

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.06.010

镍铁基高效碱性析氧电催化剂的研究进展

李小丽¹, 李朋喜^{2*}, 姜越¹, 魏方方¹, 张珠靖¹, 张静艳¹

(1. 河北工程大学 材料科学与工程学院, 河北 邯郸 056000; 2. 中国船舶集团有限公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056000)

摘要: 析氧反应(OER)是电解水实现清洁能源生产和高效储能的重要电化学反应。镍铁基材料因其具有资源丰富、价格低廉、催化活性高及稳定性好等特点,在OER电催化领域具有潜在的应用价值,受到科研人员的广泛关注。本文综述了纳米镍铁基OER电催化剂的合成方法、化学性质和催化性能等方面的最新进展,包括层状双氢氧化物(LDH)、氧化物/氢氧化物氧、硫(硒)化物、氮化物以及碳复合物,并对镍铁基OER电催化剂进行了总结和展望。

关键词: 镍基材料;析氧电极;碱性水电解;析氧过电位

中图分类号: TQ153.2 文献标识码: A

Research progress of nickel-iron based materials for high efficiency alkaline oxygen evolution electrode

Li Xiaoli¹, Li Pengxi^{2*}, Jiang Yue¹, Wei Fangfang¹, Zhang Zhujing¹, Zhang Jingyan¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China; 2. The 718th Research Institute of CSSC, Handan 056000, China)

Abstract: Oxygen evolution reaction (OER) is an important electrochemical reaction for electrolysis of water to achieve clean energy production and high energy storage. Nickel-iron based materials have been widely concerned by researchers for their potential application in the field of OER electrocatalysis due to their abundant resources, low price, high catalytic activity and good stability. This review article will broadly confer about recent reports on the recent progress in synthesis, chemical properties and catalytic performance of nanosized nickel-iron based OER electrocatalysts, including layered dihydroxide (LDH), oxide/hydroxide oxygen, sulfur (selenium) compounds, nitrogen compounds and carbon complexes. On this basis, the nickel-iron based OER electrocatalysts was summarized and prospected.

Keywords: nickel-based materials; oxygen evolution electrode; alkaline hydrolysis; oxygen evolution overpotential

随着化石燃料(如石油、煤炭和天然气)的逐渐枯竭和能量需求的日益增长,高效储能装置的设计^[1-2]和寻找洁净的替代能源(电解水制氢)^[3-4]越来越受到人们的青睐和重视。析氧反应(OER)是电解

水^[5]的核心电化学反应。电解水技术将太阳能、风能等间歇性可再生能源转化为电能,以可持续的方式生产清洁能源,是一种很有前途的技术。电解水反应由阴极的析氢反应和阳极的析氧反应组成。在

收稿日期: 2022-07-18

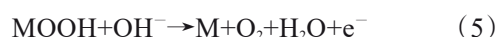
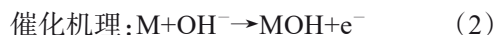
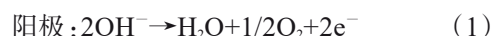
修回日期: 2022-08-19

作者简介: 李小丽(1989—),女,博士研究生,讲师, email: lixiaoli@hebeu.edu.cn

*通信作者: 李朋喜(1987—),男,博士,工程师,研究方向为电催化、电极材料、超级电容器。

email: lipenglin1207@163.com

碱性电解质中,催化位点可以将吸附的两个O直接结合产生 O_2 ,也可以在催化位点形成 OOH^* 中间体。在OER过程中存在多个中间体(如 O^* 、 OH^* 和 OOH^*),导致难以确定速率控制步骤。



OER在标准条件下,析氧反应的热力学电位值是1.23 V。然而,电解水在实际工作过程中,总是施加更大的电位来驱动阳极的析氧反应。超出部分(称过电位或超电势, η)主要是克服析氧反应本征反应势垒以及溶液电阻(η_a 和 η_c)、接触电阻(η_{other})等其他电阻。所以,要降低过电位,提高制氢效率,就是要降低 η_a 、 η_c 和 η_{other} 。其中,电阻可以通过设计电解水制氢设备的内部结构来降低,而降低固有能垒的方法主要是负载高活性的析氧催化剂。 η 是评价OER电催化剂活性最重要的指标,在一定电流密度下,过电位越低,电催化剂的活性越高。目前,贵金属基(铱、钌)析氧催化剂^[6]($\eta \approx 300$ mV)已被广泛应用于电解水领域,但它们的高成本和稀缺性阻碍了其广泛应用。因此,开发廉价高效、资源丰富且能够有效降低析氧反应势垒的催化剂至关重要。镍铁基材料因其资源丰富、成本低、催化活性高及稳定性好等特点,被科研工作者广泛用于碱性析氧催化剂。本文介绍了近年来纳米镍铁基析氧催化剂在合成方法、化学性质和催化性能等方面的突破进展。

1 镍铁基层状双氢氧化物催化剂

镍铁层状双氢氧化物(镍铁LDH)的合成方法有水热法^[5]、醇热法^[7]、沉淀法^[8]、电沉积-空气氧化法^[9]、化学沉积-浸渍法^[10]等。

水热法是一种很有前途的制备纳米结构镍铁LDH的方法。在OER催化过程中,将铁掺入镍氢氧化物,可以在镍铁LDH中原位形成高活性 $NiOOH$ 。纳米结构可以提供丰富活性位点,促进气体逸出,进而增强OER的催化活性和稳定性。2014年,Lu Z研究团队^[5]发现镍铁LDH纳米片阵列对OER表现出优异的催化活性和稳定性。在三维泡沫镍载体上,经120℃水热处理12 h后制备出 $NiFe$ LDH纳米片阵列,这种结构能够提供丰富的活性位点,促进气体的析出,具有较小的电荷转移电阻,有利于电子转移过程。 $NiFe$ LDH纳米片阵列的OER活性高于 $Ni(OH)_2$ 和 Ir/C 。在1.0 mol/L KOH中,镍铁LDH纳米片阵列表现出较高的OER催化活性($\eta = 230$ mV@10 mA·cm⁻²),电流密度约为190 mA·cm⁻²、电流持续10 h,在 η 为270 mV时保持率为97.8%。2018年,Liu Y研究团队^[11]提出了一种腐蚀工程方法,可以将廉价的铁基板增值转化为高性能OER电极。该方法成功的关键是在腐蚀环境中向铁基板引入合适的二价阳离子,形成 $NiFe$ LDH纳米片阵列薄膜(图1)。 $NiFe$ LDH对OER表现出良好的催化活性($\eta = 257$ mV@500 mA·cm⁻²),在大电流密度下,稳定超过6000 h。其优良的催化性能可归因于其整体有利的结构特征,包括纳米片阵列结构、纳米片内的超细晶畴以及LDH薄膜与铁基板之间的强耦合界面。

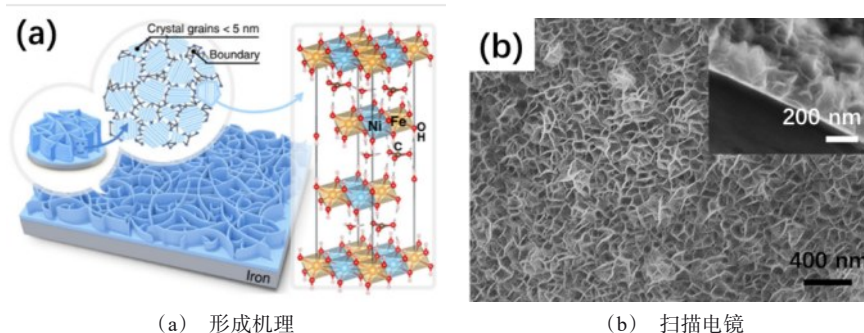


图1 $NiFe$ LDH的形成和微观形貌^[11]

Fig.1 The formation schematic and microstructure of $NiFe$ LDH^[11]

2 镍铁氧化物/氢氧化物催化剂

Landon J 等^[12]通过3种不同的方法合成了具有催化活性的Ni-Fe氧化物,如蒸发诱导自组装、硬模板和浸渍法。当Fe含量接近10 mol %时,混合Ni-Fe氧化物的OER活性比单一金属氧化物的OER活性更高;Ni-Fe氧化物中Fe主要以+3价氧化态存在,Fe含量大于25 mol %时形成 Fe_2O_3 相,低含量Fe时形成NiO/ NiFe_2O_4 混合相。研究表明,在电化学析氧条件下,Fe原子的平均配位数增加,这可能是由于在 NiFe_2O_4 中八面体配位的Fe增加。这表明,Ni-Fe氧化物中OER活性的增强可能与Fe有关,而Fe可能处于Ni-Fe氧化物的OER活性位点。Zhang X 研究团队^[13]发现NiFe泡沫表面经酸性刻蚀和低温煅烧后,该半圆柱模板形成了以未分解的NiFePBA为核、表面的 NiFe_2O_4 为壳层的核壳异质结构,该复合材料表现出优异的析氧反应性能。研究表明,这种核壳结构提供了丰富的活性位点,有利于电解质的渗透,促进电荷和物质的快速运输,从而显著提高析氧反应性能。此外,Rong W 等^[14]采用一种基于多孔

镍骨架的活性 NiFeO_xH_y 催化剂,将NiO还原为多晶金属Ni相后,其结构变为金属导电结构。经表面引入Fe原子,形成高活性的 NiFeO_xH_y 壳层与导电镍芯组成的异质结构, NiFeO_xH_y 催化剂在电流密度为 $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 时的过电位为280 mV。

电沉积法制备纳米 $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}/\text{CC}$ 可以暴露丰富的活性位点,提高OER催化性能(图2)。Rajapriya A 等^[15]研究发现 $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}/\text{CC}$ 呈现出较强的OER活性。他们利用电沉积法,在不破坏原有结构的情况下,将Sr-Fe LDH纳米片垂直锚定在高导电性和柔性的NiS/CC电极上。 $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}/\text{CC}$ 的OER活性高于Ni和Fe单独电沉积的OER活性,表明Ni和Fe在复合材料中具有协同作用,可能是由于这种丰富的3D杂化 $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}/\text{CC}$ 纳米结构提供了巨大的成核活性位点,与相互连接的层相互作用使其电催化行为显著增强。此外,3D杂化 $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}/\text{CC}$ 在极低的过电位($\eta=131 \text{ mV}@10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)时也表现出优异的OER活性,主要是因为电沉积的 $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}/\text{CC}$ 电极具有较大的比表面积、孔体积及快速的电子转移速率。

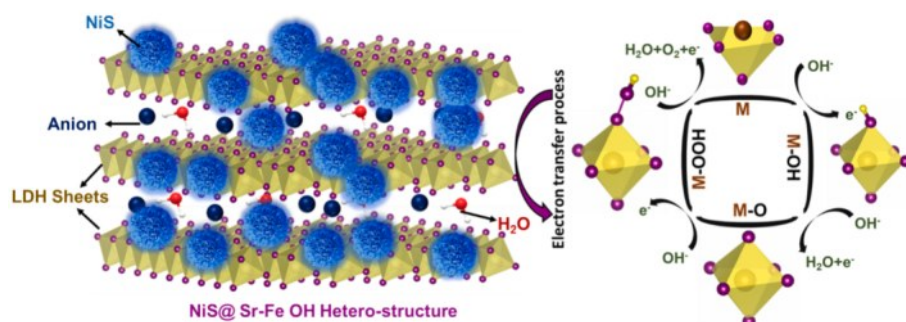


图2 $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}$ 纳米结构的OER催化反应机理图^[15]

Fig.2 OER-catalyzed reaction mechanism of $\text{NiS}@\text{Sr-FeOH}$ nanostructure^[15]

3 镍铁基硫(硒)化物催化剂

制备纳米结构的镍铁基硫化物电催化剂可以调节电子结构^[16],调节OER中间体的吸附能^[17-18],暴露丰富的活性位点^[19],加快电子转移,促进气体析出以及显示出原位生成的NiFe氧化物或氢氧化物^[20-22],这可以提高OER的催化性能。Liu Z 等^[18]发现 $(\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})_{0.96}\text{S}$ 管状球比NiFe LDH球表现出更高的OER活性和更多的缺陷($\eta=223 \text{ mV}@10 \text{ mA}/\text{cm}^2$),它可以暴露丰富的活性位点,调节电子结构,增强电子转移,促进气体的析出,从而提高OER催化性能。

另外,Tong L 研究团队^[19]报道了 $(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S}_2@\text{MoS}_2/\text{NiS}_2$ 中空杂化异质结构作为碱性整体水裂解的双功能电催化剂。微观结构(图3)分析表明,该杂合物是一种由 $\text{MoS}_2/\text{NiS}_2$ 纳米片/纳米颗粒原位生长在具有丰富异质界面的空心 $(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S}_2$ 纳米立方体上的层次化异质结构,可有效地暴露大量的电化学活性位点,促进电荷转移,提高OER性能($\eta=342 \text{ mV}@50 \text{ mA}/\text{cm}^2$)。此外,Zhang G 等^[20]发现17.5 %Fe掺杂的 Ni_3S_2 纳米阵列比 Ni_3S_2 和NiFe LDH具有更高的OER活性,该催化剂通过对NiFe LDH前驱体进行离子交换反应,原位生成氢氧化物,同时暴露出丰

富的活性位点,增强电子转移能力,促进气体逸出, 从而提高 OER 催化性能。

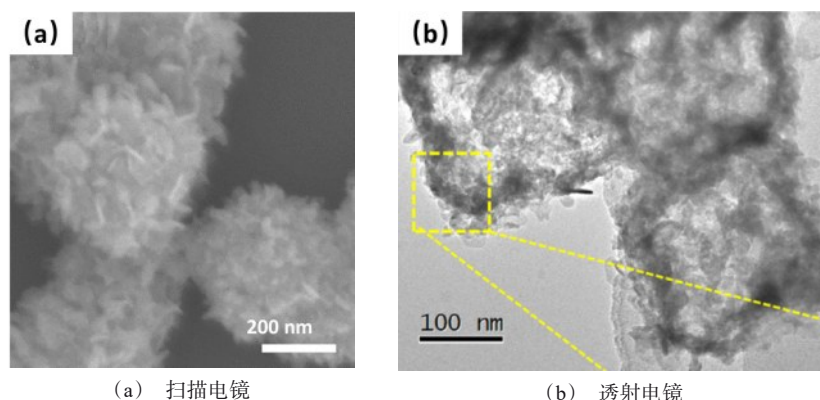


图 3 (Fe, Ni)S₂@MoS₂/NiS₂的微观结构照片^[19]

Fig.3 Microstructure photographs of (Fe, Ni)S₂@MoS₂/NiS₂^[19]

Chang J 研究团队^[21]发现 Ni₂FeS@NSC 具有较高的 OER 催化能力($\eta=247$ mV@10 mA/cm²),明显优于单一硫化物。在这类异质结杂化材料中,电子从嵌入的硫化物自发扩散到 NSC 壳层,促进电子转移,从而提高 OER 催化性能。Zhu Y 等^[22]研究发现 Fe(OH)₃-Ni-CuO 表现出优异的 OER 活性,即使用一种简单的方法,即连续离子层吸附和反应(SILAR),将适量的 NiS 和 Fe(OH)₃ 负载到珊瑚状 CuO/Cu 微阵列上;它可以暴露丰富的活性位点,从而提高了 OER 催化性能($\eta=257$ mV@10 mA/cm²)。另一方面, Jin Y 等^[23]研究发现, N-(Ni, Fe)₃S₂ 纳米片表现出比 N-Ni₃S₂ 更高的 OER 活性。N-(Ni, Fe)₃S₂ 的氮负离子表面修饰可以提高费米能级附近的态密度,提高电导率,而 Fe 的掺入可以提高 OER 的本征活性,纳米片形貌可以暴露出丰富的活性位点,这样可以提高 OER 催化性能($\eta=167$ mV@10 mA/cm²)。

构建镍铁基硒化物纳米结构可以改善电子结构^[24],为 OER 中间体提供最佳吸附能^[25-26],加快电子转移,暴露出丰富的活性位点,促进气体析出。在 OER 过程中, NiFeOOH 在催化剂表面原位生成,提高了 OER 催化性能^[27]。Lv L 等^[25]研究发现,相比于 NiSe₂ 和 Ni₃Fe, 水热法制备的 Ni_{0.75}Fe_{0.25}Se₂ 空心纳米带呈现出更高的 OER 催化活性($\eta=267$ mV@10 mA/cm²)、电化学活性比表面积以及更低的电荷转移电阻。他们的理论计算结果表明, O* 和 OH* 更倾向于吸附在 Ni 和 Fe 上;它能暴露丰富的活性位点,促进电子/质子转移,为 O* 和 OH* 中间体提供最

佳吸附,提高 OER 催化性能。另外, Lv L 研究团队^[26]还发现聚乙烯吡咯烷酮(PVP)修饰的 Ni_{0.75}Fe_{0.25}Se₂ 中空纳米粒子比原始 Ni_{0.75}Fe_{0.25}Se₂ 表现出更高的 OER 催化活性($\eta=255$ mV@10 mA/cm²)、更大的电化学活性表面积、更低的电荷转移电阻和更好的表面润湿性。由于 PVP 修饰表面亲水性强,可以提高离子的吸附/转移效率,同时暴露出丰富的活性位点,便于电子转移,提高 OER 性能。

4 镍铁基氮化物催化剂

制备纳米结构的氮化镍铁可以暴露丰富的活性位点,调节电子结构,促进气体逸出,从而提高 OER 催化性能。Jiang M 研究团队^[28]发现 Fe₂Ni₂N 纳米阵列表现出优异的 OER 催化活性和稳定性。制备 Fe₂Ni₂N 纳米阵列的步骤如下:首先,在 120 °C 下水热 12 h,得到 NiFe LDH;最后,在 NH₃ 气氛中,在 380 °C 下煅烧 2 h 制备了 Fe₂Ni₂N 纳米阵列。与 Ni-Fe-O 和 Ni₃N 相比, Fe₂Ni₂N 纳米阵列表现出更高的 OER 活性、更快的 OER 动力学性能和更低的电荷转移电阻。Fe₂Ni₂N 纳米阵列由 Fe₂Ni₂N 晶体组成,呈现多孔结构。Ni、Fe 和 N 元素在纳米阵列中均匀分布,包含 Ni⁰、Ni²⁺ 和 Fe³⁺,其中 Ni⁰ 是由 Ni²⁺ 在氨热处理过程中部分还原生成。与 Ni-Fe-O 相比, Fe₂Ni₂N 中 Ni 和 Fe 元素的 2p_{3/2} 均向下移动,表明了 Fe₂Ni₂N 纳米阵列的电子相互作用,这可能是由于 N 比 O 具有更低的电负性,导致 Fe₂Ni₂N 中的金属原子比 Ni-Fe-O 具有更高的电子密度;因此, Fe₂Ni₂N 纳米阵列

可以暴露丰富的活性位点,增强电子/质量运输,调节电子结构,促进气体逸出,从而提高 OER 性能。 $\text{Fe}_2\text{Ni}_2\text{N}$ 纳米阵列在 1.0 mol/L KOH 中具有更高的 OER 催化活性($\eta=220\text{ mV}@10\text{ mA}/\text{cm}^2$)。

5 镍铁基碳复合物催化剂

将碳与镍铁基活性材料结合,可以增强电子转移^[29],提高电导率^[30-31],增强活性^[32-33],防止活性材料的聚集^[34-36],提高稳定性^[37],最终提高 OER 催化性能。将石墨烯(G)与活性材料结合可以促进电子转移,提高 OER 催化性能。Zhang G 等^[38]研究发现 $\text{NiO-NiFe}_2\text{O}_4\text{-rGO}$ 的 OER 活性高于 NiFe-LDH-rGO 、 NiFe-LDH 、 $\text{NiO-NiFe}_2\text{O}_4$ 、 NiFe_2O_4 和 NiO 。 $\text{NiO-NiFe}_2\text{O}_4\text{-rGO}$ 是通过 NiFe-LDH-rGO 前驱体的焙烧得到的,其中前驱体是通过共沉淀法得到。它能够提供更丰富的活性位点,有利于电子转移,可提高 OER 催化性能。部分剥落石墨具有开放的层次结构、较大的比表面积和导电性,因此,与部分剥落石墨结合的纳米无定形 NiFe 氧化物或氢氧化物具有高浓度的不饱和配位,这可以暴露丰富的活性位点,促进电子/质量传递,提高 OER 催化性能。Ruan J 研究团队^[39]通过在石墨纸上恒电位沉积获得 NiFeOH-GH (GH:石墨),发现 NiFeOH-GH 对 OER 表现出增强的活性和稳定性。石墨衬底可以增强电子转移, NiFeOH 能够提供更多的活性位点,进而提高 OER 催化性能($\eta=263\text{ mV}@10\text{ mA}/\text{cm}^2$)。此外,Feng Y 等^[40]研究发现三明治结构 NiFe/C 阵列比 Fe 掺杂 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 纳米片和 NiFe 纳米颗粒表现出更高的 OER 活性。石墨化碳层包裹活性材料,一方面可以增强电子转移,防止活性材料的腐蚀,同时活性材料可以提供更多的活性位点,并且阵列结构可以促进气体的逸出,从而提高 OER 性能($\eta=200\text{ mV}@10\text{ mA}/\text{cm}^2$)。

将碳纳米管(CNT)导电材料与活性材料相结合可以促进电子传递过程,提高活性材料的稳定性,从而提高 OER 的性能。Li Y 等^[41]研究发现 NiFe-O-CNT 比 NiFe-LDH/CNT 表现出更高的 OER 活性。将 NiFe-LDH/CNT 前驱体在 Ar 气氛中煅烧,得到 NiFe-O-CNT 。CNT 能够加快电子从 NiFe-O 纳米颗粒向 CNT 的转移。同时,界面面积的增加可以增强 NiFe-O 纳米粒子与 CNT 之间的相互作用,从而使复合物结构更加稳定,进而提高 OER 催化性能($\eta=$

$200\text{ mV}@10\text{ mA}/\text{cm}^2$)。

6 镍铁基析氧催化剂性能比较分析

表 1 列出了不同种类镍铁基析氧催化剂的催化性能,可以看出 NiS@Sr-FeOH/CC 和 $\text{N-(Ni, Fe)}_3\text{S}_2$ 呈现出较低过电位,具有较高的 OER 催化性能。此外, $\text{Fe}_2\text{Ni}_2\text{N}$ 和 NiFe/C 也呈现相对低的过电位。由此可以推断出,异质原子掺杂和碳基材料复合,是提高 NiFe 基催化剂析氧性能的两种有效策略,也是今后科研工作者的有意义和价值的研究方向。

表 1 不同种类镍铁基析氧催化剂的过电位对比

Tab.1 Comparison of the overpotential of different nickel-ferric oxygen evolution catalysts

催化剂	过电位	参考文献
NiFe LDH	$230\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$	[5]
NiFeO_xH_y	$280\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$	[14]
NiS@Sr-FeOH/CC	$131\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$	[15]
$\text{Ni}_2\text{FeS@NSC}$	$247\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$	[21]
$\text{N-(Ni, Fe)}_3\text{S}_2$	$167\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$	[23]
$\text{Fe}_2\text{Ni}_2\text{N}$	$220\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$	[28]
NiFe/C	$200\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$	[40]

7 结论

析氧反应是电解水中重要的电化学反应,其越来越受到清洁能源生产和高效能源存储的关注。镍铁基析氧催化剂,由于其优异的催化活性和稳定,备受科研工作者的青睐。目前,镍铁基析氧催化剂取得了一系列研究进展,呈现出较高的催化性能。但是,现阶段的研究结果大多处于实验室研究阶段,还需进行实际应用的验证。此外,研究设计绿色高效、经济友好的析氧催化剂,对贵金属催化剂进行取代或部分取代,仍然具有非常大的研究意义和价值。

参考文献

- [1] Gao L, Cui X, Sewell C D, et al. Recent advances in activating surface reconstruction for the high-efficiency oxygen evolution reaction[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(15): 8428-8469.
- [2] Suntivich J, Gasteiger H A, Yabuuchi N, et al. Design principles for oxygen-reduction activity on perovskite oxide catalysts for fuel cells and metal-air batteries[J].

- Nature Chemistry, 2011, 3(7): 546-550.
- [3] Seitz L C, Dickens C F, Kazunori N, et al. A highly active and stable $\text{IrO}_x/\text{SrIrO}_3$ catalyst for the oxygen evolution reaction[J]. Science, 2017, 353: 1011-1014.
- [4] Chatenet M, Pollet B G, Dekel D R, et al. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments[J]. Chemical Society Reviews, 2022, 51: 4583-4762.
- [5] Lu Z, Xu W, Wei Z, et al. Three-dimensional NiFe layered double hydroxide film for high-efficiency oxygen evolution reaction[J]. Chemical Communications, 2014, 50(49): 6479-6482.
- [6] McCrory C C L, Jung S, Ferrer I M, et al. Benchmarking hydrogen evolving reaction and oxygen evolving reaction electrocatalysts for solar water splitting devices[J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137: 4347-4357.
- [7] Lu Z, Qian L, Xu W, et al. Dehydrated layered double hydroxides: Alcoholothermal synthesis and oxygen evolution activity[J]. Nano Research, 2016, 9(10): 3152-3161.
- [8] Chen L J, Han Q, Liu J C, et al. Aggregation of giant cerium-bismuth tungstate clusters into a 3D porous framework with high proton conductivity[J]. Angewandte Chemie, 2018, 57: 9392-9396.
- [9] Feng X, Jiao Q, Dai Z, et al. Revealing the effect of interfacial electron transfer in heterostructured $\text{Co}_9\text{S}_8/\text{NiFe}$ LDH for enhanced electrocatalytic oxygen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9: 12244-12254.
- [10] Yu L, Wu L B, McElhenny B, et al. Ultrafast room-temperature synthesis of porous S-doped Ni/Fe (oxy)hydroxide electrodes for oxygen evolution catalysis in seawater splitting[J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13: 3439-3446.
- [11] Liu Y, Liang X, Gu L, et al. Corrosion engineering towards efficient oxygen evolution electrodes with stable catalytic activity for over 6000 hours[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 1-10.
- [12] Landon J, Demeter E, Inoglu N, et al. Spectroscopic characterization of mixed Fe-Ni oxide electrocatalysts for the oxygen evolution reaction in alkaline electrolytes [J]. ACS Catalysis, 2012, 2(8): 1793-1801.
- [13] Zhang X, Khan I U, Huo S, et al. In-situ integration of nickel-iron Prussian blue analog heterostructure on Ni foam by chemical corrosion and partial conversion for oxygen evolution reaction[J]. Electrochimica Acta, 2020, 363: 137211.
- [14] Rong W, Cw A, Sya B, et al. Hierarchically devising $\text{Ni-FeO}_x\text{H}_y$ catalyst with surface Fe active sites for efficient oxygen evolution reaction[J]. Catalysis Today, 2021, 364: 140-147.
- [15] Rajapriya A, Keerthana S, Viswanathan C, et al. Three dimensional integrated architecture of Sr-Fe LDH on hierarchical NiS framework as a flexible electrode for efficient energy storage and conversion applications[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 53: 105091.
- [16] Li J, Xu W, Luo J, et al. Synthesis of 3D hexagram-like cobalt-manganese sulfides nanosheets grown on nickel foam: A bifunctional electrocatalyst for overall water splitting[J]. Nano-Micro Letters, 2018 (1): 9425-9435.
- [17] Yi W, Fan L, Chen W, et al. Coupling interface constructions of $\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{Ni}_4\text{S}_8$ heterostructures for efficient electrochemical water splitting[J]. Advanced Materials, 2018, 30(38): 1803151.
- [18] Liu Z, Wang Y, Chen R, et al. Quaternary bimetallic phosphosulphide nanosheets derived from Prussian blue analogues: Origin of the ultra-high activity for oxygen evolution[J]. Journal of Power Sources, 2018, 403(1): 90-96.
- [19] Tong L, Liu Y, Song C, et al. $(\text{Fe, Ni})\text{S}_2/\text{MoS}_2/\text{NiS}_2$ hollow heterostructure nanocubes for high-performance alkaline water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(21): 11143-11152.
- [20] Zhang G, Feng Y S, Lu W T, et al. Enhanced catalysis of electrochemical overall water splitting in alkaline media by Fe doping in Ni_3S_2 nanosheet arrays[J]. ACS Catalysis, 2018, 8(6): 5431-5441.
- [21] Chang J, Zang S, Song F, et al. Heterostructured nickel, iron sulfide@nitrogen, sulfur co-doped carbon hybrid with efficient interfacial charge redistribution as bifunctional catalyst for water electrolysis[J]. Applied Catalysis A: General, 2022, 630: 118459.
- [22] Zhu Y, Wang Y, Liu S, et al. Facile and controllable synthesis at an ionic layer level of high-performance NiFe-based nanofilm electrocatalysts for the oxygen evolution reaction in alkaline electrolyte[J]. Electrochemistry Communications, 2018, 86: 38-42.
- [23] Jin Y, Yue X, Du H, et al. One-step growth of nitrogen-decorated iron-nickel sulfide nanosheets for the oxygen evolution reaction[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 5592-5597.

- [24] Jeghan N S M, Kim D, Lee Y, et al. Designing a smart heterojunction coupling of cobalt-iron layered double hydroxide on nickel selenide nanosheets for highly efficient overall water splitting kinetics[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2022, 308: 121221.
- [25] Lv L, Li Z, Xue K H, et al. Tailoring the electrocatalytic activity of bimetallic nickel-iron diselenide hollow nanochains for water oxidation[J]. *Nano Energy*, 2018, 47: 275-284.
- [26] Lv L, Li Z, Yunjun R, et al. Nickel-iron diselenide hollow nanoparticles with strongly hydrophilic surface for enhanced oxygen evolution reaction activity[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 286: 172-178.
- [27] Wang Z, Li J, Tian X, et al. Porous nickel-iron selenide nanosheets as highly efficient electrocatalysts for oxygen evolution reaction[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8: 19386-19392.
- [28] Jiang M, Li Y, Lu Z, et al. Binary nickel-iron nitride nanoarrays as bifunctional electrocatalysts for overall water splitting[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2016, 3: 630-634.
- [29] Xu H, Yang J, Ge R, et al. Carbon-based bifunctional electrocatalysts for oxygen reduction and oxygen evolution reactions: Optimization strategies and mechanistic analysis[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 71: 234-265.
- [30] Liu Z, Yu H, Dong B X, et al. Electrochemical oxygen evolution reaction efficiently boosted by thermal-driving core-shell structure formation in nanostructured FeNi/S, N-doped carbon hybrid catalyst[J]. *Nanoscale*, 2018, 10: 16911-16918.
- [31] Zhong H X, Wang J, Zhang Q, et al. In situ coupling FeM (M = Ni, Co) with nitrogen-doped porous carbon toward highly efficient trifunctional electrocatalyst for overall water splitting and rechargeable Zn-air battery[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2017, 1(6): 1700020.
- [32] Mikaela G, Jorge F A, Schmies H, et al. Tracking catalyst redox states and reaction dynamics in Ni-Fe oxyhydroxide oxygen evolution reaction (OER) electrocatalysts: The role of catalyst support and electrolyte pH[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(5): 2070-2082.
- [33] Li X, Sayyar A S, Habib K, et al. Ni₃S₂ nanostrips@FeNi-NiFe₂O₄ nanoparticles embedded in N-doped carbon microsphere: An improved electrocatalyst for oxygen evolution reaction[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 617: 1-10.
- [34] Liu L, Hu S, Gao K. Natural nanofiber-based stacked porous nitrogen-doped carbon/NiFe₂O₄ nanohybrid nanosheets[J]. *Cellulose*, 2020, 27(1): 1021-1031.
- [35] Liu G, Rui Y, Yong Z, et al. Encapsulation of Ni/Fe₃O₄ heterostructures inside onion-like N-doped carbon nanorods enables synergistic electrocatalysis for water oxidation[J]. *Nanoscale*, 2018, 10: 3997-4003.
- [36] Du Y, Han Y, Huai X, et al. N-doped carbon coated FeNiP nanoparticles based hollow microboxes for overall water splitting in alkaline medium[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(49): 22226-22234.
- [37] Liu Z, Tang B, Gu X, et al. Selective structure transformation for NiFe/NiFe₂O₄ embedded porous nitrogen-doped carbon nanosphere with improved oxygen evolution reaction activity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 395: 125170.
- [38] Zhang G, Li Y, Zhou Y, et al. NiFe layered double hydroxide-derived NiO-NiFe₂O₄/reduced graphene oxide architectures for enhanced electrocatalysis of alkaline water splitting[J]. *ChemElectroChem*, 2016, 3: 1927-1936.
- [39] Ruan J, Zhao W, Wu L, et al. New insights into graphite paper as electrocatalytic substrate for oxygen evolution reaction[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 396(1): 1146-1154.
- [40] Feng Y, Zhang H, Fang L, et al. Uniquely monodispersing NiFe alloyed nanoparticles in three-dimensional strongly linked sandwiched graphitized carbon sheets for high-efficiency oxygen evolution reaction[J]. *ACS Catalysis*, 2016, 6(7): 4477-4485.
- [41] Li Y, He H, Fu W, et al. Hu, In-grown structure of NiFe mixed metal oxides and CNT hybrid catalysts for oxygen evolution reaction[J]. *Chemical Communications*, 2016, 52: 1439-1442.