

置氢 TC16 钛合金微观组织与变形行为

韩玉杰^{1,2}, 王耀奇^{1,2,3}, 侯红亮^{1,2,3}, 徐严谨^{1,2,3}

(1. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

(2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

(3. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024)

摘要: 通过置氢处理得到不同氢含量的 TC16 钛合金, 采用连续升温法研究了氢含量对 TC16 钛合金相转变温度的影响, 利用光学显微镜研究了置氢 TC16 钛合金的微观组织, 应用准静态压缩试验研究了置氢 TC16 钛合金的变形行为, 通过磁脉冲冷镦试验研究了高应变速率下合金的变形行为。结果表明, TC16 钛合金相变温度随氢含量的增加而单调递减, 当氢含量达到 0.30% 时 (质量分数, 下同), 相变温度大约下降 150 °C; 置氢 TC16 钛合金微观组织发生变化, 低氢时出现了马氏体组织, 高氢时主要由等轴 β 相组织构成; 置氢 TC16 钛合金的变形速度敏感性增加, 随着变形速度的提高, 其变形性能得到改善。在高应变速率条件下压缩变形极限大于 86%, 通过冷镦试验制备了表面完好的托板螺母, 对变形行为进行了验证。

关键词: 置氢处理; TC16 钛合金; 显微组织; 变形行为

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)S1-051-05

钛及其合金具有比强度高、高温性能好、防腐蚀能力强、无毒以及良好的生物相容性等一系列优异特性, 在航空、航天、船舶、车辆工程、生物医学等领域得到广泛应用, 如钛合金紧固件、壁板、叶片等, 被越来越多地用于飞机结构件^[1,2]。随着钛合金及其复合材料在飞机上用量的不断扩大, 对钛合金紧固件的需求也在不断增加^[3]。其中 TC16 钛合金是一种常规的钛合金紧固件的原材料, 该合金属于高强度钛合金, 其不仅具有较高的力学性能, 同时具有优异的冷镦性能, 可实现冷镦成型, 满足高效、连续、自动生产要求。目前, 小直径的螺栓、螺钉和自锁螺母均采用冷镦方法成型。但是针对零件的变形量大, 成型条件苛刻的钛合金紧固件 (如托板螺母), 现有的冷镦技术无法满足成型要求, 需要进行热镦成型。

钛合金热氢处理技术, 作为改善钛合金加工性能的新方法、新技术被广泛深入地研究^[4-7]。它利用氢作为临时合金化元素来改变合金的相变和组织结构以达到改善合金加工性能的目的^[8-11]。目前, 国外采用置氢处理技术已经将大直径钛合金紧固件的工艺改为冷镦。由于设备能力限制, 现有设备在钛合金未置氢处理时仅可以生产 M8 以下的紧固件, 大直径紧固件还需要进行热镦成型。利用置氢处理可以稳定地生产直

径为 M8 至 M16 的紧固件, 大大提高了生产效率。近年来国内学者针对静态变形行为做了一些研究工作^[12], 但是针对动态变形行为未有研究。本工作系统研究了置氢处理对钛合金微观组织及静态、动态变形行为的影响, 揭示其变形机理。

1 实验

本实验的材料为 TC16 合金棒材, 其状态为退火态, 退火制度为: 750 °C, 保温 2.0 h, 炉冷到 550 °C, 出炉空冷。TC16 合金的微观组织如图 1 所示, 化学成分如表 1 所示。

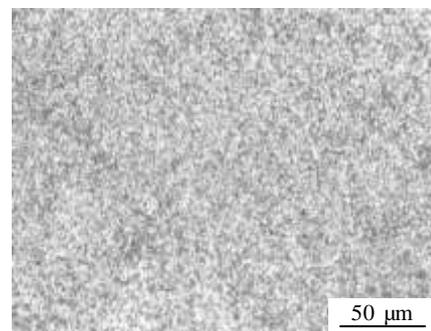


图 1 原始 TC16 钛合金显微组织

Fig.1 Optical micrograph of the TC16 alloys

收稿日期: 2016-12-31

基金项目: 航空基金 (2015ZE25006)

作者简介: 韩玉杰, 男, 1988 年生, 硕士, 北京航空制造工程研究所, 北京 100024, 电话: 010-85701237, E-mail: hanyujiehao@126.com

表 1 TC16 棒材化学成分

Table 1 Chemical composition of the TC16 bar (wt%)

Al	Mo	V	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	Ti
3.13	5.07	4.64	0.021	<0.05	<0.05	<0.08	0.12	0.01	0.0014	Bal.

钛合金试样尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ，经表面处理后置入自制的管式氢处理炉，保持炉内真空 $\leq 5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。试样在 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行置氢，保温 2 h 后空冷。利用高精度物理天平通过称重法测定氢含量（精密天平感量 10^{-5} g ）。置氢试样装入石英管中，抽高真空并封装，置入箱式电阻炉加热至预定温度，保温 30 min 后淬火，淬火时入水瞬间将石英管激碎。

选择淬火态试样采用连续升温法利用金相显微镜研究置氢 TC16 钛合金的 $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ 相转变温度，氢含量范围为 0%~1.2%，温度间隔为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。利用金相显微镜研究置氢对钛合金微观组织的影响。利用 Instron-5500R 电子万能材料试验机对置氢 TC16 钛合金进行室温压缩试验，压缩速度分别为 0.3、3、30 和 300 mm/min。利用 EMF30/5 型电磁成形机对置氢 TC16 钛合金进行了磁脉冲冷镦试验，试验所用的电容均为 $2660 \text{ } \mu\text{F}$ ，放电电压分别为 1.9、2.0、2.1、2.3 与 2.5 kV。试样端面均用二硫化钼 (MoS_2) 润滑。

2 结果与讨论

2.1 氢含量对相转变温度的影响

图 2 给出了不同氢含量 TC16 钛合金相变温度附近淬火组织。从图中可以看出，原始合金 $870 \text{ }^\circ\text{C}$ 淬火后，微观组织未发生明显变化，仍以细小的等轴态的

$\alpha + \beta$ 相为主， $875 \text{ }^\circ\text{C}$ 淬火后有大量的马氏体产生。置氢 0.30% 的 TC16 钛合金 $730 \text{ }^\circ\text{C}$ 淬火后， α 相基本消失，并且出现马氏体。置氢 0.74% 的 TC16 钛合金 $725 \text{ }^\circ\text{C}$ 淬火后，出现少量马氏体，而等轴 α 大幅度减少。图 3 所示为 TC16 钛合金的相变温度与氢含量的关系。随着氢含量的增加，相变温度降低。当氢含量达到 0.30% 时， $\alpha + \beta / \beta$ 相变温度大约下降 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ；当氢含量高于 0.8% 时， $\alpha + \beta / \beta$ 相变温度已经降低至 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。因此，在 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 置氢过程中，当氢含量高于 0.8% 时，将发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变，材料中的 β 相的比例增加，塑性变形能力得到改善。

2.2 氢含量对微观组织的影响

图 4 为不同氢含量条件下的 TC16 钛合金高温淬火后的金相显微组织。通过金相组织照片可知，TC16 钛合金的晶粒粗化，晶粒尺寸大约为 $100 \text{ } \mu\text{m}$ ，应为 β 相晶粒。在 β 相内部，分布着相互平行的针状马氏体组织，这是因为合金在高温淬火时发生非平衡相转变。当氢含量较低时，可以观察到相互平行交错的针状组织，初步判断为马氏体，由此可以说明，钛合金中的氢在降低 β 相转变温度的同时，也降低了马氏体转变温度。与原始合金相比，合金的显微组织中马氏体明显增多，观察不到完整的 β 晶界。当氢含量较高时，微观组织以细小的等轴晶为主，通过对相变温度的测

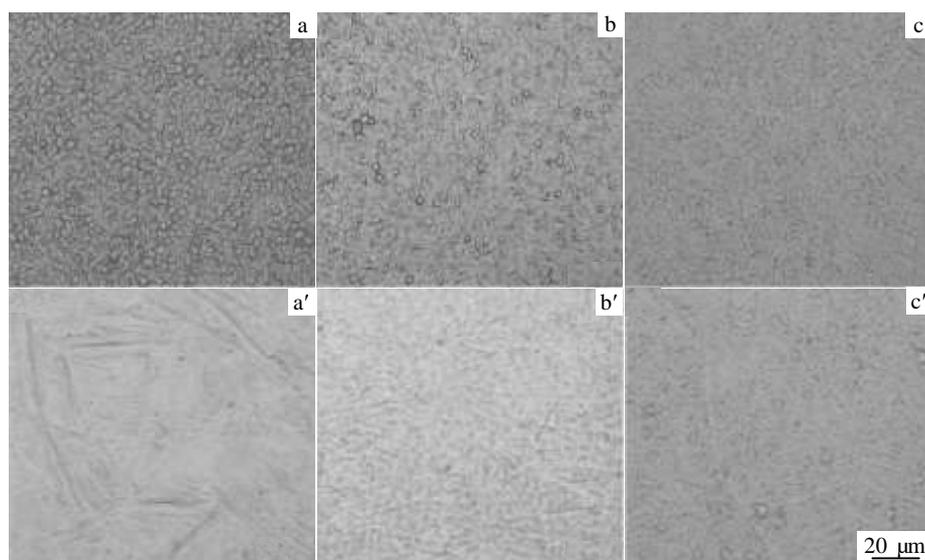


图 2 不同氢含量的 TC16 钛合金相变温度附近的淬火组织

Fig.2 Optical micrographs of the hydrogenated TC16 titanium alloys after quenching at the phase transformation temperatures:

(a) 0.00%/870 $^\circ\text{C}$, (a') 0.00%/875 $^\circ\text{C}$; (b) 0.30%/725 $^\circ\text{C}$, (b') 0.30%/730 $^\circ\text{C}$; (c) 0.74%/720 $^\circ\text{C}$, (c') 0.74%/725 $^\circ\text{C}$

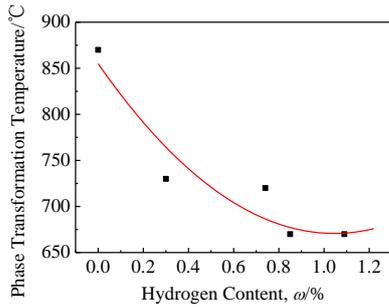


图3 TC16 钛合金相变温度与氢含量的关系曲线

Fig.3 Relation of the phase transformation temperatures of TC16 titanium alloys to the hydrogen content

定可知，此时的相变温度为 670 °C，且此时的氢含量可以将 TC16 钛合金的 β 相稳定到室温，故断定此时合金的组织为 β 单相等轴晶。

2.3 准静态室温压缩变形

不同氢含量条件下置氢 TC16 钛合金不同变形速度的准静态压缩变形真应力-应变曲线如图 5 所示。图 5 表明，TC16 钛合金置氢处理后，其变形行为发生了较大变化，未置氢 TC16 钛合金在变形过程中加工硬化占主导地位，随着应变的增加，应力稳步上升。置氢 TC16 钛合金在变形过程中则出现了稳态变形特征，应力基本保持不变；研究其屈服强度可以发现，随着氢含量的增加屈服强度呈现先降低再升高的变化趋势。

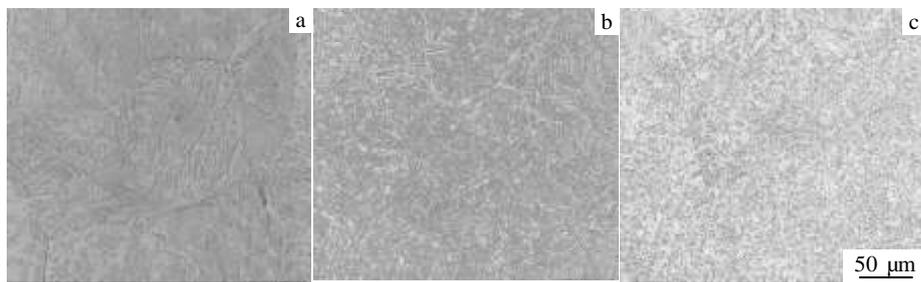


图4 不同氢含量的 TC16 钛合金高温淬火后的金相显微组织

Fig.4 Optical microstructures of hydrogenated TC16 alloy with different hydrogen contents after quenching:

(a) 0.00%, (b) 0.216%, and (c) 0.829%

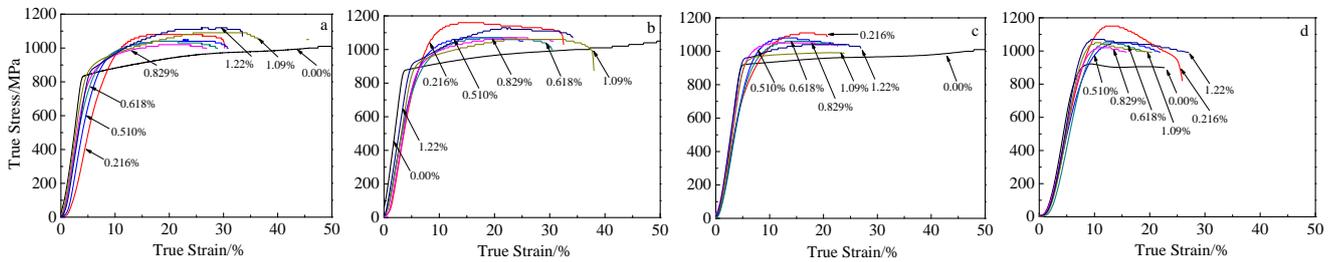


图5 不同氢含量的 TC16 钛合金不同变形速度的准静态压缩变形真应力-真应变曲线

Fig.5 True stress-true strain curves of the static compression tests with different deformation velocities:

(a) 0.3 mm/min, (b) 3.0 mm/min, (c) 30 mm/min, and (d) 300 mm/min

置氢 TC16 钛合金不同压缩速度下的极限变形率与氢含量的关系曲线如图 6 所示。图 6 表明，当压缩速度低于 30 mm/min 时，置氢 TC16 钛合金的极限变形率大幅度降低，由原始合金的 80% 左右降低至 20% 左右，氢含量对合金极限变形率的影响并不显著。当压缩速度为 300 mm/min 时，置氢 TC16 钛合金的极限变形率随氢含量的增加呈现倒 S 变化趋势，氢含量在 0.618% 至 0.829% 范围内，极限变形率达到 80% 左右，接近原始材料的极限变形率。与低压速条件下相比，极限变形率有较大幅度的增加，材料表现出一定的压缩速度敏感性。

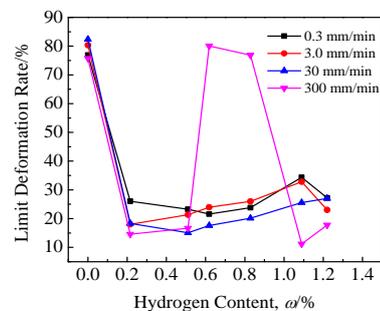


图6 不同压缩速度下极限变形率与氢含量关系曲线

Fig.6 Relation of the limit deformation rate to hydrogen content under various compression velocities

2.4 动态室温压缩变形

基于置氢钛合金在准静态条件下表现出的变形速度敏感性, 利用电磁成型方法进行动态室温压缩试验, 进一步验证准静态压缩试验得到的试验结果。图 7 为置氢 0.65% 的 TC16 钛合金磁脉冲冷镦试样外观图。通过观察可以发现, 在放电电压 1.9~2.5 kW 范围内, 试样表面上均没有出现宏观裂纹, 说明此时材料未达到其极限变形。置氢 0.65% 的 TC16 钛合金变形率与放电电压的关系曲线如图 8 所示。图 8 表明, 随着放电电压的增加, 变形率单调上升, 在放电电压 2.5 kW 时, 变形率达 86%。可见置氢 0.65% 的 TC16 钛合金的极限变形率大于 86%, 高于准静态压缩变形的极限变形率。

利用冷镦机进行了托板螺母的冷镦实验, 对置氢 TC16 钛合金的镦锻性能进行验证。不同氢含量坯料冷墩双耳托板螺母外观如图 9 所示。可以看出, 当氢含量低于 0.40% 时, 托板螺母头部都出现了不同程度的裂纹, 无法成型零件, 而当氢含量高于 0.65% 时, 通过冷镦获得了完整的头部轮廓, 与研究结果基本一致。



图 7 置氢 0.65% TC16 钛合金磁脉冲冷镦试样
Fig.7 Magnetic cold heading sample of hydrogenated 0.65% TC16 alloy

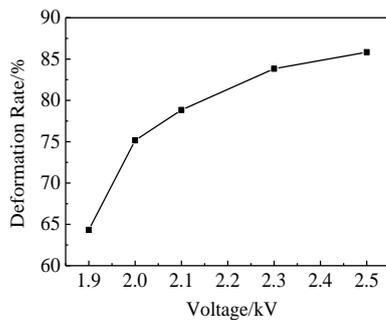


图 8 置氢 0.65% TC16 钛合金变形率与放电电压的关系曲线
Fig.8 Relation of the deformation rate to voltage for hydrogenated 0.65% TC16 alloy



图 9 不同氢含量坯料冷墩 TM5 托板螺母外观图

Fig.9 Cold heading TM5 supporting-plate nuts with different hydrogen contents

3 结 论

1) TC16 钛合金的相变温度随氢含量的增加而单调递减, 当氢含量达到 0.30% 时, $\alpha+\beta/\beta$ 相变温度大约下降 150 °C。

2) 氢可以抑制 TC16 钛合金淬火过程的马氏体相变, 促进了更稳定的亚稳 β 的生成。低氢时出现了马氏体组织, 高氢时主要由等轴 β 相组织构成。

3) 材料表现出变形速度敏感性, 高变形速度条件下, 置氢 0.618% 至 0.829% 范围内合金的极限变形率得到大幅度提高, 利用磁脉冲成型在置氢 0.65% 条件下其变形极限达到 86%, 置氢 TC16 钛合金更适用于高速变形。

参考文献 References

- [1] Hou Hongliang(侯红亮), Li Zhiqiang(李志强), Wang Yajun(王亚军) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metal*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(3): 533
- [2] Bhowmik S, Benedictus R, Poulis JA et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives*[J], 2009, 29(3): 259
- [3] Yuan Baoguo(袁宝国), Yu Haiping(于海平), Li Chunfeng(李春峰) et al. *Materials Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 2010, 18(2): 221
- [4] Huang Dong(黄东), Nan Hai(南海). *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2004, 29(6): 44
- [5] Zhang Shaoqing(张少卿). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 1992(2): 24
- [6] Yuan Baoguo, Li Chunfeng, Yu Haiping et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2009, 19(S): 423
- [7] Senkov O N, Froes F H. *International Journal of Hydrogen Energy*[J], 1999, 24: 565
- [8] Eliaz N, Eliezer D, Olson D L. *Materials Science and Engineering*[J], 2000, A289: 41
- [9] Goltsov V A, Veziroglu T N, Goltsova L F. *International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2006, 31: 153
- [10] Zong Y Y, Shan D B, Xu M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209(4): 1988
- [11] Yeom J T, Kim J H, Hong J K et al. *International Journal of Modern Physics*[J], 2009, 23(6-7): 808
- [12] Sun Zhonggang(孙中刚), Chen Guoqing(陈国清), Zhou Wenlong(周文龙) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(2): 357

Microstructure and Deformation Behavior of Hydrogenated TC16 Titanium Alloy

Han Yujie^{1,2}, Wang Yaoqi^{1,2,3}, Hou Hongliang^{1,2,3}, Xu Yanjin^{1,2,3}

(1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

(2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technology, Beijing 100024, China)

(3. Beijing Key Laboratory of Digital Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China)

Abstract: TC16 titanium alloys with different hydrogen contents were obtained using a hydrogenating treatment. Effects of the hydrogen content on phase transformation temperatures of TC16 titanium alloys were investigated by a continuous heating method. Microstructures of hydrogenated TC16 titanium alloys were studied using OM, deformation behaviours were studied using quasi-static compression tests, and the deformation behaviours at high strain rates were investigated using magnetic cold heading. The results show that phase transformation temperature of TC16 titanium alloy decreases with the increasing of hydrogen content. When the hydrogen amount reaches 0.3 wt%, the phase transformation temperature decreases by about 150 °C. Microstructures of hydrogenated TC16 titanium alloy changes as well, martensite phase occurs for low hydrogen content, while equal-axial β phase for high hydrogen quantity. Deformation velocity sensitivity of hydrogenated TC16 titanium alloy increases. With the increasing of deformation velocity, the formability is improved, the limit compression deformation is greater than 86% at a high strain rate. Layer board nuts with perfect surfaces are prepared by cold up-setting tests, and the deformation behaviour is validated.

Key words: hydrogenation; TC16 titanium alloy; microstructure; deformation behavior

Corresponding author: Wang Yaoqi, Master, Senior Engineer, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701237, E-mail: xiaoqigh@sina.com