

# 热等静压和锻造对 ZTC4 组织及力学性能的影响

娄贵涛

(中国船舶重工集团公司, 洛阳 471039)

**摘要:** 研究了 ZTC4 铸造钛合金材料在热等静压和锻造状态下的微观组织和力学性能。结果表明: 该合金经热等静压后, 强度、硬度降低, 塑性提高, 力学性能数据分散度降低, 经锻造退火后的性能全面优于铸造和 HIP 态的性能。

**关键词:** ZTC4 钛合金; 热等静压; 锻造; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TF 804.3 文献标志码: A

## Influence of HIP and forging on microstructure and mechanical properties of ZTC4 cast titanium alloy

LOU Guan-tao

(Luoyang Ship Materials Research Institute, Luoyang 471039, China)

**Abstract:** The microstructures and mechanical properties of ZTC4 cast titanium alloy under different conditions were studied. The results show that the general properties of ZTC4 cast alloy are improved after HIP, the scattering degree of mechanical properties is reduced. The mechanical properties of ZTC4 by forging are much better than these by casting or HIP.

**Key words:** ZTC4 titanium alloy; HIP; forging; microstructures; mechanical properties

ZTC4 是一种中等强度的  $\alpha+\beta$  型铸造钛合金, 具有良好的综合性能。在退火状态下使用, 可在 350 下长期工作, 该合金具有良好的铸造性能和焊接性能, 适合于制造承受较高应力的静态航空航天用结构铸件。目前, 我国的航空航天类钛合金铸件 90% 以上是由 ZTC4 合金制造的, 该合金名义成分为 Ti-6Al-4V<sup>[1]</sup>。关于铸件的技术条件和常规性能指标已列入 GB6614—1994《钛及钛合金铸件》和 GJB2896A—2007《钛及钛合金熔模精密铸件规范》和 Q/W 67A—2007《空间相机钛合金 ZTC4 铸件规范》中。虽然该合金常规性能列入了相关钛合金材料标准, 但对该材料铸造后在热等静压处理状态下和锻造退火处理状态的组织和性能缺乏系统研究。因此, 系统研究该合金材料在不同后处理状态下的性能及微观组织对实际工程应用具有重要意义, 为该材料实际工程应用提供数据支持。

## 1 实验

铸造所用模具为机加工石墨型, 石墨型在 ZJR-1200M 真空井式退火炉中除气。熔化设备为 ZN-180 真空电弧炉。熔铸工艺为: 1) 熔化稳定阶段真空度小于 5 Pa; 2) 熔化电流不小于 20 kA; 3) 浇注方式为静止状态浇注。铸件浇注成型后为消除内部缺陷需进行热等静压处理。热等静压温度为 910~930 , 氩气压力为 100~140 MPa, 保温时间为 2~2.5 h。

锻造试样为浇注铸造试样用同一根钛锭。开坯锻造温度为 950~1 100 , 变形量控制在 20%~30%, 锻造加热温度为 800~950 , 采用微氧化性火焰炉加热, 变形量为 60%~75%。锻造后退火处理在 VDF4.5T 真

空井式退火炉中进行，加热温度为700℃，保温时间为2 h，真空度小于10 Pa。

铸件力学性能测试试样从d16 mm×140 mm的铸件上横向截取。锻件的力学性能测试试样从d60 mm×200 mm的锻件上横向截取，拉伸试验按GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》进行，试样为R7短试样，铸件金相试样从d16 mm×140 mm的铸件上横向截取。锻件金相试样从d60 mm×200 mm的锻件上横向截取，金相检验按GB/T5168—2008《两相钛合金高低倍组织检验方法》和GB/T6611—2008《钛及钛合金术语和金相图谱》进行，实验设备为OLYMPUS GX71金相显微镜，浸蚀剂为：5%(体积分数)氢氟酸+12%(体积分数)硝酸+83%(体积分数)水溶液。

## 2 结果与分析

### 2.1 ZTC4合金的化学成分

ZTC4钛合金属 $\alpha+\beta$ 型铸造钛合金材料，通过 $\alpha$ 稳定元素Al和 $\beta$ 稳定元素V对合金进行固溶强化。向钛合金中加入合金元素Al可以降低合金的熔点，提高 $\beta$ 转变温度，使 $\beta$ 稳定元素在 $\alpha$ 相中的溶解度增大，在室温和高温都起到强化合金的作用；同时还降低合金的密度，提高合金的抗氧化性能和可热加工性能。V的加入在提高合金强度的同时可以改善钛合金的塑性。因此，该合金具有较高的强度和良好的工艺塑性。

取浇注的ZTC4试样进行化学成分分析，结果见表1。

表1 ZTC4合金的化学成分

Table 1 Composition of ZTC4 alloy (mass fraction, %)

Main component			Impurity					
Al	V	Ti	Fe	Si	C	N	H	O
6.06	3.97	Bal.	0.032	0.025	0.010	0.011	0.001	0.132

### 2.2 ZTC4在不同状态下的组织

ZTC4铸造钛合金材料试样在铸造状态、HIP态、锻造+700℃退火态下的低、高倍组织分别如图1(a)、1(b)、2(a)、2(b)、3(a)、3(b)所示。

ZTC4合金在铸造状态下金相组织：集束状片状 $\alpha+\beta$ 片间 $\beta+\alpha$ 晶界 $\alpha$ (见图1(a)、(b))。

ZTC4合金在HIP态下金相组织：集束状片状 $\alpha+\beta$ 片间 $\beta+\alpha$ 晶界 $\alpha$ (图2(a)和(b))。

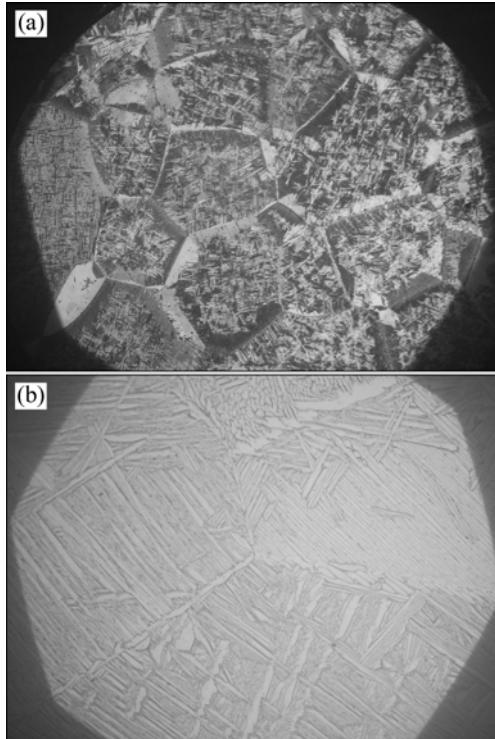


图1 ZTC4合金铸态组织

Fig.1 Microstructures of as-cast ZTC4 alloy: (a) In lower magnification; (b) In higher magnification

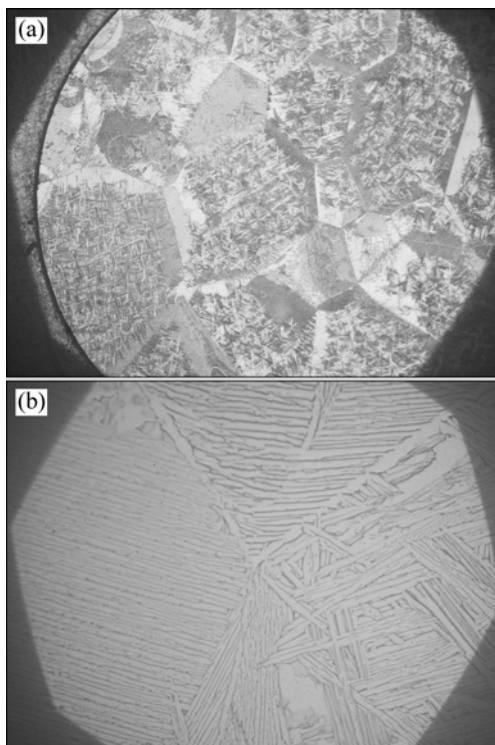


图2 ZTC4合金HIP态组织

Fig.2 Microstructures of ZTC4 alloy as-HIP: (a) In lower magnification; (b) In higher magnification

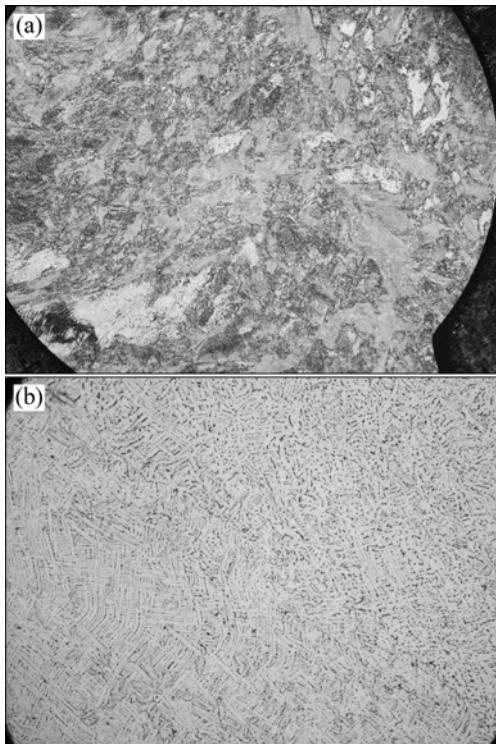


图3 ZTC4合金锻造+700 退火态组织

Fig.3 Microstructures of as-forged ZTC4 alloy: (a) In lower magnification; (b) In higher magnification

ZTC4合金在锻造+700 退火态下金相组织: 网篮状 $\alpha+\beta$ 组织, 经锻造变形加工后, 原始 $\beta$ 晶界消失, 在铸造和热等静压态的集束片状 $\alpha+\beta$ 组织转变成细小的网篮状组织(见图3(a)和(b))。

由ZTC4合金在不同处理状态下微观组织可以看出, ZTC4合金在铸造状态和热等静压状态下其金相组织都由集束片状 $\alpha+\beta$ 组织组成, ZTC4合金经热等静压处理后, 其微观组织略显宽化, 合金组织趋于均匀稳定, 这也是ZTC4合金经热等静压处理后, 强度下降、塑性提高的原因。组织粗大与热等静压时合金在高温区长时间保温有关, ZTC4合金经锻造退火处理后, 由于材料经历了较大的塑性变形, 原始的 $\beta$ 晶界消失, 由铸造和热等静压状态下的集束片状 $\alpha+\beta$ 组织转变成经锻造退火后的细小的网篮状组织, 材料的致密度也进一步提高, 锻造态密度为4.45 g/cm<sup>3</sup>, 铸造态密度为4.42 g/cm<sup>3</sup><sup>[2]</sup>, 这也是ZTC4钛合金材料经锻造退火处理后, 其材料性能全面提高的主要原因。

### 2.3 ZTC4在不同状态下的力学性能

ZTC4铸造钛合金试样在不同后处理状态下的力学性能如表2所示。

表2 ZTC4合金在不同状态下的力学性能

Table 2 Mechanical properties of ZTC4 alloy under different conditions

State	$R_m/\text{MPa}$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$
As cast	880–920	800–845	5.0–8.5
HIP	860–885	775–795	6.0–6.5
Forged+700 annealed	990–995	915–920	11.0–14.0
State	$Z/\%$	HB	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
As cast	11.0–13.5	321–329	4.42
HIP	12.5–22.5	302–306	4.42
Forged+700 annealed	39.0–42.5	345–368	4.45

由表2可以看出, ZTC4铸造钛合金材料经热等静压后, ZTC4铸造钛合金材料的强度降低约20~50 MPa, 但其塑性指标尤其是断面收缩率有较大程度的提高, 其力学性能数据分布集中稳定, 这一点也可从图2(a)、(b)中的集束片状 $\alpha$ 和晶界 $\alpha$ 最为宽化、增多看出。ZTC4合金经锻造退火处理后, 由于材料经过了较大的塑性变形, 原始的 $\beta$ 晶界消失, 由铸造和热等静压状态下的集束片状 $\alpha+\beta$ 组织转变成经锻造退火后的细小的网篮状组织, 材料的硬度和致密度也进一步得到提高, 这也是ZTC4钛合金材料经锻造退火处理后, 其材料性能全面提高的主要原因。

## 3 结论

1) ZTC4铸造钛合金材料经热等静压处理后, 强度、硬度降低, 塑性提高, 力学性能数据分散度比铸造状态的有所降低。

2) ZTC4铸造钛合金材料经锻造退火后, 组织为细小的网篮状 $\alpha+\beta$ 组织, 其力学性能全面优于铸造状态和热等静压状态下的力学性能。

## REFERENCES

- [1] 周彦帮. 钛合金铸造概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 33–35.
- [2] 黄嘉琥. 钛制备化工设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 172–178.

(编辑 陈卫萍)