

准 β 锻造变形量对 TC18 钛合金棒材组织及力学性能的影响

陈宇¹, 任晓龙¹, 王佳乐¹, 何龙龙¹, 王涛¹, 赵宁¹, 于来源², 刘向宏³

(1. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

(3. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 对 TC18 钛合金棒材分别进行变形量为 20%、30% 和 40% 的准 β 锻造, 随后进行常规固溶时效处理, 系统研究了变形量对该合金组织及力学性能的影响规律。结果表明: 经准 β 锻造后, 棒材均为网篮组织; 随着准 β 锻造变形量的增大, 原始 β 晶粒破碎程度增加, β 晶粒尺寸减小, 弥散分布的片层 α 相更加细小, 棒材抗拉强度由 1125 MPa 提高至 1146 MPa; 晶界 α 相由连续转变为断续, 棒材断后伸长率由 10.8% 提高至 12.3%; 同时 α 片层厚度减小, 棒材断裂韧性由 85.6 MPa·m^{1/2}降低至 76.7 MPa·m^{1/2}。当变形量为 30% 时, TC18 钛合金棒材强度、塑性和韧性匹配良好, 综合性能最为优异。

关键词: TC18 钛合金; 准 β 锻造; 锻造变形量; 组织; 力学性能

中图分类号: TG316; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)04-007-07

Effect of Quasi- β Forging Reduction on Microstructure and Mechanical Properties of TC18 Titanium Alloy Bars

Chen Yu¹, Ren Xiaolong¹, Wang Jiale¹, He Longlong¹, Wang Tao¹, Zhao Ning¹, Yu Laiyuan², Liu Xianghong³

(1. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

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

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

Abstract: Quasi- β forging with reductions of 20%, 30%, and 40% was conducted on TC18 titanium alloy bars, followed by conventional solution and aging treatment. The effects of reduction on the microstructure and mechanical properties of TC18 titanium alloy were systematically investigated. The results indicate that the microstructure of the bars after quasi- β forging exhibits a basketweave microstructure. As the forging reduction increases, the fragmentation of primary β grains intensifies, leading to a reduction in β grain size. Concurrently, the dispersed lamellar α phase becomes finer, which enhances the tensile strength of the bars from 1125 MPa to 1146 MPa. The grain boundary α phase transitions from continuous to discontinuous, thereby increasing the elongation after fracture from 10.8% to 12.3%. Meanwhile, the reduction in α lamellar thickness causes a decrease in fracture toughness, which drops from 85.6 MPa·m^{1/2} to 76.7 MPa·m^{1/2}. At a forging reduction of 30%, the TC18 titanium alloy bar exhibits an optimal balance of strength, ductility, and toughness, achieving the best comprehensive mechanical properties.

Keywords: TC18 titanium alloy; quasi- β forging; forging reduction; microstructure; mechanical properties

钛及钛合金具有比强度高、耐高温、耐腐蚀等优异性能, 在航空航天、石油化工、生物医药等领域得到广泛应用^[1-5]。TC18 钛合金是一种常见的高强度高钛合金, 其名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe, 经

热处理后具有良好的综合力学性能, 广泛用于飞机起落架、支架、横梁等承力结构件, 以及紧固件、弹簧等零部件^[6-11]。

TC18 钛合金锻件一般采用准 β 锻造, 旨在获得综合性能优异的网篮组织。影响 TC18 钛合金锻件组织和力学性能的参数主要包括加热温度、应变速率、变形量、冷却速率及热处理制度等, 科研工作者已对此开展了系统性研究。例如, 文献[12-16]报道了变形温

收稿日期: 2025-12-23

基金项目: 秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2023-178)

通信作者: 陈宇(1999—), 男, 工程师。

度和应变速率对 TC18 钛合金热变形行为的影响, 以及热处理工艺参数对其显微组织和力学性能的影响。然而, 关于准 β 锻造变形量对 TC18 钛合金显微组织及力学性能的影响鲜有报道。为此, 以 TC18 钛合金棒材为研究对象, 系统考察了不同锻造变形量对其显微组织及力学性能的影响规律, 探究其强韧化机理, 旨在为 TC18 钛合金准 β 锻造工艺参数优化提供理论依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用原材料为西部超导材料科技股份有限公司生产的 TC18 钛合金棒材, 规格为 $\phi 250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,

经多道次镦拔和两相区热加工成形获得。采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP)测得 TC18 钛合金棒材化学成分如表 1 所示, 金相法测得其相变温度为 873°C 。图 1a 为 TC18 钛合金棒材的光学显微镜(OM)照片, 图 1b 为扫描电子显微镜(SEM)照片。可以看出, 棒材组织为典型的双态组织, 等轴 α 相球化程度较好, 弥散分布在 β 转变组织中; 同时 β 转变组织内还弥散分布着大量时效过程中析出的针状次生 α 相, 其厚度约为 $200\sim 300 \text{ nm}$ 。经电子背散射衍射(EBSD)分析得到 TC18 钛合金棒材的反极图(IPF)如图 1c、1d 所示, 相图如图 1e 所示。利用 IPF 图测得原始 β 晶粒尺寸约为 $600 \mu\text{m}$; 从图 1e 可以看出, 等轴 α 相均匀分布在 β 基体内, 尺寸约为 $3\sim 8 \mu\text{m}$ 。

表 1 TC18 钛合金棒材化学成分(wt%)

Table 1 Chemical composition of TC18 titanium alloy bar

Al	Mo	V	Cr	Fe	C	N	H	O	Ti
5.12	4.73	4.95	0.098	1.05	0.007	0.008	0.0018	0.122	Bal.

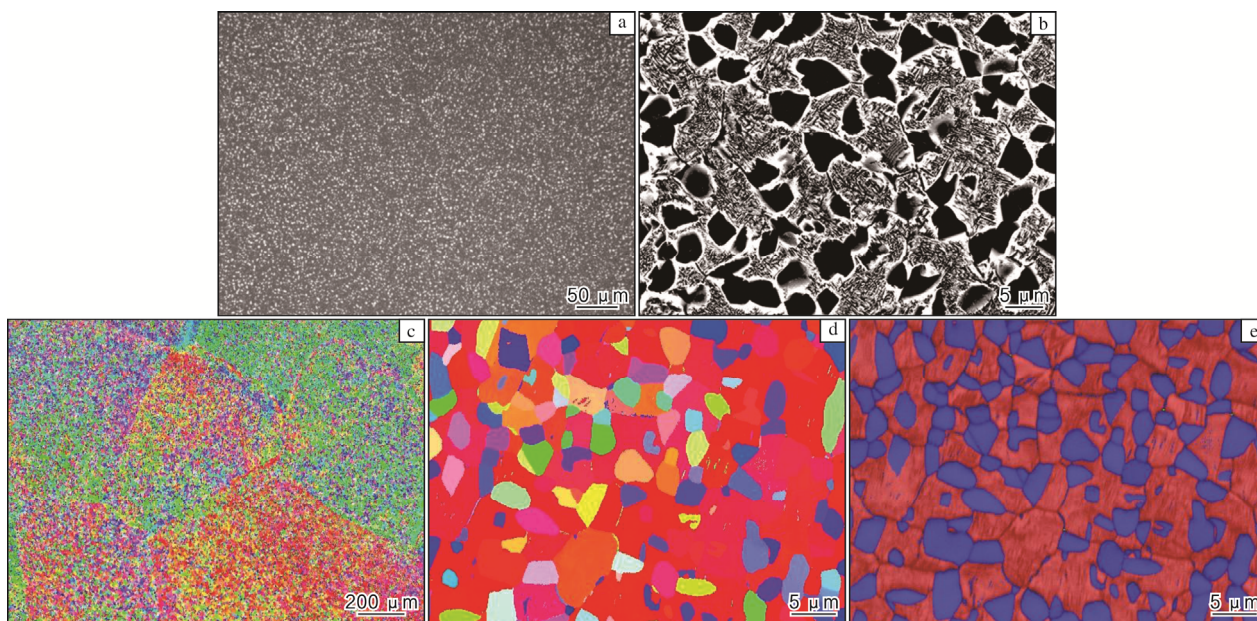


图 1 TC18 钛合金棒材的微观组织

Fig.1 Microstructures of TC18 titanium alloy bar: (a) OM microstructure; (b) SEM microstructure; (c, d) IPF maps; (e) EBSD phase map

1.2 实验过程

对 TC18 钛合金棒材进行不同变形量的准 β 锻造。1[#]~4[#]试样加热温度均为 900°C , 保温时间为 120 min 。其中, 1[#]试样出炉后直接空冷, 未进行变形处理; 2[#]试样进行一道次镦粗变形, 压下量为 80 mm , 变形量为 20% , 锻后规格为 $\phi 280 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$; 3[#]试样进行一道次镦粗变形, 压下量为 120 mm , 变形量为 30% ,

锻后规格为 $\phi 300 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$; 4[#]试样进行一道次镦粗变形, 压下量为 160 mm , 变形量为 40% , 锻后规格为 $\phi 320 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 。图 2 为准 β 锻造工艺示意图。对不同准 β 锻造变形量的试样进行相同的固溶时效处理, 具体工艺为: 825°C 保温 2 h , 炉冷至 760°C 保温 2 h , 空冷; 随后在 605°C 保温 6 h , 空冷。图 3 为热处理工艺示意图。

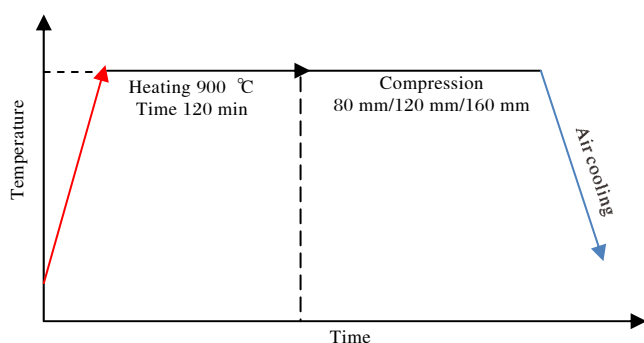
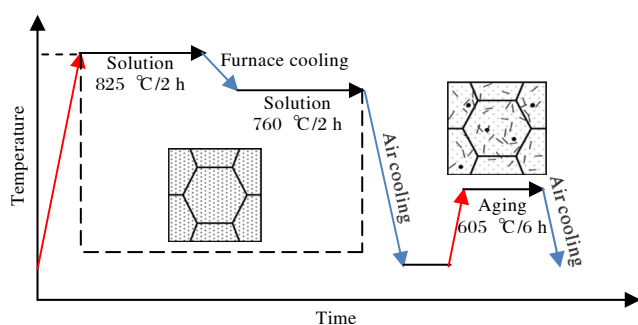
图2 准 β 锻造工艺示意图Fig.2 Schematic diagram of quasi- β forging process

图3 热处理工艺示意图

Fig.3 Schematic diagram of heat treatment process

利用线切割从热处理后的 4 组试样心部截取 15 mm × 15 mm × 10 mm 的金相试样, 依次使用 240#、

400#、1000#、2000#砂纸打磨并机械抛光后, 采用 HF + HNO₃ + H₂O 腐蚀液(体积比为 3 : 7 : 90)进行腐蚀, 利用 Olympus GX71 光学显微镜和 JSM-IT700HR 扫描电子显微镜观察其微观组织, 利用电子背散射衍射仪获取反极图和相图。

为评价不同准 β 锻造变形后试样的力学性能, 在热处理后试样的 R/2 处取样。依据 GB/T 228.1—2021 制备直径为 5 mm 的圆形拉伸试样, 采用 ZWICK/150 万能材料试验机进行室温拉伸性能测试; 依据 GB/T 4161—2007 加工断裂韧性试样(尺寸为 62.5 mm × 60 mm × 25 mm), 采用 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机进行室温断裂韧性测试。每组均测试 3 个试样, 取测试结果的平均值作为最终结果。

2 结果与分析

2.1 微观组织

2.1.1 OM 组织

图 4 为不同变形量下 TC18 钛合金棒材的 OM 照片。由图 4 可见, 随着变形量的增加, 棒材原始粗大的 β 晶粒发生破碎, 并沿金属流动方向被压扁、拉长。未变形时, 原始 β 晶粒无明显变形特征, 晶界清晰可见(图 4a); 变形量为 20%时, 原始 β 晶粒仍较粗大, 破碎程度较小, 无明显变形(图 4b); 变形量为 30%时, 原始 β 晶粒破碎程度增加, 并沿变形方向被压扁、拉长(图 4c); 变形量为 40%时, 原始 β 晶粒破碎程度进

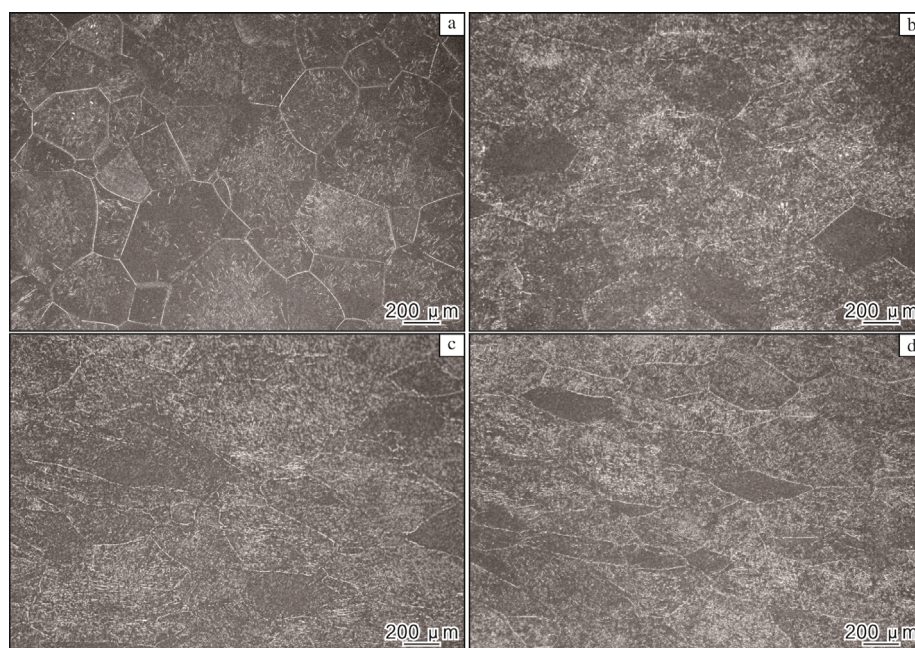


图4 不同变形量下 TC18 钛合金棒材的 OM 照片

Fig.4 OM microstructures of TC18 titanium alloy bars with varying reductions: (a) 0%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%

一步增大, 压扁与拉长现象更加明显(图 4d)。

2.1.2 SEM 组织

图 5 为不同变形量下 TC18 钛合金棒材的 SEM 照片。由图 5a、5b 可知, 1[#]试样晶界 α 相呈连续平直状, 初生 α 相已全部消失, 组织以片层 α 相形式存在。由图 5c、5d 可知, 2[#]试样变形量较小, 晶界 α 相破碎程

度低, 清晰完整, 呈连续且较为平直的形态。由图 5e、5f 可知, 随着变形量增大, 3[#]试样连续的晶界 α 相发生破碎, 呈断续分布, 晶界 α 相在变形作用下发生弯折。由图 5g、5h 可知, 随着变形量进一步增大, 4[#]试样晶界 α 相破碎加剧, 断续分布的晶界 α 相增多, 同时出现了部分短棒状和球状 α 相。

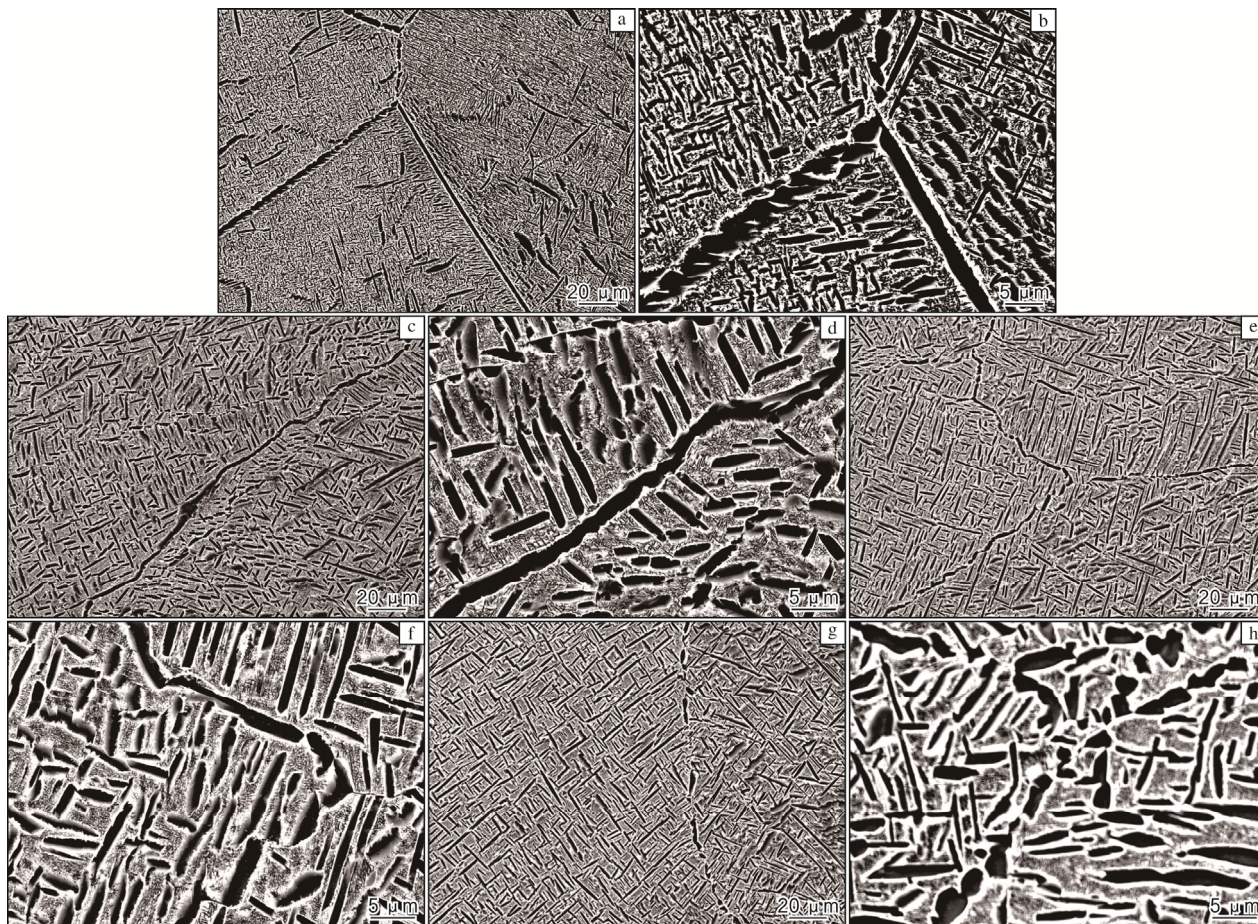


图 5 不同变形量下 TC18 钛合金棒材的 SEM 照片

Fig.5 SEM images of TC18 titanium alloy bars with varying reductions: (a, b) 0%; (c, d) 20%; (e, f) 30%; (g, h) 40%

此外, 为定量分析准 β 锻造变形量对网篮组织 α 片层厚度的影响, 利用 ImageJ 软件对不同变形量试样的 α 片层厚度进行统计, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 随着锻造变形量的增加, TC18 钛合金棒材 α 片层

厚度减小; 与 2[#]试样相比, 4[#]试样的 α 片层厚度降低了约 30%。

2.1.3 EBSD 分析

图 6 为利用 EBSD 得到的不同变形量下 TC18 钛合金棒材的 IPF 图和相图。从图 6 可以看出, 不同变形量下 α 相均呈典型的网篮组织特征。1[#]试样原始 β 晶粒尺寸约为 550 μm (图 6a); 晶界 α 相呈平直连续状, β 基体内分布着片层 α 相(图 6b、6c)。2[#]试样 β 晶粒尺寸约为 480 μm (图 6d), 较 1[#]试样减小; α 相具有明显的层状结构, 不同取向的 α 相相互交织, 阻碍彼此进一步长大, 形成网篮组织(图 6e、6f)。随着变形量增大, β 晶粒尺寸进一步减小, 3[#]试样约为 420 μm (图 6g), 4[#]试样约为 340 μm (图 6j)。

表 2 不同变形量下 TC18 钛合金棒材的 α 片层厚度

Table 2 Thickness of α lamellae in TC18 titanium alloy bars with varying reductions

No.	Reduction/%	Thickness of α lamellae/ μm
2 [#]	20	1.35 ± 0.23
3 [#]	30	1.18 ± 0.21
4 [#]	40	0.99 ± 0.24

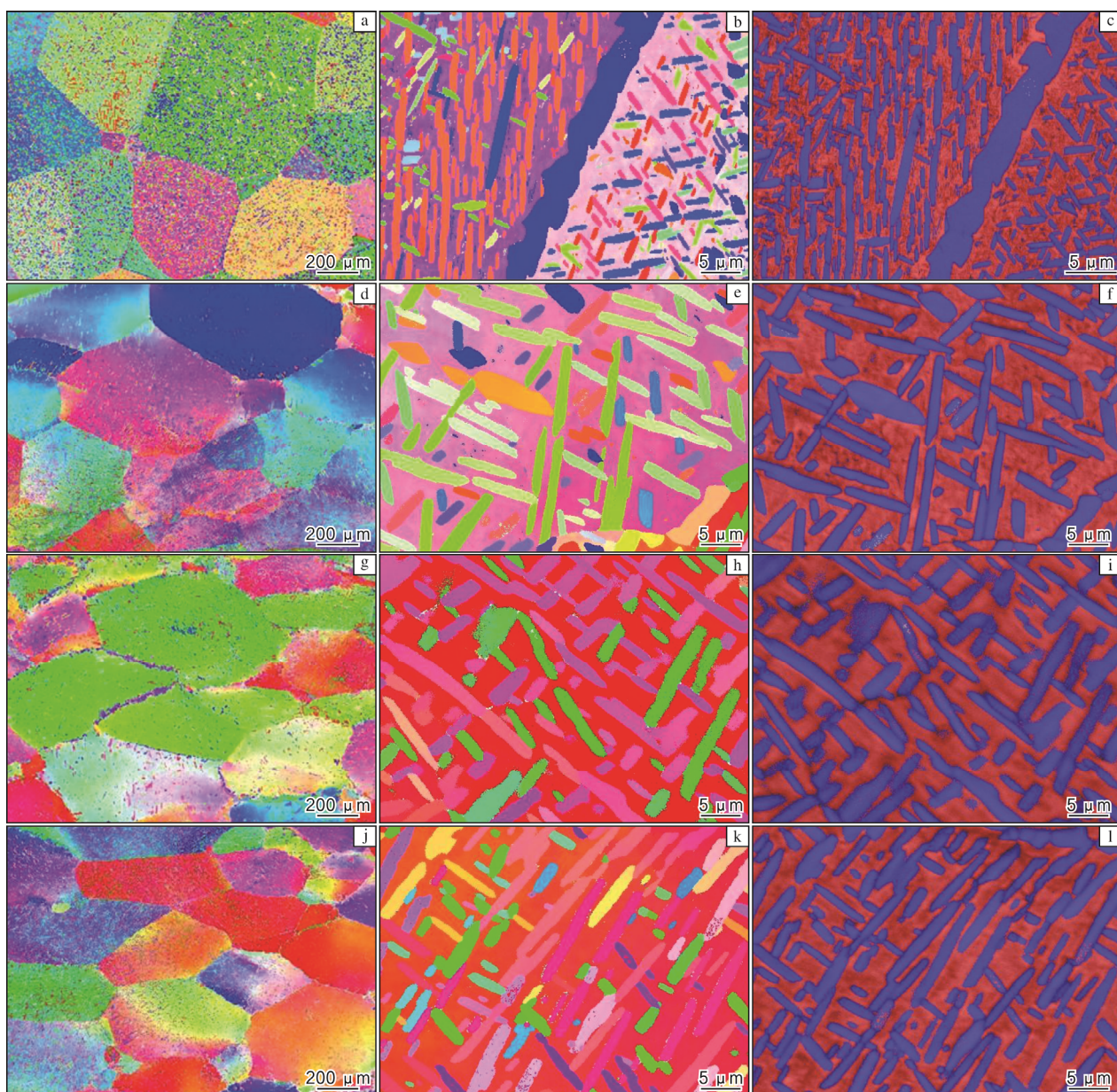


图6 不同变形量下 TC18 钛合金棒材的 IPF 图和相图

Fig.6 IPF maps (a, b, d, e, g, h, j, k) and phase maps (c, f, i, l) of TC18 titanium alloy bars with varying reductions: (a-c) 0%; (d-f) 20%; (g-i) 30%; (j-l) 40%

2.2 力学性能分析

图7为不同变形量下 TC18 钛合金棒材的室温拉伸性能。由图 7a 可知, 未进行准 β 锻造的 1[#]试样抗拉强度最低, 为 1115 MPa; 经准 β 锻造后, 随着变形量增大, 抗拉强度逐渐提高, 2[#]和 3[#]试样分别为 1125 MPa 和 1134 MPa, 4[#]试样抗拉强度最高, 为 1146 MPa。屈服强度的变化规律与抗拉强度相似: 4[#]试样屈服强度最高, 为 1052 MPa; 3[#]试样次之, 为 1043 MPa; 2[#]和 1[#]试样分别为 1032 MPa 和 1025 MPa。随着变形量增大, β 晶粒变形程度增加、尺寸减小, 同时晶内弥散

分布的片层 α 相变得更加细小, β 晶粒细化和细小片层 α 相均可以提高材料的强度, 因此抗拉强度和屈服强度随变形量增大而提高。由图 7b 可知, 未进行准 β 锻造的 1[#]试样塑性最低; 随着变形量增大, 材料塑性逐渐提高, 断后伸长率由 10.8% 提高至 12.3%。这是因为准 β 锻造变形量越大, 平直连续晶界破碎越充分, 材料塑性随之提升。

图 8 为不同变形量下 TC18 钛合金棒材的断裂韧性。未进行准 β 锻造的 1[#]试样断裂韧性为 76.6 MPa·m^{1/2}。经准 β 锻造后, 随着变形量的增大, 材料的断裂韧性

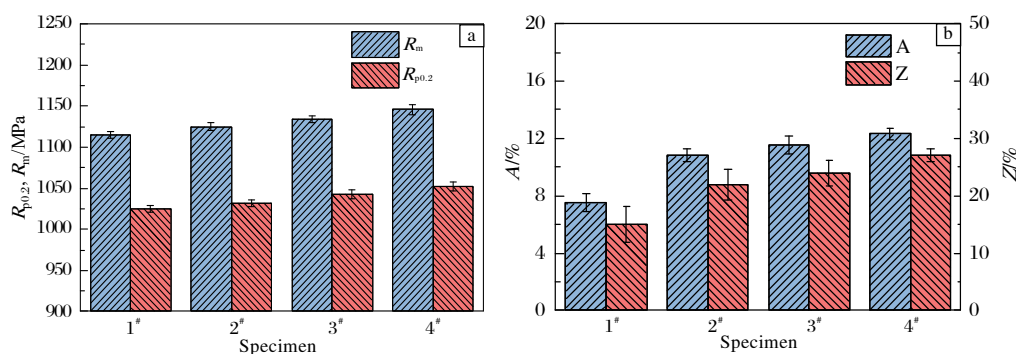


图7 不同变形量下 TC18 钛合金棒材的室温拉伸性能

Fig.7 Tensile properties of TC18 titanium alloy bars with varying reductions: (a) strength; (b) plasticity

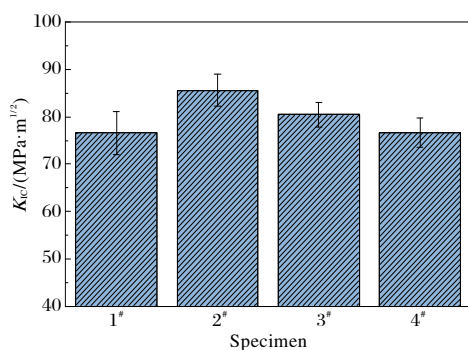


图8 不同变形量下 TC18 钛合金棒材的断裂韧性

Fig.8 Fracture toughness of TC18 titanium alloy bars with varying reductions

降低。其中，变形量最小的 2# 试样断裂韧性最高，达 $85.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ；3# 和 4# 试样的断裂韧性次之，分别为 $80.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $76.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。这是由于随着变形量增大，片层 α 相厚度减小，阻碍裂纹扩展的能力下降，导致断裂韧性降低。

2.3 微观组织与力学性能关系

综上所述，随着准 β 锻造变形量的增大，TC18 钛合金棒材的强度和塑性呈增大趋势，断裂韧性呈降低趋势。1# 试样在单相区保温后初生 α 相溶解，冷却过程中形成片层 α 相；因后续未进行变形，原始 β 晶粒未发生破碎，晶界 α 相呈平直、连续形态。试样经单相区加热及准 β 锻造变形后，形成典型的网篮组织，初生 α 相以片层形式存在， β 晶粒发生破碎，晶粒尺寸较 1# 试样减小。随着变形量增大， β 晶粒变形程度增加，尺寸进一步减小，同时晶内弥散分布的片层 α 相变得更加细小；较小的 β 晶粒和弥散分布的细小片层 α 相共同提高了材料的强度。此外，随着变形量增大，平直连续的晶界 α 相发生破碎，材料塑性提高，断裂韧性降低。这是因为变形量较小时，片层 α 相厚度较大，对裂纹扩展的阻碍作用较强；而变形量

较大时，片层 α 相厚度减小，且连续晶界 α 相破碎呈断续状分布，导致阻碍裂纹扩展的能力下降，断裂韧性随之降低。综合考量，当准 β 锻造变形量为 30% 时，TC18 钛合金棒材的强度、塑性和韧性匹配良好，综合性能最佳。

3 结 论

(1) 经变形量分别为 20%、30% 和 40% 的准 β 锻造后，TC18 钛合金棒材组织呈现典型的网篮组织特征，片层 α 相弥散分布在 β 基体内。随着变形量增大，原始 β 晶粒破碎程度增加，沿变形方向被压扁、拉长；连续的晶界 α 相发生破碎，细小的片层 α 相出现球化趋势，转变为短棒状或球状 α 相。

(2) 经准 β 锻造后，随着变形量从 20% 增大至 40%，TC18 钛合金棒材的强度和塑性均呈增大趋势，抗拉强度由 1125 MPa 提高至 1146 MPa，断后伸长率由 10.8% 提高至 12.3%；但断裂韧性降低，由 $85.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 降至 $76.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

(3) 随着准 β 锻造变形量增大，细小的 β 晶粒和弥散分布的细小片层 α 相起到强化作用，提高了强度；平直连续的晶界发生破碎，提高了塑性；片层 α 相厚度减小，阻碍裂纹扩展的能力下降，导致断裂韧性降低。

(4) 当准 β 锻造变形量为 30% 时，TC18 钛合金棒材的强度、塑性和韧性匹配较好，综合性能最优。

参考文献 References

- [1] Banerjee D, Williams J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.
- [2] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 280-282.
- [3] 尚晓峰, 蔡令志, 刘士伟, 等. Fe 含量对增材制造 TC4 钛合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025,

54(12): 3164-3173.

[4] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.

[5] 马尹凡, 樊江昆, 唐璐瑶, 等. 激光选区熔化成形高强钛合金研究现状及展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(1): 280-292.

[6] 胡愈刚, 王晓平, 周亮. TC18 钛合金焊接技术在飞机起落架制造中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2011(16): 72-74.

[7] Ning Y Q, Xie B C, Liang H Q, et al. Dynamic softening behavior of TC18 titanium alloy during hot deformation[J]. Materials & Design, 2015, 71: 68-77.

[8] 李凯, 杨平, 沙爱学, 等. 锻态 TC18 钛合金棒材中 β 相组织和织构特征研究[J]. 金属学报, 2014, 50(6): 707-714.

[9] 周晓舟, 易丹青, 刘会群, 等. 显微组织对 TC18 钛合金高温力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 98-101.

[10] Gu B, Xiong Z H, Yang P, et al. Microstructure evolution and deformation behavior of metastable β -titanium alloy Ti55511 in die forging[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(9): 2420-2429.

[11] 陈涛. TC18 钛合金热变形行为与热处理数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[12] Li C, Zhang X Y, Li Z Y, et al. Hot deformation of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe near β titanium alloys containing thin and thick lamellar α phase[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 573: 75-83.

[13] 张永强, 郭鸿镇, 刘瑞, 等. TC18 合金 β 相区等温锻造显微组织和力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 634-638.

[14] 冉春, 陈鹏万, 李玲, 等. 中高应变率条件下 TC18 钛合金动态力学行为的实验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1723-1728.

[15] 张英明, 段启辉, 韩明臣, 等. 热处理对 TC18 钛合金丝显微组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2011, 28(2): 23-25.

[16] 邓喆, 张晓泳, 李志友, 等. 固溶-时效对 TC18 钛合金显微组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(8): 23-30.

行业动态

2026 年 1—6 月中国钛、锆产品进出口统计

项目	进口数量/kg	进口金额/美元	出口数量/kg	出口金额/美元
钛相关产品				
钛矿砂及其精矿	2 879 309 201	713 397 433	28 945 599	27 729 695
钛的氧化物	2 818 293	11 060 767	23 239 805	53 268 999
钛白粉(金红石型含量 $\geq 99.8\%$ 且明度(干粉 L*) $\geq 99.0\%$)	19 340 288	55 316 577	260 710 819	539 040 192
其他钛白粉	12 576 858	44 499 525	807 639 149	1 652 763 658
海绵钛	432 354	2 109 349	3 850 807	26 015 897
其他未锻轧钛	90 796	3 442 608	733 264	8 720 618
钛粉末	50 336	1 734 076	142 376	5 252 428
钛条、杆、型材及异型材	839 390	55 787 027	4 892 078	115 299 388
钛丝	152 778	10 932 692	617 573	16 870 850
厚度 $\leq 0.8\text{mm}$ 的钛板、片、带、箔	606 115	12 565 395	1 151 867	30 237 333
厚度 $> 0.8\text{mm}$ 的钛板、片、带	888 499	51 408 468	4 317 667	87 091 617
钛管	26 754	7 752 957	2 067 974	46 468 478
其他锻轧钛及钛制品	277 547	305 853 405	2 102 655	130 674 697
锆相关产品				
锆矿砂及其精矿	1 143 630 516	627 834 291	12 408 005	20 231 534
锆的氯化物及氢氧基氯化物	0	1 814	30 131 041	62 016 716
碳酸锆	57	2 211	9 305 495	26 011 039

来源: 海关总署官网