

碳、硼对铸态 ZTC4 组织与性能的影响

戚运莲¹, 曾立英¹, 侯智敏¹, 洪权¹, 刘时兵², 赵军², 谢华生²

(1. 西北有色金属研究院, 西安 710016;

2. 沈阳铸造研究所, 沈阳 110022)

摘要: 采用熔铸工艺制备了含硼量为 0.2%~0.5%(质量分数)、含碳量为 0.5%~2.0%(质量分数)的 ZTC4/B/C 钛基复合材料, 分析并测试了合金的铸态组织和力学性能。研究表明: 钛硼相提高 TC4 合金铸棒的弹性模量, 硼元素添加量为 0.5%时, 合金弹性模量提高 30%, 同时具有较好的强塑性匹配。C 元素大大提高 ZTC4 合金铸棒的强度, 添加 0.5%C, 其抗拉强度达到 1 300 MPa, 提高了 25%。ZTC4 合金铸棒的显微组织由片层 α 或球状 α 、晶界 β 及短棒状第二相 TiB、球状颗粒且具有浮凸感的第二相 TiC 组成, B 元素具有细化晶粒的作用。

关键词: 铸造钛合金; 微量元素; 弹性模量; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标志码: A

Effects of C and B on microstructure and properties of as-cast ZTC4

QI Yun-lian¹, ZENG Li-ying¹, HOU Zhi-min¹, HONG Quan¹, LIU Shi-bing², ZHAO Jun², XIE Hua-sheng²

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;

2. Shenyang Research Institute of Foundry, Shenyang 110022, China)

Abstract: ZTC4/B/C titanium matrix composites containing B and C with B content ranging from 0.2% to 0.5% (mass fraction) and C content ranging from 0.5% to 2% (mass fraction) were fabricated using melting-casting process. The microstructure and mechanical properties of as-cast ZTC4/B/C titanium matrix composite were studied. The results indicate that elastic modulus of ZTC4/B is increased by 30% with 0.5%B. The ultimate tensile strength (UST) of ZTC4/B/C reaches 1 300 MPa with 0.5%B and 0.5%C, which is increased by 25%. The microstructures of as-cast ZTC4/B/C consist of lamellar α , grain boundaries β and the second phase TiB with bar-like shape and the second phase TiC with spherical-like shape. The microstructures of ZTC4/B/C can be refined with the increase of B content.

Key words: cast titanium alloy; trace element; elastic modulus; microstructure; mechanical properties

随着航空、航天和尖端武器的发展, 钛合金铸件得到越来越多的应用。尤其是近年来钛精密铸造技术的发展, 使得批量铸造生产一些结构复杂的装备零件成为可能。钛铸件不仅能用来制造结构复杂、近净形的铸件, 而且金属利用率高, 成本低, 生产周期短。另一方面, 各种技术的进步, 尤其是钛合金精铸技术的发展和进步以及热等静压技术(HIP)技术的出现, 大

大提高了钛铸件的质量, 推动了钛铸件在发动机和飞机上的应用^[1-4]。相对于细长和薄壁零件, 钛合金刚性差, 在使用过程中容易变形, 因此, 如何提高钛合金的综合性能是研究者一直关心的问题。人们发现向传统钛合金中加入少量的硼和碳, 其显微组织及相关性能都会产生重大变化, 将传统钛合金铸件晶粒尺寸细化一个数量级。晶粒得以细化, 强度和刚度都随着提

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613805, 2007CB613807)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 戚运莲, 教授级高级工程师, 硕士; 电话: 029-86231078; E-mail: qiyunlian@126.com

高,这就有可能研发出新型且经济适用的加工工艺,提升传统钛合金的性能。本文作者主要研究微量元素硼(B)、碳(C)对 Ti-6Al-4V 的铸造组织与性能影响,期望该材料能够获得较为广泛的应用^[5-8]。

1 实验

实验所用原材料为海绵钛、铝豆、纯钒、纯硼粉、纯碳粉、钛箔,将其按一定比例混合压制电极块,配制出含硼为 0.2%~0.5%,碳为 0.5%~2.0%的钛基复合材料。设计 4 种成分 ZTC4/B、ZTC4/B/C 钛基复合材料。为保证材料成分均匀,在感应熔炼炉中熔炼 2 次,在非自耗真空电弧熔炼炉中,采用电磁搅拌熔炼,冷却后翻转合金铸锭,重熔,反复熔炼 4 次。之后采用紫铜模具进行铸棒浇铸。从铸棒上线切割 $d 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 试样,用于相组成和显微组织分析,线切割 $d 8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 试样,用于力学性能测试。热等静压处理制度为:加热温度 $920 \text{ }^\circ\text{C}$,氩气压力 110 MPa ,氩气纯度为 99.995%,保温时间 2 h。

2 结果与讨论

2.1 碳、硼元素对 ZTC4 合金弹性模量的影响

表 1 列出了添加不同微量元素 B、C 对 TC4 合金铸棒弹性模量的影响。由表 1 可以看出,添加 0.2%硼元素,铸态 TC4 合金的弹性模量增大(未添加微量元素铸态 TC4 合金的弹性模量为 $95\sim 105 \text{ GPa}$),提高了 $20\sim 30 \text{ GPa}$;硼元素为 0.5%时,铸态 ZTC4 合金的弹性模量达到 $125\sim 145 \text{ GPa}$,这是由于生成了 TiB 增强相,提高弹性模量。在 ZTC4/0.5%B 基础上,添加了 0.5%~2%C 元素,ZTC4 合金铸棒的弹性模量为 $123\sim$

表 1 ZTC4/B/C 钛基复合材料弹性模量

Table 1 Elastic modulus of ZTC4/B/C titanium matrix composite

Nominal composition	Elastic modulus/GPa
ZTC4/0.2B	125-130
ZTC4/0.5B	125-145
ZTC/0.5B/0.5C	123-127
ZTC4/0.5B/2C	125-130

130 GPa ,弹性模量稍有降低。B 元素对弹性模量的提高有较大贡献,C 元素对 ZTC4 合金铸棒弹性模量的作用不明显^[9]。

2.2 碳、硼元素对 ZTC4 合金室温拉伸性能的影响

铸棒经热等静压处理后的室温力学性能如表 2 所示。由表 2 可以看出,硼元素的添加明显提高强度和塑性,TC4 铸棒的抗拉强度提高 $20\%\sim 30\%$,伸长率提高 $25\%\sim 30\%$ 。在 ZTC4/0.5%B 基础上添加 0.5%C,ZTC4 铸棒的抗拉强度大幅度提高,达到 $1 300 \text{ MPa}$,提高了 59%,塑性降低 50%,C 含量增加到 2%时,ZTC4 铸棒的室温力学性能较差,呈脆性断裂。原因是 C 含量较高,TiC 相颗粒的体积分数增大,脆硬的 TiB 相聚集在晶界处,抵消了晶粒细化的效果,限制合金的塑性^[6]。综上所述,B 元素对 ZTC4 合金铸棒的强度和塑性均有明显提高;微量 C 元素(小于 0.5%)可以提高 ZTC4 合金铸棒的强度,但同时塑性会降低。

表 2 ZTC4/B/C 钛基复合材料的室温力学性能

Table 2 Room temperature tensile properties of TC4/B/C titanium matrix composite

Nominal composition	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
ZTC4	815	780	7.5	13
	825	770	8.5	15
ZTC4/0.2B	995	905	10.0	27.0
	995	900	11.5	27.0
ZTC4/0.5B	1 040	940	10.0	22.5
	1 050	945	9.5	21.0
ZTC/0.5B/0.5C	1 307	1 198	3.5	9.0
	1 301	1 197	4.5	8.5
ZTC4/0.5B/2C	954	—	3.5	5.5
	975	—	3.0	6.5

2.3 碳、硼元素对 ZTC4 合金显微组织的影响

添加不同微量元素 B、C 对 ZTC4 钛合金铸棒显微组织的影响如图 1 所示。由图 1(a)和(b)可以看出,添加 0.2%~0.5%B,ZTC4 铸棒的显微组织由片层 α 、晶界 β 以及第二相(TiB)组成,随 B 含量增加,第二相的体积分数明显增加,显微组织细化效果明显,当 B 含量为 0.2%时(图 1(a)),晶粒内部 α 形态为长而粗大的板条状,当 B 含量为 0.5%时(图 1(b)),晶粒内部 α 形态细化为短粗板条。在 ZTC4/0.5%B 基础上添加

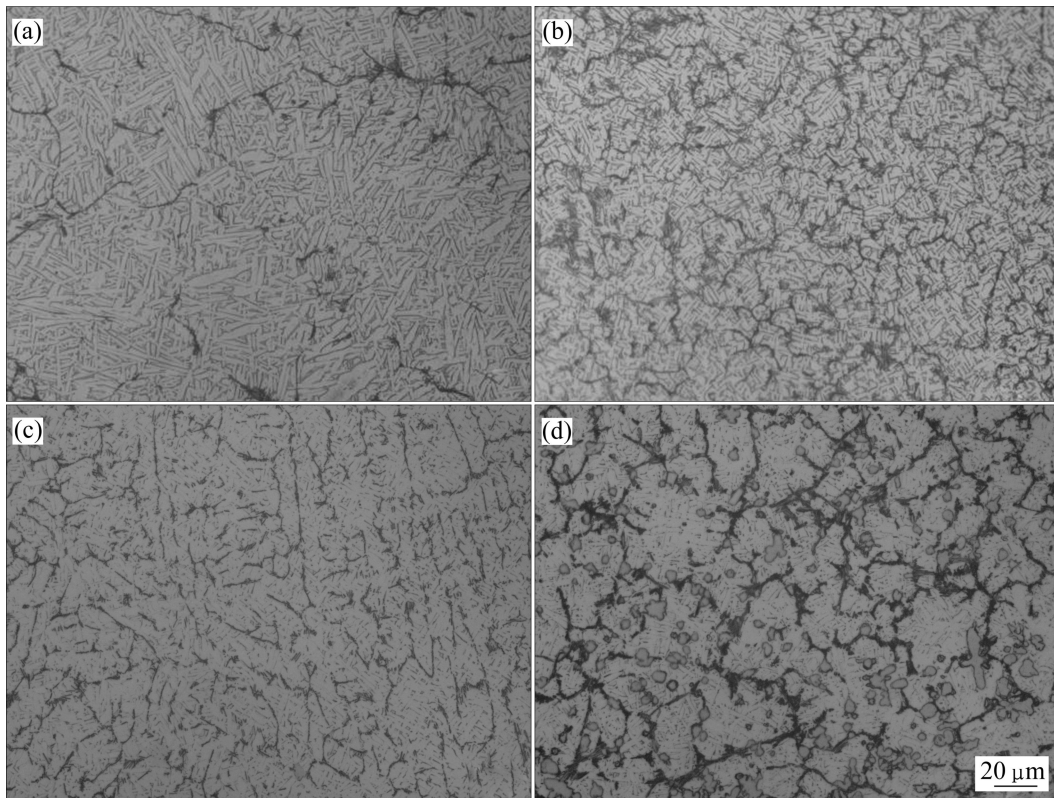


图 1 ZTC4/B/C 钛基复合材料的显微组织

Fig. 1 Microstructures of ZTC4/B/C titanium matrix composite: (a) 0.2%B; (b) 0.5%B; (c) 0.5%B+0.5%C; (d) 0.5%B+2%C

0.5%~2%C 的显微组织如图 1(c)和(d)所示, C 含量为 0.5%时(图 1(c)), 晶粒内部 α 呈细针状, 与其强度提高、塑性降低相对应。C 含量为 2%时(图 1(d)), 第二相(TiC)颗粒呈球状, 均匀分布在晶粒内, TiC 颗粒使其塑性较差。

添加不同微量元素 B、C 的 ZTC4 钛合金铸棒的 SEM 照片如图 2 所示。由图 2(a)可以看出, 添加 0.5%B 和 0.5%C, 第二相 TiB 以短棒状析出, 第二相 TiC 呈球状颗粒, C 含量添加增大到 2%时(图 2(b)), TiC 颗粒球化更明显, 且浮在基体上, 具有较强的浮凸感^[10]。

2.4 ZTC4 合金室温拉伸断口特征

B/C 钛基复合材料铸棒室温拉伸断口形貌如图 3 所示。可以看出, 图 3(a)和 3(b)断口具有较深、较大的韧窝, 这些较深、较大的韧窝与铸棒具有较好的塑性相对应; 图 3(c)和 3(d)的断面相对要平坦一些, 有大小不等的韧窝, 但韧窝较浅, 致使铸棒塑性较低。所有断口上有明显的撕裂棱, 断面上呈沿晶断裂, 并伴有沿晶二次裂纹, 断裂起源位置不明显^[11]。

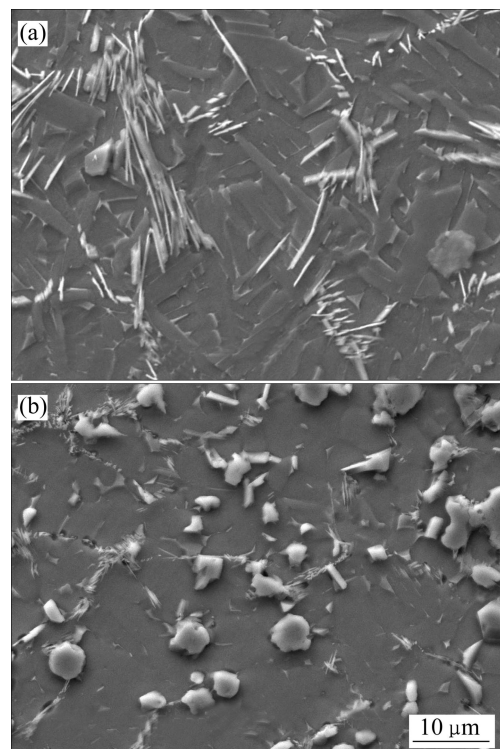


图 2 ZTC4/B/C 钛基复合材料的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of ZTC4/B/C titanium matrix composite: (a) 0.5%B+0.5%C; (b) 0.5%B+2%C

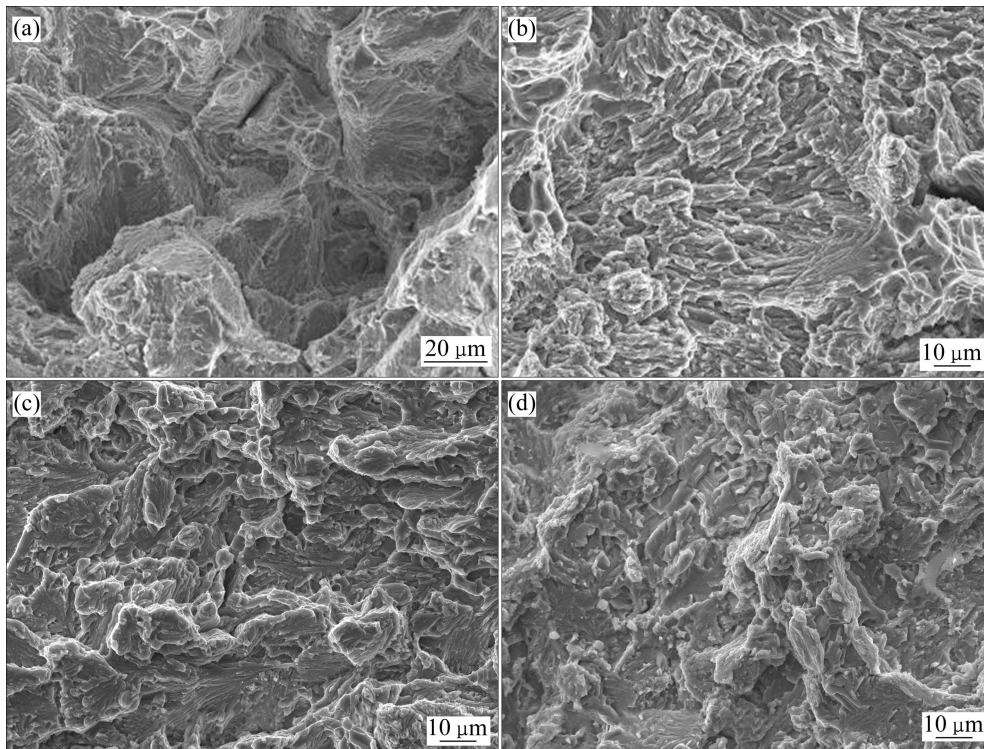


图3 ZTC4/B/C 钛基复合材料的室温拉伸断口形貌

Fig. 3 SEM images of fracture surface of ZTC4/B/C titanium matrix composite: (a) 0.2%B; (b) 0.5%B; (c) 0.5%B+0.5%C; (d) 0.5%B+2%C

3 结论

1) B 元素可以大大提高 ZTC4 铸棒的弹性模量, C 元素对提高 ZTC4 合金铸棒的弹性模量作用不明显。B 含量为 0.5% 时, TC4 弹性模量达到 145 GPa。

2) B 元素对 ZTC4 合金铸棒的强度和塑性均有明显提高, 具有较好的强塑性匹配; C 元素可以提高 ZTC4 合金铸棒的强度, C 元素含量达到 2% 时, 塑性低于 5%, 或呈脆性断裂。

3) ZTC4 合金铸棒的显微组织由片层 α 或球状 α 、晶界 β 及短棒状第二相 TiB、球状颗粒且具有浮凸感的第二相 TiC 组成, B 元素具有细化晶粒的作用。

REFERENCES

- [1] 张 满, 南 海, 黄 东, 曹国平. 钛合金铸件的热等静压和氢处理工艺研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2002(5): 1-3.
ZHANG Man, NAN Hai, HUANG Dong, CAO Guo-ping. Study of heat isostatic pressing and thermohydrogen treatment of titanium alloy castings[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2002(5): 1-3.
- [2] 闫 平, 王 利, 赵 军, 汪志华, 张春辉, 游 涛. 高强度铸造钛合金的应用及发展[J]. 铸造, 2007, 56(5): 451-454.
YAN Ping, WANG Li, ZHAO Jun, WANG Zhi-hua, ZHANG Chun-hui, YOU Tao. Development and applications of the high-strength cast titanium alloy[J]. Foundry, 2007, 56(5): 451-454.
- [3] 南 海, 谢成木. 国外铸造钛合金及其铸件的应用与发展[J]. 中国铸造装备与技术, 2006(3): 1-3.
NAN Hai, XIE Cheng-mu. The application and development of cast titanium alloys and their castings abroad[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2006(3): 1-3.
- [4] 苏贵桥, 谢华生, 张春辉, 赵 军, 王 利, 于志强, 刘宏宇. ZTi-3B 铸造钛合金材料的组织和性能[J]. 钛工业进展, 2005, 22(2): 26.
SU Gui-qiao, XIE Hua-sheng, ZHANG Chun-hui, ZHAO Jun, WANG Li, YU Zhi-qiang, LIU Hong-yu. Microstructures and mechanical properties of ZTi-3B cast titanium alloy material[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(2): 26.
- [5] 谢华生, 刘时兵, 苏贵桥, 汪志华, 赵 军. 我国钛合金精铸件铸造技术的发展及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2008: 462-464.
XIE Hua-sheng, LIU Shi-bing, SU Gui-qiao, WANG Zhi-hua, ZHAO Jun. Development and application of investment casting

- technology for titanium alloys castings of China[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2008: 462-464.
- [6] 张志辉, 王希哲, 商顺利, 白克武, 沈剑韵. 加工工艺对高弹高强钛合金弹性模量的影响[J]. *稀有金属*, 2001, 25(1): 19-21. ZHANG Zhi-hui, WANG Xi-zhe, SHANG Shun-li, BAI Ke-wu, SHEN Jian-yun. Influence of processing on elastic modulus for a titanium alloy with high strength and high elastic modulus[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2001, 25(1): 19-21.
- [7] 张尚洲, 雷家峰, 关少轩, 刘羽寅, 李东. 热处理对高弹高强高韧钛合金性能的影响[J]. *金属学报*, 2002, 38: 74-77. ZHANG Shang-zhou, LEI Jia-feng, GUAN Shao-xuan, LIU Yu-yin, LI Dong. Influence of heat treatment on mechanical properties of high elastic modulus, high strength, high toughness and weldable titanium alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38: 74-77.
- [8] 罗皓, 陈志强. 硼改性钛合金研究进展[J]. *材料开发与应用*, 2010, 25(4): 77-80. LUO Hao, CHEN Zhi-qiang. Progress in boron-modified titanium alloys[J]. *Development and Application of Materials*, 2010, 25(4): 77-80.
- [9] SEN I, RAMAMURTY U. Elastic modulus of Ti-6Al-4V-xB alloys with B up to 0.55wt. %[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62: 37-40.
- [10] GIANNOPOULOS G I, KARAGIANNIS D, ANIFANTIS N K. Micromechanical modeling of mechanical behavior of Ti-6Al-4V/TiB composites using FEM analysis[J]. *Computational Materials Science*, 2007, 39: 437-445.
- [11] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 34-216. CUI Yue-xian, WANG Chang-li. Analysis of metal fracture surface[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998: 34-216.

(编辑 杨兵)