

# 表面活性剂调控铁基氢氧化物电催化剂的 微观结构及OER催化性能

陈青华<sup>1</sup>, 宁晋昆<sup>2</sup>, 高美连<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>兰溪致德新能源材料股份有限公司, 浙江 金华

<sup>2</sup>湖南长潭泵业有限公司, 湖南 吉首

<sup>3</sup>湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

## 摘要

本研究系统分析表面活性剂对过渡金属铁基金属化合物的微观形貌影响及电解水OER催化活性的影响。采用水热合成法, 通过改变表面活性剂的种类及浓度, 分别采用阴离子表面活性剂十二烷基磺酸钠(SDS)、非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮(PVP)和质子化月桂胺聚氧乙烯醚(1215-质子化), 调控铁基氢氧化物催化剂材料的晶体结构与形貌, 并结合XRD、SEM及电化学测试(LSV, EIS, CV)分析物相组成, 微观形貌对电催化性能的影响。结果表明, SDS主要通过静电吸附抑制铁基氢氧化物晶体的晶面生长, 形成类椭圆层状结构, 且诱导(310)晶面优势生长; PVP通过空间位阻效应提升铁基材料结晶度, 诱导形成规则棒状及立方体结构; 1215(质子化)则促形成多孔碎片状结构, 增大比表面积。同时存在自支撑载体碳纸及表面活性剂SDS制备的铁基化合物催化剂具有最佳的OER催化活性, 其驱动10 mA/cm<sup>2</sup>电流密度的电位为0.596 V, 电荷转移电阻低至1.3  $\Omega$  cm<sup>2</sup>, 电化学活性面积为191.8 cm<sup>2</sup>。本研究揭示了表面活性剂分子结构与金属化合物的作用机制, 为高效非贵金属电催化剂的设计提供了理论与实验依据。

## 关键词

表面活性剂, 微观形貌, 铁基催化剂, 电解水, 析氧反应

# Surfactant-Mediated Modulation of the Microstructure and OER Catalytic Performance of Iron-Based Hydroxide Electrocatalysts

Qinghua Chen<sup>1</sup>, Jinkun Ning<sup>2</sup>, Meilian Gao<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Lanxi Zhide New Energy Materials Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

<sup>2</sup>Hunan Changtan Pump Industry Co., Ltd., Jishou Hunan

文章引用: 陈青华, 宁晋昆, 高美连. 表面活性剂调控铁基氢氧化物电催化剂的微观结构及 OER 催化性能[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 189-200. DOI: 10.12677/ms.2026.165113

## Abstract

This study systematically analyzes the effects of surfactants on the microstructure and oxygen evolution reaction (OER) catalytic activity of transition metal iron-based compounds. Using a hydrothermal synthesis method, the crystal structure and morphology of iron-based hydroxide catalyst materials were regulated by varying the type and concentration of surfactants, specifically employing the anionic surfactant sodium dodecyl sulfonate (SDS), the nonionic surfactant polyvinylpyrrolidone (PVP), and protonated laurylamine polyoxyethylene ether (protonated 1215). The effects of phase composition and microstructure on electrocatalytic performance were analyzed using XRD, SEM, and electrochemical measurements (LSV, EIS, CV). The results show that SDS primarily inhibits the growth of specific crystal facets of the iron-based hydroxide through electrostatic adsorption, forming an elliptical layered structure and inducing the preferential growth of the (310) crystal plane. PVP enhances the crystallinity of the iron-based material via steric hindrance, inducing the formation of regular rod-like and cubic structures. Protonated 1215 promotes the formation of a porous fragmented structure, increasing the specific surface area. In the presence of the self-supporting carbon paper substrate, the iron-based compound catalyst prepared with SDS exhibits the best OER catalytic activity, achieving a potential of 0.596 V to drive a current density of 10 mA/cm<sup>2</sup>, a charge transfer resistance as low as 1.3 Ω cm<sup>2</sup>, and an electrochemical active surface area (ECSA) of 191.8 cm<sup>2</sup>. This study elucidates the interaction mechanism between surfactant molecular structures and metal compounds, providing both theoretical and experimental foundations for the design of efficient non-noble metal electrocatalysts.

## Keywords

Surfactant, Microstructure, Iron-Based Catalyst, Water Electrolysis, Oxygen Evolution Reaction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在能源催化领域, 铁基催化剂因地球储量丰富、催化活性可调及多相反应适应性强等优点, 成为电催化分解水的候选材料[1][2]。然而, 其电催化性能受晶体结构及微观形貌较大影响, 而精准调控其微观结构仍面临挑战。表面活性剂作为一类兼具亲水-疏水基团的分子, 可通过界面吸附、模板导向及分子间相互作用, 显著影响铁基材料的成核动力学与晶体生长路径, 为催化剂的结构优化提供了精细调控策略[3][4]。其中, 阴离子表面活性剂可通过静电排斥作用抑制 Fe<sup>3+</sup>水解, 诱导形成高活性晶面暴露的纳米片结构。如以十二烷基硫酸钠(SDS)为模板, 可定向诱导铁基氧化物/羟基氧化物各向异性生长, 暴露高指数活性晶面, 显著提升 OER 本征活性[5]; 木质素磺酸钠等大分子阴离子表面活性剂也被报道了可调控 FeNi 基催化剂形成二维纳米片形貌, 并且由此增加了催化活性位点的暴露及提高了质子传输效率[6]。阳离子表面活性剂则由于电荷效应存在影响 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的立方晶型生长。如十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)被报道由于通过静电吸附与晶面选择性键合, 引导了 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米晶沿特定晶向生长, 形成高结晶度、尺寸均一

的立方形貌, 由此优化其电子传导与结构稳定性[7]。非离子表面活性剂能够通过空间位阻效应稳定亚稳态中间体, 进而促进多孔结构形成。如 PVP 由于其长链分子产生的空间位阻效应抑制晶粒过度团聚[8], 稳定介孔/大孔骨架, 显著增大催化剂比表面积及提升物质传输能力[9]; 而非离子表面活性剂也被报道了在 Fe-N-C 体系中用于构建多级孔道, 增加了 ORR 活性位点的暴露从而提高了催化活性[10]。

尽管上述研究证实了表面活性剂在铁基催化剂形貌调控中的潜力, 但当前不同类型的表面活性剂对铁基氢氧化物催化剂晶体生长路径和最终形貌的影响尚缺乏系统性对比研究, 多数工作仅聚焦于某一类表面活性剂的优化, 难以揭示不同分子结构与催化性能之间的构效关系; 此外在自支撑碳纸载体存在条件下, 优于自支撑电极的网络结构对催化剂晶体结构及形貌的如何协调, 目前相关研究十分有限。基于此, 本研究针对不同类型表面活性剂, 研究其对铁基催化剂晶体结构与形貌的影响, 采用典型的阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)、阳离子表面活性剂(醋酸质子化后的月桂胺聚氧乙烯醚(1215-质子化)及非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮(PVPK30)表面活性剂的单一体系, 结合水热法制备一系列铁基氢氧化物催化剂材料, 并利用 X 射线衍射仪(XRD)解析晶相组成与晶格参数, 通过扫描电子显微镜(SEM)观测微观形貌。通过对比不同表面活性剂体系中晶体的物相及微观形貌, 分析表面活性剂对铁基催化剂的影响。对比有自支撑导电基体碳纸存在, 碳纸对晶体的限域生长及表面活性剂晶体生长导向的双重作用下, 铁基氢氧化物催化剂材料的形貌变化及电解水析氧性能关系。

## 2. 试验方案

### 2.1. 无自支撑导电基底的 FeOOH 粉末样品制备

九水合硝酸铁( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , 1.62 g/0.004 mol), 氟化铵( $\text{NH}_4\text{F}$ , 0.59 g/0.016 mol), 尿素( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , 1.20 g/0.02 mol)共同溶解于 36 g 去离子水中形成均匀溶液。分别加入不同含量的 SDS (0.2 wt.%, 0.5 wt.%, 0.8 wt.%), 搅拌 30 min 后转移至 50 mL 不锈钢反应釜, 120°C 恒温反应 12 h, 自然冷却至室温后, 产物经水洗涤 6 次, 80°C 真空干燥 12 h, 研磨得到粉末, 分别命名为 Fe-SDS-x%; 分别加入不同含量的 PVPK30 (0.2 wt.%, 0.5 wt.%, 0.8 wt.%), 搅拌 30 min 后转移至 50 mL 不锈钢反应釜, 120°C 恒温反应 12 h, 自然冷却至室温后, 产物经水洗涤 6 次, 80°C 真空干燥 12 h, 研磨得到粉末, 命名为 Fe-PVP-x%; 此外不添加表面活性剂, 以九水合硝酸铁, 氟化铵及尿素共同溶解于 36 g 去离子水中形成均匀溶液, 转移至 50 mL 不锈钢反应釜, 120°C 恒温反应 12 h, 自然冷却至室温后, 产物经水洗涤 6 次, 80°C 真空干燥 12 h, 研磨得到粉末, 命名为 Fe-0。

### 2.2. 自支撑导电基底镍网/碳纸负载 FeOOH 样(FeOOH-CP)制备

**Table 1.** Sample names and the corresponding ratios of reactants for the catalysts prepared in this paper

**表 1.** 本文所制备的催化剂的样品名及反应物配比

Sample	导电基底	分散剂	加入量(wt.%)
Fe-0	/	/	/
Fe-SDS-0.2%	/	SDS	0.2
Fe-SDS-0.5%	/	SDS	0.5
Fe-SDS-0.8%	/	SDS	0.8
Fe-PVP-0.2%	/	PVP	0.2
Fe-PVP-0.5%	/	PVP	0.5
Fe-PVP-0.8%	/	PVP	0.8

续表

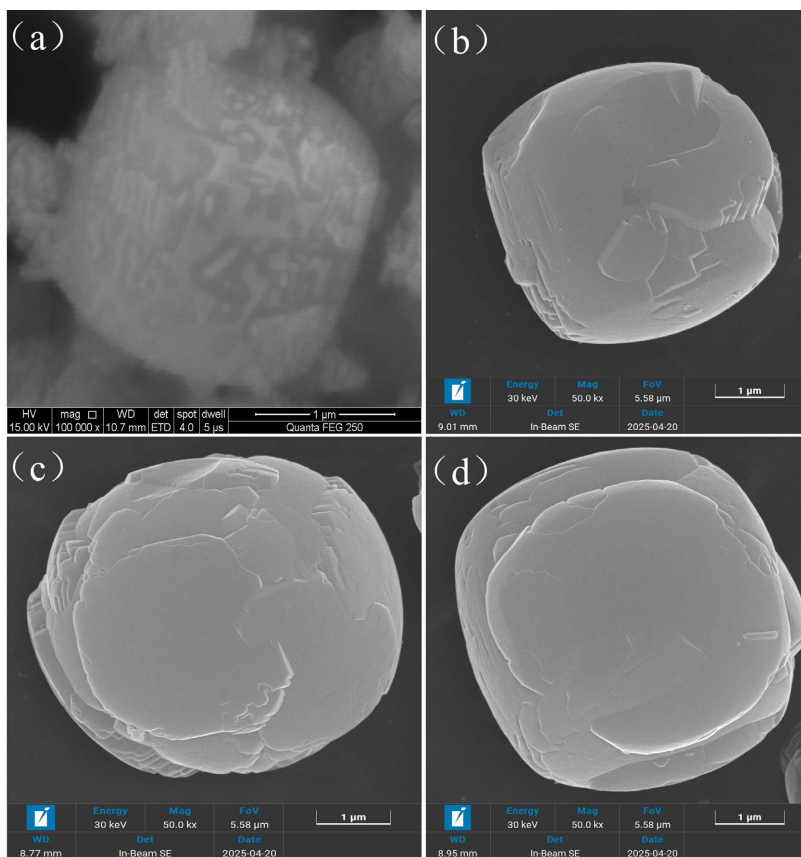
Fe-CP	Carbon paper (CP)	/	/
Fe-SDS-CP	Carbon paper (CP)	SDS	0.5
Fe-PVP-CP	Carbon paper (CP)	PVP	0.5
Fe-1215-CP	Carbon paper (CP)	1215-质子化	0.5

九水合硝酸铁( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , 1.62 g/0.004 mol), 氟化铵( $\text{NH}_4\text{F}$ , 0.59 g/0.016 mol), 尿素( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , 1.20 g/0.02 mol)共同溶解于 36 g 去离子水中形成均匀溶液, 分别加入 0.5 wt.% 的 SDS, PVP 及 1215-质子化表面活性剂, 再将预处理的碳纸分别垂直浸入搅拌均匀的上述混合溶液中, 在不锈钢反应釜中  $120^\circ\text{C}$  保温 12 h, 冷却后取出, 水冲洗 6 次,  $80^\circ\text{C}$  干燥 12 h, 获得 Fe-SDS-CP、Fe-PVP-CP 和 Fe-1215-CP, 同样的, 预处理后的碳纸浸入前以九水合硝酸铁氟化铵及尿素混合液中, 不添加任何表面活性剂, 获得样品作为对照组, 命名为 Fe-CP。

不同配比见表 1。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 表面活性剂对铁基催化剂表面形貌的影响

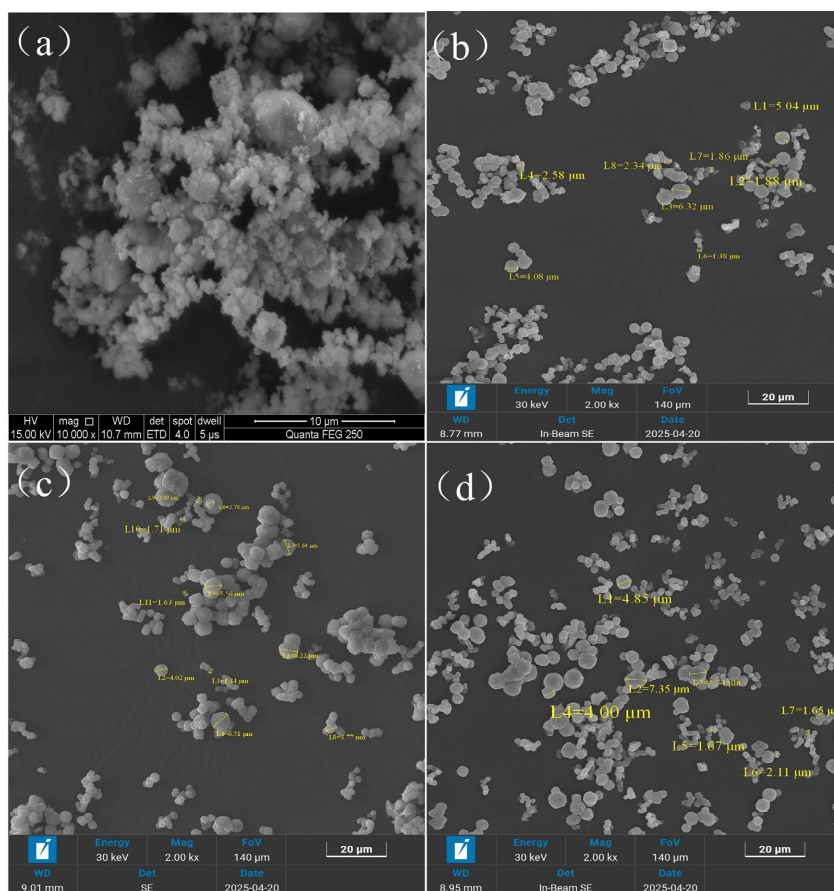


**Figure 1.** High magnification SEM images of iron-based hydroxide catalysts with different amounts of anionic surfactant SDS: (a) Fe-0; (b) Fe-SDS-0.2%; (c) Fe-SDS-0.5%; (d) Fe-SDS-0.8%

**图 1.** 阴离子表面活性剂 SDS 不同添加量的铁基氢氧化物催化剂 SEM 图(高倍率图): (a) Fe-0; (b) Fe-SDS-0.2%; (c) Fe-SDS-0.5%; (d) Fe-SDS-0.8%

阴离子表面活性 SDS 的不同添加量对铁基金属氢氧化物的表面形貌影响,如图 1 所示。图 1(a)所示,未添加 SDS 的铁基催化剂晶体颗粒表面粗糙,结构呈现明显的无序性与复杂性,是由于缺乏表面活性剂调控,晶体生长过程中团聚现象较为严重,导致表面形态不规则。加入 0.2 wt.% 的 SDS 铁基催化剂晶体颗粒呈现较为规则的类椭圆轮廓,表面具有层状结构,层间界限相对清晰,整体形貌较为平整、规整,层状结构分布均匀,无明显剧烈起伏,如图 1(b)所示。加入 0.5 wt.% 的 SDS 铁基催化剂晶体颗粒保持类椭圆形态,同时颗粒尺寸也有所增大,且表面层状结构更为丰富且明显,层的起伏与堆叠效果更显著,呈现出更复杂的层叠效果,仿佛多层结构相互交错,增加了表面形貌的层次感,如图 1(c)所示。如图 1(d)所示,加入 0.8 wt.% SDS 后的铁基催化剂晶体颗粒轮廓仍为类椭圆,层状结构特征明显,与添加量 0.5 wt.% 相比(图 1(c)),颗粒尺寸接近,但表面层的排列方式略有差异,部分区域层状结构更为平滑,层的厚度或间距存在细微变化,整体形貌在层状基础上展现出独特的结构特征,这说明 SDS 分散剂浓度对铁基催化剂颗粒尺寸及表面颗粒形貌有一定影响,而未明显改变其类椭圆立方体颗粒整体形貌。

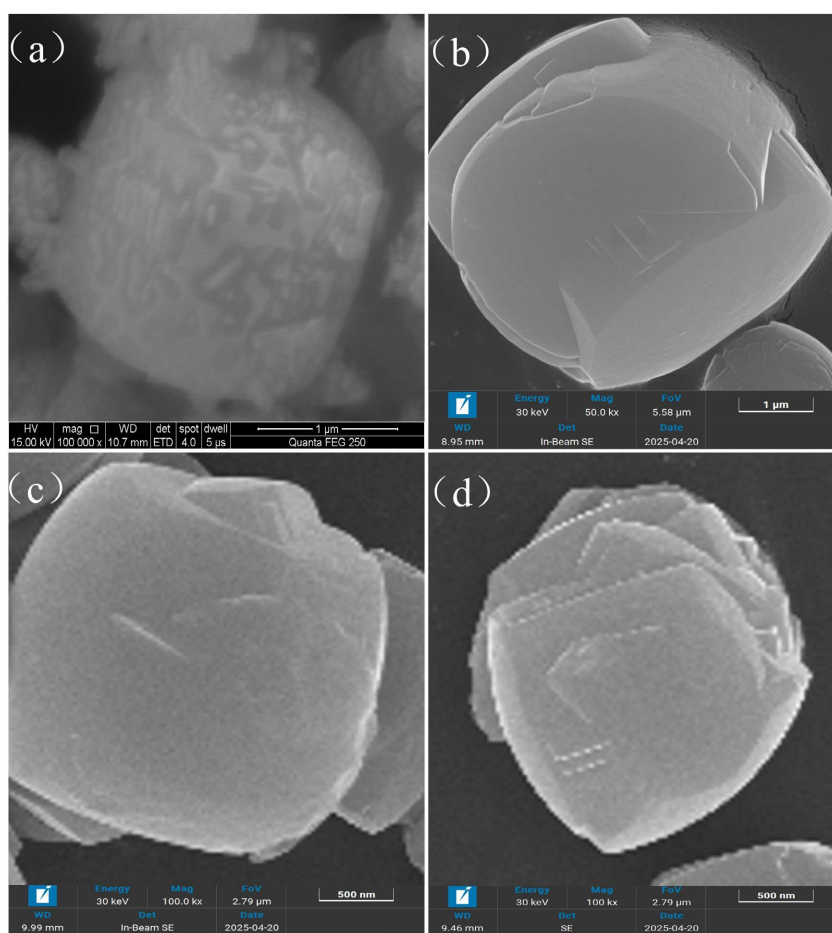
图 2 为 SDS 不同添加比例的铁基氢氧化物的低倍率 SEM 图。对比图 2 可以观察到,无分散剂加入的铁基氢氧化物催化剂具有明显团聚状态,且颗粒大小不一(如图 2(a))。而加入 SDS 后,颗粒团聚减少,且颗粒大小较为均匀,但随着 SDS 添加量增大,颗粒尺寸稍有增加,当添加量达到 0.5 wt.% 后再增加 SDS 添加量,颗粒尺寸无明显增加(如图 2(a)-(d))。



**Figure 2.** Low magnification SEM images of iron-based hydroxide catalysts with different concentrations of anionic surfactant SDS: (a) Fe-0; (b) Fe-SDS-0.2%; (c) Fe-SDS-0.5%; (d) Fe-SDS-0.8%

**图 2.** 阴离子表面活性剂 SDS 不同添加量的铁基氢氧化物催化剂 SEM 图(低倍率图): (a) Fe-0; (b) Fe-SDS-0.2%; (c) Fe-SDS-0.5%; (d) Fe-SDS-0.8%

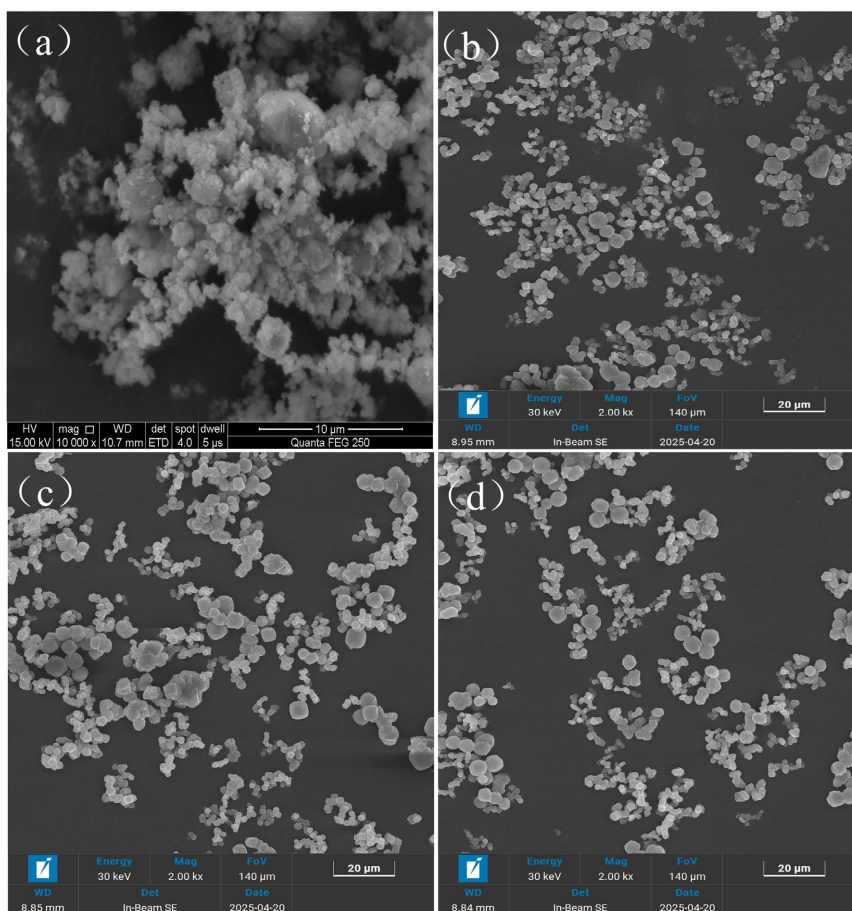
图 3 显示了未添加和添加不同浓度的 PVP 的铁基氢氧化物催化剂的 SEM 图像高倍率图像。如图 3(a) 所示, 未添加 PVP 的铁基催化剂晶体颗粒表面粗糙, 结构呈现明显的无序性与复杂性。如图 3(b) 所示, 加入 0.2 wt.% PVP 铁基催化剂晶体颗粒近似球形, 表面有一些凹陷和突出部分并存在层状或片状的结构。加入 0.5 wt.% 的 PVP 铁基催化剂晶体颗粒近似多面体形状, 棱角相对较为分明, 表面相对较为平整, 没有明显的大起伏或复杂的凹凸结构(如图 3(c) 所示)。而加入 0.8 wt.% PVP 后的铁基催化剂晶体颗粒呈现出不规则的多面体形态, 具有多个面和棱边, 表面有一些层状或台阶状结构(如图 3(d) 所示)。对比图 3(b)~(c), 可以观察到, 随着 PVP 表面活性剂添加量的增加, 颗粒的形状变得更加不规则, 表面层次感愈加丰富, 具有层状堆叠现象, 这说明 PVP 分散剂浓度对铁基催化剂颗粒对表面颗粒形貌有较大影响, 有利于层状氢氧化物形貌的获得。此外对比颗粒尺寸粒径可以观察到, 随着 PVP 含量的增加, 铁基氢氧化物催化的先变大后变小。



**Figure 3.** High magnification SEM images of iron-based catalysts with different amounts of non-ionic surfactant PVP: (a) Fe-0; (b) Fe-PVP-0.2%; (c) Fe-PVP-0.5%; (d) Fe-PVP-0.8%

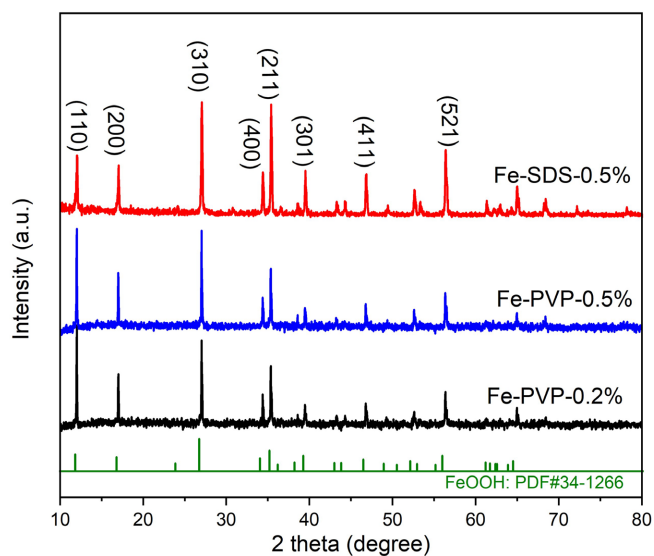
**图 3.** 非离子表面活性剂 PVP 不同添加量的铁基催化剂 SEM 图(高倍率图): (a) Fe-0; (b) Fe-PVP-0.2%; (c) Fe-PVP-0.5%; (d) Fe-PVP-0.8%

图 4 为 PVP 不同添加比例的铁基氢氧化物的低倍率 SEM 图。对比图 4(a)~(d) 可以观察到, 随着 PVP 浓度增大, 颗粒尺寸稍有增加, 到添加量达到 0.5 wt.% 时, 再增加 PVP 添加量至 0.8 wt.% 时, 颗粒尺寸则变小。



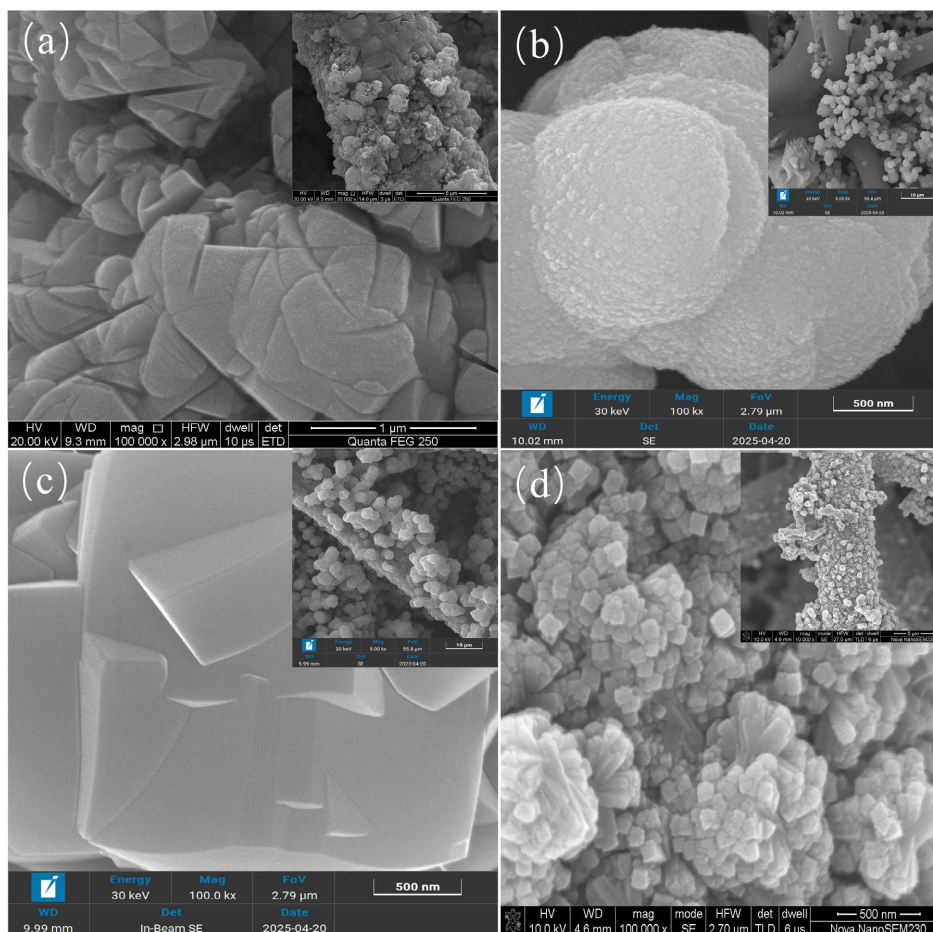
**Figure 4.** Low magnification SEM images of iron-based catalysts with different amounts of non-ionic surfactant PVP: (a) Fe-0; (b) Fe-PVP-0.2%; (c) Fe-PVP-0.5%; (d) Fe-PVP-0.8%

**图 4.** 非离子表面活性剂 PVP 不同添加量的铁基催化剂 SEM 图(低倍率图): (a) Fe-0; (b) Fe-PVP-0.2%; (c) Fe-PVP-0.5%; (d) Fe-PVP-0.8%



**Figure 5.** XRD patterns of iron-based hydroxides with 0.2 wt.% and 0.5 wt.% PVP added  
**图 5.** 添加量为 0.2 wt.% 和 0.5 wt.% 的 PVP 的铁基氢氧化物的 XRD 图

为了分析添加表面活性剂对铁基氢氧化物催化剂晶体结构及物相组成的影响,进一步对 Fe-PVP-0.2%、Fe-PVP-0.5%及 Fe-SDS-0.5%粉末样品进行 XRD 检测,并分析其晶体结构及物相组成,如图 5 所示。结果表明,所有样品均具有典型的 FeO(OH)特征衍射峰( $2\theta = 11.8^\circ, 16.8^\circ, 26.7^\circ, 34.0^\circ, 35.1^\circ, 39.2^\circ$ )。并且 0.2% PVP 加入时,样品主峰  $26.7^\circ$  强度稍低于主峰  $11.8^\circ$ ,而当 PVP 添加量增至 0.5wt.%时,FeO(OH)特征衍射峰形变得稍微尖锐,表明晶体结晶度微弱提升,并且主峰  $26.7^\circ$  强度变得与主峰  $11.8^\circ$  相同,说明 PVP 引导(310)晶面优势生长。而对于 SDS 的加入,XRD 结果表明主峰  $26.7^\circ$  强度明显高于主峰  $11.8^\circ$ ,说明相较于 PVP 作为表面活性剂,SDS 对于 FeO(OH)的(310)晶面优势生长的诱导更为显著。



**Figure 6.** SEM image of iron-based catalysts loaded on carbon paper: (a) Fe-CP; (b) Fe-1215-CP; (c) Fe-PVP-CP; (d) Fe-SDS-CP (embedded image shown in low-magnification SEM)

**图 6.** 碳纸上负载的铁基催化剂 SEM 图: (a) Fe-CP; (b) Fe-1215-CP; (c) Fe-PVP-CP; (d) Fe-SDS-CP (内置图为低倍率 SEM)

为分析表面活性剂及 CP 自支撑导电载体负载条件下的铁基氢氧化物催化剂的形貌调节,采用不同表面活性剂及导电载体(碳纸)制备铁基氢氧化物催化剂,同时在仅有导电载体无表面活性剂制备的铁基氢氧化物催化剂形貌对比也进行了对比分析,结果如图 6 所示。图 6(a)所示为不添加表面活性剂所获得的产物 Fe-CP,可以看到生成的铁基氢氧化物催化剂呈现无规则形貌,紧密和厚实地堆叠在碳纤维表面。而添加 0.5 wt.% 的 1215-质子化表面活性剂,如图 6(b)所示,碳纤维上的铁基氢氧化物催化剂呈现出类似花状的结构,由大量小颗粒紧紧聚集而成,表面粗糙且布满细小颗粒,这种结构可能由于缺乏强定向生长引

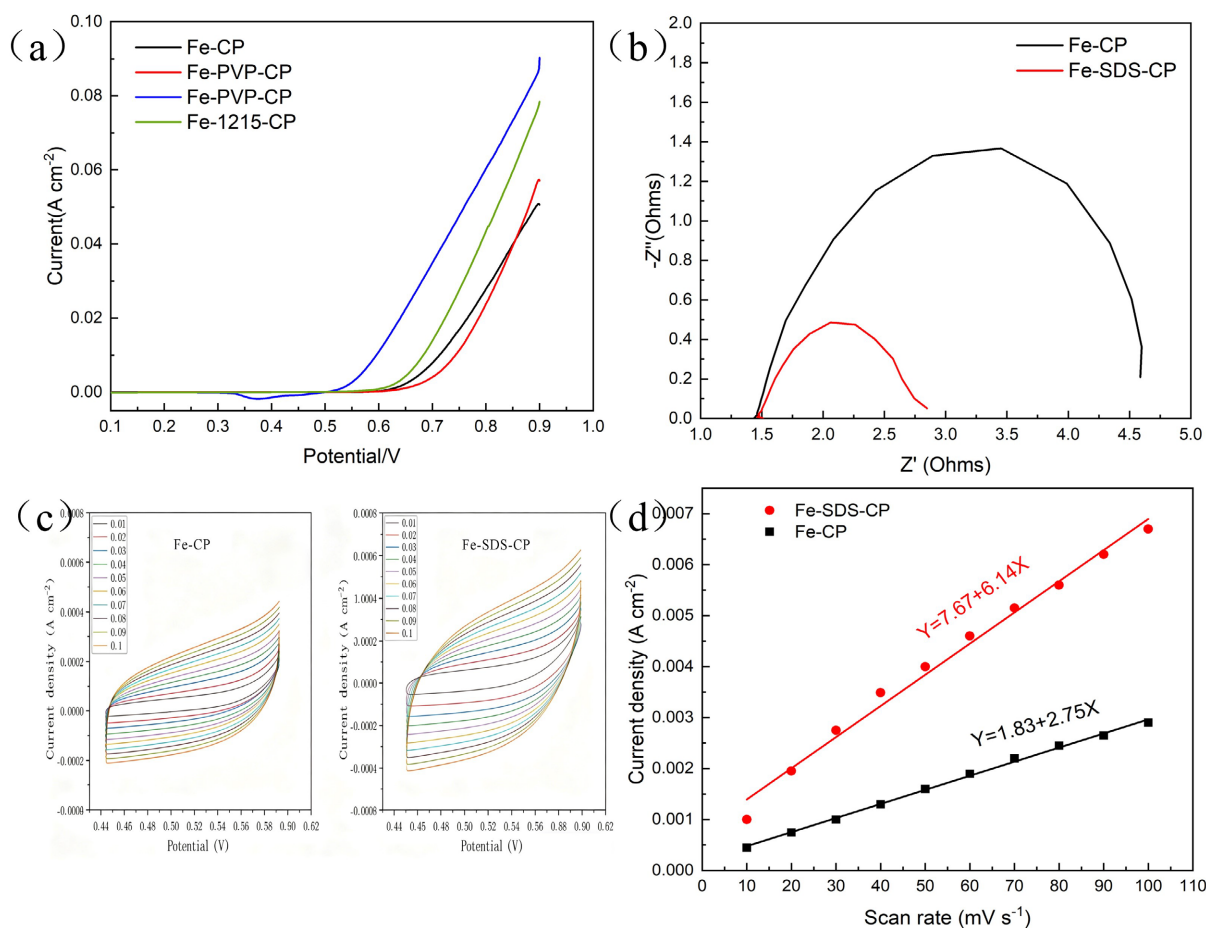
导，颗粒自发团聚形成，具有较高的结构复杂性。而当添加 0.5 wt.% 表面活性 PVP 后，如图 6(c) 所示，碳纸上的铁基催化剂呈现纳米尺寸的立方体结构，片层间有明显的堆叠与交错，表面光滑且边缘存在台阶状特征，层阶之间相互交错较多，这可能是因为在晶体形成和生长过程中，PVP 的空间位阻效应使晶体生长分散均匀，并且碳纸的立体多孔结构能有效分散反应物。当添加 0.5 wt.% 的 SDS 表面活性剂后，如图 6(d) 所示，碳纸上的铁基催化剂呈现纳米棒状的堆叠结构，紧密而厚实的充满了整个碳纤维表面。这可能是由于 SDS 是阴离子表面活性剂，其离子化基团具有电荷，可选择性吸附于铁基催化剂的特定晶面，抑制该晶面的生长速率，改变晶体生长方向与形貌。

综上所述，在导电基底碳纸上生长的铁基氢氧化物催化剂晶体具有更为纳米化的尺寸，且不同的表面活性剂生成的纳米结构不同。阳离子表面活性剂 1215-质子化获得纳米颗粒状铁基氢氧化物催化剂，非离子表面活性剂 PVP 获得纳米立方体状铁基氢氧化物催化剂、而阴离子表面活性剂获得纳米棒状铁基氢氧化物催化剂。而无表面活性剂加入的铁基氢氧化物催化剂晶体则呈现无规则形貌堆积体。这说明具有表面活性剂及限域场的催化剂相对表面形貌更为复杂多样，且具有更大比表面积，而溶液中自由生长的铁基催化剂表面形貌较为单一，基本呈现微米级的球形或立方体形状，表面相对较为光滑，根据电解水催化剂需要具有高活性的特性，表面尺寸小及复杂多变的形貌可以更多的暴露反应活性位点，增大电解水催化活性。

### 3.2. 表面活性剂对铁基催化剂 OER 性能的影响

进一步分析在导电基底碳纸上生长的铁基催化剂的电解水 OER 催化活性，进行 LSV、EIS 及 CV 检测。Fe-CP, Fe-1215-CP, Fe-SDS-CP 及 Fe-PVP-CP 裁成 1 cm \* 1.5 cm 后在三电极系统测试 OER 催化性能。所有样品的 LSV 曲线如图 7(a) 所示，Fe-SDS-CP 呈现出最大的起始电流约 0.0952 A，同时，Fe-SDS-CP 获得电流密度 10 mA·cm<sup>-1</sup> 具有最小电位的电位 0.596 V，而 Fe-PVP-CP 的电位为 0.744 V，Fe-CP 的电位为 0.714 V，Fe-1215-CP 电位为 0.688 V，这表明 Fe-SDS-CP 其反应动力学显著优于其他样品，这可能是由于添加表面活性剂 SDS 的铁基氢氧化物催化剂具有更大的比表面以及优势生长的(310)晶面，增大了催化剂与电解质的接触面积，提升了反应活性位点的暴露量，进而优化反应动力学。相比之下，添加 PVP 表面活性剂获得铁基氢氧化物催化剂具有相对最低的 OER 催化活性，与其立方块的形貌相关，这也说明并非添加了任意表面活性剂均有助于 OER 催化活性的提升。图 7(b) 所示为 Fe-CP 及 Fe-SDS-CP 的 EIS 曲线，Fe-CP 半圆直径较大，界面转移电阻( $R_{ct}$ )为 3.2  $\Omega$  cm<sup>2</sup>，这表明电荷转移电阻较高，电子传输效率受限，而 Fe-SDS-CP 样品的半圆直径远小于 Fe-CP， $R_{ct}$  为 1.3  $\Omega$  cm<sup>2</sup>，电荷转移能力明显提高。测试不同电流密度下 Fe-CP 及 Fe-SDS-CP 的 CV 曲线，并且中位电流密度的平均差值与扫速进行线性拟合，获得双电层电容( $C_{dl}$ )，进一步获得电化学活性面积(ECSA)， $ECSA = C_{dl}/C_s$ ，其中  $C_{dl}$  是双层电容，而  $C_s$  是系统的特定电容，对于光滑电极一般取值 40  $\mu$ F·cm<sup>-2</sup> [11]。如图 7(c) 及图 7(d) 所示，Fe-SDS-CP 的  $C_{dl}$  值为 7.67 mF/cm<sup>2</sup>，远大于 Fe-CP 的 1.83 mF/cm<sup>2</sup>，计算得到 Fe-CP 及 Fe-SDS-CP 样品的 ECSA 分别 191.8 和 45.8 cm<sup>2</sup>，这表明 Fe-SDS-CP 具有相对显著增加催化剂的电化学活性面积，具有更大的活性面积从而暴露更多 OER 活性位点。

表 2 列出了不同表面活性获得自支撑催化剂与近期报道的部分 Fe 基电催化剂的  $\eta_{-10}$  对比结果。可以看出，Fe-SDS-CP 的过电位  $\eta_{-10}$  (596 mV) 高于部分已报道的先进 Fe 基催化，同时也低于一些多种调控手段获得的先进 Fe 基催化，催化活性适中。需要说明的是，本文研究目的为系统分析 SDS、PVP、1215-质子化三类表面活性剂对铁基氢氧化物催化剂的微观形貌与 OER 性能的影响规律，在相同的反应条件下 Fe-SDS-CP 的 OER 性能最佳，优于 PVP 和 1215 调控的样品，且 Fe-SDS-CP 还表现出较低的电荷转移电阻和较大的电化学活性面积，这说明 SDS 通过静电吸附调控晶面生长、形成类椭圆层状结构，此外，SDS 诱导的 FeO(OH) 的(310)晶面优势生长可能具有更高的电化学活性。这共同导致了 Fe-SDS-CP 暴露更多活性位点并促进电荷传输。



**Figure 7.** The OER performance of iron-based hydroxide catalysts obtained by adding different surfactants; (a) LSV curve graph; (b) EIS curve; (c) CV curve graph; and (d)  $C_{dl}$  curve

**图 7.** 不同表面活性剂添加获得的铁基氢氧化物催化剂的 OER 性能; (a) LSV 曲线图, (b) EIS 曲线, (c) CV 曲线图及 (d)  $C_{dl}$  曲线

**Table 2.** The recently reported Fe-based catalysts for OER

**表 2.** 近期报道的用于 OER 的 Fe 基催化剂

催化剂	电解液	$\eta_{10}$ (mV)	参考文献 Ref.
Fe-SDS-CP	1.0 M KOH	596	本工作
Fe-PVP-CP	1.0 M KOH	744	本工作
Fe-1215-CP	1.0 M KOH	688	本工作
Fe-NiO/NiS <sub>2</sub>	1.0 M KOH	270	[11]
FeNiVO <sub>x-3</sub>	1.0 M KOH	270	[12]
Co-Ni-Fe-LDHs	1.0 M KOH	322	[13]
NiFe-CoTe	1.0 M KOH	321	[14]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -NPCs	1.0 M KOH	350	[15]
Fe/rGO	1.0 M KOH	768	[16]
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @NC/rGO	1.0 M KOH	295	[17]
Fe-TA@CMS	1.0 M KOH	344	[18]

## 4. 结论

本文研究了不同种类的表面活性剂对铁基氢氧化物电解水催化剂的微观形貌、晶体结构及 OER 电催化活性的影响, 结论如下:

(1) 阴离子表面活性剂 SDS 主要通过静电吸附抑制特定晶面生长, 形成类椭圆层状结构, 不同添加量对颗粒形貌影响区别较小; 非离子表面活性剂 PVP 添加量主要影响结晶度, 低浓度时颗粒分散, 高浓度通过强空间位阻促进晶粒有序生长, 引导(310)晶面优势生长。SDS 表面活性剂则以更显著诱导(310)晶面优势生长。

(2) 无导电基底 CP 存在, 催化剂在溶液中自由生产, 0.5 wt.%添加量下, SDS 诱导铁基氢氧化物呈现球形形貌而 PVP 诱导立方体形貌; 但存在碳纸的导电基底后, 0.5 wt.%添加量下, SDS 及限域生长共同作用使得铁基氢氧化物呈现纳米棒形貌, PVP 及限域生长共同作用使得铁基氢氧化物呈现纳米立方体形貌, 而 1215-质子化及限域生长共同作用使得铁基氢氧化物呈现纳米颗粒形貌。

(3) SDS 添加及自支撑导电基底碳纸负载的铁基氢氧化物具有相对最佳的 OER 电催化活性, 驱动 10 mA/cm<sup>2</sup> 电流密度的电位为 0.596 V, 电荷转移电阻为 1.3 Ω cm<sup>2</sup>, 电化学活性面积(ECSA)为 191.8 cm<sup>2</sup>, 分析其原因主要为较大的电化学活性面积及优势生长的(310)晶面。

## 致 谢

感谢兰溪致德新能源材料股份有限公司提供经费支持。

## 基金项目

感谢湖南省科技创新计划资助 2025RC3301 项目支持。

## 参考文献

- [1] Zhang, J., Zhang, Q. and Feng, X. (2019) Support and Interface Effects in Water-splitting Electrocatalysts. *Advanced Materials*, **31**, Article ID: 1808167. <https://doi.org/10.1002/adma.201808167>
- [2] 宋鹏飞, 徐唯嘉, 李欣悦, 等. 铁基硫化物形貌与电子结构调控及催化电解水研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2025, 55(3): 612-635.
- [3] Li, S., Li, E., An, X., Hao, X., Jiang, Z. and Guan, G. (2021) Transition Metal-Based Catalysts for Electrochemical Water Splitting at High Current Density: Current Status and Perspectives. *Nanoscale*, **13**, 12788-12817. <https://doi.org/10.1039/d1nr02592a>
- [4] Sangsuriyong, K., Paradee, N., Rotjanasuworapong, K. and Sirivat, A. (2022) Synthesis and Characterization of Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles by Anionic, Cationic, and Non-Ionic Surfactant Templates via Co-Precipitation. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 4611. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08709-9>
- [5] Zhao, W., Gu, J., Chang, H., Deng, B., Long, Y., Zhang, Z., et al. (2026) Anion-Regulated Corrosion-Driven Scalable Synthesis of Nickel-Iron Electrodes for Efficient Oxygen Evolution. *Advanced Functional Materials*, **36**, e28941. <https://doi.org/10.1002/adfm.202528941>
- [6] 钟晓文, 卫政涛, 陈达朗, 等. 木质素磺酸钠诱导调控 FeNi 催化剂结构与 OER 性能研究[J]. 广东工业大学学报, 2025, 42(4): 105-114.
- [7] Lotfi, M. and Esmaeilnejad-Ahranjani, P. (2024) New Insights into Controlling Rapid Combustion Synthesis Procedure: Shape-Tailored Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles Fabrication. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **603**, Article ID: 172252. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172252>
- [8] Zierdt, T., Knake, J., Müller-Hülstede, J., Schonvogel, D., Wagner, P., Wark, M., et al. (2024) Effect of Non-Ionic Surfactant on Fe-N-C Catalyst Layers under HT-PEMFC Conditions. *ECS Meeting Abstracts*, **2024**, 3040-3040. <https://doi.org/10.1149/ma2024-02443040mtgabs>
- [9] Tan, H., Kim, J., Lin, J., Li, C., Alsheri, S.M., Ahamad, T., et al. (2019) A Facile Surfactant-Assisted Synthesis of Carbon-Supported Dendritic Pt Nanoparticles with High Electrocatalytic Performance for the Oxygen Reduction Reaction. *Microporous and Mesoporous Materials*, **280**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.01.020>

- [10] Jiang, B., Jiang, N., Cui, Y., Wang, H., Zhang, G., Li, J., *et al.* (2024) Rapid Synthesis and Microenvironment Optimization of Hierarchical Porous Fe-N-C Catalysts for Enhanced ORR in Microbial Fuel Cells. *Advanced Science*, **11**, Article ID: 2402610. <https://doi.org/10.1002/advs.202402610>
- [11] Zhang, N., Hu, Y., An, L., Li, Q., Yin, J., Li, J., *et al.* (2022) Surface Activation and Ni-S Stabilization in NiO/NiS<sub>2</sub> for Efficient Oxygen Evolution Reaction. *Angewandte Chemie International Edition*, **61**, e202207217. <https://doi.org/10.1002/anie.202207217>
- [12] Ehsan, M.A., Batool, R., Hakeem, A.S., Ali, S., Nazar, M.F. and Ullah, Z. (2025) Controlled Deposition of Trimetallic Fe-Ni-V Oxides on Nickel Foam as High-Performance Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, **98**, 772-782. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.044>
- [13] Liu, S., Zhang, Y., Hao, L., Nsabimana, A. and Shen, S. (2025) Designing Ternary Co-Ni-Fe Layered Double Hydroxides within a Novel 3D Cross-Flower Framework for Efficient Catalytic Performance in Oxygen Evolution Reaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, **678**, 924-933. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.09.185>
- [14] Jing, X., Dong, J., Mao, Y., Zhou, L., Ding, J., Dong, H., *et al.* (2024) Synergistic Effect Enables the Dual-Metal Doped Cobalt Telluride Particles as Potential Electrocatalysts for Oxygen Evolution in Alkaline Electrolyte. *Inorganic Chemistry*, **63**, 12764-12773. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.4c00921>
- [15] Dong, Q., Wang, H., Ren, J., Wang, X. and Wang, R. (2022) Activating Cu/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoislands Rooted on N-Rich Porous Carbon Nanosheets via the Mott-Schottky Effect for Rechargeable Zn-Air Battery. *Chemical Engineering Journal*, **442**, Article ID: 136128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136128>
- [16] Milikić, J., Nastasić, A., Rakočević, L., Radinović, K., Stojadinović, S., Stanković, D., *et al.* (2024) FeM/rGO (M = Ni and Cu) as Bifunctional Oxygen Electrode. *Fuel*, **368**, Article ID: 131654. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131654>
- [17] Soltani, E., Gholivand, M.B., Taherpour, A.A., Norouzibazaz, M. and Mirzaei, M. (2025) Construction of Aspartic Acid -Fe MOF Derived Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@NC Implanted on rGO as a Remarkably Efficient Catalyst for the Oxygen and Hydrogen Evolution Reactions. *Fuel*, **395**, Article ID: 135249. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135249>
- [18] Liu, H., Yang, D., Wang, X., Zhang, J. and Han, B. (2021) N-doped Graphitic Carbon Shell-Encapsulated FeCo Alloy Derived from Metal-Polyphenol Network and Melamine Sponge for Oxygen Reduction, Oxygen Evolution, and Hydrogen Evolution Reactions in Alkaline Media. *Journal of Colloid and Interface Science*, **581**, 362-373. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.055>