

RuFeCoNiMn 高熵合金纳米催化剂的制备与碱性析氧性能

马小龙*, 黄奕帆, 李安琴, 胡刚, 胡松, 覃彪

(遵义师范学院化学化工学院, 贵州 遵义 563006)

摘要:为解决碱性条件下钌基催化剂活性低、稳定性差的问题,以十六烷基三甲基氯化铵为形貌控制剂,通过溶剂热法制备了具有不同钌比例的高熵合金 RuFeCoNiMn 纳米催化剂。在碱性环境中, RuFeCoNiMn 表现出最佳的析氧反应(OER)性能。在 10 mA/cm² 电流密度下,过电位仅 255 mV, Tafel 斜率 42.29 mV/dec,且在经过连续 40 h 稳定性测试后电流密度仅降低 2.3%。经 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)、透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)、X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)等手段研究表明其优异性能源于多元金属协同调节活性中心电子结构,从而增强 RuFeCoNiMn 催化剂的 OER 性能。

关键词:高熵合金; RuFeCoNiMn; OER; 碱性

中图分类号: O643

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0158-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.027

Preparation and alkaline oxygen evolution reaction performance of RuFeCoNiMn high-entropy alloy nanocatalysts

MA Xiao-long*, HUANG Yi-fan, LI An-qin, HU Gang, HU Song, QIN Biao

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China)

Abstract: To solve the problems of low activity and poor stability of ruthenium-based catalysts under alkaline conditions, hexadecyltrimethylammonium chloride was used as a morphology control agent, and high-entropy alloy RuFeCoNiMn nanocatalysts with different ruthenium ratios were prepared by the solvothermal method. In an alkaline environment, RuFeCoNiMn exhibited the optimal oxygen evolution reaction (OER) performance. At a current density of 10 mA/cm², the overpotential was only 255 mV, the Tafel slope was 42.29 mV/dec, and the current density decreased by merely 2.3% after 40 consecutive hours of stability testing. Studies via characterization methods such as X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) showed that its excellent performance originates from the synergistic regulation of the electronic structure of active sites by multiple metals, which in turn enhances the OER performance of the RuFeCoNiMn catalyst.

Key words: high-entropy alloy; RuFeCoNiMn; OER; alkaline

针对长期使用化石燃料引发的能源与环境双重危机,开发绿色可再生能源已成为当前亟待推进的关键任务^[1-2]。氢能凭借高能量密度与零污染排放的显著优势,被广泛认为是替代传统化石燃料的核心潜力能源载体之一^[3-4]。电催化水分解作为一种可持续且高效的制氢路径,其反应过程主要包含阴极发生的析氢反应(HER)与阳极进行的氧析出(OER)两大核心步骤^[5-6]。然而,水分解技术实际应用推进的核心障碍,在于 HER 与 OER 的动力学迟缓——二者复杂的多电子反应路径导致反应速率受限,其中 OER 的动力学瓶颈问题尤为显著^[7-8]。因此,开发高效、稳定和低成本的 OER 催化剂对推动电解水产氢产业化具有重要意义。

目前, Ru 基贵金属氧化物催化剂被公认为

OER 性能最优的电催化剂。然而,这类贵金属普遍存在价格高昂、自然资源储量稀少的问题,这两大瓶颈极大限制了其在实际场景中的规模化应用^[9-10]。尽管已有大量研究报道指出, Ru 与过渡金属形成的合金基纳米材料可作为高效 OER 催化剂,但其综合性能仍远不及 Ru 基贵金属氧化物催化剂^[10-11]。此外,传统的二元和三元合金存在明显缺陷:在电化学过程中,由于合金中的过渡金属原子易向催化剂表面偏析,这类合金往往容易发生降解,或溶解到电解液中^[12-13]。相比之下,高熵合金(HEAs)凭借其独特优势和出色的热力学与动力学稳定性,以及在调控结构、电子及催化性能方面的广阔自由度已作为能源催化剂引起了学界的广泛关注^[14-15]。然而,在单一 HEAs 中实现 Ru 与过渡金属合金化,将对催化

收稿日期: 2025-10-20; 修回日期: 2026-06-04

基金项目: 遵义师范学院 2025 年度服务地方专项项目(ZSFWZX[2025]14); 2025 年贵州省青年引导项目(QN[2025]389); 遵义师范学院博士基金项目(BS[2024]10)

作者简介: 马小龙(1990-), 男, 博士, 研究方向为能源电催化和功能纳米材料, 通讯联系人, shawnma1990@163.com。

反应产生积极作用仍面临挑战^[15-17]。另一方面,尽管目前已有多种合成技术用于制备高熵合金纳米材料,但要实现对高熵合金电催化剂的成分、尺寸及形貌的精准调控仍存在难度^[18-19]。由此可见,通过电子调控与形貌控制对高熵合金进行合理设计,对于提升其催化活性具有深远意义,然而这一目标的实现仍面临挑战。

基于此,以十六烷基三甲基氯化铵为形貌控制剂通过溶剂热法制备不同化学计量比的 Ru 基高熵合金催化剂(RuFeCoNiMn)。通过 X-射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)、透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)、X-射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)对催化剂晶型、形貌、表面元素存在形式进行了分析。同时,采用电化学技术探究了 RuFeCoNiMn 系列催化剂的碱性 OER 性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

乙酰丙酮铁($C_{15}H_{24}FeO_6$, 98%)、乙酰丙酮钴($C_{15}H_{24}CoO_6$, $\geq 99\%$)、乙酰丙酮镍($C_{10}H_{14}NiO_4$, 95%)、乙酰丙酮锰($MnC_{15}H_{21}O_6$, $\geq 97\%$)、乙酰丙酮钌($C_{15}H_{21}O_6Ru$, $\geq 97\%$)、阿拉丁试剂(上海)有限公司生产;无水乙醇(C_2H_5OH , 分析纯)、十六烷基三甲基氯化铵($C_{19}H_{42}ClN$, 分析纯)、醋酸(CH_3COOH , 分析纯),国药化学试剂有限公司;Vulcan XC-72(C、工业级),美国卡博特 CABOT 公司;油胺($C_{18}H_{37}N$, 80~90%)、环己烷(C_6H_{12} , 分析纯)、葡萄糖($C_6H_{12}O_6$, 分析纯),麦克林生化科技有限公司。

电子天平(BSM220.3S),上海卓精电子科技有限公司;真空干燥箱(DZF-6020),上海尚道仪器制造有限公司;磁力搅拌器(ZNCL-B),杭州振和科学仪器有限公司;超纯水机(NW10VF),上海康雷分析仪器有限公司;电化学工作站(CHI760E),上海辰华仪器有限公司;X-射线衍射分析(XRD, D8 ADVANCE),德国 Bruker 公司;透射电子显微镜(TEM, Tecnai G220 S-TWIN),美国 FEI 公司;电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, iCAP 6300)、X 射线光电子能谱仪(Escalab 250Xi),赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 RuFeCoNiMn 催化剂的制备

采用溶剂热法制备 RuFeCoNiMn 的具体步骤如下:将 10.1 mg 的 $C_{15}H_{21}O_6Ru$ 、6.4 mg 的 $C_{10}H_{14}NiO_4$ 、8.8 mg 的 $C_{15}H_{24}FeO_6$ 、8.9 mg 的 $C_{15}H_{24}CoO_6$ 、8.8 mg

的 $MnC_{15}H_{21}O_6$ 及 40 mg 的十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)加入盛有 10 mL 油胺(OAM)的双颈圆底烧瓶中,室温下超声 2.0 h 使其混合均匀。随后,以 $10^\circ C/min$ 的速率升温至 $105^\circ C$,迅速加入 30 mg 预先称量的 $C_6H_{12}O_6$,继续升温至 $250^\circ C$ 并保温 5.0 h。反应结束冷却后,将产物转移至离心机,以 9 000 r/min 离心 10 min,用乙醇/环己烷混合液反复离心洗涤至产物完全收集。最后,将产物置于真空干燥箱中, $60^\circ C$ 恒温干燥 4.0 h,即得 RuFeCoNiMn。

1.2.2 不同化学计量比 RuFeCoNiMn 催化剂的制备

不同化学计量比 RuFeCoNiMn 的合成条件与 1.2.1 相似,以改变 Ru 含量为例。采用相同的方法合成了不同 Ru 含量的 RuFeCoNiMn,只是添加了不同量的 $C_{15}H_{21}O_6Ru$,分别为:6.01 mg 和 14.1 mg,分别计为 RuFeCoNiMn-L 和 RuFeCoNiMn-H。

1.2.3 HER 性能测试

所有电化学测试均在 $30^\circ C$ 条件下进行,通过 CHI760 电化学工作站完成,测试采用标准三电极系统:以石墨棒为辅助电极、Hg/HgO 电极为参比电极、玻碳(GC)电极为工作电极,工作电解质为现用现配制的 1 mol/L KOH 水溶液。所有电化学工作站测试电位均通过公式(1)转换为可逆氢电极(RHE)电位。

$$E_{RHE} = E_{Hg/HgO} + 0.059pH + 0.098 \quad (1)$$

工作电极制备过程如下:将 10 mg 所制备催化剂分散于 2 mL 含质量分数 0.05% Nafion 的异丙醇中,连续超声处理 30 min 形成均匀油墨;用规格为 10 μL 微量注射器取 10 μL 油墨滴涂于 GC 电极表面,自然晾干,催化剂负载质量约为 0.254 8 mg/cm²。为进行 OER 性能对比,同时采用相同的手段制备商用 RuO₂ 油墨电催化剂修饰的工作电极。

电化学测试流程为:首先以 50 mV/s 的扫描速率对电极进行至少 100 次循环伏安(CV)扫描至曲线重合,随后在现配制的 1 mol/L KOH 电解质中开展后续测试。线性扫描伏安(LSV)测试的电位范围为 0.3~0.8 V(vs.Hg/HgO),扫描速率为 5 mV/s,所有 LSV 数据未进行欧姆压降补偿(IR)补偿。催化剂的循环耐久性通过 CV(扫描速率 100 mV/s)与计时电流法评估。

转化频率(TOF)通过公式(2)计算。

$$TOF = jA/4Fn \quad (2)$$

式中: j 为特定过电位下的电流密度, mA/cm²; A 为电极表面积, cm²; 4为生成 1 mol O₂ 所需转移的电子摩尔数, mol; F 为法拉第常数, 96 485 C/mol; n 为

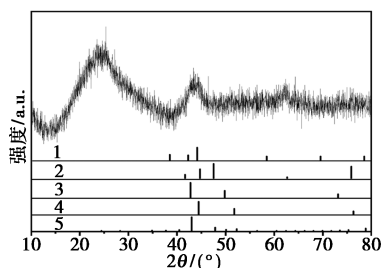
活性位点摩尔数, mol; *TOF* 计算基于“催化剂中贵金属原子为活性位点”的假设。

2 结果与分析

2.1 结构表征

2.1.1 XRD 表征

XRD 结果如图 1 所示, RuFeCoNiMn 晶型呈单一的面心立方(FCC)结构,表明没有任何额外的相。同时,谱图显示(220)与(200)衍射峰较弱,说明 RuFeCoNiMn 中(111)晶面占主导。值得注意的是,与标准的 Ru、Fe、Co、Ni、Mn 的衍射峰相比,相应的特征峰均有角度偏移,表明形成了具有伴随晶格压缩、膨胀的均匀合金相^[20]。这可归因于合金中组成元素原子尺寸的差异、电负性的不同而导致的晶格畸变。这种畸变的产生也进一步证实了 RuFeCoNiMn 高熵合金材料的成功制备。



1—JCPDS: Ru 06—0663; 2—JCPDS: Co 07—0727;
3—JCPDS: Fe 52—0513; 4—JCPDS: Ni 04—0850;
5—JCPDS: Mn 32—0637

图1 RuFeCoNiMn 催化剂的 XRD 图

2.1.2 电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)和透射电子显微镜(TEM)表征

使用 ICP-OES 对一系列 RuFeCoNiMn 中每个元素的含量进行了定量分析(表 1)。实验结果表明, RuFeCoNiMn 中各金属元素的原子百分占比范围为 5% 至 35%, 与设计的 HEAs 相一致。此外, 通过结合 ICP 结果计算的热力学参数[RuFeCoNiMn: $\Delta S_{\text{mix}} = -13.35 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $\Delta H_{\text{mix}} = 6.95 \text{ kJ/mol}$; RuFeCoNiMn-H: $\Delta S_{\text{mix}} = -13.32 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $\Delta H_{\text{mix}} = 7.18 \text{ kJ/mol}$; RuFeCoNiMn-L: $\Delta S_{\text{mix}} = -13.30 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$,

表1 RuFeCoNiMn 催化剂中 Ru、Fe、Co、Ni 和 Mn 的 ICP-OES 检测结果

催化剂	元素(原子百分比)/%				
	Ru	Fe	Co	Ni	Mn
RuFeCoNiMn	21.32	17.50	19.57	22.00	19.61
RuFeCoNiMn-H	17.32	17.43	21.50	23.21	20.55
RuFeCoNiMn-L	25.28	17.22	18.79	20.34	18.38

$\Delta H_{\text{mix}} = 6.71 \text{ kJ/mol}$]也进一步证实了制备材料符合 HEA 的熵定义^[14]。因此,对上述 ICP 表征结果证明了高熵合金 RuFeCoNiMn 催化剂的成功制备。

为了探究合成材料的形貌,一系列 RuFeCoNiMn 催化剂 TEM 表征如图 2 所示。合成的 RuFeCoNiMn 高熵合金纳米颗粒分布均匀在纳米尺度,平均粒径尺寸约为 6.59 nm。这与 RuFeCoNiMn 的 XRD 中(111)晶面占主导且宽泛的结果相一致。此外,不同化学计量比的 RuFeCoNiMn 的 TEM 结果也显示出, RuFeCoNiMn-H 和 RuFeCoNiMn-L 形貌和尺寸与 RuFeCoNiMn 相似,说明细微的改变化学计量比并不会导致催化剂形貌的改变,这源于高熵合金熵效应的结果。

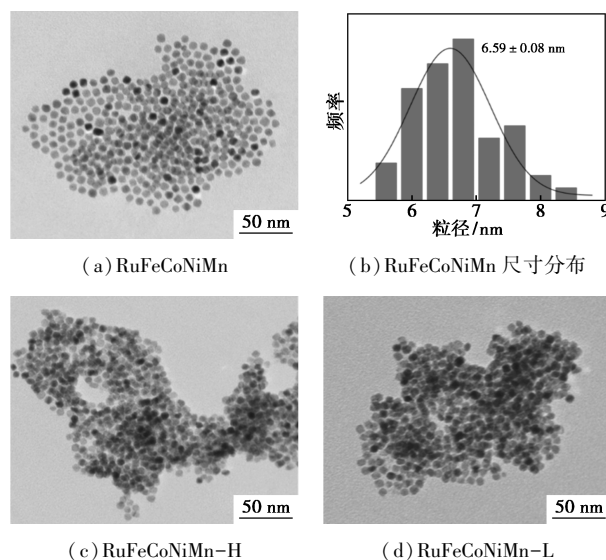
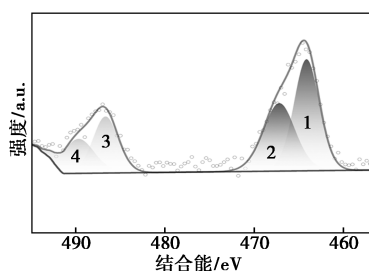


图2 RuFeCoNiMn、RuFeCoNiMn-H 和 RuFeCoNiMn-L 的 TEM 图

2.1.3 XPS 表征

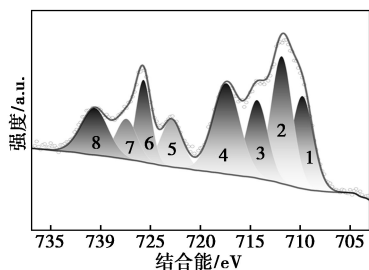
为了探索 RuFeCoNiMn 中金属元素的价态,进行了 XPS 分析,结果如图 3 所示。Ru 3p 光谱[图 3(a)]显示了位于 464.09 eV 和 486.67 eV 的一对峰,分别归属于 $\text{Ru}^0 3p_{3/2}$ 和 $\text{Ru}^0 3p_{1/2}$ 。另外一组分别位于 467.32 eV 和 489.75 eV 处归属于 $\text{Ru}^{4+} 3p_{3/2}$ 和 $\text{Ru}^{4+} 3p_{1/2}$ ^[21]。大部分以金属 Ru 态存在,少量以氧化态存在。至于图 3(b)、(c)中 Fe 2p 和 Co 2p 的 XPS 光谱,它们都可分为 8 个峰,分别对应于零价峰、二价峰、三价峰和卫星峰^[22-23]。此外, Ni 2p 的 XPS 谱[图 3(d)]显示 Ni^0 (854.64 eV 和 871.13 eV 处的峰分别对应 $\text{Ni}^0 2p_{3/2}$ 和 $\text{Ni}^0 2p_{1/2}$) 和 Ni^{2+} (855.44 eV 和 873.01 eV 处的峰分别对应 $\text{Ni}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Ni}^{2+} 2p_{1/2}$) 共存,2 个卫星峰的结合能分别为 860.96 eV 和 878.23 eV^[24]。Mn 2p 的 XPS 光谱

[图 3(e)] 包括 6 个轨道峰和 2 个卫星峰, 640.01 eV 和 651.23 eV 对应于 Mn^0 $2p_{3/2}$ 和 Mn^0 $2p_{1/2}$, 640.96 eV 和 652.29 eV 对应于 Mn^{2+} $2p_{3/2}$ 和 Mn^{2+} $2p_{1/2}$, 642.61 eV 和 653.94 eV 对应于 Mn^{2+} $2p_{3/2}$ 和 Mn^{2+} $2p_{1/2}$, 645.11 eV 和 656.24 eV 对应于 Mn^{4+} $2p_{3/2}$ 和 Mn^{4+} $2p_{1/2}$ [25]。此外, 如图 3(f) 所示, O 1s 光谱显示



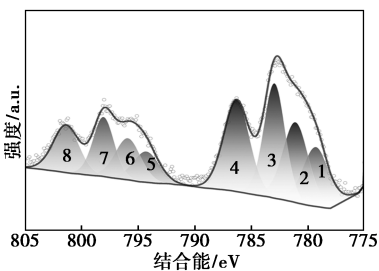
1— Ru^0 $3p_{3/2}$; 2— Ru^{4+} $3p_{3/2}$; 3— Ru^0 $3p_{1/2}$; 4— Ru^{4+} $3p_{1/2}$

(a) Ru 3p



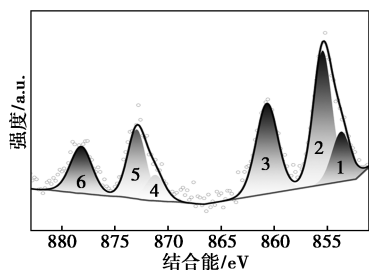
1— Fe^0 $2p_{3/2}$; 2— Fe^{2+} $2p_{3/2}$; 3— Fe^{3+} $2p_{3/2}$; 4—Fe $2p_{3/2}$ 卫星峰;
5— Fe^0 $2p_{1/2}$; 6— Fe^{2+} $2p_{1/2}$; 7— Fe^{3+} $2p_{1/2}$; 8—Fe $2p_{1/2}$ 卫星峰

(b) Fe 2p



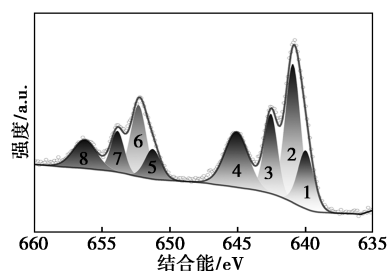
1— Co^0 $2p_{3/2}$; 2— Co^{2+} $2p_{3/2}$; 3— Co^{3+} $2p_{3/2}$; 4—Co $2p_{3/2}$ 卫星峰;
5— Co^0 $2p_{1/2}$; 6— Co^{2+} $2p_{1/2}$; 7— Co^{3+} $2p_{1/2}$; 8—Co $2p_{1/2}$ 卫星峰

(c) Co 2p



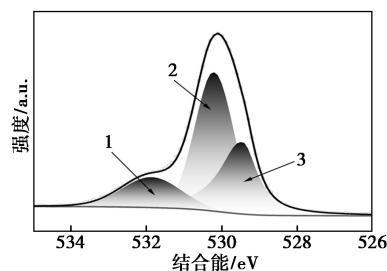
1— Ni^0 $2p_{3/2}$; 2— Ni^{2+} $2p_{3/2}$; 3—Ni $2p_{3/2}$ 卫星峰;
4— Ni^0 $2p_{1/2}$; 5— Ni^{2+} $2p_{1/2}$; 6—Ni $2p_{1/2}$ 卫星峰

(d) Ni 2p



1— Mn^0 $2p_{3/2}$; 2— Mn^{2+} $2p_{3/2}$; 3— Mn^{4+} $2p_{3/2}$; 4—Mn $2p_{3/2}$ 卫星峰;
5— Mn^0 $2p_{1/2}$; 6— Mn^{2+} $2p_{1/2}$; 7— Mn^{4+} $2p_{1/2}$; 8—Mn $2p_{1/2}$ 卫星峰

(e) Mn 2p



1— $\text{O}=\text{C}-\text{OH}$, H_2O ; 2— $\text{M}-\text{OH}$; 3— $\text{M}-\text{O}$

(f) O 1s

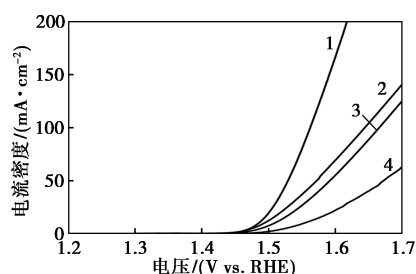
图 3 RuFeCoNiMn 的 XPS 光谱图

出 M-O 和 M-OH 的存在, 表明材料在制备过程中部分氧化 [26]。通过 XPS 结果证明了, 催化剂中的 Ru、Fe、Co、Ni 和 Mn 元素同时以金属态和氧化态的形式存在。这种多元素以不同价态存在于催化剂中的形式, 其协同效应促进了 RuFeCoNiMn 的 OER 催化性能。此外, XPS 结果也进一步证实成功构建了 RuFeCoNiMn。

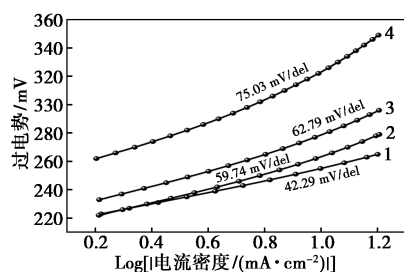
2.2 RuFeCoNiMn 催化 OER 性能

在碱性电解质环境中采用 LSV 对不同催化剂的 OER 性能进行了评估。由图 4(a) 可知, RuFeCoNiMn 催化剂展现出最优的催化活性; 当电流密度达到 $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 时, 其所需过电位仅为 255 mV, 显著低于相同测试条件下其他对比催化剂的过电位。值得注意的是, 本研究观察到的过电位甚至低于商业 IrO_2 (323 mV @ $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$)。此外, 塔菲尔值的高低决定了电催化反应动力学的快慢, 如图 4(b) 所示, RuFeCoNiMn 的 Tafel 斜率仅为 $42.29 \text{ mV}/\text{dec}$, 远低于 RuFeCoNiMn-H ($59.74 \text{ mV}/\text{dec}$)、RuFeCoNiMn-L ($62.79 \text{ mV}/\text{dec}$) 和商业 RuO_2 ($75.03 \text{ mV}/\text{dec}$), 表明 RuFeCoNiMn 具有最迅速的碱性 OER 动力学响应。为了消除质量负载效应并获得对固有催化活性的清晰理解, 计算了所有催化剂的 TOF 值以探索其固有活性, 结果如图 5(a) 所示。由图 5(a) 可得, 在过电势 300 mV 下, RuFeCoNiMn 的 TOF 值为 5.322 s^{-1} ,

是 RuFeCoNiMn-H (3.441 s^{-1})、RuFeCoNiMn-L (1.411 s^{-1}) 以及商业 RuO_2 (0.079 s^{-1}) 的 67 倍以上。这证明了 RuFeCoNiMn 能够提供更多的活性位点,在 OER 性能方面具有优越的固有活性。



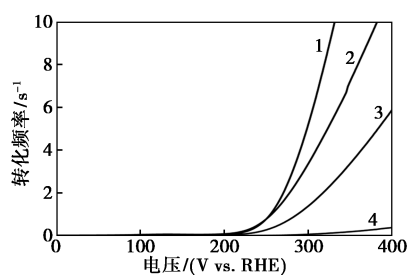
(a) LSV 曲线



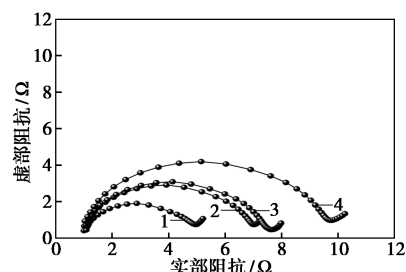
(b) Tafel 曲线

1—RuFeCoNiMn; 2—RuFeCoNiMn-H; 3—RuFeCoNiMn-L;
4—商业 RuO_2

图4 RuFeCoNiMn、RuFeCoNiMn-H、
RuFeCoNiMn-L 及商业 RuO_2 的 LSV 和 Tafel 曲线



(a) TOF 曲线

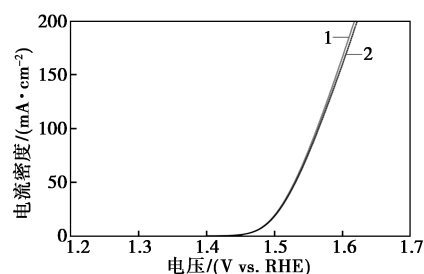


(b) EIS 曲线

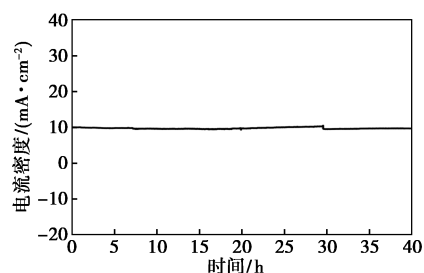
1—RuFeCoNiMn; 2—RuFeCoNiMn-H; 3—RuFeCoNiMn-L;
4—商业 RuO_2

图5 RuFeCoNiMn、RuFeCoNiMn-H、
RuFeCoNiMn-L 及商业 RuO_2 的 TOF 和 EIS 曲线

另外,为进一步揭示 RuFeCoNiMn 催化剂 OER 性能增强的内在机制,采用电化学阻抗(EIS)测试技术对所有催化剂的电子转移行为进行了系统分析。如图 5(b) 所示, RuFeCoNiMn 的电荷转移电阻 4.0Ω , 小于 RuFeCoNiMn-H (6.0Ω)、RuFeCoNiMn-L (6.8Ω) 及商业 RuO_2 (8.8Ω)。结果表明, RuFeCoNiMn 的电荷转移电阻最小,其具有快速的电荷传输能力和电催化动力学响应。为了评价 RuFeCoNiMn 的稳定性,通过快速扫描循环伏安法(CV)进行加速老化试验,如图 6(a) 所示, RuFeCoNiMn 经过连续 5 000 圈 CV 循环后的 LSV 曲线与初始基本保持一致,说明 RuFeCoNiMn 催化剂在碱性条件下进行 OER 测试时具有较好的稳定性。此外,计时电流法测试进一步验证了 RuFeCoNiMn 纳米高熵合金催化剂优异的电化学耐久性[图 6(b)]。经过 40 h 连续测试,其电流密度衰减率仅为 2.3%,充分表明该催化剂具备出色的电催化稳定性,为其在大规模商业应用中的推广提供了重要支撑。



1—RuFeCoNiMn 初始 LSV 曲线;
2—RuFeCoNiMn 循环 5 000 圈 CV 后的 LSV 曲线
(a) 5 000 圈 CV 曲线



(b) I-T 曲线

图6 RuFeCoNiMn 的 OER 稳定性测试曲线

3 结论

本研究基于熵驱动效应,采用溶剂热法成功设计并制备了五元 RuFeCoNiMn 高熵合金纳米电催化剂,并系统研究了其在碱性条件下的电催化析氧反应(OER)性能。

(1) 通过 XRD、ICP 及 TEM 等表征证实,所制

备的 RuFeCoNiMn 高熵合金具有单一的面心立方 (FCC) 晶体结构, 各元素含量符合高熵合金的熵驱动定义; 合金粒子尺寸分布均匀狭窄, 平均粒径约为 6.59 nm, 且钌元素含量的细微调控对粒子尺寸无显著影响。这种独特结构不仅可提升材料的结构稳定性、加快电子传输速率, 还能促进氧气脱附释放, 从而有效增强电催化活性。

(2) 电化学性能测试显示, 该催化剂表现出优异的碱性 OER 活性与稳定性: 与对比催化剂相比, 其过电位最低 (255 mV)、Tafel 斜率更小 (42.29 mV/dec), 且具有更强的电荷转移能力; 稳定性测试进一步证实了其良好的电化学耐久性。

综上, 各金属组成元素间的协同效应为 RuFeCoNiMn 高熵合金催化剂提供了丰富活性位点与高效电子传输能力。本工作为析氧反应中贵金属基催化剂的减量化设计与制备提供了有益参考和新思路。

参考文献

- [1] George J, Thangarasu S, Jayaram A, *et al.* Materials for electrocatalysis: Future prospects in energy conversion [J]. *The Chemical Record*, 2025, 25(5): e202400254.
- [2] Li H, Li H, Du M, *et al.* A perspective on field-effect in energy and environmental catalysis [J]. *Chemical Science*, 2025, 16(4): 1506–1527.
- [3] Jing H, Zhu P, Zheng X, *et al.* Theory-oriented screening and discovery of advanced energy transformation materials in electrocatalysis [J]. *Advanced Powder Materials*, 2022, 1(1): 100013.
- [4] Rong C, Huang X, Arandiyani H, *et al.* Advances in oxygen evolution reaction electrocatalysts via direct oxygen-oxygen radical coupling pathway [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(9): 2416362.
- [5] Lei H, Zhang Q, Liang Z, *et al.* Metal-corrole-based porous organic polymers for electrocatalytic oxygen reduction and evolution reactions [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(24): e202201104.
- [6] Zhou B, Gao R, Zou J, *et al.* Surface design strategy of catalysts for water electrolysis [J]. *Small*, 2022, 18(27): 2202336.
- [7] Arshad U, Tang J, Shao Z. Replace platinum for hydrogen evolution reaction in the cathode of proton exchange membrane water electrolyzers [J]. *SusMat*, 2025, 5(2): e267.
- [8] Li H, Lin Y, Duan J, *et al.* Stability of electrocatalytic OER: From principle to application [J]. *Chemical Society Reviews*, 2024, 53(21): 10709–10740.
- [9] Qin R, Chen G, Feng X, *et al.* Ru/ Ir-based electrocatalysts for oxygen evolution reaction in acidic conditions: From mechanisms, optimizations to challenges [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(21): 2309364.
- [10] Deng Z, Sun Z, Li Y, *et al.* Electrochemical oxygen evolution performance of nitrogen-doped ultra-thin carbon nanosheets composite RuIrCo single atom alloy catalysts [J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2024, 42(9): 973–979.
- [11] Wu H, Wang Y, Shi Z, *et al.* Recent developments of iridium-based catalysts for the oxygen evolution reaction in acidic water electrolysis [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(25): 13170–13189.
- [12] Yuan Y, Fang H, Chen K, *et al.* Engineering high-density grain boundaries in $\text{Ru}_{0.8}\text{Ir}_{0.2}\text{O}_x$ solid-solution nanosheets for efficient and durable OER electrocatalysis [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(18): 2501607.
- [13] Verma S, Singh L, Goyal A, *et al.* Ruthenium-integrated nickel selenide nanoparticles for efficient multifunctional electrocatalysis [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2025, 8(26): 13522–13531.
- [14] George E P, Raabe D, Ritchie R O. High-entropy alloys [J]. *Nature Reviews Materials*, 2019, 4(8): 515–534.
- [15] Liang J, Cao G, Zeng M, *et al.* Controllable synthesis of high-entropy alloys [J]. *Chemical Society Reviews*, 2024, 53(12): 6021–6041.
- [16] Su L, Chen X, Tan Y, *et al.* Suppressing migration of Ru in a high-entropy alloy for durable acidic oxygen evolution [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(21): 15743–15747.
- [17] Ma X, Zhang S, Zhou Y, *et al.* Recent advances in platinum group metal based alloys for alkaline hydrogen oxidation reaction [J]. *ChemNanoMat*, 2024, 10(1): e202300395.
- [18] Sun X, Sun Y. Synthesis of metallic high-entropy alloy nanoparticles [J]. *Chemical Society Reviews*, 2024, 53(9): 4400–4433.
- [19] Ma X, Zhou Y, Zhang S, *et al.* 3D-5D orbital hybridization in nano-flower-like high-entropy alloy for highly efficient overall water splitting at high current density [J]. *Small*, 2025, 21(7): 2411394.
- [20] Ma X, Zhang S, Zhou Y, *et al.* PtIrFeCoNiMo high-entropy alloy nanodendrites for boosting the alkaline hydrogen oxidation performance [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(15): 8862–8868.
- [21] Xue F, Wang F, Liao M, *et al.* Influences of Ru and ZrO_2 interaction on the hydroesterification of styrene [J]. *RSC Advances*, 2024, 14(17): 11914–11920.
- [22] Gumaste M R, Kulkarni G A. Analysis of XPS spectra and SQUID measurements of Fe doped ZnTe nano-rods synthesized by sol-gel technique for the spintronic applications [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2023, 41: 103218.
- [23] Weiss T, Warneke J, Zielasek V, *et al.* XPS study of thermal and electron-induced decomposition of Ni and Co acetylacetonate thin films for metal deposition [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2016, 34(4): 041515.
- [24] Naumkin A, Ivanova T, Sidorov A, *et al.* XPS study of structural transformations in some Ni complexes [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2018, 50(11): 1154–1157.
- [25] Zhuk N A, Makeev B A, Koroleva A V, *et al.* XPS and NEXAFS characterization of Mg/Zn and Mn codoped bismuth tantalate pyrochlores [J]. *Inorganics*, 2024, 12(3): 74.
- [26] Ravi G, Thyagarajan K. $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{CeO}_2$ nanocomposites: Structural, FT-IR, XPS, BET, and magnetic properties [J]. *Applied Physics A*, 2024, 130(10): 726. ■