

Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的组织与性能

马 凯^{1,2}, 张华倩^{1,2}, 张 维³, 冯 力^{1,2}, 赵燕春^{1,2}

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)
(2. 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)
(3. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘 要: 本研究将 Fe、Al 作为联合变量进行微调, 检测并分析 Fe、Al 共同变化对 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu(x=1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7) 高熵合金的相结构、微观组织、压缩性能、硬度、摩擦性能的影响。结果表明, Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的枝晶间及枝晶组织均由 bcc 相构成, 且枝晶内部析出有序 bcc 结构的 FeAl 相。随着 Fe 含量减少, Al 含量的增加, 其析出物含量略微增加, 使得 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的硬度不断增加。当 x=1.6 时, 高熵合金的综合性能达到最佳, 屈服强度为 1205.43 MPa, 抗压强度为 1431.52 MPa, 变形率为 9.06%。

关键词: 高熵合金; 组织结构; 析出物; 力学性能

中图分类号: TG139

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)07-1970-08

高熵合金^[1-5]中的多种主要元素导致多主元素合金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、性能上的“鸡尾酒”效应和组织上的稳定性。这些效应赋予多主元素合金优良的机械性能, 如高强度、良好的耐腐蚀性和优异的耐磨性能^[6-8]。

高熵合金中 Fe 和 Al 元素的添加有一定的积极作用, 且 Al 原子与 Fe 原子易形成 FeAl 金属间化合物。近年来, 对金属间化合物的研究主要集中在 Ni₃Al、NiAl、Fe₃Al、FeAl、Ti₃Al、TiAl 等金属间化合物^[9], 其中 FeAl 金属间化合物受到极大的重视。相较传统的合金, FeAl 金属间化合物质量轻、强度高, 且具有较好的高温强度、优良的抗氧化性和抗硫化腐蚀性能还有造价低等特点, 相比较于大多数硬脆相的金属间化合物, FeAl 金属间化合物又具有一定的韧性。本课题组研究了 Al 元素含量对 FeCrMnAl_xCu 高熵合金组织和性能的影响^[10], 同时也研究了 Fe 元素含量变化对 Fe_xCrMnAlCu 基高熵合金组织和性能的影响^[11], 结合两者的研究可知, 当 Al 含量为 1.5 时, 枝晶间组织由 fcc 结构转变为 bcc 结构, FeCrMnAl_{1.5}Cu 屈服强度达到 1286.72 MPa, 综合性能最好; Fe 含量为 0.5 时, 高熵合金中的析出物体积分数达到最大, 此时 Fe_{0.5}CrMnAlCu 高熵合金的硬度 (HV) 为 3970.9 MPa, 抗压强度为 1428 MPa, 变形率为 0.16。目前, 真空电弧熔炼作为最主要的高熵合金的制备方法^[12-13], 其熔

炼温度较高, 可熔炼熔点较高的合金, 对于易挥发杂质和某些气体的去除具有良好的效果; 并且熔炼过程在惰性气体氩气中进行, 可以有效避免材料的氧化。

本工作主要在 Al 含量为 1.5 和 Fe 含量为 0.5 的基础上进行微调, 研究 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu(x=1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7) 的相结构、微观组织、压缩性能、硬度、摩擦性能。本研究制备的 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金推广应用于中核核电运行有限公司, 该合金具有良好的耐磨性, 在核电领域有着较好的应用前景。

1 实 验

本实验选择用 Fe、Cr、Mn、Al、Cu (纯度≥99.9%) 等 5 种元素作为合金原料。通过真空感应熔炼制备 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 块体高熵合金, 按照摩尔比表征为 (2-x):1:1:x:1(x=1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7)。由于 Mn 元素具有挥发性, 在称重的过程需要多加 3 g, 为了确保合金铸锭中元素的均匀性, 每种样品至少重复熔炼 6 次以上。

采用 D/MAX2500PC 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金表面的相结构进行分析, 采用 FEG-450 热场发射扫描电子显微镜 (SEM) 来观察合金的微观组织, 采用透射电子显微镜 (TEM) 观察合金的微观亚结构, 并采用选区电子衍射及高分辨确认各相的晶体结构, 同时采用配备的能谱仪 (EDS) 对合金的成分及其分布情况进行分析, 使用 W1102D37

收稿日期: 2023-07-29

基金项目: 中核核电运行管理有限公司研发项目 (QS4FY-22003224)

作者简介: 马 凯, 男, 1995 年生, 博士生, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: mkysys131477@163.com

型全自动显微硬度测试系统测量样品的显微硬度, 施加载荷为 5 N, 在试样表面停留时间为 15 s, 并求取 5 个测量点所测得硬度的平均值。采用 MFT-R4000 型往复摩擦磨损试验机, 对磨件为直径 6 mm 的 Al₂O₃ 小球, 在常温无润滑条件下测试样品的摩擦性能, 采用 Instron5569 电子万能试验机做压缩测试, 获得合金的室温压缩性能, 并用 Origin 软件绘制出压缩应力-应变曲线。磨损率可以通过文献[14]计算。

2 结果与讨论

2.1 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金相结构和组织形貌

图 1 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu(x=1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7)高熵合金的 XRD 图谱以及局部放大图。从图 1a 可以发现, Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金均拥有 3 条 X 射线衍射峰。衍射峰对应的晶面指数分别为(110)、(200)和(211), Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金均为单相 bcc 相固溶体。图 1b 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金 XRD 图谱的放大图, 由图可知, XRD 图谱发生偏移, 主要的原因是 Al 元素原子半径大于其他元素原子半径, 导致高熵合金产生晶格畸变, bcc 相向左偏移。结合公式 (1) 对 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金 bcc 相固溶体的晶格常数进行计算, 计算结果如表 1 所示, 和 XRD 分析结果一致。

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

式中, λ 为X射线的波长; h, k, l 为晶面指数; θ 为衍射半角; a 为晶格常数。

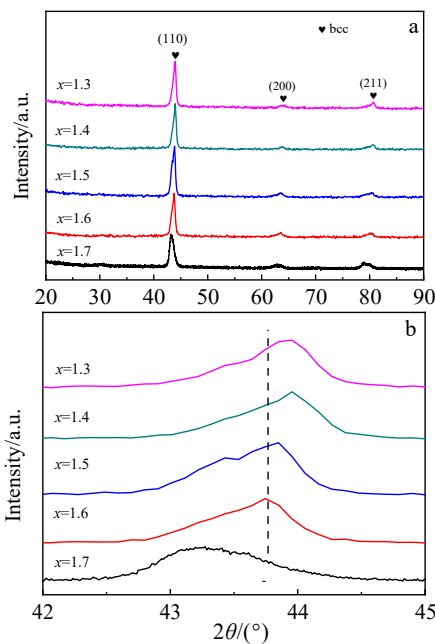


图 1 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的 XRD 图谱以及放大图
Fig.1 XRD patterns of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloys (a) and their magnification (b)

表 1 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金 bcc 相晶格常数

Table 1 Lattice constants of bcc phase of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu (x=1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7) high entropy alloys (nm)

Alloy	x=1.3	x=1.4	x=1.5	x=1.6	x=1.7
Lattice constant	0.1623	0.1629	0.1632	0.1636	0.1642

图 2 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金显微组织形貌, 高熵合金组织均由枝晶 (DR) 和枝晶间相 (ID) 构成, 从图 2a~2e 可以发现, 随着 Fe 含量的减少, Al 含量的增加, 枝晶组织与枝晶间组织的占比发生了变化, 枝晶组织的占比逐渐减少, 枝晶间组织的占比逐渐增加。图 3 是 Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu 高熵合金 EDS 元素面扫描图, 从图中可以发现, Fe、Cr、Mn 元素分布在枝晶, Cu 元素主要分布在枝晶间, Al 元素均匀地分布在整个合金组织中。

采用透射电子显微镜 (TEM) 对 Fe_{0.4}CrMnAl_{1.6}Cu 高熵合金进一步分析, 如图 4a 所示, Fe_{0.4}CrMnAl_{1.6}Cu 高熵合金的枝晶内部明显存在大量黑色条状析出物, 结合表 2 中点扫数据可知枝晶基体为富 Cr、Mn 的组织, 黑色条状析出物为富含 Fe 和 Al 的组织, 通过选区电子衍射花样如图 4c 和 4d 可知, 枝晶基体为无序的 bcc 结构, 黑色条状析出物为有序 bcc 结构。Fe、Al 和 Cu 元素的混合焓分别为-11、13 kJ/mol。当混合焓为负时, 表明原子之间具有良好的亲和力。与 Fe、Cr、Mn、Al 元素相比, Cu 的熔点较低, 相对结晶较晚, 易于在枝晶间析出。

2.2 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金抗拉强度

图 5a、5b 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金在室温条件下压缩的应力-应变曲线及抗压强度和屈服强度的变化图。从图中能够得出, 当 x=1.3 时, 抗压强度 (σ_{max})、屈服强度 (σ_b) 和应变 (ϵ) 分别为 409.31 MPa、317.64 MPa 和 5.73%。随着 Fe 含量减少 Al 含量增加, Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的抗压强度和屈服强度随之变化, 当 x=1.6 时抗压强度、屈服强度和应变均达到最大值 1431.52 MPa、1205.43 MPa 和 9.06%, 综合性能最佳。这是合金中析出物增加的原因, 析出物的强化机制主要有剪切强化和 Orowan 强化^[15], 通过对合金中析出物的形态、大小和分布可以推断出其主要为 Orowan 强化机制。Orowan 强化是由第二相颗粒对位错的钉扎作用形成的, 在外加载荷驱动下, 当位错运动到紧密排列的硬质增强颗粒处时, 位错线只能从相邻 2 个颗粒之间穿出继续运动, 从而在增强颗粒周围形成位错环, 阻碍原有位错运动^[16]。Orowan 强化增量 $\Delta\sigma_{OR}$ 可以用下述方程描述:

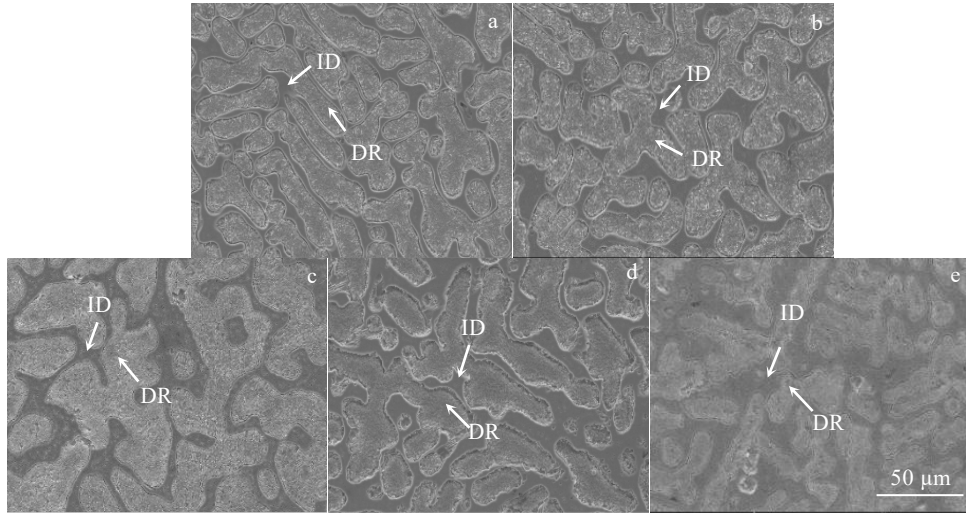


图 2 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金 SEM 图

Fig.2 SEM images of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloys: (a) x=1.3, (b) x=1.4, (c) x=1.5, (d) x=1.6, and (e) x=1.7

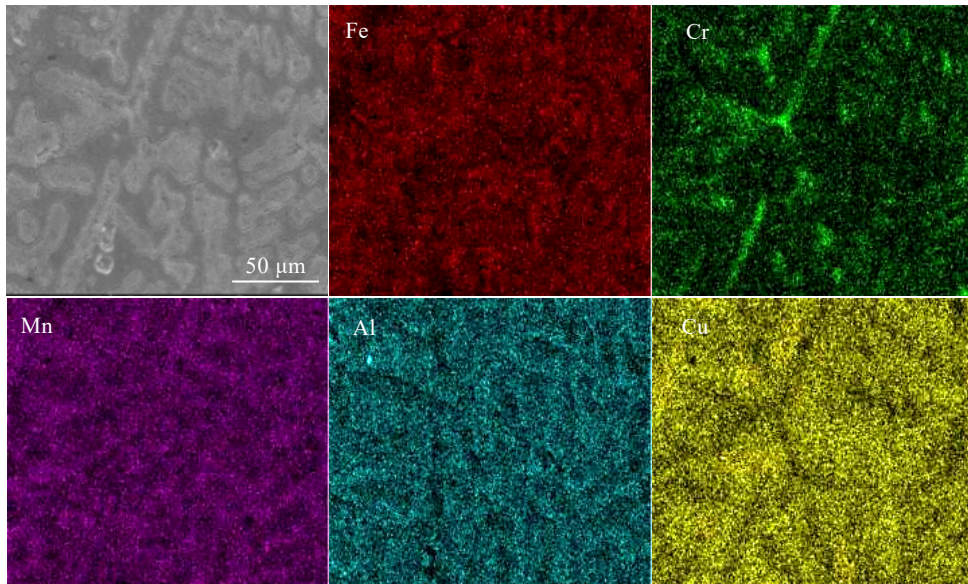


图 3 Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu 高熵合金的元素面扫描图

Fig.3 EDS maps of Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu high entropy alloy

$$\Delta\sigma_{OR} = M \left(\frac{0.4G_{A_2}b}{\pi\sqrt{1-\nu}} \right) \ln(2\sqrt{2/3}r_{B_2}/b) / \lambda_p \quad (2)$$

$$\lambda_p = 2\sqrt{2/3}r_{B_2}(\sqrt{\pi/4f_{B_2}} - 1) \quad (3)$$

其中 $M=2.73$ 是泰勒因子 (对 bcc 结构)、 $\nu=0.3$ 是泊松比、 b 是伯氏矢量, 可以通过 $b = \sqrt{3}a_{A_2}/2 = 0.2491 \text{ nm}$ 计算, 其中 a_{A_2} 是 bcc 相的晶格参数、 $G_{A_2}=75.3 \text{ GPa}$ 为剪切模量、 λ_p 为析出物间距、 f_{B_2} 为析出物的体积分数、 $r_{B_2}=50 \text{ nm}$ 为析出物平均直径。但当合金中的 Al

含量增加, Fe 含量减少时, 出现了与课题组前期研究中 FeCrMnAl₂Cu 高熵合金相同的现象, Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu 高熵合金的脆性最大, 在压缩过程中合金未出现屈服现象直接发生断裂, 但相比较 FeCrMnAl₂Cu 高熵合金而言, 两者虽然都是脆性较大的合金, 但 Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu 高熵合金的抗压强度为 560 MPa, 比 FeCrMnAl₂Cu 高熵合金的抗压强度 122.14 MPa 高出一些。发生这种现象主要是以下原因: (1) 脆性的增大是由于 FeAl 析出物大量增加, FeAl 相析出物在室温下塑性极低, 由它的本征脆性所决定^[17]。(2) 在

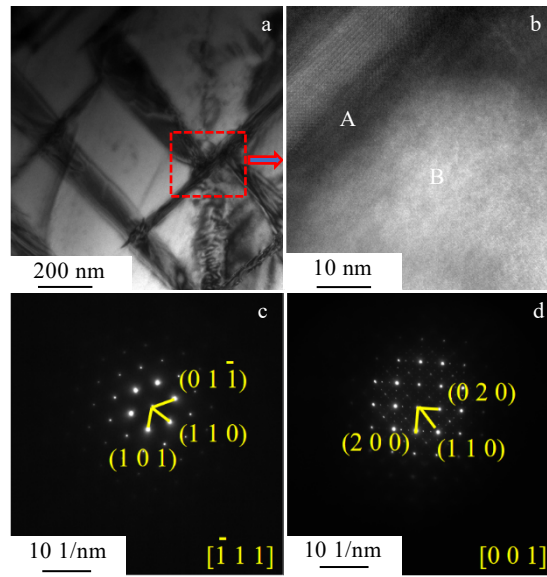


图 4 Fe_{0.4}CrMnAl_{1.6}Cu 高熵合金枝晶的 TEM 分析

Fig.4 TEM analyses of dendrites of Fe_{0.4}CrMnAl_{1.6}Cu high entropy alloy: (a) bright field image, (b) high resolution image of box position in Fig.4a, (c) SAED pattern of position A in Fig.4b, and (d) SAED pattern of position B in Fig.4b

表 2 图 4b 中 Fe_{0.4}CrMnAl_{1.6}Cu 高熵合金化学成分

Table 2 Chemical composition of Fe_{0.4}CrMnAl_{1.6}Cu high entropy alloy by EDS in Fig.4b

Position	Crystal structure	Chemical composition/at%				
		Fe	Cr	Mn	Al	Cu
A	bcc	24.97	11.98	16.79	24.99	21.27
B	bcc	16.85	23.15	27.17	18.52	14.31

室温下, FeAl 析出物的维氏硬度和强度会随着 Al 含量的增加而提高, 但当 Al 的含量达到一定值时, 它的晶界强度就会急速降低, 从而导致合金的延展性急剧下降, 断裂方式也由穿晶断裂变为沿晶断裂^[18]。它的位错过程没有发生交滑移, 从而导致其室温塑性较差^[19]。

2.3 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金显微硬度

图 6 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金显微硬度 (HV) 图, 从图中能够得出, 随着 Fe 含量的减少, Al 含量的增加, 合金的硬度逐渐上升, 其上升趋势与 Al 元素含量单独变化时的上升趋势较为相似。当 Fe 元素含量单独变化时, Fe=0.5 时合金的硬度最大, 其值为 3970.9 MPa^[11]; 当 Al 元素含量单独变化时, Al=2.0 时合金的硬度最大, 其值为 5089.1 MPa^[10], 但当 Fe 元素与 Al 元素一同变化时, 合金的硬度明显较单独含量变化时的硬度大, 当 Fe=0.3, Al=1.7 时 Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu 高熵合金的显微硬度达到最大 5862.4 MPa, 相较 Fe 元

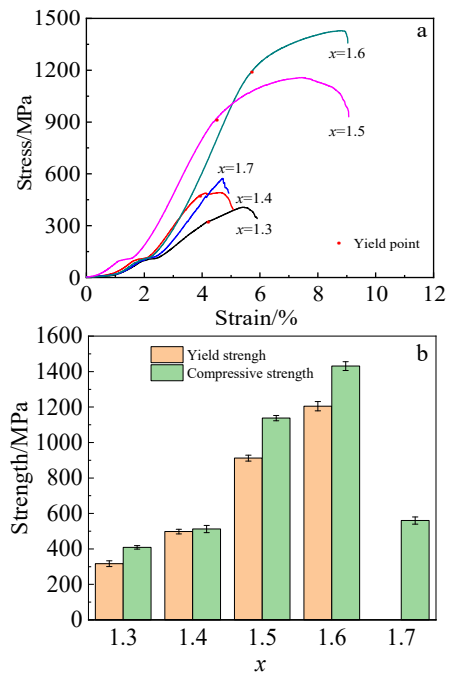


图 5 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的应力-应变曲线和强度变化图 Fig.5 Stress-strain curves (a) and strength change diagram (b) of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloys

素含量单独变化的最大硬度 3970.9 MPa 提升了 32.3%, 相较 Al 元素含量单独变化时的最大硬度 5089.1 MPa 提升了 13.2%。主要原因有两点: (1) Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金由 bcc 相构成, 随着 Fe 元素的减少, Al 元素的增加, bcc 相发生偏移, bcc 相的硬度增大, 使得合金的硬度变大^[20]。(2) 结合图 4 和

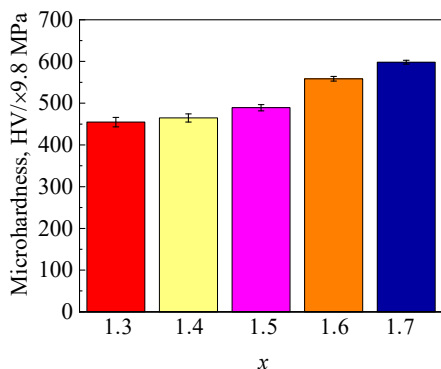


图 6 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的硬度

Fig.6 Microhardness of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloys

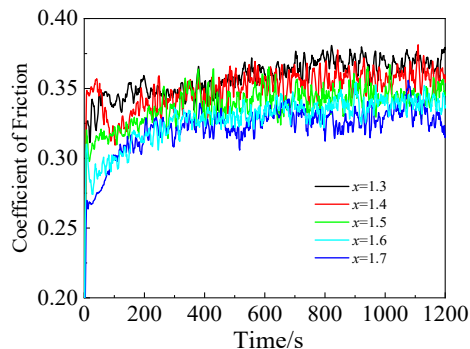


图 7 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金室温下的摩擦系数

Fig.7 Coefficient of friction of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloys at room temperature

表 2 能够得出由于合金中 Fe 元素和 Al 元素的共同变化使得合金中枝晶内组织的析出物发生了变化，FeCrMnAl_xCu 高熵合金枝晶内组织析出物为富 Cu 析出物，而 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金枝晶内析出物为 FeAl 相。FeAl 是一种硬质增强相，硬质相会大幅提高材料的硬度^[17]。

2.4 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金摩擦系数及摩擦磨损

图 7 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金室温下的摩擦系数图，表 3 为对应的摩擦系数。从表中能够得出 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu(x=1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7)高熵合金的摩擦系数分别为 0.363、0.352、0.339、0.331 和 0.325。一般而言，合金的硬度和耐磨性呈正相关，合金的硬度越高，摩擦系数就越小^[21]，Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金中，摩擦系数随着 Fe 元素含量的减少，Al 元素含量的增加而减小。图 8 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金磨痕以及三维形貌，从磨痕形貌中能够看出，Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu 高熵合金与 Fe_{0.7}CrMnAl_{1.3}Cu 高熵合金相比，磨痕的深度与宽度均有了一定的减小，随着 Fe 元素含量的减少，Al 元素含量的增加，高熵合金的磨损率逐渐减小。这与图 6 中高熵合金的硬度变化趋势一致。磨损率计算如表 3 所示，当 x=1.7 时，合金的磨损率最低，其值达到 3.28×10⁻⁵ mm³/(N·m)，比 x=1.3 时的 5.19×10⁻⁵ mm³/(N·m)，降低了 36.8%。由文献[22]研究可知，FeAl 的强度重量比高、抗氧化性能较好，因此具有较好的高温摩擦性能。FeAl 在常温和 300 °C 时的磨损机理主要为粘着磨损，但随着温度升高磨损机理会从粘着磨损为主向氧化磨损过渡，直至 600 °C 时磨损机理主要呈现为氧化磨损。这是因为随着温度的升高，Fe 元素和 Al 元素易形成氧化物为主的润滑层，能够显著降低摩擦系数，而在室温环境下，由于 FeAl 的本征脆性，在摩擦过程中会使合金材料有

表 3 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金的摩擦系数和磨损率

Table 3 Coefficient of friction and wear rate of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloys

Alloy	Coefficient of friction	Wear rate/ ×10 ⁻⁵ mm ³ ·(N·m) ⁻¹
x=1.3	0.363	5.19
x=1.4	0.352	4.41
x=1.5	0.339	3.77
x=1.6	0.331	3.48
x=1.7	0.325	3.28

开裂的倾向，因此 FeAl 在室温下的摩擦系数反而高于高温环境下的摩擦系数，与文献[23]的研究结果一致。

图 9 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金磨损表面的形貌和磨痕表面的 XRD 图谱，图 9a、9b 是 Fe_{0.7}CrMnAl_{1.3}Cu 与 Fe_{0.6}CrMnAl_{1.4}Cu 高熵合金磨痕形貌，这 2 种高熵合金表面有明显的撕裂以及剥落的痕迹，主要的磨损机制为黏着磨损与磨粒磨损。在这 2 种主要磨损机制下使得合金磨痕中的剥落坑较深，犁沟较宽且有明显的粘着层分布在剥落坑四周。图 9c、9d 是 Fe_{0.5}CrMnAl_{1.5}Cu 和 Fe_{0.4}CrMnAl_{1.6}Cu 高熵合金磨痕形貌，从图中能够发现，随着 Fe 含量减少以及 Al 含量的增加，磨损相较前面 2 种合金的磨损程度有了一定的减少，磨痕表面相对光滑，犁沟明显变浅，粘着层的数量也明显减少，剥落坑的深度也相对变浅。图 9e 是 Fe_{0.3}CrMnAl_{1.7}Cu 高熵合金磨痕形貌，磨损程度较前 4 种合金的磨损程度进一步减少，从磨痕电镜图中已基本看不到剥落坑，只剩下零星的粘着层和细而浅的犁沟，磨痕整体较为平整光滑，这些现象与摩擦系数与磨损率的变化趋势相一致。图 9f 是 Fe_{2-x}CrMnAl_xCu 高熵合金磨痕的 XRD 图谱，从图中

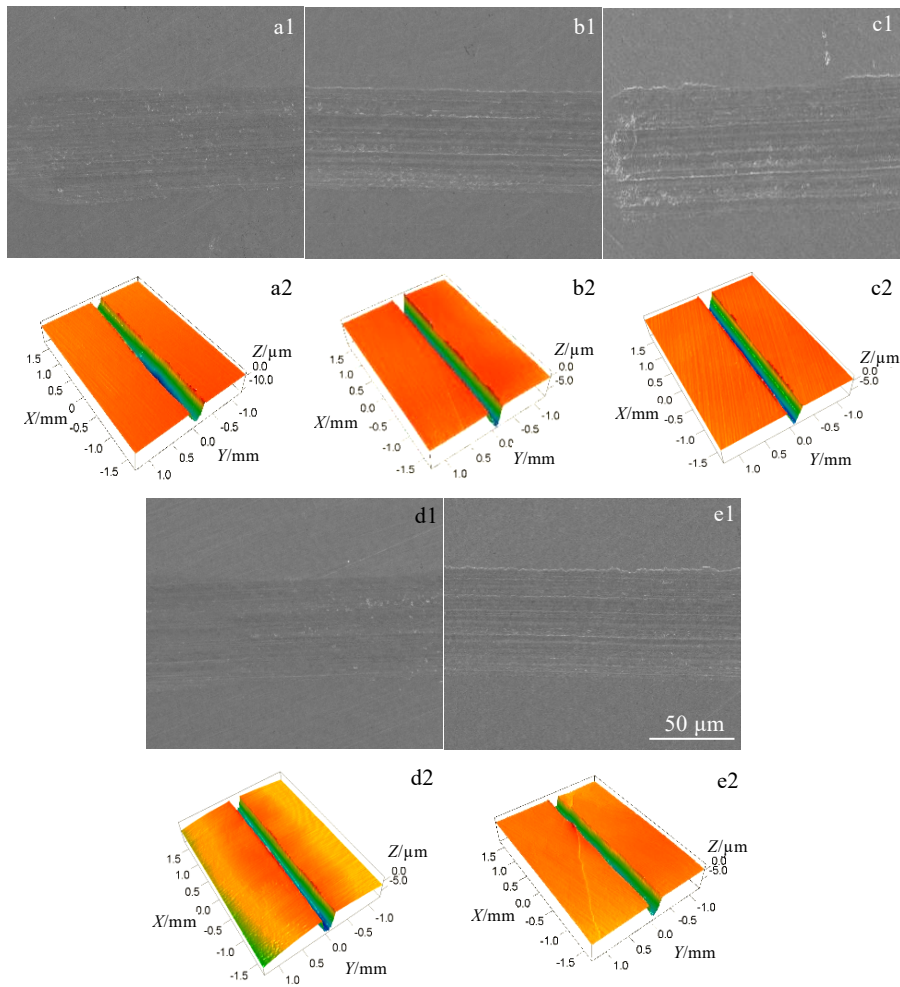


图 8 $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ 高熵合金磨痕以及三维形貌

Fig.8 Wear marks (a1-e1) and three-dimensional morphologies (a2-e2) of $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ high entropy alloys: (a1-a2) $x=1.3$, (b1-b2) $x=1.4$, (c1-c2) $x=1.5$, (d1-d2) $x=1.6$, and (e1-e2) $x=1.7$

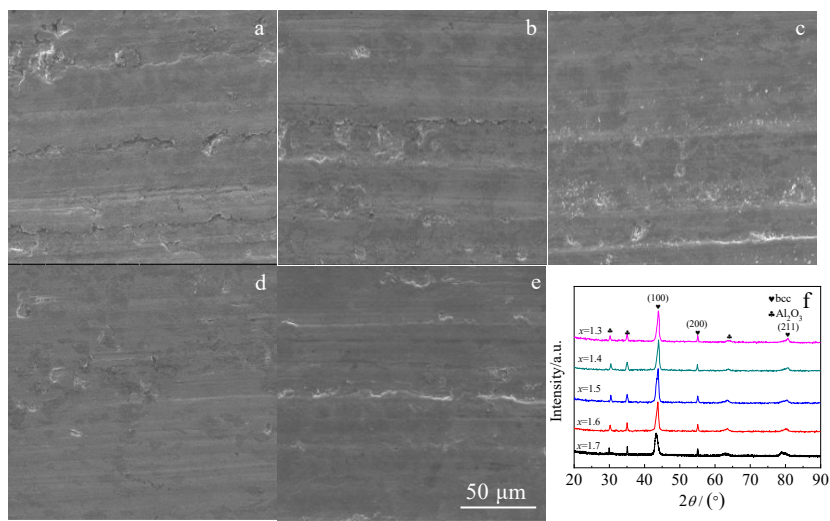


图 9 $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ 高熵合金磨痕 SEM 图及磨痕 XRD 图谱

Fig.9 SEM images (a-e) and XRD patterns (f) of wear marks of $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ high entropy alloys: (a) $x=1.3$, (b) $x=1.4$, (c) $x=1.5$, (d) $x=1.6$, and (e) $x=1.7$

可以发现, $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ 高熵合金产生 Al_2O_3 氧化物, 存在的原因可能是摩擦的过程产生热量生成 Al_2O_3 , 也可能是对磨件中剥落下来的。氧化物的形成, 降低了高熵合金的摩擦系数, 提高了高熵合金的耐摩擦性能。

3 结论

1) 采用真空电弧熔炼工艺制备的 $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ 高熵合金由枝晶和枝晶间组织构成, 枝晶间组织与枝晶组织均为 bcc 结构, 枝晶组织中存在结构为有序 bcc 结构的 FeAl 相析出物, 随 Fe 含量的减少, Al 含量的增加, 析出物的含量也逐渐增加。

2) 随着 Fe 含量减少, Al 含量增加, 枝晶间有序 bcc 结构的 FeAl 相析出物含量逐渐增加, 适量的析出物会增加合金的性能, 但过量的析出物会导致合金的性能迅速恶化, 当 $x=1.6$ 时合金的综合性能达到最佳, 屈服强度为 1205.43 MPa。当 $x=1.7$ 时过量的析出物结合 FeAl 析出物本征脆性导致 $\text{Fe}_{0.3}\text{CrMnAl}_{1.7}\text{Cu}$ 合金在压缩过程中未出现屈服而直接断裂的现象。

3) 随着 Fe 含量减少, Al 含量增加, $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ 高熵合金的硬度呈现上升趋势, 与只改变 Al 含量的 $\text{FeCrMnAl}_x\text{Cu}$ 高熵合金趋势一致, $\text{Fe}_{0.3}\text{CrMnAl}_{1.7}\text{Cu}$ 高熵合金的最大硬度 5862.4 MPa。当 $x=1.7$ 时, $\text{Fe}_{0.3}\text{CrMnAl}_{1.7}\text{Cu}$ 高熵合金的耐磨性能最好, 此时磨损率为 $3.28 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 摩擦系数为 0.325。由于 Fe、Al 含量的共同变化使得 $\text{Fe}_{2-x}\text{CrMnAl}_x\text{Cu}$ 高熵合金枝晶组织内部析出物发生了变化, FeAl 析出物虽然拥有较高的高温摩擦性能, 但在常温下由于其本征脆性的影响使得摩擦性能反而有所下降。

参考文献 References

[1] Yeh J W, Chen S K, Lin S J *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2004, 6(5): 299
 [2] Cantor B, Chang I T H, Knight P *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 375-377: 213
 [3] Tsai M H, Yeh J W. *Materials Research Letters*[J], 2014, 2(3): 107
 [4] Miracle D B, Senkov O. N. *Acta Materialia*[J], 2017, 122: 448
 [5] Yeh J W. *JOM*[J], 2013, 65(12): 1759
 [6] Ma Kai, Feng Li. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(1): 111

[7] Qiu Y, Thomas S, Gibson M A *et al. npj Materials Degradation*[J], 2017, 1(1): 15
 [8] Feng Li(冯力), Yang Weijie(杨伟杰), Ma Kai(马凯) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2023, 33(2): 490
 [9] Cui Chunjuan(崔春娟), Wen Yagang(问亚岗), Yang Meng(杨猛) *et al. Materials Protection*(材料保护)[J], 2017, 50(9): 82
 [10] Feng Li, Yuan Yudong, Bian Chunhua *et al. Materials Science and Technology*[J], 2023, 39(10): 1245
 [11] Zhang Huaqian(张华倩). *Effect of Al Content on Microstructure and Properties of FeCrMnAlCu High Entropy Alloy*(Al 含量对 FeCrMnAlCu 高熵合金组织与性能的影响)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023
 [12] Jiang Wentao(蒋文韬), Wang Ye(王晔), Jiang Bo(姜博) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(3): 846
 [13] Wang H, Wang T. *Materials Science and Technology*[J], 2021, 37(7): 738
 [14] Wang Y, Lu X X, Yuan N Y *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 849: 156222
 [15] Sun S J, Tian Y Z, Zhang Z F. *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2022, 58(1): 54
 [16] Szajewski B A, Crone J C, Knap J. *Materialia*[J], 2020, 11: 100671
 [17] Huang Guangqi(黄广棋), Zhang Guikai(张桂凯), Luo Chaoyi(罗朝以) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2018, 32(11): 1878
 [18] Venkateswaran S P, Nuhfer N T, De Graef M. *Acta Materialia*[J], 2007, 55(8): 2621
 [19] Li Baoyu, Peng Kun, Hu Aiping *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(3): 735
 [20] Li Haozhe, Li Xiaolin, Jin Chi *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2023, 156: 241
 [21] Zhang K B, Fu Z Y, Zhnag J Y *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2009, 508(1-2): 214
 [22] Fan Q C, Li B S, Zhang Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 598: 244
 [23] Karimi H, Hadi M. *Ceramics International*[J], 2020, 46(11): 18487

Microstructure and Properties of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu High Entropy Alloy

Ma Kai^{1,2}, Zhang Huaqian^{1,2}, Zhang Wei³, Feng Li^{1,2}, Zhao Yanchun^{1,2}

(1. School of Materials Science and Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(3. CNNC Nuclear Power Operation and Management Co., Ltd, Haiyan 314300, China)

Abstract: Fe and Al were used as joint variables for fine tuning, and the effects of the common changes of Fe and Al on the phase structure, microstructure, compression properties, hardness and friction properties of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu ($x=1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7$) high entropy alloy were analyzed. The results show that the interdendrite and dendrite structure of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloy are composed of bcc phase, and the ordered bcc FeAl phase is precipitated inside the dendrite, and the content of precipitates increases slightly with the decrease in Fe content and the increase in Al content. The hardness of Fe_{2-x}CrMnAl_xCu high entropy alloy keeps increasing. When $x=1.6$, the comprehensive performance of high entropy alloy reaches the best, with the yield strength of 1205.43 MPa, the compressive strength of 1431.52 MPa and the deformation rate of 9.06%.

Key words: high entropy alloy; organizational structure; precipitate; mechanical property

Corresponding author: Feng Li, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: fenglils@lut.edu.cn