

Ni/MoO₂ 纳米异质结构催化剂 助力高效碱性氢氧化反应

雷胜喜, 张淑娟, 罗浩*

(合肥工业大学化学与化工学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:开发了一种具有异质结构的复合 Ni/MoO₂ 催化剂, 异质界面可促进电子转移, 调节 Ni 的电子结构, 优化了 H 和 OH 的结合能, 从而提高催化性能。实验结果表明, Ni/MoO₂-0.2 的活性接近商用 Pt/C, 稳定性显著优于商用 Pt/C。其质量活性和交换电流密度分别达 5.02 mA/mg_{Ni} 和 1.07 mA/cm_{disk}², 是 Ni/MoO₂-0.1 的 12.2 倍和 5.9 倍。

关键词:燃料电池; 碱性氢氧化反应; 电催化; 纳米异质结构

中图分类号: TQ152

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)10-0181-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.10.029

Ni/MoO₂ nano heterostructure as effective catalyst for boosting hydrogen oxidation reaction in alkaline electrolytes

LEI Sheng-xi, ZHANG Shu-juan, LUO Hao*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A composite Ni/MoO₂ catalyst with a heterogeneous structure is developed. The heterogeneous interface can facilitate electron transfer, tune the electronic structure of Ni, and optimize the binding energy of H and OH, thereby enhancing catalytic performance. Experimental results indicate that the activity of Ni/MoO₂-0.2 is comparable to that of commercial Pt/C, with notably improved stability. Its mass activity and exchange current density reach 5.02 mA/mg_{Ni} and 1.07 mA/cm_{disk}², respectively, which are 12.2 and 5.9 times those of Ni/MoO₂-0.1.

Key words: fuel cell; alkaline hydrogen oxidation reaction; electrocatalysis; nano heterostructure

在“双碳”目标的战略背景下, 发展清洁、高效的新能源技术以替代传统的化石能源已经成为人们的普遍共识^[1-2]。燃料电池因能量转化效率高、运行温度低、启动快和能量密度高等优点受到人们的广泛关注和研究^[3-4]。对于阴离子交换膜燃料电池(AEMFC), 在碱性条件下使用非贵金属催化剂的氧还原反应(ORR)性能能够达到甚至超过 Pt 族贵金属催化剂, 但碱性条件下氢氧化反应(HOR)的性能比酸性条件下低 2~3 个数量级^[5-7]。所以在碱性条件下如何提高非贵金属催化剂的 HOR 性能成为研究热点^[8-10]。

近年来得益于阴离子交换膜以及碱性氧还原催化剂的发展, AEMFC 阳极 HOR 非贵金属催化剂的研究受到了国内外研究人员越来越多的关注^[11]。Ni 储量丰富, 其氧化物在碱性条件下具有良好稳定

性, 被认为是最有希望代替 Pt 的非贵金属之一^[12-13]。但 Ni 基催化剂相比于商业 Pt 基催化剂的活性大大降低, 所以需要采用合理的方式, 调节 Ni 基催化剂的电子结构, 使其具有适当的氢结合能(HBE)和羟基结合能(OHBE), 从而提高其 HOR 活性^[14-16]。如今已开发出许多提高 Ni 基材料 HOR 性能的策略, 如合金化^[17-18]、杂原子掺杂^[19-21]、载体效应^[22-23]和合金非晶化^[24]等。此外, 有研究表明通过界面工程的方法合成出的异质结构催化剂能够调节 Ni 的电子结构, 从而有效增强 HOR 活性。如 Yang 等^[25]通过引入富氧空位的 CeO₂, 合成了 CeO₂/Ni 异质结催化剂, 有效降低了 Ni 位点的 H 结合能, 同时增强了亲氧性, 有利于 OH 物种的吸附, 从而增强了 HOR 性能。Duan 等^[26]制备的 Ni/V₂O₃ 异质结构催化剂能够使电子从 Ni 转移到 V₂O₃, 从

收稿日期: 2025-01-20; 修回日期: 2025-08-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2024HGTCB0218)

作者简介: 雷胜喜(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为阴离子交换膜燃料电池阳极氢氧化催化剂, shengxiLei@outlook.com; 罗浩(1989-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为能源电催化, 通讯联系人, luohao@hfut.edu.cn。

而调节 Ni 位点的电子结构,能够优化 H 和 OH 结合能,同时能够防止 Ni 的过度氧化,从而在碱性条件下表现出优异的活性和稳定性。

本文通过简单的合成方法成功制备出了一种具有复合异质结构的 Ni/MoO₂-X 催化剂。对催化剂的组成成分以及形貌结构等进行表征,并对其电化学性能进行分析研究。

1 试剂与仪器

1.1 试剂

NiCl₂·6H₂O、氨三乙酸、(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O、KOH、浓氨水、异丙醇、无水乙醇,均为分析纯,购买自国药集团化学试剂有限公司;商用 Pt/C 催化剂,质量分数为 20%,购买自上海河森电气有限公司;萘酚,质量分数为 5%,购买自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;H₂/Ar 混合气(体积比 5/95);实验用水为经过提纯的超纯水,超纯水机购买自上海科治环保设备有限公司。

1.2 仪器

旋转环盘电极(RRDE-3A);电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9023A);离心机(TGL-16C);管式炉(OTF-1200X);比表面和孔径分析仪(ASAP-2460);电化学工作站(CHI660E-A19997a);X 射线衍射仪(D/MAX2500VL/PC);场发射扫描电子显微镜(Gemini 500);场发射透射电子显微镜(JEM-2100F);X 射线光电子能谱仪(ESCALAB250);电感耦合等离子体发射光谱仪(Thermo Fisher iCAP PRO)。

2 实验方法

2.1 材料制备

首先通过水热法合成前驱体。分别将 4 mmol NiCl₂·6H₂O 和 2 mmol 氨三乙酸溶解在 20 mL 去离子水和 20 mL 异丙醇中,持续搅拌待完全溶解后将上述溶液混合,在混合溶液中加入 $x(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($x = 0.5, 0.2, 0.1$ mmol, 下同),再逐滴滴加 1 mL 浓氨水,充分搅拌后将溶液转移至 100 mL 不锈钢反应釜中在 150℃ 条件下反应 6 h。将所得材料用去离子水和无水乙醇交替洗涤离心,在真空干燥箱中过夜干燥,研磨得到淡绿色的 NiMo-NTA 前驱体。接着通过高温 H₂ 还原的方法得到 Ni/MoO₂-X 异质结催化剂。将一定量的 NiMo-NTA 前驱体放在石英舟中,置于管式炉内,在 5% H₂/Ar 混合气氛下,450℃ 下高温煅烧 2 h,升温速率 5℃/min。冷却

至室温后取出研磨,得到黑色粉末状的 Ni/MoO₂-X 异质结催化剂。

2.2 电化学性能测试

所有的电化学测试都使用标准的三电极进行,其中 Hg/HgO(填充 1.0 mol/L NaOH 溶液)作为参比电极,石墨棒作为辅助电极,负载有 Ni/MoO₂-X 催化剂的玻碳电极(GCE)作为工作电极。工作电极的制备:将 5 mg Ni/MoO₂-X 催化剂分散在 1.0 mL 含质量分数 5% Nafion 的异丙醇和去离子水溶剂中,超声 30 min 以上,形成均匀的油墨。在 GCE 表面缓慢滴加油墨,在环境条件下干燥后,进行电化学测试。采用质量分数 20% Pt 的商用 Pt/C 进行比较。GCE 上 Pt 的负载量为 30 μg/cm²。在没有 *iR* 补偿的情况下,记录了线性扫描伏安曲线(LSV)。根据能斯特方程,所有的电位都用式(1)转换为可逆氢电极(E_{RHE} , V)电位:

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{Hg/HgO}} + 0.118 + 0.059 \times \text{pH} \quad (1)$$

其中: $E_{\text{Hg/HgO}}$ 表示测试电压, V。

每次电化学测试均采用 0.1 mol/L KOH 作为电解液。在转速为 1 600 r/min 下,用 RRDE 记录极化曲线。扫描电位范围为 -0.05 ~ 0.2 V (vs. RHE),扫速为 5 mV/s。动力学电流密度(j^k)可由 Koutecky-Levich 方程推导,首先根据公式(2)求出极限扩散电流密度 j^d ,再将 j^d 带入公式(3):

$$j^d = Bc_0\omega^{1/2} = 0.62n_F D^{2/3} \nu^{-1/6} c_0 \omega^{1/2} \quad (2)$$

$$1/j = 1/j^k + 1/j^d \quad (3)$$

式中: B 、 c_0 、 ω 、 n 、 F 、 D 、 ν 、 j^d 分别为 Levich 常数、H₂ 的溶解度(7.33×10⁻⁴ mol/L)、转速(r/min)、转移电子数、法拉第常数(96 485 C/mol)、H₂ 的扩散系数(3.7×10⁻⁵ cm²/s)、运动黏度(1.01×10⁻² cm²/s)测试的电流密度(mA/cm²)、极限扩散电流密度(mA/cm²)。

交换电流密度(j^0)可由 Butler-Volmer 方程[式(4)]推导:

$$j^k = j^0 \{ e^{\alpha_F \eta / RT} - e^{-(1-\alpha_F) \eta / RT} \} \quad (4)$$

式中: α 、 R 、 T 和 η 分别为传递系数、理想气体常数[8.314 J/(mol·K)]、温度(K)和过电位(V)。

为了评价催化剂的稳定性,在 -0.05 ~ 0.2 V 电位范围内, H₂ 饱和的 0.1 mol/L KOH 条件下,以 100 mV/s 扫速进行了 2 000 次加速耐久性实验。

3 结果与讨论

3.1 物相与形貌分析

图 1 为 Ni/MoO₂ 异质结构催化剂的 XRD 谱图。衍射峰分别与 Ni(JCPDS:04-0850)和 MoO₂(JCP-

DS:76-1807) 对应,表明 Ni/MoO₂ 催化剂已成功合成。图 1(a)为不同 Mo 含量的 Ni/MoO₂ 的 XRD 谱图。从图 1(a)可以看出,Mo 含量过低(0.1 mmol)时,XRD 仅出现 Ni 的衍射峰;随着加入 Mo 含量增加到 0.2 mmol,XRD 开始出现 MoO₂ 的衍射峰;当加入 Mo 含量过量(0.5 mmol)时,MoO₂ 衍射峰强度显著增强。图 1(b)为 Ni/MoO₂-0.2 在不同煅烧温度下的 XRD 谱图。从图 1(b)可以看出,当温度过低时(350℃),可能由于前驱体转化不完全,石墨化程度过低,晶相未完全形成,导致 XRD 几乎不出峰;随着煅烧温度的提高,MoO₂ 的峰显著增强,表明 MoO₂ 晶化变得明显。

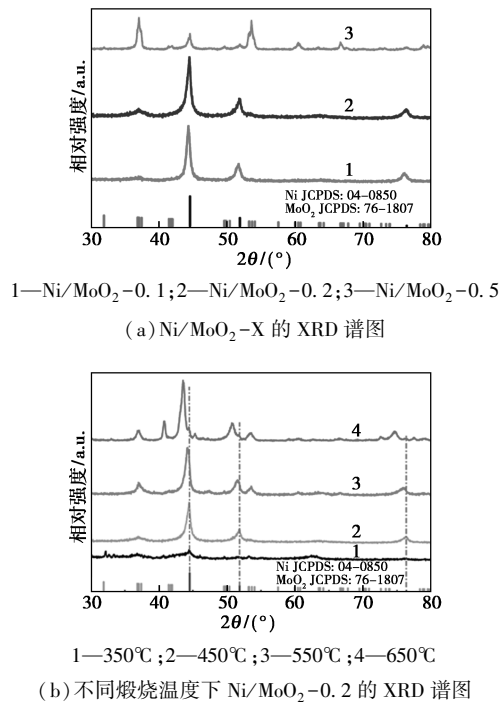


图 1 Ni/MoO₂ 异质结构催化剂的 XRD 谱图

不同放大倍数下 Ni/MoO₂-0.2 的 SEM 图[图 2(a)、(b)]及图 2(c)表明,制备的 Ni/MoO₂ 异质结构催化剂为大小均匀的纳米颗粒,较小的纳米颗粒分散在片状石墨上,有利于提供更多的活性位点,提高催化活性。Ni/MoO₂-0.2 的 HRTEM 图[图 2(d)]表明,存在明显的 Ni 与 MoO₂ 界面(白色虚线),同时 0.18、0.21 nm 的两种晶面间距的晶格条纹分别对应于 Ni 的(200)晶面和 MoO₂ 的(012)晶面。图 2(e)显示,Ni/MoO₂ 异质结构催化剂中 Ni、Mo、C、O、N 元素均匀分布,这些表征说明 Ni/MoO₂ 异质结构催化剂的成功制备。大的比表面积可提供更多的反应界面,从而提供更多的活性位点,提高催化性能。SEM 图显示,Ni/MoO₂-0.2 异质结构催化

剂颗粒之间存在较多的间隙以及碳片上具有多孔结构,因而具有较大的比表面积,其比表面积达到 110.63 m²/g(图 3)。

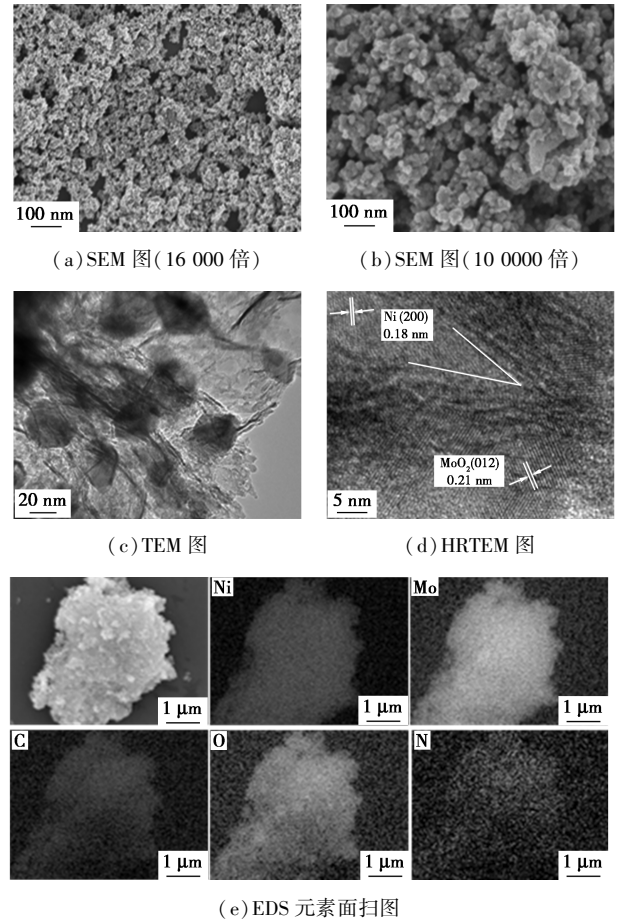


图 2 Ni/MoO₂-0.2 的 SEM、TEM、HRTEM 及 EDS 图

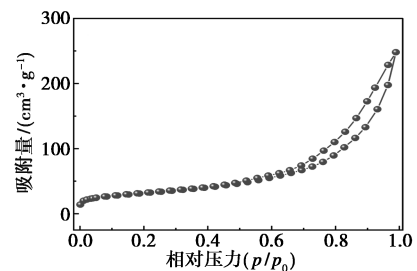


图 3 Ni/MoO₂-0.2 的氮气吸附-脱附曲线图

3.2 XPS 分析

借助 XPS 对 Ni/MoO₂-0.2 催化剂表面的化学元素组成和各元素化学状态进行分析,结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,Ni/MoO₂-0.2 催化剂含有 Ni、Mo、C、O、N 元素。图 4(b)中结合能为 284.8、286.5、288.7 eV 的 3 个信号峰分别对应于 C—C、C—N 和 C—O 键。图 4(c)中 530.7、532.9 eV 两个信号峰分别对应于晶格氧和吸附氧。图 4(d)

中 395.8、398.0、400.3 eV 3 个信号峰分别对应于吡啶氮、吡咯氮和石墨氮。从图 4(e) 可以看出, Ni/MoO₂-0.2 催化剂表面 Ni 元素主要以 0 价和+2 价存在, 部分+2 价 Ni 可能是单质 Ni 被氧化导致, 其中 852.8、870.0 eV 两个信号峰分别对应于 Ni⁰ 2p_{3/2} 和 Ni⁰ 2p_{1/2}, 874.0、856.3 eV 两个信号峰分别对应于 Ni²⁺ 2p_{1/2} 和 Ni²⁺ 2p_{3/2}, 880.3、862.2 eV 两个信号峰为卫星峰^[27-28]。图 4(f) 中 228.3 eV 信号峰为+2 价 Mo, 229.5、232.6 eV 信号峰对应+3 价 Mo, 230.5 eV 信号峰为+4 价 Mo, 235.7 eV 信号峰为+6 价 Mo。

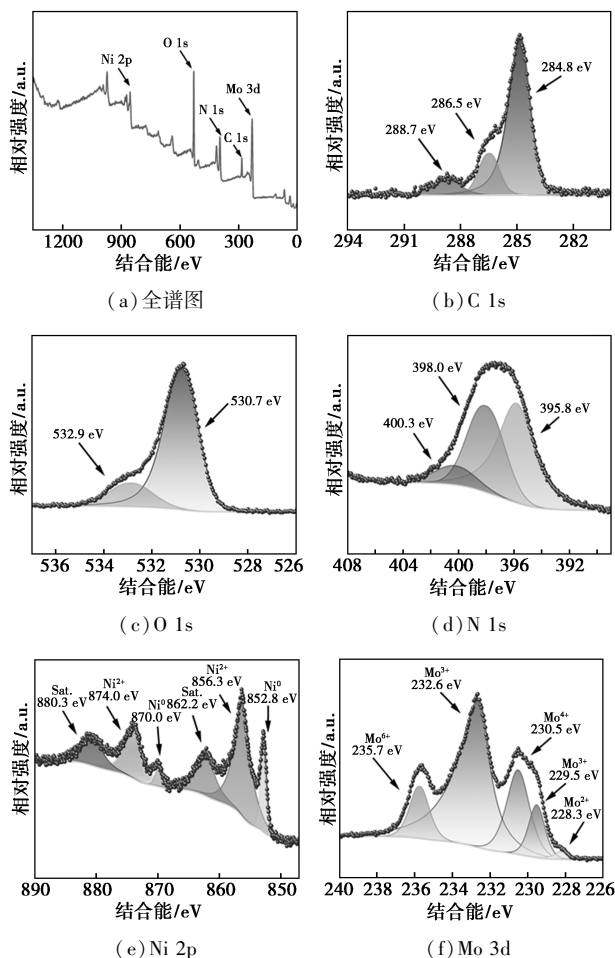
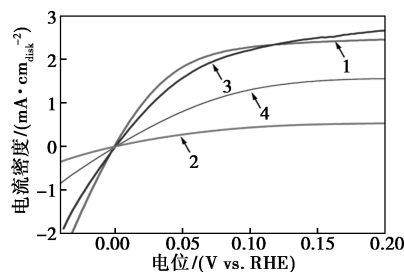


图 4 Ni/MoO₂-0.2 的全谱与各元素高分辨能谱图

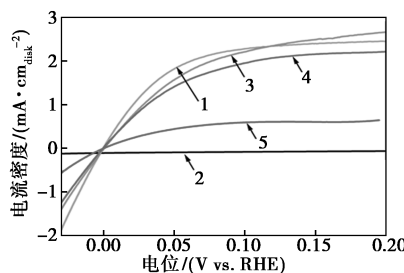
3.3 电化学性能分析

从图 5(a) 可以看出, Ni/MoO₂-0.2 的性能最佳, 50 mV 过电位下的电流密度为 1.57 mA/cm²_{disk}, 达到商业 Pt/C 电流密度 (1.82 mA/cm²_{disk}) 的 86%, 是 Ni/MoO₂-0.1 电流密度 (0.28 mA/cm²_{disk}) 的 5.6 倍, 是 Ni/MoO₂-0.5 的 2.0 倍。表明 MoO₂ 含量过多过少都会使催化剂性能下降, 与 XRD 的结果一致。Ni/MoO₂-0.1 中 MoO₂ 几乎不出峰, 亲氧性过

低, 不利于形成反应中间体 OH_{ad}; Ni/MoO₂-0.5 以 MoO₂ 的峰为主, 亲氧性过强, 不利于反应中间体 OH_{ad} 脱附。因煅烧温度是影响催化剂性能的重要因素, 所以进一步探究了煅烧温度对催化剂性能的影响, 结果如图 5(b) 所示。从图可以看出, 最佳煅烧温度为 450℃, 当温度过高或过低时催化剂性能都会下降, 与 XRD 的结果一致。当温度过低 (350℃) 时, XRD 几乎不出峰, 表明前驱体未开始或完全转化, 石墨化程度过低, 导致催化剂没有催化性能。当温度超过最佳温度, 催化剂性能开始下降, 当温度过高 (650℃) 时, MoO₂ 峰较强, 催化剂 MoO₂ 的相对含量过多, 导致催化性能大幅降低。



1—Pt/C; 2—Ni/MoO₂-0.1; 3—Ni/MoO₂-0.2; 4—Ni/MoO₂-0.5
(a) Ni/MoO₂-X 与 Pt/C 的 LSV 图

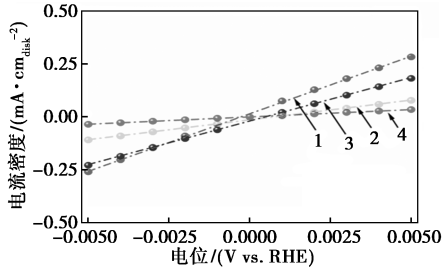


1—Pt/C; 2—Ni/MoO₂-350℃; 3—Ni/MoO₂-450℃;
4—Ni/MoO₂-550℃; 5—Ni/MoO₂-650℃
(b) 不同煅烧温度下 Ni/MoO₂-0.2 和 Pt/C 的 LSV 图

图 5 Ni/MoO₂ 催化剂与 Pt/C 的 LSV 对比图

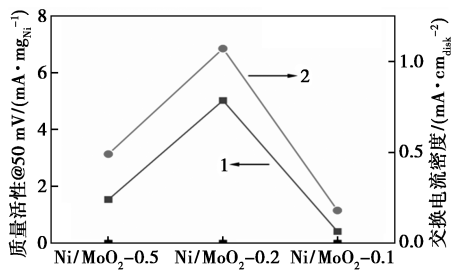
通过比较质量活性和交换电流密度, 来进一步评估催化剂的性能。在微极化区, 电流主要由动力学控制, 扩散控制可忽略不计。所测电流密度近似可看成动力学电流密度, 在相同条件下微极化区线性拟合的斜率可反映催化剂的催化活性。从图 6(a) 中可以看出, Ni/MoO₂-0.2 性能最接近 Pt/C, 优于 Ni/MoO₂-0.5 和 Ni/MoO₂-0.1, 与 LSV 测试结果相吻合。交换电流密度在研究电极过程动力学、电化学反应速率等方面具有重要意义, 反映了电极反应进行的难易程度, 可以用于分析和比较不同电极材料的反应活性和性能。结合图 6(a) 和式 (4) 可计算出交换电流密度。质量活性由式 (2) 和式 (3)

算出, Ni 的含量由 ICP 测出, 结果如图 6(b) 所示。结果表明, Ni/MoO₂-0.2 的质量活性和交换电流密度分别为 5.02 mA/mg_{Ni} 和 1.07 mA/cm²_{disk}, 均高于 Ni/MoO₂-0.1 和 Ni/MoO₂-0.5。分别是 Ni/MoO₂-0.1 的 12.2 倍和 5.9 倍。



1—Pt/C; 2—Ni/MoO₂-0.5; 3—Ni/MoO₂-0.2; 4—Ni/MoO₂-0.1

(a) Ni/MoO₂-X 与 Pt/C 在微极化区的线性拟合图

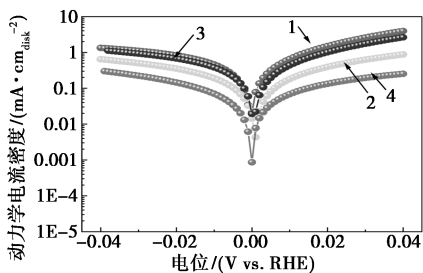


1—质量活性; 2—交换电流密度

(b) Ni/MoO₂-X 的质量活性与交换电流密度对比图

图 6 微极化区线性拟合、质量活性、交换电流密度图

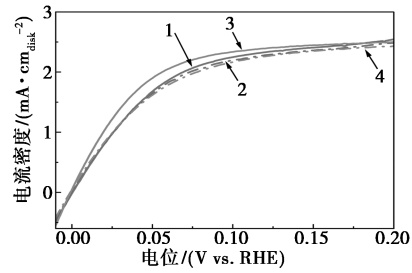
Ni/MoO₂-X 与 Pt/C 的塔菲尔曲线如图 7 所示。可以看出, 在微极化区 Ni/MoO₂-0.2 表现出了最佳的动力学活性, 性能接近 Pt/C, 优于 Ni/MoO₂-0.5 和 Ni/MoO₂-0.1。



1—Pt/C; 2—Ni/MoO₂-0.5; 3—Ni/MoO₂-0.2; 4—Ni/MoO₂-0.1

图 7 Ni/MoO₂-X 与 Pt/C 的塔菲尔曲线图

通过加速老化实验来评估催化剂的稳定性, 结果如图 8 所示。经过 2 000 圈循环后, Ni/MoO₂-0.2 在 50 mV 下的电流密度由 1.68 mA/cm²_{disk} 降为 1.65 mA/cm²_{disk}, 下降了 1.8%。相同条件下 Pt/C 电流密度由 1.90 mA/cm²_{disk} 降为 1.62 mA/cm²_{disk}, 下降了 14.7%。Ni/MoO₂-0.2 表现出了优异的稳定性。



1—起始 (Ni/MoO₂-0.2); 2—2 000 圈循环后 (Ni/MoO₂-0.2);
3—起始 (Pt/C); 4—2 000 圈循环后 (Pt/C)

图 8 Ni/MoO₂-0.2 和 Pt/C 稳定性对比图

4 结论

通过简单的水热和高温煅烧的方法, 开发出一种具有异质结构的 Ni/MoO₂ 催化剂, 异质界面促进了 Ni 与 MoO₂ 间的电子转移, 从而调节 Ni 的电子结构, 同时 MoO₂ 增强了亲氧性, 进而优化了 H 和 OH 结合能。其中 Ni/MoO₂-0.2 催化剂在碱性条件下表现出了优异的 HOR 活性和稳定性, 质量活性和交换电流密度达 5.02 mA/mg_{Ni} 和 1.07 mA/cm²_{disk}, 分别为 Ni/MoO₂-0.1 的 12.2 倍和 5.9 倍。2 000 圈循环前后 50 mV 过电位下的电流密度仅下降了 1.8%, 远低于商用 Pt/C 的 14.7%, 表现出了优异的稳定性。本研究为燃料电池降本增效、设计高效的碱性 HOR 催化剂提供了新的思路。

参考文献

- [1] Song F, Li W, Yang J, *et al.* Interfacial nickel nitride and nickel boosts both electrocatalytic hydrogen evolution and oxidation reactions[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4531.
- [2] Seh Z W, Kibsgaard J, Dickens C F, *et al.* Combining theory and experiment in electrocatalysis: Insights into materials design[J]. *Science*, 2017, 355(6321): aad4998.
- [3] Qin S, Duan Y, Zhang X L, *et al.* Ternary nickel-tungsten-copper alloy rivals platinum for catalyzing alkaline hydrogen oxidation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2686.
- [4] Cui Z, Ren Z, Ma C, *et al.* Dilute RuCo alloy synergizing single Ru and Co atoms as efficient and CO-resistant anode catalyst for anion exchange membrane fuel cells[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(28): e202404761.
- [5] Strmcnik D, Uchimura M, Wang C, *et al.* Improving the hydrogen oxidation reaction rate by promotion of hydroxyl adsorption[J]. *Nature Chemistry*, 2013, 5(4): 300-306.
- [6] Su L, Chen J, Yang F, *et al.* Electric-double-layer origin of the kinetic pH effect of hydrogen electrocatalysis revealed by a universal hydroxide adsorption-dependent inflection-point behavior[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(22): 12051-

- 12058.
- [7] Ni W, Wang T, Florent H, *et al.* An efficient nickel hydrogen oxidation catalyst for hydroxide exchange membrane fuel cells[J]. *Nature Materials*, 2022, 21(7): 804–810.
- [8] Yang Z, Lai W, He B, *et al.* Tailoring interfacial chemistry of defective carbon-supported Ru catalyst toward efficient and CO-tolerant alkaline hydrogen oxidation reaction[J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(26): 2300881.
- [9] Xue Y, Shi L, Liu X, *et al.* A highly-active, stable and low-cost platinum-free anode catalyst based on RuNi for hydroxide exchange membrane fuel cells[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5651.
- [10] Park J, Jang J H, Lee A, *et al.* Effect of support for non-noble NiMo electrocatalyst in alkaline hydrogen oxidation[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2021, 6(1): 2100226.
- [11] Ni W, Krammer A, Hsu C S, *et al.* Ni₃N as an active hydrogen oxidation reaction catalyst in alkaline medium[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(22): 7445–7449.
- [12] Wang T, Wang M, Yang H, *et al.* Weakening hydrogen adsorption on nickel via interstitial nitrogen doping promotes bifunctional hydrogen electrocatalysis in alkaline solution[J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(12): 3522–3529.
- [13] Zhuang Z, Giles S A, Zheng J, *et al.* Nickel supported on nitrogen-doped carbon nanotubes as hydrogen oxidation reaction catalyst in alkaline electrolyte[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10141.
- [14] Zhao X, Li X, An L, *et al.* Nitrogen-inserted nickel nanosheets with controlled orbital hybridization and strain fields for boosted hydrogen oxidation in alkaline electrolytes[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(3): 1234–1242.
- [15] Huang C, Feng M, Peng Y, *et al.* In situ construction of Ni/Ni_{0.2}Mo_{0.8}N heterostructure to enhance the alkaline hydrogen oxidation reaction by balancing the binding of intermediates[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(34): 2300593.
- [16] Ji W, Zhan C, Li D, *et al.* Phase and interface engineering of nickel carbide nanobranches for efficient hydrogen oxidation catalysis[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(46): 26323–26329.
- [17] Roy A, Talarposhti M R, Normile S J, *et al.* Nickel-copper supported on a carbon black hydrogen oxidation catalyst integrated into an anion-exchange membrane fuel cell[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2018, 2(10): 2268–2275.
- [18] Wang H, Yang Y, Disalvo F J, *et al.* Multifunctional electrocatalysts: Ru-M (M=Co, Ni, Fe) for alkaline fuel cells and electrolyzers[J]. *ACS Catalysis*, 2020, 10(8): 4608–4616.
- [19] Yang F, Bao X, Zhao Y, *et al.* Enhanced HOR catalytic activity of PGM-free catalysts in alkaline media: The electronic effect induced by different heteroatom doped carbon supports[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(18): 10936–10941.
- [20] Han P, Yang X, Wu L, *et al.* A highly-efficient boron interstitially inserted Ru anode catalyst for anion exchange membrane fuel cells[J]. *Advanced Materials*, 2023, 36(5): 2304496.
- [21] Yang C, Yue J, Wang G, *et al.* Activating and identifying the active site of RuS₂ for alkaline hydrogen oxidation electrocatalysis[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(17): e202401453.
- [22] Wang P, Yang Y, Zheng W, *et al.* V-O species-doped carbon frameworks loaded with Ru nanoparticles as highly efficient and CO-tolerant catalysts for alkaline hydrogen oxidation[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(50): 27867–27876.
- [23] Tian X, Ren R, Wei F, *et al.* Metal-support interaction boosts the stability of Ni-based electrocatalysts for alkaline hydrogen oxidation[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 76.
- [24] Gao F Y, Liu S N, Ge J C, *et al.* Nickel-molybdenum-niobium metallic glass for efficient hydrogen oxidation in hydroxide exchange membrane fuel cells[J]. *Nature Catalysis*, 2022, 5(11): 993–1005.
- [25] Yang F, Bao X, Li P, *et al.* Boosting hydrogen oxidation activity of Ni in alkaline media through oxygen-vacancy-rich CeO₂/Ni heterostructures[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(40): 14179–14183.
- [26] Duan Y, Zhang X L, Gao F Y, *et al.* Interfacial engineering of Ni/V₂O₃ heterostructure catalyst for boosting hydrogen oxidation reaction in alkaline electrolytes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(10): e202217275.
- [27] Wang M, Yang H, Shi J, *et al.* Alloying nickel with molybdenum significantly accelerates alkaline hydrogen electrocatalysis[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(11): 5771–5777.
- [28] Deng S, Liu X, Guo X, *et al.* Insight into the hydrogen oxidation electrocatalytic performance enhancement on Ni via oxophilic regulation of MoO₂[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 54: 202–207. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志，邮发代号 82—67。