, 但断裂韧性较差; 在较高温度($T_\beta+25^\circ\text{C}$)进行锻造, TC21 钛合金显微组织中形成粗大平直的晶界 α 相, 材料的强度、塑性和韧性均较低。

关键词: TC21 钛合金; 网篮组织; β 相区锻造; 片层 α 相; 晶界 α 相

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)08-0657-05

引用格式: 王哲, 刘程程, 李海宾. TC21 钛合金网篮组织特征对力学性能的影响研究[J]. 中国材料进展, 2023, 42(8): 657-661.

WANG Z, LIU C C, LI H B. Influence of Basket Microstructure Characteristics on Mechanical Properties of TC21 Titanium Alloy[J]. Materials China, 2023, 42(8): 657-661.

Influence of Basket Microstructure Characteristics on Mechanical Properties of TC21 Titanium Alloy

WANG Zhe¹, LIU Chengcheng², LI Haibin³

(1. Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xianyang 713801, China)

(2. Beijing Xinghang Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

(3. AVIC Tiandi Laser Technology Company Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: TC21 titanium alloy is a kind of titanium alloy with high strength and high toughness damage tolerance developed independently in China. In this paper, quasi- β forging, quasi- β forging + $(\alpha+\beta)$ forging and β forging process were used to forge TC21 titanium alloy. The influence of forging process on microstructure of TC21 titanium alloy and the relationship between microstructure and mechanical properties were studied by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The results showed that: after quasi- β forging ($T_\beta+15^\circ\text{C}$), the microstructure of TC21 titanium alloy was characterized by broken β grains and well-woven basket structure, which had good strength-plastic-toughness matching; after small deformation of $(\alpha+\beta)$ phase region after quasi- β forging, the α phases were distributed in short rod shape, and the weave degree of the basket was poor; the strength and plastic properties of the basket are similar to those of quasi- β forging, but the fracture toughness was poor; after high temperature ($T_\beta+25^\circ\text{C}$) forging, coarse and straight grain boundary α phase was formed, the strength, plasticity and toughness of the material were low.

Key words: TC21 titanium alloy; basket microstructure; β region forging; lamellar α phase; grain boundary α phase

1 前 言

钛合金具有优异的比强度、耐腐蚀性、可焊接性以及生物兼容性等优点, 广泛应用于航空、航天、兵器、船舶以及生物医疗等领域^[1-3]。TC21 钛合金是我国自主研

收稿日期: 2021-06-28 修回日期: 2021-12-06

第一作者: 王 哲, 男, 1987 年生, 高级工程师,

Email: tianchenzhe@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202106024

发的一种高强高韧损伤容限型钛合金，名义成分 Ti-6Al-3Mo-2Sn-2Zr-2Nb-1Cr^[4]。该合金经准 β 锻造后获得的网篮组织具有优异的强度、塑性、韧性以及热稳定性等综合性能，可与美国 Ti-62222s 合金相媲美^[5, 6]。国内外主要采用 β 热变形工艺获得的片层 α 相取代($\alpha+\beta$)工艺形成的等轴或双态组织，以提升合金的损伤容限性能^[7, 8]。朱知寿等研究了 TC21 钛合金高温热变形行为以及热处理工艺参数对其显微组织及力学性能的影响^[9]；党薇等研究了 TC21 钛合金 β 相区退火后片层 α 相对断裂韧性的影响^[10]；唐斌等研究了 TC21 钛合金低温时效过程中马氏体分解机制^[11]。

综上所述，国内外对 TC21 钛合金的研究主要集中在

热变形行为、相变机理等方面，而对准 β/β 锻造工艺对其力学性能的影响研究较少，本文采用 3 种热变形工艺获得了具有不同网篮组织特征的 TC21 钛合金，分析了片层 α 相形貌及 β 晶粒特征对 TC21 钛合金力学性能的影响，对制订 TC21 钛合金锻件 β 锻造工艺具有重要指导意义。

2 实 验

本研究采用经 3 次真空自耗熔炼的 TC21 钛合金铸锭，经 β 相区开坯和($\alpha+\beta$)相区锻造成 $\Phi 230$ mm 棒材，实测化学成分见表 1，采用淬火金相法测得本炉批 TC21 钛合金相变温度(T_β)为 965 ℃。

表 1 TC21 钛合金原材料棒材化学成分(w/%)
Table 1 Chemical composition of TC21 titanium alloy bar

Ti	Al	Mo	Nb	Sn	Zr	Cr	Fe	Si	C	H	O	N
Bal.	6. 21	2. 95	2. 03	2. 15	2. 11	1. 68	0. 23	0. 088	0. 01	0. 001	0. 12	0. 005

图 1 给出了 TC21 钛合金棒材的显微组织，由图可知，棒材为等轴组织，初生 α 相含量为 55% (质量分数)，呈球状或蠕虫状分布，形态较为均匀，部分片层 α 相呈短棒形态。



图 1 TC21 钛合金棒材组织的光学显微照片
Fig. 1 Optical microscope (OM) image of TC21 titanium alloy bar microstructure

本研究采用 3 种锻造工艺对 TC21 钛合金棒材进行锻造，具体方案见表 2。锻件采用 960 ℃/2 h，AC(空冷)+630 ℃/6 h，AC 的固溶+时效热处理，每种锻造工艺拉伸性能取 3 根试样进行测试，测试结果取平均值，拉伸试样取样方向为沿流线方向(L 向)。平面应变断裂韧性裂纹扩展取样方向为沿流线方向(T-L 向)，每种工艺取 2 块试样进行测试，测试结果取平均值。在拉伸试样断口附近进行金相组织检测。试样经预磨、抛光后采用 V(HF):V(HNO₃):V(H₂O)= 1:3:6 的 Kroll 腐蚀剂进行侵

蚀，采用 Olympus 型金相显微镜进行显微组织观察，拉伸断口组织观察在 Tecnai 场发射扫描电镜(field emission scanning electron microscopy, FESEM)上进行。

表 2 TC21 钛合金锻造工艺方案
Table 2 TC21 titanium forging methods

No.	Forging schedule
A	First deformed at ($T_\beta+15$ ℃) with deformation reduction is 30%, after deformed at ($T_\beta-40$ ℃) with deformation reduction is 10%
B	Deformed at ($T_\beta+15$ ℃) and deformation reduction is 40%
C	Deformed at ($T_\beta+25$ ℃) and deformation reduction is 40%

3 结果与讨论

3.1 TC21 钛合金网篮组织特征

图 2 给出了不同锻造工艺条件下 TC21 钛合金显微组织，由图可知，TC21 钛合金经 β 锻造后均具有网篮组织特征，但其网篮组织中片层 α 相(lamellar α phase)及 β 晶粒形貌特征差异较大。图 2a 为采用方案 A 锻造后的显微组织，可以得出，网篮组织片层 α 相尺寸较小，且部分呈短棒状，晶粒较为细小，无完整平直的晶界 α 相(grain boundary α phase)；图 2b 为采用方案 B 锻造后的显微组织，片层 α 相编织程度较好，且比方案 A 中的片层 α 相长宽比更大，无完整平直的晶界 α 相；图 2c 为采用方案 C 锻造后的显微组织，晶界处形成完整平直的晶界 α 相层，晶内片层 α 相细长且与晶界 α 相呈一定位相关系，且网篮编织程度较低，呈片层状分布。



图 2 经过方案 A(a)、方案 B(b)和方案 C(c)锻造的 TC21 钛合金锻件显微组织 OM 照片

Fig. 2 OM images of the microstructures of TC21 titanium alloy forged by method A(a), method B(b) and method (c)

TC21 钛合金在 β 相区锻造的过程是原始 β 晶界破碎和 α 相析出动态再结晶的过程, 在准 β 温度进行加热, 原始 β 晶粒未完全长大, 晶界不连续。在锻造过程中, β 晶粒完全破碎, 温降过程中析出的 α 相经过动态再结晶形成编织良好的网篮组织(图 2b); 该组织再经过 $(\alpha+\beta)$ 相区变形, 网篮组织中片层 α 相经过小变形后, 部分再次发生动态再结晶^[12], 形成短棒状片层 α 相(图 2a)。在较高温度($T_\beta+25^\circ\text{C}$)进行锻造, 加热过程中, β 晶粒完成静态再结晶过程, 形成粗大完整的 β 晶粒, 当温度降低至 $(\alpha+\beta)$ 相区时进行变形, 变形程度较小, 晶界未完全破碎, 且晶内片层 α 相变形量较小, 发生动态再结晶程度较低, 因此形成粗大平直的 β 晶粒及晶内细长的片层 α 相(图 2c)。

3.2 TC21 钛合金显微组织对力学性能的影响

表 3 为 TC21 钛合金经不同工艺锻造后锻件的力学性能, 可以看出, 采用工艺 A 和 B 进行锻造, TC21 钛合金强度和塑性性能差异较小, 而采用工艺 C 进行锻造, 强度和塑性均较低。上述现象的主要原因在于钛合金在断裂过程中, 微裂纹优先在 α/β 相界面处形核, 因此 α/β 相界面是决定钛合金强度的主要因素^[13], 采用工艺 A 和 B 进行锻造, 片层 α 相厚度(约 $1.8\ \mu\text{m}$)相差较小, 且小于工艺 C 的片层 α 相厚度($2.5\ \mu\text{m}$), 随着相界面数量的增加, 合金强度提升。在较高温度进行锻造(工艺 C)形成完整平直的晶界 α 相, 裂纹优先沿晶界 α 相扩展^[14], 因此采用工艺 C 的 TC21 钛合金锻件塑性较低。

采用工艺 B 进行锻造, TC21 钛合金的断裂韧性($85.6\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)高于工艺 A($78.2\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)和工艺 C($71\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), 主要原因在于, 钛合金的断裂过程分为裂纹形核和扩展 2 个阶段^[15], 网篮组织对力学性能的影响主要为片层 α 相形貌的形态对其的影响, 宽 α 相裂纹尖端孔洞形核所需应力高于细小片层 α 相孔洞, 当裂纹扩展到片层 α 相时, 若 α 相断裂所需的能量高于绕过 α 相尖端所需的能量, 裂纹扩展路径会发生偏转。工艺 A

由于经过 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造, 部分片层 α 相呈短棒状且编织程度较差, 因此其平面断裂韧性低于工艺 B。当基体中形成的微裂纹扩展到晶界区域, 且晶界为破碎的 α 相, 晶界 α 相数目也增加, 同样在裂纹扩展中吸收大量能量, 平面应变断裂韧性增加^[16, 17]。而当晶界为连续粗大平直晶界 α 相层时, 裂纹在扩展过程中受到的阻力减小, 裂纹扩展过程中消耗的能量也越低, 合金断裂韧性也较低。

表 3 TC21 钛合金锻件力学性能

Table 3 The mechanical properties of TC21 titanium alloy forgings

Fabricate methods	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\varphi/\%$	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
A	1166	1080	14.5	20	78.2
B	1158	1056	15.5	22	85.6
C	1125	1030	9.5	15	71

3.3 断口分析

图 3 给出了不同网篮组织特征的 TC21 钛合金拉伸断口显微组织, 由图中可知, 本实验中 TC21 钛合金拉伸试样宏观断口均为塑性断裂。由图 3a 和 3b 可知, 方案 A 和方案 B 锻造样品的断口显微组织中初窝较深且断口起伏较大, 而图 3c 中方案 C 锻造样品的断口显微组织中初窝较为平缓且存在明显撕裂棱。

TC21 钛合金网篮组织对力学性能的影响主要受片层 α 相形貌的影响, 当基体中形成的裂纹扩展至晶界区域, 若晶界由细小破碎的晶界 α 相组成, 晶界 α 相数量也相应增加, 裂纹在扩展过程中将消耗更多能量, 扩展速率将降低, 断裂韧性升高^[18, 19]。当晶界处 α 相为连续平直的晶界 α 相层, 裂纹在扩展中受到的阻力较小, 扩展过程中消耗的能量也较低, 裂纹沿晶界扩展, 形成撕裂棱, 扩展速率高。因此, 采用工艺 B 锻造后, 网篮组织编织程度较好, 具有较高的断裂韧性; 采用工艺 C 锻造后具有平直的晶界 α 相的组织, 塑性和断裂韧性均较低。

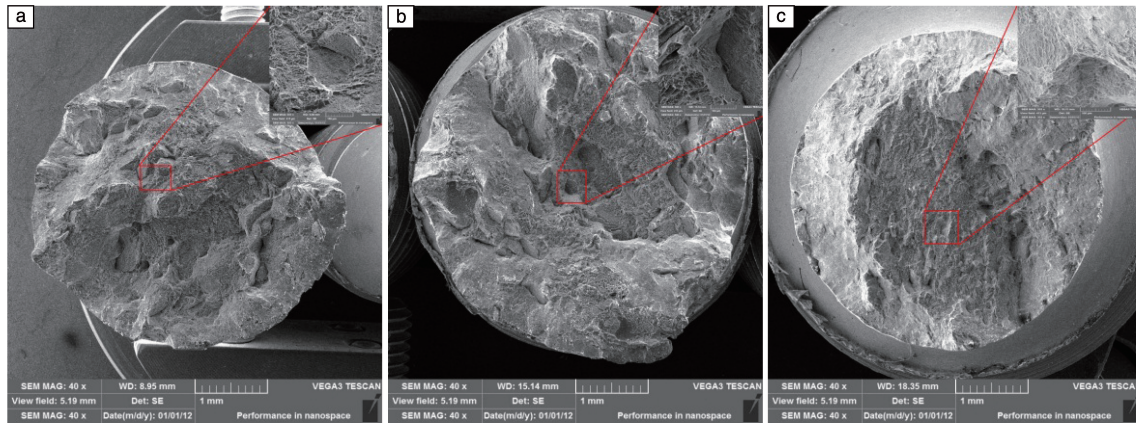


图 3 TC21 钛合金不同网篮组织特征断口 SEM 照片: (a) 方案 A, (b) 方案 B, (c) 方案 C

Fig. 3 SEM images of the fracture characteristics of TC21 titanium alloy with different baskets microstructure: (a) method A, (b) method B, (c) method C

4 结 论

本文研究了 3 种 TC21 钛合金网篮组织与力学性能的关系, 结果表明:

(1) 采用准 β 锻造 ($T_{\beta}+15\text{ }^{\circ}\text{C}$) 可以形成破碎 β 晶粒和编织较好的网篮组织, 具有良好的强度-塑性-韧性匹配。

(2) 采用准 β 锻造后再进行 ($\alpha+\beta$) 相区小变形后部分片层 α 相呈短棒状分布, 且网篮编织较差, 强度与塑性性能与准 β 锻造后性能相当, 但断裂韧性较差。

(3) 在较高温度 ($T_{\beta}+25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 进行锻造, TC21 钛合金形成粗大平直的晶界 α 相, 材料的强度、塑性和韧性均较低。

参考文献 References

- [1] 陈伟. TC21 钛合金损伤容限性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
CHEN W. Research on the Damage Tolerance of TC21 Titanium Alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [2] WANG Z, WANG X N, ZHU Z S. Journal of Alloys & Compounds [J], 2017, 692: 149–154.
- [3] WU M, MI G, LI P, *et al.* Materials Letters [J], 2022, 310: 131–135.
- [4] 朱知寿, 王新南, 童路, 等. 稀有金属快报 [J], 2006, 25(12): 27–31.
ZHU Z S, WANG X N, TONG L, *et al.* Rare Metals Letters [J], 2006, 25(12): 27–31.
- [5] 辛社伟, 周伟, 李倩, 等. 中国材料进展 [J], 2021, 40(6): 5–9.
XIN S W, ZHOU W, LI Q, *et al.* Materials China [J], 2021, 40(6): 5–9.
- [6] 房卫萍, 陈沧, 史耀武, 等. 材料工程 [J], 2010, 22(9): 95–98.
FANG W P, CHEN L, SHI Y W, *et al.* Journal of Material Engineering [J], 2010, 22(9): 95–98.
- [7] 赵永庆, 奚正平, 曲恒磊. 航空材料学报 [J], 2003, 23(3): 215–219.
ZHAO Y Q, XI Z P, QU H L. Journal of Aeronautical Materials [J], 2003, 23(3): 215–219.
- [8] 杨慧丽. 中国金属通报 [J], 2013, 34(14): 44–45.
YANG H L. China Metal Bulletin [J], 2013, 34(14): 44–45.
- [9] 朱知寿, 王新南, 顾伟, 等. 中国材料进展 [J], 2009, 28(2): 51–55.
ZHU Z S, WANG X N, GU W, *et al.* Materials China [J], 2009, 28(2): 51–55.
- [10] 党薇, 薛祥义, 寇宏超, 等. 航空材料学报 [J], 2010(3): 19–23.
DANG W, XUE X Y, KOU H C, *et al.* Journal of Aeronautical Materials [J], 2010(3): 19–23.
- [11] 唐斌, 王义红, 寇宏超, 等. 材料热处理学报 [J], 2012, 33(1): 49–53.
TANG B, WANG Y H, KOU H C, *et al.* Transactions Materials and Heat Treatment [J], 2012, 33(1): 49–53.
- [12] SHI Z F, GUO H Z, ZHANG J W, *et al.* Transaction of Nonferrous Metals Society of China [J], 2018, 28(12): 51–59.
- [13] 温鑫. TC21 钛合金多层次组织对力学性能的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
WEN X, The Effect of Multi-Level Microstructure on Mechanical Properties of TC21 Titanium Alloy [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [14] 王哲, 王新南, 商国强, 等. 稀有金属材料与工程 [J], 2018, 47(3): 810–815.
WANG Z, WANG X N, SHANG G Q, *et al.* Rare Materials and Engineering [J], 2018, 47(3): 810–815.
- [15] 胡生双, 孟晓川, 王清, 等. 金属热处理 [J], 2020, 513(5): 117–121.
HU S S, MENG X C, WANG Q, *et al.* Heat Treatment of Metals [J],

- 2020, 513(5): 117-121.
- [16] 刘知多, 张浩宇, 周舸, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(2): 658-666.
- LIU Z D, ZHANG H W, ZHOU K, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(2): 658-666.
- [17] 欧阳德来, 谢有美, 胡圣伟, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(2): 710-718.
- OUYANG D L, XIE Y M, , HU S W, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(2): 710-718.
- [18] 李辉, 曲恒磊, 赵永庆, 等. 材料工程[J], 2006, 24(4): 21-23.
- LI H, QU H L, ZHAO Y Q, *et al.* Journal of Material Engineering [J], 2006, 24(4): 21-23.
- [19] 赵彦蕾, 李伯龙, 朱知寿, 等. 材料热处理学报[J], 2011, 32(1): 14-18.
- ZHAO Y L, LI B L, ZHU Z S, *et al.* Transactions Materials and Heat Treatment[J], 2011, 32(1): 14-18.
- (编辑 张雨明)