

微量硼的添加对 Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金显微组织和力学性能的影响

郁 炎¹, 宋德军¹, 李士凯¹, 刘兴军²

(1. 中国船舶重工集团公司 第七二五研究所, 洛阳 471039;

2. 厦门大学 材料学院, 厦门 361005)

摘 要: 为掌握 B 元素的添加对 Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金显微组织和力学性能的影响规律, 采用电子探针微区分析仪 (EPMA)、光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、万能试验机 (UTM) 等设备, 详细研究 (Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo)_{1-x}B_x (x=0, 0.04, 0.08) 合金的成分、显微组织与力学性能等。研究结果表明: B 的添加可以明显细化 Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金的晶粒, 且 B 元素在合金中以 TiB 相的形式存在。随着 B 质量分数 (0, 0.04%, 0.08%) 的增加, TiB 相的质量分数亦逐渐增加, 轧制态和固溶态合金的强度亦逐渐增加, 时效态合金的强度先增加后减少。轧制态、固溶态以及时效态合金的塑性均先增加后减少。

关键词: Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金; B 元素; TiB 相; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG136.1

文献标志码: A

Effect of minor boron additions on microstructures and mechanical properties of Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo alloy

YU Yan¹, SONG De-jun¹, LI Shi-kai¹, LIU Xing-jun²

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China,

2. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to understand the effect of minor boron additions on microstructures and mechanical properties of Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo alloy, the chemical compositions, microstructures and mechanical properties of (Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo)_{1-x}B_x (x=0, 0.04, 0.08) alloys were systematically studied by electron probe micro-analyzer (EPMA), optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and universal testing machine (UTM). The obtained results are described as follows: B additions can obviously refine the crystal grains of Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo alloy, and exist in the form of TiB phases. With increasing B additions (0, 0.04%, 0.08%), the contents of TiB phase and the tensile strength of the rolled and solution-treated alloys increase, while the tensile strength of the aged alloys first increases and then decreases. The ductility of the rolled, solution-treated and aged alloys first increases and then decreases.

Key words: Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo alloy; boron; TiB phase; microstructure; mechanical property

钛及其合金被称为“太空金属”、“海洋金属”和“智慧金属”, 在航空、航天、船舶、海上石油开采、海水淡化、真空制盐、化工、电力、冶金、纺织、造纸、食品、医疗、体育休闲等领域具有广泛用途, 是重要的战略材料^[1-12]。

与 α 及 $\alpha+\beta$ 钛合金相比, β 钛合金具有更高的比强度、更优异的冷加工性能等优点, 因此, 在航空航天以及医疗等领域得到更为广泛的应用。近年来, 随着钛合金制备技术的发展, 国内外先后开发出几种高强 β 型钛合金, 亚稳 β 型 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (Ti-15-3)

是其中的代表之一^[13-19]。但是金属 V 价格昂贵,其质量分数过高会极大限制 Ti-15-3 合金的广泛应用。为在保持原有性能的前提下尽可能降低 V 的质量分数以实现 Ti-15-3 合金低成本化,本文作者在前期研究中基于 d -电子合金设计方法设计与 Ti-15-3 合金具有相近的 $\overline{B}_0$ 和 $\overline{M}_d$ 且综合性能相当的 Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金。

微合金化是改善钛合金组织和性能的常用方法之一。为进一步改善 Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金的综合性能,本文作者就 B 元素的添加对 Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金显微组织和力学性能的影响进行实验研究。

1 实验

采用真空非自耗炉熔炼(Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo)_{1-x}B_x ($x=0, 0.04, 0.08$)合金铸锭。然后对铸锭进行热处理,其中固溶处理制度是 900 ℃保温 45 min 后冰水淬火,时效处理制度是固溶处理后在 500 ℃保温 3 h 后空冷。

采用 JEOL JXA-8100 型电子探针微区分析仪(EPMA)对测定合金成分。金相组织观察在 Leica DMI5000M 型莱卡倒置金相显微镜(OM)上进行,采用的腐蚀剂为 92 mL H₂O+3 mL HF+5 mL HNO₃,也可加入少量的 H₂O₂,其中 HF 的质量分数为 40%,HNO₃ 的质量分数为 65%。在 Galdabini Sun 2500 实验机(UTM)上进行室温力学性能测试。采用 JSM-6360LV 型扫描电镜(SEM)观察微观组织和断口形貌,加速电压选为 20 kV。

2 结果与讨论

2.1 合金成分

通过 EPMA 测定的 (Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo)_{1-x}B_x ($x=0, 0.04, 0.08$)合金成分,如表 1 所列。从表 1 中可以看出,上述合金的实测成分与名义成分十分接近,表明在熔炼过程中各合金组元的损耗极小。

2.2 显微组织

图 1(a)~(c)所示分别是合金 1~3 铸态组织的背散射电子像。从图 1 中可见:当 B 元素的添加量达到 0.04%时,合金已经析出细小的黑色相(经 EPMA 成分分析确认为 TiB 相),且随着 B 元素质量分数增加至 0.08%,TiB 相的质量分数亦随之增加。

图 2(a)~(c)所示的分别是合金 1~3 的固溶态组织。

表 1 实验合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of test alloys (mass fraction, %)

No.	Ti	V	Al	Sn	Mo	B	Note
1	Bal.	9.00	3.00	4.00	5.00	0	Nominal
	Bal.	9.10	2.90	3.90	5.10	0	Actual
2	Bal.	8.964	2.988	3.984	4.98	0.04	Nominal
	Bal.	9.00	2.90	3.96	5.00	0.04	Actual
3	Bal.	8.28	2.76	3.68	4.60	0.08	Nominal
	Bal.	8.20	2.70	3.60	4.65	0.08	Actual

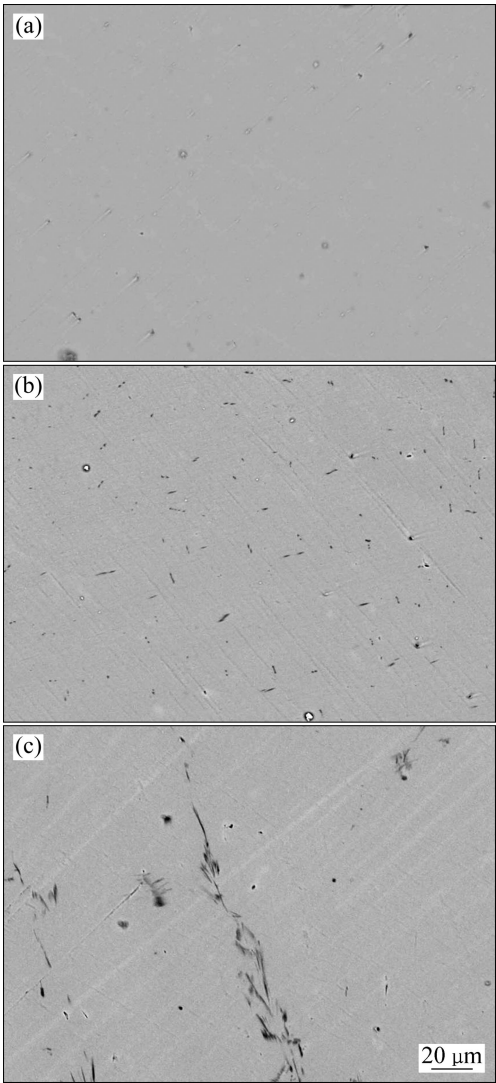


图 1 合金 1、2 以及 3 的铸态组织的背散射电子像

Fig. 1 Backscattered electron images of as-cast alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3

从图 2 中可见:所有固溶态组织都呈现单一的等轴 β 相组织。当合金没有添加 B 元素时,其固溶态组织的晶粒平均直径大概为 150 μm ,如图 2(a)所示;当 B 元素的添加量达到 0.04%时,固溶态组织的平均晶粒直

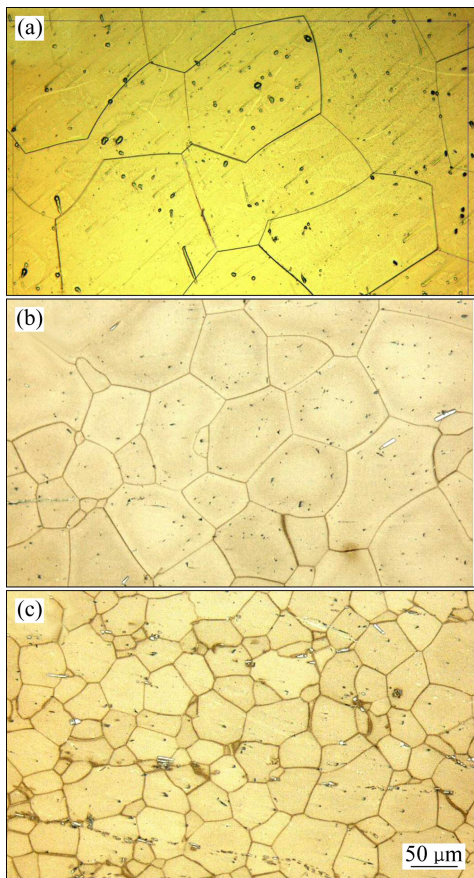


图 2 合金 1、2 以及 3 的固溶态组织

Fig. 2 Microstructures of solution-treated alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3

径显著减小, 约为 70 μm(如图 2(b)所示)。随着 B 质量分数的进一步增加至 0.08%, 固溶态组织的晶粒粒径仅约为 50 μm(如图 2(c)所示)。以上结果表明: 微量 B 元素的添加能够起到显著细化晶粒的作用。

2.3 力学性能

合金 1~3 在不同状态下的力学性能如表 2 所列。

从表 2 中可知, 合金强度在轧制态和固溶态时都是随着 B 质量分数的增加而逐渐增加, 且固溶态的强度要略低于轧制态的, 而合金经过时效后, 其强度要显著提高, 且随着 B 质量分数的增加而先增加后减少。这是因为, 当合金经过热轧制成片状材料时, 合金中存在少许的 TiB 相, 其含量随着 B 质量分数的增加而逐渐增加, 且主要分布在晶界上, 因此合金强度要比没有添加 B 时明显提高; 但是合金经过固溶处理后急速冷却时, TiB 相质量分数反而减少, 因此导致合金强度比轧制态略有降低。当这些合金经过时效处理后, TiB 相开始大量析出, 因此合金强度显著增加。

从表 2 中还可知, 合金在不同状态下的塑性随 B

质量分数的变化均呈现相同的变化规律: 即先增加, 到 B 质量分数为 0.04%时达到最大, 然后随着 B 质量分数的增加而减少。综合比较, 合金在固溶态时具有最好的塑性, 其次是轧制态, 最后是时效态。这是因为, 合金在固溶态时, TiB 相质量分数最少, 因此塑性最好, 轧制态合金中的 TiB 相质量分数要明显多于固溶态, 故其塑性较差, 而当合金经过时效处理后, TiB 相质量分数显著增加, 因此塑性最差。

表 2 实验合金在不同状态下的力学性能

Table 2 Mechanical properties of test alloys with different states

Alloy No.	State	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
1	Rolled	801	730	8.2
2		830	758	10.0
3		845	767	8.5
1	Solution-treated	790	719	20.7
2		826	750	21.2
3		840	762	18.7
1	Aged	1 121	1 046	4.1
2		1 329	1 258	5.3
3		1 304	1 237	5.1

2.4 拉伸断口形貌

图 3(a)~(c)所示的分别是固溶态合金 1~3 的拉伸断口形貌。从图 3 中可见: 上述合金的断口均呈现典型的韧性断裂特征, 由大量韧窝构成, 说明固溶状态下合金均具有较好的塑性。同时, 还可以发现, B 的添加量为 0.04%时, 合金拉伸断口组织中韧窝尺寸最大, 这和拉伸实验结果中其塑性最佳是一致的。

3 结论

- 1) 微量 B 元素的添加可以显著细化 Ti-9V-3Al-4Sn-5Mo 合金的晶粒, 且 B 元素在合金中以 TiB 相的形式存在。随着 B 质量分数的增加, TiB 相的质量分数亦随之增加。
- 2) 随着 B 质量分数(0, 0.04%, 0.08%)的增加, 轧制态和固溶态合金的强度亦逐渐增加, 时效态合金的强度先增加后减小。
- 3) 轧制态、固溶态以及时效态合金的塑性随 B 质量分数的变化均呈现相同的变化规律: 即先增加, 到 B 质量分数为 0.04%时达到最大, 然后随着 B 质量分数的增加而降低。

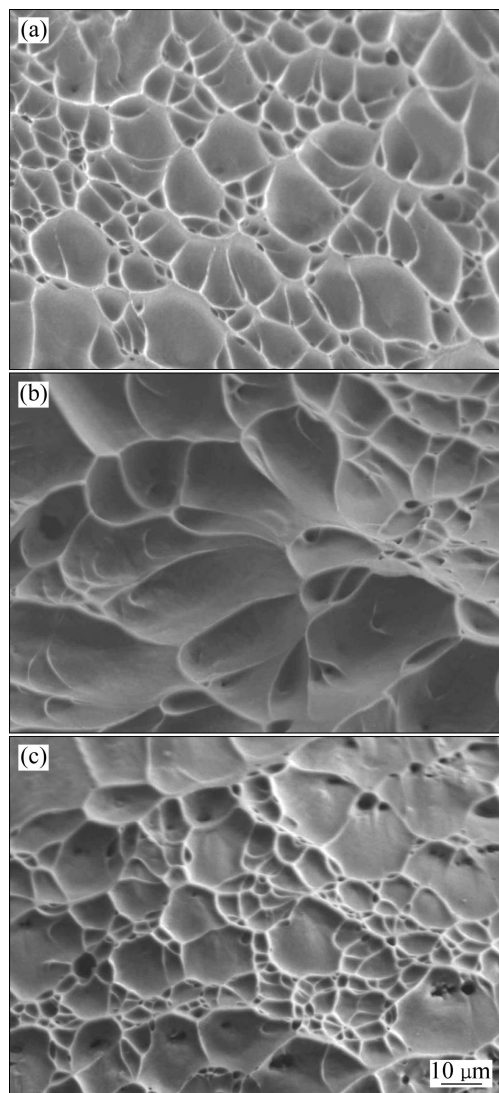


图3 固溶态合金 1、2 以及 3 的拉伸断口形貌

Fig. 3 Fracture morphologies of solution-treated alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3

REFERENCES

- [1] 邹武装, 郭晓光, 谢湘云, 王向东. 钛手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 1-30.
ZOU Wu-zhuang, GUO Xiao-guang, XIE Xiang-yun, WANG Xiang-dong. Titanium handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 1-30.
- [2] 莫畏. 钛[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 5-42.
MO Wei. Titanium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 5-42.
- [3] 王桂生. 钛的应用技术[M]. 湖南: 中南大学出版社, 2007: 20-55.
WANG Gui-sheng. Applied technologies of titanium[M]. Hunan: Central South University Press, 2007: 20-55.
- [4] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 12-35.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloys and applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 12-35.
- [5] LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys-fundamentals and applications[M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003: 8-22.
- [6] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1-8.
ZHAO Yong-qing. Current situation and development trend of titanium alloys[J]. Materials China, 2010, 29(5): 1-8.
- [7] 商国强, 朱知寿, 常辉, 王新南, 寇宏超, 李金山. 超高强度钛合金研究进展[J]. 稀有金属, 2011, 35(2): 286-291.
SHANG Guo-qiang, ZHU Zhi-shou, CHANG Hui, WANG Xin-nan, KOU Hong-chao, LI Jin-shan. Development of ultra-high strength titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(2): 286-291.
- [8] 朱知寿, 商国强, 王新南, 费跃, 李军. 低成本高性能钛合金研究进展[J]. 钛工业进展, 2012, 29(6): 1-5.
ZHU Zhi-shou, SHANG Guo-qiang, WANG Xin-nan, FEI Yue, LI Jun. Research and development of low cost and high performance titanium alloys[J]. Titanium, 2012, 29(6): 1-5.
- [9] 王鼎春. 高强钛合金的发展与应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s958-s963.
WANG Ding-chun. Development and application of high-strength titanium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s958-s963.
- [10] 杨英丽, 苏航标, 郭荻子, 赵彬, 吴金平, 赵恒章, 罗媛媛. 我国舰船钛合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s1002-s1007.
YANG Ying-li, SU Hang-biao, GUO Di-zi, ZHAO Bin, WU Jin-ping, ZHAO Heng-zhang, LUO Yuan-yuan. Research progress in titanium alloys for naval ships in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s1002-s1007.
- [11] 赵庆云, 徐峰. 航空紧固件用钛合金的研究进展[C]//中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s1021-s1023.
ZHAO Qing-yun, XU Feng. Research progress of titanium alloy for aerospace fasteners[C]//The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s1021-s1023.
- [12] 李中. 钛及钛合金在汽车上的应用[C]//中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s1035-s1038.
LI Zhong. Applications of titanium and titanium alloys in automotive field[C]//The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s1035-s1038.
- [13] 邵娟. 钛合金及其应用研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2007, 35(4): 61-65.
SHAO Juan. Application and development of titanium alloy[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2007, 35(4): 61-65.

- [14] 汶建宏, 杨冠军, 葛 鹏, 毛小南, 赵映辉. β 钛合金的研究进展[J]. 钛工业进展, 2008, 25(1): 33–39.
WEN Jian-hong, YANG Guan-jun, GE Peng, MAO Xiao-yu, ZHAO Ying-hui. The research progress of β titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2008, 25(1): 33–39.
- [15] BOYER R R. Aerospace applications of beta titanium alloys[J]. Journal of Metals, 1994, 46(7): 20–23.
- [16] 杨 健. 钛合金在飞机上的应用[J]. 航空制造技术, 2006, 11: 41–43.
YANG Jian. The airplane application of titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 11: 41–43.
- [17] 毛小南, 赵永庆, 杨冠军. 国外航空发动机用钛合金的发展现状[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(5): 1–5.
MAO Xiao-nan, ZHAO Yong-qing, YANG Guan-jun. Development situation of the overseas titanium alloys used for aircraft engine[J]. Rare Metals Letters, 2007, 26(5): 1–5.
- [18] 付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 米绪军. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850–856.
FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun. Research and application of typical aerospace titanium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 850–856.
- [19] 彭 昂, 毛振东. 钛合金的研究进展与应用现状[J]. 船电技术, 2012, 32 (10): 57–60.
PENG Ang, MAO Zhen-dong. Review on the research progress and application of titanium alloys[J]. Marine Electric and Electronic Technology, 2012, 32(10): 57–60.

(编辑 邓履翔)