

高温均匀化处理对 TC11 合金锻件组织和性能的影响

韩 栋¹, 毛小南¹, 邓瑞刚², 张鹏省¹

(1. 西北有色金属研究院, 西安 710016;

2. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 西安 713801)

摘 要: 采用光学显微观察、力学性能测试、疲劳性能测试和扫描电镜断口分析等手段, 研究不同锻造工艺和热处理对 TC11 钛合金锻件组织和性能的影响。结果表明: 高温均匀化处理适用于 TC11 钛合金。经过高温均匀化锻后, 锻造态组织能为锻后热处理提供了良好的基础, 有益于改善 TC11 钛合金的综合性能。

关键词: TC11 锻件; 高温均匀化处理; 三态组织; 力学性能; 强韧性匹配

中图分类号: TG

文献标志码: A

Effect of high temperature homogenizing treatment on microstructure and properties of TC11 titanium alloy forging

HAN Dong¹, MAO Xiao-nan¹, DENG Rui-gang², ZHANG Peng-sheng¹

(1. Northwest Research Institute of Non-ferrous Metals, Xi'an 710016, China;

2. Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xi'an 713801, China)

Abstract: The effects of different forging processes and heat treatments on microstructures and properties of TC11 titanium alloy were investigated by means of optical microscope observation, mechanical property test, fatigue property test and scanning electric microscope fractography analysis. The results show that the high temperature homogenizing forging is suitable for TC11 titanium alloy. After high temperature homogenizing forging, the as-forged microstructure can lay a good basis to the next heat treatment, which is beneficial to improving comprehensive properties of TC11 titanium alloy.

Key words: TC11 alloy forging; high temperature homogenizing treatment; tri-modal microstructure; mechanical property; strength-toughness match

TC11 合金属于 Ti-Al-Mo-Zr-Si 系马氏体型双相钛合金, 具有良好的室温/高温强度、耐腐蚀性、热稳定性及抗蠕变性能, 在现代航空发动机制造业中占有举足轻重的地位, 主要用于制造 500 °C 下使用的压气机盘、叶片、鼓筒和环形件等^[1]。TC11 合金成型温度范围窄、变形抗力大, 热加工工艺参数的选择和合理匹配对其合金的加工工艺性能和组织结构都产生重要的影响。近年来, 由于航空航天部门对 TC11 钛合金提出了高强韧性和高周疲劳强度匹配的要求, 通过有效控制钛合金组织形貌以获得双态组织以及更优化的组织结构成为研究者最为青睐的研究方向^[2-3]。本文作

者拟开展 TC11 合金的热加工工艺优化, 探讨高温均匀化处理在锻造加工中对材料的组织结构与力学性能的影响, 旨在实现 TC11 合金各项性能指标的良好匹配, 发掘材料性能潜能, 为确定合理的热加工工艺提供技术与理论依据。

1 实验

1.1 试验材料

所选用的试验材料是西北有色院采用 VAR 经 3

次熔炼制备的高均质 TC11 铸锭, 成品铸锭规格为 d 440 mm, 化学成分见表 1。金相法测得其相变温度为 $(1\,000\pm5)^\circ\text{C}$ 。

表 1 TC11 合金化学成分

Table 1 TC11 alloy composition (mass fraction, %)			
Ti	Mo	Al	Zr
87.96	3.49	6.4	1.63
Si	O	N	H
0.27	0.11	0.009	0.001

对铸锭采用 β_1 以上温度开坯锻造热加工方式, 分别选用在两相区锻造工序进行高温均匀化锻造(即两相区锻造的中间火次增加 β_1 温度以上的高温热处理)和常规锻造(即两相区多火次锻造)两种工艺制备规格为 $d140\text{ mm}\times330\text{ mm}$ 的试验样件。所采用的热处理工艺为双重退火工艺, 具体工艺为 $(950^\circ\text{C}, 1\text{ h}, \text{AC})+(510^\circ\text{C}, 6\text{ h}, \text{AC})$ 。

1.2 测试方法

室温拉伸试验在 Instron 1185 拉伸试验机上进行, 轴向拉伸应变速率控制在 1 mm/min , 测试温度为 20°C 。将经过不同锻造及热处理工艺的试样线切割成金相样品, 尺寸为 $d10\text{ mm}\times15\text{ mm}$ 选用 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:5$ 的混合溶液对试样表面进行腐蚀。用 Olympus PMG3 型金相光学显微镜及 JSM-6460 扫描电镜分析其显微组织, 观察相组成及形貌。

2 结果与分析

2.1 高温均匀化处理对显微组织的影响

采用常规锻造和高温均匀化锻造两种热加工方式制备锻件, 研究 TC11 合金显微组织在不同热加工条件下的转变规律。TC11 合金经常规锻造得到的组织结构为由球形和短棒形初生 α 相与 β 相组成的等轴组织(见图 1(a)); 经高温均匀化锻造得到的为少量初生 α 相、片层状的次生 α' 相和 β 相组成的网篮组织, 且组织更为均匀细小(见图 1(b))。

常规锻造是在相变点以下加热变形, 所以通常不改变在 $\alpha+\beta$ 区变形时形成的组织特征, 只有将热处理温度加热到非常接近于相变温度时, 才发生组织类型的明显变化, 并且主要反映在球状初生 α 相和片状 α 相之间的相对含量上。此外, 保温时间主要影响 α 相颗粒尺寸。在这一锻造过程中, α 相和 β 相呈两相共

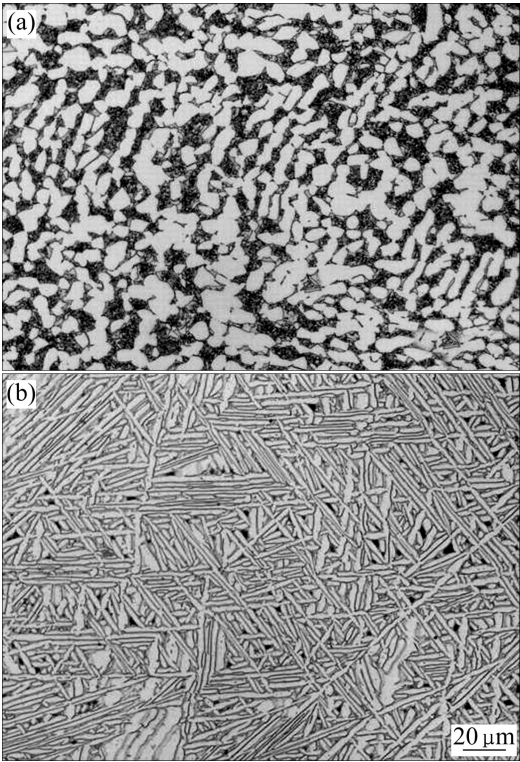


图 1 TC11 合金锻态显微组织
Fig. 1 Forging microstructures of TC11 alloy: (a) General forging; (b) High temperature homogenizing treatment

存, 它们同时发生变形。充分变形的 α 相再结晶后为球状, 而变形量小的 α 相再结晶后呈短棒状^[4], 因此锻造后得到如图 1(a)所示的等轴组织。

高温均匀化锻造工艺使材料在单相区大变形量开坯, 在 β 区开始变形, 此时, 材料变形抗力低, 可充分破碎原始 β 晶粒和晶界 α 相; 接着, 在 $\alpha+\beta$ 两相区进行锻造, 获得组织细化且比较均匀的双态组织; 然后, 将合金加热到 β 区进行高温均匀化处理并进行水冷, 将锻造产生的晶体缺陷(位错、亚晶)和位错密度增加的变形组织全部或部分地固定下来, 保持变形金属的结构特征。该工艺终锻于两相区, 结合相变和再结晶的作用, 最终得到由少量初生等轴 α 相(α_e)、针状 α' 相(α_s)和转变 β 组织(β_1)构成的条状编织结构(见图 1(b))。均匀化处理使锻件显微组织中的大块 α 相、拉长 α 相等不均匀性组织得以消除^[5], 水淬坯料显微组织中出现的白色条块是一种伪晶组织, 不是长条的 α 相及大块的 α 相^[6]。

与常规锻造相比, 高温均匀化处理可以使晶体缺陷均匀化和过饱和固溶体均匀分布, 达到组织均匀化、特别是晶粒均匀化的目的。经高温均匀化处理后, 锻态组织为三态组织(即 $\alpha_e+\alpha_s+\beta_1$ 组织), 其特征为 α_e 的

体积分数为 10%, α_s 的体积分数为 70%, 且条状 α_s 混乱交织。冷却速度越大, 过冷度越大, 条状 α_s 晶粒越细, 编织程度越混乱。水冷的目的就是获得过饱和马氏体, 避免在 β 相区锻造得到魏氏组织而不利其于其后两相区大变形量锻造时获得等轴细晶^[7]。对经高温均匀化处理和常规锻造的样品进行 XRD 分析, 结果如图 2 所示。由图 2 可见, 经高温均匀化+水冷处理后的试样存在相当数量的 α' 相; 而常规锻造试样中的 α' 相含量很少, 主要相组成为稳定的 α 相和 β 相。

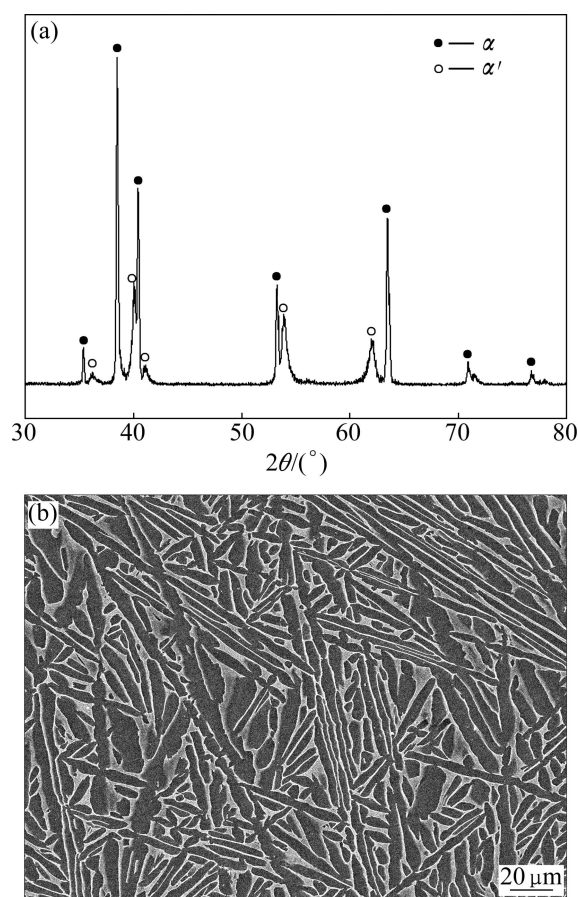


图 2 高温均匀化锻造 TC11 合金的 XRD 谱和 SEM 像
Fig. 2 XRD pattern (a) and SEM image (b) of TC11 alloy forged by high temperature homogenizing treatment

图 3 所示为 TC11 合金在热处理后的显微组织。由图 3 可见, 高温均匀化锻造后得到的网篮组织较之常规锻造得到的组织有更强的热处理敏感性, 其网篮组织的 α 相条带出现了明显的球化。这是由于在 $\alpha+\beta$ 两相区的变形机制动态球化, 经 β 相区均匀化处理后发生了自扩散控制的动态再结晶^[8], 组织结构将更多的位错和变形亚晶保留到了锻后热处理阶段, 较大的应变能及严重的晶格畸变为 α 相的球化提供了较大的驱动力。

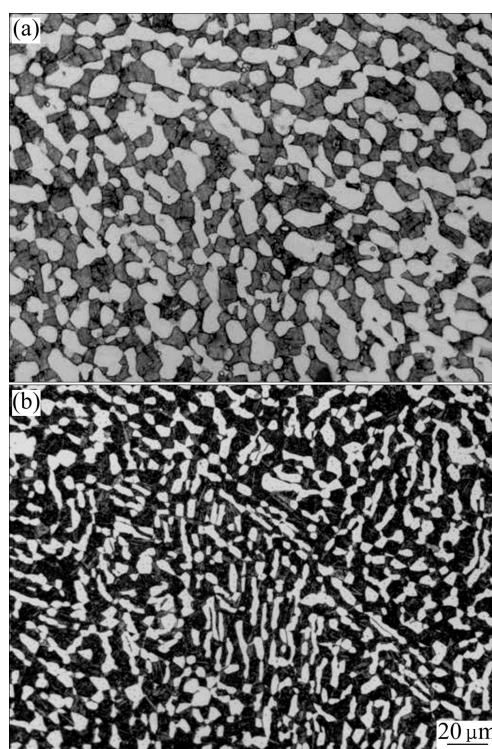


图 3 TC11 合金在热处理后的显微组织

Fig. 3 Microstructures of TC11 alloy after heat treatments: (a) General forging; (b) High temperature homogenizing treatment

2.2 高温均匀化处理对力学性能的影响

对前面经过不同锻造工艺处理的试样进行锻态力学性能测试, 结果见表 2。由表 2 可以看出, 高温均匀化锻造时, 其强度指标较之常规锻造的有显著提高, 而其塑性指标下降并不明显。

表 2 不同锻造工艺制备 TC11 锻件的室温力学性能

Table 2 Room-temperature mechanical properties of TC11 alloy prepared by various forging processes

Forging process	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Normal	935	825	14	57
Homogenizing	1030	945	11	45

不同锻造方式表现出的差别很容易从微观组织形貌上得到解释, 由于高温均匀化锻造得到的是网篮组织, α 相具有较高的纵横比, 提供了更大的 α/β 相界面, 所以具有较高的强度, 而较为均匀细化的组织结构同时保证了材料的塑性。

对比锻态拉伸性能(见表 2)可以发现, TC11 钛合金锻后再经热处理, 其强度(见表 3)得到了明显的提高, 提升幅度在 12%~18% 之间。这是由于在热处理时

效过程中, 淬火形成的 α' 相及介稳 β 相等热力学不稳定相进行了分解, 析出了大量弥散相。由图 1 可见, 热处理前的 β 组织中存在相当数量较大体积的 α 相, 且照片中两相颜色差别明显, 而热处理后 β 组织中分布的是均匀细小弥散状的 $\alpha+\beta$ 相(见图 3), 这说明热力学不稳定相进行了分解。在塑性变形时, 弥散 α 片周围产生的应力场起到阻碍位错运动的作用, 同时 α/β 相的界面也增加, 产生弥散强化作用使材料强度大幅提高^[9]。

表 3 经双重退火热处理后的 TC11 锻件室温力学性能

Table 3 Mechanical properties of TC11 alloy after double annealing

Forging process	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A/\%$	$Z/\%$
Homogenizing	1 160	1 060	15.0	45.0
Normal	1 100	990	12.0	42.0

4 结论

1) TC11 合金经高温均匀化锻造后可得到由少量等轴 α 相、细板条 α 相与 β 转变组织构成的网篮组织, 组织均匀细小; 常规锻造后可得到由球形和短棒形初生 α 相与 β 转变组织组成的等轴组织。

2) 高温均匀化锻造得到的冶金状态为锻后热处理提供了良好的基础, 结合(950 $^{\circ}\text{C}$, 1 h, AC)+(530 $^{\circ}\text{C}$, 6 h, AC), 可得到由 35% 等轴 α 、转变 β 组成的双态组织, 该组态可使材料获得良好的强韧性匹配, 使其热处理后的综合力学性能明显优于常规锻造试样的, 其性能水平较现行 TC11 合金的性能水平有很大提升。

REFERENCES

[1] 白晓环, 冯永琦, 王韦琪, 王永强, 徐祝萍. 飞机结构用 TC11 钛合金异形锻件的组织与性能[J]. 钛工业进展, 2005, 22(5): 37-40.
BAI Xiao-huan, FENG Yong-qi, WANG Wei-qi, WANG Yong-qiang, XU Zhu-ping. Structure and performance of formed forgings of titanium alloy TC11 for aircraft structure [J].

Titanium Industry Progress, 2005, 22(5): 37-40.
[2] 吴英彦, 王万波, 计波. TC11 钛合金棒材在 $\alpha+\beta$ 两相区的终锻变形[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s811-s814.
WU Ying-yan, WANG Wan-bo, JI Bo. Final wrought deformation of TC11 titanium alloy in ($\alpha+\beta$) phase [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s811-s814.
[3] DING R, GUO Z X, WILSON A. Microstructural evolution of a Ti-6Al-4V alloy during thermomechanical processing [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 327: 233-245.
[4] LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys [M]. KGaA, Weinheim: Wiley-VCH, 2003: 303-305.
[5] 郭鸿镇, 姚泽坤, 苏华, 苏祖武. TC11 钛合金叶片组织和性能控制[J]. 航空学报, 1997, 18(1): 189-195.
GUO Hong-zhen, YAO Ze-kun, SU Hua, SU Zu-wu. Structure and property control of the TC11 alloy blade die forgings [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1997, 18(1): 189-195.
[6] 董长升, 李渭清, 蔡建明. 精锻及热处理工艺对 TC11 钛合金棒材显微组织的影响[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 286-288.
DONG Chang-sheng, LI Wei-qing, CAI Jian-ming. Effect of finish forge and heat-treatment on microstructure of TC11 alloy bars [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 286-288.
[7] 姚泽坤, 郭鸿镇, 刘建超, 苏祖武, 姜明, 应志毅, 刘建宇. 双性能钛合金压气机盘的成形机理[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 378-382.
YAO Ze-kun, GUO Hong-zhen, LIU Jian-chao, SU Zu-wu, JIANG Ming, YING Zhi-yi, LIU Jian-yu, CUI Jian. Forging mechanism of two-phase Ti-alloy compressor disc with dual-property [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 378-382.
[8] LU Shi-qiang, LI Xin, WANG Ke-lu, DONG Xian-juan, FU M W. High temperature deformation behavior and optimization of hot compression process parameters in TC11 titanium alloy with coarse lamellar original microstructure [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 353-360.
[9] 韩栋, 毛小南, 张鹏省, 周义刚. 双重退火温度对高应力水平 TC11 合金组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s577-s581.
HAN Dong, MAO Xiao-nan, ZHANG Peng-sheng, ZHOU Yi-gang. Effect of double annealing temperature on microstructure and mechanical properties of TC11 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s577-s581.

(编辑 何学锋)