

置氢 TC4 钛合金室温变形行为研究

孙中刚¹, 王耀奇², 李红², 李晓华², 侯红亮², 周文龙¹

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116023)

(2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 通过压缩试验研究了置氢 TC4 合金的室温变形行为, 采用 OM、TEM、XRD 等分析手段研究了氢处理对 TC4 钛合金室温组织和变形机制的影响。结果表明, 氢作为 β 相稳定化元素, 改善了 TC4 钛合金淬火的亚稳相结构, 促进了斜方 α'' 马氏体和体心 β 相的生成。氢含量 0.45% (质量分数, 下同) 时, 合金中以 α' 相为主, 变形方式为孪晶变形, 变形能力提高幅度较小; 氢含量超过 0.59% 时, 合金中保留了大量 β 相, 变形方式以滑移为主, 变形极限大大提高。

关键词: TC4 钛合金; 氢处理; 室温变形

中图分类号: TG146.2⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)10-1749-03

氢在钛合金加工中是一种非常敏感的危害元素, 常常导致合金的塑性损失, 甚至会产生氢致滞后断裂带来很大的危害, 因此合金中的氢含量一般控制在 $1 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 以下^[1-4]。近年来, 利用氢在钛合金中溶解的可逆性来改善钛合金加工性能的氢处理技术得到越来越广泛的研究^[4-10]。研究表明, 氢是一种强 β 稳定化元素, 可以降低合金的 α/β 相变点, 可将 β 相稳定到更低温度, 降低变形温度和变形抗力以改善高温变形能力。同时, 亚稳 β 型及 β 型钛合金通过高温淬火可将 β 相稳定到室温, 抑制形变诱发马氏体的形成以提高室温变形极限^[4,10]。对于低 β 稳定化系数的合金, 如应用最广泛的 TC4 钛合金, 氢处理的研究主要集中于高温变形方面。为了探索氢对 TC4 钛合金室温增塑的可行性, 本实验根据作者在前期工艺探索的基础上, 研究了淬火后 TC4 钛合金的力学性能、微观组织变化以及氢对室温变形行为和变形机制的影响。

1 实验

实验材料为退火态 TC4 钛合金棒材, 试样尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。置氢试验在自制的管式氢处理炉进行, 采用高温充氢法, 750 °C 保温 1~2 h 后空冷。置氢量通过炉内的氢分压控制。采用高精度物理天平 (感量 10^{-5} g) 测定试验前后合金质量变化获得氢含量。根据氢对 TC4 相变点的影响, 置氢后对不同氢含量的试样在相变点以上进行淬火处理。处理时, 将试样封装于含有高纯氩气的石英管中, 升温至预定温度后水淬,

延迟时间小于 3 s。力学性能试验在 CMT 4305 万能试验机上进行, 压缩速率为 1 mm/min; 用 OLYMPUS BX41M 金相显微镜观察不同氢处理和不同变形程度后 TC4 钛合金的组织演变; 利用 X 射线衍射分析氢以及氢处理工艺对相成分的影响; 利用 H-800 透射电镜分析观察氢处理后 TC4 钛合金的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 微观结构观察

根据氢对 TC4 钛合金相变点的影响规律^[7], 将氢含量为 0.45% 和 0.59% 的 2 组试样分别在相变点以上 10 °C 淬火, 即 850 和 815 °C。图 1 为处理后的金相组织照片。淬火后, 氢含量为 0.45% 的钛合金组织内部出现了大量针状的斜方 α'' 马氏体, 且组织比较粗大, 如图 1a 所示。图 1c、1d 为淬火后的透射电镜照片, 观察发现粗大的针状 α'' 马氏体内部由大量的孪晶构成。继续增加氢含量, 粗大的马氏体开始减少, 尺寸变小, 合金中出现了 β 相, 如图 1b 所示。

含有大量 β 稳定化元素的 $\alpha+\beta$ 和亚稳 β 钛合金, 通过淬火或者在应力状态下很容易形成 α'' 马氏体^[7]。对于低 β 稳定化系数 K_{β} (β 稳定化元素含量与将 β 相完全稳定到室温时该元素的临界浓度值的比值) 的 TC4 钛合金, 在相变点以上淬火后, 合金主要形成密排六方晶体结构的 α' 马氏体, 置氢后合金的 β 稳定化系数 K_{β} 提高, 促进了斜方马氏体的生成。尽管氢是强 β 稳定化元素, 但是由于它在钛合金中以间隙固溶方

收稿日期: 2008-09-10

作者简介: 孙中刚, 男, 1981 年生, 博士生, 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116023; 通讯作者: 侯红亮, 研究员, 北京航空制造工程研究所, 北京 100024, 电话: 010-85701522, E-mail: hou_hl@163.com

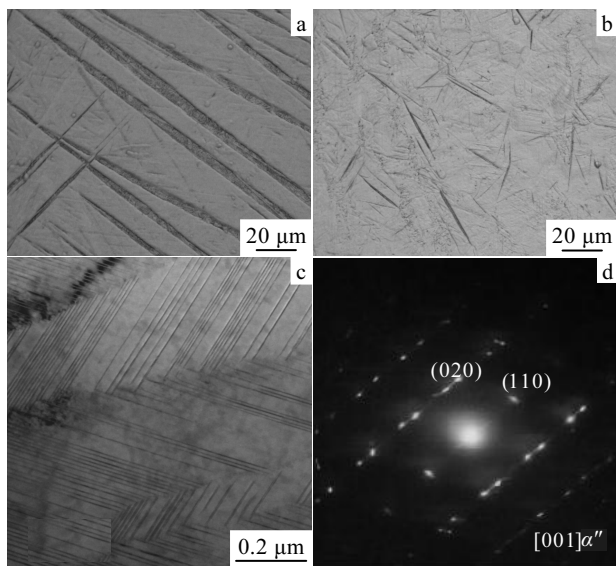


图 1 氢处理后的 TC4 合金金相及 TEM 显微组织

Fig.1 OM images of TC4 alloy after hydrogen treatment: (a) 0.45%H, (b) 0.59%H; TEM image of α'' twins(c) and the corresponding SAED pattern(d)

式存在，有一定的固溶度，因此无法通过淬火将 TC4 钛合金 β 相稳定到室温，而且淬火总会伴随着马氏体的产生。

2.2 氢对 TC4 钛合金室温力学性能的影响

图 2 为 2 种氢含量的 TC4 钛合金淬火后的压缩应力应变曲线与原始合金的比较。结果表明，原始合金的压缩变形极限只有 26%。经过置氢淬火后合金的压缩性能得到了有效的改善。其中氢含量为 0.45% 的试样变形极限为 38%；氢含量 0.59% 时为 51%，提高了近 100%。表 1 为压缩后合金的强度变化。置氢处理后合金的屈服强度从 995 MPa 降到了 585 MPa，相反合金抗压强度从 1790 MPa 提高到了 2610 MPa，从而降低了合金的屈强比，降低了变形抗力，有利于合金进行室温变形。

钛合金中的马氏体一直被认为是以脆性相存在^[8-10]。但置氢 0.45% 后，尽管合金中产生大量斜方马氏体 α'' ，合金的压缩性能不降反而提高。这可能是因为淬火后大量孪晶的存在。在压应力作用下，试样处于剪切应力状态，促进了孪晶变形的进一步进行。同时由于氢的存在降低了合金的临界剪切应力，孪晶变形更容易产生，导致了合金屈服强度的下降。虽然 α'' 在一定程度上提高了合金的变形能力，但是由于其本身晶体结构和滑移系的限制，塑性的提高幅度很小。当氢含量增加至足以使 β 相稳定到室温时，合金的变形能力可以大幅度提高。

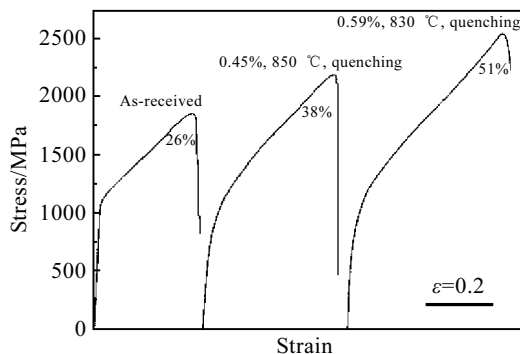


图 2 氢处理后的试样压缩应力应变曲线

Fig.2 Compression stress-strain curves after hydrogen treatment

表 1 氢处理压缩性能比较

Table 1 Comparison of the compression properties after hydrogen treatment

$\omega_H/\%$	0.0	0.45	0.59
$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	995	625	585
σ_b/MPa	1790	2110	2610

2.3 氢对 TC4 钛合金变形行为的影响

简单压缩时，合金内部的组织变化是不均匀的，其中试样心部的变形最大。正是由于变形的不均匀，试样变形后的内部组织也不均匀。图 3 为 3 种材料变形量为 20%、40% 时试样心部最大变形区的微观组织。压缩变形 20% 后，原始材料内部的晶粒并没明显的变形特征（见图 3a）。氢含量 0.45% 的试样变形 20% 后可以看到针状马氏体发生弯曲（见图 3b）。金相和透射电镜分析发现，合金内部存在大量的孪晶，可以认

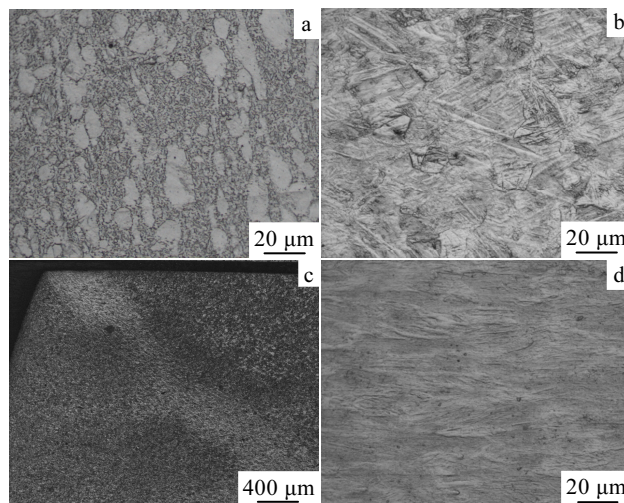


图 3 氢处理后试样压缩变形不同变形量的显微组织

Fig.3 Microstructure of specimens after hydrogen treatment with different deformation degrees: (a) as-received, $\epsilon=20\%$, (b) 0.45%, $\epsilon=20\%$, and (c,d) 0.45%, $\epsilon=40\%$

为, 马氏体引起的变形能力提高, 主要是因为切应力下, 合金的变形主要是以孪晶机制进行, 进而诱发了其他滑移系, 促进了位错的增殖。但是由于其本身晶体结构和滑移系的限制, 塑性的提高幅度很小。当氢含量增加至足以使 β 相稳定到室温时, 合金的变形能力可以大幅度提高。图 3c 和 3d 为氢含量 0.59% 时, 合金经过 40% 压缩变形的组织。可以看到试样沿 45° 方向出现了白色的绝热剪切带, 并且试样内部变形很不均匀, 产生多个横向的白色高变形区。随着变形量的增加, 晶粒发生变形, β 晶粒被拉长, 晶粒碎化导致晶粒尺寸减小, 位错密度增加。虽然此氢含量下合金的变形能力得到很大提高, 但是由于氢间隙固溶于合金中, 有一定的固溶度, 继续增加氢含量, 马氏体仍不会完全被抑制, 反而会使合金中过饱和的 β 相发生共析反应生成高温氢化物, 造成合金性能下降。

3 结 论

1) 氢作为 β 相稳定化元素, 改善了 TC4 钛合金淬火的亚稳相结构, 促进了斜方 α'' 马氏体和体心 β 相的生成。低氢时合金主要以斜方马氏体 α'' 为主, 高氢含量时, 大部分高温 β 相被稳定至室温。

2) 氢处理提高合金的变形能力。但是受到晶体结构的限制, 低氢时以斜方马氏体为主要结构的合金提高幅度较小, 变形主要以孪晶为主; 高氢时合金中 β 相增加, 为滑移变形机制, 合金的变形极限大大提高。

参考文献 References

- [1] Zhang Wangfeng(张旺峰), Zhu Jinhua(朱金华). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1999, 28(4): 225
- [2] Zhang Shaoqing(张少卿). *Materials Engineering*(材料工程)[J], 1992(2): 24
- [3] Kerr K, Smith P R. *Proceedings of the Fourth International Conference on Titanium*[M]. Warrendale, PA: TMS, 1986: 2477
- [4] Hou Hongliang(侯红亮), Li Zhiqiang(李志强), Wang Yajun(王亚军). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(3): 533
- [5] Kerr W R. *Metall Trans*[J], 1985, 16A: 1077
- [6] Senkov O N, Froes F H. *International Journal of Hydrogen Energy*[J], 1999, 24: 565
- [7] Qazi J I, Senkov O N, Rahim J *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 359: 137
- [8] Kolachev B A *et al.* *Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing*[M]. Warrendale, PA: TMS, 1996: 331
- [9] Kolachev B A, Mitin B B, Talaaev V D. *Aviation Manufacturing*[J], 1991(1): 58
- [10] Ilyin A A, Nosov V K, Kollerov M Y *et al.* *Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing*[M]. Warrendale, PA: TMS, 1996: 517

Investigations on Room Temperature Deformation Behaviors of Hydrogenated TC4 Alloys

Sun Zhonggang¹, Wang Yaoqi², Li Hong², Li Xiaohua², Hou Hongliang², Zhou Wenlong¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

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

Abstract: The room temperature deformation behavior of hydrogenated TC4 alloys was studied through compression tests. The hydrogen treatment on the microstructure and deformation mechanism of the TC4 alloy at room temperature was studied by OM, TEM and XRD. Results show that hydrogen, as β stabilized element, modified the metastable phase composition of as-quenched alloys, promoted the generation of orthorhombic martensite α'' and body-centered β phase. When the H content was 0.45% (mass fraction, similarly hereinafter), the alloy mainly consisted of α'' phase, and the deformation behavior was twinning, which improved the deformation limit in a small range; while when the H content was higher than 0.59%, there were much β phase, and the deformation behavior was slipping, which improved the deformation limit greatly.

Key words: TC4 titanium alloys; hydrogen treatment; room temperature deformation

Biography: Sun Zhonggang, Candidate for Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, P. R. China; Corresponding Author: Hou Hongliang, Researcher, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, P. R. China Tel: 0086-10-85701522, E-mail: hou_hl@163.com