

## 初生 $\alpha$ 相含量对 TC4 钛合金性能的影响

李四清, 刘晶南, 王 旭

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘 要:** 对两相锻 TC4 钛合金环形锻件进行 4 种制度热处理, 以研究初生  $\alpha$  相含量(体积分数)对合金力学性能的影响。采用光学显微镜和定量金相方法分析锻件的显微组织及其初生  $\alpha$  相含量, 测试锻件的拉伸、断裂韧度和低周疲劳等力学性能。结果表明, 随着合金中初生  $\alpha$  相含量的降低, 其室温、400 °C 拉伸强度和 400 °C 持久性能提高, 但室温断裂韧度和低周疲劳性能降低。

**关键词:** TC4 钛合金; 初生  $\alpha$  相; 力学性能; 热处理

**中图分类号:** TG 146.2

**文献标志码:** A

## Effect of primary $\alpha$ -phase volume fraction on mechanical properties of TC4 titanium alloy ring forging

LI Si-qing, LIU Jing-nan, WANG Xu

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The effects of primary  $\alpha$ -phase volume fraction on mechanical properties of TC4 titanium alloy ring forging were investigated. Microstructures of the ring forging were observed using optical microscopy. The mechanical properties of the ring forging were evaluated. The results show that the tensile strength at room temperature and 400 °C and creep rupture life at 400 °C are improved with decreasing primary  $\alpha$ -phase volume fraction, however, the fracture toughness and strain control low cycle fatigue life at room temperature are decreased.

**Key words:** TC4 titanium alloy; primary  $\alpha$ -phase; mechanical property; heat treatment

钛合金具有高的比强度、比刚度和较高的使用温度, 广泛应用于先进航空发动机, 在航空发动机中的用量越来越高, 已成为航空发动机先进性的标志<sup>[1-6]</sup>。TC4 钛合金的名义成分为 Ti-6%Al-4%V, 属于  $\alpha$ - $\beta$  型两相钛合金。该合金具有优异的综合力学性能、优良的热工艺性能、良好的焊接性能, 长期使用温度可达 400 °C 和相对比较低廉的成本, 因此在航空、航天和航海等工业领域中得到广泛的应用<sup>[7-9]</sup>。由于在 TC4 钛合金大型锻件锻造过程中, 各部位的温度场是不均匀的, 因此各部位组织中的初生  $\alpha$  相含量不同。采用高温固溶处理, 可提高锻件的组织均匀性, 减小锻件的力学性能分散性。本文作者对 TC4 合金在  $\beta$  相变点

以下的 937 °C、957 °C 和 977 °C 进行固溶, 然后 700 °C 时效 2 h, 再空气冷却的热处理实验, 研究不同初生  $\alpha$  相含量对室温拉伸、400 °C 拉伸、400 °C 持久、室温断裂韧度和室温应变控制低周疲劳等力学性能的影响。

### 1 实验

TC4 钛合金原材料为  $d$  300 mm 棒材, 棒材经 3 次真空自耗电弧熔炼, 其  $\beta$  转变点为 997 °C。TC4 钛合金环形锻件的制备过程为: 首先在 100 MN 液压机上对棒坯改锻, 采用  $\alpha$ + $\beta$  两相区加热多火次反复锻

拔制成饼坯,最后在 16 MN 水压机上进行冲孔扩孔,采用  $\alpha+\beta$  两相区多火次制成环形锻件。其尺寸为  $d 620 \text{ mm} \times d 300 \text{ mm} \times 265 \text{ mm}$ 。从环形锻件切取用于研究所需的实验坯料,实验坯料长度为 120 mm。

针对实验坯料,开展了 937 °C、957 °C、977 °C 固溶+过时效(即(固溶温度, 2 h), 水淬+(700 °C, 2 h), 空冷)的热处理实验,研究初生  $\alpha$  相含量对环件力学性能的影响。在热处理后的实验坯料上切取室温拉伸、高温拉伸、高温持久、室温低周疲劳和室温断裂韧性等力学性能试样毛坯。除  $K_{IC}$  为 R-C 外,其余所有性能试样取样方向均为弦向。按照 GB 或 HB 规定的标准图样加工成各种力学性能标准试样,力学性能测试按照相应的标准方法进行。显微组织试样取自室温拉伸试样 R 部位,经砂磨、抛光、腐蚀制成,腐蚀剂为 HF、 $\text{HNO}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}$  混合溶液。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织

环形锻件经不同温度固溶热处理后的显微组织如图 1 所示。由图 1 可知,3 种固溶温度处理后的显微组织均为典型的  $\alpha+\beta$  两相区锻造组织,即在  $\beta$  转变组织基体上存在球状初生  $\alpha$  相。937 °C、957 °C 和 977 °C

固溶处理后的初生  $\alpha$  相体积分数分别为 50%、30%和 15%,其尺寸分别为 22  $\mu\text{m}$ 、16  $\mu\text{m}$  和 12  $\mu\text{m}$ , $\beta$  转变组织晶粒尺寸分别为 22  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{m}$ ,次生  $\alpha$  相形貌和尺寸基本相似。

随着固溶温度升高,初生  $\alpha$  相含量逐渐降低,相对应的  $\beta$  转变组织含量增加;初生  $\alpha$  相尺寸进一步减小,而  $\beta$  转变组织尺寸增大。

### 2.2 力学性能

环形锻件经不同温度固溶处理后的室温拉伸性能见表 1。与经 937 °C 固溶处理的试样相比,经 957 °C 固溶处理的试样的室温断裂强度和屈服强度分别增加了 45 MPa 和 52 MPa,经 977 °C 固溶处理的试样的断裂强度和屈服强度分别增加了 67 MPa 和 62 MPa,而它们的塑性基本相当。

环形锻件经不同温度固溶处理后的 400 °C 拉伸性能见表 2。由表 2 可知,与经 937 °C 固溶处理的试样相比,经 957 °C 固溶处理的试样的 400 °C 断裂强度和屈服强度分别增加了 71 MPa 和 65 MPa,经 977 °C 固溶处理的试样的 400 °C 断裂强度和屈服强度分别增加了 101 MPa 和 94 MPa,而它们的塑性也基本上相当。

当合金中初生  $\alpha$  相含量从 50%降低到 15%时,其室温、400 °C 拉伸强度均不断提高,但塑性基本上相当。TC4 钛合金环形锻件室温和 400 °C 拉伸强度的提

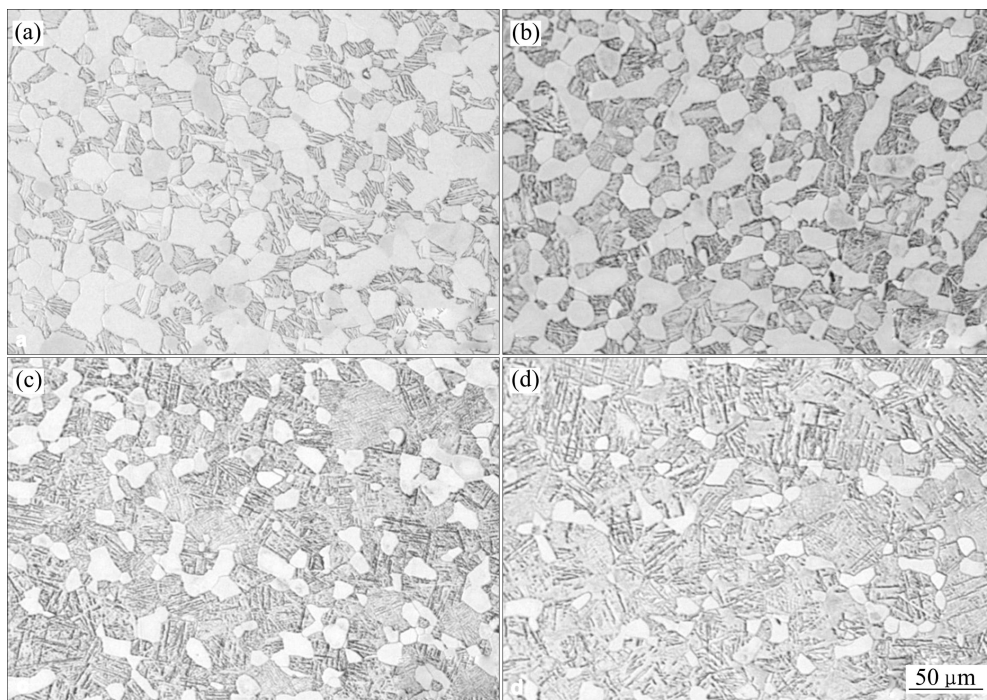


图 1 不同温度固溶处理后 TC4 钛合金环形锻件的显微组织

Fig. 1 Microstructures of TC4 alloy ring forging after solution treatment at different temperatures: (a) As-received; (b) 937 °C; (c) 957 °C; (d) 977 °C

高, 主要是初生 $\alpha$ 相尺寸减小和 $\beta$ 相经700℃分解生成的细小弥散的 $\alpha$ 相作用的结果, 尤其是后者。高温固溶处理时TC4钛合金组织由初生 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相构成, 通过固溶后的快速冷却,  $\beta$ 相转变成马氏体相 $\alpha'$ 和少量的亚稳定 $\beta$ 相; 经700℃时效后, 马氏体相 $\alpha'$ 转变成 $\alpha$ 相(即次生 $\alpha$ 相)+ $\beta$ 相, 亚稳定 $\beta$ 相分解成弥散细小 $\alpha$ 相和稳定的 $\beta$ 相。这种细小弥散的 $\alpha$ 相产生强化作用。初生 $\alpha$ 相减少, 意味着 $\beta$ 转变组织中起强化作用的细小弥散的 $\alpha$ 相增多, 强化效果更好。

环形锻件经不同温度固溶处理后的400℃持久性能和室温断裂韧度见表3。由表3可知, 与937℃固溶试样相比, 经957℃和977℃固溶处理的试样的400

℃持久性能均有一定程度的提高, 但室温断裂韧度有一定程度的降低。

随初生 $\alpha$ 相含量降低, 钛合金的400℃持久性能提高, 这也与 $\beta$ 转变组织中的细小弥散强化相含量高有关。随初生 $\alpha$ 相含量降低, 室温断裂韧度降低。影响断裂韧度的因素较多, 一般而言, 初生 $\alpha$ 相尺寸越大对断裂韧度越有利, 起强化作用的细小弥散的 $\alpha$ 相对断裂韧度不利。

环形件经不同温度固溶处理后的室温应变控制低周疲劳性能如表4所示。这3种试样的低周疲劳性能是比较优良的。相比较而言, 含50%初生 $\alpha$ 相含量的试样的低周疲劳性能最高, 含30%初生 $\alpha$ 相含量的次

表1 TC4钛合金环形锻件的室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties at RT of TC4 titanium alloy ring forging

Solution temperature/℃	Volume fraction of $\alpha$ phase/%	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
937	50	1 010	941	12.5	42.2
		1 004	937	13.1	43.4
957	30	1 052	983	14.9	47.7
		1 051	999	15.3	48.8
977	15	1 071	999	14.6	45.8
		1 075	1 002	14.4	44.8

表2 TC4钛合金环形锻件的400℃拉伸性能

Table 2 Tensile properties at 400℃ of TC4 titanium alloy ring forging

Solution temperature/℃	Volume fraction of $\alpha$ phase/%	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
937	50	664	529	19.6	55.5
		658	527	17.5	54.3
957	30	728	588	16.8	60.6
		735	597	15.8	58.4
977	15	765	622	16.6	61.7
		759	621	17.1	61.4

表3 TC4钛合金环形锻件的400℃持久性能和室温断裂韧度

Table 3 Creep rupture life at 400℃ and fracture toughness at RT of TC4 titanium alloy ring forging

Solution temperature/℃	Volume fraction of $\alpha$ phase/%	Stress/MPa	Creep rupture life/h	$K_{IC}$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )
937	50	590	1 373	75.85
			1 275	71.25
957	30	590	>1 500	71.64
			>1 500	70.57
977	15	590	>1 500	69.97
			>1 500	69.97

之, 含 15%初生  $\alpha$  相含量的最低。

随初生  $\alpha$  相含量降低, 室温应变控制的低周疲劳性能有一定程度的降低, 这与文献[10]报道的结果相吻合。影响室温应变控制低周疲劳性能的因素较多且复杂, 如初生  $\alpha$  相含量、次生  $\alpha$  相形貌等。一般而言, 初生  $\alpha$  相含量越高, 对室温应变控制低周疲劳性能越有利。

**表 4** TC4 钛合金环形锻件的室温应变控制的低周疲劳性能  
**Table 4** Strain control low cycle fatigue life at RT of TC4 titanium alloy ring forging

Solution temperature/°C	Volume fraction of $\alpha$ phase/%	$\epsilon_{\max}/\%$	$\epsilon_{\min}/\%$	$N_f/\text{Cycle}$
937	50	0.86	0	26 152
				18 384
957	30	0.86	0	27 935
				14 273
977	15	0.86	0	19 874
				15 220

### 3 结论

1) 固溶温度升高, TC4 钛合金中初生  $\alpha$  相含量逐渐减少, 初生  $\alpha$  相尺寸越小,  $\beta$  转变组织尺寸越大。

2) 随初生  $\alpha$  相含量降低, TC4 钛合金的室温、400 °C 拉伸强度均提高, 而塑性基本相当。

3) 随初生  $\alpha$  相含量降低, 400 °C 持久性能提高, 室温断裂韧度和应变控制低周疲劳性能降低。

### REFERENCES

[1] RUGG D. The current status of titanium alloy use in aero-engines[C]// LUTJERING G, ALBRECHT J. Titanium's 2003, Science and Technology. Hamburg: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 2727-2735.  
[2] EßLINGER J, HELM D. Titanium in aero-engines[C]//

LUTJERING G, ALBRECHT J. Titanium's 2003, Science and Technology. Hamburg: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 2845-2852.  
[3] FEIST W D, NIKLASSON, FOX K M. The influence of manufacturing anomalies on fatigue performance of critical rotating parts in the aero-engine[C]// LUTJERING G, ALBRECHT J. Titanium's 2003, Science and Technology. Hamburg: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 2883-2890.  
[4] TERLINDE G, WITULSKI T, FISHER G. Development of Ti-6246 engine discs[C]// LUTJERING G, ALBRECHT J. Titanium's 2003, Science and Technology. Hamburg: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 2891-2898.  
[5] VOICE W E. Burn resistant titanium alloy (BuRTi)[C]// LUTJERING G, ALBRECHT J. Titanium's 2003, Science and Technology. Hamburg: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 2915-2922.  
[6] 郭萍, 洪权, 赵永庆, 戚运莲, 辛社伟, 刘伟. Ti600 高温钛合金的力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(Special 1): s36-s39.  
GUO Ping, HONG Quan, ZHAO Yong-qing, QI Yun-lian, XIN She-wei, LIU Wei. Mechanical properties of Ti600 high temperature titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(Special 1): s36-s39.  
[7] 周廉. 美国、日本和中国钛工业发展评述[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(8): 577-584.  
ZHOU Lian. Review of titanium industry progress in America, Japan and China[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(8): 577-584.  
[8] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 杨建朝. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 102-107.  
HUANG Zhang-hong, QU Heng-lei, DENG Chao, YANG Jian-chao. Development and application of aerial titanium and its alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 102-107.  
[9] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213(1): 103-114.  
[10] WAGNER L W, GREGORY J V. Improve the fatigue life of titanium alloys[J]. Advanced Materials and Processes, 1994, 94(3): 36-42.

(编辑 袁赛前)