

特约专栏

Mo、V、Cr 对钛合金 β 相的合金化效应

葛鹏, 吴欢, 赵永庆

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 为了研究钛合金中常用 β 合金元素 Mo、V、Cr 等对 β 相合金化的影响, 通过设计制备一系列不同元素含量的 Ti-Mo、Ti-V、Ti-Cr 二元 β 型钛合金, 分析了含单一合金化元素的 β 型钛合金的显微组织、硬度及室温拉伸性能。结果发现: 随着合金中 β 稳定元素含量的增加, 所有二元合金的晶格常数及晶粒尺寸都呈减小的趋势, 其中元素 Cr 具有最强烈的减小晶格常数效应, 而元素 Mo 对晶粒细化的效果最显著。成分为 Ti-xV、Ti-xCr 的 β 相的拉伸强度随元素含量增加的变化规律与硬度变化相似, 先减小后增加。Ti-xMo 拉伸强度则随元素含量的增加强度升高。元素 Cr 对 β 相的强化效果高于 Mo 和 V。

关键词: 钛合金; 合金元素; β 相; 强化

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)10-0795-04

Alloying Effect of Mo, V and Cr on Titanium Alloy Beta Phase

GE Peng, WU Huan, ZHAO Yongqing

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: In order to study the influence of usual beta elements Mo, V, Cr in titanium alloy on alloying effect of beta phase, a series of binary beta titanium alloys such as Ti-Mo, Ti-V and Ti-Cr were designed and prepared. The microstructure, hardness and room temperature tensile property of beta titanium alloys containing single beta element were tested. Results showed that: With the increase of the content of beta alloying elements, the lattice constant and grain size of all binary alloys decrease; the element Cr has the most strongly reduced lattice constant effect, while the effect of element Mo on grain refinement is most notable; The tensile strength and hardness of β phase of Ti-xV and Ti-xCr alloys firstly decrease, then increase with the content of beta elements increasing, and the tensile strength of β phase of Ti-xMo alloy increases linearly; The strengthening effect of element Cr for beta phase is higher than that of Mo and V.

Key words: titanium alloy; alloying elements; β phase; strengthening effect

1 前言

钛合金由于具有比强度高、耐蚀、抗疲劳等优良的综合性能, 成为航空、航天等高新技术领域的关键材料。目前已经有十几种牌号的钛合金在飞行器关键部件的制造中获得应用, 典型合金如用量最大的 Ti-6Al-4V 及高强结构钛合金 Ti-10V-2Fe-3Al、Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe 及近几年才获得应用的 Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.5Fe 等^[1-5]。航空飞行器的发展对高强结构钛合金的韧

性、疲劳性能及淬透性提出了越来越高的要求, 对于现有钛合金组织与性能关系及通过控制组织提高合金性能已经有大量的研究^[6-20], 仍然需要继续开发具有更高性能的新型高强韧结构钛合金。由于 α 和 β 相是高强钛合金中的两个基本相, 因此非常有必要掌握常用合金元素对两种不同结构相的强化效果, 从而得出合金元素对钛合金整体强度和韧性性能影响规律。Mo、V、Cr 是高强结构钛合金最常用的合金化元素, 已有研究人员进行了这些元素对钛合金中 α 相或整体强化的研究, 并获得了有意义的结果^[21-24]。但对于单一 β 相强化的研究较少。为了保证合金的淬透性及强度效果, 新型的高强结构钛合金中 β 稳定元素的含量一般较高, 强化处理后仍然保留较多的 β 相, 因此非常有必要进行关于合金化元素对钛合金 β 相强化效果的研究。

收稿日期: 2015-04-28

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划(钛合金研发创新团队)(2012KCT-23); 科技部“973”项目(2007CB613805)

第一作者: 葛鹏, 男, 1976年生, 博士,

Email: gepeng-1@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.10.06

2 实验材料及方法

根据常规钛合金 β 相中 V、Mo、Cr 合金元素可能存在的含量, 选取了 Ti18V、Ti25V、Ti35V、Ti15Mo、Ti20Mo、Ti30Mo、Ti10Cr、Ti15Cr、Ti20Cr 合金作为二元 β 合金的研究对象。试验用材料为根据设计成分制备的铸锭经锻造后得到的锻坯。原材料选用零级海绵钛, Mo、V、Cr 分别以纯钼粉、电解钒、电解铬的形式加入。在真空自耗电弧炉中经三次熔炼得到成品铸锭。针对不同的合金, 经过三个火次的热变形锻成 $70\times30\times L$ mm 的扁方坯, 以保证锻后显微组织整体均匀。将依照合金的相变点选取相变点以上退火 1 h 后水淬的方式获得所需的 β 相。金相试样腐蚀剂为 10% 氢氟酸: 30% 硝酸: 60% 水。

选用维氏硬度仪对不同合金的硬度进行测试, 压头压力为 10 kg。研究过程中选用的测试手段如表 1 所示。

表 1 测试用仪器

Table 1 Experimental instruments

Experimental project	Instrument
Metallographic examination	OLYMPUS PMG3
XRD	PWI700 XRD
Vickers Microhardness	MVS-1000JMT2
Tensile test	INSTRON1185 universal tensile testing machine

3 结果与讨论

图 1 为各成分的 β 钛合金经相变点以上保温、水淬后的金相组织。从图 1 看到, 成分为 Ti- x V、Ti- x Mo、Ti- x Cr 的合金的晶粒尺寸随着 V、Mo 和 Cr 的增加而减小。添加 Mo 元素则能够显著减小合金的晶粒尺寸, 而添加 V 或 Cr 元素作用则不明显。成分为 Ti- x Cr 的合金尺寸仅略大于 Ti- x V。

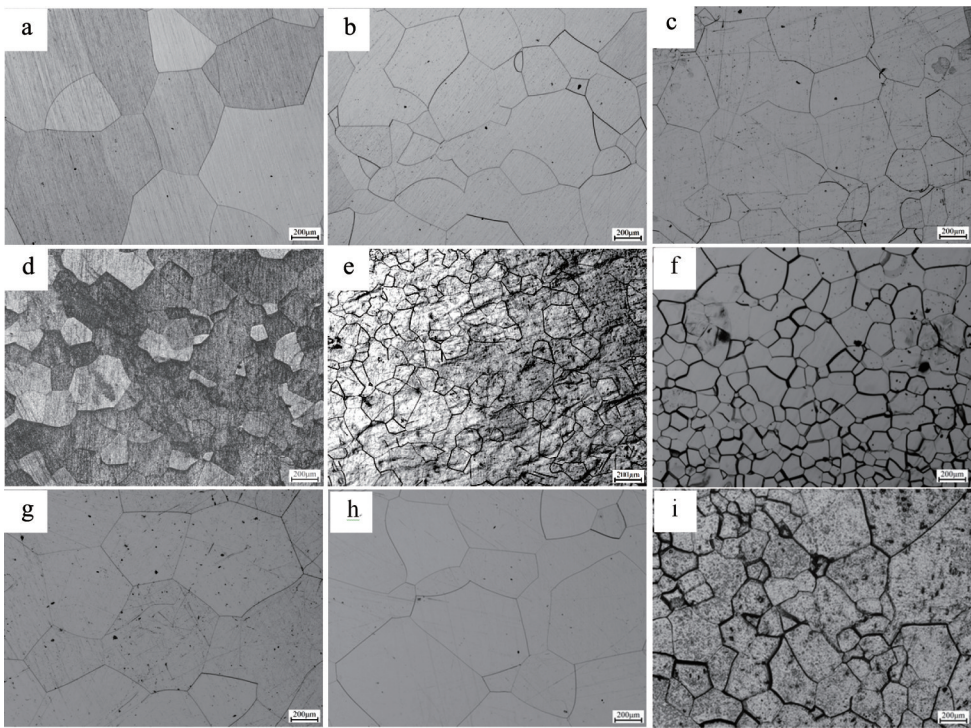
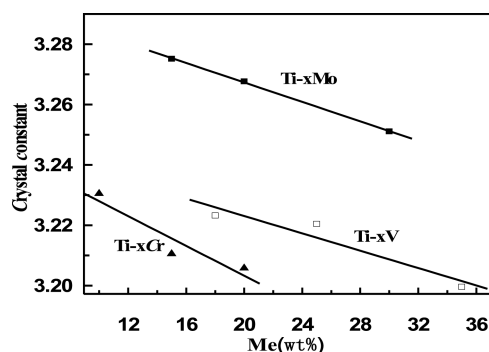


图 1 不同成分 β 钛合金的金相照片: (a) Ti-18V, (b) Ti-25V, (c) Ti-35V, (d) Ti-15Mo, (e) Ti-20Mo, (f) Ti-30Mo, (g) Ti-10Cr, (h) Ti-15Cr, (i) Ti-20Cr

Fig. 1 Metallographs of different beta titanium alloys: (a) Ti-18V, (b) Ti-25V, (c) Ti-35V, (d) Ti-15Mo, (e) Ti-20Mo, (f) Ti-30Mo, (g) Ti-10Cr, (h) Ti-15Cr, (i) Ti-20Cr

从图 2 看到, 随着 V、Mo、Cr 含量的增加, 晶格常数 c 单调降低。Ti- x Cr 的晶格常数 c 最小, Ti- x V 的晶格常数 c 其次, Ti- x Mo 的晶格常数 c 最大。Ti- x Cr 和 Ti- x V 的 c 值相差较少, 而 Ti- x Mo 与 Ti- x Cr 和 Ti- x V 的 c 值差别较大。

同样由于硬度和强度有一定的对应关系, 且硬度测试排除了晶粒尺寸对性能的影响, 更能够真实地反映合金元素对 β 相的作用, 对上述成分的 β 相进行了硬度测试。图 3 展示的是 Mo、V、Cr 元素含量变化对 β 相硬度的影响。可以看出, 随着合金元素 Cr、V 的增加, 相的

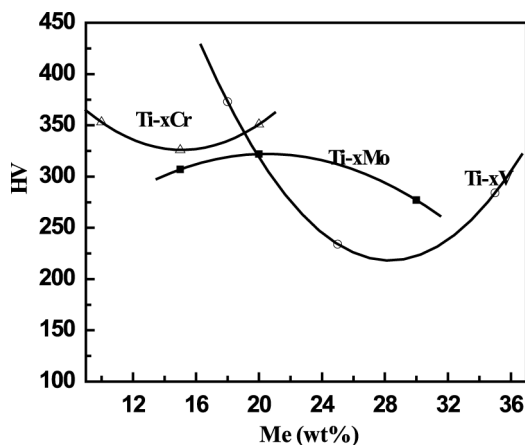
图 2 V、Mo、Cr 含量对 β 相晶格常数 c 的影响Fig. 2 Effect of Mo, V, and Cr content on the lattice constant c of β phase

硬度先降低后升高; 随着合金元素 Mo 的增加, 相的硬度先升高后降低。成分为 Ti-xCr 的 β 相硬度高于成分为 Ti-xMo 的 β 相硬度。对图 3 中数据拟合后得到合金含量 Me 与硬度值 HV 的定量关系如式 (1)~(3) 所示。

$$\text{HV}-\text{Cr} = 563 - 31.4 \text{ Cr} + 1.04 \text{ Cr}^2 \quad (1)$$

$$\text{HV}-\text{Mo} = 112 + 20.5 \text{ Mo} - 0.5 \text{ Mo}^2 \quad (2)$$

$$\text{HV}-\text{V} = 1388 - 82.7 \text{ V} + 1.46 \text{ V}^2 \quad (3)$$

图 3 Mo、V、Cr 元素含量对 β 相硬度的影响Fig. 3 Effect of Mo, V and Cr content on the hardness of β phase

对上述具有全 β 相结构的 β 合金进行了拉伸性能测试, 如图 4 所示。

对于采用零级海绵钛熔炼加工后生产出的工业纯钛, 其退火后的抗拉强度只有 300 MPa 左右。从图 4 看到, 相比纯钛, 钛中大量 β 稳定元素的加入在获得 β 相结构的同时, 强度也显著增加。随 β 稳定元素加入的不同, 合金强度能够提高 270 ~ 700 MPa, 同时还拥有较优的拉伸塑性和断面收缩率。

图 4 的结果表明, Ti-xCr、Ti-xV、Ti-xMo 的拉伸强度曲线的相对位置与硬度测试的结果 (图 3) 是相似的。其中, Ti-xCr、Ti-xV 随合金元素 Cr、V 的增加其拉伸强度的变化趋势与硬度的测试结果也是相似的。Ti-xMo

随合金元素的增加拉伸强度单调上升, 与硬度测试中 Ti-30Mo 的硬度迅速下降有所差别。各成分 β 相的拉伸塑性无一例外地随 β 稳定元素的增加单调下降。将图 4 中的数据拟合后, 得到元素含量和力学性能的定量关系, 如式 (4) ~ (9)。

$$R_m = 1241 - 42.5 \text{ Cr} + 1.34 \text{ Cr}^2 \quad (4)$$

$$R_m = 543 + 10.6 \text{ Mo} \quad (5)$$

$$R_m = 1923 - 94.96 \text{ V} + 1.662 \text{ V}^2 \quad (6)$$

$$A = 34.8 - 0.288 \text{ V} \quad (7)$$

$$A = 55 - 6.7 \text{ Cr} + 0.26 \text{ Cr}^2 \quad (8)$$

$$A = 168 - 11.6 \text{ Mo} + 0.22 \text{ Mo}^2 \quad (9)$$

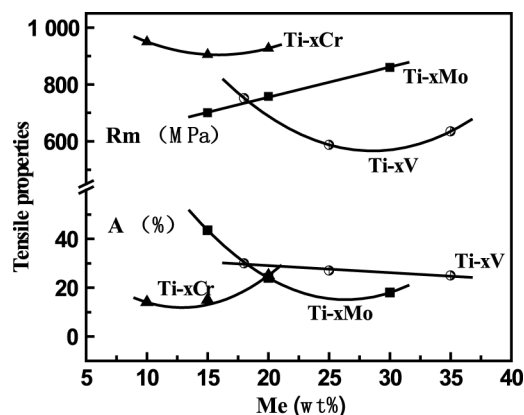
图 4 β 稳定元素含量对成分为 Ti-xMe 的 β 相力学性能的影响

Fig. 4 Effect of beta element content on tensile properties of Ti-xMe alloy with single beta phase

在硬度测试排除了相的晶粒尺寸对性能的影响的情况下, Ti-xMo 对相的强化作用和 Ti-xCr、Ti-xV 强化作用的相关性与拉伸测试中表现出的非常相似。但图 4 中与 Ti-xMo 有关的拉伸强度的变化是随着 Mo 含量的增加线性增加的。对于 β 相而言, 这可能与相的结构有更密切的关系。从图 1 看到, Ti-xMo 的晶粒尺寸远小于其他成份的 β 相, 且随着 Mo 含量的增多, 晶粒尺寸不断减小。和其他成份的 β 相组织相比, 明显小的晶粒尺寸将对拉伸强度有重要的影响。因此, 对于 Ti-xMo 而言, 其拉伸强度变化曲线形状和排除组织尺寸干扰的硬度变化曲线形状有所不同。

将成分为 Ti-xMe 的拉伸强度和硬度的相关性绘入图 5, 同时将相关数据进行拟合, 获得 β 相拉伸强度和硬度的定量关系如式 (10) ~ (12)。从图 5 看到, 硬度和强度关系线性最好的是 Ti-xV 和 Ti-xCr, 偏差较大的是 Ti-xMo。

$$R_m - \text{HV} = 302 + 1.2 \text{ V} \quad (10)$$

$$R_m - \text{HV} = 1590 - 2.7 \text{ Mo} \quad (11)$$

$$R_m - \text{HV} = 469 + 1.33 \text{ Cr} \quad (12)$$

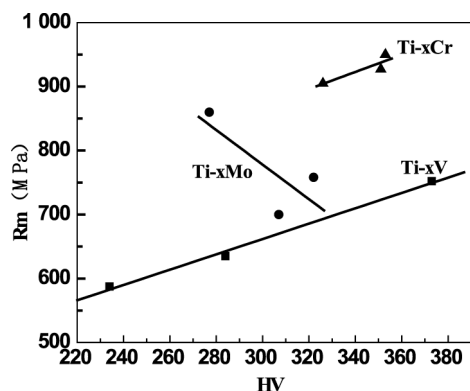


图 5 具有单一 β 相的 Ti-xMe 合金的 HV 与 R_m 的关系

Fig. 5 Relationship of HV and R_m for Ti-xMe alloys with single beta phase

4 结 论

钛合金中合金化元素对 β 相的强化效应是钛合金强韧化设计及制备的关键基础。本文通过设计合金化元素含量不同的简单二元系 β 钛合金, 分析了 Mo、V、Cr 对钛合金 β 相合金化的基本影响规律, 获得如下结论:

(1) 对于成分为 Ti-xMe (Me: Mo、V、Cr) 的 β 钛合金, Ti-xCr 二元合金具有相对较高的硬度, 表现出高的强化效果;

(2) 成分为 Ti-xV、Ti-xMo、Ti-xCr 的 β 钛合金的晶粒尺寸随着 V、Mo 和 Cr 的增加而减小。添加 Mo 元素则能够显著减小晶粒尺寸。而添加 V 或 Cr 元素作用则不明显。成分为 Ti-xCr 的 β 晶粒的尺寸仅略大于 Ti-xV;

(3) 成分为 Ti-xV、Ti-xCr 的 β 相的拉伸强度随元素含量增加的变化规律与硬度变化相似, 都有一个最低点。Ti-xMo 则表现为随元素含量的增加强度升高。

参考文献 References

- [1] Brewer W D, Bird R K, Wallace T A. *Materials Science and Engineering A* [J], 1998, 243: 299-304.
- [2] Boyer R R. *Journal of Metals* [J], 1992, 44 (5): 23-25.
- [3] Williams J C, Starke E A. *Acta Materialia* [J], 2003, 51: 5775-5799.
- [4] Boyer R R, Cotton J D, Chellmman D J. Titanium for Airframe Applications: Present Status and Future Trends [C] // Lütjering G, Albrecht J. *Ti-2003 Science and Technology*. Germany: DGM, 2004. 2615-2626.
- [5] Fanning J C, Boyer R R. Properties of TIMETAL 555-A New Near-Beta Titanium Alloy for Airframes Components [C] // Lütjering G,

- Albrecht J. *Ti-2003 Science and Technology*. Germany: DGM, 2004: 2643-2650.
- [6] Jones N G, Dashwood R J, Dye D, et al. *Materials Science and Engineering A* [J], 2008, 490: 369-377.
- [7] Jones N G, Dashwood R J, Jackson M, et al. *Acta Materialia* [J], 2009, 57: 3830-3839.
- [8] Jones N G, Dashwood R J, Jackson M, et al. *Scripta Materialia* [J], 2009, 60: 571-573.
- [9] Hall J A, Pierce C M, Ruckel D L. *Materials Science and Engineering A* [J], 1972, 9: 197-210.
- [10] Raghunathan S L, Dashwood R J, Jackson M. *Materials Science and Engineering A* [J], 2008, 488: 8-15.
- [11] Zhang Z G, Wu G Q, Song H. *Materials Science and Engineering A* [J], 2008, 487: 488-494.
- [12] Britton T B, Wilkinson A J. *Acta Materialia* [J], 2012, 60: 5773-5782.
- [13] Han Yuanfei, Zeng Weidong, Sun Yu, et al. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* [J], 2011, 18 (4): 444-449.
- [14] Zhang S Z, Liu Z Q, Wang G D, et al. *J Cent South Univ Technol* [J], 2009, 16: 0354-0359.
- [15] Min X H, Emura S, Nishimura T, et al. *Materials Science and Engineering A* [J], 2010, 527: 1480-1488.
- [16] Shimizu I, Takemoto Y. The Effect of Deformation Mechanism on Plastic Behavior of Beta-Type Ti-Mo Alloys [C] // *Ti-2007 Science and Technology*. The Japan Institute of Metals, 2008: 785-790.
- [17] Song Z Y, Sun Q Y, Xiao L, et al. *Materials Science and Engineering A* [J], 2011, 528: 4111-4114.
- [18] Paladugu M, Kent D, Wang G, et al. *Materials Science and Engineering A* [J], 2010, 527: 6601-6606.
- [19] Wang Kaixuan (王凯旋), Zeng Weidong (曾卫东), Zhao Yongqing (赵永庆), et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2011, 40 (5): 784-787.
- [20] Zhou Y L, Luo D M. *Materials Characterization* [J], 2011, 62 (10): 931-937.
- [21] Wu Huan (吴欢), Zhao Yongqing (赵永庆). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2012, 41 (5): 805-810.
- [22] Wu Huan (吴欢), Ge Peng (葛鹏), Zhao Yongqing (赵永庆), et al. *Heat Treatment of Metals* (金属热处理) [J], 2011, 36 (5): 24-29.
- [23] Khorev I. Complex Alloying of Titanium Alloys. Translated from *Metallodesenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 1975, (8): 55-63.
- [24] Seishi Ishiyama, Shuji Hanada. *The Sumitomo Search* [J], 1993 (54): 41-47.

(编辑 惠琼)