

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.03.017

何慧明, 赵建伟, 秦丽溶, 等. 纳米镍钼氧化物的制备及其在葡萄糖燃料电池中的应用 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 191-199.

纳米镍钼氧化物的制备 及其在葡萄糖燃料电池中的应用

何慧明, 赵建伟, 秦丽溶, 刘远欣

西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要: 燃料电池作为一种新型的能源利用装置, 具有能量转化率高, 环境污染轻微, 易于制备等优点, 葡萄糖可作为燃料电池理想的能量来源。通过水热法与退火相结合的方式, 在碳布上直接生成具有纳米片阵列结构的镍钼氧化物, 并将其作为燃料电池的阳极。通过多种检测手段分析了材料的结构、成分及其对葡萄糖的氧化催化性能, 比较了反应溶液中不同镍钼比例对材料性能的影响, 找出了最优的材料制备条件(溶液中镍钼比例为 1:1), 在 0.1 mol/L 的 KOH 和 5 mmol/L 的葡萄糖底液中可获得的最大功率密度为 $476.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

关键词: 纳米结构; 水热法; 燃料电池; 葡萄糖

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2025)03-0191-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation of Nano Nickel-Molybdenum Oxide and Its Application in Glucose Fuel Cells

HE Huiming, ZHAO Jianwei, QIN Lirong, LIU Yuanxin

School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: As an emerging energy utilization device, the fuel cell offers several advantages including high energy conversion efficiency, minimal environmental pollution, and ease of preparation. Glucose serves as a promising energy source for fuel cells. In this study, nickel-molybdenum oxides with a nanosheet array structure were synthesized directly on carbon cloth using a combination of hydrothermal synthesis and annealing techniques, and subsequently employed as anodes in fuel cells. The structural and compositional attributes of these materi-

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0311)。

作者简介: 何慧明, 硕士研究生, 主要从事葡萄糖燃料电池研究。

通信作者: 赵建伟, 教授。

als, along with their catalytic properties for glucose oxidation, were thoroughly analyzed. The influence of different Ni : Mo ratios in solutions on the performance was also assessed. Optimal material preparation conditions were determined to be a ratio of Ni : Mo=1 : 1 in the solution. Under these conditions, the maximum power density of $476.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ was achieved in a solution of 0.1 mol/L KOH and 5 mmol/L glucose.

Key words: nanostructure; hydrothermal method; fuel cells; glucose

人类社会的发展离不开能源,地球上煤、石油等不可再生能源逐渐枯竭,而人们在各行各业中对用电的需求却越来越大,因此迫切需要新的能源来满足需求^[1-2]。燃料电池是一种电化学转换装置,能将燃料中的化学能直接转换成电能,不需要中间能量的转换,因此能量的转换效率可以进一步提高,且环境污染小^[3-4]。燃料电池的应用范围广泛,目前应用于汽车、航空航天、医学等众多领域。葡萄糖是自然界中最常见的单糖,来源非常广泛,人体中也含有一定的葡萄糖,这使得葡萄糖燃料电池利用人体内葡萄糖实现自发电成为现实^[5-6]。此外,葡萄糖还具有成本低、环境污染小、安全无毒性、易储存和运输、不易挥发、不易燃等优点^[7-8],这些优点使得葡萄糖燃料电池成为备受人们关注的研究对象。理论上来说,1个葡萄糖分子完全氧化可以产生24个电子,氧化产物为水和二氧化碳,标准电动势为 $1.24 \text{ V}^{[9-11]}$ 。但是实际情况中,葡萄糖很难完全氧化,在阳极反应中很容易反应不完全,因此阳极性能是决定葡萄糖燃料电池性能的关键因素之一^[12-14]。同时,葡萄糖的氧化还原反应是非均相反应,反应动力学缓慢,因此提高葡萄糖燃料电池的氧化还原性能和反应动力学需要更加高效的催化剂。

葡萄糖燃料电池的催化剂按照种类的不同,可以分为酶葡萄糖燃料电池、微生物葡萄糖燃料电池、非生物葡萄糖燃料电池^[15-16]。非生物燃料电池使用非生物催化剂来模拟酶的作用,常见的有贵金属催化剂、过渡金属氧化物、双金属化合物、改性碳材料、MOF材料、N/C掺杂的单金属化合物等。纳米镍钼氧化物具有高活性、环保性,且储量丰富,在超级电容器、电催化等领域具有广泛的应用潜力,目前对纳米镍钼氧化物的研究多集中于形貌调控以及复合材料的设计,将其应用到葡萄糖燃料电池的报道较少。本文以导电碳布为基底,选择过渡金属镍和钼为材料,用水热法在导电碳布上成功制备出具有纳米片阵列结构的镍钼氧化物材料作为葡萄糖燃料电池的阳极,研究表明该阳极材料对于葡萄糖的氧化具有良好的效果,本工作对于葡萄糖燃料电池的研发具有一定的参考价值。

1 实验

1.1 试剂与仪器

1.1.1 试剂

$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (上海麦克林生化科技公司), Na_2MoO_4 (天津瑞金特化学品公司), $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (成都科龙化工试剂厂), $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ (重庆茂业化学试剂公司), KOH(重庆钛新化工公司), 无水乙醇(重庆钛新化工公司), 无水葡萄糖(上海麦克林生化科技公司), 铁氰化钾(上海阿拉丁生化科技公司), PBS溶液(自制), 导电碳布(上海河森电气公司)。实验中所用水均为去离子水。

1.1.2 仪器

数控超声波清洗仪(KQ-250DE, 昆山市超声仪器公司), 马弗炉(SX2, 上虞道墟科析仪器公司), 电化学工作站(CHI660E, 上海辰华仪器公司), 扫描电子显微镜(SEM, JSM-7100F, 日本电子株式会社), 透射电子显微镜(TEM, JEM-2010, 日本电子株式会社), X射线衍射仪(XRD, TD-3500, 丹东通达科技公司), X射线光谱仪(XPS, ESCALAB 250, 美国赛默飞世尔公司)。

1.2 材料制备

裁剪出 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 大小的碳布, 分别用无水乙醇和去离子水超声清洗 30 min, 清洗后放入干燥箱干

燥备用。称取 0.872 g 的 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.644 g 的 Na_2MoO_4 、0.09 g 的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和 0.21 g 的 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ 溶解于 30 mL 去离子水中, 在磁力搅拌器的作用下搅拌溶解成澄清的溶液。将配置好的溶液转移到 30 mL 的聚四氟乙烯内衬中, 然后将清洗好的碳布也放入其中。将聚四氟乙烯内衬放入高压反应釜中, 置于鼓风干燥箱中在 120 ℃ 的温度下反应 3 h。反应结束后, 自然冷却至室温, 取出碳布, 分别用无水乙醇和去离子水超声清洗 30 min, 清洗后放入干燥箱干燥 12 h。将干燥后的样品在马弗炉中 300 ℃ 的温度下退火 3 h, 得到的样品即为碳布负载纳米镍钼氧化物。制备不同比例的镍钼氧化物, 制备过程同上, 仅改变镍或钼的含量。在本实验中, 调整了制备溶液中的 Ni : Mo 原子比, 选取 4 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 4 共 5 种不同比例下制备的样品进行了对比研究。

1.3 性能测试

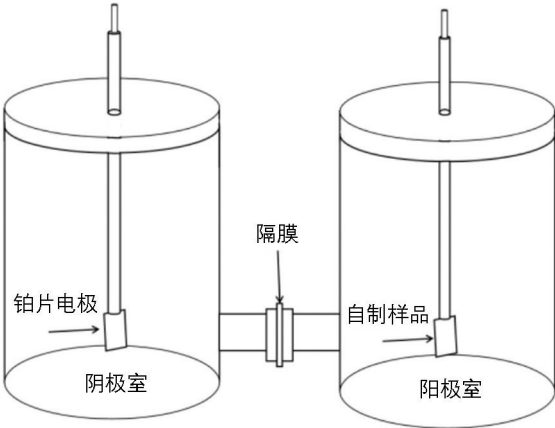
性能测试在电化学工作站上进行, 采用三电极测试体系, 以制备的样品(剪裁为 1 cm×1 cm)作为工作电极, 1 cm×1 cm 的铂片电极作为对电极, Ag/AgCl 电极作为参比电极。分别在 0.1 mol/L 的 KOH 以及 0.1 mol/L 的 KOH 和 5 mmol/L 的葡萄糖混合液中进行电化学性能测试。功率密度曲线和极化曲线在 H 型双室电解池中进行测试(图 1), 其中阴极液为 1.65 g 铁氰化钾溶解于 100 mL 的 PBS 缓冲液中的溶液, 阳极液为 3 mol/L 的 KOH 加 1 mol/L 的葡萄糖溶液, 2 种溶液之间用 PP 隔膜隔开, 将组装好的 H 型双室电解池静止一晚进行测试, 测试在室温条件下进行。测量功率密度时, 将电阻箱与电池的阴阳两极并联。将外接电阻箱的起始阻值固定在 9 000 Ω, 等万用表示数稳定后记录对应的电压值, 随后将电阻箱的阻值从大到小进行调节, 直至最小外接阻值为 3 Ω。每改变一次阻值记录相对应的电压表示数, 分别根据以下公式计算出对应的电流密度和功率密度。

$$J = \frac{U}{R \times S} \times 100 \tag{1}$$

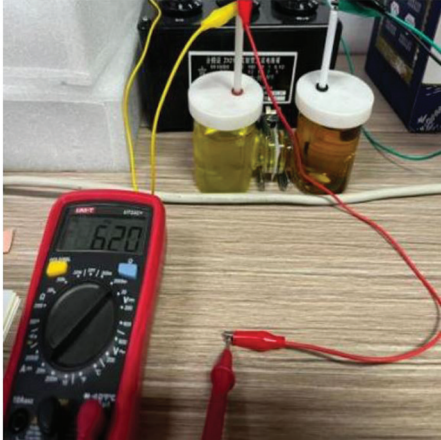
$$P = J \times U \times 1\,000 \tag{2}$$

其中: U 为测量的电压(V); J 为电流密度($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$); R 为阻值(Ω); S 为阳极的有效面积(cm^2); P 为功率密度($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

以电流密度 J 为 x 轴, 功率密度 P 为 y 轴, 得到电池的功率密度曲线。以电流密度 J 为 x 轴, 电压 U 为 y 轴, 得到电池的极化曲线。将外接电阻箱的阻值固定在 2 000 Ω, 记录电压随时间的变化示数, 根据上述公式计算出对应的电流密度, 以时间 t 为 x 轴, 以电流密度 J 为 y 轴, 得到电池的放电一时间曲线。



a. 组装电池的示意图



b. 组装电池的实物图

图 1 葡萄糖燃料电池组装图

2 结果与讨论

2.1 材料表征

使用扫描电镜对制得的样品进行了形貌表征,从图 2a 可以看出,材料表面非常均匀平整,而且几乎没有破损和杂质颗粒。图 2b 和图 2c 为样品的高倍 SEM 图,从高倍图中可以看出,材料均匀致密地覆盖在碳布表面,样品的形貌为纳米片阵列结构,这些纳米片的大小在几十到一百纳米,厚度仅为几纳米。这样的纳米片阵列结构具有更大的比表面积,也使其具有更多的活性位点,这有利于提高催化剂的性能。由于材料在碳布上直接生长而成,这也使得材料在碳布表面结合稳固,不易脱落,提高了催化剂的稳定性。

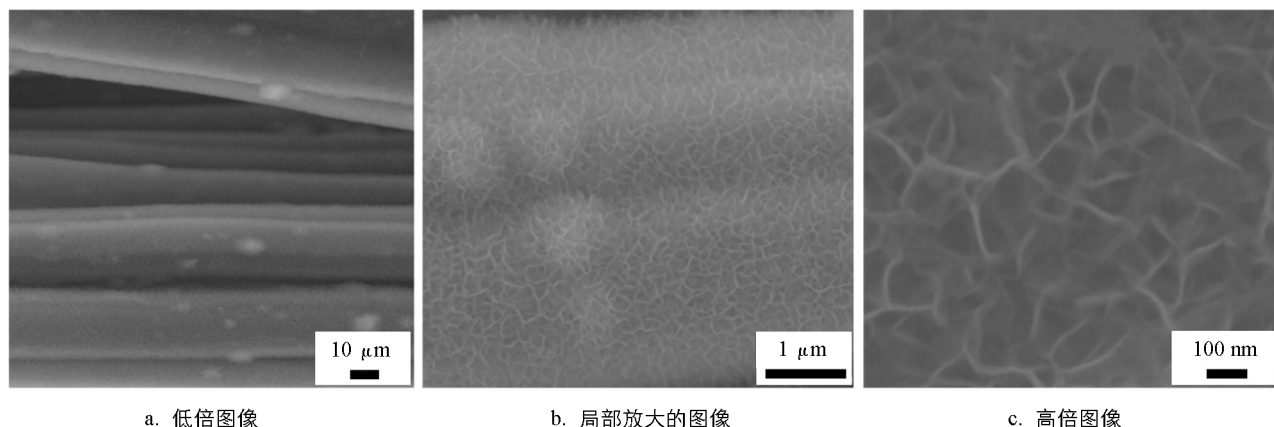


图 2 镍钼氧化物纳米片的 SEM 图像

图 3 为样品的 XRD 谱图,样品在碳布上直接生长而成, C 峰对应 XRD 谱图中 24.6° 和 43.8° 处较宽的衍射峰。图中 34.5° 处的衍射峰对应于 MoO_3 的(111)晶面, 60.4° 处的小衍射峰与 MoO_2 的(031)晶面相吻合,而 79° 处的衍射峰可以与 NiO 对应。除此之外, 43.8° 的峰也可与 NiO 的衍射峰对应,也就是说 C 峰和 NiO 的峰在此处重合,而 NiMoO_4 的(330)晶面也对应于 43.8° 处的峰。通过 XRD 的分析,说明在碳布上成功制备了镍钼氧化物。

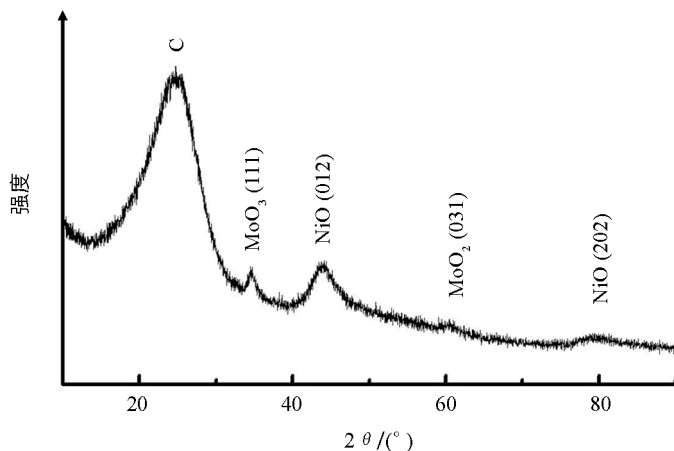


图 3 镍钼氧化物纳米片的 XRD 谱图

为了进一步确定材料的形貌与成分,对样品进行了 TEM 测试,结果如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,纳米材料紧密包裹在碳布的表面,这与 SEM 图中结果一致。从图 4b 和图 4c 中可以找出 3 种不同宽度的晶格,通过测量计算可以得出晶格宽度分别为 0.233 nm、0.201 nm、0.142 nm,这与图 4c 插图 SAED 图像中的衍射环很好地对应。其中,0.233 nm 晶格宽度对应 MoO_2 的(002)晶面间距,0.201 nm 晶格宽度对应 NiO 的(200)晶面间距,0.142 nm 晶格宽度对应 MoO_3 的(31-3)晶面间距。通过 XRD 和 TEM 分析,可以证明镍钼氧化物在碳布表面成功地生长出。

使用 XPS 对样品材料的元素组成和价态进行了测试,结果如图 5 所示。图 5a 是总谱图,总谱图中表明了 Ni、Mo、O、C 几种元素的存在,其中 C 来自于碳布。图 5b 是 Ni 2p 的谱图,856.8 eV 和 875.3 eV 分别对应 Ni 2p_{3/2} 和 Ni 2p_{1/2} 自旋轨道,862.9 eV 和 881.0 eV 分别对应特征峰的卫星峰^[17-19]。图 5c 是 Mo 3d 的谱图,

232.4 eV 对应的是 Mo 3d_{5/2} 轨道, 235.5 eV 对应的是 Mo 3d_{3/2} 轨道, 这 2 个峰值差 3.1 eV, 说明其中还有 Mo⁶⁺ 的存在^[20-21]。图 5d 为 O 1s 的谱图, 其中 530.4 eV 对应与金属结合的 O, 应该来自于退火过程中金属形成的氧化物; 532.5 eV 对应 C=O 键, C=O 键的存在有利于增强材料在底液中的浸润性^[22-25]。XPS 结果也再次说明在碳布表面成功制备了镍钼氧化物。

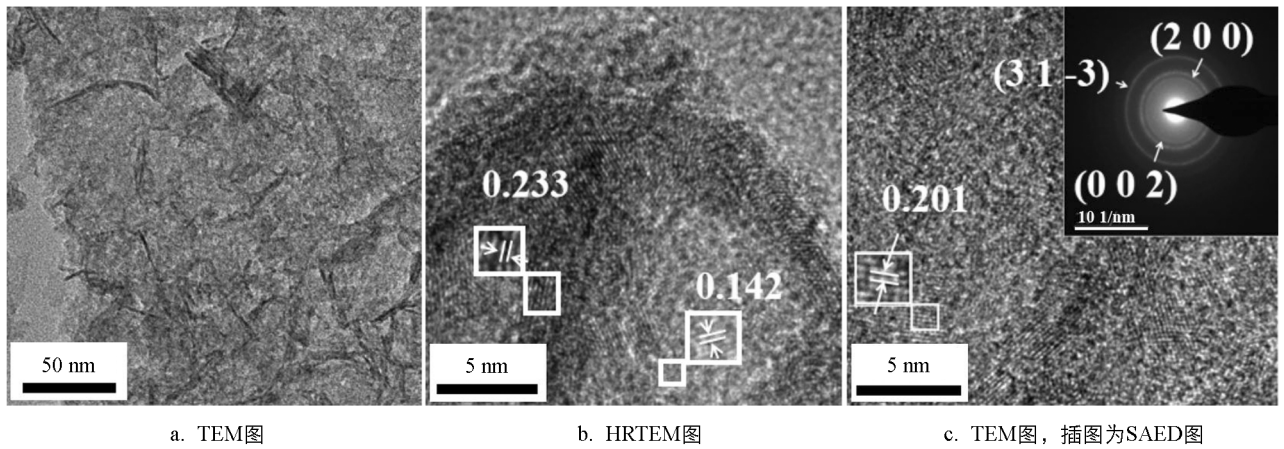


图 4 镍钼氧化物纳米片的透射电镜表征

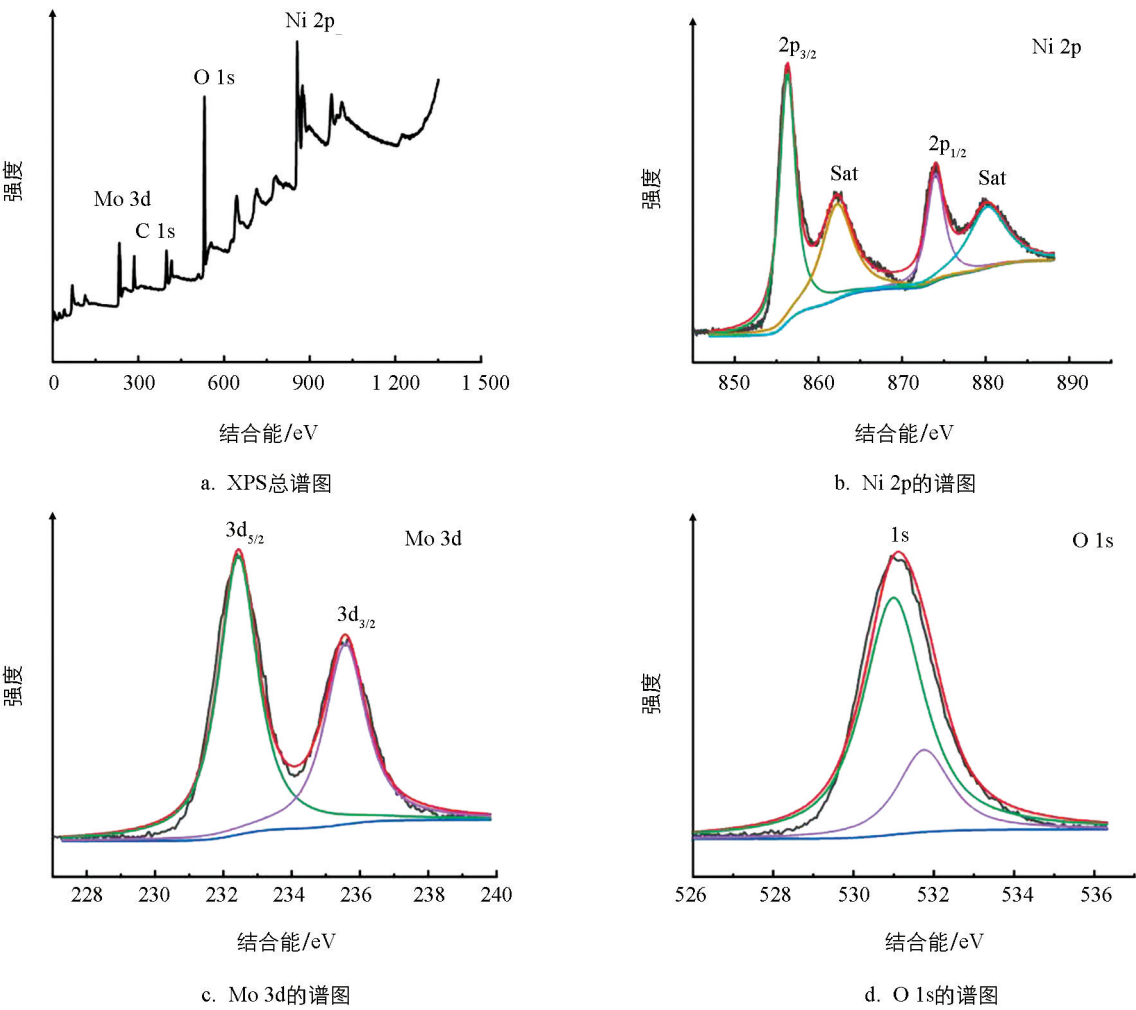
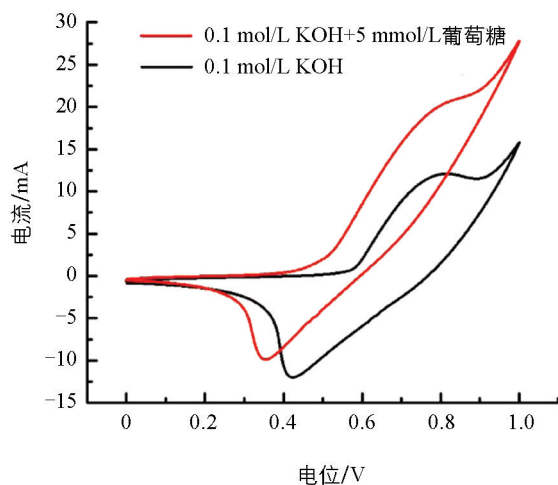


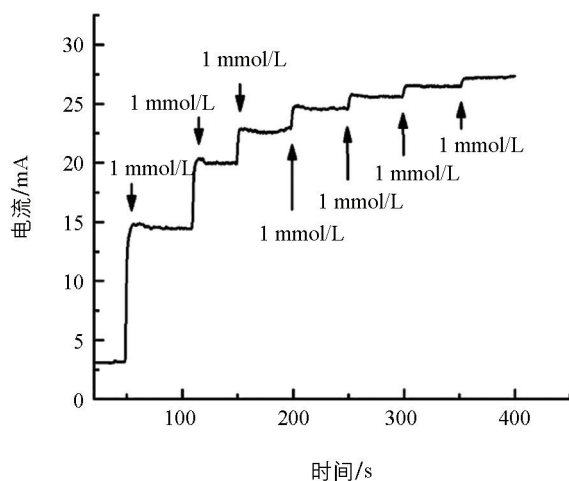
图 5 镍钼氧化物纳米片的 XPS 谱图

2.2 性能分析

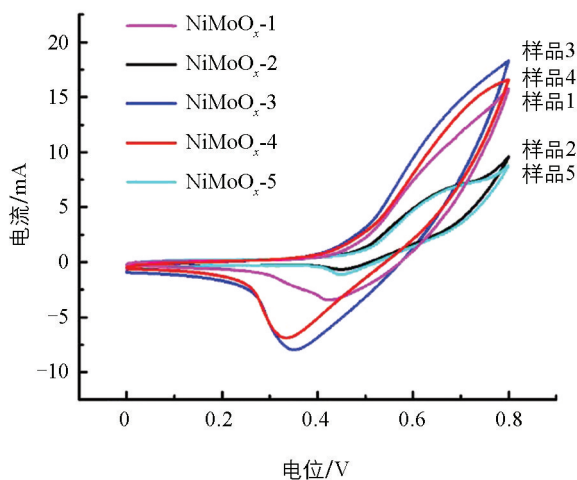
在电化学工作站上测试了材料对葡萄糖催化的电化学性能,结果如图 6 所示。图 6a 是镍钼比例为 1 : 1 的材料的 CV 曲线,通过对比可以看出,在 0.1 mol/L KOH 底液中加入 5 mmol/L 葡萄糖溶液后,阳极电流在 0.4 V 左右开始明显增加,说明催化剂对葡萄糖的电氧化需要更高的偏压,材料本身的电阻不会随着葡萄糖的加入而改变,因此阳极电流的增加是由于葡萄糖在材料表面发生催化反应导致的。图 6b 是它的 IT 曲线,每隔 50 s 向 0.1 mol/L KOH 底液中加入 1 mmol/L 的葡萄糖溶液并得到其响应电流。每次加入葡萄糖溶液后,电流在极短的时间内快速提升,特别是第一次添加时电流有着显著的变化,说明材料对于葡萄糖的催化具有敏锐的响应;随着葡萄糖溶液浓度的增大,电流的增大程度逐渐减小,这是出现催化饱和的迹象。图 6c 是不同比例的镍钼氧化物在 0.1 mol/L KOH 底液中加入 5 mmol/L 葡萄糖溶液对葡萄糖氧化的 CV 曲线。其中,样品 1 到 5 分别对应 Ni : Mo 原子比为 4 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2 和 1 : 4 的溶液(图中以 NiMoO_x-1 到 NiMoO_x-5 表示,下同)。可以看出,在相同的葡萄糖底液中,相同的电位下镍钼比例为 1 : 1 的样品具有最大的响应电流,说明其对葡萄糖的催化氧化性能优于其他比例的样品。



a. CV曲线(镍钼比例为1:1)



b. IT曲线(镍钼比例为1:1)



c. 不同镍钼比例的CV曲线

图 6 镍钼氧化物纳米片的电化学测试

在 H 型双室电解池中进行功率密度曲线、极化曲线以及放电—时间曲线测试。测试了 5 种不同镍钼比

例对其电化学性能的影响, 测试结果如图 7 所示。从图 7a 中可以看出, 改变镍和钼的比例对其性能有着很大的影响, 所有比例样品的功率密度都呈现出先增大后减小的规律, 在某一电流密度下达到最大值。当溶液中镍钼比例为 1 : 1 时, 比其他比例下得到的镍钼氧化物具有更大的功率密度, 在 0.1 mol/L 的 KOH 和 5 mmol/L 的葡萄糖底液中可获得的最大功率密度为 $476.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。当镍或者钼的含量增高, 其功率密度有所下降, 这与电化学测试的结果也相吻合。图 7b 是不同比例镍钼氧化物的极化曲线, 在所有比例中, 镍钼比例为 1 : 1 的镍钼氧化物具有最小的斜率, 这与最大功率密度保持一致, 说明镍钼比例为 1 : 1 的样品的极化程度最低。而除了比例不同, 其他因素都相同, 说明这是由于阳极性能的差异导致的, 极化程度的降低可以增加电池的功率密度。活化极化是燃料电池中初始极化的主导部分, 较小的斜率说明镍钼比例为 1 : 1 的材料可以降低催化剂的电化学活化电位, 且在镍钼比例为 1 : 1 时具有最佳的协同作用。图 7c 是镍钼比例为 1 : 1 的材料制作的电池的放电—时间曲线, 从图中可以看出, 在经过 10 h 的长时间连续运行后, 电池的电流密度波动很小, 甚至随着时间的推移电流密度还略微有所上升, 说明制备的材料具有良好的稳定性。理论上来说, 只要葡萄糖一直存在, 组装的燃料电池就能一直运行下去。

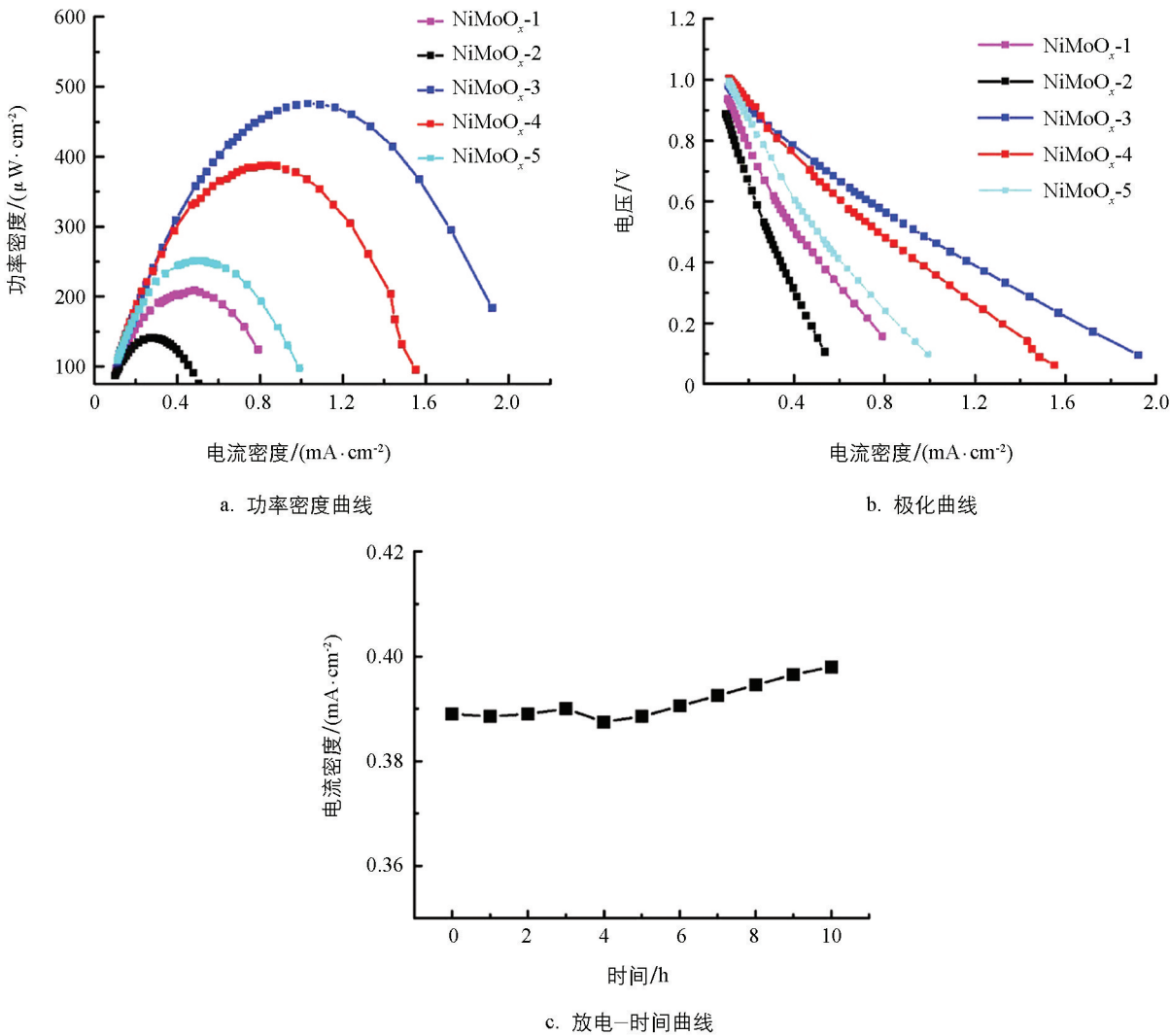


图 7 不同比例镍钼氧化物纳米片的组装测试

通过以上测试, 可以表明制备的样品对于葡萄糖的氧化具有良好的催化作用, 当合成溶液中镍钼比例为 1 : 1 时制备得到的镍钼氧化物具有比其他比例的样品更优异的性能, 这归功于该比例下得到的镍钼氧化物具有更合适的微观形态, 可以提供更多电化学活性位点, 同时该比例下更有利于发挥镍氧化物和钼氧

化物材料之间的协同作用。与以往文献相比,制备的材料也表现出相对较好的性能,这也归因于复合材料的微观形态和材料间的协同作用,共同提升了材料对葡萄糖的电催化氧化性能。

3 结论

本文通过一步水热和退火相结合的制备方法,成功在碳布表面生成了具有纳米片阵列结构的镍钼氧化物材料,对样品的形貌和成分进行了表征,对样品的葡萄糖电催化氧化性能进行了分析,并且对样品组装成的葡萄糖燃料电池进行了测试,获得了电池的功率密度曲线、极化曲线以及放电—时间曲线,结果表明实验样品对于葡萄糖的氧化具有良好的催化性能。同时研究了不同镍钼比例的材料对葡萄糖催化的效果,结果表明当镍钼比例为 1 : 1 时的材料具有最好的效果,最大功率密度可以达到 $476.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,这归功于镍钼之间良好的协同作用以及制备材料优异的纳米结构。该实验方法具有操作简单、成本低的优点,而且对葡萄糖具有良好的催化作用,该工作对于葡萄糖燃料电池的研发具有一定的意义。

参考文献:

- [1] ZU X H, SUN L L, GONG J, et al. Ferric Ion Pair Mediated Biomass Redox Flow Fuel Cell and Related Chemical Reaction Kinetics Study [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 348: 476-484.
- [2] ZHANG Y W, LI T T, SHEN Y B, et al. Extrusion Followed by Ultrasound as a Chemical-Free Pretreatment Method to Enhance Enzymatic Hydrolysis of Rice Hull for Fermentable Sugars Production [J]. Industrial Crops and Products, 2020, 149: 112356.
- [3] WANG C, NEHRIR M H. Distributed Generation Applications of Fuel Cells [C] //2006 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, March 14-17, 2006, Clemson, SC, USA. IEEE, 2006: 244-248.
- [4] BOUDGHENE STAMBOULI A, TRAVERSA E. Fuel Cells, an Alternative to Standard Sources of Energy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(3): 295-304.
- [5] COOK B. Introduction to Fuel Cells and Hydrogen Technology [J]. Engineering Science & Education Journal, 2002, 11(6): 205-216.
- [6] JI J, CHUNG Y, KWON Y. The Effects of Cobalt Phthalocyanine and Polyacrylic Acid on the Reactivity of Hydrogen Peroxide Oxidation Reaction and the Performance of Hydrogen Peroxide Fuel Cell [J]. Journal of Power Sources, 2020, 480: 228860.
- [7] NG T K, YU A Q, LING H, et al. Engineering Yarrowia Lipolytica towards Food Waste Bioremediation: Production of Fatty Acid Ethyl Esters from Vegetable Cooking Oil [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2020, 129(1): 31-40.
- [8] SHI N, XIE Y, YANG Y, et al. Infiltrated $\text{Ni}_{0.08}\text{Co}_{0.02}\text{CeO}_{2-x}@\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ Catalysts for a Finger-Like Anode in Direct Methane-Fueled Solid Oxide Fuel Cells [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(4): 4943-4954.
- [9] CHANGKHAMCHOM S, KUNANUPATHAM P, PHASUKSOM K, et al. Anion Exchange Membranes Composed of Quaternized Polybenzimidazole and Quaternized Graphene Oxide for Glucose Fuel Cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(7): 5642-5652.
- [10] 韦晓娟. 植入式微型医疗器械供电方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(理化技术研究所), 2008.
- [11] 张巍, 陈乾宏, 曹玲玲. 植入式设备非接触电能传输系统的研究进展 [J]. 电源学报, 2011, 9(4): 36-45.
- [12] SANTIAGO Ó, NAVARRO E, RASO M A, et al. Review of Implantable and External Abiotically Catalysed Glucose Fuel Cells and the Differences between Their Membranes and Catalysts [J]. Applied Energy, 2016, 179: 497-522.
- [13] YANG Y L, LIU X H, HAO M Q, et al. Performance of a Low-Cost Direct Glucose Fuel Cell with an Anion-Exchange

Membrane [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(34): 10979-10984.

[14] BASU D, BASU S. Mathematical Modeling of Overpotentials of Direct Glucose Alkaline Fuel Cell and Experimental Validation [J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2013, 17(11): 2927-2938.

[15] FUJIWARA N, YAMAZAKI S I, SIROMA Z, et al. Nonenzymatic Glucose Fuel Cells with an Anion Exchange Membrane as an Electrolyte [J]. Electrochemistry Communications, 2009, 11(2): 390-392.

[16] RAO M L B, DRAKE R F. Studies of Electrooxidation of Dextrose in Neutral Media [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1969, 116(3): 334.

[17] BASU D, BASU S. A Study on Direct Glucose and Fructose Alkaline Fuel Cell [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(20): 5775-5779.

[18] 万路, 黄玉明, 奉萍. 基于 NH₂-MIL-101(Fe)过氧化物模拟酶特性测定葡萄糖 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 84-88.

[19] GOHAIN M, BARDHAN P, LASKAR K, et al. Rhodotorula Mucilaginosa: A Source of Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production from Yeast Single Cell Oil and Waste Cooking Oil [J]. Renewable Energy, 2020, 160: 220-230.

[20] LI Z, LIU X H, LIU P, et al. The Performance of Electron-Mediator Modified Activated Carbon as Anode for Direct Glucose Alkaline Fuel Cell [J]. Catalysts, 2016, 6(7): 95.

[21] AN L, ZHAO T S, SHEN S Y, et al. Alkaline Direct Oxidation Fuel Cell with Non-Platinum Catalysts Capable of Converting Glucose to Electricity at High Power Output [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 186-190.

[22] DU TOIT H, DI LORENZO M. Continuous Power Generation from Glucose with Two Different Miniature Flow-through Enzymatic Biofuel Cells [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2015, 69: 199-205.

[23] CHEN J Y, ZHAO C X, ZHI M M, et al. Alkaline Direct Oxidation Glucose Fuel Cell System Using Silver/Nickel Foams as Electrodes [J]. Electrochimica Acta, 2012, 66: 133-138.

[24] LIU J N, DENG X Y, ZHU S, et al. Porous Oxygen-Doped NiCoP Nanoneedles for High Performance Hybrid Supercapacitor [J]. Electrochimica Acta, 2021, 368: 137528.

责任编辑 柳剑

