● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.01.001

非等原子比 AlCoCrFeNi 高熵合金组织及力学性能研究

李洪超,王 军,赵萌萌,王 毅,李金山
(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘 要:通过改变 Co、Cr、Fe、Ni 元素含量,研究了铸态非等原子比 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 高熵合金的组织和力学性能。结果表明,Cr 元素的增加会提高 bcc 相体积分数,而 Fe、Co、Ni 元素的增加会提高 fcc 相的体积分数;对于 Co-Fe、Co-Ni、Fe-Ni 元素含量较高的 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金,其 bcc 相中一般析出球状的二次相,而在富 Cr-Ni、Co-Cr 元素的合金中,bcc 相内部分别产生了调幅分解结构和立方体形状的析出相;在铸态 $Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$ 合金内部形成了块状 fcc 相连接而成的层状组织,fcc 相之间分布着 bcc 相,这种独特的组织使其抗拉强度和伸长率分别达到了 1 049 MPa 和 11.2%。

关键词:高熵合金;非等原子比;力学性能;组织
中图分类号:TG146;TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2022)01-0001-05

Research on Microstructure and Mechanical Properties of Non-equiatomic AlCoCrFeNi High-entropy Alloys

LI Hongchao, WANG Jun, ZHAO Mengmeng, WANG Yi, LI Jinshan
(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of as-cast non-equal atomic ratio $Al_{0.5}$ (Co, Cr, Fe, Ni)$_4$ high entropy alloy were studied by changing the contents of Co, Cr, Fe and Ni. The results show that the increase of Cr increases the volume fraction of BCC phase, while the increase of Fe, Co and Ni increases the volume fraction of FCC phase. For $Al_{0.5}$ (Co, Cr, Fe, Ni)$_4$ alloy with high content of Co-Fe, Co-Ni and Fe-Ni, spherical secondary phase is precipitated in BCC phase, while for Cr-Ni and Co-Cr alloy, amplitude-modulated decomposition structure and cube-shaped precipitated phase are generated in BCC phase. Whats more, the layered structure of block fcc interconnections, with bcc phases distributed between these phases, was formed in the as-cast $Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$ alloy, this unique structure make its tensile strength and elongation reached 1 049 MPa and 11.2%, respectively.

Key words: high-entropy alloy; non-equal atomic ratio; mechanical properties; microstructure

高熵合金是近些年来涌现出的一种具有广泛应用潜力的新型金属结构材料[1]。不同于传统合金以一种或两种合金为主要元素的合金设计理念,高熵合金一般由 5 种或 5 种以上元素以等原子比或近等原子比混合而成。这种新型的合金化原理,使其具有独特的原子结构[2-4],并展示了优异的综合性能[5-6]。

高熵合金在发展初期,研究者主要研究等原子比高熵合金,例如 AlCoCrFeNi[7]、AlCoCrCuFeNi[8]等。相比于等原子比高熵合金,非等原子比高熵合金具有更大的元素调节范围,这为其组织改善和力学性能调控提供了更多的可能性。AlCoCrFeNi 系高熵合金是目前研究最广泛的高熵合金体系之一,通过改变合金中元素含量,AlCoCrFeNi 合金一般形成单相 fcc、单相 bcc、fcc+bcc 等多种相组成,进一步可以调控合金的力学性能[9-11]。例如,通过增加合金中 Al 元素含量,Al_xCoCrFeNi 合金中 fcc 相减少,bcc 相增加,合金强度提高,塑性下降[12]。Lu 等人通过提高 AlCoCrFeNi 合金中 Ni 元素的含量,得到了具有双相共晶组织的 $AlCoCrFeNi_{2.1}$ 合金,显著提高了铸态 AlCoCrFeNi 高熵合金的力学性能[13],吸引力广泛的研究兴趣[14]。

收稿日期:2021-12-06
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774240);重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0976);陕西省创新能力支撑计划(2020KJXX-073)
作者简介:李洪超(1992—),博士生.研究方向:高熵合金成分设计及强韧化.电话:02988460294,
Email:lihongchao1007@163.com
通讯作者:王 军(1985—),教授.研究方向:金属材料及其凝固行为.电话:02988460568,
Email:nwpuwj@nwpu.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在组成 AlCoCrFeNi 高熵合金的几个元素中，Al 元素对合金相组成影响最为明显，由 Chen 等人提出的 VEC 理论[15]可知，Al 元素的价电子数为 3，而 Co、Cr、Fe、Ni 元素的价电子数分别为 9、6、8、10，少量 Al 元素的添加就可以引起合金价电子浓度的降低，提高 bcc 相含量，使合金强度提升。因此目前的研究主要以 Al 元素的变化开展研究，但是 Co、Cr、Fe、Ni 元素含量同样对合金相组成及力学性能有重要影响，在此类研究的开展过程中还存在一些问题：在进行试验设计时没有控制 Al 元素的含量，而 Al 元素本身对合金相组成及力学性能的影响容易将其他元素的作用掩盖；研究者分别研究了 Co、Cr、Fe、Ni 对合金相组成的影响[16]，对多种元素的共同作用研究较少。

基于以上问题，本文作者以我们前期对铸态 $Al_{0.5}CoCrFeNi$ 合金的研究工作为基础[17]，通过控制 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金中 Al 元素含量，分别调整过渡族金属元素 Co、Cr、Fe、Ni 的含量，研究多种元素的共同作用对合金组织、相组成及力学性能的影响，分析其潜在规律，丰富 AlCoCrFeNi 系高熵合金的相组成及力学性能调控手段。

1 试验材料与方法

所采用的原材料分别为纯度大于 99.95% 的 Al、Co、Cr、Fe、Ni 纯金属，对 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金按照 $Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$、$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$、$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{1.2}$（原子比）成分进行配比称重（总重 65 g）。利用非自耗真空电弧熔炼炉，在氩气的保护下对合金铸锭进行熔炼。为保证熔炼均匀性，每次熔炼完成将合金锭翻转，反复熔炼 4~5 次，最终得到直径约为 33 mm，厚度约为 10 mm 的纽扣锭。

采用多晶 X 射线衍射仪对铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金进行相结构分析，工作参数为：Cu 靶 Kα（波长 λ=0.154 06 nm）、工作电压 40 kV、工作电流 30 mA、扫描角度 20~100°、扫描速度 4°/min。分别采用 OLYMPUS 光学显微镜和 FEI Helios G4 CX 聚焦离子 / 电子双束扫描电子显微镜观察了合金的组织形貌。在进行 XRD 测试之前，用 80#-2 000# 砂纸将样品表面打磨平整，然后置于超声波清洗仪中清洗并吹干。在对合金组织形貌观察前，用 2 000# 砂纸对样品进行机械抛光，之后用配比为 $HClO_4$:C_2H_5OH=1:9 的电解液对合金进行电解抛光，抛光参数为：电压 25 V，时间 25 s。采用电火花切割机从合金铸锭上切取板状拉伸式样，其平行段尺寸为 8.0 mm×2.0 mm×1.5 mm，拉伸前，用 1 500# 砂纸将试样打磨光亮。使用 Zwick/Roell 拉伸试验机进行室温拉伸试验，拉伸速率为 1×10^{-3} s^{-1}。

2 试验结果及讨论

2.1 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金组织分析

图 1 为铸态 $Al_{0.5}$ (Co, Cr, Fe, Ni)$_4$ 合金的 XRD 图片。可以看出，相比于铸态 $Al_{0.5}CoCrFeNi$ 高熵合金[17]，随着 Co、Cr、Fe、Ni 元素的变化，$Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金仍然由简单的 fcc 和 bcc 相组成，并没有观察到其他相的衍射峰。同时 fcc 相的衍射峰明显强于 bcc 相的衍射峰，这说明对于 Al 元素含量为11.11 at%的 AlCoCrFeNi 高熵合金，在一定范围内改变 Co、Cr、Fe、Ni 元素含量，并不会大幅度改变 fcc 和bcc 相的体积分数。并且，对于 Cr 元素含量较高的 $Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$ 合金，bcc 相的衍射峰比较明显，这表明其 bcc 相含量较高。此外，观察 6 个合金成分的 XRD 图片可知，fcc 相某个晶面如(111)、(200)或(311)的峰强度非常高，远高于整个物相的其他峰强，这说明 fcc 相在凝固过程中存在着择优取向。

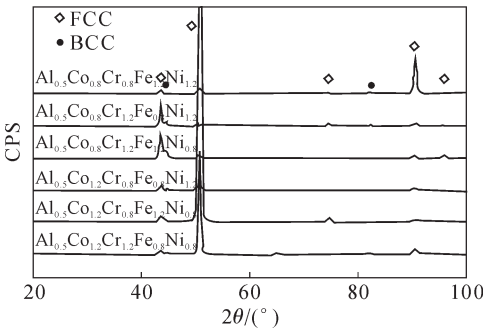
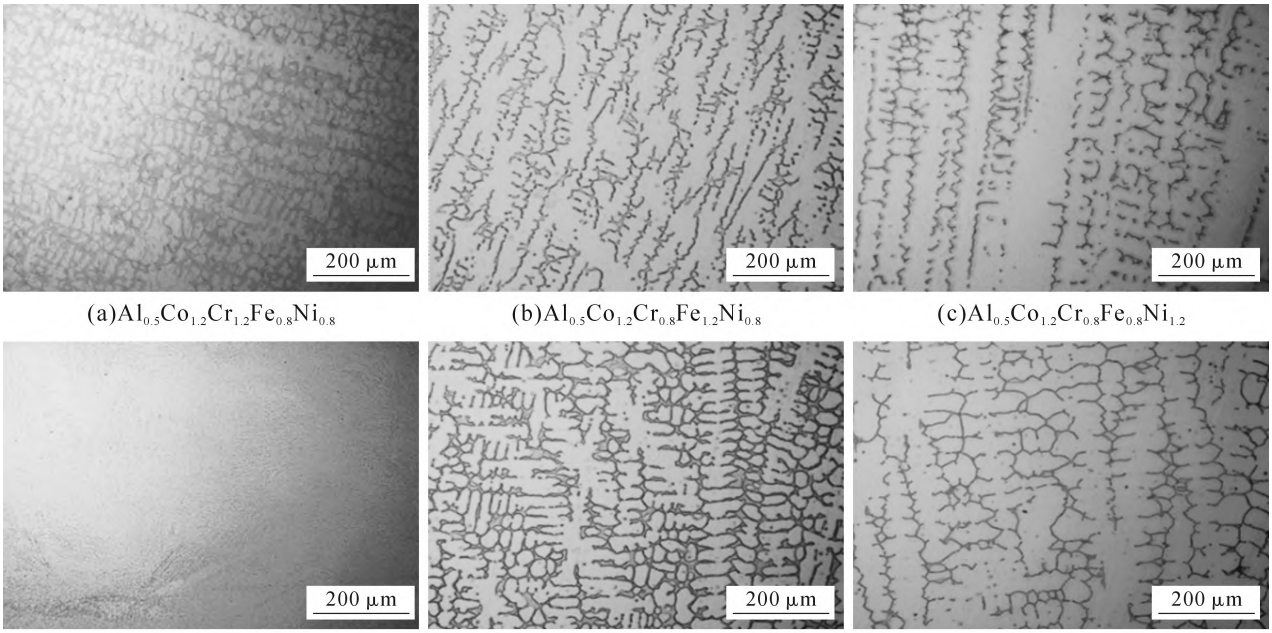


图 1 铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金的 XRD 谱
Fig.1 XRD patterns of as-cast $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ alloy

图 2 为铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金的光学显微镜图片。观察图 2(d)可知，$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$ 合金主要由随机取向的片层组织组成。除了 $Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$ 合金外，其他合金均由树枝晶和枝晶间的第二相组成，并且树枝晶生长基本沿一个方向择优生长。由 XRD 结果可知，合金主要由 fcc 相和少量的 bcc 相组成，因此可以认为，树枝晶相为 fcc 相，枝晶间相为 bcc 相。观察图 2 中的 b、c、f 图，对于 Co-Fe、Co-Ni、Fe-Ni 元素含量较高的合金，其初生 fcc 枝晶相体积分数分别达到了 92.9%、97.9%、91.8%，由于 Fe、Co、Ni 元素的价电子数≥8，增加 Fe、Co、Ni 元素有利于提高合金的整体价电子

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$　(b)$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$　(c)$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$

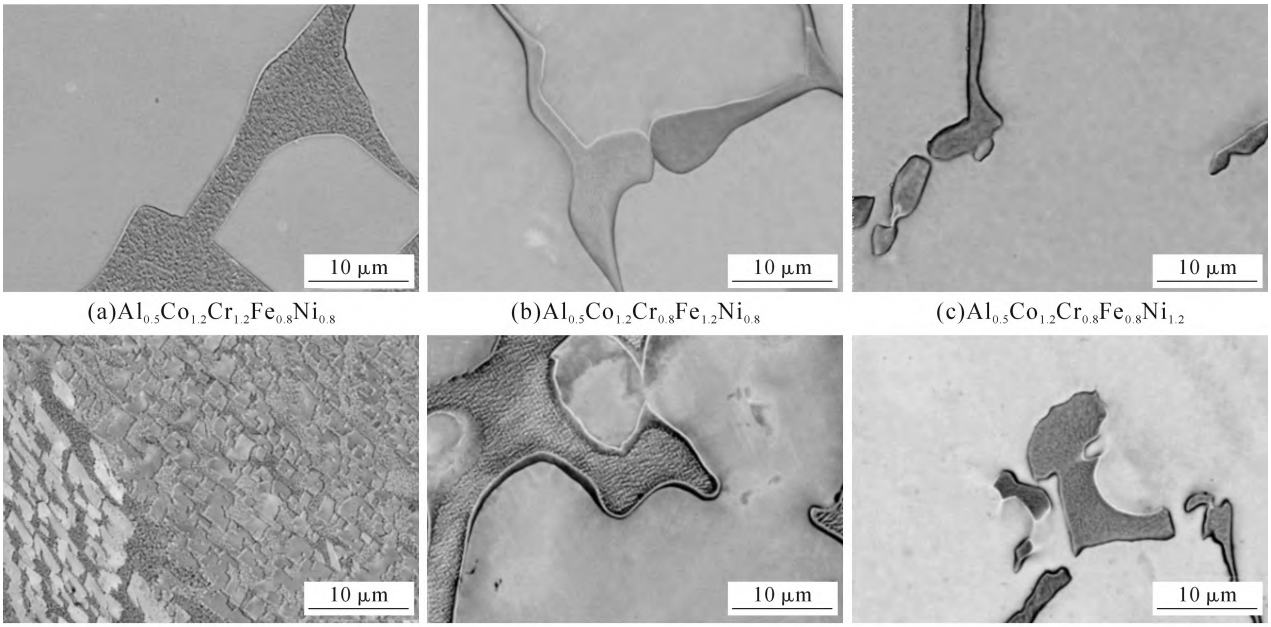
(d)$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$　(e)$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$　(f)$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{1.2}$

图 2 铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金的光学显微镜图片

Fig.2 Optical microscope images of as-cast $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ alloy

浓度，因此有利于提高合金的 fcc 相体积分数。相比之下，图 2(a)和 e 中富含 Co-Cr、Cr-Ni 的合金 fcc 枝晶相体积分数较小，分别为 66.0%、86.3%，进一步通过扫描电镜图片(图 3d)计算了富 Cr-Fe 合金的 fcc 相体积分数为 53.9%，Cr 元素的加入降低了 fcc 相的体积分数，其中提高 Cr-Fe 元素对 fcc 和 bcc 相体积分数影响最为显著，fcc 相和 bcc 相体积分数分别达到了 53.9%和 46.1%。

为了对枝晶间相进一步分析，利用扫描电子显微镜观察了铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金的微观形貌，如图 3 所示。虽然合金均由 fcc 相和 bcc 相组成，但是 bcc 相内部结构却有很大差异。对于富 Co-Cr 元素的 $Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$ 高熵合金，在 bcc 相内部产生了立方体状的析出相，在富 Cr-Ni 元素的合金中，bcc 相内部产生了调幅分解结构的析出相，在铸态等原子比 AlCoCrFeNi 高熵合金中也发现了此类相结构[18]。对于 Co-Fe、Co-Ni、Fe-Ni 元素含量较高的 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金，其 bcc 相中一般析出球状的二次相，如图 3b、c、f 所示。观察图 3(d)中富 Cr-Fe 的 $Al_{05}Co_{08}Cr_{12}Fe_{12}Ni_{08}$ 合金微观组



(a)$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$　(b)$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$　(c)$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$

(d)$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$　(e)$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$　(f)$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{1.2}$

图 3 铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金的扫描电镜图片

Fig.3 SEM images of as-cast $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ alloy

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

织，可以看出，在光学显微镜下观察到的片层组织由连续分布的块状 fcc 相及 fcc 相间的 bcc 相组成。

进一步，用 X 射线能谱分析了 fcc 相和 bcc 相的元素分布，如表 1。对于 Cr 元素含量较少的 $Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$ 和 $Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{1.2}$ 合金，其 bcc 相主要富集 Al 和 Ni 元素，这在 AlCoCrFeNi 合金中十分常见 [19]。但对于富含 Cr 元素的 $Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$ 和 $Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$ 合金，其 bcc 相一般富集 Cr 元素，而且相比于富 Co-Cr、Fe-Cr 元素的合金，富 Cr-Ni 元素的合金的 bcc 相中还存在着 Al、Ni元素的富集。

2.2 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金力学性能

对铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金进行了室温拉伸实验，结果如图 4。合金力学性能随着 Co、Cr、Fe、Ni 元素的变化有明显的差异。对于富 Co-Fe、Co-Ni、Fe-Ni 的铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金，它们的拉伸性能差别不大，屈服强度为 210~230 MPa，拉伸塑性均在 47%左右，这源于这些合金内部存在 90%以上的 fcc 相，促进了合金的均匀变形，但是合金强度不高。对于富 Cr 元素的 $Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$、$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$ 和 $Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$ 合金，同时增加 Cr 元素和 Fe 元素时合金强度最高，其抗拉强度达到了 1 049 MPa，拉伸塑性也达到了 11.2%，

表 1 铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金 fcc 和 bcc 相的元素分布

Tab.1 Element distribution of fcc and bcc phases of as-cast $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ alloy

Alloy	Phase	Al(at%)	Co(at%)	Cr(at%)	Fe(at%)	Ni(at%)
$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{0.8}$	fcc	8.5	31.6	30.3	14.5	15.1
	bcc	8.7	27.2	40.1	13.0	10.8
$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$	fcc	9.1	32.0	20.3	23.8	14.9
	bcc	20.9	27.4	15.2	15.5	20.9
$Al_{0.5}Co_{1.2}Cr_{0.8}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$	fcc	9.3	31.5	22.0	16.0	21.3
	bcc	26.5	23.4	10.2	8.5	32.0
$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$	fcc	7.3	22.8	28.8	25.0	16.1
	bcc	11	17.0	38.6	21.6	11.8
$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{0.8}Ni_{1.2}$	fcc	8.5	22.3	31.6	15.9	21.7
	bcc	14.9	16.3	31.2	12.1	25.5
$Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{0.8}Fe_{1.2}Ni_{1.2}$	fcc	8.9	21.5	21.4	25.2	23.0
	bcc	26.7	16.3	9.1	13.2	34.7

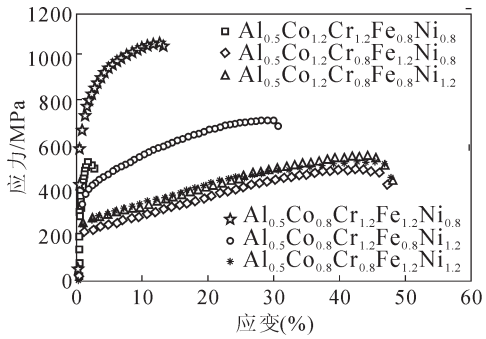


图 4 铸态 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金的拉伸应力应变曲线

Fig.4 Tensile stress-strain curve of as-cast $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ alloy

这与其均匀分布的 fcc 相和 bcc 相有关。同时增加 Co 元素和 Cr 元素合金，合金的塑性和强度最小。对于富 Cr-Ni 元素的合金，抗拉强度和伸长率分别达到了 719 MPa 和 30.6%。因此，增加 Cr 元素的含量可以显著提高合金强度，但合金伸长率有所下降。

3 结论

(1)随着 Co、Cr、Fe、Ni元素在一定范围内变化，$Al_{0.5}$ (Co, Cr, Fe, Ni)$_4$ 高熵合金由 fcc 相和 bcc 相组成，并且 fcc 相含量高于 bcc 相。

(2)Cr 元素的增加会提高 bcc 相体积分数，而 Fe、Co、Ni 元素的增加会提高 fcc 相的体积分数。

(3)在富 Cr-Ni 元素的合金中，bcc 相内部产生了调幅分解结构的析出相，对于 Co-Fe、Co-Ni、Fe-Ni 元素含量较高的 $Al_{0.5}(Co, Cr, Fe, Ni)_4$ 合金，其 bcc 相中一般析出球状的二次相。

(4)Cr 元素的增加有助于提高合金强度，降低合金塑性。在铸态 $Al_{0.5}Co_{0.8}Cr_{1.2}Fe_{1.2}Ni_{0.8}$ 合金内部形成了块状 fcc 相连接而成的层状组织，相间分布着 bcc 相，这种独特的组织结果使其抗拉强度和伸长率分别达到了 1 049 MPa 和 11.2%。

参考文献：

[1] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, A375-377: 213-218.

[2] 余倩，陈雨洁，方研. 高熵合金中的元素分布规律及其作用[J]. 金属学报, 2021, 57: 393-402.

[3] 丁俊，王章洁. 高熵合金中的局域化学有序[J]. 金属学报, 2021,

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

57: 413-424.

[4] 杨勇，赫全锋. 高熵合金中的晶格畸变 [J]. 金属学报, 2021, 57: 385-392.

[5] LI Z, ZHAO S, RITCHIE R O, et al. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys [J]. Progress in Materials Science, 2019, 102: 296-345.

[6] 靳柯，卢晨阳，豆艳坤，等. 高熵合金辐照损伤的实验研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34: 17018-17030.

[7] WANG Y P, LI B S, REN M X, et al. Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 491(1-2): 154-158.

[8] TUNG C C, YEH J W, SHUN T T, et al. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system [J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 1-5.

[9] 谭雅琴，王晓明，朱胜，等. 高熵合金强韧化的研究进展[J]. 材料导报，2020, 34: 05120-05126.

[10] 李洪超，王军，袁睿豪，等. AlCoCrFeNi 系高熵合金的强化方法研究[J]. 材料导报，2021, 35: 17010-17018.

[11] 吕昭平，雷智锋，黄海龙，等. 高熵合金的变形行为及强韧化[J]. 金属学报，2018, 54(11): 85-98.

[12] LI R X, LIAW P K, ZHANG Y. Synthesis of $Al_xCoCrFeNi$ high-entropy alloys by high-gravity combustion from oxides [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 707: 668-673.

[13] LU Y, DONG Y, GUO S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6200.

[14] 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.

[15] CHEN R, QIN G, ZHENG H, 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.

[16] MA Y, WANG Q, JIANG B B, et al. Controlled formation of coherent cuboidal nanoprecipitates in body-centered cubic high-entropy alloys based on $Al_2(Ni,Co,Fe,Cr)_{14}$ compositions[J]. Acta Materialia, 2018, 147: 213-225.

[17] NIU S Z, KOU H C, WANG J, et al. Improved tensile properties of $Al_{0.5}CoCrFeNi$ high-entropy alloy by tailoring microstructures [J]. Rare Metals, 2021, 40(9): 2508-2513.

[18] ZHAO C, LI J, HE Y, et al. Effect of strong magnetic field on the microstructure and mechanical-magnetic properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 820: 153407.

[19] WANG S, ZHAO Y, XU X, et al. Evolution of mechanical properties and corrosion resistance of $Al_{0.6}CoFeNiCr_{0.4}$ high-entropy alloys at different heat treatment temperature [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 244: 122700.

2022年《铸造技术》杂志征订

1979年创刊 月刊 西安市科学技术协会主管 西安市铸造学会主办

国内邮发代号：52-64 国外发行号：M855 中国标准连续出版物号 ISSN 1000-8365 CN 61-1134/TG

《铸造技术》杂志是集中报道国内外铸造领域先进科研成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态的综合性科技期刊。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。对科研院所与企业的研究人员、工程技术人员、管理人员以及高等院校师生具有参考价值。

《铸造技术》杂志刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器仪表、计算机模拟软件、3D打印等相关信息，为铸造行业的供应商、采购商搭建平台、提供服务。

请读者从当地邮局或本刊编辑部订阅。全年12期，每期定价25元，平邮全年300元（含邮费），快递全年420元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

联系地址：陕西省西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学凝固楼308室

电话/传真：（029）88491681 88491682

联系人：李巧凤13991824906

http：//www.zhuzaojishu.net

Email：zzjs@263.net.cn

铸造技术杂志

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net