

电子束蒸发沉积 Al-Fe-Co-Cr-Ni-Cu 高熵合金涂层耐蚀性研究

牛雪莲, 王立久*, 孙 丹, 董晶亮, 李长明

(大连理工大学 建设工程学部 建材研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 研究电子束蒸发方法在工业常用的钢筋基体表面制备 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0, 25, 0.50, 1.00$) 高熵合金涂层的工艺, 探讨了铝含量对涂层耐蚀性的影响, 并用 X 射线衍射 (XRD)、原子力显微镜 (AFM) 和电子探针 (EPMA) 等手段对涂层的物相、形貌和化学成分进行分析. 结果表明: 光滑基底上得到的合金涂层表面平整、分布均匀, 膜层致密, 随着铝含量的升高, 制备的高熵合金涂层的晶体结构由简单的 FCC 结构转变为 FCC 和 BCC 混合结构. 极化曲线表明, 在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液和 1 mol/L NaCl 溶液中, 高熵合金涂层和 304 不锈钢相比具有更好的耐蚀性能. 此外, $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiCu}$ 高熵合金涂层表现出更全面的耐蚀性和抗孔蚀能力.

关键词: 高熵合金涂层; 电子束蒸发; 微观结构; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG146 **文献标志码:** A

0 引言

混凝土中钢筋腐蚀的两大主要原因是碳化和氯离子的侵蚀. 根据对我国沿海码头工程的调查研究发现, 在大多数引起混凝土结构破坏的原因中, 钢筋腐蚀破坏占主导地位, 由钢筋腐蚀造成的混凝土耐久性问题占 80% 以上. 一些海工建筑中, 钢筋混凝土钢筋表面的钝化膜由于氯离子渗透和浓度积聚而被破坏, 混凝土保护层过早地碳化^[1], 严重影响了海工建筑的使用寿命. 目前, 钢筋的防腐蚀技术主要有阻锈剂、表面涂层、阴极保护法和提高混凝土的性能, 前三种方式是直接地改善钢筋的耐腐蚀性能, 而后者是采取间接的方式改善钢筋耐腐蚀性能. 应用最广泛、最有效的方法是亚硝酸盐类阻锈剂, 但是这类产品用量不足会加速钢筋腐蚀, 过量会对环境和人体健康有负面影响, 因而开发一种防止钢筋腐蚀的新技术或新产品成为提高水工、海工钢筋混凝土建筑物耐久性面临的巨大挑战.

Yeh 等^[2]1995 年突破材料设计的传统观念, 提出了新的合金设计理念, 制备了多元高熵合金, 由于其具有较高的强度、硬度及耐高温、耐腐蚀、抗氧化等优良性能而备受关注, 成为一种具有发

展潜力的新兴材料^[3-8]. 基于此种合金的优点, 本文尝试在钢筋基底上采用电子束蒸发方法制备高熵合金涂层, 以实现钢筋耐腐蚀的目的. 目前制备薄膜的方法有电子束蒸发 (E-beam evaporation)^[9]、磁控溅射法、脉冲激光沉积 (PLD)、原子层外延 (ALE) 等. 相比较而言, 电子束蒸发方法具有成本低廉、操作简单、成膜较快、方便大面积制备等优点. 目前合金的制备和性能研究较为广泛, 但是用这种方法制备高熵合金涂层并具体应用尚未见报道. 本文拟采用此方法在钢筋基底上制备高质量的高熵合金涂层, 并对制备工艺、涂层形貌、化学组成以及耐蚀性等进行系统的研究.

1 实验过程

1.1 材料和实验过程

利用真空电弧熔炼法, 所用的原材料为高纯铝 (99.999 9%)、高纯铁 (99.99%)、高纯镍 (99.999%)、高纯钴 (99.95%)、高纯铬 (99.98%)、高纯铜 (99.999%), 按照所需的物质的量比配料, 在高纯氩气保护下放在电弧炉中真空熔炼样品, 反复熔炼 3~4 次, 以确保铸锭均匀, 将制备的不同成分配比的圆形 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$

($x=0.25, 0.50, 1.00$)高熵合金作为蒸发材料. 实验用的基底材料为工业常用钢筋, 将其做成板状, 切割成 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的方片, 使用 800 # 和 1000 # 砂纸打磨, 经除油、超声波处理清洗吹干. 涂层的制备采用 DZS-500 型电子束蒸发镀膜机, 沉积的工艺参数: 本底真空度 $<3.0\times 10^{-3}\text{ Pa}$, 镀膜气压 $2.0\sim 2.4\text{ Pa}$, 枪电压 6 kV , 束流 $50\sim 100\text{ mA}$, 衬底温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 氩气流量 20 mL/min .

电化学腐蚀行为实验: 电化学实验采用 CHI660D 型恒电位仪(上海辰华公司生产), 用三电极法连接电极, 试样作为工作电极, 饱和甘汞电极作为参比电极, 铂电极作为对电极. 在得到的涂层试样背面焊接一根导线, 其他部位用环氧树脂包裹, 只露出 0.5 cm^2 的有效面积用来进行电化学特性分析测试. 所选试剂为分析纯, 一次蒸馏水配制, 试样分别浸入 $0.5\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液和 1 mol/L NaCl 溶液中稳定 5 min 后, 电位扫描范围为 $-400\sim 1\,500\text{ mV}$ (相对于开路电位), 扫描速率均为 1 mV/s , 然后在相应的软件中对数据进行处理, 绘制相应的电化学极化曲线.

1.2 测试与表征

采用 D/max-2400 型 X 射线衍射仪分析涂层的微观结构, 采用 Cu 靶的 $\text{K}\alpha$ 射线($\lambda=0.154\,056\text{ nm}$), 加速电压 40 kV , 电流 100 mA , 衍射范围 $10^{\circ}\sim 100^{\circ}$, 衍射速度 $1.2^{\circ}/\text{min}$, 步长 0.02° , 并用 EPMA 21600 型电子探针和原子力显微镜对涂层的表面信息进行表征. 采用电化学工作站测定涂层的腐蚀电位和腐蚀电流密度.

2 结果与讨论

2.1 XRD 结果分析

图 1 为经过 800 # 砂纸处理后的基底涂层 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0.25, 0.50, 1.00$) 的 XRD 图谱, 分别缩写为 Al-0.25, Al-0.50 和 Al-1.00. 其中衍射图在 $2\theta=44.62^{\circ}$ 左右出现的衍射峰(111)与面心立方 NiFeCr 的峰非常接近. 对衍射峰的检测发现, 当铝的含量较低时($x=0.25$), 涂层为简单的 FCC 结构的固溶体相; 随着铝含量增加到 $x=0.50$ 时, 合金仍是 FCC 结构, 但是衍射峰的强度随着铝含量的增加而逐渐降低; 当 $x=1.00$ 时, 在 $2\theta=32.14^{\circ}, 45.48^{\circ}, 65.08^{\circ}$ 的位置出现了新的峰, 经检测 AlNi 与衍射峰符合得较好,

说明 AlFeCoCrNiCu 中出现了类似 AlNi 结构的有序的 BCC 结构, 形成 FCC+BCC 的混合结构. 分析表明, Al 元素含量增加使元素发生偏聚, 导致晶格尺寸畸变, 体积膨胀, 体心立方结构的体积分数和硬度都逐渐增大, 晶格的畸变降低了晶胞的完整程度, 散射增强, 从而衍射峰强度降低. 从图 1 中看出, 3 个涂层样品的图谱均为单一的衍射峰, 表明在该条件下制备的是结晶性较好的涂层, 涂层表现出垂直于基底表面择优取向生长特性^[10]. 前人的研究^[11-13] 都表明 Al-Fe-Co-Cr-Ni-Cu 六元合金相主要是由一个体心立方结构和一个面心立方结构组成, 大原子半径 Al 的增加有利于合金中体心相的析出, 元素种类越多原子尺寸差别越大, 导致晶格畸变, 形成非晶相.

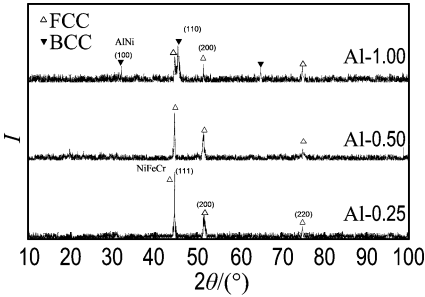
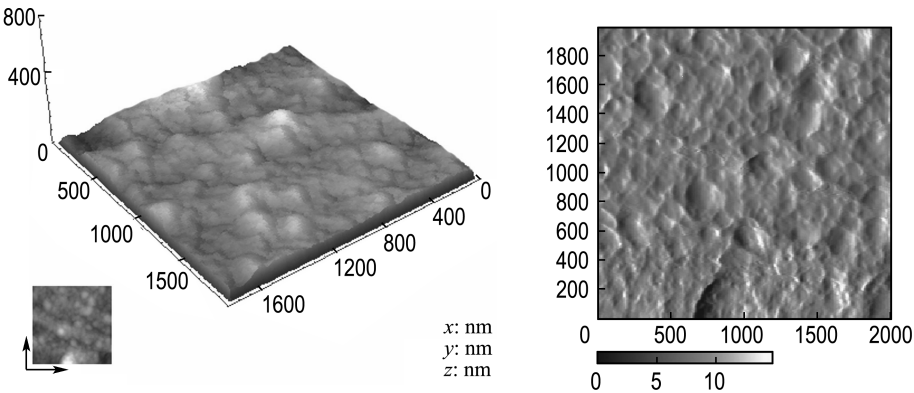


图 1 不同 Al 含量的 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ 高熵合金涂层的 XRD 图谱

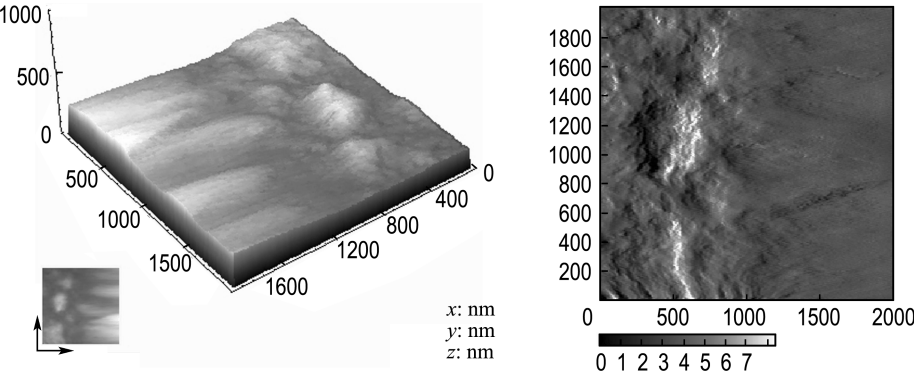
Fig. 1 XRD patterns of $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ high-entropy alloy coatings with different Al contents

2.2 AFM 结果分析

利用 AFM 表征在不同粗糙程度基底制备的高熵合金涂层 $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiCu}$ 样品的三维表面形貌. 扫描面积为 $2\text{ }\mu\text{m}\times 2\text{ }\mu\text{m}$, 基底温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. 如图 2 所示, 图 2(b) 经过 800 # 砂纸处理的基底沉积的涂层表面不平坦, 而图 2(a) 经过 1000 # 砂纸处理的基底沉积的涂层表面平整、分布均匀, 膜层致密. 基底的粗糙程度不同得到的涂层质量也不同, 基底越光滑得到的涂层质量越好. 造成这一现象的原因也很好理解, 在成膜过程中当表面比较粗糙时, 合金中不同原子沉积在基底上, 经过扩散、成核、晶粒合并, 被基底的小岛俘获, 导致成膜不连续. 当表面比较光滑时, 表面没有凸起, 原子在成核过程连续生长, 得到涂层的均匀度和致密性较好. 测量结果给出, 两种涂层表面均方根粗糙度约为 50 nm 和 10 nm .



(a) 1000 # 砂纸处理基底



(b) 800 # 砂纸处理基底

图 2 Al_{0.5}FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的 AFM 图

Fig. 2 AFM images of Al_{0.5}FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating

2.3 电子探针结果分析

图 3 展示了涂层 Al_{0.5}FeCoCrNiCu 的表面形貌及元素分布的分析结果. 由图 3 可以看出涂层的形态仍然保持原有的枝晶组织, 而且在枝晶间有颗粒析出. 表 1 表明: 涂层表面的各种元素与靶材成分相近. 与靶材相比, 在涂层的表面检测出较大含量的 Fe 元素, 说明 Fe 元素从基底向涂层中扩散, 在涂层和基底间应有一层扩散层. 图中 A、B 两个位置的 Co、Cr 含量分布情况极为相似, 而且和靶材样品的初始质量分数的比例相差不多, 而在枝晶边缘的 A 位置 Al、Ni 的含量比较高, 形成了 AlNi 金属间化合物, 这一点在前面的 XRD 分析中也得到了证实. Cu 元素在 A 位置的质量分数为 12.87%, 而在 B 位置时上升到了 31.01%, Cu 元素在合金的枝晶间出现了明显的富集现象. 由于 Cu-Cr、Cu-Fe 之间具有较大的混合焓, 超过了 10 kJ/mol, 使得 Cu 受到 Cr 和 Fe 元素的排斥, 而且 Cu 元素与其他元素的结合力还比较小, 导致 Cu 在枝晶间出现富集^[11].

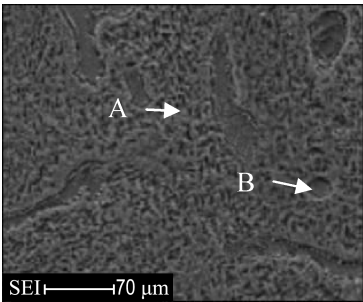


图 3 Al_{0.5}FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的 EPMA 图
Fig. 3 EPMA pattern of Al_{0.5}FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating

表 1 Al_{0.5}FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的化学成分
Tab. 1 The chemical composition of Al_{0.5}FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating

元素	w _A /%	w _B /%	元素	w _A /%	w _B /%
Al	7.15	4.31	Fe	54.14	43.31
Co	8.97	8.22	Ni	10.12	7.85
Cr	6.75	5.30	Cu	12.87	31.01

2.4 极化曲线结果分析

图 4 为 Al_xFeCoCrNiCu (*x* 为物质的量比,

$x=0.25,0.50,1.00$)高熵合金涂层在 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 溶液中的极化曲线. 利用阴极 Tafel 曲线外插与腐蚀电位相交,就可以得到有关腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(i_{corr})的相关数据,列于表 2 中. 通过表 2 可发现 304 不锈钢具有低的腐蚀电位和大的腐蚀电流密度,高熵合金涂层具有较高的腐蚀电位和较小的腐蚀电流密度,304 不锈钢的腐蚀电流密度要比高熵合金涂层低一个数量级,因而高熵合金涂层在 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 溶液中的耐腐蚀性要优于 304 不锈钢. 同时也发现在 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 溶液中 304 不锈钢最早进入钝化态,高熵合金涂层也发生了明显的钝化现象,其中 Al-0.50 发生钝化较早,而且也出现了二次钝化,第一次钝化的钝化膜短时间内被破坏,转而再次发生钝化,对高熵合金涂层的腐蚀起到了阻止的作用. 与其他两种高熵合金涂层相比,

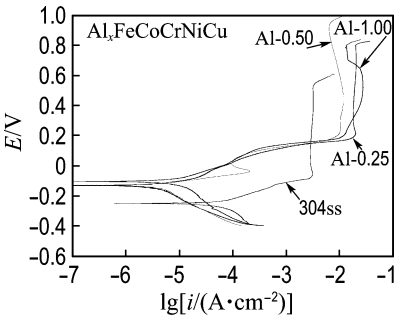


图 4 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0.25,0.50,1.00$) 高熵合金涂层和 304 不锈钢在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中的极化曲线

Fig. 4 The polarization curves for $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0.25,0.50,1.00$) high-entropy alloy coatings and 304 stainless steel in 0.5 mol/L H_2SO_4 solution

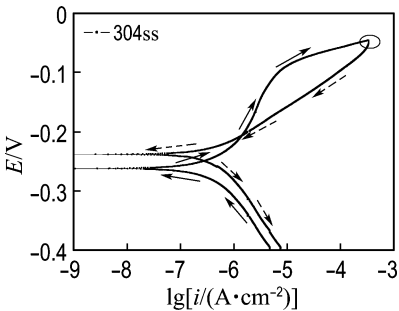
表 2 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0.25,0.50,1.00$) 高熵合金涂层和 304 不锈钢在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中的极化参数

Tab. 2 The polarization parameters of $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0.25,0.50,1.00$) high-entropy alloy coatings and 304 stainless steel in 0.5 mol/L H_2SO_4 solution

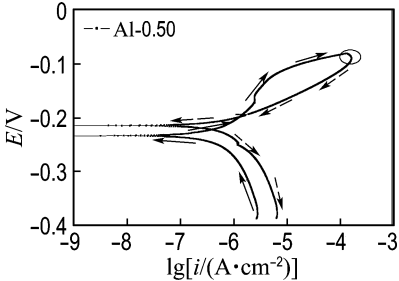
样本	E_{corr}/V	$i_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
Al-0.25	-0.130	2.184×10^{-6}
Al-0.50	-0.129	2.185×10^{-6}
Al-1.00	-0.106	4.291×10^{-6}
304ss	-0.253	2.14×10^{-5}

Al-0.50 钝化电位更低,钝化区间更长,足有 750 mV,可形成有效的保护膜来保护材料. 前面的衍射结果已表明,随 Al 的添加,合金晶界变得越来越少,晶间腐蚀作用也会减小,从而有利于高熵合金涂层耐腐蚀性提高,但是其钝化能力并不是随着 Al 含量的增加而增强,这说明 Al 的添加不利于该系高熵合金涂层钝化,而钝化作用对于高熵合金涂层的耐腐蚀性能起到了极其重要的作用^[14]. 综合比较而言,在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中 Al-0.50 高熵合金涂层具有最优的耐硫酸腐蚀性.

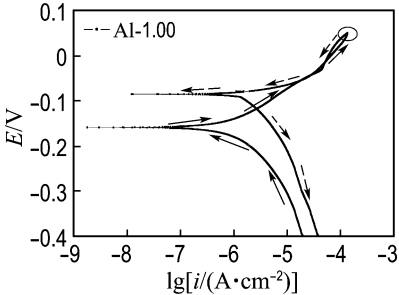
图 5 为 Al-0.50、Al-1.00 高熵合金涂层和 304 不锈钢在 1 mol/L 的 NaCl 溶液中的循环极



(a) 304 不锈钢



(b) Al-0.50 高熵合金涂层



(c) Al-1.00 高熵合金涂层

图 5 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0.50,1.00$) 高熵合金涂层和 304 不锈钢在 1 mol/L NaCl 溶液中的循环极化图

Fig. 5 Cyclic polarization curves for 304 stainless steel, Al-0.50 and Al-1.00 in 1 mol/L NaCl solution

化图. 极化参数相关数据的获得同上述计算方法, 计算结果列于表 3 中. 图中 304 不锈钢和 Al-0.50 高熵合金涂层有一个明显的正迟滞环, 出现正迟滞环意味着会有孔蚀现象发生; 而 Al-1.00 高熵合金涂层有一个负迟滞环, 负迟滞环的出现说明此表面不会有孔蚀发生^[15-16]. 图 5(a) 的正迟滞环停留在较高的电流密度转折后, 电流密度线性下降, 再钝化电位(E_{rp})也比较低, 随着电位的下降, 形成的蚀孔也持续扩大, 大约在电位-260 mV 时, 元素的溶解才结束. 然而, 从图 5(c) 可以看出, Al-1.00 高熵合金涂层呈现出了不同的循环极化环, 负迟滞环转折时的电流密度停留在较低的电流密度下, 转折后电流密度下降缓慢, 再钝化电位较高(-85 mV), 但是具有偏高一些的腐蚀电流密度和腐蚀电位. 综合考虑, 高熵合金涂层和 304 不锈钢在 1 mol/L NaCl 溶液中耐腐蚀性对比, Al-1.00 高熵合金涂层有较高的自腐蚀电位, 较低的自腐蚀电流密度, 耐孔蚀能力要强于 Al-0.50 高熵合金涂层, 304 不锈钢的抗孔蚀能力最差.

表 3 Al_xFeCoCrNiCu ($x=0.50, 1.00$) 高熵合金涂层和 304 不锈钢在 1 mol/L NaCl 溶液中的极化参数

Tab. 3 The polarization parameters of Al_xFeCoCrNiCu ($x=0.50, 1.00$) high-entropy alloy coatings and 304 stainless steel in 1 mol/L NaCl solution

样本	E_{corr}/mV	$i_{corr}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	E_{rp}/mV
Al-0.50	-234	1.716×10^{-7}	-215
Al-1.00	-157	2.910×10^{-7}	-85
304ss	-262	1.672×10^{-7}	-239

3 结 论

(1)XRD 分析结果表明,随着高熵合金涂层中 Al 含量的增加,合金从简单的 FCC 结构转变为 FCC 和有序的 BCC 混合结构,体心立方结构的体积分数和硬度都逐渐增大.

(2)AFM 分析结果表明,基底表面光滑得到的涂层表面平整、分布均匀,膜层致密,不同基底得到的涂层表面均方根粗糙度为 50 nm 和 10 nm.

(3)电子探针分析结果表明,涂层表面的各种元素与靶材成分相近. 与靶材相比,在涂层的表面检测出较大含量的 Fe 元素,说明 Fe 元素从基底向涂层中扩散,检测到较多 Cu 含量的原因是由

于在枝晶间出现 Cu 富集.

(4)综合考虑,Al_{0.5}FeCoCrNiCu 高熵合金涂层无论是在 0.5 mol/L 的 H₂SO₄ 溶液还是 1 mol/L NaCl 溶液中,都表现出极好的耐腐蚀性和抗 Cl⁻ 腐蚀能力. 由此可见,高熵合金涂层在很大程度上能够改善钢筋的抗腐蚀能力,为开发一种新型的钢筋防腐蚀的方法提供可靠的依据.

参考文献:

[1] 祝烨然,李克亮,王 冬,等. 阻锈剂及硅粉、阻锈剂联合应用对防止钢筋锈蚀效果的研究[J]. 混凝土, 2006(2):49-52.

ZHU Ye-ran, LI Ke-liang, WANG Dong, *et al.* Rust inhibitor and combination of silicon fume and rust inhibitor on prevention of rebar rust [J]. **Concrete**, 2006(2):49-52. (in Chinese)

[2] Yeh Jien-wei, Chen Swe-kai, Lin Su-jien, *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.

[3] ZHANG K B, FU Z Y, ZHANG J Y, *et al.* Annealing on the structure and properties evolution of the CoCrFeNiCuAl high-entropy alloy [J]. **Journal of Alloys and Compounds**, 2010, **502**(2): 295-299.

[4] 刘 源,陈 敏,李言祥,等. Al_xCoCrCuFeNi 多主元高熵合金的微观结构和力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, **38**(9):1602-1607.

LIU Yuan, CHEN Min, LI Yan-xiang, *et al.* Microstructure and mechanical performance of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloys [J]. **Rare Metal Materials and Engineering**, 2009, **38**(9): 1602-1607. (in Chinese)

[5] LI B S, WANG Y R, REN M X, *et al.* Effects of Mn, Ti and V on the microstructure and properties of AlCrFeCoNiCu high entropy alloy [J]. **Materials Science and Engineering: A**, 2008, **498**(1-2): 482-486.

[6] Wu Jien-min, Lin Su-jien, Yeh Jien-wei, *et al.* Adhesive wear behavior of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloys as a function of aluminum content [J]. **Wear**, 2006, **261**(5-6):513-519.

[7] Hsu Chin-you, Yeh Jien-wei, Chen Swe-kai, *et al.* Wear resistance and high-temperature compression strength of Fcc CuCoNiCrAl_{0.5}Fe alloy with boron addition [J]. **Metallurgical and Materials**

- Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, 2004, **35**(5):1465-1469.
- [8] Kim K B, Warren P J, Cantor B. Metallic glass formation in multicomponent (Ti, Zr, Hf, Nb)-(Ni, Cu, Ag)-Al alloys [J]. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 2003, **317**(1-2):17-22.
- [9] 侯海虹,孙喜莲,申雁鸣,等. 电子束蒸发氧化锆薄膜的粗糙度和光散射特性[J]. 物理学报, 2006, **55**(6):3124-3127.
- HOU Hai-hong, SUN Xi-lian, SHEN Yan-ming, *et al.* Roughness and light scattering properties of ZrO_2 thin films deposited by electron beam evaporation [J]. **Acta Physica Sinica**, 2006, **55**(6):3124-3127. (in Chinese)
- [10] Tong Chung-jin, Chen Yu-liang, Chen Swe-kai, *et al.* Microstructure characterization of $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloy system with multiprincipal elements [J]. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, 2005, **36**(4):881-893.
- [11] WEN L H, KOU H C, LI J S, *et al.* Effect of aging temperature on microstructure and properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy [J]. **Intermetallics**, 2009, **17**(4):266-269.
- [12] Shun Tao-tsung, Du Yu-chin. Microstructure and tensile behaviors of FCC $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy [J]. **Journal of Alloys and Compounds**, 2009, **479**(1-2):157-160.
- [13] ZHANG K B, FU Z Y, ZHANG J Y, *et al.* Characterization of nanocrystalline CoCrFeNiTiAl high-entropy solid solution processed by mechanical alloying [J]. **Journal of Alloys and Compounds**, 2010, **495**(1):33-38.
- [14] Rapp R A. Kinetics, microstructures and mechanism of internal oxidation — its effect and prevention in high temperature alloy oxidation [J]. **Corrosion**, 1965, **21**(12):382-401.
- [15] Lee C P, Chiang C C, Chen Y Y, *et al.* Effect of the aluminium content of $\text{Al}_x\text{CrFe}_{1.5}\text{MnNi}_{0.5}$ high-entropy alloys on the corrosion behaviour in aqueous environments [J]. **Corrosion Science**, 2008, **50**(7):2053-2060.
- [16] Hsu Yu-jui, Chiang Wen-chi, Wu Jiann-kuo. Corrosion behavior of FeCoNiCrCu_x high-entropy alloys in 3.5% sodium chloride solution [J]. **Materials Chemistry and Physics**, 2005, **92**(1):112-117.

Research on corrosion resistance of Al-Fe-Co-Cr-Ni-Cu high-entropy alloy coating by electron beam evaporation plating

NIU Xue-lian, WANG Li-jiu*, SUN Dan, DONG Jing-liang, LI Chang-ming

(Institute of Building Materials, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: High-entropy alloy coatings of $\text{Al}_x\text{FeCoCrNiCu}$ ($x=0.25, 0.50, 1.00$) were prepared on steel bar using the electron beam evaporation plating technology, and the effects of different Al contents on corrosion resistance of the coatings were discussed. The phase, microstructure and chemical composition of the prepared coatings were observed with XRD, AFM and EPMA. The experimental results show that the alloy coating surface prepared on smooth base is smooth and with well-distributed thickness, the produced membranous film is dense, and the structure of the prepared high-entropy alloy coating is gradually changed from a single FCC phase to a mixture phase of FCC and BCC with the increase of Al content. The polarization curves show that high-entropy alloy coating has better corrosion resistance than 304 stainless steel in 0.5 mol/L H_2SO_4 solution and 1 mol/L NaCl solution, meanwhile $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiCu}$ high-entropy alloy coating has the best comprehensive corrosion resistance and pit-corrosion resistance.

Key words: high-entropy alloy coating; electron beam evaporation; microstructure; corrosion resistance