

共晶高熵合金研究进展

李肖逸 高绪杰 史程程 朱光明 郭娜娜
(山东理工大学机械工程学院)

摘 要 高熵合金(HEAs)打破了传统合金的设计理念,是以多种主要元素组成的一类新型合金,但大部分高熵合金通常流动性和可铸造性较差,成分不均匀,不利于高熵合金的规模化应用。共晶高熵合金(EHEAs)可同时具有高熵合金和共晶合金的特性,减少铸造缺陷,改善了铸造性能,设计和制备共晶高熵合金具有重要的意义。概述了国内外共晶高熵合金的研究进展,介绍了合金的相组成和性能,共晶形貌的生长特征及生长机理,概括了共晶高熵合金的相形成规律和共晶成分的设计方法,最后展望了未来共晶高熵合金的主要研究方向。

关键词 共晶高熵合金;力学性能;激光熔覆;合金设计

中图分类号 TG139 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research Progress in Eutectic High Entropy Alloys

Li Xiaoyi, Gao Xujie, Shi Chengcheng, Zhu Guangming, Guo Nana
(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology)

Abstract: High-entropy alloy (HEA), which breaks the design concept of traditional alloy, is a new type of alloy composed of multiple main elements. However, most high-entropy alloys usually have poor fluidity and castability as well as larger compositional unevenness, which is adverse to the large-scale industrial application. Eutectic high-entropy alloys (EHEAs) exhibit the characteristics of high-entropy alloys and eutectic alloys simultaneously, which can reduce casting defects and have unique advantages in high-temperature application. Therefore, it is of great significance to design and preparation of eutectic high-entropy alloys. The research progress of melting eutectic high-entropy alloys at home and abroad was reviewed. The phase composition and properties of the alloys as well as the growth characteristics and mechanism of the eutectic morphology were introduced. Subsequently, the phase formation law of eutectic high-entropy alloy and the design method of eutectic composition were summarized. Finally, the forward research direction of eutectic high-entropy alloy was prospected.

Key Words: Eutectic High-entropy Alloy, Mechanical Properties, Laser Cladding, Alloy Design

近年来,高熵合金(HEA)因具有良好的强度和延展性,且在高温下具有良好的抗氧化性和各种优异的物理性能,可作为高温结构材料、耐磨工具、模具材料和耐腐蚀材料,在金属应用领域受到了广泛关注。

目前已报道的大多数高熵合金采用熔炼方式制备,然而高熵合金流动性能较差,合金成分偏析严重,不能制备大尺寸的高熵合金铸锭,这严重阻碍了高熵合金的工业应用。已有研究表明,单一 FCC 结构固溶相的高熵合金通常具有优良的塑韧性,但强度偏低,如 CoCrFeMnNi 合金^[1];单一 BCC 结构固溶相的高熵合金一般具有很高的强度,但塑韧性较差,如 WNbMoTa 合

金^[2]。为了解决高熵合金铸造性能差的问题,同时达到平衡强度和塑韧性的目标,LU Y P 等^[3]提出了一种采用共晶合金的思想设计多相高熵合金的方法并受到广泛关注^[4],设计并制备了在室温和高温下均具有优异力学性能的 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金(EHEA),铸造合金的抗拉强度为 944 MPa,伸长率为 25.6%。随后,共晶高熵合金得到广泛关注,如 Co-Cr-Fe-Ni 系的 CoCrFeNiTa_x^[5]、CoCrFeNiZr_x^[6] 和 CoCrFeNiNb_x^[7]。为了更好地应用于实际生产,降低合金的成本,研究人员开发了无 Co 元素的共晶高熵合金^[8],具有优异力学性能的共晶和近共晶的 AlCrFe₂Ni₂^[8]、Al_{0.9}CrFeNi^[9]、

收稿日期:2020-08-11;修改稿收到日期:2020-08-27
基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2017BEM003,ZR2017EMM036);中国博士后科学基金资助项目(2018M632695)
第一作者简介:李肖逸,男,1996 年出生,硕士研究生,山东淄博(255000),E-mail:365144826@qq.com
通信作者:郭娜娜,女,1987 年出生,副教授,山东淄博(255000),E-mail:guonana111@126.com
引用格式:李肖逸,高绪杰,史程程,等. 共晶高熵合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):32-37.
LI X Y, GAO X J, SHI C C, et al. Research progress in eutectic high entropy alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1): 32-37.

Al_{1.3}CrFeNi^[9]、CrFeNi₂Al^[10]、Al_{1.2}CrCuFeNi₂^[11]、Al-CrFeNiMo_{0.2}^[12]等高熵合金被设计和制备。

本课题从共晶高熵合金的相组成及性能,合金的组织形貌特征及生长机理,合金的相形成规律和设计方法等方面综合概述了近年来共晶高熵合金的研究现状,并展望了共晶高熵合金未来的研究方向。

1 熔炼共晶高熵合金

1.1 共晶高熵合金的相组成及性能

目前已公开的部分共晶和近共晶高熵合金见表 1。

表 1 共晶和近共晶高熵合金体系组织结构及性能

合金系	组成相	状态	性能
AlCoCrFeNi _{2.1} ^[3]	L ₁₂ +B2	室温铸态	$\sigma_m=944\text{ MPa}, \epsilon=25.6\%$
AlCrFe ₂ Ni ₂ ^[8]	FCC+A2+B2	室温铸态	$\sigma_{0.2}=796\text{ MPa}, \sigma_m=1\ 437\text{ MPa}, \epsilon=15.7\%$
Al _{0.9} CrFeNi ^[9]	B2+BCC	室温铸态	压缩性能: $\sigma_{0.2}=770\text{ MPa}, \sigma_m=3\ 002.4\text{ MPa}, \epsilon=37.1\%$
Al _{1.3} CrFeNi ^[9]	B2+BCC	室温铸态	$\sigma_{0.2}=1\ 122.8\text{ MPa}, \sigma_m=3\ 705.3\text{ MPa}, \epsilon=24.7\%$
CrFeNi ₂ Al ^[10]	FCC+B2	室温铸态	$\sigma_{0.2}=774\text{ MPa}, \sigma_m=1\ 357\text{ MPa}, \epsilon=6.4\%$
Fe ₂₀ Co ₂₀ Ni ₄₁ Al ₁₉ ^[13]	B2+L ₁₂	室温铸态	$\sigma_{0.2}=577\text{ MPa}, \sigma_m=1\ 103\text{ MPa}, \epsilon=18.7\%$
CoFeNi ₂ V _{0.5} Nb _{0.75} ^[14]	FCC+Fe ₂ Nb 型 Laves	室温铸态	压缩性能: $\sigma_{0.2}=2\ 073\text{ MPa}, \sigma_m=2\ 232\text{ MPa}, \epsilon=3.4\%$ 软磁性能: $M_S=70.33\text{ emu/g}, H_C=1.62\text{ Oe}$
Co ₂ Mo _{0.8} Ni ₂ VW _{0.8} ^[15]	FCC+ μ	室温铸态	压缩性能: $\sigma_{0.2}=1\ 431\text{ MPa}, \sigma_m=2\ 364\text{ MPa}, \epsilon=14.4\%$
CoCrFeNiNb _{0.5} ^[7]	FCC+Laves	750 ℃	$\sigma_{0.2}=1\ 031.4\text{ MPa}, \sigma_m=2\ 304.58\text{ MPa}, \epsilon=27.3\%$
Al _{1.2} CrCuFeNi ₂ ^[11]	B2+L ₁₂	室温铸态	520 HV
AlCoCrFeNb _{0.1} Ni ^[16]	BCC+(CoCr)Nb 型的 Laves 相	室温铸态	软磁性能: $M_S=6.106\text{ emu/g}, H_C=1.62\text{ Oe}$ 压缩性能: $\sigma_{0.2}=1\ 641\text{ MPa}, \sigma_m=3\ 285\text{ MPa}, \epsilon=17.2\%, 569\pm 11\text{ HV}$
CoCrFeNb _{0.45} Ni ^[17]	FCC+Laves 相	室温铸态	压缩性能: $\sigma_{0.2}=1\ 474.9\text{ MPa}, \sigma_m=2\ 558\text{ MPa}, \epsilon=27.9\%$
CoCrFeNiTa _{0.4} ^[18]	FCC+Co ₂ Ta 型 Laves 相	室温铸态	压缩性能: $\sigma_m=2\ 293\text{ MPa}, \epsilon=22.6\%, 492\text{ HV}$
CoCrFeNiTa _{0.43} ^[5]	FCC+Cl ₄ 型 Laves 相	室温铸态	$\sigma_m=2\ 377\text{ MPa}, \epsilon=17.5\%$
CoCrFeNiTa _{0.395} ^[19]	FCC+Laves 相	室温铸态	$\sigma_{0.2}=1\ 200\text{ MPa}, \epsilon=25\%$
CoCrFeNiTa _{0.3} ^[19]	FCC+Laves 相	室温铸态	$\sigma_m=2\ 500\text{ MPa}, \epsilon=44\%$
CoCrFeNiZr _{0.4} ^[6]	FCC+Cl ₅ 型 Laves 相	室温铸态	随着温度的升高,合金发生韧性断裂
NbScTiZr ^[20]	$\alpha(\text{Sc}, \text{Zr})+\beta\text{-NbTiZr}$	—	压缩性能: $\sigma_{0.2}=1\ 020\text{ MPa}, \sigma_m=1\ 250\text{ MPa}, \epsilon=8.2\%$
Mo _{0.5} NbHf _{0.5} ZrTiSi _{0.5} ^[21]	BCC+M ₅ Si ₃ 硅化物	室温铸态	压缩性能: $\sigma_m=1\ 250\text{ MPa}, \epsilon=22.5\%$
AlCrFeNiMo _{0.2} ^[12]	BCC+B2	≤1 050 ℃	优异的抗退火软化性能

凝固机理有待进一步研究。

1.2 共晶高熵合金的组织形貌及生长机理

共晶高熵合金作为一个新兴的研究方向,对共晶相形貌及其形成机理的研究为其优良的力学性能提供了理论解释。大多数的金属-金属或金属间化合物共晶是非光滑-非光滑界面,合金相组成为固溶体相和金属间化合物相时,共晶组织形貌一般是片层状或纤维棒状;在共晶高熵合金中,还存在独特的向日葵形貌和海草形貌。

CHEN X 等^[9]研究了 Al_xCrFeNi 共晶高熵合金的凝固过程,并建立了凝固的简化模型,见图 1。原子相互之间的混合焓是两个原子结合的重要影响因素,根据元素的混合焓可知,Al 和 Ni 元素的混合焓最低。此

可知共晶高熵合金由固溶体相和金属间化合物相构成,其中多数固溶体相是面心立方(FCC)结构,FCC 固溶体相可以保证合金具有良好的塑性和韧性^[9,11,13,14,16,17,20,21],金属间化合物相(多数为 Laves 相)具有较高的硬度和强度^[6~8,16,18~20],能够在合金变形过程中强化合金,使合金具有较高强度的同时也会表现出极高的脆性。固溶体相和金属间化合物相共同作用,使得多数共晶高熵合金既有较高的强度和硬度,还表现出良好的塑性和韧性。而且由于共晶高熵合金的凝固机理复杂,难以扩散和聚合,限制了三元共晶相的形成,目前已经报道的共晶高熵合金均由两相组成,EHEAs 的

外,还发现通过分子动力学模拟(AIMD)和相图计算(CALPHAD)方法进行理论研究预测,得出液态过饱和状态下 Al-Ni 和 Cr-Fe 会优先结合。在一定温度下,结构不稳定,发生调幅分解,这将导致形成具有 Al/Ni 的元素富集区域和 Cr/Fe 的元素贫乏区域。当原子浓度达到一定水平后,Al/Ni 元素将形成 NiAl 相晶核,发生 Al 和 Ni 的有序化。随 NiAl 相长大,无序[Fe,Cr]固溶体相开始形核,最后将获得有序的 NiAl 和 无序[Fe,Cr]固溶体片层相间的共晶组织。

GUO S 等^[22]研究了近共晶 Al₂CrCuFeNi₂合金中的凝固组织,并发现了向日葵状共晶结构,见图 2。其中富 Ni-Al 的 B2 相形成的初生相,具有球形或者椭球形态;富 Ni-Al 的 B2/Cr 富集的 A2 共晶在初生相上径向生长,并且初级 B2 相在较低温度下进一步分解为近

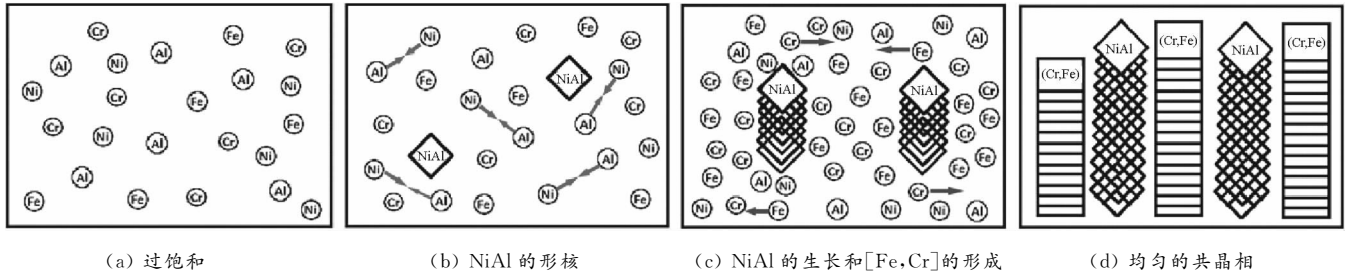


图 1 Al_xCrFeNi 合金的简化凝固模型^[9]

Fig.1 The simplified solidification model of Al_xCrFeNi alloys

立方的颗粒,分散在基体中,研究人员推测可能是调幅分解形成的。在凝固过程中,首先从液相中形成 $(\text{Ni}, \text{Fe}, \text{Cr})_{50}(\text{Al}, \text{Cu})_{50}$ 组成的 B_2 相,初生相几乎各向同性生长,没有形成树枝状结构。达到共晶温度时,交替的 B_2 和 A_2 相形成在初生相上生长的薄片,且薄片的生长方向垂直于初生相的边界,从而形成放射状,形成机理见图 3^[22], L 为液相, α 为薄片中的主相 B_2 相和层片 B_2 相, β 为层片中 A_2 相, α' 和 β' 为调幅分解后的 B_2 和 A_2 相。

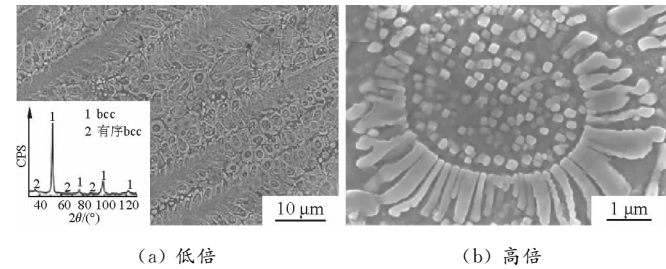


图 2 $\text{Al}_2\text{CrCuFeNi}_2$ 合金的向日葵状微观组织^[22]

Fig.2 Sun flower-like microstructure in $\text{Al}_2\text{CrCuFeNi}_2$ alloy

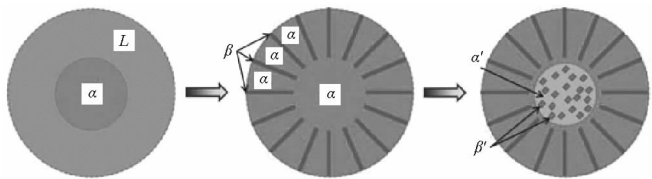
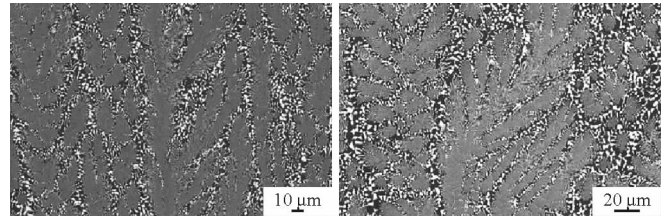


图 3 向日葵状结构的形成机理

Fig.3 Formation mechanism of the sun flower-like structure

TAN Y 等^[23]研究了 CoCrFeNiMnPd_x 的共晶组织结构,发现当 $x=0.4, 0.8$ 和 1.0 时,铸态合金组织呈现特有的共晶-枝晶形貌,细小的层状共晶被粗粒状的共晶包覆,其中粗粒共晶是由于富含 (CoCrFeNiPd) 的 FCC 相和 Mn_7Pd_9 或 Mn_2Pd_3 金属间化合物的协同生长而形成,界面前沿溶质的富集引起共晶界面的不稳定性造成再溶化的细薄层状共晶的粗化。界面明显偏离局部非平衡条件,富含 (CoCrFeNiPd) 的 FCC 相和四方 Mn_7Pd_9 或 Mn_2Pd_3 金属间化合物的交替排列可能导致界面能各向异性弱,从而形成海草共晶-枝晶形貌,见图 4。



(a) $x=1.0$ (b) $x=1.4$

图 4 CoCrFeNiMnPd_x 合金的海草状微观组织^[23]

Fig.4 Sea grass-like microstructure in CoCrFeNiMnPd_x alloy

2 共晶高熵合金的设计

2.1 相形成规律

目前已知的的影响多主元高熵合金相稳定性的经验参数中:高的混合熵能够抑制有序相和相分离的产生,促进固溶体相的生成;负的混合焓容易促使金属间化合物的产生;大的原子尺寸差会增加合金中的晶格畸变程度,不利于固溶体相的稳定;合金元素之间电负性差越大,越容易形成金属间化合物。尽管提出了这些参数来设计共晶高熵合金,但经验参数对单相高熵合金和共晶高熵合金相形成的影响有很大差异,仍需进一步研究。

CHANDA B 等^[24]对高熵合金中共晶相的稳定性进行了评估,图 5 为在简单固溶体相(即单相 BCC、单相 FCC HEA 和 EHEA)中, ΔH_{mix} 和 δ_r 之间的关系。

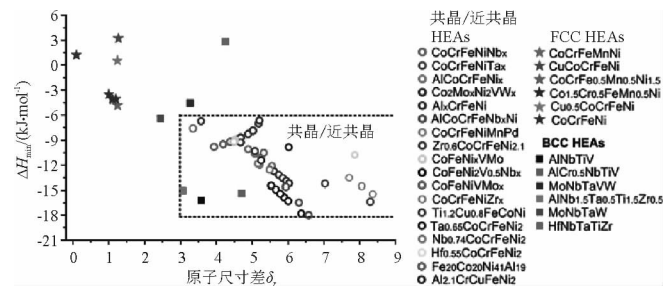


图 5 单相 FCC、BCC 和共晶/近共晶 HEA 的混合焓与原子尺寸差之间的关系^[24]

Fig.5 The relationship between the mixing enthalpy and atomic size difference of single-phase FCC, BCC and eutectic/near-eutectic HEA

根据图 5 可知, EHEA 是在 $-18 \text{ kJ/mol} \leq$

$\Delta H_{\text{mix}} \leq 6 \text{ kJ/mol}$, $\delta_r > 3\%$ 时获得。 ΔH_{mix} 的较高正值导致相分离, 而 ΔH_{mix} 较高的负值导致金属间化合物的形成。因此, ΔH_{mix} 的合理负值可确保 HEA 中共晶相的稳定性。而 δ_r 的值应该较高, 因为较高的 δ_r 值会由于晶格应变的增加而导致简单相的不稳定, 使得在 EHEA 中可以形成两相。因此, EHEAs 中相的演变受合金浓度控制, 这影响到 ΔH_{mix} 和 δ_r 的值。CoCrFeNi 表现出单一的 FCC 固溶相。Nb/Ta [$x(\text{Nb}) \geq 3.16\%$; $x(\text{Ta}) \geq 2.88\%$] 的添加会破坏单相 FCC 相的稳定性, 并形成两相共晶 (FCC + Laves) 微观结构^[5,7]。Nb 和 Ta 的原子半径比其他组成元素大, 这可能是形成第二相的有利条件。另一方面, Nb/Ta 与所有其他构成元素的负 ΔH_{mix} 最大。因此, ΔH_{mix} 和 δ_r 充当了 HEA 中两相演变的驱动力。

此外, 研究还发现, 即使固溶体在 $\Delta H_{\text{mix}} > -6 \text{ kJ/mol}$ 时形成, 但在 Al 基 BCC 高熵合金中也存在一些例外, 如 AlNbTiV, AlCr_{0.5}NbTiV 和 AlNb_{1.5}Ta_{0.5}Ti_{1.5}Zr_{0.5} 在 EHEA 区域内。因此, 不应将 ΔH_{mix} 和 δ_r 视为判断共晶高熵合金中相组成的唯一标准。

图 6 为单一固溶体相 (BCC 或 FCC) 和 EHEAs 中 V_{EC} 和 δ_r 之间的关系。GUO G 等^[25] 曾预测过单相 FCC 高熵合金在 $V_{\text{EC}} \geq 8$ 时是稳定的, BCC 高熵合金在 $V_{\text{EC}} < 6.87$ 时稳定。图 6 显示 FCC 和 BCC HEA 遵循文献^[25] 类似的规律。CHANDA B 等^[26] 对大量的 EHEA 进行了分析, 发现所有这些 EHEA 的 V_{EC} 和 δ_r 都在 $6 \leq V_{\text{EC}} \leq 8.5$ 且 $\delta_r > 3\%$ 的范围内。当两相之一是 BCC 时, V_{EC} 值趋于接近图 6 中的 EHEAs 区域的下限。如 Al_xCrFeNi (BCC + B2) 的 V_{EC} 为 6.57, 倾向于在 V_{EC} 的下限形成^[9], 而当两相之一是 FCC 时, V_{EC} 值往往接近 EHEAs 区域的上限。如 AlCoCrFeNi_{2.1}^[3] 由一个 FCC 相组成, 它的 V_{EC} 值为 7.70。由此认为, 当满足 $-18 \leq \Delta H_{\text{mix}} \leq 6$, $\delta_r > 3\%$ 且 $6 \leq V_{\text{EC}} \leq 8.5$ 时, 极易获得共晶高熵合金。

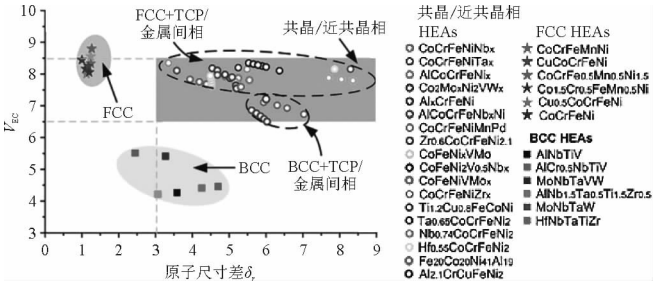


图 6 单相 FCC, BCC 和共晶/近共晶 HEA 的价电子浓度与原子尺寸差之间的关系^[26]

Fig.6 The relationship between valence electron concentration and atomic size difference of single-phase FCC, BCC and eutectic/near-eutectic HEA

2.2 设计方法

共晶高熵合金降低了 HEA 的铸件偏析问题, 并且还具有良好的可铸造性和力学性能。然而, 如何准确地设计 EHEA 仍然是一个难点, 相图不适用于四元和五元合金系统, 使得设计 EHEA 仍未有一个系统的理论方案。目前大多数已报道的 EHEA 是通过反复试验发现的。

HE F 等^[27] 提出了设计 EHEA 的最早方法之一。Fe-Nb, Cr-Nb, Ni-Nb 和 Co-Nb 二元体系中存在类似的共晶反应。因此认为准二元 CoCrFeNi-Nb 系统中也可能存在共晶合金。为了验证这一假设, 制造了一系列的 CoCrFeNiNb_x, 通过反复试验发现了化学成分为 CoCrFeNiNb_{0.65} 的共晶合金。基于组成元素之间的混合焓, 他们提出了共晶合金的组成元素可以分为两个原子团的假设。

随后, LU Y P 等^[28] 提出共晶合金的双相微观结构是两个原子团的观点, 通过使用该假设并考虑共晶合金 AlCoCrFeNi_{2.1} 的成分, 设计了 Zr_{0.45}CoCrFeNi_{2.1}、Nb_{0.73}CoCrFeNi_{2.1}、Hf_{0.52}CoCrFeNi_{2.1} 和 Ta_{0.76}CoCrFeNi_{2.1} 合金。然而, 试验结果证明这些合金是近共晶合金。通过试验和误差试验对成分进行调整, 得到了 Zr_{0.6}CoCrFeNi_{2.0}、Nb_{0.74}CoCrFeNi_{2.0}、Hf_{0.55}CoCrFeNi_{2.0} 和 Ta_{0.65}CoCrFeNi_{2.0} 共晶成分。

JIANG H 等^[29] 通过组合二元共晶成分, 提出了一种简单的方法来设计 EHEA: 组合二元共晶合金得到多元共晶成分, 如 CoCrFeNiNb_{0.6} 合金是通过组合二元共晶合金 Ni_{84.5}Nb_{15.5}、Co_{86.1}Nb_{13.9}、Cr₈₈Nb₁₂ 和 Fe_{89.4}Nb_{10.6} 来设计的。此外, 还设计了合金 CoCrFeNiTa_{0.47}、CoCrFeNiZr_{0.51} 和 CoCrFeNiHf_{0.49}, 但是设计的合金被确定为近共晶合金。研究者通过进行少量的试验并进行合金成分修正, 确定了确切的共晶成分为 CoCrFeNiNb_{0.45}、CoCrFeNiTa_{0.4}、CoCrFeNiZr_{0.55} 和 CoCrFeNiHf_{0.4}。

JIN X 等^[30] 提出了一种用于设计共晶高熵合金的伪二进制策略。通过使用混合焓和价电子浓度的参数, 选择适当的稳定 FCC 和金属间相; 然后混合选取两相, 通过一些反复试验来调整金属间形成元素的含量。通过这种方式, 设计了近共晶合金 AlCoCrFeNi₃、AlCo₂CrFeNi₂ 和 AlCoCrFe₂Ni₂, 然后通过调整合金的 Al 和 Ni 含量获得了精确的共晶组成。

SHAFIEI A 等^[31] 提出基于经验的共晶合金的成分, 以及在这些合金之间存在共晶线的假设, 建立共晶网络的方法, 来预测新的共晶成分。假设在共晶成分 Al₂₀Co₈₀ 和 Al₁₉Co₁₅Cr₁₅Ni₅₁ 之间存在共晶线, 因此, 在

共晶线的中心点的合金 $\text{Al}_{19.5}\text{Co}_{47.5}\text{Cr}_{7.5}\text{Ni}_{25.5}$ 也可以是共晶的。该合金的模拟结果见图 7。模拟结果验证了窄共晶线,试验验证了粗体共晶线,虚线表示根据模拟结果研究的线而不是共晶线,模拟结果表明,沿虚线的合金实际上接近共晶合金。

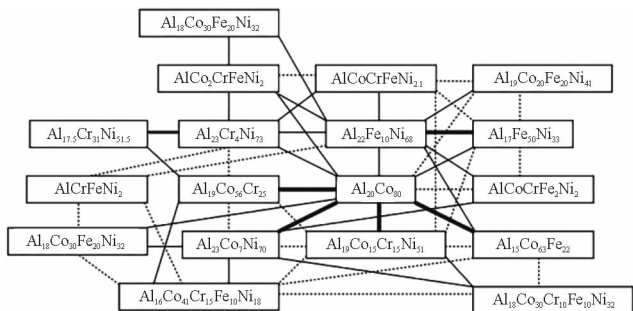


图 7 通过考虑某些共晶合金的组合而获得的共晶网络^[31]

Fig.7 The eutectic network obtained by considering the combinations of some eutectic alloys

3 结语与展望

目前共晶高熵合金的研究还处于起步阶段,所报道的共晶高熵合金体系很少,对凝固机理的研究还不完善,无法系统地总结出其相形成规律以及经验参数对共晶高熵合金相形成的影响,很难准确地定位共晶成分。不健全的热力学数据库使得 CALPHAD 方法的设计结果并不精确,而且设计出来的共晶高熵合金并不一定具有优异的力学性能。共晶高熵合金的研究者大多数集中在室温铸态合金的组织结构及力学性能的研究,通过热处理等手段改善合金性能,合金涂层的组织及性能的研究等方面都是未来研究的方向。

参 考 文 献

- [1] BHATTACHARJEE P P, SATHIARAJ G D, ZAID M, et al. Microstructure and texture evolution during annealing of equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 587: 544-552.
- [2] AKIRA T, KUNIO Y, TAKESHI W, et al. Critically percolated states in high-entropy alloys with exact equi-atomicity[J]. Materials Transactions, 2019, 60(2): 330-337.
- [3] LU Y P, DONG Y, GUO S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: Eutectic high-entropy alloys[J]. Scientific Reports, 2014(4): 6 200.
- [4] LU Y P, DONG Y, JIANG H, et al. Promising properties and future trend of eutectic high entropy alloys[J]. Scripta Materialia, 2020, 187: 202-209.
- [5] CHENG A, FENG H, MIN G, et al. Alloy design, micromechanical and macromechanical properties of CoCrFeNiTa_x eutectic high entropy alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017(12): 2 653-2 662.
- [6] HUO W Y, ZHOU H, FANG F, et al. Microstructure and me-

- chanical properties of CoCrFeNiZr_x eutectic high-entropy alloys[J]. Materials & Design, 2017, 134: 226-233.
- [7] HE F, WANG Z J, CHENG P, et al. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 656(1): 284-289.
- [8] DONG Y, GAO X X, LU Y P, et al. A multi-component AlCrFe₂Ni₂ alloy with excellent mechanical properties[J]. Materials Letters, 2016, 169: 62-64.
- [9] CHEN X, QI J Q, SUI Y W, et al. Effects of aluminum on microstructure and compressive properties of Al-Cr-Fe-Ni eutectic multi-component alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2017, A681(1): 25-31.
- [10] JIN X, BI J, ZHANG L, et al. A new CrFeNi₂Al eutectic high entropy alloy system with excellent mechanical properties[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2019, 770: 655-661.
- [11] GUO S, NG C, LIU C T. Anomalous solidification microstructures in Co-free Al_xCrCuFeNi₂ high-entropy alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 557: 77-81.
- [12] DONG Y, JIANG L, JIANG H, et al. Effects of annealing treatment on microstructure and hardness of bulk AlCrFeNiMo_{0.2} eutectic high-entropy alloy[J]. Materials & Design, 2015, 82(10): 91-97.
- [13] JIN X, ZHOU Y, ZHANG L, et al. A novel Fe₂₀Co₂₀Ni₄₁Al₁₉ eutectic high entropy alloy with excellent tensile properties[J]. Materials Letters, 2018, 216: 144-146.
- [14] JIANG L, WU W, CAO Z, et al. Microstructure evolution and wear behavior of the laser clad CoFeNi₂V_{0.5}Nb_{0.75} and CoFeNi₂V_{0.5}Nb high-entropy alloy coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25(4): 1-9.
- [15] JIANG H, ZHANG H, HUANG T, et al. Microstructures and mechanical properties of Co₂Mo_xNi₂VW_x eutectic high entropy alloys[J]. Materials & Design, 2016, 109: 539-546.
- [16] MA S G, ZHANG Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2012, A532(1): 480-486.
- [17] JIANG H, LI J, QIAO D, et al. Effect of niobium on microstructure and properties of the CoCrFeNb_xNi high entropy alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(7): 712-717.
- [18] JIANG H, HAN K M, QIAO D X, et al. Effects of Ta addition on the microstructures and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy[J]. Materials Chemistry & Physics, 2017, 210: 43-48.
- [19] HUO W Y, ZHOU H, FANG F, et al. Microstructure and properties of novel CoCrFeNiTa_x eutectic high-entropy alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2018, 897-904.
- [20] ROGAL L, MORGIEL J, SWIATEK Z, et al. Microstructure and mechanical properties of the new Nb₂₅Sc₂₅Ti₂₅Zr₂₅ eutectic high entropy alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2016, A651(1): 590-597.
- [21] GUO N N, WANG L, LUO L S, et al. Microstructure and mechanical properties of refractory high entropy (Mo_{0.5}NbHf_{0.5}ZrTi) BCC/M₅Si₃ in-situ compound[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 660: 197-203.

基于相结构的高熵合金设计

张 杨^{1,2} 艾云龙^{1,2} 陈卫华^{1,2} 杨启明³ 朱振滔³
(1.南昌航空大学江西省金属材料微结构调控重点实验室;
2.南昌航空大学材料科学与工程学院;3.江西同欣机械制造有限公司)

摘 要 综述了各种相结构的高熵合金的理论及试验研究,以及围绕高熵合金的相形成规律,提出了各种相形成判据的内容及相关应用,以期探索高熵合金的相形成规律提供思路。
关键词 高熵合金;相结构;相形成判据;合金设计
中图分类号 TG139 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.007 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Design of High Entropy Alloy Based on the Phase Structure

Zhang Yang^{1,2}, Ai Yunlong^{1,2}, Chen Weihua^{1,2}, Yang Qiming³, Zhu Zhentao³

(1.Key Laboratory for Microstructural Control of Metallic Materials of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University; 2.School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University;
3.Jiangxi Tongxin Machinery Manufacture Co., Ltd.)

Abstract: The theoretical and experimental research of high entropy alloys with various phase structures were reviewed, and the contents and applications of various phase formation criteria proposed on the phase formation rules of high entropy alloys were summarized, which was expected to provide ideas for establishing the phase formation rules of high entropy alloys.

Key Words: High Entropy Alloy, Phase Structure, Phase Formation Criterion, Alloy Design

YE H J W 等^[1]首先提出高熵合金,并且分别从高熵合金的成分和熵两个角度对高熵合金进行了定义。从成分的角度,高熵合金是指至少含有 5 种主要元素的合金,每种主要元素的摩尔分数在 5%~35% 之间;从熵的角度,高熵合金是指在随机状态下具有大于 1.5R 的构型熵合金^[2]。CANTOR B 等^[3]合成了第一种等摩

收稿日期:2020-07-23;**修改稿收到日期:**2020-08-15
基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20192BAB206007,20122BAB206015)
第一作者简介:张杨,男,1996 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:zy13607045445@163.com
通信作者:艾云龙,男,1962 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:ayunlong@126.com
引用格式:张杨,艾云龙,陈卫华,等. 基于相结构的高熵合金设计[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):37-42.
ZHANG Y, AI Y L, CHEN W H, et al. Design of high entropy alloy based on the phase structure[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):37-42.

[22] GUO S, NG C, LIU C T. Sunflower-like solidification micro-structure in a near-eutectic high-entropy alloy[J]. Materials Research Letters,2013, 1(4): 228-232.

[23] TAN Y, LI J, WANG J, et al. Seaweed eutectic-dendritic solidification pattern in a CoCrFeNiMnPd eutectic high-entropy alloy[J]. Intermetallics, 2017, 85: 74-79.

[24] CHANDA B, DAS J. Composition dependence on the evolution of nanoeutectic in CoCrFeNiNb_x (0.45 ≤ x ≤ 0.65) high entropy alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 20(4): 1700908.

[25] SHENG G, NG C, JIAN L, et al. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys [J]. Journal of Applied Physics,2011, 109(10): 103 505.

[26] CHANDA B, DAS J. An assessment on the stability of the eutectic phases in high entropy alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds,2019, 798: 167-173.

[27] HE F, WANG Z, CHENG P, et al. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x [J]. Journal of Alloys & Compounds,2015, 656: 284-289.

[28] LU Y P, JIANG H, GUO S, et al. A new strategy to design eutectic high-entropy alloys using mixing enthalpy[J]. Intermetallics,2017,91:124-128.

[29] JIANG H, HAN K M, GAO X X, et al. A new strategy to design eutectic high-entropy alloys using simple mixture method[J]. Materials & Design,2018,142(4): 101-105.

[30] JIN X, ZHOU Y, ZHANG L, et al. A new pseudo binary strategy to design eutectic high entropy alloys using mixing enthalpy and valence electron concentration[J]. Materials & Design,2018, 143(4): 49-55.

[31] SHAFIEI A, LI A. Design of eutectic high entropy alloys in Al-Co-Cr-Fe-Ni system[J]. Metals and Materials International,2020 (3):259-265.