

热氢处理对 Ti600 钛合金组织和性能的影响

张鹏省, 赵永庆, 毛小南, 洪 权, 韩 栋

(西北有色金属研究院 钛合金研究所, 西安 710016)

摘 要: 针对近 α 型 Ti600 钛合金热加工抗力大、变形困难等问题, 通过对实验样品分别进行 5 种不同氢含量的置氢处理和真空退火除氢, 研究热氢处理过程中 Ti600 钛合金的组织结构演变和高温力学特性, 探讨热氢处理对钛合金组织和高温力学行为等热加工工艺塑性的影响规律。研究表明, 对于 Ti600 钛合金, 热氢处理后合金出现不同程度的组织细化, 置氢量在 0.1%~0.5% 范围内, 热氢处理可有效提高 Ti600 近 α 型合金的热加工工艺塑性。

关键词: Ti600 合金; 热氢处理; 组织细化; 力学性能; 热工艺塑性

中图分类号: TG 146

文献标志码: A

Influence of thermo-hydrogenation treatment on microstructure and properties of Ti600 titanium alloy

ZHANG Peng-sheng, ZHAO Yong-qing, MAO Xiao-nan, HONG Quan, HAN Dong

(Institute of Titanium Alloy, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Aiming at the problems such as large deformation resistance and difficulty in deforming during hot working of high-temperature α alloy Ti600, all specimens were handled hydrogen treatment respectively by five different hydrogen content (mass fraction) from 0.1% to 0.5%, and dehydrogenated by vacuum annealing. The microstructure evolution and tensile properties of Ti600 alloy at thermal temperatures were studied. The effects of thermo-hydrogenation treatment on the microstructure, grain size, as well as high temperature mechanical, heat processing plasticity and the variations regularity were investigated. The result shows that the microstructures of Ti600 alloy are refined to some degree. The thermal plasticity of Ti600 alloy is improved obviously with hydrogen increasing from 0.1% to 0.5%.

Key words: Ti600 alloy; thermo-hydrogenation treatment; microstructure refinement; mechanical property; thermal processing plasticity

热氢处理技术是通过氢元素在钛及钛合金中的可逆作用对钛合金的微观组织、力学性能和热加工工艺特性进行调整的一种新兴的热加工技术, 是钛及钛合金的一种特有的热处理方式。西北有色金属研究院自主开发研制的 Ti600 钛合金是 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 系高温钛合金, 经过多年的研究和发展, 其工作温度水平、机械与使用综合性能的提高靠采用传统的热处理和热加工方法已经难以获得突破, 而且热加工时塑性低, 制造成本高, 因而大大限制了它的推广应用。通过热氢处理技术来增加钛合金中塑性相的体积分数, 降低流动应力, 提高塑性性能, 从而降低 Ti600

钛合金塑性变形对变形速度和变形温度的苛刻要求, 是一种行之有效的方法。

本文作者针对 Ti600 钛合金热加工抗力大、变形困难、成品率低等问题, 研究和探讨置氢、除氢过程中 Ti600 钛合金的组织变化和高温变形。

1 实验

1.1 试验材料

实验采用的高温近 α 型 Ti600 钛合金是西北有色

金属研究院在 Ti-1100 合金的基础上开发研制的一种长期使用温度为 600 °C 的近 α 型钛合金^[1]。尺寸 $\phi 8$ mm $\times$ 12 mm 的铸态试样从 25 kg 铸锭上沿周向线切割制取,厚度为 2.0 mm 的板材试样从铸锭经锻造、板材轧机轧制而成。

1.2 试验方法

采用固态热氢处理,对 Ti600 钛合金的铸态和加工态试样在管式氢处理炉中进行置氢处理。

根据置氢后钛合金中理想氢含量(质量分数)均为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和 0.5%,设计 5 个置氢点。氢含量通过充氢系统中的氢气压力变化来控制,实际氢含量采用高精度物理天平称量获得,精密分析天平的感量为 1×10^{-5} g。真空除氢是在真空炉中,550 °C 温度下退火 15 h 实现的,真空度为 1.4×10^{-3} Pa。除氢后的氢含量用 OH900 氧氢测定仪获得。高温拉伸试样为标准板材拉伸试样,拉伸试验在 Zwick150 试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min。所采用的组织观察和分析手段主要有光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)。

2 结果与讨论

2.1 热氢处理对 Ti600 钛合金铸态组织的影响

Ti600 钛合金的原始组织一般由初生 α 相和少量的 β 相组成,可通过热氢处理制度来调整合金中 α 相和 β 相的形状、尺寸及分布,满足加工需求。图 1 为置氢量分别为 0、0.1%、0.3%和 0.5%的 Ti600 钛合金的铸态组织形貌。由图 1 可见,氢含量为 0%时, Ti600 钛合金的铸态原始组织主要由 α 片和残余 β 相组成的片层状 β 转变组织组成(见图 1(a))。每个晶粒内部由片层状组织交错混织构成的 β 转变组织或 α 片状组织构成。当氢含量为 0.1%时,和原始显微组织相比, β 相有所增多,晶界仍为清晰可见的 α 相,且有条状 α 向晶内延伸(见图 1(b))。随着氢含量的增加, Ti600 钛合金中的初生 α 相和 β 相的含量、相结构的形状、大小、分布均发生了明显的变化。其中 β 转变组织的数量和形态随着氢含量的增加变化显著, β 相逐渐增多。 α 相的体积分数随着氢含量的增加有所减少,片层变得细小,晶界 α 相呈平直状(见图 1(c))。当氢含量达到 0.5%时,由于 α 相的逐渐减少以及 β 相和氢化物的生成,阻断了片层组织的形态,使原已充分细化的片层产生断裂,原 α 板条的连续性逐渐变差, α 相与 β 相相界、晶界和片层界面变得非常模糊,几乎不能辨别(见图 1(d))。

张少卿^[2]发现,在室温下,氢在 α 钛中的溶解度仅为 0.002%~0.01%,引入的氢元素很容易沿晶界和晶内形成氢化物。由于 Ti600 钛合金为近 α 合金,氢元素在其中的溶解度很小,当氢含量增到 0.1%时,其含

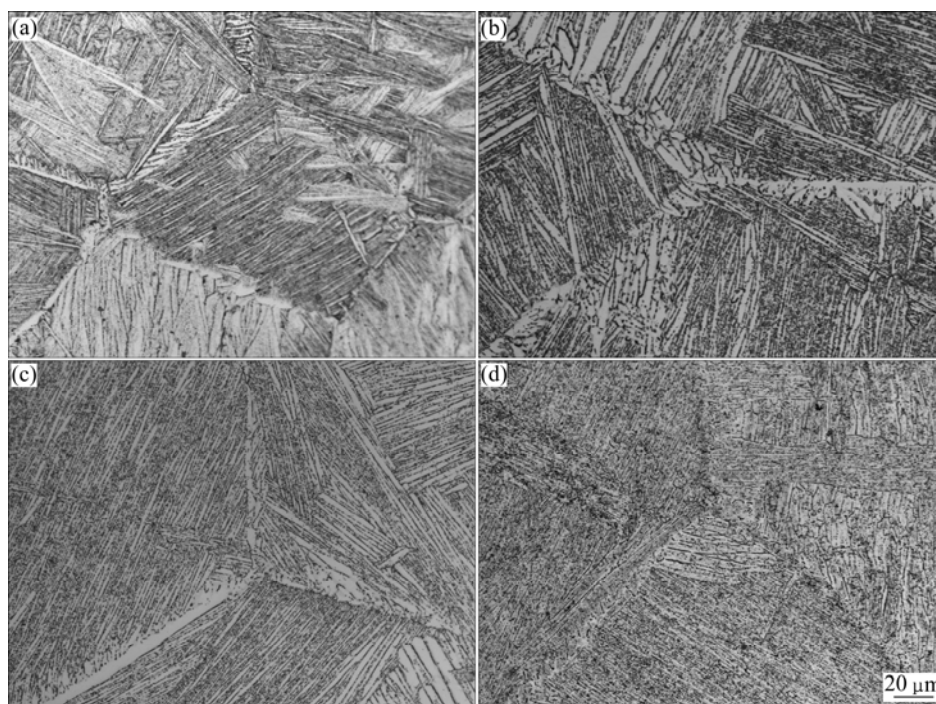


图 1 不同氢含量 Ti600 钛合金铸态样品的金相组织

Fig.1 Microstructures of as-cast Ti600 titanium alloys with different hydrogenation contents: (a) 0%; (b) 0.1%; (c) 0.3%; (d) 0.5%

量已经超过它在 Ti600 钛合金中的最大固溶度,并沿着晶界和晶内的 α 片形成氢化物;随着氢含量继续增加,氢化物大量形成,并弥散分布在晶界及晶内,使晶界模糊、组织变细。

图 2 和 3 所示分别为 Ti600 钛合金铸态原始组织以及氢含量为 0.5% 时的 XRD 谱。由图 2 可以看出,原始组织主要由不同位相的 α 相衍射峰组成,还有少量 β 相的衍射峰,说明 Ti600 钛合金原始铸态组织主要由大量的 α 相和少量的 β 相组成。由图 3 可以看出,由于置氢后试验样品随炉冷却,冷速缓慢,发生了 β 相向 $\alpha+\text{TiH}_2$ 共析组织的转变,因此,在大量的 α 相衍射峰出现的同时,没有发现 β 相的衍射峰,而是出现了大量氢化物衍射峰。经分析为正交晶系的 $\delta\text{-TiH}$ 。同时,衍射峰出现明显的宽化,可能是因为氢元素的大量固溶引起的晶格畸变或各个物相衍射峰发生部分重叠引起的^[3]。对不同氢含量的 Ti600 钛合金铸态样

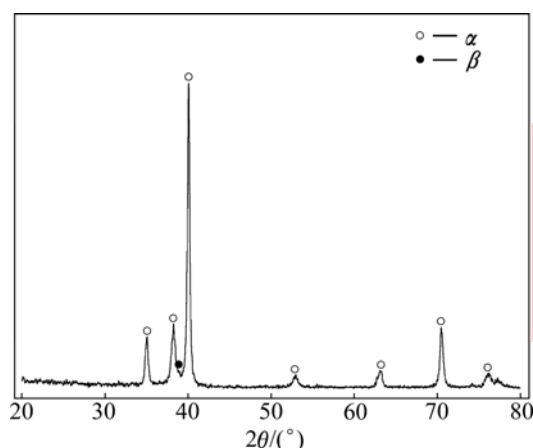


图 2 Ti600 钛合金铸态组织的 XRD 谱

Fig.2 XRD pattern of as-cast Ti600 titanium alloy

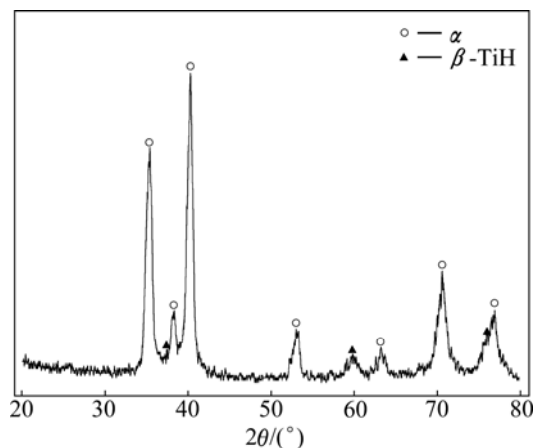


图 3 Ti600 钛合金铸态样品铸态置氢后的 XRD 谱

Fig.3 XRD pattern of as-cast Ti600 titanium alloy after cast hydrogenation (0.5%)

品在真空退火炉中进行(550 °C, 1 h)真空除氢处理,真空度控制在 1×10^{-3} Pa。不同氢含量的 Ti600 钛合金铸造态样品除氢后的金相组织,如图 4 所示。

由图 4 可见, Ti600 钛合金铸态组织随着氢含量的增加,尤其是当氢含量增加到 0.5% 时再除氢,其晶粒度几乎保持在置氢后除氢前的水平,晶内组织的细化效果较为明显, α 和 β 组织由块状、片状转变为细针状,但晶界和两相组织界面模糊(见图 4(c))。晶界和两相组织界面主要由针状组织构成,以纵横交错的细小的 α 相和 β 相为主要特征。同时,晶界也由于氢化

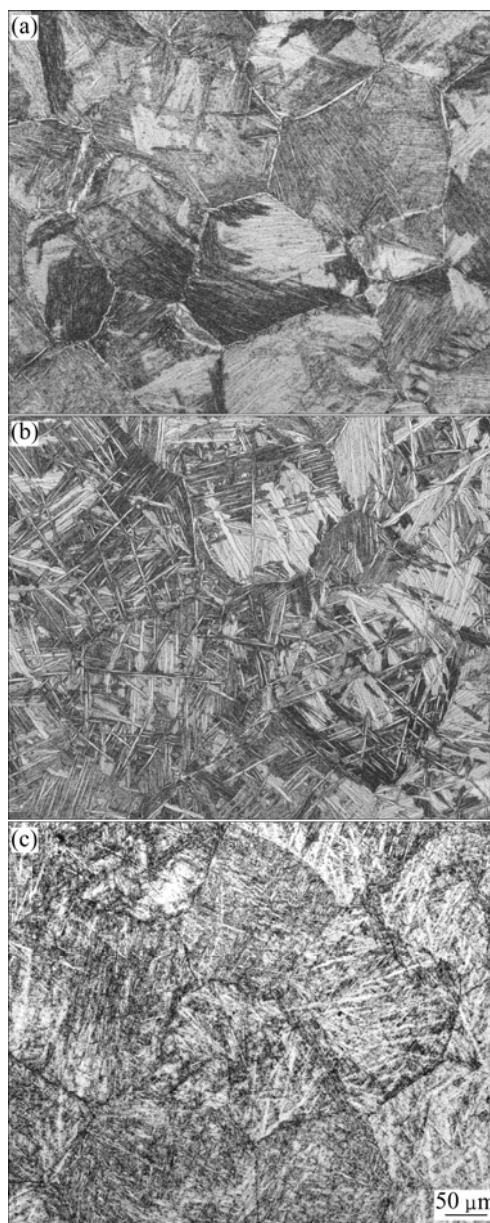


图 4 不同氢含量的 Ti600 钛合金铸态样品除氢后的金相组织

Fig.4 OM microstructures of as-cast Ti600 titanium alloys with different hydrogenation contents after dehydrogenation: (a) 0.1%; (b) 0.3%; (c) 0.5%

物分解而破碎、细化, 片层的连续性变差。这是因为氢化物大量形成并在除氢过程中分解、变化, 最后在晶内形成细网篮组织。利用热氢处理这一特性可以优化和改善铸件的组织结构和力学性能, 有助于克服高温钛合金开坯锻造加工难, 成材率低等问题^[4]。

2.2 不同氢含量的 Ti600 钛合金的高温拉伸性能

图 5 所示为不同氢含量的 Ti600 钛合金在 600 °C 的拉伸性能。由图 5 可见, 在 600 °C 时, 随着氢含量的增加, Ti600 钛合金的拉伸强度逐渐降低, 塑性逐渐提高。这是因为 Ti600 钛合金的设计使用温度是 600 °C, 在 600 °C 时 Ti600 钛合金的抗氧化能力较强, 其强度和伸长率总会在某一个最佳的置氢量达到良好的匹配。在这个置氢点, Ti600 钛合金具备较低的强度和较高的塑性。这说明 Ti600 钛合金置氢之后, 会在一定程度上提高其热加工工艺塑性, 优化其热加工工艺性能。

图 6 所示为不同氢含量的 Ti600 钛合金在 650 °C 的拉伸断口形貌。由图 6 可见, 断口总体呈现韧性特征, 随着氢含量的增加, 韧窝形态从均匀分布的浅韧窝逐渐变深, 而且越来越密集, 甚至出现了窄幅瞬断区(见图 6(d))。

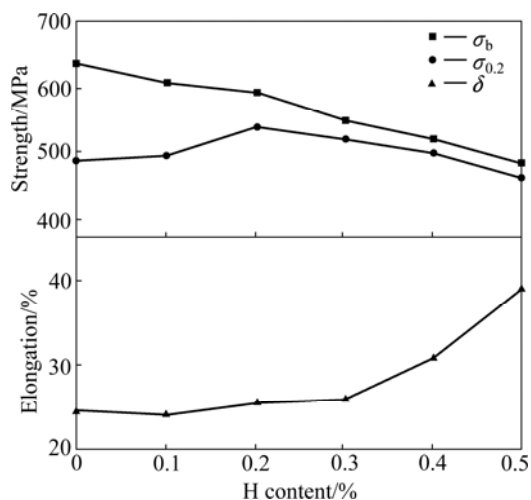


图 5 不同氢含量的 Ti600 钛合金在 600 °C 的拉伸性能

Fig.5 Tensile properties of Ti600 titanium alloys with different hydrogenation contents at 600 °C

图 7 所示为不同氢含量的 Ti600 钛合金除氢后在 600 °C 的高温拉伸性能。由图 7 可以看出, 除氢后 Ti600 钛合金强度变化不大, 随着置氢量的增加, 塑性先减小而后逐渐增大, 但变化程度较小。图 8 所示为不同氢含量的 Ti600 钛合金除氢后的断口形貌。从图 8 可

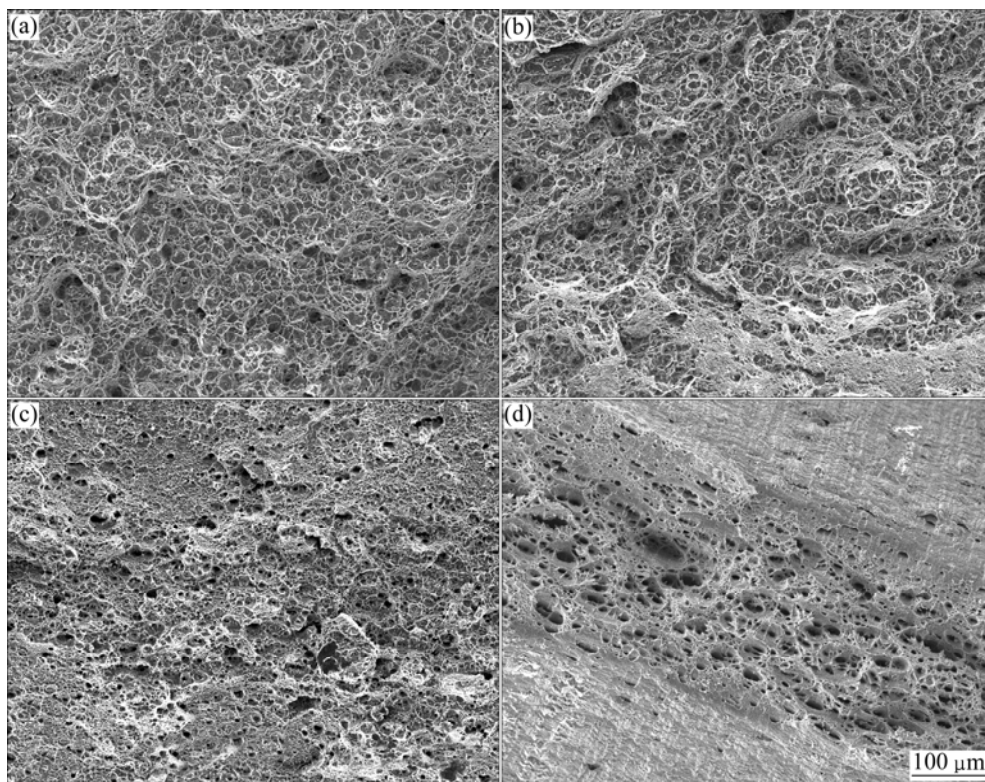


图 6 不同氢含量的 Ti600 钛合金在 650 °C 的拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fracture morphologies of Ti600 titanium alloys with different hydrogenation contents at 650 °C: (a) 0%; (b) 0.1%; (c) 0.3%; (d) 0.5%

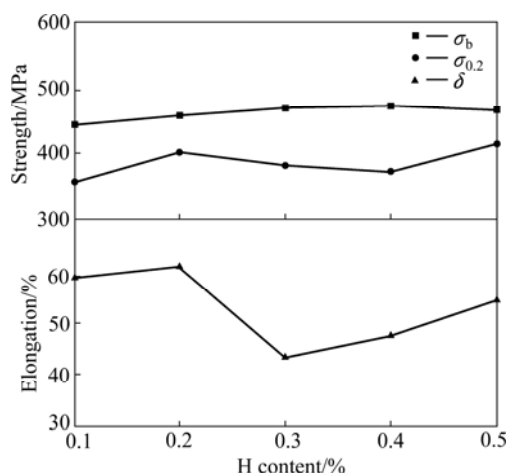


图 7 不同氢含量的 Ti600 钛合金除氢后在 600 °C 的拉伸性能

Fig.7 Tensile properties of Ti600 titanium alloys with different hydrogenation contents after dehydrogenation at 600 °C

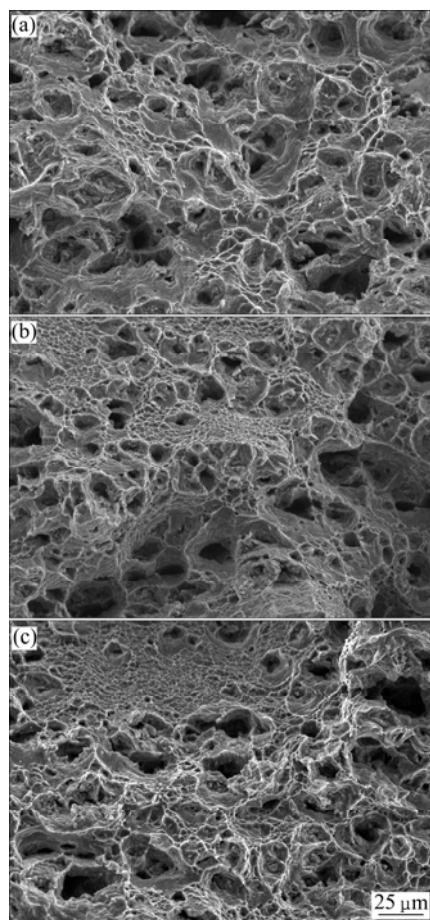


图 8 不同氢含量的 Ti600 钛合金除氢后的断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies of Ti600 titanium alloys with different hydrogenation contents after dehydrogenation: (a) 0.1%; (b) 0.3%; (c) 0.5%

以看出, 除氢后拉伸断口韧窝的形态和数量没有明显变化, 这是因为除氢是在 550 °C 下完成的, 只是起到时效的作用, 而 Ti600 合金属于近 α 型合金, 时效的效果是有限的。

3 结论

1) 对于近 α 型 Ti600 钛合金, 引入氢元素可在一定程度上细化合金组织。

2) 氢含量在 0.1%~0.5% 时, 热氢处理可有效提高近 α 型 Ti600 合金的热加工工艺塑性。

REFERENCES

- [1] 洪 权, 杨冠军, 赵永庆. 一种高温固溶强化耐热钛合金: 中国专利 ZL 200710017881.8[P]. 2008-11-19.
HONG Quan, YANG Guan-jun, ZHAO Yong-qing. A heat resistance titanium alloy strengthened by thermal solution: Chinese Patent ZL 200710017881.8 [P]. 2008-11-19.
- [2] 张少卿. 氢在钛合金热加工中的作用[J]. 材料工程, 1992(2): 24-29.
ZHANG Shao-qing. Hydrogen action in thermal processing of titanium [J]. Material Engineering, 1992(2): 24-29.
- [3] 龚 沛, 孙东立, 李中华. TC4 钛合金渗氢后显微组织特征[J]. 内蒙古工业大学学报, 2006, 25(3): 190-195.
GONG Pei, SUN Dong-li, LI Zhong-hua. Microstructure character of TC4 titanium alloy by hydrogen charged [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 2006, 25(3): 190-195.
- [4] 韩明臣. 钛合金的热氢处理[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(1): 23-27.
HAN Ming-chen. Thermal hydrogenous treatment of titanium alloy [J]. Aerospace Material Processing, 1999, 29(1): 23-27.

(编辑 何学锋)