

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5129

高强钛合金大尺寸棒材芯表横纵组织与性能研究

杨 草^{1,2}, 张林嘉^{1,3}, 赵彦妮⁴, 唐 斌¹

(1. 西北工业大学 材料学院 陕西 西安 710072 2. 中国航发贵州黎阳航空发动机有限公司, 贵州 贵阳 550014 3. 海装广州局驻贵阳地区军事代表室, 贵州 贵阳 550000 4. 陕西天成航空材料股份有限公司 陕西 咸阳 712023)

摘 要: 聚焦于直径 400 mm 的 TC18 钛合金大尺寸棒材, 系统研究其芯表横纵 4 个位置的拉伸性能、组织特征、断口形貌及断口剖面空洞特征。结果显示, 边缘试样强度优势明显, 其中边横 ET 试样抗拉强度可达 1 230 MPa; 纵向试样塑性更优, 中纵 CL 试样伸长率最高达 16.5%。组织定量分析表明, 纵向试样等轴 α_p 相占比较横向试样多 5%, 且边缘试样片状次生 α_s 相的长度和宽度尺寸均小于芯部试样。断口形貌表征发现, 其微观形貌均由韧窝构成, 呈现出典型的韧性断裂特征。进一步对拉伸后剖面进行表征发现存在 α_p 内、 α_p 与 β 边界及 β 相 3 种空洞形成现象。

关键词: TC18 钛合金; 大尺寸棒材; 拉伸性能; 韧性断裂; 断裂机制

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)09-0882-06

Study of the Microstructure and Mechanical Properties of Large-sized High-strength Titanium Alloy Bars: Core and Surface in the Longitudinal and Transverse Directions

YANG Cao^{1,2}, ZHANG Linjia^{1,3}, ZHAO Yanni⁴, TANG Bin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AECC Guizhou Liyang Aero Engine Co., Ltd., Guiyang 550014, China; 3. Guiyang Military Representative Office of Guangzhou Bureau of Naval Armament Department, Guiyang 550000, China; 4. Shaanxi Tiancheng Aerospace Co., Ltd., Xianyang 712023, China)

Abstract: Focusing on large TC18 titanium alloy bars with a diameter of 400 mm, the tensile properties, microstructural characteristics, fracture morphology, and characteristics of voids in the fracture surface profile were systematically investigated at four locations: the center transverse (CT), center longitudinal (CL), edge transverse (ET), and edge longitudinal (EL) locations. The tensile results demonstrate that edge samples exhibit a significant strength advantage, with the ET sample achieving a tensile strength of 1 230 MPa. The longitudinal sample exhibits superior plasticity, with the CL sample exhibiting the highest elongation of 16.5%. Compared with the core samples, the longitudinal samples contained 5% more equiaxed α_p phase, whereas the edge samples present smaller dimensions of the lamellar secondary α_s phase. Fractography reveals typical ductile fracture characteristics with uniformly distributed dimples. Further characterization of tensile fracture cross-sections reveals three types of void formation: within α_p , at the α_p - β interface, and within the β phase.

Key words: TC18 titanium alloy; large bar; tensile properties; ductile fracture; fracture mechanism

钛(Ti)及其合金凭借高比强度、卓越的耐腐蚀性、宽广的使用温度范围以及优良的焊接性等, 在航空航天、船舶、军事及生物学等高性能和先进工程领域得到广泛应用^[1-4]。BT22 钛合金, 即中国牌号为 TC18 的钛合金, 由苏联于 20 世纪 60 年代开发, 其名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe^[5-6]。TC18 钛

合金作为一种近 β 型钛合金, 具备高强高韧、良好的淬透性和高退火强度等特点, 使其成为航空领域大型承力构件制造的优选材料之一^[5, 7, 18]。

随着航空工业的迅猛发展, 对于钛合金航空承力结构件的要求日益严格, 整体化、大型化的结构件成为其未来的发展趋势。这种整体成型的工件不仅

收稿日期: 2025-06-29

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3702603)

作者简介: 杨 草, 1993 年生, 硕士生。研究方向为钛合金锻造。Email: yangcao@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 唐 斌, 1984 年生, 博士, 教授。研究方向为航空航天用先进金属结构材料及其特种制造技术。Email: Toby@nwpu.edu.cn

引用格式: 杨草, 张林嘉, 赵彦妮, 唐斌. 高强钛合金大尺寸棒材芯表横纵组织与性能研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(9): 882-887.

YANG C, ZHANG L J, ZHAO Y N, TANG B. Study of the microstructure and mechanical properties of large-sized high-strength titanium alloy bars: Core and surface in the longitudinal and transverse directions[J]. Foundry Technology, 2025, 46(9): 882-887.

能有效简化生产制造流程,降低生产成本,且对于保证钛合金构件的结构完整性具有重要意义^[8-11]。在此背景下,大尺寸原始材料的制造和对其性能的精准把控面临着更高的要求。

目前,众多学者围绕 TC18 钛合金的锻造工艺、热变形参数及组织性能等方面进行了广泛研究。乔恩利等^[11]针对不同锻造工艺对 TC18 钛合金棒材组织和性能的影响展开了深入探讨;颜孟奇等^[12]研究了热变形参数对 $\phi 300$ mm 的 TC18 钛合金棒材组织及织构演变规律;熊智豪等^[13]则对胚料 $\phi 585$ mm TC18 钛合金棒材在不同火次锻造过程中 β 相织构的演变规律进行了分析。然而,大尺寸棒材在生产过程中普遍存在组织均匀性与力学性能稳定性难以精确控制的技术难题,且由于尺寸效应的存在, $\phi 300/585$ mm 棒材的研究成果无法通过简单外推直接应用于 $\phi 400$ mm 规格棒材的工艺优化。

为此,本文利用扫描电子显微镜观察 $\phi 400$ mm 大尺寸 TC18 钛合金棒材芯表横纵 4 个位置的显微组织,并对其拉伸性能进行测试,同时对断口及断口剖面进行表征分析。通过系统地研究 TC18 钛合金组织—性能—断口的匹配关系,旨在为优化大尺寸棒材 TC18 钛合金的组织 and 性能提供参考依据,以满足航空工业对大型化、高性能钛合金承力结构件的需求。

1 实验材料与方法

实验材料为锻造态棒材 TC18 钛合金,直径为 400 mm。棒材经熔炼和多火次锻造而成。TC18 钛合金化学成分如表 1 所示, β 转变温度 $T_{\beta}=(875\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 。通过线切割分别对棒材芯表位置的横纵方向取样(图 1),进行组织观察和拉伸性能测试。边缘试样的取样位置距离棒材的最外表面约 20 mm,芯部试样在以棒材几何中心为圆心,半径为 80 mm 的区域内取样。拉伸试验参照 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》在 MTS LAND MARK 万能试验机上进行,拉伸速率为 0.45 mm/min。后续对拉伸试样剖面进行显微组织观测。试样经砂纸打磨、抛光和腐蚀(腐蚀剂体积比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:3:6$),采用德国蔡司 ZEISS SURPA 40 型号场发射扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织、断口及其剖面观察。

表 1 TC18 钛合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of the TC18 titanium alloy (mass fraction/%)

Elements	Ti	Al	Mo	V	Cr	Fe
Content	Bal.	5.25	5.2	5.3	1.1	0.8

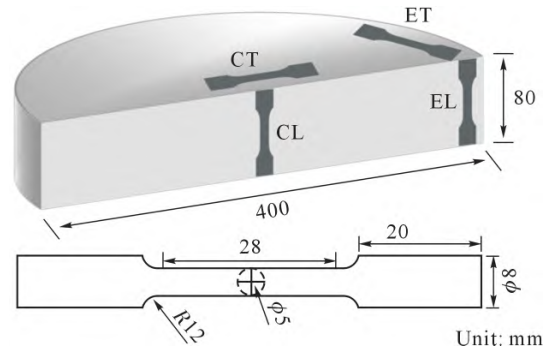


图 1 试样的取样位置及拉伸样尺寸

Fig.1 Sampling locations of the samples and schematic diagram of the tensile samples

2 实验结果与讨论

2.1 显微组织特点

图 2 显示了边横(ET)、边纵(EL)、中横(CT)和中纵(CL)4 种不同取样位置的 SEM 像。从图中可以看出,不同试样的显微组织十分接近,均由等轴状的初生 α 相、细小针状的次生 α 相及 β 基体组成。其中, α_p 和 α_s 相均匀分布在 β 基体中,从形貌图中观察到析出相没有明显的形貌和尺寸差异(图 2)。表 2 列出了各试样相应微观结构的定量特征。对于 α_p 相,相对于取向为横向的试样(ET,CT),取向为纵向(EL,CL)的试样中等轴 α_p 相含量的绝对体积分数均增加约 5%(达到 30% 的体积分数),直径相差不到 0.25 μm 。对于 α_s 相,芯部试样边缘长度和宽度较小,分别相差约 100 和 21 nm。此外,基体中的 $\alpha(\alpha_p, \alpha_s)$ 相呈均匀分布。

表 2 微结构定量尺寸参数

Tab.2 Quantitative parameters of the microstructure

Samples	Content of α_p /%	Average size of α_p / μm	Average length of α_s / μm	Average width of α_s /nm
ET	25.289	2.923	0.73	63.3
EL	29.674	2.826	0.78	71.8
CT	25.796	2.974	0.83	89.7
CL	30.168	2.736	0.87	88.8

2.2 拉伸性能

对 TC18 钛合金 4 种试样进行拉伸性能测试。合金拉伸试验的工程应力—应变曲线和相应的拉伸性能如图 3a~c 和表 3 所示。ET 试样显示出较高的强度(屈服强度为 1 142 MPa,抗拉强度为 1 230 MPa)和略低的塑性(伸长率为 10.2%,断面收缩率为 21.5%),这是因为其细小片层 α 相的强化作用^[14]。而 EL 试样强度和塑性分别为屈服强度 1 105 MPa,抗拉强度 1 191 MPa,伸长率 14.9%,断面收缩率 38.4%。可以看出边缘试样塑性 EL 比 ET 高(伸长率相差 4.7%),而 ET 比 EL 试样屈服强度约高 37 MPa。同样,CT 试样比

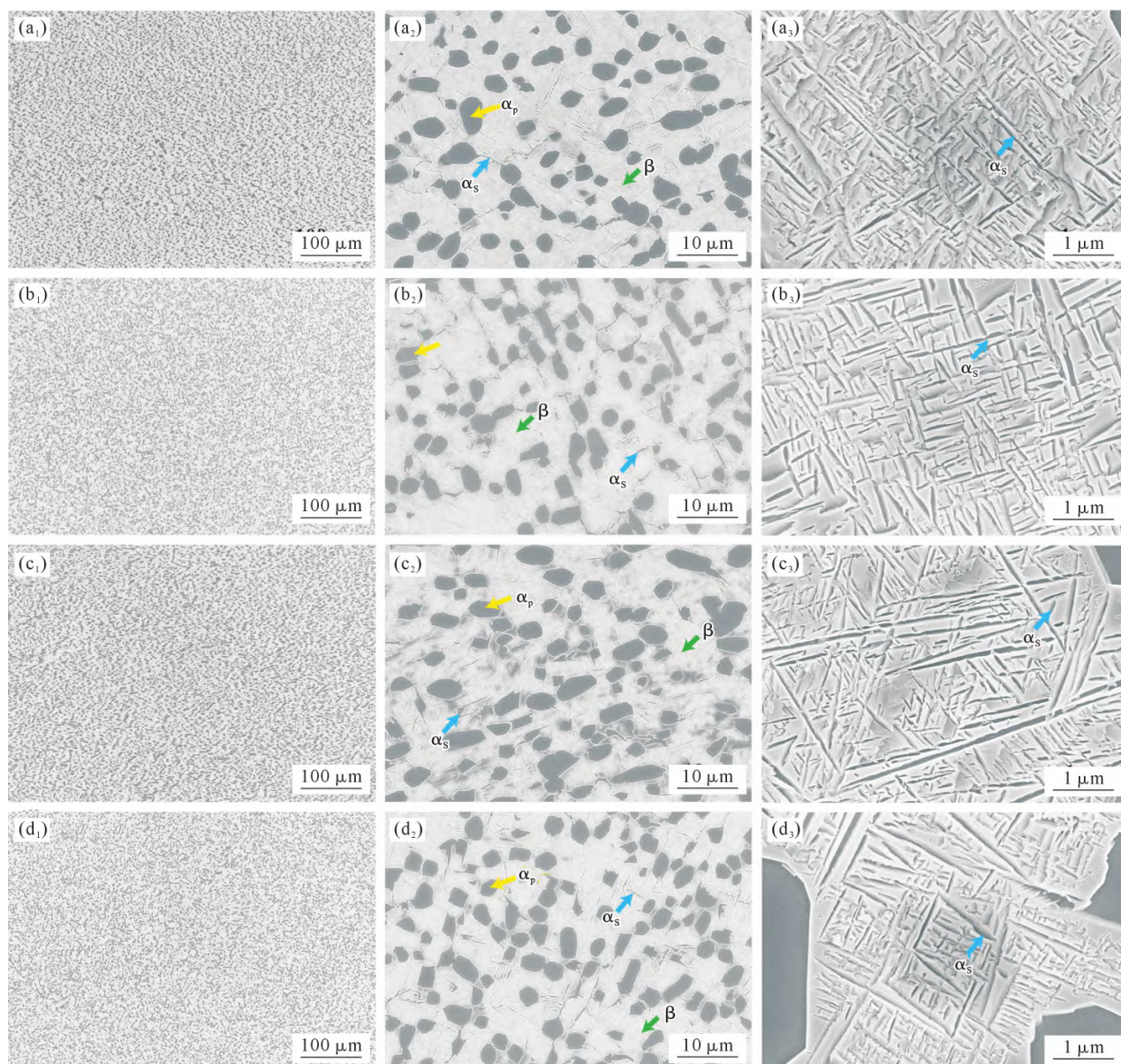
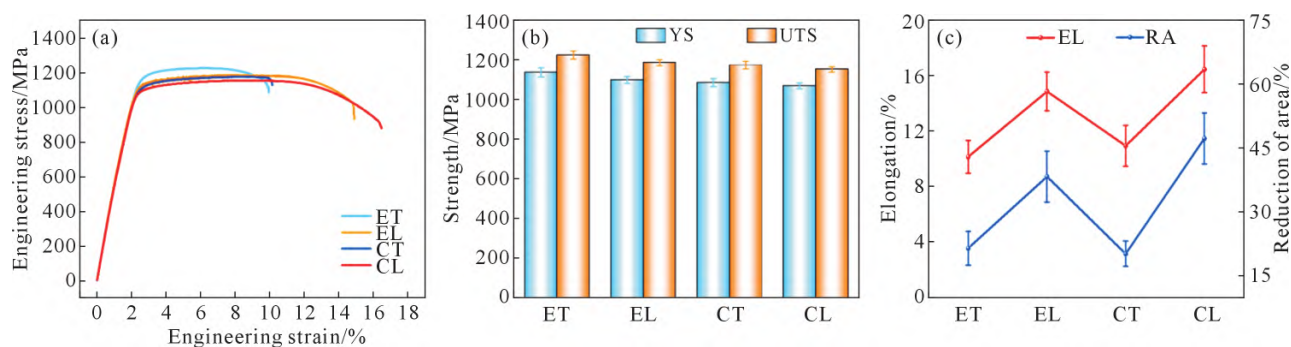
图2 TC18 钛合金各试样显微组织:(a₁~a₃) ET; (b₁~b₃) EL; (c₁~c₃) CT; (d₁~d₃) CLFig.2 Microstructure of the TC18 titanium alloy for different samples: (a₁~a₃) ET; (b₁~b₃) EL; (c₁~c₃) CT; (d₁~d₃) CL

图3 TC18 钛合金各试样的拉伸性能:(a) 工程应力-应变曲线;(b, c) 力学性能对比

Fig.3 Mechanical properties of TC18 titanium alloy for different samples: (a) engineering stress-strain curves, (b, c) comparison of mechanical properties

CL 试样屈服强度高约 15 MPa(CT 为 1 090 MPa, CL 为 1 075 MPa), 伸长率相差 6.3%(CT 为 10.2%, CL 为 16.5%)。值得注意的是, 边部试样的强度均比芯部试样高, 而纵向试样的塑性整体明显比横向试样

高, 可能归因于纵向试样等轴 α 相含量较高^[15]。

2.3 断口形貌

根据上述拉伸性能结果对 4 种试样断口形貌进行表征, 如图 4 所示。其中 a₁、b₁、c₁、d₁ 为断口低倍宏

表 3 不同位置 TC18 钛合金力学性能
Tab.3 Mechanical properties of the TC18 titanium alloy at different positions

	YS/MPa	UTS/MPa	EL/%	RA/%
ET	1 142±23	1 230±21	10.2±1.2	22±4
EL	1 105±17	1 191±15	14.9±1.4	38.4±6
CT	1 089±21	1 179±19	10.9±1.5	20.2±3
CL	1 075±15	1 159±13	16.5±1.7	47.4±6

观形貌, a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 为中心区域(黄框)高倍形貌, 可以看出 4 种试样断口均由大量韧窝组成, 为典型的韧性断裂。 a_3 、 b_3 、 c_3 、 d_3 为边缘区域(红框)高倍形貌。图 4 a_1 中 ET 试样断口呈现不规则形状, 存在明显的高低起伏区域。但其中心区域由大量韧窝组成, 如图 4 a_2 所示, 不规则的韧窝分布和应力集中形成的空洞是其塑性差的主要原因。CT 试样断口有大量

韧窝, 不均匀变形导致稀疏分布的空洞形成, 成为裂纹的萌生点, 如图 4 c_2 所示。由图 4 b_1 和 d_1 可知, 明显的颈缩和曲折的断口形貌证明 EL 和 CL 试样断裂前经历大量的塑性变形。结合高倍图 4 b_3 和 d_3 , 可以观察到 EL 和 CL 试样剪切唇区域剪切拉长的韧窝。图 4 b_2 和 d_2 表明, 与 ET 和 CT 试样不同的是 EL 和 CL 并没有明显成核质点, 仅由大量均匀分布的韧窝和其生长、合并的较大凹坑组成, 表明其良好的塑性表现归因于均匀变形。

2.4 剖面组织

如图 5 所示, 对强塑性相差较大的 CL 和 ET 试样进行剖面表征以进一步研究试样的断裂机制及组织对强塑性的影响规律。众所周知, 应变失配和应力集中是裂纹扩展的根源, 这是由于应变失配和应力

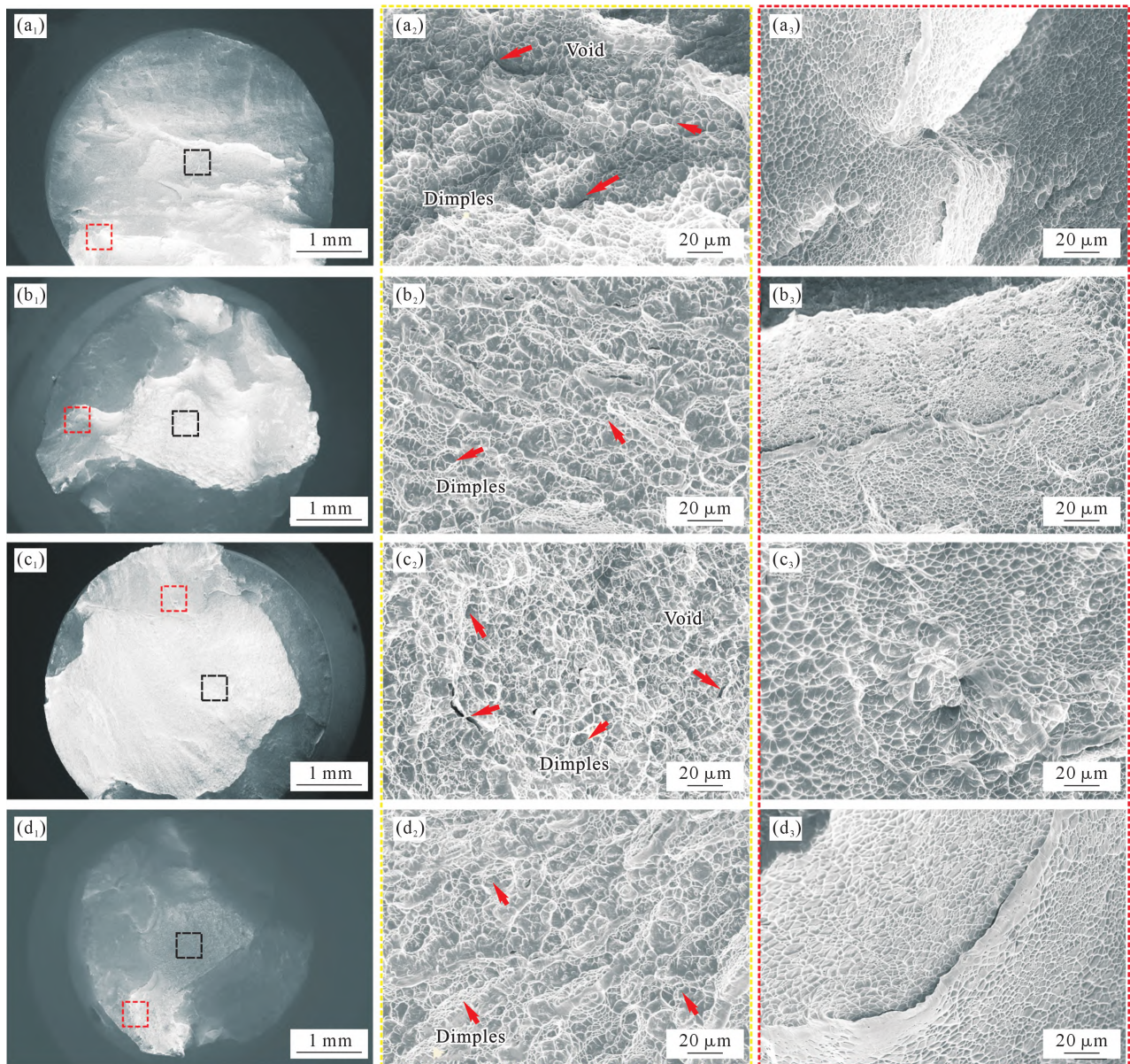


图 4 TC18 钛合金各试样的断口形貌: (a₁~a₃) ET; (b₁~b₃) EL; (c₁~c₃) CT; (d₁~d₃) CL
Fig.4 Fractography of TC18 titanium alloy for different samples: (a₁~a₃) ET; (b₁~b₃) EL; (c₁~c₃) CT; (d₁~d₃) CL

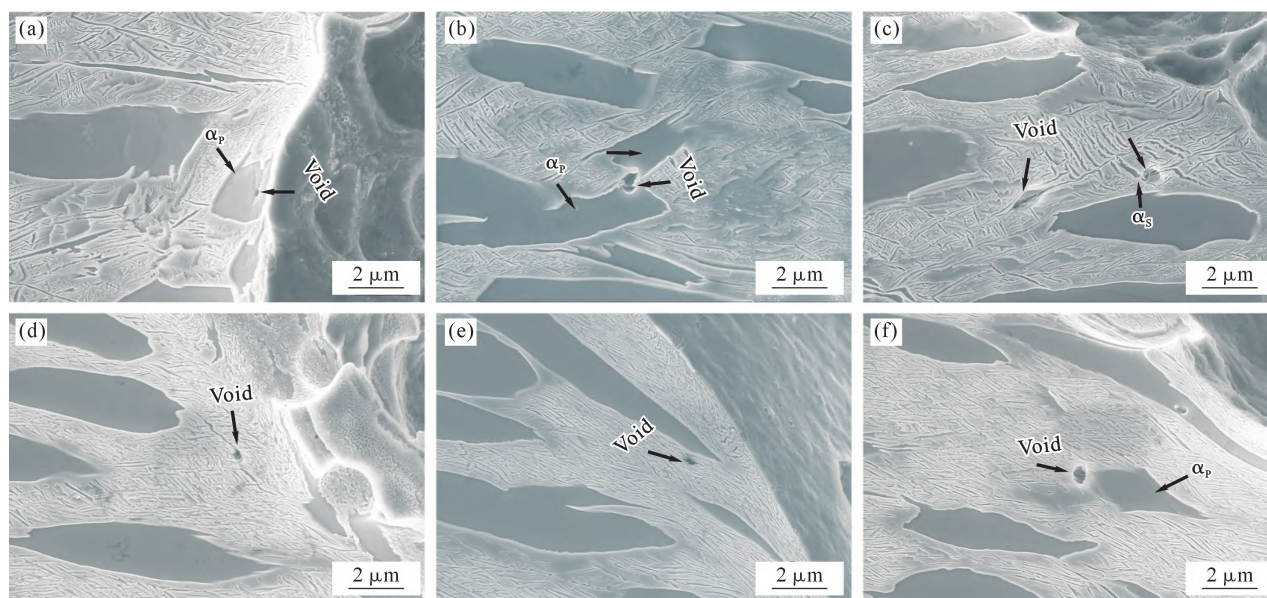


图5 CL和ET试样的断口剖面:(a~c) CL; (d~f) ET

Fig.5 Cross-sectional images of the fracture profiles of the CL and ET samples: (a~c) CL; (d~f) ET

集中会驱动空隙或微裂纹的形成。由图 5a~c 可知, CL 试样中空洞的形成主要有 3 种: ①等轴 α 相内部应力集中及载荷作用下滑移带相互交叉^[16,19-20]; ②在 α_p 相与 β 相界面处由于 α_p 相与 β 相硬度和变形优先级的差异导致大量位错塞积后应力集中^[17]; ③硬质 α_s 相会严重阻碍位错的运动进而导致位错塞积后应力集中^[16]。在变形过程中, 裂纹起源于空位并沿着空隙扩大最终导致拉伸过载发生断裂。与 CL 试样相比, ET 试样空洞的产生主要是第 2 和第 3 种方式, 如图 5d~f 所示。此外, TC18 钛合金中 α_p 相对应较高的塑性及疲劳性能, α_s 相一般为细小针状, 主要起到析出强化作用^[21-22]。结合表 2, CL 试样的 α_p 相体积分比 ET 试样高约 5%, 但 ET 试样的 α_s 相更为细小。所以, 细小硬质的 α_s 相和独特的空洞产生方式使 ET 试样具有更高的强度, 更高占比的等轴 α_p 相和综合的空洞产生方式使 CL 试样的强塑性获得优异的匹配。

3 结论

(1) 棒材不同位置试样由等轴 α_p 相、片层 α_s 和 β 相组成, 等轴 α_p 相和片层 α_s 尺寸均匀分布在 β 相中, 两相尺寸相差较小。

(2) 棒材边缘试样比芯部试样强度均较高, ET 试样强度最高(抗拉强度达到 230 MPa)。而纵向试样塑性均比横向试样高。其中 EL 试样的强塑性匹配最好(屈服强度 105 MPa, 抗拉强度为 191 MPa, 伸长率为 14.9%)。

(3) 所有试样的断口均由大量韧窝组成, 发生韧性断裂。应力集中导致部分成核质点和微裂纹的存

在造成横向试样塑性较差。发现了等轴 α_p 相、 α_p 相与 β 相界面处和 β 内部 3 种空洞的形核位点。

参考文献:

- [1] ZHAO Q Y, SUN Q Y, XIN S W, CHEN Y N, WU C, WANG H, XU J W, WAN M P, ZENG W D, ZHAO Y Q. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 845: 143260.
- [2] 王东, 张晓静, 戴泓源, 李永华, 常辉. 钛及钛合金表面处理技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(10): 924-934.
WANG D, ZHANG X J, DAI H Y, LI Y H, CHANG H. Research progress on surface treatment technologies of titanium and titanium alloys[J]. Materials China, 2024, 43(10): 924-934.
- [3] 狄玉丽, 黄海燕, 焦钰, 靳必强, 罗茜. 医用多孔钛及钛合金的表面改性研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 188-192.
DI Y L, HUANG H Y, JIAO Y, JIN B Q, LUO Q. Research progress on surface modification of medical porous titanium and titanium alloys[J]. Materials Protection, 2022, 55(10): 188-192.
- [4] 张文井, 丁梓, 王凯. 钛及钛合金剧烈塑性变形研究进展[J]. 钛工业进展, 2017, 34(3): 1-8.
ZHANG W J, DING H, WANG K. Progress in severe plastic deformation of titanium and titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2017, 34(3): 1-8.
- [5] 李瑞锋, 张智鑫, 唐斌, 何书林, 李金山. TC18 钛合金大规格棒材热变形行为研究进展[J]. 铸造技术, 2024, 45(4): 316-327.
LI R F, ZHANG Z X, TANG B, HE S L, LI J S. Research progress on the thermal deformation behavior of TC18 titanium alloy large-size bars[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 316-327.
- [6] 韩栋, 张鹏省, 毛小南, 卢亚锋, 奚正平, 杨建朝. BT22 钛合金及其大型锻件的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 46-50.
HAN D, ZHANG P S, MAO X N, LU Y F, XI Z P, YANG J C. Research progress of BT22 titanium alloy and its large forgings[J]. Materials Reports, 2010, 24(3): 46-50.

- [7] 尹卫东,尹慧,向伟,罗恒军,吕孝根,翟瑞志,徐邹圆. TC18 钛合金棒材的组织-服役性能一致性热处理[J]. 金属热处理, 2024, 49(9): 232-236.
- YIN W D, YIN H, XIANG W, LUO H J, LYU X G, ZHAI R Z, XU Z Y. Heat treatment with consistency of microstructure and serviceability for TC18 titanium alloy bar[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(9): 232-236.
- [8] 何忝铸,米磊,郭凯,和蓉. 航空钛合金锻造技术的研究进展[J]. 世界有色金属, 2021(9): 113-114.
- HE T Q, MI L, GUO K, HE R. Research progress of aviation titanium alloy forging technology[J]. World Nonferrous Metals, 2021(9): 113-114.
- [9] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- ZHU Z S. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.
- [10] 任晓龙,陈宇,张胜,杨晶,王涛,赵宁. 航空用超大规格 TC18 钛合金棒材的制备及组织性能研究[J]. 钛工业进展, 2024, 41(3): 14-18.
- REN X L, CHEN Y, ZHANG S, YANG J, WANG T, ZHAO N. Study on preparation, microstructure and mechanical properties of oversized TC18 titanium alloy bar for aviation[J]. Titanium Industry Progress, 2024, 41(3): 14-18.
- [11] 乔恩利,冯永琦,李渭清,谢仁沛,张少波,陈瑞菁. TC18 钛合金大规格棒材锻造工艺[J]. 金属世界, 2013(4): 54-55, 72.
- QIAO EN L, FENG Y Q, LI W Q, XIE E P, ZHANG S B, CHEN R J. Forging process for large size TC 18 titanium alloy bars[J]. Metal World, 2013(4): 54-55, 72.
- [12] 颜孟奇,陈立全,杨平,黄利军,佟健博,李焕峰,郭鹏达. 热变形参数对 TC18 钛合金 β 相组织及织构演变规律的影响[J]. 金属学报, 2021, 57(7): 880-890.
- YAN M Q, CHEN L Q, YANG P, HUANG L J, TONG J B, LI H F, GUO P D. Effect of hot deformation parameters on the evolution of microstructure and texture of β phase in TC18 titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(7): 880-890.
- [13] 熊智豪,李志尚,杨平,顾新福,颜孟奇,沙爱学. 大规格 TC18 钛合金棒材多火次锻造中 β 相织构演变规律[J]. 钛工业进展, 2021, 38(6): 6-11.
- XIONG Z H, LI Z S, YANG P, GU X F, YAN M Q, SHA A X. Evolution of β phase texture of large size TC18 titanium alloy bar during multi-pass forging[J]. Titanium Industry Progress, 2021, 38(6): 6-11.
- [14] ZHANG H Y, WANG C, ZHOU G, ZHANG S Q, CHEN L J. Dependence of strength and ductility on secondary α phase in a novel metastable- β titanium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 5257-5266.
- [15] ZHOU Y, WANG K, LI H H, WEN X, XIN R L. Effect of content and configuration of equiaxed α and lamellar α on deformation mechanism and tensile properties of a near- α titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 877: 145192.
- [16] GE J Y, SHI S X, ZHAN X D, SONG M, ZHANG X Y, ZHOU K C. Advancing fracture toughness in high-strength TC18 alloy by optimizing the forging process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 911: 146857.
- [17] LEI Z N, GAO P F, LI H W, CAI Y, ZHAN M. On the fracture behavior and toughness of TA15 titanium alloy with tri-modal microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 753: 238-246.
- [18] 陈立全,杨平,李志尚,顾新福,颜孟奇,沙爱学. TC18 钛合金棒材锻造织构的模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3600-3608.
- CHEN L Q, YANG P, LI Z S, GU X F, YAN M Q, SHA A X. Simulation of texture formation in hot forged TC18 titanium bars[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(10): 3600-3608.
- [19] GAO P F, LEI Z N, WANG X X, ZHAN M. Deformation in fatigue crack tip plastic zone and its role in crack propagation of titanium alloy with tri-modal microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 739: 198-202.
- [20] HE D, ZHU J C, ZAEFFERER S, RAABE D. Effect of retained beta layer on slip transmission in Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V near alpha titanium alloy during tensile deformation at room temperature[J]. Materials & Design, 2014, 56: 937-942.
- [21] 王媛,董健,王德琴. 热处理工艺对 TC18 合金锻件组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(8): 93-95.
- WANG Y, DONG J, WANG D Q. Effects of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of TC18 alloy forged piece[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 38(8): 93-95.
- [22] 邱保安,王晓晖,蒋晓虎. 固溶及时效温度对 TC18 组织性能的影响[J]. 电子机械工程, 2018, 34(1): 61-64.
- QIU B AN, WANG X H, JIANG X H. Effects of Solution and Aging Temperatures on Microstructure and Mechanical Properties of TC18[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2018, 34(1): 61-64.

(责任编辑:李亚敏)