

Al_xCoCrFeNi高熵合金组织性能研究

马金磊^{1,2}, 孟祥然^{1,2}, 曲涛^{1,2}

¹辽宁科技学院冶金工程学院, 辽宁 本溪

²辽宁省低品位非伴生铁矿优化应用重点实验室, 辽宁 本溪

Email: m261140814@163.com

收稿日期: 2021年3月29日; 录用日期: 2021年4月13日; 发布日期: 2021年4月27日

摘要

采用激光烧结法制备Al_xCoCrFeNi (x = 1; 1.5; 2)高熵合金, 通过测试其显微组织、成分和力学性能, 研究Al元素含量的变化对高熵合金的组织性能的影响。实验结果表明, 当x从1到1.5再到2不断增大时, Al_xCoCrFeNi合金的晶体结构由FCC + BCC向BCC不断转变, 高熵合金的晶格畸变和硬度也随之增大; 当x = 2时晶格畸变达到最大, 同时硬度也达到最大值512.5 HV。

关键词

高熵合金, 硬度, 组织结构

Research on Microstructure and Properties of Al_xCoCrFeNi High-Entropy Alloy

Jinlei Ma^{1,2}, Xiangran Meng^{1,2}, Tao Qu^{1,2}

¹School of Metallurgy Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

²Liaoning Key Laboratory of Optimized Utilization for Non-Associated Lean Iron Ore, Benxi Liaoning

Email: m261140814@163.com

Received: Mar. 29th, 2021; accepted: Apr. 13th, 2021; published: Apr. 27th, 2021

Abstract

Al_xCoCrFeNi (x = 1; 1.5; 2) high-entropy alloy was prepared by laser sintering. The effect of Al content on the microstructure and properties of high-entropy alloy was studied by measuring its microstructure, composition and mechanical properties. The experimental results show that when x increases from 1 to 1.5 and then to 2, the crystal structure of Al_xCoCrFeNi alloy changes from FCC + BCC to BCC, and the lattice distortion and hardness of the high entropy alloy also increase; the lattice distortion reaches its maximum when x = 2, and the hardness also reaches the maximum of 512.5 HV.

文章引用: 马金磊, 孟祥然, 曲涛. Al_xCoCrFeNi 高熵合金组织性能研究[J]. 材料化学前沿, 2021, 9(2): 66-70.

DOI: 10.12677/amc.2021.92008

Keywords

High Entropy Alloys, Hardness, Structure

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高熵合金是一类新型金属材料, 1995年由台湾学者叶均蔚提出了高熵合金的概念, 即: 合金元素一般大于等于5种元素, 且每种元素的原子百分比为5%~35%, 熵值大于 $1.61R$ [1]。高熵合金可以通过机械合金化、电弧熔炼和激光熔覆等方法来制备[2]。由于多种主要元素形成固溶体合金的高熵效应、迟缓扩散效应和鸡尾酒效应, 导致高熵合金易形成面心立方、体心立方结构或两相混合结构, 拥有了高强的硬度、良好的耐腐蚀性、耐磨性和抗高温软化性等优点[3], 被广泛地应用到装备制造、航空航天和能源工程等高新技术领域之中[4]。

目前, 过渡族金属元素组成的高熵合金研究处于初级阶段, 研究内容主要是制备方法、组元比例、微量非金属元素对合金组织、性能的影响[5][6]。高熵合金在性能方面主要集中在热稳定性、压缩性能等方面, 结构方面主要集中于形成简单固溶体结构[7]。AlFeCuCoNiCr、AlCoCrCuFeNi和AlCrFeNi等系列的高熵合金系列都被广大的学者研究, 在高熵合金中主要元素的合理设计能使其满足我们的需求。鲍亚运等[8]发现随Al元素含量的增加, FeCrNiCoCu高熵合金的结构由FCC向BCC转变并且合金的硬度和耐冲蚀性在显著提高。郑必举等[9]发现随Al元素含量的增加, $Al_xCrFeCoCuNi$ 高熵合金高温表面 Al_2O_3 氧化膜的厚度也随之变厚, 从而使合金具有良好的抗氧化性。李安敏等[10]研究发现 $AlCr_xCuFeNi$ 合金的硬度随Cr含量的增加而增加, 是晶体结构, 固溶强化和晶格畸变因素综合作用结果。Hsu等[11]发现, Fe元素含量的增加使合金 $AlCoCrFe_xMo_{0.5}Ni$ 硬度降低和耐磨性降低。

本文选择了5组元 $Al_xCoCrFeNi$ 作为研究对象, 主要研究Al对 $Al_xCoCrFeNi$ ($x = 1; 1.5; 2$)组织结构和力学性能的影响, 为高熵合金主要元素的选择提供一定的实验基础。

2. 实验

2.1. 实验材料

实验中使用的Al、Co、Cr、Fe、Ni金属粉末纯度为99.9%, 颗粒度是300目。根据x的值来确定每种元素的质量, 取试样质量为15g, 可以得出每组试样中各元素的质量, 如表1所示。使用真空球磨机混合粉体, 球磨时间为4h, 在100MPa的压强下压坯, 得到直径 Φ 为15mm块状试样。

Table 1. Sample numbers and mass of components of high entropy alloys

表 1. 高熵合金试样编号及各组分的质量

试样编号	x	Al (g)	Co (g)	Cr (g)	Fe (g)	Ni (g)
1	1	1.601	3.498	3.083	3.320	3.498
2	1.5	2.280	3.321	2.927	3.152	3.321
3	2	2.893	3.161	2.786	3.000	3.161

2.2. 实验方法及设备

使用功率为 1 kW 的 CO₂ 激光器, 持续时间 10 s, 完成试样的烧结。合金试样的物相通过布鲁克 advance D8 型 X 射线衍射分析仪进行测试, 扫描角度为 10°~90°, 扫描速度为 0.1°/s。合金的显微组织和成分通过蔡司 EVO-18 扫描电子显微镜和牛津 X-max 能谱仪进行测试。

使用 HVS-50 维氏硬度计测量试样的硬度, 荷载 10 kgf, 保持时间 10 s。每个试样测试 3 次硬度值, 取平均值。使用 MMW-1 摩擦磨损试验机测试试样的磨损性能, 对磨材料为 GCr15 淬火钢, 试验力为 200 N, 转速为 200 r/min, 测试时间为 6 min。

3. 测试结果分析

3.1. XRD 分析

图 1 为 Al_xCoCrFeNi 高熵合金的 XRD 图谱; 其中 1 为试样 AlCoCrFeNi, 2 为试样 Al_{1.5}CoCrFeNi, 3 为试样 Al₂CoCrFeNi。随着 Al 元素的增加, 高熵合金的晶体结构由 FCC + BCC 向 BCC 转变, Al 元素的原子半径大, 引起的晶格畸变也随着含量的增加而增大, 晶体结构也从密堆结构向非密堆结构转变。由于激光烧结急冷的作用, 高熵合金的结晶度低于类似原子组成的铸态高熵合金。

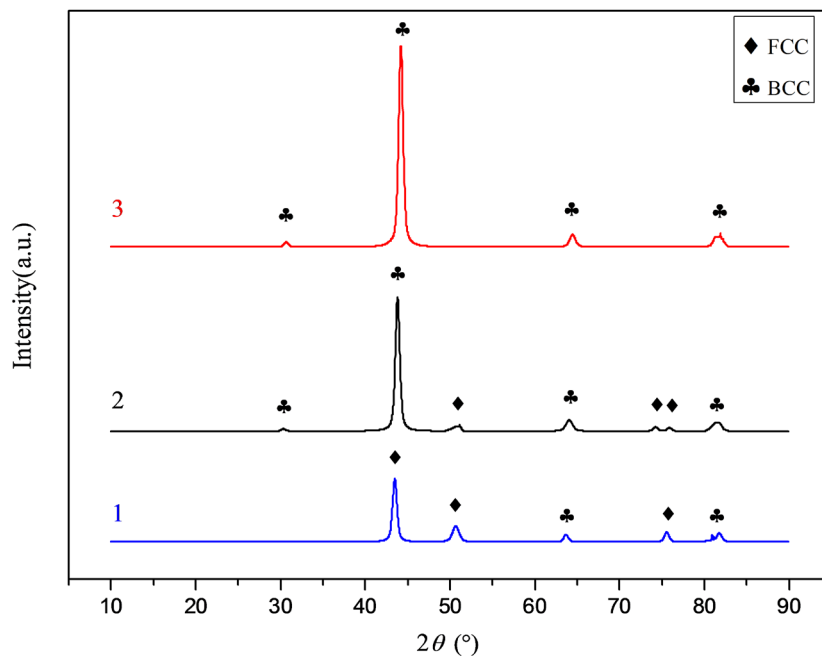


Figure 1. XRD map of Al_xCoCrFeNi high entropy alloys

图 1. Al_xCoCrFeNi 高熵合金的 XRD 图谱

3.2. 显微组织分析

图 2 为 Al_xCoCrFeNi 高熵合金的背散射(BSD)图像, 表 2 为 Al_xCoCrFeNi 高熵合金的 EDS 数据(原子百分比, %)。图 2 中(1)为试样 AlCoCrFeNi, (2)为试样 Al_{1.5}CoCrFeNi, (3)为试样 Al₂CoCrFeNi; (2) (3)中的黑色部分为孔隙。随着 Al 元素增加, 晶格畸变增大, 晶间组织增加, 晶间组织主要是由富 Cr 的 BCC 相组成, CoFeNi 三种元素的原子半径十分接近, 更容易形成固溶体结构, Cr 元素的熔点高于其他元素, 在形成晶粒时, Cr 元素被排斥到晶间组织中。

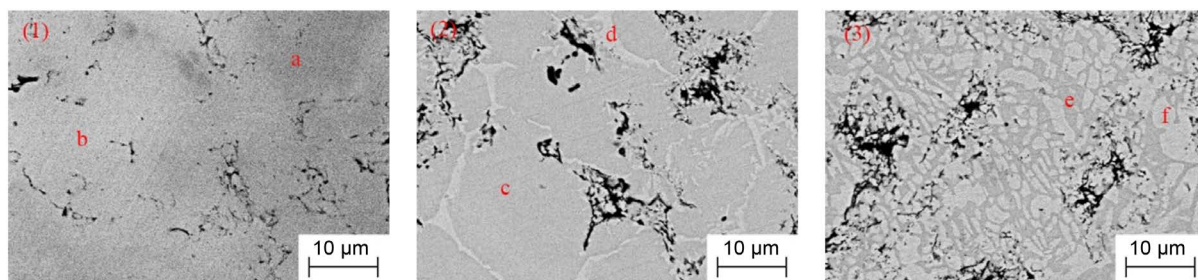


Figure 2. BSD image of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy

图 2. $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的 BSD 图像

Table 2. $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ EDS data of high entropy alloy matrix (atomic percentage, %)

表 2. $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金基体的 EDS 数据(原子百分比, %)

试样编号	能谱点	Al	Co	Cr	Fe	Ni
(1)	a	22.17	20.24	18.12	19.82	19.65
	b	16.46	20.06	21.72	21.18	20.58
(2)	c	23.4	18.54	10.96	21.57	25.53
	d	29.43	18.88	19.99	14.38	17.32
(3)	e	28.37	20.62	8.33	23.54	19.14
	f	33.25	14.32	18.33	16.68	17.42

3.3. 硬度与磨损测试

根据图 3 中 $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金硬度和磨损测试结果可知,随着 Al 元素含量的增大, $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的硬度也变大,这是由于高熵合金的晶格畸变增大,位错阻力增大,从而提高了合金的硬度。与此相对的就是合金的抗磨损性能提高。

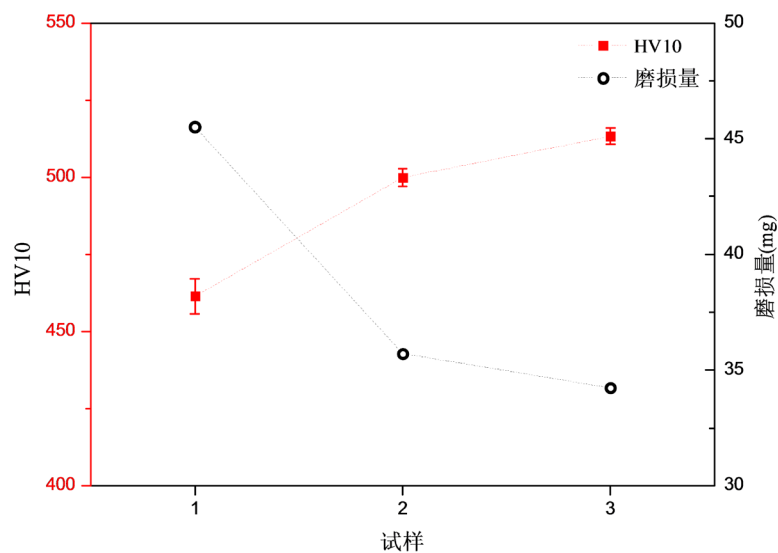


Figure 3. Vickers hardness and wearing volume of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys

图 3. $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的维氏硬度和磨损量

4. 结论

1) $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的晶体结构由 FCC 和 BCC 组成, 随着 Al 元素的增加, $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的晶体结构向富 Cr 的 BCC 转变, Al 元素的原子半径大, 引起的晶格畸变也随着含量的增加而增大, 晶体结构也从密堆结构向非密堆结构转变。

2) 随着 Al 元素含量的增加, $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的维氏硬度值在不断地增加, 磨损量在不断地减小。

基金项目

本辽宁科技学院 2020 年大学生创新创业训练计划项目(202011430087); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(202007111)。

参考文献

- [1] Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., *et al.* (2004) Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, **6**, 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- [2] 李梦娇, 董应虑, 张瑞卿, 等. 高熵合金的制备方法及其应用进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(22): 58-63.
- [3] 欧子义, 王春伟, 唐建江. 高熵合金的最新研究进展[J]. 材料热处理技术, 2010, 39(22): 36-38.
- [4] 张爱军, 韩杰胜, 苏博, 等. AlCoCrFeNi 高熵合金的高温摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 776-783.
- [5] 屈乐, 王维刚, 李培友, 等. 过渡族 Fe-Cr-Co-Ni 系高熵合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(16): 15-19.
- [6] 梁栋, 周文博, 龚学磊, 等. 高熵合金的概念及其特点[J]. 中国金属通报, 2019(4): 223-224.
- [7] 胡成平, 赵亚林, 王杰鹏, 等. 高浓度过氧化氢中 AlCoCrFeNiCu 的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(5): 439-446.
- [8] 鲍亚运, 纪秀林, 顾鹏, 等. Al 含量对 FeCrNiCoCu 高熵合金涂层组织结构及冲蚀性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(4): 421-429.
- [9] 郑必举, 蒋业华, 胡文. 铝含量对 AlxCrFeCoCuNi 高熵合金涂层抗氧化性能的影响[J]. 应用激光, 2016, 36(1): 18-22.
- [10] 李安敏, 张喜燕. Cr 对 Al-Cr-Cu-Fe-Ni 高熵合金组织与硬度的影响[J]. 有色金属, 2009, 61(4): 18-21.
- [11] Hsu, C.Y., Sheu, T.S., Yeh, J.W., *et al.* (2010) Effect of Iron Content on Wear Behavior of AlCoCrFeMo0.5Ni High-Entropy Alloys. *Wear*, **268**, 653-659. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.10.013>