

CoNi LDH 纳米片自支撑电极的制备与 电解水性能研究

田园园*, 李浩翔, 张建隼, 孙晓慧, 曹俊斌
(山西工学院建筑工程学院, 山西 朔州 036000)

摘要:采用原位生长法制备非贵金属催化剂基自支撑电极,是开发低成本高效电解水电极的有效途径之一。利用一步电沉积法制备了钴镍层状双金属氢氧化物(CoNi LDH)纳米片自支撑电极,通过扫描电子显微镜、X射线衍射仪和X射线光电子能谱仪分析了电极界面催化剂的物相结构。所制备的CoNi LDH纳米片自支撑电极展现出了快速的电化学反应动力学过程和丰富的电催化活性比表面积,在电流密度为100 mA/cm²下的析氢过电位为286 mV,析氧过电位为440 mV,全解水电压为1.96 V。这种采用原位生长法制备CoNi LDH纳米片自支撑电极的工艺为高效电解水电极的开发提供了新的借鉴。

关键词:电解水;析氢反应;析氧反应;CoNi LDH

中图分类号:TQ035

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)10-0109-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.020

Preparation and evaluation of self-supported CoNi LDH nanosheet electrodes for electrolytic water performance

TIAN Yuan-yuan*, LI Hao-xiang, ZHANG Jian-jun, SUN Xiao-hui, CAO Jun-bin
(School of Architectural Engineering, Shanxi College of Technology, Shuozhou 036000, China)

Abstract: The in-situ growth method for preparing self-supported electrodes based on non-noble metal catalysts represents an effective approach to developing cost-effective and high-performance electrodes for water electrolysis. In this study, CoNi LDH nanosheet self-supported electrodes were fabricated by a one-step electrodeposition method. The phase structure of the electrode interface catalyst was analyzed by scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and X-ray photoelectron spectroscopy. The self-supported CoNi LDH nanosheet electrode displayed rapid electrochemical kinetics and a large electrochemically active surface area, achieving an overpotential of 286 mV for the hydrogen evolution reaction and 440 mV for the oxygen evolution reaction at a current density of 100 mA · cm⁻², with an overall water electrolysis voltage of 1.96 V. This method for preparing self-supported CoNi LDH nanosheet electrodes via an in-situ growth process offers a novel reference for the development of high-performance electrocatalytic water-splitting electrodes.

Key words: electrolysis of water; hydrogen evolution reaction; oxygen evolution reaction; CoNi LDH

随着全球能源结构的不断优化以及对低碳排放的强烈需求,开发高效、低成本的清洁能源技术已成为解决能源危机和环境污染问题的关键^[1]。在众多可再生能源资源中,氢气因其高能量密度和零碳排放特性,被认为是未来能源体系的关键组成部分^[2]。电解水制氢技术是绿色氢能开发的关键技术之一,其关键在于开发高效、稳定且经济的电极材料^[3-4]。然而,当前主流的电极制备技术依赖于将贵金属催化剂(如铂、钌等)粉末通过后处理工艺(如喷涂、热压成型等)制备成电极。在这一过程中,通常需要使用高分子导电材料作为粘结剂以确保催化剂在导电基底上的固定^[5-7]。因此,传统电极制备技术导致了电极成本高和稳定性差的问题,进而限制了电解水技术的商业化进程。因此,开发

高性能的非贵金属催化剂以及优化电极制备工艺过程,成为了电解水制氢技术研究领域的重要研究方向之一。

研究表明,钴镍层状双金属氢氧化物(CoNi LDH)因其独特的二维结构、丰富的反应活性位点以及良好的电化学稳定性,被认为是替代贵金属催化剂的理想材料^[8-13]。通过结构调控、元素掺杂、表面修饰等策略,可以显著增强CoNi LDH催化剂在电解水反应中的性能^[14-17]。此外,相较于传统电极制备技术,采用原位生长法制备的自支撑电极能够与导电基底形成更为紧密的键合,从而在高电流密度、长时间析氢的条件下依然保持优异的催化稳定性^[18-20]。因此,结合电极界面的CoNi LDH的结构调控与原位生长法制备工艺的优化,有望实现高性能、低成本

收稿日期:2025-12-17;修回日期:2026-07-24

基金项目:山西省基础研究计划资助项目(202203021222328);山西工学院科研启动经费项目(200101)

作者简介:田园园(1992-),男,博士,副教授,研究方向为新能源材料与器件电解水,通讯联系人,tyy20220418@163.com。

本、高稳定性的电解水电极的设计与制备。

本研究通过一步电沉积技术,在泡沫镍导电基底上原位构建了钴镍层状双金属氢氧化物纳米片自支撑电极,并将其应用于全水解反应。利用X射线衍射仪(XRD)、X射线光电子能谱(XPS)、扫描电子显微镜(SEM)等表征手段,对电极的晶体结构、元素组成及微观形貌进行了详细表征。电解水性能测试结果表明,钴镍层状双金属氢氧化物纳米片的负载显著提升了泡沫镍基底的电化学活性表面积,并加速了反应动力学进程。通过调控电沉积工艺参数,研究发现,当沉积时间为90 min时,所制备的电极在碱性水溶液 100 mA/cm² 的电流密度下,析氢和析氧的过电位分别达到了 286 mV 和 440 mV,全解水电压仅需 1.96 V。本研究提出的一步电沉积法制备 CoNi LDH 纳米片自支撑电极的方法,为开发低成本、高活性、高稳定性的电极材料提供了新的借鉴。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

原料:氯化钴·六水(CoCl₂·6H₂O),山东科源生化有限公司;氯化镍·六水(NiCl₂·6H₂O),天津市风船化学试剂科技有限公司;氯化钠(NaCl),天津市申泰化学试剂有限公司;氨水(NH₃·H₂O)、氢氧化钾(KOH),山东科源生化有限公司;十二烷基磺酸钠(C₁₂H₂₅NaO₃S)上海阿拉丁生化科技股份有限公司;泡沫镍常德力源新材料有限公司;实验用超纯水通过纯水机(Economic-S15)自制获得。实验所涉及的药品均为直接购买后使用,未进一步进行提纯。

仪器:扫描电子显微镜(SEM, JSM-7800F),日本电子株式会社;X射线光电子能谱仪(XPS, Thermo ESCALAB 250),赛默飞世尔科技;X射线衍射仪(XRD, MiniFlex600),日本理学株式会社;电化学工作站(CHI 760F),上海辰华仪器有限公司。

1.2 钴镍层状纳米片自支撑电极的制备

泡沫镍基底的预处理:

将购买的泡沫镍裁剪成 20 mm×40 mm 的矩形,并浸润于 0.1 mol/L HCl 水溶液中超声 15 min 以除去表面的氧化物及杂质;随后将其分别浸润于超纯水、无水乙醇、超纯水中超声 15 min;最后,将其置于氩气气流下干燥备用。

一步电沉积法制备 CoNi LDH 纳米片自支撑电极:

将上述预处理得到的泡沫镍作为工作电极置于标准三电极体系进行电沉积反应,以饱和甘汞电极、碳棒分别作为参比电极和对电极。电解液为 20 mmol/L NiCl₂·6H₂O、80 mmol/L CoCl₂·6H₂O、0.3 mol/L NaCl、0.2 g/L C₁₂H₂₅NaO₃S 的混合溶液,并加入 5 mL NH₃·H₂O 调节 pH。采用 -1.1 V 恒电位模式进行电沉积,沉积时间调控为 20、40、60、90 min 所制备的电极分别命名为 CoNi LDH-1/NF、CoNi LDH-2/NF、CoNi LDH-3/NF、CoNi LDH-4/NF。

1.3 CoNi LDH 纳米片自支撑电极的物相表征

本研究采用扫描电子显微镜和能谱仪分析电极界面催化剂的微观形貌和元素分布及含量。采用X射线衍射仪分析电极界面催化剂的晶体结构,扫描范围设定为 10~90°,扫描速率设定为 10°/min。采用X射线光电子能谱仪分析电极界面催化剂的元素组成及价态。

1.4 电解水性能测试

采用电化学工作站在标准三电极体系中对复合电极的电催化析氢性能进行测试:以 1 mol/L KOH 作为碱性电解液,复合电极为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,石墨碳棒为对电极。在室温环境下进行极化曲线用于表征电极的电解水性能,设定电压扫描速率设定为 10 mV/s。电化学交流阻抗测试用于评估电极的反应动力学过程,过电位设定为 -0.1 V vs.RHE,交流电压的振幅设定为 5 mV,测试频率范围设定为 10⁵~10⁻¹ Hz。采用循环伏安法评估电极的电化学活性比表面积,电容测试区间设定为:0.1~0 V vs.RHE,扫描速率分别设定为 60、80、100、120、150 mV/s。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌及晶体结构分析

采用扫描电子显微镜对 CoNi 层状双金属氢氧化物/泡沫镍(CoNi LDH/NF)电极的微观结构进行了表征。图 1 展示了该电极在不同放大倍数下的扫描电子显微镜(SEM)图像。如图 1(a)、(b)所示,CoNi LDH 纳米片均匀且致密地覆盖在泡沫镍的骨架上。这些 CoNi LDH 纳米片呈半圆盘状结构,并垂直于泡沫镍的骨架排列,其直径约为 2 μm[图 1(c)]。进一步放大观察[图 1(d)],在 50 000 倍的放大倍率下,可以发现 CoNi LDH 纳米片的侧面由更小尺寸的纳米片组成。

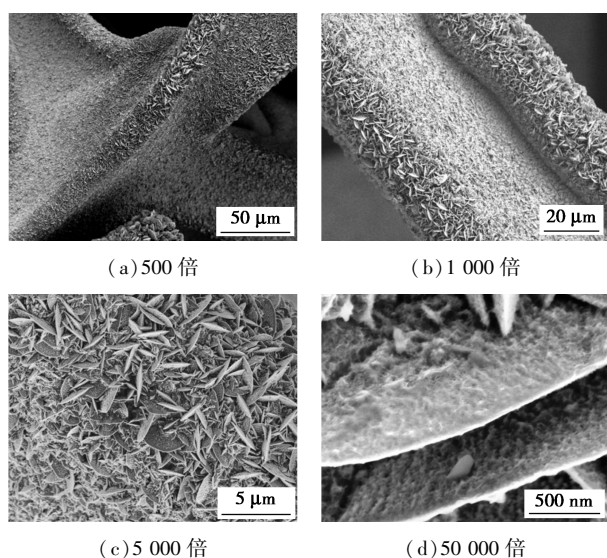
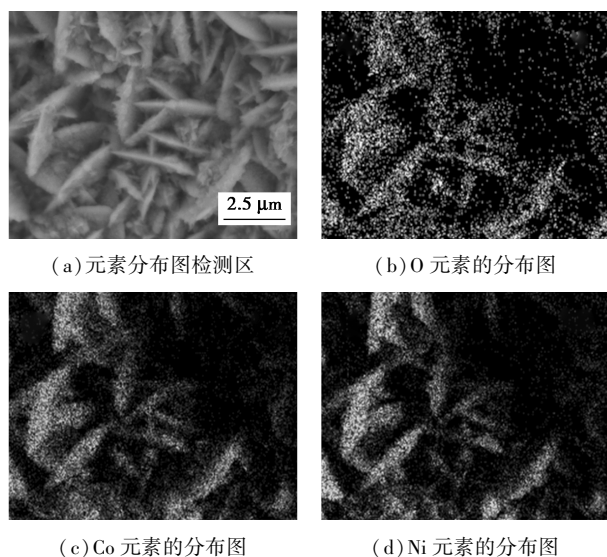
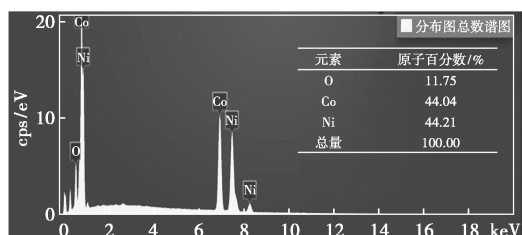


图 1 CoNi LDH/NF 复合电极不同放大倍数下的 SEM 图

CoNi LDH/NF 复合电极的元素分布及能谱图,如图 2 所示。由图 2(a)~(d)可知,O 元素、Co 元素、Ni 元素均匀的分散于被检测区域。图 2(e)为该检测区域的能谱图,可以发现,该检测区域的元素主要为 O、Co、Ni 3 个元素,且 Co 元素、Ni 元素和 O 元素的原子比接近于 4:4:1。



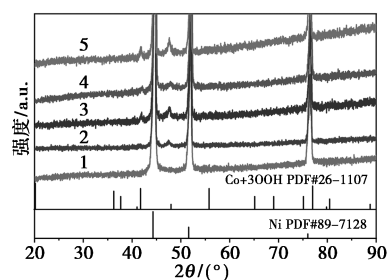
(a)元素分布图检测区 (b)O 元素的分布图 (c)Co 元素的分布图 (d)Ni 元素的分布图



(e)能谱图(内插图为该检测区域的元素原子百分比)

图 2 CoNi LDH/NF 复合电极的元素分布及能谱图

采用 X 射线衍射仪分析了不同电沉积时间制备的 CoNi LDH/NF 电极界面催化剂的晶体结构,如图 3 所示。通过对比标准 PDF 卡片(Ni PDF#89—7128)可知,位于 44.3°、51.7°和 76.1°分别对应于金属镍的(111)、(200)和(220)晶面;通过对比标准 PDF 卡片(Ni PDF#26—1107)可知,位于 41.8°和 48.0°分别对应于 Co^{3+}OOH 的(102)和(103)晶面。由图 3 可知,不同电沉积时间所制备的 CoNi LDH/NF 电极和泡沫镍 NF 基底均出现了尖锐的金属镍的衍射峰,表明了通过一步电沉积法制备的复合电极不影响导电基底 NF 的晶体结构。随着电沉积时间的延长,电沉积法所制备的 CoNi LDH/NF 电极出现了微弱的 Co^{3+}OOH 衍射峰,且随着电沉积时间的延长,衍射峰逐渐增强。此外,并未观察到其他衍射峰,这可能是归因于 CoNi LDH 结晶性差的原因^[21]。



1—NF;2—CoNi LDH-1/NF;3—CoNi LDH-2/NF;
4—CoNi LDH-3/NF;5—CoNi LDH-4/NF

图 3 XRD 图谱

为了进一步表征 CoNi LDH/NF 电极界面催化剂的晶体结构和元素组成,分析了 CoNi LDH/NF 电极的 X 射线光电子能谱,如图 4 所示。由图 4(a)所示,CoNi LDH/NF 电极界面元素主要为 C、Co、Ni 和 O 元素。图 4(b)是 O 1s 高分辨 XPS 图谱,位于 530.5、531.3、532.2 eV 处的衍射峰分别对应于电极界面催化剂的金属-氧键(M—O)、羟基(O—H)和表面化学吸附氧物种(H—O—H)^[22]。图 4(c)是 Co 2p 高分辨 XPS 图谱,位于 781.0、796.4 eV 处的衍射峰分别对应于 $\text{Co}^{3+} 2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$;位于 785.7、798.6 eV 处的衍射峰分别对应于 $\text{Co}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$;位于 790.0、802.9 eV 处的衍射峰对应于金属 Co 的卫星峰^[23]。图 4(d)是 Ni 2p 高分辨 XPS 图谱,位于 855.4、873.1 eV 处的衍射峰分别源自于 $\text{Ni}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$;位于 857.3、875.0 eV 处的衍射峰分别源自于 $\text{Ni}^{3+} 2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$;位于 861.5、879.7 eV 处的衍射峰源自于金属镍的卫星峰^[24-25]。

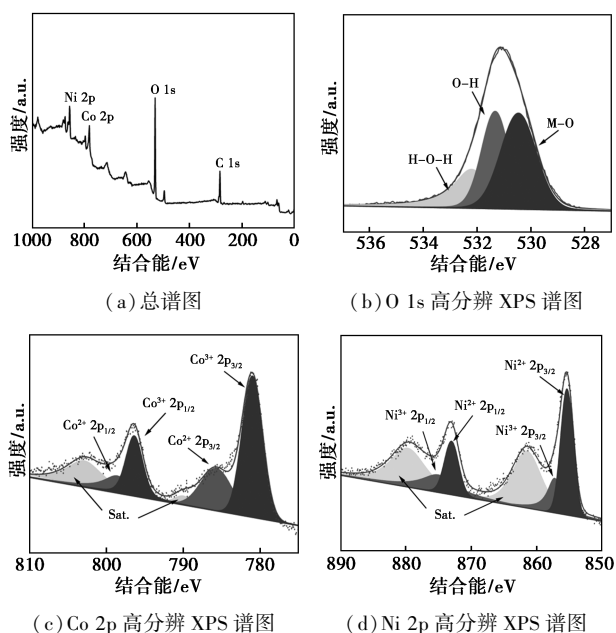
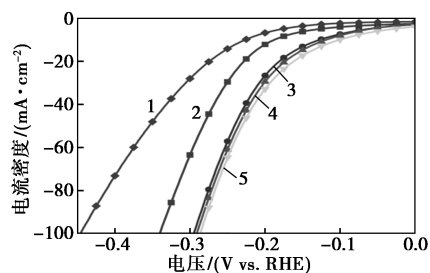


图4 CoNi LDH/NF 电极的X射线光电子能谱图

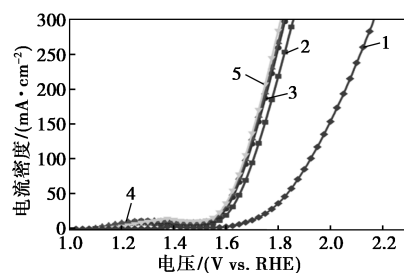
综上,通过分析 CoNi LDH/NF 电极 SEM 图、元素分布及能谱图、X 射线衍射图谱和 X 射线光电子能谱分析,表明了通过简单的一步电沉积法成功地制备了钴镍层状双金属氢氧化物纳米片包覆的泡沫镍自支撑电极。

2.2 电化学性能分析

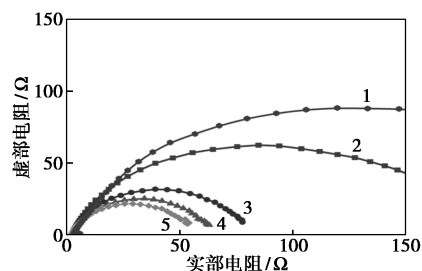
为了表征所制备电极的电解水性能,本文测试了单纯泡沫镍电极 NF 和不同电沉积时间制备的 CoNi LDH/NF 电极的电极极化曲线、交流阻抗和循环伏安测试,如图 5 所示。研究表明,阴极极化曲线与阳极极化曲线是表征电极析氢催化活性与析氧催化活性的有效手段之一^[26]。图 5(a) 是不同电沉积时间制备的 CoNi LDH/NF 电极与泡沫镍电极的阴极极化曲线,单纯泡沫镍电极在 10 mA/cm² 与 100 mA/cm² 的过电位分别为 231 mV 和 446 mV。电沉积包覆 CoNi LDH 纳米片后,电催化析氢性能显著提升,其中电沉积时间为 90 min 所制备的 CoNi LDH-4/NF 电极在 10 mA/cm² 与 100 mA/cm² 的过



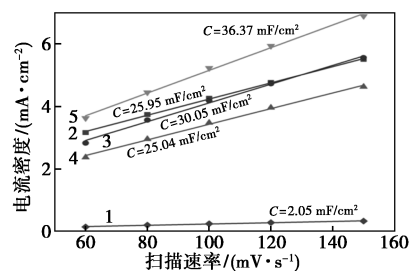
1—NF;2—CoNi LDH-1/NF;3—CoNi LDH-2/NF;
4—CoNi LDH-3/NF;5—CoNi LDH-4/NF
(a) 析氢阴极极化曲线



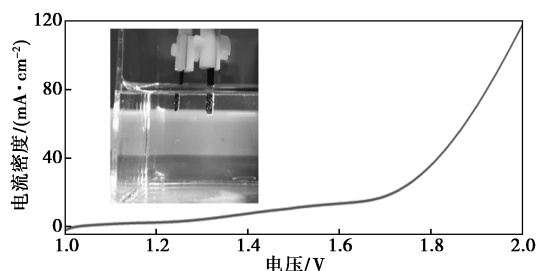
1—NF;2—CoNi LDH-1/NF;3—CoNi LDH-2/NF;
4—CoNi LDH-3/NF;5—CoNi LDH-4/NF
(b) 析氧阳极极化曲线



1—NF;2—CoNi LDH-1/NF;3—CoNi LDH-2/NF;
4—CoNi LDH-3/NF;5—CoNi LDH-4/NF
(c) 双电层电容值



1—NF;2—CoNi LDH-1/NF;3—CoNi LDH-2/NF;
4—CoNi LDH-3/NF;5—CoNi LDH-4/NF
(d) Nyquist 图



(e) CoNi LDH-4/NF||CoNi LDH-4/NF 的全解水性能图
(内插图为实物图)

图5 CoNi LDH/NF 和 NF 电极的电化学性能测试曲线

电位仅为 104,286 mV。图 5(b) 是所制备电极的阳极极化曲线,当电沉积包覆 CoNi LDH 纳米片后,电流密度为 100 mA/cm² 时对应的过电位由单纯泡沫镍的 701 mV 缩减至 440 mV。这表明了 CoNi LDH

纳米片的包覆有效提升了电极的析氢与析氧活性。

为进一步探究电极析氢和析氧的活性提升来源,本文测试了电极在非法拉第反应区间的双电层电容用于估算电极的电化学活性比表面积^[27]。如图 5(c)所示,是 CoNi LDH/NF 自支撑电极和 NF 电极估算的双电层电容值。单纯泡沫镍电极的双电层电容值为 2.05 mF/cm^2 ,所制备的 CoNi LDH/NF 电极的双电层电容显著增大,其中 CoNi LDH-4/NF 电极的双电层电容增大至 36.37 mF/cm^2 。这表明了电沉积包覆 CoNi LDH 纳米片后有效增大了电极的电化学活性比表面积。图 5(d)为所测试电极交流阻抗所导出的 Nyquist 图,可直接反映电极在进行电化学反应时的电解水动力学过程^[28]。由图 5(d)所示,单纯泡沫镍的电荷转移电阻显著大于 CoNi LDH/NF 电极,其中 CoNi LDH-4/NF 电极的电荷转移电阻最小。这表明了通过电沉积包覆 CoNi LDH 纳米片后,电极的电化学动力学过程获得有效提升。将 CoNi LDH-4/NF 电极同时作为电解池的阴极和阳极进行全水解性能探究,如图 5(e)所示,当电压为 2.0 V 时,所制备电极的电流密度可以达到 118 mA/cm^2 ,电流密度为 100 mA/cm^2 时,所需过电位仅需 1.96 V 。这表明了,采用一步电沉积法制备的钴镍层状双金属氢氧化物自支撑电极具备优异的全解水性能。

3 结论

本文采用一步电沉积法成功地在泡沫镍骨架上原位生长了 CoNi LDH 纳米片制备得到 CoNi LDH/NF 自支撑电极,并探究了其电解水性能。实验结果表明 CoNi LDH 纳米片的包覆显著加速了自支撑电极的电解水动力学过程,并丰富了自支撑电极的电化学活性比表面积,从而为电极提供了优异的电解水性能。所制备的 CoNi LDH/NF 自支撑电极在电流密度为 100 mA/cm^2 下,析氢过电位仅为 286 mV ,析氧过电位为 440 mV ,全解水过电位仅为 1.96 V 。这种采用非贵金属催化剂原位制备自支撑电极的方法,为高效发展电解水工艺的开发提供了新的借鉴。

参考文献

- [1] Xie M Y, Ding H, Huang T T, *et al.* Hollow CoFeSe nanocubes supported on NiCoSe nanosheet-decorated Ni foam as electrocatalysts for water splitting[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2025, 8: 6626–6634.
- [2] Chen Y W, Guo J, Chen B M. Oxygen vacancy-induced crystal-amorphous interface in NiFe LDH catalyst for enhanced OER performance[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2025, 69: 106829–106835.
- [3] Li H X, Li G D. Novel palladium-based nanomaterials for multifunctional ORR/OER/HER electrocatalysis[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11: 9383–9400.
- [4] Hu L Y, Li M Y, Wei X Q, *et al.* Modulating interfacial electronic structure of CoNi LDH nanosheets with $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene for enhancing water oxidation catalysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 398: 125605–125610.
- [5] 田园园. 新型光电阴极的制备及其在水解制氢反应的性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [6] Wang J X, Zhang W C, Zheng Z L, *et al.* Dendritic core-shell Ni@Ni(Fe)OOH metal/metal oxyhydroxide electrode for efficient oxygen evolution reaction[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 469: 731–738.
- [7] Lu X Y, Jia L L, Hou M C, *et al.* Tunable heteroassembly of 2D CoNi LDH and Ti_3C_2 nanosheets with enhanced electrocatalytic activity for oxygen evolution[J]. *Nanoscale*, 2025, 17: 1080–1091.
- [8] 张雪茹, 姚尚智, 肖客松, 等. 钴镍合金纳米片分级结构及其双催化电解水性能[J]. *材料科学与工艺*, 2019, 35(4): 23–29.
- [9] Kannakuzhiyil S, Ramakrishnan V, Harsh D, *et al.* Indium-intercalated NiCo LDH on MWCNT as bifunctional electrocatalyst for HER and OER[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 198: 107159–107173.
- [10] Bao E H, Ren X L, Wang Y, *et al.* Advanced hybrid supercapacitors assembled with CoNi LDH nanoflowers and nanosheets as high-performance cathode materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 82: 110535–110544.
- [11] Kordek K, Lorence-Grabska E, Rutkowski P. Tailoring the composition of a one-step electrodeposited Co, Ni/Co, Ni(OH)₂ composite coating for a highly active hydrogen evolution electrode[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2020, 4: 369–379.
- [12] Li H, Chen F, Wu X Y, *et al.* Improved HER/OER performance of $\text{NiS}_2/\text{MoS}_2$ composite modified by CeO_2 and LDH[J]. *Materials*, 2024, 17: 4876–4888.
- [13] Mo J Y, Chen Y W, Guo J, *et al.* Microstructure and oxygen vacancy modulation realizing high OER performance in Co-NiFe LDH[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 42: 111162–111168.
- [14] Shi Y L, Li J Q, Zhang B Y, *et al.* Tuning electronic structure of CoNi LDHs via surface Fe doping for achieving effective oxygen evolution reaction[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 565: 150506–150513.
- [15] Jiao F, Huang J Z, Liu Z H, *et al.* Enhanced electrocatalytic OER activity of FeCo LDH by co-modification with Ce and reducing anions[J]. *CrystEngComm*, 2025, 27(27): 6626–6634.
- [16] Zhi L H, Zhang M M, Tu J B, *et al.* Coordination polymer and layered double hydroxide dual-precursors derived polymetallic phosphides confined in N-doped hierarchical porous carbon nanoflower as a highly efficient bifunctional electrocatalyst for overall water splitting[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 659: 110535.
- [17] Zheng X R, Zhang Y Q, Liu H, *et al.* In situ fabrication of hetero-

- structure on nickel foam with tuned composition for enhancing water-splitting performance[J]. *Small*, 2018, 14: 1803666–1083675.
- [18] Guan J B, Chen W B, Fang Y N, *et al.* Electrospinning derivative fabrication of sandwich structured CNF/Co₃S₄/MoS₂ as self-supported electrodes to accelerate electron transport in HER[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47: 14930–14941.
- [19] Liu Q Q, Liu K H, Huang J F, *et al.* A review of modulation strategies for improving the catalytic performance of transition metal sulfide self-supported electrodes for the hydrogen evolution reaction[J]. *Dalton Transactions*, 2024, 53: 3959–3969.
- [20] Parvin S, Maji M, Majee R, *et al.* Atomic insights into catalyst-substrate interfaces of self-supported electrodes for energy conversion and fuel synthesis[J]. *ACS Catalysis*, 2025, 15: 11818–11851.
- [21] Ye Y, Shan Y, Zhu H L, *et al.* Controllable formation of amorphous structure to improve the oxygen evolution reaction performance of a CoNi LDH[J]. *RSC Advances*, 2023, 13: 2467–2475.
- [22] 薛世翔, 吴攀, 赵亮, 等. NiO@CoFe LDH/NF 纳米片阵列用于高效析氧反应[J]. *材料导报*, 2025, 39: 2404131–2404137.
- [23] Zhang Z F, Meng Y Y, Su H L, *et al.* Controllable design of 3D hierarchical Co/Ni-POM nanoflower compounds supported on Ni foam for the hydrogen evolution reaction[J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45: 11536–11548.
- [24] Hu H T, Zheng Y H, Zhu Y, *et al.* Cactus-like (Ni, Co) Se₂ nanosheets with 3D structure decorated on the conductive substrate for efficient hydrogen evolution reaction[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 679: 132572–132579.
- [25] Yang M H, Liu Q X, Zhang M G, *et al.* Preparation of CoNi-LDH-modified polypropylene-based carbon fiber membranes for flexible supercapacitors[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142: 56716–56726.
- [26] Wei D, Chen L X, Tian L D, *et al.* Hierarchically structured CoNiP/CoNi nanoparticle/graphene/carbon foams as effective bifunctional electrocatalysts for HER and OER[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62: 4987–4994.
- [27] Zhang Y Y, Chen M X, Guo P, *et al.* Magnetic field-enhanced water splitting enabled by bifunctional molybdenum-doped nickel sulfide on nickel foam[J]. *Carbon Energy*, 2023, 5: 351–364.
- [28] Zhang X H, Wu A P, Wang D X, *et al.* Fine-tune the electronic structure in Co-Mo based catalysts to give easily coupled HER and OER catalysts for effective water splitting[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2023, 328: 122474–122488. ■
-
- (上接第108页)
- [16] 李覃, 李斌, 李帅臻, 等. 碳系填充型导电聚氨酯弹性体性能研究[J]. *化工新型材料*, 2019, (5): 68–72.
- [17] 刘亚群, 许佩新, 章连众, 等. 炭系填充型导电复合材料电性能的研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, (2): 126–129.
- [18] 刘远瑞. 填充型导电复合材料的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [19] Amjadi M, Kyung K, Park I, *et al.* Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(11): 1678–1698.
- [20] Jeong S, Cho H, Han S, *et al.* High efficiency, transparent, reusable, and active PM_{2.5} filters by hierarchical ag nanowire percolation network[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(7): 4339–4346.
- [21] Bonyadinejad G, Sarafriz M, Khosravi M, *et al.* Electrochemical degradation of the Acid Orange 10 dye on a Ti/PbO₂ anode assessed by response surface methodology[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33(1): 189–196.
- [22] Jarda K, Dirany A, Drogui P, *et al.* Statistical optimization of electrochemical oxidation of ethylene glycol using response surface methodology[J]. *Process Safety & Environmental Protection*, 2017, 105: 12–20.
- [23] Qi I, Liu G, Zhang Z, *et al.* Optimization of green extraction process of cinnamomum camphora fruit dye and its performance by response surface methodology[J]. *BioResources*, 2023, 18(3): 4916–4934.
- [24] 蒋玉思, 曹洪杨, 高远, 等. 钛基金属氧化物电极失效机制与耐久性改进进展[J]. *稀有金属*, 2025, (2): 247–258.
- [25] Joint Committee on Powder Diffraction Standards. JCPDS Powder Diffraction File Card No. 44-1294[CP/OL]. Pennsylvania: International Centre for Diffraction Data, 1996.
- [26] Houk L. Effects of Sb doping level on the properties of Ti/SnO₂-Sb electrodes prepared using ultrasonic spray pyrolysis[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 34(1/3): 312–317. ■

蓝星安迪苏获巴西可持续发展奖项

近日,蓝星安迪苏凭借创新性 SustainWay 服务,荣获巴西库鲁卡可持续发展奖,彰显公司在推动动物营养健康、引领行业可持续变革方面的坚定承诺与卓越实力。

SustainWay 服务是蓝星安迪苏赋能畜牧业绿色转型

的核心解决方案,以科学专长、精准数据和深度协作为支柱,通过优化饲料配方、降低氮磷排放,帮助客户将可持续发展目标转化为可量化、可落地行动,在保障生产效率和市场竞争力的同时提升环境绩效。(蓝星安迪苏)