# 航空用钛合金显微组织控制和力学性能关系

朱知寿, 商国强, 王新南, 祝力伟, 李 静 李明兵, 信云鹏, 刘格辰

(中国航发北京航空材料研究院 先进钛合金航空科技重点实验室,北京 100095)

摘要:钛合金由于具有多样性和复杂性的固态相变特征,其组织性能关系一直都是材料科学工作者研究的热点之 一。通过调整钛合金的成分配比、加工工艺以及热处理工艺参数,可以在一定范围内调整钛合金制件的组织类型 与组织参数,实现强度、塑性、韧性、疲劳和疲劳裂纹扩展速率等综合性能的最佳匹配。本文在对比钛合金材料的 等轴组织、双态组织、网篮组织和片层组织四种典型显微组织特征以及控制技术基础上,以航空用 TC21 钛合金、 TC4-DT 钛合金、TC32 钛合金以及 TB17 钛合金为例综述不同显微组织特征与拉伸性能、断裂韧度、疲劳裂纹扩展 速率的影响关系,为钛合金选择合适的组织参数、实现最佳的综合性能匹配和稳定批量生产提供参考依据。 关键词: 航空用钛合金; 等轴组织; 双态组织; 网篮组织; 片层组织; 力学性能 doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2020.000086

中图分类号: TG146.2 文献标识码:A 文章编号:1005-5053(2020)03-0001-10

钛合金材料由于具有高比强度、高比模量、高 韧性、耐蚀性好以及可焊接等优异的综合性能,在 航空航天、石油化工、汽车工业以及体育休闲用品 等领域获得了大量应用[1-4],但钛合金因其固态相变 的多样性与复杂性,一定程度上增加了工程应用的 稳定性控制难度。根据钛合金材料的成分、工艺、 组织和性能四要素的相互关系,成分决定合金类 型,工艺决定显微组织结构,而显微组织决定合金 综合性能。因此,通过调整钛合金成分配比、加工 工艺以及热处理制度,可以在一定范围内调整钛合 金制件的组织类型与组织参数,实现强度、塑性、 韧性和疲劳等力学性能的最佳匹配<sup>[5-9]</sup>,对钛合金材 料的组织类型与力学性能的关系研究具有重要的 实际意义。

本文分析钛合金材料的四种典型显微组织特 征以及控制技术,分别以 TC21 钛合金、TC4-DT 钛 合金、TC32 钛合金以及 TB17 钛合金为例探讨不 同显微组织特征与拉伸性能、断裂韧度、疲劳裂纹 扩展速率的对应关系,以期能够更好地掌握钛合金 显微组织特征与力学性能之间的关系,为实际生产

收稿日期: 2020-05-12;修订日期: 2020-05-22

稳定性控制提供参考。

钛合金显微组织分类及主要特征 1

钛合金按稳定相组成一般可以分为α钛合金、 α + β 钛合金和 β 钛合金, 其中 β 钛合金还可以按 Mo 当量不同进一步细分为近亚稳β 钛合金、亚稳  $\beta$  钛合金、稳定  $\beta$  钛合金,常用钛合金的典型显微 组织可以分为四种类型<sup>[10-12]</sup>:等轴组织、双态组织、 网篮组织和片层组织,如图1所示。

等轴组织主要特征是在转变β基体上均匀分 布着含量超过40%的等轴初生α相,等轴初生 α相主要有球形、椭圆形、橄榄形、棒槌形、短棒形 等多种形态(图1(a))。不同钛合金类型的等轴组 织因 Mo 当量不同在退火态时初生 α 相的含量与 分布也不同,例如,近 α型钛合金相比亚稳 β型钛 合金,等轴初生α相大小与数量较低。

双态组织主要特征是片状 β转变基体组织上 分布着不超过 50% 的等轴初生 α相, β转变组织中 的 α 相或次生 α 相的形态随合金类型的不同而有 所区别(图1(b))。不同钛合金类型的双态组织初 ± α相的含量与分布也不同,相对于近 α 型和 α + β 钛合金,亚稳 β 钛合金的初生  $\alpha$  相较为细小。

网篮组织主要特征是原始β晶粒边界被不同 程度地破碎、晶界α相不连续、晶内片状α相变短 变粗、在原始β晶粒轮廓内交错分布编织成网篮

通讯作者:朱知寿(1966—),男,博士,研究员,主要从事航 空钛合金及应用技术研究,联系地址:北京市 81 信箱 15 分 箱(100095), E-mail: zhuzzs@126.com。



- 图 1 常用钛合金的四种典型显微组织类型 (a)等轴组织,其中,al:近α钛合金典型组织类型,a2:α+β钛合金典型 组织类型,a3:亚稳β钛合金典型组织类型;(b)双态组织,其中,bl:近α钛合金典型组织类型,b2:α+β钛 合金典型组织类型,b3:亚稳β钛合金典型组织类型;(c)网篮组织,其中,cl:破碎晶界α相,c2:不连续晶界 α相,c3:大块α相;(d)片层组织,其中,dl:粗大转变α相,d2:典型转变α相,d3:细小转变α相
- Fig. 1 Four classic microstructure types for titanium alloys (a) equiaxed microstructure type, including three typical metallographic standard figures: al for near  $\alpha$  titanium alloys, a2 for  $\alpha + \beta$  titanium alloys, and a3 for metastable  $\beta$  titanium alloys; (b) bimodel microstructure type, including three typical metallographic standard figures: b1 for near  $\alpha$  titanium alloys, b2 for  $\alpha + \beta$  titanium alloys, and b3 for metastable  $\beta$  titanium alloys; (c) basketweave microstructure type, including three typical metallographic standard figures: c1 showing broken grain boundary  $\alpha$  phases, c2 showing discontinuous grain boundary  $\alpha$  phases, and c3 showing massive transformation  $\alpha$  phases; (d) lamellar microstructure type, including three typical metallographic standard figures: d1 showing thick lamellar  $\alpha$  phases, d2 showing typical lamellar  $\alpha$ phases, and d3 showing thin lamellar  $\alpha$  phases

状,属于变形后的β转变组织(图1(c))。不同钛 合金类型或不同β加工工艺形成的网篮组织形态 特征差异较大,一般有破碎晶界α相的、断续晶界 α相及晶内具有大块α相的网篮组织等形态特点。

片层组织主要特征是在粗大等轴的原始β晶 粒内,转变α相呈片状规则排列,一般原始β晶界 α相成清晰完整的连续网状(图1(d))。不同钛合 金类型或不同的β热处理工艺参数,会形成不同的 片层厚度,特别地,当β热处理冷却速率增大到一 定程度时,转变的片层α相成细小针状,这种片层 组织也称"魏氏组织",一般钛合金不希望出现这 种类型的片层组织。

### 2 钛合金显微组织控制技术及应用

### 2.1 等轴组织

图 2 为钛合金等轴组织的控制技术示意图。 当钛合金的主要变形加工与随后的热处理均在α+ β相区进行,且加热温度低于相变点较多时,一般 可获得等轴组织,常用的钛合金铸锭开坯到棒材或 锻坯半成品的锻造工艺路线主要有常规工艺和高 低高工艺。通过相变点以上三火次开坯锻造,将铸 锭粗大的晶粒充分破碎,随后在相变点以下(50± 20)℃的一个较宽的温度范围内反复墩拔变形,以 获得细晶化和均匀化的等轴组织。对于截面比较 大的大型锻坯,可采用高低高变形控制工艺,但应 避免大厚度坯料因较大变形时导致的心部过热问题。



- 图 2 钛合金等轴组织控制技术 (a)普通锻造加工工艺;(b)高低高锻造工艺;(c)晶粒细化示意图;(d)"β斑" 组织缺陷;(e)"细晶亮带"缺陷低倍组织;(f)正常区域组织;(g)"β斑"组织缺陷对疲劳寿命的影响; (h)"细晶亮带"缺陷显微组织;(i)"细晶亮带"缺陷对疲劳 S-N 曲线的影响
- Fig. 2 Controlling technology of equiaxed microstructures of titanium alloys (a) conventional forging processing; (b) high-low-high temperature (HLH) homogenization processing; (c) grain refining effect diagram; (d) microstructure of "β fleck" defect in titanium forgings; (e) fine-grained bright band (FGBB) defect found in titanium alloy forgings; (f) normal microstructure; (g) effect of β fleck on fatigue life; (h) microstructure features of FGBB; (i) effect of FGBB inhomogeneous defect on *S-N* fatigue curve.

等轴组织适用于棒材、板材、丝材以及管材等 半成品,需要控制铸锭熔炼成分均匀化、开坯锻造 均匀化、初生α相球化、冶金与变形缺陷等技术关 键,避免β斑(Cr、Fe、Mo等偏析)和低倍不均匀 (细晶亮带)组织缺陷的出现。如图2所示,当钛合 金中出现β斑时,其塑性和疲劳性能将会大幅度的 降低,而出现低倍组织不均匀时,其强度、塑性和疲 劳性能也会有一定程度的降低。

### 2.2 双态组织

钛合金双态组织的控制技术如图 3 所示。当 钛合金主要的锻造变形在两相区上部温度或在两 相区内完成、锻后热处理加热至两相区上部温度空 冷后一般可得到双态组织。钛合金铸锭开坯与半 成品常用的锻造工艺也有常规工艺和高低高工 艺。通过相变点以上三火次开坯锻造,将铸锭粗大 的晶粒充分破碎,为提高韧性和高温性能,在随后 α+β两相区反复墩拔变形时,加热温度尽量控制 在相变点以下的上部温度区间锻造(相变点以下 15~25 ℃),以获得细晶化和均匀化的双态组织。 对于截面比较大的大型锻坯,可采用高低高变形控 制工艺,也需要避免大厚度坯料因较大变形时而导 致的心部过热。

双态组织比等轴组织工艺控制难度较大,因此 适合于钛合金制件最终成品毛坯的组织状态,例 如,大部分的锻件、可直接使用的棒材/厚板等。双 态组织的控制温度是在一个较窄的温度区间范围 内,因此,最终性能对初生α相含量、形态及分布等 组织参数较为敏感,实际生产控制中,除了注意双 态组织的控制要点外,还需关注初生α相球化/细 化、晶界α相碎化、转变β等组织参数细节控制。

如图 3 所示, 双态组织的典型应用中, 主要有 对 TC11 钛合金的近β锻造"三态"组织控制<sup>[13-15]</sup> 和 TA15 钛合金厚板、锻件的双态组织控制<sup>[16-17]</sup>。 其中,"三态组织"也可以理解为一种考虑转变 β 相组织参数的双态组织。

#### 2.3 网篮组织

钛合金网篮组织的控制技术如图 4 所示,当钛 合金在( $\alpha$ + $\beta$ )/ $\beta$ 相变点附近变形,或在  $\beta$ 相区加热 和开始变形,在  $\alpha$ + $\beta$ 相区温度完成变形,并控制 在  $\alpha$ + $\beta$ 相区的总变形量时,可形成转变  $\alpha$ 相的网 篮编织结构,相对于等轴组织和双态组织的锻造技 术,网篮组织参数控制难度更大,为此,钛合金制件



- 图 3 钛合金双态组织控制技术 (a)普通锻造加工工艺; (b)高低高锻造工艺; (c)晶粒细化示意图; (d)两相区 锻造加热示意图; (e)TC11 钛合金近β 锻造显微组织; (f)TA15 厚板显微组织; (g)TA15 锻件显微组织
- Fig. 3 Controlling technology of bi-modal microstructures of titanium alloys (a) conventional forging processing; (b) high-low-high temperature (HLH) homogenization processing; (c) grain refining effect diagram; (d) α + β forging diagram for titanium alloys; (e) microstructure features of TC11 titanium alloy after near β forging processing; (f) microstructure features of TA15 titanium alloy plate after α + β forging processing; (g) microstructure features of TA15 titanium alloy forgings after α + β forging processing



图 4 网篮组织控制技术 (a)准β锻造工艺示意图; (b)~(e)四种典型的网篮组织形貌特征

Fig. 4 Controlling technology of basketweave microstructures of titanium alloys (a) quasi β forging diagram for titanium alloys; (b) - (e) four typical basketweave microstructures after quasi β forging processing

的锻造技术发展了有类似β锻造工艺、跨β锻造以 及准β锻造工艺等。

由于获得最佳强韧性匹配的工艺控制难度大, 网篮组织适合于较高强度合金最终产品的组织状态,如高强度或超高强度成品锻件毛坯。理想的网 篮组织是由细小的  $\beta$  晶粒 + 破碎的晶界  $\alpha$  相 + 编 织的  $\beta$ 转变组织组成。网篮组织的控制要点主要 为原始  $\beta$  晶粒细化、晶界  $\alpha$  相碎化、网篮组织参数 优化等。

#### 2.4 片层组织

钛合金片层组织的控制技术如图 5 所示。一

般情况下,当钛合金制件完成两相区锻造制坯后、 重新加热至β相区冷却时,可得到片层组织,采用 的锻后热处理方法主要有准β热处理和普通β热 处理。由于中等强度钛合金塑性余量比较大,允许 采用片层组织,在牺牲一定塑性的基础上,最大程 度地获得高的断裂韧度和最低的疲劳裂纹扩展速 率,适用于中高强度钛合金成品锻件或直接使用的 厚板等半成品。

片层组织的控制要点是通过两相区锻造细化 原始β晶粒、优化片层组织参数和组织均匀化控 制。通过控制冷却速率等手段,调整转变α相的



图 5 钛合金片层组织控制技术 (a)准β热处理工艺示意图; (b)TC4-DT 钛合金典型锻件片层组织特征 Fig. 5 Controlling technology of lamellar microstructures of titanium alloys (a) quasi β heat treatment processing diagram

Controlling technology of lamellar microstructures of titanium alloys (a) quasi  $\beta$  heat treatment processing diagram; (b) lamellar microstructure features of TC4-DT titanium alloy forgings after  $\beta$  heat treatment processing

片层厚度、原始β晶粒尺寸以及转变α相集束等 尺寸,从而获得最佳的强韧性匹配关系。如 图 5 所示, TC4-DT 钛合金通过准β热处理工艺, 成功解决了钛合金框梁类锻件晶粒粗大、片层组 织塑性偏低、复杂截面特大型锻件组织性能均匀 性差和普通β热处理在实际生产控制难等技术 难题。

## 3 航空用钛合金显微组织与力学性 能的关系

### 3.1 拉伸性能

图 6~图 8 分别为中强高韧 TC4-DT 钛合金<sup>[18-25]</sup>、 高强高韧 TC21 钛合金<sup>[26-33]</sup>、中高强韧 TC32 钛合



图 6 几种典型钛合金不同显微组织类型与室温力学性能的关系 (a)室温抗拉强度( $\sigma_b$ ); (b)室温屈服强度 ( $\sigma_{0,2}$ ); (c)伸长率(A); (d)室温断面收缩率(Z)

Fig. 6 Relationship of room temperature tensile properties with different type microstructures of several typical titanium alloys (a) tensile strength ( $\sigma_b$ ); (b) yield strength ( $\sigma_{0,2}$ ); (c) tensile elongation (A); (d) tensile reduction of area (Z)





图 7 几种常用飞机结构用钛合金不同显微组织类型与室温断裂韧度、疲劳性能的关系 (a)钛合金不同组织类型的室温断裂韧度(K<sub>IC</sub>); (b)不同合金室温轴向应力疲劳极限(σ<sub>D</sub>)

Fig. 7 Relationship of room temperature tensile properties with different type microstructures of several typical titanium alloys (a) room temperature fracture toughness ( $K_{IC}$ ) with different type microstructures; (b) room temperature axial stress fatigue limit strength ( $\sigma_D$ ) with different type microstructures



图 8 几种常用飞机结构用钛合金不同显微组织类型与室温疲劳裂纹扩展速率之间的关系 (a) TC4-DT 钛合金; (b) TC21 钛合金; (c) TC32 钛合金; (d) TB17 钛合金

Fig. 8 Fatigue crack growth rate of several typical titanium alloys with different microstructures at room temperature (a) TC4-DT alloy; (b) TC21 alloy; (c) TC32 alloy; (d) TB17 alloy

金<sup>[34-39]</sup>以及超高强韧 TB17 钛合金<sup>[40-42]</sup> 等几种常 用飞机结构用钛合金不同显微组织类型与室温力 学性能的关系。

可以看出, 钛合金双态组织抗拉强度最高、拉伸塑性最好, 例如, TC32和 TC4-DT 钛合金双态组织下的断面收缩率高达近 50%, 充分显示了双态组

织在静态拉伸性能方面的综合优势(图 6(d))。经 准β热处理后的片层组织,在拉伸性能满足使用要 求的前提下,大大提升了断裂韧度 K<sub>IC</sub> 值(图 7 (a))、降低疲劳裂纹扩展 da/dN值(图 8)。 TC21 钛合金双态组织虽然抗拉强度与塑性较好, 但经准β锻造获得网篮组织后,也同样可以实现最 高的 KIC 值和最低的 da/dN 值,确保飞机构件的损 伤容限设计需要。为了进一步提升损伤容限钛合 金的抗疲劳性能, TC32 钛合金分别获得双态组织、 网篮组织和片层组织状态下强度、塑韧性、疲劳等 最佳的综合匹配,采用 TC32 钛合金试制的大型梁 类锻件在 K<sub>t</sub>=3 时的缺口疲劳极限, 甚至可以与强 度达到 1350 MPa 级的超高强韧 TB17 钛合金中等 规格锻件相当,显示出该类型合金较强的综合强韧 性匹配能力(图7(b))。从图8所示的不同组织类 型对典型钛合金疲劳裂纹扩展速率影响关系进一 步可以看出,中高强度 TC4-DT 或 TC32 钛合金采 用片层组织时的 da/dN 值可达最低, 高强度的 TC21或TB17钛合金采用网篮组织时的 da/dN值 可达最低。这也说明,只要采用合适的组织参数控 制技术,不同类型的钛合金均可以获得合适的损伤 容限、抗疲劳和其他综合使用性能,更好地满足飞 机结构对长寿命、高减重和低成本的设计使用 要求。

### 4 结束语

(1)为了实现航空用钛合金制件批量稳定性, 组织稳定性是决定批产性能稳定性的核心。

(2) 钛合金显微组织类型可以分为等轴组织、 双态组织、网篮组织和片层组织四种组织类型, 通 过建立组织类型评级标准, 并在生产中采用合适可 固化的热加工工艺控制技术以便实现各种显微组 织的稳定化精确控制, 是实现批产稳定性的关键 技术。

(3)通过实验研究建立钛合金组织类型和组织 参数与强度、塑性、韧性、疲劳及疲劳裂纹扩展速 率等综合力学性能的最佳匹配关系,是实现稳定批 量生产的重要技术依据。

(4)针对类似 TC4-DT、TC21、TC32 和 TB17 等常用航空用高性能新型钛合金半成品和制件,采 用合适的组织参数控制技术,不同类型的钛合金均 可以获得合适的损伤容限、抗疲劳和其他使用性能 的综合匹配,以更好地满足飞机结构对长寿命、高 减重和低成本的设计使用要求。

### 参考文献:

- [1] BOYER R, BRIGGS R. The use of β titanium alloys in the aerospace industry [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681-685.
- [2] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用 [J]. 稀有金属

快报,2006(1):17-21.

( CAO C X. Applications of titanium alloys on large transporter[J]. Rare Metals Letters, 2006(1); 17-21.)

- [3] NYAKANA S, FANNING J, BOYER R. Quick reference guide for β titanium alloys in the 00s[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 799-811.
- [4]杨健. 钛合金在飞机上的应用 [J]. 航空制造技术, 2006(11):41-43.
  (YANG J. The application of titanium alloy in

aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(11):41-43.)

- [5] IVASISHIN O M, MARKOVSKY P E, MATVIYCHUK Y V, *et al.* A comparative study of the mechanical properties of high-strength β-titanium alloys[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2007, 14: 1-14.
- [6] SAUER C, LUETJERING G. Thermo-mechanical processing of high strength β-titanium alloys and effects on microstructure and properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117: 311-327.
- [7] FURUHARA T, MAKI T, MAKINO T, et al. Microstructure control by thermo mechanical processing in β-Ti-15-3 alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117: 318-323.
- [8] CLEMEN N, LENAIN A. Mechanical property optimization via microstructural control of new metastable beta titanium alloys[J]. Journal of Minerals, 2007, 59(1): 50-53.
- [9] WANG B, LIU Z Q, GAO Y, *et al.* Microstructural evolution during aging of Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy[J]. Journal of University of Science and Technology, 2007(14): 335-340.
- [10] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展
  [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
  (ZHU Z S. Research and development of new-brand titanium alloys of high performance for aeronautical application[M]. Beijing: Aviation industry press, 2013.)
- [11] 冯冉. 热处理对 Ti-Al-Sn-Zr-Ta 合金组织演变的影响
  [D]. 西安: 西北工业大学, 2008.
  (FENG R. Study of heat treatment on microstructure evolution of Ti-Al-Sn-Zr-Ta alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008.)
- [12] LINDEMAN J, WAGNER L. Microtextural effects on mechanical properties of duplex microstructures in(α + β) titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 263(2): 137-141.

- [13] ZHOU Y G, ZENG W D, YU H Q. An investigation of anew near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 393(1/2): 204-212.
- [14] 周义刚, 曾卫东, 俞汉清. 近β 锻造推翻陈旧理论发展
   了三态组织 [J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 61-66.

(ZHOU Y G, ZENG W D, YU H Q. The near forging overthrows the conventional forging theory and develops anew tri-modal microstructure[J]. Engineering Science, 2001, 3(5): 61-66.)

[15] 杨合, 孙志超, 樊晓光, 等. 钛合金大型复杂构件等温局部加载近β锻造组织控制研究进展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 72-82.

(YANG H, SUN Z C, FAN X G, *et al.* Advances in microstructure control during isothermal forming of Tialloy large complex components by near- $\beta$  local forging[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4); 72-82.)

 [16]马超,孙志超,韩飞孝,等. TA15 钛合金近β变形三态 组织中片状α演化规律[J].稀有金属材料与工程, 2015,44(7):1661-166.

(MA C, SUN Z C, HAN F X, *et al.* Evolution mechanism of lamellar  $\alpha$  in Tri-modal microstructure of TA15 Ti-alloy during near  $\beta$  deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(7): 1661-166.)

- [17] JI Z, YANG H, LI H W. Evolution of two types of α plates in Tri-modal microstructure of TA15 alloy under varying processing conditions[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(3): 527-531.
- [18] 朱知寿, 马少俊, 王新南, 等. TC4-DT 损伤容限型钛合 金疲劳裂纹扩展特性的研究 [J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 10-13.

(ZHU Z S, MA S J, WANG X N, *et al.* Study on fatigue crack propagation rate of TC4-DT damage tolerance titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(6): 10-13.)

[19] 郭萍,赵永庆,洪权,等.损伤容限型 TC4-DT 钛合金性 能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2367-2370.

(GUO P, ZHAO Y Q, HONG Q, *et al.* Properties of damage tolerance TC4-DT titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2367-2370.)

[20] ZHU L W, ZHU Z S, WANG X N, et al. Influence of lamellar microstructure on fatigue crack propagation behavior of TC4-DT of damage tolerance[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(Suppl1): 164-167. [21] 刘小刚,朱笑林,郭海丁.TC4-DT 焊接接头 I-II 复合型 疲劳裂纹扩展实验及模拟研究 [J]. 航空材料学报, 2020,40(2):661-669.

(LIU X G, ZHU X L, GUO H D. Experimental and simulation study on I-II mixed-mode fatigue crack growth of TC4-DT welded joint[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 661-669.)

- [22] LIU J L, ZENG W D, SHU Y, et al. Hot working parameters optimization of TC4-DT titanium alloy based on processing maps considering true strain[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(7): 1647-1653.
- [23] 刘诚, 董洪波. TC4-DT 钛合金β 锻动态再结晶元胞自动机模拟 [J]. 航空材料学报, 2015, 35(2): 21-27.
  (LIU C, DONG H B. Cellular automaton simulation of dynamic recrystallization for TC4- DT titanium alloy in β hot process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(2): 21-27.)
- [24] PENG X N, GUO H Z, SHI Z F, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermo mechanical treatment[J]. Trans. Nonferrous Met Soc China, 2014, 24: 682-689.
- [25] PENG X N, GUO H Z, WAND T, et al. Effects of β treatments on microstructures and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 533: 55-63.
- [26] 杨春林, 张松, 欧梅桂. 退火工艺对热变形 TC21 合金 组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 133-139.

(YANG C L, ZANG S, OU M G. Effect of annealing on microstructure and properties of hot deformed TC21 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(3): 133-139.)

- [27] LI Y F, ZENG X G. Dynamic Tensile behavior and constitutive modeling of TC21 titanium alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Mater Sci Ed), 2019, 34(3): 707-716.
- [28] SHI Z F, GUO H Z, ZHANG J W, et al. Microstructure-fracture toughness relationships and toughening mechanism of TC21 titanium alloy with lamellar microstructure[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2018, 28: 2440-2448.
- [29] HOU Z M, ZHAO Y Q, ZENG W D. Effect of heat treatment on the microstructure development of TC21 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(8): 2087-2091.
- [ 30 ] SHI Z F, GUO H Z, HAN J Y, et al. Microstructure and

mechanical properties of TC21 titanium alloy after heat treatment[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013, 23(10): 2882.

- [31] ZHAO Y L, LI B L, ZHU Z S, et al. The high temperature deformation behavior and microstructure of TC21 titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(21/22): 5360.
- [ 32 ] GUO L F, LI B C, ZHANG Z M. Constitutive relationship model of TC21 alloy based on artificial neural network[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013, 23(6): 1761.
- [33] 朱知寿, 王新南, 商国强, 等. 新型高性能钛合金研究与应用 [J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 7-12.
  (ZHU Z S, WANG X N, SHANG G Q, *et al.* Research and application of new type of high performance titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016,
- 36(3): 7-12.)
  [34] 朱知寿, 商国强, 王新南, 等. 低成本高性能钛合金研究 进展 [J]. 钛工业进展, 2012, 29(16): 1-5.
  (ZHU Z S, SHANG G Q, WANG X N, *et al.* Research and development of low cost and high performance titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(16): 1-5.)
- [35] 商国强, 王新南, 费跃, 等. 新型低成本钛合金高周疲劳 性能和断裂韧度 [J]. 失效分析与预防, 2013, 8(2): 74-78.

(SHANG G Q, WANG X N, FEI Y, *et al.* High-cycle fatigue properties and fracture toughness of new low cost titanium alloy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(2): 74-78.)

[36] 王新南, 费跃, 刘洲, 等. 航空用新型低成本钛合金显微 组织与损伤容限性能关系研究 [J]. 钛工业进展, 2013, 30(2): 7-10.

(WANG X N, FEI Y, LIU Z, *et al.* Research of the relationship between microstructure and damage-tolerance property of new low cost titanium alloy in aviation applications[J]. Titanium Industry Progress, 2013, 30(2): 7-10.)

[37]费跃,朱知寿,王新南,等. 锻造工艺对新型低成本钛合 金组织和性能影响[J]. 稀有金属, 2013, 37(2):186-191.

(FEI Y, ZHU Z S, WANG X N, *et al.* Influence of forging process on microstructure and mechanical properties of a new low-cost titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(2): 186-191.)

- [ 38 ] SHANG G Q, WANG X N, FEI Y, e t, a l. Experimental study of heat treatment processing to a new low cost titanium alloy used in aviation field[J]. Material Science Forum, 2013(747/748): 919-925.
- [39] 李明兵,朱知寿,王新南,等.显微组织对 TC32 钛合金 高周疲劳性能的影响关系研究 [J].中国有色金属学 报,2016,26(9):1886-1892.
  (LI M B, ZHU Z S, WANG X N, *et al.* Influence of microstructure on high cycle fatigue properties of TC32 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(9):1886-1892.)
- [40] 王哲, 王新南, 祝力伟, 等. TB17 钛合金等温时效析出 行为 [J]. 航空材料学报, 2016, 36(5): 1-6.
  (WANG Z, WANG X N, ZHU L W, *et al.* Isothermal aging precipitate of TB17 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(5): 1-6.)
- [41] 刘洪骁, 董洪波, 王喆鑫, 等. TB17 钛合金室温变形及
   时效析出行为 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10):
   2306-2311.

(LIU H X, DONG H B, WANG Z X, *et al.* Room temperature deformation and aging precipitation behavior of TB17 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2306-2311.)

[42] 刘洪骁, 董洪波, 朱知寿, 等. 低温时效及冷/温变形工 艺对 TB17 钛合金组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2019, 40(6): 69-74.
(LIU H X, DONG H B, ZHU Z S, *et al.* Effect of lowtemperature aging and cold/warm deformation on microstructure of TB17 titanium alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(6): 69-74.)

# Microstructure controlling technology and mechanical properties relationship of titanium alloys for aviation applications

ZHU Zhishou, SHANG Guoqiang, WANG Xinnan, ZHU Liwei, LI Jing, LI Mingbing, XIN Yunpeng, LIU Gechen

(Key Laboratory of Advanced Titanium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Because of the variety and complexity of solid-state phase transformation characteristics of titanium alloys, the relationship between their microstructure and performance has always been one of the hot topics in the field of titanium alloy materials science. By adjusting the composition, processing technology and heat treatment process parameters of titanium alloys, the microstructure type and parameters of titanium alloy parts can be adjusted to a certain extent to achieve the best matches in strength, plasticity, toughness, fatigue and fatigue crack propagation rate, etc. In this paper, based on the comparison of four typical microstructure characteristics including equiaxed microstructure, bimodal microstructure, lamellar microstructure, basket weave microstructure and their thermo-mechanical controlling technologies, taking the TC21 titanium alloy, TC4-DT titanium alloy, TC32 titanium alloy and TB17 titanium alloy for aviation use as examples to review the properties of strength, plasticity, fracture toughness, fatigue life and fatigue crack propagation rate, which can provide a reference basis for reasonably choosing microstructure parameters, optimizing properties, stabilizing mass production quality of titanium alloy products.

Key words: titanium alloy; equiaxed microstructure; bimodal microstructure; lamellar microstructure; basketweave microstructure; mechanical property

(责任编辑:徐永祥)