

置氢 TC4 钛合金等温锻造叶片组织演变规律

宗影影, 黄树晖, 罗永胜, 单德彬, 郭斌

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001, hagongda@hit.edu.cn)

摘要: 为了降低钛合金叶片的锻造温度和改善其组织性能, 基于氢致钛合金高温增塑机理, 将热氢处理技术应用于钛合金叶片的等温锻造成形工艺中. 观察和对比分析了未置氢 TC4 钛合金和置氢 TC4 钛合金叶片等温锻造后的组织以及真空除氢热处理和普通热处理工艺下的组织演变. 实验结果表明: 置氢降低了 TC4 钛合金叶片的等温锻造载荷, 除氢热处理后组织得到改善, 获得了含有细小、等轴 α 晶粒的双态组织. 确定了置氢量为 0.25% (质量分数) 的 TC4 钛合金适宜的热处理工艺为: 锻后在 750 °C 真空脱氢保温 5 h, 900 °C 退火 1 h 后再 450 °C 时效 4 h.

关键词: 钛合金叶片; 置氢; 等温锻造; 组织演变

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1086-04

Microstructural evolution of isothermal forged hydrogenated TC4 titanium alloy blade

ZONG Ying-ying, HUANG Shu-hui, LUO Yong-sheng, SHAN De-bin, GUO Bin

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, hagongda@hit.edu.cn)

Abstract: In order to decrease the forging temperature and improve the microstructure and properties of titanium alloy blade, based on the theory of hydrogen-induced plasticity enhancement at elevated temperature, thermohydrogen treatment technology was used in the forging process of titanium alloy blade in this paper. Microstructures of hydrogenated TC4 titanium alloy blade and TC4 titanium alloy blade without hydrogen forged at different conditions were investigated. The microstructures of hydrogenated TC4 alloy and TC4 alloy without hydrogen after dehydrogenation treatment in vacuum and common heat treatment processes were compared. Results show that hydrogenation can decrease the forging load of TC4 titanium alloy blade. The microstructure is improved after heat treatment and the bimodal microstructure with fine equiaxed α phase is obtained. The reasonable heat treatment parameters of TC4 titanium alloy blade with 0.25wt. % hydrogen are dehydrogenation treatment in vacuum at 750 °C for 5 h after forging, then 900 °C anneal treatment for 1 h and 450 °C aging treatment for 4 h in conventional furnace.

Key words: titanium alloy blade; hydrogen; isothermal forging; microstructural evolution

钛合金由于具有比强度高、热强性好和耐腐蚀等优点, 被广泛应用于航空航天领域, 更是制造航空发动机叶片的首选材料之一^[1-2]. 目前, 精确塑性成形是高性能发动机的关键制造技术, 是叶片生产的发展趋势^[3]. 但是由于钛合金变形抗力

大、变形温度高, 一般在 900 °C 以上, 精锻钛合金叶片时, 模具变形和磨损严重, 叶片的尺寸精度较低, 叶片的组织性能难以保证^[4-5]. 研究表明^[6-9], 采用热氢处理技术, 即把氢作为临时性合金元素加入钛合金中, 可以显著降低钛合金的变形抗力, 流变应力降幅最大达 70%, 降低成形温度约 100 ~ 150 °C, 增大变形速率约一个数量级. 这对提高叶片的锻造质量, 提高模具的寿命具有重要的意义. 钛合金热氢处理技术可划分为置氢、氢加工和真空脱氢 3 个步骤. 真空脱氢热处理不

收稿日期: 2010-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805037).

作者简介: 宗影影(1980—), 女, 博士, 讲师;

单德彬(1967—), 男, 教授, 博士生导师;

郭斌(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

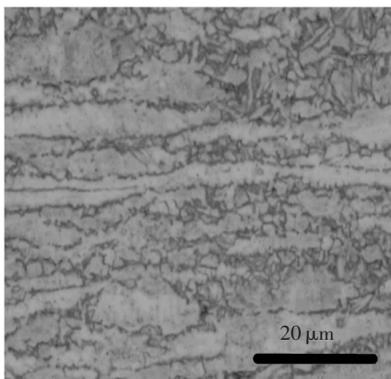
仅可以去除置氢工艺中加入的氢,防止室温下合金变脆,而且可以达到改善钛合金的组织结构和性能的目的。

因此,本文将热氢处理技术应用于钛合金叶片的锻造过程中,以提高钛合金的高温塑性,降低变形抗力,进而降低钛合金叶片的锻造温度,改善其组织结构。研究了未置氢 TC4 钛合金和置氢 TC4 钛合金叶片在不同等温锻造和热处理工艺下的组织演变规律,制定了置氢 TC4 钛合金叶片等温锻造和热处理的最佳工艺参数。

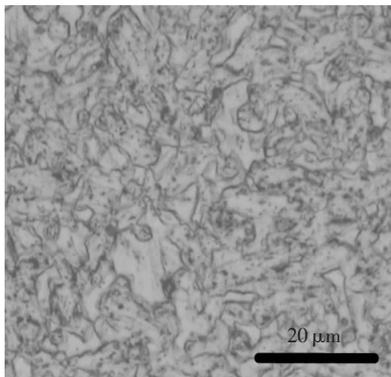
1 材料、设备及工艺

1.1 试验材料

试验所用材料为北京航空制造工程研究所提供的未置氢 TC4 钛合金和氢含量为 0.25% (质量分数) 的置氢 TC4 钛合金。置氢工艺为:抽真空→充氩气→升温至 750 °C→充氢气→保温 2 h→空冷至室温。TC4 钛合金叶片锻造前坯料的原始组织如图 1 所示。由图 1 可知,未置氢 TC4 钛合金坯料的原始组织较为粗大,为大块、拉长的 α 相和 β 相组成,组织存在严重的不均匀性;而 TC4 钛合金坯料经过氢处理工艺后,坯料的原始组织转变为多边形化的 α 相和 β 相。



(a) 未置氢



(b) H 质量分数 0.25%

图 1 TC4 钛合金锻造前坯料的原始组织

1.2 试验设备及工艺

试验所用锻造设备为天津锻压机床厂生产的

6 300 kN 四柱式液压机,锻造时模具的工作速度为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,坯料锻造温度为 850 °C 和 940 °C,真空脱氢所用设备为多功能真空热处理炉 (ZRY45A 型),热处理炉的真空度为 10^{-2} Pa 。由文献[10]制定脱氢热处理工艺为:室温 1 h 加热至 750 °C,后保温 5 h,随炉冷却至室温。借助光学显微镜观察 TC4 钛合金叶片的显微组织。

2 结果及讨论

2.1 锻造后的组织分析

在叶片锻造过程中,上下模具闭合,保证各坯料的压下量均一样。据文献[10],氢质量分数为 0.25% 的 TC4 钛合金,锻造温度宜选择在 850 °C。本文以锻造温度 850 °C 为例分析置氢对钛合金叶片等温锻造载荷的影响,如表 1 所示。由表 1 可知,相同锻造条件下置氢使钛合金等温锻造所需要的成形力明显降低。锻造温度 850 °C,模具下行速度 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时置氢钛合金锻造叶片成形质量良好,实物照片如图 2 所示。

表 1 TC4 钛合金叶片等温锻造载荷

序号	试验参数			载荷 /kN
	温度/°C	工作速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	氢质量分数/%	
1	850	1.4×10^{-5}	0	580
2			0.25	500
3		1×10^{-4}	0	680
4			0.25	580

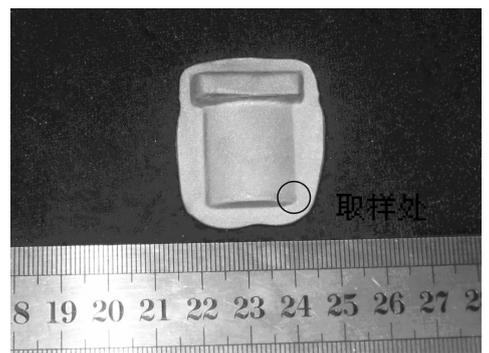


图 2 锻造叶片实物照片

叶片锻造后,真空脱氢热处理前,光学组织照片如图 3 所示。为方便比较,文中所有光学组织皆在如图 2 所示的叶尖处取样。当锻造温度为 940 °C,模具工作速度为 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对比置氢和未置氢 TC4 钛合金叶片组织可知(图 3(a)和图 3(d)),置氢 TC4 钛合金叶片为全针状马氏体组织,未置氢 TC4 钛合金叶片为等轴组织。这说明,置氢 TC4 钛合金在锻造温度 940 °C 时,为 β 锻造,置氢降低了 TC4 钛合金发生马氏体相转变

的最小冷却速率和 β 相转变点。

置氢 TC4 钛合金叶片在 850 °C 锻造时,组织为双态组织,含有马氏体 α' 相、剩余 β 相和少量初生 α 相,属于近 β 锻造,如图 3(b)和图 3(c)所示。随着温度的增加,当锻造温度加热到 940 °C 时马氏体 α' 相长度增长;随着模具工作速度的增加,马氏体 α' 相间距变小,组织变细,如图 3(c)和图 3(d)所示。这是因为锻造温度较高,合金中原子迁移扩散运动的速率高, α 相转变为 β 相充分,使锻造完成后 β 相转变为针状马氏体 α' 相时,马氏体 α' 相长度变长。

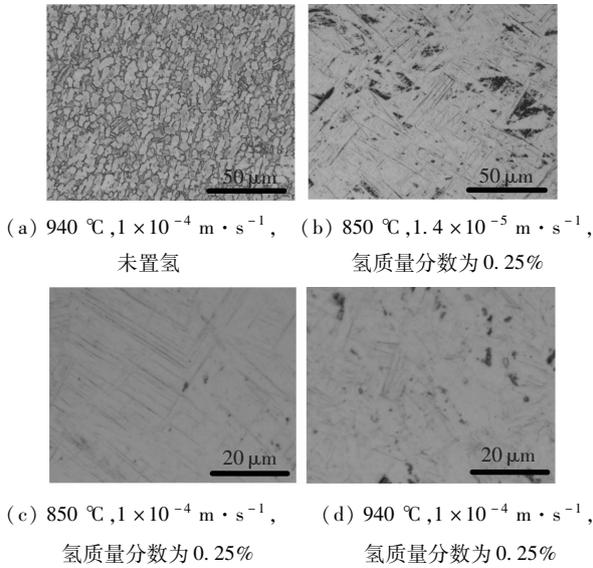


图3 TC4 钛合金叶片锻造后组织

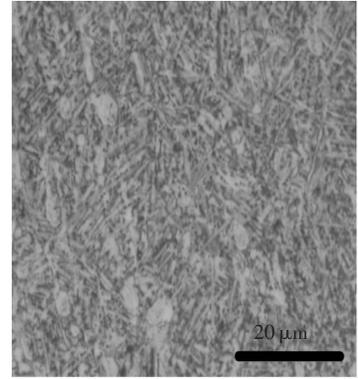
2.2 真空脱氢后的组织分析

脱氢热处理时,由于氢在 α 相和 β 相中扩散系数相差很大,影响了 β/α 转变时的马氏体 α' 相的形貌和尺寸,且脱氢热处理工艺的温度和保温时间对置氢 TC4 钛合金的组织有很大的影响。TC4 钛合金叶片真空脱氢后的光学组织如图 4 所示。可以看出真空脱氢后置氢 TC4 钛合金叶片中的针状马氏体 α' 相断裂球化长大,形成大量的等轴 α 相,发生 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 转变。对比锻造温度为 940 °C 和 850 °C 的置氢 TC4 钛合金叶片,发现锻造温度 850 °C 时,真空脱氢后针状马氏体 α' 相发生分解的趋势更加明显。

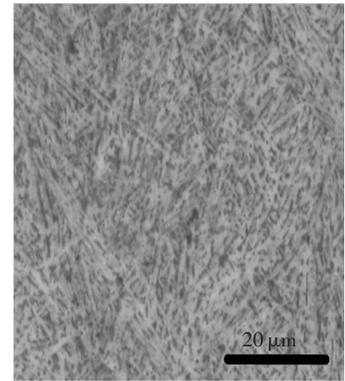
2.3 热处理后的组织分析

为了获得满足叶片使用性能的组织结构,真空脱氢热处理后对叶片进行了普通热处理。不同的显微组织对钛合金的力学性能有着强烈的影响。细小的组织可以提高钛合金的强度和韧性,还可以延缓裂纹形核;等轴组织往往具有高的塑性和疲劳强度,层状组织具有高的断裂韧性、优异的抗蠕变性能和抗疲劳裂纹扩展性能。双态组织综

合了层状和等轴状组织的优点,具有优良的综合性能^[11]。本文以探讨获得细小的双态组织的热处理工艺为研究目标。



(a) 850 °C



(b) 940 °C

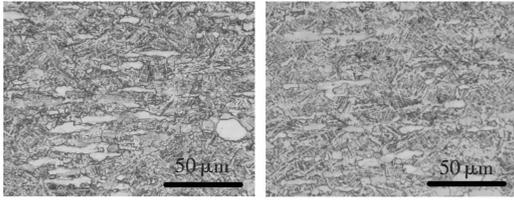
图4 TC4 钛合金叶片真空脱氢后的组织, $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

锻造温度 850 °C, 模具工作速度 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,置氢 TC4 钛合金叶片真空脱氢后,在不同热处理工艺下的组织形貌如图 5 所示。对比置氢 TC4 钛合金叶片真空脱氢后,以不同温度退火,但均在 500 °C 时效 4 h 的组织照片可知,当退火温度为 700 °C 时马氏体 α' 相断裂球化不充分, α 相呈拉长形貌,且沿马氏体 α' 相分布;当退火温度为 900 °C 时马氏体 α' 相球化充分, α 相呈等轴弥散分布形貌,如图 5(a)和图 5(c)所示。因此,适宜的退火温度选择为 900 °C。

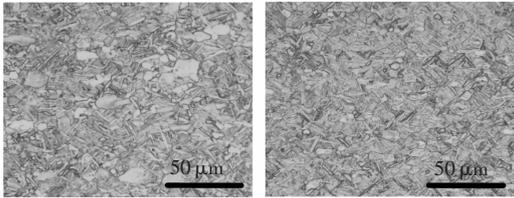
置氢 TC4 钛合金叶片真空脱氢后,在 900 °C 退火,再分别以不同温度时效 4 h,其组织如图 5(c)和图 5(d)所示。可知,当时效温度为 500 °C 时,组织中细小的等轴 α 相长大成粗大的等轴 α 相, α 相的尺寸约为 16 μm ;当时效温度为 450 °C 时得到双态组织,细小、等轴的 α 相呈弥散分布状态,其尺寸约为 8 μm 。因此,适宜的时效温度选择为 450 °C。

由上述分析可知,置氢 TC4 钛合金叶片可以通过固溶时效达到改善组织的目的。置氢 TC4 钛合金叶片从真空脱氢前的针状马氏体转变为固溶时效后的双态组织,适宜的热处理工艺为 750 °C

真空脱氢保温 5 h, 900 °C 退火 1 h 后 450 °C 时效 4 h.



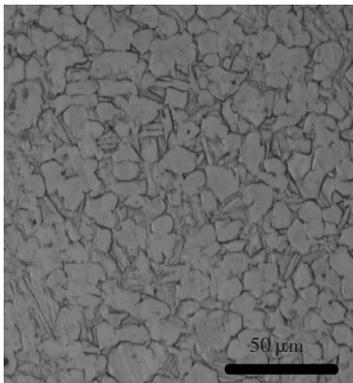
(a) 700 °C 退火 1 h 后 500 °C 时效 4 h (b) 700 °C 退火 1 h 后 450 °C 时效 4 h



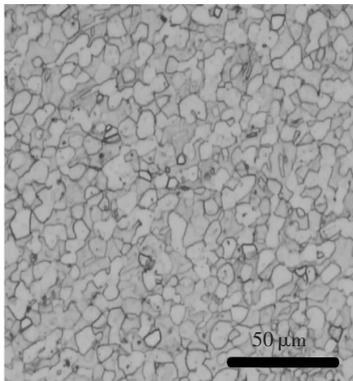
(c) 900 °C 退火 1 h 后 500 °C 时效 4 h (d) 900 °C 退火 1 h 后 450 °C 时效 4 h

图 5 叶片真空脱氢后,不同热处理工艺下的组织

图 6 为未置氢 TC4 钛合金叶片在锻造温度 940 °C, 模具工作速度 $1.4 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 锻造后的组织照片和热处理后的组织照片. 对比分析可知, 未置氢钛合金锻造叶片热处理前后的组织均为等轴组织, 且组织变化不大. 说明对未置氢钛合金叶片, 通过固溶时效改善组织的途径困难.



(a) 锻造后叶片组织



(b) 热处理后叶片组织

图 6 未置氢 TC4 钛合金叶片热处理前后的组织

3 结 论

1) 置氢降低了 TC4 钛合金发生马氏体相转变的最小冷却速率和 β 相转变点, 降低了 TC4 钛合金叶片的锻造载荷.

2) 置氢 TC4 钛合金脱氢热处理后, 马氏体 α 相断裂球化成细小 α 相, 且长大、等轴化的趋势明显.

3) 对未置氢 TC4 钛合金叶片, 通过固溶时效改变组织的途径困难, 而置氢 TC4 钛合金叶片可以通过固溶时效达到改变组织的目的. 置氢 TC4 钛合金叶片从真空脱氢前的针状马氏体转变为固溶时效后的双态组织, 适宜的热处理工艺为 750 °C 真空脱氢保温 5 h, 再 900 °C 退火 1 h 后 450 °C 时效 4 h.

参考文献:

- [1] HU Z M, DEAN T A. Aspects of forging of titanium alloys and production of blade forms[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/3): 10 - 19.
- [2] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况[J]. 航空科学技术, 2005, (4): 3 - 6.
- [3] 钟杰, 胡楚江, 郭成. 叶片精密锻造技术的发展现状及其展望[J]. 锻压技术, 2008, 33(1): 1 - 5.
- [4] 刘莹, 曲周德, 王本贤. 钛合金 TC4 的研究开发与应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(1): 47 - 50.
- [5] 曲银化, 孙建科, 孟祥军. 钛合金等温锻造技术研究进展[J]. 钛工业进展, 2006, 23(1): 6 - 9.
- [6] 候红亮, 李志强, 王亚军, 等. 钛合金置氢处理技术及其应用前景[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 533 - 549.
- [7] ZONG Y Y, SHAN D B, LV Y, *et al.* Effect of 0.3 wt. % H addition on the high temperature deformation behaviors of Ti-6Al-4V alloy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(16): 3936 - 3940.
- [8] ZONG Y Y, SHAN D B, LV Y, *et al.* The effect of hydrogen on the strengthening and softening of Ti-6Al-4V alloy[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(6): 449 - 452.
- [9] FROES F H, SENKOV O N, QAZI J I. Hydrogen as a temporary alloying element in titanium alloys: Thermo-hydrogen processing [J]. International Materials Reviews, 2004, 49(3/4): 227 - 245.
- [10] 宗影影. 置氢钛合金高温增塑机理及其变形规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] 莱茵斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 14 - 15.