

固溶温度对 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织及性能的影响

冉兴^{1,2}, 王哲³, 李海宾⁴, 吕志刚¹, 李培杰^{1*}

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 2. 中航重机股份有限公司, 贵州 贵阳 550005; 3. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 陕西 咸阳 713801; 4. 中航天地激光科技有限公司, 北京 102209)

摘要: 采用扫描电镜 (SEM) 和金相显微镜 (OM) 研究了固溶热处理对 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织的演变规律, 以及显微组织对力学性能的影响关系, 结果表明: 随着固溶温度的升高, Ti6Al4V ELI 钛合金初生 α_p 相含量降低, 片层 α 相厚度和 β 晶粒尺寸均增加; 钛合金强度和塑性均随着固溶温度的升高而降低, 在 952 °C 固溶后时效, 抗拉强度可达 915 MPa, 延伸率 16.8%, 断裂韧性仅为 84 MPa·m^{1/2}; 在 997 °C 进行固溶后时效, 钛合金抗拉强度降低至 861 MPa, 延伸率 9.6%, 断裂韧性达 115 MPa·m^{1/2}。在 952 °C 进行固溶, Ti6Al4V ELI 钛合金为韧性断裂, 提高固溶温度后合金呈韧脆混合型断裂。

关键词: Ti6Al4V ELI 钛合金; 固溶温度; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG156.94 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)06-0066-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.008

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者
聊科研

Influence of solution treatment on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V ELI titanium alloy

Ran Xing^{1,2}, Wang Zhe³, Li Haibin⁴, Lv Zhigang¹, Li Peijie^{1*}

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, Guizhou, China; 3. Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xianyang 713801, Shaanxi, China; 4. AVIC Tiandi Laser Technology Co., Ltd, Beijing 102209, China)

Abstract: The scanning electron microscope (SEM) and optical microscope (OM) were employed to investigate the influence of solution treatment on microstructure evolution of Ti6Al4V ELI titanium alloy, and the relationship between microstructure and mechanical properties were discussed. The results show that the content of the primary α_p phase of Ti6Al4V ELI titanium alloy decreases, and the thickness of lamellar α phase and β grain size increase with the increase of solution treatment temperature. The strength and plasticity of Ti6Al4V ELI titanium alloy decrease with the increase of solution temperature. When the solution treatment is 952 °C, the tensile strength, elongation and fracture toughness values of Ti6Al4V ELI titanium alloy are 915 MPa, 16.8% and 84 MPa·m^{1/2}, respectively. At the solution treatment up to 997 °C, the tensile strength and elongation values decrease to 861 MPa and 9.4%, respectively, but the fracture toughness increases to 115 MPa·m^{1/2}. It shows a ductile fracture with solution treatment at 952 °C while ductile-brittle mixed fracture as the temperature increases.

Key words: Ti6Al4V ELI titanium alloy, solution temperature, microstructure, mechanical properties

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家两机重大专项基础研究 (J2019-VII-002)。

作者简介: 冉兴 (1968—), 男, 贵州松桃人, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向: 熔模精密铸造, E-mail: 2560680637@qq.com, 电话: 0851-32208022; * 通讯作者: 李培杰, 博士, 教授, 主要研究方向: 轻合金材料成型, E-mail: lipj@mail.tsinghua.edu.cn。

0 引言

钛合金以其高比强度、良好的耐热耐蚀性能以及生物兼容性等优点广泛应用于航空、航天、兵器、船舶、医疗等领域^[1-2], Ti6Al4V 是目前应用最广泛的钛合金, 占钛材使用量 60% 以上^[3]。随着现代飞机设计思想由断裂力学向损伤容限理念的发展, 材料的断裂韧性逐渐成为考核材料能否满足结构设计的重要性能指标, 相应选材判据也发生变化, 促进了高损伤容限型钛合金的研制与应用^[4-5]。如国外的 Ti62222S、Ti6Al4V ELI, 国内的 TC21、TC4-DT 钛合金等^[6-7]。

Ti6Al4V ELI 钛合金 (国内牌号 TC4-DT) 是 Ti6Al4V 钛合金结合纯净化技术而研制的一种中强度损伤容限型钛合金, 能够满足新一代飞机长寿命、高可靠性等现代飞机设计需求, 有望成为下一代飞机用大型整体框、梁等关键主承力结构用钛合金材料^[8-9]。科研人员对该材料进行了深入研究, 刘金豪对 TC4-DT 钛合金热变形行为进行了研究并计算了该材料的热变形激活能^[10]。雷文光研究了退火与固溶时效热处理工艺对 TC4-DT 钛合金棒材 α 相尺寸与力学性能的影响关系, 认为普通退火 α 相尺寸增加, 塑性较好, 固溶时效热处理有利于提升合金的强度与韧性^[11]。祝力伟研究了固溶冷却速率对 TC4-DT 钛合金组织及性能的影响, 认为随着固溶冷却

速率降低片层 α 相厚度增加, 在 β 相区水冷后形成马氏体组织^[12]。李静对 TC4-DT 裂纹扩展行为进行了研究, 表明随着固溶温度的提高, 裂纹扩展转折点 ΔK_I 由 17.5 MPa·m^{1/2} 提高至 20.5 MPa·m^{1/2}, 裂纹扩展速率降低^[13]。

综上所述, 国内外对 Ti6Al4V ELI 钛合金的研究主要集中在热变形行为以及固溶冷却方式对其组织与力学性能的影响, 而对固溶温度对其显微组织演变规律的研究较少。笔者分别采用 $(\alpha+\beta)$ 及 β 相区对 Ti6Al4V ELI 钛合金进行固溶热处理, 系统地研究了固溶温度对 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织及力学性能的影响关系, 为该合金获得最佳的强度-塑性-韧性匹配提供理论依据。

1 试验材料及方法

试验采用国外某公司经三次真空自耗电弧熔炼的 Ti6Al4V ELI 钛合金铸锭, 铸锭经扒皮、去冒口后在 β 相区开坯和 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造成 $\varnothing 240$ mm 规格棒材, 化学成分见表 1。图 1 为 Ti6Al4V ELI 钛合金棒材显微组织, 可以看出, 球状初生 $\alpha(\alpha_p)$ 相均匀分布于 β 相基体上, 初生 α_p 相含量约 55%。采用淬火金相法测得该炉批次 Ti6Al4V ELI 钛合金 $(\alpha+\beta) \rightarrow \beta$ 相转变温度为 982 $^{\circ}\text{C}$, 棒材经 940 $^{\circ}\text{C}$ 锻造成规格为 140 mm (宽) $\times$ 150 mm (厚) $\times$ L mm (长) 的锻件。

表 1 Ti6Al4V ELI 钛合金棒材化学成分
Table 1 Chemical compositions of Ti6Al4V ELI alloy %

合金	Ti	Al	V	Fe	C	H	O	N
棒材	Bal.	6.21	4.25	0.06	0.009	0.001	0.09	0.006
Ti6Al4V ELI	Bal.	5.6~6.3	3.6~4.4	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.125	≤ 0.13	≤ 0.03

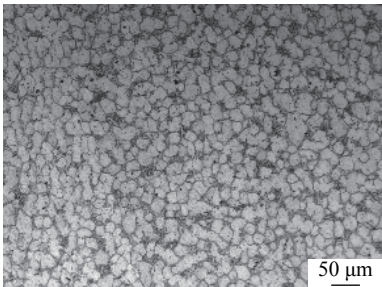


图 1 Ti6Al4V ELI 钛合金棒材显微组织

Fig. 1 Microstructure of the Ti6Al4 V ELI titanium alloy

本试验采用箱式电阻炉 (控温精度 ± 3 $^{\circ}\text{C}$) 对 Ti6Al4V ELI 钛合金进行热处理, 热处理制度如下:
试样 I 952 $^{\circ}\text{C}/2$ h, AC+730 $^{\circ}\text{C}/4$ h, AC(空冷)

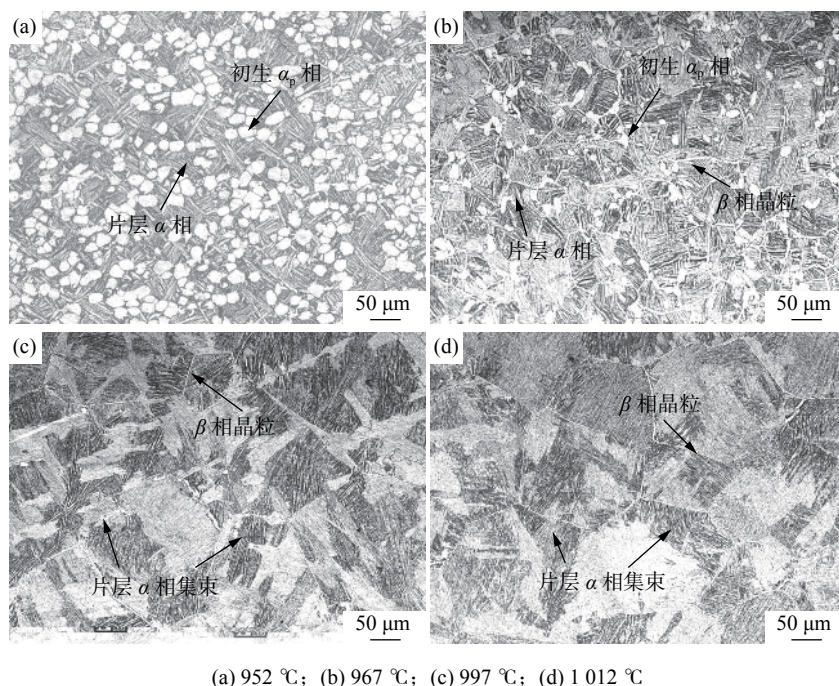
试样 II 967 $^{\circ}\text{C}/2$ h, AC+730 $^{\circ}\text{C}/4$ h, AC(空冷)
试样 III 997 $^{\circ}\text{C}/2$ h, AC+730 $^{\circ}\text{C}/4$ h, AC(空冷)
试样 IV 1 012 $^{\circ}\text{C}/2$ h, AC+730 $^{\circ}\text{C}/4$ h, AC(空冷)
室温拉伸试样采用 $\varnothing 13$ mm $\times$ 71 mm 标准拉伸试样, 在 Instron 万能试验机上进行拉伸性能检测, 平面应变断裂韧性试验在 MTS 疲劳试验机上进行。金相试样经去除氧化层、预磨、抛光后, 采用 $V(\text{HF}) : V(\text{HNO}_3) : V(\text{H}_2\text{O}) = 1 : 2 : 7$ 的 Kroll's 腐蚀液进行侵蚀。金相显微组织和拉伸试样断口分析分别采用 Leica DMI 3000M 金相显微镜和 Tecnai G2 F30 S 扫描电镜进行, 采用截线法计算平均片层 α 相厚度及 β 晶粒尺寸, 每个测量样本不少于 10 个。

2 结果与讨论

2.1 固溶温度对 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织的影响

图2为 Ti6Al4V ELI 钛合金经不同固溶温度+时效后显微组织, Ti6Al4V ELI 钛合金在 (α + β) 相区固溶, 显微组织为典型双态组织, 由球状初生 α_p 相、

片层状次生 α 相和 β 相基体组成。固溶温度对 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织形貌的影响主要在于初生 α_p 相含量、片层 α 相厚度以及 β 晶粒尺寸, 由图2a可知, 在 952 °C 进行固溶, 显微组织中还存在少量棒状 α 相, 次生 α 相呈针状且无明显 β 晶粒。随着固溶温度升高至 967 °C (图2b), 次生 α 相呈片状分布, 且出现明显 β 晶粒。



(a) 952 °C; (b) 967 °C; (c) 997 °C; (d) 1012 °C

图2 不同固溶温度条件下 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织

Fig. 2 Microstructure of Ti6Al4V ELI titanium alloy at various solution treatment temperatures

由图2c、d可知, Ti6Al4V ELI 钛合金在 β 相区固溶, 显微组织为典型魏氏组织, 由片层 α 相以及 β 相基体组成, β 相晶粒内部形成不同位相的片层 α 相构成的集束, 固溶温度对其显微组织的影响主要为 α 相集束和 β 晶粒尺寸。

表2为不同固溶温度条件下 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织参数, 由表2可知, 在相变温度以下进行固溶, 随着固溶温度的升高, 初生 α_p 相由 30% 降低到 10%, 而超过相变温度固溶, 球状初生 α_p 相完全消失, 其主要原因在于初生 α_p 相仅与材料成分及固溶温度有关, 随着固溶温度升高, 球状初生 α_p 相发生相变过程, 超过相变温度固溶, 初生 α_p 相完全转变为 β 相, 并在冷却过程中析出片层状次生 α 相^[14-15]。

在 (α + β) 相区进行固溶热处理, 锻态中的部分初生 α_p 相保留, 固溶冷却过程中亚稳 β 相分解, 片层 α 相从过饱和 β 相中析出, 在较低温度条件下固溶 (952 °C), 基体中保留了大量初生 α_p 相, 由于 α 相稳定元素主要在 α 相中富集, 大量 β 稳定元素残留

在 β 相基体中, 析出的次生 α 相呈针状, 平均片层 α 相厚度仅为 2.8 μm 。随着固溶温度的升高至 967 °C, 短棒状 α 相完全溶解在 β 相基体中, 并且初生 α_p 相含量降低, 大量 α 相稳定元素溶入 β 相基体中, 在固溶冷却过程中析出, 片层 α 相厚度增加至 4.8 μm 。随着固溶温度上升至 997 °C, Ti6Al4V ELI 钛合金发生静态再结晶现象, 形成完整的 β 相晶粒, 其平均尺寸约 75 μm 。

表2 不同固溶温度条件下 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织参数

Table 2 Microstructure parameters of Ti6Al4V ELI titanium alloy at various solution treatment temperatures

编号	初生 α_p 相含量/%	片层 α 相平均尺寸/ μm	β 相晶粒平均尺寸/ μm
I	30	2.8	
II	10	4.8	75
III		5.5	138
IV		5.7	215

在 β 相区进行固溶热处理, 初生 α_p 相完全消失, 初生 α_p 相对原始 β 晶粒的钉扎作用消失, 并且随着固溶温度的升高, 原子平均动能增加, 更多的晶界原子越过能垒进行扩散, 晶粒长大动力学增加, 晶粒长大速率增加^[16]。随着固溶温度由 997 °C 上升到 1 012 °C, β 相晶粒平均尺寸由 138 μm 迅速长大至 215 μm 。

片层 α 相的析出是形核-长大的过程, 在 997 °C 加热, β 晶粒中存在大量片层 α 相析出的形核点, 形成大量片层 α 相集束, 并在冷却中形成的较为细小的片状 α 相, 而当温度升高到 1 012 °C, 原子扩散速度加快, 片层 α 相形核和长大速率均增加, 大量同一位相的 α 相集束同时长大, 形成较宽的片层 α 相集束^[17]。

2.2 固溶温度对 Ti6Al4V ELI 钛合金力学性能的影响

表 3 为不同固溶温度热处理条件下 Ti6Al4V ELI 钛合金力学性能, 可以得出, 随着固溶温度由 952 °C 增加到 1 012 °C, Ti6Al4V ELI 钛合金抗拉强度由 915 MPa 降低至 843 MPa, 其屈服强度也具有相似趋势。钛合金在塑性变形过程中, 大量位错在析出相附近塞积, 片层 α 相对位错的滑移具有阻碍作用, 导致位错在运动过程中阻力增加增加^[18]。根据表 3 可知, 随着固溶温度的升高, 片层 α 相尺寸增加, 而片层 α 相作为 Ti6Al4V ELI 钛合金的析出强化相, 细小弥散分布的片层 α 相有利于合金强度的提升^[19]。

表 3 Ti6Al4 V ELI 钛合金在不同热处理制度下的室温力学性能
Table 3 Tensile and fracture toughness of Ti6Al4V ELI titanium alloy at various solution treatments

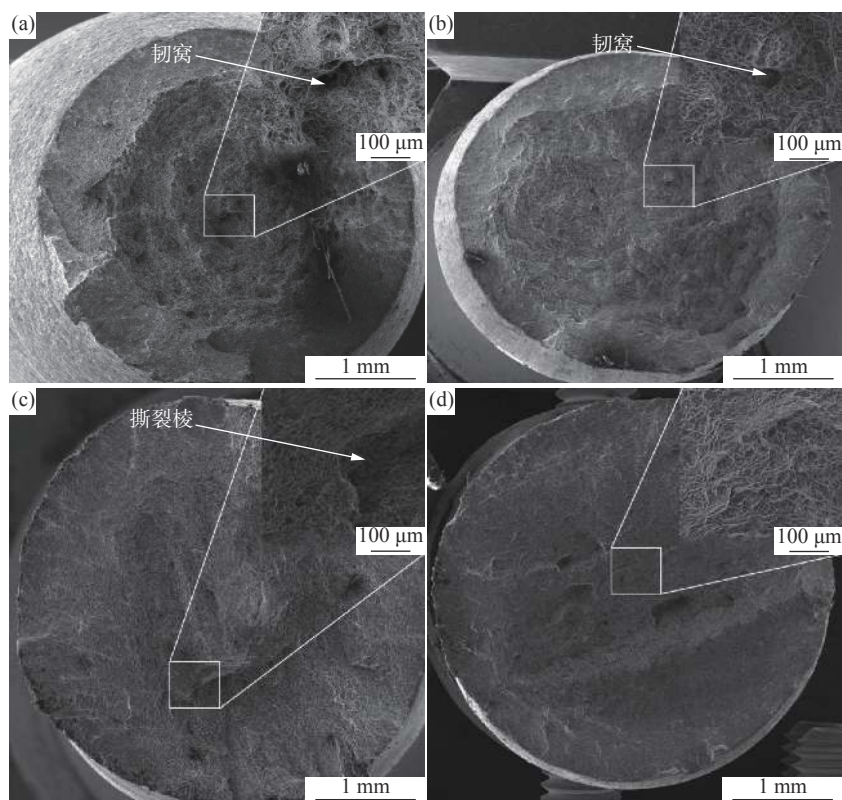
编号	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
I	915	846	16.8	45	84
II	875	801	11.2	26	91
III	861	792	9.6	19	115
IV	843	775	8.2	16	103

随着固溶温度的升高, Ti6Al4V ELI 钛合金断裂韧性在 997 °C 达到最大值 (115 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), 继续升高固溶温度断裂韧性降低。其主要原因在于钛合金的断裂韧性影响因素主要为 α 相形态及含量, 其直接影响了裂纹扩展路径的曲折程度。由于 α/β 相界面结合能较弱, 裂纹通常优先沿 α/β 相界面形成和扩展, 当裂纹扩展方向与 α/β 相界面一致时, 裂纹将沿 α/β 相界面方向扩展。而当裂纹扩展方向与 α/β 相界面不一致时, 裂纹将产生停滞效应或被迫改变方向, 从而消耗更多能量。双态组织中存在大量球状初生 α_p 相, 裂纹扩展路径较为平直, 因此双态组织的断裂韧性低于魏氏组织^[20]。在 997 °C 固溶后, 显微组织中细小的 β 晶粒以及大量不同位相的 α 相集束阻碍裂纹扩展, 当裂纹穿过集束边界时被迫改变方向, 导致裂纹分叉和二次裂纹的萌生^[21]。该过程需要消耗大量能量, 导致断裂韧性升高。并且当裂纹穿过粗大平直的 β 相晶粒时, 平直的晶界为裂纹提供了快速扩展的通道, 该过程消耗能量较低^[22]。因此, 当固溶温度升高至 1 012 °C, 断裂韧性降低至 103 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

2.3 断口分析

图 3 为不同固溶温度条件下 Ti6Al4V ELI 钛合金室温拉伸试样断口组织形貌, 在 952 °C 固溶+时效后室温拉伸断口宏观形貌为典型杯锥形形貌 (图 3 a、b), 存在剪切唇区、纤维区和放射区三个区域, 为典型塑性断裂特征, 纤维区断口内部存在大量较深的等轴形韧窝。随着固溶温度的升高, 室温拉伸试样断口无明显颈缩现象, 呈脆性断裂特征, 纤维区断口韧窝较浅。在 β 相区固溶+时效后室温拉伸试样断口形貌发现明显撕裂棱 (图 3 c、d)。

钛合金在塑性变形过程中, 微裂纹优先在 α/β 相界面形核, 在 952 °C 固溶+时效后显微组织中存在大量初生 α_p 相, 裂纹穿过初生 α_p 相时, 扩展距离较长, 材料塑性较高, 延伸率达 16.8%。而随着固溶温度的升高, 初生 α_p 相含量降低, 显微组织中存在大量片层 α 相, 裂纹在片层 α 相扩展过程中扩展距离较小^[23-24], 裂纹容易发生扩展, 形成较浅的韧窝, 同时粗大平直的晶界 α 相为裂纹扩展提供了快速扩展的通道。因此, 在具有完整 β 晶粒的断口组织中出现了撕裂棱, 同时塑性也较差 (延伸率仅为 8.2%), 为韧脆混合型断裂。



(a) 952 °C; (b) 967 °C; (c) 997 °C; (d) 1012 °C

图3 不同热处理条件下 Ti6Al4V ELI 钛合金室温拉伸断口形貌

Fig. 3 Tensile fracture morphology of Ti6Al4V ELI titanium alloy at various solution treatments

3 结论

研究了 Ti6Al4V ELI 钛合金不同固溶热处理条件下显微组织的演变及对力学性能的影响关系, 结果表明:

1) 随着固溶温度的升高, Ti6Al4V ELI 钛合金初生 α_p 相含量降低, 片层 α 相厚度和 β 晶粒尺寸均增加。

2) 随着固溶温度的升高, Ti6Al4V ELI 钛合金强度和塑性均降低, 但其断裂韧性增加。在 952 °C 固溶后进行时效热处理, 抗拉强度可达 915 MPa, 延伸率 16.8%, 断裂韧性仅为 84 MPa·m^{1/2}。在 997 °C 进行固溶后时效, 合金抗拉强度降低至 861 MPa, 延伸率 9.6%, 断裂韧性达 115 MPa·m^{1/2}。

3) 在 952 °C 进行固溶, Ti6Al4V ELI 钛合金为韧性断裂, 随着固溶温度的升高, 合金呈韧脆混合型断裂。

参考文献

- [1] Yuan Hong, Yu Huai, Wang Jinxue, *et al.* Damage tolerance properties of electron beam welded joints of TC4-DT titanium alloy[J]. Materials Engineering, 2007, (8): 18–20.
(袁鸿, 余槐, 王金雪, 等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能[J]. 材料工程, 2007, (8): 18–20.)
- [2] Akahori T, Niinomi M, Fukunaga K I. An investigation of the effect of fatigue deformation on the residual mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2000, 31(8): 1937–1948.
- [3] Semenova I P, Saitova L R, Raab G I, *et al.* Microstructural features and mechanical properties of the Ti-6Al-4V ELI alloy processed by severe plastic deformation[J]. Materials Science Forum, 2006, (1): 128–131.
- [4] Xu Liang, Zhao Qing, Hui Li, *et al.* Influence of corrosion environments on corrosion fatigue property of per-corroded TC-DT titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, (20): 125–129.
(许良, 赵晴, 回丽, 等. 腐蚀环境对预腐蚀 TC4-DT 钛合金疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, (20): 125–129.)
- [5] Chen Lianguo, Wang Wensheng, Zhu Zhishou, *et al.* Development and application of large size damage tolerant titanium alloy TC4-DT[J]. Journal of Aeronautics (Special Issue of Fighter), 2020, 41(6): 36–41.
(陈联国, 王文盛, 朱知寿, 等. 大规格损伤容限钛合金 TC4-DT 的研制及应用[J]. 航空学报(战斗机专刊), 2020, 41(6):

- 36–41.)
- [6] Yu Lanlan, Mao Xiaonan, Li Hui, *et al.* Research on high cycle fatigue behavior of TC4-DT titanium alloy[J]. *Titanium Industry Progress*, 2012, 29(6): 11–14.
(于兰兰, 毛小南, 李辉, 等. TC4-DT钛合金高周疲劳行为研究[J]. *钛工业进展*, 2012, 29(6): 11–14.)
- [7] Venkatesh B D, Chen D L, Bhole S D. Effect of heat treatment on mechanical properties of Ti-6 Al-4 V ELI alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, (1): 121–125.
- [8] Peng X, Guo H, Shi Z, *et al.* Study on the hot deformation behavior of TC4-DT alloy with equiaxed $\alpha+\beta$ starting structure based on processing map—Science direct[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2014, 605: 80–88.
- [9] Lu Y, Xu X, Zhang B, *et al.* Microstructural analysis and mechanical behavior of TC4 titanium alloy and 304 stainless steel by friction stir lap welding[J]. *Welding in the World*, 2021: 1–16.
- [10] Liu Jinhao, Liu Jiansheng, Xiong Yunsen, *et al.* Study on thermal deformation behavior and machining drawing of TC4-DT titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, (8): 1674–1678.
(刘金豪, 刘建生, 熊运森, 等. TC4-DT钛合金的热变形行为研究及加工图[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, (8): 1674–1678.)
- [11] Lei Wenguang, Mao Xiaonan, Lu Yafeng. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of TC4-DT titanium alloy thick plate[J]. *Metal Heat Treatment*, 2012, 37(9): 102–105.
(雷文光, 毛小南, 卢亚锋. 热处理工艺对TC4-DT钛合金厚板组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2012, 37(9): 102–105.)
- [12] Zhu Liwei, Wang Xinnan, Zhu Zhishou. Microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy under different heat treatment processes[J]. *Titanium Industry Progress*, 2012, (1): 14–17.
(祝力伟, 王新南, 朱知寿. 不同热处理工艺下TC4-DT钛合金的显微组织及力学性能[J]. *钛工业进展*, 2012, (1): 14–17.)
- [13] Li Jing, Zhu Zhishou, Wang Xinnan, *et al.* β effect of heat treatment process on crack propagation behavior of TC4-DT titanium alloy[J]. *Rare Metals*, 2017, 41(7): 745–750.
(李静, 朱知寿, 王新南, 等. 准 β 热处理工艺对TC4-DT钛合金裂纹扩展行为的影响[J]. *稀有金属*, 2017, 41(7): 745–750.)
- [14] Li Hui, Qu Henglei, Zhao Yongqing, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy thick plate[J]. *Rare Metals*, 2005, (6): 841–844.
(李辉, 曲恒磊, 赵永庆, 等. 热处理对Ti-6Al-4V ELI合金厚板组织与性能的影响[J]. *稀有金属*, 2005, (6): 841–844.)
- [15] Wang Xinnan, Zhu Zhishou, Shang Guoqiang, *et al.* Effect of heat treatment process on mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI alloy thick section forgings[J]. *Titanium Industry Progress*, 2019, (2): 29–33.
(王新南, 朱知寿, 商国强, 等. 热处理工艺对Ti-6Al-4V ELI合金厚截面锻件力学性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2019, (2): 29–33.)
- [16] Wang Zhe, Wang Xinnan, Zhu Liwei, *et al.* Grain growth behavior in β phase of TB17 titanium alloy[J]. *Titanium Industry Progress*, 2016, 33(6): 11–15.
(王哲, 王新南, 祝力伟, 等. TB17钛合金 β 相区晶粒长大行为[J]. *钛工业进展*, 2016, 33(6): 11–15.)
- [17] Wang B, Cheng L, Cui W, *et al.* Effect of forging process on high cycle and very high cycle fatigue properties of TC4 titanium alloy under three-point bending[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, (1): 36–40.
- [18] Tian Chenchao, Gao Yang, Zhang Juan, *et al.* Comparative analysis of fatigue crack growth rate of TC4-DT and TC21 titanium alloys[J]. *Welded Pipe*, 2019, 42(11): 31–34.
(田晨超, 高阳, 张娟, 等. TC4-DT及TC21钛合金疲劳裂纹扩展速率的对比分析[J]. *焊管*, 2019, 42(11): 31–34.)
- [19] Cui W, Chen X, Cheng L, *et al.* Fatigue property and failure mechanism of TC4 titanium alloy in the HCF and VHCF region considering different forging processes[J]. *Materials Research Express*, 2021, (3): 48–52.
- [20] Guo P, Zhao Y, Hong Q, *et al.* Microscopic mechanism of fatigue crack propagation in TC4-DT titanium alloy[J]. *Materials Reports*, 2019, (5): 28–32.
- [21] Wang B H, Cheng L, Bao X C. Effect of heat treatment on very high cycle fatigue properties of TC4[J]. *Key Engineering Materials*, 2021, 881: 3–11.
- [22] Naydenkin E V, Soldatenkov A P, Mishin I P, *et al.* Very high cycle fatigue failure of near β titanium alloy[J]. *Physical Mesomechanics*, 2021, 24(3): 326–334.
- [23] Shi Xiaoyun, Gao Yushe, Wang Wensheng. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy bar[J]. *Hot Working Process*, 2013, 42(14): 163–165.
(史小云, 高玉社, 王文盛. 热处理对TC4-DT钛合金棒材组织和力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(14): 163–165.)
- [24] Liu G, Huang C, Sun S, *et al.* Effect of microstructure on high-speed cutting modified anti-fatigue performance of Incoloy A286 and titanium alloy TC17[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(3): 855–866.