

微波水热法制备 NiCoFe 基阳极催化剂及性能研究

陈 哲*, 孟繁辉, 贾鹏飞, 常 兴, 张金亮, 孙 鹏

(中国石化天然气股份有限公司华北石化分公司, 河北 沧州 061000)

摘要:针对传统共沉淀法和常规水热法制备阳极催化剂存在成核不均、制备周期长等共性问题,以及碱性电解水阳极析氧反应(OER)动力学迟缓、贵金属基催化剂成本高昂的行业痛点,采用微波水热法高效制备了 NiCoFe 基三元层状氢氧化物(NiCoFe-LTH)催化剂,研究金属比例、微波功率及基底等对结构与性能的影响。通过多种表征与电化学测试,建立合成参数-结构-性能构效关系。结果表明,当 Ni:Co:Fe=1:1:1、功率 800 W、泡沫镍为基底时性能最优;在电流密度 10 mA/cm² 下过电位为 227 mV, Tafel 斜率为 24.3 mV/dec;三电极体系在 1.55 V 条件下电流密度达 700 mA/cm²,该电流密度下全解水仅需 1.73 V。微波水热使催化剂快速均匀生长,形成三维花状结构,提升活性位点与界面结合,加速电荷传输。

关键词: NiCoFe 基三元层状氢氧化物;微波水热法;析氧反应;碱性电解水

中图分类号: TQ426.6; O643.36

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0184-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.031

Preparation and performance study of NiCoFe-based anode catalysts by microwave hydrothermal method

CHEN Zhe*, MENG Fan-hui, JIA Peng-fei, CHANG Xing, ZHANG Jin-liang, SUN Peng

(PetroChina North China Petrochemical Company, Cangzhou 061000, China)

Abstract: To address the common issues of uneven nucleation and long preparation cycles in traditional coprecipitation and conventional hydrothermal methods for preparing anode catalysts, as well as the industry pain points of sluggish kinetics of the oxygen evolution reaction (OER) in alkaline electrolysis water and the high cost of noble metal-based catalysts, a microwave hydrothermal method was adopted to efficiently prepare NiCoFe-based ternary layered double hydroxide (NiCoFe-LTH) catalysts. The effects of metal ratios, microwave power, and substrates on the structure and performance were investigated. Through various characterizations and electrochemical tests, a structure performance relationship based on synthesis parameters was established. The results showed that the optimal performance was achieved when the metal ratio was Ni:Co:Fe = 1:1:1, the power was 800 W, and the substrate was nickel foam; at a current density of 10 mA/cm², the overpotential was 227 mV, and the Tafel slope was 24.3 mV/dec; in a three-electrode system, the current density reached 700 mA/cm² at 1.55 V, and only 1.73 V was required for overall water splitting at this current density. The microwave hydrothermal method enabled the rapid and uniform growth of the catalyst, forming a three-dimensional flower-like structure, enhancing the combination of active sites and interfaces, and accelerating charge transfer.

Key words: NiCoFe-based ternary layered double hydroxide; microwave hydrothermal method; oxygen evolution reaction; alkaline water electrolysis

在“双碳”目标驱动下,全球能源结构正加速向清洁化、低碳化转型,氢能作为高能量密度、零排放的理想能源载体,其规模化开发与利用成为破解能源与环境双重困境的关键^[1-3]。电解水制氢是绿氢生产的核心技术路径,其阴离子交换膜电解水(Anion Exchange Membrane Water Electrolysis, AEMWE)技术因适配非贵金属催化剂、兼容高电流密度运行和动态响应性能优异,成为碱性电解水技术升级的重要方向^[4-5]。然而, AEMWE 体系中阳极析氧反应(OER)涉及四电子耦合质子转移的复杂历程,反应

动力学缓慢、活化过电位高,成为制约电解水制氢效率提升的核心瓶颈,而催化剂体系的优化与创新是突破该瓶颈的关键^[6-7]。

目前,商用 OER 催化剂主要为 IrO₂、RuO₂ 等贵金属基材料^[8-10],虽具有优异的催化活性,但地壳储量稀缺、价格高昂,且在强氧化电解环境中易发生溶解、团聚导致活性衰减,严重限制了碱性电解水技术的规模化应用。因此,开发制备工艺简单、低成本、高活性和高稳定性的非贵金属 OER 催化剂成为研究热点。过渡金属二元层状氢氧化物(LDH)因可

收稿日期:2026-04-07;修回日期:2026-06-13

基金项目:中国石化青年科技专项(2024DQ03194)

作者简介:陈哲(1993-),男,本科,工程师,研究方向为化工和新能源工艺技术研究,通讯联系人,271850436@qq.com。

调的金属组分及优异的碱性 OER 催化性能备受关注^[11-14]。在过渡金属中, Ni、Co、Fe 等具有电子协同效应, 可有效优化对 OER 中间体的吸附能、降低反应能垒, 展现出巨大潜力^[15-18]。

催化剂的制备工艺直接决定生产效率、微观结构、活性位点暴露程度及界面传输特性, 进而影响催化性能。传统制备方法如共沉淀法、水热法存在反应时间长、加热不均匀、催化剂易团聚等问题^[19]。微波水热法融合了微波加热的快速体加热特性与水热合成的晶化优势, 具有反应速率快、加热均匀、产物形貌可控等优点, 可实现催化剂的快速成核与定向生长, 构筑出高比表面积、高活性的纳米结构^[20]。

本文以 NiCoFe 基三元层状氢氧化物 (NiCoFe-LTH) 催化剂为研究对象, 采用微波水热法制备碱性电解水阳极催化剂, 系统优化金属组分比例、微波功率、负载基底等关键参数, 结合多种表征手段揭示催化剂微观结构与催化性能的内在关联, 筛选出最优制备工艺, 并验证其在工业级高电流密度下的催化性能, 为低成本高效碱性电解水阳极催化剂的开发提供实验与理论支撑。

1 实验部分

1.1 材料

实验试剂包括六水合硝酸镍 [Ni(NO₃)₂·6H₂O, 99%]、六水合硝酸钴 [Co(NO₃)₂·6H₂O, 99%]、九水合硝酸铁 [Fe(NO₃)₃·9H₂O, 98%]、尿素 (H₂NCONH₂, 99.5%)、异丙醇 (IPA, 99.9%)、无水乙醇 (99.7%)、Nafion 溶液 (质量分数 5%)、泡沫镍 (NF, 厚度 1 mm, 孔径 0.2~0.5 mm)、碳纸 (CP, 10 cm×10 cm) 作为催化剂负载基底。

1.2 仪器表征参数

采用扫描电子显微镜 (SEM, Apreo S Lo Vac, FEI 公司) 观察催化剂的微观形貌与结构特征; 采用 X 射线衍射 (XRD, Smart Lab, Rigaku, Cu K_α 辐射, 扫描范围 10~80°, 扫描速率 5°/min) 分析催化剂的晶相组成与结晶度; 采用原位拉曼光谱 (LabRAM HR Evolution, 法国 Horiba 公司) 研究催化剂在 OER 反应过程中的动态结构演化。

1.3 实验方法

1.3.1 基底预处理

将泡沫镍裁剪为 3 cm×3 cm 的薄片, 依次用稀盐酸、去离子水和无水乙醇超声清洗各 5 min, 去除表面氧化层与杂质, 真空干燥箱 60℃ 烘干备用; 碳纸裁剪为相同尺寸, 在 60℃ 真空烘干备用。

1.3.2 微波水热法制备 NiCoFe-LTH 催化剂

采用微波水热法制备 NiCoFe-LTH 催化剂, 具体步骤如下: 按不同摩尔比 (1:1:1、2:1:1、1:2:1) 称取 Ni(NO₃)₂·6H₂O、Co(NO₃)₂·6H₂O、Fe(NO₃)₃·9H₂O, 溶于 40 mL 去离子水中, 加入尿素 (尿素与金属离子总物质的量之比为 3:1), 磁力搅拌 30 min 形成均匀的前驱体溶液, 将前驱体溶液转移至 100 mL 聚四氟乙烯内衬的微波反应釜中, 垂直放入预处理后的负载基底, 密封后置于微波合成仪中, 设定不同微波功率 (600、800、1 000 W)。反应结束后自然冷却至室温, 取出催化剂, 用去离子水和无水乙醇反复超声清洗各 3 次, 去除表面松散吸附的产物, 在 60℃ 真空干燥 12 h, 得到不同比例泡沫镍或碳纸负载的 NiCoFe-LTH 催化剂。

1.4 电化学测试方法

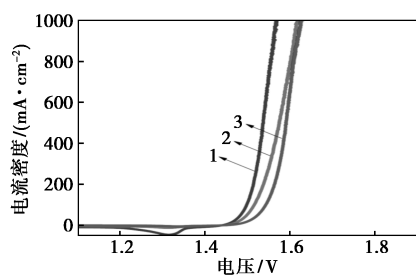
电化学测试均在室温下进行, 循环伏安 (CV) 测试在 0~1.8 V 电位范围内以 50 mV/s 扫描速率连续扫描 20 圈至曲线稳定以完成电极活化, 线性扫描伏安 (LSV) 测试在 0~2.0 V 范围内以 100 mV/s 进行。Tafel 斜率分析基于 LSV 结果拟合低过电位线性段得到斜率以揭示反应动力学特性。全解水性能测试则采用两电极体系, 以 NiCoFe-LTH/NF 为阳极、Pt/C 为阴极, 在 1 mol/L KOH 电解液中以 100 mV/s 扫描速率在 0~2.0 V 电位范围内测试, 以此评价其全解水催化性能。

2 结果与分析

2.1 金属组分比例对 NiCoFe-LTH 催化性能的影响

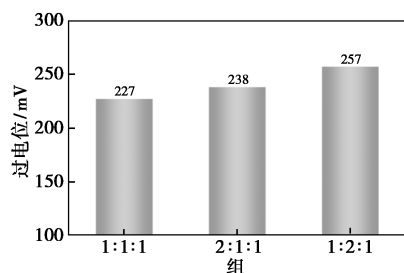
金属组分比例直接影响 LTH 的电子结构、活性位点数量及金属间的协同效应, 进而决定 OER 催化性能。图 1 为不同 Ni:Co:Fe 原子比 (1:1:1、2:1:1、1:2:1) 的 NiCoFe-LTH/NF 催化剂的电化学性能对比。由 [图 1(a)] 的 LSV 曲线可知, 相同电位下, 1:1:1 比例催化剂的电流密度显著高于 2:1:1 和 1:2:1 比例, 表明其具有更优异的 OER 本征活性。[图 1(b)] 的过电位结果显示, 在 10 mA/cm² 下, 1:1:1、2:1:1、1:2:1 比例催化剂的过电位分别为 227、238 和 257 mV, 1:1:1 比例较 2:1:1 降低 11 mV, 较 1:2:1 降低 30 mV, 催化活性优势显著。Tafel 斜率是反映反应动力学的关键参数, 斜率越小, 反应动力学越快^[21]。由 [图 1(c)] 可知, 3 种比例催化剂的 Tafel 斜率分别为 24.3 mV/dec (1:1:1)、32.5 mV/dec (2:1:1) 和 41.2 mV/dec (1:2:1), 1:1:1 比

例的最小 Tafel 斜率表明其 OER 反应速率最快,电子转移动力学最优。电化学阻抗谱(EIS)测试结果[图1(d)]显示,1:1:1比例催化剂的 Nyquist 曲线圆弧直径最小,对应 R_{ct} 最低,说明其电极/电解液界面的电荷传输阻力最小,电荷转移效率最高^[22]。上述结果表明,Ni:Co:Fe = 1:1:1为最优金属组分比例,

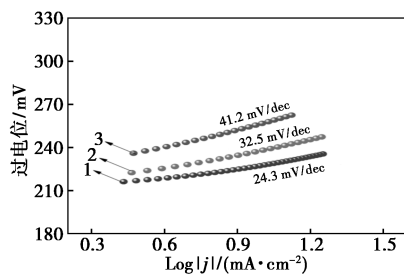


1—Ni、Co、Fe 离子比例 1:1:1; 2—Ni、Co、Fe 离子比例 2:1:1;
3—Ni、Co、Fe 离子比例 1:2:1

(a) LSV 曲线

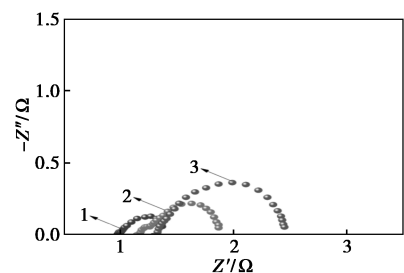


(b) 过电位



1—Ni、Co、Fe 离子比例 1:1:1; 2—Ni、Co、Fe 离子比例 2:1:1;
3—Ni、Co、Fe 离子比例 1:2:1

(c) Tafel 斜率



1—Ni、Co、Fe 离子比例 1:1:1; 2—Ni、Co、Fe 离子比例 2:1:1;
3—Ni、Co、Fe 离子比例 1:2:1

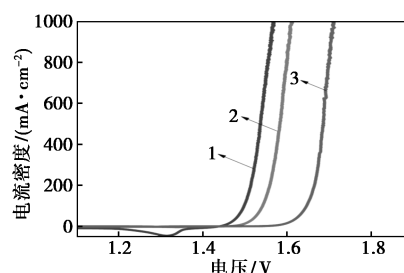
(d) EIS 测试

图1 不同 Ni、Co、Fe 离子比例的 LSV 曲线、过电位、Tafel 斜率和 EIS 测试对比图

该比例下 Ni、Co、Fe 3 种过渡金属的电子协同效应最显著,可有效调控 LTH 的 d 带中心,优化对 OER 中间体 (*OH、*O、*OOH) 的吸附能,降低反应能垒,同时增加活性位点数量,加速电荷与离子传输,从而提升催化性能。

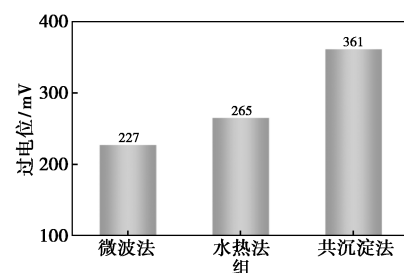
2.2 制备方法对 NiCoFe-LTH 催化性能的影响

为验证微波水热法的优势,对比了微波水热法、水热法、共沉淀法制备的 NiCoFe-1:1:1/NF 催化剂的 OER 性能,结果如图 2 所示。由[图 2(a)]可知,

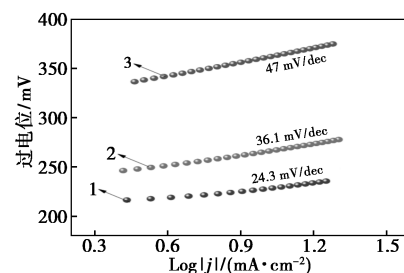


1—微波法; 2—水热法; 3—共沉淀法

(a) LSV 曲线

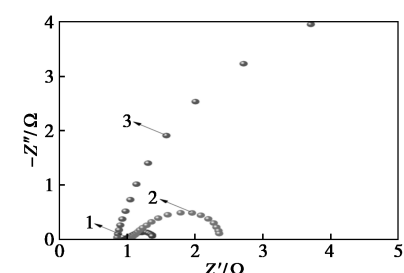


(b) 过电位



1—微波法; 2—水热法; 3—共沉淀法

(c) Tafel 斜率



1—微波法; 2—水热法; 3—共沉淀法

(d) EIS 测试

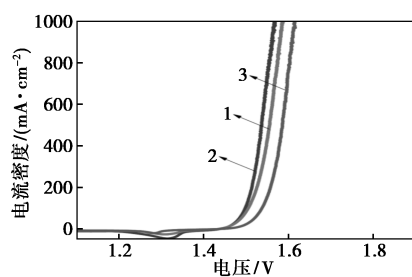
图2 不同制备方法的 LSV 曲线、过电位、Tafel 斜率和 EIS 测试对比图

微波水热法制备的催化剂在相同电位下电流密度远高于水热法和共沉淀法, $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 下过电位仅 227 mV , 较水热法 (265 mV) 降低 38 mV , 较共沉淀法 (361 mV) 降低 134 mV [图 2(b)], 催化活性提升显著。Tafel 斜率分析 [图 2(c)] 显示, 微波水热法、水热法、共沉淀法制备的催化剂 Tafel 斜率分别为 24.3 、 36.1 、 $47 \text{ mV}/\text{dec}$, 微波水热法的最小 Tafel 斜率表明其反应动力学最优。EIS 测试结果 [图 2(d)] 表明, 微波水热法制备的催化剂 R_{ct} 最低, 界面电荷传输效率最高。

不同制备方法的催化性能差异源于其产物微观结构的不同, 共沉淀法为液相均相反应, 产物易团聚, 比表面积小, 活性位点暴露不足, 且喷涂法制备的电极存在粘结剂导致的界面电阻; 水热法反应时间长, 加热不均匀, 产物晶粒易长大, 形貌可控性差; 而微波水热法的快速体加热效应可实现催化剂的快速、均匀成核, 避免晶粒团聚与长大, 构筑出高比表面积的纳米结构, 同时催化剂直接原位生长于基底表面, 无需粘结剂, 提升了与基底的界面结合强度, 降低了界面电阻, 从而显著提升催化性能。

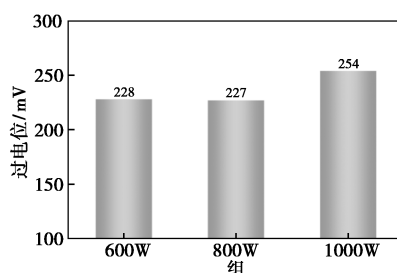
2.3 微波功率对 NiCoFe-LTH 催化性能的影响

微波功率决定了反应体系的加热速率与能量输入, 直接影响催化剂的成核速率、晶粒尺寸及形貌结构。图 3 为不同微波功率 (600 、 800 、 $1\,000 \text{ W}$) 制备的 NiCoFe- $1:1:1/\text{NF}$ 催化剂的电化学性能对比。由 [图 3(a)] 可知, 800 W 功率下催化剂的电流密度最高, 600 W 次之, $1\,000 \text{ W}$ 最低。[图 3(b)] 显示, $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 下, 600 、 800 、 $1\,000 \text{ W}$ 功率催化剂的过电位分别为 227 、 228 和 254 mV , 800 W 功率较 $1\,000 \text{ W}$ 显著降低 27 mV 。Tafel 斜率分析 [图 3(c)] 表明, 800 W 功率催化剂的 Tafel 斜率低至 $24.3 \text{ mV}/\text{dec}$, 远低于 600 W ($30.4 \text{ mV}/\text{dec}$) 和 $1\,000 \text{ W}$ ($44.1 \text{ mV}/\text{dec}$), 反应动力学最优。EIS 测试结果 [图 3(d)] 显示, 800 W 功率催化剂的 Nyquist 曲线圆弧直径最小, R_{ct} 最低, 界面电荷传输效率最高。 600 W 功率较低, 加热速率慢, 催化剂成核速率低, 晶粒生长不充分, 部分活性位点被包裹; 800 W 功率下, 加热速率与能量输入适中, 催化剂快速均匀成核, 晶粒尺寸适中, 形貌规整, 活性位点充分暴露; $1\,000 \text{ W}$ 功率过高, 加热速率过快, 反应体系局部温度过高, 导致催化剂晶粒团聚、结构劣化, 活性位点减少, 同时晶格缺陷增加, 电荷传输阻力增大, 催化性能下降。因此, 800 W 为微波水热法制备 NiCoFe-LTH 催化剂的最优功率。

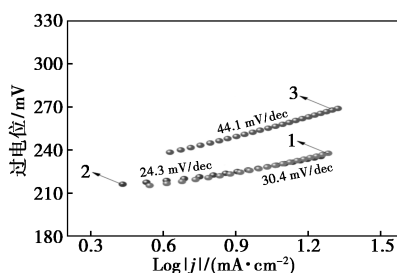


1— 600 W ; 2— 800 W ; 3— $1\,000 \text{ W}$

(a) LSV 曲线

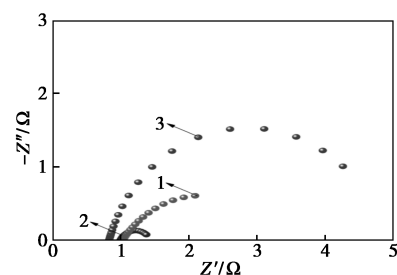


(b) 过电位



1— 600 W ; 2— 800 W ; 3— $1\,000 \text{ W}$

(c) Tafel 斜率



1— 600 W ; 2— 800 W ; 3— $1\,000 \text{ W}$

(d) EIS 测试

图 3 不同微波功率的 LSV 曲线、过电位、Tafel 斜率和 EIS 测试对比图

2.4 负载基底对 NiCoFe-LTH 催化性能的影响

负载基底的导电性、表面形貌及与催化剂的界面结合性直接影响电荷传输效率与催化剂的稳定性, 对比了泡沫镍 (NF) 与碳纸 (CP) 负载的 NiCoFe- $1:1:1/800 \text{ W}$ 催化剂的 OER 性能, 结果如图 4 所示。由 [图 4(a)] 可知, NF 基底负载的催化剂电流密度显著高于 CP 基底, $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 下过电位为 227 mV , 较 CP 基底 (312 mV) 降低 85 mV [图 4(b)], 催化活

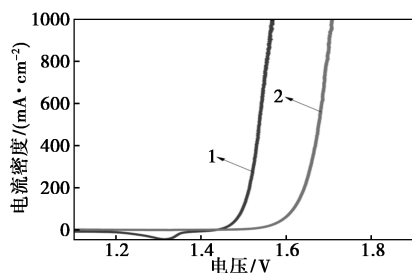
性优势显著。Tafel 斜率分析[图 4(c)]显示,NF 与 CP 基底的 Tafel 斜率分别为 24.3 mV/dec 和 64.2 mV/dec,NF 基底的更小 Tafel 斜率表明其能有效降低反应能垒,加快反应动力学。EIS 测试结果[图 4(d)]表明,NF 基底的 R_{ct} 远低于 CP 基底,界面电荷传输效率更高。NF 具有优异的导电性、三维多孔结构及良好的亲碱性,催化剂可原位生长于其骨架表面,界面结合强度高,电荷传输路径短,且多孔结构

有利于电解液渗透与气体产物脱附;而 CP 的导电性较差,且表面为二维平整结构,催化剂与基底的界面结合性弱,电荷传输阻力大,导致催化性能下降。因此,NF 为最优负载基底。

2.5 催化剂表征

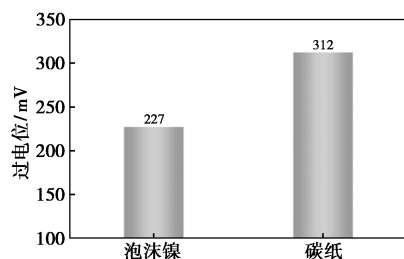
2.5.1 形貌表征

图 5 为不同 Ni:Co:Fe 原子比的 NiCoFe-LTH/NF 催化剂的 SEM 图像。由图可知,1:1:1 比例催化剂呈现出由二维纳米片相互交织构筑的三维花状分级结构,纳米片边缘清晰、厚度均匀,分布无团聚,形成了丰富的介孔通道;2:1:1 比例催化剂虽也为三维花状结构,但纳米片尺寸稍大,介孔数量略少;1:2:1 比例催化剂则转变为尺寸更小、团聚显著的纳米颗粒簇状形貌,比表面积与活性位点暴露程度大幅降低。高比表面积可充分暴露活性位点,为反应物与中间体的吸附、反应提供充足场所,同时二维纳米片的超薄特性可缩短电荷与离子的传输路径,加速界面电荷转移,从而提升催化活性与动力学性能。

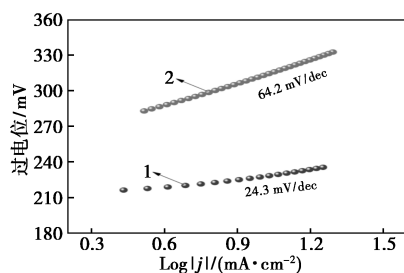


1—泡沫镍;2—碳纸

(a) LSV 曲线

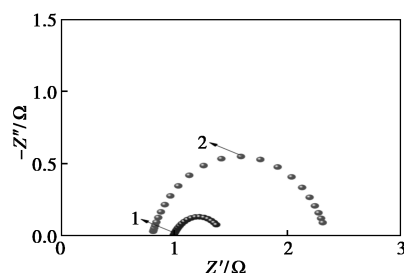


(b) 过电位



1—泡沫镍;2—碳纸

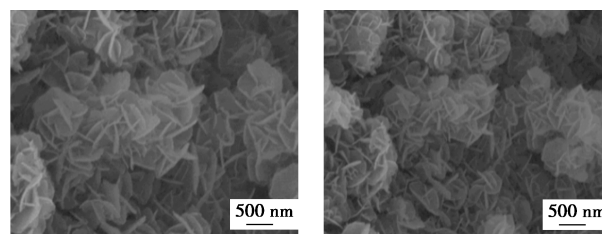
(c) Tafel 斜率



1—泡沫镍;2—碳纸

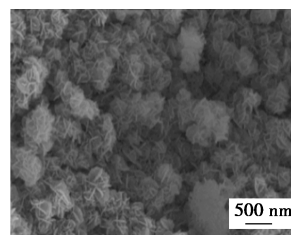
(d) EIS 测试

图4 负载基底的 LSV 曲线、过电位、Tafel 斜率和 EIS 测试对比图



(a) 1:1:1

(b) 2:1:1



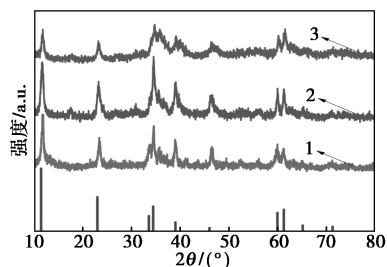
(c) 1:2:1

图5 不同 Ni、Co、Fe 离子比例的 SEM 对比图

2.5.2 结构表征

图 6 为不同 Ni:Co:Fe 原子比的 NiCoFe-LTH 催化剂的 XRD 谱图。由图可知,3 种比例的催化剂在 11.6°、23.3°、34.5°、60.1°处均出现特征衍射峰,分别对应(003)、(006)、(012)、(110)晶面,表明成功制备出 NiCoFe 三元层状氢氧化物。其中,1:1:1 比例催化剂的衍射峰最为尖锐、强度最高,结晶度最优。高结晶度的 NiCoFe-LTH 具有更规整的层状结构,可提供丰富的边缘活性位点与开放的离子传输通道,加快电解液渗透与电荷传输,同时增强晶体结构稳定性,缓解大电流下的形貌坍塌与活性衰减。

1:1:1 比例的最优结晶度与元素配比,使其在电子协同效应、活性位点数量及结构稳定性方面达到平衡,从而展现出较优的催化性能。



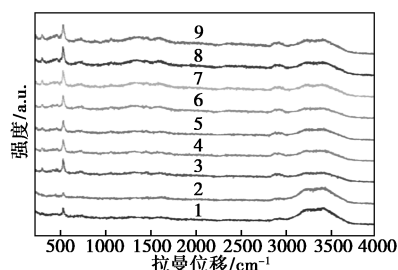
1—Ni、Co、Fe 离子比例 1:1:1; 2—Ni、Co、Fe 离子比例 2:1:1;

3—Ni、Co、Fe 离子比例 1:2:1

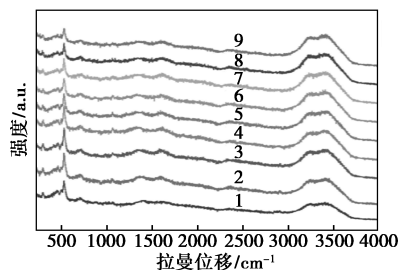
图 6 不同 Ni、Co、Fe 离子比例的 XRD 谱图

2.5.3 原位拉曼表征

为揭示催化剂在 OER 反应过程中的动态结构演化,对 NF 与 CP 基底负载的 NiCoFe-1:1:1/800 W 催化剂进行了原位拉曼光谱测试,结果如图 7 所示。2 种基底在开路电位 (OCP) 下均呈现出 NiCoFe-LTH 的特征峰及 3400 cm^{-1} 附近的 H_2O 伸缩振动峰。随着电位升高至 1.8 V , NF 基底上催化剂的特征峰强度随电位升高快速增强,峰形逐渐清晰锐利,在 $1.6\sim 1.8\text{ V}$ 高电位区间仍保持良好的峰形完整性与强度稳定性,表明催化剂在 OER 过程中发生持续的结构活化,活性位点不断暴露,且结构稳定



(a) 泡沫镍基底



(b) 碳纸基底

1—开路电压; 2— 0.4 V ; 3— 0.6 V ; 4— 0.8 V ; 5— 1.0 V ;

6— 1.2 V ; 7— 1.4 V ; 8— 1.6 V ; 9— 1.8 V

图 7 NiCoFe-1:1:1 催化剂不同负载基底的原位拉曼光谱图

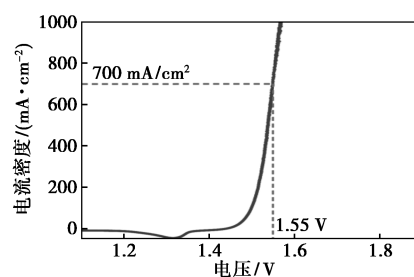
性优异。

CP 基底上催化剂的特征峰虽随电位升高有所增强,但信号强度显著低于 NF 基底,且在高电位下出现明显的基线波动与峰形畸变,表明其结构活化不充分,且在高氧化环境中易发生结构劣化。这一结果与电化学性能测试一致,证实了 NF 基底的高导电性、良好的界面结合性可有效促进催化剂的结构活化与电荷传输,同时提升催化剂在高电位下的结构稳定性。

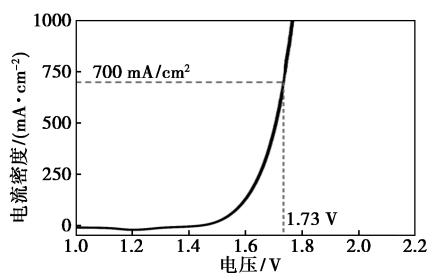
2.6 最优催化剂的全解水性能测试

结合上述研究,筛选出 $\text{Ni}:\text{Co}:\text{Fe} = 1:1:1$ 、微波功率 800 W 、NF 为基底的 NiCoFe-LTH 催化剂为最优体系,对其进行 OER 半反应与全解水性能测试,结果如图 8 所示。由 [图 8(a)] 可知,在三电极 OER 半反应中,该催化剂在 1.55 V 即可实现 $700\text{ mA}/\text{cm}^2$ 的高电流密度,且极化曲线走势陡峭,表明其在大电流密度下仍具有良好的电位响应特性,传质阻力小。

在两电极全解水体系中 [图 8(b)],该催化剂作为阳极,与 Pt/C 阴极匹配后,仅需 1.73 V 即可达到 $700\text{ mA}/\text{cm}^2$ 的高电流密度,且在宽电流密度范围内极化曲线无明显极化,表明其全解水催化性能优异,具有良好的工业应用潜力。这一结果归因于最优参数组合下催化剂的三维花状分级结构、高结晶度、丰富的活性位点及高效的界面电荷传输,实现了 OER 的高效进行。



(a) 在三电极体系 OER 半反应



(b) 两电极体系全解水

图 8 NiCoFe-1:1:1 催化剂在三电极体系 OER 半反应和两电极体系全解水测试对比图

3 结论

本文采用微波水热法实现了 NiCoFe-LTH 催化剂的高效制备,系统考察了金属比例、微波功率及负载基底对结构与性能的影响,构建了合成参数微观结构催化性能的构效关系。结果表明,各制备参数对催化性能影响显著,最优条件为 Ni:Co:Fe 原子比 1:1:1、微波功率 800 W、以泡沫镍为基底。在 1 mol/L KOH 中,10 mA/cm² 时过电位仅 227 mV, Tafel 斜率 24.3 mV/dec,电荷转移电阻小,OER 活性与动力学性能优异。同时,该催化剂在三电极体系 1.55 V 即可达到 700 mA/cm² 工业级电流密度,两电极全解水仅需 1.73 V,具备良好的工业应用潜力。微波水热的快速体加热实现了均匀成核与高活性结构构筑,增强了界面结合与电荷传输,Ni、Co、Fe 的电子协同作用,共同提升了催化性能。本研究为高效低成本碱性电解水阳极催化剂的开发提供了新路径,后续可通过掺杂复合改性进一步提高高电流稳定性,并开展中试研究以推动工业化应用。

参考文献

- [1] Nabera A, Josemartin A, Istrate R, *et al.* Integrating climate policies in the sustainability analysis of green chemicals[J]. *Green Chemistry*, 2024, 26(11): 6461–6469.
- [2] 李桂亮, 张文昌, 刘家敏, 等. 我国“氢能产业 2.0 阶段”发展现状与展望[J]. *现代化工*, 2025, 45(8): 1–5.
- [3] 廖龙飞, 李明雨, 尹永利, 等. 碱性水电解制氢催化剂研究进展[J]. *工业催化*, 2023, 31(2): 7–17.
- [4] Xu Q, Zhang L, Zhang J, *et al.* Anion exchange membrane water electrolyzer: Electrode design, lab-scaled testing system and performance evaluation[J]. *Energy Chem*, 2022, 4(5): 100087.
- [5] 李子烨, 劳力云, 王谦. 制氢技术发展现状及新技术的应用进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(7): 86–89.
- [6] Zhang Y, Yan R, Xu X, *et al.* Next generation noble metal-engineered catalysts: From structure evolution to structure-reactivity correlation in water splitting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(4): 2308813.
- [7] 杨阳, 张胜中, 王红涛. 碱性电解水制氢关键材料研究进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(5): 78–82.
- [8] Jiang Z, Fan C, Pan J, *et al.* Recent advances in Ir/Ru-based perovskite electrocatalysts for oxygen evolution reaction[J]. *Rare Metals*, 2024, 43(7): 2891–2912.
- [9] 许莹莹, 孙守刚. 原位负载 Co 掺杂 IrO₂ 催化剂的制备及在电解水中的研究[J]. *化工技术与开发*, 2025, 54(9): 32–37.
- [10] 纵榜峰, 刘如祎, 魏博, 等. RuO₂ 纳米纤维的制备及电解水析氧性能研究[J]. *电源技术*, 2025, 49(3): 631–636.
- [11] Wang Q, Wang Y, Luk H, *et al.* Recent advances in non-precious metal electrocatalysts for anion exchange membrane water electrolysis: Mechanistic insights, catalyst design, and structural regulation strategies[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 523: 168587.
- [12] Wu X, Gu X, Tai J, *et al.* Facile synthesis of the NiFe bimetallic alloy wrapped on the porous N-doped graphene aerogel via thermal reduction and electronic structure modulation for boosting oxygen evolution reaction[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 633: 236430.
- [13] 杨梧桐, 刘芳名, 周子尧, 等. 镍铁层状氢氧化物催化水电解制氢的工况研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(12): 4509–4522.
- [14] Su M, Zhu S, Cui Z, *et al.* A corrosion-resistant diamond-supported NiFe-LDH electrode for efficient oxygen evolution[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2026, 1060: 187167.
- [15] Wang Y, Tao S, Lin H, *et al.* Atomically targeting NiFe LDH to create multivacancies for OER catalysis with a small organic anchor[J]. *Nano Energy*, 2021, 81: 105606.
- [16] Wu L, Yu L, Xiao X, *et al.* Recent advances in self-supported layered double hydroxides for oxygen evolution reaction[J]. *Research*, 2020, (5): 3976278.
- [17] 武红丹, 曹立新, 董博华. 非晶 FeCoNi/Ni₃S₂/NF 的制备及电催化析氧性能[J]. *电池*, 2023, 53(1): 14–18.
- [18] Anand C, Chandraba B, Nithiya P, *et al.* Green hydrogen for a sustainable future: A review of production methods, innovations, and applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 111: 319–341.
- [19] Kubiak A. Comparative study of TiO₂-Fe₃O₄ photocatalysts synthesized by conventional and microwave methods for metronidazole removal[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 12075.
- [20] Yang X, He Q, Hu L, *et al.* Ultrafast microwave-assisted synthesis of porous NiCo layered double hydroxide nanospheres for high-performance supercapacitors[J]. *Molecules*, 2024, 29: 2546.
- [21] Vojvodic A, Nørskov J. New design paradigm for heterogeneous catalysts[J]. *National Science Review*, 2015, 2(2): 140–143.
- [22] Klingehof M, Trzesniowski H, Koch S, *et al.* High-performance anion-exchange membrane water electrolyzers using NiX (X = Fe, Co, Mn) catalyst-coated membranes with redox-active Ni—O ligands[J]. *Nature Catalysis*, 2024, 7(11): 1213–1222. ■