

# 激光沉积 $Al_xTiCrMnCu$ 高熵合金组织性能的研究

胡 勇, 刘 飞, 王达豪, 赵龙志, 唐延川, 刘德佳, 沈明学, 赵火平, 焦海涛

(1. 华东交通大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013)

(2. 华东交通大学 南昌市载运工具先进材料与激光增材制造重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘 要:** 采用激光沉积方法制备了  $Al_xTiCrMnCu$  ( $x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 高熵合金。通过 XRD、SEM 及腐蚀电化学测试技术等研究了  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的微观结构及性能。研究发现, 随 Al 含量的增加,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金由简单的 fcc 和 hcp1 混合固溶体结构逐渐转变为全部 hcp2 固溶体结构; 合金的显微硬度随 Al 含量的增加而增大;  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金在 3.5% NaCl 水溶液中的耐蚀性先提高后降低, 当  $x=0.25$  时, 其耐蚀性最佳。

**关键词:** 激光沉积; 高熵合金; 微观组织; 耐蚀性能

中图分类号: TG131

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-2967-06

高熵合金因其具有高混合熵、原子迟滞扩散、大晶格畸变等效应, 易获得热稳定性高的面心立方 (fcc)、体心立方 (bcc)、密排六方 (hcp) 等单相固溶体结构或它们组成的多相结构, 具有强度高、耐磨性和耐腐蚀性好等优异性能, 在航空航天、轨道交通等领域的高性能化方面具有广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>。如 AlTiCrFeNiCu 高熵合金由 bcc 固溶体相组成, 其抗压缩强度为 1219 MPa<sup>[7]</sup>。AlFeCrCoCuZr<sub>x</sub> 高熵合金的耐蚀性能优于 304L 不锈钢<sup>[8]</sup>。AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> 高熵合金微观结构由 fcc 和 bcc 相组成, 且发现 fcc 相与 bcc 相的变形机理不同, fcc 相以平面位错滑移的形式变形, 为韧性断裂, 而 bcc 相中的高密度富 Cr 纳米析出物对位错起到钉扎作用, 为脆性断裂<sup>[9]</sup>。TiVNbTa 高熵合金由 bcc 和 fcc 两相组成, 压缩屈服强度为 1506 MPa, 塑性应变为 33%<sup>[10]</sup>。

通过调整组元的含量可调控高熵合金的相结构及性能<sup>[11]</sup>。Li 研究了 Mn 含量对  $Fe_{80-x}Mn_xCo_{10}Cr_{10}$  高熵合金微观结构的影响, 发现随 Mn 含量增加, 其微观结构由 fcc 单相结构转变为 fcc+hcp 双相结构<sup>[11]</sup>。Zhou 等和 Wang 等的研究表明<sup>[12,13]</sup>, 通过调整 Al、Cu、Ti 元素含量, 室温压缩屈服强度由 fcc 结构的 CoCrCuFeNiTi<sub>x</sub> 高熵合金的 230 MPa, 提升至 bcc 结构的 AlCoCrFeNiTi<sub>x</sub> 高熵合金的 3140 MPa, 硬度 HV 由 1000 MPa 变至 9000 MPa。Yeh 等<sup>[1]</sup>发现 CoCrCuNiFeAl<sub>x</sub> 高熵合金的微观结构随 Al 含量的增加, 逐渐由 fcc 结

构变为 fcc+bcc 结构, 最后全部变为 bcc 结构, 其硬度 HV 由 1330 MPa 提高到 6550 MPa。

高熵合金的微观结构和性能除了与组元的种类和含量有关外, 还与高熵合金的制备方法相关<sup>[2]</sup>。目前广泛采用铸造法制备的高熵合金, 易产生残余应力、空隙及缩孔等缺陷。激光沉积过程具有快速凝固冷却速率, 可获得非常细小的显微组织, 提高合金性能<sup>[14,15]</sup>。所以, 激光沉积制备高熵合金具有显著的应用前景。

因此, 本实验采用激光沉积制备  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金, 探索 Al 含量对其微观结构和性能的影响规律, 有望为高熵合金的应用提供依据。

## 1 实 验

激光沉积用实验材料为平均粒度约 74  $\mu m$  的高纯 (>99.5%) Al、Ti、Cr、Mn、Cu 球形金属粉末, 其配比如表 1 所示。将 Al、Ti、Cr、Mn、Cu 混合粉末在 QXQM-1 行星球磨机上球磨 2 h 使粉末混合均匀, 使用的球磨罐及磨球为氧化锆, 球料比为 3:1, 球磨转速为 200 r/min。采用德国 LDM-2500-60 半导体激光器在 316L 基板上进行激光沉积实验, 激光沉积过程中采用 Ar 气进行保护, 激光沉积工艺参数为: 光斑直径 1.5 mm, 激光功率 600 W, 扫描速度 250 mm/min, 离焦量 5 mm, 送粉速率为 15 g/min。

通过王水对金相试样进行腐蚀, 采用 Hitachi SU-8020 型扫描电镜进行微观组织观察; 采用 Max-2000X

收稿日期: 2020-09-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51865011)

作者简介: 胡 勇, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 华东交通大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013, 电话: 0791-87046718, E-mail: huyong@ecjtu.edu.cn

表 1 Al<sub>x</sub>TiCrMnCu 高熵合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Al<sub>x</sub>TiCrMnCu high entropy alloys (wt%)

Alloy	Al	Ti	Cr	Mn	Cu
TiCrMnCu	-	21.93	23.81	25.16	29.1
Al <sub>0.25</sub> TiCrMnCu	3	21.27	23.1	24.41	28.23
Al <sub>0.5</sub> TiCrMnCu	5.82	20.65	22.43	23.7	27.41
Al <sub>0.75</sub> TiCrMnCu	8.48	20.07	21.79	23.03	26.63
AlTiCrMnCu	11	19.52	21.19	22.39	25.9

型 X 射线衍射仪进行物相分析 (Cu 靶 Kα 线, 电压 40.0 kV, 电流 30.0 mA, 扫描角度为 20°~80°, 扫描速度为 2°/min); 采用 HV-1000IS 硬度计进行显微硬度测试; 采用 CS350 电化学工作站检测耐腐蚀性能, 腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液, Pt 电极为辅助电极, 饱和甘汞电极为参比电极, 电位扫描范围为 -1.6~0.8 V, 扫描速率为 1 mV/s。

## 2 结果与分析

### 2.1 XRD 分析

激光沉积 Al<sub>x</sub>TiCrMnCu (x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0)高熵合金的 XRD 图谱如图 1 所示。由图可知, Al<sub>x</sub>TiCrMnCu 高熵合金的组织未出现复杂金属间化合物, 由简单固溶体相组成。当 x=0 时, TiCrMnCu 高熵合金由 fcc 和 hcp1 相组成; 当 x=0.25 时, Al<sub>0.25</sub>TiCrMnCu 高熵合金的相结构及相的峰值未见明显变化; 当 x=0.5, 0.75 时, 2θ=36°~40°间的 hcp1 相的峰值增强, 2θ=42°~43°间的 fcc 相的峰消失; 由图 1 还可发现, 当 x=0~0.75 时, 随 Al 含量的增加, 2θ=43°~45°间的 fcc 和 hcp1 相的峰向左偏移; 当 x=1.0 时, fcc 和 hcp1 相消失, 形成 hcp2 相。由于 Al 原子半径较大, Al 元素加入之后, Al 原子将挤进 fcc 固溶体的晶格中, 从而产生晶格畸变, 促进形成 hcp 相。

合金形成简单固溶体相与高熵合金的高熵效应有关, 可通过所加元素的热力学参数如原子半径差 δ、混合焓 ΔH<sub>mix</sub> 及参数 Ω 进行预测。原子半径差 δ、混合焓 ΔH<sub>mix</sub> 及参数 Ω 计算公式如下所示<sup>[2,16]</sup>:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - r_i / \left(\sum_{i=1}^n c_i r_i\right)\right)^2} \quad (1)$$

$$\Delta H_{\text{mix}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4\Delta H_{AB}^{\text{mix}} c_i c_j \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n c_i T_{mi} \cdot (-R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i)}{\Delta H_{\text{mix}}} \quad (3)$$

式中, c<sub>i</sub> 和 c<sub>j</sub> 为元素 i 和 j 的百分数; r<sub>i</sub> 为元素 i 的原子半径, μm; ΔH<sub>AB</sub><sup>mix</sup> 为 AB 元素间的混合焓, kJ/mol; T<sub>mi</sub> 为元素 i 的熔点, K; R 为气体常数。本实验中所涉及各元素间的混合焓<sup>[17]</sup>、原子半径及熔点如表 2 所示。

根据式(1)~式(3)及表 2 数据计算得到 Al<sub>x</sub>TiCrMnCu 高熵合金的 δ、ΔH<sub>mix</sub>、Ω 值如表 3 所示。Zhang 等<sup>[2]</sup>指出, 当 δ ≤ 6.6%, -20 kJ/mol ≤ ΔH<sub>mix</sub> ≤ 5 kJ/mol, Ω ≥ 1.1 时, 高熵合金可形成简单固溶体。由表 3 可见, Al<sub>x</sub>TiCrMnCu 高熵合金均满足上述热力学条件, 能形成简单固溶体结构, 这也与图 1 的 XRD 结果相吻合。

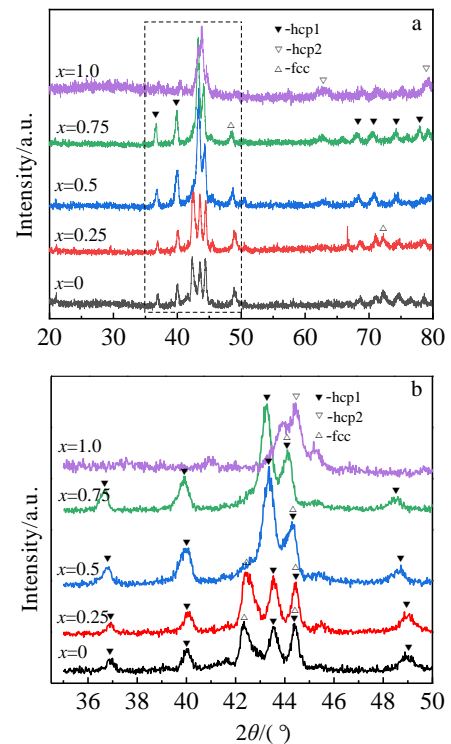


图 1 Al<sub>x</sub>TiCrMnCu 高熵合金的 XRD 图谱  
Fig.1 XRD patterns of Al<sub>x</sub>TiCrMnCu high entropy alloys:  
(a) 2θ=20°~90° and (b) 2θ=35°~50°

表 2 各元素间的混合焓、原子半径及熔点

Table 2 Mixing enthalpy (ΔH<sub>mix</sub>), atomic radius (r) and melting point (T<sub>m</sub>) of different element pairs

Element	Mixing enthalpy, ΔH <sub>mix</sub> /kJ mol <sup>-1</sup>					T <sub>m</sub> /K	r/pm
	Al	Ti	Cr	Mn	Cu		
Al	-	-30	-10	-19	-1	933	143
Ti	-30	-	-7	-8	-9	1941	146
Cr	-10	-7	-	2	12	2180	124
Mn	-19	-8	2	-	4	1519	135
Cu	-1	-9	12	4	-	1358	127

表 3  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的  $\delta$ 、 $\Delta H_{mix}$ 、 $\Omega$  值

Table 3 Values of  $\delta$ ,  $\Delta H_{mix}$ ,  $\Omega$  of  $Al_xTiCrMnCu$  high entropy alloys

Property	$x=0$	$x=0.25$	$x=0.5$	$x=0.75$	$x=1$
$\delta/\%$	6.14	6.17	6.17	6.16	6.12
$\Delta H_{mix}/kJ\ mol^{-1}$	-1.5	-4.64	-7.11	-9.04	-10.56
$\Omega$	13.45	4.67	3.06	2.39	2.01

2.2 显微组织

图 2 为激光沉积  $Al_xTiCrMnCu$  ( $x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ )高熵合金的显微组织。随 Al 含量的增加,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金中 fcc 相的含量逐渐减少, hcp 相的含量逐渐增加。当  $x=0$  时, 显微组织由 fcc 相及岛状的 hcp1 相组成(图 2a); 当  $x=0.25$  时, 显微组织中 fcc 相含量减少, hcp1 相的形貌由岛状变为马蹄状(图 2b); 当  $x=0.5, 0.75$  时, 显微组织中 fcc 相含量进一步减少, hcp1 相含量明显增加(图 2c、2d); 当  $x=1.0$  时, 显微组织中 fcc 相及 hcp1 相消失, 全部变为 hcp2 相, 同时组织中存在明显元素偏析(图 2e)。

图 2 中  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金不同区域的能谱分析结果如表 4 所示。当  $x=0$  时, A 区域 Ti、Cr、Mn 3 种元素含量较高, 组成了 hcp1 结构; B 区域 Cu 元素发生了偏析, 同时 Ti、Mn 含量也较大, 形成富 Cu 的 fcc 结构。当  $x=0.25\sim 0.75$  时, A 区域仍然由 Ti、Cr、

Mn 3 种元素形成的 hcp1 结构组成; 但 B 区域中的 Ti、Cr 元素含量较  $x=0$  时明显减少, Al 含量明显增多, Mn 含量变化不大。当  $x=1.0$  时, Al、Ti、Cr、Mn 4 种元素形成了 hcp2 结构, 同时 Cu 元素严重偏析(B 区域)。

从 EDS 分析可发现,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金中 Cu 元素偏析较严重。元素间的混合焓越正, 则它们的互溶性越差<sup>[6]</sup>。由表 2 可知, Al 与 Ti、Cr、Mn、Cu 的混合焓较小, Al-Ti 为 -30 kJ/mol, Al-Cr 为 -10 kJ/mol, Al-Mn 为 -19 kJ/mol, Al-Cu 为 -1 kJ/mol, 它们之间能较好地互溶。然而, Cu-Cr 的混合焓为 12 kJ/mol, Cu-Mn 的混合焓为 4 kJ/mol, 数值较大, 因此 Cu 不能与 Cr、Mn 很好地互溶, 即 Cr、Mn 会排斥 Cu。由于 Al 原子半径较大, Al 元素加入之后, 产生严重的晶格畸变, 晶格畸变阻碍了与其它元素不互溶的 Cu 元素存在, 导致 Cu 元素偏析。此外, Cu 与其它合金元素的结合能力较差, 从而导致 Cu 产生偏析。

2.3 显微硬度

Al 含量对  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金显微硬度的影响如图 3 所示。由图可见, 随 Al 含量的增加,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的硬度逐渐增大。 $TiCrMnCu$  高熵合金的硬度 6300 MPa,  $AlTiCrMnCu$  高熵合金的硬度达到 7500 MPa。为了进一步描述显微硬度与相结构的关系, 根据图 2 得出  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金中 fcc

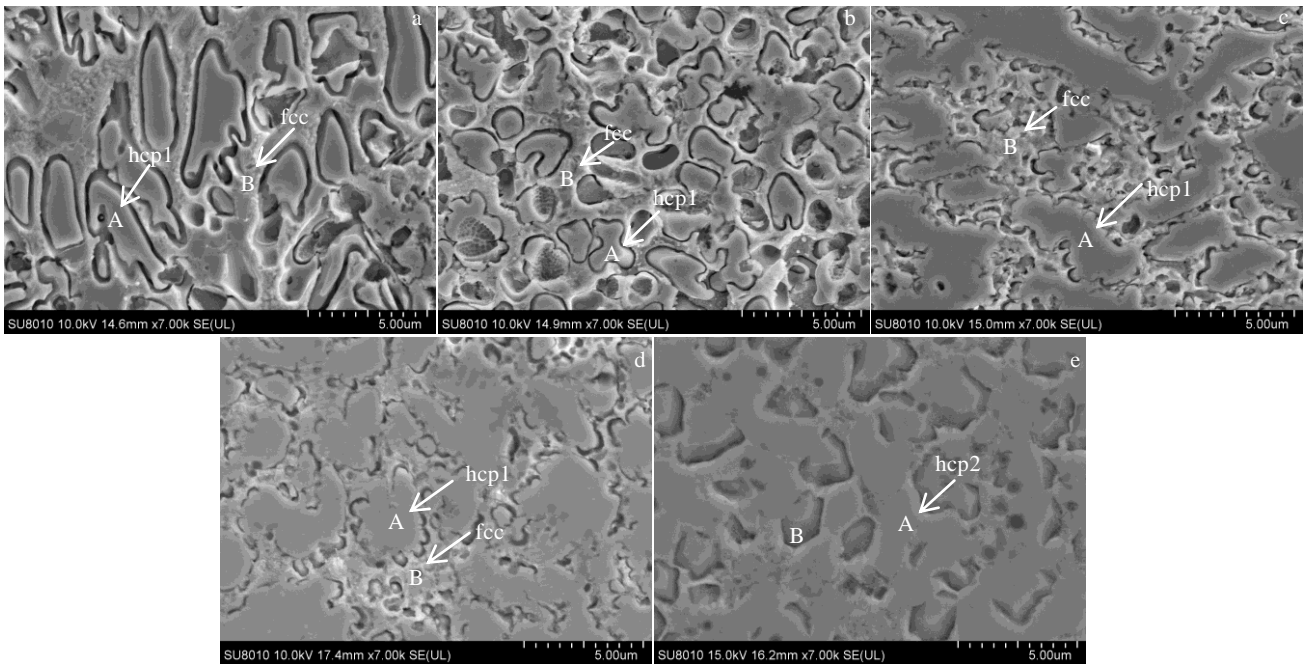


图 2  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的显微组织

Fig.2 Microstructures of  $Al_xTiCrMnCu$  high entropy alloys: (a)  $x=0$ , (b)  $x=0.25$ , (c)  $x=0.5$ , (d)  $x=0.75$ , and (e)  $x=1$

表 4 图 2 中  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金不同区域的能谱分析

Table 4 EDS results of different regions for  $Al_xTiCrMnCu$  high entropy alloys in Fig.2 (at%)

x	Region	Al	Ti	Cr	Mn	Cu
0	A	-	39.02	34.59	22	4.39
	B	-	9.76	3.16	14.49	72.59
0.25	A	2.64	28.96	33.36	31.36	3.68
	B	15.21	2.74	0.41	10.44	71.19
0.5	A	3.45	34.05	27.34	28.61	6.55
	B	21.1	1.69	1.2	13.54	62.47
0.75	A	3.02	38.65	25.27	27.49	3.58
	B	17.06	1.71	2.36	14.04	64.82
1.0	A	17.33	40.79	22.19	14.77	4.92
	B	0.89	1.91	0.64	1.32	95.2

相和 hcp 相的含量 (图 4)。实验测出 fcc 相的硬度为 3550 MPa, hcp 相 (hcp1 相和 hcp2 相硬度接近) 的硬度为 7710 MPa。发现,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的硬度 ( $HV_{alloy}$ ) 与 fcc 相和 hcp 相的含量 ( $V_{fcc}$ 、 $V_{hcp}$ ) 及硬度 ( $HV_{fcc}$ 、 $HV_{hcp}$ ) 满足:  $HV_{alloy} \approx HV_{fcc} \cdot V_{fcc} + HV_{hcp} \cdot V_{hcp}$ 。

一方面, 随 Al 元素的加入,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金中强度低的 fcc 相逐渐减少, 而强度高的 hcp 相逐渐增加, 导致  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的硬度增加。另一方面, 大原子半径 Al 元素的加入, 引起严重的晶格畸变, 并产生固溶强化作用, 晶格畸变还会阻碍位错的开动及运动, 因此, 随 Al 含量的增加,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金硬度提高。

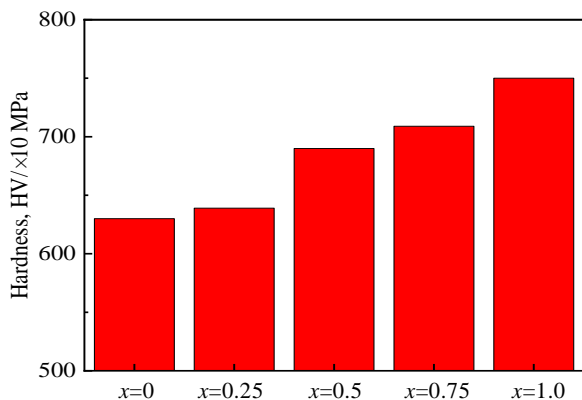


图 3  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的显微硬度

Fig.3 Micro-hardness of  $Al_xTiCrMnCu$  high entropy alloys

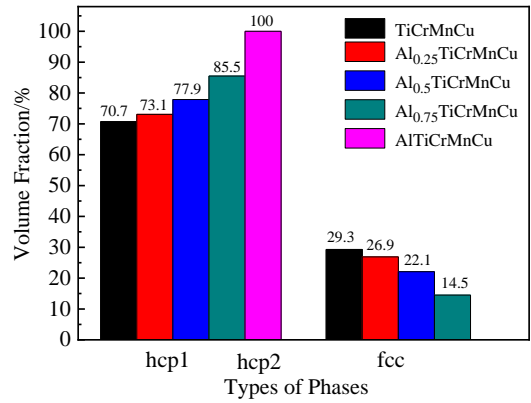


图 4  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金中 fcc 相与 hcp 相的含量

Fig.4 Volume fraction of fcc and hcp phase of  $Al_xTiCrMnCu$  high entropy alloys

### 2.4 耐蚀性能

图 5 为  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线, 其自腐蚀电位  $E_{corr}$  和自腐蚀电流密度  $I_{corr}$  如表 5。一般来说, 自腐蚀电位越大、自腐蚀电流密度越小, 则耐蚀性能越强。当  $x=0$  时, 合金的自腐蚀电位最低, 自腐蚀电流密度最大。随 Al 含量的增加,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的自腐蚀电位  $E_{corr}$  先增加后减小, 而自腐蚀电流密度  $I_{corr}$  先减小后增大, 也就是说随 Al 含量的增加,  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金的耐蚀性先提高后降低。当  $x=0.25$  时,  $Al_{0.25}TiCrMnCu$  高熵合金的自腐蚀电位最大, 为 -0.42 V; 其自腐蚀电流密度最小, 为  $1.17 \mu A/cm^2$ , 说明  $Al_{0.25}TiCrMnCu$  高熵合金的耐腐蚀性能最好。

图 6 为  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金在 3.5% NaCl 溶液

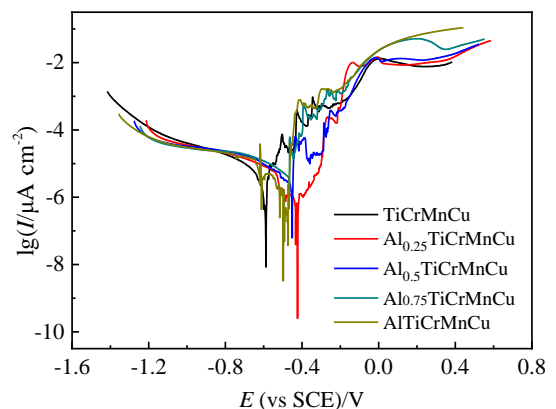


图 5  $Al_xTiCrMnCu$  高熵合金在 3.5% NaCl 溶液中动电位极化曲线

Fig.5 Potentiodynamic polarization curves of  $Al_xTiCrMnCu$  high entropy alloys in 3.5% NaCl solution

表 5  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  高熵合金的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度  
Table 5 Electrochemical parameters of  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  high entropy alloys

Alloy	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$I_{\text{corr}}/\mu\text{A cm}^{-2}$
TiCrMnCu	-0.59	3.84
$\text{Al}_{0.25}\text{TiCrMnCu}$	-0.42	1.17
$\text{Al}_{0.5}\text{TiCrMnCu}$	-0.45	2.37
$\text{Al}_{0.75}\text{TiCrMnCu}$	-0.49	3.26
$\text{AlTiCrMnCu}$	-0.5	3.64

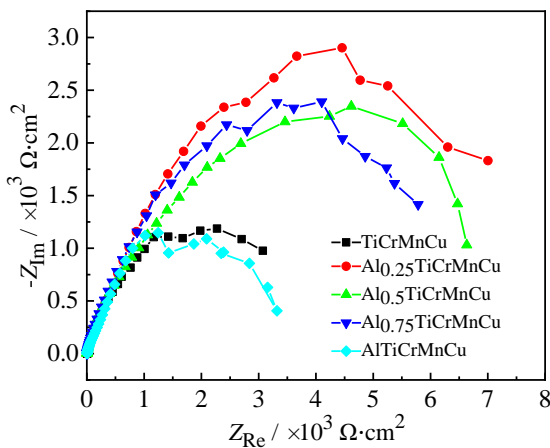


图 6  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  高熵合金在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗  
Fig.6 Electrochemical impedance of  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  high entropy alloys in 3.5% NaCl solution

中的电化学阻抗。由图可见,  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  高熵合金都展现出半圆弧的特征, 这和界面发生的电荷传输过程相关<sup>[18]</sup>。电化学阻抗图谱的半圆弧半径越大, 合金的耐蚀性能越好。其中  $\text{Al}_{0.25}\text{TiCrMnCu}$  高熵合金的半圆弧半径最大, 说明  $\text{Al}_{0.25}\text{TiCrMnCu}$  高熵合金具有最大的电荷传输电阻, 其耐蚀性能最好。随着 Al 含量的增加, 合金的半圆弧半径逐渐减小, 耐蚀性能逐渐变弱, 这与动电位极化曲线所得结果一致。

在 3.5% 的 NaCl 溶液中, 对合金起腐蚀作用的主要是 Cl 离子。根据吸附理论<sup>[19]</sup>, Cl 离子与氧会向金属表面吸附, 当 Cl 离子与金属表面接触时, 会促进金属离子进入溶液当中; 然而, 氧会与金属形成氧化膜, 阻碍金属离子进入溶液。当吸附 Cl 离子加速金属溶解的电流高于氧覆盖金属表面阻碍金属溶解的电流时, 则合金产生腐蚀。 $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  高熵合金中 Al、Cr 元素, 在电化学腐蚀过程中易在合金表面形成致密的钝化膜如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 保护合金内部不被 Cl 离子

侵蚀。然而, 当 Al 含量过多时, 相当于降低了 Cr 的含量, 相对  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  钝化膜而言,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  钝化膜的致密度和保护性不足, 合金耐腐蚀性下降。同时, Al 在含 Cl 离子的溶液中不耐蚀<sup>[20]</sup>, 且溶液中含有电位较正的  $\text{Ti}^{4+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  等金属离子, 由于二次析出的原因, 在 Al 含量较多的情况下, 这将加速合金的腐蚀, 从而降低耐蚀性。

### 3 结 论

1) 激光沉积  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  高熵合金的微观结构随 Al 含量的增加而变化。当  $x=0\sim 0.75$  时, 其微观结构由 fcc 相和 hcp1 相组成, 且随 Al 含量的增加, hcp1 相逐渐增加, fcc 相逐渐减少; 当  $x=1.0$  时, 其微观结构全部由 hcp2 相组成。

2) 随 Al 含量的增加, 激光沉积  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  高熵合金的显微硬度逐渐增大。

3) 在 3.5% NaCl 溶液中,  $\text{Al}_x\text{TiCrMnCu}$  高熵合金的耐蚀性先提高后降低; 当  $x=0.25$  时,  $\text{Al}_{0.25}\text{TiCrMnCu}$  高熵合金的耐蚀性最佳。

### 参考文献 References

- [1] Yeh J W, Chen S K, Lin S J *et al. Advanced Engineering Materials* [J], 2004, 6: 299
- [2] Zhang Yong, Zuo Tingting, Tang Zhi *et al. Progress in Materials Science*[J], 2014, 61: 1
- [3] Wang Yong(王 勇), Li Mingyu(李明宇), Sun Lili(孙丽丽) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(1): 94
- [4] Zhang Weiran, Liaw Peter K, Zhang Yong. *Science China Materials*[J], 2018, 61: 2
- [5] Ma Huan, Shek Chan Hung. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 827: 154 159
- [6] Bao Yayun(鲍亚运), Ji Xiulin(纪秀林), Ji Cuicui(姬翠翠) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2019, 47(11): 141
- [7] Pi Jinhong, Pan Ye, Zhang Lu *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 509: 5641
- [8] Xie Hongbo(谢红波), Liu Guizhong(刘贵仲), Guo Jingjie(郭景杰). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2016, 44(6): 44
- [9] Gao Xuzhou, Lu Yiping, Zhang Bo *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 141: 59
- [10] Gao Nan(高 楠), Long Yan(龙 雁), Peng Haiyan(彭海燕) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2019, 33(8): 572

- [11] Li Z M, Pradeeps K G, Deng Y *et al.* *Nature*[J], 2016, 534: 227
- [12] Zhou Y J, Zhang Y, Wang Y L *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2007, 90: 181 904
- [13] Wang X F, Zhang Y, Qiao Y *et al.* *Intermetallics*[J], 2007, 15: 357
- [14] Qiu Xingwu(邱星武), Wu Mingjun(吴明军), Qi Yan(戚燕) *et al.* *Infrared and Laser Engineering*(红外与激光工程)[J], 2018, 47(7): 0 706 008
- [15] Abdukadir A Mir(阿卜杜喀迪尔·艾麦尔), Xiang Shuo(向硕), Le Guomin(乐国敏) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2020, 41(3): 70
- [16] Miracle D B, Senkov O N. *Acta Materialia*[J], 2017, 122: 448
- [17] Akira Takeuchi, Akihisa Inoue. *Materials Transactions*[J], 2005, 46: 2817
- [18] Wei Lin(魏琳), Wang Zhijun(王志军), Wu Qingfeng(吴庆峰) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(7): 840
- [19] Li Wei(李伟), Liu Guizhong(刘贵仲), Guo Jingjie(郭景杰). *Special Casting and Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2009, 29(10): 941
- [20] Zhu Zufang(朱祖芳). *Corrosion Resistance of Non-ferrous Metal and Its Application*(有色金属的耐腐蚀性及其应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1995

## Study on the Microstructures and Properties of $Al_xTiCrMnCu$ High Entropy Alloys Fabricated by Laser Deposition

Hu Yong, Liu Fei, Wang Dahao, Zhao Longzhi, Tang Yanchuan, Liu Dejie, Shen Mingxue, Zhao Huoping, Jiao Haitao  
(1. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)  
(2. Key Laboratory of Advanced Materials for Vehicles & Laser Additive Manufacturing of Nanchang City, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:**  $Al_xTiCrMnCu$  ( $x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) high entropy alloys were prepared by laser deposition. The XRD SEM and corrosion electrochemical testing methods were used to investigate the effect of Al content on the microstructure and properties of  $Al_xTiCrMnCu$  alloys. The results show that with the increase of Al addition, the phases of  $Al_xTiCrMnCu$  alloys change from simple fcc and hcp1 solid-solutions to single hcp2 solid-solution. The microhardness of  $Al_xTiCrMnCu$  alloys increases gradually with the increase of Al addition. The corrosion resistance of  $Al_xTiCrMnCu$  alloys in 3.5% NaCl solution increases firstly and then decreases with the increase of Al addition. The optimum corrosion resistance can be obtained when  $x=0.25$ .

**Key words:** laser deposition; high entropy alloy; microstructure; corrosion resistance

Corresponding author: Hu Yong, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China, Tel: 0086-791-87046718, E-mail: huyong@ecjtu.edu.cn