

## Ti600 高温钛合金的力学性能

郭 萍<sup>1,2</sup>, 洪 权<sup>1</sup>, 赵永庆<sup>1,2</sup>, 戚运莲<sup>1</sup>, 辛社伟<sup>1</sup>, 刘 伟<sup>1</sup>

(1. 西北有色金属研究院 钛合金研究所, 西安 710016; 2. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

**摘 要:** 研究 Ti600 高温钛合金经过不同退火制度处理后的显微组织和力学性能。结果表明: Ti600 合金具有良好的热稳定性, 片层组织可以获得强度与塑性的良好匹配, 蠕变性能优异。随着退火温度的升高, 合金的强度升高, 合金经过双重退火后的强度高于一次退火的强度。

**关键词:** Ti600 高温钛合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.4

文献标志码: A

## Mechanical properties of Ti600 high temperature titanium alloy

GUO Ping<sup>1,2</sup>, HONG Quan<sup>1</sup>, ZHAO Yong-qing<sup>1,2</sup>, QI Yun-lian<sup>1</sup>, XIN She-wei<sup>1</sup>, LIU wei<sup>1</sup>

(1. Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The microstructure and mechanical properties after different annealing treatments of Ti600 alloys were researched. The results show that Ti600 alloy has a good thermal stability, and the lamellar structure can provide good matching of strength and plasticity to get the better creep resistance; when anneal temperature increases, the strength of Ti600 alloy increases, and the strength after duplex-annealing is higher than that after conventional annealing.

**Key words:** Ti600 high temperature titanium alloy; microstructure; mechanical property

随着航空工业的迅速发展, 为了满足新型飞机设计的要求, 世界各国都在竞相发展 600 以上长期使用的钛合金<sup>[1]</sup>。目前, 高温钛合金的开发主要集中在 Ti-Al-Zr-Sn-Mo-Si 体系中<sup>[2-6]</sup>, 各国已相继开展几种性能优良的在 600 使用的高温钛合金, 如表 1 所示。该系列合金目前被证明为是最成功的高温钛合金系<sup>[7]</sup>。Ti600 合金是西北有色金属研究院研制的一种近  $\alpha$  型高温钛合金, 主要是针对航空发动机应用需求设计的, 其成分在上述合金系的基础上添加了稀土元素 Y, 符合高温合金设计标准, 因此有望成为一种航空用材料。对于发动机材料, 必须研究其热稳定性和蠕变性能, 本工作主要对 Ti600 合金的高温拉伸性能、

热稳定性和蠕变性能进行研究。

## 1 实验

实验用 Ti600 合金原材料取自 2 次真空自耗电弧炉熔炼的 400 kg 铸锭, 经开坯、锻造、精锻及轧制工艺加工成  $d12$  mm 的棒材, 力学性能试验取样是从棒材上截取的  $d10$  mm $\times$ 70 mm 试样, 蠕变试样取样为  $d10$  mm $\times$ 130 mm, 蠕变实验在 KD-2 试验机上进行, 金相腐蚀剂为 Kroll 试剂, 用奥林巴斯 PMG3 型金相显微镜进行观察和照相。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613805, 2007BAE07B07); 国家科技支撑计划资助项目(2007BAE07B01, 2007 BAE07B03, 2007 BAE07B07)

通信作者: 郭 萍, 工程师; 电话: 029-86231078; E-mail: gp8440086@163.com

2 结果与讨论

2.1 室温拉伸性能及热稳定性能

表 2 所列为  $d12\text{ mm}$  棒材经过不同热处理后的室温拉伸性能及热稳定性能。从表 2 可以看出,对于未经过热暴露的试样,随着固溶温度的升高,强度上升。在同一热处理制度下,经过热暴露的试样较未进行热暴露的试样,塑性有所下降。例如,经过  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ h}$  热暴露处理的试样,在固溶处理温度为  $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,热暴露前、后其强度变化不大,断面收缩率由原来的  $24\%$ 下降至  $15\%$ ,相对值降低了  $38\%$ ;而经过  $1\text{ }020\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理的试样,断面收缩率由原来的  $19\%$ 降低至  $13\%$ ,相对值降低了  $32\%$ ,强度上升了  $30\text{ MPa}$ 。经过  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ h}$  热暴露处理的试样,其强度和塑性均有所降低。经  $1\text{ }020\text{ }^{\circ}\text{C}$  固溶处理的试样,强度由原来的  $1\text{ }060\text{ MPa}$  降低至  $1\text{ }010\text{ MPa}$ ,其断面收缩率由原来的  $19\%$ 降低至  $9.5\%$ ,相对值降低了  $50\%$ 。经过  $1\text{ }060\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理的试样,强度值降低了  $80\text{ MPa}$ ,断面收缩率( $Z$ )

由原来的  $15\%$ 降低值至  $8.5\%$ 。从数据分析可以看出,经过热暴露处理的试样,其断面收缩率降低,但均能满足使用要求。有资料表明,经过一定时间热暴露(在炉中加热一定时间,一般为  $100\text{ h}$ )后,再进行室温拉伸,所测得的面缩率与未经过热暴露的试样所测的面缩率的比值大于  $50\%$ ,表明材料或工艺是稳定的,可判断为稳定性好;否则,判为不合格。因此, Ti600 合金具有良好的热稳定性能。

另外,通过显微组织也可以分析室温力学性能的变化。图 1 所示为经过不同热处理后 Ti600 合金的显微组织。从图 1(a)可以看出,经过  $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理的试样呈现双态组织。Ti600 合金的相变点为  $1\text{ }010\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在低于相变点温度处理时,初生  $\alpha$  部分转变成  $\beta$  相,但仍有  $10\%$ 左右的  $\alpha$  相未发生转变,这类型合金具有较高的塑性,但蠕变性能较差。而在相变点以上,  $\alpha$  相全部转变成  $\beta$  相,呈现粗大的片状组织,其塑性有所下降。主要原因是等轴组织试样拉伸变形是在  $\alpha$  相的个别晶粒中以滑移开始的,随着变形量的增大,滑移将占据越来越多的  $\alpha$  晶粒,并向周围的  $\beta$  转变组织扩展,因而空洞形核、连接和扩展较迟,断裂前将产生

表 1 高温钛合金的成分和使用温度

Table 1 Chemical composition and useful temperature of high temperature titanium alloys

| 研制国家 | 合金牌号     | 使用温度/<br>$^{\circ}\text{C}$ | 质量分数/% |     |     |     |    |      |        |
|------|----------|-----------------------------|--------|-----|-----|-----|----|------|--------|
|      |          |                             | Al     | Sn  | Zr  | Mo  | Nb | Si   | 其他     |
| 美国   | Ti6242S  | 520                         | 6      | 2   | 4   | 2   |    | 0.1  |        |
|      | Ti1100   | 600                         | 6      | 2.7 | 4   | 0.4 |    | 0.45 |        |
| 英国   | IMI829   | 580                         | 5.5    | 3.5 | 3   | 0.3 | 1  | 0.3  |        |
|      | IMI834   | 600                         | 5.5    | 4   | 4   | 0.3 | 1  | 0.5  | 0.06C  |
| 俄罗斯  | BT25Y    | 500~550                     | 6.5    | 2   | 4   | 4   |    | 0.2  | 1.0W   |
|      | BT36     | 600                         | 6.2    | 2   | 3.6 | 0.7 |    | 0.15 | 5.0W   |
| 中国   | Ti53311S | 550                         | 5.5    | 3.5 | 3   | 1   | 1  | 0.3  |        |
|      | Ti60     | 600                         | 5.8    | 4.8 | 2   | 1   |    | 0.35 | 0.85Nd |

表 2 Ti600 合金经过不同热处理后的室温拉伸和热稳定性能

Table 2 Room temperature tensile properties and thermal stabilities of Ti600 titanium alloy bars after different heat treatments

| Annealing                                                                   | Condition of thermal exposure      |        | Room temperature tensile property |                       |        |        |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------|--------|--------|
|                                                                             | Temperature/<br>$^{\circ}\text{C}$ | Time/h | $R_m/\text{MPa}$                  | $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | $A/\%$ | $Z/\%$ |
| (1 000 $^{\circ}\text{C}$ , 2 h, AC)+<br>(650 $^{\circ}\text{C}$ , 8 h, AC) | Un-exposed                         |        | 1070                              | 965                   | 15     | 24     |
|                                                                             | 600                                | 100    | 1070                              | 995                   | 6.0    | 15     |
| (1 020 $^{\circ}\text{C}$ , 1 h, AC)+<br>(650 $^{\circ}\text{C}$ , 8 h, AC) | Un-exposed                         |        | 1060                              | 955                   | 11     | 19     |
|                                                                             | 600                                | 100    | 1090                              | 1010                  | 6      | 13     |
|                                                                             | 650                                | 100    | 1010                              | 930                   | 9      | 9.5    |
| (1 060 $^{\circ}\text{C}$ , 1 h, AC)+<br>(650 $^{\circ}\text{C}$ , 8 h, AC) | Un-exposed                         |        | 1090                              | 980                   | 8.5    | 15     |
|                                                                             | 650                                | 100    | 1010                              | 925                   | 6.5    | 8.5    |

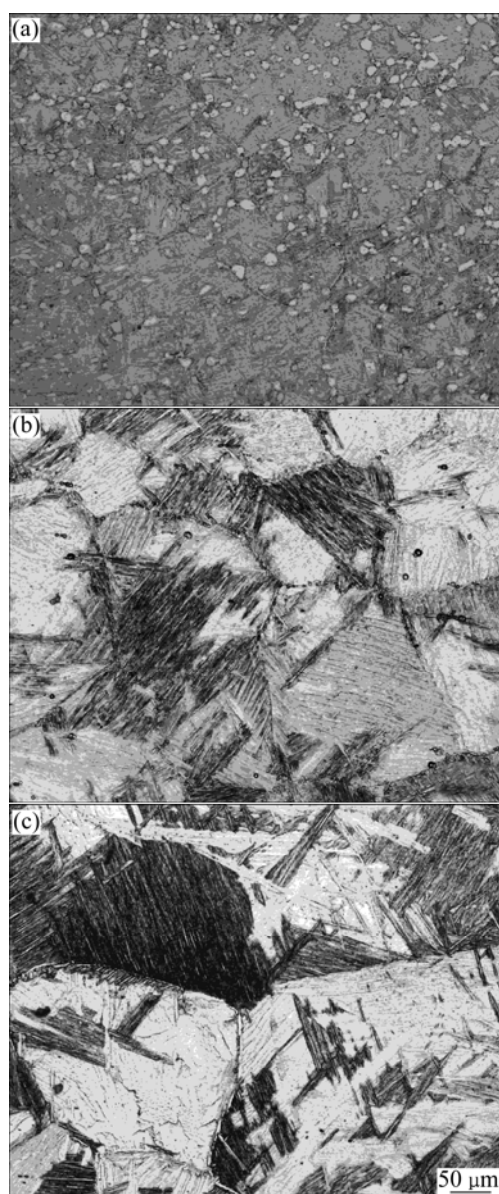


图1 不同热处理状态 Ti600 合金棒材的显微组织

**Fig.1** Microstructures of Ti600 alloy bars after different heat treatments: (a) 1 000 °C, 1 h; (b) 1 020 °C, 1 h; (c) 1 060 °C, 1 h

生更大的变形,从而获得更高的塑性。在片状组织中,由于同一  $\alpha$  集束具有相同的惯习面,所以滑移一开始就能毫无阻碍地穿过互相平行的  $\alpha$  束而形成快速发展的粗滑移带,且在晶界  $\alpha$  处易产生位错塞积,出现微区变形不均匀,促使空洞提前形成和发展,从而导致试样过早断裂。对于高温合金,考察合金的蠕变性能也非常重要。图 1 (b)和(c)所示的合金具有较好的蠕变性能。因为钛合金的抗蠕变能力与组织中等轴  $\alpha$  相和魏氏  $\alpha$  相的相对含量有关系,在相同热处理条件下,条状  $\alpha$  比等轴  $\alpha$  相有好的抗蠕变能力。因而,增加  $\beta$

转变组织的相对含量(条状  $\alpha$  和魏氏  $\alpha$ ),必然导致力学性能,特别是蠕变性能的提高。这也正解释了为什么随着固溶温度的升高,合金的抗拉强度会上升,而塑性不会降低的原因。图 2 所示为不同热处理制度下合金的蠕变性能。由图 2 可以看出,随着热处理温度的升高,合金抗蠕变性能随之提高。文献[8]已经对该合金的蠕变性能进行了分析。

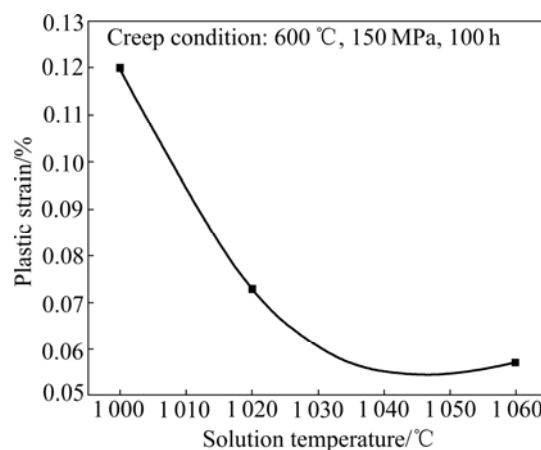


图2 固溶温度对 Ti600 合金蠕变性能的影响

**Fig.2** Effect of solution temperature on creep property of Ti600 alloy

## 2.2 高温拉伸性能

图 3 所示为合金棒材经过一次退火后的高温力学性能。由图 3 可以看出,高温下退火,可以提高合金的强度,而塑性不会降低很多,因为 Ti600 属于近  $\alpha$  型合金;在低温退火时,组织中  $\alpha$  等轴含量较多,升高退火温度,可减少  $\alpha$  等轴含量,增加  $\alpha$  条状的同时球化  $\alpha$  等轴。图 4 所示为合金经过双重退火后的性能。

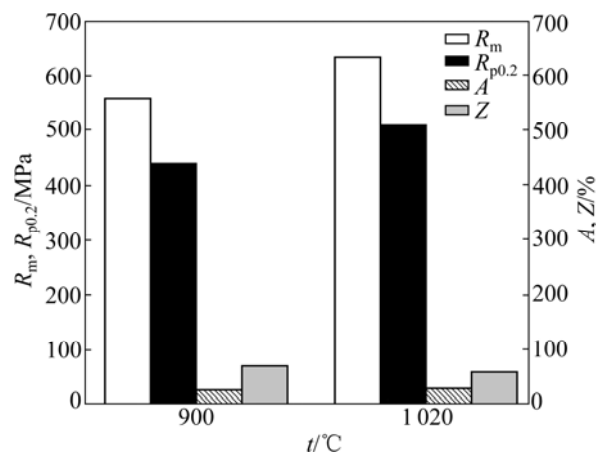


图3 Ti600 合金在 650 °C 一次退火 1 h 后的拉伸性能

**Fig. 3** Tensile properties of Ti600 alloy after conventional annealing at 650 °C for 1 h

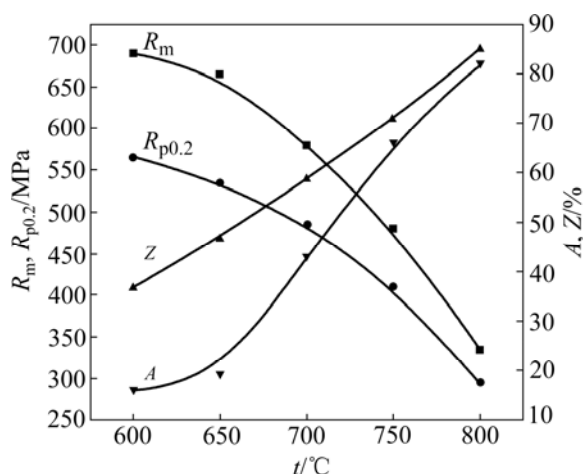


图4 Ti600合金双重退火后的高温拉伸性能((1 020 , 1 h, AC)+(650 , 8 h, AC))

Fig.4 High temperature tensile properties of Ti600 alloys after duplex-annealing

比较图3和4可以看出,在同样的一次退火制度下,双重退火后可以再一次提高合金的强度,主要因为第1次退火温度高,等轴 $\alpha$ 减少,条状 $\alpha$ 增加,强度提高。在第2次退火时, $\alpha$ 条状的充分析出,也有利于提高强度。从图4还可以看出,合金在650的高温拉伸性能仍保持较高的水平。

### 3 结论

1) Ti600合金具有良好的热稳定性,可以获得强度和塑性良好匹配及蠕变性能优异片层组织。

2) 对于Ti600合金,随着退火温度的升高,合金的强度随之升高,合金经过双重退火后,强度高于一度退火的强度,并且合金具有良好的耐高温性能。

### REFERENCES

- [1] 张振祺,洪权,杨冠军,罗国珍. Ti-600高温钛合金蠕变前后组织变化[J]. 材料工程, 2000(10): 18-21.  
ZHANG Zhen-qi, HONG Quan, YANG Guan-jun, LUO Guo-zhen. Research on microstructure of Ti600 alloy after creep test [J]. Materials Engineering, 2000(10): 18-21.
- [2] 蔡建明,李臻熙,马济民,黄旭,曹春晓. 航空发动机用600高温钛合金的研究与发展[J]. 材料导报, 2005, 19(1): 50-53.  
CAI Jian-ming, LI Zhen-xin, MA Ji-min, HUANG Xu, CAO Chun-xiao. Research and development of 600 high temperature titanium alloys for aeroengine [J]. Materials Review, 2005, 19(1): 50-53.
- [3] BANIA P J. An advanced alloy for elevated temperature [J]. J Met, 1988(3): 20-22.
- [4] CHANDLER H. Heat treaters's guide: Practices and procedures for nonferrous alloy [C]// ASM International. The Materials Information Society, 1996: 511-513.
- [5] TETYUKHIN V, LEVIN I, ILYENKO V, BILIBINA E, USOVA T, PADYKOVA N. Heat-resistant titanium alloys with enhanced, heat resistance, thermal stability [C]// BLENKINSOP P A, EVANS W J, FLOWER H M. Titanium's 95, Science and Technology. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 2430-2437.
- [6] 洪权,戚运莲,赵永庆,杨冠军. 加工工艺对Ti-600合金板材组织性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(8): 1334-1337.  
HONG Quan, QI Yun-lian, ZHAO Yong-qing, YANG Guan-jun. Influence of processing technique on organization and properties of Ti600 alloy sheet [J]. Rare Metal Material and Engineering, 2005, 34(8): 1334-1337.
- [7] 赵永庆. 高温钛合金研究[J]. 钛工业进展, 2001(1): 33-37.  
ZHAO Yong-qing. Research on high temperature titanium alloy [J]. Titanium Industry Progress, 2001(1): 33-37.
- [8] 郭萍,洪权,曹立英,等. 固溶处理对Ti-600高温钛合金蠕变性能影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(14): 50-52.  
GUO Ping, HONG Quan, CAO Li-ying, et al. Effect of solution heat treatment on creep property of Ti-600 high temperature titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(14): 50-52.

(编辑 杨华)