

# 热处理工艺对 ZTC4 钛合金显微组织及性能的影响研究

冉 兴<sup>1,2</sup>, 王 哲<sup>3</sup>, 吕志刚<sup>1</sup>, 曹 建<sup>4</sup>, 陈 垚<sup>4</sup>, 杨朝荣<sup>4</sup>, 李培杰<sup>1\*</sup>

(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. 贵州安吉航空精密铸造有限责任公司, 贵州 安顺 561003)

**摘 要:** 采用金相显微镜 (OM) 研究了热处理制度对 ZTC4 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: ZTC4 钛合金铸件由马氏体  $\alpha'$  相组成, 进行退火以及热等静压+退火热处理后, 显微组织均为典型魏氏组织。ZTC4 钛合金铸件退火后抗拉强度可达 955 MPa, 其延伸率和断面收缩率分别为 8.8% 和 13.1%。采用热等静压+退火热处理后, 抗拉强度降低至 892 MPa, 但其延伸率和断面收缩率升高至 11.2% 和 21.4%。采用热等静压热处理, 可破碎原始  $\beta$  相晶粒, 形成破碎的晶界  $\alpha$  相, 提高 ZTC4 钛合金塑性性能。

**关键词:** ZTC4 钛合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG146.23

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0048-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.008

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音  
聊科研  
与作者互动

## Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZTC4 titanium alloy

Ran Xing<sup>1,2</sup>, Wang Zhe<sup>3</sup>, Lv Zhigang<sup>1</sup>, Cao Jian<sup>4</sup>, Chen Yao<sup>4</sup>, Yang Chaorong<sup>4</sup>, Li Peijie<sup>1\*</sup>

(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. Guizhou Anji Aviation Precision Casting Co., Ltd., Anshun 561003, Guizhou, China)

**Abstract:** The optical microscope (OM) was employed to investigate the influence of heat treatment on microstructure evolution of ZTC4 titanium alloy, and the relationship between microstructure and mechanical properties was discussed. The results showed that the ZTC4 titanium alloy casting was composed of martensitic phase  $\alpha'$ . A typical Widmanstätten microstructure was always obtained after annealing or hot isostatic pressing followed by annealing heat treatment. The tensile strength of ZTC4 titanium alloy casting after annealing can reach 955 MPa, and its elongation and reduction of area were only 8.8% and 13.1%, respectively. After hot isostatic pressing followed by annealing heat treatment, the tensile strength was reduced to 892 MPa, but its elongation and reduction of area were increased to 11.2% and 21.4%. The hot isostatic pressing heat treatment can break the original  $\beta$  phase grains, which improve the plastic properties of ZTC4 titanium alloy.

**Key words:** ZTC4 titanium alloy, heat treatment, microstructure, mechanical properties

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 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, 电话: 0851-32208022,

E-mail: 2560680637@qq.com。 \*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、船舶及医疗等领域<sup>[1-3]</sup>, ZTC4 是一种中等强度的 ( $\alpha+\beta$ ) 型铸造钛合金, 具有优异的铸造性能, ZTC4 钛合金占国内航空、航天类钛合金铸件用材的 90% 以上, 是大型飞机中大型薄壁复杂非对称精密铸件首选材料<sup>[4-5]</sup>。ZTC4 钛合金铸件目前主要是通过热等静压 (Hot Isostatic Pressing, HIP) 处理, 使铸件内部气孔封闭、缩孔压实, 通过扩散链接成致密组织, 提高铸件力学性能<sup>[6-7]</sup>。

近些年, 国内外对 ZTC4 钛合金进行了深入研究, 张美娟采用组织定量分析研究了 ZTC4 钛合金表层与心部组织演变<sup>[8]</sup>; 冯新研究了 ZTC4 钛合金铸件表面缺陷与疲劳裂纹扩展行为的影响关系<sup>[9]</sup>; 郝喜望对 ZTC4 钛合金复杂铸件组织与性能均匀性进行了研究, 表明随着铸件尺寸的增加,  $\beta$  晶粒尺寸和片层  $\alpha$  相间距呈近线性关系<sup>[10]</sup>; 刘继雄通过对低温热处理后进行热等静压 ZTC4 钛合金处理, 认为元素微区扩散是造成 ZTC4 钛合金  $\beta$  晶粒及片层  $\alpha$

相组织差异的主要原因<sup>[11]</sup>。

目前, 国内外对 ZTC4 钛合金的研究主要集中在 ZTC4 钛合金铸造成形过程以及引起的显微组织和力学性能差异, 而对热处理工艺对 ZTC4 钛合金显微组织及力学性能的影响关系鲜有报道。笔者分别采用退火和热等静压工艺对 ZTC4 钛合金铸件进行热处理, 系统地研究了热处理工艺对 ZTC4 钛合金显微组织及力学性能的影响关系, 为该合金获得最佳力学性能提供理论及工程指导依据。

## 1 试验材料及方法

试验采用贵州安吉航空精密铸造有限责任公司在 ZSK05-500 KC 型 500 kg 真空凝壳炉上生产的 ZTC4 离心铸造附铸试棒, 浇铸温度为 1 760 °C, 浇铸型壳预热温度为 500 °C, 离心转速为 120 r/min。本炉批 ZTC4 钛合金合金成分及验收标准见表 1, 由表 1 可知, 本炉批 ZTC4 钛合金化学成分符合标准 GB/T 15073—1994《铸造钛及钛合金牌号和化学成分》的要求。采用淬火金相法测得该炉批次 ZTC4 钛合金 ( $\alpha+\beta$ ) $\rightarrow\beta$  相转变温度为 990 °C。

表 1 ZTC4 钛合金铸件化学成分及验收标准

Table 1 Chemical compositions of ZTC4 titanium alloy casting and standard

ZTC4 钛合金	Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
铸锭成分	Bal.	6.40	4.38	0.19	0.02	0.014	0.006	0.002	0.14
GB/T 15073—1994	Bal.	5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.3	≤0.15	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20

本试验采用 DHS-500 型真空炉对 ZTC4 钛合金铸件进行退火热处理, 在 RDG1250/1 500-150-1 000 型设备上热等静压处理, 具体热处理制度如下:

试样 I: 退火, 735 °C/2.5 h, 炉冷至 300 °C, 空冷, 真空度 0.4 Pa;

试样 II: 热等静压, 935 °C/3 h, 炉冷, 氩气压 130 MPa;

试样 III: 热等静压+退火, 935 °C/3 h, 炉冷; 氩气压: 130 MPa+735 °C/2.5 h, 炉冷至 300 °C, 空冷, 真空度 0.4 Pa。

室温拉伸试样采用  $\varnothing 13 \text{ mm} \times 71 \text{ mm}$  标准拉伸试样, 在 Instron 万能试验机上进行拉伸性能检测, 每组取 3 根试样进行测试, 结果取平均值。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

显微组织采用 Leica DMI3000 M 金相显微镜进行, 采用截线法计算平均片层  $\alpha$  相厚度, 每个测量样本数据不少于 10 个。

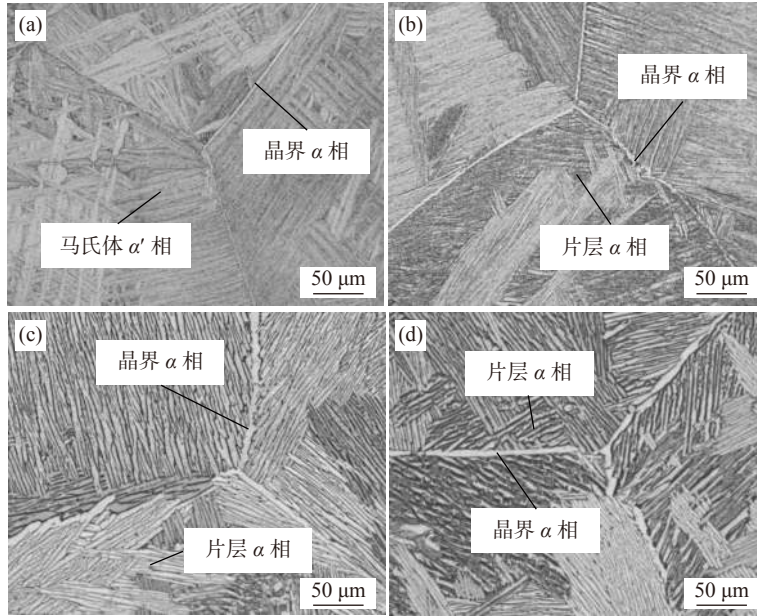
## 2 结果与讨论

### 2.1 热处理制度对 ZTC4 钛合金显微组织的影响

图 1 为 ZTC4 钛合金铸态及不同热处理工艺 ZTC4 钛合金显微组织, 均为典型魏氏组织, 由粗大的原始  $\beta$  晶粒中片层  $\alpha$  相和  $\beta$  相基体构成,  $\beta$  晶粒内部存在不同位相的片层  $\alpha$  相形成的集束。图 1(a) 为 ZTC4 钛合金原始铸态组织, 可以看出, 显微组织中晶界  $\alpha$  相呈薄膜状且晶内存在大量片层状的马氏体  $\alpha'$  相, 形成该组织的主要原因在于浇铸温度为 1 760 °C, 而型壳预热温度仅为 500 °C, 浇铸过程是一个非稳态扩散相变的过程, 较大的过冷度提供了

相变热力学及动力学并形成大量晶核,  $\beta$  相不能通过扩散相变转化为平衡态的片层  $\alpha$  相<sup>[12]</sup>, 且该合金中  $\beta$  相稳定元素含量较低, 不足以使高温  $\beta$  相完全保留至室温状态,  $\beta$  相中的原子只能通过整体有规律的进程迁移, 发生切变形成过饱和固溶体的马氏体  $\alpha'$  相。图 1(b) 为 ZTC4 钛合金经退火后显微组织, 存在平直连续的晶界  $\alpha$  相及晶内片层  $\alpha$  相, 其

主要原因在于, 在退火热处理过程中, 铸态组织中非稳态的马氏体  $\alpha'$  相发生扩散相变, 形成稳态的片层  $\alpha$  相。图 1(c) 和 (d) 为 ZTC4 钛合金铸件热等静压处理后的显微组织, 存在非连续状晶界  $\alpha$  相以及晶内粗化的片层  $\alpha$  相。由图 1 还可以看出, 在退火热处理后, 晶内存在大量不同位相的片层  $\alpha$  相集束, 而采用热等静压后, 片层  $\alpha$  相集束数量明显减少。



(a)铸态;(b)退火;(c)热等静压;(d)热等静压+退火

图 1 不同热处理工艺条件下 ZTC4 钛合金铸件显微组织

Fig. 1 Microstructures of ZTC4 titanium alloy castings at various heat treatments

表 2 为不同热处理工艺条件下 ZTC4 钛合金显微组织参数, 由表 2 可知, ZTC4 钛合金铸态组织中片层  $\alpha$  相和晶界  $\alpha$  相厚度均细小, 平均片层  $\alpha$  相厚度仅为 1.1  $\mu\text{m}$ , 平均晶界  $\alpha$  相厚度为 3.5  $\mu\text{m}$ ; 采用退火热处理后, 显微组织与 ZTC4 钛合金铸态显微组织特征差异较小, 但其平均片层  $\alpha$  相厚度增加至 2.5  $\mu\text{m}$ , 平均晶界  $\alpha$  相厚度增加至 4.8  $\mu\text{m}$ 。其主要原因在于退火温度为 735  $^{\circ}\text{C}$ , ZTC4 钛合金在该温度热处理时对原子扩散动能较小, 热处理温度对其显微组织的影响较小, 而热处理的冷却阶段, 采用炉冷至 300  $^{\circ}\text{C}$  出炉的冷却工艺, 析出的次生  $\alpha$  相形核长大。因此, 退火热处理后平均片层  $\alpha$  相和晶界  $\alpha$  相厚度均增加。

采用 935  $^{\circ}\text{C}$  进行热等静压后炉冷热处理, 平均片层  $\alpha$  相和晶界  $\alpha$  相厚度分别增加至 4.6  $\mu\text{m}$  和 7.6  $\mu\text{m}$ , 其主要原因在于, 在较高温度进行加热, 钛合金原子扩散速率加快, 扩散更加充分, 在炉冷过程

中发生相变, 形成粗大的片层  $\alpha$  相和晶界  $\alpha$  相。在该基础上再次进行退火热处理, 部分析出的次生  $\alpha$  相再次长大, 形成更加粗大的片层  $\alpha$  相 (6.2  $\mu\text{m}$ ) 和晶界  $\alpha$  相 (10.6  $\mu\text{m}$ )。

表 2 不同热处理工艺条件下 ZTC4 钛合金显微组织参数  
Table 2 Microstructure parameters of ZTC4 titanium alloy at various heat treatments

热处理工艺	平均片层 $\alpha$ 相尺寸/ $\mu\text{m}$	平均晶界 $\alpha$ 相尺寸/ $\mu\text{m}$
铸态	1.1	3.5
退火态	2.5	4.8
热等静压态	4.6	7.6
热等静压+退火态	6.2	10.6

## 2.2 热处理制度对 ZTC4 钛合金铸件力学性能的影响

表 3 为不同热处理工艺条件下 ZTC4 钛合金铸件的力学性能, 可以得出, ZTC4 钛合金铸件抗拉强度较高, 可达 942 MPa, 但其延伸率和断面收缩率较

低, 分别为 8.0% 和 12.2%。采用退火热处理后, 强度上升至 955 MPa, 延伸率和断面收缩率分别提升至 8.8% 和 13.1%。而采用热等静压对 ZTC4 钛合金铸件进行热处理后, 铸件抗拉强度降低至

911 MPa, 但其塑性提升 (延伸率 9.5%, 断面收缩率 15.3%)。采用热等静压+退火热处理后其抗拉强度进一步降低至 892 MPa, 塑性性能进一步提升 (延伸率 11.2%, 断面收缩率 21.4%)。

表 3 ZTC4 钛合金在不同热处理工艺条件下的室温力学性能  
Table 3 Mechanical properties of ZTC4 titanium alloy castings at various heat treatments

热处理工艺	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
铸态	942	860	8.0	12.2
退火态	955	897	8.8	13.1
热等静压态	911	851	9.5	15.3
热等静压+退火态	892	834	11.2	21.4

### 2.3 讨论与分析

ZTC4 钛合金铸件显微组织对力学性能主要受片层  $\alpha$  相及晶界  $\alpha$  相形貌的影响<sup>[13]</sup>, ZTC4 钛合金铸件中主要以针状马氏体  $\alpha'$  相为主, 与钢铁中马氏体相不同, 该相是一种软质相, 对钛合金的强化效果不明显, 但其片层厚度较小, 在塑性变形过程中, 为裂纹的萌生提供了大量裂纹形核源, 降低了应力集中现象<sup>[14-15]</sup>。因此 ZTC4 钛合金铸件具有较高的强度, 而其晶界由平直的晶界  $\alpha$  相构成, 裂纹在扩展过程中, 易沿晶界方向扩展, 发生沿晶断裂<sup>[16]</sup>。因此, ZTC4 钛合金铸件的塑性性能较差。

当 ZTC4 钛合金进行退火热处理, 过饱和的固溶体  $\alpha'$  相发生相变过程, 转变成稳定的片层  $\alpha$  相, 钛合金  $\alpha$  与  $\beta$  相界面的结合能较弱, 微裂纹通常沿着  $\alpha/\beta$  相界面处扩展, 细小的片层  $\alpha$  相与  $\beta$  相基体存在大量  $\alpha/\beta$  相界面, 对基体有明显的强化效果。同时当显微组织中大量  $\alpha$  相以片层组织形式存在, 片层  $\alpha$  相集束的不同取向阻碍了裂纹扩展, 当裂纹穿越集束边界时改变方向, 导致裂纹分叉和二次裂纹的萌生, 这些过程均需消耗更多的能量<sup>[17]</sup>。因此, ZTC4 钛合金铸件进行退火后, 虽然平均片层  $\alpha$  相厚度比铸态平均片层厚度大, 但其强化效果比 ZTC4 钛合金铸态高, 因此退火热处理的 ZTC4 钛合金具有最高强度。

采用热等静压以及热等静压+退火热处理工艺对 ZTC4 钛合金铸件进行热处理, 其片层  $\alpha$  相厚度持续增加, 其抗拉强度进一步降低。而采用热等静压工艺, 在 130 MPa 的氩气条件下, 材料进行微小的热变形, 原始  $\beta$  晶粒破碎, 形成不连续的晶界  $\alpha$  相。当裂纹沿晶界进行扩展过程中, 扩展路径被迫发生偏移, 沿晶界扩展转移至晶内扩展, 该过程消耗更多能量<sup>[18]</sup>。因此, 采用热等静压以及热等静压+退火热处理制度可提升 ZTC4 钛合金塑性性能。

### 3 结论

主要研究了 ZTC4 钛合金不同热处理工艺条件下显微组织的演变及对力学性能的影响, 结果表明:

1) ZTC4 钛合金铸件为马氏体相  $\alpha'$  相组成, 进行退火以及热等静压+退火热处理后, 显微组织均为典型魏氏组织。

2) ZTC4 钛合金铸件退火后抗拉强度可达 955 MPa, 其延伸率和断面收缩率分别为 8.8% 和 13.1%。采用热等静压+退火热处理后, 抗拉强度降低至 892 MPa, 但其延伸率和断面收缩率升高至 11.2% 和 21.4%。

3) ZTC4 钛合金铸件采用热等静压热处理, 可破碎原始  $\beta$  相晶粒, 形成破碎的晶界  $\alpha$  相, 提高 ZTC4 钛合金塑性性能。

### 参考文献

- [1] Tian Yongwu, Zhu Lele, Li Weidong, et al. Application and development of high temperature titanium alloys[J]. Hot Working Process, 2020, 49(8): 4-9.  
(田永武, 朱乐乐, 李伟东, 等. 高温钛合金的应用及发展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 4-9.)
- [2] 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.

- [ 3 ] Ran Xing, Lv Zhigang, Cao Jian, *et al.* Investment casting technology for large complex titanium alloy castings[J]. *Casting*, 2021, 70(2): 8–13.  
(冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术[J]. *铸造*, 2021, 70(2): 8–13.)
- [ 4 ] Zhang W, Qin P, Wang Z, *et al.* Superior wear resistance in EBM-processed TC4 alloy compared with SLM and forged samples[J]. *Materials*, 2019, 12(5): 67–72.
- [ 5 ] Pan Bo, Huang Yichen, Li Liqun, *et al.* Effect of multiple laser repair on microstructure and hardness of ZTC4 titanium alloy[J]. *China Laser*, 2019, 46(10): 28–32.  
(潘博, 黄怡晨, 李俐群, 等. 多次激光修复对ZTC4钛合金组织与硬度的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 28–32.)
- [ 6 ] Yin Zhongwei, Sun Yanbo, Zhang Xuhu, *et al.* Near net forming technology and development status of hot isostatic pressing of powder titanium alloy[J]. *Material Guide*, 2019, 33(7): 24–33.  
(阴中炜, 孙彦波, 张绪虎, 等. 粉末钛合金热等静压近净成形技术及发展现状[J]. *材料导报*, 2019, 33(7): 24–33.)
- [ 7 ] Xu Kaihua, Liu Haijun, Yan Jiangpeng, *et al.* Microstructure evolution of hot isostatic pressing TC4 titanium alloy during multi pass hot compression deformation[J]. *Journal of Plastic Engineering*, 2021, 28(7): 7–12.  
(徐凯华, 刘海军, 闫江鹏, 等. 热等静压态TC4钛合金在多道次热压缩变形中的组织演变[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(7): 7–12.)
- [ 8 ] Zhang Meijuan, Ying Xiwang, Nan Hai, *et al.* Study on interfacial fusion effect of ZTC4 / TA2 titanium alloy castings with slender holes[J]. *Precision Forming Engineering*, 2018, 10(3): 5–11.  
(张美娟, 郗喜望, 南海, 等. 含细长孔ZTC4/TA2钛合金铸件界面熔合效果研究[J]. *精密成形工程*, 2018, 10(3): 5–11.)
- [ 9 ] Feng Xin, Qiu Jianke, Ma Yingjie, *et al.* Effect of surface defects on fatigue crack propagation behavior of ZTC4 titanium alloy castings[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2019, (5): 3–8.  
(冯新, 邱建科, 马英杰, 等. ZTC4钛合金铸件表面缺陷对疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, (5): 3–8.)
- [ 10 ] Ying Xiwang, Zhang Meijuan, Zou Chunyu, *et al.* Mechanical properties and failure analysis of ZTC4 laser cladding repair[J]. *Welding*, 2020, (1): 29–35,41.  
(郗喜望, 张美娟, 邹纯昱, 等. ZTC4激光熔覆修复力学性能及失效分析[J]. *焊接*, 2020, (1): 29–35,41.)
- [ 11 ] Liu Jixiong, Yang Qi, Guo Zhijun, *et al.* Microstructure evolution of ZTC4 titanium alloy treated by hot isostatic pressing during low temperature heat treatment[J]. *Journal of Material Heat Treatment*, 2015, (S1): 5–10.  
(刘继雄, 杨奇, 郭志军, 等. 热等静压处理ZTC4钛合金低温热处理过程中组织演变[J]. *材料热处理学报*, 2015, (S1): 5–10.)
- [ 12 ] Zhang Tingjie. Electron microscopic study of phase transformation in titanium alloys (Ⅲ): Martensitic transformation in titanium alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1989, (4): 71–78.  
(张廷杰. 钛合金相变的电子显微镜研究(Ⅲ): 钛合金中的马氏体相变[J]. *稀有金属材料与工程*, 1989, (4): 71–78.)
- [ 13 ] Wang Z, Wang X, Zhu Z. Characterization of high-temperature deformation behavior and processing map of TB17 titanium alloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 692: 149–154.
- [ 14 ] Zhu Liwei, Wang Xinnan, Zhu Zhishou. Microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy under different heat treatment processes[J]. *Progress of Titanium Industry*, 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.)
- [ 15 ] Tian Chenchao, Gao Yang, Zhang Juan, *et al.* Comparative analysis of fatigue crack growth rates 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.)
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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]. *Progress of Titanium Industry*, 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.)