

双功能 NiFe-LDH/磷化物复合催化剂的构建及其全解水性能研究

杨灏鑫, 陈曙光*

(长沙理工大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要:通过一步电沉积法在泡沫镍上原位构筑 NiFe-LDH/磷化物双功能复合催化剂。对比含磷与不含磷催化剂发现, 磷的引入促进了金属相生成, 降低了 NiFe-LDH 结晶度, 构建了丰富异相界面与氧空位, 并形成了 Ni/Fe 磷化物。在 6 mol/L KOH 中, NFLP 电极于 100 mA/cm² 下的析氢与析氧过电位分别为 202 mV 与 225 mV, 全解水槽压仅 1.666 V, 且稳定性优异。机理表明, 磷的引入增大了电化学活性面积, 并通过形成高活性磷化物及促进还原重构, 显著提升析氢本征活性。该策略为高效非贵金属双功能电解水催化剂的设计提供了新思路。

关键词:电沉积; NiFe-LDH; 磷化物; 全解水; 异相界面

中图分类号: O646

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0264-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.043

Construction of bifunctional NiFe-LDH/phosphide composite catalyst and its overall water splitting performance

YANG Gan-xin, CHEN Shu-guang*

(School of Materials Science and Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In this study, a bifunctional NiFe-LDH/phosphide composite catalyst (NFLP) was in-situ constructed on nickel foam via a one-step electrodeposition method. Comparative analysis with phosphorus-free counterparts revealed that phosphorus incorporation promotes the formation of metallic phases, reduces the crystallinity of NiFe-LDH, generates abundant heterointerfaces and oxygen vacancies, and facilitates the formation of Ni/Fe phosphides. In 6 mol/L KOH, the NFLP electrode exhibited overpotentials of 202 mV and 225 mV for hydrogen evolution reaction and oxygen evolution reaction, respectively, at 100 mA/cm², with a cell voltage of only 1.666 V for overall water splitting, alongside excellent long-term stability. Mechanistic studies indicate that phosphorus not only increases the electrochemically active surface area but also significantly enhances the intrinsic hydrogen evolution activity through the formation of highly active phosphides and the promotion of reductive reconstruction. This heterointerface construction strategy offers a promising route for the design of efficient non-noble metal bifunctional electrocatalysts for water splitting.

Key words: electrodeposition; NiFe-LDH; phosphide; overall water splitting; heterointerface

随着新兴产业对能源需求的持续增长, 全球向可再生能源的转型正面临风光发电间歇性带来的挑战, 从而催生了对大规模储能的迫切需求^[1]。利用可再生电力电解水制取绿氢, 为能源转型提供了一条切实可行的路径; 氢气既可作为长期储能的灵活载体, 又可作为清洁化工原料^[2-3], 有助于实现全面可持续发展与碳中和目标。

高效电解水需要采用高催化活性的电催化剂以降低过电位、减少能耗。然而, 目前商业化贵金属催化剂因成本高昂、资源稀缺等不足, 难以在未来大规模推广应用, 亟需开发高性能、低成本的非贵金属催

化剂^[4]; 若能进一步实现双功能催化, 将有助于降低电解水系统的成本与维护难度。在非贵金属催化剂中, 以 NiFe-LDH 为代表的双金属层状氢氧化物(LDHs)得益于 Fe 对 Ni 的协同作用, 可在低过电位下生成高价态 Ni 物种并伴随晶格氧机制^[5-6], 展现出优异的析氧反应(OER)性能, 但其电导率低、氢中间体吸脱附能垒高, 限制了析氢反应(HER)效率^[7]。过渡金属磷化物(TMPs)如 Ni₂P 等, 因 P 与金属之间合适的电负性差异而具备高导电性与低氢吸附自由能, 被视为高效 HER 催化剂^[8-9]。因此, 将高 OER 活性的双金属层状氢氧化物与高 HER 活

收稿日期: 2026-03-31; 修回日期: 2026-06-29

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2023JJ30017)

作者简介: 杨灏鑫(2000-), 男, 硕士生, 研究方向为电解水用催化剂, 2045314975@qq.com; 陈曙光(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型能源存储与催化材料技术, 通讯联系人, 102181395@qq.com。

性的过渡金属磷化物进行复合,利用异相界面相互作用提升整体性能,是开发高效双功能电催化剂的有效思路。

本文通过一步电沉积法在泡沫镍基体上原位制备了含镍铁氢氧化物/磷化物混合相的催化剂镀层,所得一体化双功能催化剂电极在 6 mol/L KOH 中表现出优异的双功能催化活性:在 100 mA/cm² 电流密度下,HER 和 OER 过电位分别为 202 mV 和 225 mV,全解水所需电压仅为 1.666 V。采用电压-时间法在 100 mA/cm² 下连续运行 100 h,槽压仅增加 22 mV,表明该催化剂具有优异的稳定性。此外,通过含磷与不含磷催化剂的对比研究,发现磷的引入可提高导电性、优化氢吸附自由能、降低镀层结晶度、改善表面形貌与内部结构,显著提升催化剂的活性面积及活性位点的本征活性,从而实现高效双功能电解水。

1 实验部分

1.1 双功能催化剂电极制备

所有化学品购自中国上海国药集团化学试剂有限公司,均为分析纯,整个实验过程中均使用去离子水。

将 135.7 mmol 六水合硫酸镍(NiSO₄·6H₂O)、20.0 mmol 六水合氯化镍(NiCl₂·6H₂O)、70.1 mmol 七水合硫酸亚铁(FeSO₄·7H₂O)、50.0 mmol 氯化铵(NH₄Cl)、0.14 mmol 十二烷基硫酸钠(C₁₂H₂₅NaO₄S)和 10.0 mmol 一水合次亚磷酸钠(NaH₂PO₂·H₂O)溶解于 200.0 mL 去离子水中,用作镀液。使用经盐酸处理的泡沫镍片(1.0 cm×3.0 cm)作为阴极,2 个并联的石墨片(每个 1.0 cm×3.0 cm)作为阳极,置于阴极两侧,保持阳极-阴极间距为 1.5 cm。在恒定温度(25.0±0.5)℃下,以 1.0 A 的电流密度进行电沉积,持续 90.0 s,所得电极标记为 NFLP。为了比较,在其他条件相同,但不添加一水合次亚磷酸钠的镀液中制备了另一种电极,命名为 NFL。NFLP 电极沉积镀层的平均质量负载为 10.05 mg/cm²,NFL 电极为 9.89 mg/cm²。电沉积在 25.0℃ 下进行,以减少镀液中 Fe²⁺ 的氧化,并更好地区分 NaH₂PO₂ 对电镀过程的影响。

1.2 材料表征

X 射线衍射分析,在 Rigaku D/max 2200 衍射仪上进行,使用 Cu K_α 射线(λ=0.154 06 nm),电压 40 kV,电流 40 mA,扫描速度为 1°/min,范围为 5~80°。扫描电子显微镜,在 Tescan MIRA3 显微镜上进行,加

速电压为 20 kV,使用配备 Oxford X-Max20 探测器的能谱仪在 20 kV 下进行 X 射线能量色散谱仪(EDS)分析。透射电子显微镜以及能谱和元素分布分析在 Talos 显微镜上进行,工作电压为 300 kV。X 射线光电子能谱分析(XPS)分析,使用 Thermo Fisher Scientific K-Alpha X 射线光电子能谱仪分析元素的化学状态,采用 Al K_α 射线(12 keV,6 mA)。红外光谱分析,使用 Thermo Scientific Nicolet iS50 光谱仪进行傅里叶变换红外光谱分析。拉曼光谱分析,在室温下使用 Renishaw inVia 系统记录,配备二极管激光器(532 nm,100 mW)。比表面积和孔径分析,氮气吸附-脱附等温线在 77 K 下使用 Novatouch LX2 吸附分析仪测量,测量前在 100℃ 下预处理 3 h。表面电阻分析,使用 ST2258C 四探针测试仪测定薄层电阻。

1.3 电化学性能测试

线性扫描伏安法(LSV,使用 95% iR 补偿)、循环伏安法(CV)和电化学阻抗谱(EIS),均在辰华 CHI604E 电化学工作站上进行。采用标准三电极体系,其中石墨棒作为对电极,Hg/HgO 电极作为参比电极,6 mol/L KOH 作为电解液。Mott-Schottky(MS 曲线)测量在 0.1 mol/L Na₂SO₄ 水溶液中进行,交流振幅为 10 mV。催化剂的稳定性测试采用电压-时间法(V-t 曲线)进行测试,使用的设备为蓝电 CT3001A 电池测试系统。

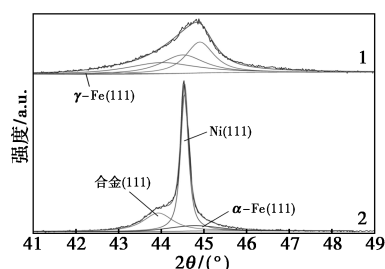
2 结果与讨论

2.1 微观结构与成分分析

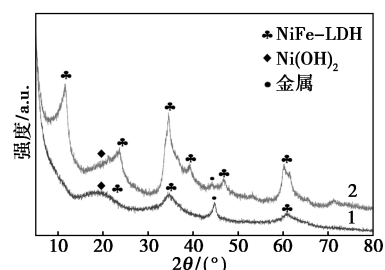
为了研究镀层成分变化及磷源引入的影响,将制备的不含 NaH₂PO₂(NFL)与含 NaH₂PO₂(NFLP)的镀层分别进行剥离、超声分散和磁分离处理,经离心洗涤后获得底部沉积物与悬浮沉淀物两组分。其中,悬浮沉淀物占 NFL 镀层的 5.30%,占 NFLP 镀层的 3.52%,其余质量均归属于各自的底部沉积物。

底部沉积物与悬浮沉淀物的 X 射线衍射(XRD)图谱如图 1 所示。与 NFL 的底部沉积物相比,NFLP 电极底部沉积物中 α-Fe(PDF #87—0722)和 γ-Fe(PDF #52—0513)相的衍射峰显著增强,表明 NFLP 中这 2 相的含量更高。NFLP 的悬浮沉淀物由 NiFe-LDH(PDF #89—0460)、β-Ni(OH)₂(PDF #73—1520)及位于 44.74°附近的金属相组成,而 NFL 的悬浮沉淀物则表现为相对纯净的 NiFe-LDH,β-Ni(OH)₂ 峰较弱,仅在 44.22°处存在一微

弱金属峰。NFLP 中氢氧化物的衍射峰强度明显较低且半高宽更大,表明其结晶度较低。同时,NFLP 中金属峰的峰位较 NFL 发生正移,这与底部沉积物中 α -Fe 含量更高、其衍射峰位于更高角度相一致。镀层剥离过程中发现 NFLP 镀层中悬浮沉淀物含量较低,结合 XRD 结果共同说明 NFLP 中形成了更多金属相(尤其是 α -Fe),且其 NiFe-LDH 中包含了更高比例的金属相与 β -Ni(OH)₂。以上分析证明,NFLP 镀层具有更丰富的异相界面、更高的金属相含量及更低的结晶度。



(a) NFLP 和 NFL 的底部沉积物的 XRD 图谱

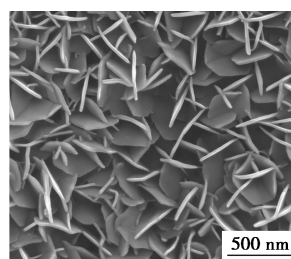


(b) NFLP 和 NFL 的悬浮沉淀物的 XRD 图谱

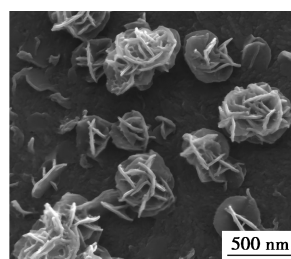
1—NFLP; 2—NFL

图 1 NFLP 和 NFL 的 XRD 图谱

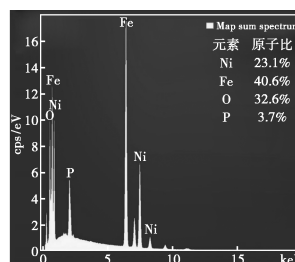
为分析 NFLP 与 NFL 镀层在表面形貌及横截面结构上的差异,对两种电极的镀层表面与截面分别进行了扫描电镜表征。表面 SEM 图像如图 2 所示,NFLP 表面呈现由交错纳米片构成的均匀多孔网络结构,而 NFL 表面则由分散的近球形纳米片聚集体组成。尽管两者镀层负载质量相近,但横截面 SEM 图像(图 3)表明,NFLP 镀层的密度约为 NFL 的 2 倍,厚度仅为 NFL 的一半,截面 EDS 线扫描进一步显示 NFLP 具有更平滑的元素梯度分布,反映出其内部结构更为均匀。元素分布与定量分析表明:NFLP 的 Fe/Ni 原子比超过 NFL 的 2 倍,证实了更多金属 Fe 的形成(与 XRD 结果一致);表面至截面的 O 原子比分别为 1.93(NFLP)与 1.60(NFL),且 O 含量由内向外增加,说明 NiFe-LDH 主要分布于表面;NFLP 中表面至截面的 P 原子比约为 0.59,表明 P 优先富集于内部金属相中。



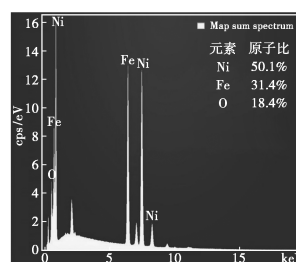
(a) NFLP 的表面 SEM 图像



(b) NFL 的表面 SEM 图像

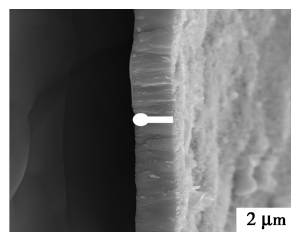


(c) NFLP 的表面元素分布统计

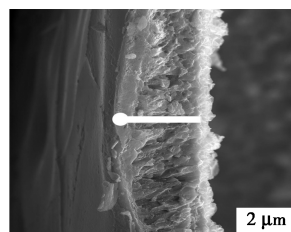


(d) NFL 的表面元素分布统计

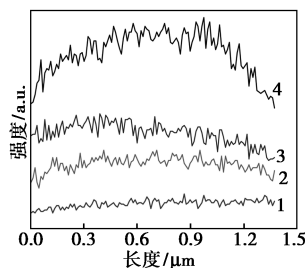
图 2 SEM 图像及表面元素分布统计



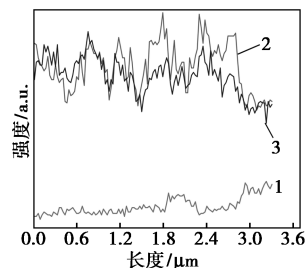
(a) NFLP 的横截面 SEM 图像



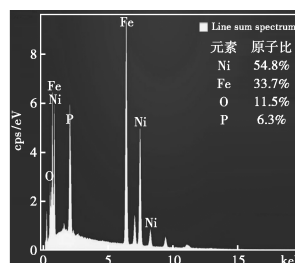
(b) NFL 的横截面 SEM 图像



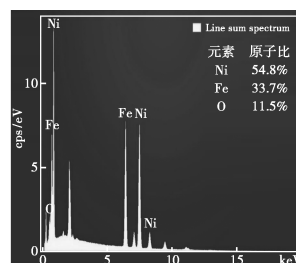
(c) NFLP 横截面 EDS 能谱



(d) NFL 横截面 EDS 能谱



(e) NFLP 横截面元素分布统计



(f) NFL 横截面元素分布统计

图 3 NFLP 和 NFL 的横截面 SEM 图像、横截面 EDS 能谱和横截面元素分布统计

如图 4 所示,对从 NFLP 剥离的悬浮沉淀物中一个纳米片进行了透射电子显微镜分析,图像表明,

NFLP 的 NiFe-LDH 呈现出不规则形状,具有低结晶度。EDS 元素分布图显示 P 原子分数为 4.22%,其分布与 Ni、Fe、O 呈现强烈的空间相关性,证实 P 在 NiFe-LDH 结构内实现了均匀的纳米级分布。

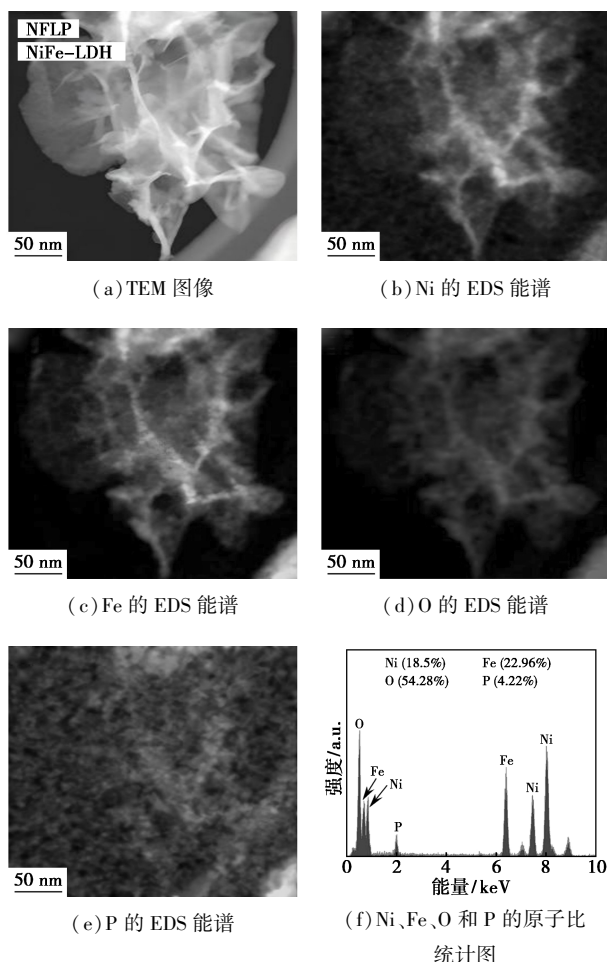


图 4 从 NFLP 剥离的纳米片的 EDS 能谱图及原子比统计图

对 NFLP 与 NFL 电极镀层的 XPS 分析如图 5 所示,阐明了 Ni、Fe、O 的化学状态^[10-12]。根据分峰面积计算,与 NFL 相比,NFLP 中金属物种含量显著提高: Ni^0 物种占比为 13.48%,明显高于 NFL 的 5.59%; Fe^0 物种占比为 28.69%,亦高于 NFL 的 17.61%,该结果与 XRD 数据一致,证实 P 的掺入促进了金属相的形成。此外,NFLP 中氧空位占比达 35.92%^[13],明显高于 NFL 的 22.43%。NFLP 的 P 2p XPS 谱图中,位于 129.44 eV 与 130.40 eV 的峰对应于 P^{3-} —M 键^[14],位于 133.15 eV 的峰归属于 P^{5+} —O 键^[15],证实了 NiFe 磷化物的存在。

从 NFLP 与 NFL 电极表面剥离的悬浮沉淀物的傅里叶变换红外光谱(FT-IR)光谱如图 6(a)所示,NFLP 悬浮沉淀物在 567 cm^{-1} 与 $1\,062\text{ cm}^{-1}$ 处的峰

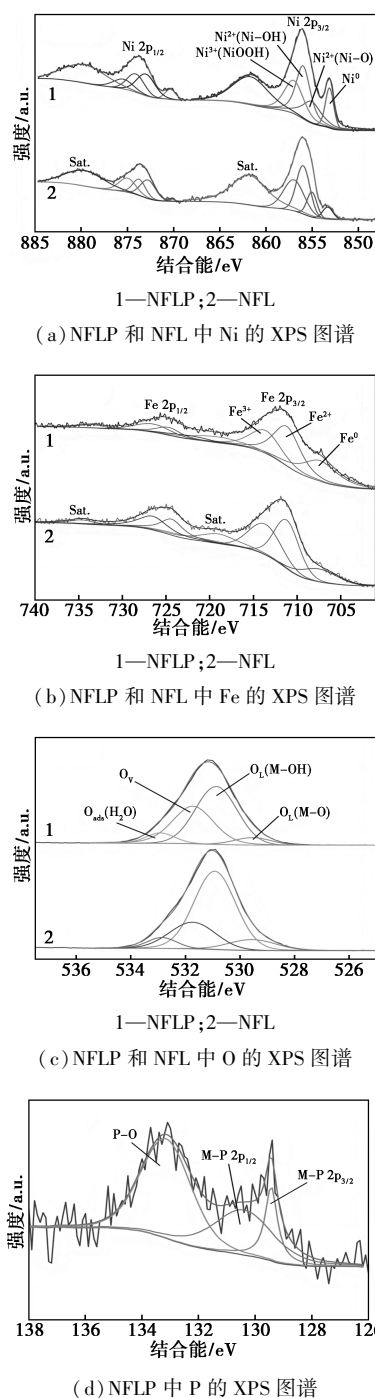
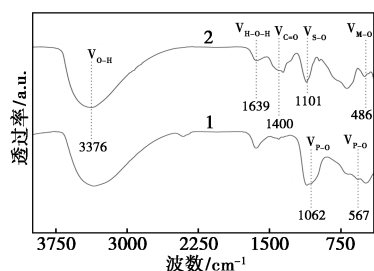


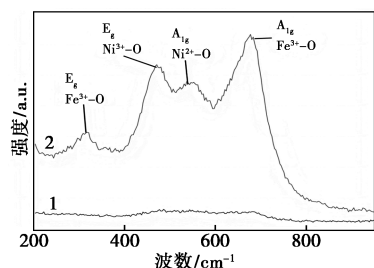
图 5 NFLP 和 NFL 的 XPS 图谱

分别归属于 PO_4^{3-} 的 ν_4 弯曲振动与 ν_3 不对称伸缩振动^[16]。结合 EDS 结果(体相与表面 P 原子比约为 1.69)、XRD 结果(体相主要为 Ni、Fe 金属相,表面主要为 NiFe-LDH),XPS 与 FT-IR 分析共同表明, P^{3-} 主要以 Ni/Fe 磷化物形式掺入金属相中,而 PO_4^{3-} 则作为层间电荷平衡阴离子存在于 NiFe-LDH 片层内。NFLP 与 NFL 电极的拉曼光谱如图 6(b)所示,对应于 Fe^{3+} —O、 Ni^{2+} —O 与 Ni^{3+} —O 的峰^[17-18]在 NFLP 中明显减弱,几乎难以检测,进一

步证实 NFLP 镀层中金属相含量更高、NiFe-LDH 结晶度更低。



(a) NFLP 和 NFL 的悬浮沉淀物的 FT-IR 图谱



(b) NFLP 和 NFL 的拉曼光谱

1—NFLP; 2—NFL

图6 NFLP 和 NFL 中悬浮沉淀物的 FT-IR 图谱和拉曼光谱

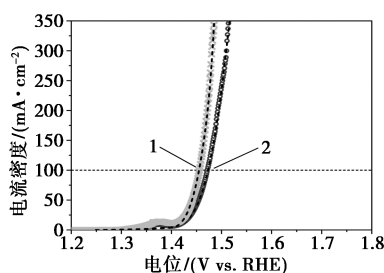
BET 分析结果显示, NFLP 表面悬浮沉淀物的比表面积与总孔体积分别为 $49.16 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $0.16 \text{ cm}^3/\text{g}$, 分别达到了 NFL 的 1.91 倍与 1.78 倍, NFLP

和 NFL 的平均孔径分别为 17.69 nm 与 15.55 nm 。这表明, 尽管 NFLP 镀层在横截面 SEM 图像中显得更为致密, 但其表面 NiFe-LDH 具有更明显的多孔结构, 且孔径属介孔范围, 有利于电解质传输及活性位点的暴露。

NFLP 镀层内部富含致密的金属相, 表面 NiFe-LDH 则富含氧空位, 这种结构特征协同促进电催化过程中的高效电子转移^[13], 面电阻测试结果支持这一结论: NFLP 和 NFL 的面电阻分别为 $4.27 \text{ m}\Omega$ 和 $4.91 \text{ m}\Omega$ 。值得关注的是, NFLP 表面 NiFe-LDH 中还掺入了更高含量的金属相与 $\text{Ni}(\text{OH})_2$, 引入更多相界面与缺陷。低结晶度、高表面能的富缺陷 NiFe-LDH 与电极的高电导率相结合, 在电催化过程中协同作用, 增加电化学活性位点数量。因此, 得益于一体化高导电结构, 同时利用富含氧空位的 NiFe-LDH 的高 OER 活性与 Ni/Fe 磷化物的高 HER 活性, NFLP 电极有望展现优异的双功能催化性能。

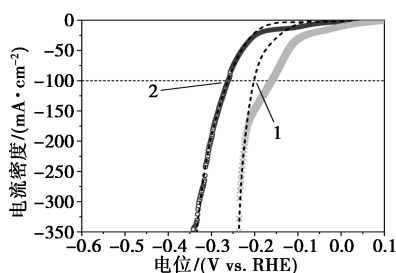
2.2 双功能电极的电化学性能

在 6.0 mol/L KOH 中对双功能电极的性能进行了评估。如图 7(a)、(b) 所示, 在 OER 中, NFLP 在 $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 电流密度下的过电位为 225 mV , 略低于 NFL 的 243 mV ; 而在 HER 中, NFLP 在相同电流密度下的过电位显著降低至 -202 mV , 远低于 NFL 的 -262 mV 。如图 7(c)、(d) 显示, NFLP 的 OER 和



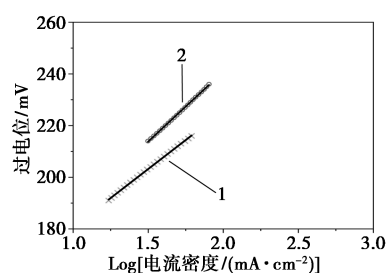
1—NFLP; 2—NFL

(a) NFLP 和 NFL 的析氧反应极化曲线



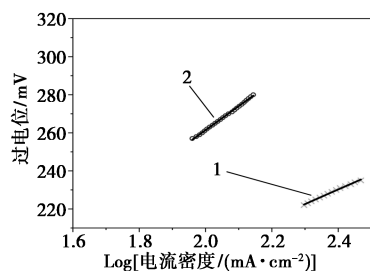
1—NFLP; 2—NFL

(b) NFLP 和 NFL 的析氢反应极化曲线



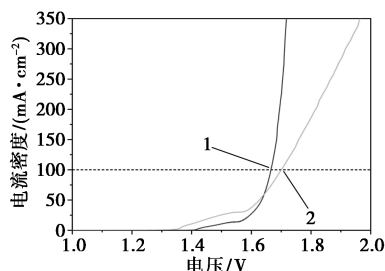
1—NFLP; 2—NFL

(c) NFLP 和 NFL 在析氧反应中的塔菲尔斜率



1—NFLP; 2—NFL

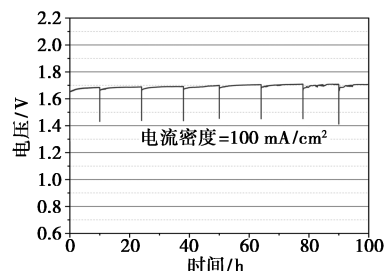
(d) NFLP 和 NFL 在析氢反应中的塔菲尔斜率



1—校正外电路电阻;

2—不校正外电路电阻

(e) NFLP 全解水的极化曲线



(f) NFLP 的稳定性测试曲线

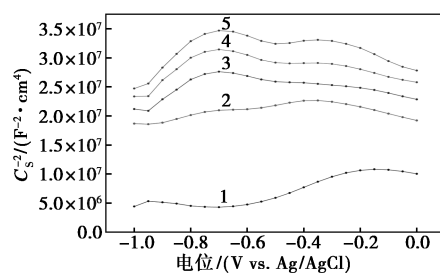
图7 电化学性能分析

HER 的塔菲尔斜率分别为 44.88 mV/dec 和 76.63 mV/dec, 而 NFL 的对应分别为 54.09 mV/dec 和 76.63 mV/dec, 与 NFL 相比, NFLP 在 HER 动力学上的提升明显大于其在 OER 动力学上的变化。上述结果表明, P 的引入显著增强了 HER 活性, 同时对 OER 性能也有一定提升。

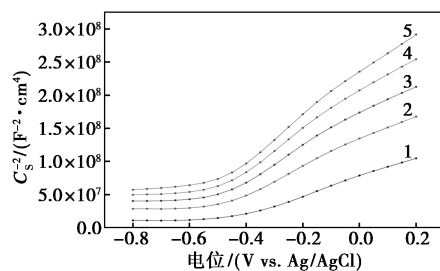
在 $(25.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的 6.0 mol/L KOH 中测试了 NFLP 的全解水性能。全解水 LSV 曲线如图 7(e) 所示, 在校正了外电路电阻的情况下, 达到 $100\text{ mA}/\text{cm}^2$ 电流密度仅需 1.666 V 的驱动电压, 表明 NFLP 具有优异的双功能活性。在相同条件下进行的 100.0 h 计时电位测试如图 7(f) 所示, 电压仅上升 22 mV (从 1.701 V 升至 1.723 V), 平均工作电压低至 1.692 V 证实 NFLP 具有优异的稳定性。

在电化学阻抗谱(EIS)测试中, NFLP 和 NFL 在 OER 中的反应电阻处于同一数量级, 而 NFLP 在 HER 中的反应电阻较 NFL 减少了一个数量级。根据双电层电容计算, NFLP 的电化学活性面积(ECSA)在 OER 中为 NFL 的 1.52 倍, 在 HER 中则高达 NFL 的 6.94 倍。利用 ECSA 对 LSV 曲线进行归一化, 结果显示, 在电流密度达 $1.0\text{ mA}/\text{cm}^2$ 时, NFLP 与 NFL 之间的 OER 过电位差异仅为 4 mV, 而 HER 过电位差异为 20 mV。此外, NFLP 在 OER 中的转化频率(TOF)为 0.076 s^{-1} , 是 NFL 的 1.07 倍, 而 HER 的 TOF 为 0.024 s^{-1} , 达到 NFL 的 3.17 倍。以上结果表明, NFLP 的本征 HER 活性显著高于 NFL, 而其本征 OER 活性与 NFL 相当, 说明 NFLP 的 OER 性能提升主要归因于电化学活性面积增大所带来的活性位点数量增加, 而 HER 性能的显著增强则源于本征活性提升与活性位点数量增多的共同作用。

莫特-肖特基(Mott-Schottky, MS)曲线如图 8 所示, 结果显示, 在相同条件下 NFL 始终保持 n 型半导体行为, 而 NFLP 自首次测试起便迅速由初始的 n 型传导转变为类金属的双极型半导体^[19-20], 表明 NFLP 的活性物种更易发生表面还原重构。金属相是 HER 活性的来源^[21], 因此还原重构能有效提高 HER 活性。此外, 磷的高电负性使 d 带中心下移, 优化了 Ni 与 Fe 位点的电子结构^[22-23], 从而促进电子转移并优化氢吸附自由能。因此, NFLP 本征 HER 活性的显著增强源于高活性的 Ni/Fe 磷化物与重构金属相的协同作用。



(a) NFLP 的 MS 曲线



(b) NFL 的 MS 曲线

1—1 000 Hz; 2—2 000 Hz; 3—3 000 Hz; 4—4 000 Hz; 5—5 000 Hz

图 8 NFLP 和 NFL 的 MS 曲线

3 结论

本文通过一步电沉积法在泡沫镍基体上成功构筑了 NiFe-LDH/磷化物复合催化剂(NFLP), 揭示了磷元素对催化剂结构与性能的影响机制。磷的引入促进了金属相生成, 降低了 NiFe-LDH 结晶度, 构建了丰富的异相界面与氧空位, 并形成了 Ni/Fe 磷化物。该催化剂在 $100\text{ mA}/\text{cm}^2$ 下析氢与析氧过电位分别为 202 mV 与 225 mV, 全解水的槽压仅为 1.666 V, 并表现出优异的长期稳定性。磷通过增大电化学活性面积和提升本征活性显著增强了析氢性能, 而析氧性能的提升主要源于活性位点数量的增加。本研究阐明了 NiFe-LDH/磷化物复合催化剂的构效关系, 为开发高效稳定的非贵金属双功能电解水催化剂提供了可行的设计策略与实验依据。

参考文献

- [1] Ge L, Zhang B, Huang W, *et al.* A review of hydrogen generation, storage, and applications in power system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 75: 109307.
- [2] Mulky L, Srivastava S, Lakshmi T, *et al.* An overview of hydrogen storage technologies-Key challenges and opportunities [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 325: 129710.
- [3] Sebbagh T, Sahin M E, Beldjaatit C, *et al.* Green hydrogen revolution for a sustainable energy future [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2024, 26: 4017-4070.
- [4] Wu T, Yuan H, Xu M, *et al.* Heterostructure engineering of bimetal-

- lic Ni-Fe hydroxide decorated in Nickel sulfides array as bifunctional electrocatalyst for efficient water splitting[J]. Applied Materials Today, 2025, 47: 102945.
- [5] Zheng X, Zhang B, Luna P D, *et al.* Theory-driven design of high-valence metal sites for water oxidation confirmed using in situ soft X-ray absorption[J]. Nature Chemistry, 2018, 10: 149–154.
- [6] Zhu Y, Zhao Y, Xi C, *et al.* Cationic defect engineering induces LOM-enhanced electrocatalysts derived from in situ semi-transformed NiFe-LDH/MOF heterostructure for efficient overall water-splitting[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 298: 112356.
- [7] Hu J, Zhang C, Jiang L, *et al.* Nanohybridization of MoS₂ with layered double hydroxides efficiently synergizes the hydrogen evolution in alkaline media[J]. Joule, 2017, 1: 383–393.
- [8] Zhou J, Huang C, Zhou Q, *et al.* Electronic structure regulation of nickel phosphide for efficient overall water splitting[J]. Inorganic Chemistry, 2022, 61: 9318–9327.
- [9] Hui B, Li J, Lu Y, *et al.* Boosting electrocatalytic hydrogen generation by a renewable porous wood membrane decorated with Fe-doped NiP alloys[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 56: 23–33.
- [10] Wang K, Sun K, Yu T, *et al.* Facile synthesis of nanoporous Ni-Fe-P bifunctional catalysts with high performance for overall water splitting[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7: 2513–2518.
- [11] Bernasconi R, Khalil M I, Cakmakci D S, *et al.* Electrocatalytic layers for hydrogen evolution reaction based on nickel phosphides: Cost-effective fabrication and XPS characterization[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57: 9370–9388.
- [12] Yao S, Forstner V, Menezes P W, *et al.* From an Fe₂P₃ complex to FeP nanoparticles as efficient electrocatalysts for water-splitting[J]. Chemical Science, 2018, 9: 8590–8597.
- [13] Zhang T, Wu M, Yan D, *et al.* Engineering oxygen vacancy on NiO nanorod arrays for alkaline hydrogen evolution[J]. Nano Energy, 2018, 43: 103–109.
- [14] Zhang H, Li X, Hähnel A, *et al.* Bifunctional heterostructure assembly of NiFe LDH nanosheets on NiCoP nanowires for highly efficient and stable overall water splitting[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28: 1706847.
- [15] Yu X, Feng Y, Guan B, *et al.* Carbon coated porous nickel phosphides nanoplates for highly efficient oxygen evolution reaction[J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9: 1246–1250.
- [16] Lou Y, Ba Z, Yuan Z, *et al.* Corncob-inspired synthesis of carbon fiber/PO₄³⁻ intercalated NiFe-LDH hybrid for simultaneously improving flame retardancy and mechanical properties of epoxy resin composites[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 522: 168051.
- [17] Feng Y, Xu C, Hu E, *et al.* Construction of hierarchical FeP/Ni₂P hollow nanospindles for efficient oxygen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 14103.
- [18] Hu R, Fan C, Wang K, *et al.* Synergistic effect of Ce doping and heterointerface engineering of NiCoP/Ce-NiCo LDH for durable and corrosion-resistant electrocatalysis in alkaline freshwater and seawater oxidation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 700: 138590.
- [19] Rajasekar S, Chetty R, Neelakantan L. Low-nickel austenitic stainless steel as an alternative to 316L bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 4: 12413–12423.
- [20] Chen J, Zhao G, Matsuda K, *et al.* Microstructure evolution and corrosion resistance of Ni-Cu-P amorphous coating during crystallization process[J]. Applied Surface Science, 2019, 484: 835–844.
- [21] Chen B, Hu P, Yang F, *et al.* In situ porousized MoS₂ nano islands enhance HER/OER bifunctional electrocatalysis[J]. Small, 2023, 19: 2207177.
- [22] Zhang J, Cui R, Li X, *et al.* A nanohybrids coupling of NiPS₃ canoparticles and defective graphene as a pH-universal electrocatalysts for efficient hydrogen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5: 23536–23542.
- [23] Ipadeola A K, Sliem M H, Mwonga P, *et al.* Rational construction of N-containing carbon sheets atomically doped NiP-CoP nanohybrid electrocatalysts for enhanced green hydrogen and oxygen production[J]. Electrochimica Acta, 2024, 508: 145236. ■

(上接第263页)

- [15] 赵明, 李艳荣. 循环水结垢和腐蚀的机理及其控制[J]. 油气储运, 1998, (2): 25–28, 61.
- [16] Choi Y S, Farelis F, Paolinelli L, *et al.* Effect of H₂S on CO₂ corrosion of mild steel in high-temperature supercritical CO₂ conditions[J]. Corrosion, 2023, 79(9): 1052–1063.
- [17] Ding T C, Sun C, Sun J B, *et al.* A mechanistic model for the corrosion prediction of bare carbon steel in supercritical CO₂-H₂S-Cl⁻ environments[J]. Corrosion Science, 2025, 256: 113161.
- [18] 刘政宇, 曹学乾, 王少龙, 等. 油气开采环境下管道的协同腐蚀及防护研究进展[J]. 中国表面工程, 2023, 36(6): 36–48.
- [19] Karimi S, Tajji I, Hajilou T, *et al.* Role of cementite morphology on corrosion layer formation of high-strength carbon steels in sweet and sour environments[J]. Corrosion Science, 2023, 214: 111031.
- [20] 杨涛, 张丽华, 王建国, 等. CO₂ 驱采及输送防腐研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(5): 23–28.
- [21] 陈堃, 李东昊, 刘春辉, 等. 油田注水系统管路腐蚀及主控因素研究[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(1): 63–67, 74.
- [22] 曹攀, 周婷婷, 白秀琴, 等. 深海环境中的材料腐蚀与防护研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(1): 12–20.
- [23] 梁金强, 王延臻, 贾远远, 等. 高酸原油的加工及防腐工艺的探讨[J]. 现代化工, 2011, 31: 35.
- [24] Sun H Y, Zhong L G, Zhu Y, *et al.* Assessing sulfate-reducing bacteria influence on oilfield safety: Hydrogen sulfide emission and pipeline corrosion failure[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 164: 108646. ■