

# 壁厚和铸造缺陷对 ZTA15 钛合金 组织及性能的影响

韩云飞<sup>1,2</sup>, 袁兵兵<sup>1,2</sup>, 孙 冰<sup>1,2</sup>, 刘义辉<sup>1,2</sup>, 乔海滨<sup>1,2</sup>, 李渤渤<sup>1,2</sup>

(1. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 河南 洛阳 471000; 2. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘 要:** 利用熔模精密铸造技术, 制备了圆柱形和哑铃形的 ZTA15 钛合金试棒(铸态), 然后进行热等静压处理(HIP 态), 采用室温拉伸、显微组织观察、晶粒度评定、X 射线探伤、扫描电镜(SEM)及能谱分析等方法, 研究了壁厚和铸造缺陷对 ZTA15 钛合金组织及性能的影响。结果表明: 铸态 ZTA15 钛合金存在残余应力和缩松类铸造缺陷, 影响其力学性能, 对工程化应用不利; 壁厚影响 ZTA15 钛合金力学性能, 壁薄位置晶粒度级别较高, 铸态残余应力较大, 力学性能反而较低, 经热等静压后残余应力得到消除, 力学性能稍有提高, 为较佳使用状态; 缩松类缺陷经热等静压后压实闭合, 扩散结合成致密、均匀组织, 提高了力学性能, 且数据分布集中; 夹杂类缺陷对 ZTA15 钛合金的力学性能不利, 尤其是塑性。

**关键词:** ZTA15 钛合金; 熔模精密铸造; 壁厚; 铸造缺陷; 显微组织; 力学性能; 晶粒度

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)06-0084-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Effect of wall thickness and casting defects on microstructure and properties of ZTA15 titanium alloy

Han Yunfei<sup>1,2</sup>, Yuan Bingbing<sup>1,2</sup>, Sun Bing<sup>1,2</sup>, Liu Yihui<sup>1,2</sup>, Qiao Haibin<sup>1,2</sup>, Li Bobo<sup>1,2</sup>

(1. Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China; 2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, Henan, China)

**Abstract:** In this paper, cylindrical and dumbbell shaped ZTA15 titanium alloy test bars (as cast) were prepared by investment casting technology, and then treated by hot isostatic pressing (HIP). The effects of wall thickness and casting defects on the microstructure and properties of ZTA15 titanium alloy were studied by means of room temperature tensile test, microstructure observation, grain size evaluation, X-ray flaw detection, scanning electron microscope (SEM) and energy spectrum analysis. The results show that as-cast ZTA15 titanium alloy has residual stress and shrinkage casting defects, which affect its mechanical properties and are detrimental to its engineering application. The wall thickness affects the mechanical properties of ZTA15 titanium alloy. The grain size at the thin wall position is finer, but the as-cast residual stress is larger, leading to the lower mechanical properties. After hot isostatic pressing, the residual stress is eliminated, and the mechanical properties are slightly improved, which enable the alloy at better use state. The shrinkage defects are compacted and closed after hot isostatic pressing, and the dense and uniform structure is formed by diffusion bonding, which improves the mechanical properties, and the data distribution is centralized. Inclusion defects are detrimental to the mechanical properties of ZTA15 titanium alloy, especially the plasticity.

收稿日期: 2022-07-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB2008300, 2020YFB2008301)。

作者简介: 韩云飞, 1988 年出生, 男, 河南南阳人, 硕士, 工程师, 研究方向: 铸造钛合金, E-mail: 337668161@qq.com。

**Key words:** ZTA15 titanium alloy, investment casting, wall thickness, casting defect, microstructure, mechanical property, grain size

## 0 引言

铸造钛合金与其他的铸造合金一样,其性能有较大的分散度,这种分散度通过热等静压可获得较大改善,铸件壁厚对力学性能有一定的影响,特别是塑性,这主要是由于冷却速度不同造成显微组织不同和薄壁铸件冷却速度快,得不到很好的补缩,易形成分散的缩松引起的<sup>[1]</sup>。熔模精密铸造钛合金经常出现缩松、缩孔、气孔和夹杂等各类缺陷,也影响铸件的性能,通过热等静压(HIP)处理,使铸件内部的封闭气孔、缩松被压实闭合,并扩散结合成致密的组织,提高铸件的力学性能<sup>[2-3]</sup>。

ZTA15 钛合金名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V,属于近  $\alpha$  型钛合金<sup>[4]</sup>,与俄罗斯 BT20 和 BT20JI 合金相似<sup>[5-6]</sup>。随着热等静压和热处理工艺的应用,ZTA15 钛合金铸件的性能基本接近其变形件,应用于航天、航空等领域的大型结构件<sup>[7]</sup>。

目前,国内外对钛合金组织及性能的研究主要集中在锻轧钛合金上,针对铸造钛合金组织及性能的研究少有报道。工业化生产的钛合金铸件结构复杂,存在薄壁和厚壁交接情况,以往采用圆柱形试棒检测组织和性能,其横截面是固定的,无法准确反映铸件薄壁区域的组织和性能,笔者选用 ZTA15 钛合金制备铸态和 HIP 态的圆柱形及哑铃形试棒,分别模拟不同壁厚铸件,采用室温拉伸、显微组织观察、晶粒度评定、X 射线探伤、扫描电镜(SEM)及能谱分析等方法,研究了壁厚和铸造缺陷对其组织及性能的影响,支撑了 ZTA15 钛合金铸件的推广应用。

## 1 试验方法

本试验所用 ZTA15 钛合金试棒(铸态)采用熔模精密铸造工艺制备,首先制作了圆柱形及哑铃形的耐火材料型壳,然后使用 VAC-150 真空自耗电极凝壳炉浇铸成型,浇铸制度:电流 22~23 kA、真空度<0.9 Pa,电压 40 V。圆柱形及哑铃形试棒的最小横截面不同,分别为  $\varnothing 16$  mm 和  $\varnothing 8$  mm,在满足标准拉伸试样尺寸的前提下,哑铃形试棒更能体现铸件厚薄交接的实际状态,借此研究壁厚对钛合金组织及性能的影响,如图 1 所示。

圆柱形及哑铃形铸态试棒进行热等静压处理(HIP 态),热等静压制度:在 100~140 MPa 氩气压

力下,温度  $920 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温 2~2.5 h,随炉冷至  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。

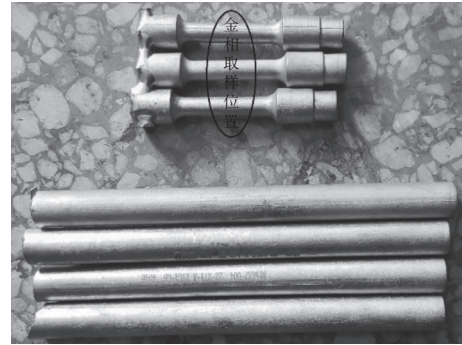


图 1 圆柱形和哑铃形试棒

Fig. 1 Cylindrical and dumbbell shaped test bars

首先使用 MG226 高频恒压 X 射线机检测铸态和 HIP 态的圆柱形及哑铃形试棒的内部缺陷情况,然后各随机加工 5 根标准拉伸试样,如图 2 所示。使用 250 kN 材料试验机在室温下进行拉伸试验,各得到 5 组力学性能数据,并取其平均值。使用 Quanta650 扫描电子显微镜和 Genesis X 射线能谱仪对拉伸试样断口分别进行形貌观察和能谱分析。

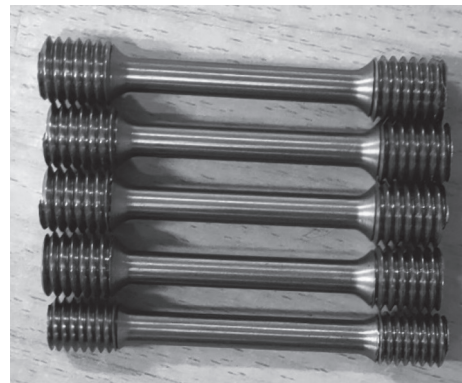


图 2 标准拉伸试样

Fig. 2 Standard tensile samples

从铸态和 HIP 态的圆柱形试棒横向截面( $\varnothing 16$  mm)随机切取 3 个金相试样;从铸态和 HIP 态的哑铃形试棒最小横向截面( $\varnothing 8$  mm)随机切取 3 个金相试样,取样位置如图 1 所示。使用 OLYMPUS GX71 金相显微镜按照 GB/T 5168—2020《钛及钛合金高低倍组织检验方法》、GB/T 6611—2008《钛及钛合金术语和金相图谱》和 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》进行显微组织观察及晶粒度检测。

从试棒上切取屑样和块样进行化学成分检验,检验结果见表 1,满足 GJB2896A—2007 标准要求。

表1 ZTA15 钛合金化学成分  
Table 1 The chemical compositions of ZTA15 titanium alloy

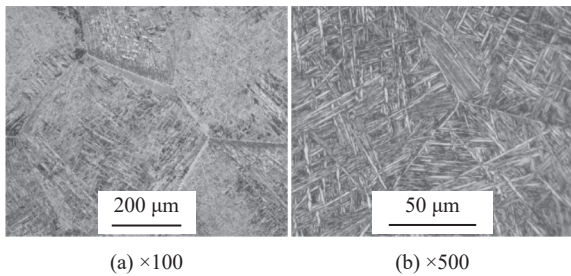
	主要成分					杂质含量					
	Ti	Al	V	Zr	Mo	Fe	Si	C	N	H	O
标准要求	基	5.5~6.8	0.8~2.5	1.5~2.5	0.5~2.0	0.25	0.15	0.13	0.05	0.01	0.16
实测值	基	6.49	2.02	1.60	1.82	0.048	0.018	0.012	0.006 6	0.002 4	0.093

## 2 试验结果与分析

### 2.1 ZTA15 钛合金铸态组织和性能

#### 2.1.1 ZTA15 钛合金铸态显微组织和晶粒度

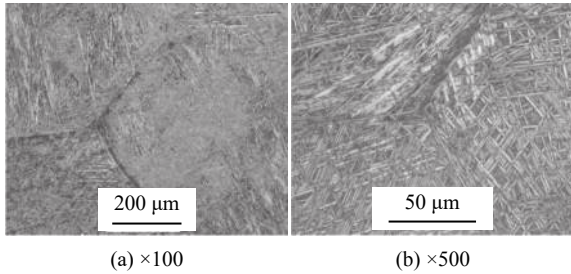
圆柱形及哑铃形试棒的铸态显微组织均为针状  $\alpha$ +晶间  $\beta$ +晶界  $\alpha$ , 具备典型的网篮组织特征,  $\beta$  相快速冷却转变为针状  $\alpha$  相,  $\alpha$  相在晶界出现, 原生  $\beta$  晶粒转变成成长, 在一些地方呈编织状, 如图 3、4 所示。



(a)  $\times 100$  (b)  $\times 500$

图 3 圆柱形试棒铸态显微组织

Fig. 3 As-cast microstructure of cylindrical test bar

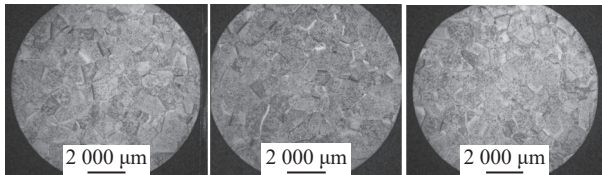


(a)  $\times 100$  (b)  $\times 500$

图 4 哑铃形试棒铸态显微组织

Fig. 4 As-cast microstructure of dumbbell shaped test bar

ZTA15 钛合金铸态  $\alpha$  晶粒粗大, 根据 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》中的比较法进行晶粒度评定, 结果如图 5、6 所示。



(a) 试样 1-1, 3.0 级 (b) 试样 1-2, 2.5 级 (c) 试样 1-3, 2.5 级

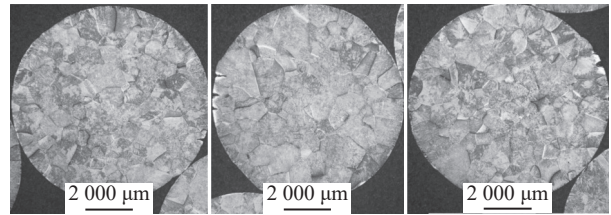
图 5 铸态圆柱形试棒晶粒度

Fig. 5 Grain size of as-cast cylindrical test bar

#### 2.1.2 ZTA15 钛合金铸态缺陷和室温拉伸性能

铸造钛合金存在残余应力, 对材料性能存在不利影响, 应在后处理状态下使用<sup>[8-9]</sup>。圆柱形及哑铃形试棒经 X 射线探伤, 发现其内部均存在缩松类缺陷, 但哑铃型试棒缩松缺陷数量更多, 如图 7 所示, 试棒不做任何处理, 直接加工成标准拉伸试样。

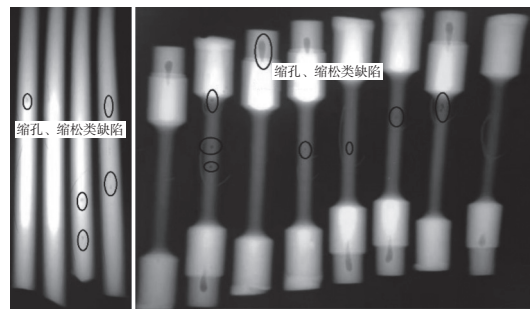
陷, 但哑铃型试棒缩松缺陷数量更多, 如图 7 所示, 试棒不做任何处理, 直接加工成标准拉伸试样。



(a) 试样 2-1, 2.0 级 (b) 试样 2-2, 2.5 级 (c) 试样 2-3, 2.0 级

图 6 铸态哑铃形试棒晶粒度

Fig. 6 Grain size of as-cast dumbbell shaped test bar



(a) 铸态圆柱形试棒 (b) 铸态哑铃形试棒

图 7 铸态试棒 X 射线探伤底片

Fig. 7 X-ray flaw detection negative film of as-cast bar

室温拉伸力学性能见表 2, 与圆柱形试棒相比, 哑铃形试棒的晶粒较小、缩松类缺陷较多、残余应力较大, 室温拉伸强度和塑性反而较小, 其中部分试样的数据不满足 GJB2896A—2007 标准要求, 尤其是规定非比例延伸强度和塑性, 说明铸态缩松类缺陷严重影响其力学性能, 对材料工程化应用不利。

表 2 铸态试样室温拉伸力学性能

Table 2 Tensile mechanical properties of as-cast samples at room temperature

试棒形状	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
标准要求	$\geq 885$	$\geq 785$	$\geq 5$	$\geq 12$
圆柱形	917 ~ 992	788 ~ 813	4 ~ 9.5	11 ~ 19
哑铃形	934 ~ 987	774 ~ 798	3.5 ~ 11.5	9 ~ 15

### 2.2 ZTA15 钛合金 HIP 态组织和性能

#### 2.2.1 ZTA15 钛合金 HIP 态显微组织和晶粒度

圆柱形及哑铃形试棒的 HIP 态显微组织均为片状  $\alpha$ +晶间  $\beta$ +晶界  $\alpha$ , HIP 温度  $920\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ , 低于  $\beta$  相变温度 ( $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ ), 其组织“遗传”于

铸态组织, 针状  $\alpha$  相明显宽化成片状,  $\alpha$  晶界宽化且增多, 如图 8、9 所示。

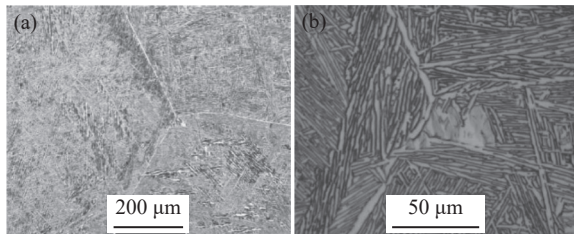


图 8 圆柱形试棒 HIP 态显微组织  
Fig. 8 HIP microstructure of cylindrical test bar

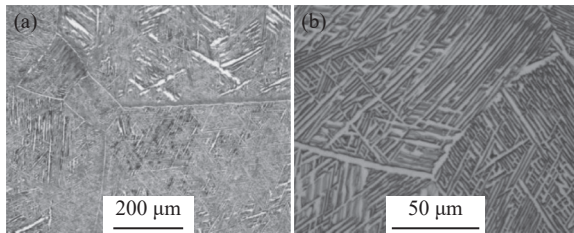
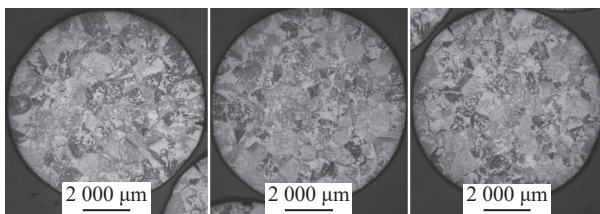


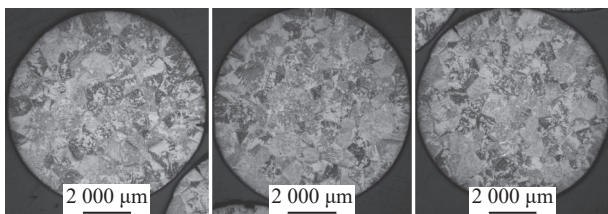
图 9 哑铃形试棒 HIP 态金相显微组织  
Fig. 9 Microstructure of HIP dumbbell shaped test bar

HIP 态  $\alpha$  晶粒仍然粗大, 根据 GB/T 6394-2017 《金属平均晶粒度测定方法》中的比较法, 进行晶粒度评定, 结果如图 10、11 所示, 与铸态相比, 晶粒度级别均提高, 尤其是哑铃形试棒, 这是因为经 HIP 高温高压后, 内部缩松类缺陷压实闭合, 并扩散成致密、均匀的组织, 晶粒度级别提高。



(a) 试样 2-1, 1.0 级 (b) 试样 2-2, 1.5 级 (c) 试样 2-3, 1.0 级

图 10 HIP 态圆柱形试棒晶粒度  
Fig. 10 Grain size of HIP cylindrical test bar



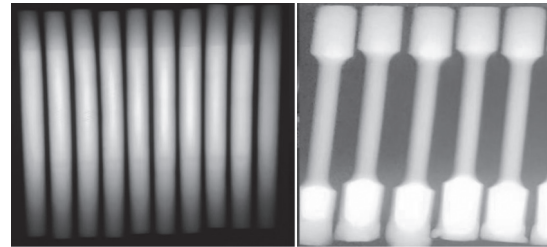
(a) 试样 2-1, 1.0 级 (b) 试样 2-2, 1.5 级 (c) 试样 2-3, 1.0 级

图 11 HIP 态哑铃形试棒晶粒度  
Fig. 11 Grain size of HIP dumbbell shaped test bar

### 2.2.2 ZTA15 钛合金 HIP 态缺陷和室温拉伸性能

HIP 态圆柱形及哑铃形试棒经 X 射线探伤后发现其内部缩松类缺陷已压实闭合, 见图 12, 其室

温拉伸力学性能均得到较大提高, 数据分布集中, 如表 3 所示, 哑铃形试棒力学性能稍好, 这与其 HIP 后残余应力得到消除及晶粒度级别较高有关, 在此状态下的 ZTA15 钛合金适合工程化应用。



(a) HIP 态圆柱形试棒 (b) HIP 态哑铃形试棒

图 12 HIP 态试棒 X 射线探伤底片  
Fig. 12 X-ray flaw detection negative film of HIP test bar

表 3 HIP 态试样室温拉伸力学性能  
Table 3 Tensile mechanical properties of HIP state samples at room temperature

试棒形状	抗拉强度 $R_m$ /MPa	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 $A$ /%	断面收缩率 $Z$ /%
标准要求	$\geq 885$	$\geq 785$	$\geq 5$	$\geq 12$
圆柱形	932 ~ 942	813 ~ 825	9.5 ~ 12.5	17 ~ 21
哑铃形	936 ~ 947	816 ~ 841	4 ~ 12	9 ~ 22

由表 3 可知, 部分哑铃形试棒的塑性指标不满足标准要求, 对拉伸试样断口进行扫描电镜形貌观察, 发现存在微小夹杂缺陷, 如图 13 所示, 对夹杂缺陷进行能谱分析, 发现 O 和 Y 元素含量较高, 见图 14。从断口形貌和能谱分析可知: 试样断口位置存在型壳面层材料  $Y_2O_3$  的夹杂, 内部夹杂缺陷影响了 ZTA15 钛合金的室温拉伸性能, 尤其是塑性。

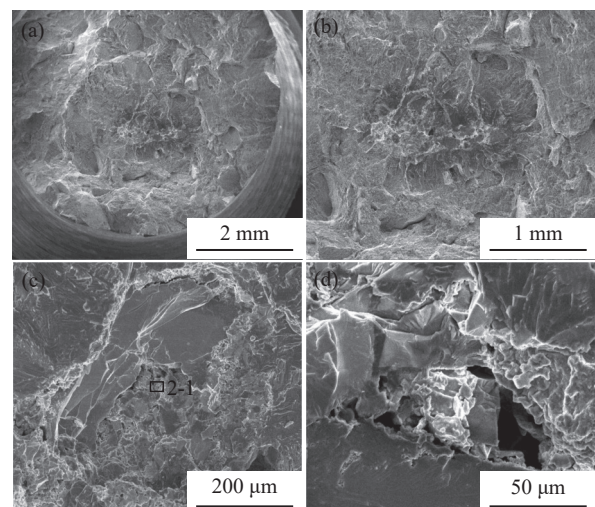


图 13 哑铃形试棒拉伸断口扫描电镜形貌  
Fig. 13 SEM photos showing fracture appearance of dumbbell tensile sample

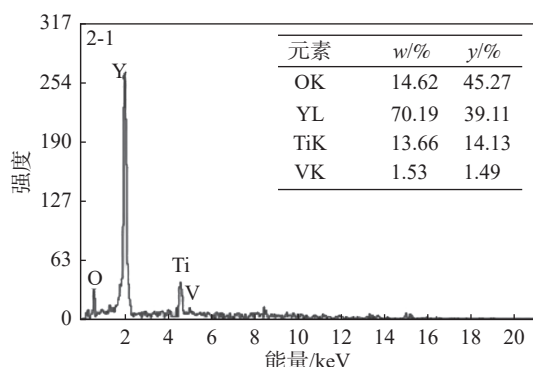


图 14 哑铃形试棒拉伸断口能谱分析结果

Fig. 14 Energy spectrum analysis results of dumbbell tensile sample fracture

### 3 结论

1) 铸态 ZTA15 钛合金存在残余应力和缩松类铸造缺陷, 影响其力学性能, 对工程化应用不利。

2) 壁厚影响 ZTA15 钛合金力学性能, 壁薄位置晶粒度级别较高, 铸态残余应力较大, 力学性能反而较低, 经热等静压后残余应力得到消除, 力学性能稍有提高, 为较佳使用状态。

3) 缩松类缺陷经热等静压后压实闭合, 扩散结合成致密、均匀组织, 提高了力学性能, 且数据分布集中。

4) 夹杂类缺陷对 ZTA15 钛合金的力学性能不利, 尤其是塑性。

### 参考文献

- [1] Xie Chengmu. Titanium and titanium alloy casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 32.  
(谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 32.)
- [2] Yang Weiguang, Zhao Jiaqi, Nan Hai, *et al.* Effect of hot isostatic pressing process parameters on microstructure of ZTC4 titanium alloy[J]. *Materials Engineering*, 2011, (9): 25-28.  
(杨伟光, 赵嘉琪, 南海, 等. 热等静压工艺参数对ZTC4钛合金组织的影响规律[J]. *材料工程*, 2011, (9): 25-28.)
- [3] Yang Weiguang, Zhao Jiaqi, Nan Hai, *et al.* Effect of hot isostatic pressing process parameters on mechanical properties of ZTC4 titanium alloy[J]. *Materials Engineering*, 2011, (10): 42-46.  
(杨伟光, 赵嘉琪, 南海, 等. 热等静压工艺参数对ZTC4钛合金力学性能的影响[J]. *材料工程*, 2011, (10): 42-46.)
- [4] Paulisova E A. Metallography of titanium alloys[M]. Translated by Chen Shiqing. Beijing: National Defense Industry Press, 1986: 4-6.  
(鲍利索娃 E A. 钛合金金相学[M]. 陈石卿, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986: 4-6.)
- [5] Zhou Yanbang. Introduction to titanium alloy casting[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 3.  
(周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 3.)
- [6] China Aeronautical Materials Manual Compilation Committee. China aeronautical materials manual: volume 4 titanium alloy and copper alloy[M]. Beijing: Standards Press of China, 2000: 74-75.  
(中国航空材料手册编写委员会. 中国航空材料手册: 第4卷 钛合金、铜合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 74-75.)
- [7] Huang Xu. Advanced aeronautical titanium alloy materials and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.  
(黄旭. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.)
- [8] Lou Guantao. Effect of post-treatment on microstructure and properties of ZTC4 cast titanium alloy[J]. *Material Development and Application*, 2010, 25(3): 8-10.  
(娄贯涛. 后处理对ZTC4铸造钛合金材料组织及性能的影响[J]. *材料开发及应用*, 2010, 25(3): 8-10.)
- [9] Lou Guantao. Effect of post-treatment on microstructure and properties of ZTA5 cast titanium alloy[J]. *Material Development and Application*, 2011, 26(3): 1-3.  
(娄贯涛. 后处理对ZTA5铸造钛合金材料组织及性能的影响[J]. *材料开发及应用*, 2011, 26(3): 1-3.)

编辑 杨冬梅