

置氢处理对 TC17 钛合金固溶-时效组织和显微硬度的影响

王耀奇¹, 李红¹, 牛勇², 张宁¹, 刘文祎¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

(2. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 对 TC17 钛合金进行置氢处理后, 再对其进行固溶、时效热处理, 利用光学显微镜、显微硬度仪分别进行显微组织观察和硬度测试。结果表明, 置氢处理后的 TC17 钛合金随着氢含量的增加, β 转变组织中的片层状 α 相逐渐转变为 β 相, 显微硬度降低。固溶处理后随着氢含量的增加或固溶温度的升高, 初生 α 相比例减少, β 相比例增加, 当固溶温度低于 780 °C 时, 显微硬度整体呈降低的变化趋势, 当固溶温度高于 800 °C 时, 显微硬度整体呈上升的变化趋势。固溶+时效处理后, 随着氢含量的增加, 微观组织由双态组织转变为网篮组织, 并且当固溶温度高于 780 °C 时, 显微硬度随着氢含量的增加先升高后降低。

关键词: TC17 钛合金; 置氢处理; 固溶处理; 时效处理; 微观组织; 显微硬度

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)03-014-06

Effect of Hydrogen Treatment on Solution-aging Microstructure and Microhardness of TC17 Titanium Alloy

Wang Yaoqi¹, Li Hong¹, Niu Yong², Zhang Ning¹, Liu Wenyi¹

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The hydrogen treatment was performed on TC17 titanium alloy, followed by solution-aging treatments of the hydrogenated TC17 titanium alloy. The microstructure and hardness of TC17 titanium alloy were observed and analyzed by optical microscope and microhardness tester. The results show that the α lamellae in the β transformed structure gradually transforms into β phase with the increase of hydrogen content of TC17 titanium alloy after hydrogen treatment, and the microhardness decreases monotonically. With the increase of hydrogen content or solution temperature, the proportion of primary α phase decreases and the proportion of β phase increases after solution treatment. When the solution temperature is below 780 °C, the microhardness decreases generally, and when the solution temperature is above 800 °C, the microhardness increases generally. After solution and aging treatment, with the increase of hydrogen content, the microstructure changes from bimodal microstructure into basketweave microstructure. Moreover, when the solution temperature exceeds 780 °C, the microhardness first increases and then decreases as the hydrogen content rises.

Keywords: TC17 titanium alloy; hydrogen treatment; solution treatment; aging treatment; microstructure; microhardness

TC17 钛合金是一种高强、高韧和高淬透性的 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 其名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr, 可以在 400 °C 高温环境下长期保持较高的强度, 被大

量用于制造航空发动机风扇、压气机盘等部件^[1]。TC17 钛合金构件主要采用高温锻造工艺制备, 锻造温度范围较宽, 可以在 $\alpha+\beta$ 两相区锻造, 也可以在 β 单相区锻造。对于 β 单相区锻造, 成形温度高于 900 °C, 制备成本高^[2-5]。

钛合金置氢处理是利用氢的可逆合金化作用改善加

收稿日期: 2024-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075509)

通信作者: 王耀奇 (1978—), 男, 研究员。

工性能的新技术。该技术通过合理控制合金中的氢含量及其存在状态,在不改变材料整体状态的前提下,诱导形成有利于加工的组织结构。研究表明,置氢处理在降低钛合金变形温度,改善加工性能方面具有显著效果,展现出良好的应用前景^[6-14]。众所周知,氢是钛合金中 β 相的稳定元素,钛合金经置氢处理、热处理,其微观组织与力学性能会发生显著变化,掌握置氢钛合金氢含量、热处理工艺参数、组织与性能之间的关系,对于制定置氢钛合金锻造工艺至关重要^[15-17]。

本研究对 TC17 钛合金进行置氢处理,通过观察和

测试不同置氢量以及固溶-时效处理制度下 TC17 钛合金锻件微观组织和显微硬度,探索氢含量、固溶温度、时效温度以及时效时间对 TC17 钛合金组织及性能的影响规律,以期对 TC17 钛合金构件的高效、低成本制备奠定理论与技术基础。

1 实验

实验材料为 TC17 钛合金锻件,其相变点为 897 °C,化学成分见表 1。TC17 钛合金原始组织为典型的双态组织,由等轴初生 α 相和 β 转变组织构成,如图 1 所示。

表 1 TC17 钛合金锻件化学成分 (w%)

Table 1 Chemical composition of TC17 titanium alloy forging

Ti	Al	Mo	Cr	Sn	Zr	Fe	O	H	N	B	Cu	Mn	Y
Bal.	4.90	4.07	4.04	2.15	1.99	0.047	0.10	0.0054	0.005	<0.010	<0.010	<0.010	<0.005

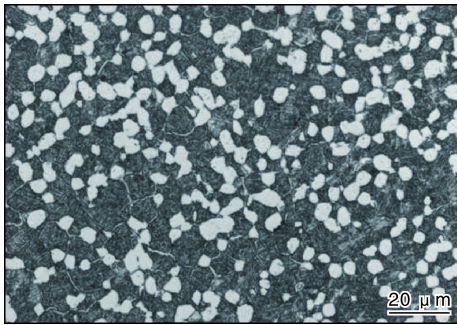


图 1 TC17 钛合金的原始组织

Fig.1 Original microstructure of TC17 titanium alloy

利用机械加工制备出 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的 TC17 钛合金试样,采用固态置氢法,利用管式氢处理炉对 TC17 钛合金进行置氢处理,置氢温度 700 °C,保温时间 2 h,炉冷至室温。通过控制充氢时间 (50~300 s) 控制 TC17 钛合金的氢含量,充氢流速为 1 L/min。采用 Sartorius 高精度物理天平 (精确到 10^{-5} g) 称量样品置氢前后的质量,利用式 (1) 计算置氢钛合金的氢含量。

$$C = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中: C 为置氢钛合金的氢含量, w%; m_0 为置氢前钛合金的质量, g; m_1 为置氢后钛合金的质量, g。经计算,制备的置氢 TC17 钛合金氢含量分别为 0%、0.12%、0.20%、0.30%、0.42% 和 0.50% (质量分数,下同)。

将置氢 TC17 钛合金加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的试样,利用箱式电阻炉对其进行固溶-时效处理,固溶处理制度为 (760~840) °C/4 h/WQ, 温度间隔 20 °C, 时效处理制度为 630 °C/8 h/AC。金相试样经砂纸打磨和机械抛光后,用 $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (体积比为 1 : 2 : 5) 腐蚀液

浸蚀。采用 Leica DMI5000M 金相显微镜进行微观组织观察。利用显微硬度仪进行显微硬度测试,每个试样测试 3 个点,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 置氢 TC17 钛合金微观组织与显微硬度

TC17 钛合金置氢处理后的微观组织如图 2 所示。从图 2 可以看出,与未置氢合金相比,置氢合金的球状初生 α 相尺寸和比例并无明显变化,但 β 转变组织却发生了显著变化;随着氢含量的增加, β 转变组织中的片层状 α 相尺寸减小、比例降低,转变为 β 相;当氢含量高于 0.30% 时,片层状 α 相消失,几乎全部转变为 β 相。这是因为氢作为 β 相稳定元素,可以保留更多的 β 相至室温。

TC17 钛合金置氢处理后的显微硬度如图 3 所示。从图 3 可知,TC17 钛合金置氢处理后显微硬度显著降低。原始态合金显微硬度为 385 $\text{HV}_{0.3}$,经置氢处理后 (置氢量为 0%) 显微硬度降低至 353 $\text{HV}_{0.3}$;随着氢含量的增加,合金显微硬度逐渐降低,当氢含量为 0.5% 时,显微硬度降低至 300 $\text{HV}_{0.3}$ 。TC17 钛合金置氢处理后,氢主要以间隙原子的形式存在于体心立方结构的 β 相中,引起较大的晶格膨胀和内应力,增大了对位错运动的阻碍作用,导致材料的显微硬度升高。与此同时,置氢处理后 β 转变组织中的片层状 α 相比比例降低,导致材料的显微硬度降低。TC17 钛合金置氢处理后显微硬度下降是上述两种机制共同作用的结果。

2.2 置氢 TC17 钛合金固溶处理后微观组织与显微硬度
在 800 °C 条件下对置氢 TC17 钛合金进行固溶

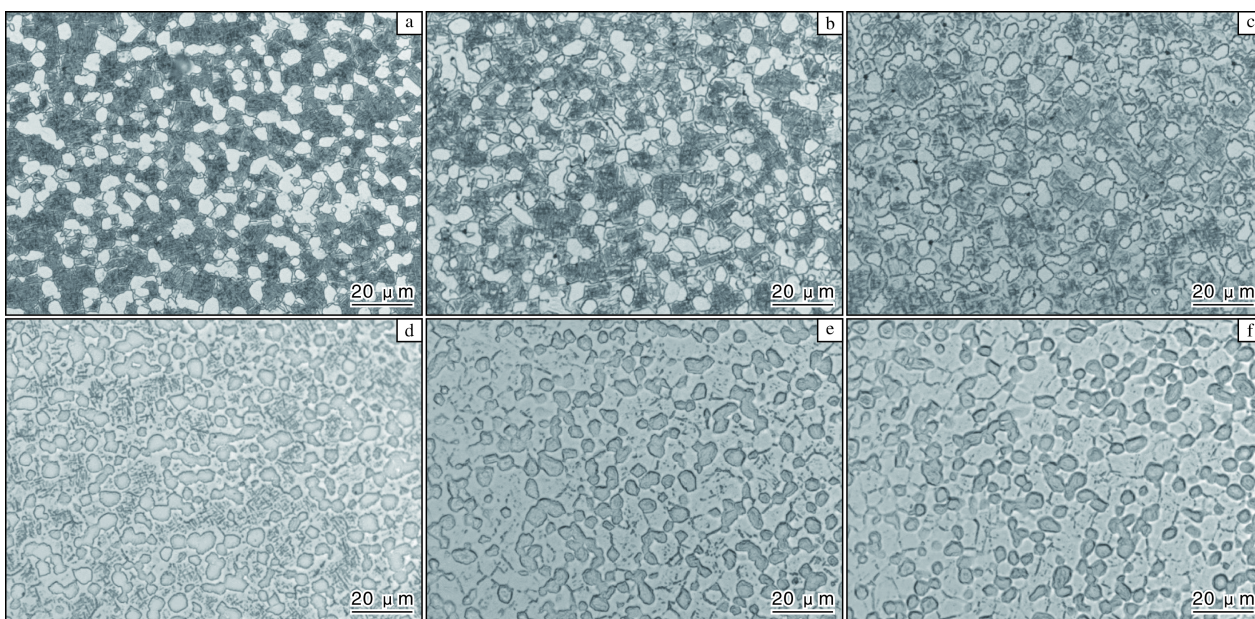


图 2 不同氢含量置氢 TC17 钛合金的微观组织

Fig.2 Microstructures of hydrogenated TC17 titanium alloy with different hydrogen contents:
(a) 0%; (b) 0.12%; (c) 0.20%; (d) 0.30%; (e) 0.42%; (f) 0.50%

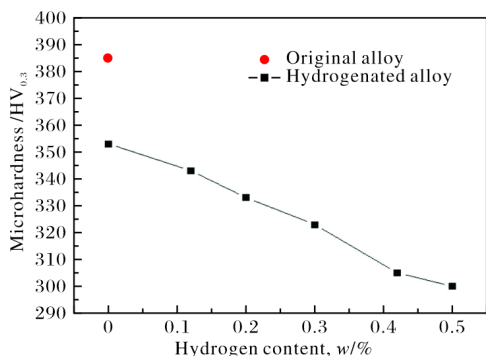


图 3 不同氢含量置氢 TC17 钛合金的显微硬度

Fig.3 Microhardness of hydrogenated TC17 titanium alloy with different hydrogen contents

处理，处理后的微观组织如图 4 所示。从图 4 可知，随着氢含量的增加，初生 α 相比比例显著降低， β 相比比例增加，当氢含量为 0%~0.20%时，组织中存在较多未完全转化的初生 α 相，当氢含量高于 0.30%时，初生 α 相基本消失。此外，可以观察到 β 相基体中存在深色点状形貌的物相，且随着氢含量的增加未发现其数量、形貌及分布有明显变化。通过扫描电镜分析此深色点状物相，判断为置氢 TC17 钛合金在 $\alpha+\beta$ 相区加热后冷却过程中 β 相分解产生的次生 α 相，其尺寸较初生 α 相减小了 70%~90%。

氢含量为 0.30%的置氢 TC17 钛合金经不同温度固溶处理后的微观组织如图 5 所示。从图 5 可以看出，随

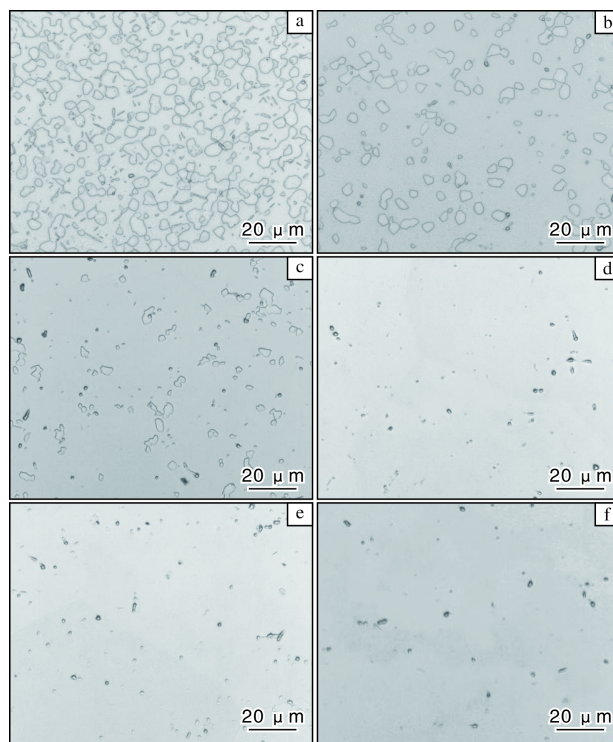


图 4 不同氢含量置氢 TC17 钛合金固溶处理后的微观组织

Fig.4 Microstructures of hydrogenated TC17 titanium alloy with different hydrogen contents after solution treatment:
(a) 0%; (b) 0.12%; (c) 0.20%; (d) 0.30%; (e) 0.42%; (f) 0.50%

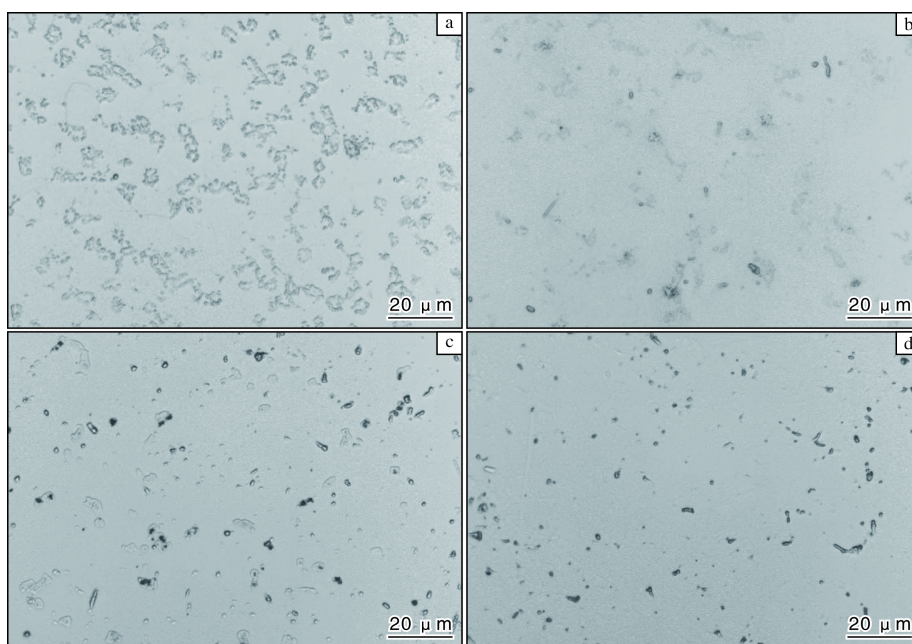


图5 氢含量为0.30%的置氢 TC17 钛合金经不同温度固溶处理后的微观组织

Fig.5 Microstructures of hydrogenated TC17 titanium alloy with hydrogen content of 0.30% after solution treatment at different temperatures: (a) 760 °C; (b) 780 °C; (c) 800 °C; (d) 820 °C

随着固溶温度的升高, 初生 α 相减少, 转变为 β 相, 当固溶温度高于 800 °C 时, 初生 α 相消失, 几乎转变为 β 相。可见, 固溶温度对微观组织的影响与氢含量的影响相同, 这主要是由 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变温度降低所导致。氢含量增加或者固溶温度升高都会导致热处理温度更加接近相变温度, 从而促进初生 α 相向 β 相的转变。

不同氢含量置氢 TC17 钛合金固溶处理后的显微硬度如图 6 所示。从图 6 可以看出, 当固溶温度低于 780 °C 时, 随着氢含量的增加, 显微硬度整体呈降低的变化趋势, 且温度越低, 硬度也越低, 与置氢处理后硬度的变化趋势相似。当温度高于 800 °C 时, 随着置氢量的增加, 显微硬度整体呈上升的变化趋势, 且温度越高, 硬度也越高, 这是因为固溶处理过程中溶入固溶体中的溶质原

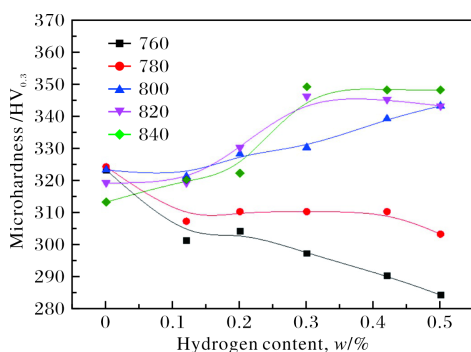


图6 不同氢含量置氢 TC17 钛合金固溶处理后的显微硬度

Fig.6 Microhardness of hydrogenated TC17 titanium alloy with different hydrogen contents after solution treatment

子造成晶格畸变, 晶格畸变增大了位错运动的阻力, 使滑移难以进行, 从而使合金的强度与硬度增加, 且固溶温度越高、氢含量越高, 溶入固溶体中的溶质原子数量越多, 因此固溶强化效果越明显, 硬度越高。

2.3 置氢 TC17 钛合金时效处理后微观组织与显微硬度

对 800 °C 固溶处理后的置氢 TC17 钛合金进行 630 °C/8 h 时效处理, 时效后的微观组织如图 7 所示。从图 7 可以看出, 氢含量为 0% 时, 析出了细小的 α 相片层组织, 形成了双态组织, 与未经固溶+时效处理的组织相似; 当氢含量为 0.12% 时, 微观组织仍为双态组织, 但初生 α 相体积分数大幅减少; 当氢含量增加至 0.30% 时, 初生 α 相基本消失, 析出相首先沿晶界析出, 以一定的角度向晶内生长形成针状、板状次生 α 相, 同时在 β 相内大量析出 α 相并长大, 靠近晶界的 α 相和晶内 α 相几乎无差异, 都呈现细小的网篮组织。随着氢含量的增加, 置氢 TC17 钛合金时效析出相呈现长大的变化趋势, 说明氢的加入促进了析出相的形核和长大。

置氢 TC17 钛合金 (氢含量为 0.20%) 经不同温度固溶处理及 630 °C/8 h 时效处理后的显微组织如图 8 所示。从图 8 可以看出, 固溶温度较低 (780 °C) 时, 时效处理后微观组织中还存在一定含量的初生 α 相, 初生 α 相由球状转变为不规则形状; 随着固溶温度的升高, 初生 α 相比例逐渐降低, 当固溶温度超过 820 °C 时, 初生 α 相消失, 微观组织以细小的次生 α 相为主, 分布于 β 相界和 β 相内。

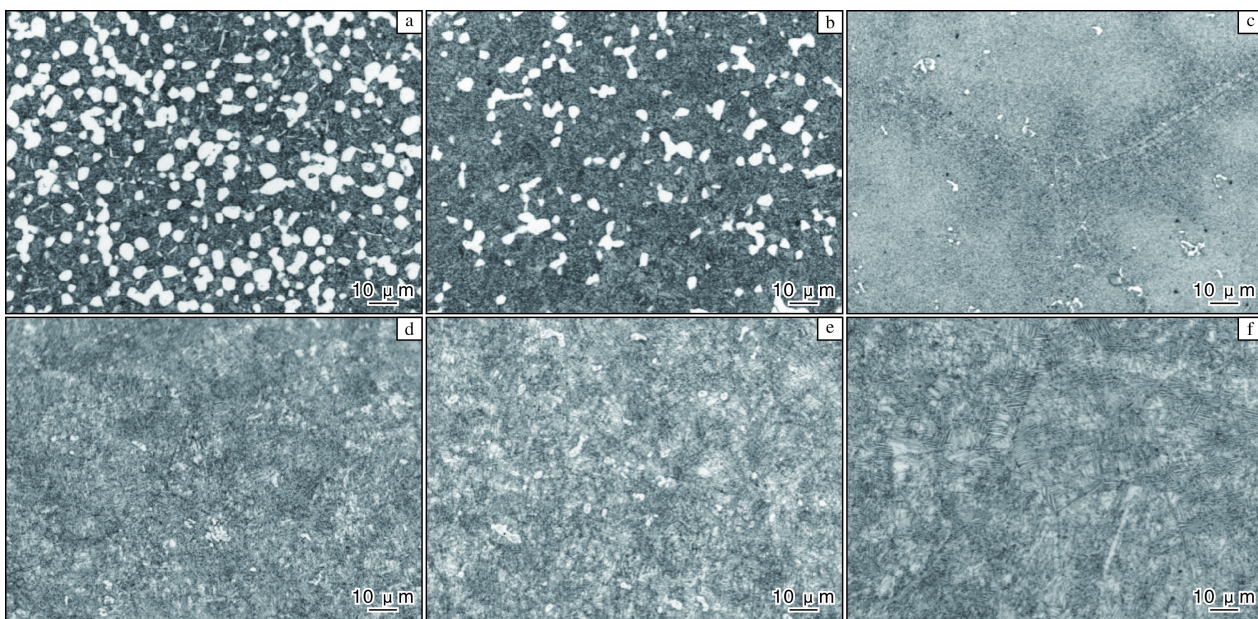


图 7 不同氢含量置氢 TC17 钛合金时效处理后的微观组织

Fig.7 Microstructures of hydrogenated TC17 titanium alloy with different hydrogen contents after aging treatment:
(a) 0%; (b) 0.12%; (c) 0.20%; (d) 0.30%; (e) 0.42%; (f) 0.50%

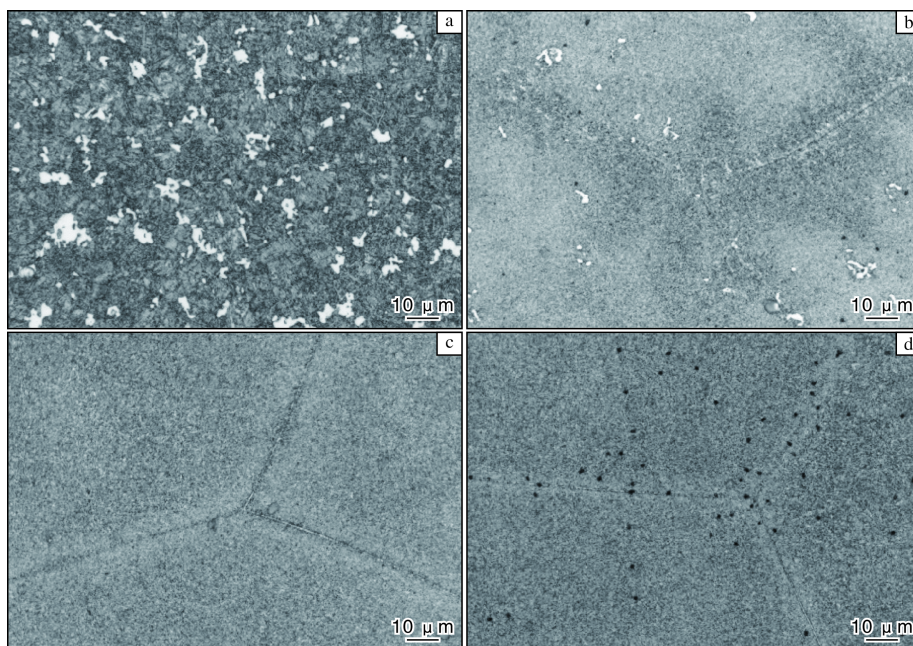


图 8 置氢 TC17 钛合金经不同温度固溶+时效处理后的微观组织

Fig.8 Microstructures of hydrogenated TC17 titanium alloy after solution treatment at different temperatures and aging treatment:
(a) 780 °C; (b) 800 °C; (c) 820 °C; (d) 840 °C

置氢 TC17 钛合金经不同温度固溶+时效处理后的显微硬度如图 9 所示。从图 9 可知，固溶温度较低（760 °C）时，随着氢含量的增加，TC17 钛合金显微硬度变化不大；当固溶温度高于 780 °C 时，随着氢含量的增加，显微硬度呈现先升高再降低的变化趋势，在氢含

量为 0.20% 时，硬度出现了极大值，且随着固溶温度的升高，硬度也呈上升趋势。氢含量为 0.20% 的置氢 TC17 钛合金经 840 °C 固溶+时效热处理后，显微硬度达到 450 HV_{0.3}，与固溶+时效处理前相比提高了 21%。这主要是由于氢含量为 0.20% 的置氢 TC17 钛合金经固溶+时

效处理后以细小的次生 α 相为主, 对提高强度起到了重要的作用。

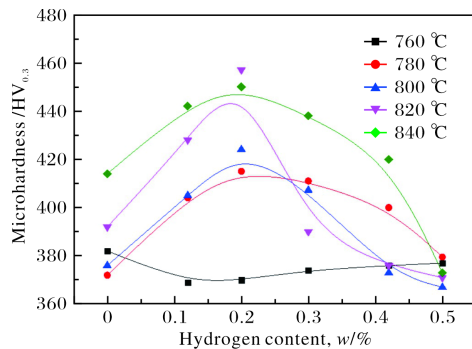


图9 置氢 TC17 钛合金经不同温度固溶+时效处理后的显微硬度
Fig.9 Microhardness of hydrogenated TC17 titanium alloy after solution treatment at different temperatures and aging treatment

3 结论

(1) 置氢处理前后 TC17 钛合金微观组织中初生 α 相尺寸和比例并无明显变化, 随着氢含量的增加, β 转变组织中的片层状 α 相逐渐转变为 β 相, 显微硬度降低。

(2) 置氢 TC17 钛合金经固溶处理后微观组织发生显著变化, 随着氢含量的增加或固溶温度的升高, 初生 α 相比例减少, β 相比例增加, 主要是由氢致 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变温度降低所致。此外, 当固溶温度低于 780 °C 时, 整体呈降低趋势, 当固溶温度高于 800 °C 时, 随着氢含量的增加整体呈上升趋势。

(3) 置氢 TC17 钛合金经固溶+时效处理后微观组织变化显著, 随着氢含量的增加, 微观组织由双态组织转变为网篮组织。氢含量为 0.20% 的置氢 TC17 钛合金经 840 °C 固溶+时效热处理后, 显微硬度达到 450 HV_{0.3}, 与固溶+时效处理前相比提高了 21%。

参考文献 References

[1] Ren L N, Zhang Q B, Lei X W, et al. Effect of laser heat input on microstructure and fatigue behavior of TC17 titanium alloy laser welded joint[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(7): 1836-1844.
[2] 郭萍, 强菲, 王欢, 等. 热处理工艺对大规格 TC17 钛合金棒材组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2024, 41(3): 19-23.
[3] 白东辉, 汤育玺. 锻造工艺对 TC17 钛合金锻件组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (23): 84-86.

[4] 李昌永, 魏鑫, 赵兴东, 等. TC17 钛合金盘件的 β 锻造工艺优化[J]. 钛工业进展, 2021, 38 (3): 1-5.
[5] 何俊, 王鹏, 覃佳栋, 等. TC17 钛合金压气机前轴颈锻件 β 锻造工艺优化[J]. 钛工业进展, 2021, 38 (4): 5-10.
[6] Senkov O N, Froes F H. Thermohydrogen processing of titanium alloys[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24(6): 565-576.
[7] Goltsov V A. Hydrogen treatment (processing) of materials: current status and prospects[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1999, 293-295: 844-857.
[8] Eliezer D, Eliaz N, Senkov O N, et al. Positive effects of hydrogen in metals[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 220-224.
[9] Shan D B, Zong Y Y, Lv Y. The effect of hydrogen on the strengthening and softening of Ti-6Al-4V alloy[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(6): 449-452.
[10] Zhao J W, Ding H, Wang Y Q, et al. Influence of thermohydrogen treatment on hot deformation behavior of Ti600 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 65-72.
[11] Zong Y Y, Huang S H, Wang Y Q, et al. Strengthening versus softening mechanisms by hydrogen addition in β -Ti40 alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(7): 3498-3504.
[12] Li X F, Jiang J, Wang S, et al. Effect of hydrogen on the microstructure and superplasticity of Ti-55 alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(9): 6338-6349.
[13] 李细锋, 朱富慧, 陈长江, 等. 置氢钛合金超塑成形/扩散连接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(16): 38-45.
[14] 周昊, 王耀奇, 李红, 等. 置氢 TC17 钛合金组织演变规律及高温变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 947-952.
[15] 王维. 氢处理对 TC4 钛合金力学性能的影响[J]. 模具制造, 2023, 23(4): 160-162.
[16] 马鑫, 孙前江, 文超, 等. 准 β 热处理工艺对 TC4-DT 钛合金组织和拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(12): 4260-4267.
[17] 邓雨亭, 李四清, 黄旭, 等. 航空发动机用 β 锻 TC17 钛合金时效析出行为研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(9): 59-63.