

热处理对 CuNiCoMnAl 多主元合金组织与性能的影响

朱成圆<sup>1</sup> 张俊<sup>2</sup> 柳俊晨<sup>1</sup> 杨志勇<sup>1</sup> 陈维平<sup>1</sup>

(1.华南理工大学机械与汽车工程学院,广东省金属新材料制备与成形重点实验室;2.陆军驻重庆地区军代局)

**摘 要** 设计并通过铸造方法制备了(Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>10</sub>Al<sub>5</sub>和(Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>7</sub>两种多主元合金,研究了其铸态和均匀态的相组成、微观组织与力学性能。结果表明,铸态合金均为双相 FCC 结构,微观组织为典型的树枝晶组织,其中枝晶为富 Ni-Co-Al 相、枝晶间为富 Cu 相。(Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>10</sub>Al<sub>5</sub>和(Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>7</sub>合金的室温拉伸性能较好,屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为 238 和 251 MPa,500 和 530 MPa,45.1% 和 43.1%。与基体 Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>合金相比,两种合金的伸长率分别提升了 24 倍和 23 倍。经均匀化处理后,两种合金的成分均匀,得到单相 FCC 固溶体,但强塑性较铸态均有所下降。均匀态合金屈服强度下降的原因是晶粒粗化和树枝晶组织消失,塑性降低与 Al、Mn 元素造成的晶格畸变及 Mn 元素的强化学活性有关。

**关键词** 多主元合金;显微组织;力学性能

**中图分类号** TG146.1<sup>+</sup>1;TG113.25 **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2023.09.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Heat Treatment on Microstructure and Properties of CuNiCoMnAl Multi-principal-element Alloy

Zhu Chengyuan<sup>1</sup>, Zhang Jun<sup>2</sup>, Liu Junchen<sup>1</sup>, Yang Zhiyong<sup>1</sup>, Chen Weiping<sup>1</sup>

(1. Guangdong Key Laboratory for Advanced Metallic Materials Processing, College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology; 2. Chongqing Military Representative Bureau)

**Abstract:** (Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>10</sub>Al<sub>5</sub> and (Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>7</sub> multi-principal-element alloys (MPEA) were designed and fabricated, and the phase composition, microstructure and mechanical properties of as-cast and homogenized alloys were investigated. The results indicate that as-cast alloy is composed of dual FCC solid-solution phases, and the microstructure is characterized by dendrite structure, in which the dendrite is Ni-Co-Al rich phase and the interdendritic is Cu-rich phase. (Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>10</sub>Al<sub>5</sub> and (Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>)<sub>85</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>7</sub> alloys exhibit desirable tensile properties at room temperature, with yield strength of 238 MPa and 251 MPa, tensile strength of 500 MPa and 530 MPa, and elongation of 45.1% and 43.1%. Compared with Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub> alloy, the elongation of the MPEA is increased by 24 times and 23 times, respectively. After homogenizing treatment, the composition of MPEA is uniform, and the single-FCC solid solution is generated, while the strength plasticity is lower than that of as-cast ones. The reduction of yield strength is attributed to grain coarsening and disappearance of dendrite structure, and the reduction of plasticity is related to the lattice distortion caused by Al and Mn elements and the strong chemical activity of Mn elements.

**Key Words:** Multi-principal-element Alloys, Microstructure, Mechanical Properties

多主元合金包括中熵合金和高熵合金<sup>[1]</sup>,极大地拓展了合金的设计空间,为探索新型合金提供了更多可能。同时,由于多主元的特性,使其可以获得传统合金难以获得的优异性能<sup>[2]</sup>。单相 FCC(面心立方)多主元合金通常具有良好的塑性、优异的耐腐蚀性能和断裂韧度<sup>[3-5]</sup>,其优异的塑性和应变硬化能力使其成为理想的

基体合金。因此,多种 FCC 系列多主元合金,如 CrCo-Ni、VCoNi 和 FeCrCoNi 合金,得到了广泛研究<sup>[6-10]</sup>。研究发现,Cu 有助于提高多主元合金的耐微生物腐蚀性能,这是由于高浓度的 Cu<sup>2+</sup> 可以阻止海洋生物腐蚀性细菌种类的生长和生物膜的形成<sup>[11-14]</sup>。含 Cu 多主元合金在海洋环境中表现出巨大的应用潜力,海洋环境

收稿日期:2023-05-31;修改稿收到日期:2023-07-07  
基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52103360),广东省重点领域研发计划资助项目(2018B090905002)  
第一作者简介:朱成圆,女,2000 年出生,硕士研究生,广州(510640),E-mail:202220101111@mail.scut.edu.cn  
通信作者:陈维平,男,1959 年出生,教授,广州(510640),E-mail:mewpchen@scut.edu.cn  
引用格式:朱成圆,张俊,柳俊晨,等. 热处理对 CuNiCoMnAl 多主元合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 240-1 245.  
ZHU C Y, ZHANG J, LIU J C, et al. Effects of heat treatment on microstructure and properties of CuNiCoMnAl multi-principal-element alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 240-1 245.

要求结构功能集成材料具有优异的力学性能和抗菌性能<sup>[15]</sup>。然而,迄今为止,富 Cu 单相 FCC 多主元合金的研究报道很少。众所周知,Cu、Ni 和 Ni、Co 都可无限互溶,这表明Cu-Ni-Co可能形成 FCC 固溶相。

课题组前期设计了一组  $(\text{CuNi})_{100-x}\text{Co}_x$  ( $x = 15$ 、20、25 和 30,摩尔分数,下同)多主元合金,并对其相组成、显微组织和力学行为进行了研究,发现  $(\text{CuNi})_{70}\text{Co}_{30}$  合金具有较好的强度但塑性较差,其伸长率仅有 1.9%<sup>[16]</sup>,因而考虑通过合金化方式进一步优化其性能。Mn 元素常被用来改善合金的铸造性能,可作为脱氧剂加入到镍铝青铜合金中,以提高熔体的流动性,降低铸造缺陷出现的几率<sup>[17]</sup>;Al 是多主元合金中常见的固溶强化元素,可有效提高合金的性能<sup>[18-21]</sup>。

因此,本研究选取  $(\text{CuNi})_{70}\text{Co}_{30}$  (即  $\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30}$ ) 作为基体合金,通过添加 Mn、Al 元素设计了名义成分为  $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_x\text{Al}_{15-x}$  合金 ( $x = 8$ 、10,记为 Mn8 和 Mn10 合金)。采用真空电弧熔炼技术制备合金,并对其铸态和均匀态的相组成、微观组织及力学性能进行研究,旨在为含铜高熵合金的应用提供参考。

## 1 试验方法

以质量分数高于 99.5% 的纯 Cu、Ni、Co、Mn 及 Al 颗粒作为原材料,根据合金的名义成分,以 90 g 的总质量计算各元素的质量,并使用精度为 0.001 g 的精密天平称量原料质量。采用非自耗型真空电弧熔炼炉熔炼  $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_x\text{Al}_{15-x}$  ( $x = 8$ 、10)多主元合金,在高纯氩气保护下反复熔炼 5 次以上,以确保合金化学成分的均匀性。在氩气保护的 GR-AF12/14 型热处理炉中对合金进行  $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \times 15\text{ h}$  的均匀化处理,最后水淬。

使用线切割制取  $\phi 5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  的试样,经研磨抛光后在采用 Cu 靶的 Panalytical X'Pert 型 X 射线衍射仪进行相组成分析,工作电压为 40 kV,扫描角度范围为  $20^{\circ} \sim 100^{\circ}$ ,扫描速度为  $2(^{\circ})/\text{min}$ 。使用配有能谱仪(EDS)的 Phenom XL 型扫描电镜(SEM)观察试样的微观组织;采用 Instron-1123 型万能拉伸试验机对合金进行室温性能测试,试样尺寸为  $10\text{ mm} \times 2.5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ,应变速率为  $1 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 铸态 CuNiCoMnAl 合金的组织

图 1 为铸态 Mn8 和 Mn10 多主元合金的 XRD 图谱。可以看出,两种合金中均只存在单一的 FCC 结构。经计算,铸态 Mn8 和 Mn10 多主元合金的晶格常数分

别为 0.359 22 和 0.359 61 nm。单一 FCC 相结构的形成可能与合金原子半径相似有关。但单一的 FCC 衍射峰并不表明该合金为单相的 FCC 结构,主要是因为多主元合金相的晶体结构相同并且晶格常数非常接近时,两相的衍射峰会发生重叠并难以分辨。因此,还需进一步表征其相组成。

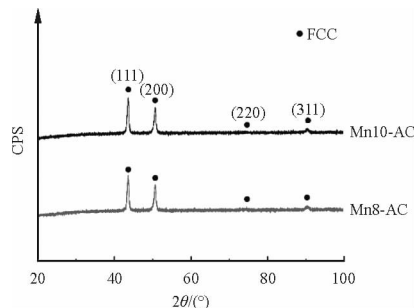
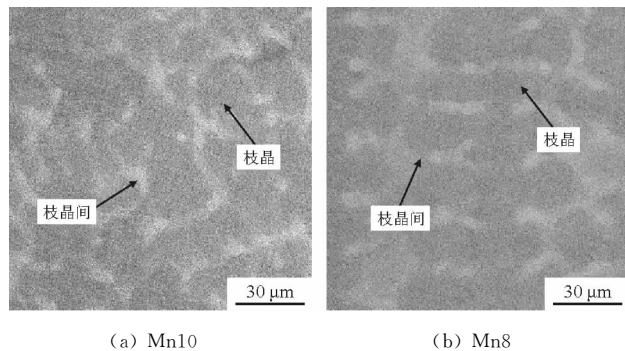


图 1 铸态 CuNiCoMnAl 多主元合金 XRD 图谱  
(AC 为铸态)

Fig.1 XRD patterns of as-cast CuNiCoMnAl MPEAs

图 2 为铸态 Mn8 和 Mn10 多主元合金的 BSE 组织。可以看出,两种铸态合金的形貌均呈树枝状,可据此判断其结构与  $\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30}$  基体合金类似<sup>[16]</sup>,为双相 FCC 结构,且两相晶格常数相近。



(a) Mn10 (b) Mn8

图 2 铸态 CuNiCoMnAl 多主元合金的 BSE 图

Fig.2 BSE images of as-cast CuNiCoMnAl MPEAs

含 Cu 多主元合金中常存在 Cu 元素的富集现象,其原因是 Cu 与其他元素之间的混合焓为正,表示原子对之间存在不互溶性<sup>[2]</sup>。在凝固时低熔点的 Cu 原子被排斥到固、液界面前沿造成 Cu 元素的富集,形成富 Cu 的枝晶间相。对于 Mn8 和 Mn10 合金,枝晶的形态聚集呈团球状,枝晶含量较高。这是由于 Mn8 与 Mn10 合金化学成分中 Ni、Co 摩尔比较大的缘故。为分析合金的元素分布,对 Mn10 与 Mn8 合金中枝晶与枝晶间区域进行了 EDS 能谱分析,结果见表 1。可见 Ni、Co、Al 元素富集于枝晶区域,Mn 大致均匀分布,而 Cu 富集于枝晶间区域。由 EDS 结果可知,Mn8 合金中枝晶间 Cu 富集现象较 Mn10 合金略微明显,摩尔分数为 52.9%。这是因为虽然 Mn8 与 Mn10 合金中的 Cu 含量相同,但 Mn8 合金中 Al 含量高于 Mn10 合金的。

Al 与 Ni、Co 元素均具有较负的混合焓<sup>[22]</sup> (Al-Ni: -22 kJ/mol; Al-Co: -19 kJ/mol), 而 Al-Cu 混合焓仅为 -1 kJ/mol, 表明 Al 与 Ni、Co 的亲合力大于 Cu。因此, Al 元素富集于枝晶, 从而降低了 Cu 元素在枝晶中的固溶度, 导致 Cu 元素在枝晶间的富集变得更明显。

表 1 铸态多主元合金的 EDS 结果

Tab.1 EDS results of as-cast MPEAs

| 合金   | 区域   | 晶体结构 | $x_B/\%$ |      |      |      |      |
|------|------|------|----------|------|------|------|------|
|      |      |      | Cu       | Ni   | Co   | Mn   | Al   |
| Mn10 | 名义成分 | —    | 29.8     | 29.8 | 25.4 | 10.0 | 5.0  |
|      | 枝晶   | FCC1 | 26.2     | 28.5 | 23.8 | 9.3  | 12.2 |
|      | 枝晶间  | FCC2 | 51.8     | 19.9 | 11.8 | 10.0 | 6.5  |
| Mn8  | 名义成分 | —    | 29.8     | 29.8 | 25.4 | 8.0  | 7.0  |
|      | 枝晶   | FCC1 | 23.4     | 29.6 | 29.1 | 9.2  | 8.7  |
|      | 枝晶间  | FCC2 | 52.9     | 19.2 | 11.3 | 12.8 | 3.8  |

2.2 铸态 CuNiCoMnAl 合金的力学性能

图 3 为铸态 Mn10、Mn8 合金的力学性能。由图 3a 可以看出, 两种铸态合金均表现出优异的拉伸塑性, Mn10、Mn8 合金的伸长率分别为 45.1% 和 43.1%, 显著优于基体合金的 1.9%<sup>[16]</sup>。Mn10 合金的屈服强度和抗拉强度均低于 Mn8 合金, 分别为 238 MPa 和 500

MPa 以及 251 MPa 和 530 MPa。由图 3c 可以看出, 在第 1 阶段, 合金的加工硬化率均急剧降低, 这是合金正在经历弹塑性转变所致; 第 2 阶段, 所有合金的加工硬化率有所增大, 后趋于平稳。这在 FCC 系合金的室温拉伸应力应变曲线是比较少见的, FCC 系合金多见于第二阶段维持稳定不变, 或缓慢降低的趋势<sup>[23]</sup>。YANG T 等<sup>[24]</sup>研究的 NiCoFeCrAlTi 多主元合金在低温拉伸时的加工硬化率曲线和本研究类似。在第 2 阶段呈上升趋势, 表明合金在这一阶段的形变过程中存在除位错滑移以外的强化机制。经透射表征分析认为这一特殊的强化过程是由合金在拉伸过程中产生的形变孪晶所致。由此可推断, 铸态 CuNiCoMnAl 多主元合金出现加工硬化率逐渐增加的现象, 很可能是因为合金中存在孪生变形, 提高了合金的加工硬化率。在第 3 阶段, 合金加工硬化率开始随真应变的提高而下降, 这在合金中也是很普遍的现象。

图 4 为 Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub> 基体合金与添加 Mn、Al 元素优化的 Mn10 与 Mn8 合金的性能对比图。分析可知, 添加 Mn、Al 元素后合金的塑性显著提高, Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub>

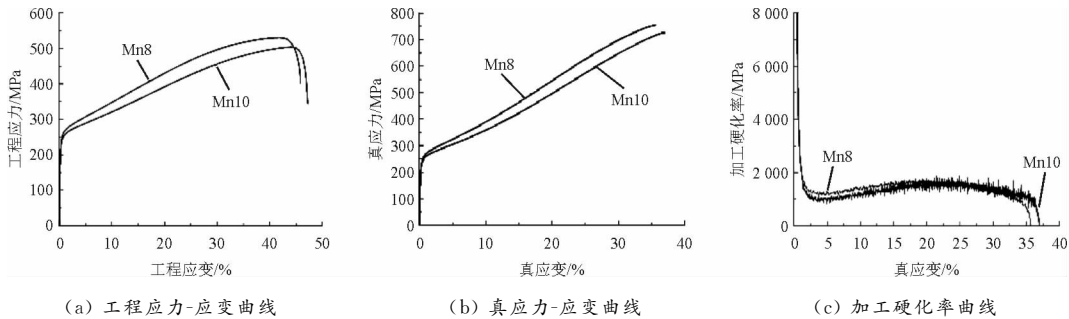


图 3 铸态 Mn10、Mn8 合金的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of as-cast Mn10 and Mn8 alloys

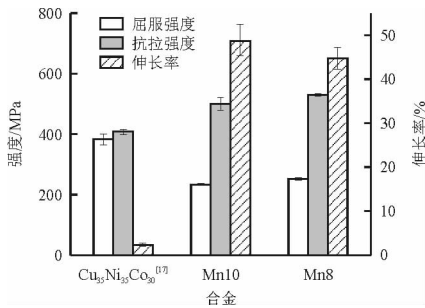


图 4 Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub> 基体合金<sup>[16]</sup>与 CuNiCoMnAl 多主元合金性能对比

Fig.4 Property comparison of Cu<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Co<sub>30</sub> matrix alloy and CuNiCoMnAl MPEAs

基体伸长率仅为 1.9%, 而 Mn10 与 Mn8 合金的伸长率分别为 45.1% 与 43.1%, 分别提高了 24、23 倍。对比合金的屈服强度与抗拉强度可知, 合金化使 Mn10 与 Mn8 合金的屈服强度较基体合金有所降低, 但由于

Mn10 与 Mn8 合金的塑性较高, 变形过程中的加工硬化效果显著, 因此两种合金的抗拉强度均高于基体合金<sup>[16]</sup>。添加 Mn、Al 元素后, 合金抗拉强度增大, 塑性显著提高。这是因为一方面, Mn 元素在合金中均匀分布, 提高了合金熔体的流动性, 减少了铸造缺陷; 另一方面, 高 Cu 含量的多主元合金中通常存在细小的纳米级富 Cu 析出相, 如 CuNiCoMn 系多主元合金, 析出相与基体共格且具有相近的晶格常数<sup>[25]</sup>, 共格富 Cu 纳米析出相可以同时提高合金的强度与塑性。

2.3 均匀态 CuNiCoMnAl 合金的微观组织

铸态的 CuNiCoMnAl 多组元合金均呈双相树枝晶结构, Cu 元素富集于枝晶间, Ni、Co、Al 元素富集于枝晶。由于元素分布的不均匀性对合金的力学性能影响很大, 故对两种合金采取均匀化热处理手段, 以消除铸态的树枝晶组织而获得单相 FCC 固溶体。

图 5 为 Mn10 合金和 Mn8 合金均匀化热处理后的 XRD 图谱。可以看出,两种合金经热处理后均呈单一的 FCC 衍射峰结构,经计算,均匀态的 Mn8 和 Mn10 多主元合金的晶格常数分别为 0.359 93 和 0.359 64 nm。与铸态合金的 XRD 图谱相比,Mn10 合金与 Mn8 合金的衍射峰相对位置发生了变化,这表明合金原子间发生了进一步相互固溶。其中,Mn8 合金在同一晶面发生衍射的角度较 Mn10 更小,故 Mn8 合金有着更大的晶格常数。这是由于 Mn8 合金与 Mn10 合金仅有 Al、Mn 元素之间相对摩尔比的不同,Al 的原子半径较 Mn 原子大,故当 Al 原子固溶进合金中,产生更大的晶格畸变,晶格常数更大,造成衍射峰向左偏移。同样地,XRD 并不能证明该类合金仅为单一 FCC 相,需通过其他表征手段证明。

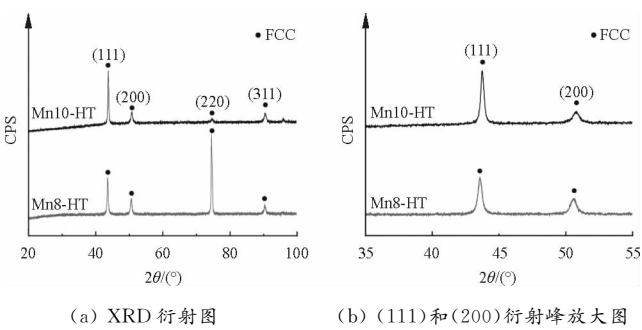


图 5 均匀态 CuNiCoMnAl 多主元合金 XRD 衍射图谱 (HT 为均匀化热处理)

Fig.5 XRD patterns of homogenized CuNiCoMnAl MPEAs

图 6 和图 7 分别为两种合金经 1 000 ℃ 保温 15 h 均匀化热处理后的 BSE 图以及相应的元素分布。可以看出,均匀态 CuNiCoMnAl 合金的 BSE 图片展现出均

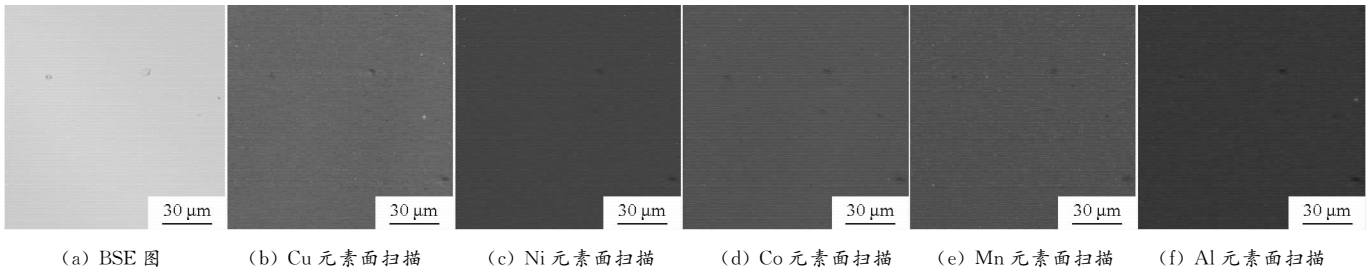


图 6 均匀态 Mn10 合金的 BSE 图及 EDS 元素面扫描分布图  
Fig.6 BSE images of Mn10 alloy and corresponding EDS mapping analysis

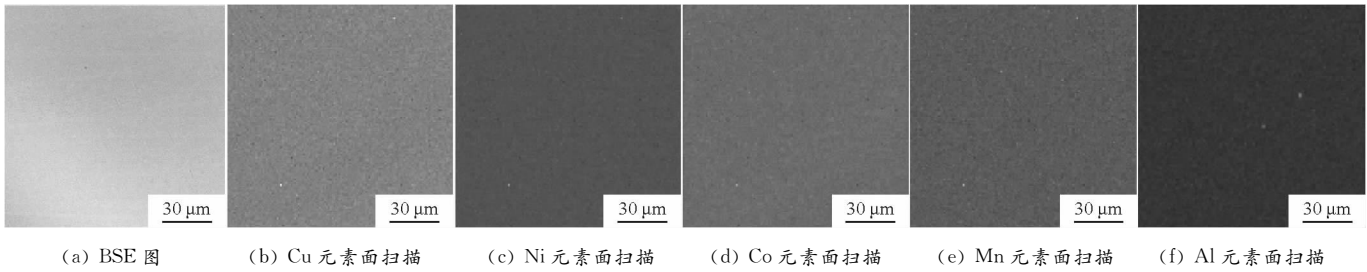


图 7 均匀态 Mn8 合金的 BSE 图及其 EDS 元素面扫描分布图  
Fig.7 BSE images of Mn8 alloy and corresponding EDS mapping analysis

匀的组织,且元素分布均匀,这表明 Cu、Ni、Co、Mn 以及 Al 元素在高温下进行长时间热处理后都均匀扩散至合金中,最终消除了树枝晶组织,形成了单相 FCC 的组织结构。

2.4 均匀态 CuNiCoMnAl 合金的力学性能

图 8 为 CuNiCoMnAl 合金经过 1 000 ℃ 保温 15 h 均匀化热处理后的拉伸应力-应变曲线及加工硬化率曲线。其相应的屈服强度、抗拉强度和伸长率见

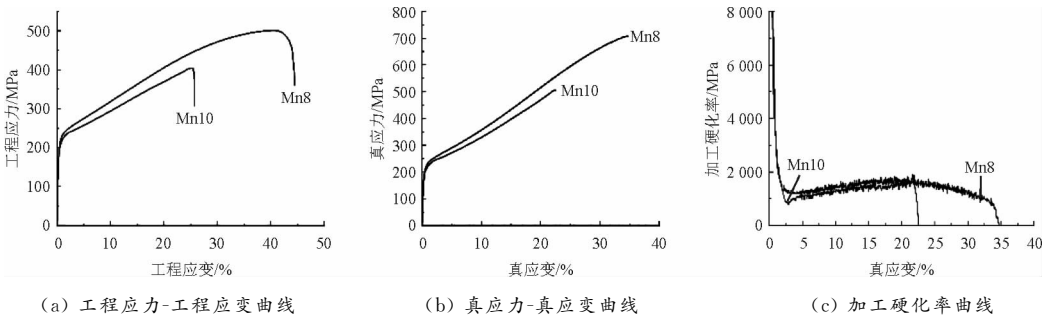


图 8 均匀态 CuNiCoMnAl 合金的力学性能  
Fig.8 Mechanical properties of homogenized CuNiCoMnAl MPEAs

表 2。从图 8a 和图 8b 可以看出,Mn10 与 Mn8 合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 214 和 224 MPa、405 和 501 MPa、25.4% 和 42.7%。与其铸态合金相比,均匀态 Mn10 合金的屈服强度、塑性及应变硬化指数均有所降低。而均匀态 Mn8 合金屈服强度下降,塑性及应变硬化指数相当。屈服强度的下降是由晶粒粗化和元素偏析固溶进合金基体所致。塑性及应变硬化指数的降低则从两个方面考虑:一方面,Al、Mn 原子固溶进  $\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30}$  基体合金后产生较大的晶格畸变,会降低合金的塑性变形能力;另一方面,由于 Mn 的化学活性很强,易在长时间的热处理过程中吸氧,从而在合金中形成富 Mn 氧化物,恶化合金的性能<sup>[26]</sup>。因此,较高的 Mn 含量可能是 Mn10 合金塑性急剧下降的主要原因。对比 Al、Mn 含量不同的合金,Mn10 合金的屈服强度略小于 Mn8 合金,这是由于 Mn8 合金成分中 Al 含量更高,其原子半径较大,更多的 Al 原子固溶进合金中可以产生更大的晶格畸变,从而提高合金的固溶强化效果<sup>[2]</sup>。

表 2 铸态和均匀化态 CuNiCoMnAl 合金的力学性能  
Tab.2 Mechanical properties of as-cast and homogenized

| CuNiCoMnAl MPEAs                                             |              |              |           |                     |
|--------------------------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|---------------------|
| 合金                                                           | 屈服强度/<br>MPa | 抗拉强度/<br>MPa | 伸长率/<br>% | 应变硬化<br>指数 <i>n</i> |
| $\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30}$ <sup>[16]</sup> | 384±8        | 408±15       | 1.9±0.5   | —                   |
| Mn10-AC                                                      | 238±11       | 500±15       | 45.1±1.3  | 0.357 4             |
| Mn10-HT                                                      | 214±11       | 405±14       | 25.4±1.8  | 0.224 1             |
| Mn8-AC                                                       | 251±12       | 530±19       | 43.1±2.7  | 0.340 1             |
| Mn8-HT                                                       | 224±9        | 501±16       | 42.7±2.5  | 0.339 3             |

由图 8c 可以看出,在加工硬化第二阶段存在与铸态合金相似的上升趋势,表明合金在形变过程中也可能产生了形变孪晶,进一步提高了合金的加工硬化效果。

3 结 论

(1)经电弧熔炼方法制备的 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_{10}\text{Al}_5$ 和 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_8\text{Al}_7$ 合金均呈双相 FCC 结构,其微观组织为典型的树枝晶组织。枝晶富集 Ni、Co、Al 元素,Cu 元素富集于枝晶间,Mn 元素大致呈均匀分布。 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_{10}\text{Al}_5$ 和 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_8\text{Al}_7$ 合金较基体  $\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30}$  合金而言,抗拉强度和塑性提高,但屈服强度由 384 MPa 分别降至 238 MPa 和 251 MPa,抗拉强度提高至 500 MPa 和 530 MPa,伸长率由 1.9% 大幅提高至 45.1% 和 43.1%,伸长率相对于基体合金提升了 20 多倍。

(2)经 1 000 ℃×15 h 均匀化热处理后 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_{10}\text{Al}_5$ 和 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_8\text{Al}_7$ 合金,树枝晶组织消除,呈均匀的单相 FCC 组织。力学性能

方面,相比于铸态合金,均匀态 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_{10}\text{Al}_5$ 合金的屈服强度、抗拉强度及塑性均有所降低,分别为 214 MPa、405 MPa 及 25.4%;均匀态 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_8\text{Al}_7$ 合金的屈服强度下降,抗拉强度提升,伸长率与铸态相当,分别为 224 MPa、501 MPa 及 42.7%。

(3)均匀态合金屈服强度下降的原因是晶粒粗化和元素偏析固溶进合金基体。其塑性降低的原因是合金中的 Al、Mn 原子固溶进  $\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30}$  基体合金后产生较大的晶格畸变;同时 Mn 元素的强化学活性使其易在长时间的热处理过程中吸氧,从而形成富 Mn 氧化物,降低合金性能。由于 Al 的原子半径较大,会产生更大的晶格畸变从而带来更强的固溶强化效果,导致 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_8\text{Al}_7$ 合金的屈服强度略高于 $(\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Co}_{30})_{85}\text{Mn}_{10}\text{Al}_5$ 合金。

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] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts[J]. Acta Materialia, 2017, 122: 448-511.

[3] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, CATOOR D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications[J]. Science, 2014, 345(6 201): 1 153-1 158.

[4] 邵亚云,郭富强.Ni 对 CoCrCuFeMn 高熵合金的微观组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2023, 43(7):888-894.

[5] WU Z, BEI H, PHARR G M, et al. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures[J]. Acta Materialia, 2014, 81: 428-441.

[6] 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.

[7] TIAN J, TANG K, WU Y K, et al. Effects of Al alloying on microstructure and mechanical properties of VCoNi medium entropy alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A811: 141 054.

[8] MORAVCIK I, HADRABA H, LI L, et al. Yield strength increase of a CoCrNi medium entropy alloy by interstitial nitrogen doping at maintained ductility[J]. Scripta Materialia, 2020, 178: 391-397.

[9] 李伟,刘贵仲,郭景杰.AlFeCuCoNiCrTi<sub>x</sub> 高熵合金的组织结构及电化学性能[J].特种铸造及有色合金, 2009, 29(10): 941-944.

[10] GAO J, JIN Y, FAN Y, et al. Fabricating antibacterial CoCrCuFe-Ni high-entropy alloy via selective laser melting and in-situ alloying [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 102: 159-165.

[11] REN G, HUANG L, HU K, et al. Enhanced antibacterial behavior of a novel Cu-bearing high-entropy alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 117: 158-166.

[12] ZHOU E Z, REN G Y, SUN Y L, et al. Antibacterial activities of

- a novel Cu-bearing high-entropy alloy against multi-drug-resistant *Acinetobacter baumannii* and *Staphylococcus aureus*[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(2): 570-579.
- [13] CHEN C, CHEN J L, YUAN S H, et al. Microstructure, mechanical properties, corrosion resistance and anti-bacterial behavior of novel Co-free high entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022; 163 714.
- [14] 郭富强,任波.CuCrFeNiMn 高熵合金的耐蚀性能研究[J].*特种铸造及有色合金*, 2019, 39(2): 202-206.
- [15] YU Y, XU N, ZHU S, et al. A novel Cu-doped high entropy alloy with excellent comprehensive performances for marine application [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 69: 48-59.
- [16] YANG Z Y, CHEN W P, HAO L Y, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast (CuNi)<sub>100-x</sub> Co<sub>x</sub> medium-entropy alloys[J]. *China Foundry*, 2022, 19(4): 511-518.
- [17] 郭泽亮,汤文新,张化龙,等.合金元素对镍铝青铜性能的影响[J].*材料开发与应用*, 2003(2): 39-42.
- [18] LI Z M, LI X N, HU Y L, et al. Cuboidal  $\gamma'$  phase coherent precipitation-strengthened CuNi-Al alloys with high softening temperature[J]. *Acta Materialia*, 2021, 203: 116 458.
- [19] FU Z Q, JIANG L, WARDINI J L, et al. A high-entropy alloy with hierarchical nanoprecipitates and ultrahigh strength[J]. *Science Advances*, 2018, 4(10): 8 712.
- [20] HUANG X, HUANG L, PENG H, et al. Enhancing strength-ductility synergy in a casting nonequiatomic NiCoCr-based high-entropy alloy by Al and Ti combination addition[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 200: 113 898.
- [21] DING Z Y, CAO B X, LUAN J H, et al. Synergistic effects of Al and Ti on the oxidation behaviour and mechanical properties of  $L_{12}$ -strengthened FeCoCrNi high-entropy alloys[J]. *Corrosion Science*, 2021, 184: 109 365.
- [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*, 2005, 46(12): 2 817-2 829.
- [23] LAPLANCHE G, KOSTKA A, HORST O M, et al. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2016, 118: 152-163.
- [24] YANG T, ZHAO Y L, LUAN J H, et al. Nanoparticles-strengthened high-entropy alloys for cryogenic applications showing an exceptional strength-ductility synergy[J]. *Scripta Materialia*, 2019, 164: 30-35.
- [25] LIU X W, LIU P, ZHANG W B, et al. Microstructure and mechanical properties of face-centered Cubic-based Cr-free equiatomic high-entropy alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(3): 2 000 848.
- [26] 刘鹏, Mn-Fe-Co-Ni-Cu 系高熵合金的微观组织及力学性能[D].武汉:华中科技大学, 2020.

(编辑:刘晨辉)

## 《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

