

# 0.2%氢对 Ti-22Al-25Nb 合金 O 相转变和 B2 相再结晶的影响

邵 斌, 单德彬, 郭 斌, 宗影影

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 通过对 Ti-22Al-25Nb 合金置氢, 研究氢对 Ti-22Al-25Nb 合金 O 转变及 B2 再结晶过程的影响。结果表明, 在添加质量分数 0.2% 的氢后 Ti-22Al-25Nb 合金的热处理过程中, 相变过程加快, 相变点降低。并且氢促进 B2 相再结晶过程, 960 °C 时的晶粒尺寸从 135 μm 细化到 60 μm。在升温过程中氢促进强化相 O 相分解为 B2 相, 并促进 α<sub>2</sub> 相从颗粒状转变为条状。在 750 °C 保温时氢促进 O 相在晶界处优先析出并迅速长大, 氢加快了 B2→O 相的转变过程。

**关键词:** Ti-22Al-25Nb 合金; 氢致相变; 晶粒细化; O 相

**中图分类号:** TG113.12; TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)04-1174-05

Ti-22Al-25Nb 合金是第 2 代 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金 (又称 O 相合金)。合金中 Nb 元素原子分数高达 25%, 从而相对于第 1 代的 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金<sup>[1,2]</sup>拥有了更好的塑性变形能力。合金本身具有低密度、高比强度、高比刚度、良好的焊接性能、抗氧化性及耐腐蚀性等优异的性能<sup>[3-5]</sup>, 使之有希望替代高温镍基合金作为航空航天结构材料<sup>[6]</sup>。目前主要应用于发动机叶片、连轴转子、导弹壳体以及一些高温部件等<sup>[7-9]</sup>。虽然合金具有一定的塑性加工能力, 但是其加工温度高、变形抗力大、易开裂等问题严重限制了合金的大规模生产<sup>[10,11]</sup>。热氢加工技术作为一种有效提高钛合金塑性变形能力的方法被广泛的研究及应用<sup>[12,13]</sup>。目前我国已经有学者研究了 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金氢致相变, 热氢加工技术。发现了氢能促进 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的相变过程, 显著降低了 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金变形抗力, 提高了合金的塑性加工性能<sup>[14,15]</sup>。张勇等最先开始对铸态及锻态 Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo 合金置氢, 发现置氢 0.2% 后合金的压缩变形抗力降低 30% 左右<sup>[16,17]</sup>。之后丁桦等也研究了 Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo 合金, 发现氢能降低 O 相的含量<sup>[18]</sup>。Zhang 和 Ito 等对 Ti-22Al-27Nb 合金吸氢和脱氢过程进行系统的分析<sup>[19]</sup>。Patselov 等对 Ti-Al-Nb 系统的吸氢过程做了详细的研究, 发现在 500 °C 吸氢量最大<sup>[15]</sup>。而孙越麒和 Guillaume 等分别对置氢后的 Ti<sub>3</sub>Al 合金的热变形行为及焊接性能进行了研究<sup>[14,20]</sup>。温道胜对置氢 Ti-Al 合金的塑性加工性能进行了系统的研究, 发现氢能促进

B2 相动态再结晶过程<sup>[21]</sup>。大部分学者主要是对第 1 代 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的热氢作用进行了研究<sup>[22,23]</sup>。但是对于第 2 代 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金, 特别是 Ti-22Al-25Nb 合金的热氢作用过程及氢对于合金中主要强化相 O 的影响的研究还较少。而 Ti-22Al-25Nb 合金中 O、α<sub>2</sub> 相含量及形态的变化和 B2 相再结晶过程将直接导致合金的力学性能发生改变<sup>[24]</sup>, 所以研究氢对 Ti-22Al-25Nb 合金相转变及再结晶的影响十分重要, 明确氢促进相转变及再结晶过程能够更好地指导运用热氢加工技术。因此本工作着重研究了氢对于 Ti-22Al-25Nb 合金 O 相转变及 B2 再结晶过程。

## 1 实 验

原始材料为 1 mm 厚的 Ti-22Al-25Nb 合金轧制板, 晶粒尺寸约 120 μm。未置氢合金记为 0H 合金, 置氢量为 0.2% (质量分数) 的合金记为 0.2H 合金。热处理在箱式电阻炉中进行。实验过程分为两类: (1) 原始轧制板材的升温相变过程。0H 合金分别在 870、930、990 和 1080 °C 保温 15 min 后水淬, 0.2H 合金分别在 870、930 和 990 °C 保温 15 min 后水淬; (2) 纯 B2 相合金 750 °C 保温过程, 保温前合金是 B2 相的单相组织。为获得纯 B2 相组织需进行预先处理, 其中 0H 合金预先在 1200 °C 保温 15 min 水淬以获取 B2 相组织, 0.2H 合金在 960 °C 保温 15 min 以获取 B2 相组织 (晶界处有微量条状 α<sub>2</sub> 相近似认为是纯 B2 相)。将纯

收稿日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51275132)

作者简介: 邵 斌, 男, 1989 年生, 博士, 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 黑龙江 150001, 电话: 0451-86412043, E-mail: heloshao@126.com

B2 相合金放置于 750 °C 热处理炉中分别保温 2、5 和 15 min 后水淬观察组织。金相组织观察在 Olympus GX71 光学显微镜上进行, 背散射电子及 EBSD 在场发射环境扫描电镜 Quanta 200FEG 上进行, 透射在场发射高分辨分析在透射电镜 Tecnai G2 F30 上进行。

## 2 结果与讨论

温度  $\geq 870$  °C 时, 0H 及 0.2H 合金的相变过程如图 1 所示。870 °C 时 0H 合金的晶粒尺寸约为 120  $\mu\text{m}$ , 与原始组织的晶粒尺寸相当, 说明未发生再结晶过程, 在晶界处有 B2+ $\alpha_2$  相片层结构析出, 如图 1a 所示。870 °C 时 0.2H 合金的组织与 0H 合金组织相似, 但晶界处的 B2+ $\alpha_2$  相片层结构形态进一步转变, B2+ $\alpha_2$  相片层粗化,  $\alpha_2$  相转变成为球状, 而 B2 相则逐渐长大形成连续的基体相, 说明氢促进了 B2+ $\alpha_2$  相片层结构的析出过程, 如图 1e 所示。当温度达到 930 °C 后 0H 合金在晶界处的 B2+ $\alpha_2$  相片层结构类似于 0.2H 合金 870 °C 时的析出形态 (图 1a), 并逐渐向晶内扩展。B2+ $\alpha_2$  相片层结构在晶界处优先析出的原因是晶界处存在大量缺陷, 使得原子扩散阻力小, 易于原子扩散, 促进相析出过程。而晶粒内部晶格结构完整, 原子扩散时受到相邻原子的约束, 原子扩散困难, 所以 B2+ $\alpha_2$  相析出能力弱于晶界处。但是随温度的升高, 热能驱动下原子摆脱相邻原子束缚的能力增强, 扩散能力增强, 所以 B2+ $\alpha_2$  相片层结构向晶内蔓延, 如图 1b 所示。当温度增加到 990 °C 后, 0H 合金内大量的  $\alpha_2$  相颗粒在晶界处规则地析出, 如图 1c 所示。但是反观 0.2H 合

金, 在 930 °C 时 O 相大量消失, 颗粒状的  $\alpha_2$  相弥散析出, 如图 1f 所示。当温度达到 990 °C 时合金已经进入 B2+ $\alpha_2$  相双相区, 由 B2 相再结晶晶粒及晶界处的条状  $\alpha_2$  相构成, 晶粒尺寸在 70  $\mu\text{m}$  左右, 如图 1g 所示。同时晶内部也有一定的条状及颗粒状的  $\alpha_2$  相析出, 如图 1h 所示。然而 0H 合金只有当温度达到 1080 °C 时才会观察到部分区域少量的条状  $\alpha_2$  相, 如图 1d 所示。说明 0.2%H 的加入使得 Ti-22Al-25Nb 合金相变进程加快。本质为氢促进了合金内部原子的扩散运动, 具体表现为氢促进了 O $\rightarrow$ B2+ $\alpha_2$  的转化过程, 加速了 O 相的消失。同时氢也促进了  $\alpha_2$  相由颗粒状向条状生长。

氢不仅促进 Ti-22Al-25Nb 合金相变过程, 同时也会促进再结晶过程。0.2H 在 930 °C 就已经观察不到明显的晶界 (图 1f), 而 990 °C 时已经完成再结晶过程 (图 1g)。而 960 °C 时为氢促进合金再结晶过程最为明显的温度, 如图 2 所示。图 2a 为 0H 合金 960 °C 时的 IPF 图, 图 2b 为 0.2H 合金 960 °C 时的 IPF 图, 对比图 2a、2b 发现氢显著促进了合金的再结晶现象, 置氢后合金晶粒细化。分别对 0H 及 0.2H 合金的晶粒尺寸进行统计如图 2c 所示。0H 合金 129.3  $\mu\text{m}$  尺寸的晶粒占比高达约 20%, 而且有近 50% 的晶粒尺寸大于 150  $\mu\text{m}$ , 经统计合金的平均晶粒尺寸约 135  $\mu\text{m}$ , 相对于原始轧制板材有略微长大, 这是由于晶界处的 B2+ $\alpha_2$  相及  $\alpha_2$  相的钉扎作用, 使得 B2 晶粒长大速度缓慢。0.2H 合金的主要晶粒尺寸集中在 69.8  $\mu\text{m}$ , 经统计晶粒平均尺寸约为 60  $\mu\text{m}$ 。所以从图 2c 的数据可分析出氢有效促进合金再结晶过程, 细化晶粒。

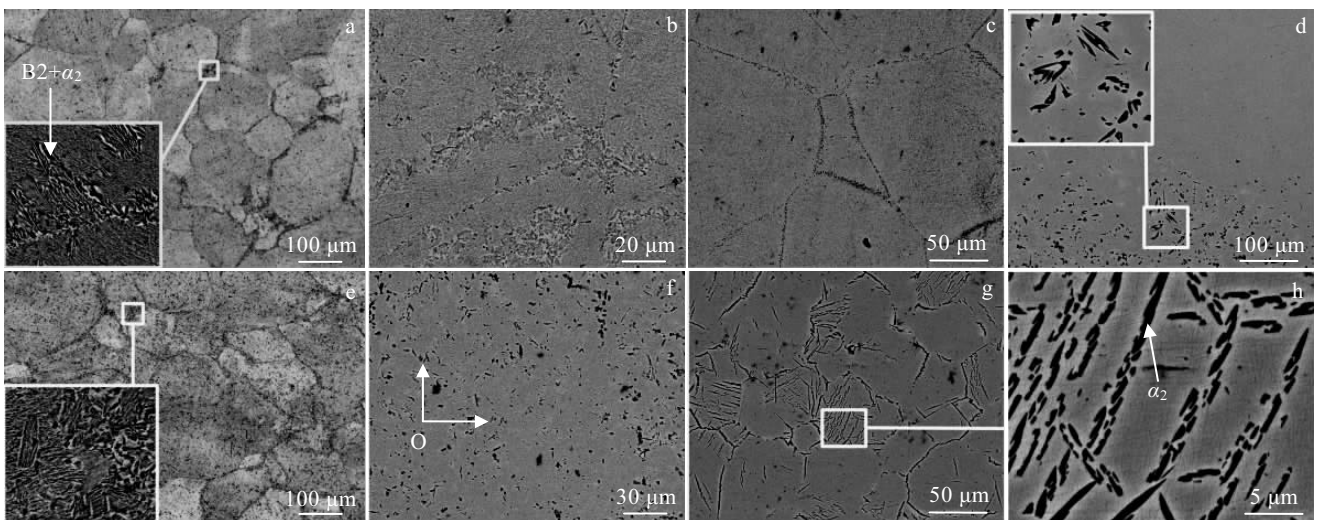


图 1 0H 和 0.2H 合金相变过程组织

Fig.1 Microstructures of 0H (a~d) and 0.2H (e~h) alloys during the phase transformation process: (a, e) 870 °C, (b, f) 930 °C, (c, g, h) 990 °C, and (d) 1080 °C

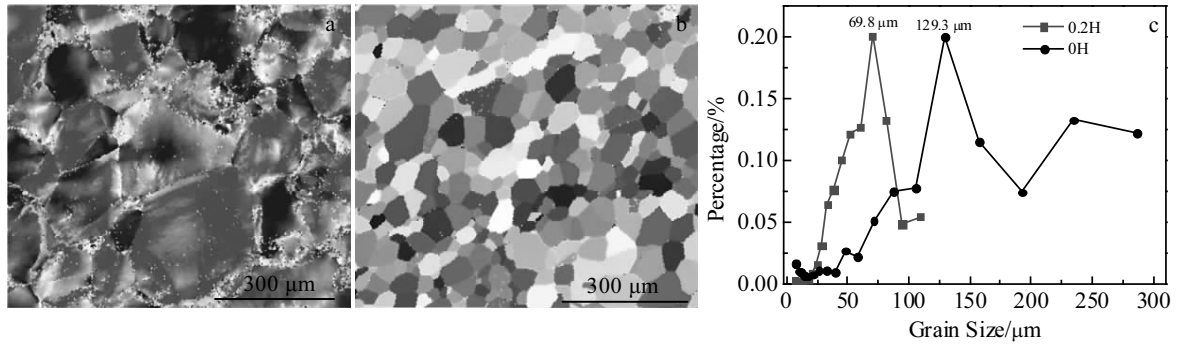


图 2 0H 合金和 0.2H 合金 960 °C 时 IPF 图及晶粒尺寸统计

Fig.2 IPF images of 0H alloy (a) and 0.2H alloy (b); statistics of grain sizes (c)

以上分析可知氢能促进合金相变及再结晶过程。对于 Ti-22Al-25Nb 合金的热氢技术最关键的是研究出氢为什么能有效地降低合金的塑性变形抗力。O 相是合金的主要强化相，同时又是合金的主要组成相，在合金中的含量非常高，合金优异的力学性能主要得益于 O 相的存在。而氢促进 O 相转变的过程正好可以解释“氢致增塑”。图 3 分析了 960 °C 时氢对 O 相的影响。如图 3a 和 3b 所示 0H 合金 960 °C 时 O 相以条状镶嵌于 B2 相基体内，且 O 相分布较为密集，说明此

时 O 相含量较高起到较明显的强化作用，合金强度较高。而图 3c、3d 所示 0.2H 合金的 TEM 组织未发现条状 O 相的存在，只存在 B2 相基体及 B2 相晶界。这充分证明了在 960 °C 时氢促进了 O→B2 的转变，加速了 O 相的消失，从而使得塑性较高且变形抗力较低的 B2 相含量大增，所以置氢后合金表现为力学软化行为，易于加工成形。同时由于氢降低了相变温度，所以在降低合金变形抗力的同时也能降低合金的热加工温度。

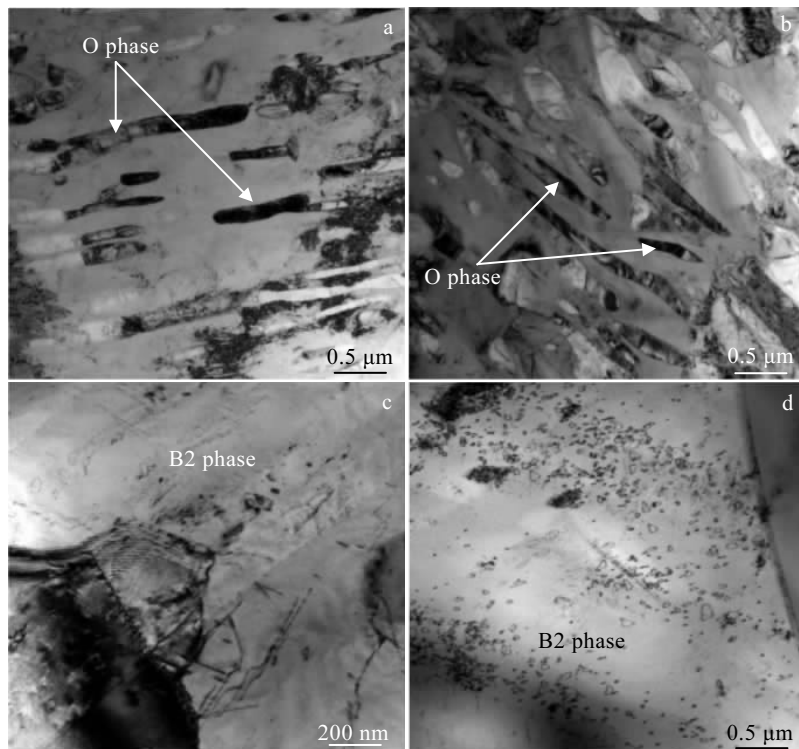


图 3 0H 和 0.2H 合金 960 °C 时的 TEM 组织

Fig.3 TEM images of 0H (a, b) and 0.2H (c, d) alloys heated at 960 °C

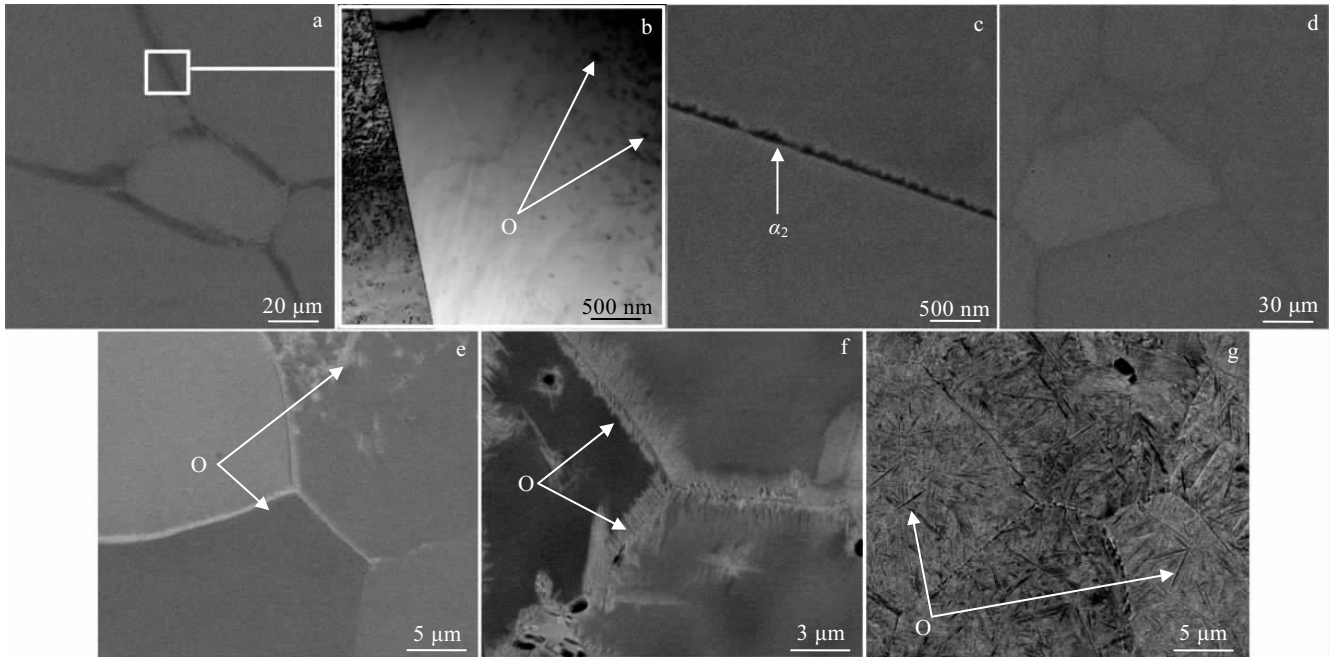


图4 0H合金(B2相)和0.2H合金在750 °C保温不同时间的组织

Fig.4 Microstructures of 0H alloy (B2 phase) (a~d) and 0.2H alloy (e~g) heated at 750 °C for 2 min (a, b, e), 5 min (c, f), and 15 min (d, g)

图4所示为纯B2相合金在750 °C保温不同时间的组织。如图4a所示,当保温2 min后0H合金背散射电子图像中B2相晶界处出现灰色条带状,说明晶界处发生成分偏析。具体观察发现在晶界处有约2 μm宽的纯B2相带,而晶内部有微量的O相颗粒生成,如图4b所示,同时说明0H合金的O相在晶内优先析出。而当保温时间增加到5 min后在晶界处观察到了微量的 $\alpha_2$ 相生成,如图4c所示。当保温时间继续增加,达到15 min后合金组织并未发生明显转变,依旧以B2晶粒为主,如图4d所示。然而0.2H合金750 °C保温后的组织则发生明显变化,如图4e所示,0.2H合金保温2 min后,主要在晶界处有微量的O相生成,晶内也有少量O相生成。当保温时间增加到5 min后,在晶界处可以观察到明显规则生长的O相,如图4f所示,说明氢促进O相在晶界处优先析出。当保温时间达到15 min后0.2H合金的组织已经从B2相转变为针状的O相,如图4g所示,说明氢加速了O相的析出过程。

对比0H及0.2H合金不同温度条件下的组织,可知在升温过程中氢能促进强化相O相的分解,降低加工温度及变形抗力。750 °C保温过程中又能促进O相的析出。从而得知Ti-22Al-25Nb合金的热氢加工方法是通过氢来控制O相含量从而达到提高塑性加工能力的。即热加工时氢促进O相分解,降低合金强度,易

于加工。而热加工后在750 °C保温,氢又促进O相的析出使得合金的力学性能恢复。

### 3 结论

1) 氢促进Ti-22Al-25Nb合金 $O+\alpha_2+B2\rightarrow\alpha_2+B2$ 相变过程,使得合金 $O+\alpha_2+B2\rightarrow\alpha_2+B2$ 相变点从1020 °C降低到930 °C。同时氢促进 $\alpha_2$ 相的析出过程,并使其从颗粒状转变为条状。

2) 氢促进B2相的再结晶过程,使得合金B2相晶粒尺寸由135 μm细化到60 μm。

3) 在升温相变过程中氢促进条状O相分解,加速 $O\rightarrow B2$ 相转变。而在750 °C保温过程中氢促进O相在B2相晶界处优先规则析出,并加速 $B2\rightarrow O$ 的相转变过程。

4) 热氢加工过程中,氢降低热加工时O相的含量,起到软化作用。加工成形后在750 °C保温氢促进O相生长,恢复合金力学性能。

### 参考文献 References

- [1] Banerjee D. *Progress in Materials Science*[J], 1997, 42(1-4): 135
- [2] Banerjee D, Gogia A K, Nandi T K *et al. Acta Metallurgica*[J], 1988, 36(4): 871
- [3] Shen Jun(沈军), Feng Aihan(冯艾寒). *Acta Metallurgica*

- Sinica*(金属学报)[J], 2013, 49(11): 1286
- [4] Cao Jian, Dai Xiangyu, Liu Jiaqi *et al. Materials & Design*[J], 2017, 121: 176
- [5] Lin Peng, He Zhubin, Yuan Shijian *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 578: 96
- [6] Li Miaoquan(李淼泉), Yao Xiaoyan(姚晓燕). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(5): 925
- [7] Zhang Jianwei(张建伟), Li Shiqiong(李世琼), Liang Xiaobo(梁晓波) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 336
- [8] Lein S, Reimer T, Stubicar K *et al. Acta Astronautica*[J], 2009, 64(4): 416
- [9] Di Clemente M, Marini M, Di Benedetto S *et al. Acta Astronautica*[J], 2009, 65(1-2): 221
- [10] Zhao Hongze(赵洪泽), Lu Bin(卢斌), Yang Rui(杨锐). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2017, 27(4): 708
- [11] Zhang Qincai, Chen Minghe, Wang Hui *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(3): 722
- [12] Hou Hongliang(侯红亮), Li Zhiqiang(李志强), Wang Yajun(王亚军) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(3): 533
- [13] Liu Xinwang, Zhang Zhaolong, Du Hui *et al. Intermetallics* [J], 2014, 55: 102
- [14] Sun Yueqi(孙越麒). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [15] Patselov A M, Rybin V V, Greenberg B A *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 505(1): 183
- [16] Zhang Yong(张勇), Zhang Shaoqing(张少卿), Tao Chunhu(陶春虎). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 1996, 6(1): 84
- [17] Zhang Yong(张勇), Zhang Shaoqing(张少卿), Tao Chunhu(陶春虎). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1996, 32(3): 235
- [18] Ding Hua(丁桦), Lu Guimin(路贵民), Zhang Caipei(张彩碚) *et al. Material Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 1998, 6(4): 55
- [19] Zhang L T, Ito K, Vasudevan V K *et al. Acta Materialia*[J], 2001, 49(5): 751
- [20] Guillaume Begin(顾罗莫). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [21] Wen Daosheng(温道胜). *Dissertation for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [22] Illarionov A G, Grib S V, Popov A A *et al. The Physics of Metals and Metallography*[J], 2010, 109(2): 142
- [23] Dong Lin(董林), Zhang Caipei(张彩碚), Ding Hua(丁桦) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2000, 14(S1): 63
- [24] Feng Aihan(冯艾寒), Li Bobo(李渤渤), Shen Jun(沈军). *Journal of Materials and Metallurgy*(材料与冶金学报)[J], 2011, 10(1): 30

## Effect of 0.2%H on the O Phase Transformation and Recrystallization of B2 Phase of the Ti-22Al-25Nb Alloy

Shao Bin, Shan Debin, Guo Bin, Zong Yingying  
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The Hydrogen was added into Ti-22Al-25Nb alloy, and the effects of H on the O phase transformation and recrystallization of B2 phase were investigated. The results show that the phase transformation process accelerates and the phase transformation point declines during the hot treatment process of the Ti-22Al-25Nb alloy after a 0.2% (mass fraction) hydrogen addition. Hydrogen facilitates the recrystallization process and the grain size refines from 135  $\mu\text{m}$  to 60  $\mu\text{m}$  at 960  $^{\circ}\text{C}$ . Hydrogen facilitates the decomposition of strengthening phase O phase into B2 phase and the transformation of the  $\alpha_2$  phase from granular shape to strip shape during the temperature increasing process. Hydrogen promotes the preferential segregation and fast growth of the O phase at grain boundaries and accelerates the transformation process of B2 $\rightarrow$ O phase during the 750  $^{\circ}\text{C}$  heat preservation process.

**Key words:** Ti-22Al-25Nb alloy; hydrogen-induced phase transition; grain refinement; O phase

Corresponding author: Zong Yingying, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86416221, E-mail: hagongda@hit.edu.cn