

Al 对 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 高熵合金组织和性能影响

王 晔¹ 汪天天¹ 蒋文韬¹ 姜 博¹ 朱冬冬² 胡茂良¹

(1. 哈尔滨理工大学材料科学与化学工程学院; 2. 衢州学院浙江省空气动力装备技术重点实验室)

摘 要 采用真空电弧熔炼工艺制备了不同 Al 含量的 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ ($x=0.5, 0.8, 1.0$, 摩尔比) 难熔高熵合金。研究了合金的相组成、微观组织、密度和力学性能。结果表明, $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 高熵合金的微观组织为典型的树枝晶结构, 均由 BCC 固溶体相和 M_5Si_3 金属间化合物相组成。Al 含量的增加并未使得合金的相组成发生改变。合金 BCC 基体相富集 Al、Mo 和 V 元素, M_5Si_3 相富集 Ti 和 Si 元素, Nb 元素在两相中分布较为均匀。随 Al 含量增加, 合金的密度从 6.18 g/cm^3 降至 5.86 g/cm^3 , 硬度提升了 13.7%, 压缩屈服强度增加约 332 MPa, 增幅达到 37%, 抗压强度从 1 073 MPa 提高到 1 457 MPa, 断裂应变从 13.6% 增加到 14.4%。合金力学性能的提升主要是通过固溶强化、细晶强化和第二相强化机制实现的。

关键词 难熔高熵合金; $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$; 微观组织; 硬度; 压缩性能

中图分类号 TG146.21; TG139

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2023.07.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Al on Microstructure and Properties of $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ High Entropy Alloys

Wang Ye¹, Wang Tiantian¹, Jiang Wentao¹, Jiang Bo¹, Zhu Dongdong², Hu Maoliang¹

(1. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology;

2. Key Laboratory of Air-Driven Equipment Technology of Zhejiang Province, Quzhou University)

Abstract: $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ ($x=0.5, 0.8, 1.0$, molar ratio) refractory high entropy alloys with different Al contents were fabricated by vacuum arc melting. The phase composition, microstructure, density and mechanical properties of the alloy were investigated. The results indicate that the $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ high entropy alloys are characterized by dendritic structure, which are composed of BCC solid solution matrix phase and M_5Si_3 intermetallic phase. The phase composition of the alloy has little change with the increase of Al content. Al, Mo and V elements are enriched in BCC matrix phase, while Ti and Si elements are enriched in M_5Si_3 phase, and Nb elements are evenly distributed in both phases. With the increase of Al content, the density of the alloy is decreased from 6.18 g/cm^3 to 5.86 g/cm^3 , and the hardness is increased by 13.7%. The compressive yield strength is increased by nearly 332 MPa (37%), and the compressive strength is increased from 1 073 MPa to 1 457 MPa, while the fracture strain is increased from 13.6% to 14.4%. The enhancement of mechanical properties are mainly attributed to solid solution strengthening, fine grain strengthening and second phase strengthening mechanisms.

Key Words: Refractory High Entropy Alloy, $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$, Microstructure, Hardness, Compressive Properties

高熵合金(HEAs)的提出打破了传统合金的设计理念, 引起了广泛关注^[1-2]。高熵合金因其较高的强度、硬度、耐高温、抗氧化等优异性能, 成为海洋工程、航空航天等领域很有前景的结构材料^[3-5], 尤其是近年来开发的难熔高熵合金(RHEAs)。与传统的合金相比, 难熔高熵合金具有更高的混合熵, 因而其微观结构大多为简单的体心立方固溶体相^[6-9]。高熔点金属元素的共同

作用使其成为比 Ni 基高温合金和传统的耐火材料更有潜力的高温应用材料^[6-8]。

与传统合金类似, 元素种类或含量的变化可以明显改变高熵合金的微观组织和力学性能, 同时金属间化合物相可明显改善合金的组织 and 性能^[10-13]。由于 Si 与其他元素的混合焓较低, 向合金中添加 Si 元素, 更易形成 M_5Si_3 金属间化合物相, 这种硬脆金属间化合物相的存

收稿日期: 2022-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071188)

第一作者简介: 王晔, 男, 1984 年出生, 讲师, 哈尔滨(150001), E-mail: wangye1984@hrbust.edu.cn

通信作者: 姜博, 男, 1990 年出生, 讲师, 哈尔滨(150001), E-mail: jiangbo@hrbust.edu.cn

引用格式: 王晔, 汪天天, 蒋文韬, 等. Al 对 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 高熵合金组织和性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(7): 871-875.

WANG Y, WANG T T, JIANG W T, et al. Effects of Al on microstructure and properties of $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ high entropy alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7): 871-875.

在可显著提升合金的强度和硬度。如具有典型枝晶结构的 AlCrNiTiSi_x 难熔高熵合金, Si 含量的增加使相组成更加复杂, 其硬度 (HV) 在 $\text{Si}_x=1.0$ 时接近 900^[14]。Al 含量的变化同样在很大程度上影响合金的微观组织和力学性能。向具有单一 BCC 结构的 HfNbTaTiZr 合金中添加 Al, 其压缩性能可以得到显著提升, Al 的摩尔比为 1.0 时其屈服强度可达 1 489 MPa, 较 HfNbTaTiZr 合金增加了近 400 MPa^[15]。

当前对材料轻量化需求日益提高, 因此高密度难熔高熵合金的轻量化则显得尤为重要。Si 和 Al 均具有较低的密度, 加入后势必会降低合金的密度。因此, 在上述研究的基础上, 以 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ ($x=0.5, 0.8, 1.0$, 摩尔比) 低密度难熔高熵合金为研究对象, 探究 Al 含量变化对合金微观组织、密度以及力学性能的影响, 以期获得具有密度较低且性能优异的轻质难熔高熵合金, 为难熔高熵合金的设计和应用提供参考。

1 试验方法与材料

采用 DHL-500 II 型非自耗真空电弧熔炼炉制备了一组高硬度 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ ($x=0.5, 0.8, 1.0$, 摩尔比) 轻质难熔高熵合金。考虑到 Al 在较高温度的烧损, 配料时 Al 颗粒在设计质量的基础上增加了 10%。高熵合金铸锭在电磁搅拌作用下至少反复熔炼 6 次并采用电磁搅拌功能以保证成分均匀。采用 DUH-211s 型超显微动态硬度计对合金的显微硬度进行测试, 测试条件为在 1 N 的载荷下保持 20 s, 并随机选取 7 个点进行硬度测试, 去除最大值和最小值后取平均值; 采用 MTS-370 电子万能试验机对难熔高熵合金的室温压缩性能进行测试, 试样尺寸为 $\phi 4\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 初始应变速率为 $1 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 每组试样进行 3~5 次测试, 取其平均值。

采用 X 射线衍射仪 (XRD, Panalytical X'Pert Pro) 分析合金的晶体结构和相组成, 扫描速度为 $6\text{ (}^\circ\text{)}/\text{min}$, 试样尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, Cu-K α , 2θ 范围为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。采用日立 SU8010 冷场发射扫描电镜对合金的微观组织进行观察和分析, 采用扫描电镜配备的能量色散光谱 (EDS) 探测器对合金进行化学成分分析。采用阿基米德排水法测量 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 高熵合金的密度, 每组试样测 5 次后取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 合金的相组成

铸态 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 难熔高熵合金的 XRD 结果见图 1。由图 1a 可以看出, 添加 Al 后合金的相组成

并未发生变化, 均由 BCC 固溶相和 $M_5\text{Si}_3$ ($M=\text{Nb, Ti}$) 金属间化合物相组成, 且 $M_5\text{Si}_3$ 相的衍射峰强度都远低于 BCC 相, 这表明 BCC 相为基体相。 $x=0.5, 0.8, 1.0$ 时合金的 BCC 固溶体相在 (110) 晶面衍射峰对应的 2θ 分别约为 $39.982^\circ, 40.087^\circ, 40.133^\circ$, 可利用 Bragg 方程对其晶格常数进行计算, 获得不同合金基体相的晶格常数, 分别为 0.318 6、0.317 8、0.317 1 nm。由图 1b 可以看出, 随着 Al 含量增加, $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 合金 (110) 晶向的衍射峰向右偏移。显然, 由于 Al 原子半径较小, Al 的添加使该晶面的晶格常数减小。

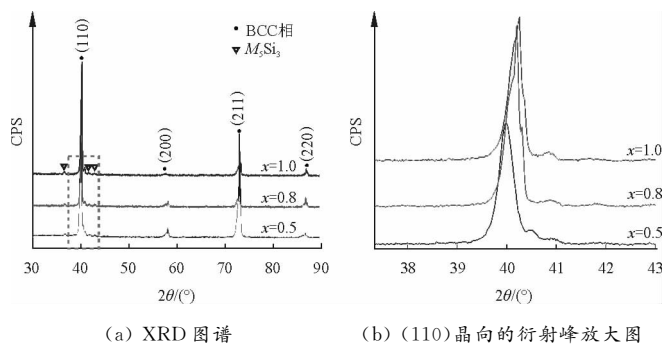


图 1 铸态 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 难熔高熵合金 XRD 图谱及 (110) 晶向的衍射峰放大图

Fig.1 XRD patterns of as-cast $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ refractory high entropy alloys and magnification of diffraction peak in (110) orientation

2.2 合金的微观组织

图 2 为铸态 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ ($x=0.5, 0.8, 1.0$) 难熔高熵合金的背散射电子图像。从图 2a 中看出, $x=0.5$ 时合金具有典型的树枝状凝固组织, 相邻晶粒之间存在明显的晶界, 且有两种不同形貌的枝晶存在, 这是水冷铜坩锅中凝固时冷却速度分布不均匀造成的。此外, 由于冷却速度较快, 但随着 Al 含量增加, 合金的基体形貌变化不大, 仍然保持着树枝状结构。明显的对比度表明, 合金由树枝晶和枝晶间区域构成。为了更清楚地说明微观组织形貌随 Al 含量的变化, 将枝晶区域定义为 DR、枝晶间区域定义为 ID。分析结果表明, $x=0.5, 0.8, 1.0$ 时合金的二次枝晶间距分别约为 24.3、27 和 17 μm , 证明随 Al 含量增加, 合金的树枝晶组织得到了细化。在更高的扫描电镜放大倍数下观察到, $M_5\text{Si}_3$ 相均为网状分布的黑色析出相, 随着 Al 含量增加, 颗粒状黑色析出相显著减少。

图 3 为 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 难熔高熵合金 DR 和 ID 区域在扫描电镜下的元素分布图。可以看出, 随着 Al 含量的增加, 合金中元素富集情况并未发生变化。其中, DR 区域主要富集 Al、Mo 和 V 元素, ID 区域则

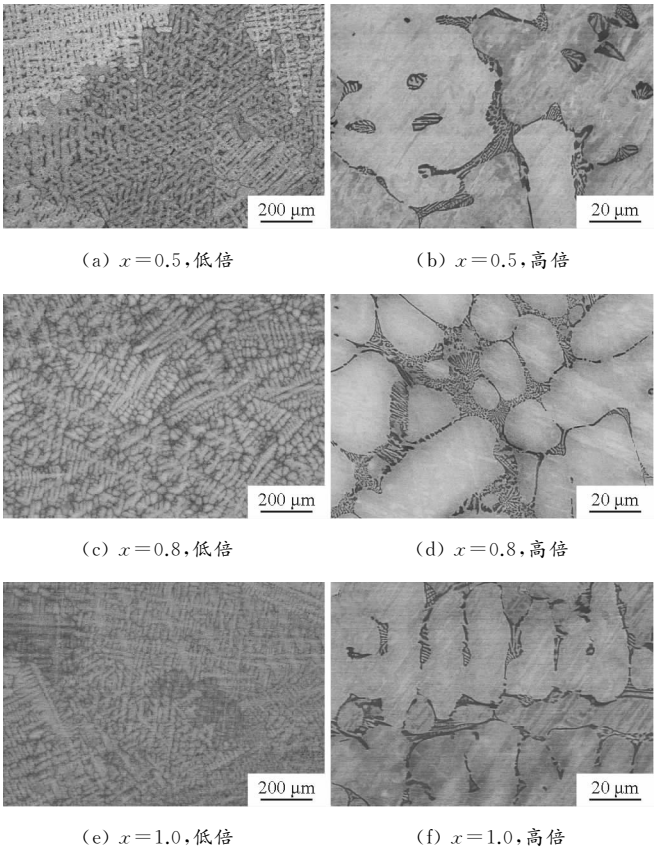


图 2 铸态 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 难熔高熵合金的背散射电子(BSE)图像

Fig.2 BSE images of as-cast $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ refractory high entropy alloys

主要富集 Ti 和 Si 元素,Nb 元素在 DR 和 ID 区域的分布比较均匀,并未随 Al 含量的增加而发生偏析,元素间的混合熵的相互作用使得合金倾向于形成无序固溶体。表 1 为合金的混合熵、混合焓、熔点以及原子半径差(Ω)和混合参数(δ)值的计算结果。相关研究表明,固溶体的形成准则为 $\Omega>1.1$, $\delta<6.6\%$, ΔH_{mix} 应在 $-20\sim 5\text{ kJ/mol}$ 范围内。随着温度持续降低,各组元之间的混合焓的作用将起主要作用,因而更倾向于形成第二相^[16-17]。由于 Mo 和 Nb 元素的熔点均高于合金中其他组元,因而在冷却过程中会先凝固,这就更有倾向性地形成了树枝晶的枝干区域。随着炉内温度降低,合金中 Si 等其他元素熔点相对较低,且 Si 与其他元素组成的二元混合焓较负,特别是 Ti 和 Si 元素的二元混合焓(ΔH_{mix})为 -66 kJ/mol , Nb_5Si_3 和 Ti_5Si_3 的熔点分别为 $2\,753\text{ K}$ 和 $2\,403\text{ K}$,低于组成合金基体 Nb 和 Mo 元素的熔点,因而在冷却过程中更易在枝晶间区域偏

表 1 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 难熔高熵合金的 $-\Delta H_{\text{mix}}$, ΔS_{mix} , T_{m} , Ω , δ

refractory high entropy alloys					
x	混合焓 $-\Delta H_{\text{mix}}/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	混合熵 $\Delta S_{\text{mix}}/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	熔点 T_{m}/K	Ω	$\delta/\%$
$x=0.5$	-18.50	14.02	2 191	1.66	3.23
$x=0.8$	-18.84	13.96	2 069	1.53	2.95
$x=1.0$	-19.82	14.00	2 028	1.43	2.88

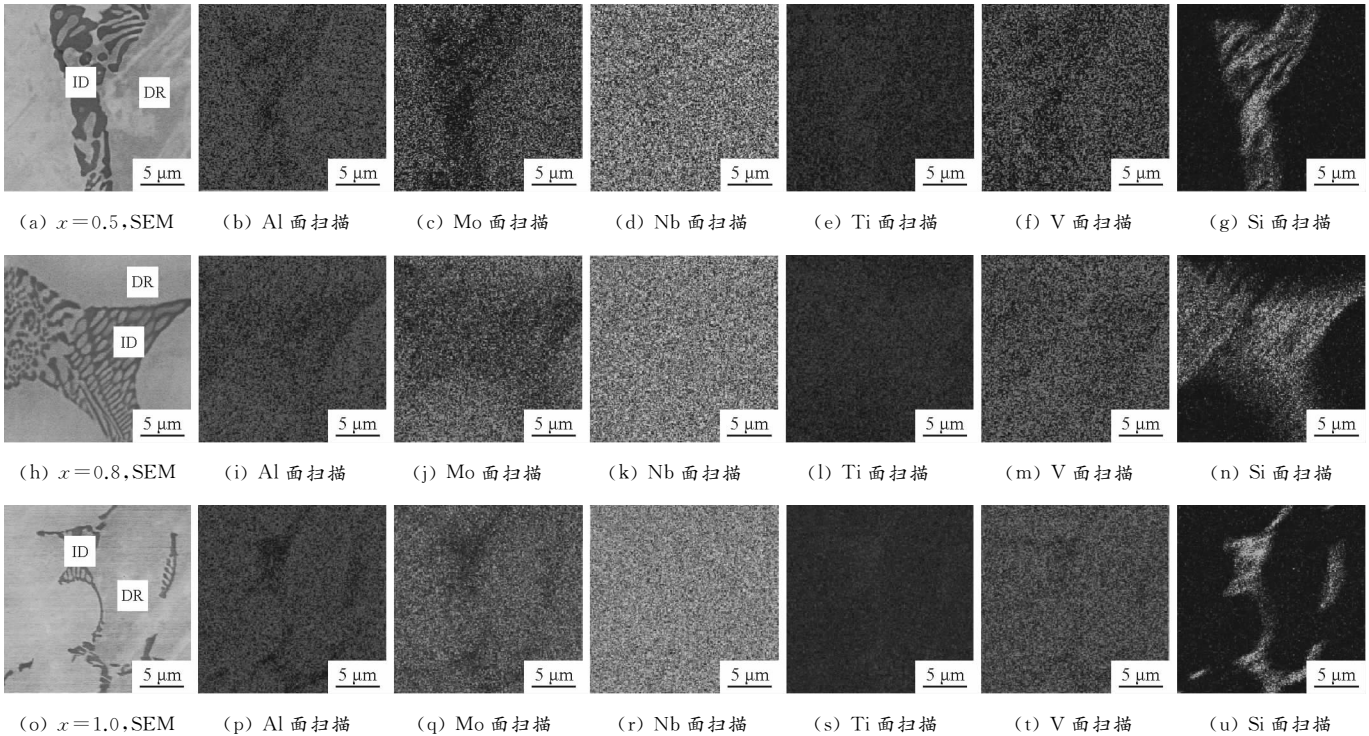


图 3 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ 难熔高熵合金元素分布面扫描

Fig.3 Elemental distribution surface scanning of $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbTiVSi}_{0.2}$ refractory high entropy alloy

聚并凝固形成 M_5Si_3 金属间化合物。因此,合金中形成由深色 M_5Si_3 金属间化合物相和浅色 BCC 固溶体基体相组成的共晶组织。

2.3 合金的密度和硬度

利用混合物准则和组成合金的各元素密度,计算了 $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 无序固溶体的密度^[18-19]:

$$\rho_{\text{mix}} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i A_i}{\sum_{i=1}^n c_i A_i / \rho_i}$$

式中, A_i 、 c_i 和 ρ_i 分别为元素 i 的相对原子质量、原子浓度和密度。同时,对 $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 高熵合金的密度进行了实测,结果见表 2。可以看出,Al 含量的增加使得合金的密度明显降低,从 6.18 g/cm^3 降低到 5.86 g/cm^3 ,试验确定的密度值与计算值吻合良好。

表 2 $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 难熔高熵合金试验密度、理论密度和显微硬度

Tab.2 Experimental density, theoretical density and microhardness of $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ refractory high entropy alloys			
x	试验密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	理论密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	硬度/ GPa
0.5	6.18 ± 0.10	6.19	5.91 ± 0.2
0.8	6.01 ± 0.06	5.96	6.07 ± 0.1
1.0	5.86 ± 0.08	5.82	6.72 ± 0.1

由表 2 还可以看出,Al 摩尔比从 0.5 增加到 1.0,合金的硬度从 5.91 GPa 增加到 6.72 GPa,提高了 13.7%,这主要归因于 Al 含量的增加导致的第二相强化。

2.4 合金的压缩性能

图 4 为 $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 难熔高熵合金的室温压缩应力-应变曲线,表 3 为压缩测试得到的合金屈服强度、抗压强度和断裂应变结果。 $x=0.5$ 时,合金抗压强度为 1 073 MPa。 $x=1.0$ 时,合金的屈服强度和抗压强度均显著提高,抗压强度比 $x=0.5$ 时提高了 35.8%,屈服强度从 897 MPa 提升到 1 229 MPa,增幅达 37%。然而, x 从 0.5 增加到 0.8 时,合金断裂应变从 13.6% 增加到了 13.7%,这可能是因为二次枝晶间距变化不大,但第二相增多,使得合金强度有所增加,但对塑性影响不大。 x 从 0.8 增加到 1.0,组织得到细化,根据 Hall-Petch 效应,合金的屈服强度得到提高,应变有所增加,达到 14.4%。另一方面,Al 作为溶质原子固溶到合金的基体当中,使得基体颗粒晶面间距 d 减小,在相同外应力的作用下,位错运动更难进行^[20],因而 Al 含量的增加导致 BCC 基体相产生严重晶格畸变,合金固溶强化效果增加。由于固溶强化的作用, $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 难熔高熵合金的强度显著提高。

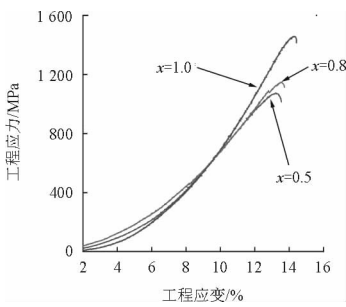


图 4 $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 难熔高熵合金室温压缩应力-应变曲线

Fig.4 Compressive stress-strain curves of $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ refractory high entropy alloys

表 3 $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 难熔高熵合金在室温下的压缩屈服强度、抗压强度和断裂应变

Tab.3 Compressive yield strength, compressive strength and strain of $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ refractory high entropy alloys at room temperature			
x	屈服强度/MPa	抗压强度/MPa	应变/%
0.5	897	1 073	13.6
0.8	936	1 148	13.7
1.0	1 229	1 457	14.4

3 结 论

(1) $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 难熔高熵合金由富 Al、Mo 和 V 元素的 BCC 固溶体基体相和富集 Ti 和 Si 元素的 M_5Si_3 相组成。Al 含量的增加并未改变合金的相组成,但使得 BCC 基体相在(110)晶向的衍射峰向右偏移,使其晶格常数减小。

(2)随 Al 含量增加, $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 合金的密度从 6.18 g/cm^3 降低到 5.86 g/cm^3 ,硬度从 5.91 GPa 增加到 6.72 GPa,提升了 13.7%。

(3)随 Al 含量增加, $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 合金的压缩屈服强度从 897 MPa 提升到 1 229 MPa,抗压强度从 1 073 MPa 提升到 1 457 MPa,断裂应变从 13.6% 增加到 14.4%。

(4) $Al_xMo_{0.5}NbTiVSi_{0.2}$ 合金强度和硬度的提升主要归因于 Al 原子固溶到合金基体造成严重的晶格畸变而引起的固溶强化效应以及第二相强化效应和晶粒细化引起的细晶强化效应。

参 考 文 献

[1] YE H 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): 299-303.

[2] CANTOR B, I. CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2004, A(375-377): 213-218.

- [3] 赵伊, 曹京宜, 方志刚, 等. 耐蚀高熵合金在岛礁装备中的应用前景[J]. 装备环境工程, 2021, 18 (11): 42-50.
- [4] 柳建, 郭煜, 蔡志海, 等. 轻质高熵合金在车辆装备中的应用前景[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (7): 849-852.
- [5] 宋繁策, 李鉴霖, 韩金科, 等. $\text{AlFeCoNiMo}_{0.2}$ 高熵合金热变形行为及热加工图[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 91-97.
- [6] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18(10): 1 758-1 765.
- [7] XU Q, CHEN D Z, TAN C Y, et al. NbMoTiVSi_x refractory high entropy alloys strengthened by forming BCC phase and silicide eutectic structure[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 60: 1-7.
- [8] JIANG W T, WANG X H, LI S Y, et al. A lightweight $\text{Al}_{0.8}\text{Nb}_{0.5}\text{Ti}_2\text{V}_2\text{Zr}_{0.5}$ refractory high entropy alloy with high specific yield strength[J]. Materials Letters, 2022, 328: 133 144.
- [9] SENKOV O N, SCOTT J M, SENKOVA S V, et al. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZr-Ti alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 6 043-6 048.
- [10] 徐琴, 王琪, 李娟, 等. B 对 NbMoTiVSi_{0.2} 难熔高熵合金组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (3): 292-296.
- [11] 要玉宏, 梁霄羽, 金耀华, 等. 新型 NbMoCrTiAl-1Si- $x\text{B}$ ($x=0,1$) 难熔高熵合金的微观组织及高温氧化行为研究[J]. 表面技术, 2020, 19 (6): 224-235.
- [12] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, GRIDNEVA A O, et al. Structure and hardness of B_2 ordered refractory AlNbTiVZr_{0.5} high entropy alloy after high-pressure torsion[J]. Materials Science & Engineering, 2018, A716: 308-315.
- [13] CAO Y K, ZHANG W D, LIU B, et al. Phase decomposition behavior and its effects on mechanical properties of TiNbTa_{0.5}ZrAl_{0.5} refractory high entropy alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 66: 10-20.
- [14] 叶喜惠, 徐张洋, 王童, 等. Si 含量对 AlCrNiTiSi_x 高熵合金微观组织和硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (12): 1 323-1 327.
- [15] LIN C M, JUAN C C, CHANG C H, et al. Effect of Al additions on mechanical properties and microstructure of refractory Al_xHfNbTaTiZr alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 624: 100-107.
- [16] TAKEUCHI A, INOUE A. Mixing enthalpy of liquid phase calculated by miedema's scheme and approximated with sub-regular solution model for assessing forming ability of amorphous and glassy alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18(9): 1 779-1 789.
- [17] GWALANI B, CHOUDHURI D, SONI V, et al. Cu assisted stabilization and nucleation of $L1_2$ precipitates in $\text{Al}_{0.3}\text{Cu-FeCrNi}_2$ FCC-based high entropy alloy[J]. Acta Materialia, 2017, 129: 170-182.
- [18] SENKOV O N, SENKOVA S V, WOODWARD C, et al. Effect of aluminum on the microstructure and properties of two refractory high-entropy alloys[J]. Acta Materialia, 2014, 68: 214-228.
- [19] JIANG W T, WANG X H, KANG H J, et al. Microstructure and mechanical properties of AlNbTiVZr system refractory high entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 925: 166 767.
- [20] CHEN S Y, YANG X, DAHMEN K A, et al. Microstructures and crackling noise of $\text{Al}_x\text{NbTiMoV}$ high entropy alloys[J]. Entropy, 2016, 16: 870-884.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

