

文章编号 1672-6634(2024)01-0062-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023010008

AlCrFeMoSi_x 高熵合金的显微组织和性能研究

郝雪卉, 齐明洋, 李学军, 刘文阁, 张 娣, 战艳虎, 王长征

(聊城大学 材料科学与工程学院, 山东 聊城 252059)

摘 要 采用非自耗真空电弧熔炼法制备了 AlCrFeMo 和 AlCrFeMoSi_x 高熵合金, 通过 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、显微硬度计及电化学测试系统等技术, 研究了 Si 的加入对 AlCrFeMo 高熵合金的显微组织和性能的影响。结果表明: 加入 Si 元素后, AlCrFeMo 高熵合金相结构由单一体心立方(BCC1)结构转变为由 BCC1 和 BCC2 组成的双相结构, 且形成了少量的 Cr₅Si₃ 和 Mo₃Si。这是因为 Si 元素不仅是 BCC 相形成元素, 也因为其与金属元素间高的负混合焓促进硅化物的形成; Si 添加也使 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的显微组织转变为枝晶组织加片层状组织。这些变化引起的第二相强化作用、晶界强化作用以及 Si 原子的固溶强化作用使 AlCrFeMoSi_x 合金的硬度由 394 HV 升高到 549 HV。同时, 混合组织间电位差使合金表面发生严重的电偶腐蚀, 导致 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的腐蚀电流密度由 1.71×10^{-8} 增加至 5.54×10^{-8} A/cm²。

关键词 高熵合金; Si 元素; 显微组织; 硬度; 腐蚀行为

中图分类号 TG139

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Study on the Microstructure and Properties of AlCrFeMoSi_x High Entropy Alloys

HAO Xuehui, QI Mingyang, LI Xuejun, LIU Wenge, ZHANG Di,
ZHAN Yanhu, WANG Changzheng

(School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract AlCrFeMo and AlCrFeMoSi_x high entropy alloys were prepared by non-consumable vacuum arc melting method. The effect of Si addition on the microstructure and properties of AlCrFeMo high entropy alloys were studied using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, micro-hardness tester and electrochemical measurement system. The results showed that the phase composition of AlCrFeMo high entropy alloys changed from single BCC1 phase to dual-phases (BCC1 and BCC2) after Si addition and a small amount of intermetallic compounds (Cr₅Si₃ and Mo₃Si) was also detected. This was because Si element not only promoted the formation of BCC phase, but also facilitated the presence of silicides due to the high negative mixing enthalpy between Si and metal elements. Meanwhile, the AlCrFeMoSi_x high entropy

收稿日期: 2023-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52103054); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE026); 聊城大学大学生创新创业训练计划项目(CXCY2021186)资助

通信作者: 战艳虎, 男, 汉族, 博士, 副教授, 功能高分子材料, E-mail: zhanyanhu@lcu.edu.cn.

alloy developed a dendritic and lamellar mixed structure. As a result of second phase strengthening, grain-boundary strengthening and solid solution strengthening caused by Si atoms, the hardness of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys increased from 394 HV to 549 HV. Besides, the potential difference among mixed structures brought about a serious galvanic corrosion on the alloy surface. Therefore, the corrosion current density of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys increased from 1.71×10^{-8} to 5.54×10^{-8} A/cm².

Key words high entropy alloys; Si element; microstructure; hardness; corrosion behavior

0 引言

随着社会的发展,人类对材料的需求量越来越大,特别是对金属材料性能的要求越来越高。《中国制造 2025》中明确提出了要加快基础材料的升级换代和新材料的开发。高熵合金作为近年来金属材料领域的一种新型材料受到人们广泛的关注。2004 年 Yeh 等^[1]首先提出了一种新的合金设计理念,即由 5 种或 5 种以上主元素等物质的量比或近似等物质的量比混合,各主元素摩尔分数为 5%~35%,该材料即为高熵合金。近年来,高熵合金的概念得到了扩展,覆盖四种主元素的合金也可称之为高熵合金^[2,3]。受高熵效应、晶格畸变效应、延迟扩散效应和鸡尾酒效应影响,高熵合金呈现出很多传统合金无法比拟的优异性能,如高强度、高硬度、良好的耐蚀性等诸多优良性能,因此高熵合金具有广阔的应用前景^[4-8]。

众所周知,合金化是改善材料性能的常用手段。相较于其他非金属元素(如 B 和 C),Si 元素与金属元素有更相近的原子半径和更负的混合焓,与其他金属原子结合更稳定,因此对高熵合金性能的影响更明显。如吴炳乾等^[9]研究发现 FeCoCr_{0.5}NiBSi_x 高熵合金由先共晶 M₂B(M 主要是 Fe、Co、Cr、Ni)相、共晶 M₂B 相和共晶面心立方(FCC)相组成,而 Si 主要固溶在 FCC 相。随着 Si 含量的增加,FCC 相增多而 M₂B 相减少,共晶组织也由蜂窝状到颗粒状转变直至消失,最终导致合金硬度先降低后提高。孙荣禄等^[10]却发现 Si 的固溶促进 CoCrFeNi 系高熵合金涂层中 FCC 相向 BCC 相转变,但其显微组织仍为等轴晶和枝晶;同时,合金的硬度随 Si 含量的增加而不断升高。Gu 等^[11]研究结果也证实了 Si 是体心立方(BCC)相促进元素,且 Si 的添加引起的耐蚀 BCC 相含量增加和晶粒尺寸细化可提高 Al_{0.3}CoCrFeNi 高熵合金的耐蚀性。此外,Si 还可与金属原子结合形成金属间化合物,如 Ni_xSi_y、Cr₃Si 和 M₅Si₃,提高合金强度、硬度和耐磨性^[12-14]。以上文献表明,Si 可能固溶在高熵合金晶粒内,促进其他相向 FCC 转变或作为 BCC 促成元素,也可能与金属原子结合形成化合物,最终对合金性能产生影响。但是,高熵合金中 Si 的存在形式仍存在争议,Si 合金化对高熵合金组织和性能的影响仍需进一步研究。

过渡元素高熵合金是近年来金属材料领域的主要研究方向之一,而 Fe 因其优异的性能和低廉的价格被认为是过渡元素高熵合金的主要成分。研究高熵合金通常选用具有 BCC 或者 FCC 结构的元素,而 Al、Cr、Mo 在提高 Fe 的 BCC 结构稳定性具有很好的表现。鉴于此,选取 Al、Cr、Fe 和 Mo 作为主要金属元素,通过添加非金属元素 Si 对其进行了较为系统的合金化研究,探讨了 Si 元素对相组成、微观组织、硬度和耐腐蚀性能的影响。

1 实验材料及方法

实验选用纯度大于 99.9%的 5 种金属粉末(Al、Cr、Fe、Mo、Si)为原材料。首先,将金属单质粉末按照表 1 所示原子数分数配料后,将所有粉末放入高能球磨机中混合均匀。接着,将混合的粉末压块后,利用真空电弧熔炼制备 AlCrFeMo 和 AlCrFeMoSi 高熵合金。为保证熔炼后样品的成分均匀,将其反复熔炼 5 次^[15,16]。然后,利用电火花线切割机将铸锭切割成多组均匀大小的待测样品,打磨抛光处理后备用。

使用 X 射线衍射仪(Ultima IV XRD)分析 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的物相组成,靶材为 CuKα($\lambda = 0.154\ 18\ \text{nm}$),扫描范围为 20°~90°,扫描速度为 5°/min。经王水[$v(\text{HCl}) : v(\text{HNO}_3) = 3 : 1$]侵蚀处理后,使用光学显微镜(OM, Axio Cam MRc 5)、扫描电子显微镜(SEM, JSM63800LV)和能谱仪(EDS)分别

观察样品的微观组织结构及元素分布。最后,利用显微硬度计(HVS-1000)测试试样的硬度,多次测试取平均值。

用 CHI660E 电化学工作站测试样品的电化学腐蚀行为,其中高熵合金为工作电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂电极为辅助电极。待开路电位稳定后,在 $10^5 \sim 10^{-2}$ Hz 频率范围内测量合金的电化学阻抗谱(EIS),其正弦波扰动电压幅值为 10 mV。在 20 mV/min 的扫描速度、相对于开路电位 -250 ~ 250 mV 电压下,测试合金的动电位极化曲线。

表 1 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的化学成分(摩尔分数)

Table 1 Chemical compositions of AlCrFeMoSi_x alloys (mole ratio)

Materials	Al	Cr	Fe	Mo	Si
AlCrFeMo	25%	25%	25%	25%	0
AlCrFeMoSi	20%	20%	20%	20%	20%

2 结果与讨论

2.1 合金的相结构分析

图 1 为两种 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的 XRD 图谱。可以看出,未添加 Si 元素时,AlCrFeMo 高熵合金主要由单相 BCC1(JCPDS 卡片 65-9000)组成。这是因为在高温熔铸过程中,合金系统的混合熵比形成金属间化合物所需熵大,高熵效应抑制了金属间化合物的生成,从而促进上述固溶体的形成^[5]。加入 Si 元素后 BCC1 相仍存在,但合金中形成了新的有序结构 BCC2 相(JCPDS 卡片 65-0985),表明 Si 元素促进了 BCC2 相的形成^[10]。从图 1 中还可看出,BCC1 相的衍射峰发生了偏移,这是因为 Si 融入晶格后会产生点阵畸。同时,加入 Si 元素后,合金中出现了两种金属间化合物 Cr₅Si₃(JCPDS 卡片 50-1329)和 Mo₃Si(JCPDS 卡片 51-0764)。综上所述,Si 元素的加入使 AlCrFeMo 高熵合金由一种 BCC 相转变为两种 BCC 相,同时出现少量金属间化合物。

2.2 合金的热力学分析

大量文献表明^[17-19],高熵合金的混合焓(ΔH_{mix})、混合熵(ΔS_{mix})、原子尺寸差(δ)和价电子浓度(VEC)均为影响其相组成的重要因素。当 $-22 \leq \Delta H_{\text{mix}} \leq 57$ KJ/mol、 $11 \leq \Delta S_{\text{mix}} \leq 19.5$ J/(K · mol)、 $\delta \leq 8.5\%$ 和 $VEC \leq 6.87$ 时,高熵合金体系更易形成 BCC 固溶体相。为了分析 Si 对 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的影响,利用下列公式计算 ΔH_{mix} 、 ΔS_{mix} 、 δ 和 VEC:

$$\Delta H_{\text{mix}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4\Delta H_{ij}^{\text{mix}} C_i C_j, \quad (1)$$

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n C_i \ln C_i, \quad (2)$$

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i \left(1 - \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n C_i r_i} \right)^2}, \quad (3)$$

$$VEC = \sum_{i=1}^n C_i (VEC)_i, \quad (4)$$

式中 $\Delta H_{ij}^{\text{mix}}$ 是由合金中的第 i 个和第 j 个主元素组成的

二元合金在规则固溶体中的混合焓, C_i 或 C_j 是合金中第 i 个或第 j 个主元素的浓度, R 是理想气体常数 ($8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), r_i 是第 i 个原子的原子半径差,(VEC) _{i} 为合金中第 i 个主元素的价电子浓度,具体计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,仅 AlCrFeMo 高熵合金的参数满足 BCC 固溶体相的形成规则。然而,合金加入 Si 后, ΔS_{mix} 增大而 VEC 减小,导致 BCC 相固溶体的形成倾向增大^[20,21]。另外,Si 还使 δ

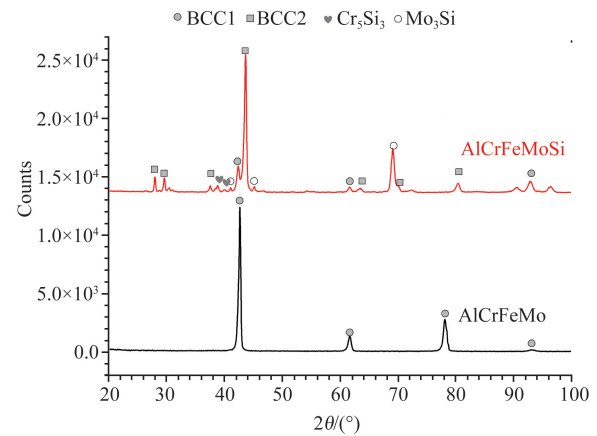


图 1 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys

增大,导致 AlCrFeMo 高熵合金的晶格畸变严重。

为了更直观地研究 Si 元素对 AlCrFeMoSi_x 高熵合金相形成的影响,根据表 2 绘制了 AlCrFeMoSi_x 高熵合金中 ΔH_{mix} 与 δ 的关系图,如图 2 所示。根据 Zhang^[17] 等人对 ΔH_{mix} 和 δ 之间关系的研究结论,加入 Si 之后,AlCrFeMo 高熵合金易形成金属间化合物,这是因为 Si 元素与金属元素间高的负混合焓导致高熵效应不能有效地抑制相的析出^[22]。综上所述,Si 的加入使 ΔH_{mix} 更负, δ 增大,VEC 减小, ΔS_{mix} 变大,合金中更易形成 BCC 相固溶体和金属间化合物。

表 2 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的混合焓 ΔH_{mix} (KJ · mol⁻¹)、混合熵 ΔS_{mix} (J · K⁻¹ · mol⁻¹)、原子尺寸差 δ (%)和价电子浓度 VEC 的计算结果

Table 2 The mixing enthalpy ΔH_{mix} (KJ · mol⁻¹), mixing entropy ΔS_{mix} (J · K⁻¹ · mol⁻¹), difference in atomic size δ (%) and valence electron concentration VEC of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys

Materials	ΔH_{mix}	ΔS_{mix}	δ (%)	VEC (%)
	/(KJ · mol ⁻¹)	/(J · K ⁻¹ · mol ⁻¹)		
AlCrFeMo	-7.25	11.53	6.06	5.75
AlCrFeMoSi	-24.8	13.38	7.63	5.40

2.3 合金的显微组织分析

图 3 为 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的 OM 和 SEM 图。从图 3(a)可以看出,AlCrFeMo 高熵合金为单一相组织。加入 Si 后,图 3(b)显示合金发生了明显偏析,其显微组织主要由白灰色树枝晶、暗灰色枝晶间和黑色片层组织构成。进一步,利用 EDS 对两种 AlCrFeMoSi_x 高熵合金表面的元素分布进行了分析,见图 3(c),可见未加入 Si 时,Al、Cr、Fe、Mo 元素在 AlCrFeMo 高熵合金表面均匀分布。由 EDS 点扫结果(表 3)可知,四种元素的摩尔分数都在 25%左右。由此可知,未添加 Si 时,合金形成了 Al-Cr-Fe-Mo 体心固溶体晶体结构,即为 XRD 中的 BCC1 相。图 3(d)是 AlCrFeMoSi 合金的 EDS 面扫结果,可见表面分别存在 Al、Fe 富集区和 Si、Mo 富集区,而 Cr 元素在表面均匀分布。显然,Si 元素引起了合金元素偏析,从而使合金组织结构发生变化。EDS 点扫结果(表 3)显示,合金表面树枝晶区域主要富集 Cr、Mo、Si 元素,枝晶间区域为 Al、Fe 元素富集区。鉴于 XRD 结果中 BCC1 相和 BCC2 相分别与 JCPDS 卡片 65-9000(CrMo 相)和 JCPDS 卡片 65-0985(AlFe 相)的晶体结构一致,可推测树枝晶区域为 BCC1 相,枝晶间区域为 BCC2 相。另外,片层状组织中富含较多的 Cr、Mo、Si 元素。结合 XRD 可知,该区域主要由金属间化合物 Cr₅Si₃ 和 Mo₃Si 构成。综上所述,Si 的加入使合金微观组织形貌发生变化,形成了新的 BCC 相,并产生少量金属间化合物。

表 3 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的 EDS 分析结果

Table 3 The EDS analysis results of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys

Materials	$x(\text{Al})(\%)$	$x(\text{Cr})(\%)$	$x(\text{Fe})(\%)$	$x(\text{Mo})(\%)$	$x(\text{Si})(\%)$
AlCrFeMo	25.08	24.86	24.72	25.34	—
Dendrite	3.93	23.77	5.22	35.54	31.54
AlCrFeMoSi Inter-dendrite	6.44	25.63	11.61	25.38	30.94
Lamellar structure	38.27	16.88	34.67	5.82	4.36

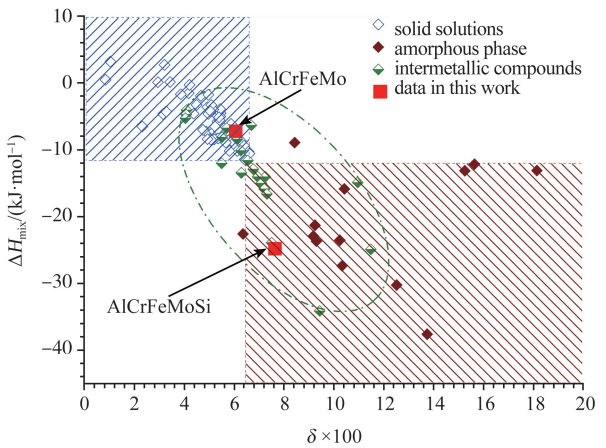


图 2 本工作及参考文献^[23]中高熵合金的 ΔH_{mix} 与 δ 的关系

Fig. 2 A δ - ΔH_{mix} plot delineating the phase selection of high entropy alloys in this work and reference^[23]

2.4 合金的硬度分析

为了更准确地描述 Si 的加入对高熵合金性能的影响,对两种 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的硬度进行了测试,结果见图 4。可以看出,未添加 Si 元素时, AlCrFeMo 高熵合金的硬度为 394 HV。而加入 Si 之后,合金硬度增加至 549 HV。由此可知,添加 Si 有利于提高 AlCrFeMo 高熵合金的硬度。这是因为添加 Si 元素后, AlCrFeMo 高熵合金中形成了 BCC、 Cr_5Si_3 和 Mo_3Si 相,产生第二相强化效应。同时,新相的形成也会导致晶界和相界数量的增加,对位错滑移的阻碍加强,进而引起合金硬度的升高。另外, Si 原子还可起到了固溶强化作用^[24]。

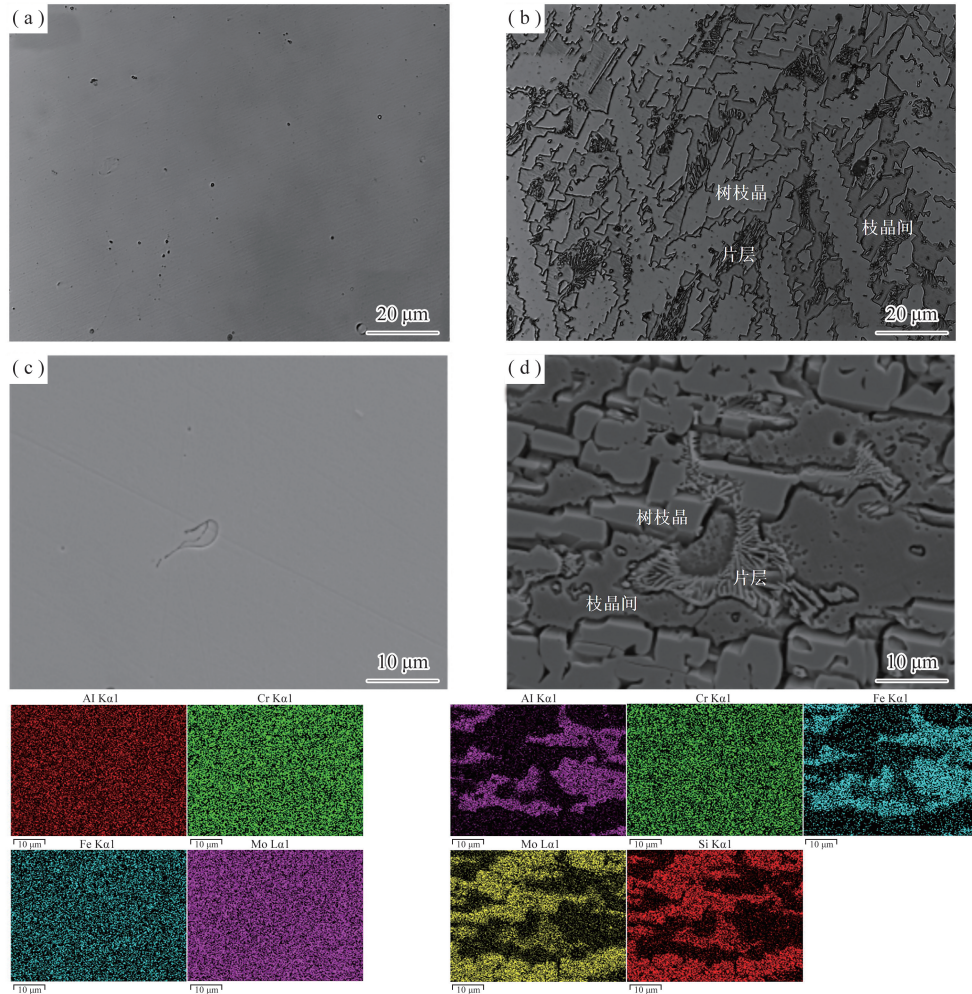


图3 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的 OM 和 SEM 图谱。(a, c) Si_0 合金; (b, d) Si_1 合金

Fig. 3 OM and SEM images of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys. (a, c) Si_0 alloy; (b, d) Si_1 alloy

2.5 合金的腐蚀行为

图 5(a, b)为两种 AlCrFeMoSi_x 高熵合金在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的 EIS 谱。从 Bode 图[图 5(a)]可以看出, AlCrFeMo 高熵合金的低频阻抗模值明显高于 AlCrFeMoSi 高熵合金。由于低频阻抗模值反映了腐蚀阻力,且模值越大腐蚀速率越小^[25],因此 AlCrFeMo 高熵合金的耐腐蚀性能优于 AlCrFeMoSi 高熵合金。从图 5(a)中还可看出,两种高熵合金的相位角曲线中都在高频范围内存在一个由连接工作电极和恒电位仪的长导线引起的高频相移,在中频区也存在一个由

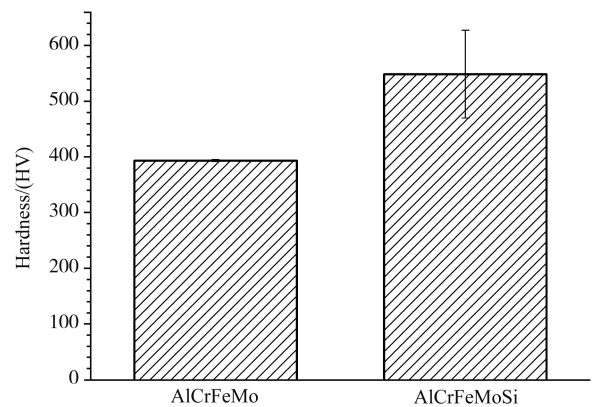


图4 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的硬度

Fig. 4 Hardness of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys

工作电极表面的电化学反应引起的相位角峰。但 Si 加入后,相位角峰向高频移动,表明 AlCrFeMoSi 合金的腐蚀加快。对应的 Nyquist 图[图 5(b)]也显示 Si 添加后,容抗弧半径迅速减小。为了更好地研究测得的 EIS 谱,图 5(c)中等效电路[$Q(R_s(Q_{dl}R_{ct}))$]可以用来拟合数据,其中 Q 表示高频容抗特性, R_s 表示溶液电阻, Q_{dl} 和 R_{ct} 表示基体/溶液界面处双电层的电容和电阻。常相位元件 Q 的阻抗可表示为:

$$Z_{CPE}=Y_0^{-1}(j\omega)^{-n},$$

(5)

式中 Z_{CPE} 为常相位元件的阻抗, Y_0 为比例因子($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n}$), j 为单位虚数($j=\sqrt{-1}$), n 为无量纲指数($0 \leq n \leq 1$), ω 为角频率。EIS 拟合结果见图 5(a, b)中的连续实线,相应的电化学参数见表 4。两种合金的误差分别为 8.98×10^{-4} 和 1.23×10^{-3} ,表明选择的等效电路可以很好地反应两种高熵合金表面的腐蚀状态。AlCrFeMo 高熵合金的 R_{ct} 值($8.53 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$)是 AlCrFeMoSi($2.23 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$)的 4 倍左右,显然 Si 的添加削弱了 AlCrFeMo 高熵合金的耐腐蚀性能。

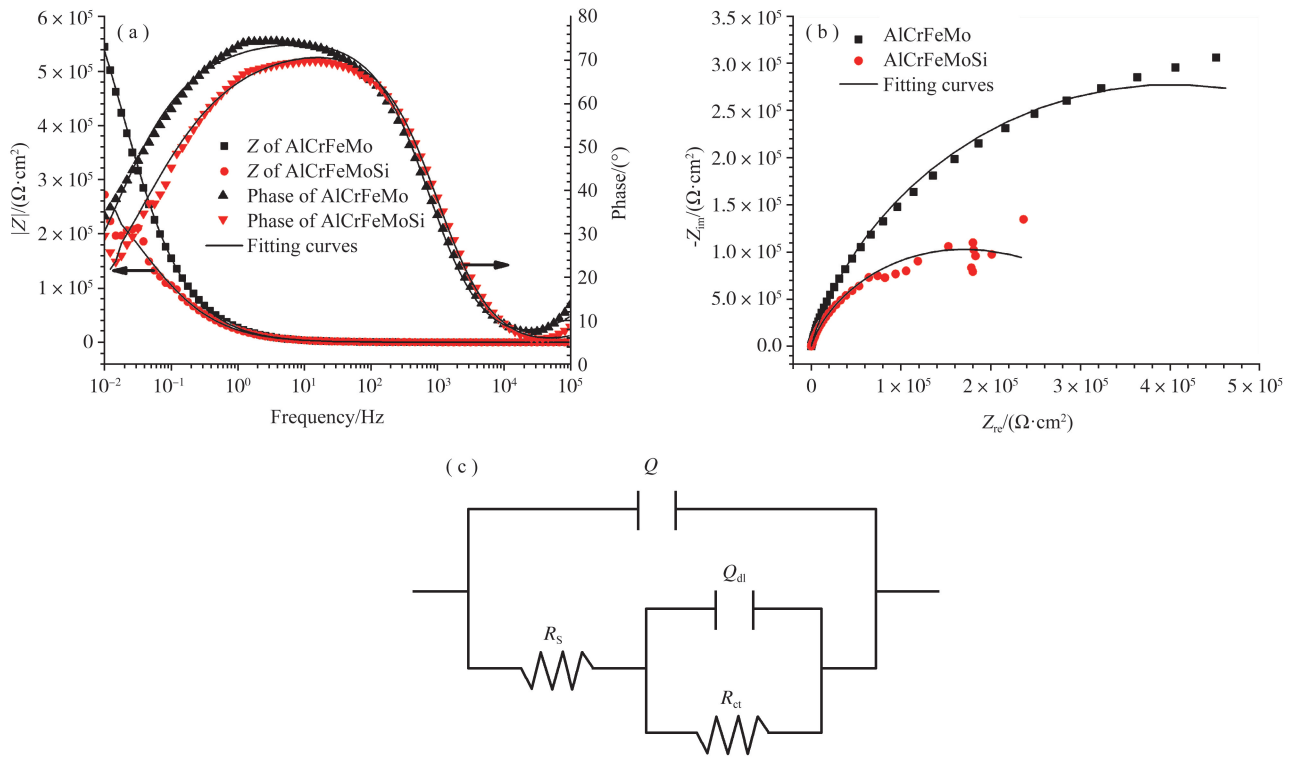


图 5 AlCrFeMoSi_x 高熵合金在质量含量为 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学阻抗谱

(a)Bode 图;(b)Nyquist 图;(c)拟合等效电路

Fig. 5 EIS plots of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys in the 3.5% NaCl solution. (a) Bode plots;

(b) Nyquist plots; (c) Selected equivalent circuit

表 4 AlCrFeMoSi_x 高熵合金的电化学阻抗谱拟合结果

Table 4 The EIS fitting results of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys

Materilas	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$(Q_{dl}-Y_0)/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	Error
AlCrFeMo	103.1	6.81×10^{-6}	0.856 9	8.53×10^5	8.98×10^{-4}
AlCrFeMoSi	87.3	7.64×10^{-6}	0.833 8	2.23×10^5	1.23×10^{-3}

图 6 为 AlCrFeMoSi_x 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的动电位极化曲线结果。可见,添加 Si 元素后 AlCrFeMo 高熵合金的曲线整体向负电位方向偏移,表明其腐蚀倾向增大。利用 Tafel 曲线外推法^[26]可得 AlCrFeMo 和 AlCrFeMoSi 高熵合金的自腐蚀电流密度分别为 1.71×10^{-8} 和 $5.54 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 。显然,Si 元素加剧了 AlCrFeMo 高熵合金在 NaCl 溶液中的腐蚀,这与电化学阻抗谱的结果一致。

图 7 为两种 AlCrFeMoSi_x 高熵合金极化后的 SEM 形貌图。由图 7(a)可以看出,单相的 AlCrFeMo 高

熵合金表面发生了均匀腐蚀。而图 7(b) 显示 AlCrFeMoSi 高熵合金的表面腐蚀不均匀, 主要由白灰色树枝晶和黑色枝晶间构成。此外, 高倍 SEM 形貌图 [图 7(c)] 显示合金表面还能观察到少量白灰色片层组织, 这是因为添加 Si 以后 AlCrFeMo 高熵合金发生明显偏析, 组织转变为枝晶组织加片层状组织。由于这些相之间存在电极电位差异, AlCrFeMoSi 合金表面可以形成无数腐蚀微电池, 使其比单相 AlCrFeMo 合金更易遭受腐蚀。因此, Si 添加降低了 AlCrFeMo 高熵合金在 NaCl 溶液中的耐蚀性。

3 结论

采用非自耗真空电弧熔炼法制备了 AlCrFeMo 和 AlCrFeMoSi_x 高熵合金, 研究了 Si 的加入对 AlCrFeMo 高熵合金的显微组织和性能的影响。

(1) 添加 Si 元素后, AlCrFeMo 高熵合金中形成新的 BCC 相, 同时检测到少量的 Cr₅Si₃ 和 Mo₃Si 化合物。这是因为 Si 不仅是 BCC 相形成元素, 且与金属元素间高的负混合焓可促进硅化物的生成。另外, AlCrFeMo 高熵合金的显微组织转变为枝晶组织加片层状组织。

(2) 添加 Si 元素后, AlCrFeMo 高熵合金的硬度明显提高, 这是因为 Si 原子的固溶强化作用, 以及新的 BCC、Cr₅Si₃ 和 Mo₃Si 物相的第二相强化和晶界强化作用。

(3) 添加 Si 元素后, AlCrFeMo 高熵合金的耐腐蚀性能显著下降。这与 Si 添加引起的组织变化有关, 枝晶与枝晶间和片层状组织间存在明显的电位差, 故易发生电偶腐蚀, 加快腐蚀速率。

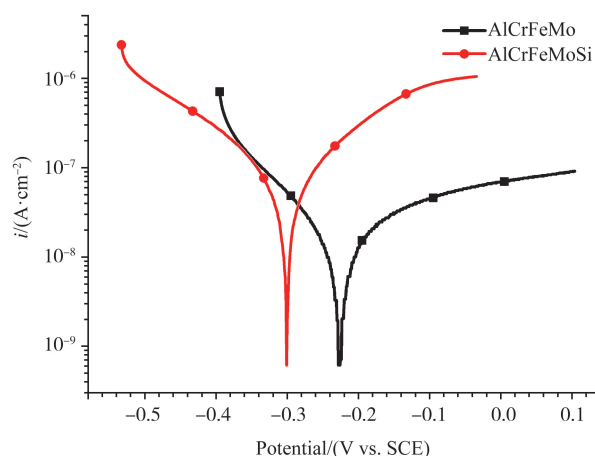


图 6 AlCrFeMoSi_x 高熵合金在质量含量为 3.5% 的 NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys in the 3.5% NaCl solution

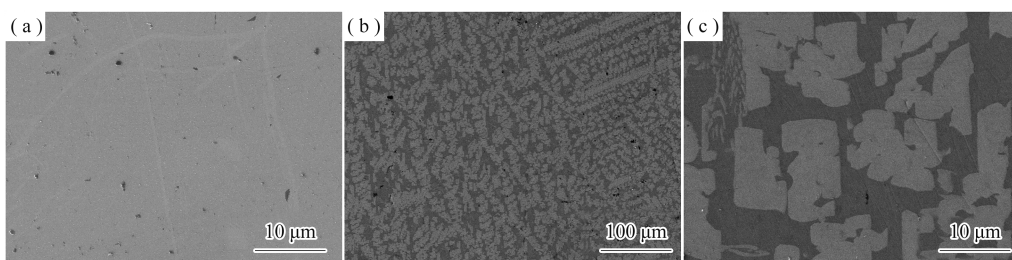


图 7 AlCrFeMoSi_x 高熵合金高熵合金极化后的腐蚀形貌。(a) AlCrFeMo 合金; (b, c) AlCrFeMoSi 合金

Fig. 7 Corrosion morphologies of AlCrFeMoSi_x high entropy alloys after polarization.

(a) AlCrFeMo alloy; (b, c) AlCrFeMoSi alloy

参 考 文 献

- [1] YE H J W, LIN S J, CHIN T S, et al. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2004, 35(8): 2533-2536.
- [2] IKEDA Y, GRABOWSKI B, KÖRMANNAC F. Ab initio phase stabilities and mechanical properties of multicomponent alloys: A comprehensive review for high entropy alloys and compositionally complex alloys[J]. Materials Characterization, 2019, 147: 464-511.
- [3] ARIF Z U, KHALID M Y, REHMAN E, et al. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 225-273.
- [4] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts[J]. Acta Materialia, 2017, 122: 448-511.
- [5] YANG X, ZHANG Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 132(2-3): 233-238.
- [6] 王虎, 王智慧. 等离子熔覆法制备 Al_xCoCrFeNi 高熵合金微观组织与性能研究[J]. 材料导报, 2018, 32(4): 78-81.

- [7] HUANG M T, WANG C M, CUI H Z, et al. Investigation of the structure and properties of AlCrCuFeNiV_x high-entropy alloys[J]. Vacuum, 2020, 173: 109129.
- [8] DONG Y, YAO Z Q, HUANG X, et al. Microstructure and mechanical properties of AlCo_xCrFeNi_{3-x} eutectic high-entropy-alloy system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 823: 153886.
- [9] 吴炳乾, 饶湖常, 张冲, 等. Si 含量对 FeCoCr_{0.5}NiBSi_x 高熵合金涂层组织结构和耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 85-91.
- [10] 郝文俊, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层组织及耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 343-348+381.
- [11] GU X Y, ZHUANG Y X, HUANG D. Corrosion behaviors related to the microstructural evolutions of as-cast Al_{0.3}CoCrFeNi high entropy alloy with addition of Si and Ti elements[J]. Intermetallics, 2022, 147: 107600.
- [12] HUANG L, WANG X J, HAN J S, et al. Effect of Si element on phase transformation and mechanical properties for FeCoCrNiSi_x high entropy alloys[J]. Materials Letters, 2021, 282: 128809.
- [13] TAN M, MENG L, LIN C, et al. Variation of microstructures and properties of Co_{0.2}CrAlNi high entropy alloy doped Si[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 927: 167081.
- [14] CHEN Y, GAO X, QIN G, et al. Achieving excellent specific yield strength in non-equiatomic TiNbZrVMo high entropy alloy via metalloid Si doping[J]. Materials Letters, 2023, 335: 133832.
- [15] 叶喜葱, 徐张洋, 王童, 等. Si 含量对 AlCrNiTiSi_x 高熵合金微观组织和硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(12): 1323-1327.
- [16] 黄东, 庄艳歆. Co 含量对于 Co_xCr₂₅(AlFeNi)_{75-x} 高熵合金组织和力学性能的影响[J/OL]. 材料与冶金学报, 2022 [2022-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1473.TF.20220611.1231.002.html>.
- [17] ZHANG Y, ZHOU Y J, LIN J P, et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(6): 534-538.
- [18] 黄蕾, 王雪洁, 王长征, 等. Ti 对 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金微观组织和摩擦性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(5): 562-566.
- [19] 王晓民, 李和奇, 魏书香, 等. Ti 对 FeCrMnNi 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2019, 4(4): 356-359.
- [20] GUO S, NG C, LU J, 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): 103505.
- [21] 张勇. 先进高熵合金技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [22] JIN B Q, ZHANG N N, GUAN S, et al. Microstructure and properties of laser re-melting FeCoCrNiAl_{0.5}Si_x high-entropy alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 867-873.
- [23] GUO S, HU Q, NG C, et al. More than entropy in high-entropy alloys: forming solid solutions or amorphous phase[J]. Intermetallics, 2013, 41: 96-103.
- [24] 叶喜葱, 徐张洋, 王童, 等. Si 含量对 AlCrNiTiSi_x 高熵合金微观组织和硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(12): 1323-1327.
- [25] HAO X H, ZHAO X C, CHEN H, et al. Comparative study on corrosion behaviors of ferrite-pearlite steel with dual-phase steel in the simulated bottom plate environment of cargo oil tanks[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 399-411.
- [26] WANG X, HU S W, LI W H, et al. Corrosion monitoring for prestressed concrete cylinder pipe spigot with combined use of Tafel extrapolation and surface acoustic wave methods[J]. Construction and Building Materials, 2022, 337: 127572.

(责任编辑:蒲锡鹏)