

(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x 高熵金属间化合物合金的组织结构研究

覃业恒, 张越, 张骁, 杨程, 陈迅, 王乔, 赵鹏程, 刘亮

(辽宁工业大学材料科学与工程学院, 辽宁锦州 121001)

摘要: 设计并用真空电弧熔炼法制备了五主元 (Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x 高熵金属间化合物合金, 研究了铸态及高温退火后合金的晶体结构、显微组织及硬度的变化。结果表明, (Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x 高熵金属间化合物合金以D0₂₂有序化合物结构为基体, 夹杂少量的L1₀析出相。合金组织为树枝晶组织, 由于枝晶相和枝晶间相的元素分布不同, 使合金产生了相分离现象。(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5}合金中L1₀相含量最少, 并且在1 300 °C热处理后基本消失, 合金转变为完全由有序的D0₂₂相组成。此合金在1 400 °C高温下仍能保持铸态的基体结构, 没有析出其他相, 表明此合金具有极好的高温热稳定性。

关键词: 高熵合金; 金属间化合物; 热处理; 显微组织; 晶体结构

近年来, 高熵合金因其所具有的优异性能而被广泛关注, 如高强度^[1]、高热稳定性^[2]、耐低温断裂^[3]、高温抗氧化^[4]、抗辐照性能强^[5]、良好的耐磨性^[6]和出色的耐腐蚀性^[7]等。由于其优异的综合性能, 高熵合金在以下的领域中有很大的应用价值: 耐高温材料, 用于高温环境中如火箭发动机、核反应堆结构件等; 电子材料, 高性能电子器件, 如超导体、超级电容器等; 超硬材料, 用于制造高硬度的工具、刀具、钻头; 化学材料, 用于制造耐腐蚀、耐磨、高强度的化学器件; 生物医学材料, 用于生物医学领域, 如生物活性材料、生物相容材料等。早期高熵合金的定义在于高熵合金要形成简单固溶体, 并且主要合金元素的原子含量要满足等原子比或接近等原子比^[8]。其中多个主要元素的原子随机占据FCC、BCC和HCP结构的晶格位点^[9-11]。随着对高熵合金研究逐渐深入, 大量的试验结果表明, 高熵合金几乎都不是单相固溶体结构, 而是存在着一些金属间化合物相或者是多相结构^[12-15]。例如, 曲明洋等人^[16]发现Al_xCoFeNiMo系高熵合金就是由单相固溶体加上拓扑密堆μ相构成的。与传统合金不同, 高熵合金中金属间化合物相的存在不一定破坏合金的整体性能。于是, 不少学者对含有金属间化合物相作为第二相的高熵合金进行了大量研究。例如, He等人发现, 在FeCoCrNi高熵合金中加入适量的合金元素Al和Ti, 形成了少量的金属间化合物相^[17]。经过热处理后, 该合金具有1 273 MPa的高抗拉强度和17%的高延展性。刘帅宾等人发现可以通过调节Ti的含量调节Ti_x(Fe₁₅Co₃₅Ni₃₅Cr₁₅)_{100-x}系高熵合金的晶体结构, 由最开始的单相FCC结构变为FCC+μ-(Ni+Co)₃Ti化合物相, 使该高熵合金获得优良的综合力学性能^[18]。Qi等人通过对Al_{0.4}CoCrFe₂Ni₂高熵合金添加TiO₂纳米陶瓷颗粒发生分解, 生成少量Al₂O₃和大量具有简单立方结构的金属间化合物(γ'相)^[19]。γ'相在枝晶间富集, 增加了合金变形过程中位错运动的阻力, 从而平衡了合金塑性高、强度低的问题。当TiO₂添加量为2.5 vol.%时, 高熵合金的强度达到最大值489 MPa, 比由单一FCC相组成的基体合金提高了11.1%。Liu等人开发了一种FCC-L1₂双相纳米结构的高熵合金, 获得了优异的强度-延性组合, 其拉伸屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为1 000 MPa、1 500 MPa和50%, 其中金属间化合物相的体积分数高达50%~55%^[20]。然而, 受到相对较低的熔化温度以及固溶体基

作者简介:

覃业恒(2000-), 男, 本科, 主要研究方向为高熵合金。E-mail: 2936243733@qq.com

通讯作者:

张越, 高级工程师。电话: 18741614698, E-mail: zyfb_0708@126.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)08-1059-06

收稿日期:

2023-07-16 收到初稿,
2023-10-18 收到修订稿。

体的限制, 这些少量金属间化合物对材料高温性能的提升有限, 当使用温度达到500 °C以上时, 其强度仍会急剧下降。所以迫使人们去开发含有更高金属间化合物体积分数的耐高温高熵合金。例如Yeh等人提出一种新的高熵高温合金设计概念, 进一步提升了金属间相的含量, 类似于镍基高温合金中FCC/L1₂的经典设计, 如Ni_{50.5}Co_{17.2}Fe_{8.2}Cr_{9.2}Al_{8.9}Ti₆和Ni₄₅Co_{13.3}Fe_{13.3}Cr_{13.3}Al_{7.5}Ti_{7.5}高熵合金^[21-22]。

金属间化合物合金由于金属键、共价键、离子键的共存以及特殊的晶体结构, 通常具有较高强度、优良的高温稳定性、耐蚀性、抗高温蠕变及抗高温氧化能力^[23-25]。但其塑性较差、高温强度较低, 应用受到了很大限制。而将高熵合金、金属间化合物的设计思想相结合, 同时依据传统高温合金的合金化规律, 开发一种兼具高熵合金塑性、金属间化合物稳定性的以有序化合物结构为基体的新型耐高温高熵合金材料, 则很有可能解决以上问题。最近, Zhou等人用机械合金化法制备了具有单相B2结构的(Fe_{1/5}Co_{1/5}Ni_{1/5}Mn_{1/5}Cu_{1/5})Al高熵金属间化合物合金^[26], 为探索成分复杂的金属间化合物合金开辟了新的视角。近几年, 研究人员制备了一系列有序金属间化合物结构的高熵金属间化合物, 如TiZrHfFe_{0.75}Co_{0.75}Ni_{0.75}Cu_{0.75}^[27]、TiZrHfCoNiCu^[28]和(TiZrHf)-(NiCuCo)^[29]等。本文中, 我们根据Al₃Ti金属间化合物(A₃B型化合物, D0₂₂结构)设计了一种新型(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x高熵合金, 通过调控Al元素含量, 获得单相高熵金属间化合物。系统研究了此合金的晶体结构、显微组织和力学性能的演变, 为高熵金属间化合物的广泛应用提供数据支持。

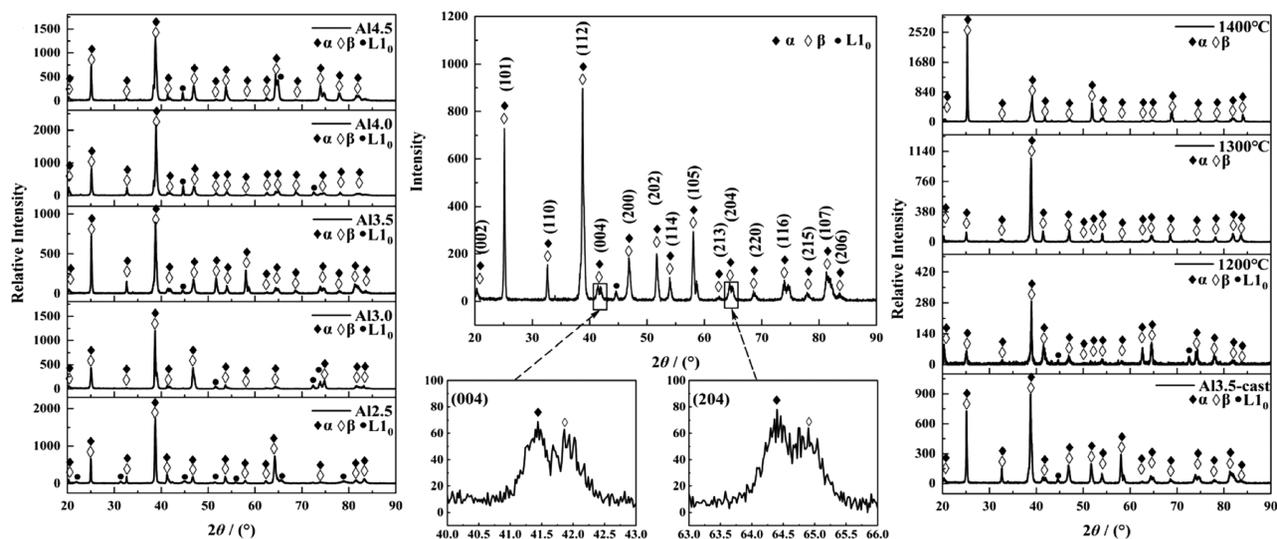
1 试验材料与方法

试验所用的原料为Ti、Nb、V、Zr、Al纯金属, 其纯度皆为99.5%以上。通过WK-II型非自耗电弧熔炼炉在氩气保护气氛下, 制备(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x合金铸锭(x表示当Ti、Zr、V、Nb四种元素含量为等摩尔比, 且总含量为1时Al元素的原子含量, 本文中, x=2.5、3.0、3.5、4.0和4.5, 对应合金分别简称为Al_{2.5}、Al_{3.0}、Al_{3.5}、Al_{4.0}和Al_{4.5})。每份原料反复熔炼5次, 确保铸锭成分均匀。合金分别在1 200 °C、1 300 °C和1 400 °C下进行高温退火处理, 保温时间2 h, 检测相稳定性。将所得试样用120号至800号砂纸打磨, 再通过粒度为1.5 μm的金刚石研磨膏抛光至无划痕, 用X射线衍射仪(Rigaku, D/max-2500/PC)进行物相分析, 靶材为铜靶, 电子加速电压为40 kV, 电流为100 mA, 扫描角度为20°~100°, 扫描速度为8°/min。将用王水腐蚀后的金相试样, 用金相显微镜(Zeiss, Axio Vert.A1)和搭配有能谱仪(Oxford, AZtec X-Max 50)的场发射扫描电子显微镜(Zeiss, Sigma500)对试样的微观组织形貌和元素分布进行观察。用HVS-1000CCD型维氏显微硬度计测定试样显微硬度, 每个样品测试5个点确保结果准确, 载荷砝码为200 g, 压头加载时间为10 s。

2 试验结果与分析

2.1 铸态及热处理后(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x合金的晶体结构

图1为铸态下不同Al含量的(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x合金和高温退火后的XRD图谱。从图1a和图1b中可以



(a) 铸态Al_{2.5}, Al_{3.0}, Al_{3.5}, Al_{4.0}和Al_{4.5} (b) 铸态Al_{3.5}以及(004)面和(204)面衍射峰放大图

(c) Al_{3.5}热处理态

图1 不同Al含量的(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x高熵金属间化合物的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of the (Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x high entropy intermetallic compounds with different Al contents

看出 $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ 系列合金以 D0_{22} 有序化合物结构为基体 (图中有两个 D0_{22} 相, 下文简称为 α 相和 β 相), 基体夹杂微量 L1_0 有序相。由于 α 相和 β 相具有非常相近的晶格常数, 因此两相的衍射峰几乎重合, 在 XRD 中难以区分。在图 1b 的放大图中可以相对明显地看出两相分离的情况。另外, 根据图 1b 放大图中的衍射峰的强度及半高宽, 可以推测出 α 和 β 两相的相对含量相近。

通过 Jade 软件进行相识别, α 相和 β 相分别被识别为类似 Al_3Nb 和 Al_3Ti 的金属间化合物结构 (这两种化合物具有相同的布拉维点阵)。依据 A_3B 型化合物的原子排布特点 (D0_{22} 结构), 合金中的 Al 原子占据 A 阵点位置, 而 Ti、Zr、V、Nb 四种元素作为溶质原子占据 B 阵点位置。大量固溶元素的存在将会影响 D0_{22} 结构的晶格错配度、反相畴界能和有序化程度, 进而影响合金的力学性能。另外, 从图 1a 中 XRD 的衍射峰强度来看, $\text{Al}_{3.5}$ 合金中 L1_0 相含量最少, 合金几乎形成了单 D0_{22} 结构。图 1c 为 $\text{Al}_{3.5}$ 合金经不同温度的高温退火后的 XRD 图, 可以发现, $\text{Al}_{3.5}$ 合金在经过 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 高温退火后, L1_0 相完全消失, 合金转变为完全由有序的 D0_{22} 相组成。另外, 此合金在 $1\ 400\ ^\circ\text{C}$ 高温下仍能保持铸态的基体结构, 没有析出其他相, 表明此合金具有极好的

高温热稳定性, 而且相分离现象随退火温度的提高逐渐降低。

2.2 铸态及热处理后 $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ 合金的组织结构

图 2 为不同 Al 含量 $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ 高熵金属间化合物的扫描电镜组织形貌。可以看到, 铸态条件下, 不同 Al 含量的合金均表现为细密的树枝晶组织, 存在比较明显的枝晶相和枝晶间相, 与 XRD 分析结果相同。随着 Al 含量的增加, 组织形貌也发生明显的改变。根据 XRD 结果, $\text{Al}_{3.5}$ 合金中 D0_{22} 相含量很少, 几乎为单 D0_{22} 结构。因此, 对此合金铸态及 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 高温退火后的组织形貌及元素分布进行了进一步分析。铸态下此合金为细密的树枝晶组织, 存在明显的两相, 经 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 高温退火后, 组织明显粗化。由对应的能谱图及表 1 可以看出, 枝晶相富含 Nb 元素 (对应 XRD 图中的 α 相), 枝晶间相富含 Ti、V 元素 (对应 XRD 图中的 β 相), Zr、Al 元素在两相中分布比较均匀。另外, 对比图 3 a 和表 1 中 $\text{Al}_{3.5}$ 合金铸态下的元素分布, 经 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 高温退火后, 元素分布趋于均匀化, 与 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 高温退火后的 XRD 图中相分离现象减弱相对应。

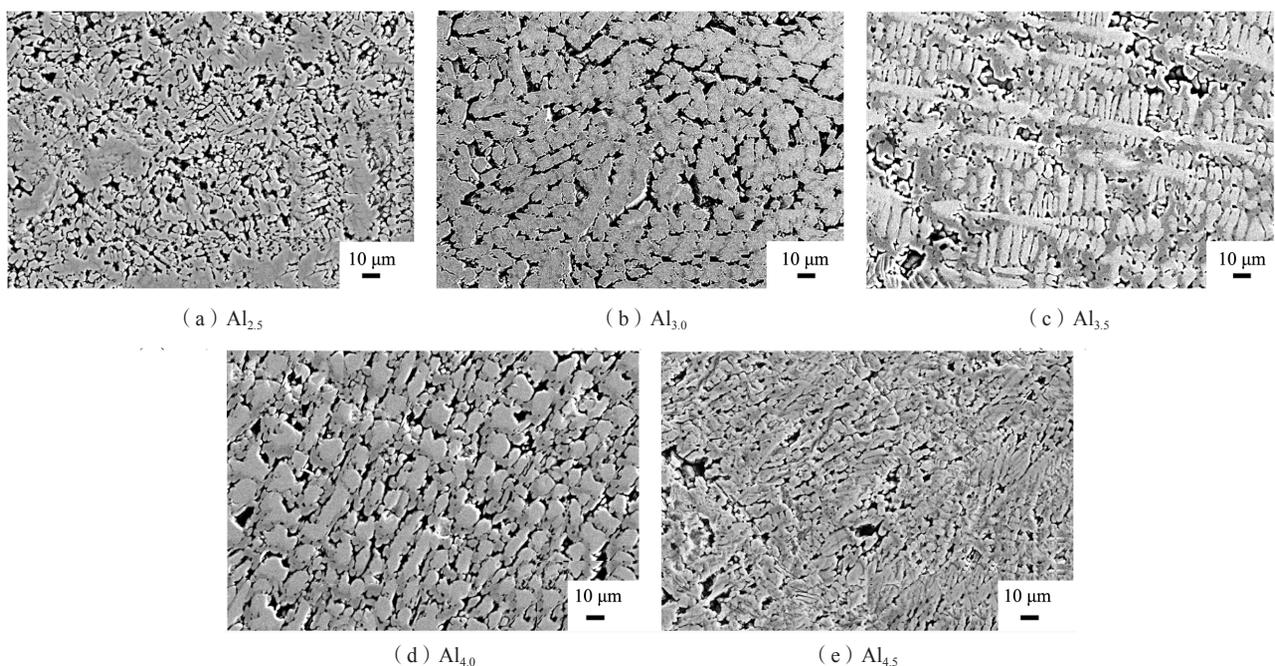


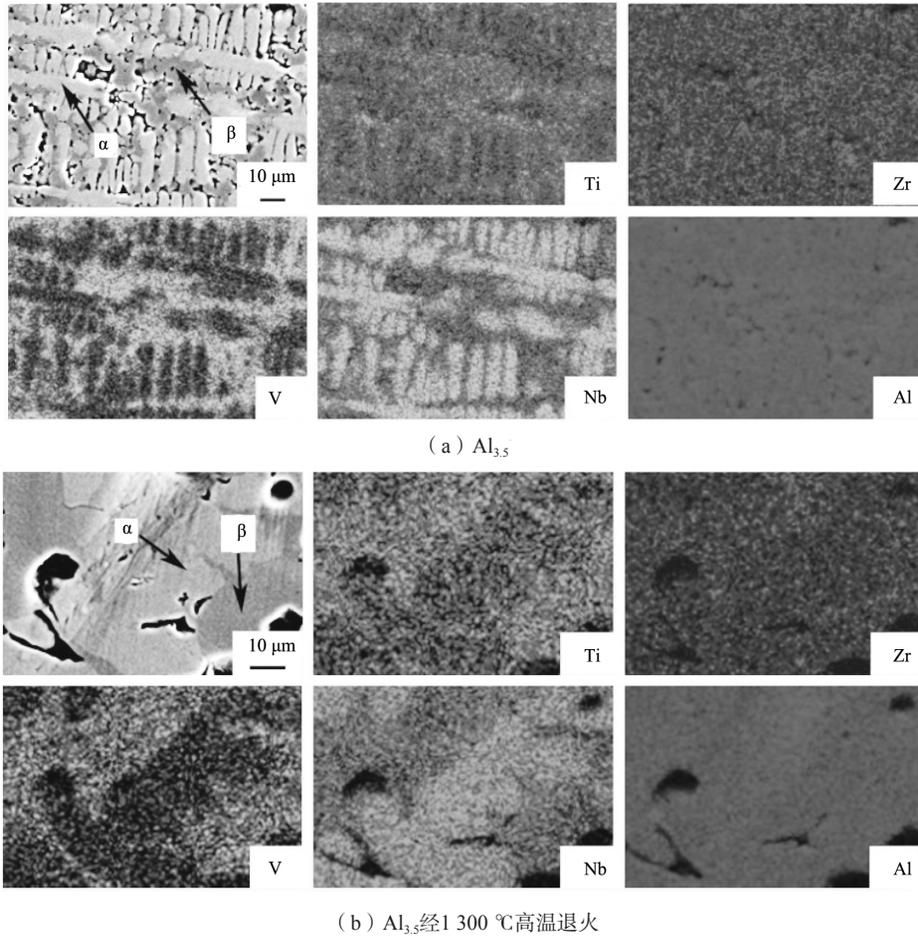
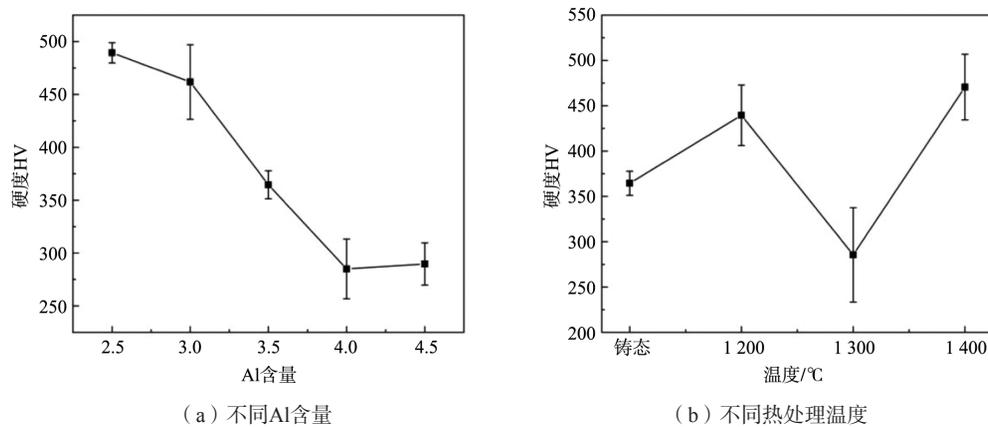
图 2 不同 Al 含量的 $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ 高熵金属间化合物的显微组织

Fig. 2 Microstructures of the $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ high entropy intermetallic compounds with different Al contents

2.3 铸态及热处理后合金的硬度分析

图 4 为铸态下不同 Al 含量 $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ 和不同热处理后的 $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_{3.5}$ 合金的显微硬度 (载荷为 $0.2\ \text{kg}$) 变化曲线。如图 4 (a) 所示, 该合

金体系在 $\text{Al}_{2.5}$ 时获得最佳的硬度为 $\text{HV}\ 489.36$ 。随着 Al 元素含量增加, 合金的硬度逐渐减小, 由 $\text{HV}\ 489.36$ 逐渐降低至 $\text{HV}\ 285.04$ 。这种硬度变化主要与 L1_0 析出相的相对含量有关。结合 XRD 的分析, 随 Al 含量的增加, L1_0

图3 $(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5}$ 高熵金属间化合物显微组织和能谱图Fig. 3 Microstructures and EDS of the $(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5}$ high entropy intermetallic compounds图4 不同条件下 $(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5}$ 高熵金属间化合物的硬度Fig. 4 Hardnesses of the $(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5}$ high entropy intermetallic compounds under different conditions

相的含量逐渐降低。而通过对 $Al_{3.5}$ 合金在不同温度下进行热处理后,发现其硬度变化也十分显著,随着热处理温度升高 $Al_{3.5}$ 的硬度出现先升高后降低再升高的现象,在1 300 °C热处理后,具有最低硬度HV 285.52。

这是由于原来基体中弥散的 $L1_0$ 相消失,失去析出强化作用所导致的。而在1 400 °C热处理后,再次出现的 $L1_0$ 相使 $Al_{3.5}$ 合金硬度再次升高,达到最高值HV 470.6。

表1 (Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5}高熵金属间化合物组织元素含量
Table 1 (Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5} high entropy intermetallic compound element contents w_B/%

样品	相	Ti	Zr	V	Nb	Al
铸态	α	4.71	5.63	2.04	16.17	71.45
	β	8.22	6.65	9.94	3.31	71.88
1 300 °C	α	4.16	4.79	1.78	17.98	71.29
	β	7.89	7.20	7.26	6.51	71.13

3 结论

设计并制备了 (Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_x系列高熵金属间化合物合金, 此系列合金以D0₂₂有序化合物结构

为基体, 夹杂少量的L1₀析出相。合金组织为树枝晶组织, 由于枝晶相和枝晶间相的元素分布不同, 使合金产生了相分离现象。其中枝晶相富含Nb元素, 枝晶间相富含Ti、V元素, Zr、Al元素在两相中分布比较均匀。(Ti_{1/4}Zr_{1/4}V_{1/4}Nb_{1/4})Al_{3.5}合金中L1₀相含量最少, 并且在1 300 °C热处理后基本消失, 合金转变为完全由有序的D0₂₂相组成。另外, 此合金在1 400 °C高温下仍能保持铸态的基体结构, 没有析出其他相, 表明此合金具有极好的高温热稳定性。在不同Al含量的试验中, Al_{2.5}的硬度最佳为HV 489.36, 在对Al_{3.5}进行不同温度热处理的试验中, 1 400 °C热处理后获得最佳硬度为HV 470.6, 可以得知影响硬度的主要因素为L1₀相, 因此对于硬度来说L1₀为有益相。

参考文献:

- [1] HANNA J, BAKER I, WITTMANN M, et al. A new high-strength spinodal alloy [J]. Journal of Materials Research, 2005, 20 (4): 791-795.
- [2] 农智升, 李宏宇, 王继杰. AlCrFeNiTi高熵合金热稳定性的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (1): 191-196.
- [3] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, CATOOR D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications [J]. Science, 2014, 345 (6201): 1153-1158.
- [4] HUANG C, ZHANG Y, SHEN J, et al. Thermal stability and oxidation resistance of laser clad TiVCrAlSi high entropy alloy coatings on Ti-6Al-4V alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206 (6): 1389-1395.
- [5] NAGASE T, RACK P D, NOH J H, et al. In-situ TEM observation of structural changes in nano-crystalline CoCrCuFeNi multicomponent high-entropy alloy (HEA) under fast electron irradiation by high voltage electron microscopy (HVEM) [J]. Intermetallics, 2015, 59: 32-42.
- [6] TONG C J, CHEN M R, YEH J W, et al. Mechanical performance of the Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements [J]. Metall Mater Trans A, 2005, 36 (5): 1263-1271.
- [7] HASSAN M A, GHAYAD I M, MOHAMED A S A, et al. Improvement ductility and corrosion resistance of CoCrFeNi and AlCoCrFeNi HEAs by electroless copper technique [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 463-485.
- [8] YEH J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes [J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6 (5): 299-303.
- [9] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375: 213-218.
- [10] CHOU H P, CHANG Y S, CHEN S K, et al. Microstructure, thermophysical and electrical properties in Al_xCoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys [J]. Materials Science and Engineering: B, 2009, 163 (3): 184-189.
- [11] 赵亚杰. 密排六方结构稀土高熵合金及其力学性能 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [12] 谭雅琴, 王晓明, 朱胜, 等. 高熵合金强韧化的研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34 (5): 5120-5126.
- [13] 涂泽立. CrFeCoNi基高熵合金第二相的析出特征及调控机理 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [14] ZHAO Y L, YANG T, TONG Y, et al. Heterogeneous precipitation behavior and stacking-fault-mediated deformation in a CoCrNi-based medium-entropy alloy [J]. Acta Mater, 2017, 138: 72-82.
- [15] LIANG Y J, WANG L, WEN Y, et al. High-content ductile coherent nanoprecipitates achieve ultrastrong high-entropy alloys [J]. Nat Commun, 2018, 9 (1): 4063.
- [16] 曲明洋, 李廷取, 颜丙辉, 等. Al-CoFeNiMo高熵合金的结构演变及力学性能 [J]. 铸造, 2020, 69 (1): 11-15.
- [17] HE J Y, WANG H, HUANG H L, et al. A precipitation-hardened high-entropy alloy with outstanding tensile properties [J]. Acta Mater, 2016, 102: 187-196.
- [18] 刘帅宾, 翟秋亚, 刘洋, 等. Ti_x(Fe₁₅Co₃₅Ni₃₅Cr₁₅)_{100-x}高熵合金的微结构与力学性能 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 200-205.
- [19] QI H, LI G, ZHANG W, et al. Effect of TiO₂ nano-ceramic particles on microstructure and mechanical properties of Al_{0.4}CoCrFe₂Ni₂ high-entropy alloy [J]. China Foundry, 2022, 19 (6): 528-534.
- [20] YANG T, ZHAO Y L, TONG Y, et al. Multicomponent intermetallic nanoparticles and superb mechanical behaviors of complex alloys [J]. Science, 2018, 362: 933-937.

- [21] ZHANG L, ZHOU Y, JIN X, et al. The microstructure and high-temperature properties of novel nano precipitation-hardened face centered cubic high-entropy superalloys [J]. *Scr. Mater.*, 2018, 146: 226–230.
- [22] TSAO T K, YE H A C, MURAKAMI H. The microstructure stability of precipitation strengthened medium to high entropy superalloys [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2017, 48 (5) : 2435–2442.
- [23] TAUB A I, FLEISCHER R L. Intermetallic compounds for high temperature structural use [J]. *Cheminform*, 1989, 20 (22) : 616–621.
- [24] FLEISCHER R L. High-strength, high-temperature intermetallic compounds [J]. *J. Mater. Sci.*, 1987, 22 (7) : 2281–2288.
- [25] RUSSELL A M. Ductility in intermetallic compounds [J]. *Adv. Eng. Mater.*, 2003, 5 (9) : 629–639.
- [26] ZHOU N, JIANG S, HUANG T, et al. Single-phase high-entropy intermetallic compounds (HEICs) : bridging high-entropy alloys and ceramics [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64: 856–864.
- [27] YAO K, LIU L, REN J, et al. High-entropy intermetallic compound with ultra-high strength and thermal stability [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 194: 113674.
- [28] DUAN K, LIU L, YAO K, et al. High-entropy intermetallics with striking high strength and thermal stability [J]. *Materials Letters*, 2022, 321: 132424.
- [29] HONG S H, PARK H J, KANG G C, et al. Nanocrystalline single-phase high-entropy alloy synthesized by using intermetallic compound type (TiZrHf) - (NiCuCo) high-entropy metallic glass precursor [J]. *Scripta Materialia*, 2022, 209: 114391.

Study on Microstructure and Crystal Structure of $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ High Entropy Intermetallic Compounds

QIN Ye-heng, ZHANG Yue, ZHANG Xiao, YANG Cheng, CHEN Xun, WANG Qiao, ZHAO Peng-cheng, LIU Liang
(Department of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract:

Five principal-element $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ high-entropy intermetallic compounds were designed and prepared by vacuum arc melting method. The changes in crystal structures, microstructures and hardnesses of as-cast and high-temperature annealed alloys were investigated in detail. The results indicated that the $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_x$ high entropy intermetallic compounds were based on ordered D0_{22} structure with a small amount of L1_0 precipitates. The alloys' microstructure was a dendritic structure. Because of the different distribution of elements in dendritic and interdendritic regions, phase separation phenomenon occurs in the alloys. The $(\text{Ti}_{1/4}\text{Zr}_{1/4}\text{V}_{1/4}\text{Nb}_{1/4})\text{Al}_{3.5}$ alloy had the least content of L1_0 phase, which basically disappeared after heat treatment at 1 300 °C. This alloy could still maintain its as-cast matrix structure at a high temperature up to 1 400 °C without precipitation of other phases, indicating that it had excellent high-temperature thermal stability.

Key words:

high entropy alloy; intermetallic compounds; heat treatment; microstructure; crystal structure