

固溶处理对 Ti65 高温钛合金组织与性能的影响

王 旭, 李四清, 李臻熙, 黄 旭, 刘晶南

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 研究 Ti65 高温钛合金的固溶处理工艺, 分析不同固溶处理的 Ti65 高温钛合金的金相组织, 测试 Ti65 高温钛合金的力学性能。结果表明: 随着固溶温度的提高, Ti65 高温钛合金初生 α 相的尺寸与含量减少, 拉伸性能降低, 蠕变性能提高; 随冷却速率的提高, 合金次生 α 相尺寸变小, 长宽比增大, 拉伸强度和蠕变性能提高, 塑性和持久性能降低。

关键词: Ti65 合金; 固溶处理; 显微组织; 力学性能; 热稳定性

中图分类号: TG145.21

文献标志码: A

Effects of solution treatment on microstructures and properties of Ti65 high-temperature titanium alloy

WANG Xu, LI Si-qing, LI Zhen-xi, HUANG Xu, LIU Jing-nan

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

Abstract: The solution treatment process of Ti65 high-temperature titanium alloy was studied. The microstructure of Ti65 alloy was analyzed by optical microscopy. The mechanical properties of the alloy were tested. The results show that, with the solution temperature increasing, both the size and content of the primary α phase of the alloy and the tensile properties decrease, but the creep properties improve. With the increase of cooling rate, the size of secondary α phase, plasticity and stress rupture life of the alloy decrease, but the tensile properties improve.

Key words: Ti65 high-temperature titanium alloy; solution treatment; microstructure; mechanical property; thermal stability

高温钛合金是一类主要用于航空发动机风扇轮盘和叶片等部位, 使用温度在 400 °C 以上的钛合金。使用高温钛合金取代高温合金, 可以显著地减小发动机质量, 提高发动机的推重比。目前, 已使用的高温钛合金的服役温度最高达到 600 °C, 包括英国的 IMI834 合金和美国的 Ti-1100 合金等^[1-3], 各国也做了很多的相关工作^[4-8]。但随着航空发动机推重比的不断提高, 对高温钛合金提出了越来越苛刻的使用要求, 新设计的高推重比航空发动机高压压气机后段的工作温度将超过 600 °C。600 °C 高温钛合金已经不能满足其设计要求, 迫切需要开发出高比强度、高比模量和使用温度高于 600 °C 的高温钛合金以替代镍基高温合金, 制成发动机的结构件。为不断满足航空发动机对高温钛合金的要求, 国内在 600 °C 钛合金的基础上自行研发

了最高使用温度达到 650 °C 的高温钛合金(简称为 Ti65 合金)^[9-10]。为了满足高推重比航空发动机对高温钛合金的性能要求, 北京航空材料研究院开展了对 Ti65 合金的性能优化研究。本文作者主要通过调节固溶处理参数控制合金的组织 and 力学性能, 最终优化固溶处理参数, 以期使锻件获得良好的热强性与热稳定性匹配。

1 实验

实验使用 3 次真空自耗熔炼 Ti65 高温钛合金, 名义成分(质量分数, %)为 Ti-6.5Al-2Sn-4Zr-2.5Mo-1.4W-0.2Si。试样坯料取自经过预制坯锻造, 热模锻

制备的航空锻件。为研究固溶处理对合金组织和性能的影响, 本实验将试样毛坯分别进行 1 020、1 030 和 1 040 ℃固溶保温 2 h, 按空冷(AC)、油冷(OQ)和水冷(WQ) 3 种冷却方式冷却, 然后进行 700 ℃保温 5 h 后空冷的时效处理。工艺如表 1 所列。

表 1 固溶处理工艺

Table 1 Solution treatment processes

Process number	Processing
A	(1 020 ℃, 2 h, OQ) + aging
B	(1 030 ℃, 2 h, OQ) + aging
C	(1 040 ℃, 2 h, OQ) + aging
D	(1 030 ℃, 2 h, AC) + aging
F	(1 030 ℃, 2 h, WQ) + aging

将不同固溶处理后的材料加工成拉伸、持久、蠕变和金相试样。其中热稳定性拉伸试样为固溶时效处理后的毛坯料进行 650 ℃热暴露 100 h 后按照标准加工成的室温拉伸试样。

2 结果与讨论

2.1 固溶温度对 Ti65 合金组织与性能的影响

2.1.1 固溶温度对力学性能的影响

固溶温度对 Ti65 合金拉伸性能的影响如表 2 所列。从表 2 可以看出, Ti65 合金的室温拉伸强度和 650 ℃高温拉伸强度对固溶温度的变化不敏感; 而随着固溶温度升高, Ti65 合金的塑性均有一定程度的降低。固溶温度对 Ti65 高温钛合金 650 ℃蠕变性能的影响如表 3 所列。由表 3 可知, Ti65 高温钛合金的高温蠕变性能随着固溶温度的提高有显著的提高。

表 2 固溶温度对 Ti65 合金力学性能的影响

Table 2 Effects of solution treatment temperature on tensile properties of Ti65 alloy

Solution processing	Test temperature/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
A	Room temperature	1 083	1 009	12	22
B		1 080	994	11	18
C		1 075	990	9	14
A	650	629	525	21	50
B	650	627	516	20	53
C	650	629	525	21	50

表 3 固溶温度对 Ti65 合金蠕变性能的影响

Table 3 Effects of solution treatment temperature on creep properties of Ti65 alloy

Solution processing	σ /MPa	τ /h	ε_p /%
A	100	100	0.139
B	100	100	0.130
C	100	100	0.059

2.1.2 固溶温度对合金显微组织的影响

固溶温度对 Ti65 合金显微组织的影响如图 1 所示。由图 1 可知, Ti65 合金在 3 种固溶温度下的显微组织均由初生 α 相和 β 转变组织组成, 但是其含量和尺寸差异较大。随着固溶温度的升高, 合金中初生 α

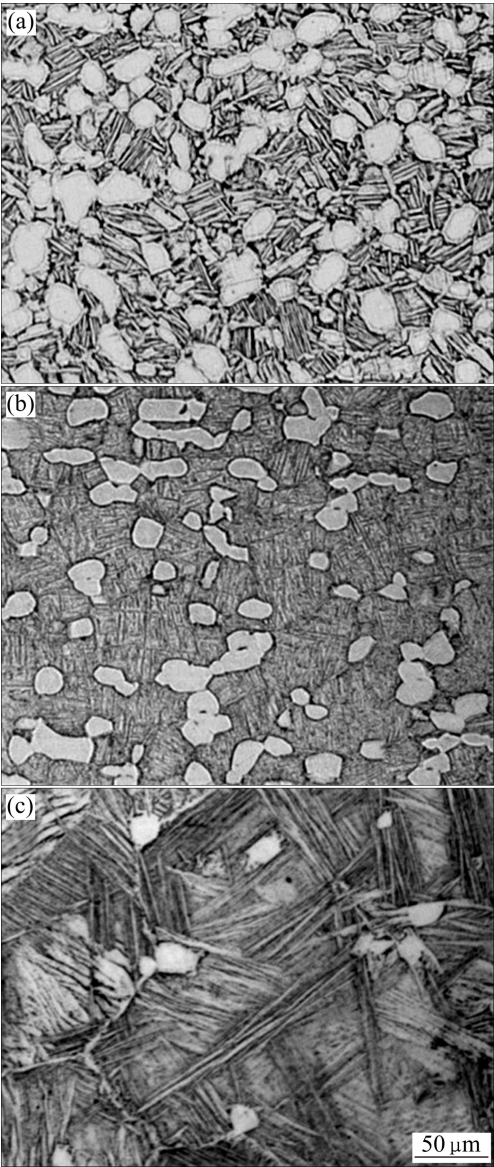


图 1 不同固溶处理的 Ti65 合金的微观组织
Fig. 1 Microstructures of Ti65 alloy by different solution processes: (a) Processing A; (b) Processing B; (c) Processing C

表 4 冷却方式对 Ti65 合金力学性能和热稳定性能的影响

Table 4 Effects of cooling method on tensile properties and thermal stability of Ti65 alloy					
Solution processing	Test temperature/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
D	Room temperature	1 037	955	11	18
A		1 089	1 000	10	18
F		1 093	1 007	10	16
A	650	627	516	20	53
F	650	638	534	26	54
D +(650 ℃, 100 h)	Room temperature	1 059	983	11	15
A + (650 ℃, 100 h)		1 116	1 041	9	13
F + (650 ℃, 100 h)		1 119	1 041	9	15

相的体积分数逐渐降低, 而 β 转变组织体积分数逐渐增加、尺寸增大。这与 Ti65 合金在表 2 和 3 中表现出的力学性能相吻合, 这是由于初生 α 相含量降低, 初生 α 相与 β 转变组织之间的协调性差, 对合金的拉伸塑性不利; 而初生 α 相含量越少, β 转变组织越多, 相界面越少, 越有利于提高高温蠕变性能。

2.2 固溶后冷却方式对 Ti65 合金组织与性能的影响

2.2.1 固溶后冷却方式对合金力学性能的影响

冷却方式对 Ti65 合金室温、650 ℃拉伸性能以及毛坯热稳定性的影响如表 4 所列。随冷却速率的提高, 合金的室温和 650 ℃高温拉伸强度均有一定程度的提高, 而合金塑性有少量降低。Ti65 合金毛坯经过 650 ℃热暴露试验后, 其室温拉伸性能与未经热暴露的毛坯数据相比, 强度有一定的提高, 塑性有少许降低。说明 Ti65 合金具有良好的 650 ℃毛坯热稳定性。

冷却方式对 650 ℃持久和蠕变性能的影响分别见图 2 和表 5。可见, 随冷却速率的提高, Ti65 合金的持久性能有一定程度的降低, 而蠕变性能却有所提高。

2.2.2 固溶后冷却方式对合金显微组织的影响

Ti65 合金在固溶后不同冷却方式处理后的显微组织如图 3 所示。由图 3 可知, 固溶后冷速对 Ti65 合金初生 α 相的形貌影响不大, 但对次生 α 相的影响较显著, 随着固溶后冷却速度的增加, 合金中次生 α 相的尺寸逐步变小, 而长宽比则逐步增大。

3 结论

1) 固溶温度对 Ti65 合金显微组织的初生 α 相的含量和尺寸影响较大, 固溶温度越低初生 α 相的体积越大, 尺寸越大。

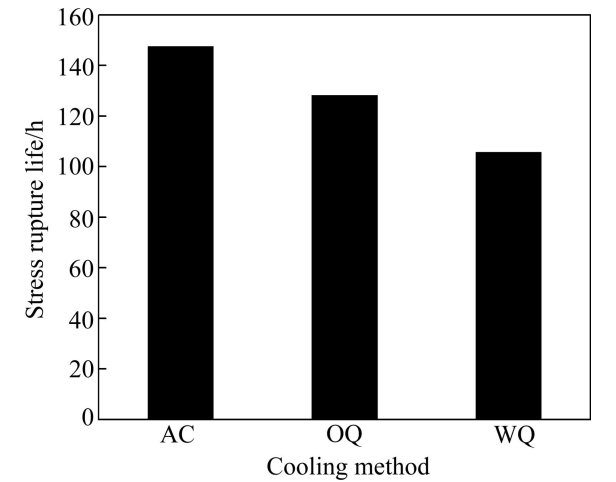


图 2 冷却方式对 Ti65 合金在 650 ℃和 240 MPa 下的持久性能的影响

Fig. 2 Effects of cooling method on stress rupture properties of Ti65 alloy at 650 ℃ and 240 MPa

表 5 冷却方式对 Ti65 合金在 650 ℃的蠕变性能的影响

Table 5 Effects of cooling method on creep properties of Ti65 alloy at 650 ℃

Solution processing	σ /MPa	τ /h	ε_p /%
D	100	100	0.308
A	100	100	0.160
F	100	100	0.164

2) 固溶后冷却方式对对初生 α 相的影响不大, 但对次生 α 相影响显著。

3) 随着固溶温度升高, 拉伸塑性均降低, 高温蠕变等性能则有显著的提高; 随冷却速率的提高, 合金在室温和 650 ℃高温下的拉伸强度均有一定程度的提高, 塑性和持久性能有一定程度的降低, 蠕变性能有所提高。

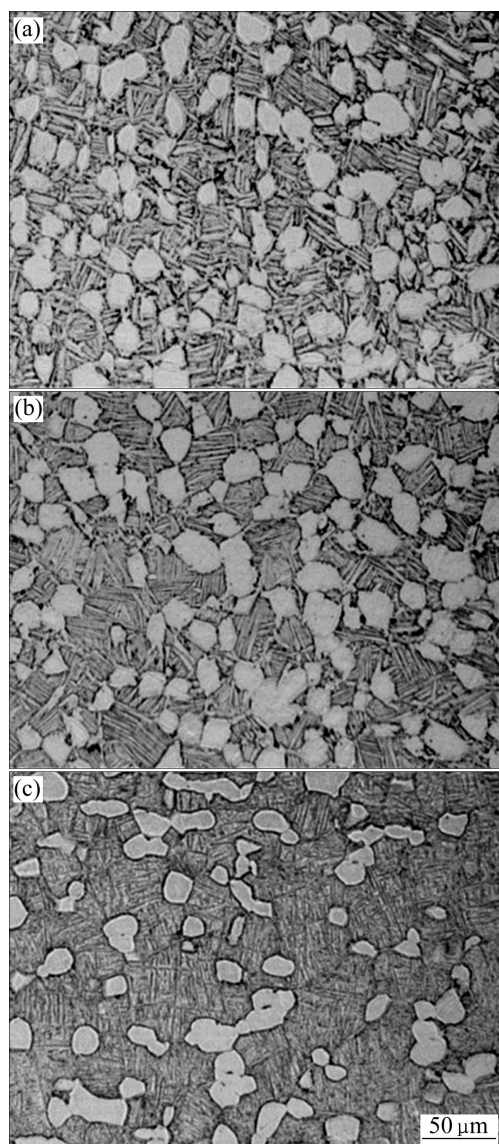


图3 不同冷却方式下的Ti65合金的微观组织

Fig. 3 Microstructures of Ti65 alloy by different cooling processes: (a) Processing D; (b) Processing A; (c) Processing F

REFERENCES

- [1] 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-xi, 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.

- [2] 付艳艳, 宋月请, 惠松晓, 米绪军. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850-856.
FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun. Research and application of typical aerospace titanium alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 850-856.
- [3] 曾立英, 赵永庆, 洪权, 毛小南, 戚运莲. 600℃高温钛合金的研发[J]. 钛工业进展, 2012, 29(5): 1-5.
ZENG Li-ying, ZHAO Yong-qing, HONG Quan, MAO Xiao-nan, QI Yun-lian. Research and development of high temperature titanium alloys at 600℃ [J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(5): 1-5.
- [4] MESHRAM S D, MOHANDAS T. Influence of matrix microstructure on aging response of near alpha titanium alloy (IMI 834) parent metal and welds on toughness [J]. Materials Science & Technology, 2011, 27(1): 235-239.
- [5] WANJARA P, JAHAZI M, MONAJATI H, YUE S, IMMARIGION J P. Hot working behavior of near- α alloy IMI834 [J]. Material Science and Engineering A, 2005, 396(1/2): 50-60.
- [6] GERHARD B, MARK E, HANS J M. Influence of environment on fatigue mechanisms in high-temperature titanium alloy IMI834 [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10/12): 1485-1493.
- [7] KARTIK P, VIKAS K. Effect of temperature and hold time on internal hardening behavior of a near α titanium alloy under cyclic deformation [J]. Materials and Design, 2010, 31(6): 2716-2724.
- [8] VO P, JAHAZI M, YUE S. Recrystallization during thermomechanical processing of IMI834 [J]. Metallurgical and Transactions A, 2008, 39(12): 2965-2980.
- [9] 卢斌, 杨锐. 热处理对650℃短时用Ti650板材显微组织和力学性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 77-81.
LU Bin, YANG Rui. Heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti650 alloy sheet for short-term use at 650℃ [J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(6): 77-81.
- [10] 王永, 卢斌, 杨锐. 热处理对Ti650钛合金显微组织和相组成的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S3): 704-707.
WANG Yong, LU Bin, YANG Rui. Effects of heat treatment on the microstructure and phase evolution of Ti650 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S3): 704-707.

(编辑 何学锋)