

## 泡沫镍负载 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ 电极材料的制备及其电化学性能

林峰<sup>1</sup>, 靳忠欣<sup>1,2,\*</sup>, 李彩莹<sup>1</sup>, 邵秤<sup>1</sup>, 徐扬<sup>1</sup>, 李芳泽<sup>1</sup>, 刘思琦<sup>1</sup>, 顾睿宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大庆师范学院化学工程学院, 黑龙江 大庆 163000

<sup>2</sup>哈尔滨理工大学材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150000

**摘要:** 电化学理论知识作为物理化学、仪器分析中的重要内容, 超级电容器性能评价能够充分将电化学理论知识运用于实践。本实验先合成 $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 镍钼九多酸前驱体, 然后用水热方法合成电极材料 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4/\text{NF}$ , 最后利用电化学工作站对其进行超级电容器性能评价。实验过程结合了无机化学、物理化学、仪器分析知识特点, 多学科交叉融合, 属于综合创新性实验。该实验能够促进学生对理论知识的巩固、学生实验操作能力的提升、实验数据图表的处理、理论和生活实际结合, 激发学生实验兴趣, 培养分析、解决问题的能力 and 创新意识。

**关键词:** 电化学; 多金属氧酸盐; 超级电容器; 电极材料; 综合实验

**中图分类号:** G64; O6

## Preparation and Electrochemical Properties of Nickel Foam-Supported $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ Electrode Material

Feng Lin<sup>1</sup>, Zhongxin Jin<sup>1,2,\*</sup>, Caiying Li<sup>1</sup>, Cheng Shao<sup>1</sup>, Yang Xu<sup>1</sup>, Fangze Li<sup>1</sup>, Siqi Liu<sup>1</sup>, Ruining Gu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Chemical Engineering, Daqing Normal University, Daqing 163000, Heilongjiang Province, China.

<sup>2</sup> Materials Physics and Chemistry, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150000, China.

**Abstract:** As a fundamental component of physical chemistry and instrumental analysis, electrochemical theory finds practical application in supercapacitor performance evaluation. This study initially synthesized the  $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  polyoxometalate precursor, followed by the hydrothermal synthesis of  $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4/\text{NF}$  electrode material. The supercapacitor performance was subsequently evaluated using an electrochemical workstation. The experimental procedure integrates knowledge from inorganic chemistry, physical chemistry, and instrumental analysis, representing a comprehensive, interdisciplinary innovation experiment. This approach enhances students' theoretical understanding, improves experimental skills, facilitates data processing, bridges theory with practical applications, stimulates research interest, and cultivates problem-solving abilities and innovative thinking.

**Key Words:** Electrochemistry; Polyoxometalates; Supercapacitors; Electrode material; Comprehensive experiment

开发新能源及新的储能装置是当今解决能源问题的重要部分。超级电容器作为一种新型储能装置, 结合了传统电容器和二次电池的特点, 具有循环稳定性良好、功率密度高和可逆性良好等优点, 被认为是当今具有前途的储能装置之一。研究超级电容器的核心是开发具有较好导电能力和稳定性

收稿: 2024-12-02; 录用: 2025-01-23; 网络发表: 2025-05-19

\*通讯作者, Email: jzx1128@126.com

基金资助: 黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(202310235A025); 黑龙江省基本科研业务费(2023KYYWF0022); 大庆市科学技术局项目(zd-2024-68); 大庆师范学院基金(14ZR18)

的电极材料。而开发一种具有优异电化学性能的超级电容器的电极材料仍是当前难点。电化学工作站作为测试电化学性能的重要仪器,可以测试循环伏安(CV)、恒电流充放电、开路电位、交流阻抗、线性扫描伏安等技术。当前有关电化学理论知识仅在物理化学和仪器分析课程中体现,而在仪器分析实验课程中,由于课时限制,对于电化学工作站的学习仅仅在于循环伏安测试,很多技术还有待学习和开发。

超级电容器按照电荷存储机理可主要分为法拉第赝电容器和双电层电容器,法拉第赝电容器主要是通过快速法拉第氧化还原反应来储存电荷,双电层电容器主要是由电极-电解质界面上的静电吸附储存电荷<sup>[1]</sup>,而混合型超级电容器则是基于法拉第赝电容器和双电层电容器的混合。电极材料作为超级电容器研究的重点领域,主要包含碳基材料、金属氧化物、氢氧化物和导电聚合材料<sup>[2]</sup>,具有良好的电化学性能<sup>[3]</sup>。

本实验以镍钼九多酸为前驱体,充分利用多酸提供多金属源以及良好的氧化还原特性、电子海绵、类半导体、可调变性特点,通过水热方法合成以泡沫镍负载的Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoO<sub>4</sub>复合材料作为超级电容器的电极材料,对其进行超级电容器性能测试。本实验立足于材料制备以及电化学性能探究,结合了绿色环保理念,体现了多学科交叉融合的特点。并涉及到无机化学、物理化学、仪器分析等基本操作及理论内容,多学科交叉融合。与校内课程教学内容结合紧密,同时能提升学生综合实验能力。

## 1 实验内容

### 1.1 实验原理

#### 1.1.1 电极材料制备原理

电极材料如金属氧化物、氢氧化物等具有良好的电化学性能。氢氧化镍具有理论比电容高、合成简单和稳定性好等优点,目前已经作为电池型超级电容器电极材料被广泛研究。但是氢氧化镍在循环充放电过程中会发生不可逆相变,以及其相对较低的电导率会导致电化学性能显著下降<sup>[4]</sup>。钼酸盐结构稳定,具有优异的物理化学性质,是储能设备研究领域的热点。金属钼酸盐中Mo与金属离子有协同作用,可以进一步提高材料电化学反应活性。而NiMoO<sub>4</sub>纳米材料因其低成本、来源丰富、环保、良好的电子传输特性,以及能有效促进电解质离子渗透等优点,将其作为超级电容器电极材料引起了广泛关注<sup>[5]</sup>。泡沫镍(NF)具有三维网状结构,以及孔隙率高、比表面积大、质量均匀等优点,因此常被用作很多电极的基底。本实验通过水热法合成以泡沫镍为基底负载的Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoO<sub>4</sub>复合电极材料(即Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoO<sub>4</sub>/NF),充分发挥三者的协同作用,以其作为超级电容器的电极材料进行超级电容器性能研究。

#### 1.1.2 超级电容器性能测试原理

在超级电容器性能评价中,根据循环伏安曲线形状可以初步判断其电容类型,比如曲线中出现氧化还原峰,则发生了法拉第氧化还原反应,大致推断其为赝电容超级电容器<sup>[6]</sup>;若CV曲线有矩形峰,则可以推测其为双电层电容<sup>[6]</sup>。电化学交流阻抗测试则是用来表征电极材料的内阻以及离子扩散速率。恒流充放电曲线则是反映电极材料充放电时长以及根据其曲线形状反映库伦效率大小<sup>[7]</sup>。循环稳定性图像则反映电极材料在最大比电容对应的电流密度下,经过多次充放电后的电容保持率以及循环寿命。

比电容计算公式如下:

$$C = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta V} \quad (1)$$

其中C为比电容, F·g<sup>-1</sup>; I为放电电流, A; Δt为放电时间, s; m为负载质量, g; ΔV为电位窗口, V。

## 1.2 实验药品

表1为实验用到的主要化学药品。

表1 实验所需主要药品

名称	纯度	生产厂家
六水合硫酸镍	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
钼酸铵	分析纯	天津市风船化学试剂科技有限公司
丙酮	分析纯	廊坊市格曼化工有限公司
乙醇	分析纯	山东辰宇化工有限公司
氢氧化钾	分析纯	天津市光复科技发展有限公司
过硫酸铵	分析纯	天津市致远化学试剂有限公司
尿素	分析纯	辽宁泉瑞试剂有限公司
氟化铵	分析纯	辽宁泉瑞试剂有限公司

## 1.3 实验仪器

表2为实验用到的主要仪器。

表2 实验所需主要仪器

仪器	型号	制造商
电子分析天平	GL2004B	上海佑科仪器仪表有限公司
数控超声波清洗机	XC-250C	济宁鑫欣超声电子设备有限公司
电热鼓风干燥箱	WGL-85L	天津市泰斯特仪器有限公司
电化学工作站	CHI660D	上海辰华仪器有限公司
加热板	HP550-S	大龙兴创实验仪器(北京)股份公司

## 1.4 实验步骤

(1)  $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 多酸前驱体的制备。

称量11.1204 g的 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 溶于100 mL去离子水中，搅拌溶解配制成溶液，接着用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸调节溶液pH至4.44，加入1.6074 g的硫酸镍配成的100 mL溶液，搅拌加热至溶液微沸，然后继续向溶液中缓慢加入1.3692 g过硫酸铵配成的100 mL溶液。继续加热至溶液呈红色，保持溶液沸腾并同时搅拌1 h。在室温下放置过夜，析出大量黑红色晶体，抽滤，在 $60^\circ\text{C}$ 下烘干得到黑红色晶体 $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，产率在70%左右。

(2) 电极材料 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4/\text{NF}$ 的制备。

将裁剪好的泡沫镍 $1 \times 1.5 \text{ cm}^2$ ，分别用丙酮、乙醇、蒸馏水超声处理30 min，然后用蒸馏水对泡沫镍进行多次冲洗，将泡沫镍在 $60^\circ\text{C}$ 下烘干，备用。

称量1.3208 g的 $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.0240 g的尿素、0.0593 g的 $\text{NH}_4\text{F}$ 和前面处理好的泡沫镍依次放在25 mL烧杯中，加入12 mL去离子水搅拌溶解。然后将处理好的溶液转移到20 mL反应釜中，放入 $120^\circ\text{C}$ 的烘箱中反应8 h，获得水热后的产品 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4/\text{NF}$ ，经过蒸馏水洗涤后，将其放入 $60^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干备用。

(3) 超级电容器性能的测试。

电化学测试使用的是CHI 660D型电化学工作站，测试体系为三电极体系，以泡沫镍负载的电极材料为工作电极、铂片为对电极、 $\text{Hg}/\text{HgO}$ 为参比电极，以 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{KOH}$ 溶液为电解液。对电极材

料进行循环伏安、恒流充放电(GCD)、开路电位、交流阻抗(EIS)和循环稳定性测试。首先进行循环伏安测试,确定电位窗口,在该电位窗口下,依次以 $1-10\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 的电流密度进行恒流充放电测试,根据公式(1)计算不同电流密度下的比电容大小,为后面进行循环稳定性测试做准备。然后进行开路电位测试,得到合适的电位,在 $0.01-100000\text{ Hz}$ 频率下进行交流阻抗测试,最后基于恒流充放电中计算的比电容,以最大的比电容对应电流密度下进行1000次的循环稳定性测试。所测得的所有电化学数据中需要进行电位换算,换算公式如下:

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{Hg/HgO}} + 0.059 \times \text{pH} + 0.098\text{V} \quad (2)$$

### 1.5 实验注意事项

- (1) 合成多酸前驱体时,加入溶液步骤应该缓慢进行,避免溅出和副产物的生成。
- (2) 对于所测得的循环伏安法的电化学数据,要注意进行电位换算。
- (3) 加入反应釜中的溶液体积宜保持在反应釜容积的60%到80%。
- (4) 涉及到过硫酸铵、强酸、强碱等危险药品的使用时应该佩戴耐酸碱手套。实验过程中涉及到高温操作,注意不要被烫伤。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 表征结果

#### 2.1.1 红外光谱分析

用傅里叶红外光谱仪对 $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 多酸盐进行测试,测试范围为 $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ,从图1中可以看到,在 $1000-400\text{ cm}^{-1}$ 范围内,振动峰 $931$ 和 $894\text{ cm}^{-1}$ 是 $\text{Mo}=\text{O}$ 的伸缩振动峰, $\text{Mo}-\text{O}-\text{Mo}$ 弯曲振动峰在 $675$ 、 $600$ 和 $545\text{ cm}^{-1}$ 位置, $500\text{ cm}^{-1}$ 为 $\text{Ni}-\text{O}-\text{Mo}$ 弯曲振动峰,在 $714\text{ cm}^{-1}$ 处为 $\text{Ni}-\text{O}$ 伸缩振动峰。此外 $3145$ 、 $1400\text{ cm}^{-1}$ 分别为 $\text{NH}_4^+$ 的弯曲振动峰和伸缩振动峰, $3500$ 、 $1570\text{ cm}^{-1}$ 为 $\text{H}_2\text{O}$ 的弯曲振动峰和伸缩振动峰。进一步验证该物质为 $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 多酸盐。

在 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ 的红外光谱曲线中,在 $700-1000\text{ cm}^{-1}$ 的指纹区中,振动峰 $880$ 、 $946\text{ cm}^{-1}$ 分别对应着 $\text{Mo}-\text{O}$ 和 $\text{Mo}-\text{O}-\text{Mo}$ 键的吸收振动<sup>[8]</sup>, $1400$ 、 $3145\text{ cm}^{-1}$ 分别对应着 $\text{NH}_4^+$ 的 $\text{N}-\text{H}$ 键伸缩、弯曲振动<sup>[9]</sup>,这说明多酸中的部分结构得到保留。在 $639\text{ cm}^{-1}$ 左右处的吸收峰对应着 $\text{OH}^-$ 的弯曲振动,在 $580\text{ cm}^{-1}$ 左右处出现的弱吸收峰,对应 $\text{Ni}-\text{O}$ 键的晶格振动<sup>[10]</sup>,表明 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 结构存在。位于 $3443$ 、 $1672\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰分别为水分子的伸缩、弯曲振动<sup>[11]</sup>。

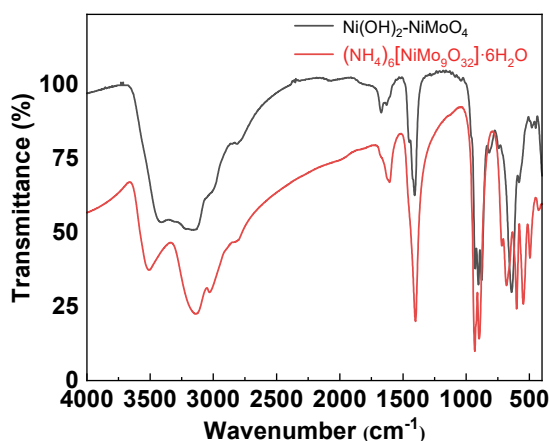


图1  $(\text{NH}_4)_6[\text{NiMo}_9\text{O}_{32}]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 多酸前驱体和 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ 的红外光谱图

#### 2.1.2 电极材料 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ 的X射线粉末衍射分析

图2显示了水热合成的电极材料的X射线粉末衍射(XRD)图谱。电极材料与 $3\text{Ni}(\text{OH})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 标准

PDF图谱(PDF # 22-0444)在 $11.64^\circ$ 、 $39.06^\circ$ 处的衍射峰相吻合,分别对应着(001)、(200)晶面。电极材料与 $\text{NiMoO}_4$ 标准的PDF图谱(PDF # 12-0348)衍射峰吻合,分别对应着(011)、(-121)、(220)、(130)、(141)晶面。由此可以判断该电极材料主要成分为 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ 复合材料。

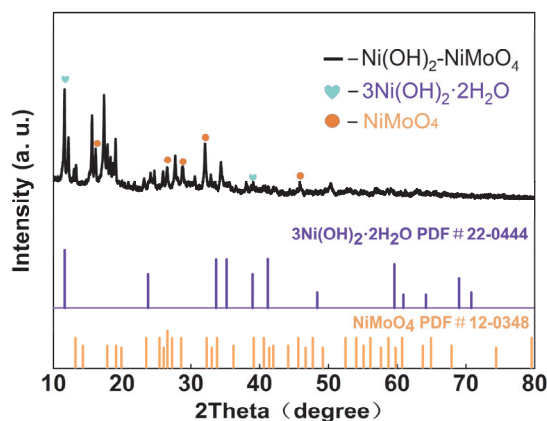


图2  $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ 的粉末衍射谱图

### 2.1.3 电极材料 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4/\text{NF}$ 扫描电镜分析

图3为电极材料在不同放大倍率图。发现 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiMoO}_4$ 材料大量地生长在了泡沫镍表面,材料在泡沫镍基底上的生长方式多是片状堆积的。片状的结构增加了电极材料的比表面积,为氧化还原反应提供了更多的活性位点,提高了电极材料的电化学性能。

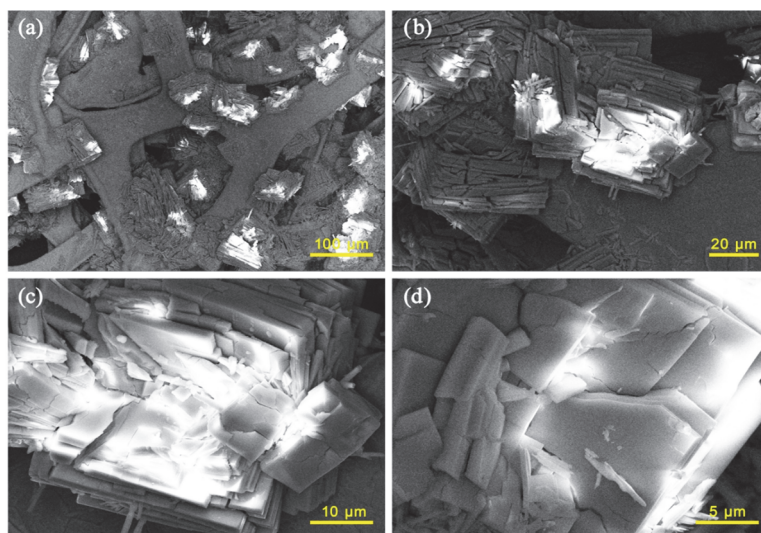


图3 电极材料在不同放大倍率下的扫描电镜图

## 2.2 电极材料的超级电容器性能分析

### 2.2.1 循环伏安性能

图4展现的是电极材料在电位窗口 $0.8699\text{--}1.5199\text{ V vs. Hg/HgO}$ 之间,在 $10\text{--}100\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 不同扫速下的循环伏安曲线,在不同扫速下呈现出氧化还原峰,可以初步判定该材料具有赝电容的特性<sup>[7]</sup>。这些CV曲线随扫速的变化过程中仅电流强度发生改变,而形状几乎不变,说明反应过程中电极表面发生了氧化还原反应,表明该材料具有较好的倍率特性<sup>[12]</sup>。

### 2.2.2 恒流充放电性能测试

图5为电极材料分别在1–10 A·g<sup>-1</sup>电流密度下的下的充放电时间, 在1 A·g<sup>-1</sup>的电流密度下可达450 s, 基于三电极体系, 活性物质的负载质量为0.0223 g, 根据公式(1), 分别计算出1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 A·g<sup>-1</sup>电流密度下的比电容依次为320、200、156、123、92、73、47、37、12、10 F·g<sup>-1</sup>, 可以看到当电流密度为1 A·g<sup>-1</sup>时呈现出最大的比电容为320 F·g<sup>-1</sup>。

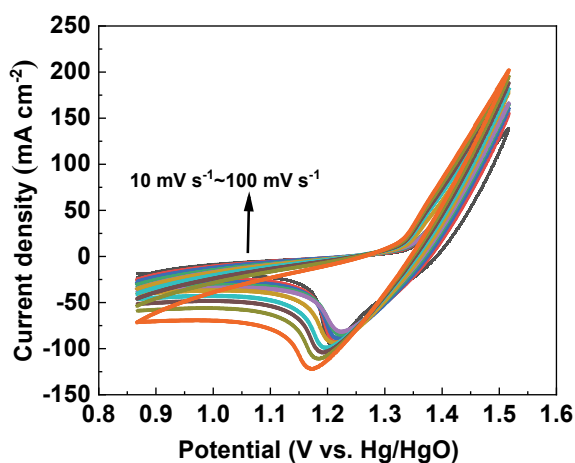


图4 电极材料的CV曲线图

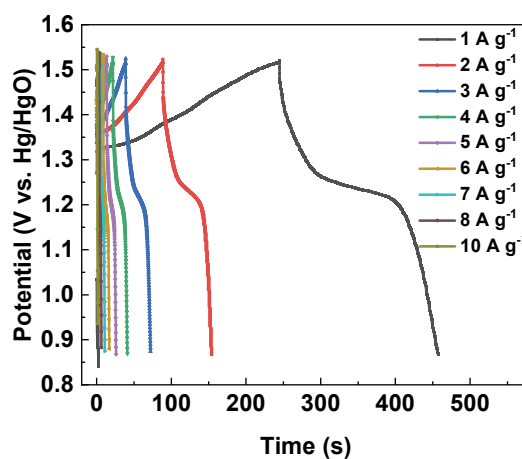


图5 电极材料在不同电流密度下的GCD曲线图

### 2.2.3 交流阻抗性能测试

电化学交流阻抗测试用来表征电极材料的内阻以及离子扩散速率。如图6所示, 在高频区, 整个曲线呈半圆状, 半径小, 表明其电荷转移电阻低, 导电率高, 说明电极材料中电子转移迅速。在低频区, 该曲线呈近似直线型, 直线斜率越大, 表明其在发生氧化还原反应时有相对较好的离子扩散速率。该材料具有较好的电化学性能。

### 2.2.4 峰值电流与扫描速率的关系

通过CV曲线中峰值电流和不同扫速之间的关系来评估电极材料电化学动力过程, 峰值电流( $i$ )和扫描速率( $v$ )之间满足幂函数关系 $i = a v^b$  [13], 其中 $a$ 和 $b$ 为常量,  $i$ 是峰值电流,  $v$ 是扫描速率。对数据进行线性拟合, 由图7可以看出,  $b = 0.15$ , 说明是扩散控制存储过程, 也就是电池型。

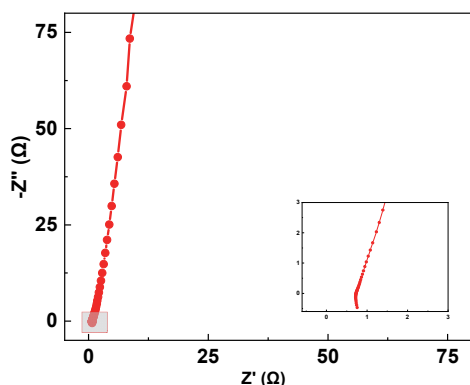


图6 电极材料的交流阻抗曲线

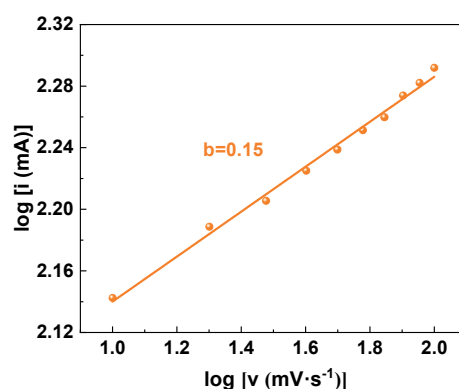


图7 峰值电流和扫描速率关系曲线

### 2.2.5 循环稳定性

循环稳定性测试是评估电极材料经过多次氧化还原后电化学性能的优良性, 鉴于Ni(OH)<sub>2</sub>-

NiMoO<sub>4</sub>/NF电极材料在1 A·g<sup>-1</sup>时其对应的比电容321 F·g<sup>-1</sup>最大, 所以进一步探究电极材料在该电流密度下进行1000圈的循环稳定性测试。从图8中可以看出, 该电极材料经过1000圈的循环后其电容保持率高达87%, 仍保持着较高的电容保持率, 表明该电极材料具有良好的循环稳定性和循环寿命。

图9是经过查阅文献, 不同电极材料的电容保持率对比图, 结果表明本实验所用的Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoO<sub>4</sub>/NF电极材料(红色)的电容保持率处于较高水平<sup>[14-18]</sup>。

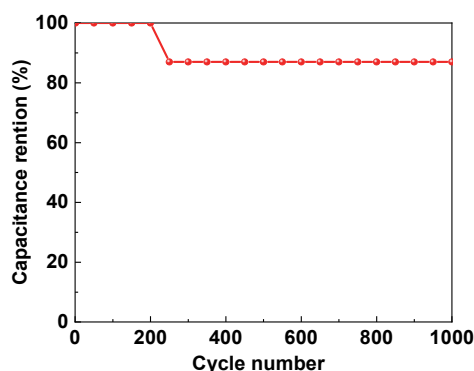


图8 电极材料的电容保持率图

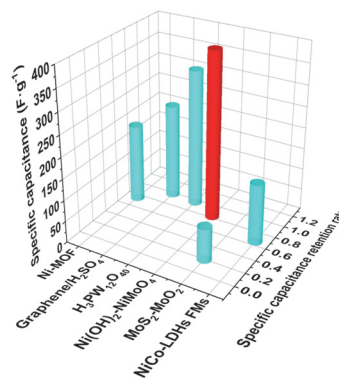


图9 不同电极材料的循环保持率对比图

### 3 结语

本实验以(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>[NiMo<sub>9</sub>O<sub>32</sub>]·6H<sub>2</sub>O多酸为前驱体, 通过水热法合成得到Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoO<sub>4</sub>/NF复合材料, 合成的电极材料简单、易操作、无污染, 且具有良好的超级电容器性能, 符合绿色环保理念。与传统仪器分析实验课程相比, 该实验综合无机合成实验和仪器分析实验, 拓展了电化学工作站的学习内容, 体现了多学科理论知识交叉融合的理念, 丰富了电化学技术的应用。大量的实验数据能锻炼学生对数据的处理及分析能力。电化学作为物理化学课程中的重要内容, 通过此超级电容器性能实验, 能够深刻理解掌握电化学相关知识, 以及电化学在实践方面的应用。

## 4 实验的实施及创新点

### 4.1 实验的实施

本实验主要针对化学专业本科生开设(如表3所示), 1-3阶段的实验学生相对容易接受, 4阶段的实验学生需在进行实验之前充分调研文献, 了解何为超级电容器、超级电容器的评价方法以及电化学理论知识在其中的应用, 结合指导教师的帮助, 能够达到最佳的学习效果。本实验为16学时的综合创新实验, 适于20人左右的教学班级, 建议3-4人一组合作完成该实验。

表3 实验实施过程

实验阶段	主要内容	学时	实验要求
1	多酸前驱体的合成	4	巩固基本无机实验操作及仪器的使用
2	电极材料的制备	4	掌握水热合成方法, 反应釜使用
3	多酸及电极材料的表征	4	熟练对大型仪器的操作, 了解图谱分析知识
4	电极材料的超级电容器性能测试	4	提高学生对电化学工作站运用能力, 数据的处理及分析能力

实验分四个阶段进行:

第一阶段是(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>[NiMo<sub>9</sub>O<sub>32</sub>]·6H<sub>2</sub>O多酸前驱体的合成(4学时), 涉及到无机化学实验中电子分析天平使用、溶液配制、酸度计使用、电热板使用、磁力加热搅拌器使用等等;

第二阶段是Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoO<sub>4</sub>/NF电极材料的制备(4学时), 学生以上一步实验产品为原料, 进行水热原位合成电极材料, 掌握反应釜、电热鼓风干燥箱的使用;

第三阶段是对多酸前驱体及电极材料的表征及分析(4学时), 涉及到傅里叶红外光谱测试、X射线粉末衍射测试、扫描电镜分析, 小组互相配合完成数据图表处理、分析、实验结果的讨论。

第四阶段是Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoO<sub>4</sub>/NF电极材料的超级电容器性能表征(4学时), 涉及到电化学工作站使用, 包括循环伏安、恒电流充放电、开路电位、交流阻抗等不同技术使用, 实验数据处理、作图及分析。与传统仪器分析实验中循环伏安实验项目相比, 学生多掌握了恒电流充放电技术、交流阻抗技术和开路电位技术的原理及使用方法, 开设电化学在超级电容器方面的应用实验项目, 开拓了学生的科研视野。

#### 4.2 实验创新与特色

- (1) 以镍钼九多酸为前驱体, 原位合成材料, 为后续电极材料开发提供方法。
- (2) 该综合创新实验体现无机化学、物理化学、仪器分析多学科知识交叉融合。
- (3) 实验涉及超级电容器知识在电化学中的应用, 拓展学生科研视野。

#### 参 考 文 献

- [1] Poonam; Sharma, K.; Arora, A.; Tripathi, S. K. *J. Energy Storage* **2019**, *21*, 801.
- [2] 刘梦超. 镍钴双金属氢氧化物自支撑电极的制备及电化学性能研究[硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2024.
- [3] 萧桢源, 马瑞宁, 李媛媛, 彭筱, 陈新, 柴卉. 新疆大学学报(自然科学版), **2023**, *40* (4), 433.
- [4] 王国胜. 氢氧化镍基复合材料的制备及其在超级电容器中的应用[硕士学位论文]. 武汉: 江汉大学, 2024.
- [5] Li, J.; Zou, Y. J.; Jin, L.; Xu, F.; Sun, L. X.; Xiang, C. L. *J. Energy Storage* **2022**, *50*, 104639.
- [6] Chen, S. M.; Chandrasekaran, S.; Cui, S. Q.; Li, Z. L.; Deng, G. L.; Deng, L. B. *J. Electroanal. Chem.* **2019**, *846*, 113153.
- [7] 王梦瑶, 陈亚容, 陈昭如, 汪形艳. 湘潭大学学报(自然科学版), **2024**, *46* (6), 1.
- [8] 王奕霖, 彭鹏. 河南化工, **2011**, *28* (5), 36.
- [9] 霍国燕, 霍国堂, 王玉平. 河北大学学报, **2003**, *23* (2), 151.
- [10] 韩恩山, 许寒, 康红欣, 冯智辉. 化工进展, **2008**, *27* (3), 426.
- [11] 靳忠欣, 林峰, 齐文晶, 李彩莹, 徐杨, 邵程, 李芳泽. 绥化学院学报, **2024**, *44* (6), 139.
- [12] 柴东风. 多酸基铜有机框架晶体材料的调控制备及其超级电容器性能研究[博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [13] Wang, Y.; Song, Y.; Xia, Y. *Chem. Soc. Rev.* **2016**, *45* (21), 5925.
- [14] 沈万鑫. 镍基金属有机框架材料的合成及超级电容器性能的研究[博士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [15] 洪晏忠. 化工设计通讯, **2022**, *48* (8), 44.
- [16] Wang, Y. G.; Zhang, X. G. *Solid State Ionics* **2004**, *166* (1-2), 61.
- [17] 黄晓霞. 化工设计通讯, **2023**, *49* (12), 180.
- [18] Chu, D. W.; Song, X. M.; Tian, L. C.; Ma, H. Y.; Pang, H. J.; Wang, X. M.; Guo, D. X. *Inorg. Chem. Commun.* **2019**, *110*, 107587.