

# Ti-6Al-4V 合金氢致塑性效应与应用

王耀奇<sup>1,\*</sup>, 侯红亮<sup>1</sup>, 孙中刚<sup>2</sup>

1. 中国航空工业集团公司 北京航空制造工程研究所, 北京 100024
2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116085

**摘要:** 利用光学显微镜研究了置氢处理后 Ti-6Al-4V 合金的微观组织, 通过 X 射线衍射分析试验研究了置氢处理过程中的相转变过程; 采用室温压缩试验研究了置氢处理后 Ti-6Al-4V 合金的变形行为, 并进行了冷镦试验。结果表明, 氢促进了  $\alpha'$  马氏体与亚稳  $\beta$  相的形成, 亚稳  $\beta$  相的形成与转变是 Ti-6Al-4V 合金变形性能提高的主要因素; 在氢含量为 0.60%~0.90% 时, 与原始合金相比, 峰值应力降低 60 MPa, 压缩极限提高 40% 以上; 氢含量为 0.80% 时, 通过冷镦成型制备了直径为  $\varnothing 10$  mm 的 Ti-6Al-4V 合金 90° 沉头螺钉。

**关键词:** 钛合金; Ti-6Al-4V 合金; 置氢处理; 微观组织; 变形行为; 沉头螺钉

**中图分类号:** V250.2; TG146.2+3 **文献标识码:** A

钛合金紧固件具有重量轻、比强度高、耐腐蚀和疲劳性能好等综合性能, 能够满足现代先进飞机在减重、耐腐蚀及耐疲劳等方面的要求, 并且钛合金紧固件还是复合材料关键结构的最佳连接件, 因此在飞机、导弹和火箭等高速飞行器上得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。作为主要的钛合金紧固件材料之一的 Ti-6Al-4V 合金<sup>[2]</sup>, 它的冷塑性很差, 不能进行冷成型, 因而其紧固件只能采用热镦法进行, 尤其对于大尺寸的紧固件, 如  $\varnothing 8\sim 16$  mm 的螺栓的热镦温度范围为 700~750 °C。然而热镦时材料在热作用下, 组织结构将发生恶化, 极大地影响所获紧固件的机械性能, 同时热镦模具在热与循环载荷的作用下, 使用寿命降低, 生产成本增加<sup>[3]</sup>。因此提高 Ti-6Al-4V 合金室温塑性, 实现其紧固件的室温成型, 具有重要的工程意义与应用价值。

氢处理技术是近年来改善钛合金性能的一种新方法, 它是利用氢作为临时合金元素, 通过不同的处理工艺来改变合金的相成分和组织结构, 从

而改善合金的各种加工性能<sup>[4-9]</sup>。在室温增塑方面, 俄罗斯学者 Tsiolkovsky 在淬火后的 BT15 和 BT30 型钛合金中观察到低温氢增塑现象, 原始试样初始裂纹出现前的镦粗极限变形约为 60%, 当试样中氢的质量分数达到 0.11% 时, 镦粗压扁至锋利边缘的薄饼, 在其侧面未出现任何裂纹。《标准件》科学生产联合公司已将低温氢增塑使用在淬火的 BT30 合金托板螺母的生产上, 在 BT16 合金大直径螺栓的生产中采用可逆的氢合金化, 已将热镦改为冷镦<sup>[10]</sup>。不仅如此, 俄罗斯学者 Ilyin 等<sup>[11]</sup>在淬火后的  $\alpha+\beta$  钛合金中也观察到低温增塑现象。国内在这方面也开展了相关的研究工作, 并且取得了一定的研究进展<sup>[12-14]</sup>。笔者在前期研究工作的基础上, 优化了置氢处理工艺, 系统研究了置氢处理过程中 Ti-6Al-4V 合金的组织转变规律以及置氢处理后 Ti-6Al-4V 合金的室温压缩性能, 并进行了冷镦试验, 制备了直径为  $\varnothing 10$  mm 的 90° 沉头螺钉, 并对试验结果进行了验证。

收稿日期: 2010-11-18; 退修日期: 2011-01-14; 录用日期: 2011-03-01; 网络出版时间: 2011-03-10 17:11:21

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110310.1711.003.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110310.1711.003

\* 通讯作者. Tel.: 010-85701254 E-mail: xiaogqh@sina.com

引用格式: 王耀奇, 侯红亮, 孙中刚. Ti-6Al-4V 合金氢致塑性效应与应用[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1563-1568. Wang Yaoqi, Hou Hongliang, Sun Zhonggang. Plastic effect of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy and its application [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1563-1568.

## 1 试验材料及方法

试验材料为宝鸡钛业股份有限公司生产的退火态的 Ti-6Al-4V 合金棒材,其直径为 $\varnothing 10$  mm,材料的微观组织为片状  $\alpha+\beta$  相,如图 1 所示。

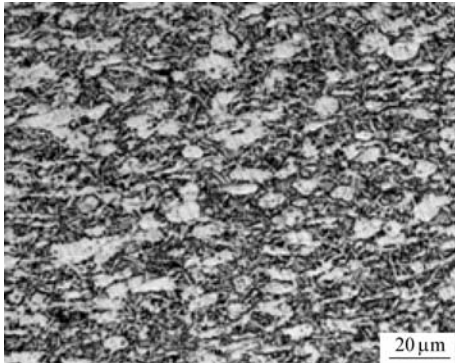


图 1 Ti-6Al-4V 合金金相组织

Fig. 1 Metallurgical structure of Ti-6Al-4V alloy

置氢处理工艺流程如图 2 所示,试样经表面处理,置入自制的管式氢处炉内,在 750 °C 条件下采用固态充氢法进行置氢试验,通过控制充氢时间控制试样中的氢含量,采用高精度物理天平通过称重法测量试样的氢含量,高精度物理天平的质量为  $1 \times 10^{-5}$  g。将置氢试样加热至相变温度以上 10 °C,保温 30 min 后淬火,淬火延迟时间小于 4 s。通过置氢处理,获得了氢含量分别为 0.17%、0.45%、0.59%、0.80% 和 0.90% 的置氢试样,与其对应的相变温度分别为 880 °C、825 °C、815 °C、805 °C 和 805 °C<sup>[13]</sup>。

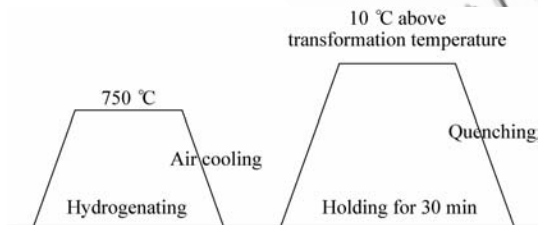


图 2 Ti-6Al-4V 合金置氢处理工艺

Fig. 2 Process of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy

置氢处理后,利用 X 射线衍射(XRD)研究置氢 Ti-6Al-4V 合金的相组成,采用 OLYMPLUS BX41M 金相显微镜观察不同氢含量的 Ti-6Al-4V 合金的微观组织,侵蚀试剂为 Kroll 试剂(1~3 mL HF, 2~6 mL HNO<sub>3</sub>, 100 mL H<sub>2</sub>O),将置氢试样在 CMT4305 万能试验机上进行室温压缩试验,试样的尺寸规格为 $\varnothing 8$  mm $\times$ 12 mm,压缩

变形速率 10 mm/s。在此基础上,优化工艺参数,在冷镦机上进行冷镦试验,试样表面涂覆润滑剂,制备 90° 的沉头镦钉,对上述结果的有效性进行工程化验证。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 氢对微观组织的影响

置氢处理后,Ti-6Al-4V 合金的 XRD 图谱如图 3 所示,图中  $\theta$  为衍射角。由图 3 可知,氢含量较低时,材料中形成了  $\alpha'$  马氏体,其衍射峰与  $\alpha$  相衍射峰基本重合;随着氢含量的增加,当氢含量达到 0.45% 时,一部分  $\alpha'$  衍射峰发生分裂现象,材料中出现了  $\alpha''$  衍射峰,且  $\alpha''$  衍射峰强度较高,说明材料中形成了  $\alpha''$  马氏体,并且体积分数较大;当氢含量进一步升高时,材料中出现了  $\beta$  衍射峰。随着氢含量的增加,衍射峰强度逐渐增强,说明  $\beta$  相比比例增加。

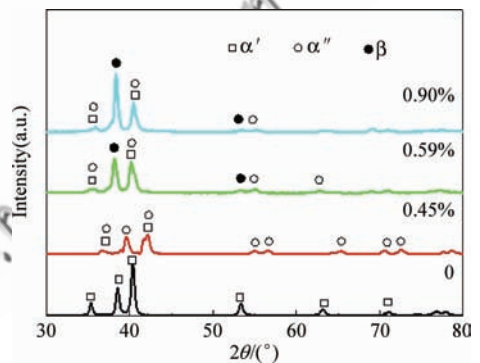
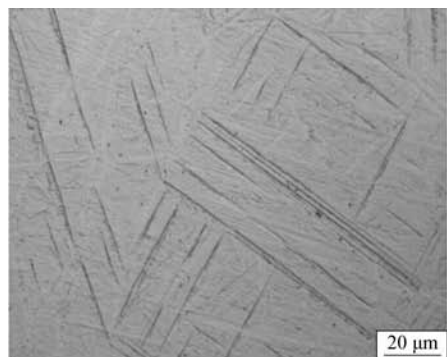


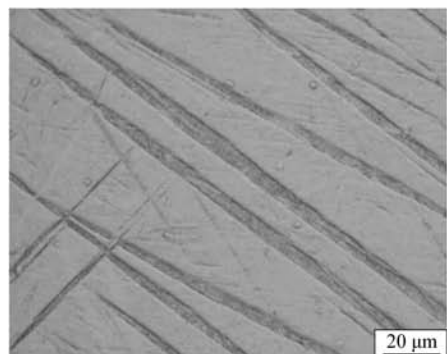
图 3 置氢处理 Ti-6Al-4V 合金 XRD 图谱

Fig. 3 XRD (X-ray diffraction) patterns of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy

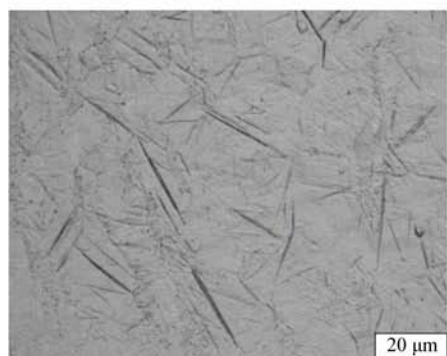
置氢处理后,Ti-6Al-4V 合金微观组织如图 4 所示。由图 4 可知,置氢处理后,氢含量较低时,形成了大量细小针状  $\alpha'$  马氏体,相互之间呈一定角度分布,其晶体结构与  $\alpha$  相相同,为密排六方结构,如图 4(a) 所示;随着氢含量的增加, $\alpha'$  马氏体数量减少,在试样中出现了粗大的斜方形  $\alpha''$  马氏体,氢含量为 0.45% 时, $\alpha''$  马氏体尺寸与相比比例均达到最大,体积分数约为 90%,如图 4(b) 所示;当氢含量进一步增加时, $\alpha''$  马氏体尺寸和体积分数急剧降低,出现了更为稳定的亚稳  $\beta$  相,如图 4(c) 和图 4(d) 所示。



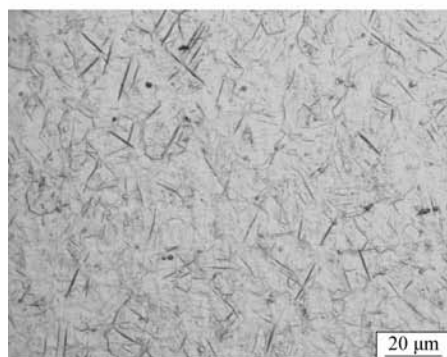
(a) With hydrogen content 0.17%



(b) With hydrogen content 0.45%



(c) With hydrogen content 0.60%



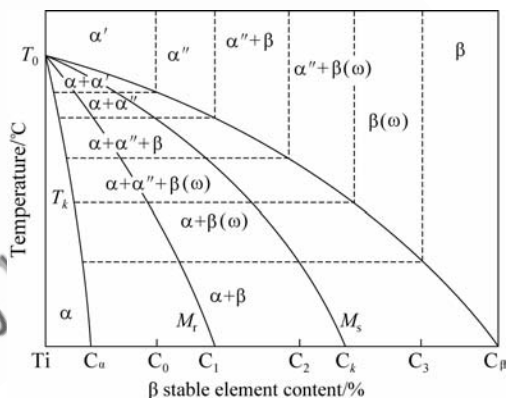
(d) With hydrogen content 0.80%

图4 置氢处理 Ti-6Al-4V 合金金相组织

Fig. 4 Metallurgical structure of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy

Ti-6Al-4V 合金置氢处理后,微观组织形态

与氢含量相关,根据 Ti- $\beta$  稳定元素亚稳相图(如图 5 所示,氢是  $\beta$  相同晶元素)<sup>[15]</sup>,不难发现,氢含量较低时( $<0.17\%$ ),晶格转变阻力小, $\beta$  相由体心立方晶格直接转变为六方晶格的  $\alpha'$  马氏体;随着氢含量的增加,相变的晶格转变阻力变大, $\beta$  相不能直接转变为六方晶格的  $\alpha'$  马氏体,只能转变为斜方晶格的  $\alpha''$  马氏体, $\alpha'$  马氏体相比比例降低,而  $\alpha''$  马氏体相比比例增加;当氢含量进一步增加时( $>0.45\%$ ), $\alpha''$  马氏体数量减少, $\beta$  相将转变为由  $\alpha'$  马氏体与  $\beta$  亚相组成的混合物。因为氢元素在钛合金中以间隙固溶的形式存在,所以在钛合金中不能无限固溶,存在一定的固溶度,当氢含量超过其固溶度时,将产生钛氢化合物,不再起到稳定作用,因此其淬火过程中无法形成  $\omega$  相及  $\beta$  相。图 5 中: $T_0$  和  $T_k$  均代表不同条件下的相转变温度; $T_0C_k$  线是  $M_s$  线,即马氏体转变开始线; $T_0C_1$  线是  $M_r$  线,即马氏体转变终止线。

图5 Ti- $\beta$  稳定元素亚稳相图<sup>[15]</sup>Fig. 5 Metastable phase diagram of Ti- $\beta$  stable element<sup>[15]</sup>

## 2.2 氢对压缩变形行为的影响

置氢 Ti-6Al-4V 合金的室温压缩过程中真应力-真应变曲线如图 6 所示,结果显示,置氢后材料的峰值应力与氢含量相关,在氢含量为  $0.17\%$  时,峰值应力达到最大。根据真应力-真应变曲线的形状,可将其归纳为两类:

I 类:氢含量小于  $0.17\%$  时,加工硬化占主导地位,当应力达到峰值后便开始降低,均匀变形阶段较短;

II 类:氢含量大于  $0.17\%$ ,应变量较小时,加工硬化占主导地位,随着应变的增加,出现了软化的现象,在真应力-真应变曲线上表现为加工硬化

与软化相平衡,这只有在材料的高温变形过程中才表现出来的特质。

可见,置氢处理不但影响了材料的峰值应力,也影响了材料的硬化行为。

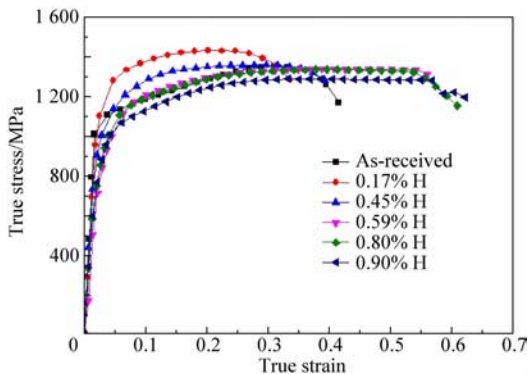


图6 置氢处理 Ti-6Al-4V 合金真应力-真应变曲线  
Fig. 6 True stress-true strain curves of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy

置氢处理后,氢对 Ti-6Al-4V 合金室温力学性能的影响如图 7 和图 8 所示。研究表明,随着氢含量的增加,峰值应力增加,在氢含量为 0.17% 时,达到最大,与原始合金相比,峰值应力增加 80 MPa。之后,峰值应力快速降低,当氢含量大于 0.59% 时,峰值应力小于原始合金,并且随着氢含量的增加,峰值应力降低的幅度增大。在氢含量为 0.90% 时,峰值应力为 1 286 MPa,比原始合金降低了 60 MPa;同时,压缩极限随氢含量的增加,呈“S”型变化趋势,与强度变化相反。在氢含量为 0.17% 时,压缩极限达到极小值。之后,压缩极限快速增加,当氢含量大于 0.59% 时,压缩极限变化趋缓,由原始合金的 31% 增加到 44%,增幅达 40%,可见在此工艺条件下的最佳氢含量

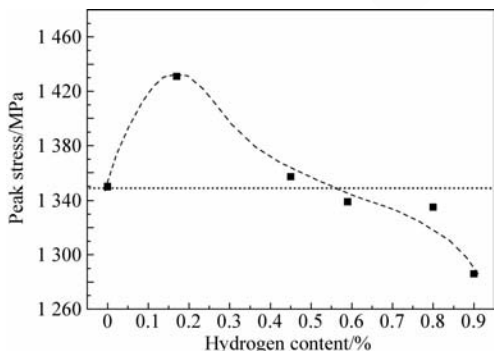


图7 氢对 Ti-6Al-4V 合金峰值应力的影响  
Fig. 7 Effect of hydrogen on peak stress of Ti-6Al-4V alloy

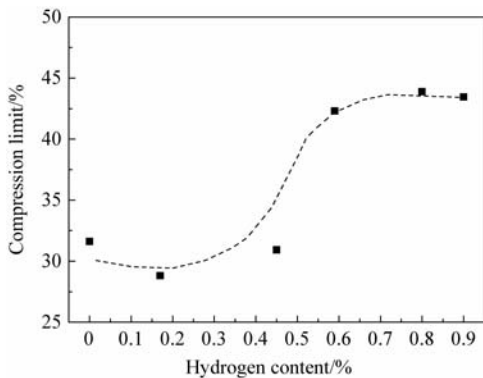


图8 氢对 Ti-6Al-4V 合金压缩极限的影响

Fig. 8 Effect of hydrogen on compression limit of Ti-6Al-4V alloy

区间为 0.60%~0.90%。

Ti-6Al-4V 合金置氢处理后,其压缩性能是与合金的组织组成相及各相在压缩变形过程中的变化相关的。置氢处理后,低氢阶段,材料中出现了  $\alpha'$  马氏体与  $\alpha''$  马氏体,  $\alpha'$  马氏体和  $\alpha$  相的晶体结构都为密排六方结构。但是  $\alpha'$  相是  $\alpha$  相的过饱和固溶体,在变形过程中起到强化作用,降低了合金的塑性。而  $\alpha''$  马氏体由于合金元素过多,晶格畸变较大,马氏体的点阵发生变形形成的斜方晶体结构,导致其滑移系增多,晶体内的孪晶增多,提高了合金的塑性变形能力。因此,在 0~0.45% 氢含量范围内,材料的峰值应力呈现先升高再降低的变化趋势,而压缩极限呈现出先降低再升高的变化趋势;随着氢含量的增加,材料中出现了体心立方的  $\beta$  亚相,由于其滑移系较多,因此其塑性变形能力得到进一步提高,材料的峰值应力快速降低,而压缩极限快速升高。同时,研究表明,  $\beta$  亚相在受到应力作用时能形成马氏体<sup>[16]</sup>,即形变诱发马氏体相变,在真应力-真应变曲线上表现为二次屈服和 S 型硬化现象<sup>[17]</sup>,如图 6 中氢含量为 0.90% 的曲线所示,可以进一步促进塑性变形,诱发大量孪晶,使受困的滑移系发生切变,继续进行滑移变形,对塑性变形能力的提高有一定的作用。

### 2.3 90° 的沉头螺钉冷镦验证

Ti-6Al-4V 合金经置氢处理后,获得了氢含量为 0.60%、0.80% 与 0.90% 的冷镦坯料,尺寸为规格  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。冷镦试验后,90° 沉头螺钉的外观如图 9 所示,试验过程中为避免因打击力过大或变形量过大损伤模具和设备,采用逐

次增加冷镦沉头变形区长度的方式进行试验,变形区长度 I < II < III。由图 9 可以看出,变形区较短时,冷镦成型后,原始合金高度与置氢合金相近,但头部未产生变形,且圆柱体已经弯曲失稳,说明不能继续再加大变形区长度,否则必然会损伤设备和模具,置氢合金虽未成型出完整的螺钉头,但已形成螺钉的雏形;当变形区长度达到 II

时,置氢合金冷镦成型出完整的螺钉头,无宏观裂纹,且氢含量为 0.80% 的材料成型效果好于氢含量为 0.60% 与 0.90%;当变形区长度为 III 时,置氢合金冷镦后形成完整的螺钉头,且形成了多余的飞边,但飞边边缘处出现明显的宏观裂纹。可见,置氢处理后,在适量的氢与冷镦条件下可以实现 Ti-6Al-4V 合金紧固件的冷镦制备。

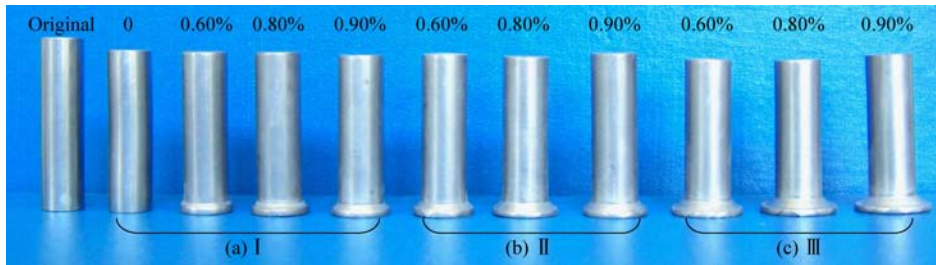


图 9 90°沉头螺钉外观图

Fig. 9 Appearance of 90° sunk screws

### 3 结 论

(1) 置氢处理后, Ti-6Al-4V 合金中出现了  $\alpha''$  马氏体与亚稳  $\beta$  相, 其中亚稳  $\beta$  相在压缩变形过程中将发生形变诱发马氏体相变, 形成  $\alpha''$  马氏体。

(2) 置氢处理提高了 Ti-6Al-4V 合金室温变形性能, 在氢含量 0.60% ~ 0.90% 时, 与原始合金相比, 峰值应力降低 60 MPa, 压缩极限提高 40%, 亚稳  $\beta$  相的形成与转变是 Ti-6Al-4V 合金变形性能改善的主要因素。

(3) Ti-6Al-4V 合金经置氢处理, 可以进行冷镦成型, 在氢含量达到 0.80% 时, 实现了直径为  $\varnothing 10$  mm 的 90° 沉头螺钉的冷镦成型, 证明了置氢处理改善 Ti-6Al-4V 合金室温塑性的实效性。

### 参 考 文 献

- [1] 毛进勤. 我国应积极发展高品质钛合金紧固件[J]. 世界有色金属, 2008(4): 64-67.  
Mao Jinqin. Emphasizing the development of high-qualified titanium alloy fastener industry in China[J]. World Nonferrous Metals, 2008(4): 64-67. (in Chinese)
- [2] 张庆玲, 王庆如, 李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析[J]. 材料工程, 2007(1): 11-18.  
Zhang Qingling, Wang Qingru, Li Xingwu. Materials selection analysis for titanium alloy fasteners in aviation industry[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(1): 11-18. (in Chinese)
- [3] 周芸, 王超. 钛合金紧固件生产技术[J]. 钛工业进展, 2001(1): 12-15.

2001(1): 12-15.

Zhou Yun, Wang Chao. Manufacturing technique of titanium fastener[J]. Titanium Industry Progress, 2001(1): 12-15. (in Chinese)

- [4] Senkov O N, Froes F H. Thermohydrogen processing of titanium alloys[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24(6): 565-576.
- [5] Goltsov V A. Hydrogen treatment (processing) of materials: current status and prospects[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1999, 293-295: 844-857.
- [6] 侯红亮, 李志强, 王亚军, 等. 钛合金热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.  
Hou Hongliang, Li Zhiqiang, Wang Yajun, et al. Technology of hydrogen treatment for titanium alloy and its application prospect[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(3): 533-549. (in Chinese)
- [7] Zhang S Q, Zhao L R. Effect of hydrogen on the superplasticity and microstructure of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1995, 218(2): 233-236.
- [8] Zong Y Y, Shan D B, Lu Y, et al. Effect of 0.3wt% H addition on the high temperature deformation behaviors of Ti-6Al-4V alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(16): 3936-3940.
- [9] Feng J C, Liu H, He P, et al. Effects of hydrogen on diffusion bonding of hydrogenated Ti6Al4V alloy containing 0.3 wt% hydrogen at fast heating rate[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(14): 3054-3058.
- [10] 宁兴龙. 钛合金的可逆氢合金化[J]. 钛工业进展, 1995(1): 19-20.  
Ning Xinglong. Reversible hydrogen of titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 1995(1): 19-20. (in Chinese)

nese)

- [11] Ilyin A A, Nosov V K, Kollerov M U, et al. Hydrogen technology of semifinished products and finished goods production from high-strength titanium alloys[C]// Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing. Warrendale, PA: TMS, 1996; 517-523.
- [12] 孙中刚, 侯红亮, 李红, 等. 氢处理对 TC4 钛合金组织及室温变形性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(5):789-793.  
Sun Zhonggang, Hou Hongliang, Li hong, et al. Effect of hydrogen treatment on microstructure and room temperature deforming properties of TC4 Ti alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(5): 789-793. (in Chinese)
- [13] 李晓华, 孙中刚, 侯红亮, 等. 置氢 Ti-6Al-4V 合金组织与室温变形行为的相关性[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(8):888-892.  
Li Xiaohua, Sun Zhonggang, Hou Hongliang, et al. Correlation between microstructure and room-temperature deformation behavior of the hydrogenated Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(8):888-892. (in Chinese)
- [14] 李红, 侯红亮, 孙中刚. 氢对 TC4 钛合金室温压缩行为的影响[J]. 航空制造技术, 2007(z1):80-83.  
Li Hong, Hou Hongliang, Sun Zhonggang. The effect of hydrogen treatment on the room temperature compression behaviour of TC4[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(z1):80-83. (in Chinese)
- [15] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光, 等. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:91.  
Zhang Xiyan, Zhao Yongqing, Bai Chenguang, et al. Titanium alloy and its applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:91. (in Chinese)
- [16] 吴晓东, 杨冠军, 葛鹏, 等.  $\beta$  钛合金及其固态相变的归纳[J]. 钛工业进展, 2008, 25(5):1-6.  
Wu Xiaodong, Yang Guanjun, Ge Peng, et al. Inductions of  $\beta$  titanium alloy and solid state phase transition[J]. Titanium Industry Progress, 2008, 25(5):1-6. (in Chinese)
- [17] 李兴无, 沙爱学, 储俊鹏, 等. 淬火温度对 Ti-3Al-4.5V-5Mo 钛合金形变诱发马氏体的影响[J]. 材料工程, 2007(9):3-8.  
Li Xingwu, Sha Aixue, Chu Junpeng, et al. Effect of quenching temperature on deformation-induced martensite of Ti-3Al-4.5V-5Mo titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(9):3-8. (in Chinese)

## 作者简介:

王耀奇(1978—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 钛合金、铝合金加工及改性。

Tel: 010-85701254

E-mail: xiaoqih@sina.com

侯红亮(1963—) 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 钛合金、铝合金加工及改性。

E-mail: hou\_hl@163.com

## Plastic Effect of Hydrogenated Ti-6Al-4V Alloy and Its Application

WANG Yaoqi<sup>1,\*</sup>, HOU Hongliang<sup>1</sup>, SUN Zhonggang<sup>2</sup>

1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100024, China

2. Department of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China

**Abstract:** The microstructure of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy is studied by an optical microscope, and its phase transformations are analyzed during the hydrogenating treatment by X-ray diffraction(XRD). The deformation behavior of the hydrogenated Ti-6Al-4V alloy is investigated through compression tests at room temperature, and jumptests are performed, too. The results show that the presence of hydrogen in the alloy promotes the formation of martensite  $\alpha'$  and metastable phase  $\beta$ , and the formation and transition of metastable phase  $\beta$  is the major factor for the improvement of processability of Ti-6Al-4V alloy. Compared with the as-received alloy, the peak stress of hydrogenated Ti-6Al-4V with 0.60% H to 0.90% H decreases by 60 MPa and its compression limit improves by over 40%. When the hydrogen content reaches 0.80%, 90° sunk screws of diameter  $\varnothing 10$  mm can be prepared from Ti-6Al-4V by alloy jumptests at room temperature.

**Key words:** Titanium alloys; Ti-6Al-4V alloy; hydrogenating treatment; microstructure; deformation behavior; sunk screw

Received: 2010-11-18; Revised: 2011-01-14; Accepted: 2011-03-01; Published online: 2011-03-10 17:11:21

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110310.1711.003.html DOI:CNKI:11-1929/V.20110310.1711.003

\* Corresponding author. Tel.:010-85701254 E-mail: xiaoqih@sina.com