

一种钼金属掺杂的硒化镍纳米材料的构筑及其电解水性能研究

杨天琦, 王敏敏*

南通大学化学化工学院, 江苏 南通

收稿日期: 2024年5月15日; 录用日期: 2024年8月5日; 发布日期: 2024年8月16日

摘要

电解水产氢作为一种可持续的清洁能源生产方式, 开发更加高效稳定的电催化材料对于促进可再生能源的发展具有重要的意义。硒化镍化合物作为一种新型的电催化剂材料, 近年来受到了广泛的关注。与其它常见金属催化剂相比, 硒化镍化合物有许多优势, 例如更高的化学稳定性和较大的化学电导率, 而且, 硒化镍化合物具有可调节的导电性、表面积和表面化学活性, 使其在水电解反应中展现出良好的电催化性能。掺杂钼的硒化镍纳米材料已经显示出对析氢反应的有希望的催化活性, 使它们成为用于水电解的潜在候选材料。钼金属掺杂硒化镍纳米材料的构建及其电解水性能是材料科学和能源研究领域中的重要意义和价值的课题。本工作合成了一种Mo-Ni₅Se₅三维孔洞纳米材料, 该材料是在Ni₅Se₅材料上使用含Mo溶液进行离子交换得到了。正如预期的那样, 我们所制备的这种材料在HER/OER方面都显示了良好的电催化全解水性能。这些发现为未来钼基硒化镍材料的工业化应用提供了一种优秀的思路。

关键词

钼基化合物, 电催化, 硒化镍, 纳米材料, 离子交换

Construction of a Molybdenum Metal Doped Nickel Selenide Nanomaterial and Its Water Electrolysis Performance

Tianqi Yang, Minmin Wang*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: May 15th, 2024; accepted: Aug. 5th, 2024; published: Aug. 16th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 杨天琦, 王敏敏. 一种钼金属掺杂的硒化镍纳米材料的构筑及其电解水性能研究[J]. 物理化学进展, 2024, 13(3): 367-374. DOI: 10.12677/japc.2024.133042

Abstract

As a sustainable and clean energy production method, the development of more efficient and stable electrocatalytic materials is of great significance to promote the development of renewable energy. Nickel selenide, as a new kind of electrocatalyst material, has received extensive attention in recent years. Compared with other common metal catalysts, nickel selenide compounds have many advantages, such as higher chemical stability and greater chemical conductivity, and nickel selenide compounds have adjustable electrical conductivity, surface area and surface chemical activity, so that they show good electrocatalytic properties in the water electrohydrolysis reaction. Molybdenum doped nickel selenide nanomaterials have shown promising catalytic activity for hydrogen evolution reactions, making them potential candidates for use in hydroelectrolysis. The construction of molybdenum metal-doped nickel selenide nanomaterials and their water electrolysis performance are important and valuable topics in the field of materials science and energy research. In this work, Mo-Ni₅Se₅ three-dimensional porous nanomaterial was synthesized. The nanomaterial was obtained by ion exchange with Mo solution on Ni₅Se₅ material. As expected, the nanomaterials we have prepared have shown good electrocatalytic properties in HER/OER. These findings provide an excellent idea for the industrial application of molybdenum-based nickel selenide materials in the future.

Keywords

Molybdenum Based Compounds, Electrocatalysis, Nickel Selenide, Nanomaterials, Ion Exchange

Copyright © 2024 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

随着对高效和可持续能源的需求持续增长,化石燃料的枯竭,全球能源危机的不断逼近,开发可持续和可再生的能源至关重要[1]。电解水制氢作为一种重要的可持续的清洁能源生产方式,可以通过将水解成氢气和氧气,将电能转化为化学能[2][3]。电催化技术是实现水分解产氢的一种重要途径,因此寻求一种能够高效稳定的电催化材料对于实现新能源转型具有非常重要意义[4]。迄今为止,铂被认为是最有效的电催化剂,但由于其稀少和昂贵的价格,限制了电解水制氢的商业化大规模应用[5][6]。与之相反,钼作为常见的多金属掺杂材料中的金属元素之一,其单质是一种廉价、丰富的金属,被广泛应用于电催化产氢领域[7]。同时钼基化合物作为一种新型的电催化剂材料,近年来受到了广泛的关注[8][9]。与其它常见金属催化剂相比,钼基化合物有许多优势,例如更高的化学稳定性和较大的化学电导率,而且,钼基化合物具有可调节的导电性、表面积和表面化学活性,使其在水电解反应中展现出良好的电催化性能[10]。开发先进的电解水催化剂材料对于推动向清洁能源技术过渡至关重要。与此同时,硒化镍在低过电位下表现出良好的电催化活性,具有较高的电导率和本征催化活性,所以钼金属掺杂硒化镍纳米材料的构建及其电解水性能是材料科学和能源研究领域具有重要意义和价值的课题[11][12]。掺杂钼的硒化镍纳米材料已经显示出对析氢反应的有希望的催化活性,使它们成为用于水电解的潜在候选材料[13][14]。

在过去几十年里,过度金属硒化物被认为是电催化效率最高的电催化材料之一,其性能可市面上常见的过渡金属电催化剂媲美,如 NiSe, NiSe₂ 已被广泛研究于 HER 和 OER 中,并且取得了不错的成果

[15]。研究表明, 单金属化合物对于 HER 表现出较差的电催化性能, 为此优化其电子结构或通过合金化过渡金属来增加其活性位点的数量。由于金属之间的协同效应, 双金属电催化剂具有良好的 HER 效应[16][17]。

钼掺杂的硒化镍材料在电解水制氢领域中展现出了显著的应用潜力, 主要得益于其优异的电催化性能[18]。硒化镍本身就是一种有效的催化剂, 因为它具有良好的导电性和化学稳定性。当钼元素掺杂进硒化镍结构时, 可以进一步改善材料的电子结构和催化活性[19][20]。钼掺杂带来的电子结构调整能够提供更多的活性位点, 并优化电荷分布, 这对于加速水分解反应中的氢气释放尤为关键[21]。此外, 钼掺杂还能增强材料的耐腐蚀性和长期稳定性, 这对于实际应用中的耐用性要求极为重要[22][23]。钼掺杂的硒化镍材料能够在较低过电位下实现高效的水分解, 这意味着在实际操作中能够降低能耗, 提高整体的能效比。这一特性使得钼掺杂硒化镍成为一种非常有前景的电解水制氢催化剂。在实验研究中, 该材料展示了优于许多传统催化材料的活性和稳定性, 特别是在碱性环境中的表现尤为突出[24]。此外, 钼掺杂的硒化镍材料的制备过程相对简单, 可以通过化学沉积或热处理等方法实现, 这为大规模生产和商业化应用提供了可能[25]。总体来说, 钼掺杂的硒化镍材料因其卓越的催化性能和良好的经济性, 预示着在可持续能源领域, 尤其是在清洁能源的生产中, 具有重要的应用前景。

本工作合成了一种 Mo-Ni₅Se₅ 材料, 所合成的材料展现出优异的电催化性能用于电催化全解水反应。经过测试, 所制备的材料展示出较好的电催化性能, 其高本征活性和优异的电导率为高效的催化反应提供了潜力。未来的研究将集中在进一步优化多金属掺杂材料的合成方法, 深入理解其催化机制, 并提高催化剂的稳定性和可持续性。这将有助于推动电催化全解水技术的发展, 为清洁能源领域的应用做出重要贡献。

2. 实验部分

2.1. 主要试剂

氢氧化钾(分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司), 五氯化钼(分析纯, 上海迈瑞尔化学技术有限公司), 无水乙醇(分析纯, 上海阿拉丁试剂有限公司), 硒粉(分析纯, 上海迈瑞尔化学技术有限公司)。

2.2. Mo-Ni₅Se₅ 的合成

本文主要采用离子交换法得到 Mo-Ni₅Se₅, 具体如下所示, 将泡沫镍(NF)切成 1 cm × 3 cm, 在 3 mol/L HCl 溶液中超声处理 30 分钟去除表面氧化层, 然后用乙醇和超纯水洗涤各 10 分钟, 最后将处理过的 NF 放入 60°C 烘箱中干燥 12 小时, 得到预处理的 NF。随后将 0.5 g 硒粉置于瓷舟上游, 下游放置处理好的泡沫镍, 置于管式炉中。在连续 N₂ 流动条件下, 将管式炉加热至 450°C, 升温速率为 2 °C·min⁻¹, 保温 2 h。最后, 洗涤泡沫镍, 在 60°C 的真空烘箱中干燥过夜, 最后, 冷却至室温得到 Ni₅Se₅/NF。

配置 0.1 M MoCl₅ 的乙醇溶液, 将制备好的 Ni₅Se₅/NF 放入其中, 浸泡 24 h, 取出并且洗涤泡沫镍, 在 60°C 的真空烘箱中干燥过夜, 最后, 冷却至室温得到 Mo-Ni₅Se₅。

2.3. 结构与形貌表征

用 X 射线粉末衍射在 2θ 范围内(10°~90°)扫描样品, 扫描速度为 5 °·min⁻¹。并使用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察形貌。

2.4. 电化学表征

所有电化学测试都采用传统的三电极系统。在室温下, 运用电化学工作站(CHI 660E)在 1 M KOH 电

解液里进行测试。将 Ag/AgCl (饱和 KCl) 作为参比电极, 碳棒为对电极, 制备的 $1 \times 1 \text{ cm}$ NF 基电极为工作电极。用线性扫描伏安法记录极化曲线, 将扫描速率设定为 5.0 mV s^{-1} 。所有初始数据都用红外补偿校正, 并将电位转移到可逆氢电极(RHE)。在相同的三电极和 1 M KOH 电解液上进行电化学阻抗谱(EIS), 频率范围为 $0.01 \sim 10^5 \text{ Hz}$, 振幅为 10 mV 。利用 CV 计算不同扫描速率($20 \sim 60 \text{ mV s}^{-1}$)下的电化学表面积(ECSA)。

3. 结果与讨论

3.1. Mo-Ni₅Se₅ 材料的物理表征

采用离子交换法, 在 Ni₅Se₅ 上成功地生长了 Mo-Ni₅Se₅ 三维孔洞结构。

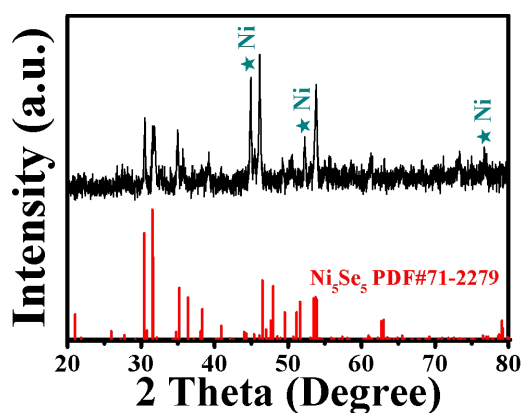


Figure 1. XRD pattern of Mo-Ni₅Se₅

图 1. Mo-Ni₅Se₅ 的 XRD 图

制备的催化剂对应的粉末 X 射线衍射(XRD)图谱如图 1 所示, 经过查阅文献可知, 衍射峰与文献所假设的各晶面可以很好地匹配。Mo 离子掺杂之后, 其 XRD 于原本的 Ni₅Se₅/NF 没有发生变化。

3.2. Mo-Ni₅Se₅ 催化剂的形貌表征

图 2 中的 SEM 扫描照片所示, 所制备的 Mo-Ni₅Se₅ 和 Ni₅Se₅/NF 前驱体均为三维孔洞纳米结构, 这种形态不仅增加了催化剂的比表面积, 还进一步提高了 NF 的亲水性, 更有利于后续浸渍中 Mo 的掺杂。离子交换之后的材料仍然保持了这种具备高比表面积的形貌, 是取得优异性能的关键因素。

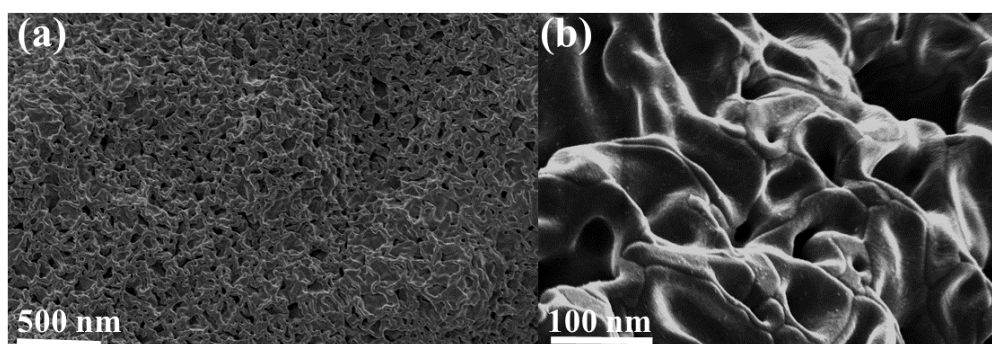


Figure 2. (a) SEM images of Ni₅Se₅/NF; (b) SEM images of Mo-Ni₅Se₅.

图 2. (a) Ni₅Se₅ 的 SEM 图; (b) Mo-Ni₅Se₅ 的 SEM 图

3.3. Mo-Ni₅Se₅ 的催化性能测试

在 1 M KOH 溶液中对制备的电催化剂的析氧性能进行研究。如图 3(a)所示, 通过线性扫描伏安法 (LSV)测试三种不同催化剂的 OER 性能。由此可以发现三种材料的 OER 性能是有区别的。从图中可以看出复合材料 Mo-Ni₅Se₅ 的析氧性能显然更好。在相同电压下, Mo-Ni₅Se₅ 电流密度更高, 说明钼掺杂的 Mo-Ni₅Se₅ 的催化活性相比 Ni₅Se₅/NF 更好。图 3(b)是在电化学交流阻抗(EIS)测试下得到的电化学阻抗谱。从图中可以看出 Mo-Ni₅Se₅ 相比于 Ni₅Se₅/NF 和 NF 的半径更小, 表明 Mo 元素的掺杂改善了材料的导电能力, 有效的降低了电荷转移电阻并且提高了性能。为进一步探究催化剂的结构特点, 进行了 C_{dl}测试, C_{dl}的大小能够反映出电化学表面积(ESCA)的大小。从图 3(c)可以知道, Mo-Ni₅Se₅ 样品的 C_{dl} 约为 222.71 mF cm⁻², 具有最大的双电层电容, 表示它有更高的电化学活性面积, 从而说明该材料对 OER 具有很好的催化活性。

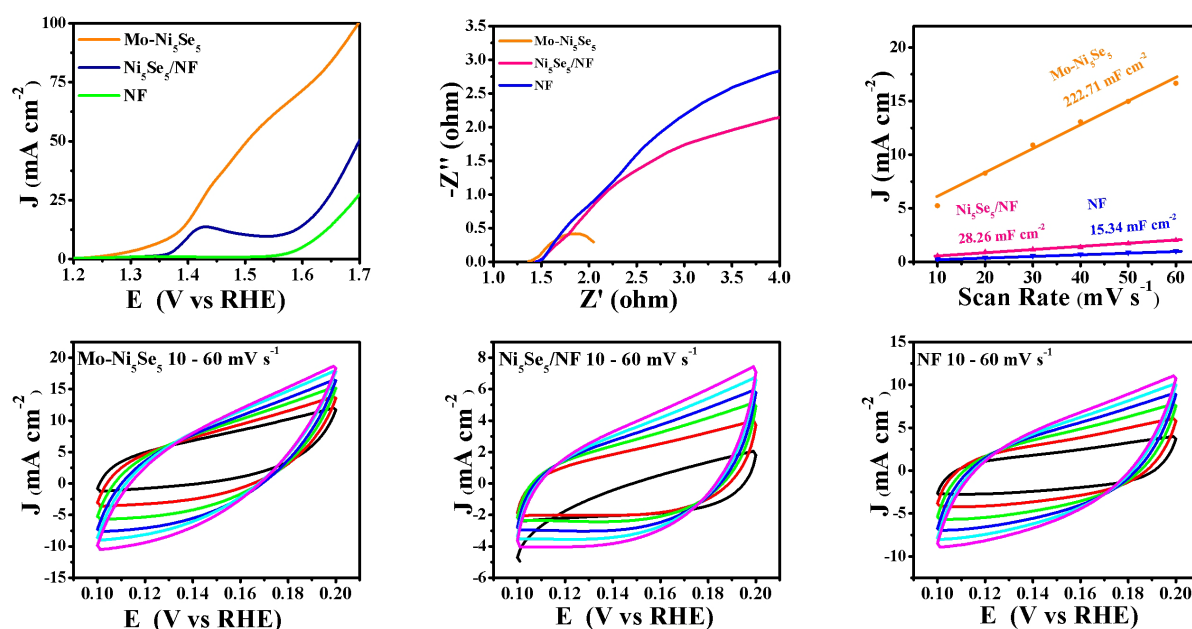


Figure 3. (a) Polarization curves of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF, NF; (b) Electrochemical impedance spectra of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF, NF; (c) C_{dl} value diagram of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF and NF; (d)~(f) represents the cyclic voltammety curves of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF and NF at different scanning rates, respectively.

图 3. (a) Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 的极化曲线; (b) Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 的电化学阻抗谱; (c) Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 的双层电容; (d)~(f) 分别表示 Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 在不同扫描速率下的循环伏安曲线

为深入探究所制备的电催化剂的 HER 性能。如图 4(a)表示了三种材料的 LSV 曲线。从图中可见, 钼掺杂的复合材料 Mo-Ni₅Se₅ 的电流密度相对于其他两个材料有显著的提高, 这说明所制备的材料与前驱体相比具备更好的催化活性。利用电化学阻抗谱(EIS)可以测试催化剂的 HER 性能。图 4(b)是在 1.0 M KOH 溶液中测试得到的 Nyquist 图。电荷转移电阻(R_{ct})越小, 说明催化剂表面的电化学反应动力学越快。明显地, Mo-Ni₅Se₅ 的 R_{ct} 值远远小于其他两个纯催化剂的 R_{ct} 值, 由此可以进一步判断钼元素的掺杂使得催化剂材料在 OER 过程中的电子传输效率。另外, 计算了催化剂的双电层电容(C_{dl})。从图 4(c)~(f)可以看出, Mo-Ni₅Se₅ 的双电层电容达到了 150 mF cm⁻², 相较于其他两种前驱体表现出了更高的双电层电容(C_{dl}), 表示它具有更高的电化学活性面积并且暴露出了更多的活性位点。所有结果都表明了, 合成的复合材料 Mo-Ni₅Se₅ 对析氢具有很高的催化性能。

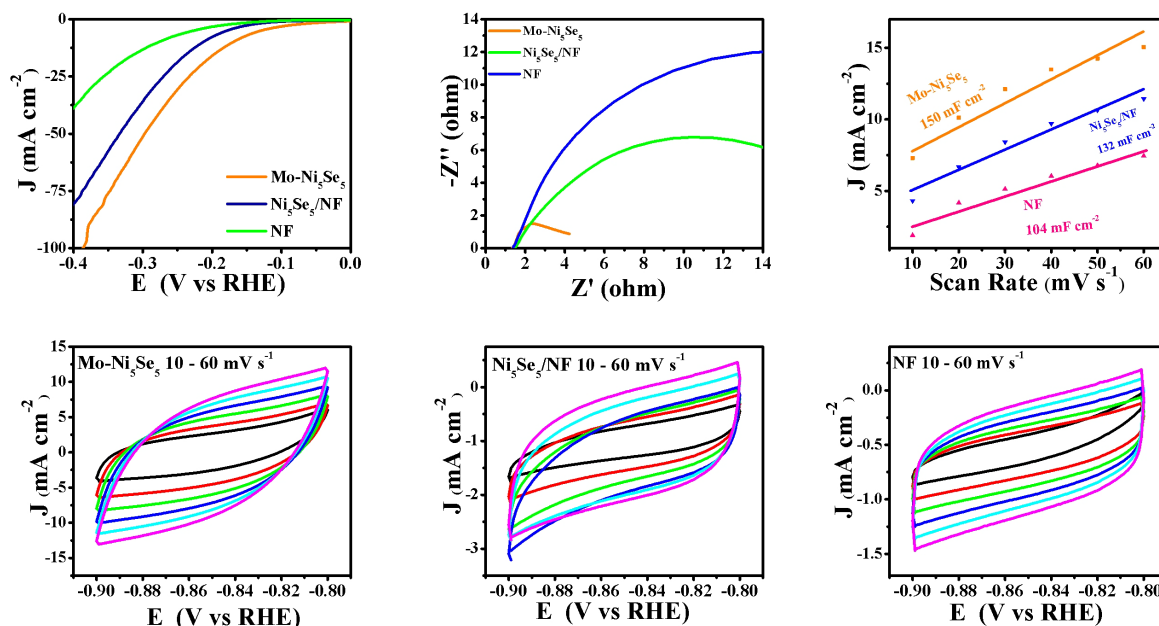


Figure 4. a) Polarization curves of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF, NF; b) Electrochemical impedance spectra of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF, NF; c) C_{dl} value diagram of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF and NF; d~f) represents the cyclic voltammetry curves of Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅/NF and NF at different scanning rates, respectively.

图 4. a) Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 的极化曲线; b) Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 的电化学阻抗谱; c) Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 的双层电容; d~f) 分别表示 Mo-Ni₅Se₅、Ni₅Se₅/NF、NF 在不同扫描速率下的循环伏安曲线

4. 结论

本研究旨在评估钼金属掺杂硒化镍纳米材料在电催化全解水反应中的催化性能。通过使用 1.0 M KOH 电解液和典型的三电极体系, 采用扫描速率为 5 mVs⁻¹ 的条件对 Mo-Ni₅Se₅, Ni₅Se₅ 与 NF 的 OER 活性进行了测试。结果显示, Mo-Ni₅Se₅ 表现出与两种前驱体相比更高的本征活性。进一步的研究表明, Mo-Ni₅Se₅ 具有相对较大的电化学表面积和较小的电荷转移电阻(R_{ct}), 表明其具有优异的电导率和电催化动力学特性。此外, 为了评估催化剂的析氢性能, 我们还进行了析氢反应(HER)的测试。采用碳棒和 Ag/AgCl 电极作为对电极和参比电极, 并将电位校准到标准氢电极(RHE)。结果显示, Mo-Ni₅Se₅ 相对于 Ni₅Se₅ 与 NF 表现出更好的析氢性能。与此同时, Mo-Ni₅Se₅ 展示出较大的双电层电容和较小的电荷转移电阻(R_{ct}), 表明其具有较大的电化学表面积和较好的电导率。这些都是其获得较好催化性能的原因。

综上所述, 本工作合成了一种 Mo-Ni₅Se₅ 材料, 所合成的材料展现出优异的催化性能用于电催化全解水反应。其高本征活性和优异的电导率为高效的催化反应提供了潜力。未来的研究将集中在进一步优化多金属掺杂材料的合成方法, 深入理解其催化机制, 并提高催化剂的稳定性和可持续性。这将有助于推动电催化全解水技术的发展, 为清洁能源领域的应用做出重要贡献。

参考文献

- [1] Li, Z., Hu, M., Wang, P., Liu, J., Yao, J. and Li, C. (2021) Heterojunction Catalyst in Electrocatalytic Water Splitting. *Coordination Chemistry Reviews*, **439**, Article 213953. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213953>
- [2] Chandrasekaran, S., Yao, L., Deng, L., Bowen, C., Zhang, Y., Chen, S., *et al.* (2019) Recent Advances in Metal Sulfides: From Controlled Fabrication to Electrocatalytic, Photocatalytic and Photoelectrochemical Water Splitting and Beyond. *Chemical Society Reviews*, **48**, 4178-4280. <https://doi.org/10.1039/c8cs00664d>
- [3] Duan, C., Tang, C., Yu, S., Li, L., Li, J. and Zhou, Y. (2023) Efficient Electrocatalytic Desulfuration and Synchronous Hydrogen Evolution from H₂S via Anti-Sulfuretted Nise Nanowire Array Catalyst. *Applied Catalysis B: Environmen-*

- tal*, **324**, Article 122255. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.122255>
- [4] Song, J., Wei, C., Huang, Z., Liu, C., Zeng, L., Wang, X., *et al.* (2020) A Review on Fundamentals for Designing Oxygen Evolution Electrocatalysts. *Chemical Society Reviews*, **49**, 2196-2214. <https://doi.org/10.1039/c9cs00607a>
- [5] Liu, Y., Chen, Y., Tian, Y., Sakthivel, T., Liu, H., Guo, S., *et al.* (2022) Synergizing Hydrogen Spillover and Deprotonation by the Internal Polarization Field in a MoS₂/NiPS₃ Vertical Heterostructure for Boosted Water Electrolysis. *Advanced Materials*, **34**, Article 2203615. <https://doi.org/10.1002/adma.202203615>
- [6] Shaikh, N., Mukhopadhyay, I. and Ray, A. (2022) Heterointerfaces of Nickel Sulphides and Selenides on Ni-Foam as Efficient Bifunctional Electrocatalysts in Acidic Environments. *Journal of Materials Chemistry A*, **10**, 12733-12746. <https://doi.org/10.1039/d2ta01630c>
- [7] Li, M., Zhu, H., Yuan, Q., Li, T., Wang, M., Zhang, P., *et al.* (2022) Proximity Electronic Effect of Ni/Co Diatomic Sites for Synergistic Promotion of Electrocatalytic Oxygen Reduction and Hydrogen Evolution. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article 2210867. <https://doi.org/10.1002/adfm.202210867>
- [8] Sun, L., Reddu, V. and Wang, X. (2022) Multi-Atom Cluster Catalysts for Efficient Electrocatalysis. *Chemical Society Reviews*, **51**, 8923-8956. <https://doi.org/10.1039/d2cs00233g>
- [9] Dai, W., Zhu, Y., Ye, Y., Pan, Y., Lu, T. and Huang, S. (2022) Electrochemical Incorporation of Heteroatom into Surface Reconstruction Induced Ni Vacancy of Ni₉₀ Nanosheet for Enhanced Water Oxidation. *Journal of Colloid and Interface Science*, **608**, 3030-3039. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.026>
- [10] Pei, Z., Lu, X.F., Zhang, H., Li, Y., Luan, D. and Lou, X.W. (2022) Highly Efficient Electrocatalytic Oxygen Evolution Over Atomically Dispersed Synergistic Ni/Co Dual Sites. *Angewandte Chemie International Edition*, **61**, e202207537. <https://doi.org/10.1002/anie.202207537>
- [11] Li, Y., Zeng, Y., Chen, Y., Luan, D., Gao, S. and Lou, X.W. (2022) Mesoporous N-Rich Carbon with Single-Ni Atoms as a Multifunctional Sulfur Host for Li-S Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **61**, e202212680. <https://doi.org/10.1002/anie.202212680>
- [12] Liu, Y., Sakthivel, T., Hu, F., Tian, Y., Wu, D., Ang, E.H., *et al.* (2023) Enhancing the d/p-Band Center Proximity with Amorphous-Crystalline Interface Coupling for Boosted pH-Robust Water Electrolysis. *Advanced Energy Materials*, **13**, Article 2203797. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203797>
- [13] Wang, S., Jiang, Q., Ju, S., Hsu, C., Chen, H.M., Zhang, D., *et al.* (2022) Identifying the Geometric Catalytic Active Sites of Crystalline Cobalt Oxyhydroxides for Oxygen Evolution Reaction. *Nature Communications*, **13**, Article No. 6650. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34380-9>
- [14] Nie, F., Li, Z., Dai, X., Yin, X., Gan, Y., Yang, Z., *et al.* (2022) Interfacial Electronic Modulation on Heterostructured NiSe@CoFe LDH Nanoarrays for Enhancing Oxygen Evolution Reaction and Water Splitting by Facilitating the Deprotonation of OH to O. *Chemical Engineering Journal*, **431**, Article 134080. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134080>
- [15] Wang, J., Zhang, J., Hu, Y., Jiang, H. and Li, C. (2022) Activating Multisite High-Entropy Alloy Nanocrystals via Enriching M-Pyridinic N-C Bonds for Superior Electrocatalytic Hydrogen Evolution. *Science Bulletin*, **67**, 1890-1897. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.08.022>
- [16] Lei, H., Ma, L., Wan, Q., Tan, S., Yang, B., Wang, Z., *et al.* (2022) Promoting Surface Reconstruction of NiFe Layered Double Hydroxide for Enhanced Oxygen Evolution. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article 2202522. <https://doi.org/10.1002/aenm.202202522>
- [17] Hu, J., Liang, Y.Q., Wu, S.L., Li, Z.Y., Shi, C.S., Luo, S.Y., *et al.* (2022) Hierarchical Nickel-Iron Layered Double Hydroxide Composite Electrocatalyst for Efficient Oxygen Evolution Reaction. *Materials Today Nano*, **17**, Article 100150. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2021.100150>
- [18] Nai, J., Xu, X., Xie, Q., Lu, G., Wang, Y., Luan, D., *et al.* (2021) Construction of Ni(CN)₂/NiSe₂ Heterostructures by Stepwise Topochemical Pathways for Efficient Electrocatalytic Oxygen Evolution. *Advanced Materials*, **34**, Article 2104405. <https://doi.org/10.1002/adma.202104405>
- [19] Chang, K., Tran, D.T., Wang, J., Kim, N.H. and Lee, J.H. (2022) A 3D Hierarchical Network Derived from 2D Fe-Doped NiSe Nanosheets/Carbon Nanotubes with Enhanced OER Performance for Overall Water Splitting. *Journal of Materials Chemistry A*, **10**, 3102-3111. <https://doi.org/10.1039/d1ta07393a>
- [20] Jeghan, S.M.N., Kim, D., Lee, Y., Kim, M. and Lee, G. (2022) Designing a Smart Heterojunction Coupling of Cobalt-Iron Layered Double Hydroxide on Nickel Selenide Nanosheets for Highly Efficient Overall Water Splitting Kinetics. *Applied Catalysis B: Environmental*, **308**, Article 121221. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121221>
- [21] Bao, W., Yang, C., Ai, T., Zhang, J., Zhou, L., Li, Y., *et al.* (2023) Modulating Interfacial Charge Distribution of NiSe Nanoarrays with NiFe-LDH Nanosheets for Boosting Oxygen Evolution Reaction. *Fuel*, **332**, Article 126227. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126227>
- [22] Pan, Z., Tang, Z., Yaseen, M. and Zhan, Y. (2022) NiSe and Fe-Based Layered Double Hydroxide Nanosheet/Ni Foam

- Bifunctional Catalyst for Water Splitting. *ACS Applied Nano Materials*, **5**, 16793-16803. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c03764>
- [23] Zheng, X., Sun, A., Qiu, Y., Wang, Z., Xu, J. and Liu, J. (2023) Controllable Atoms Implantation for Inducing High Valency Nickel towards Optimizing Electronic Structure for Enhanced Overall Water Splitting. *Journal of Colloid and Interface Science*, **650**, 1966-1973. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.07.131>
- [24] Tian, L., Chen, Z., Wang, T., Cao, M., Lu, X., Cheng, W., *et al.* (2023) Mo Doping and Se Vacancy Engineering for Boosting Electrocatalytic Water Oxidation by Regulating the Electronic Structure of Self-Supported CO₉Se₈@NiSe. *Nanoscale*, **15**, 259-265. <https://doi.org/10.1039/d2nr05410h>
- [25] Li, Y., Bao, W., Zhang, J., Ai, T., Wu, D., Wang, H., *et al.* (2023) Ultrathin MoS₂ Nanosheets Decorated on NiSe Nanowire Arrays as Advanced Trifunctional Electrocatalyst for Overall Water Splitting and Urea Electrolysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **121**, 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.02.006>