

ZT6 合金的主要力学性能数据

北京航空材料研究所 陆盘金* 王定华 薛志庠 吴崇周

本文简要介绍 ZT6 铸造钛合金室温与高温的主要力学性能数据。

Main Mechanical Properties of ZT6 Alloy

Lu Panjin Wang Dinghua Xue Zhixiang Wu Chongzhou

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

In this paper, both room temperature and elevated temperature main mechanical properties of ZT6 cast titanium alloy have been briefly introduced.

ZT6 (名义成分为 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) 铸造合金密度小 (4.54g/cm^3), 比强度高, 具有良好的综合性能和高温强度。在 500C 下显示出良好的热稳定性。

ZT6 合金主要力学性能数据来自于离心浇注环形铸件 (具有自由内表面) 致密部位试样的试验结果。母合

金铸锭由海绵钛—合金电极经两次真空电弧自耗熔炼而成。试验用两炉次环形铸件的化学成分列于表 1, 主要合金元素和杂质含量均符合 ZT6 合金化学成分的规定要求。需指出的是, 在不外加硅和现行熔炼—浇注工艺条件下, 合金含硅量是比较低的。

表 1 研究用两炉次 ZT6 环形铸件的化学成分

	主要成分, %				杂质, %					
	Al	Sn	Zr	Mo	Fe	Si	C	O	N	H
0 炉次	5.90	1.98	4.19	2.00	0.08	0.04	0.009	0.108	0.0085	0.0017
1 炉次	5.89	2.19	3.93	2.11	0.079	<0.05	0.016	0.090	0.010	0.0011
合金标准草案 ^[1]	5.75~6.50	1.75~2.25	3.50~4.50	1.75~2.25	≤0.12	≤0.13	≤0.10	≤0.15	≤0.05	≤0.0125

ZT6 合金属于近 α 型钛合金, β 转变温度约为 $995 \pm 10\text{C}$ 。ZT6 合金铸件推荐的热等静压处理 (HIP) 规范为: 加热温度 900C , 压力 $100 \sim 110\text{MPa}$, 保温 2h, 然后炉冷。航空用 ZT6 合金铸件呈退火状态使用, 以消除铸造残余应力和改善组织的稳定性, 推荐的退火规范为 800C , 保温 2h, 随后空冷 (视铸件壁厚, 保温时间可适当增减, 允许炉冷)。根据铸件不同类型和要求, 退火温度可在 $700 \sim 850\text{C}$ 范围内选择, 允许真空退火。

1. 室温力学性能

(1) 室温拉伸和冲击性能

ZT6 合金的室温拉伸和冲击性能数据列于表 2。两炉次铸件之间, 以及环形铸件不同取样部位 (轴向与弦向) 之间性能数据没有呈现出显著性的差异。由 $600 \sim 850\text{C}$ 退火 (2h, 空冷) 状态和铸造状态的室温拉伸、冲击韧性和硬度比较 (图 1) 可知, 退火温度对这些性能的影响不十分显著。对 600C 和 800C 退火试验数据的检

验结果表明, 不同保温时间 ($2 \sim 8\text{h}$) 对这些性能亦无明显影响。

表 2 ZT6 合金的室温拉伸和冲击性能

试样状态	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_b MPa	δ_5 %	ψ %	a_{ku} kJ/m ²	HB
铸态	$\frac{807.4}{14.26}$	$\frac{899.4}{19.37}$	$\frac{7.9}{1.57}$	$\frac{26.0}{5.42}$	$\frac{629.7}{39.31}$	$\frac{296.3}{3.14}$
800 $^{\circ}$ C 退火	$\frac{817.4}{11.16}$	$\frac{894.1}{15.36}$	$\frac{8.6}{1.42}$	$\frac{20.2}{4.18}$	$\frac{567.5}{50.10}$	$\frac{290.9}{6.60}$
铸态、或退火状态 (合金标准草案) ^[1]	≥795	≥860	≥5	≥10	≥350	≤335

注: 分子表示试验数据的平均值, 分母为其标准偏差
(此表示方法以后亦同)

热等静压处理对 ZT6 合金铸造状态及随后退火状态的室温拉伸、冲击性能没有显示出明显的影响, 其试验结果列于表 3。

ZT6 合金 800C 退火状态的室温拉伸弹性模量平均

* 陆盘金是工学博士, 高级工程师, 北京航空材料研究所副总工程师。

值为 117.3GPa。双重退火和固溶-时效状态的室温拉伸和冲击性能列于表 4。

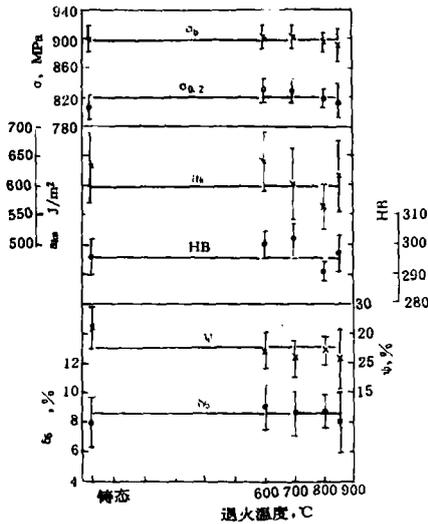


图 1 ZT6 合金不同退火温度 (2h, 空冷) 对室温拉伸、冲击性能的影响

注: I 表示 95% 置信系数的平均置信区间

表 3 热等静压处理对 ZT6 合金室温拉伸、冲击性能的影响

试样状态	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_b MPa	δ_5 %	ψ %	a_{ku} kJ/m ²	HB
HIP	798.0 1.4f	891.5 7.78	8.1 0.14	23.2 0.71		
HIP+600°C退火	826.0 8.49	904.0 5.66	7.9 1.56	19.6 5.87	561.3 39.15	294.8 5.31
HIP+800°C退火	816.0 11.27	885.0 13.86	8.2 1.06	18.1 5.33	582.3 36.25	288.8 3.60

注: HIP: 900°C/103MPa/1~2h, 炉冷 (冷却速度约为 30°C/min)

表 4 ZT6 合金双重退火 (1) 和固溶-时效 (2) 的室温拉伸、冲击性能

试样状态	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_b MPa	δ_5 %	ψ %	a_{ku} kJ/m ²	HB
(1) 900°C/1h, 空冷 +600°C/8h, 空冷	846.0 14.53	924.7 21.59	8.3 1.89	18.1 3.39	624.3 36.12	305.0 5.44
(2) 950°C/1h, 水冷 +600°C/8h, 空冷	1026.7 16.07	1117.7 24.70	2.6 0.20	5.5 0.64	221.5 19.09	366.7 9.97

在 60°V 型缺口条件下, ZT6 合金 800°C 退火状态的室温缺口敏感系数 K_n ($=\sigma_0^H/\sigma_0$) 为 1.6 左右。室温缺口 (应力集中系数 $K_t=3.5$) 试样在拉伸应力 1250MPa 作用

下, 持续时间至少 5h 不断裂 (起始加载拉伸应力为 1150MPa, 作用持续时间 5h, 应力增量 50MPa)。

(2) 室温扭转和剪切性能

ZT6 合金室温扭转性能列于表 5。根据拉伸弹性模量和剪切模量, 计算所得的平均泊桑系数 $\mu=0.29$ 。

合金 800°C 退火状态的室温剪切强度平均为 659.0MPa。

表 5 ZT6 合金的室温扭转性能

试样状态	G GPa	τ_p MPa	$\tau_{0.2}$ MPa	τ_b MPa
800°C退火 (2h, 空冷)	45.3 0.58	419.3 4.51	579.4 4.04	760.3 5.51

(3) 室温疲劳性能

ZT6 合金 800°C 退火状态室温高周轴向拉伸光滑疲劳强度 (相应于 2×10^7 断裂循环次数) 约为 360MPa。图 2 给出了合金缺口试样的室温高周轴向拉伸疲劳曲线。在所试验条件下, 热等静压处理提高了合金疲劳强度极限 20% 左右。

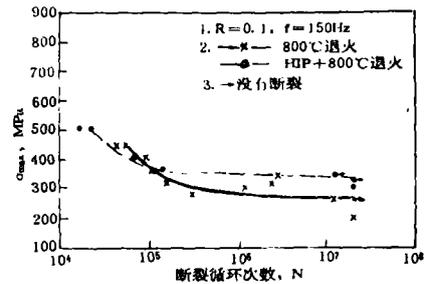


图 2 ZT6 合金不同处理状态缺口试样的室温高周轴向拉伸疲劳性能

图 3 给出了合金热等静压处理+800°C 退火状态与 800°C 退火状态的室温低周轴向拉伸疲劳性能的比较。两种状态试样的缺口拉伸强度基本相同, 约为 1185MPa。在 $\sigma_{max}/\sigma_{min}=0.5$ 情况下, 两者的断裂循环次数无明显差异。

另外, ZT6 合金 800°C 退火状态的室温疲劳裂纹扩展速率公式 $da/dN=C(\Delta k)^n$ 中, $C=1.9175 \times 10^{-10}$, $n=4.1296$ (紧凑拉伸试样宽度与厚度分别为 80mm, 20mm, 试验频率为 10Hz, $R=0.1$)。

(4) 室温断裂韧性

ZT6 合金 600~800°C 退火状态的室温断裂韧性条件值 K_{I0} 平均为 $102\text{MPa m}^{1/2}$ (紧凑拉伸试样宽度与厚度分别为 40mm, 20mm) 和 $95\text{MPa m}^{1/2}$ (试样宽度与厚度分别为 50mm, 25mm)。

2. 高温力学性能

(1) 高温拉伸性能

ZT6 合金不同处理状态试样 500°C 的拉伸性能列于

表 6. 600~800℃退火状态与铸造状态 500℃拉伸性能相比, 没有明显的变化。但是, 热等静压处理却使 800℃退火状态的高温拉伸强度有所下降。800℃退火状态 500℃拉伸弹性模量平均为 85.4GPa。

ZT6 合金 800℃退火状态的高温拉伸性能示于图 4, 300℃以上合金强度明显下降。合金 500℃拉伸强度允许最小值规定为 530MPa^[1]。

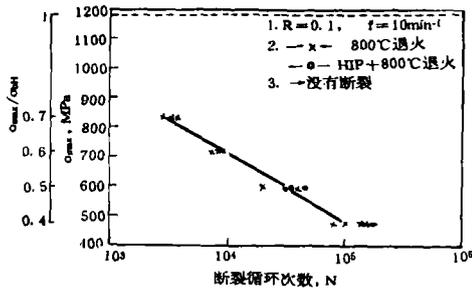


图 3 ZT6 合金不同处理状态的室温低周轴向拉伸疲劳性能

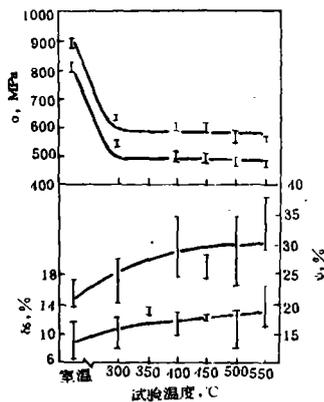


图 4 ZT6 合金 800℃退火 (2h, 空冷) 状态的高温拉伸性能
注: I 表示试验值范围

(2) 高温剪切性能

合金 800℃退火状态的 500℃剪切强度平均为 432.3MPa。

(3) 高温持久性能

ZT6 合金 800℃退火状态 450℃和 500℃持久强度(断裂时间不小于 100h) 分别为 560MPa、500MPa。500℃持久强度的允许最小值规定为 490MPa^[1]。

(4) 高温应力断裂性能

ZT6 合金 800℃退火光滑试样具有良好的高温应力断裂性能。试样在 450℃, 起始拉伸应力 520MPa 下, 持续 50h 未断裂; 随后拉伸应力增至 590~620MPa 时, 试样才断裂,

表 6 ZT6 合金的 500℃拉伸性能

试样状态	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_b MPa	δ_5 %	ψ %
铸态	475.3 17.79	562.0 15.72	11.1 0.7	34.6 6.66
600℃退火 (8h, 空冷)		577.7 10.88	11.1 1.08	31.5 3.41
800℃退火 (2h, 空冷)	470.9 11.02	562.4 14.84	11.3 1.56	30.7 3.33
HIP+600℃退火		578.0 16.82	11.3 0.78	32.2 2.07
HIP+800℃退火	456.3 6.81	545.0 4.36	11.9 0.61	31.5 1.05

注: HIP 规范与表 3 相同

其延伸率为 8.8~14.8%。

(5) 高温蠕变性能

ZT6 合金 800℃退火状态 500℃, 100h, 残余延伸率 0.2% 的蠕变强度极限约为 250MPa。

(6) 热稳定性能

ZT6 合金 800℃退火状态试样在空气中, 于 500℃, 300~400MPa 拉伸应力作用下曝晒 100h, 其剩余室温拉伸性能与未曝晒试样的相应性能相比, 剩余拉伸强度增加不明显, 而剩余延伸率与剩余断面收缩率则分别降低 20%、10% 左右, 但仍高于合金相应的允许规定值, 且有较大的裕度。这说明在上述热曝晒条件下, ZT6 合金试样是热稳定的。

ZT6 合金是仿制型合金, 目前我国航空发动机和飞机上还尚无使用经验。依据它的特性, 它可以用作航空发动机压气机部位的结构零件, 如高推重比发动机的高压压气机机匣。上述主要力学性能数据在一定程度上, 反映了我所实验室条件下该合金的目前实际水平, 具有一定的参考价值, 可以作为一份基础性技术资料, 提供给航空航天设计、生产部门选材试用。当然, 这份力学性能数据资料有待于在今后的使用中, 不断加以充实和完善。

参考文献

1. ZT6 铸造钛合金标准 (暂行草案, 621 所内部技术总结, 1992, 1)

用商业纯钛制作的手套

瑞士切肉工人过去戴钢丝手套操作, 这种手套硬、重、冷, 且不耐蚀。因此, 改用商业纯钛制作, 戴钛手套不感觉冷, 没有过敏反应。这种手套由钛丝构成, 丝直径 0.508mm, 有足够的挠性, 手指可以灵活运动, 重只有 80~100g。