

热处理对钛合金 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 组织和性能的影响

张雪峰^{1,2}, 陈敏¹, 刘许昉^{2,3*}, 高友智³, 韦良晓³, 蔡俊豪³, 倪梓洁³, 陈新才³

(1. 攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 四川钒钛产业技术研究院, 四川 攀枝花 617000; 3. 重庆大学航空航天学院, 重庆 400044)

摘要:通过 d 电子理论设计出新型两相钛合金 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$, 分析了物相组成随温度的变化关系。结合热力学计算结果, 分别研究了 700、770 °C 以及 850 °C 不同时效温度下钛合金的微观组织与力学性能的演化关系。结果表明, 随着时效处理温度的提高, $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 钛合金微观组织中 β 相的含量逐渐增多。当时效温度增加到 850 °C 时, β 析出相的含量最多, 且在粗 β 相间分布着大量细小尺寸的 β 相。 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 钛合金经不同时效温度处理后表现出不同的力学性能, 在 700 °C 和 770 °C 下时效处理后可显著提高钛合金的压缩强度, 而在 850 °C 下时效后可以实现钛合金的强度和塑性的同步提升。

关键词:钛合金; $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$; 热处理; 强度; 塑性

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)06-0066-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of heat treatment on microstructure and properties of $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ titanium alloy

Zhang Xuefeng^{1,2}, Chen Min¹, Liu Xuyang^{2,3*}, Gao Youzhi³, Wei Liangxiao³,
Cai Junhao³, Ni Zijie³, Chen Xincai³

(1. Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Sichuan Vanadium & Titanium Industrial Technology Institute, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel two-phase titanium alloy of $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ was designed based on d-electron theory and the phase composition as a function of temperature was analyzed. Combined with the thermodynamic calculation results, the evolution relationship between the microstructure and mechanical properties of titanium alloys at different aging temperatures of 700 °C, 770 °C and 850 °C was studied, respectively. The results show that the amount of β phase in the microstructure of $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ titanium alloy gradually increases with the increase of aging temperature. When the aging temperature is increased to 850 °C, the amount of β precipitates reaches the maximum, and a large number of small-sized β phases are distributed among the coarse β phases. $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ titanium alloy exhibits different mechanical properties after aging treatment at different temperatures. The compressive strength of titanium alloy

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 四川省重点研发项目(2020 YFG0423, 2022 YFG0286)。

作者简介: 张雪峰, 1965 年出生, 男, 四川仁寿人, 教授, 长期从事钒钛材料制备方面等基础研究工作, E-mail: 532256335@qq.com; * 通讯作者: 刘许昉, 1988 年出生, 女, 副教授, 主要从事钒钛材料制备及性能表征等相关研究工作, E-mail: liuxuyang@cqu.edu.cn。

could be significantly improved after aging at 700 °C and 770 °C, while the high strength and ductility could be simultaneously obtained after aging at 850 °C.

Key words: titanium alloy, $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$, heat treatment, strength, ductility

0 引言

钛合金因其具有高的比强度,良好的耐蚀性和耐高温性等特点,被广泛应用于航空航天、医疗、汽车等领域^[1-5]。钛合金根据其相组成可分为 α 钛合金, β 钛合金以及 $\alpha+\beta$ 两相钛合金^[6-8]。 $\alpha+\beta$ 两相钛合金由于两相间的变形协调作用,既具备 α 钛合金的高塑性,又兼有 β 钛合金高强度的性能特点,成为目前工业领域应用的主要合金^[9-11]。随着航空航天工业等领域的快速发展,对钛合金材料的力学性能提出了更高的要求,不仅要求钛合金具有高的强度,还要保持良好的塑性。

钛合金的强韧一体化一直是该领域研究的热点和重点。在钛合金强韧化的众多研究中表明,热处理是实现钛合金强韧化的重要手段,合适的热处理制度可以显著提高钛合金的力学性能^[12-16]。Li和Hui^[17]等人在Ti-1023合金基础上,采用钼当量和d电子理论成功设计出新型钛合金Ti-3Al-4.5Cr-1Fe-4V-1Zr。经过固溶处理后该合金强度为850~1100 MPa,延伸率为12.5%~17%,而对固溶样品再经过时效处理后,合金强度达到1273 MPa,延伸率为11%,韧性为83.8 MPa·m^{1/2},实现了强度-延展性-韧性的良好结合。Li^[18]等人通过对Ti-6Al-4V合金多步热处理,使合金中 α 相球化,形成了等轴的两相组织,从而使合金表现出优良的延展性,抗拉强度为953 MPa,伸长率为21.8%。Yumak^[19]等人研究了不同热处理工艺对Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr亚稳 β 钛合金力学性能的影响。结果表明合金在250 °C时效24 h后再在550 °C时效20 h,可以产生细小弥散的 α 相,此时合金的力学性能最佳,抗拉强度和延伸率分别达到1100 MPa和9%。然而,如何进一步提升钛合金的强度和延展性,使其满足社会发展的需求,仍然是一大挑战。

$\alpha+\beta$ 型钛合金因其具有优良的综合性能、热加工工艺性能、可以进行热处理强化等特点,被广泛应用于制作航空结构件,其典型代表如Ti-6Al-4V^[20-22]。然而V元素昂贵的价格及熔炼时产生的钒蒸气会使吸入者有钒中毒的危险,限制了其发展与应用。针对上述问题,利用廉价的合金元素取代

或部分取代Ti-6Al-4V合金中昂贵的V元素来设计新型钛合金是一条简便且行之有效的方法。西北有色金属研究院^[23]采用廉价的Fe中间合金部分代替Ti-6Al-4V中昂贵元素V,研发出了一种Ti-Fe-V-Cr-Al系 $\alpha+\beta$ 两相钛合金,该合金经过热处理后强韧性匹配良好,室温强度达到1100~1300 MPa,伸长率在7%~14%,目前该合金已应用于坦克装甲的研制,抗弹性能优于TC4合金。美国Timetal公司^[24]以Fe、Si元素代替Ti-6Al-4V合金中的V元素,设计开发出了一种非航空航天用途的新型低成本 $\alpha+\beta$ 型Ti-6Al-2Fe-0.1Si钛合金,该合金性能与TC4相比并不逊色,成本降低了15%~20%,并且具备优异的冷热加工性,主要应用于高强度、抗损伤的民用领域钛合金钣金结构件,已在气门座圈的生产中替代了TC4合金。

从目前已有的研究结果来看,新型低成本Ti-Al-Fe系钛合金的力学性能与Ti-6Al-4V相当,属于中强度钛合金,其最高强度尚不能突破1300 MPa。由于对Ti-Al-Fe系合金的研究尚处于初始阶段,其诸多特性还未曾发掘出来,相比于其他钛合金,Ti-Al-Fe系合金仍有较大的发展潜力。如何进一步提升Ti-Al-Fe系合金的力学性能,对推动该体系合金的发展和具有重要应用具有重要意义。笔者在目前研究基础上,采用d电子理论^[25]设计了一种强韧性匹配的Ti-Al-Fe-Mo系两相钛合金 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$,并研究了不同热处理工艺对钛合金两相组成、微观组织结构和力学性能的影响规律。

1 试验材料和方法

1.1 材料成分设计

d电子理论通过参数Md和Bo来表征原子电负性、原子尺寸以及合金化等综合因素。表1为Ti中不同元素的Bo、Md参数值,参考现有的高强韧钛合金体系参数值范围,最终设计的钛合金成分为 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 。

1.2 试验方法

采用纯度为99.9%的Ti、Fe、Al、Mo颗粒作为初始原材料,并按照 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 的成分配比进行配料,合金的质量为30 g。所有的原材料在熔炼前,

都先采用砂纸进行打磨,以便除掉表面的氧化层,避免熔炼时造成严重的氧化。合金颗粒经电弧熔炼制备成钛合金铸锭。为保证成分的均匀性,合金熔炼次数为8次。待合金熔炼完后,将炉子冷却至室温,随后取出合金锭,最终得到直径为25 mm,厚度为8 mm,质量为30 g的合金纽扣状样品。合金经热处理后再通过线切割,加工3~5个直径为3 mm,高度为6 mm的小圆柱用于性能测试。采用万能试验机对热处理后的钛合金进行力学性能测试。采用场发射扫描电子显微镜对合金试件的表面形貌以及压缩断口特征进行观测。熔炼后对合金的元素组成进行了测试,测得的合金的实际组成是 $Ti_{84.24}Al_{10.9}Fe_{1.02}Mo_{3.84}$,跟理论配比 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 十分接近。

为研究钛合金在热处理过程中物相组成和微观组织演变对合金力学性能的影响关系,需要制定合适的热处理温度。采用Thermocalc热力学软件计

算了 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 合金中物相组成随温度变化的演化关系,如图1所示。从图1可以看出, $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 钛合金中 $\alpha+\beta$ 两相组成的温度区间为680~885℃,885℃即为 $\alpha+\beta$ 两相区转变为 β 单相区的临界温度。为保证钛合金成分均匀,首先使钛合金在单相区进行固溶处理,固溶温度为950℃。为研究钛合金物相组成对钛合金力学性能的影响规律,本研究选择3组不同的时效温度进行热处理,热处理制度和对应的平衡相图物相组成如表2所示。

表1 Ti中不同元素Bo、Md参数值
Table 1 Bo and Md parameter values of different elements in Ti alloy

元素	Bo	Md
Ti	3.513	2.447
Fe	3.428	0.969
Al	3.297	2.2
Mo	3.759	1.961

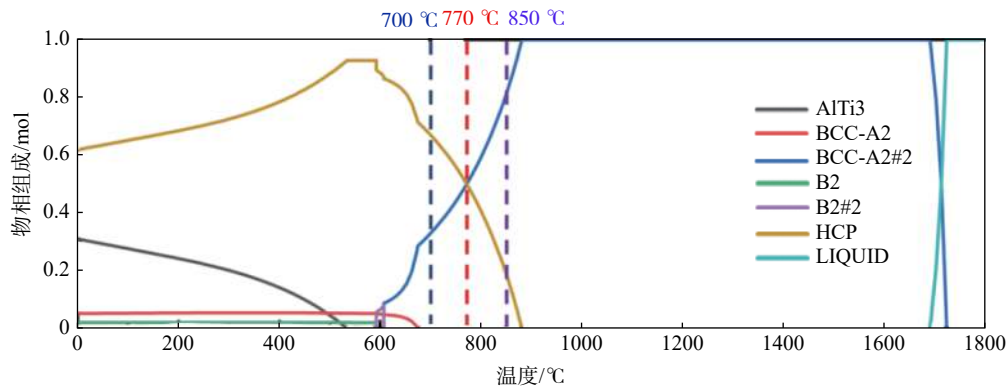


图1 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 合金的热力学计算相图
Fig. 1 Calculated thermodynamic phase diagram of $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ alloy

表2 热处理制度及热力学理论物相组成
Table 2 Heat treatment system and thermodynamic theory phase composition

序号	固溶温度/℃	时效温度/℃	物相组成/%	
			α -Ti	β -Ti
样品1	950+WQ	700+WQ	65	35
样品2	950+WQ	770+WQ	50	50
样品3	950+WQ	850+WQ	20	80

注: WQ表示水冷。

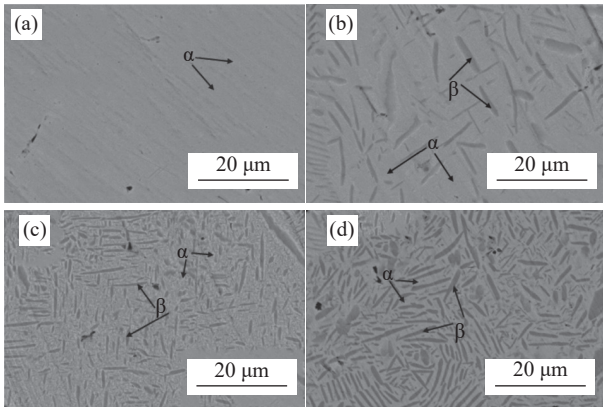
2 结果及讨论

2.1 显微组织

图2为 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 铸态合金以及合金在不同时效温度下的显微组织。由图2(a)可以看出,铸态合金组织中主要由 α 相组成, β 析出相的相含量较少。(b)、(c)和(d)中合金表现出了明显的两相组

织结构,其中深灰色为 β 相,浅灰色为 α 相。随着时效处理温度的提高,钛合金微观组织中 β 相的含量逐渐增多。时效温度在700℃时,析出的 β 相含量接近30%左右,且表现出来的微观结构为10 μm 左右的短条状结构。当时效温度增加到770℃时, β 相的组成含量增加到接近50%,同时 β 相由短条状逐渐向短针状转变,尺寸明显变小;当时效温度增加

到 850 °C 时, 此时 β 析出相的含量最多, 达到 80% 左右, 并且在粗 β 相间分布着大量细小尺寸的 β 相。除此之外, 为研究热处理后合金元素在两相中的分布情况, 对样品 1 进行了能谱分析, 如图 3 所示。可以看出, 该合金在 700 °C 时效处理后, Al 和 Mo 元素主要富集在 α 相中, 而 Fe 在两相中分布相对较为均匀。



(a) 铸态; (b) 样品 1; (c) 样品 2; (d) 样品 3

图 2 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 合金在不同时效温度下的微观形貌
Fig. 2 Micromorphology of $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ alloy obtained at different aging temperatures

2.2 力学性能

图 4 为 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 铸态合金以及在不同时效温度下合金的压缩力学性能。从图 4 可以看出, 合金经过不同温度的热处理后, 其强度和塑性都有着一定程度上的提高。 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 铸态钛合金的压缩强度为 1 366 MPa, 断裂韧性为 20%; 当合金在 700 °C 时效处理后, 合金强度达到 1 712 MPa, 与铸态合金相比强度提升了 25.32%; 而 770 °C 时效处理后, 合金强度达到 1 695 MPa, 相比铸态合金其强度提升了 24.1%, 这主要归结于 β 析出相的强化作用。当合金在 850 °C 进行时效后, 其强度和断裂韧性分别提高到 1 558 MPa 和 24%; 与铸态性能相比, 强度和塑性分别提高 14% 以及 20%, 如表 3 所示。对比文献 [15] 中的其他两相钛合金, 该合金经时效处理后表现出了良好的强塑性匹配。这是由于 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 合金进过 850 °C 时效处理后, 显微组织中大小相间的 β 相分布一方面有利于材料在变形时进行协调变形, 另一方面也增加了滑移阻力, 从而提高材料的强度和塑性。

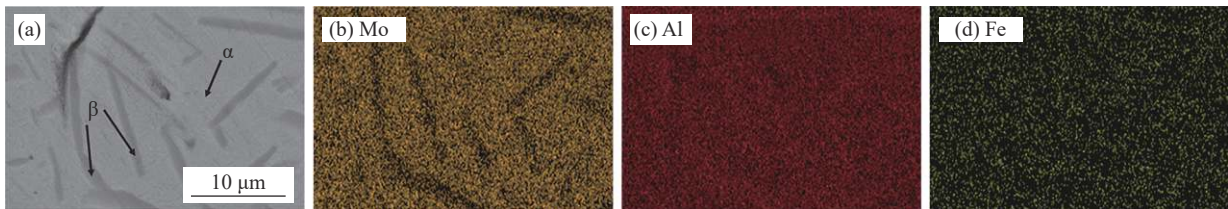


图 3 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 合金中合金元素在两相中的分布情况

Fig. 3 Distribution of alloying elements in two phases in $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ alloy

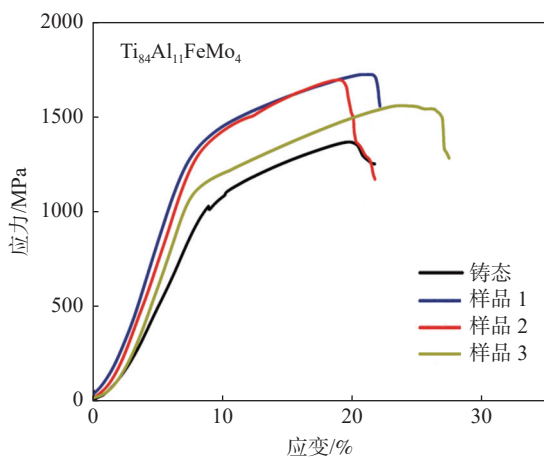


图 4 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 合金在不同时效温度下的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ alloy obtained at different aging temperatures

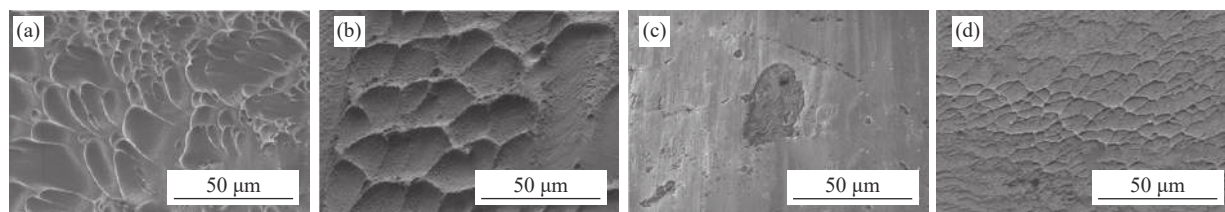
表 3 不同时效温度下 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 合金压缩强度和断裂塑性

Table 3 Compressive strength and fracture ductility of $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ alloy obtained at different aging temperatures

样品	压缩强度/MPa	断裂塑性/%
铸态	1 366	20
样品 1	1 712	22
样品 2	1 695	18.9
样品 3	1 558	24

2.3 断口形貌

图 5 为 $Ti_{84}Al_{11}FeMo_4$ 铸态合金以及在不同时效温度下合金的压缩断口形貌。除了在 770 °C 时效处理后的样品, 其他样品的断口中都有着明显的韧窝分布, 表现出了良好的塑性, 这与上述压缩力学性能结果相匹配。



(a) 铸态; (b) 样品 1; (c) 样品 2; (d) 样品 3

图 5 $\text{Ti}_{84}\text{Al}_{11}\text{FeMo}_4$ 合金在不同时效温度下的断口形貌

Fig. 5 Fracture morphologies of $\text{Ti}_{84}\text{Al}_{11}\text{FeMo}_4$ alloy obtained at different aging temperatures

3 结论

1) 采用 d 电子理论设计出新型两相钛合金 $\text{Ti}_{84}\text{Al}_{11}\text{FeMo}_4$ 。随着时效处理温度的提高, $\text{Ti}_{84}\text{Al}_{11}\text{FeMo}_4$ 钛合金微观组织中 β 相的含量逐渐增多。当时效温度增加到 850 °C 时, β 析出相的含量最多, 且在粗

β 相间分布着大量细小尺寸的 β 相。

2) $\text{Ti}_{84}\text{Al}_{11}\text{FeMo}_4$ 钛合金经不同时效温度处理后表现出不同的力学性能, 在 700 °C 和 770 °C 下时效处理后可显著提高钛合金的压缩强度, 而在 850 °C 下时效后可以实现钛合金的强度和塑性的同步提升。

参考文献

- [1] Oh J M, Park C H, Yeom J T, *et al.* High strength and ductility in low-cost Ti-Al-Fe-Mn alloy exhibiting transformation-induced plasticity[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2020, 772: 138813.
- [2] Zhu W, Lei J, Tan C, *et al.* A novel high-strength β -Ti alloy with hierarchical distribution of α -phase: The superior combination of strength and ductility[J]. *Materials & Design*, 2019, 168: 107640.
- [3] Das J, Gogia A K, Satyanarayana D V V. Effect of iron and nickel impurities on creep and tensile behaviour of Ti-24Al-20Nb-0.5Mo alloy[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2008, 496(1-2): 1-8.
- [4] Fan J, Li J, Zhang Y, *et al.* Formation and crystallography of nano/ultrafine-trimorphic structure in metastable β titanium alloy Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.5Fe processed by dynamic deformation at low temperature[J]. *Materials Characterization*, 2017, 130: 149-155.
- [5] Fan J, Kou H, Zhang Y, *et al.* Formation of slip bands and microstructure evolution of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.5Fe alloy during warm deformation process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 770: 183-193.
- [6] Wang W L, Wang X L, Mei W, *et al.* Role of grain size in tensile behavior in twinning-induced plasticity β Ti-20V-2Nb-2Zr alloy[J]. *Materials Characterization*, 2016, 120: 263-267.
- [7] Sun F, Zhang J Y, Marteleur M, *et al.* Investigation of early stage deformation mechanisms in a metastable β titanium alloy showing combined twinning-induced plasticity and transformation-induced plasticity effects[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(17): 6406-6417.
- [8] Zafari A, Xia K. Stress induced martensitic transformation in metastable β Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr alloy: Triggering stress and interaction with deformation bands[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2018, 724: 75-79.
- [9] Dong R, Li J, Kou H, *et al.* Precipitation behavior of α phase during aging treatment in a β -quenched Ti-7333[J]. *Materials Characterization*, 2018, 140: 275-280.
- [10] Xue Q, Ma Y J, Lei J F, *et al.* Mechanical properties and deformation mechanisms of Ti-3Al-5Mo-4.5V alloy with varied β phase stability[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(12): 2507-2514.
- [11] Ren L, Xiao W, Chang H, *et al.* Microstructural tailoring and mechanical properties of a multi-alloyed near β titanium alloy Ti-5321 with various heat treatment[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2018, 711: 553-561.
- [12] Šmilauerová J, Janeček M, Harcuba P, *et al.* Ageing response of sub-transus heat treated Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 724: 373-380.
- [13] Kim Y K, Park S H, Yu J H, *et al.* Improvement in the high-temperature creep properties via heat treatment of Ti-6Al-4V alloy manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 715: 33-40.
- [14] Lee K H, Yang S Y, Yang J G. Optimization of heat-treatment parameters in hardening of titanium alloy Ti-6Al-4V by using the Taguchi method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90: 753-761.

(下转第 77 页)