

选择性电氧化醇类制备药物中间体的 NiFe 基催化剂设计

李霖, 胡行宇, 范扬, 张树鹏*

(南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: NiFe 基催化剂在碱性介质中兼具高活性与可调选择性, 对其在该领域的研究进展进行了研究; 重点探讨元素掺杂、缺陷工程、异质结构构筑及电化学重构 4 大策略对催化剂电子结构、活性位点和界面微环境的调控机制; 分析反应路径、中间体演化、构效关系及应用潜力, 并展望发展方向, 为高效 NiFe 基催化剂设计及电合成技术在绿色制药中的应用提供参考。

关键词: NiFe 基催化剂; 氧析出反应; 有机电氧化; 药物中间体; 材料改性

中图分类号: O61

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)10-0046-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.009

Design of NiFe-based catalysts for the selective electrooxidation of alcohols to pharmaceutical intermediates

LI Lin, HU Xing-yu, FAN Yang, ZHANG Shu-peng*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: NiFe-based catalysts demonstrate high activity and tunable selectivity in alkaline media. This review summarizes research progress in this field, focusing on four strategies—element doping, defect engineering, heterostructure construction, and electrochemical reconstruction—and their regulatory effects on the electronic structures of the catalysts, active sites, and interfacial microenvironments. The article examines reaction pathways, intermediate evolution, structure-activity relationships, and application potential, while suggesting future directions. It aims to provide a reference for designing efficient NiFe-based catalysts and developing electro-synthesis technologies in green pharmaceutical manufacturing.

Key words: NiFe-based catalysts; oxygen evolution reaction; organic electrooxidation; pharmaceutical intermediates; material modification

在可持续能源与绿色化学需求下, 电催化有机合成可借可再生电力常温常压制备高附加值化学品, 其选择性有机电氧化相较析氧 (oxygen evolution reaction, OER) 副反应, 既降能耗, 又能定向转化生物质为医药等化学品, 兼具环境与经济价值^[1]。在各类阳极反应中, 醇类的选择性氧化因产物 (如醛、酮、羧酸) 可作为药物分子中的关键官能团而备受关注^[2]。例如, 结构复杂的甾醇经选择性电氧化可高效转化为甾体酮, 是合成皮质激素、性激素及抗炎药物 (如泼尼松、地塞米松) 的核心中间体^[3]。但该过程面临选择性差、催化剂稳定性不足等挑战。

镍铁基材料 (NiFe) 因在碱性介质中优异的 OER 活性而被广泛研究, 可通过原位生成高价 $\text{Ni}^{3+}/\text{Ni}^{4+}$ —O 活性物种, 高效活化醇的 $\alpha\text{-C-H}$ 键, Fe 的引入可调控 Ni 的电子结构, 优化中间体吸附能, 从而提升反应速率与选择性^[4]。已有综述^[5]系

统总结了 NiFe 基材料在析氧反应 (OER) 及整体水分解中的研究进展, 但该类材料在药物相关有机电氧化, 尤其是一元醇与多元醇的选择性转化中的构效关系、改性机制与应用潜力尚缺乏系统梳理。

本文中聚焦 NiFe 基催化剂在此领域的最新进展, 先阐述主要改性策略对调控催化活性与选择性的重要作用, 再重点评述其在一元醇和多元醇电氧化中的应用, 涵盖典型反应路径、中间体演化及选择性控制机制。最后, 对当前挑战与未来发展方向进行展望, 以期对高效、稳定、高选择性有机电氧化催化剂的设计提供理论参考与实践指导。

1 NiFe 基催化剂改性与性能调控策略

1.1 元素掺杂

元素掺杂是提升 NiFe 基催化剂 OER 性能的关键策略。通过引入非金属 (如 F、S、N、P) 或过渡金

收稿日期: 2025-12-29; 修回日期: 2026-08-01

基金项目: 江苏省重点研发社会发展项目 (BE2023820, BE2021720); 污染控制与资源化研究国家重点实验室开放基金项目 (PCRRF19032); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (30925010506)

作者简介: 李霖 (2001-), 男, 硕士, 研究方向为制氢-有机电氧化双功能电催化体系, 136255072@qq.com; 张树鹏 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向为功能化纳米材料, 通讯联系人, shupengnj@njut.edu.cn。

属(如 Co、Mn、Cr、Mo、V)原子,可精准调节 Ni/Fe 活性中心的电子密度,优化中间体吸附能垒并促进 $\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}^{3+}$ 可逆转化。其中,非金属掺杂主要利用强电负性或极性键改变局域电子分布,调控金属-氧键极化;而过渡金属掺杂则通过 d 轨道耦合调节 d 带中心,进而影响吸附能与氧化还原电位^[6]。

过渡金属阳离子掺杂是最直接的价态调制手段。Wang 等^[7]通过水热法在 NiFe-LDH 中引入 Mo,制得 NiFeMo-2 催化剂,在 1.0 mol/L KOH 中 10 mA/cm² 下过电位仅 262 mV(未掺杂样品为 344 mV),50 mA/cm² 下稳定运行 65 h。机理研究表明,Mo 掺杂提升了 Ni 的电子云密度,诱导氧空位形成,并促进活性 NiOOH 在更低电位生成。

非金属掺杂更侧重于通过电负性差异或配位重构调控金属-氧键极性。Song 等^[8]通过低温磷化将 P 间隙掺入 NiFe 合金,所得 $\text{P}_{4.8}\text{-NiFe ANs-400}$ 在碱性淡水和海水中均表现优异:100 mA/cm² 下过电位分别为 244、214 mV,500 mA/cm² 时为 305 mV,100 h 内稳定运行且 OER 法拉第效率接近 100%,有效抑制氯析出反应。

综上,杂原子掺杂通过电子结构重塑、金属-氧键极性调控及高活性相构筑等多重机制,显著降低 OER 能垒。作为性能调控的核心手段,在面向工业级高电流密度、复杂电解质环境的电解水技术中将持续发挥关键作用。

1.2 缺陷工程

缺陷工程通过在催化剂结构中引入氧空位、金属空位、边缘缺陷或非晶/晶界缺陷,从原子尺度调控局域电子结构与配位环境,从而提升 NiFe 基氧析出反应(OER)催化剂的性能,侧重于改变金属中心的配位数及几何构型,形成未饱和配位位点,增强对反应中间体的吸附与活化能力,使 OER 的关键步骤更易发生。因此,精准调控缺陷浓度、位置及类型,可有效提升 NiFe 基催化剂在高电流密度下的活性与稳定性。

金属空位通过引入非饱和配位中心调制表面电荷分布,为性能优化提供新路径。Cao 等^[9]利用富电子碱性离子液体合成亚 2 nm NiFe LDH 纳米片,诱导金属空位与氧空位共存,该催化剂在 1.0 mol/L KOH 中实现 180 mV@10 mA/cm² 的低过电位,且稳定运行超过 100 h。结果表明,金属空位能够调控表面电荷分布与 d 带中心位置,降低 OER 中间体吸附能垒,同步提升催化活性与稳定性。

近年来,非晶/晶界缺陷及边缘位缺陷的调控成

为研究热点。Qi 等^[10]利用硼酸根桥连填补无定形 NiFe 基催化剂中的氧空位,抑制 Fe 溶解并优化 Ni 高价态重构过程。所制备的 $\alpha\text{-B-NiFeO}_x\text{H}_y$ 催化剂在阴离子交换膜电解器中,2.0 V 下电流密度达 4.75 A/cm²,且在 0.5 A/cm² 下稳定运行 3 000 h,其短程有序、长程无序的结构特征,能够快速适应局域电子环境变化,展现出优异的动力学响应。

总体来看,缺陷工程通过改变电子结构、增强未饱和配位位点、促进吸附-反应动力学以及诱导活性相重构等多重机制,为调控 NiFe 基 OER 催化剂提供了灵活的设计思路。

1.3 异质结构构建

异质结构构建通过将 NiFe 基催化剂与具有不同电子结构、维度特征或导电性质的材料组合,形成界面耦合区域,在电子调控、界面活性位点生成及载流子传输方面产生协同效应。这类异质结构在反应过程中通常保持较高的结构稳定性,其性能增强主要源于界面电荷极化、跨界面电荷转移及应力调控等内在因素^[11]。因此,从导电基底、二维材料到金属硫化物/磷化物等方向设计异质结构,已成为提升 NiFe 体系本征催化活性的核心路径之一。

二维材料是构建异质结构的关键。例如,高比表面积与导电性的 MXene($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$),其表面终止基团($-\text{O}$ 、 $-\text{F}$ 、 $-\text{OH}$)可调控界面电子分布^[12]。Wang 等^[13]开发的 $(\text{Ni},\text{Fe})\text{S}_2@\text{Ti}_3\text{C}_2$ 催化剂通过强电子耦合诱导高价金属中心与晶格氧机制,提升析氧反应(OER)活性,同时以 $\text{Ti}-\text{O}-\text{Fe}$ 键抑制 Fe 溶出,并利用负电官能团增强抗氯腐蚀能力,在模拟海水中仅需 1.598 V vs.RHE 便可达到 2 A/cm²,并在 0.5 A/cm² 下稳定运行超 1 000 h,电解槽在工业电流密度下能耗低至 48.4 kWh/kg,效率达 70%。

石墨烯、氮掺杂碳等导电碳材料也可改善电子传输与界面稳定性。Xing 等^[14]构建的“拉链式”NiFe LDH/WN 异质结构在 50 mA/cm² 下稳定运行 4 500 h 以上,工业级电流密度(@350 mA/cm²)下持续工作 550 h。机理分析表明,强界面键合型异质结构有助于维持高价 Ni/Fe 活性态,抑制活性相大尺度相变与金属溶解。

综上所述,异质结构构建通过界面电子耦合、导电网络构筑及跨界面协同活性位点生成等机制,为 NiFe 基催化剂性能提升提供了高度可设计的路径。

1.4 结构重构

结构重构是 NiFe 基催化剂在碱性 OER 中的普

遍动态演化过程,表现为表层初始晶相原位转化为无定形、高价态的 $\text{NiOOH}/\text{FeOOH}$ 活性相。区别于元素掺杂等“预调控”策略,其由电化学电位触发,涉及化学组成与配位环境的原位/准原位转变。该过程具有双重影响,既能暴露活性位点、优化电子结构提升催化活性,也可能因金属溶出或结构坍塌损害稳定性^[15]。原位/准原位表征证实,多数 Ni 基及 NiFe 基催化剂会发生此类转变, Ni^{2+} 氧化为 $\text{Ni}^{3+}/\text{Ni}^{4+}$ 并形成 $\gamma\text{-NiOOH}$ 是活性核心, Fe 的引入可调节 Ni—O 键极化,加速氧化动力学,但需适度保留以保障稳定性^[16]。

近年来,调控重构过程成为提升 NiFe 基催化剂性能的关键策略。Lin 等^[17] 提出“原位重构分子围栏”策略,通过在 NiFe-S-TCNQ 催化剂表面引入可在工作条件下重构并锚定的硫酸酯修饰芳环分子,有效抑制 Fe 活性位点溶出并稳定重构后形成的活性相,使 Ni-Fe 前驱体在 $100\text{ mA}/\text{cm}^2$ 高电流密度下可连续稳定运行 2 200 h 以上。Zhao 等^[18] 利用硫辅助原位深度重构策略,成功制备了 S-doped (Fe) $\text{Ni}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$, 该材料通过硫诱导的晶格氧活化,实现了深层结构重构,形成富含活性位点的表面结构。在

膜电组件 (MEA) 测试中,该催化剂在 1 000 h 稳定性测试中保持优异活性,电力至氢能转换效率比商业催化剂提高 17%。此外,FMNS-A 成本仅为 $46.60\text{ 美元}/\text{m}^2$,远低于 Pt/C (约 $9\ 100\text{ 美元}/\text{m}^2$),展现出巨大的工业应用潜力。

2 NiFe 基催化剂在药物相关有机电氧化反应中的应用

传统氧化依赖高毒或贵金属氧化剂,存在成本高、污染大、选择性差等问题,难以满足绿色合成需求。相比之下, NiFe 基催化剂因成本低、结构可调,在碱性条件下易形成高活性 $\text{NiOOH}/\text{FeOOH}$ 物种,近年来被广泛用于醇类选择性电氧化,通过可逆转化生成高价 $\text{Ni}^{3+}/\text{Ni}^{4+}\text{-O}$ 活性位,促进 $\alpha\text{-C-H}$ 活化与脱氢氧化^[19],从而提升反应速率与选择性(表 1),实现温和条件下以低过电位高选择性生成醛、酮或羧酸等产物。这些产物(如茴香酮、FDCA 等)是精细化工平台分子,也是药物中间体^[20]。系统总结其在一元醇与多元醇电氧化中的反应路径与构效关系,对推动绿色制药与生物质高值化利用具有重要意义。

表 1 已报道醇类电氧化研究中相关的 NiFe 基电极材料性能

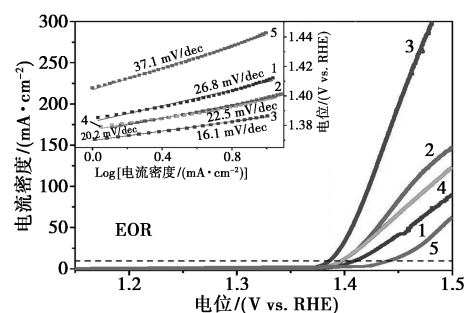
催化剂材料	有机底物体系	OER 性能	醇类氧化性能	选择性/%	法拉第效率/%
$\text{Pt}/\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CC}$ ^[21]	乙二醇 (1.0 mol/L PBS)	1.68 V@10 mA/cm ²	0.65 V@10 mA/cm ²	≈100	≈100
CC@M-NiFe-LDH ^[22]	苯甲醇 (0.3~1 mol/L KOH)	1.456 V@10 mA/cm ²	1.318 V@10 mA/cm ²	≈100	≈99
NiFe-0.10F LDH ^[23]	EtOH (1~1 mol/L KOH)	1.483 V@10 mA/cm ²	1.386 V@10 mA/cm ²	>95	—
Cu-NiFe PBA ^[24]	HMF (0.1 mmol/L~1 mol/L KOH)	—	1.43 V@100 mA/cm ²	≈100	≈100
NiFe-MOF ^[25]	多种醇类 (0.1~1 mol/L KOH)	1.80 V@100 mA/cm ²	1.61 V@100 mA/cm ²	>95	—
Fe LDH ^[26]	甘油 (0.1~1 mol/L KOH)	—	1.55 V (反应起始)	92	86

2.1 一元醇的选择性电氧化及其在药物中间体构建中的应用

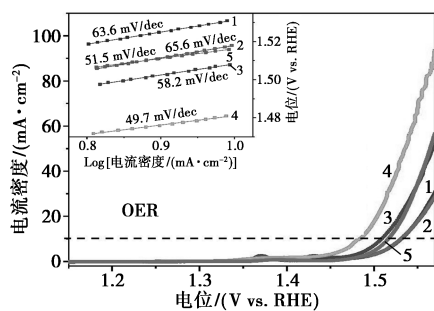
一元醇是来源广泛、结构简单的含氧底物,其选择性氧化产物(醛、酮、羧酸)是药物和香料的重要中间体。例如,苯甲醛可抑制肿瘤转化,具有抗癌药物潜力,脂肪醛参与前列腺素类抗炎药制备,樟脑等酮类用于局部麻醉剂。相比依赖贵金属或苛刻条件的传统热催化,该体系可在温和条件下以低过电位精准活化羟基,高选择性生成醛、酮或羧酸等产物^[27]。

在结构最简单的小分子伯醇体系中, Shi 等^[23] 报道了一种氟掺杂 NiFe LDH (NiFe-0.10F) 展现出优异的乙醇氧化能力,在 1.42 V vs. RHE 即可驱动反应,显著低于传统析氧反应 (OER) 电位 (>1.50 V vs. RHE), 产物分析证实乙醇主要被转化为乙酸盐,法拉第效率接近 95%,并可在 $100\text{ mA}/\text{cm}^2$ 下稳定

运行 10 h (图 1)。机理研究表明, F 掺杂增强 Ni 位点正电性,提升 OH^- 去质子化能力并促进高活性 $\text{Ni}^{3+}\text{-O}$ 的生成,同时抑制乙酸根的强吸附,避免活性位中毒。乙酸及其酯类广泛应用于防腐剂、药物合成溶剂及中间体生产,使这一体系成为小分子醇类绿色转化的重要基础范例。



(a) LSV 曲线



(b) LSV 曲线

1—NiFe-0.00F; 2—NiFe-0.05F; 3—NiFe-0.10F;
4—NiFe-0.20F; 5—NiFe-0.30F

图 1 NiFe-LDH-xF 催化剂在含 1 mol/L EtOH 的 KOH 中的 LSV 曲线(插图为对应的 Tafel 图)和 LSV 曲线

NiFe 基催化剂的应用已从简单醇类拓展至高附加值的复杂生物分子,其中以 5-羟甲基糠醛(HMF)的选择性电氧化最具代表性。如图 2 所示, Liu 等^[24]开发了铜诱导的镍基普鲁士蓝类似物(Cu-Ni PBA)电催化剂,实现了接近 100% 的 FDCA 选择性和 99.2% 的法拉第效率,在 1.43 V vs. RHE、1 mol/L KOH 条件下,电流密度达 100 mA/cm²,并成功放大至千克级连续生产(>1 kg FDCA, 运行 120 h),展现出显著的工业化潜力。

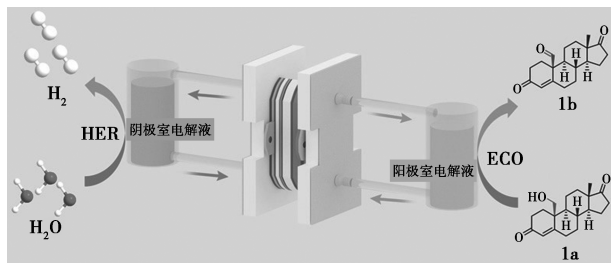


图 2 面向公斤级 FDCA 的可视化多级连续流电解槽

NiFe 催化体系能够胜任甾体醇这类空间位阻大、官能团密集的复杂底物。如图 3、图 4 所示, Xu 等^[25]报道的 NiFe-MOF 与氨氧自由基 ACT 协同电氧化体系成功地将 19-羟基-4-雄烯-3,17-二酮的合成放大到 30 g 规模,实现 98% 转化率与 99% 的目标酮选择性,时空产率高达 12.99 kg/(m³·h)。该体系利用高价 Ni³⁺/Ni⁴⁺物种和 ACT 快速攫取 C—H 上的氢原子形成可控碳自由基,实现温和且选择性地逐步氧化,避免了传统强氧化剂对甾体骨架的破坏。其产物甾体酮是合成皮质激素、性激素以及抗炎药物(如泼尼松、地塞米松)的核心中间体,使该体系在绿色制药领域具有突出的应用前景。

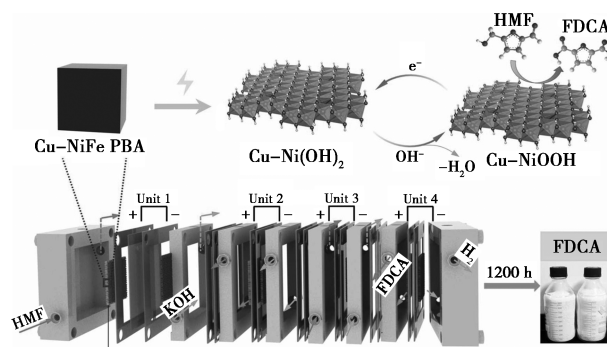
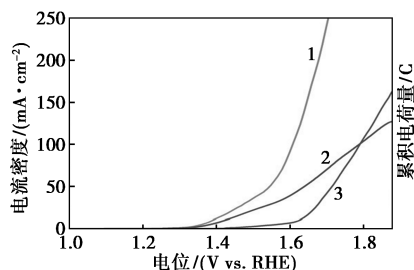
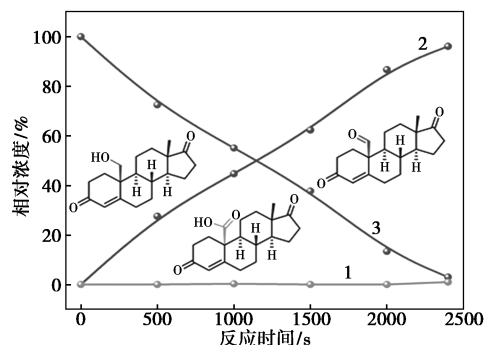


图 3 甾醇连续流式电解槽示意图



(a) LSV 曲线



(b) 甾醇电氧化产物转化曲线

1—NiFe-MOF+1a; 2—ACT+1a; 3—NiFe-MOF+ACT+1a

图 4 Cu-PBA 催化剂甾醇连续电解体系中的 LSV 曲线和产物转化曲线

2.2 多元醇的选择性电氧化及其在药物中间体构建中的应用

多元醇(含 2 个及以上羟基)作为可再生生物质平台分子的核心代表,选择性电氧化不仅关系到碳资源的高效利用,也直接关联医药、营养及精细化工领域关键中间体的绿色制备。由于这类分子常含伯/仲醇共存位点、C—C 键稳定性差异显著且多步脱氢路径交错,使其电催化反应在选择性调控上具有普遍挑战^[28]。

乙二醇作为典型的小分子多元醇,受到广泛关注。基于对 C₂→C₁ 转化路径的深入探索,如图 5 所示, Liu 等^[29]开发了结构稳定的 NiFe-sc-PBA,可在安培级电流密度下以 98.5% 的法拉第效率将乙二

醇选择性转化为甲酸,并连续稳定运行超 500 h。其关键机制在于乙二醇分子在催化剂表面形成的自富集层,有效抑制活性位点氧化重构并避免析氧反应竞争。所得高纯甲酸作为 C_1 单元具有重要医药化学价值,使该体系在绿色制药原料电合成中具有应用潜力。

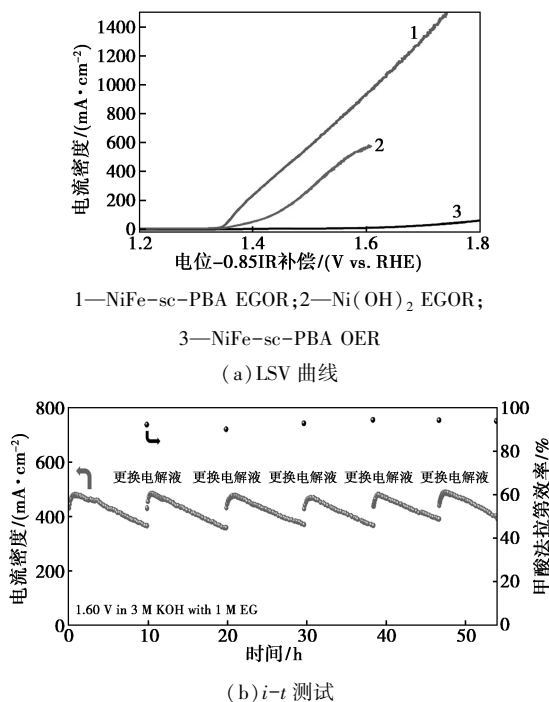


图5 NiFe-sc-PBA 催化剂乙二醇连续电解体系中的 LSV 曲线以及恒电位稳定性曲线

甘油作为更高碳数的 C_3 多元醇成为验证 NiFe 基催化剂选择性调控能力的重要体系。在甘油的深度断裂与定向产物控制方面, Kim 等^[26]报道了一种基于 Ni 和 NiFe 层状双氢氧化物(LDH)的电催化体系,可在碱性条件下高效、高选择性地甘油电氧化为甲酸。研究发现, NiFe-LDH 在 1.45 V vs. RHE 下实现 93% 的甲酸法拉第效率,显著优于纯 Ni-LDH (约 68%),且在 100 mA/cm² 电流密度下稳定运行超过 24 h。依托甘油这一廉价生物质原料直接制备高纯甲酸,为生物质电精炼和绿色制药的融合提供了可行路径。

更高碳数且含多手性中心的糖类(如葡萄糖)进一步考验催化剂在多位点、多路径反应中的选择性操控能力。Tayebi 等^[30]开发了一种 Ta 掺杂的 NiFe LDH 电极,用于葡萄糖电氧化耦合制氢。在 1 mol/L KOH+0.1 mol/L 葡萄糖中,仅需 1.32 V vs. RHE 即可驱动阳极葡萄糖氧化反应达 100 mA/cm²,远低于析氧电位。转化率>99%,选择性>95%,法拉第效率高达 94.3%,系统总电压较常规水电解降低

约 280 mV。葡萄糖酸及其盐类在补铁补钙制剂、伤口敷料及医药辅料中具有广泛应用,使该电化学生径具有显著的产业潜力。

3 总结与展望

NiFe 基催化剂因高活性、高选择性及碱性稳定性,成为有机电氧化反应的重要候选材料。当前通过掺杂、缺陷工程、前驱体重构和异质结构等策略,有效调控其电子结构与动态活性位,提升反应选择性。然而,迈向实际应用仍面临 3 大挑战:一是形貌与结构均一性差,限制机理研究与性能对比,需发展可重复、可放大的前驱体调控方法;二是前驱体重构过程不可控,易导致活性位演变紊乱或结构崩塌,应通过稳定配体、缓释阴离子或空间限域实现重构精准调控;三是长期稳定性不足,尤其在电流密度或有机物底物下易发生 Fe 流失与骨架腐蚀,需强化界面结合、构建稳定三维导电骨架及原位包覆提升耐腐蚀性。总体而言,通过前驱体设计、界面强化和宏观电极工程的协同优化,有望推动 NiFe 体系在实际制氢、电氧化有机物及药物分子转化等领域实现更广泛的应用。

参考文献

- [1] Xu Z, Kovács E. Beyond traditional synthesis: Electrochemical approaches to amine oxidation for nitriles and imines[J]. *ACS Organic & Inorganic Au*, 2024, 4(5): 471-484.
- [2] Chen Y, Fan J, Mo Q, et al. Recent advances in developing aldehyde-accumulating microbes and future perspective of biosynthetic applications[J]. *Synthetic Biology and Engineering*, 2024, 2(4): 10016.
- [3] Li K, Ren L, Li S, et al. Boosting electrocatalytic oxidation of heterocyclic alcohols with low usage aminoxyl radicals via MOF-derived NiOOH[J]. *AIChE J*, 2024, 70(10): e18531.
- [4] Ha M A, Alia S M, Norman A G, et al. Fe-doped Ni-based catalysts surpass Ir-baselines for oxygen evolution due to optimal charge-transfer characteristics[J]. *ACS Catalysis*, 2024, 14(23): 17347-17359.
- [5] Liu Y, Hu H, Wang K, et al. Advancing seawater electrolysis: NiFe-LDH-based electrocatalysts for the oxygen evolution reaction[J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(5): e04101.
- [6] Wang X, Pi W, Hu S, et al. Boosting oxygen evolution reaction performance on NiFe-based catalysts through d-orbital hybridization[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 17(1): 11.
- [7] Wang L, Li J, Meng Q, et al. Facilitating active niooh formation via mo doping towards high-efficiency oxygen evolution[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2024, 14(15): 4166-4173.
- [8] Song L, Zhang D, Miao H, et al. Interstitial atom-doped NiFe alloy as pre-catalysts boost direct seawater oxygen evolution[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2024, 342: 123376.
- [9] Cao Y, Li Z, Yue M, et al. Surface defect engineering of sub-2 nm

- NiFe layered double hydroxide with multiple vacancies induced by alkaline ionic liquid enabling enhanced water oxidation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(16): 11694–11702.
- [10] Qi W, Zeng Y, Wang L, *et al.* Stabilizing amorphous NiFe-based catalysts via borate bridging for water oxidation under industrial conditions[J]. *EES Catalysis*, 2025, 3(6): 1369–1376.
- [11] Du X, Xie W, Wang Y, *et al.* Steering benzyl alcohol electrooxidation coupled with hydrogen evolution via hetero-interface construction[J]. *AIChE Journal*, 2024, 70(8): e18469.
- [12] Song L, Zhang X, Du X, *et al.* Rapid surface reconstruction strategies for oxygen evolution reactions: Chemical grafting of MXene quantum dots on Ni-Co layered double hydroxides [J]. *PCCP*, 2022, 24(40): 24902–24909.
- [13] Wang J, Liu Y, Yang G, *et al.* MXene-assisted NiFe sulfides for high-performance anion exchange membrane seawater electrolysis [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 1319.
- [14] Xing M, Qiao Z, Zhu S, *et al.* Zipper-like interlocked heterostructure of NiFe layered double hydroxide-wn for super-stable oxygen evolution over 4500 h[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(49): 2409559.
- [15] Zhao J W, Yue K, Shi Z X, *et al.* Visualization of the surface reconstruction and dynamic catalytic sites of Ni-Fe catalysts for the oxygen evolution reaction by in situ raman measurements[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(29): 15717–15723.
- [16] Zhang Z, Ren X, Dai W, *et al.* In situ reconstructing NiFe oxalate toward overall water splitting[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(44): 2408754.
- [17] Lin Y, Fang J, Wang W, *et al.* Operando reconstructed molecule fence to stabilize NiFe-based oxygen evolution catalysts [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(30): 2300604.
- [18] Zhao Z, Qin S, Li X, *et al.* Sulfur-facilitated in situ deep reconstruction of transition metal molybdates toward superior electrocatalytic oxidation of alkaline seawater [J]. *Chem Catalysis*, 2024, 4(11): 101144.
- [19] Laan P C M, de Zwart F J, Wilson E M, *et al.* Understanding the oxidative properties of nickel oxyhydroxide in alcohol oxidation reactions[J]. *ACS Catalysis*, 2023, 13(13): 8467–8476.
- [20] Wang M, Li J, Li S, *et al.* Process intensification enhanced continuous flow for the effective coupling of sterol electrooxidation with H₂ evolution using Ni-Mo-based electrocatalysts [J]. *Chem Eng Sci*, 2024, 285: 119589.
- [21] Shi K, Ren Y, Zhou B, *et al.* Electrocatalytic alcohol oxidation to aldehyde through direct dehydrogenation mechanism using a high-performance Pt/Co₃O₄ catalyst [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64(51): e202518122.
- [22] Zhou Q, Song S, Tang K, *et al.* Macroporous NiFe-LDH accelerating highly-selective electrosynthesis of benzaldehyde accompanied with hydrogen production[J]. *Electrochim Acta*, 2024, 487: 144178.
- [23] Shi J, He H, Guo Y, *et al.* Enabling high-efficiency ethanol oxidation on NiFe-LDH via deprotonation promotion and absorption inhibition [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 85: 76–82.
- [24] Liu Z, Xiao T, Wu X, *et al.* Cu-induced Ni³⁺-o active sites in prussian blue analogues enable nearly 100% selective electrooxidation of 5-hydroxymethylfurfural to produce kilogram-scale 2,5-furandicarboxylic acid[J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2025, 378: 125601.
- [25] Xu Y, Li S, Liu L, *et al.* Enhanced electrocatalytic oxidation of sterols using the synergistic effect of NiFe-MOF and aminoxyl radicals [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2024, 40(3): 2305012.
- [26] Kim D, Dang Van C, Lee M S, *et al.* Selective formic acid production in Ni and NiFe layered hydroxides via glycerol electro-oxidation[J]. *ACS Catalysis*, 2024, 14(10): 7717–7725.
- [27] Zhang M, Xu Z, Liu B, *et al.* Anchoring hydroxyl intermediate on NiCo(OOH)_x nanosheets to enable highly efficient electrooxidation of benzyl alcohols[J]. *AIChE J*, 2023, 69(7): e18077.
- [28] Doll K M, Cermak S C. Selective electrochemical oxidation of alcohols catalyzed by partially biobased tempo analogs [J]. *Chemistry Select*, 2022, 7(29): e202201736.
- [29] Liu J K, Kang M, Huang K, *et al.* Stable Ni(II) sites in prussian blue analogue for selective, ampere-level ethylene glycol electrooxidation[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 3458.
- [30] Tayebi M, Masoumi Z, Seo B, *et al.* Production of H₂ and glucaric acid using electrocatalyst glucose oxidation by the Ta NiFe LDH electrode[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(20): 26107–26120. ■
- (上接第 45 页)
- [19] Tang L B, Li P Y, Peng T, *et al.* Double-coated SnS with hierarchical carbon network as high-performance anode materials for sodium-ion batteries[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2023, 928: 117077.
- [20] Zhang L, Ding Y, Jin H, *et al.* MnS/SnS nanocomposite anchored on graphite layers for lithium-ion battery anodes[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 132: 117837.
- [21] Luo J, Xiang S L, Han D Y, *et al.* Interface engineering of Co₉S₈/SnS heterostructure as a high-performance anode for lithium/sodium-ion batteries[J]. *Rare Metals*, 2023, 43(2): 612–623.
- [22] Cheng D, Yang L, Liu J, *et al.* Nano-spatially confined and interface-controlled lithiation-delithiation in an in situ formed (SnS-SnS₂-S)/FLG composite: A route to an ultrafast and cycle-stable anode for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(25): 15320–15332.
- [23] Zhou X, Wu Q, Ma E, *et al.* Litchi-like Sn-MOF derived SnS₂@SC composite as an advanced anode material for lithium-ion batteries [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 686: 162116.
- [24] Sheng Y, Zhang X, Lan B, *et al.* MoS₂/SnS₂ synergistically cooperate with graphene to construct high-quality lithium storage anode materials[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 659: 130798.
- [25] Shi Z, Wang B, Zhang Z, *et al.* Hierarchical MXene/SnS₂ with honeycomb architecture for high performance anode material of Li-ion batteries[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 711: 164021.
- [26] Zhou X, Liu X, Xu H, *et al.* SnS₂/SnSe heterostructures on porous carbon skeletons for lithium-ion battery anodes [J]. *Energy & Fuels*, 2025, 39(40): 19496–19504.
- [27] Mohammadi E, Taheri-nassaj E, Shahalizade T, *et al.* Synthesis and electrochemical performance of SnSe/PANI composite as a long-cycle-life lithium-ion battery anode [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2025, 979: 118930.
- [28] Feng W, Wen X, Wang Y, *et al.* Interfacial coupling SnSe₂/SnSe heterostructures as long cyclic anodes of lithium-ion battery [J]. *Advanced Science*, 2022, 10(2): 2204671.
- [29] Liu Y, Lei K, Liu S, *et al.* FeSe_x-SnSe/C nanofibers decorated with selenium-doped carbon nanosheets as advanced anode materials for lithium/potassium ion batteries [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 101: 113994. ■