

主元素对CoFeNi系高熵合金组织性能影响的研究综述

程金阳^{1,2}, 孟祥然¹, 郭晓影¹, 周佳琪¹, 隋林江¹

¹辽宁科技学院, 冶金与材料工程学院, 辽宁 本溪

²湖南华菱涟源钢铁有限公司, 湖南 娄底

收稿日期: 2023年5月6日; 录用日期: 2023年6月22日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

高熵合金是一种新型结构合金, 相比传统合金, 它具有更优异的硬度、耐腐蚀性和抗拉强度等性能, 具有很高的研究价值。通过大量的实验研究发现, 高熵合金的制备方法多样, 且不同的合金元素添加能够改变其整体的性能, 如: Cr、Mo、Ti、B元素可以提高高熵合金的硬度, Mn元素则可提高电阻率, Al、Cr可以改变高熵合金的相结构, Zr元素可以增强高熵合金的晶格畸变等。本文综合现有的研究结果, 总结了高熵合金的常用制备工艺以及各元素对于高熵合金的组织性能的影响。

关键词

高熵合金, 显微组织, 力学性能

A Research Review of the Effects of Principal Elements on Microstructure and Properties of CoFeNi Series High-Entropy Alloys

Jinyang Cheng^{1,2}, Xiangran Meng¹, Xiaoying Guo¹, Jiaqi Zhou¹, Linjiang Sui¹

¹College of Metallurgy and Materials Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

²Hunan Valin Lianyuan Iron and Steel Co., Ltd., Loudi Hunan

Received: May 6th, 2023; accepted: Jun. 22nd, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

High-entropy alloys (HEAs) are a new type of structural alloy that exhibit superior properties such

文章引用: 程金阳, 孟祥然, 郭晓影, 周佳琪, 隋林江. 主元素对 CoFeNi 系高熵合金组织性能影响的研究综述[J]. 冶金工程, 2023, 10(2): 56-65. DOI: 10.12677/meng.2023.102007

as hardness, corrosion resistance, and tensile strength compared to traditional alloys. Therefore, they have high research value. Through extensive experimental research, it has been found that HEAs can be prepared by various methods, and the addition of different alloying elements can change their overall properties. For example, Cr, Mo, Ti, and B elements can increase the hardness of HEAs, Mn element can increase their resistivity, Al and Cr elements can alter their phase structure, and Zr element can enhance their lattice distortion. This paper summarizes the common preparation processes of HEAs and the effects of different elements on their microstructure and properties based on existing research results.

Keywords

High-Entropy Alloys, Microstructure, Mechanical Property

Copyright © 2023 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

随着社会的不断发展,人们对于合金材料需求不断增加,传统合金性能难以突破极限,为解决这一难题,性能各异的新型合金材料的研究越来越受到重视[1]。高熵合金是一种新型合金,由于独特的晶体结构和特性,因此具有了复杂的机械性能[2] [3] [4] [5],常温下,高熵合金要比一般材料结构的屈服强度更高[6]。传统合金在高温下会出现软化的现象,而高熵合金在高温条件下表现出高强度、高韧性的特性[7]。Qiao 等[8]研究发现,高熵合金在低温下屈服强度和断裂强度比在室温条件下要高,然而脆性没有发生改变,也没有发生韧性和脆性之间的转变。高熵合金主元元素种类多于传统合金,赋予了高熵合金在高强度、高硬度[9]、耐腐蚀性[10] [11]、抗氧化性[12]和高韧性[13]等优异的性能,使得其在航空航天、医疗器械、能源、电子和材料科学等领域有着广泛的应用前景。

2. 高熵合金的定义及特性

根据吉布斯自由能公式 $\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix}$, 合金体系的熵越高,体系自由能 ΔG_{mix} 越低,越容易形成多元素的固溶体结构[14]。在忽略到对体系混合熵影响较小的组分的前提下,构型熵成为主导部分,并能够用热力学中的玻尔兹曼公式来计算。我国台湾清华大学 Yeh 等[15]教授首先提出高熵合金的概念:高熵合金也叫多主元合金,由五种主要元素(一般不超过 13 种金属或非金属)组成,主元元素的成分占比大致相同,并且主要元素的原子分数一般在 5%~35%之间,凝固后基体一般为简单的固溶体结构(面心立方 FCC、体心立方 BCC 或密排六方 HCP 等),具有热力学上的高熵效应、结构上的晶格畸变效应、动力学上的迟滞扩散效应以及性能上的“鸡尾酒”效应[16]。

经过近些年来的研究,按照组成元素的不同,高熵合金可以分为轻质高熵合金[17]、过渡族高熵合金、难熔高熵合金[18]等。常用的高熵合金制备工艺可分为三大类,如图 1 所示,第一种是由液态制备合金,包括真空电弧熔炼[19] [20]、真空感应熔炼[21] [22]、激光熔覆[23] [24]和增材制造技术[25]等;第二种是由固态制备合金,包括粉末冶金法[26]、机械合金法[27]和等离子热压烧结[28] [29] [30]等;第三种是由气态制备合金,如磁控溅射技术[31]等,每种工艺的优缺点如表 1 所示。

研究发现,高熵合金的理论晶体结构可以用混合焓[32]、价电子浓度[33]、原子半径差[34]和电负性差[35]等参数预测,而实际晶体结构同时也受高熵合金制备工艺方法和参数影响,与理论结构存在不同。

但在设计高熵合金元素种类及成分比时，使用参数预测合金相结构仍然是很常用的手段。

CoFeNi 系高熵合金主要是 FCC 相固溶体结构，塑性和拉伸性能优异[36]。但较差的硬度和耐磨性限制了该系高熵合金的应用范围。因此，科研人员将研究重点放在改善 CoFeNi 系高熵合金的性能上，如：采用不同的合金制备工艺、加入不同的主元元素以及改变成分含量等。

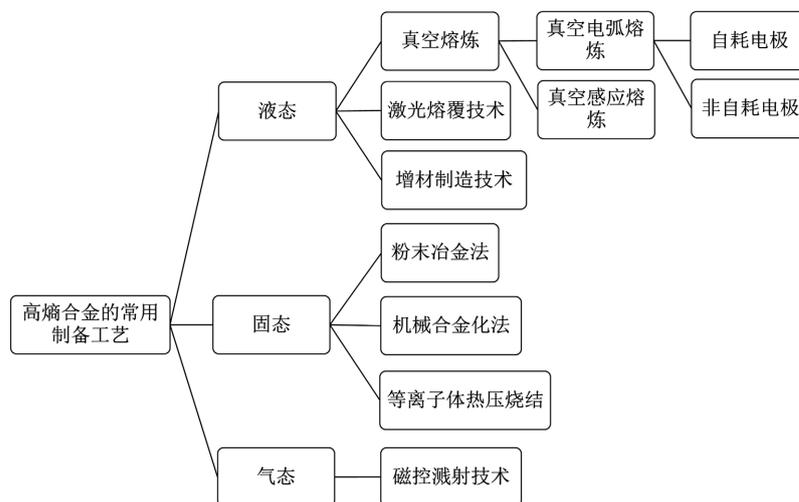


Figure 1. Preparation processes of commonly used high-entropy alloys
图 1. 常用高熵合金的制备方法

Table 1. Advantages and disadvantages of commonly used preparation processes for high-entropy alloys

表 1. 常用高熵合金制备工艺的优缺点

工艺名称	优点	缺点
真空电弧熔炼	自耗电电极熔炼：熔炼速度快，能够制造尺寸较大的合金坯体，且产能较高 非自耗电电极熔炼：操控方便，效率高	不能熔炼粉末材料，生产大尺寸铸锭容易产生合金化元素的偏析
真空感应熔炼	合金的纯度高，熔炼过程中引入的杂质少	产出的合金的均质化程度不够，在制备高熵合金时，通常需要反复熔炼获得均匀成分的合金
激光熔覆技术	在快速凝固过程，可以得到一些新相，比如非稳相，非晶相等；可以获得可控的低稀释率涂层；涂层粉末的选择没有限制；工艺过程的自动化程度高	激光加热和冷却的速度极快，由于熔覆层与基体材料的温度梯度和热物性参数不同，涂层中可能出现很多的缺陷
增材制造技术	能够完成对各种大尺寸和复杂的零件的制备，制备效率高	设备和材料有限制，成本高
粉末冶金法	生产效率高，生产成本低，适用于结构简单的工件制造	利用该方法制备高熵合金，所需的金属粉末成本较高，无法生产尺寸较大的金属压坯
机械合金法	合金成分均匀，工艺设备价格低廉	耗能大，粒径分布宽，易参入杂质
等离子体热压烧结	升温速度快，烧结温度高，节能环保等	生产率低、成本高
磁控溅射技术	沉积效率高、速度快，易于大规模生产；薄膜纯度高，致密性好，与基体结合能力强	靶材利用率低，等离子体不稳定，无法制备绝缘体薄膜等

3. 主元素对 CoFeNi 系高熵合金性能的影响

从高熵合金的定义可知,合金由多种元素组成,且原子在晶体中随机排列。性能不同、数量不同的原子形成固溶体相时,高熵合金的组织 and 性能也各不相同,如表 2 所示。主元素的种类和含量改变会直接影响 CoFeNi 系高熵合金性能。

Table 2. Phases, preparation processes, and properties of some high-entropy alloys

表 2. 部分高熵合金的物相、制备方法以及性能

高熵合金	物相	制备方法	性能变化
$\text{Al}_x\text{CoFeNi}_2\text{V}_{0.5}$ ($x = 0\sim 1$)	FCC + BCC	真空电弧熔炼	合金强度硬度增加, 塑形降低
$\text{Al}_x\text{CuFeNiCoCr}$	FCC + BCC	粉末冶金法	高温抗氧化性能增强, 耐蚀性增强
$\text{CrCoFeNiAl}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}$	FCC + BCC	机械合金化法	硬度强度抗氧化性能增加
FeCoNiAlCr_x	FCC + BCC	真空电弧熔炼	硬度强度抗氧化性能增加
CoFeMnNiZr_x	Laves	真空电弧熔炼	硬度增加, 屈服强度增加, 压缩应变降低
AlCoCrFeNiSi_x ($x = 0\sim 1$)	BCC	真空电弧熔炼	耐热腐蚀能力增强
AlCuFeNiCoSi_x	FCC + BCC	氩弧熔覆技术	硬度增加, 耐磨性增加
CoCrFeNiMn_x ($x = 0.25, 0.5, 1, 2$)	FCC	真空电弧熔炼	电阻率增加
$\text{CrFe}_2\text{Ni}_2\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_x$	FCC + Laves	真空电弧熔炼	屈服强度增加, 硬度增加, 塑形下降
AlFeCrCoCuTi	BCC1 + BCC2 + FCC + 析出相	非自耗电弧熔炼	硬度增加, 耐磨性增加
CrTeCoNiTi_x ($x = 0.2\sim 1$)	BCC	放电等离子体烧结	硬度和压缩强度增加, 耐腐蚀性降低

3.1. Al 元素

Al 元素的加入可以影响高熵合金中的相平衡, 改变其相比例和相稳定性。齐兆鑫等[37]采用真空电弧熔炼炉制备了 $\text{Al}_x\text{CoFeNi}_2\text{V}_{0.5}$ ($x = 0\sim 1$) 高熵合金。

实验发现, 该合金铸锭存在 FCC 和 BCC 两种不同的相结构。当 $x < 0.4$ 时, $\text{Al}_x\text{CoFeNi}_2\text{V}_{0.5}$ 系高熵合金中形成纯单相的 FCC 晶体结构。随着 Al 含量的不断增加, 在 $\text{Al}_{0.6}$ 合金中开始出现 BCC 的衍射峰, 而在 Al 含量在 0.1 至 1.0 之间是合金中的相结构转变为 FCC + BCC 的混合固溶体结构。

同样, 合金中随着 Al 含量的增加, 合金的强度、硬度等也有不同程度的增强。Al 元素的增加使合金的晶格畸变的程度增加, 在晶格畸变产生的应力场与合金发生位错而产生的应力场相互作用下, 位错运动的阻力增大, 合金的硬度增加, 塑性降低。江佳阳等[38]应用粉末冶金法制备 $\text{Al}_x\text{CuFeNiCoCr}$ 高熵合金, 研究表明, 烧结后的合金晶体结构为 BCC + FCC 的双相固溶体, $x = 2$ 时, 合金拥有最好的高温抗氧化性能。 $x = 1$ 时, 合金的耐腐蚀性最好。

Joseph 等[39]通过直接激光烧结和电弧熔炼得到 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ 、 $\text{Al}_{0.6}\text{CoCrFeNi}$ 和 $\text{Al}_{0.8}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金, XRD 图谱结果如图 2 所示, 可见 Al 含量的提高可以有效稳定 BCC 固溶相, 其中 $\text{Al}_{0.6}\text{CoCrFeNi}$ 合金为 FCC + BCC 双相结构, $\text{Al}_{0.8}\text{CoCrFeNi}$ 合金为 BCC 单相结构, 并且激光烧结与电弧熔炼得到的高熵合金的相结构保持一致。通过直接激光烧结与铸造的 $\text{Al}_{0.6}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的微观组织对比, 发现直接激光烧结试样为细长板条结构, 其生长方向与沉积方向一致, 并且晶体取向是随机分布的, 而铸造态合金表现为粗大枝晶结构。

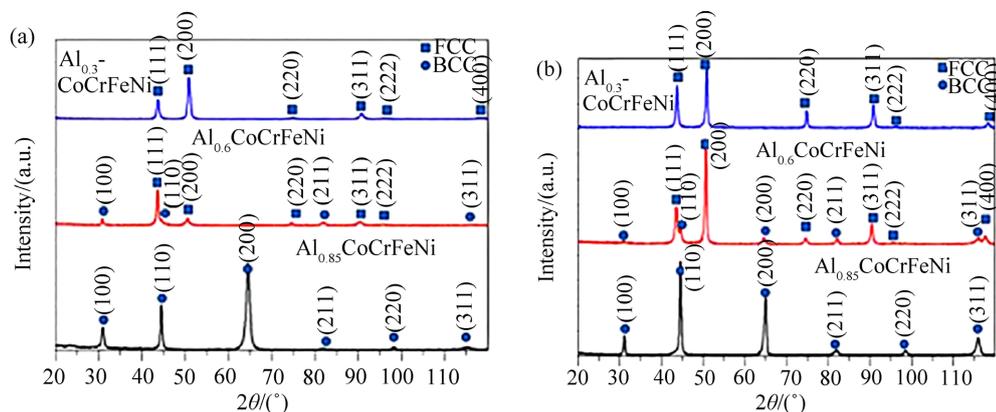


Figure 2. XRD curves of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ series high-entropy alloys. (a) Direct laser sintering; (b) Arc melting [37]
图 2. $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 系高熵合金的 XRD 曲线。(a) 直接激光烧结; (b) 电弧熔炼[37]

3.2. Cr 元素

适量添加 Cr 元素可以显著提高高熵合金的硬度、强度、抗氧化和抗腐蚀性能。付志强等[40]应用机械合金法制备 $\text{CoFeNiAl}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}$ 和 $\text{CrCoFeNiAl}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}$ 高熵合金, 加入 Cr 元素后, 机械合金化的高熵合金粉末的相结构由 FCC 相转变为 FCC + BCC 双相结构。高炜等[41]采用真空电弧法 FeCoNiAlCr_x 系高熵合金, 研究发现, 随着 Cr 元素的增加, 合金的相结构由单相的 BCC 结构转变为 BCC + FCC 结构, 显微组织由等轴晶变转为枝晶, 合金晶粒尺寸变小。并且当 Cr 元素 x 由 0 增加到 0.8 时, 合金的抗拉强度从 1500 MPa 增大到 2460 MPa, 延展率由 13.56% 增到 64%。Cr 元素对于高熵合金的组织细化, 抗压强度和塑形都有明显的提高, 可以推断出随着 Cr 含量的增加, 合金晶粒尺寸出现先减小后增大的现象。

3.3. Zr 元素

Zr 元素是高熵合金中常见的添加元素之一, 对高熵合金的组织性能有着重要的影响。董琬晴[42]研究了 Zr 元素对 CoFeMnNi 系高熵合金的组织性能的影响, 由图 3 我们可以清晰地看到, 当 Zr 元素添加量为零时, CoFeMnNi 高熵合金展现出了典型的塑性材料的性能, 样品并未随着压缩应力的增加而断裂, 表现出很好的延展性。随着 Zr 元素的添加, 高熵合金强度有渐次增大的趋势, 这是由 Zr 有着相对较大原子半径所致, Zr 含量的增加就导致了合金体系中晶格畸变效应更明显, 产生了更强的固溶强化作用, 从而使合金有着较高的屈服强度, 随着 Laves 相含量的增加, 使合金的强度增加, 但是合金的塑形下降。

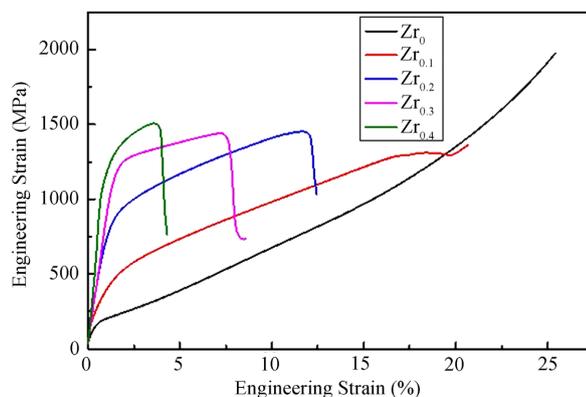


Figure 3. Compressive stress-strain curve of CoFeNiMnZr_x series high-entropy alloys at room temperature [42]
图 3. CoFeNiMnZr_x 系高熵合金在室温下的压缩应力 - 应变曲线[42]

对于 CoFeMnNi 系高熵合金，添加 Nb 元素后的组织性能与 Zr 元素相近，合金中同样出现了 Laves 相，高熵合金硬度增加，屈服强度增加，压缩应变降低。

3.4. Si 元素

添加适量的 Si 元素可以增强高熵合金的抗氧化性能和机械性能。张平等[43]利用真空电弧熔炼的方法制备 AlCoCrFeNiSi_x ($x = 0\sim 1$)高熵合金，研究 Si 元素对于高熵合金热腐蚀性能的影响，合金在 950°C 经过 100 小时的热腐蚀后，Al 元素发生选择性氧化，高熵合金由 BCC 相转变为 FCC 相，随着适量 Si 元素的添加，合金表面会产生致密的氧化铝薄膜，提高了合金的耐热腐蚀能力。但当 Si 元素过量时，合金表面的薄膜由热物性不同的氧化铝和尖晶石氧化物组成，在内应力作用下容易出现裂缝，合金的耐热腐蚀能力下降。

时海芳等[44]利用氩弧熔覆技术在 Q235 钢上制备了 AlCuFeNiCoSi_x 高熵合金涂层，高熵合金涂层由 FCC 相和 BCC 相组成，随着 Si 元素的增加，BCC 相比例先减小后增大，合金显微组织经历了从“树枝晶 - 棒状晶 - 细小块状晶”的过程，合金涂层表面硬度先减小再增大最后又减小，当 $x = 0.75$ 时，合金的硬度达到最大值 62.5 HRC，耐磨性提高了 26.3%。

3.5. Mn 元素

为探究 Mn 元素对于高熵合金组织和性能的影响，邢逸凡等[45]应用超高真空电弧熔炼方法制备 CoCrFeNiMn_x ($x = 0.25, 0.5, 1, 2$)高熵合金，合金为单相的 FCC 固溶体结构，Mn 主要富集于晶界处。随着 Mn 元素的增加，合金的电阻率逐渐变大，当 $x = 2$ 时，高熵合金的电阻率最大高达 $210.215 \mu\Omega/\text{cm}$ 。

3.6. Mo 元素

加入适量 Mo 元素可以同时提高高熵合金的强度和硬度。为提高 $\text{CrFe}_2\text{Ni}_2\text{Nb}_{0.3}$ 高熵合金的强度以及硬度，梁维中等[46]向合金中添加 Mo 元素探究 $\text{CrFe}_2\text{Ni}_2\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_x$ 微观组织以及力学性能，利用真空电弧法熔炼出 $\text{CrFe}_2\text{Ni}_2\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_x$ 高熵合金。研究发现：合金的组织结构主要是 FCC 相和 Laves 相，Mo 元素的加入使得该高熵合金屈服强度从 421 MPa 提升至 612 MPa，抗拉强度从 856 MPa 提升到 956 MPa，硬度由 2.56 GPa 提升至 3.84 GPa。由这些数据可以看出，Mo 元素的加入使得该高熵合金的性能更加优异。由图 4 的应力应变曲线可以看出， Mo_0 合金展现出较低的屈服强度和良好的塑性， $\text{Mo}_{0.4}$ 合金屈服强度和极限抗拉强度相较于 Mo_0 合金有了明显的提升，但塑性下降明显。

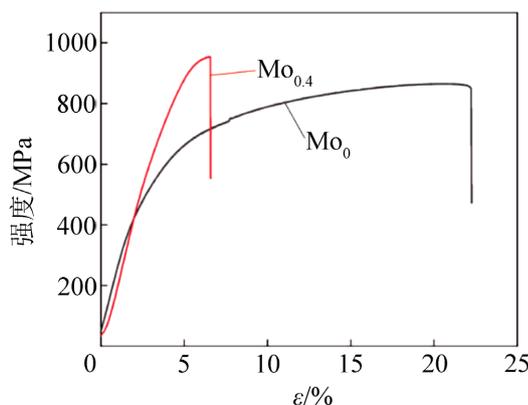


Figure 4. Tensile stress-strain curve of $\text{CrFe}_2\text{Ni}_2\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_x$ high-entropy alloys [46]

图 4. $\text{CrFe}_2\text{Ni}_2\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_x$ 高熵合金拉伸应力 - 应变曲线[46]

包晔峰等[47]采用激光熔覆的方法以 Q235 为基体制备 $\text{FeCoCrNiB}_{0.2}\text{Mo}_x$ 高熵合金涂层抗冲蚀性能, 实验发现, 高熵合金涂层全部是由单相的 BCC 相组成, 涂层的硬度可以达到 $600 \text{ HV}_{0.2}$ 以上, 耐冲蚀性能优异, 并且随着 Mo 元素的不断增加, 涂层的固溶强化效果也越来越明显, 合金涂层的硬度上升, 性能表现优异。

3.7. Ti 元素

Ti 元素对高熵合金的组织性能有着重要的影响。谢红波等[48]利用非自耗电弧熔炼的方法制备了 AlFeCrCoCuTi 高熵合金, 用来研究 Ti 元素对 AlFeCrCoCuTi 高熵合金组织以及耐磨性能的影响, 结果表明, 该高熵合金是由简单的 BCC + FCC 相转变为 BCC1 + BCC2 双相、FCC 相和析出相组成的四相固溶体, Ti 的加入使得合金的整体硬度得到提高, 析出相的强化效应和枝晶两相共析组织的特殊结构也使得合金的耐磨性能提高, 回火后的合金表现出更优秀的耐磨性能。

姜越等[49]采用放电等离子烧结的方法制备 BCC 相的 CrTeCoNiTi_x ($x = 0.2 \sim 1$) 高熵合金, 由图 5 可以清晰看到, 随着 Ti 元素含量增加, 合金硬度和压缩强度也增大, 最大值达分别为 672.59 HV 和 690.28 MPa , 但耐硫酸腐蚀性能降。 CrTeCoNiTi_x 高熵合金中随着 Ti 含量的升高, 原子尺寸差异变大, 晶格畸变显著, 从而使合金具有较高的抗压强度; 除此之外, Ti 元素在高熵合金中能够起到细化晶粒的作用, 合金的晶粒越细小, 其强度就越高。

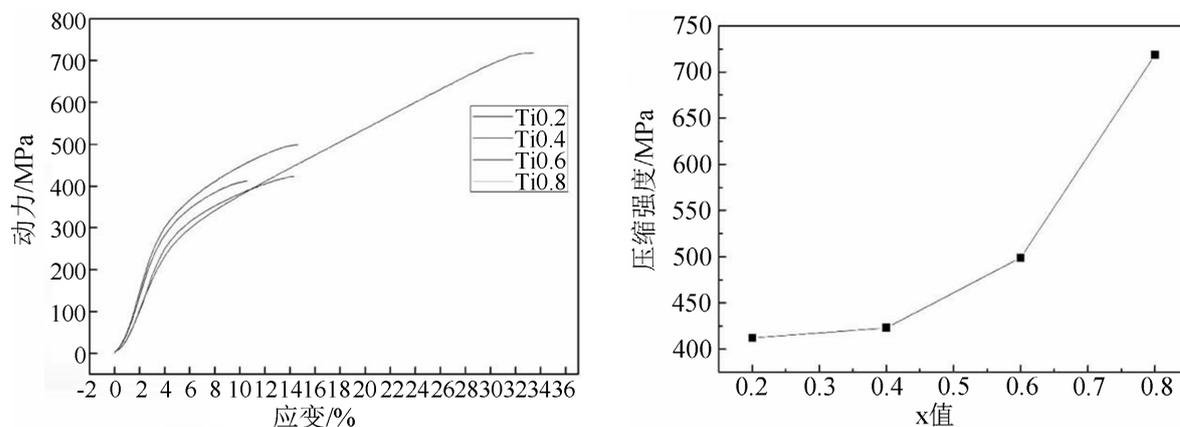


Figure 5. Stress-strain curves and compression strength curves of high-entropy alloys [49]

图 5. 高熵合金的应力 - 应变曲线以及压缩强度曲线[49]

3.8. B 元素

B 元素的原子半径远小于 Co、Fe、Ni 元素, 且 B 与 Co、Fe、Ni 混合焓为负值, 容易形成金属硼化物相。赵龙志等[50]研究不同含量的 B 元素对 FeCoCrNiSiB_x ($x = 0 \sim 0.08$) 高熵合金熔覆层的显微组织和硬度的影响, 根据吉布斯自由能理论, 合金在凝固过程中, 为了降低体系的应变能, B 元素在晶界处富集, 与 Cr 元素形成 Cr_2B , 产生过冷现象, 合金显微组织由胞状晶转变为树枝晶。添加少量的 B 元素, 使高熵合金熔覆层的硬度明显提升, 当 $x = 0.06$ 时, 涂覆层硬度最高, 为 $537 \text{ HV}_{0.2}$ 。但当 $x = 0.08$ 时, 高熵合金中 Cr_2B 含量增多, 树枝晶被破坏, 涂覆层硬度降低为 $398 \text{ HV}_{0.2}$ 。

侯丽平等[51]研究了 B 原子对 CoFeNiMnB_x ($x = 0, 0.15, 0.2$) 高熵合金相变的作用机理。添加 B 元素后, 较大的原子半径差, 使 B 元素在晶界聚集, 凝固后在 FCC1 相的枝晶间出现 FCC2 相的晶间组织, 分别为块状的富 B、Co 相和颗粒状的富 Ni 相。

4. 总结

高熵合金作为新型合金材料，突破了以一种或两种元素为主元的合金材料的限制，为材料科学发展和社会进步提供新的发展方向。通过调整高熵合金主元素的种类与含量，其合金的性能呈现多样化，具有广阔的应用前景。但在科研工作中仍存在诸多难题：

1) 高熵合金的主元间存在较强的相互作用，针对如何选择更合理的组元成分和制备工艺，设计高熵合金以满足相应的性能需求，需要更加详实的理论依据；

2) 现行工艺条件下，高熵合金的尺寸和生产成本受限，能够实现高熵合金的小尺寸、小批量的生产，但大批量生产仍然有诸多问题需要解决。

基金项目

辽宁科技学院大学生创新创业训练计划项目项目“CoCrFeNi 基高熵合金及其复合材料研究”，项目编号：202211430047。

参考文献

- [1] 钟永录, 董应虎, 张瑞卿, 王昆昆, 方俊晓, 孙文. 主元对高熵合金组织及性能影响的研究综述[J]. 热加工工艺, 2019, 48(12): 6-8+11.
- [2] Yong, Z., Zou, T.T., Zhi, T., *et al.* (2014) Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys. *Progress in Materials Science*, **61**, 1-93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- [3] Tong, C.J., Chen, Y.L. and Yeh, J.W. (2005) Mechanical Performance of the $Al_xCoCrFeNi$ High-Entropy Alloy System with Multiprincipal Elements. *Metallurgical & Materials Transactions Part A*, **36**, 1263-1271. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0218-9>
- [4] Miracle, D.B. and Senkov, O.N. (2017) A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts. *Acta Materialia*, **122**, 448-511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- [5] 杜黎明. $Al_{0.25}CoCrFeNi$ 高熵合金渗氮层的高温摩擦磨损性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019, 14-16.
- [6] Zhang, Y., Lu, Z.P., Ma, S.G., *et al.* (2014) Guidelines in Predicting Phase Formation of High-Entropy Alloys. *MRS Communications*, **4**, 57-63. <https://doi.org/10.1557/mrc.2014.11>
- [7] 梁秀兵, 万义兴, 莫金勇, 张志彬, 胡振峰, 陈永雄. 新型高温高熵合金材料研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(11): 96-108.
- [8] Qiao, J.W., Ma, S.G., Huang, E.W., *et al.* (2011) Microstructural Characteristics and Mechanical Behaviors of $Al-CoCrFeNi$ High-Entropy Alloys at Ambient and Cryogenic Temperatures. *Materials Science Forum*, **688**, 419-425. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.688.419>
- [9] 郭亚雄, 刘其斌, 周芳. 激光熔覆高熔点 $AlCrFeMoNb_xTiW$ 高熵合金涂层组织及耐磨性能[J]. 稀有金属, 2017, 41(12): 1327-1332.
- [10] 孙驰驰, 张艳, 张静, 等. $CoCrFeNi$ 系高熵合金耐腐蚀性能研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(5): 557-562.
- [11] 唐群华, 戴品强, 花能斌. $Al_{0.3}CoCrFeNi$ 纳米晶高熵合金在碱性溶液中的电化学性能[J]. 机械工程材料, 2015, 39(12): 1-4+29.
- [12] 张士陶, 杜旭, 李文戈, 等. 等离子喷涂 $FeCoCrNiMo$ 高熵合金涂层高温氧化行为的研究[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 90-98+110.
- [13] 宋鑫芳, 张勇. 高熵合金研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(5): 451-457.
- [14] 郝文俊, 孙荣禄, 牛伟, 谭金花, 李小龙. 合金元素影响高熵合金涂层组织及力学性能综述[J]. 材料导报, 2020, 34(s2): 1330-1333.
- [15] 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>
- [16] Yeh, J.W. (2006) Recent Progress in High-Entropy Alloys. *European Journal of Control*, **31**, 633-648.

<https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>

- [17] 赵海朝, 乔玉林, 梁秀兵, 胡振峰, 陈永雄. 轻质高熵合金的研究进展与展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 1457-1468.
- [18] 赵林飞, 李慧, 梁精龙. 高熵合金制备工艺的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(7): 42-47.
- [19] 王世伟, 周晖, 徐莺歌, 等. CoCrFeNiW_x 高熵合金在室温及 900℃ 下的摩擦磨损性能[J/OL]. 摩擦学学报: 1-13. <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023005>, 2023-03-07.
- [20] 郭顺, 王朋坤, 顾介仁, 彭勇, 徐俊强, 周琦. 电弧熔炼 Ti₆Al₄V/B₄C 复合材料微观组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2022, 43(9): 62-68+117.
- [21] 季承维, 马爱斌, 江静华. 轻质高熵合金的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2020, 34(19): 19094-19100.
- [22] 田永强, 苑清英, 付安庆, 等. Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Mo_{0.5}Ti_{0.5} 在不同 pH 值的 3.5% NaCl 酸性溶液中的钝化行为研究[J]. 材料导报, 2021, 35(z2): 399-403+409.
- [23] 王昕阳, 刘谦, 任海滔, 李湛, 许谄, 黄燕滨, 郭一鸣. 钛元素含量对 CoCrFeNiTi 高熵合金涂层硬度及耐磨性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 47-55.
- [24] 李礼, 叶宏, 刘越, 等. 激光熔覆 AlCoCrFeNiCu 高熵合金工艺优化及耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 388-396.
- [25] 袁碧亮, 李传强, 董勇, 等. 增材制造 Al_xCoCrFeNi 系高熵合金的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(z2): 417-423.
- [26] 姜越, 周广泰, 程思梦, 等. CrFeCoNiTi_x 高熵合金组织与性能[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(6): 112-118.
- [27] 蒋焯, 陈可, 王伟. 机械合金化法制备 AlCoNiFeCr 高熵合金涂层[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1784-1790.
- [28] Marder, R., Estournes, C., Chevallier, G., et al. (2014) Plasma in Spark Plasma Sintering of Ceramic Particle Compacts. *Scripta Materiala*, **82**, 57-60. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.03.023>
- [29] 张超, 刘杰, 王晓花, 等. 烧结方式对 CoCrNi 中熵合金组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7): 2673-2680.
- [30] 韩杰胜, 吴有智, 孟军虎, 等. 放电等离子烧结制备 MoNbTaW 难熔高熵合金[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 2021-2026.
- [31] 黄纯可, 李伟, 刘平, 等. 磁控溅射法制备 Al_xCoCrFeNi 高熵合金薄膜的微观组织和力学性能研究[J]. 功能材料, 2017, 48(6): 6144-6148.
- [32] Takeuchi, A. and Inoue, A. (2005) 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. *Materials Transactions*, **46**, 2817-2829. <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.2817>
- [33] Guo, S., Ng, C., Lu, J., et al. (2011) Effect of Valence Electron Concentration on Stability of FCC or BCC Phase in High Entropy Alloys. *Journal of Applied Physics*, **109**, Article ID: 103505. <https://doi.org/10.1063/1.3587228>
- [34] Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., et al. (2008) Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-Component Alloys. *Advanced Engineering Materials*, **10**, 534-538. <https://doi.org/10.1002/adem.200700240>
- [35] Sheng, G.U.O. and Liu, C.T. (2011) Phase Stability in High Entropy Alloys: Formation of Solid-Solution Phase or Amorphous Phase. *Progress in Natural Science: Materials International*, **21**, 433-446. [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60080-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60080-X)
- [36] 李思念, 黄海鸿, 赵伦武, 等. 外加磁场对等离子熔覆 FeCoNiCr_{0.5}B 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 机械工程学报, 2022, 58(13): 251-260.
- [37] 齐兆鑫, 梁卉, 赵延周, 等. Al 含量对 CoFeNi₂V_{0.5} 高熵合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2022, 70(9): 1047-1053.
- [38] 江佳阳, 杜景红, 严继康, 等. 粉末冶金法制备 Al_xCuFeNiCoCr 高熵合金及其性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(2): 392-399.
- [39] Joseph, J., Jarvis, T., Wu, X., et al. (2015) Comparative Study of the Microstructures and Mechanical Properties of Direct Laser Fabricated and Arc-Melted Al_xCoCrFeNi High Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **633**, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.072>
- [40] 付志强, 陈维平, 方思聪. Cr 对 CoFeNiAl_{0.6}Ti_{0.4} 的合金化行为与组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(10): 2411-2414.
- [41] 高炜, 余竹煊, 阎亚雯, 王晓慧, 刘旭亮, 杜伟. Cr 对 FeCoNiAlCr_x 高熵合金组织与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(2): 91-97.

- [42] 董琬晴. Zr、Nb 元素添加对 CoFeMnNi 系高熵合金组织结构与性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [43] 张平, 李远田, 张金勇, 等. Si 对 AlCoCrFeNi 高熵合金热腐蚀行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3640-3647.
- [44] 时海芳, 李强, 刘忆. Si 含量对氩弧熔覆 AlCuFeNiCoSi_x 高熵合金涂层组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2022, 55(5): 18-22.
- [45] 邢逸凡, 王伟丽, 郑风勤. Mn 对 CoCrFeNi 基高熵合金组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 37-40.
- [46] 梁维中, 吴万东, 关升, 齐凯, 王洋, 陈永生. CrFe₂Ni₂Nb_{0.3}Mo_x 高熵合金微观组织及力学性能[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(6): 732-737.
- [47] 包晔峰, 谢秉鎬, 宋元宁, 等. 高熵合金 FeCoCrNiB_{0.2}Mo_x 激光熔覆层抗冲蚀性能[J]. 焊接学报, 2021, 42(5): 7-13.
- [48] 谢红波, 刘贵仲, 郭景杰. Mn、V、Mo、Ti、Zr 元素对 AlFeCrCoCu_x 高熵合金组织与高温氧化性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 103-110.
- [49] 姜越, 程思梦, 祖红梅. Ti 元素对 CrTeCoNiTi_x 高熵合金组织及性能的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(3): 149-152.
- [50] 赵龙志, 喻世豪, 赵明娟, 唐延川, 焦海涛, 李劲, 宋立军. B 对 FeCoCrNiSiB_x 高熵合金激光熔覆层组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(10): 1887-190.
- [51] 侯丽丽, 郭强, 要玉宏, 等. B 原子促进高熵合金 FCC2 相的形成机制[J]. 材料导报, 2021, 35(z2): 381-384.