

高熵氢氧化物担载钉单原子催化剂 构筑及其析氢性能

孟裕朝*, 袁希伟, 江淑彤, 和丽晗, 刘向楠, 杨苡喆, 杜肖
(昆明理工大学云南省磷化工节能与新材料重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要:通过一种简便的一步室温腐蚀工程策略,先在镍泡沫基底上制备出了高熵 FeCoNiCrMn 纳米片,再通过水热法在 FeCoNiCrMn 纳米片成功担载钉单原子。在碱性电解液中,FeCoNiMnCrRu 催化剂实现了极佳的析氢反应(HER)活性与长期稳定性。在 10 mA/cm² 电流密度下,其过电位低至 0.047 V,显著优于对比催化剂,并在 100 mA/cm² 的电流密度下无衰减运行 300 h。相比之下,Tafel 斜率更小、电荷转移效率更快以及拥有最大的电化学比表面积。将 FeCoNiMnCrRu 催化剂作为阴极构建全解水电解槽装置,在 1 A/cm² 的驱动下电压仅为 1.91 V。

关键词:析氢反应;电解水;单原子催化剂;高熵材料;全解水电解槽

中图分类号:O631.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0315-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.051

Construction of Ru single-atom catalysts loaded by high-entropy hydroxide and its hydrogen evolution performance

MENG Yu-chao*, YUAN Xi-wei, JIANG Shu-tong, HE Li-han,
LIU Xiang-nan, YANG Yi-yin, DU Xiao

(Yunnan Provincial Key Laboratory of Energy Saving and New Materials in Phosphorus Chemical Industry,
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: By employing a simple one-step room-temperature corrosion engineering strategy, high-entropy FeCoNiCrMn nanosheets were first prepared on a nickel foam substrate, and then ruthenium single atoms were successfully loaded onto the FeCoNiCrMn nanosheets through the hydrothermal method. In an alkaline electrolyte, the FeCoNiMnCrRu catalyst demonstrated excellent hydrogen evolution reaction (HER) activity and long-term stability. At a current density of 10 mA·cm⁻², its overpotential was as low as 0.047 V, significantly superior to the control catalyst, and it operated without attenuation for 300 hours at a current density of 100 mA·cm⁻². Compared with others, it had a smaller Tafel slope, faster charge transfer efficiency, and the largest electrochemical specific surface area. The FeCoNiMnCrRu catalyst was used as the cathode to construct an overall water-splitting electrolyzer, and the driving voltage at 1 A·cm⁻² was only 1.91 V.

Key words: hydrogen evolution reaction; electrolysis of water; single-atom catalyst; high-entropy materials; overall water-splitting electrolyzer

在全球气候变暖持续加剧、传统化石能源加速枯竭的双重压力下,推动能源结构向清洁、低碳方向转型已成为全球实现可持续发展的核心战略^[1]。氢能因其燃烧产物仅为水、具备极高的能量密度,并可在储能、交通运输、工业生产等多种场景中高效应用,被视为构建未来可持续能源体系的关键支柱^[2]。

电解水析氢反应(HER)是实现绿氢规模化制备的核心技术路径,其发展瓶颈主要集中在催化剂的高效性、稳定性与成本控制上^[3-4]。尽管贵金属基催化剂凭借原子级分散特性展现出一定的催化潜力,但其活性位点孤立导致电子结构调控能力受限,难以兼顾高催化活性与长期稳定性^[5-7]。同时,传统载体材料普遍存在结构稳定性不足、与活性中心电子耦合效应弱等问题,进一步制约了整体催化性

能的提升^[8-10]。

针对上述挑战,本研究创新性地提出一种高熵氢氧化物担载钉单原子催化剂的设计方案。高熵氢氧化物所具有的刚性骨架结构与强配位环境,可从原子尺度有效抑制钉原子的迁移与团聚,显著提高活性位点密度^[11-13]。其多主元协同效应不仅能够精准调控氢中间体的吸附与脱附行为,从而提升本征催化活性^[14-16],还可增强催化剂的整体结构稳定性,保障其在长时间电解过程中的耐久表现^[17-19]。

基于该设计思路,研究采用一步室温腐蚀法在镍泡沫基底上成功构建高熵 FeCoNiCrMn 纳米片载体,并通过水热法实现钉单原子的精准锚定,最终获得 FeCoNiMnCrRu 催化剂。系统表征表明,该催化剂具有规整的纳米片形貌与均匀的单原子分散特

收稿日期:2026-04-03;修回日期:2026-07-07

作者简介:孟裕朝(2000-),男,硕士生,研究方向为电解水,通讯联系人,774474552@qq.com。

征。电化学测试结果显示,在 10 mA/cm^2 电流密度下,其过电位低至 0.047 V ,性能接近商业铂碳催化剂。此外,该催化剂还表现出更小的 Tafel 斜率、更快的电荷转移速率以及更大的电化学比表面积,体现出优异的质子吸附/解离动力学性能与丰富的活性位点暴露。

本研究通过融合高熵材料的结构优势与单原子催化的高利用率特性^[20],为开发高效、稳定且低成本的析氢催化剂提供了新的思路,有望加速绿氢制备技术的工业化进程。

1 材料与试剂

1.1 材料

三氯化钨(95%),购自上海麦克林生化科技有限公司。无水三氯化铁(分析纯),购自阿拉丁生化科技股份有限公司。六水氯化钴(分析纯,97%),购自上海麦克林生化科技有限公司。六水氯化镍(分析纯,98%),购自阿拉丁生化科技股份有限公司。无水氯化锰(分析纯),购自阿拉丁生化科技股份有限公司。六水氯化铬(分析纯,98%),购自阿拉丁生化科技股份有限公司。氯化钠(分析纯,99.5%),购自上海麦克林生化科技有限公司。盐酸(分析纯),购自国药集团化学试剂有限公司。丙酮(分析纯),购自国药集团化学试剂有限公司。无水乙醇(分析纯),购自国药集团化学试剂有限公司。氢氧化钾(分析纯,95%),购自上海麦克林生化科技有限公司。Pt/C 催化剂(20%),购自苏州晟尔诺科技有限公司。泡沫镍,购自昆山隆圣宝电子材料有限公司。

1.2 仪器

MS104S 电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;DHG-9249A 鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;CHI760E 电化学工作站,上海辰华仪器有限公司;TA-21 钛片电极夹,芜湖孚兰克新材料有限公司;218 Hg/HgO 参比电极,上海仪电科学仪器股份有限公司;SB-5200D 超声波清洗器,宁波新芝生物科技股份有限公司;200 mL 水热反应釜,西安仪创仪器厂;日立(Regulus 8230)型扫描电子显微镜;Thermo Fisher Titan Cubed Themis G2 300;BRUKER 的 D8-ray diffractometer X 射线衍射仪。

2 实验方法

2.1 催化剂的制备

FeCoNiMnCrRu 由 2 步组成,第 1 步是先在泡沫

镍上室温腐蚀生长杂原子高熵纳米片基底,第 2 步再将含有 Ru 单原子的化学药品前驱体通过水热法锚定在杂原子高熵纳米片基底之上。

2.1.1 泡沫镍的预处理

将购置的泡沫镍(NF)裁剪为 $1\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$ 大小,分别在丙酮、 3 mol/L 盐酸、超纯水中超声波辅助处理 15 min ,除去 NF 表面氧化层。

2.1.2 FeCoNiMnCr 前驱体制备

依次将 0.5 mmol FeCl_3 、 $0.5\text{ mmol CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.5\text{ mmol NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 0.5 mmol MnCl_2 、 $0.5\text{ mmol CrCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 0.5 mmol NaCl 溶于 100 mL 去离子水中,室温超声搅拌 10 min ,确保完全溶解。然后将 6 片泡沫镍($1\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$)平放在烧杯底部,在室温下静置 12 h ,使 NF 表面完全反应。反应完成后,用乙醇、超纯水清洗,烘干待用。

2.1.3 FeCoNiMnCrRu 的制备

将 0.12 mmol 三氯化钨溶于 100 mL 超纯水中,超声使其完全溶解后,取 4 片 FeCoNiMnCr 前驱体泡沫镍置于反应釜底部, 120°C 下水热 12 h ,反应完成后取出泡沫镍利用乙醇超纯水清洗,烘干后得到最终样品 FeCoNiMnCrRu。

2.2 催化剂表征

采用日立(Regulus 8230)扫描电子显微镜与 Thermo Fisher Titan Cubed Themis G2 300 kV 透射电子显微镜观察催化剂形貌结构,将催化剂粉末超声分散于无水乙醇中,吸取少量分散液滴加至铜网微栅表面测试;X 射线粉末衍射使用 BRUKER 的 D8-ray diffractometer 衍射仪,以 Cu 靶作为 X 射线源。通过将待测样品置于单晶硅片上,Cu 靶产生的 X 射线照射样品表面,探测器记录衍射角度和强度,生成 X 射线衍射(XRD)谱图。

2.3 电化学测试

电化学性能测试均采用上海辰华电化学工作站,构建标准三电极体系。对比电极为 Pt/C 与 Ir/C (20%)通过超声分散制备成含 0.05% Nafion 的乙醇浆料,精确滴涂于预处理泡沫镍表面,干燥后获得对比电极。所有工作电极电位均依据公式(1)转换为相对于可逆氢电极(RHE)的值。采用线性扫描伏安法(LSV)、电化学阻抗谱(EIS)、双电层电容法(C_{dl})、计时电流法($I-t$)对催化剂的电化学性能进行一系列评估。

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{SCE}} + 0.241 + 0.059\text{ 16pH} \quad (1)$$

3 结果与分析

3.1 催化剂表征

首先通过扫描电子显微镜 (SEM) 对 FeCoNiMnCrRu 样品的形貌特征进行了表征。从图 1(a) 的低倍 SEM 图像中可以清晰观察到,在泡沫镍三维骨架结构表面均匀生长着一层茂密的纳米片结构,整体形貌规整且覆盖完全。进一步的高分辨率 SEM 图像如图 1(b) 显示,所制备的 FeCoNiMnCrRu 纳米片呈现超薄特性,并以垂直取向紧密排列于泡沫镍表面,同时纳米片表面存在大量介孔结构^[21]。这种独特的形貌结构不仅能够暴露出更多的活性位点,更有利于电解反应过程中电解质的快速传输与产物气体的高效释放,从而显著提升催化反应动力学效率^[22-23]。

为深入解析高熵纳米片的具体结构,本研究结合透射电子显微镜 (TEM) 与 X 射线衍射 (XRD) 技术开展了系统表征。从图 1(c) 的 TEM 图像可见, FeCoNiMnCrRu 样品同时存在结晶区与非晶区,呈现出晶-非晶共存的结构特征^[24]。XRD 分析结果[图 1(d)]显示, FeCoNiMnCrRu 与 FeCoNiMnCr 的衍射峰位置及强度高度吻合,未检测到金属 Ru 或 RuO₂ 的特征衍射峰,也未观察到纳米颗粒或晶界富集现象,表明 Ru 以原子级分散形式固溶于高熵氢氧化物基底中,未形成独立物相^[25-26]。其中, 44.5° 处的衍射峰归属于泡沫镍 (NF) 基底的镍信号,其余金属氢氧化物衍射峰均与 Ni(OH)₂ 标准卡

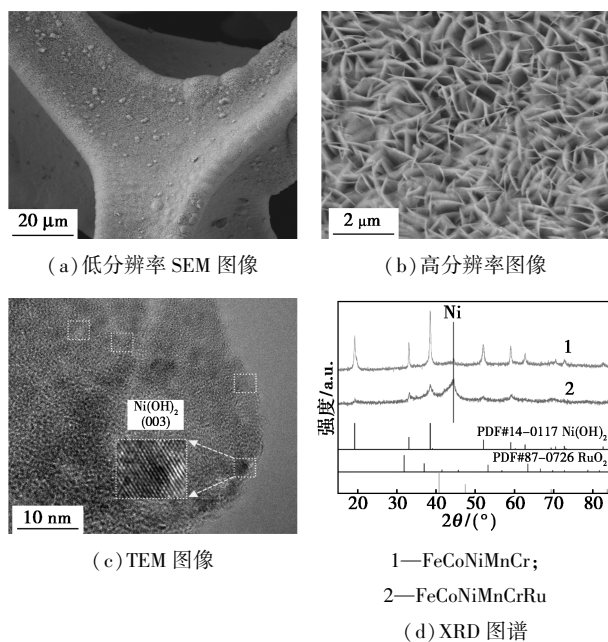


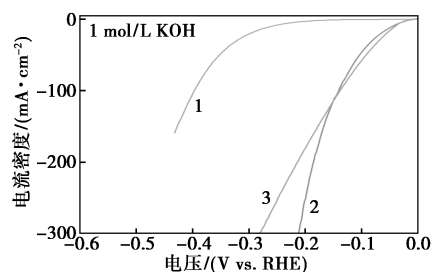
图 1 催化剂 FeCoNiMnCrRu 的形貌表征

片 (PDF#14—0117) 的特征峰完美匹配。

上述表征结果充分证实了高熵氢氧化物基底的成功制备以及钌单原子物种在基底中的原子级分散引入。

3.2 电化学性能

在 1 mol/L KOH 碱性电解液中,采用标准三电极体系系统评估了 FeCoNiMnCrRu 催化剂的析氢反应 (HER) 性能,并以 FeCoNiMnCr 载体及负载于泡沫镍 (NF) 基底的 20% Pt/C 作为对照样,在相同测试条件下开展平行实验。图 2 为 3 种样品的 HER 电化学性能曲线对比结果:在 10 mA/cm² 电流密度下, FeCoNiMnCrRu 的过电位仅为 47 mV,显著优于 FeCoNiMnCr 载体 (261 mV),且性能接近商业 20% Pt/C 催化剂 (42 mV)。相较于 FeCoNiMnCr 载体, FeCoNiMnCrRu 的 HER 活性大幅提升,直接证实了钌单原子在高熵氢氧化物基底上的成功负载与以及钌单原子优异的催化活性。进一步对比大电流区间性能发现, FeCoNiMnCrRu 展现出优于 20% Pt/C 的催化活性,这一结果表明,钌单原子与高熵氢氧化物基底之间存在的强协同作用,在大电流的反应条件下同样具备极快的析氢反应动力学,为其在工业化高电流密度电解水场景中的应用奠定了基础。



1—FeCoNiMnCr; 2—FeCoNiMnCrRu; 3—20% Pt/C

图 2 FeCoNiMnCrRu 及其对比样的 LSV 极化曲线

由 LSV 曲线得到的各催化剂塔菲尔斜率如图 3(a) 所示, FeCoNiMnCrRu 催化剂的 Tafel 斜率为 60 mV/dec,介于 20% Pt/C (35 mV/dec) 与 FeCoNiMnCr (122 mV/dec)。Tafel 分析表明, FeCoNiMnCrRu 具有较低的塔菲尔斜率,反映其优异的 HER 动力学特性。

为深入探究电极界面的电荷传输动力学,本研究进一步开展了电化学阻抗谱 (EIS) 测试。图 3(b) 的 EIS 阻抗曲线显示, FeCoNiMnCrRu 的电荷转移电阻 (R_{ct}) 远低于 FeCoNiMnCr 载体,且与商业 20% Pt/C 催化剂处于同一数量级。这一结果表明,钌单原子的引入显著加速了电极/电解液界面的电

荷转移过程,有效降低了 HER 反应的动力学能垒^[27]。相较于 FeCoNiMnCr 载体,FeCoNiMnCrRu 的 R_{ct} 大幅减小,证实了钉单原子与高熵氢氧化物基底之间的强电子相互作用,可优化活性位点的电子结构,进而显著提升法拉第反应动力学效率。

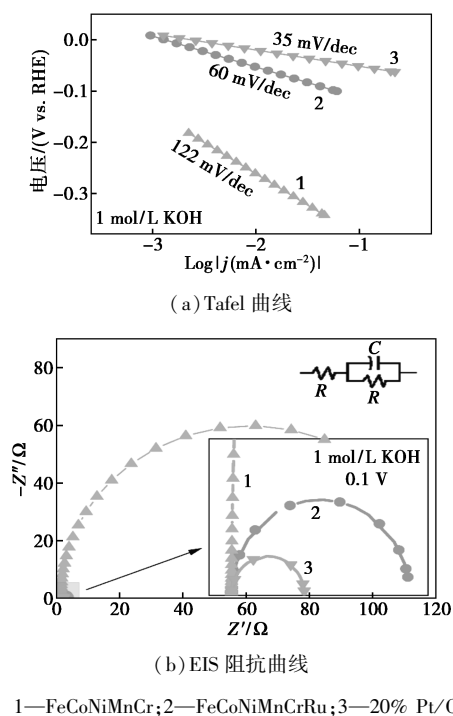


图 3 FeCoNiMnCrRu 及其对比样的 Tafel 曲线和 EIS 阻抗曲线

为评估催化剂在实际工况下的耐久性,本研究采用计时电流法 ($I-t$) 对 FeCoNiMnCrRu 进行了长周期稳定性测试。如图 4 所示,在 $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 的大电流密度下,FeCoNiMnCrRu 连续析氢 300 h 后,电流密度未出现衰减。这一结果充分证实,高熵氢氧化物纳米片载体的刚性骨架结构与强配位作用,可有效抑制钉单原子的团聚与流失^[28],确保催化剂在长期电解过程中维持结构完整性与活性位点的暴露状态^[29]。相较于传统单原子催化剂易在大电流下失活的缺陷,FeCoNiMnCrRu 展现出优异的结构稳

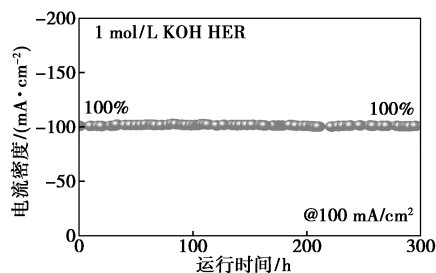
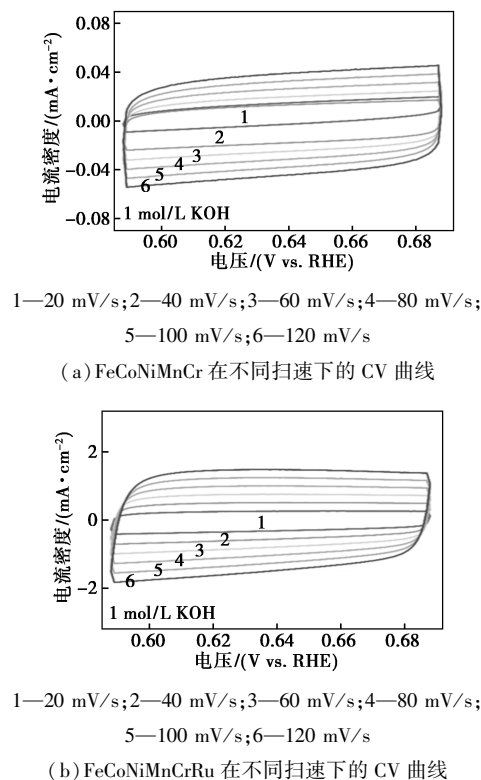


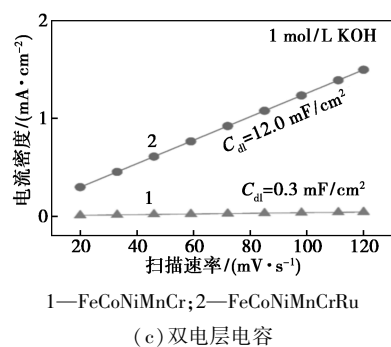
图 4 FeCoNiMnCrRu 的计时电流法稳定性测试曲线

定性与催化耐久性。

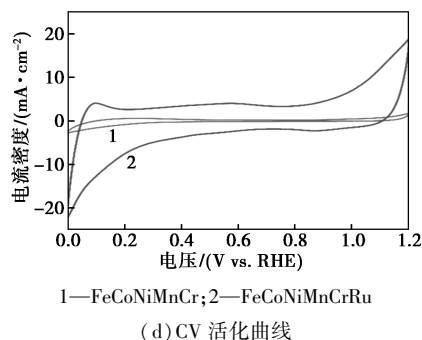
为精准评估催化剂的本征活性,本研究通过双电层电容 (C_{dl}) 法测定了电化学活性表面积 (ECSA)。这一参数可直接反映材料表面暴露的活性位点数量,是揭示本征催化性能的关键指标^[30]。如图 5(a)、(b) 所示,在非法拉第电位窗口内,采集



1—20 mV/s; 2—40 mV/s; 3—60 mV/s; 4—80 mV/s; 5—100 mV/s; 6—120 mV/s
(a) FeCoNiMnCr 在不同扫速下的 CV 曲线
(b) FeCoNiMnCrRu 在不同扫速下的 CV 曲线



(c) 双电层电容



(d) CV 活化曲线

图 5 FeCoNiMnCrRu 及其对比样的本征活性

了 FeCoNiMnCrRu 及对照样品在 20~120 mV/s 扫描速率下的循环伏安(CV)曲线[图 5(d)]。通过对不同扫描速率下的电容电流进行线性拟合,得到各样品的双电层电容值[图 5(c)]。结果显示,FeCoNiMnCrRu 的 C_{dl} 高达 12.0 mF/cm²,是 FeCoNiMnCr 载体(0.3 mF/cm²)的 40 倍。这一显著差异表明,钌单原子的引入极大地增加了催化剂表面的活性位点密度。更多的活性位点可独立吸附氢中间体(H*),使单位时间内的反应循环数大幅提升^[31],从而加速整体析氢动力学过程,这与 FeCoNiMnCrRu 优异的 HER 催化性能高度契合。上述电化学表征结果充分验证了高熵氢氧化物负载钌单原子这一设计策略的可扩展性。

为验证 FeCoNiMnCrRu 催化剂在实际电解体系中的应用潜力,本研究进一步构建了以 FeCoNiMnCrRu 为阴极、IrO₂ 为阳极的全解水电解槽(FeCoNiMnCrRu || IrO₂),并在 1 mol/L KOH 电解液、60℃ 的模拟工业工况下开展性能测试。同时,采用商业 Pt/C 为阴极、IrO₂ 为阳极的电解槽(Pt/C || IrO₂)作为对照组,所有电极均负载于泡沫镍基底。全解水极化曲线(图 6)显示,在 1 A/cm² 的大电流密度下,FeCoNiMnCrRu || IrO₂ 电解槽的驱动电压仅为 1.91 V,显著低于对照组 Pt/C || IrO₂。这一结果表明,FeCoNiMnCrRu 作为全解水电解槽阴极在高电流工况下仍能保持优异的 HER 活性,与 IrO₂ 阳极形成良好的动力学匹配,有效降低了全解水过程的整体能耗。相较于依赖贵金属 Pt 的传统电解槽,FeCoNiMnCrRu || IrO₂ 体系在保持高性能的同时,展现出更优的成本效益与工业应用潜力,为规模化绿氢制备提供了可行的技术路径。

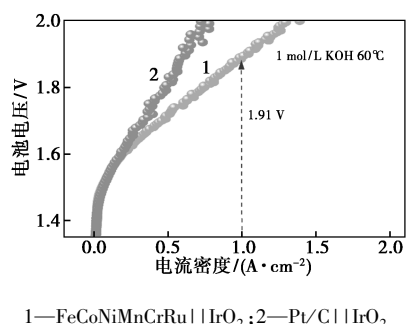


图 6 由 FeCoNiMnCrRu 催化剂作为阴极组装的全解水电解槽性能极化曲线

4 结论

本研究通过室温原位氯刻蚀法在泡沫镍基底上生长高熵氢氧化物,再经水热法成功负载钌单原子,

制备得到 FeCoNiMnCrRu 催化剂。该制备流程简单高效,泡沫镍的多孔网络结构为电子传输提供低阻抗通道,高熵氢氧化物纳米片则促进了 HER 反应中电解质扩散与气体释放。在碱性电解液中,FeCoNiMnCrRu 凭借原子级分散的 Ru 原子位点与高熵固溶结构,展现出优异的 HER 活性与稳定性。在 10 mA/cm² 电流密度下,过电位低至 0.047 V。优异的电化学性能证实高熵氢氧化物负载钌单原子析氢催化剂的成功构筑。将其作为阴极构建电解槽,在 1 A/cm² 电流密度下驱动电压仅 1.91 V 展现出良好的实际应用潜力。本研究为单原子-高熵氢氧化物结构的 HER 高性能电催化剂的制备提出了一种可借鉴的广泛思路。

参考文献

- [1] 熊波,王东,郝思莹,等.全球能源转型驱动下新能源高质量发展的机遇、挑战与展望[J].石油学报,2026,47(1):74-94.
- [2] 李致朋,叱干东东,肖仪卓,等.中国氢能产业关键技术与应用探究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(1):147-157.
- [3] Chang B, Liu X, Zuo S, *et al.* Dynamic construction of a durable epitaxial catalytic layer for industrial alkaline water splitting[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 7959.
- [4] Müller A K, Loos S, Bernäcker C I, *et al.* Nickel-molybdenum nanoparticles anchored on molybdenum oxide as high-performance electrocatalyst for hydrogen production in alkaline water electrolysis[J]. ACS Catalysis, 2026, 16(5): 4399-4409.
- [5] He P, Wang W, Cai M, *et al.* Polyoxometalates-derived lattice-confined atomically dispersed catalysts for water electrolysis[J]. Nano Research, 2026, 19(4): 94908188.
- [6] Lu X, Wu J, He X, *et al.* Ordered single active sites for cascade hydrogenation and hydroformylation reactions[J]. Nature Catalysis, 2025, 8(6): 536-547.
- [7] Du H G, Huang H H, He M Q, *et al.* Metal-support synchronous dynamics of an atomically dispersed ruthenium electrocatalyst for boosting hydrogen production[J]. ACS Catalysis, 2025, 16(3): 2596-2605.
- [8] Guo F, Gong M, Liu L, *et al.* Harnessing controlled dealloying-support coupling for ultrastable PtNi catalysts in PEMFC applications[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2026, 65(12): e4524344.
- [9] Kim J, Guo J, Shan N, *et al.* Deciphering catalyst-support interaction via doping for highly active and durable oxygen evolution catalysis[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147(19): 16340-16349.
- [10] Chen G, Shang Z, Zhang J, *et al.* Dual-function zinc modulation stabilizes Ru clusters on spinel oxide for efficient and durable acid wa-

- ter oxidation [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(3): e17073.
- [11] Guo H, Guo Z, Xue G, *et al.* Entropy-driven stabilization of noble metal single atoms; advancing ammonia synthesis and energy output in zinc-nitrate batteries [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(28): 2500224.
- [12] Li B, Yuan M, Liu Y, *et al.* Single-atom catalysts with microenvironment tuned by high entropy for efficient and stable alkaline hydrogen evolution reaction [J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(4): e05018.
- [13] Qian F, Cao D, Chen S, *et al.* High-entropy RuO₂ catalyst with dual-site oxide path for durable acidic oxygen evolution reaction [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 6894.
- [14] Cai J, Zhu H. Surface-engineered nanostructured high-entropy alloys for advanced electrocatalysis [J]. *Communications Materials*, 2025, 6(1): 118.
- [15] Wan Y, Wei W, Ding S, *et al.* A multi-site synergistic effect in high-entropy alloy for efficient hydrogen evolution [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(5): 2414554.
- [16] Tong Y, Li X, Wang X, *et al.* Entropy-mediated gradient oxygenophilic architecture on high-entropy alloy for dynamic spillover and bifunctional hydrogen electrocatalysis [J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(9): e17450.
- [17] Li Z, Zhong H, Liu X, *et al.* Dynamic dissolution-deposition equilibrium enables unprecedented HER stability in acidic PEMWE [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(45): e10703.
- [18] Liu X C, Wu G, Han X, *et al.* High-entropy metal interstitials activate TiO₂ for robust catalytic oxidation [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(7): 2416749.
- [19] Kwon N H, Noh W J, Hwang S J, *et al.* Design rule for highly stable efficient high-entropy metal oxide electrocatalysts; Complementary roles of 3D transition metal ions [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(45): e10594.
- [20] Zhou Y, Zhang L, Wang M, *et al.* Maximized atom utilization in a high-entropy metallene via single atom alloying for boosted nitrate electroreduction to ammonia [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 7915.
- [21] Liu R, Yang Q, Pang Y, *et al.* In situ preparation of ultra-thin and high-entropy FeCoNiMnMo nanosheet arrays to achieve efficient water/seawater oxidation at large current density [J]. *Small*, 2025, 21(24): 2500518.
- [22] Wang Y, Miao L, Shi R, *et al.* Unraveling the synergistic effect of hollow sea urchin-like Ag-Co₃O₄ heterostructures in electrochemical dehydrogenation reactions; Interface-enhanced electron transfer and desorption process [J]. *ACS Catalysis*, 2025, 15(10): 7966–7978.
- [23] Yang X, Shen H, Xiao X, *et al.* Regulating interfacial H₂O activity and H₂ bubbles by core/shell nanoarrays for 800 h stable alkaline seawater electrolysis [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(19): 2416658.
- [24] Tian P, Zong W, Xiong J, *et al.* Dynamic reconstruction of crystal/amorphous hetero-phosphate janus interfaces for highly stable seawater splitting [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(42): 2504862.
- [25] Guo B, Li W, Chen H, *et al.* Single-atom Ru anchored on Co₃S₄ nanowires enabling ampere-level water splitting for multi-scenarios green energy-to-hydrogen systems [J]. *Nano Energy*, 2025, 138: 110881.
- [26] Sun Y, Wu Y, Wang H, *et al.* Single-atom Ru on CeO₂ nanorods for efficient N₂O decomposition; Mechanistic insights and multipollutant control [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(46): 24777–24785.
- [27] Meng L, Dai T, Li J, *et al.* Interfacial water regulation on Ru single atoms doped Co₃O₄ toward efficient electrochemical hydrogenation of quinoxaline [J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 1895.
- [28] Wang Z, Chen S, Chen R, *et al.* Charge competition enhancing Ru-based high entropy oxide nanosheet for efficient and stable oxygen evolution [J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2025, 383: 126034.
- [29] Chang R, Pang Y, Yang Q, *et al.* High entropy hydroxide with a hollow nanocage structure promotes efficient and stable water/seawater electro-oxidation [J]. *Chemical Science*, 2025, 16(26): 11961–11969.
- [30] Wang J, Gao X, Li B, *et al.* Synergistically modulating the active-site density and charge-transfer in covalent organic frameworks for boosting electrocatalytic water splitting [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(46): 39759–39765.
- [31] Wang Z, Zhang Y, Yang G, *et al.* Ni/Zn-ZIF-derived bamboo-like N-doped carbon nanotubes encapsulating Ni-based chalcogenides as efficient bifunctional electrocatalysts for hydrogen production and photovoltaics [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(46): 40041–40054. ■