

Y 添加对 CoCrFeMnNi 高熵合金组织及力学性能的影响

陈瑞润^{1,2} 张淑婧² 秦刚^{2,3} 高雪峰² 刘桐²

(1. 山东科技大学材料科学与工程学院; 2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院; 3. 香港大学机械与工程系)

摘要 通过向 FCC 结构的 CoCrFeMnNi 高熵合金中添加 Y 来改善其强度, 系统研究了 Y 含量对 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x ($x=0, 1, 2, 3, 4$, 摩尔比) 高熵合金微观组织与力学性能的影响。结果表明, 随着 x 增加到 2, 合金中有富 Y 和 Ni 的 HCP 结构的第二相生成, 呈长条状; 当 $x=4$ 时, HCP 相呈矩形镂空网状且规律分布, 并分布有黑色富 Y 金属间化合物。随着 Y 含量增加, 第二相体积分数逐渐增加。Y 的添加增加了合金的原子尺寸差及熵焓比, 有助于第二相的形成。力学性能测试表明, 压缩强度及显微硬度随着 Y 含量的增加逐渐升高, (CoCrFeMnNi)₉₆Y₄ 合金的屈服强度为 521 MPa, 显微硬度 (HV) 为 321.6, 较基体合金 CoCrFeMnNi (187 MPa, 160.3) 分别增加了 178.6%、100.6%。第二相体积分数增加是导致合金强度及硬度提升的主要原因。

关键词 高熵合金; 钇元素; HCP 相; 力学性能

中图分类号 TG139; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2022.03.004

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Effects of Y Addition on Structure and Mechanical Properties of CoCrFeMnNi High Entropy Alloys

Chen Ruirun^{1,2}, Zhang Shujing², Qin Gang^{2,3}, Gao Xuefeng², Liu Tong²

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

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology;

3. Department of Mechanical Engineering, the University of Hong Kong)

Abstract: The effects of Y addition on the microstructure and mechanical properties of (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x ($x=0, 1, 2, 3, 4$) high entropy alloys were investigated. The results indicate that the second phase of HCP structure rich in Y and Ni is formed with the increase of x to 2, presenting a long strip shape. When $x=4$, the HCP phase is distributed in a rectangular network shape, with the black Y-rich intermetallic compounds distributed. With the increase of Y content, the volume fraction of the second phase is increased gradually. The addition of Y promotes the atomic size difference and enthalpy-entropy ratio of the alloy, contributing to the formation of the second phase. The mechanical properties reveal that the compressive strength and microhardness are gradually increased with the increase of Y content. The yield strength and microhardness of (CoCrFeMnNi)₉₆Y₄ alloy are 521 MPa and 321.6 HV, which are increased by 178.6% and 100.6%, respectively, compared with those of the matrix CoCrFeMnNi alloy (187 MPa, 160.3 HV). The enhancement of the strength and hardness of the alloys is mainly attributed to the increase of the volume fraction of the second phase in the entropy alloys.

Key Words: High Entropy Alloy, Y Element, HCP Phase, Mechanical Properties

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51825401)

第一作者简介: 陈瑞润, 男, 1975 年出生, 教授, 哈尔滨 (518055), E-mail: chenruirun@163.com

通信作者: 秦刚, 男, 1989 年出生, 博士后, 哈尔滨 (518055), E-mail: qingang@hku.hk

引用格式: 陈瑞润, 张淑婧, 秦刚, 等. Y 添加对 CoCrFeMnNi 高熵合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(3): 286-291.

CHEN R R, ZHANG S J, QIN G, et al. Effects of Y addition on structure and mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3): 286-291.

[14] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. Progress in Materials Science, 2014, 61: 1-93.

[15] YEH J W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys[J]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2013, 65(12): 1 759-1 771.

[16] 郭策安, 赵宗科, 赵爽, 等. 电火花沉积 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的高速摩擦磨损性能[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 1 462-1 465.

[17] 叶超, 龙威, 周小平. 热压温度对 AlFeCrCoCu/ZL109 复合材料的组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(3): 22-29.

[18] 杨博. 高熵合金增强铜基复合材料的制备及性能研究[D]. 辽宁大连: 大连交通大学, 2019.

[19] 李晓东. 激光冲击 AlCoCrFeNi 高熵合金微观组织及力学性能的研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2019.

(编辑: 刘晨辉)

高熵合金(又称多主元合金)自从本世纪初被 YE H J W 等^[1]和 CANTOR B 等^[2]分别提出以来,由于其优异的综合性能而受到广泛关注^[3~8]。高熵合金含有多个主要元素,因此其合金种类较为复杂^[9]。这一方面为设计出更多具有优异性能的高熵合金提供了可能,另一方面也为高熵合金的成分设计带来了巨大的挑战^[10]。

对于传统合金而言,合金化是改善合金材料力学性能的常用方法^[2]。类似的研究方法也被应用到高熵合金领域。LI Q 等^[11]研究了添加 Al 对 CoCrFeMnNi 高熵合金的微观组织及力学性能的影响,发现 Al 有助于在 CoCrFeMnNi 高熵合金中形成 BCC 结构的第二相,并且随着 Al 含量的增加,BCC 相的体积分数逐渐增加,合金的强度也随之增加,但是塑性降低。STEPANOV N D 等^[12]研究了添加 V 对 CoCrFeMnNi 高熵合金的微观组织及力学性能的影响,发现 V 有利于合金中生成 σ 相,并且随着 V 含量的增加, σ 相体积分数也逐渐增加。一些其他元素的合金效应,如 V、Nb、Mo、Si、Ti,也被众多研究者关注^[13~17]。因此,合金化元素对高熵合金组织和力学性能的影响规律及其影响机制对高熵合金的发展具有积极意义。

CoCrFeMnNi 高熵合金为单相 FCC 高熵合金,具有较好的塑性,但是强度较低。前期的研究表明,Y 添加对提高合金的强度具有显著作用,如钛合金^[18]、镁合金^[19]以及高熵合金^[20]。因此,本课题研究了 $(\text{CoCrFeMnNi})_{100-x}\text{Y}_x$ ($x=0,1,2,3,4$) 高熵合金的微观组织及力学性能,并分析了其微观组织和力学性能之间的规律,并分析了 $(\text{CoCrFeMnNi})_{100-x}\text{Y}_x$ 高熵合金的相形成机制。

1 试验方法

熔炼原材料采用质量分数为 99.9% 的 Co、Cr、Fe、Mn、Ni 和 Y。采用真空非自耗水冷铜坩埚电弧炉在高纯氩气氛围下熔炼制备,在其中一个铜坩埚中装入海绵钛,其余铜坩埚分别装入配好的料。炉体内部抽至真空,先用高纯氩气洗炉 3 次,再通入高纯氩气至内部气压为 1×10^{-4} Pa。采用 600 目砂纸将试样打磨至表面光洁。对清洗后的扫描试样分别用 600、800、1000、1500、2000、3000 目砂纸打磨,然后进行电解抛光,腐蚀液采用体积分数为 90% 的冰乙酸与 10% 的高氯酸的混合液,电压为 27 V,抛光时间依照光镜下的腐蚀结果而定。采用铜阳极靶 Empyrean X 射线衍射仪对试样进行相结构分析,衍射角为 $20^\circ \sim 100^\circ$,电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描速度为 $10^\circ/\text{min}$ 。采用 AG-X plus 250KN 电子万能材料测试仪对合金进行压缩性能测

试。在每个纽扣锭的正中间部位取 3 个尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的试样,试样的上下面用 600、1200 目砂纸打磨平整,侧面棱角用 600 目砂纸打磨光滑,同时用游标卡尺精确测量圆柱体的尺寸和高度,以便于精确处理压缩数据。压缩试验的应变速率为 0.5 mm/min 。采用 HVS-1000 维氏硬度计进行显微硬度测试,采用磨制好的扫描试样,上下面保证平行,且待测面机械抛光良好,每个试样上打 5 个点,取平均值,加载载荷为 5 N,保荷时间为 30 s。采用 ZEISS 扫描电镜对所制备合金的显微组织进行分析,使用其附带的能谱仪对合金的成分分布进行检测。

2 试验结果与分析

2.1 $(\text{CoCrFeMnNi})_{100-x}\text{Y}_x$ 高熵合金的相组成

图 1 为 $(\text{CoCrFeMnNi})_{100-x}\text{Y}_x$ ($x=0,1,2,3,4$) 高熵合金的 XRD 图谱。可以看出,当无 Y 时,只有 FCC 相衍射峰,当 Y 的摩尔分数为 1% 时,出现了微弱的 HCP 相的衍射峰,因此可判定合金中组织仍为 FCC 相并析出了少量的 HCP 相。随着 Y 含量增加,HCP 相衍射峰的强度逐渐增加,当 Y 的摩尔分数为 4% 时,合金内部产生的 HCP 相较多。以上结果表明,随着 Y 添加量的增加,HCP 相的析出增多。

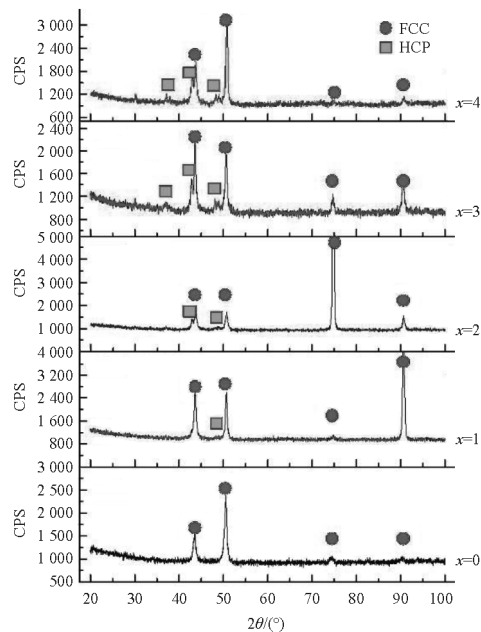


图 1 $(\text{CoCrFeMnNi})_{100-x}\text{Y}_x$ ($x=0,1,2,3,4$) 高熵合金 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of $(\text{CoCrFeMnNi})_{100-x}\text{Y}_x$ ($x=0,1,2,3,4$) high entropy alloy

2.2 $(\text{CoCrFeMnNi})_{100-x}\text{Y}_x$ 高熵合金的微观组织

图 2 为 $(\text{CoCrFeMnNi})_{96}\text{Y}_4$ 高熵合金的元素分布图。可以看出,组成合金的各个合金元素呈现不一样的聚集状态。Y 和 Ni 主要分布在生成的新相中,Cr 和

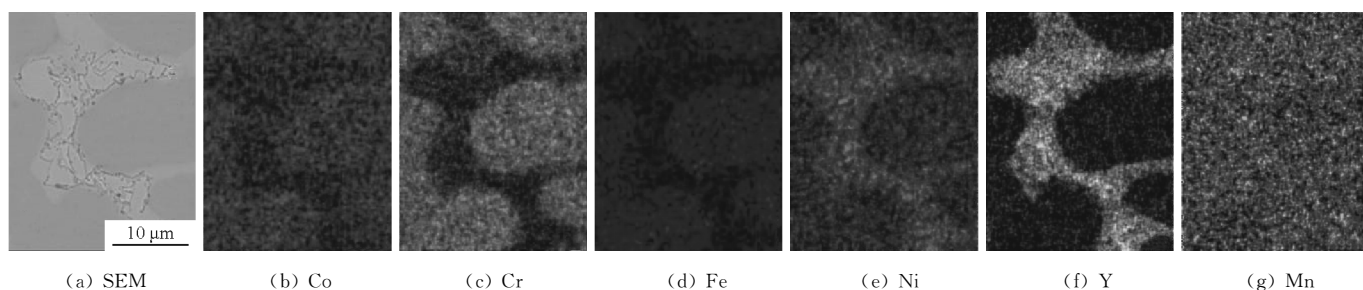

 图 2 (CoCrFeMnNi)₉₆Y₄ 高熵合金的元素分布

 Fig.2 Element distribution in (CoCrFeMnNi)₉₆Y₄ high entropy alloys

Fe 主要分布在合金基体中,Co 和 Mn 分布相对均匀,析出的第二相为富集 Y 元素的相。

图 3 为 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 合金的 SEM 微观组织形貌。从图 3b 可以看出,原始的 CoCrFeMnNi 高熵合金组织为单一的 FCC 相,这与 XRD 衍射峰结果一致。当 $x=1$ 时,合金中开始形成新相,即图 3c 和图 3d 中小岛形区域,经 XRD 物相分析,结合元素面分布、点

分布图分析可知,该相为富 Y 的 HCP 相。当 $x=2$ 时,新相明显增多,形貌开始变成长条状,且 XRD 衍射峰中 HCP 相的峰值明显增高。当 $x=3$ 时,合金内部出现了网状的新相,见图 3g。由图 3h 可以看出,新的析出相呈矩形镂空的网状,分布非常有规律。当 $x=4$ 时,白色的新相呈规则连续网状形貌,黑色的富 Y 金属间化合物分布其中,见图 3i。

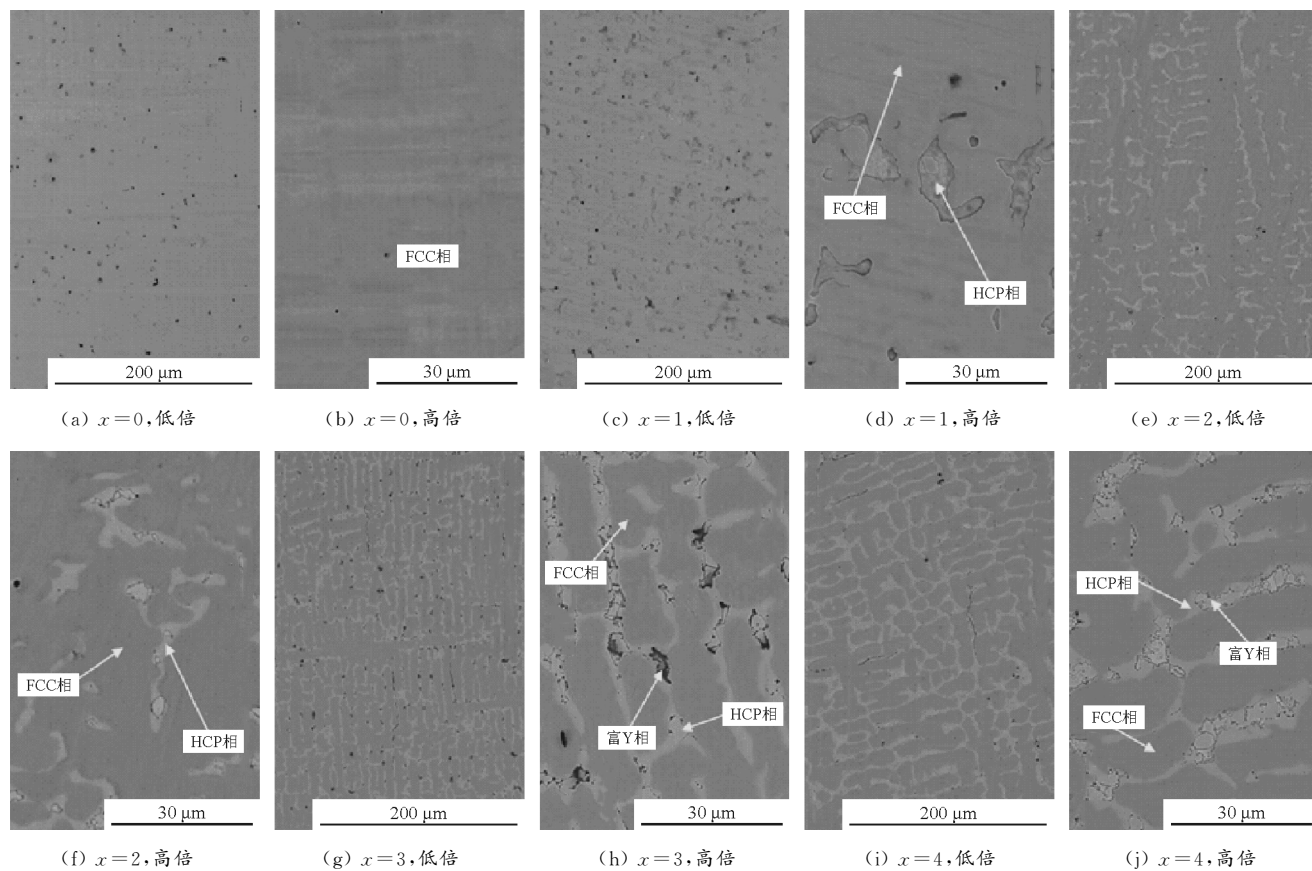

 图 3 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金的 SEM 组织

 Fig.3 SEM structure of (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x high entropy alloy

2.3 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金的压缩力学性能

图 4 为 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金的压缩应力-应变曲线,其中每个成分选取 3 个位置取样进行压缩性能测试。可以看出,随着 Y 含量逐渐增加,曲线的斜率逐渐增大,这表明合金的弹性应变模量逐渐增加,同时合金的屈服强度也逐渐增加。当无 Y 添加时,

CoCrFeMnNi 高熵合金的屈服强度为 187 MPa,当 $x=1$ 时,合金的屈服强度为 229 MPa,与原始合金相比,增加了 22.5%;当 $x=2$ 时,合金的屈服强度增至 394 MPa,与原始合金相比增加了 110.7%;当 $x=3$ 时,合金的屈服强度为 448 MPa,与原始合金相比增加了 139.6%;当 $x=4$ 时,合金的屈服强度为 521 MPa,与原始合金相比增加了 176.5%。

始合金相比,增加了 178.6%。可见,向 CoCrFeMnNi 高熵合金中添加 Y 可以显著提高合金的强度。

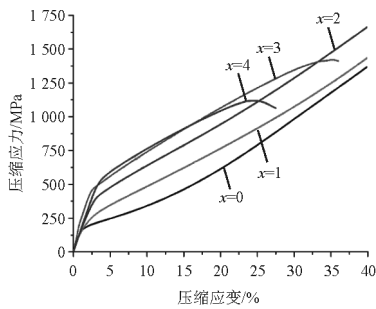


图 4 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金的室温压缩应力-应变曲线
Fig.4 Compressive stress-strain curves of (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x high entropy alloys at room temperature

图 5 为 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金的屈服强

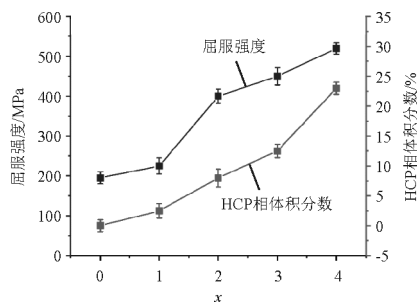


图 5 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金屈服强度与 HCP 相体积分数关系图

Fig.5 Relationship between yield strength and volume fraction of HCP phase of (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x high entropy alloys at room temperature

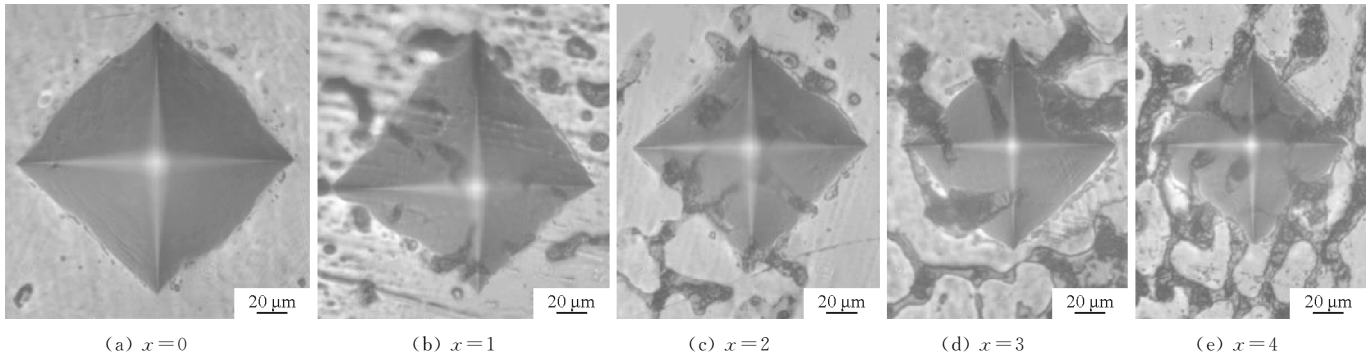


图 6 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金显微维氏硬度压痕形貌

Fig.6 Indentation morphology of micro-vickers hardness of (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x high entropy alloy

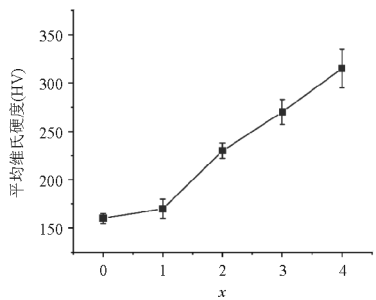


图 7 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金平均显微维氏硬度
Fig.7 Average micro Vickers hardness of (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x high entropy alloy

度、HCP 相体积分数与 Y 含量的关系图。可以看出,随着第二相增加,合金的屈服强度显著增加,这表明生成的 HCP 相是一种增强相。合金整体的屈服强度随着 HCP 相含量的增加而增加。

2.4 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金的显微硬度

表 1 为 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金的维氏硬度。根据计算,(CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金($x=0,1,2,3,4$)的显微维氏硬度变化范围分别为 3.3%、8.6%、3.7%、7.5%、12.3%,变化幅度随着 Y 含量的增加略有增大。这表明,随着 Y 的增加,合金内部析出相增多,合金各个部位的硬度相对均匀。

表 1 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金显微维氏硬度 (HV)
Tab.1 Micro Vickers hardness values of (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x high entropy alloy

合金	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5
Y ₀	160.9	160.0	160.3	158.6	161.9
Y ₁	176.0	167.0	168.4	162.5	168.8
Y ₂	223.8	223.3	229.2	224.5	231.5
Y ₃	287.7	285.4	273.4	267.6	277.8
Y ₄	313.7	305.7	333.3	311.9	343.3

图 6 为每个成分合金打点测试时随机选取的压痕形貌。可以看出,随着析出相的增多,压痕尺寸逐渐减小。图 7 为 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 的平均硬度曲线。计算得高熵合金 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x ($x=0,1,2,3,4$) 的平均硬度 (HV) 分别为 160.3、167.9、226.5、278.4、321.6,合金平均硬度随着 Y 含量的增加而增加,当 $x=$

1、2、3、4 时合金的平均维氏硬度相对于原始合金增幅分别为 4.7%、41.2%、73.7%、100.6%。

3 分析讨论

利用下列公式计算了 (CoCrFeMnNi)_{100-x}Y_x 高熵合金($x=0,1,2,3,4$)的混合熵、混合焓及原子半径差^[9,2~25]。

$$\Delta H_{\text{mix}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n \Omega_{ij} c_i c_j \quad (1)$$

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n (c_i \ln c_i) \quad (2)$$

$$\Omega_{ij} = 4\Delta H_{AB}^{\text{mix}} \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i (r_i - \bar{r})^2} \quad (4)$$

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i \quad (5)$$

式中, ΔH_{mix} 为高熵合金系统混合焓; $\Delta H_{AB}^{\text{mix}}$ 为组元 A 与组元 B 的混合焓; c_i, c_j 分别为第 i, j 种组元的摩尔分数; ΔS_{mix} 为高熵合金系统混合熵; $\bar{r}$ 为平均原子半径; Ω_{ij} 为常规固溶体相互作用参数; δ 为原子半径差; R 为气体常数 ($R=8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)。

图 8 为根据式 (1)~式 (3) 获得的 (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 高熵合金的混合焓和混合熵的变化曲线。可以看出, 合金的理论混合焓随着 Y 含量的增加呈逐渐降低的趋势, (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 高熵合金的理论混合熵随着 Y 含量的增加呈逐渐升高的趋势。

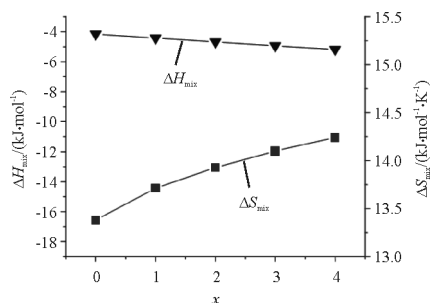


图 8 (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 高熵合金的混合焓与混合熵

Fig.8 Mixing enthalpy and mixing entropy of (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ high entropy alloys

该合金的相结构随着 Y 含量的增加, 逐渐由原始单一的面心立方结构变为面心立方、密排六方以及少量的富 Y 金属间化合物组合的结构。当无 Y 添加时, 合金为单一的面心立方相; 当 $x=1$ 时, 合金主要相结构仍然为面心立方固溶体, 并生成了少量的密排六方相固溶体, 此时焓降并没有发挥太大作用; 当 $x=2$ 时, 合金主要相结构为面心立方固溶体和少量的密排六方相固溶体并含有微量的富 Y 化合物, 此时焓的增加促进形成金属间化合物的作用显现出来; 当 $x=3, 4$ 时, 合金主要相结构为面心立方固溶体、密排六方相固溶体, 并且富 Y 化合物的含量明显增加, 此时焓的增加促进形成金属间化合物形成。

图 9 为通过式 (4) 和式 (5) 计算得出的 (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 高熵合金的原子半径差。可以看出, 随着 Y 含量增加, (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 高熵合金的原子半径差增大。这增加了 Y 元素固溶到基体中的难度, 因此过量的 Y 元素将会从基体中析出, 有助于金属间化合物的形成, 并且随 Y 含量增加, 其体积分数也逐

渐增加。

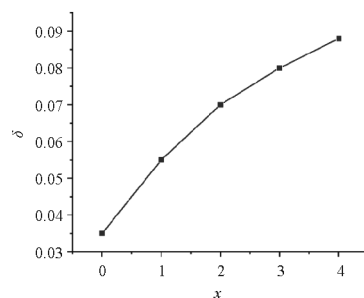


图 9 (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 高熵合金的平均原子半径差

Fig.9 Average atomic radius difference of (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ high entropy alloys

4 结 论

(1) 随着 Y 含量增加, 在单相 FCC 的 CoCrFeMnNi 基体高熵合金中形成了具有富 Y 和 Ni 元素的 HCP 结构的第二相。当 Y 的摩尔比超过 3, 合金中析出了黑色的富 Y 的金属间化合物。

(2) 随着 Y 含量增加, (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 合金中 HCP 结构的第二相的体积分数逐渐增加, 形貌由长条状逐渐演变为镂空网状。

(3) Y 加入到 CoCrFeMnNi 高熵合金中, 原子半径差增加, 这促进了合金中第二相的生成。

(4) (CoCrFeMnNi) $_{100-x}$ Y $_x$ 随着 x 从 0 增加至 4, 合金的弹性应变模量增加, 屈服强度由基体的 187 MPa 增加至 521 MPa。同时, 显微硬度 (HV) 由基体的 160.3 增加至 321.6。HCP 相的形成和增加显著改善了合金的屈服强度和硬度。

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 (5): 299-303.
- [2] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A(375-377): 213-218.
- [3] CHEN R R, QIN G, ZHENG H T, et al. Composition design of high entropy alloys using the valence electron concentration to balance strength and ductility[J]. Acta Materialia, 2018, 144: 129-137.
- [4] QIN G, CHEN R R, MAO H H, et al. Experimental and theoretical investigations on the phase stability and mechanical properties of Cr₇Mn₂₅Co₉Ni₂₃Cu₃₆ high-entropy alloy[J]. Acta Materialia, 2021, 208: 116 763.
- [5] QIN G, CHEN R R, PETER K, et al. A novel face-centered-cubic high-entropy alloy strengthened by nanoscale precipitates[J]. Scripta Materialia, 2019, 172: 51-55.
- [6] QIN G, WANG S, CHEN R R, et al. Microstructures and me-

- chanical properties of Nb-alloyed CoCrCuFeNi high-entropy alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(2): 365-369.
- [7] SUN S J, TIAN Y Z, LIN H R, et al. Enhanced strength and ductility of bulk CoCrFeMnNi high entropy alloy having fully recrystallized ultrafine-grained structure[J]. Materials & Design, 2017, 133: 122-127.
- [8] 张辉, 李兴国, 郭古青, 等. FeAl_xNiCrMn 系高熵合金力学性能的第一性原理计算[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 1 172-1 176.
- [9] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. Progress in Materials Science, 2011, 61: 1-93.
- [10] GUO N N, WANG L, SU Y Q, et al. Microstructure and properties of novel quinary multi-principal element alloys with refractory elements[J]. China Foundry, 2015(5): 319-325.
- [11] LI Q, ZHAO S, BAO X, et al. Effects of AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy on microstructure and mechanical properties of pure aluminum[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 52(17): 1-11.
- [12] STEPANOV N D, SHAYSULTANOV D G, SALISHCHEV G A, et al. Effect of V content on microstructure and mechanical properties of the CoCrFeMnNiV_x high entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 628: 170-185.
- [13] HE F, WANG Z, CHENG P, et al. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 656: 284-289.
- [14] DONG Y, ZHOU K Y, LU Y P, et al. Effect of vanadium addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy[J]. Materials & Design, 2015, 57: 67-72.
- [15] 黄蕾, 王雪洁, 王长征, 等. Ti 对 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金微观组织和摩擦性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(5): 562-566.
- [16] CHANG R, FANG W, YAN J, et al. Microstructure and mechanical properties of CoCrNi-Mo medium entropy alloys: Experiments and first-principle calculations[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 62: 25-33.
- [17] ZHU J M, FU H M, ZHANG H F, et al. Synthesis and properties of multiprincipal component AlCoCrFeNiSi_x alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527: 7 210-7 214.
- [18] LI B H, KONG F T, CHEN Y Y. Effect of yttrium addition on microstructures and room temperature tensile properties of Ti-47Al alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24(3): 352-356.
- [19] LI Q, WANG Q D, WANG Y X, et al. Effect of Nd and Y addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Zn-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427: 115-123.
- [20] ZHANG L J, ZHANG M D, ZHOU Z, et al. Effects of rare-earth element, Y, additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A725: 437-446.
- [21] YANG X, ZHANG Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys [J]. Mater. Chem. Phys., 2012, 132(2-3): 233-238.
- [22] TAKEUCHI A, INOUE A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element[J]. Materials Transactions, 2006, 46(12): 2 817-2 829.
- [23] ZHANG Y, ZHOU Y, LIN J, et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(6): 534-538.
- [24] FENG R, GAO M C, LEE C, et al. Design of light-weight high-entropy alloys[J]. Entropy, 2016, 18(9): 333.
- [25] ZHANG Y, LU Z P, MA S G, et al. Guidelines in predicting phase formation of high-entropy alloys [J]. MRS Communications, 2014, 4(2): 57-62.

(编辑:彭瑾)

铝镁钪金属 3D 打印技术助力 北京冬奥会

2021 年初,工业级 3D 打印领航企业华曙高科与中国奥林匹克委员会奥运会备战办公室签署协议,采用金属 3D 打印技术为参加北京冬奥会的中国短道速滑队提供装备优化解决方案,为运动员量身定制轻量化、个性化新型短道速滑冰刀,为国家队征战 2022 北京冬奥会贡献出一份力量。

华曙研发团队通过分析运动员在短道速滑转弯中的动作,采集运动员作用在冰刀上的数据,得出冰刀受力工况,并对冰刀刀管进行轻量化拓扑优化,保证了刀管的流线型外观及质量、横向和切向强度的几何优化设计,满足了安装、定位、加工等工艺需求。

传统冰刀刀管采用铝合金材料生产,华曙 3D 打印冰刀刀管则采用了铝镁钪合金(AlMgSc)材料。

铝镁钪合金是在传统铝镁合金基础上开发的新一代航天结构材料,具有比强度高、塑性好、耐高温(250℃)等特性,华曙研发团队在 FS421M 金属 3D 打印设备上,测试了铝镁钪材料的强度、韧性、疲劳等力学性能,获得最优化参数,成功开发出铝镁钪金属 3D 打印工艺。铝镁钪合金打印的结构件,具有比传统铝合金更高的强度,且能替代某些钛合金部件,达到减重降费的效果。

(摘自中国有色网)