

600 时高温钛合金(Ti60)的组织与力学性能

魏寿庸¹, 石卫民¹, 王鼎春¹, 王清江², 陈志勇², 刘建荣²

(1. 宝钛集团有限公司, 宝鸡 721014;

2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要:较全面地介绍 600 时高温钛合金 Ti60 的组织 and 力学性能, 包括该合金的室温和高温拉伸、持久、蠕变和热稳定性能等, 并与国外同类的高温钛合金进行比较。结果表明: 该合金与 IMI834 和 Ti-1100 合金具有相类似的组织和性能。经双重退火处理后, 获得双态组织, 并含有强化相 α_2 和硅化物相。这种组织的合金材料具有优良的综合性能, 有望用于制作航空发动机压气机盘和叶片等构件。

关键词: Ti60 钛合金; 组织; 力学性能; 应用

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Microstructure and mechanical properties of high temperature titanium alloy Ti60 at 600

WEI Shou-yong¹, SHI Wei-min¹, WANG Ding-chun¹, WANG Qing-jiang², CHEN Zhi-yong², LIU Jian-rong²

(1. Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties, such as room and high temperature tensile property, creep property, creep rupture property and heat stability of a high temperature titanium alloy Ti60 were studied, and the alloy with another foreign high temperature titanium was compared. The results show that Ti60 alloy has a comparable microstructure and mechanical property as the IMI834 and Ti-1100 alloy. The precipitation of α_2 phase and silicides can be observed in Ti60 alloy and the bimodal structure is obtained after duplex heat treatment. Ti60 alloy has excellent mechanical property and is hopeful to be used in the disks and blades of aero engines.

Key words: Ti60 alloy; microstructure; mechanical property; application

Ti60 钛合金是 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-Ta-Si 系多元复合强化的近 α 型高温钛合金, 它是我国自行设计研制的具有自主知识产权的 600 高温钛合金。该合金用高合金化、微合金化和复合强化方式, 在 Ti-Al-Sn-Zr 的基础上同时加入一定量的 Ta、Nb 和 Mo 3 种同晶型高熔点的 β 稳定元素, 通过这 3 种元素与 α 稳定元素 Al、Sn 和 Zr 等合金元素之间恰当搭配和共同作用, 使合金成为集细晶强化、固溶强化和第二相(α_2 和硅化物)弥散强化于一身的多元复合强化的一种热强钛合金。它具有优良的综合性能, 使它在工作温度下具有较高

的热强性、抗氧化性和满意的热稳定性的良好匹配^[1]。近年来, 航空发动机压气机的工作温度已达到或超过 600 , 目前投入使用的高温钛合金有英国的 IMI834 合金, 美国的 Ti-1100 合金和俄罗斯的 BT18Y 合金^[2-5]。为满足我国航空发动机提高推重比的需求, 中国科学院金属研究所、宝钛集团有限公司与中航工业集团燃气涡轮研究院、西安航空发动机制造公司、陕西宏远航空锻造有限责任公司和贵州安大锻造有限责任公司、北京航空材料研究院和西北工业大学等单位组织材料研制和应用研究联合课题组, 对该合金进

行多年的试验研究工作,在中国科学院金属研究所和宝钛集团有限公司完成小型试验、中型扩大试验的基础上,又在宝钛集团有限公司完成了工业化条件大型工业铸锭熔炼、棒材和饼环材加工和热处理等试验研究工作,已熔炼直径为 710 mm 大型工业铸锭,加工多种规格棒材($d25\sim35$ mm、 $d250\sim300$ mm)和饼环材($d460$ mm $\times$ 140 mm、 $d220$ mm $\times$ 140 mm),经航空部门检验和复验表明,这些材料达到技术指标要求,并由航空部门进一步加工和制作,已制成航空发动机压气机构件,质量符合航空构件技术条件质量和使用要求。

本文作者简述 Ti60 钛合金研制和应用研究所取得组织和性能数据,为合理选用该合金提供选材依据。

1 合金的成分和相组成

Ti60 钛合金是一种 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-Ta-Si 系多元复合强化的近 α 型高温钛合金,它的成分(质量分数,%) : Al 5.0~6.3 ; Sn 3.0~5.0 ; Zr 2.5~7.0 ; Mo 0.2~1.5 ; Nb 0.2~1.0 ; Ta 0.2~3.0 ; Si 0.2~0.55 ; C 0.01~0.09 ,其余为钛和不可避免的杂质元素^[1]。Ti60 钛合金的成分和相组成如图 1 所示,由于该合金含有足量的 α 稳定

元素 Al、Sn、Zr 和一定量的 Ta、Nb 和 Mo 等 β 稳定元素,同时还含有 Si、C 等元素,使合金得到充分的固溶强化,又使合金获得金属间化合物(α_2)和硅化物弥散强化,由于各种合金元素的合理和恰当搭配,使合金具有热强性和抗氧化性能;它还含有一定量同晶型 β 稳定元素,因此它还具有良好的工艺性能和热稳定性,是一种集固溶强化、细晶强化和弥散强化于一身的复合强化的钛合金,具有优良的综合性能。

2 合金的物理性能

Ti60 钛合金的密度 : 4.53×10^3 kg/m³ ;相转变温度 : (1 045 $\pm$ 10) ;线膨胀系数(α)、热导率(λ)、比热容(c)、弹性模量(E)、剪切模量(G)、泊松比(μ)等的典型数据见表 1。

3 力学性能

3.1 常规力学性能

Ti60 钛合金叶片棒材、饼环材和盘锻件的常规力学性能和技术要求见表 2,表中同时还列出国外同类

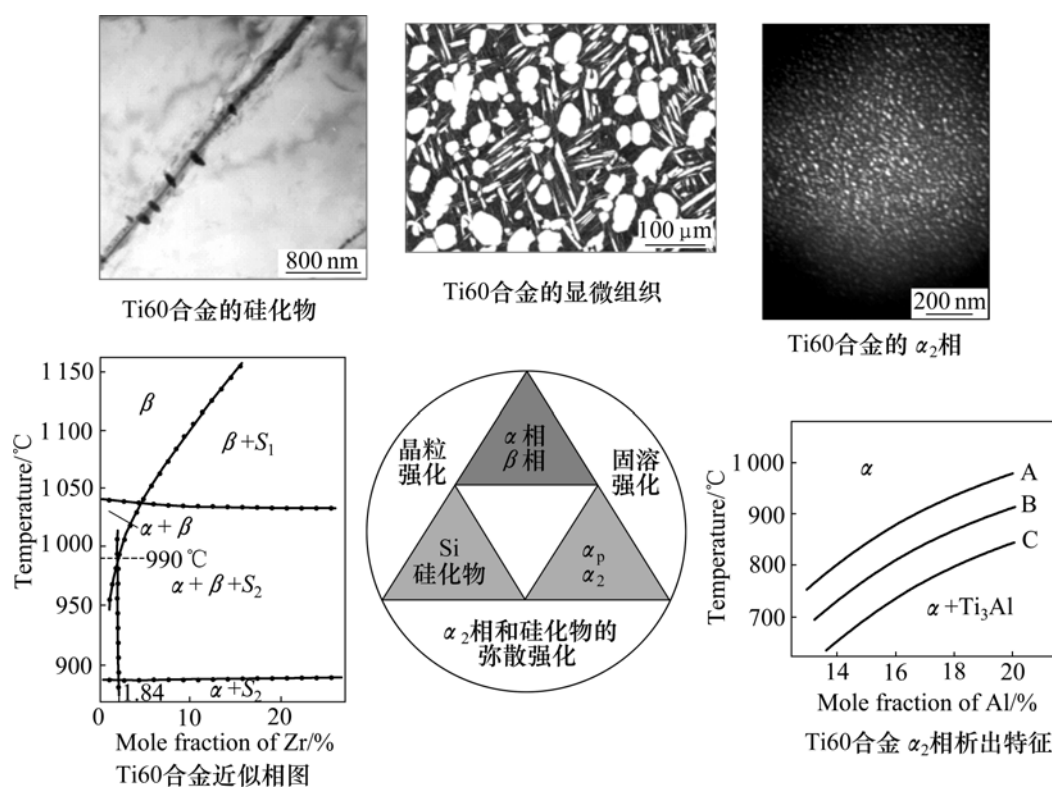


图 1 Ti60 钛合金成分与相组成

Fig.1 Composition and phases in Ti60 alloy

表 1 Ti60 钛合金的物理性能

Table 1 Physical properties of Ti60 alloy

Temperature/	$\alpha^{1)}/$ ($10^{-6} \cdot ^{-1}$)	$\lambda/$ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot$)	$c/$ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot$)	$E/$ GPa	$G/$ GPa	μ
20	—	—	—	114.0	43.6	0.31
100	7.22	6.21	496	110.0	41.8	0.31
200	8.37	7.38	520	105.0	39.7	0.32
300	9.34	8.55	544	99.9	37.8	0.32
400	9.97	9.64	566	95.3	35.9	0.33
500	10.20	10.70	585	90.8	34.1	0.33
600	10.30	12.10	615	86.4	32.3	0.34
700	10.60	13.80	663	81.9	30.6	0.34
800	11.00	15.40	707	77.3	28.7	0.35
900	11.60	16.40	729	72.5	26.8	0.35

1) α 为室温至该温度的线膨胀系数。

表 2 Ti60 钛合金与国外同类合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti60 and other titanium alloys

Titanium alloy	Tensile property at room temperature				Tensile property at 600				600		Heat stability property (600 , 100 h)			
									Creep rupture ¹⁾	Creep ²⁾				
	$\sigma_b/$ MPa	$\sigma_{0.2}/$ MPa	$\delta_5/$ %	$\varphi/$ %	$\sigma_b/$ MPa	$\sigma_{0.2}/$ MPa	$\delta_5/$ %	$\varphi/$ %	$\tau/$ h	$\varepsilon_p/$ %	$\sigma_b/$ MPa	$\sigma_{0.2}/$ MPa	$\delta_5/$ %	$\varphi/$ %
Ti60 bars for blades ($d\geq 30$ mm)	1 050	978	12.8	23.3	656	536	21.2	39.0	214 —223	0.16— 0.2	1 080	1 004	7.3	10.0
Ti60 ring material ($d\geq 460$ mm $\times$ 140 mm, $d\geq 220$ mm $\times$ 140 mm)	1 047	960	11.0	19.7	670	552	16.3	43.3	160~ > 80	< 0.2	1 105	1 015	9.3	11.5 ³⁾
Ti60 die forgings()	1 020	955	8.0	15.5	670	568	19.0	50.0	> 101	0.11— 0.196	960	895	5.0	7 ⁴⁾
Ti60 die forgings()	980	900	11.0	18.0	640	542	16.0	43.0	> 101	0.09— 0.12	963	890	7.0	10 ⁴⁾
Ti60 technical index (bars for ≥ 1 030 blades)	≥ 1 030	≥ 930	≥ 10	≥ 20	≥ 600	≥ 500	≥ 12	≥ 25	≥ 100	≤ 0.12	≥ 1 030	—	≥ 4	≥ 6
Ti60 technical index (forgings)	≥ 950	≥ 880	≥ 6	≥ 15	≥ 600	≥ 500	≥ 9	≥ 18	≥ 100	≤ 0.2	≥ 950	≥ 880	≥ 3	≥ 6 ⁴⁾
IMI834	≥ 1 030	≥ 910	≥ 6	≥ 15	≥ 585	≥ 450	≥ 9	≥ 20	—	$\leq 0.1(\beta)$	—	—	—	—
BT18y														
Ty1-92-32-80, ≤ 50 kg	≥ 932	—	≥ 7	≥ 15	≥ 560	—	—	—	≥ 100 ⁵⁾	—	—	—	—	—
Disk forging, > 50~200 kg	883	—	≥ 6	≥ 14	≥ 560	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1) 持久试验应力为 310 MPa 2) 蠕变试验应力为 160 MPa 3) 为毛坯热暴露 4) 为热暴露 120 后的测试性能 5) $\sigma=295$ MPa。

高温钛合金 IMI834(英)和 BT18y(俄)合金技术标准性能要求。从表 2 可以看出,我国自行研制的 Ti60 钛合金常规力学性能不但达到和满足技术标准的要求,也达到或优于国外同类高温钛合金的性能水平。

3.2 Ti60 钛合金不同温度下的拉伸性能

国内外典型的高温钛合金不同温度下的拉伸性能如图 2 所示。从图 2 可以看出,Ti60、IMI834 和 Ti-1100

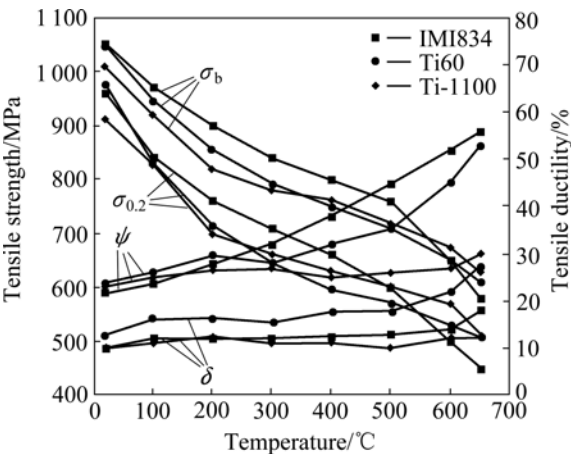


图 2 Ti60、IMI834 和 Ti-1100 合金不同温度下的力学性能
Fig.2 Mechanical properties of titanium alloy Ti60, IMI834 and Ti-1100 at different temperatures

表 3 Ti60 钛合金棒材的热稳定性能

Table 3 Heat stability of Ti60 bars

Specimen	Thermal exposure condition		σ_b /GPa	$\sigma_{0.2}$ /GPa	δ_5 /%	ψ /%
	Temperature/	Time/h				
Before thermal exposure	Original state		1.073	0.998	12.8	23.7
	600	100	1.107	1.043	13.2	20.8
	600	200	1.117	1.053	12.5	19.7
	600	300	1.120	1.050	11.7	17.7
	600	400	1.117	1.050	11.7	17.7
	600	500	1.123	1.053	11.8	17.5
After thermal exposure	550	100	1.097	1.040	9.3	11.3
	600	100	1.080	1.020	7.3	9.83
	600	200	1.097	1.033	5.5	6.33
	600	300	1.107	1.037	4.7	5.2
	600	400	1.107	1.047	3.5	4.5
	600	500	1.110	1.040	3.3	3.8
	650	100	1.090	1.020	5.5	7.3

高温钛合金不同温度下的拉伸性能相类似^[5]。

3.3 棒材的热稳定性能

所谓热稳定性问题其实质是“相稳定性”和“表面污染”的共同作用。Ti60 钛合金棒材的热稳定性能如表 3 所列。从表 3 可以看出,该合金具有较高的热稳定性能,在 600 高温下热暴露 500 h 后,毛坯暴露的伸长率和断面收缩率降低很小,分别约为 10%和 20%,这表明该合金具有较高组织稳定性。然而,试样暴露时,由于高温的氧化作用,形成一层氧化膜层,该氧化膜层比基体脆,所以在拉力作用下首先开裂,进而裂纹发展到整个断面,由于这种原因,试样热暴露时,使塑性指标下降较多,但仍保持在一定的水平。

3.4 棒材的持久和蠕变性能

棒材的持久和蠕变性能分别如表 4 和 5 所列。

3.5 合金的断裂性能

合金的断裂性能如表 6 所列。

3.6 合金的疲劳和焊接性能

合金的疲劳和焊接性能分别如表 7 和 8 所列。

表 4 Ti60 钛合金的持久性能

Table 4 Creep rupture property of Ti60 alloy

Experimental condition		Failure life/h	Elongation/%
Temperature/	Stress/MPa		
580	310	215–239	11–30
600	310	213–254	57–75
600	310	163–205(ring)	34–44(ring)
620	310	78–80	81–85

注：持久试验过程中每 100 h 后，试验应力增加 40 MPa，而后每 50 h 增加 40 MPa。

表 5 Ti60 钛合金的蠕变性能

Table 5 Creep property of Ti60 alloy

Temperature/	Stress/MPa	Time/h	Creep strain, ϵ_p /%	Type
580	160	100	0.120	Bars
600	160	100	0.190	Bars
600	160	200	0.262	Bars
600	160	300	0.380	Bars
600	160	400	0.430	Bars
600	160	500	0.480	Bars
620	160	100	0.360	Bars
600	160	100	0.120–0.170	Rings
600	160	100	0.090–0.170	Die forgings

表 6 Ti60 钛合金的断裂韧性

Table 6 Fracture toughness of Ti60 alloy

Specimen	Bar	Ring	Forging	EB-weldment
K_{Ic}	36–62	38–61	34–44	20–30

表 7 棒材的疲劳性能

Table 7 Fatigue property of Ti60 alloy bars

Rotary bending fatigue ($n=5\,000$, $K_t=1$)	σ_{-1} /MPa	Structure
Room temperature	550	Bimodal structure
Room temperature	460	Lamellar structure
600	460	Bimodal structure
600	400	Lamellar structure

表 8 焊接接头的室温和高温(600)性能

Table 8 Mechanical property of weld joint at room temperature and 600

Details of Specimens	Room temperature				600			
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	φ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	φ /%
Base metal	1 075	985	10.5	16.5	650	525	14.0	28.0
Weldments	1 080	996	9.5	19.5	660	545	13.5	31.0
Fusion zone	1 202	1 140	5.5	8.0	775	665	16.0	46.0

4 合金的抗氧化性能

Ti60 钛合金与其他材料的抗氧化性能如图 3 所示。从图 3 可看出，Ti60 钛合金的抗氧化性能优于国外同类高温合金 IMI834 和 Ti-1100 合金的。

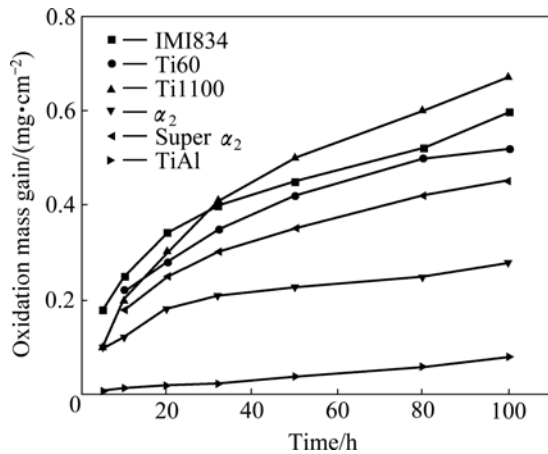


图 3 钛合金和其他材料的氧化质量增加
Fig.3 Oxidation mass gain of titanium alloys and other materials

5 应用前景

20 世纪 80 年代英国研制的 IMI834 高温钛合金已用于欧洲军用喷气发动机 EJ200 和 Rolls-Royce Trent 系列商用喷气发动机中压压气机和高压前四级压气机中。美国研制的 Ti-1100 高温钛合金已用于莱康明公

司的 T55-712 改型发动机；俄罗斯 BT18y 合金已在 Cy-27ck 战斗机的发动机中使用^[3]。综合性能优良、与国外高温钛合金性能相似的 Ti60 高温钛合金也有望在航空发动机中获得应用。

REFERENCES

[1] 王清江, 刘建荣, 杨 锐, 魏寿庸, 刘羽寅, 陈占乾, 王鼎春, 高 颀. 一种高热强性、高热稳定性的高温钛合金: 中国, ZL200710011771.0[P]. 2008-01-16.
WANG Qing-jiang, LIU Jian-rong, YANG Rui, WEI Shou-yong, LIU Yu-yin, CHEN Zhan-qian, WANG Ding-chun, GAO Qi. A high temperature strength and high heat stability: CN, ZL200710011771.0[P]. 2008-01-16.

[2] LYENS C, PETERS M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 北京化工出版社, 2005: 300.
LYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloy[M]. CHEN Zhen-hua, transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 300.

[3] 张 钧, 李 东. 高温钛合金中的 α_2 相[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002: 60.
ZHANG Jun, LI Dong. α_2 ordered phase in high temperature titanium alloys[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2002: 60.

[4] BOYER R, WELSCH G, COLLINGS E W. Materials properties handbook: Titanium alloys[M]. USA: ASM International Press, 1994: 411-439.

[5] 王金友, 葛志明, 周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科技出版社, 1985: 231-249.
WANG Jin-you, GE Zhi-ming, ZHOU Yan-bang. Aeronautical titanium alloys[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 231-249.

(编辑 杨幼平)