

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.002

低电流密度分级多孔 NiFe/Ni@NM 构筑及高效析氧

郑晓漫, 朱业权, 明铄, 李淮孜, 汪玉, 王振卫

(上海应用技术大学 化工与能源技术学部, 上海 201418)

摘要: 针对 NiFe 基粉体催化剂在高电流密度下易剥落且传质效率低的瓶颈问题, 提出了一种低电流密度动态氢气泡模板电沉积与选择性刻蚀技术相结合的方法, 构筑了分级多孔 Ni 基集流体(Ni@NM)作为自支撑基底, 并在其表面电沉积了 NiFe 氢氧化物(NiFe/Ni@NM)。系统研究了 NiFe 膜层的电沉积电流密度对阳极析氧反应(OER)性能的影响。结果表明: 在 $5 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ 沉积电流密度下制备的、蜂窝状分级多孔纳米片阵列电极(NiFe/Ni@NM-5)表现出卓越的电催化性能, 在 $100 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 高电流密度下, 可稳定运行 100 h, 性能无明显衰减。本研究揭示了 NiFe/Ni@NM 自支撑多孔电极在高效性、稳定性及经济可扩展性方面的显著优势, 为低成本 NiFe 基 OER 催化剂的规模化应用提供了全新的材料设计理念和制备策略。

关键词: 电沉积; 氢气泡模板; 多孔结构; 析氧反应

中图分类号: TQ153; TG156.1 **文献标志码:** A

Construction of hierarchical porous NiFe/Ni@NM at low current density for efficient oxygen evolution

ZHENG Xiaoman, ZHU Yequa, MING Shuo, LI Huaizi, WANG Yu, WANG Zhenwei

(School of Chemical Engineering and Energy Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: To solve the tendency to peel off and low mass transfer efficiency of NiFe-based powder catalysts at high current densities, a new method combining low-current-density dynamic hydrogen bubble template (DHBT) electrodeposition with selective etching was proposed. A hierarchical porous Ni-based Ni@NM current collector was fabricated as a self-supporting substrate, onto which NiFe hydroxide (NiFe/Ni@NM) was deposited. The influence of NiFe deposition current density on oxygen evolution reaction (OER) performance was systematically investigated. Results show that the honeycomb-structured hierarchical porous nanosheet array electrode (NiFe/Ni@NM-5) prepared at $5 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$, which shows excellent stability for 100 h at $100 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ without decay. It demonstrates that the NiFe/Ni@NM electrode has great advantages in higher efficiency, stronger stability and better scalability. It provides new design concepts and fabrication strategies for industrial-scale application of low-cost NiFe-based OER catalysts.

Keywords: electrodeposition; hydrogen bubble template; porous structure; oxygen evolution reaction

收稿日期: 2025-06-26 修回日期: 2025-12-21

作者简介: 郑晓漫(2000—), 女, 硕士生, 研究方向为电沉积制备析氧材料, e-mail: xmzheng2025@163.com

通信作者: 汪玉, e-mail: yuwang@sit.edu.cn; 王振卫, e-mail: wangzhenwei@sit.edu.cn

基金项目: 上海市教委国内访学项目(10110N251006)

引用信息: 郑晓漫, 朱业权, 明铄, 等. 低电流密度分级多孔 NiFe/Ni@NM 构筑及高效析氧[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 13-19, 26.

ZHENG Xiaoman, ZHU Yequa, MING Shuo, et al. Construction of hierarchical porous NiFe/Ni@NM at low current density for efficient oxygen evolution[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 13-19, 26.

随着全球能源结构的转型和可再生能源的快速发展,电解水制氢因其零碳排放和能量转换效率高等优势,已成为实现绿色氢能制备的关键技术路径之一^[1-2]。碱性电解水制氢技术是目前最成熟的技术之一,且在国内外已经实现大规模生产^[3]。然而,该过程的整体能效受限于阳极析氧反应,其复杂的四电子转移机制导致动力学缓慢、过电位高,成为制约整体反应效率的关键因素^[4]。目前广泛应用的贵金属基催化剂(如RuO₂和IrO₂)尽管催化活性优异,但因资源稀缺、价格昂贵等问题,限制了其在大规模工业电解槽中的应用^[5]。开发高活性、低成本且稳定性优异的非贵金属基OER催化剂,成为电解水研究领域的重要方向和挑战。

在众多非贵金属催化体系中,NiFe基材料因其可调节的电子结构及丰富的资源,是近年来研究最活跃的一类OER催化剂^[6]。为了进一步提升NiFe活性组分的电催化性能,构建高比表面积的催化剂是关键^[7]。这类结构不仅能暴露更多活性位点,还能有效提高电解质浸润性和氧气释放效率,从而显著降低过电位^[8]。目前最常见的是将NiFe活性组分负载于石墨烯、碳纳米管等高比表面碳材料上,以构筑复合催化体系^[9]。然而,这类粉体催化剂需要粘结剂将其附着于导电基底,制备流程复杂、接触电阻高,且在高电流密度下因气体剧烈析出易导致粉体脱落、催化层剥离,进而引发活性损失与稳定性下降^[10]。因此,开发无需粘结剂的一体化自支撑NiFe电极,并结合高比表面结构设计,是构建高性能、工程可行OER催化电极的有效路径。

近年来,基于动态氢气泡模板(DHBT)的电沉积策略,凭借工艺温和、操作简便及可调孔结构等优势,已成为制备三维自支撑多孔金属电极基底的有效途径,并在能量转换与存储领域引起广泛关注^[11]。该方法通过在高电流密度下诱导H₂气泡瞬时生成与逸出,从而在金属沉积过程中自发形成多级孔隙结构,具备优良的传质通道和电导通路^[12]。Wang等^[13]采用DHBT方法在3 A·cm⁻²的电流密度下,在Ni泡沫上成功构筑了三维多孔Ni骨架,并在其上原位生长了NiFe LDH纳米层,所制备的NiFe/Ni电极展现出优异的催化活性和长期稳定性。尽管该类电极在结构设计方面取得重要进展,但其对高电流密度(通常>1 A·cm⁻²)的依赖严重制约了其在规模化工业制备中的经济性与工艺可控性^[14]。因此,开发一种在低电流密度条件下原位构筑分级多

孔Ni基底的策略,对于推动NiFe基OER催化剂的产业化应用具有重要意义。

针对上述问题,本研究提出了一种基于低电流密度动态氢气泡模板的电沉积策略,用于构筑分级多孔自支撑集流体基底。电沉积过程中引入Zn²⁺,依托其还原电位低于Ni²⁺的特点,在Ni网表面获得均匀多孔的NiZn合金镀层。借助KOH溶液对Zn成分进行选择刻蚀,成功制备出具有多级孔结构的Ni基底(Ni@NM)。在此基底表面,进一步快速电沉积原位生成NiFe氢氧化物,构建OER自支撑电极(NiFe/Ni@NM)。

1 实验

1.1 前处理

将200目镍网裁剪至1 cm × 2 cm的规格,并在1 cm × 1 cm处用热熔胶胶封,保证电镀面积和测试面积为1 cm × 1 cm。依次使用0.5 mol/L硫酸、无水乙醇和去离子水超声清洗15 min,去除表面氧化物和油污,然后取出吹干后待用。

1.2 镀液成分

NiZn镀液配置:将NiSO₄·6H₂O(65.6 g/L)、ZnSO₄·7H₂O(53.8 g/L)、NaCl(112.5 g/L)、无水柠檬酸(2.5 g/L)药品进行称量后加入纯水定容,超声并搅拌至药品溶解,此时液体中镍源与锌源比例为4:3,pH≈1,温度30℃。NiFe镀液配置:将NiSO₄·6H₂O(52.4 g/L)、FeSO₄·7H₂O(18.5 g/L)、NaCl(46.7 g/L)、无水柠檬酸(1.8 g/L)药品进行称量后加入纯水定容,超声并搅拌至药品溶解,该镀液镍源铁源比例为3:1,pH≈1,在室温下进行电沉积。

1.3 工艺流程

阳极为铂片(1 cm × 1 cm),阴极为镍网(有效面积1 cm × 1 cm)。NiZn镀层沉积电流密度为45 A/dm²,沉积时间为30 s,将样品命名为NiZn@NM。NiZn@NM在1 mol/L KOH中浸泡至气泡完全溢出(约30 min),制备Ni@NM样品(Zn溶出后,样品命名为Ni@NM)。二次沉积NiFe镀层的条件为3、5、15和25 A/dm²,沉积时间15 s,pH≈1,室温,样品命名为NiFe/Ni@NM-X(X为电流密度,X=3、5、15、25 A/dm²)。

1.4 表征

通过SEM(ZEISS, Sigma 360)对催化剂的表面形貌进行观察。使用Rigaku SmartLab SE型的XRD仪记录产物的XRD谱,采用Cu Kα辐射(2θ范围为

$5^\circ \sim 90^\circ$, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, 扫描速率 $= 2^\circ/\text{min}$ 。

1.5 测试方法

电化学测量在电化学工作站(Ivium V53522, 荷兰)上进行, 使用标准三电极体系, 在 1 mol/L KOH 中、 25°C 下进行测试。工作电极是通过电沉积制备负载催化剂的镍网, 汞/氧化汞电极和铂片电极分别用作参比电极和辅助电极。实验中的电位都以可逆氢电极为参考标准, 使用能斯特方程进行计算:

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{Hg/HgO}} + 0.0592 \times \text{pH} + 0.098 \quad (1)$$

式中: E_{RHE} 为相对RHE电位, V; $E_{\text{Hg/HgO}}$ 为实测 Hg/HgO 电位, V; $\text{pH} = 13.8$ 。

进行OER性能评估之前, 在 $0.915 \sim 1.915 \text{ V}$ 电压区间以 50 mV/s 的扫描速率进行连续循环扫描以活化催化剂, 10个循环后曲线重合。使用线性扫描伏安法评估OER活性, 在 $0.915 \sim 1.615 \text{ V}$ 扫描电压范围下, 扫描速率为 5 mV/s 。为消除溶液电阻对极化曲线的影响, 实测电位均采用85%的*iR*(电流-电阻)补偿校正。补偿参数通过电化学工作站的自动*iR*补偿功能实现, 在Data Options窗口中选择EIS, 设置频率为 5000 Hz 、振幅 5 mV 。过电势的计算公式为:

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

式中: η 为过电位, V; 1.23为 25°C 下OER的热力学平衡电位, V。

电化学阻抗谱(EIS)测试: 扫描频率 $100 \text{ kHz} \sim 0.01 \text{ Hz}$, 交流振幅为 5 mV 。通过计时电位法(CP)对催化剂的稳定性进行评价。

2 结果与讨论

2.1 相结构及形貌演变

在NM上电沉积Zn与Ni(NiZn@NM)后, 其XRD谱图显示(图1(a)), 除了基底峰外, 在 $2\theta \approx 43.6^\circ$ 处出现了一个宽峰, 对应Ni-Zn金属间化合物相。结合Zn-Ni相图及PDF数据, 该宽峰涵盖 $\text{Ni}_3\text{Zn}_{22}$ 与 NiZn 两种相^[15]。EDS分析(图1(d))测得Zn : Ni原子比约为2.4, 进一步证明了富Zn合金涂层的形成。对 NiZn@NM 样品进行KOH溶液蚀刻(Ni@NM)后, 富Zn相 $\text{Ni}_3\text{Zn}_{22}$ 的衍射峰完全消失(图1(a)), 而 NiZn 峰得以保持(图1(c)), 金属Ni峰的相对强度显著增强。该现象可归因于 $\text{Ni}_3\text{Zn}_{22}$ 在碱性条件下Zn的溶解及 NiZn 的抗碱腐蚀^[16]。蚀刻后EDS测得Zn : Ni原子比降至0.8(图1(e)), 印证了部分Zn被溶解浸出。

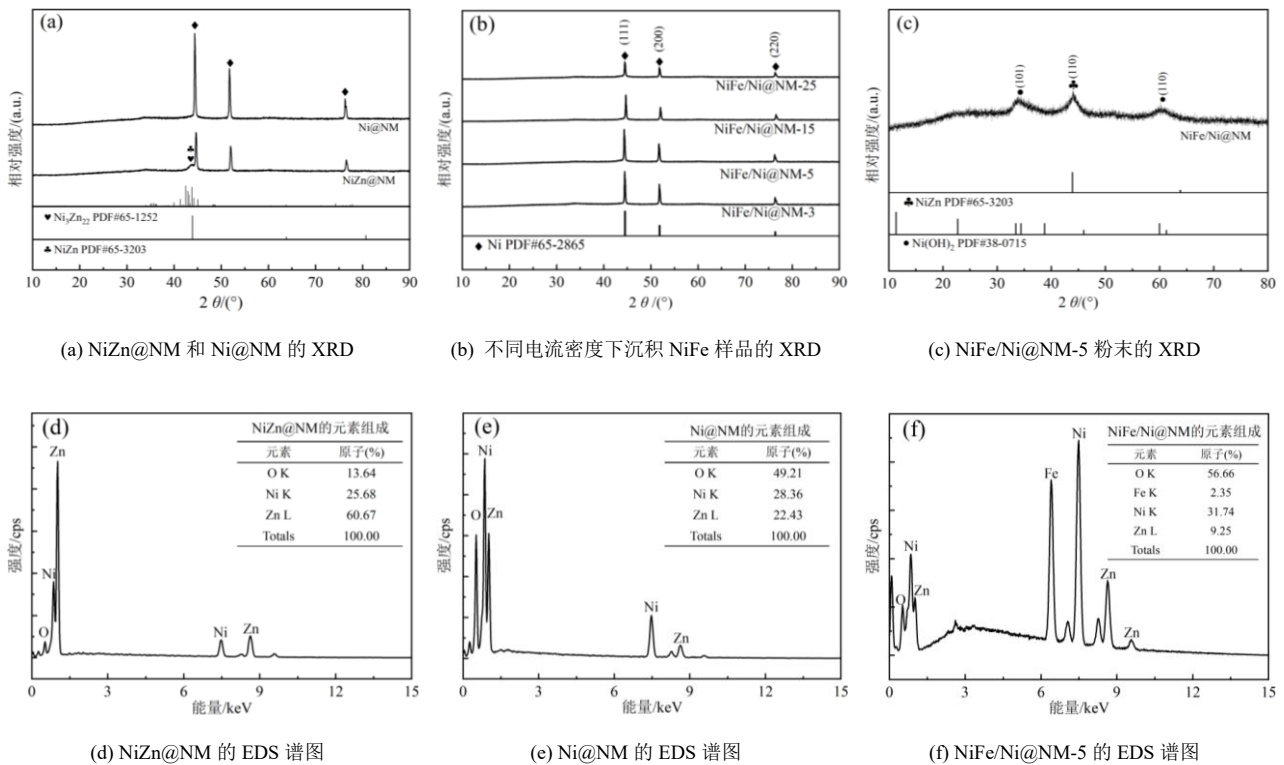


图1 NiZn@NM 、 Ni@NM 及 NiFe/Ni@NM-X 的 XRD 谱图及 EDS 谱图

Fig.1 XRD and EDS spectra of NiZn@NM , Ni@NM and NiFe/Ni@NM-X

通过XRD研究一系列NiFe/Ni@NM-X样品的晶体结构(图1(b))。所有样品在 $2\theta=44.5^\circ$ 、 51.8° 和 76.4° 处均出现衍射峰,可归属为镍网基底(PDF #65-2865)。但随着电流密度增加,基底峰强度呈持续减弱趋势。这表明NiFe镀层厚度随沉积速率提高而增加,从而削弱了基底衍射信号,与文献中关于电流密度与镀层生长速率的关系一致^[17]。未观察到NiFe晶相的产生,说明在高电流密度下NiFe的沉积量增加,在表面形成了无定形的NiFe化合物。

为排除基底干扰,将NiFe镀层从NiFe/Ni@NM-5样品上机械刮取,得到粉末后进行XRD分析(图1(c))。该粉末样品除NiZn与金属Ni的衍射峰外,在 $2\theta \approx 34.3^\circ$ 和 60.5° 处新增两峰,分别对应 α -Ni(OH)₂的(101)和(110)晶面(PDF#38-0715)^[18]。相较于纯 α -Ni(OH)₂,这两衍射峰向高角度轻微偏移,这是由于Fe离子掺入引起晶格常数减小^[19]。且EDS进一步确认了存在Fe元素(图1(f)),验证了Fe掺杂 α -Ni(OH)₂相的生成。

图2中的SEM图表征了样品在各阶段的微观形

貌变化。原始镍网表面平整光滑,镍纤维直径约为 $48.63 \mu\text{m}$ (图2(a)(b))。电沉积3D多孔NiZn合金膜后,镍纤维直径显著增大至 $75.71 \mu\text{m}$,由此可估算出所沉积合金膜的厚度约为 $13.54 \mu\text{m}$ (图2(c))。在每根镍纤维表面,合金膜呈现均匀、多孔的堆积结构,孔径分布范围为 $4\sim 18 \mu\text{m}$ 。此外,多孔壁上还可见若干球状颗粒(图2(d)),形成大量富集的缝隙孔。独特的多级孔结构有利于电解液的渗透及气体的高效扩散。经 1 mol/L KOH 溶液蚀刻处理后(Ni@NM),样品的3D多孔框架保持完整,孔道未发生明显塌陷或破坏(图2(e))。进一步放大可见,多孔壁纳米颗粒表面变得更加粗糙(图2(f)),并出现了清晰的棱角结构(图2(f)插图)。

2.2 电流密度对 Ni-Fe 镀层形貌的影响

为了探究电流密度对Ni-Fe镀层形貌的调控作用,在不同电流密度下制备了样品,并通过SEM进行了对比观察(图3)。当电流密度为 $3 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ 时,样品形貌与Ni@NM基底相似(图3(a)),放大图中可见

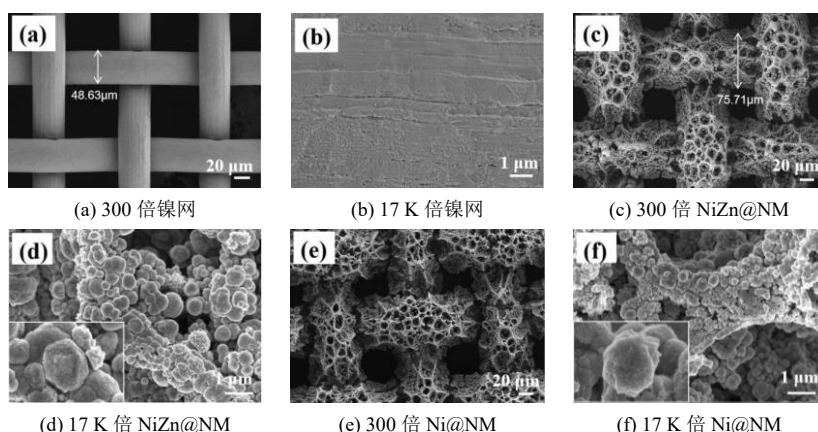


图2 原始镍网、NiZn@NM及碱蚀后Ni@NM的SEM图

Fig.2 SEM images of original nickel mesh, NiZn@NM and Ni@NM after alkali etching

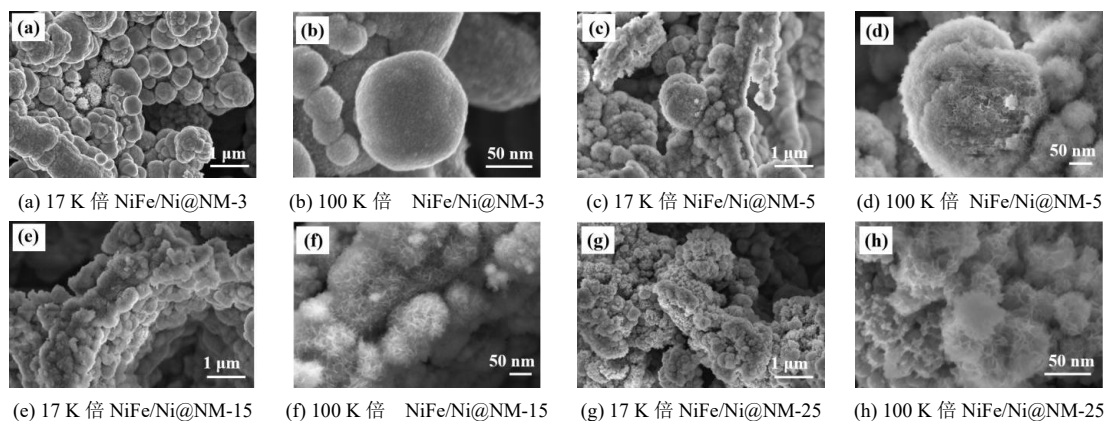


图3 NiFe/Ni@NM-X(X=3、5、15、25 A·dm⁻²)的SEM图

Fig.3 SEM images of NiFe/Ni@NM-X (X=3、5、15、25 A·dm⁻²)

构成孔壁的纳米颗粒呈光滑球形,其表面生长出不规则的小颗粒(图3(b))。电流密度提高至 $5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 时,纳米颗粒表面垂直生长出相互交联的纳米片,形成蜂窝状的阵列结构,实现了典型的分级多孔结构(图3(c)(d))^[13]。此种结构不仅有效增强了纳米片阵列的机械稳定性,还利于电解液离子和电子在多孔网络中的快速扩散与传输^[4]。当电流密度升至 $15 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 时,垂直生长的纳米片尺寸进一步增大,孔壁纳米颗粒堆积形成的间隙孔几乎被纳米片完全覆盖(图3(e)(f)),孔隙密度有所减弱。继续提高至 $25 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 时,样品呈现出纳米颗粒与纳米片并存的

双重形态(图3(g)(h))。综上,通过调控电沉积过程中的电流密度,可实现Ni-Fe镀层形貌的可控合成。

2.3 基底对OER电催化性能的影响

在含有 1 mol/L KOH 的典型三电极电化学体系中,采用线性扫描伏安法评估了NM、Ni@NM、NiFe@NM及NiFe/Ni@NM-5的OER催化活性(见图4(a)(b))。

NiFe/Ni@NM-5在 $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 电流密度下的过电位最低,仅为 237 mV ,而NM、Ni@NM、NiFe@NM的过电位分别为 401 、 315 和 271 mV 。这一结果表明,作为集流体基底的NM和Ni@NM对OER的活性较

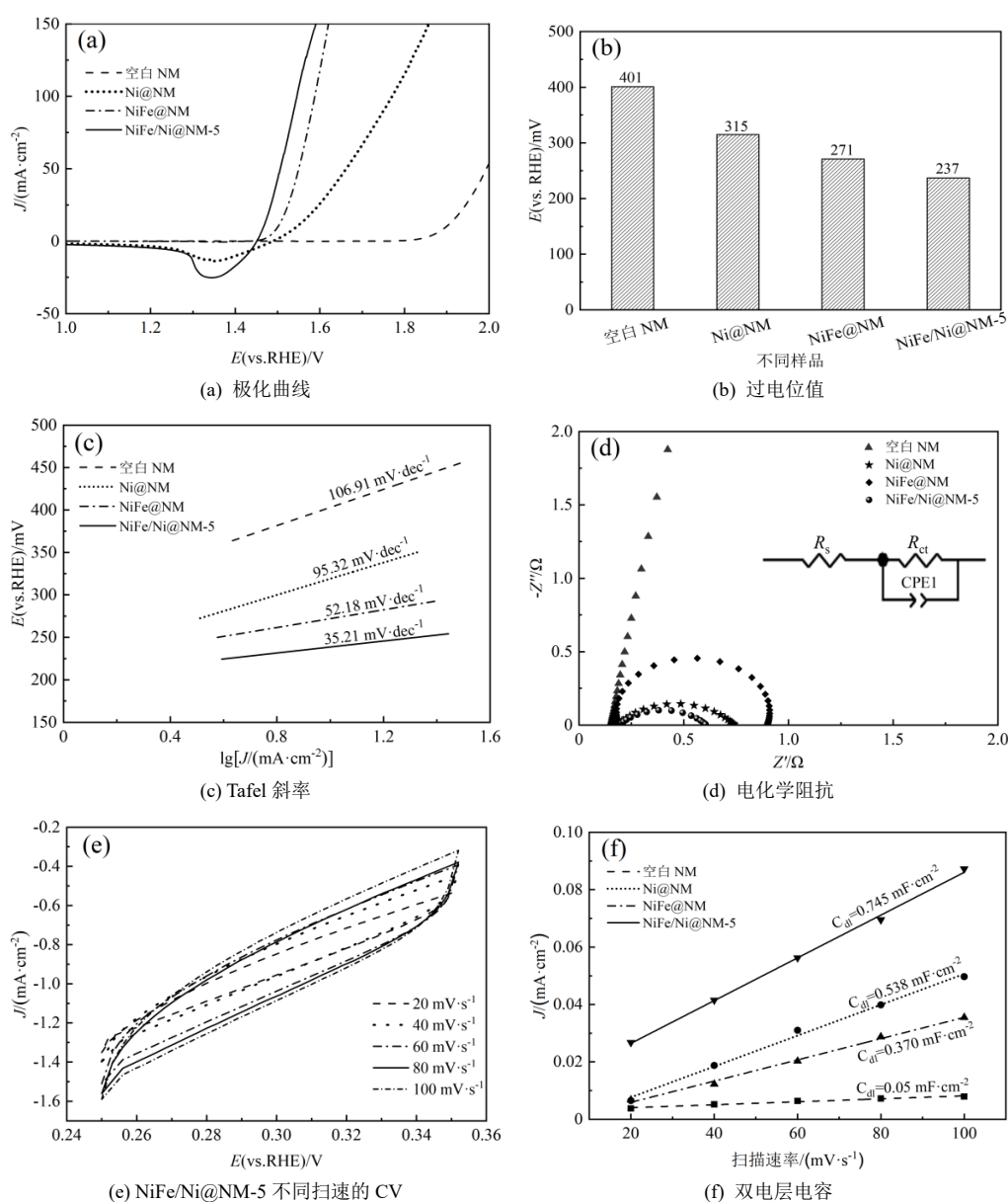


图4 NM、Ni@NM、NiFe@NM和NiFe/Ni@NM-5的极化曲线、过电位值、Tafel斜率、电化学阻抗图及双电层电容
Fig.4 Polarization curves, overpotential values, Tafel slopes, electrochemical impedance diagrams and double layer capacitance of NM, Ni@NM, NiFe@NM and NiFe/Ni@NM-5

低。引入Fe组分后，可显著降低OER过电位，这归因于Fe与Ni间的协同增效作用^[20]。此外，采用具有多级孔结构的Ni@NM作为基底，能够进一步提升Ni-Fe催化层的活性，原因是多级孔网络有效增强了电解液浸润及气体产物逸出，从而优化了催化位点的利用效率。通过Tafel曲线对催化剂的电化学动力学进行了评估。如图4(c)所示，NM、Ni@NM、NiFe@NM及NiFe/Ni@NM-5电极对应的Tafel斜率分别为106.91、95.32、52.18和35.21 mV·dec⁻¹。在所有测试样品中，NiFe/Ni@NM-5表现出最低的Tafel斜率，说明其电催化反应具有最低的动力学障碍。为评估材料的导电性能，采用电化学阻抗谱(EIS)测试揭示各样品界面电荷的传输特性(图4(d))。基于Randles等效电路^[21]对NM、Ni@NM、NiFe@NM-5及NiFe/Ni@NM-5样品的Nyquist图拟合(图4(d))，其中 R_{ct} 表示电荷转移电阻， R_s 表示溶液电阻。结果表明，NiFe/Ni@NM-5电极的 R_{ct} 明显低于其它对照样品，仅为0.415 Ω，表明其具有更加优异的电荷传输能力和更快的催化动力学。可见，NiFe/Ni@NM-5结构在促进电子转移、提升催化活性方面具有明显优势。

电催化剂的电化学活性表面积(ECSA)是决定其催化性能高低的关键指标。ECSA越大意味着可提供的电催化活性位点越多，有利于反应物和产物的吸脱附。通常，双电层电容(C_{dl})值越高，表明暴露的活性位点越丰富^[22]。如图4(e)和图4(f)所示，NiFe/Ni@NM-5的 C_{dl} 达到0.745 mF·cm⁻²，远高于NiFe@NM-5(0.370 mF·cm⁻²)及未改性镍网基底(0.05 mF·cm⁻²)。该结果进一步证明，通过构建多级多孔的Ni-Zn合金层显著提升了电极的比表面积，从而暴露出更多活性位点，增强了电催化活性。

如图5所示，为评估OER催化剂的稳定性，将

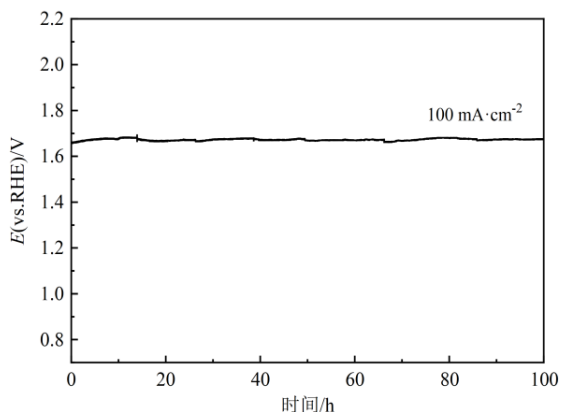


图5 NiFe/Ni@NM-5的计时电位曲线

Fig.5 Timed potential curve of NiFe/Ni@NM-5

NiFe/Ni@NM-5电极在1 mol/L KOH碱性电解液中，以100 mA·cm⁻²恒定电流密度进行长期电解测试。结果显示，该电极在连续100 h测试过程中，工作电位未见明显波动，充分证明了其出色的长期耐久性。

2.4 电流密度对 Ni-Fe 镀层 OER 电催化性能的影响

为了揭示电沉积电流密度对Ni-Fe镀层OER活性的调控机制，将不同电流密度制备得到的样品通过线性扫描伏安法进行了测试(图6)。结果显示，3 A·dm⁻²(NiFe/Ni@NM-3)下，在10 mA·cm⁻²时对应过电位最高，为301 mV。这是由于电流密度过小，仅生长出少量不规则小颗粒，活性位点较为匮乏。当电流密度升至5 A·dm⁻²(NiFe/Ni@NM-5)时，形成了蜂窝状分级多孔阵列结构，不仅增大了比表面积和活性位点密度，还为电子/离子传输提供了直通通道，使过电位降至最低，仅237 mV。在15 A·dm⁻²(NiFe/Ni@NM-15)制备条件下，纳米片尺寸进一步增大，部分覆盖了孔壁颗粒，孔隙密度下降，导致传质和催化活性略有削弱，过电位回升至248 mV。继续提高至25 A·dm⁻²(NiFe/Ni@NM-25)时，镀层呈现纳米颗粒与纳米片并存的混合形态，结构不够均匀，其过电位为254 mV。以上结果表明，只有在5 A·dm⁻²下形成的分级多孔纳米片阵列，才能在活性位点丰富性和传质效率之间取得最佳平衡，实现Ni-Fe镀层的最优OER催化性能。

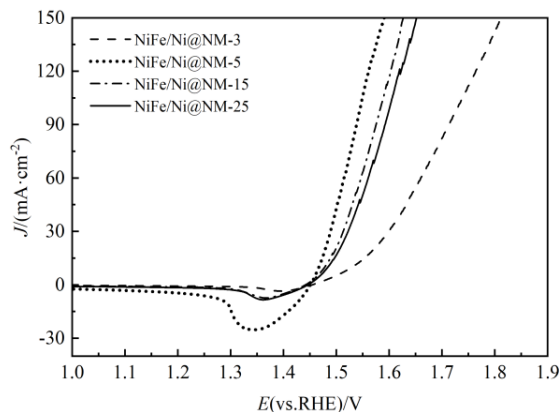


图6 系列 NiFe/Ni@NM 样品的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of a series of NiFe/Ni@NM samples

3 结论

采用动态氢气模板电沉积法，在低电流密度下制备了具有分级多孔结构的Ni基集流体作为自支撑基底。通过选择性刻蚀技术进一步优化其表面

特性,并结合精确调控的NiFe电沉积工艺,成功开发出高性能OER催化剂。其中,NiFe/Ni@NM-5电极表现出优异的电催化活性,在 $10\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 电流密度下仅需237 mV过电位,同时具有 $35.8\text{ mV}\cdot\text{dec}^{-1}$ 的低Tafel斜率。该复合电极在 $100\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 高电流密度条件下能够持续稳定运行100 h而无明显性能衰减,证明了其优异的长期耐久性。NiFe/Ni@NM-5的优异OER电催化性能主要归因于其独特的自支撑蜂窝状分级多孔纳米片阵列结构,该结构不仅提供了丰富的电催化活性位点,还构建了高效的气体产物逸出通道,同时显著增强了电极的机械稳定性。本研究设计的电极制备方法具有工艺简便、成本低廉且易于规模化等显著优势,为工业级水电解系统的大规模应用提供了创新性的材料设计思路和制备策略。

参考文献

- [1] LIU Y, QIN Y Y, YU D W, et al. Enhance water electrolysis for green hydrogen production with material engineering: a review [J]. *The Chemistry Record*, 2025, 25(6): e202400258.
- [2] 张春雁, 窦真兰, 徐桂芝, 等. PEM 电解槽制氢多相传输及转化模型综述[J]. *电池*, 2024, 54(4): 569-573.
- [3] 李海鹏, 孙邦兴, 李嘉焯, 等. 双碳目标下绿色制氢技术的进展[J]. *电池*, 2024, 54(2): 271-275.
- [4] WU Y T, WANG H, JI S, et al. Ultrastable NiFeOOH/NiFe/Ni electrocatalysts prepared by in-situ electro-oxidation for oxygen evolution reaction at large current density[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 564: 150440.
- [5] YU H, WANG Y H, ZHU C Y, et al. Amorphous FeOOH decorated CoSe₂ nanorod heterostructured arrays for efficient water oxidation[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 8(1): 2001310.
- [6] CHEN Y W, GUO J, CHEN B M, et al. Oxygen vacancy-induced crystal-amorphous interface in NiFe-LDH catalyst for enhanced OER performance[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2025, 69: 106829.
- [7] GAO G J, XU J L, TANG J, et al. Zn constructs micro/nano porous structure to boost efficient oxygen evolution reaction for bulk NiFe alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 903: 164004.
- [8] TANG Y, ZOU Z J, WU X G, et al. ZIF-67@POM hybrid-derived unique willow-shaped two-dimensional Mo-CoP nanostructures as efficient electrocatalysts for the oxygen evolution reaction[J]. *New Journal of Chemistry*, 2023, 47: 9887-9893.
- [9] ALAMRO F S, MEDANY S S, AL KADHI N S, et al. Modified NiFe₂O₄-supported graphene oxide for effective urea electrochemical oxidation and water splitting applications[J]. *Molecules*, 2024, 29(6): 1215.
- [10] JIN J, XIA J B, QIAN X, et al. Exceptional electrocatalytic oxygen evolution efficiency and stability from electrodeposited NiFe alloy on Ni foam[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 299: 567-574.
- [11] WANG J, SHAO H T, REN S R, et al. Fabrication of porous Ni-Co catalytic electrode with high performance in hydrogen evolution reaction[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 148045.
- [12] MODGHAN N S, MIRJALILI M, MOAYED M H, et al. A suitable porous micro/nanostructured Cu and Cu-Ni film: evaluation of electrodeposition behavior, electrocatalytic activity, and surface characterization of porous film[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2023, 170(7): 076506.
- [13] WANG P C, WAN L, LIN Y Q, et al. NiFe hydroxide supported on hierarchically porous nickel mesh as a high-performance bifunctional wlectrocatalyst for water splitting at large current density [J]. *Chemistry Sustainability Energy Materials*, 2019, 12(17): 4038-4045.
- [14] LI L, YAN S S, WANG H, et al. Ni-Fe nanosheets anchored on porous cobalt substrate towards oxygen evolution reaction [J]. *Catalysis Letters*, 2024, 154(8): 4088-4095.
- [15] LOTFIlotfi N, ALIOFKHAZRAEI M, RAHMANI H, et al. Zinc-Nickel alloy electrodeposition: characterization, properties, multilayers and composites [J]. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2018, 54(6): 1102-1140.
- [16] PARK J, KIM W, SUH C, et al. Catalytic properties of Ni-Zn alloy prepared by mechanical alloying for steam reforming from methanol [J]. *Metals and Materials International*, 2012, 18(2): 237-241.
- [17] JONES M I, MCCOLL I R, GRANT D M. Effect of substrate preparation and deposition conditions on the preferred orientation of TiN coatings deposited by RF reactive sputtering[J]. *Surface and Coatings Technology*, *下转26页*