

## MOF衍生的多孔碳材料制备及其电容性能研究 ——基于OBE理念设计一个综合化学实验

段俊新, 余奥, 李全华, 屈德宇, 刘丹, 程冬炳, 王东雪, 李曦\*

武汉理工大学化学化工与生命科学学院, 武汉 430070

**摘要:** 基于成果导向的OBE理念, 围绕人才培养的毕业要求和课程目标, 结合科研成果设计了一个综合实验——MOF衍生的多孔碳材料制备及其电容性能研究。该实验采用常压直接加入法合成Zn-MOF-5 ( $Zn_4O(OOCC_6H_4COO)_3$ ), 通过碳化、酸洗等技术制成分层多孔碳材料并对其进行表征, 最后考察了其电化学性能。通过该综合实验, 学生不仅可以了解超级电容器这一科技前沿领域, 而且可以有效地提升材料合成与表征、仪器操作和数据分析能力, 培养学生综合应用知识的能力和解决复杂问题的能力, 促进创新思维、团队协作意识和交流沟通能力的提升, 从而达到高等工程教育毕业要求。

**关键词:** OBE理念; 综合化学实验; MOF; 多孔碳材料; 超级电容器

**中图分类号:** G64; O6

## Preparation of Porous Carbon Materials Derived from MOF and Their Capacitance Performance: Design of a Comprehensive Chemistry Experiment Based on the OBE Concept

Junxin Duan, Ao Yu, Quanhua Li, Deyu Qu, Dan Liu, Dongbing Cheng, Dongxue Wang, Xi Li \*

School of Chemistry, Chemical Engineering and Life Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China.

**Abstract:** Grounded in the principles of Outcome-Based Education (OBE) and aligned with graduation requirements and course objectives, we designed a comprehensive experiment titled "Preparation of Porous Carbon Materials Derived from MOF and Their Capacitance Performance". This experiment involves the synthesis of Zn-MOF-5 using a direct addition method under atmospheric pressure, followed by the preparation of layered porous carbon materials through processes such as carbonization and acid washing, which were then characterized. Finally, we investigated the electrochemical properties of these materials. Through this comprehensive experiment, students not only gain insights into the cutting-edge field of supercapacitors but also enhance their skills in material synthesis and characterization, instrument operation, and data analysis. This experience fosters their ability to integrate knowledge across disciplines, solve complex problems, stimulate innovative thinking, and develop teamwork and communication skills. Ultimately, this supports students in meeting the graduation requirements of advanced engineering education.

**Key Words:** OBE concept; Comprehensive chemistry experiment; MOF; Porous carbon materials; Supercapacitor

21世纪的竞争将是人才的竞争。为满足我国社会对创新型、全能型人才的需要, 教育部提出了《教育部关于加快建设高水平本科教育 全面提高人才培养能力的意见》(教高〔2018〕2号), 各高校

收稿: 2024-05-10; 录用: 2024-07-30; 网络发表: 2024-08-27

\*通讯作者, Email: chemlixixi@whut.edu.cn

基金资助: 湖北省高等学校省级教学改革项目(2018115); 武汉理工大学教学改革研究项目(w20210147, w20210144, w2019119)

也纷纷以培养学生创新思维和解决复杂问题的能力为培养目标,进行教育改革<sup>[1-3]</sup>。基于成果导向的教育理念(OBE理念)以学生为中心,强调学生的学习成果,关注学生在学习结束后所掌握知识和获得能力的程度,体现了知识、能力和素质的综合培养<sup>[4]</sup>。为了保证教学目标和学习成果的一致性,OBE采用了反向教学设计,首先确定预期的学习成果(即学生所获得的能力和知识),再围绕学习成果依次进行学习评价方式的制定、教学方案的设计以及教学活动的组织<sup>[5,6]</sup>。由此可见,OBE理念与人才培养目标相契合,采用OBE理念进行教学设计和实施,有利于对学生创新思维和解决复杂问题能力的培养。因此,我们根据应用化学专业的毕业要求和综合化学实验课程目标,结合当前研究热点和本课题组在超级电容器方面的研究成果,基于OBE的教学理念和设计思路,设计了一个综合实验“MOF衍生的多孔碳材料制备及其电容性能研究”,建立了项目教学目标和实验目的与课程目标和毕业要求的对应关系,制定了能实现实验目的的考核方式和要求,进而设计了相应的教学内容、教学方案和教学方式,以保证课程目标的达成。

## 1 实验目的确定

随着全球经济的快速增长,传统能源将变得严重短缺,发展新的可再生能源和新的储能设备已迫在眉睫,其中,超级电容器作为一种新型的电化学储能器件被广泛关注。它是介于传统电容器和电池之间的一种储能设备,具有功率密度高、充放电速度快、可循环次数多、使用温度范围广等优点,是目前的研究热点<sup>[7,8]</sup>。其性能与电极材料密切相关,目前常用的电极材料为多孔碳、金属氧化物和导电聚合物等。其中,多孔碳材料因其价格低廉、导电性好、孔结构丰富和比表面积大等优点成为超级电容器的首选电极材料,但能量密度低,而金属氧化物和导电聚合物的加入可以有效提高能量密度<sup>[9,10]</sup>。金属有机框架材料(MOF)是金属离子和有机配体以配位的方式形成的多孔材料,具有孔径一致、孔道分布均匀和比表面积高等特点。而且,通过选择合适的金属离子和有机配体,可以获得不同形貌、粒径和孔结构的MOF,以满足不同领域的需求,因此,MOF受到材料学家们的青睐<sup>[11,12]</sup>。本实验采用常压直接加入法成功合成了MOF,并以MOF为模板,经高温碳化和酸洗,获得MOF衍生的多孔碳材料,采用电化学方法研究所制备材料在超级电容器中的应用。本实验涉及材料制备、分析表征以及电化学等方面的基础知识及相关实验手段,需要综合运用所学知识及实验技能去调控实验条件、分析实验结果,是一个化学、材料、能源三学科交叉融合的综合性实验。

根据应化专业学生的毕业要求和综合实验课程目标,对于该实验我们提出了5条实验目的与之对应,对应关系见表1。

- (1) 掌握常压直接加入法、高温碳化等实验技术和操作注意事项。
- (2) 掌握MOF和多孔材料的表征方法和测试原理,如红外光谱(FT-IR)、X射线粉末衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、氮气吸脱附测试(BET)等,能够分析制备条件对物质结构和形貌的影响。
- (3) 掌握超级电容器的储能机理,掌握循环伏安法(CV)、恒电流充放电(CP)等电化学方法的测量原理和实验方法,能够熟练运用数据处理软件处理和分析实验数据。
- (4) 能综合运用基础化学知识以及文献信息来分析和解决实验中遇到的问题。
- (5) 通过查阅文献,能够分析和解释实验结果,获得制备条件、物质结构和性能之间的关系,对后续研究具有指导作用,完成实验报告的撰写。

## 2 评价体系的构建

根据OBE理念,课程考核应覆盖实验全过程,且能够体现对课程目标的达成度。因此,我们将实验教学过程分为实验预习、实验过程和实验分析三个阶段,综合考虑学习能力、实验技能、实验结果与团队合作等因素,以表1的毕业要求、课程目标和实验目的为依据,制定了图1所示的评价体系和表1的考核要求。而且,除教师评价外,还增加了学生自评和学生互评等评价方式,多维度评价学生在实验过程中的表现和成果。

表1 实验目的与毕业要求、课程目标和考核要求的对应关系

毕业要求	课程目标	考核要求	实验目的
(1) 掌握有关化学的基本知识和基本实验技能, 培养独立分析和解决化学问题的能力, 培养实际动手操作能力, 为相关专业课程奠定基础	知识能力	① 掌握常压直接加入法、高温碳化等实验技术和操作注意事项, 掌握超级电容器的储能机理 ② 掌握表征方法和电化学方法的测量原理	(1) (2) (3)
(2) 具有较强的自学能力、综合应用各种手段获取信息的基本能力	实验能力	熟练进行材料制备和电化学测量等实验操作	
	数据处理能力	熟练运用数据处理软件处理和分析实验数据	
(3) 具有本专业必须的试验、测试、计算机应用等技能, 具有从事化学合成、化学分析等领域的工作能力	安全意识	① 准确分析实验的安全隐患 ② 正确处理“三废”	
(4) 具有较强的开拓创新精神和初步的科研开发能力, 了解本学科国际前沿性的科学技术最新发展动态, 具有一定的创新性思维和科技研究能力	获取信息和分析能力	能综合运用化学知识和文献信息来分析和解决问题, 解释实验结果	(4) (5)
(5) 具有较强的安全防护意识和相关的安全知识, 能在实验、实践活动和工程项目的实施中严格执行安全规范	创新能力	分析实验结果, 获得制备条件、物质结构和性能之间的关系, 对未来有展望	
(6) 具有较强的表达和沟通能力	写作能力	完成实验报告的撰写	(5)
	团队合作意识	合作完成实验, 数据共享	所有

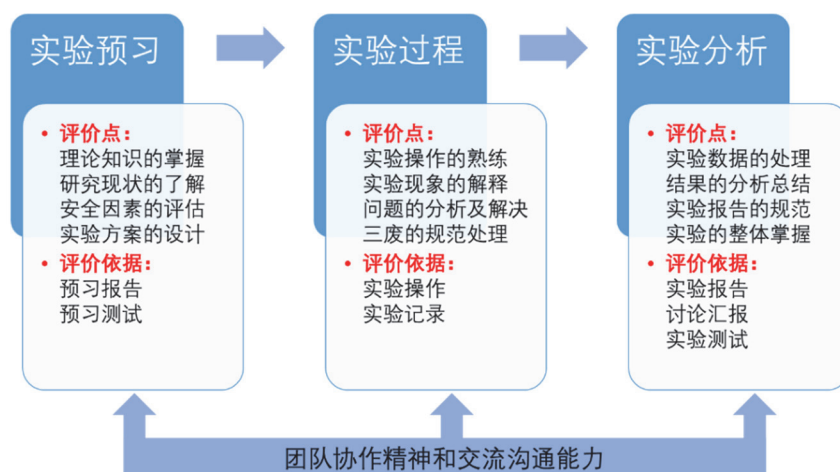


图1 评价体系示意图

### 3 教学内容的设计

围绕实验目的和评价要求, 我们以“研究探索、项目规划、工程实现、成果总结”为指导进一步设计了实验教学的具体内容。

#### 3.1 实验原理

根据储能机理, 超级电容器可分为双电层超级电容器和法拉第超级电容器。其中, 双电层电容的产生是依靠溶液与电极界面形成的双电层结构。超级电容器工作原理及基本构成如图2所示。根据电容计算公式(1)可知, 电容值 $C$ 与双电层厚度 $d$ 成反比, 与电极有效面积成正比。

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} \quad (1)$$

其中,  $\epsilon$ 为介电常数,  $S$ 为电极有效面积,  $k$ 为静电力常量。

因此, 研究出导电性能优良、比表面积较高且在电解液中具有稳定化学性能的材料是研究超级电容器的关键。

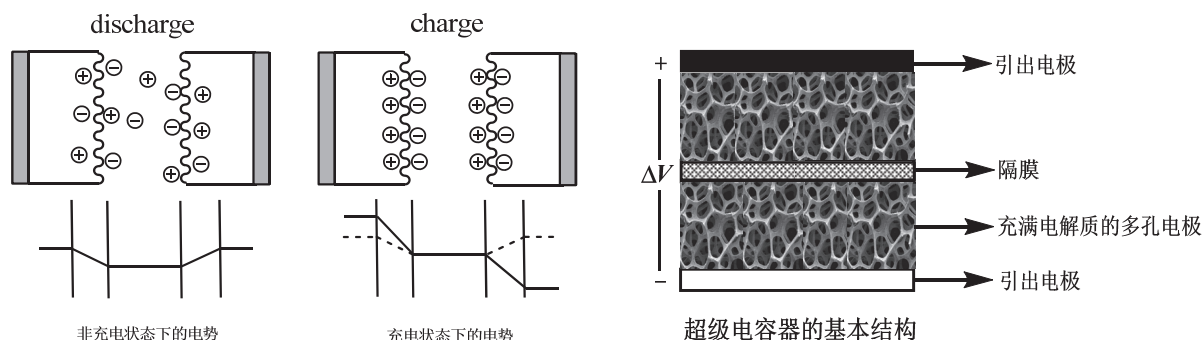


图2 双电层电容器工作原理(左)及结构示意图(右)

其中, MOF是一种将配体和金属离子通过自组装形成的具有重复结构单元的金属有机框架材料, 以其为模板合成多孔碳材料的孔径大小与MOF中的有机配体结构密切相关。一般来说, 有机配体越长, 除去金属离子之后, 材料的孔径越大。正因为MOF材料孔径良好的可调控性, 使得其非常适合作为纳米多孔碳材料的模板。而研究比较成熟的Zn-MOF-5 ( $\text{Zn}_4\text{O}(\text{OOC}_6\text{H}_4\text{COO})_3$ )具有三维交叉孔道结构, 它是由四面体的中心结 $[\text{Zn}_4\text{O}(\text{CO}_2)_6]$ 与对苯二甲酸连接起来形成的3D立体结构。其结构中包括孔径宽度分别为8 Å (1 Å = 0.1 nm)和12 Å的结构, 这两种孔径结构在MOF-5中交叉分布形成一个准球面结构<sup>[13]</sup>, 这种结构可以为碳化后的材料提供不同大小的孔径结构, 有利于制备具有复杂孔径的多孔材料, 所以常被用作多孔碳模板使用<sup>[14]</sup>。

本文利用常压直接加入法成功合成了Zn-MOF-5, 之后以MOF为模板, 通过煅烧、酸洗、研磨、压片等工序将其制成了层状多孔碳电极材料, 利用XRD、SEM、BET等表征手段分析了电极材料的结构和形貌特征, 采用电化学方法研究了其电化学性能, 并进一步探究了形貌微观结构对电容性能的影响。该综合实验可以引导学生从制备方法对结构形貌和性能的影响进行分析研究, 制备条件的优化使学生了解科学研究的思路和方法, 有效提升了学生全面分析问题、解决复杂问题的能力。

### 3.2 实验仪器与试剂

仪器: 84-1A型六工位磁力搅拌器(上海司乐仪器有限公司)、FA2104N型电子分析天平(0.1 mg)(上海精密科学仪器有限公司)、DZF-6050型真空干燥箱(上海索普仪器有限公司)、TL1200型管式炉(南京博蕴通仪器科技有限公司)、SHZ-D型循环水真空泵(巩义市予华仪器有限责任公司)、CH660B型电化学工作站(上海辰华仪器有限公司)、iS5型傅里叶变换红外光谱仪(Thermo公司, 美国)、Zeiss Ultra Plus场发射扫描电子显微镜(Zeiss FE-SEM Gmini Technology公司, 德国)、RU-200B/D/MAX-RB型转靶X射线衍射仪(Rigaku公司, 日本)、ASAP-2010型全自动比表面积及孔隙度分析仪(Micromeritics公司, 美国)。

试剂: 对苯二甲酸( $\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOH}$ ,  $\text{H}_2\text{BDC}$ );  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $N,N$ -二甲基甲酰胺(DMF); 三乙胺(TEA); 氢氧化钾(KOH); 二氯甲烷( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ); 氢氟酸(HF); 无水乙醇; 以上试剂均为分析纯。

### 3.3 实验内容

#### (1) Zn-MOF-5的制备

采用常压直接加入法, 参照文献<sup>[15]</sup>, 将1.21 g (4 mmol)六水合硝酸锌溶于40 mL DMF中, 之后在室温下加入0.34 g (2 mmol)  $\text{H}_2\text{BDC}$ , 开启磁力搅拌, 待固体全部溶解后, 加入1.6 g (16 mmol) TEA, 此时溶液立刻变为粘稠状白色悬浊液, 磁力搅拌2 h, 之后用10 mL DMF洗涤抽滤, 将白色沉淀转移至培养皿中, 于115 °C下真空干燥6 h, 以除去产物中的DMF<sup>[16]</sup>, 每次平行做五组, 最后获得白色粉末Zn-MOF-5, 称重为2.5547 g左右, 产率约97%。

#### (2) Zn-MOF-5的处理

将得到的Zn-MOF-5分成两部分, 一部分留作测试用, 标记为样品A。剩下一部分(约2.1 g左右)放入管式炉中, 以氮气做保护气下800 °C保温5 h, 得到的黑色粉末用20%的HCl溶液浸泡24 h, 水洗

至中性以除去煅烧后留下的ZnO，真空80 °C干燥，最后得到的多孔碳粉末约0.7307 g，标记为样品B。

### (3) 工作电极的制备

将样品B与乙炔黑和聚四氟乙烯乳液(60%)以质量比18 : 1 : 1在玛瑙研钵中混合研磨成表面光滑的大薄片，然后将大薄片剪成数个10 mg左右的小薄片。干燥后的每个多孔碳材料薄片放置在两片泡沫镍(1 cm<sup>2</sup>)中，并以镍丝为引出导线，用压片机在3 MPa下压片，制备好的电极片放入6 mol·L<sup>-1</sup> KOH溶液中浸泡8 h，然后进行电化学测量。

### (4) 工作电极的电化学性能测试

本实验所有的电化学测试都采用三电极体系。工作电极为上述制得的电极，Pt柱电极为辅助电极，Hg/HgO电极为参比电极，电解质为6 mol·L<sup>-1</sup> KOH溶液。其中循环伏安测试和恒电流充放电测试时电位窗口均为-1.0 - 0 V，改变扫描速度与电流密度多次测量。

### (5) 材料表征

利用傅里叶变换红外光谱仪对Zn-MOF-5进行FT-IR表征。利用转靶X射线衍射仪对所得样品进行组成与晶格结构表征，辐射源Cu-K<sub>α</sub>射线。利用全自动比表面积及孔隙度分析仪对样品比表面积、孔径大小与分布进行表征，测量温度为-196 °C，测量前将样品用乙醇洗涤并在150 °C下脱气3 h；孔径分布采用吸附曲线用Barrett-Joyner-Halenda (BJH)法计算。利用场发射扫描电镜分析样品的孔结构和材料组成等信息。

## 3.4 结果与讨论

### 3.4.1 材料表征

#### (1) 红外光谱分析

图3为Zn-MOF-5的红外光谱图，从图中可以看出在3400-3600 cm<sup>-1</sup>波段中3605 cm<sup>-1</sup>处有一小吸收峰，表明合成的MOF-5含有少量水，1658 cm<sup>-1</sup>处可归属为少量未去除的DMF的C=O引起的<sup>[17]</sup>。此外在1599和1503 cm<sup>-1</sup>可归属为-COO<sup>-</sup>的不对称伸缩振动吸收峰，1389 cm<sup>-1</sup>可归属为-COO<sup>-</sup>的对称伸缩振动吸收峰，这些峰位置和COO<sup>-</sup>配位到Zn<sup>2+</sup>后的吸收峰一致<sup>[18,19]</sup>。750 cm<sup>-1</sup>主要由于MOF-5中四面体Zn<sub>4</sub>O晶簇中Zn-O的伸缩振动引起的<sup>[20]</sup>。由此红外图谱可初步判断成功合成了MOF-5。

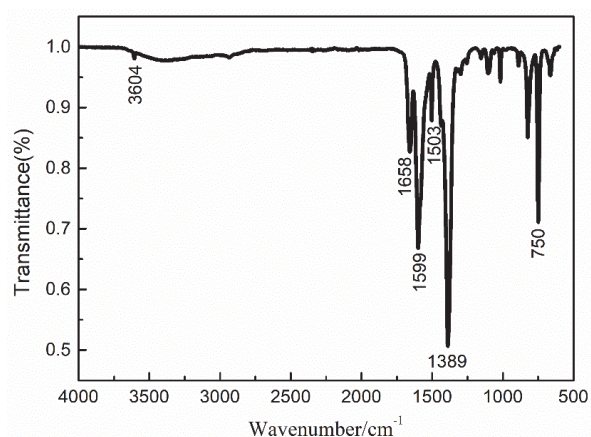


图3 Zn-MOF-5的红外光谱图

#### (2) XRD分析

图4是样品A与B的XRD图谱，2 $\theta$ 角扫描范围是5°-70°。结果表明：首先，样品A在2 $\theta$ 为6.1°、8.8°、14.1°和15.7°处出现Zn-MOF-5的主要特征衍射峰，与文献<sup>[21,22]</sup>报道完全吻合，这表明Zn-MOF-5已经成功制备；其次，碳化后的样品B与原样品A相比，晶体的衍射峰消失，在2 $\theta$ 为22°和44°左右出现两个宽而散的衍射峰，分别对应石墨的(002)和(101)衍射峰<sup>[23]</sup>，说明经过碳化、酸洗后，所得样品B为纯净的多孔碳材料。

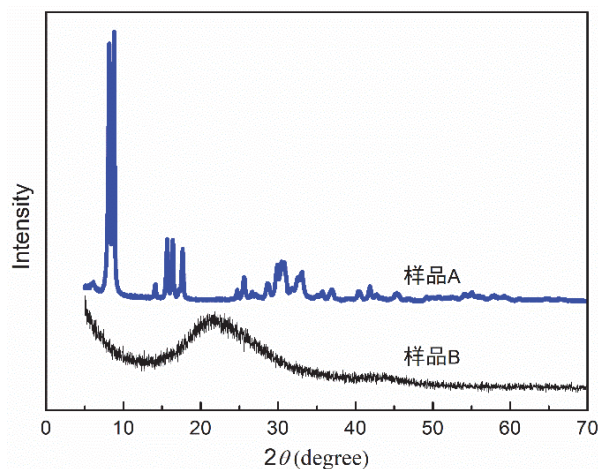


图4 样品A和样品B的XRD图谱

### (3) SEM分析

图5为场发射扫描电镜Zeiss Ultra Plus的图片,从图5a可以看出,样品A为立方晶体结构,晶体尺寸大小约为50–200 nm,这进一步说明Zn-MOF-5已经被成功制备。图5b表明样品B在经过碳化、酸洗之后呈分层多孔状,孔径范围在2–200 nm,该结构将有利于电解液在多孔碳内部进行快速迁移,从而提高该材料的电化学性能。

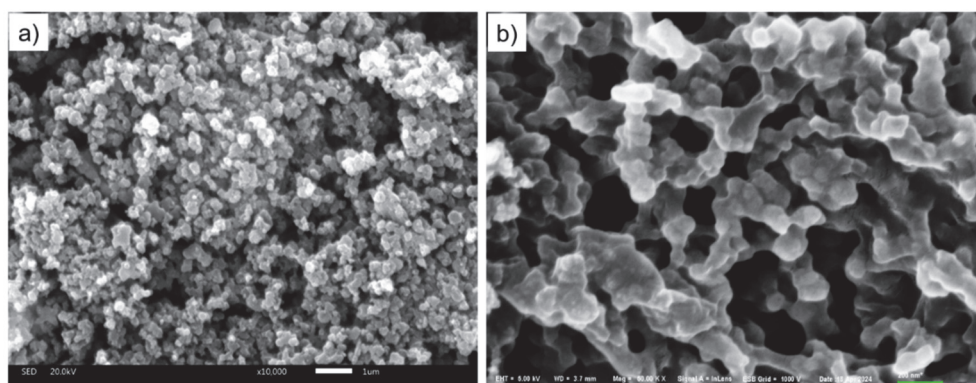


图5 样品A (a)和B (b)的SEM图

### (4) BET分析

图6a和6b分别为样品A、B的吸脱附等温曲线图和孔径分布图。根据IUPAC的分类,样品B的吸脱附曲线呈现出第IV类曲线且具有H3型的回滞环的特征,说明样品为层状结构且以介孔和大孔为主,孔径范围与SEM的分析结果大体一致。利用BET法计算,样品A和B的孔结构数据如表2所示。样品B的比表面积为 $1158.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,是样品A的约47.6倍,孔容量积是样品A的34.8倍。进一步说明样品B经过酸洗、碳化后更加疏松多孔,且孔径分布发生了变化。介孔的存在有利于电解液和电极活性物质充分接触,增加电极的电化学有效表面积,从而提高电极材料的双电层电容;一定量的大孔的存在有利于电解质离子在多孔碳中的传输,并因此而改善材料的倍率性能<sup>[24]</sup>。

#### 3.4.2 电化学性能测试

从图7(a)可以清晰地看到,测试体系的电位窗口为 $-1.0 \text{ V}$ 到 $0 \text{ V}$ ,这比一般多孔碳材料的电位窗口要宽,说明了样品B具有理想的孔径结构。CV曲线表现为完美的矩形,符合双电层电容的循环伏安曲线特征,这说明样品B只具有双电层电容特性。同时观察CV曲线图可知,随着扫描速率的增大,

CV曲线的形状也没有明显变化,这说明在整个测试过程中离子能够很好地进入电极材料,在电极表面堆积形成双电层电容。这些优良性质都归功于样品B层状的孔隙结构<sup>[25]</sup>。

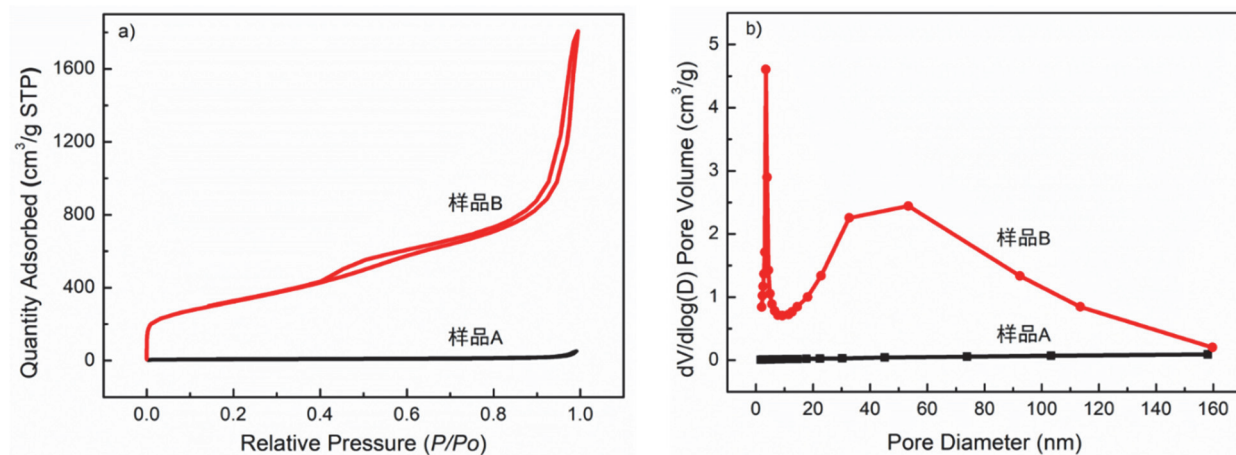


图6 样品A和B的氮气吸脱附等温曲线(a)和孔径分布图(b)

表2 样品A和B的孔结构数据

样品	比表面积 $S_{BET}/(m^2 \cdot g^{-1})$	孔容/ $(cm^3 \cdot g^{-1})$			平均孔径/nm	孔比例	
		$V_{总}$	$V_{(介孔+大孔)}$	$V_{微孔}$		介孔+大孔	微孔
A	24.34	0.0804	0.0771	0.0033	9.6526	0.959	0.041
B	1158.92	2.7967	2.7838	0.0129	13.2089	0.995	0.005

恒电流充放电测试又称计时电势法(CP),是在恒定电流条件下对被测电极或者电容器进行充放电测试,记录其电势随时间的变化,从而研究电容器的电化学性能。同循环伏安法相似,恒电流充放电测试也可以得到待测电容器的比电容大小。其计算公式为:

$$C_m = \frac{it_d}{m\Delta E} \quad (2)$$

其中,  $C_m$ 表示质量比电容( $F \cdot g^{-1}$ ),  $i$ 表示放电电流(A),  $t_d$ 表示放电时间(s),  $\Delta E$ 表示放电电压降(V),  $m$ 为电极上的活性物质的质量(mg)。

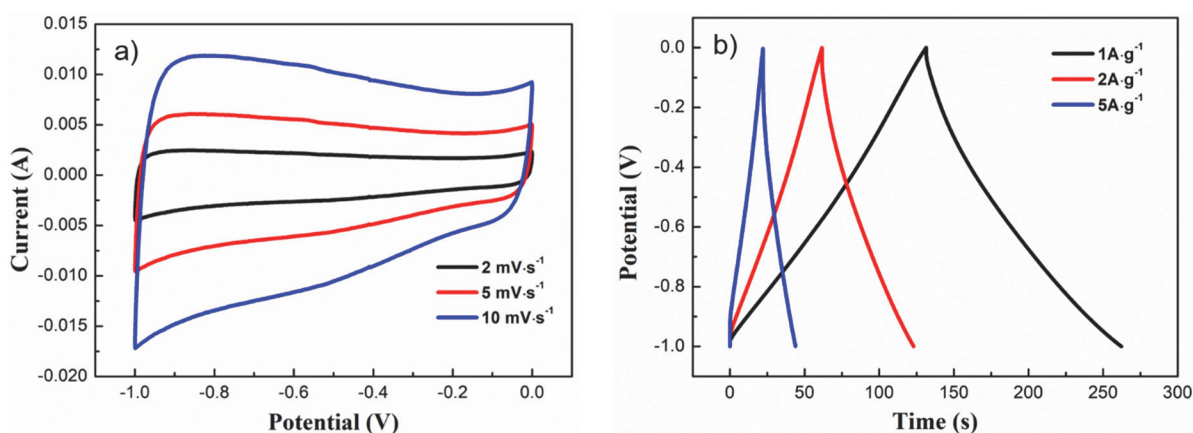


图7 样品B的电化学测量图谱

(a) 扫描速度为2、5、10  $mV \cdot s^{-1}$ 的循环伏安曲线; (b) 电流密度分别为1、2、5  $A \cdot g^{-1}$ 的恒电流充放电曲线

电子版为彩图

从图7(b)中可以看出,不同电流密度下的恒电流充放电曲线呈近似“等腰三角形”,表明该材料具有良好的双电层行为。其次,欧姆降随着电流密度增大基本不变,这同样是由于样品B有大量的介孔和大孔结构,即便扫描速率增大时,介孔和大孔也能相对保证离子进入电极材料内部并在表面堆积,形成双电层。根据公式(2)计算不同电流密度1、2、5 A·g<sup>-1</sup>下的比电容分别为162.7、154.6、142.7 F·g<sup>-1</sup>,即电流密度从1变化到5 A·g<sup>-1</sup>,电容保持率仍为87.7%,说明该电极具有良好的电容性能<sup>[26]</sup>。

#### 4 实验的注意事项

(1) 该综合实验包括FT-IR、XRD、SEM和BET的表征,为保证实验的顺利开展,学生需提前复习表征方法的制样、原理和数据分析,为后续的电化学测试结果提供有力支撑。

(2) MOF-5的后处理需用到管式炉等高温设备以及20% HCl溶液,存在一定的危险性。实验课开始前,教师一定要考查学生对实验过程中使用的仪器的安全操作规程和试剂的理化性质的理解和预习程度,保证实验的安全性。

(3) 实验过程中涉及到洗涤抽滤产品,注意做好废液回收工作。

#### 5 教学过程的实施

本实验涉及材料制备、表征及电容性能测试等实验过程,影响因素较多,适合大三以上高年级学生以团队形式完成,因此,在实验前将一个班的学生分成5个小组,每组5-6人,结合线上教学平台和线下实验操作完成教学,具体实施过程包括预习准备与讨论、实验操作、结果分析与总结三个阶段。

##### (1) 预习准备与讨论阶段

实验开始前四周,教师在线上教学平台发布实验任务,明确实验目的和内容以及可能需要的实验方法,给出相应的经典文献,要求学生进一步查阅文献资料,了解MOF、多孔材料和超级电容器的研究进展,熟悉实验内容相关的理论知识,归纳MOF和多孔材料的制备方法及其原理,总结研究超级电容器的电化学方法,设计实验方案,并对所用试剂及实验方法给出安全评估,完成预习报告。然后,教师与学生一起对实验方案进行讨论,确定最终实验方案。同时,学生在网上完成预习测试。实验前的准备阶段大概需要2学时。

##### (2) 实验操作阶段

各小组按照实验方案进行实验,分工合作,要求学生仔细观察实验现象,及时做好实验记录。在此过程中,教师要引导学生对实验现象及结果进行解释,有针对性地开展研讨。实验部分包括:① MOF-5的制备及洗涤处理过程大概需要3学时,之后对其干燥6 h,由实验辅助老师完成取出,不占用学生时间。② MOF-5的表征测试,红外制样、测试每小组自主完成,XRD和SEM受实验条件限制,需送样测试,同时将剩余的MOF-5进行煅烧5 h,设置好条件到时自动停止,煅烧过程由实验辅助教师值守。学生操作过程约需要2学时。③ 对煅烧后的样品浸泡、洗涤、干燥,学生操作过程大概需要2学时。④ 对煅烧洗涤后的样品进行XRD、SEM送样测试,及MOF-5和煅烧后多孔碳样品B进行BET测试,BET测试可由每小组自主上机完成,该过程大概需要1学时。⑤ 电极的制备及电化学测试,大约需要4学时。

##### (3) 结果分析与总结阶段

实验完成后,要求学生整理并处理实验数据,对实验结果进行分析总结,完成实验报告,并以小组为单位进行实验汇报。同时,学生在网上完成实验测试。该过程大约需要3学时。

#### 6 实验成绩的评定

根据评价体系,学生最终实验成绩由教师评价(60%)、小组成员互评(10%)、学生自评(10%)和网上测试成绩(20%)四部分构成。其中,教师评价成绩是贯穿于实验教学的整个过程,包括实验预习、

实验过程和实验分析三部分,各占总成绩的20%;小组成员互评是小组每位成员根据实际表现以及贡献度对其进行评分,取平均值;网上测试成绩包括实验前的预习测试和实验后的网上测试,各占总成绩的10%。这样的评价体系和方式是全方位的,既考核了学生的理论知识和实验技能,也考查了学生综合运用知识解决问题的能力、创新能力和写作能力等,客观评价了学生对知识的掌握程度以及能力的获得程度。

## 7 结语

以OBE理念为导向的综合实验设计,从人才培养的毕业要求和课程目标出发,以科研成果转化的实验项目为载体,通过多样化的教学模式和客观全面的评价方式,使学生将所学的基础理论知识和实验技能融会贯通,对实验项目的认知更全面、更系统,提高了解决复杂问题的能力,培养创新思维;同时,以团队合作形式进行,给予学生更多的自主性,能激发学生的主观能动性,培养团队协作意识和交流沟通能力,从而达到人才的培养目标。

## 参 考 文 献

- [1] 李永军,王玉枝,张晓兵,范媛吉,蔡焜,陈淑云,吴英鹏. *大学化学*, **2021**, *36* (5), 2008022.
- [2] 李育佳,贾叙东,陈露洪,朱成建. *大学化学*, **2019**, *34* (10), 14.
- [3] 谢钢,吴彪,陈三平,马向科,赵志厚,马佳妮,谭青山,赵晓霞. *大学化学*, **2020**, *35* (9), 41.
- [4] Spady, W. D. *Outcome-Based Education: Critical Issues and Answers*; American Association of School Administrators: Arlington, TX, USA, 1994; pp. 4–26.
- [5] 鞠志宇,舒朋华,谢智宇,李公春. *化学教育*, **2020**, *41* (2), 71.
- [6] 郭虹琦,刘婷,王德义,苏柏方,黄一川,李振彪,李红岩,卢爱党. *化学教育*, **2020**, *41* (8), 67.
- [7] Sardana, S.; Gupta, A.; Singh, K.; Maan, A. S.; Ohlan, A. *J. Energy Storage* **2022**, *45*, 103510.
- [8] Wu, G.; Wu, X. J.; Zhu, X. L.; Xu, J. H.; Bao, N. Z. *ACS Nano*. **2022**, *16* (7), 10130.
- [9] Li, Z. J.; Guo, D. F.; Liu, Y. Y.; Wang, H. Y.; Wang, L. L. *Chem. Eng. J.* **2020**, *397*, 125418.
- [10] Kumar, S.; Saeed, G.; Zhu, L.; Hui, K. N.; Kim, N. H.; Lee, J. H. *Chem. Eng. J.* **2021**, *403*, 126352.
- [11] Zhou, J. W.; Wang, B. *Chem. Soc. Rev.* **2017**, *46* (22), 6927.
- [12] Kaye, S. S.; Dailly, A.; Yaghi, O. M.; Long, J. R. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 14176.
- [13] Tsao, C. S.; Yu, M. S.; Chung, T. Y.; Wu, H. C.; Wang, C. Y.; Chang, K. S.; Chent, H. L. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129* (51), 15997.
- [14] Liu, B.; Shioyama, H.; Akita, T.; Xu, Q. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130* (16), 5390.
- [15] Saha, D.; Deng, S. G.; Yang, Z. G. *J. Porous Mater.* **2009**, *16*, 141.
- [16] Zhang, L.; Hu, Y. H. *Appl. Surf. Sci.* **2011**, *257*, 3392.
- [17] Burgaz, E.; Erciyes, A.; Andac, M.; Andac, O. *Inorg. Chim. Acta* **2019**, *485*, 118.
- [18] Hermes, S.; Schröder, F.; Amirjalayer, S.; Schmid, R.; Roland, A. *J. Mater. Chem.* **2006**, *16*, 2464.
- [19] Phan, N. T. S.; Le, K. K. A.; Phan, T. D. *Appl. Catal. A* **2010**, *382*, 246.
- [20] 孙红,柳志刚,陈敏. *大连交通大学学报*, **2013**, *34* (4), 102.
- [21] Huang, L. M.; Wang, H. T.; Chen, J. X.; Wang, Z. B.; Sun, J. Y.; Zhao, D. Y.; Yan, Y. S. *Microporous Mesoporous Mat.* **2003**, *58* (2), 105.
- [22] Van Vleet, M. J.; Weng, T. T.; Li, X. Y.; Schmidt, J. R. *Chem. Rev.* **2018**, *118* (7), 3681.
- [23] Wang, H. G.; Wu, Z.; Meng, F. L.; Ma, D. L.; Huang, X. L.; Wang, L. M.; Zhang, X. B. *ChemSusChem* **2013**, *6* (1), 56.
- [24] 江兰兰,王先友,张小艳,吴昊,吴春. *电源技术*, **2014**, *38* (8), 1497.
- [25] 黄思赞,李帅,丁万,王一. *化学试剂*, **2022**, *44* (5), 691.
- [26] 王丕涛,武丽丽,陈鑫国,张建强,雒和明. *兰州理工大学学报*, **2022**, *48* (5), 21.