

# 热处理对 $\alpha+\beta$ 与 $\beta$ 锻造 TC25 钛合金显微组织和力学性能的影响

张安琴<sup>1</sup>, 陈宏志<sup>2</sup>, 邓浩<sup>3</sup>, 尹翔<sup>1</sup>, 邓肯<sup>3</sup>, 王江<sup>1</sup>, 景春红<sup>3</sup>, 李倩<sup>4</sup>

(1. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵州 贵阳 550081)

(2. 中国人民解放军 93147 部队, 四川 德阳 618013)

(3. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳 618013)

(4. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** TC25 钛合金经  $\alpha+\beta$  两相区锻造和  $\beta$  单相区锻造后, 分别进行 550 °C/2 h/AC、900 °C/2 h/AC 和 900 °C/2 h/AC + 550 °C/6 h/AC 的热处理, 研究了锻造温度和热处理工艺对锻件微观组织、拉伸性能及低周疲劳性能的影响。结果表明,  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金为双态组织, 对该锻件进行单重退火处理, 提高退火温度有利于促进初生  $\alpha$  相溶解和次生  $\alpha$  相增厚; 在双重退火处理下, 二次退火能够促进初生  $\alpha$  相长大和次生  $\alpha$  相进一步粗化。 $\beta$  锻造 TC25 钛合金为网篮组织, 片层  $\alpha$  相交错分布; 不同热处理导致  $\alpha$  集束尺寸发生变化。经  $\alpha+\beta$  锻造后, TC25 钛合金具有更优的综合力学性能, 其塑性和低周疲劳寿命均显著优于  $\beta$  锻造。

**关键词:** TC25 钛合金; 锻造; 热处理

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)05-018-06

## Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of $\alpha+\beta$ and $\beta$ Forged TC25 Titanium Alloy

Zhang Anqin<sup>1</sup>, Chen Hongzhi<sup>2</sup>, Deng Hao<sup>3</sup>, Yin Xiang<sup>1</sup>, Deng Ken<sup>3</sup>, Wang Jiang<sup>1</sup>, Jing Chunhong<sup>3</sup>, Li Qian<sup>4</sup>

(1. Guiyang Engine Design Research Institute of AECC, Guiyang 550081, China)

(2. Unit 93147 of the Chinese People's Liberation Army, Deyang 618013, China)

(3. China National Erzhong Group Deyang Wanhang Die Forging Co., Ltd., Deyang 618013, China)

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

**Abstract:** TC25 titanium alloy was forged in the  $\alpha+\beta$  two-phase region and  $\beta$  single-phase region, followed by heat treatments of 550 °C/2 h/AC, 900 °C/2 h/AC, and 900 °C/2 h/AC + 550 °C/6 h/AC, respectively. The effects of forging temperature and heat treatment processes on the microstructure, tensile properties, and low-cycle fatigue performance of the forgings were investigated. The results show that the  $\alpha+\beta$  forged TC25 titanium alloy exhibits a dual-phase microstructure, single-step annealing promotes the dissolution of primary  $\alpha$  phase and thickening of secondary  $\alpha$  phase as the temperature increased, while two-step annealing further facilitates the growth of primary  $\alpha$  phase and coarsening of secondary  $\alpha$  phase. The  $\beta$  forged TC25 titanium alloy presents a basket-weave microstructure with interlaced lamellar  $\alpha$  phases, and different heat treatments induce changes in  $\alpha$  colony size. Moreover, the  $\alpha+\beta$  forged alloy demonstrates superior comprehensive mechanical properties, with significantly better plasticity and low-cycle fatigue life than the  $\beta$  forged counterpart.

**Keywords:** TC25 titanium alloy; forging; heat treatment

收稿日期: 2025-09-02

通信作者: 邓浩 (1993—), 男, 高级工程师。

TC25 钛合金 (俄罗斯牌号 BT25) 是一种  $\alpha+\beta$  型热强钛合金, 名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-2Sn-2Mo-1W-0.2Si<sup>[1-2]</sup>。

通过添加高熔点元素 Mo 和 W, 显著提升了该合金高温下的热强性和稳定性, 其长期工作温度可达 500~550 °C, 是制造航空发动机压气机盘的重要材料<sup>[3-4]</sup>。

研究人员对 TC25 钛合金的热加工工艺进行了大量研究<sup>[5-6]</sup>。该合金通常采用  $\beta$  相区模锻成形, 旨在得到片层组织, 这类组织在服役过程中具有良好的断裂韧性、持久性能和蠕变性能, 但塑性和疲劳性能较差<sup>[7-8]</sup>。此外, 超转试验和低周循环疲劳试验结果显示,  $\beta$  单相区锻造的钛合金模锻件存在强度和低周疲劳寿命低的问题<sup>[9-10]</sup>。研究发现, 钛合金在两相区较高温度变形, 或经两相区变形后加热至两相区的上部温度区间冷却可以形成双态组织, 其组织特征为  $\beta$  转变基体上存在一定数量的初生  $\alpha$  相, 总含量不超过 50%<sup>[11]</sup>。这类组织通常具有良好的综合力学性能。

基于上述背景, 本研究提出将 TC25 钛合金的锻造温度从  $\beta$  单相区降低至  $\alpha+\beta$  两相区, 并改变后续热处理工艺。通过设置对比实验组, 利用光学显微镜表征试样的显微组织, 对锻件进行拉伸性能和疲劳性能测试, 以研究锻造温度及退火制度对 TC25 钛合金显微组织和力学性能的影响规律。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及热处理

实验材料为 TC25 钛合金棒坯, 分别在  $\alpha+\beta$  两相区的 977 °C 和  $\beta$  单相区的 1044 °C 进行锻造, 并对锻件进行初步热处理, 以获得相对均匀的微观组织。 $\alpha+\beta$  锻件的  $\beta$  转变温度为 1022 °C, 其初步热处理制度为 982 °C/2.5 h/FC+550 °C/6 h/AC。 $\beta$  锻件的  $\beta$  转变温度为 1019 °C, 其初步热处理制度为 970 °C/2.5 h/AC+550 °C/6 h/AC。

从  $\alpha+\beta$  两相区锻造和  $\beta$  单相区锻造 TC25 钛合金锻件上分别切取  $\phi 50$  mm 圆盘, 按照表 1 所示, 进行不同工艺的后续热处理。

表 1 TC25 钛合金锻件热处理工艺

Table 1 Heat treatment processes of TC25 titanium alloy forgings

No.	Heat treatment process
Process I	550 °C/2 h/AC
Process II	900 °C/2 h/AC
Process III	900 °C/2 h/AC + 550 °C/6 h/AC

### 1.2 力学性能测试

从热处理后的圆盘上分别切取拉伸试样和疲劳试样。采用 GB/T 228.1—2021 标准进行室温拉伸性能测试。采用 GB/T 15248—2008 标准进行低周疲劳性能测

试, 测试项目为轴向力控制疲劳, 试验温度设定为 300 °C, 试验频率为 2 Hz, 加载波形分别为三角波( $\alpha+\beta$  锻造试样)和正弦波( $\beta$  锻造试样), 最大应力为 800 MPa, 最小应力为 80 MPa, 应力比为 0.1, 应力集中因数  $K_t=1$ , 测定疲劳寿命  $\geq 10\ 000$  周次, 达到 20 000 周次后停止测试。

### 1.3 显微组织表征

金相试样用 800#~7000# 砂纸逐级打磨, 随后使用 OPS 悬浮抛光液进行抛光, 最后用氢氟酸+硝酸+水溶液浸蚀 5 s。采用光学显微镜(OM)进行微观组织表征。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\alpha+\beta$ 锻造显微组织

图 1 为  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金经不同热处理后的光学显微组织。从图 1 可以看出,  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金经不同热处理后均为双态组织, 组织中包含初生  $\alpha$  相 ( $\alpha_p$ )、晶界  $\alpha$  相 ( $\alpha_{GB}$ ) 以及  $\beta$  转变组织, 并且  $\beta$  转变组织中析出了针状次生  $\alpha$  相 ( $\alpha_s$ )。在未热处理试样中, 晶界  $\alpha$  相优先在原始  $\beta$  晶界处形核长大(图 1a)。随着热处理温度的升高, 晶界  $\alpha$  相的体积分数略微呈下降趋势(图 1b、1c)。 $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金经 900 °C/2 h/AC + 550 °C/6 h/AC 双重退火处理后, 只观察到极少量的晶界  $\alpha$  相(图 1d)。这是由于在退火温度升高和时间延长的共同作用下, 大部分晶界  $\alpha$  相发生了溶解。

未经退火处理的  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金次生  $\alpha$  相非常细小, 呈针状(图 1a)。经 550 °C/2 h 退火后, 次生  $\alpha$  相厚度几乎不变(图 1b), 而经 900 °C/2 h 退火后, 次生  $\alpha$  相厚度明显增大(图 1c), 表明其厚度随着退火温度的升高而增大。经双重退火后, 次生  $\alpha$  相进一步粗化(图 1d), 表明延长退火时间同样能够促进次生  $\alpha$  相增厚<sup>[12]</sup>。

为量化热处理对初生  $\alpha$  相的影响, 对经不同热处理后的  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金初生  $\alpha$  相的体积分数进行统计, 结果如图 2 所示。未经退火处理以及经 550 °C/2 h、900 °C/2 h 退火处理后, TC25 钛合金初生  $\alpha$  相体积分数分别为 (23.74±1.14)%、(22.74±0.7)%、(21.39±1.03)%。在  $\alpha+\beta$  两相区退火过程中, 初生  $\alpha$  相会逐渐向  $\beta$  转变组织内溶解, 且溶解速度随着退火温度的升高而加快, 因此提高退火温度会降低初生  $\alpha$  相的体积分数。经双重退火后, 初生  $\alpha$  相的体积分数为 (21.51±1.12)%, 与 900 °C/2 h 单次退火试样近乎一致, 表明二次退火对初生  $\alpha$  相体积分数影响不大, 其体积分数主要由第一步高温退火制度决定。

为进一步分析退火工艺对  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金

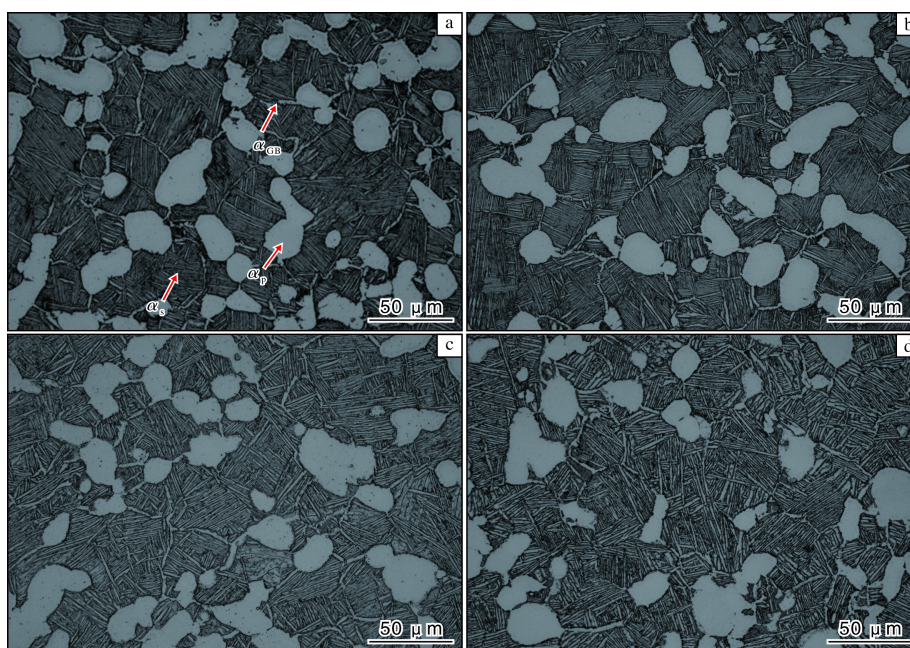


图 1  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金经不同热处理后的显微组织

Fig.1 Microstructures of  $\alpha+\beta$  forged TC25 titanium alloy under different heat treatment processes: (a) untreated; (b) process I; (c) process II; (d) process III

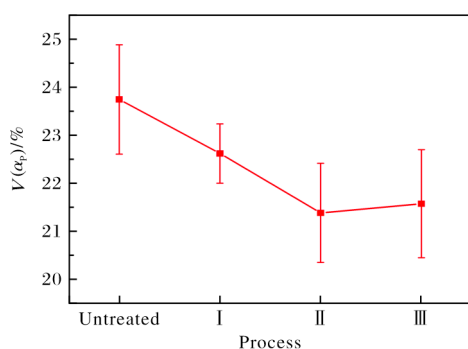


图 2  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金经不同热处理后的初生  $\alpha$  相体积分

Fig.2 Volume fraction of primary  $\alpha$  phase in  $\alpha+\beta$  forged TC25 titanium alloy under different heat treatment processes

初生  $\alpha$  相形貌的影响，统计了不同退火处理条件下初生  $\alpha$  相的长轴、短轴尺寸并计算了长径比  $\lambda$ ，结果如图 3 所示。经  $550\text{ }^\circ\text{C}/2\text{ h}$  退火后，初生  $\alpha$  相的长轴、短轴尺寸均略有增大（图 3c、3d），可能与较小尺寸初生  $\alpha$  相的溶解有关。当退火温度提升至  $900\text{ }^\circ\text{C}$  时，初生  $\alpha$  相长轴、短轴尺寸均明显减小（图 3e、3f），说明初生  $\alpha$  相发生了显著溶解。经过双重退火后，初生  $\alpha$  相的长轴、短轴尺寸均与  $550\text{ }^\circ\text{C}/2\text{ h}$  退火试样相当，高于  $900\text{ }^\circ\text{C}/2\text{ h}$  单次退火试样，说明  $550\text{ }^\circ\text{C}/6\text{ h}$  的二次退火使得残留的初生  $\alpha$  相发生一定程度的长大，长轴、短轴尺寸均变大（图 3g、3h），即双重退火制度下  $\alpha+\beta$

锻造 TC25 钛合金的初生  $\alpha$  相形貌与尺寸受两步退火制度的共同影响<sup>[13]</sup>。此外，热处理前后，初生  $\alpha$  相的长径比均未出现明显变化。

## 2.2 $\alpha+\beta$ 锻造力学性能

$\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金的室温拉伸性能见表 2，低周疲劳寿命见表 3。与单重退火处理相比，经双重退火后， $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金强度略高，抗拉强度为  $1060\text{ MPa}$ ，屈服强度为  $918\text{ MPa}$ ；塑性略低，断后延伸率为  $17\%$ ，断面收缩率为  $35.5\%$ 。总体而言，不同热处理后  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金的力学性能变化幅度相对较小， $\alpha+\beta$  锻造能够使合金保持良好的强塑性匹配。 $300\text{ }^\circ\text{C}$  低周疲劳寿命测试结果显示，除了  $550\text{ }^\circ\text{C}/2\text{ h}$  退火处理试样在循环载荷为  $11\ 276$  周次失效外，其余试样的低周疲劳寿命均超过  $20\ 000$  周次，表现出较好的低周疲劳性能。这与文献[11-12]中报道的双态组织 TC25 钛合金具有良好综合力学性能的结论一致。 $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金展现出优异的综合力学性能，其关键原因在于双态组织中初生  $\alpha$  相和转变  $\beta$  组织的相互作用，从而表现出良好的塑性、疲劳裂纹萌生抗力和适中的强度。

## 2.3 $\beta$ 锻造显微组织

图 4 为  $\beta$  锻造 TC25 钛合金经不同热处理后的光学显微组织。从图 4 可以看出，该锻件在给定的 3 种热处理制度下均表现为网篮组织，由相互交错的片层

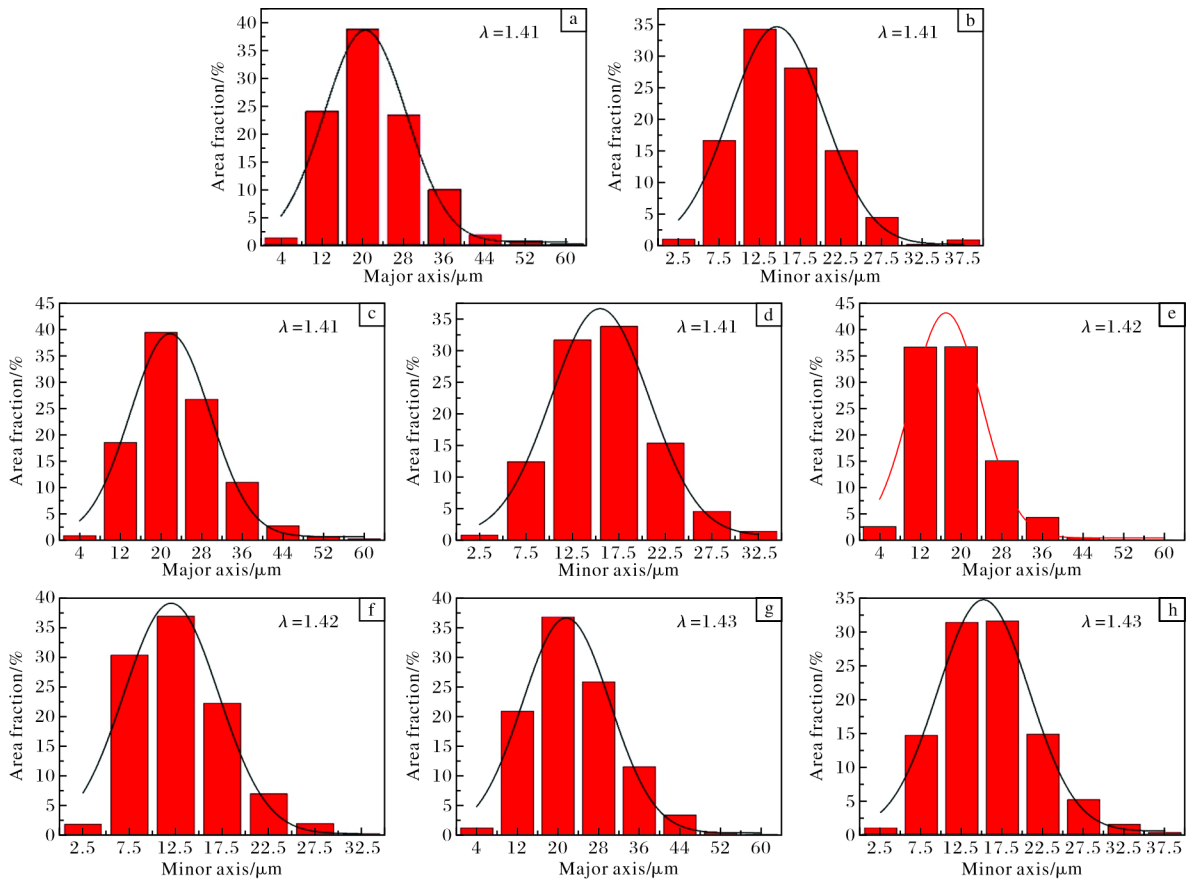


图 3  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金试样经不同热处理后的初生  $\alpha$  相长轴、短轴尺寸分布图

Fig.3 Distribution maps of major axis size and minor axis size of primary  $\alpha$ -phase in  $\alpha+\beta$  forged TC25 titanium alloy under different heat treatment processes: (a, b) untreated; (c, d) process I; (e, f) process II; (g, h) process III

表 2  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金的室温拉伸性能

Table 2 Room-temperature tensile properties of  $\alpha+\beta$  forged TC25 titanium alloy

Process	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
Untreated	1021.0±1.0	867.5±7.8	19.5±0.5	41.5±2.5
I	1021.0±7.1	875.5±4.9	18.8±1.8	45.0±3.0
II	999.0±12.0	854.0±11.3	17.8±2.5	43.5±1.5
III	1059.5±11.5	917.5±6.4	17.0±0.5	35.5±0.5

表 3  $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金的低周疲劳寿命

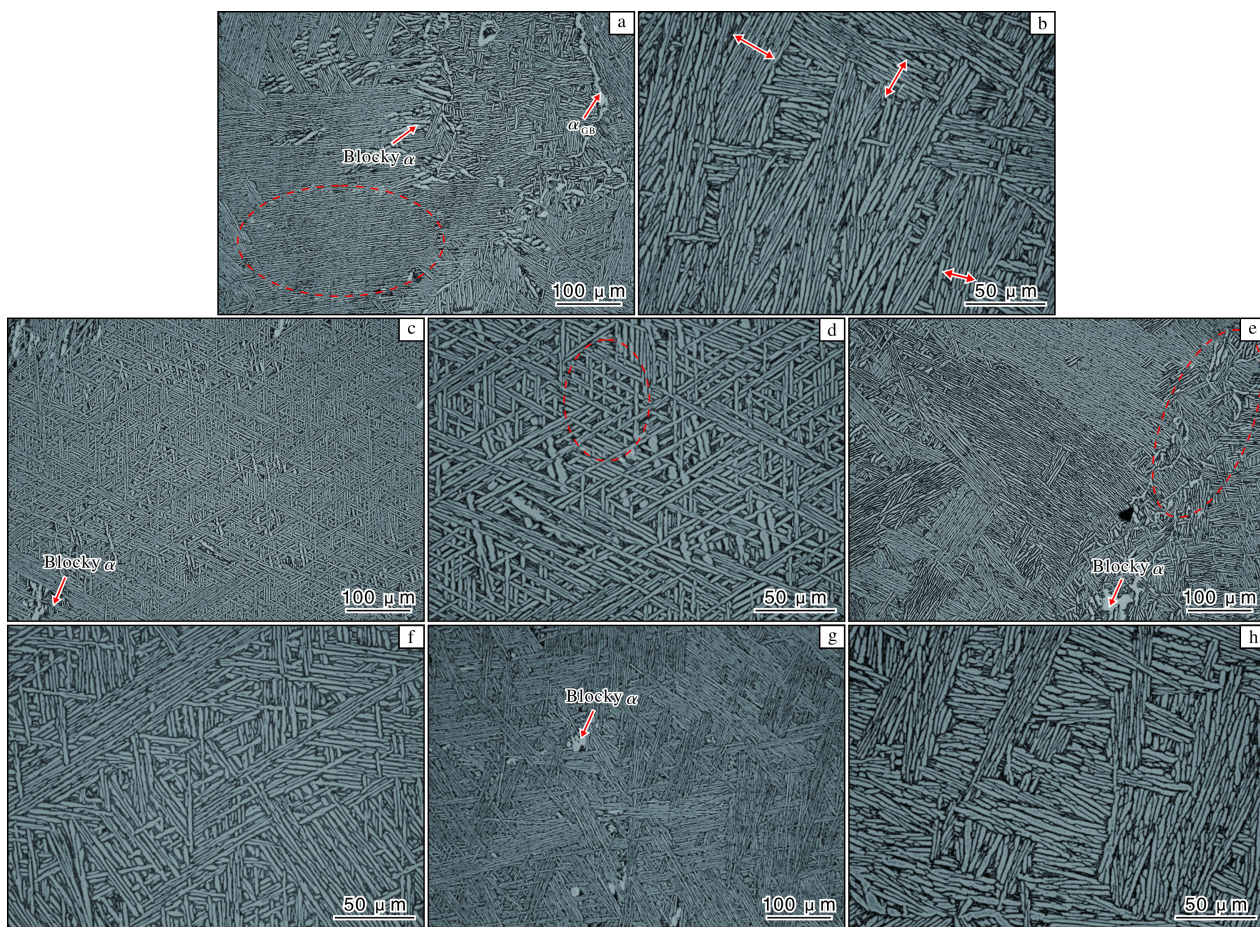
Table 3 Low-cycle fatigue life of  $\alpha+\beta$  forged TC25 titanium alloy

Process	Number of cycles	Result
Untreated	>20 000	Pass
I	11 276	Failure
II	>20 000	Pass
III	>20 000	Pass

$\alpha$  集束构成, 集束间为  $\beta$  相。同时存在晶界  $\alpha$  相, 但其连续性在不同热处理下被不同程度破坏。此外, 还

观察到少许块状  $\alpha$  相, 其形成与合金中元素的微观偏析有关, 相关研究已表明块状  $\alpha$  相区域存在明显的 Al 元素富集现象, 导致  $\alpha$  相异常长大<sup>[11,14]</sup>。

对于未热处理的  $\beta$  锻造 TC25 钛合金, 可以观察到较为连续的晶界  $\alpha$  相, 但由于锻造变形晶界变得弯曲 (图 4a、4b)。晶内片层  $\alpha$  相相互交错, 集束尺寸大多在 10~30  $\mu\text{m}$  之间, 但局部区域也存在大致平行的片层  $\alpha$  相形成的大尺寸集束。此外, 在晶界和晶内都可观察到不均匀分布的块状  $\alpha$  相。经 550  $^\circ\text{C}/2\text{ h}$  退火后, 晶界  $\alpha$  相未发生明显变化, 只是尺寸略有减小且分布更为分散, 晶内出现了由较少片层相互交错

图4  $\beta$  锻造 TC25 钛合金经不同热处理后的显微组织Fig.4 Microstructures of  $\beta$  forged TC25 titanium alloy under different heat treatment processes:  
(a,b) untreated; (c,d) process I; (e,f) process II; (g,h) process III

形成的小尺寸网篮单元（图 4c、4d），这些区域可能与局部应力状态或成分起伏有关，但与宏观力学性能的直接关联尚不明确。经 900 °C/2 h 退火后，可观察到大量破碎的晶界  $\alpha$  相（图 4e、4f）。晶内  $\alpha$  集束尺寸相较于未热处理试样有所增大，并且大尺寸  $\alpha$  集束的数量增多，相互交错形成的典型网篮区域减少。经 900 °C/2 h + 550 °C/6 h 双重退火后，晶界  $\alpha$  相更不连续，甚至不能明显识别到晶界  $\alpha$  相（图 4g、4h）。晶内  $\alpha$  集束尺寸进一步增大，部分集束宽度可达 50  $\mu\text{m}$ ，这与第二次退火过程中  $\alpha$  相的 Ostwald 熟化有关<sup>[15-16]</sup>。

块状  $\alpha$  相数量相比未热处理试样仍明显减少，说明后续的退火处理可以在一定程度上均质化合金元素，对块状  $\alpha$  相的消除具有一定的促进作用。

#### 2.4 $\beta$ 锻造力学性能

$\beta$  锻造 TC25 钛合金的室温拉伸性能见表 4，低周疲劳寿命见表 5。与  $\alpha+\beta$  锻造相比， $\beta$  锻造 TC25 钛合金的强度略高，抗拉强度为 1090 MPa，但塑性显著下降，断后伸长率为 10.8%，断面收缩率为 17%。经双重退火后， $\beta$  锻造 TC25 钛合金强度最高，抗拉强度为 1099 MPa，屈服强度为 953 MPa；但塑性最低，断后

表 4  $\beta$  锻造 TC25 钛合金的室温拉伸性能Table 4 Room-temperature tensile properties of  $\beta$  forged TC25 titanium alloy

Process	$R_m/\text{MPa}$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
Untreated	1090.0±10.0	944.0±7.0	10.8±0.3	17.0±1.0
I	1089.0±3.0	937.0±2.0	12.8±1.3	19.0±1.0
II	1058.5±6.5	817.5±10.6	11.3±1.8	17.5±1.5
III	1099.0±1.0	953.0±4.0	8.8±0.8	14.0±2.0

表5  $\beta$  锻造 TC25 钛合金的低周疲劳寿命  
Table 5 Low-cycle fatigue life of  $\beta$  forged TC25 titanium alloy

Process	Number of cycles	Result
Untreated	>20 000	Pass
I	18 128	Failure
II	9134	Failure
III	>20 000	Pass

伸长率为 8.8%，断面收缩率为 14%，强塑性匹配最差。总体来说，3 种热处理制度下  $\beta$  锻造 TC25 钛合金的性能变化较小。

$\beta$  锻造 TC25 钛合金的低周疲劳性能较差，经单重退火处理后低周疲劳寿命均未达标。这是由于  $\beta$  锻造 TC25 钛合金为网篮组织，该组织虽然强度较高，但塑性较差，且大尺寸  $\alpha$  集束对裂纹扩展的抗力较低，故导致合金低周疲劳寿命较低。

## 2.5 组织与性能的关系

通过对比  $\alpha+\beta$  锻造与  $\beta$  锻造 TC25 钛合金的显微组织，发现锻造方式显著影响合金的微观组织： $\alpha+\beta$  锻造得到双态组织， $\beta$  锻造得到网篮组织。力学性能测试结果表明， $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金的强度略低，但其塑性和 300 °C 低周疲劳寿命显著优于  $\beta$  锻造，表现出更好的综合力学性能。这与双态组织中球状初生  $\alpha$  相有利于提高塑性和疲劳性能，而转变  $\beta$  基体具有高强度的特性相符。网篮组织的高强度源于片层  $\alpha$  相，但其塑性和疲劳性能较差，这与片层界面易于成为裂纹源和扩展路径有关。后续热处理主要影响组织中相的尺寸、形貌和分布，但对性能的影响明显不及锻造方式。

## 3 结 论

(1)  $\alpha+\beta$  两相区锻造 TC25 钛合金为双态组织，包含初生  $\alpha$  相、晶界  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织， $\beta$  转变组织中析出针状的次生  $\alpha$  相。在单重退火下，提高退火温度能够促进初生  $\alpha$  相溶解和次生  $\alpha$  相增厚；在双重退火下，二次退火促进初生  $\alpha$  相长大和次生  $\alpha$  相进一步粗化，初生  $\alpha$  相体积分数主要由初次退火决定。

(2)  $\beta$  单相区锻造 TC25 钛合金为网篮组织，片层  $\alpha$  相相互交错，且存在异常的块状  $\alpha$  相。退火工艺主要影响晶界  $\alpha$  相形态以及  $\alpha$  集束尺寸。

(3) 与  $\beta$  锻造相比， $\alpha+\beta$  锻造 TC25 钛合金的强度虽略微降低，但塑性和低周疲劳寿命显著提高，综合力学性能更优。锻造温度是影响 TC25 钛合金锻件性能的主导因素。

## 参考文献 References

- [1] Liu X H, Zhang X Y, Du Y X, et al. Insights into microstructural stability and embrittlement of TC25 high temperature titanium alloy subjected to thermal exposure[J]. *Materials Characterization*, 2024, 210: 113820.
- [2] Ma X, Zeng W D, Tian F, et al. Optimization of hot process parameters of Ti-6.7Al-2Sn-2.2Zr-2.1Mo-1W-0.2Si alloy with lamellar starting microstructure based on the processing map[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 545: 132-138.
- [3] 向彪, 张鹏, 王周田. 热变形对 TiB-TC25G 合金组织与结构影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(12): 4586-4593.
- [4] 刘巧沐. 锻态 TC25G 钛合金棒材的显微组织和结构[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(6): 21-25.
- [5] 张安, 张元东, 刘秀良, 等. 锻造变形量对 TC25G 钛合金组织和性能的影响[J]. *锻压装备与制造技术*, 2023, 58(3): 100-104.
- [6] He S T, Zeng W D, Xu J W, et al. The effects of microstructure evolution on the fracture toughness of BT-25 titanium alloy during isothermal forging and subsequent heat treatment[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 745: 203-211.
- [7] 张晓园, 刘向宏, 杜予暉, 等. TC25G 钛合金高温变形组织演变及强塑性研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(12): 4227-4237.
- [8] Zhou G, Xin S W, Xing H, et al. Effect of microstructures on mechanical properties of Ti-6.5Al-2Sn-4Zr-4Mo-1W-0.2Si alloy[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(12): 2300012.
- [9] Li Y S, Xu P W, Guo Y F, et al. Optimizing the mechanical properties of dual-phase Ti-6242s titanium alloy at 550 °C using the boundary architecture[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 4497-4509.
- [10] 王俭, 刘继雄, 张伟, 等. TC25G 钛合金热变形过程中的组织演变[J]. *钛工业进展*, 2018, 35(4): 30-34.
- [11] 肖清云, 郎连林, 苏庆, 等. TC25 钛合金  $\alpha+\beta$  锻件和准  $\beta$  锻件组织和性能研究[J]. *模具技术*, 2023(1): 23-30.
- [12] 张苗, 强刚刚, 关向东, 等. 退火温度对 TC25 钛合金板材组织和性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2024, 41(3): 24-28.
- [13] 肖挺, 马斌, 宣航. 一次退火冷却方式对 TC25 钛合金锻件组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2024, 49(10): 118-120.
- [14] 王晓巍, 董宇, 王德勇, 等. 退火对 TC25G 钛合金组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48(6): 74-79.
- [15] Leyens C, Peters M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [16] 唐军, 秦卫东, 王清江, 等. TC25G 钛合金整体叶盘锻件的组织和力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(1): 39-42.