

# 铸造 Ti6Al4V 合金的性能

六二一所钛合金铸造组

铸造 Ti6Al4V 合金具有良好的综合性能,是目前国内外较为成熟、应用甚广的一种合金。它在航空上有着较大的应用潜力,受到设计部门和工厂的重视。根据 1966~1976 年开展的铸造 Ti6Al4V 合金的几种典型零件的研制和几批梅花试棒的试验结果,参考国内外的有关资料,对我所 1971 年编写的《6Al-4V 铸造钛合金性能简介》加以补充,供有关工厂和设计部门参考。

从发动机压气机的工作条件上分析,铸造 Ti6Al4V 合金可以代替某些钢铸件和铝铸件,以减轻发动机的结构重量和满足高性能的需要。该合金的工作温度可达 350℃ 左右,虽然目前主要考虑研制静止结构件,但据国外报道铸造 Ti6Al4V 合金也有可能用于某些转动零件<sup>[1]</sup>。

十多年来,我们为飞机、发动机研制的 Ti6Al4V 合金铸件有支撑座、整流叶片、内半环、机轮轮毂、刹车壳体和气缸座等。其中有的零件经受了地面长期试车、试飞的考验,结果良好。

## 一、熔炼-浇注工艺

浇注用 Ti6Al4V 母合金自耗电极系由压制海绵钛电极经二次真空自耗电弧熔炼而成,亦可采用表面经扒皮后的棒材。海绵钛电极可按名义成份(6%Al, 4%V)配料。

母合金自耗电极在真空自耗电弧凝壳炉内再次重熔,当水冷铜坩埚凝壳内的熔融钛达一定数量后,灭弧并立即将钛液浇入铸型。根据铸件的几何特征和质量要求,可分别采用静止浇注或离心浇注方法。

由于熔融钛的高活性,容易引起与造型材料的反应,使铸件表面吸收碳、氧、氮、氢等间隙元素杂质<sup>[2]</sup>,产生硬而脆的沾污层(或称“α 层”),造成对塑性和疲劳强度的不利影响<sup>[3]</sup>,所以对重要铸件必须设法防止和消除这种“α 层”的存在。目前采用的铸型有石墨加工型、石墨捣实型和精密熔模铸型等。

铸造 Ti6Al4V 合金具有窄的凝固温度范围和好的流动性,可以充填形状复杂的薄截面。由于真空自耗电弧熔炼对钛液的过热度低,在增加熔化功率的情况下,虽然增加了自耗电极的熔化速率,但对提高熔池过热温度是很有限的,对改善该合金的补缩性能达不到明显的效果。浇注时钛液进入铸型已接近凝固点,在铸型壁的激冷作用下,往往不大可能产生顺序凝固所必需的条件。这样就导致了在铸件中形成分散缩孔和气孔的倾向,因此铸造 Ti6Al4V 合金铸件浇冒系统的设计要比相应钢铸件的大,对大的薄壁部位要考虑一定斜度(约 2°)<sup>[4,5]</sup>。从目前铸件的冶金质量来看,对铸造工艺性较差的零件通常需要补焊。只要补焊工艺适当,铸件性能不会明显降低。

## 二、化学成分与热处理

铸造 Ti6Al4V 合金的化学成分的技术要求见表 1。

表 1 铸造 Ti6Al4V 合金化学成分的技术要求<sup>[6]</sup>

主要成分, %			杂质, % 不大于					
Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
基体	5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15

该合金属于 $\alpha+\beta$ 型合金，通常在退火状态下使用。目前采用的退火规范为 $800\pm 15^{\circ}\text{C}$  1小时，空冷（视铸件壁厚不同，其保温时间可适当增减）。 $800^{\circ}\text{C}$ 以下退火对铸造状态的组织结构和室温机械性能无明显影响。国外目前趋向于采用 $700^{\circ}\text{C}$ 退火<sup>[7]</sup>。 $800^{\circ}\text{C}$ 退火状态的显微组织见图1。

该合金可以通过固溶-时效处理强化，但这种热处理会导致合金塑性的明显下降，从目前来看对铸件实用价值不大。

### 三、物理性能

铸造Ti6Al4V合金的熔化温度范围为 $1538\sim 1649^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>。淬火-金相法测定的 $\beta/\alpha+\beta$ 转变温度约为 $990\pm 15^{\circ}\text{C}$ 。

该合金的比重为 $4.42\text{克/厘米}^3$ ，无磁性。其热膨胀系数和导热系数分别见表2、3。

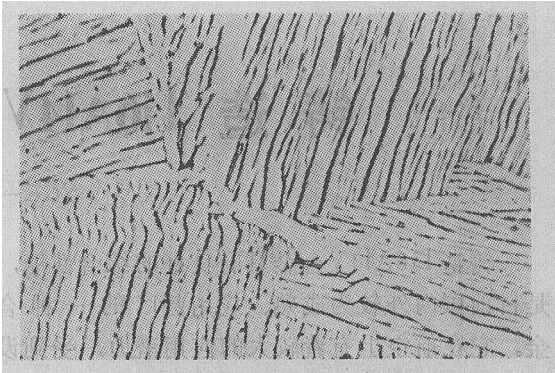


图1 铸造Ti6Al4V合金 $800^{\circ}\text{C}$ 退火状态的显微组织  $\times 500$

表2 铸造Ti6Al4V合金的热膨胀系数

温度, $^{\circ}\text{C}$	20~100	20~200	20~300	20~350
$\alpha \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$	8.93	9.30	9.46	9.45

表3 铸造Ti6Al4V合金的导热系数

温度, $^{\circ}\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700
$\lambda$ 卡/厘米·秒· $^{\circ}\text{C}$	0.021	0.024	0.027	0.029	0.032	0.035	0.037

### 四、机械性能

#### 1. 主要机械性能

该合金的主要机械性能见表4。

#### 2. 室温拉伸和冲击性能

不同浇注方式、不同试样尺寸和退火温度对该合金室温拉伸、冲击性能的影响分别列于表5，示于图2、3。

表4 铸造Ti6Al4V合金的主要机械性能

室 温						高 温	
$\sigma_{0.2}$	$\sigma_b$	$\delta_5$	$\psi$	$\alpha_K$	HB	$\sigma_b^{350^{\circ}\text{C}}$	$\sigma_{100\text{小时}}^{350^{\circ}\text{C}}$
公斤/毫米 <sup>2</sup> 最小值		% 最小值		公斤·米/厘米 <sup>2</sup> 最小值	公斤/毫米 <sup>2</sup> 最大值	公斤/毫米 <sup>2</sup> 最小值	
75	83	5	10	3	328	54	50

注：1. 室温 $\sigma_{0.2}$ 、 $\psi$ 值仅供参考。

2. HB为不少于3个数据的平均值。

表 5 铸造Ti6Al4V合金不同浇注方式试样的室温拉伸和冲击性能

试样来源	静止浇注梅花试棒、叶片*、浇道				离心浇注支撑座、空心叶片**			
铸 型	石墨加工型和捣实型、精密熔模铸型				石墨加工型			
	试 验 最小~最大值	试样数 个	平 均 值	标准误差	试 验 最小~最大值	试样数 个	平均值	标准 误差
$E^{***}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	10900~11600	17	11260	230				
$\sigma_p^{***}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	53.2~83.1	10	58.3	2.97				
$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	76.9~89.5	46	82.9	3.6	78.8~95.5	23	89.4	4.3
$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	82.1~97.5	103	88.8	3.4	91.0~102.0	61	97.3	2.6
$\delta_5$ %	3.4~13.3	89	7.2	1.3	4.4~12.7	61	9.5	2.0
$\psi$ %	7.8~28.7	76	17.9	3.7	12.6~33.7	61	21.1	5.7
$\alpha_K$ 公斤·米/厘米 <sup>2</sup>	3.35~7.07	44	5.53	0.8	3.20~6.30	32	4.30	0.72
硬 度								
HRC	236~302	65	280	11	302~321	19	315	7.24
HB					32.0~36.7	26	34.5	1.25

拉伸试样形状和工作部位尺寸：

\*静止浇注叶片：厚2毫米，宽4毫米的小平板试样；

\*\*离心浇注空心叶片： $\phi 3 \times 15$ 毫米；

\*\*\* $E$ 、 $\sigma_p$ 由 $\phi 10 \times 100$ 毫米大试样测定；

其余试样为 $\phi 5 \times 25$ 毫米。

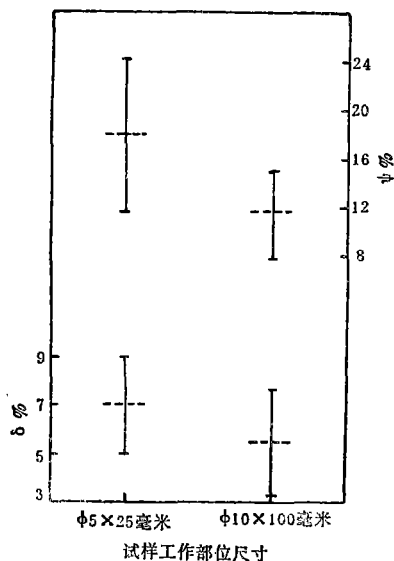


图 2 圆形试样尺寸对铸造Ti6Al4V合金室温拉伸塑性的影响

置信度为95%的上下限范围；

--- 平均值；

试样来源：梅花试棒。

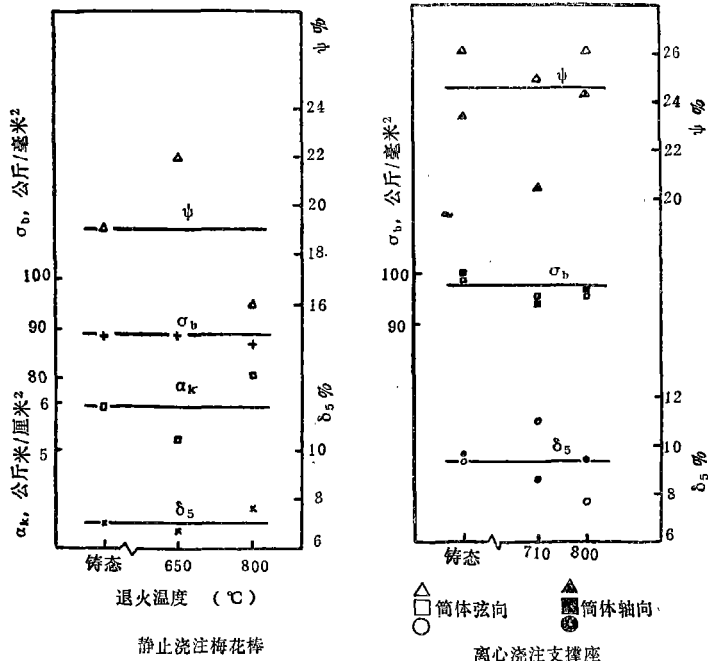


图 3 退火温度对铸造Ti6Al4V合金室温拉伸和冲击性能的影响

试验数据为3~4个试样的平均值。

### 3. 室温疲劳性能

铸造Ti6Al4V合金室温旋转弯曲疲劳极限 $\sigma_{-1} = 20$ 公斤/毫米<sup>2</sup>。其室温旋转弯曲和轴向拉伸疲劳曲线分别示于图4、5。

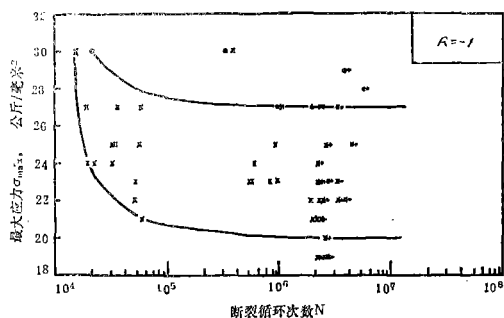


图4 铸造Ti6Al4V合金梅花试棒(800°C退火)室温旋转弯曲疲劳性能

●—悬臂梁式光滑试样;  
×—双支梁式光滑试样;  
→—没有断裂。

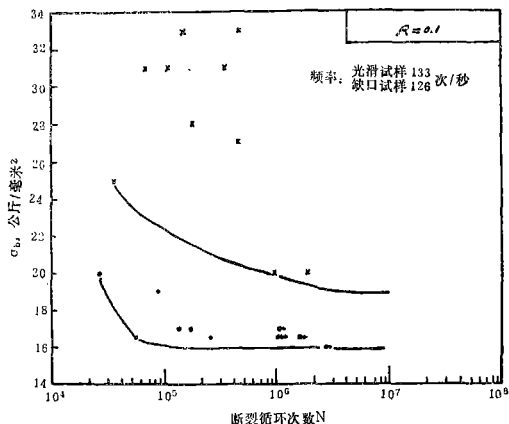


图5 铸造Ti6Al4V合金梅花试棒(800°C退火)室温轴向拉伸疲劳性能

×—光滑试样; ●—缺口试样; →—没有断裂。

表6 铸造Ti6Al4V合金350°C的拉伸性能

试样来源	梅花试棒				
铸型	石墨加工型				
试样状态	800°C退火				
	试验 最小~最大值	试样 个数	平均值	标准 误差	
$\sigma_b$ , 公斤/毫米 <sup>2</sup>	50.5~61.9	33	54.7	3.5	
$\delta_5$ , %	9.1~15.3	32	11.6	1.8	
$\psi$ , %	22.9~45.5	32	35.5	6.0	

注: 试样工作部位尺寸为 $\phi 5 \times 25$ 毫米。

### 4. 高温拉伸性能

铸造Ti6Al4V合金350°C的拉伸性能列于表6, 不同试验温度拉伸性能的变化见图6。

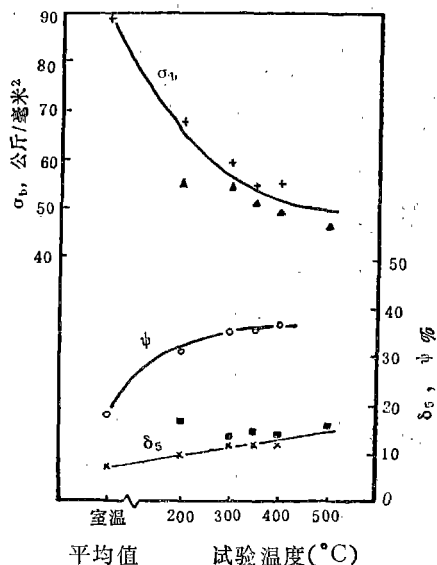


图6 铸造Ti6Al4V合金(退火状态)高温拉伸性能  
+ × ○—梅花试样;

▲ ■—静止浇注叶片(切取小平板试样);

除350°C外, 每个试验点为3~4个试样的平均值。

表7 铸造Ti6Al4V合金的高温持久强度

试样来源	静止浇注梅花试棒			离心浇注叶片		
铸型	石墨加工型和捣实型					
试验状态	800°C退火					
试验温度 °C	$\sigma$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	断裂 时间 小时	试样 个数	$\sigma$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	断裂 时间 小时	试样 个数
200	62	>152.5	3			
250				59	>201	4
300	58	>150	3	55	>193	4
350	51	>342.5	2			
	54	>200	4	54	>200	4
	56	>145	11			
400	52	>150	2			
	53	>258	2	50	>201	5
	54	>164	3			

注: 试样工作部位尺寸: 梅花试棒:  $\phi 5 \times 25$ 毫米;  
叶片: 厚2毫米、宽4毫米的小平板试样。

## 5. 高温持久性能

表7为该合金在不同试验温度下光滑试样的高温持久强度。

## 6. 高温蠕变性能

该合金梅花试棒 800°C 退火状态 350°C、100 小时的蠕变极限大于或等于 40 公斤/毫米<sup>2</sup>。

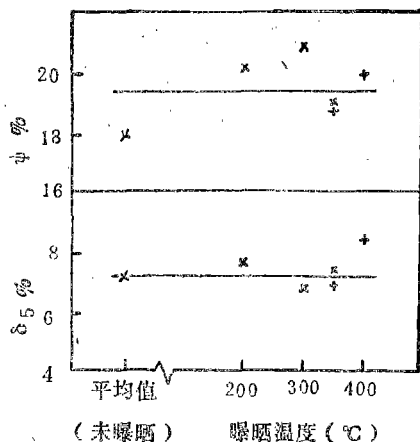


图7 铸造Ti6Al4V合金梅花试棒热稳定性试验的室温拉伸塑性

曝晒条件: 100小时;

×—铸态;

+—800°C、1小时, 空冷;

试验点为3~4个试样的平均值。

(上接第25页)

5. 叶片合金的晶界存在大量连续的MC碳化物相, 对热疲劳性能不利, 而“咬合状”晶界较好。

## 参 考 文 献

- [1] D.A. Woodford, 《Materials Science and Engineering》16 (1974) 5~43.
- [2] S. S. Masson, 《Thermal Stress and Low Cycle Fatigue》(1966).
- [3] E. Glenny, 《Thermal and High Strain Fatigue》

## 7. 热稳定性

该合金梅花试棒 100 小时热稳定性试验结果见图7。

## 参 考 资 料

- [1] AD728225.
- [2] Причины образования при сварке трещин в литейных титановых сплавах, Справочное производство, 1973, №9, стр.23.
- [3] 钛-6铝-4钒合金, 有色金属研究院201室.
- [4] Aerospace Structural Metals Handbook 1970, AFML-TR-68-115.
- [5] D. M. Coney 等, Precision Casting of Ti6Al4V, Transaction Vacuum Metallurgy Conference 1969, p.313-328.
- [6] 冶金部标准 YB761-70.
- [7] 铸造钛合金, 《国外航空材料》专题参考资料(41), 《国外航空材料》编辑组, 1976.6.

(1976) 346.

- [4] D. A. Spera, Thermal Fatigue Testing of Simulated Turbine Blades, NASA TMX-67820 (1971).
- [5] A. E. Gemma 等, Thermomechanical Fatigue Crack Propagation in an Anisotropic (Directionally Solidified) Nickel-Base Superalloy, ASTM STP 621 (1976) 199.