

Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金固溶后的组织及力学性能

王振国¹, 叶文君², 蔡海娇¹

(1. 有研亿金新材料股份有限公司, 北京 102200;

2. 北京有色金属研究总院, 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘 要: 本文采用光学显微镜(OM)、X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等对 Ti-2.3Cr-1.3Fe 低成本钛合金固溶后的组织和力学性能进行观察、分析和研究。固溶条件为: 温度 930 °C, 保温时间分别为 0.5 h、1.0 h、1.5 h 和 2.0 h, 水淬(WQ)。研究表明: 固溶后该合金的组织由 β 相、马氏体和 ω 相组成, 合金强度随固溶时间延长而缓慢降低, 抗拉强度最高为 1 165 MPa, 此时合金的延伸率最低仅为 2.5%, 主要是该合金固溶后的组织中含有 ω 相所致。

关键词: 钛合金; Ti-2.3Cr-1.3Fe; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

Microstructure and mechanical properties of Ti-2.3Cr-1.3Fe alloy after solution treatment

WANG Zhen-guo¹, YE Wen-jun², CAI Hai-jiao¹

(1. Grikin Advanced Materials Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. State Key Laboratory of Nonferrous Metals and Processes,
General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: After solution treatment, microstructure and tensile properties of Ti-2.3Cr-1.3Fe low cost alloy were studied through the methods of XRD, OM, SEM and TEM. The results indicate that the microstructure of alloy includes β phase, martensite and ω phase after solution treatment; the strength decreases with increasing solution time. Under the β phase heat treatment condition of 930 °C for 0.5 h, 1.0 h, 1.5 h and 2.0 h, WQ, the tensile strength is 1 165 MPa with 2.5% in elongation. As a result of the ω phase exists; the plasticity of alloy is low after solution treatment.

Key words: titanium alloys; Ti-2.3Cr-1.3Fe; microstructure; mechanical property

钛及钛合金因比强度高、密度小、耐高温及对环境污染等优异的综合性能, 在航空航天及化学化工领域应用广泛, 但与钢铁、铝合金等相比, 其成本要高许多: 首先, 矿成本, 钛是钢的 15 倍, 铝的 3 倍; 其次, 板材成本, 钛是钢的 50~83 倍, 铝的 10~15 倍^[1-2]。较高的成本限制钛合金在对成本比较敏感的领域更广泛的应用, 因此, 低成本钛合金的研制已越来越得到人们的重视。降低钛合金成本的方法有在合金

设计过程中使用廉价元素或中间合金降低原材料成本^[3-4], 如美国 Timetal LCB(Ti-4.5Fe-6.8Mo-1.5Al)合金用 Fe-Mo 代替 V^[5]和日本 Ti-0.05Pd-0.3Co 合金由 Co 来替代 Ti-0.2Pd 合金中的部分 Pd^[6]; 改善材料加工特性的设计及在材料加工过程中提高材料利用率均可降低合金成本。

Fe 作为 β 稳定元素, 可提高钛合金淬透性, 主要用于高强、高韧和高淬透性 β 合金^[7]。Cr 在 α 钛中溶

解度不超过 0.5%, 但在 β 钛中无限固溶, 起固溶强化作用, 还可提高合金塑性、韧性和淬透性^[8]; Cr 还可使钛合金具有良好的强度-塑性匹配, 保证热处理强化效应的同时还能细化合金铸态组织^[9-10]。因此, 本文作者对 Ti-2.3Cr-1.3Fe 低成本合金固溶处理及直接时效后的组织和力学性能进行研究, 以期以后深入研究奠定一定基础, 具有一定的学术价值和实践指导意义。

1 实验

实验材料为采用 Cr-Fe 合金自行研制的二次真空自耗熔炼而成的 Ti-2.3Cr-1.3Fe 低成本钛合金, 合金铸锭 15 kg, 化学成分如表 1 所列。铸锭在 1 050 °C 下开坯锻造, 在 800 °C 下加热后, 轧制成直径为 12 mm 的棒材, 棒材组织及 XRD 谱如图 1 所示。从 XRD 谱中知棒材组织由 α 相和 β 相组成, 体积分数分别为 81.7% 和 18.3%。用淬火金相法测得该合金相变点为 (905 ± 5) °C。

在棒材上用线切割切取 10 mm 高的金相试样和 70 mm 长拉伸试样。固溶温度 930 °C, 保温时间为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 h, 水淬(WQ)。热处理后的金相试样在水砂纸上由粗到细逐级打磨, 打磨完毕后进行电解抛光, 抛光液为 95%乙酸+5%高氯酸, 电压 60~70 V, 时间 10~20 s, 将制备好的金相试样采用体积比为 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:10$ 的腐蚀液腐蚀, 时间 45~60 s, 腐蚀后的金相试样放置干燥器中 24 h, 然后在 Axiovert 200 MAT 型 Zeiss 光学显微镜上进行组织观察。70 mm 长试样热处理后制成标准拉伸试样, 同一状态下采用 3 个平行试样, 拉伸实验在 ZNSTRON200 LZC 型拉伸试验机上进行, 拉伸速度为 2 mm/min。TEM 试样先用线切割切成 0.3 mm 厚薄片, 然后在砂纸上逐级打磨至 50 μm 左右, 用冲片器将试样冲成 $d3$ mm 的试样, 然后进行电解双喷或离子减薄至出现可观察区域, 双喷液为 6%高氯酸+34%正丁醇+60%甲醇, TEM 观察在 JEM 2100 LaB₆ 透射电镜上进行。

表 1 Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti-2.3Cr-1.3Fe alloy (mass fraction, %)

Cr	Fe	Si	C	H	O	N	Ti
2.33	1.28	0.048 7	0.078	0.003 2	0.054	0.006 0	Bal.

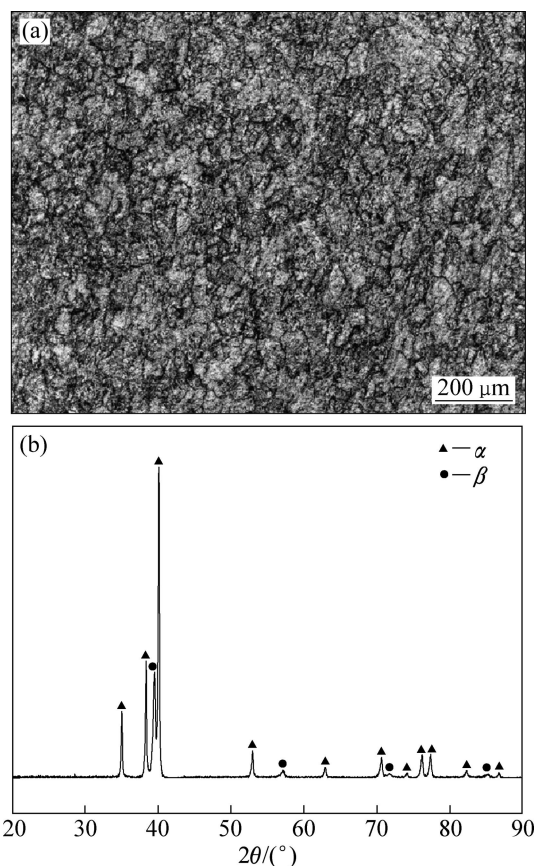


图 1 Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金棒材的显微组织及 XRD 谱

Fig. 1 Microstructure (a) and XRD pattern (b) of Ti-2.3Cr-1.3Fe alloy bar

2 结果及讨论

钛合金在 β 相区固溶后, 冷却速度对组织影响比较明显, 随冷却速度降低合金内组织由细小针状马氏体过渡为网篮和魏氏组织并存的混合结构, 最后全部变为 α 片层整齐排列的魏氏组织^[11]。固溶后合金以很快速度从 β 相区冷却至室温过程中, 原子来不及扩散只能通过切变方式析出细小针状且分布不均的马氏体^[11-13]。图 2 所示为合金经 930 °C 固溶后不同保温时间下的金相组织, 从中可知合金组织内含有 β 相和马氏体; 图 3 所示为保温 0.5 h 的 XRD 能谱图及马氏体 TEM 形貌, 从中进一步验证合金固溶后的相组成含有马氏体。选取保温时间 0.5 h 的试样进行 TEM 观察, 发现合金内还存在有 ω 相(图 4)。钛合金固溶处理后淬火形成的 ω 相是 β 相向 α 相转变形核长大时形成的, 具有六方结构, 与 β 相具有如下的共格关系: $[0001]_{\omega} // [111]_{\beta}, (11\bar{2}0)_{\omega} // (1\bar{1}0)_{\beta}$ ^[14]。

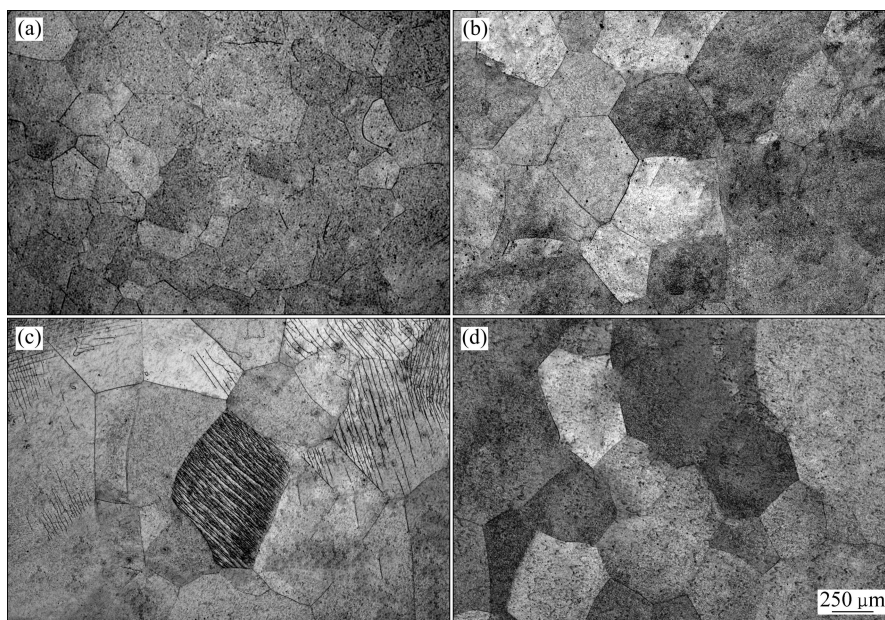


图 2 Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金固溶热处理后的金相组织

Fig. 2 Optical microstructures of Ti-2.3Cr-1.3Fe alloy after solution treatment: (a) 0.5 h; (b) 1.0 h; (c) 1.5 h; (d) 2.0 h

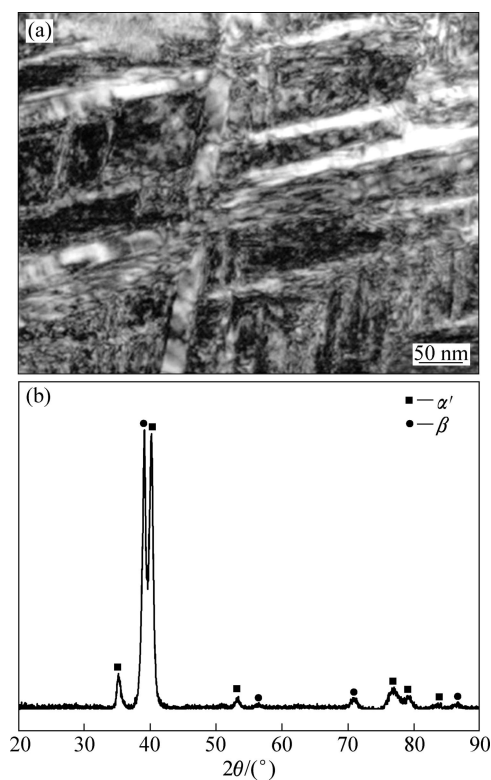


图 3 Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金固溶处理后保温 0.5 h 的 TEM 像和 XRD 谱

Fig. 3 TEM morphology (a) and XRD pattern (b) of Ti-2.3Cr-1.3Fe alloy after solution treatment and holdings for 0.5 h

表 2 所示为 Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金在不同固溶时间下的力学性能, 从中可知保温 0.5 h 后合金强度最高, 抗

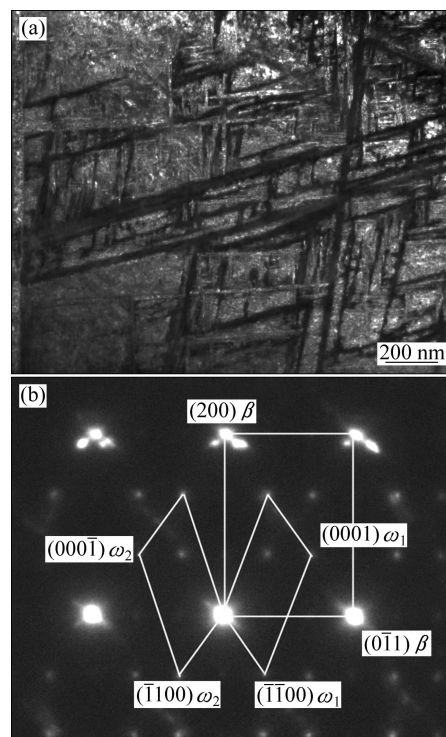


图 4 ω 相暗场相形貌及衍射斑

Fig. 4 TEM micrograph (a) and selected area electron diffraction spots (b) of ω phase

拉强度为 1 165 MPa, 此时延伸率仅为 2.5%; 保温 2 h 时抗拉强度与 0.5 h 的相比降低 5.2%, 这与其组织内 β 相平均晶粒粒径长大有关, 0.5 h 时约 300 μm , 2.0 h 约 400 μm , 长大约 33.3%, 晶粒长大导致细晶强化作用减弱, 从而导致合金强度有所降低; 从表 2 中还可

知, 固溶后 Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金的延伸率均比较低, 延伸率最大为 4.5%, 主要与其合金组织内的 ω 相有关, ω 相硬而脆, 位错不能在其中移动, 可使合金硬度、强度和弹性模量等得到很大提高, 并严重降低合金塑性^[15]。

表 2 Ti-2.3Cr-1.3Fe 合金固溶后的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti-2.3Cr-1.3Fe alloy after solution treatment

Time/h	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
0.5	1 165	1 015	2.5	6.5
1.0	1 120	990	4.5	6.0
1.5	1 135	1 015	3.0	4.5
2.0	1 105	990	4.0	5.5

3 结论

低成本钛合金 Ti-2.3Cr-1.3Fe 固溶后的组织由 β 相、马氏体和 ω 相组成。该合金强度随保温时间增加呈缓慢降低趋势; 经 930 °C、0.5 h、WQ 热处理后, 合金的抗拉强度最高为 1 165 MPa, 而此时的伸长率仅为 2.5%。由于固溶后合金组织中含有 ω 相, 致使合金固溶后的塑性均较低。

REFERENCES

- [1] 吴引江, 段庆文, 周 廉, 金志浩. 汽车用低成本钛合金及其制品的研究进展[J]. 新材料产业, 2003(2): 11-15.
WU Yin-jiang, DUAN Qing-wen, ZHOU Lian, JIN Zhi-hao. The study progress of low cost titanium alloy and its products[J]. Advanced Materials Industry, 2003(2): 11-15.
- [2] 李 中. 钛及钛合金在汽车上的应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(Special 1): 1034-1038.
LI Zhong. Applications of titanium and titanium alloys in automotive field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(Special 1): 1034-1038.
- [3] KAWABE Y. Research activities on cost effective metallurgy of titanium alloys in Japan[C]//GORYNIN I V. Proceedings of 9th World Conference on Titanium, Russia Central. Saint Petersburg: Research Institute of Structural Materials PPOMETEY, 1999: 1275-1282.
- [4] ESTEBAN P G, RUIZNAVASE M, BOLZON L, GORDO E. Low cost titanium alloys? Iron may hold the answers[J]. Metal Powder Report, 2008, 63(4): 24-27.
- [5] SEAGLE S R. The state of the USA titanium industry in 1995[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 1-7.
- [6] OGAWA M. Research and development of low cost titanium alloys[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2005, 55(11): 549-552.
- [7] 毛小南, 张鹏省, 于兰兰, 袁少冲. BT22 合金的成分设计和淬透性的关系研究[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(6): 21-26.
MAO Xiao-nan, ZHANG Peng-sheng, YU Lan-lan, YUAN Shao-chong. Relationship study between the component design and quenching degree for BT22 alloy[J]. Rare Metal Letters, 2006, 25(6): 21-26.
- [8] 张新平, 于思荣, 何镇明, 闫飞昊, 王美姣. 义齿钛合金成分的 d -电子合金理论设计[J]. 中国生物医学工程学报, 2004, 23(6): 567-572.
ZHANG Xin-ping, YU Si-rong, HE Zhen-ming, YAN Fei-hao, WANG Mei-jiao. The application of d -electron alloy design theory to optimization of dentistry titanium alloys[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2004, 23(6): 567-572.
- [9] 辛社伟, 赵永庆, 曾卫东. 钒和铬对 Ti40 阻燃钛合金力学性能的影响机制[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(7): 1216-1222.
XIN She-wei, ZHAO Yong-qing, ZENG Wei-dong. Mechanism of V and Cr on mechanical properties of Ti40 burn resistant titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(7): 1216-1222.
- [10] BIROSCA S, BUFFIERE J Y, GARCIA-PASTOR F A. Three-dimensional characterization of fatigue cracks in Ti-6246 using X-ray tomography and electron backscatter diffraction[J]. Acta materialia, 2009, 57(9): 957-963.
- [11] 冯 冉, 寇宏超, 常 辉, 李金山, 薛祥义, 王义红, 周 廉. 固溶处理对一种近 α 钛合金显微组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(10): 1785-1789.
FENG Ran, KOU Hong-chao, CHANG Hui, LI Jin-shan, XUE Xiang-yi, WANG Yi-hong, ZHOU Lian. Influence of solution treatment on microstructure of a near- α titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(10): 1785-1789.
- [12] 曾卫东, 周义刚. 冷速对 TC11 合金 β 加工显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(12): 1273-1276.
ZENG Wei-dong, ZHOU Yi-gang. Influence of cooling rate on microstructure and mechanical properties of beta processed TC11 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(12): 1273-1276.
- [13] 王 国, 惠松晓, 叶文君, 米绪军. 固溶处理对 Ti-3.0Al-2.3Cr-1.3Fe 钛合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3015-3021.
WANG Guo, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, MI Xu-jun. Influence of solution treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-3.0Al-2.3Cr-1.3Fe titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3015-3021.
- [14] SHAO G, TSAKIROPOULOS P. On the omega phase formation in Cr-Al and Ti-Al-Cr alloys[J]. Acta Materialia, 2000, 48(14): 3671-3685.
- [15] 李世凯, 余 魏, 廖志谦, 闫飞昊, 王美姣. ω 相对 Ti10V2Fe3Al 合金性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(Special 1): 387-392.
LI Shi-kai, YU Wei, LIAO Zhi-qian, YAN Fei-hao, WANG Mei-jiao. Effect of ω phase on properties of Ti10V2Fe3Al alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(Special 1): 387-392.

(编辑 邓履翔)