

# 热处理制度对 TC4 钛合金风扇盘组织和性能的影响研究

魏 鑫, 赵兴东, 李昌永, 王健妍

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043)



魏 鑫

**摘 要:** 随着国产大飞机及其发动机的自主研制, TC4 钛合金被用来制造发动机风扇盘, 该风扇盘锻件尺寸大、结构复杂, 且为工作时承受很大载荷的转动件, 对 TC4 钛合金锻件综合力学性能要求苛刻。为提高风扇盘锻件的组织和力学性能水平, 需要对其热处理工艺进行系统的研究。研究了不同热处理制度对 TC4 钛合金风扇盘锻件组织和性能的影响。采用光学显微镜分析了锻件的显微组织, 测试了锻件的拉伸性能、断裂韧度和应变控制的低周疲劳性能等力学性能。试验结果表明: 与普通退火相比, 固溶时效处理后具有更好的组织均匀性和综合力学性能; 固溶温度升高, 室温、400 °C 拉伸强度增加, 但室温应变控制的低周疲劳性能和断裂韧度稍微有所降低; 固溶后的冷却速率增加, 室温、400 °C 拉伸强度增加, 室温应变控制的低周疲劳性能和断裂韧度稍微降低; TC4 钛合金风扇盘锻件最佳的热处理制度为  $T_{\beta}-(40 \sim 60) ^\circ\text{C}/2 \text{ h}$ ,  $\text{WQ}+700 ^\circ\text{C}/2 \text{ h}$ , AC。

**关键词:** 热处理; TC4 钛合金; 风扇盘; 组织; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)07-0588-06

## Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties for TC4 Fan Disk

WEI Xin, ZHAO Xingdong, LI Changyong, WANG Jianyan

(AECC Shen Yang Li Ming Aero-engine CO., LTO., Shenyang 110043, China)

**Abstract:** With the independent development of China-made large aircrafts and engines, TC4 titanium alloy is adopted to manufacture engine fan disks, which have high requirements on comprehensive mechanical properties of TC4 fan disk owing to the large forging size, complex structure, and rotating under high load during work. In order to improve the microstructure and mechanical properties of fan disk forgings, it is necessary to conduct systematical study on heat treatment processes. The effects of different heat treatment processes on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy fan disk forging were studied. Microstructures of the fan disk forging were observed using optical microscopy. The mechanical properties of the fan disk forging were evaluated. The results show that compared with annealing, solution + aging treatment makes better microstructure uniformity and comprehensive mechanical performances. The tensile strengths at room temperature and 400 °C are improved, however, fracture toughness and strain controlled low cycle fatigue life at room temperature are decreased with increasing solution temperature and cooling rate after solution treating. The optimum heat treatment process for fan plate forgings is  $T_{\beta}-(40 \sim 60) ^\circ\text{C}/2 \text{ h}$ ,  $\text{WQ}+700 ^\circ\text{C}/2 \text{ h}$ , AC.

**Key words:** heat treatment; TC4; fan disk; microstructure; mechanical property

## 1 前 言

TC4 钛合金是一种马氏体型  $\alpha$ - $\beta$  两相钛合金, 含有 6% Al 和 4% V, 名义成分的铝当量为 7.0, 钒当量为

2.9。该合金具有优异的综合力学性能、优良的热工艺塑性和良好的焊接性能, 长期使用温度可达 400 °C, 且成本相对比较低廉, 广泛应用于航空航天工业领域, 如航空发动机风扇和压气机的叶片、盘件、机匣, 以及飞机结构中的梁、接头和隔框等重要承力构件<sup>[1-5]</sup>。

钛合金热处理的主要目的是降低制备过程产生的内应力, 获得最佳的塑性、机械加工性、尺寸稳定性和组织稳定性, 提高强度, 最佳化特殊性能, 如断裂韧度、

收稿日期: 2017-07-10

第一作者: 魏 鑫, 男, 1983 年生, 硕士, 工程师, Email:

dangjianshiti@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.07.13

疲劳强度和高温蠕变等性能<sup>[6-12]</sup>。还可以通过特殊热处理来提高某些力学性能,如缺口强度、断裂韧度和疲劳抗力<sup>[13]</sup>。这些特殊热处理主要包括固溶+过时效、再结晶退火和 $\beta$ 退火等<sup>[14]</sup>。

TC4 钛合金普通退火的显著特点是:不完全再结晶的 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相,最小的强度和最高的塑性,工艺普通,成本相对低廉。国内在普通退火的 TC4 钛合金中小规格锻件组织和性能等方面研究比较充分,在航空发动机和飞机上实现了中小规格 TC4 钛合金结构件的应用。随着大型航空发动机的研制与发展,TC4 钛合金锻件趋向于大型化、整体化。某发动机大型风扇盘选用 TC4 钛合金,其锻件轮廓尺寸为 $\phi 628\text{ mm} \times 246\text{ mm}$ ,结构复杂,锻件重量为 290 kg,最大截面尺寸达到了 150 mm。风扇盘上还安装了大型风扇转子叶片,发动机工作时承受很大的载荷,因此风扇盘设计要求的强度指标高。一般而言,随重量和截面尺寸增大,TC4 钛合金锻件的强度将会进一步降低。普通退火处理的大型 TC4 钛合金风扇盘锻件在室温拉伸强度、高温拉伸强度以及高温持久强度、蠕变抗力等力学性能方面可能存在富裕度不足或不能满足设计指标要求的风险。固溶+高温时效(或过时效)可获得比普通退火更高的强度,以及良好的断裂韧度和低的疲劳裂纹扩展速率。关于热处理工艺对大型 TC4 钛合金锻件组织性能影响的研究较少<sup>[15-19]</sup>,为此本文开展大型 TC4 钛合金风扇盘锻件的热处理工艺研究,主要研究普通退火和固溶时效、不同固溶温度、不同固溶后的冷却方式对大型风扇盘锻件组织和性能的影响,获得优化的热处理工艺,改善锻件的组织均匀性,提高锻件的力学性能,为锻件研制提供技术依据和支持,满足大型发动机设计与生产的需求。

## 2 试验材料及方法

试验材料为采用模锻工艺生产的 TC4 钛合金风扇盘锻件(如图 1 所示)。该批锻件的 $\beta$ 转变温度为 993  $^{\circ}\text{C}$ 。



图1 TC4 钛合金风扇盘锻件

Fig. 1 TC4 titanium alloy fan disk forging

将该锻件沿直径方向 4 等分,首先在 1/4 锻件上进行固溶时效和普通退火的热处理试验,采取的热处理制度分别为表 1 的 No. 1 和 No. 2,以比较不同类型热处理方式对于组织性能的影响;其次,在 1/4 锻件上进行不同固溶温度(分别采用表 1 的 No. 1 和 No. 3 热处理制度)和不同固溶后冷却方式(分别采用表 1 的 No. 1 和 No. 4 热处理制度)的热处理试验,因为对于固溶时效热处理而言,当时效温度被设定在一个适当范围内时,固溶温度及其冷却方式对于合金的组织性能影响较为明显,因此,本文主要对这两个因素的影响进行研究。

按照上述方案在热处理后的试验料中心部位分别切取径向显微组织试样,弦向室温拉伸、高温拉伸和室温应变控制的低周疲劳性能等力学性能测试试样和断裂韧度测试试样(C-R 向),按照国标进行试样制备及相应的检测,为了减小测试误差对试验结果的影响,每种条件重复测试两个数据。

表 1 TC4 钛合金风扇盘锻件的热处理制度

Table 1 Heat treatment processes for TC4 titanium alloy fan disk

No.	Heat treatment process
1	$T_{\beta}-40\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , WQ + $700\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , AC
2	$700\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , AC
3	$T_{\beta}-60\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , WQ + $700\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , AC
4	$T_{\beta}-40\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , AC + $700\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , AC

Note: WQ: water cooling; AC: air cooling.

## 3 试验结果与分析

### 3.1 固溶时效与普通退火对锻件组织和性能影响

#### 3.1.1 固溶时效与普通退火对组织的影响

固溶时效与普通退火后的风扇盘锻件的典型显微组织如图 2 所示。由图可知,在  $T_{\beta}-40\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ,水冷 +  $700\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ,空冷处理后锻件的显微组织比较均匀,初生 $\alpha$ 相主要呈球状(或等轴状),含量大约在 40%,次生 $\alpha$ 相呈细小的片状,长宽比较大; $700\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ,空冷退火后不同部位的显微组织差异较大,初生 $\alpha$ 相和次生 $\alpha$ 相的含量(50%以上)、形貌差异较大,部分次生 $\alpha$ 相尺寸比较粗大、长宽比较小。

#### 3.1.2 固溶时效与普通退火对性能的影响

固溶时效和普通退火后锻件的室温拉伸性能和断裂韧度见表 2。由表可知,固溶时效处理后的室温拉伸强度、屈服强度比普通退火的分别高 50 MPa 和 35 MPa,但两者的塑性相当。其断裂韧度比普通退火的低。这与其显微组织相吻合,固溶时效后显微组织中的次生 $\alpha$ 相含量多、尺寸细小、长宽比较大,对室温拉伸强度有利,对断裂韧度不利<sup>[20]</sup>。

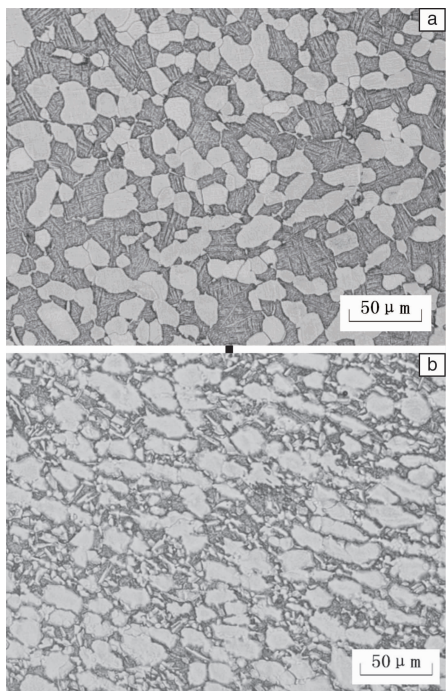


图2 采用热处理制度 No. 1 固溶时效 (a) 与 No. 2 退火处理 (b) 后的锻件显微组织

Fig. 2 Microstructures of the forging after solution + aging treatment with No. 1 process (a) and annealing treatment with No. 2 process (b)

表2 固溶时效与退火后的锻件室温拉伸性能和断裂韧度  
Table 2 Tensile properties and fracture toughness at room temperature of the forging after solution + aging and annealing heat treatments

Heat treatment process	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$K_{IC}$ /MPa $\cdot$ m <sup>1/2</sup>
No. 1	1029	965	16.6	48.2	71.07
	1031	966	17.0	48.2	77.28
No. 2	980	934	18.6	47.6	82.91
	978	928	16.0	45.9	72.68

固溶时效和普通退火后锻件的室温应变控制的低周疲劳性能见表3。固溶时效处理后的室温应变控制的低周疲劳性能比普通退火的基本上相当或稍高。普通退火后显微组织中存在部分粗大的、长条状的次生 $\alpha$ 相,这种粗大的、长条状次生 $\alpha$ 相对室温应变控制的低周疲劳性能不利。

固溶时效和普通退火后锻件400℃拉伸性能见表4。固溶时效处理后的400℃拉伸强度、屈服强度比普通退火的分别高74 MPa和56 MPa,但塑性与退火态的相当。次生 $\alpha$ 相含量越多、尺寸越小、长宽比越大,强化效果越高。

表3 固溶时效与退火后的锻件室温应变控制的低周疲劳性能

Table 3 Strain controlled fatigue properties at room temperature of forging after solution + aging and annealing heat treatments

Heat treatment process	Kt	Alternating strain amplitude, mean strain	Tatal strain range, mm/mm	Frequency, N/min	Cycle life, N
No. 1	1.0	1.00 ± 0.02	0.0086	30	30815
					18778
No. 2	1.0	1.00 ± 0.02	0.0086	30	22957
					24361

表4 固溶时效与退火后的锻件400℃拉伸性能

Table 4 Tensile properties at 400℃ of forging after solution + aging and annealing heat treatments

Heat treatment process	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
No. 1	698	562	15.5	58.6
	708	579	15.9	59.6
No. 2	624	511	19.0	56.5
	633	519	18.8	56.8

3.2 固溶温度对风扇盘锻件组织和性能的影响

3.2.1 固溶温度对组织的影响

不同温度固溶时效处理后锻件的显微组织见图3。初生 $\alpha$ 相形貌均表现为球状,次生 $\alpha$ 相均为细小的片状。 $T_\beta$ -60℃固溶时效处理后的初生 $\alpha$ 相含量为50%, $T_\beta$ -40℃固溶时效处理后的初生 $\alpha$ 相含量为35%。随固溶温度升高,初生 $\alpha$ 相含量降低, $\beta$ 转变组织含量相应地增加、次生 $\alpha$ 相长度更长。

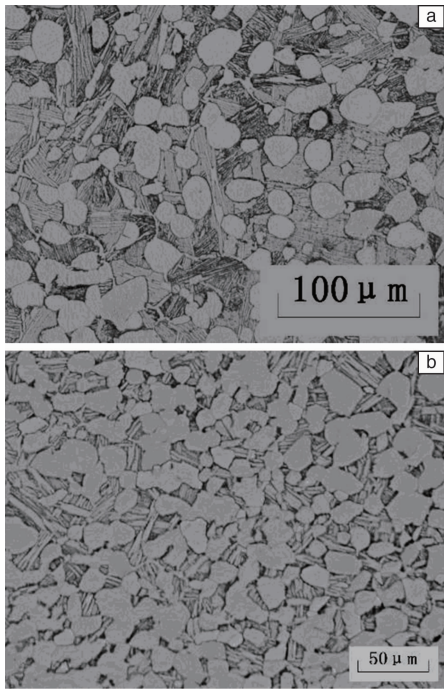


图3 不同固溶温度对锻件固溶时效处理后显微组织的影响: (a)  $T_\beta$ -40℃; (b)  $T_\beta$ -60℃

Fig. 3 Effect of solution temperature on the forging microstructure after solution + aging heat treatment: (a)  $T_\beta$ -40℃; (b)  $T_\beta$ -60℃



3.2.2 固溶温度对力学性能的影响

固溶温度对室温拉伸性能和断裂韧度的影响见表 5。由表 5 可知，固溶温度升高，室温拉伸强度提高，而塑性基本上相当，但断裂韧度降低。经较高温度固溶然后时效处理后，材料中的  $\beta$  转变组织含量较高，也就是析出的次生  $\alpha$  相含量较高，因此材料的室温拉伸强度提高，断裂韧度降低。

表 5 固溶温度对锻件室温位伸性能和断裂韧度的影响

Table 5 Effects of solution temperature on the forging tensile property and fracture toughness at room temperature

Heat treatment process	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$K_{IC}$ /MPa $\cdot$ m <sup>1/2</sup>
No. 1	1001	943	16.4	41.2	72.69
	1009	951	15.6	38.7	77.40
No. 3	970	910	16.5	43.8	77.11
	973	911	15.6	42.6	79.02

固溶温度对室温应变控制的低周疲劳性能的影响见表 6。由表可知，固溶温度升高，室温应变控制的低周疲劳寿命降低。由于片状  $\alpha$  相与片间  $\beta$  相之间的差异，疲劳裂纹萌生于次生  $\alpha$  相的片与片之间界面，当疲劳裂纹在  $\beta$  转变组织中扩展时，会沿着次生  $\alpha$  相的片与片之间的界面扩展。与  $T_\beta-60\text{ }^\circ\text{C}$  相比， $T_\beta-40\text{ }^\circ\text{C}$  固溶处理的初生  $\alpha$  相含量少、片状次生  $\alpha$  相长度更长，这样疲劳裂纹萌生更容易，疲劳裂纹扩展更快，造成低周疲劳性能降低。

固溶温度对风扇盘锻件高温拉伸性能的影响见表 7。固溶温度升高，400  $^\circ\text{C}$  拉伸强度增加，而塑性降低。固溶温度对高温拉伸性能的影响机制与对室温拉伸性能的相同。

表 6 固溶温度对室温应变控制的低周疲劳性能的影响

Table 6 Effect of solution temperature on the forging strain controlled fatigue property at room temperature

Heat treatment process	Kt	Alternating strain amplitude, mean strain	Tatal strain range, mm/mm	Frequency, N/min	Cycle life, N
No. 1	1.0	1.00 $\pm$ 0.02	0.0086	30	20029
					16228
No. 3	1.0	1.00 $\pm$ 0.02	0.0086	30	26171
					25257

表 7 固溶温度对 400  $^\circ\text{C}$  拉伸性能的影响

Table 7 Effect of solution temperature on the forging tensile property at 400  $^\circ\text{C}$

Heat treatment process	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
No. 1	634	511	16.0	53.1
	625	505	17.4	53.9
	615	492	19.2	57.5
No. 3	593	478	19.4	57.0

3.3 固溶后的冷却方式对风扇盘锻件组织和性能的影响

3.3.1 固溶后的冷却方式对组织的影响

固溶后的冷却方式对风扇盘锻件显微组织的影响见图 4。由图可见，两种冷却方式的初生  $\alpha$  相的含量相当，均为双态组织。固溶后水冷的次生  $\alpha$  相尺寸相对于空冷的细小，这是由固溶处理后的冷却速率造成的。

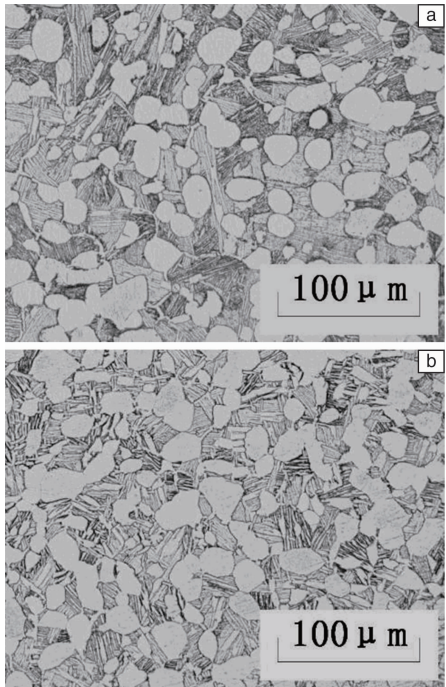


图 4 固溶后的冷却方式对锻件固溶时效处理后显微组织的影响：(a) 水冷；(b) 空冷

Fig. 4 Effect of cooling methods after solution on the forging microstructure heat treated by solution + aging: (a) water cooling; (b) air cooling

3.3.2 固溶后的冷却方式对性能的影响

固溶后的冷却方式对室温拉伸性能和断裂韧度的影响见表 8。固溶后水冷的室温拉伸强度和屈服强度比空冷的分别高 43 MPa 和 49 MPa，而塑性基本上相当；固溶后水冷的断裂韧度低于空冷的。如前所述，冷却速率越慢，次生  $\alpha$  相尺寸越粗化，强化效果越差，强化效果越差，断裂韧度越好。

表 8 固溶后的冷却方式对风扇盘室温拉伸性能和断裂韧度的影响

Table 8 Effect of cooling methods after solution on the forging tensile property and fracture toughness at room temperature heat treated by solution + aging

Heat treatment process	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$K_{IC}$ /MPa $\cdot$ m <sup>1/2</sup>
No. 1	1001	943	16.4	41.2	72.69
	1009	951	15.6	38.7	77.40
No. 4	964	902	16.3	42.6	73.70
	960	896	15.8	39.3	81.68

固溶后的冷却方式对室温应变控制的低周疲劳性能的影响见表 9。固溶后水冷的应变控制的低周疲劳性能比空冷的稍低。

固溶后的冷却方式对高温拉伸性能的影响见表 10。固溶后水冷的 400 ℃ 拉伸强度比空冷的高, 而塑性相当。

表 9 固溶后的冷却方式对风扇盘室温应变控制的低周疲劳性能的影响  
Table 9 Effect of cooling methods after solution on the forging strain controlled fatigue property at room temperature heat treated by solution + aging

Heat treatment process	Kt	Alternating strain amplitude, mean strain	Total strain range, mm/mm	Frequency, N/min	Cycle life, N
No. 1	1.0	1.00 ± 0.02	0.0086	30	20029 16228
No. 4	1.0	1.00 ± 0.02	0.0086	30	21877 25747

表 10 固溶后冷却方式对风扇盘 400 ℃ 拉伸性能的影响  
Table 10 Effect of cooling methods after solution on the forging tensile property at 400 ℃ heat treated by solution + aging

Heat treatment process	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
No. 1	634	511	16.0	53.1
	625	505	17.4	53.9
No. 4	606	476	17.5	50.8
	614	477	17.9	52.4

不同热处理工艺对风扇盘锻件显微组织和室温拉伸性能、400 ℃ 拉伸性能、室温应变控制的低周疲劳性能、断裂韧度等力学性能影响的试验结果表明, TC4 钛合金风扇盘锻件最佳的热处理制度为:  $T_\beta - (40 \sim 60)^\circ\text{C}/2\text{ h}$ , WQ + 700 ℃/2 h, AC。

## 4 结 论

(1) 与普通退火相比, 固溶时效提高了锻件的初生  $\alpha$  相和次生  $\alpha$  相的含量、尺寸和形貌等的均匀性, 获得了更高的室温拉伸强度、高温拉伸强度, 拉伸塑性、低周应变疲劳和断裂韧度等性能基本上相当。

(2) 随固溶温度升高, 初生  $\alpha$  相含量降低,  $\beta$  转变组织含量增加; 室温拉伸强度、400 ℃ 拉伸强度增加, 塑性基本上相当, 但室温低周应变疲劳性能和室温断裂韧度稍微有所降低。

(3) 与空冷相比, 固溶后水冷使组织中次生  $\alpha$  相尺寸更加细小, 具有更高的室温拉伸强度和 400 ℃ 拉伸强

度, 拉伸塑性基本上相当, 室温低周疲劳性能和断裂韧度稍低。

(4) 针对类似本文中风扇盘的大尺寸 TC4 钛合金锻件, 可选择的较优热处理方式为固溶时效, 具体制度为:  $T_\beta - (40 \sim 60)^\circ\text{C}/2\text{ h}$ , WQ + 700 ℃/2 h, AC, 固溶的具体温度根据实际性能要求确定。

## 参考文献 References

- [1] Zhou Lian(周 廉). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(8): 577-584.
- [2] Huang Zhanghong(黄张洪), Qu Henglei(曲恒磊), Deng Chao(邓 超), et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2011, 25(1): 102-107.
- [3] Boyer R R. *Materials Science and Engineering*[J], 1996, A213(1): 103-114.
- [4] Zhu Zhishou(朱知寿), Wang Xinnan(王新南), Tong Lu(童 路), et al. *Materials China*(中国材料进展)[J], 2010, 29(5): 14-17.
- [5] Zhao Yongqing(赵永庆). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2014, 33(7): 398-404.
- [6] Li Chengren(李成仁). *Rare Metals Letters*(稀有金属快报)[J], 1999, 05: 1-2.
- [7] Li Yujia(李煜佳), Xuan Fuzhen(轩福贞), Tu Shandong(涂善东). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2015, 51(6): 45-50.
- [8] Guo Qingqing(郭庆清), Wang Jialiang(王佳亮), Wu Yonghong(吴永红), et al. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*(东北大学学报(自然科学版))[J], 2017, 38(3): 345-349.
- [9] Zhang Chongyuan(张宠元). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2015, 36(1): 80-82.
- [10] Zhao Yongqing(赵永庆), Xin Shewei(辛社伟), Wu Huan(吴欢), et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(5): 779-783.
- [11] Shen Dongdong(申东东), Chen Yanyan(陈艳艳). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2014, 35(12): 2876-2877.
- [12] Liu Wanying(刘婉颖), Zhu Yike(朱毅科), Lin Yuanhua(林元华), et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2013, 27(9): 108-111.
- [13] Wood J R, Russo P A. Heat Treatment of Titanium Alloys[M]// Weiss I, et al. *Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing ed. Minerals, Metals & Materials Society*, 1997: 421-433.
- [14] Wangman G. *Proceedings of the Eighth World Conference on Titanium* [C]. Science and Technology, OCT, 1995.
- [15] Xu Jian(徐 坚), Wang Wenyan(王文焱), Xie Jingpei(谢敬佩), et al. *Rare Metals and Cemented Carbides*(稀有金属与硬质合金)[J], 2014, 42(2): 41-44.
- [16] Qi Lichun(齐立春), Huang Lijun(黄利军), Zhao Xinqing(赵新青), et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2015, 36(S1): 78-83.
- [17] Wang Fuqiang(王富强), Wang Deyong(王德勇). *Titanium Industry*

- Progress*(钛工业进展)[J], 2017, 34(2): 24-27.
- [18] Qi Guangxia(齐广霞), Li Lian(李立安), Shi Likun(史丽坤), *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 20: 191-192.
- [19] Xu Wujiao(徐戊矫), Tan Yuquan(谭玉全), Gong Lihua(龚利华), *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(11): 2932-2936.
- [20] Lei Wenguang(雷文光), Mao Xiaonan(毛小南), Lu Yafeng(卢亚锋). *Heat Treatment of Metals*(金属热处理), 2012, 37(9): 103-107.

(编辑 惠 琼)