

# Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF的合成及其用于高效电催化析氧研究

高瑜<sup>1</sup>, 张斯瞳<sup>2\*</sup>, 赵晓月<sup>2</sup>, 杜星希<sup>2</sup>, 宋悦<sup>2</sup>

(1. 吕梁学院物理与电子信息工程系, 山西 吕梁 033001;  
2. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:**以泡沫镍为基底,成功地将二维镍铁双层氢氧化物负载并原位生长 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 纳米片,形成了具有三维核桃状结构的 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 纳米阵列,通过电化学工作站对其电化学性能进行测试。结果表明,与 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 和 2D NiFe 相比,三维核桃状结构的 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 纳米阵列提供了更稳定的结构,同时 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 与 2D NiFe 产生协同效应降低了电化学阻抗,提高了电子转运速率,提供了丰富的活性位点,加快了氧气释放。在电流密度为 40 mA/cm<sup>2</sup> 时,过电势仅为 168 mV;在电流密度为 11.6 mA/cm<sup>2</sup> 的条件下,电流密度维持超过 50 h 无明显的下降。

**关键词:**原位生长;三维;协同效应;过电势

**中图分类号:**TB331

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2025)02-0205-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.02.036

## Synthesis of Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF and its application in high efficiency electrocatalytic oxygen evolution

GAO Yu<sup>1</sup>, ZHANG Si-tong<sup>2\*</sup>, ZHAO Xiao-yue<sup>2</sup>, DU Xing-xi<sup>2</sup>, SONG Yue<sup>2</sup>

(1. Department of Physics and Electronic Information Engineering, Lyliang University, Lvliang 033001, China;  
2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** 2D nickel-iron hydroxide is loaded on a nickel foam substrate, and Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> nanosheets grow in situ to form Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF nanoarray with 3D walnut-like structure. The electrochemical performance of the nanoarray is tested by means of an electrochemical workstation. Results show that compared with Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> and 2D NiFe, the 3D walnut-like Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF nanoarray provides a more stable structure. Meanwhile, the synergistic effect between Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> and 2D NiFe reduces the electrochemical impedance, increases the electron transport rate, and provides abundant active sites, which accelerating the release of oxygen. Under a current density of 40 mA·cm<sup>-2</sup>, the overpotential is 168 mV only. Under a current density of 11.6 mA·cm<sup>-2</sup>, the current density can maintain for more than 50 h without obvious downward trend.

**Key words:** in situ growth; three-dimensional; synergistic effect; overpotential

石油、天然气、煤炭等传统不可再生能源的快速枯竭以及对环境造成的污染,迫使新型可持续能源开发和转化技术的发展<sup>[1]</sup>。电催化水裂解是一种环保、高效、简单经济的可再生氧气、氢气产生技术。理论上电催化水裂的理论电压为 1.23 V,但是在反应过程中存在的电阻和势垒,所以反应中其实际电压会比较高<sup>[2]</sup>。因此,为了使实际电位接近理论值,需要催化活性高的电催化剂来降低水电解的过电位。

2D NiFe LDH 由于其独特的分层结构和金属间的协同作用,在碱性条件下具有优异的析氧反应(OER)活性。然而,未经过修饰改性 NiFe LDH 存

在电导率较低,限制了离子和电子的迁移,导致其催化性能有待进一步提高<sup>[3]</sup>。过渡金属硫化物具有较高的 OER 活性,其中镍基硫化物(Ni<sub>x</sub>S<sub>y</sub>)由于高的地壳存储量、高的导电性和良好的化学稳定性等优点,被认为是有研究价值的 OER 催化剂<sup>[4]</sup>。与 NiS 和 NiS<sub>2</sub> 相比, Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 的结构中存在连续的网状 Ni—Ni 键,使其具有金属本征特性和高电导率<sup>[5]</sup>。Liu 等<sup>[6]</sup>通过水热法与电沉积相结合的方法成功合成了 NiFe-LDH@Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>-Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>/NF 纳米阵列,在电流密度为 1 000 mA/cm<sup>2</sup> 时,过电势仅为 298 mV。

笔者将二维镍铁双层氢氧化物负载到泡沫镍基底上,并作为骨架原位生长了具有金属本征特性和

收稿日期:2024-09-30;修回日期:2024-12-03

作者简介:高瑜(1989-),男,硕士,助教,主要从事材料结构表征、无损检测等方面研究,20181089@llu.edu.cn;张斯瞳(2000-),女,硕士生,主要从事光电催化材料等方面的研究,通讯联系人,18434848368@163.com。

高电导率的 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, 得到了具有三维核桃状结构的 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 纳米阵列。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂

硝酸镍、硝酸铁、钼酸钠、硫化钠、硫代乙酰胺, 均为分析纯; 泡沫镍。

### 1.2 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 电催化剂的合成

#### 1.2.1 二维镍铁双层氢氧化物的合成

先将硝酸镍和硝酸铁溶解于去离子水的烧杯中, 标记为溶液 A; 然后将尿素和氟化铵缓慢地加入溶液 A 中, 搅拌 30 min 形成透明溶液 B; 最后将 B 溶液与泡沫镍置于反应釜中, 加热至 120℃ 恒温 8 h。所得样品记为 2D NiFe-NF。

#### 1.2.2 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的合成

先将硫化钠和硫代乙酰胺溶解于去离子水的烧杯中, 标记为溶液 A; 然后将尿素和钼酸钠依次加入溶液 A 中, 搅拌形成溶液 B; 最后将 B 溶液与泡沫镍置于反应釜中, 180℃ 恒温 10 h。最终产品记为 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF。Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 在不添加钼酸钠的条件下得到。

#### 1.2.3 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 的合成

先将硫化钠和硫代乙酰胺溶解于去离子水的烧杯中, 标记为溶液 A; 然后将尿素和钼酸钠依次加入溶液 A 中, 搅拌形成溶液 B; 最后将 B 溶液与 2D NiFe-NF 转移至反应釜, 于 180℃ 分别恒温 8、10 h 和 12 h。所得样品记为 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe(8 h)-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe(10 h)-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe(12 h)-NF。

#### 1.2.4 2D NiFe@Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF

先将硝酸镍和硝酸铁溶解于去离子水的烧杯中, 标记为溶液 A; 然后将尿素和氟化铵缓慢地加入溶液 A 中, 搅拌 30 min 形成透明溶液 B; 最后将 B 溶液与 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 放于反应釜中, 升温至 120℃ 恒温 8 h。最终产品记为 2D NiFe@Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF。

## 1.3 测试表征

### 1.3.1 催化材料的表征

利用 X 射线衍射仪测试样品的晶体结构; 利用扫描电子显微镜测试样品形貌。

### 1.3.2 电化学催化性能测试

利用电化学工作站对样品的电化学催化性能进行测试。

可逆氢电极 (RHE) 的转换方程为<sup>[3]</sup>:

$$E_{\text{RHE}} = E^{\circ}_{\text{Ag/Cl}} + 0.197 + 0.059 \times \text{pH} \quad (1)$$

过电势 ( $\eta$ ) 的计算式为<sup>[3]</sup>:

$$\eta = E_{\text{RHE}} - 1.23 \quad (2)$$

(1) 线性扫描伏安法: 在扫速为 5 mV/s 条件下测试。

(2) 塔菲尔曲线 (Tafel): 极化曲线计算方程为<sup>[3]</sup>:

$$\eta = b \log j + a \quad (3)$$

式中:  $\eta$ 、 $j$ 、 $b$  分别为过电势、电流密度和 Tafel 斜率。

(3) 电化学阻抗 (EIS): 在振幅 5 mV 的条件下测试。

(4) 循环伏安图 (CV) 扫速为 10~50 mV/s。OER 的双电层电容 ( $C_{\text{dl}}$ ) 通过绘制  $\Delta j$  和不同扫描速率确定 [见式 (4)]<sup>[7]</sup>。其电化学活性表面积 (ECSA) 由式 (5) 进行评估<sup>[7]</sup>:

$$\Delta j = j_a - j_c \quad (4)$$

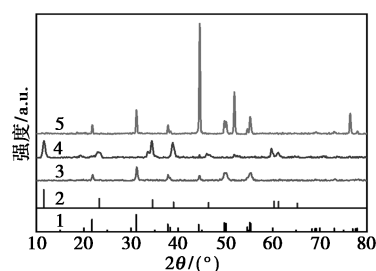
$$\text{ECSA} = C_{\text{dl}}/C_s \quad (5)$$

(5) 稳定性测试: 采用计时电流法进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

电催化剂的 XRD 图如图 1 所示。



1—Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>(JCPDS:44-1418); 2—2D NiFe(JCPDS:51-0463);  
3—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF; 4—2D NiFe-NF; 5—Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF

图 1 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF、2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的 X 射线衍射图

从图 1 可知, 位于 21.75、31.1、37.78、38.27、44.33、49.73、50.12、54.62、55.16、55.35° 处出现的衍射峰与 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> (JCPDS: 44-1418) 相匹配, 表明 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 被成功的制备。而位于 44.46、51.81、76.33° 处的强峰属于 Ni (JCPDS: 04-0850), 这是由于在刮制过程中导致大量的镍残留。在 2θ 为 11.53、23.28、34.56、39.01、60.28、61.25° 处出现的衍射峰与 2D NiFe (JCPDS: 51-0463) 一致, 说明 2D NiFe 被成功制备<sup>[8]</sup>。Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 的主衍射峰与 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 和 2D NiFe 的衍射峰基本一致, 证明具有三维核桃状结构 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 被成功合成, 但衍射峰强度降低, 这是由于材料无定形转变导致的<sup>[3]</sup>。

## 2.2 微观形貌分析 (SEM)

电催化剂的 SEM 图如图 2 所示。

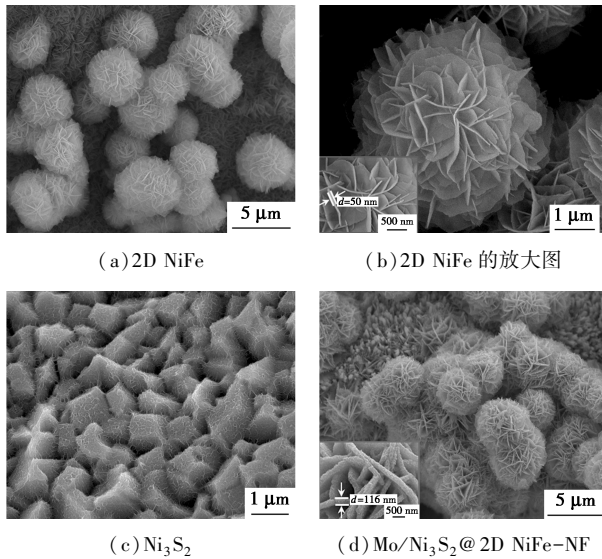
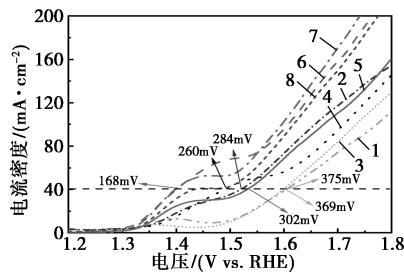


图 2 2D NiFe、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 的 SEM 图

从图 2(a)、图 2(b) 可知, 2D NiFe 是由相互连接的纳米片组成的微米级小球, 其直径大约为 5 μm, 这种独特的分层结构有利于 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 的生长, 同时可以提供丰富的活性位点, 加快氧气释放<sup>[9]</sup>。从图 2(c) 可知, Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 由表面呈蜂巢状的纳米棒相互连接组成, 这种独特结构有利于生长在 2D NiFe 的表面。从图 2(d) 可知, Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 的形貌没有发生改变, 但纳米片厚度变为了 116 nm, 说明成功地将 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 垂直生长在 2D NiFe 表面, 形成了具有三维核桃状结构的 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 独特纳米阵列, 这种结构有利于电子传输和传质<sup>[10]</sup>。

## 2.3 线性扫描伏安测试

电催化剂的线性扫描伏安曲线如图 3 所示。



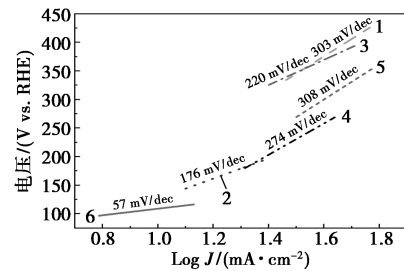
1—NF; 2—2D NiFe-NF; 3—Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF; 4—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF;  
5—2D NiFe@ Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF; 6—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(8 h)-NF;  
7—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF;  
8—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(12 h)-NF

图 3 线性扫描伏安曲线

由图 3 可知, Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的过电势为 369 mV@40 mA/cm<sup>2</sup>, 而 Mo 的掺杂成功地降低了其的过电势, Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的过电势为 260 mV@40 mA/cm<sup>2</sup>, 低于 2D NiFe-NF 的 284 mV@40 mA/cm<sup>2</sup>, 说明 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 在提高 OER 的活性中起主要作用。Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe-NF 的电催化性能随着水热时间的增加先减小后增大, 而 2D NiFe@ Mo Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的过电势为 302 mV@40 mA/cm<sup>2</sup>, 但 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe(10 h)-NF 的过电势最低为 168 mV, 说明合适的水热反应时间和生长顺序可以增加电催化活性<sup>[9]</sup>。结果表明, Mo 的掺杂成功地提高了 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的电催化活性, 同时 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 与 2D NiFe 的协同效应可以提高电催化的活性。

## 2.4 塔菲尔曲线

Tafel 值越低, 电催化动力学越好<sup>[11]</sup>, NF、2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、2D NiFe@ Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe(10 h)-NF 的 Tafel 曲线如图 4 所示。



1—NF; 2—2D NiFe-NF; 3—Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF; 4—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF;  
5—2D NiFe@ Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF; 6—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF

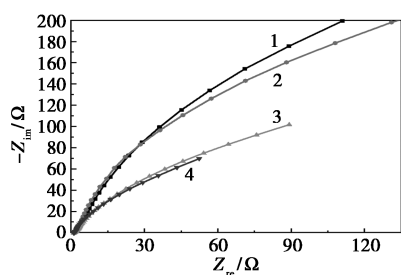
图 4 NF、2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、  
2D NiFe@ Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D  
NiFe(10 h)-NF 的 Tafel 曲线

从图 4 可知, 2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 和 2D NiFe@ Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的 Tafel 斜率分别为 176、220 mV/dec 和 306 mV/dec, 而 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe(10 h)-NF 的 Tafel 斜率最低, 为 57 mV/dec, 具有最好的电催化反应动力学, 说明合适的生长顺序可以增加电催化活性, 同时 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 与 2D NiFe 的协同作用可以提高反应动力学。

## 2.5 电化学阻抗测试

EIS 的大小影响电荷的转移效率, 2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@2D NiFe(10 h)-NF 的电化学阻抗图如图 5 所示。

从图 5 可知, 与 2D NiFe-NF 和 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 相比, Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的电化学阻抗最小, 说明 Mo 的掺



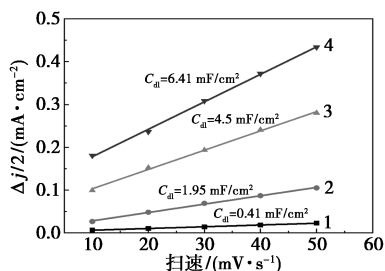
1—2D NiFe-NF; 2—Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF; 3—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF;  
4—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF

图 5 2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 的电化学阻抗图

杂可以加快电荷的转移效率。2D NiFe-NF 和 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的协同作用进一步降低了 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 的电化学阻抗,有效提高电荷转移动力学,提高了电子转移速率。

### 2.6 ESCA 测试

从式(5)可知,  $C_{dl}$  值越大, 催化剂的 ECSA 越大, 其催化活性位点越多<sup>[12]</sup>, 2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 的双电层电容图如图 6 所示。



1—2D NiFe-NF; 2—Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF; 3—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF;  
4—Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF

图 6 2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 的双电层电容图

由图 6 可知, Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 的  $C_{dl}$  值为 1.95 mF/cm<sup>2</sup>, 而 Mo 元素的成功掺杂提高了其电催化活性比表面积, 同时 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 阵列具有最大的  $C_{dl}$ , 为 6.41 mF/cm<sup>2</sup>, 说明三维核桃状结构的 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe-NF 独特纳米阵列具有更大的 ECSA, 可以为电催化提供更多的活性位点。

### 2.7 稳定性测试

对 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 的电催化稳定性进行了测试, 结果如图 7 所示。

从图 7 可知, 在 11.6 mA/cm<sup>2</sup> 的电流密度下, Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 电流密度保持超过了 50 h, 说明 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe(10 h)-NF 阵列具

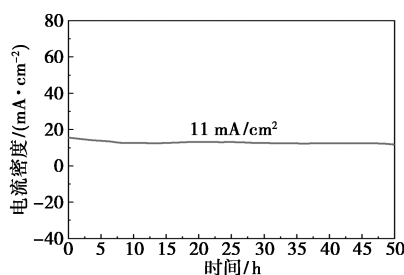


图 7 Mo-Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ NiFe LDH/NF-10 的稳定性测试结果

有良好的电催化稳定性, 有望应用于大规模商业中<sup>[9]</sup>。

## 3 结论

(1) 以泡沫镍为基底, Mo-Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 纳米片原位生长在二维镍铁双层氢氧化物表面, 形成了具有三维核桃状结构的 Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe-NF 纳米阵列。这种独特结构不仅可以提高其结构的稳定性, 加快电子转运速率, 而且可以加快氧气释放, 提高催化活性。

(2) 与 NF、2D NiFe-NF、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF、2D NiFe@ Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>-NF 相比, Mo/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@ 2D NiFe-NF 具有优异的催化活性和稳定性: 过电势为 168 mV@ 40 mA/cm<sup>2</sup>; Tafel 斜率为 57 mV/dec; 电化学阻抗最小;  $C_{dl}$  值为 6.41 mF/cm<sup>2</sup>; 稳定性维持为 50 h@ 11.6 mA/cm<sup>2</sup>。

## 参考文献

- [1] Cai Y, Shi Y X, Shi W L, et al. A one-photon excitation pathway in 0D/3D CoS<sub>2</sub>/ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> composite with nanoparticles on micro-flowers structure for boosted visible-light-driven photocatalytic hydrogen evolution [J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 238: 109955.
- [2] Sun H, Yan Z, Liu F, et al. Self-supported transition-metal-based electrocatalysts for hydrogen and oxygen evolution [J]. Advanced Materials, 2020, 32: 1806326.
- [3] Yang Z, Lin Y, Jiao F X, et al. In situ growth of 3D walnut-like nano-architecture Mo-Ni<sub>2</sub>P@ NiFe LDH/NF arrays for synergistically enhanced overall water splitting [J]. Journal of Energy Chemistry, 2020, 49: 189-197.
- [4] Yan C, Huang J, Wu C, et al. In-situ formed NiS/Ni coupled interface for efficient oxygen evolution and hydrogen evolution [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 42: 10-16.
- [5] Jiang N, Tang Q, Sheng M, et al. Nickel sulfides for electrocatalytic hydrogen evolution under alkaline conditions: A case study of crystalline NiS, Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, and Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> nanoparticles [J]. Catalysis Science & Technology, 2016, 6(4): 1077-1084.

(下转第 215 页)

- light-driven performance for tetracycline degradation and bacterial inactivation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6): 111421.
- [9] Yi S, Li Y, Sun Z, *et al.* Z-scheme ZnV<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterojunction catalyst produced by the one-pot method for the degradation of tetracycline under visible light [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 62(1): 72-84.
- [10] Saib F, Özel F, Sarılmaz A, *et al.* Photo-electrochemical properties of p-type AgCoO<sub>2</sub> prepared by low temperature method [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2019, 91: 174-180.
- [11] Tian N, Huang H, He Y, *et al.* Mediator-free direct Z-scheme photocatalytic system: BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> organic-inorganic hybrid photocatalyst with highly efficient visible-light-induced photocatalytic activity [J]. *Dalton Transactions*, 2015, 44(9): 4297-4307.
- [12] Li Y, Li H, Li S, *et al.* Boosting the photocatalytic hydrogen evolution performance by fabricating the NiO/Zn<sub>3</sub>In<sub>2</sub>S<sub>6</sub> p-n heterojunction [J]. *Applied Surface Science*, 2024, 642: 158622.
- [13] Sun H, Wang L, Wang X, *et al.* A novel WO<sub>3</sub>/ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>/CoWO<sub>4</sub> heterojunction for enhancement of photocatalytic degradation sparfloxacin; Dual S-scheme multi-charge transfer mode and Mechanistic pathway [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2): 112386.
- [14] Chen Q, Hu L, Shi Y, *et al.* Cu<sub>2</sub>O/WO<sub>3</sub> S-scheme heterojunctions for photocatalytic degradation of levofloxacin based on coordination activation [J]. *Chemosphere*, 2024, 352: 141446.
- [15] Xu B, An Z, Li M, *et al.* Photocatalytic degradation of tetrabromobisphenol A by Z-scheme WO<sub>3</sub>/ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> heterojunction; Efficiency, mechanism and toxicity evaluation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6): 111522.
- [16] Xue J, Xiao W, Shi L, *et al.* Efficient degradation of ciprofloxacin by a flower-spherical Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>/BiOCl Z-type heterojunction photocatalyst enriched with oxygen vacancies [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6): 111235.
- [17] Parida V K, Srivastava S K, Chowdhury S, *et al.* Facile synthesis of 2D/0D Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MnO<sub>2</sub> Z-scheme heterojunction for enhanced visible light-assisted photocatalytic degradation of acetaminophen [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 472: 144969.
- [18] Shao C, Zhang J, Wang Z, *et al.* Photo-Fenton degradation of tetracycline on nitrogen vacancy and potassium-doped Z-scheme FeOCl/NvCN heterojunction with low H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> consumption; Activity and mechanism [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 970: 172532.
- [19] Sun H, Qin P, Guo J, *et al.* Enhanced electron channel via the interfacial heterotropic electric field in dual S-scheme g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/WO<sub>3</sub>/ZnS photocatalyst for year-round antibiotic degradation under sunlight [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 470: 144217.
- [20] Zhang S, Zhao X, Niu H, *et al.* Superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as catalysts for the catalytic oxidation of phenolic and aniline compounds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/3): 560-566.
- [21] Waheed I F, Hamad M A, Jasim K A, *et al.* Degradation of methylene blue using a novel magnetic CuNiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposite as heterojunction photocatalyst [J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 133: 109716. ■

(上接第 208 页)

- [6] Liu L Y, Chen Y Y, Zhang Q, *et al.* Superhydrophilic NiFe-LDH@Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>-Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>/NF heterostructures for high-current-density freshwater/seawater oxidation electrocatalysts [J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2024, 354: 124140.
- [7] Yang Z, Lin Y, Jiao F X, *et al.* Morphology engineering of 3D nanostructure MMNS as bifunctional electrocatalysts towards high-efficient overall water splitting [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 502: 144147.
- [8] Ning F Y, Shao M F, Xu S M, *et al.* TiO<sub>2</sub>/graphene/NiFe-layered double hydroxide nanorod Array photoanodes for efficient photoelectrochemical water splitting [J]. *Energy Environmental Science*, 2016, 9(8): 2633-2643.
- [9] 刘文辉, 段永明, 王宏伟, 等. W-Ni<sub>2</sub>P@NiFe LDH/NF 的合成及其用于高效电催化析氧研究 [J]. *现代化工*, 2024, 44(1): 183-187.
- [10] Yang C C, Zai S F, Zhou Y T, *et al.* Fe<sub>3</sub>C-Co nanoparticles encapsulated in a hierarchical structure of N-doped carbon as a multifunctional electrocatalyst for ORR, OER, and HER [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 9(4): 1901949.
- [11] Badam R, Hara M, Huang H H, *et al.* Synthesis and electrochemical analysis of novel IrO<sub>2</sub> nanoparticle catalysts supported on carbon nanotube for oxygen evolution reaction [J]. *Science Direct*, 2018, 8(34): 1-10.
- [12] Gong Y Q, Pan H L, Xu Z F, *et al.* ACo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (A=Ni, Zn, Mn) nanostructure arrays grown on nickel foam as efficient electrocatalysts for oxygen evolution reaction [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(31): 14360-14368. ■

欢迎浏览《现代化工》网站 <http://www.xdhg.com.cn>