



FePc-MXene 催化材料制备及其性能的综合实验设计

张 洁, 向松敏, 谭 兴, 刘佳焱, 卢 泽, 李韦漫, 王文武

(四川大学 材料科学与工程学院, 成都 610065)

摘要: 以“柔性锌空电池”这一研究和发展热点为主题, 依托新能源专业, 以柔性锌空电池空气阴极催化剂存在的问题为切入点, 采用轴向配位的策略制备了酞菁铁(FePc)和功能化的 MXene 复合催化材料, 并进行物理表征和电化学性能测试。该综合实验设计有助于学生掌握催化材料的基本制备方法, 深入理解电化学理论, 熟悉柔性锌空电池的组装流程和测试方法, 熟知科研工作基本流程, 进一步认识所学课程在新能源领域中的重要作用, 培养科研探索意识和自主学习能力。

关键词: 综合实验设计; MXene; 催化剂; 锌空电池

中图分类号: G424.31

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20230594](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20230594)

Comprehensive Experimental Design of FePc-MXene-Based Catalysts and Its Performance Testing

ZHANG Jie, XIANG Songmin, TAN Xing, LIU Jiayao, LU Ze, LI Weiman, WANG Wenwu

(College of Material Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The comprehensive experimental design takes the “flexible Zn-air battery” as the research and development hotspot. It relies on the major of new energy to solve the problems in the air cathode catalyst of flexible Zn-air battery. The axial coordination strategy is adopted to prepare the iron phthalocyanine (FePc) and the functional MXene composite catalytic materials. Besides, the physical characterization and electrochemical performance are conducted and further evaluated. This teaching design helps students master the basic preparation method of catalytic materials and deeply understand the electrochemical theory. It is also beneficial to make students be familiar with the assembly process and testing methods of flexible zinc-air batteries as well as the basic process of scientific research. Furthermore, the students can better understand the significance of new energy courses and improve the awareness of scientific research, exploration, and independent learning ability.

Key words: comprehensive experimental design; MXene; catalyst; Zn-air battery

新能源专业的实验设计对于培养具有较强烈动手能力和独立思考能力的复合型创新人才至关重要。实验教学设计不仅能激发学生对本专业的学习兴趣, 也有助于学生未来进入相关技术领域更好地从事材料研发、质量检验、教学及技术管理等工作^[1]。通过合理的综合实验设计, 可以培养学生设计实验方案、使用仪器设备以及分析数据的能力, 进而结合理论课所学知识, 解决相关领域的一些问题, 提升科研探索意识^[2]。

在能源危机日益严重的当下, 为保护人类赖以生存的自然环境, 实现“碳达峰、碳中和”长远目标, 清洁能源的有效利用得到了极大的应用和推广。锌空电池(Zn-air battery, ZAB)是一种使用金属锌作为阳极的金属空气电池, 具有高能量密度($1218 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$)、环境友好、寿命长、安全性高等优点, 在电子产品、能量存储、电动汽车等领域具有广泛的应用^[3]。近年来随着柔性器件的大规模使用, 柔性储能装置的需求大幅提高, 特别是

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 四川大学大学生创新创业训练计划(C2024129877); 中央高校基本科研业务费专项资金(20826041E4280)。

作者简介: 张洁, 博士, 讲师, 主要从事新能源材料与器件相关实验教学和科研工作。E-mail: jzhangchem@scu.edu.cn

柔性锌空电池(flexible Zn-air battery, FZAB), 可以作为可充电织物为穿戴设备如电子手表、手机等电子产品供电^[4]。在 FZAB 各组件中, 空气阴极对于电池性能有着至关重要的作用, 特别是涉及多电子转移的氧还原反应(oxygen reduction reaction, ORR)对应放电过程, 电荷转移动力学极其缓慢, 导致输出性能不理想^[5]。为了提高 FZABs 的效率, 往往需要高效的催化剂来加速 ORR 过程。目前, 铂(Pt)基催化材料是一种理想的氧还原催化剂, 但 Pt 价格昂贵且易中毒, 极大地阻碍了锌空电池的商业化进程。因此, 开发经济高效、性能稳定的氧还原催化剂对促进可充电 ZABs 的实际应用具有重要意义。

金属大环化合物是一种具有大环结构的有机金属配合物, 通常由一个大环分子和一个或多个金属原子组成, 其中金属原子通常是过渡金属(Fe, Co, Ni, Cu 等)^[6]。如金属酞菁(metal phthalocyanine, MPc)是最常见的大环化合物之一, 自 Jasinski 于 1964 年首次提出金属酞菁对 ORR 具有催化活性以来, 已成为一种极具潜力的 ORR 催化剂^[7-8]。但金属酞菁在反应过程中容易被氧化并且发生团聚, 导致催化剂失活。学生基于对现有金属酞菁不足之处的认识和相关文献的查阅, 根据老师的建议, 设想利用“轴向配位”将金属酞菁与稳定的功能化材料相结合, 以发挥其高催化活性的同时有效解决稳定差的问题。

MXene 材料作为一种新型功能化材料, 由于其独特的结构和性质, 在催化、传感和医学等领域具有广泛的应用^[9]。MXene 属于过渡金属碳/氮化物纳米层状材料, 过渡金属与碳或氮交错排列, 其分子式为 $M_{n+1}X_nT_x$ 。其中, T_x 表示表面官能团, 官能团的电子特性往往赋予一些特殊的物理化学性质。大量研究表明, 大多数纯 MXene 材料的氧还原催化性能远不如贵金属催化剂, 其原因可能是 MXene 本身的金属(如 Ti 等)并不适合催化氧还原过程, 但其独特的结构特征使之适合作为活性物质的载体材料。

本实验针对柔性锌空气电池空气阴极氧还原反应动力学缓慢以及 Pt 催化剂价格昂贵、稳定性差等问题, 以开发高效、稳定的非贵金属氧还原催化剂为主要目标, 基于酞菁铁(FePc)和功能化的 MXene 设计制备了一系列 FePc-X-MXene 复合催化材料(X 为可调变的官能团)。通过合理调控

获得最优催化剂, 进一步将其组装至柔性锌空电池, 让学生掌握材料的制备、物理表征和电化学表征, 再拓展到器件组装和性能测试。通过以上实验设计, 使学生了解科研工作的基本流程, 培养学生查阅文献、理性思考和分析数据的能力, 为撰写科技论文奠定基础。

1 实验部分

1.1 综合实验设计思路

柔性锌空电池空气阴极催化材料的制备、表征和分析、电池组装及性能测试过程整合为综合实验项目进行教学设计, 能够在一定程度上帮助学生建立不同课程知识以及理论与实践之间的联系, 培养学生的科学思维和创新意识。此综合实验设计具体的课时安排如下: FePc-X-MXene 复合催化材料的制备方法(15 课时)、材料的表征和分析(4 课时)、柔性锌空电池的组装(2 课时)以及电池性能测试及评价(4 课时)。

首先, 要求学生分组根据制备方案, 列出包括所需的原材料和测试所需要的设备, 然后在讨论过程逐步完善实验方案。为确保每位同学都能对实验方案和测试实施操作, 且每组之间能够进行结果对比, 将学生分成 A、B、C 三组。A 组 3 人负责少层 MXene 的制备, 制备及操作时间合计约 3 h, 涉及室温搅拌 24 h 需在通风橱进行, 无需人为操作。B 组 4 人负责功能化 MXene 的制备及调控, 制备时间合计约 5 h, 高温烧结步骤由指导教师实施。C 组 3 人负责 FePc-X-MXene 催化剂的制备, 制备时间合计约 5 h, 后续高温煅烧步骤由指导教师实施。A 组需提前制备好少层 MXene 样品, 供 B 组实验时使用, B 组完成后再交由 C 组完成后续的材料复合。A、B、C 三组共同学习并完成基本表征及电池组装、测试, 要求每位学生在每一实验阶段都要详细记录实验数据, 由教师指导学生分析数据, 以提高学生在实验中分析解决问题的能力, 培养学生的创新意识。

1.2 试剂和仪器

试剂: MAX 相碳化钛铝(Ti_3AlC_2 , 莱州凯烯陶瓷材料有限公司)、酞菁铁(梯希爱上海化成工业发展有限公司)为主要原材料; 氟化锂、盐酸、甲醇、无水乙醇、氢氧化钠、异丙醇和 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)等试剂购于成都科隆化学有限公司; 亲水碳布(厚度 0.35 mm, 电阻率 $1.9\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$,

CeTech Co., Ltd)、铝箔(厚度 0.08 mm, 长沙斯普林)用于组装柔性锌空电池。

主要仪器和设备: 电子天平, 磁力搅拌器, 管式炉, 真空干燥箱, 场发射扫描电镜(SEM, Thermo scientific Apreo 2C), 傅里叶红外光谱仪(FTIR, Thermo Fisher Nicolet Is5), 紫外可见近红外分光光度计(UV-vis, 岛津 UV-2600), X 射线光电子能谱(XPS, 赛默飞 K-ALPHA), 电池测试系统(LAND CT2001A), 电化学工作站(AutoLab 302N, 瑞士万通), 旋转圆盘电极(PINE, 理化香港有限公司)。

1.3 实验流程

1.3.1 材料制备

1) A 组: 少层 MXene 的制备

称取 2 g Ti_3AlC_2 置于烧杯, 加入由 2 mL 氢氟酸、6 mL 去离子水和 12 mL HCl (12 mol/L) 组成的溶剂, 在室温下连续搅拌 24 h; 用去离子水反复离心、洗涤(离心机转速为 4000 r/min), 直至上层清液 pH 值为 7; 用去离子水分散产物, 对混合液超声处理 1 h, 收集上层清液得到少层 MXene 分散液, 经冷冻干燥获得少层的 MXene 粉体。

2) B 组: 功能化 MXene 的制备及调控

本实验中, 功能化的 MXene 记为 X-MXene (其中, X 为 OH、SCN、I 和 Cl)。OH-MXene 的制备步骤如下: 学生量取 20 mL 的 NaOH 溶液 (0.5 mol/L), 加入 50 mg 少层 MXene 粉体, 超声处理半小时后继续搅拌 4 h, 然后用去离子水离心、洗涤数次, 80 °C 真空干燥后得到 OH-MXene。其余功能化 X-MXene 的制备方法为: 分别将 50 mg KSCN、KI、KCl 与 50 mg 少层 MXene 粉体充分混合后研磨至均匀, 然后将粉体转移至管式炉, 在氩气保护下 550 °C 煅烧 5 h; 冷却至室温后, 将样品粉末分散于去离子水和丙酮, 离心洗涤至上清液无色, 收集固体产物, 80 °C 真空干燥后所得产物分别标记为 SCN-MXene、I-MXene 和 Cl-MXene。

3) C 组: FePc-X-MXene 催化剂的制备

称取 50 mg FePc 分散于少量 DMF 溶液, 超声处理 1 h 获得分散液 A; 再称取 50 mg X-MXene 分散于 DMF 获得分散液 B。将分散液 A 倒入分散液 B, 搅拌半小时后超声处理 1 h, 再继续搅拌 12 h。然后用 DMF 和甲醇离心、洗

涤, 将烘干后的粉体转移至管式炉, 在氩气保护下 400 °C 煅烧 2 h, 最后得到 FePc-X-MXene 催化剂。

1.3.2 电极制备与电池组装

评价催化剂和空气阴极的性能对于进一步的电池应用至关重要。例如, 本实验所涉及循环伏安法(cyclic voltammetry, CV)和线性伏安扫描(linear sweep voltammetry, LSV)作为两种重要的电分析化学研究方法, 学生可以判断电极反应的可逆程度以及推测电极反应, 初步判断反应关键步骤和机理等^[10]。此外, 本实验采用多通道电池测试系统进行恒流充、放电, 电流密度的选择依靠学生对于相关文献的学习和对比。

1) 电极制备

本实验所有电化学表征基于三电极体系在电化学工作站上进行, 采用石墨棒为对电极, 氯化银电极为参比电极, 玻碳电极为工作电极(半径 5 mm)。工作电极制备方法如下: 称取 5 mg 催化剂和 5 mg 乙炔黑置于血清瓶, 添加 800 μL 异丙醇+200 μL 去离子水的混合溶液, 再滴加 50 μL Nafion 溶液(5 wt%), 超声 30 min 得到分散均匀的催化剂浆液。用移液枪量取 5 μL 浆液均匀涂覆在工作电极的玻碳部分, 并使用红外灯烘干。

电化学测试过程如下: 先在氩气饱和的 0.1 mol/L KOH 溶液中采用循环伏安进行活化, 扫描速率为 50 mV/s, 活化 10 圈。为了评价催化剂的 ORR 活性, 在氧气饱和的 0.1 mol/L KOH 溶液中进行线性扫描伏安扫描, 扫描速率为 10 mV/s。

2) 柔性锌空电池组装

空气电极的制备: 称取 5 mg FePc-SCN-MXene 催化剂和 5 mg 乙炔黑分散于 1 mL 无水乙醇+100 μL Nafion 溶液的混合溶液, 经超声分散获得均一的浆液。然后, 用移液枪量取一定量的催化剂浆液均匀涂覆在面积为 1 cm^2 的碳布上。采用多次涂覆的方式, 使碳布上的催化剂载量达到 $\sim 1 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 并用红外灯烘干至定型, 再放入真空烘箱 90 °C 彻底烘干备用。

固态聚丙烯酸电解质的制备: 将 3 g 丙烯酸与 0.5 g 硫代水杨酸充分搅拌后倒入 12 mol/L 的 KOH 中充分搅拌并过滤, 加入 2 mL $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液 (0.5 mol/L), 加热使其充分溶解, 并快速搅拌至无色后, 倒入培养皿, 冷却后获得固态聚丙烯酸电解质。

最后,选取铝箔作为阳极,将负载催化剂的碳布作为空气阴极、固态聚丙烯酸作为电解质按照如图1所示“三明治”的结构进组装,并用透气绷带以及订书钉封装。使用万用表测试柔性锌空电池的开路电压,并采用线性伏安扫描以5 mV/s从开路电压扫描至2.3 V左右(即充电),然后从开路电压回扫至0.5 V以下(即放电),记录充放电极化曲线,计算获得功率密度曲线。最后,在电池测试系统上进行恒流充放电测试。

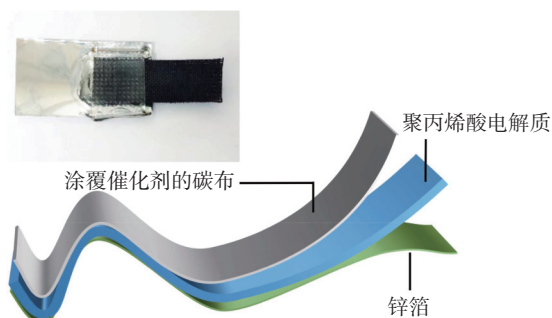


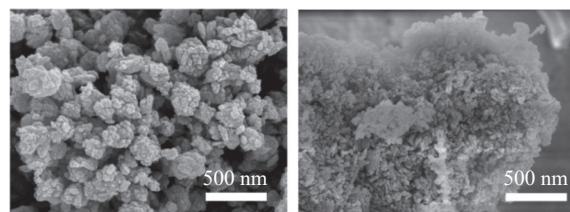
图1 柔性锌空电池的结构示意图

2 结果分析

2.1 催化剂的物理表征

SEM是利用电子束轰击样品收集产生的二次电子、背散射电子等,用以分析材料的形貌特征,在催化材料研发与性能研究中起着重要作用。图2(a)为商业FePc的SEM图像,FePc堆叠团聚形成块体。从FePc-SCN-MXene的形貌可以看出,SCN-MXene片层宽度约为2 μm ,且大量FePc均匀分散在SCN-MXene表面,如图2(b)所示。通过对样品SEM图像的观察,学生初步认识到功能化的SCN-MXene作为载体与FePc发生轴

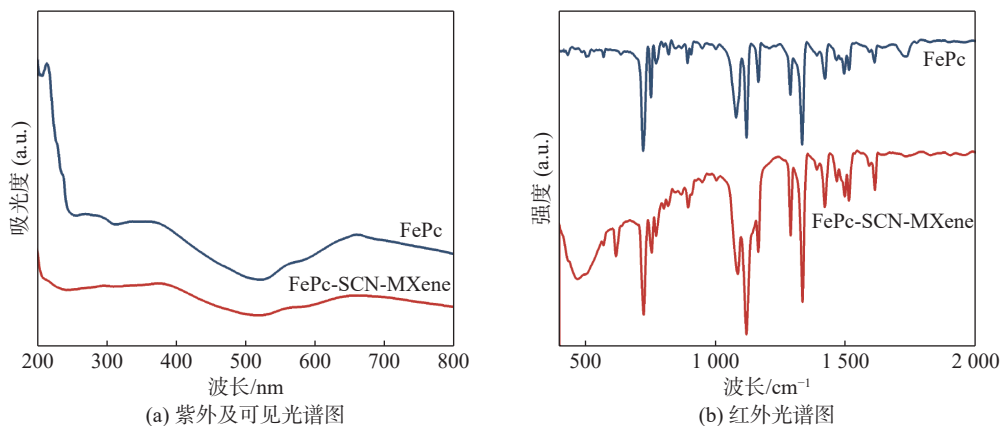
向配位后,可以显著提高FePc的分散性。进一步引导学生进行思考,这样的形貌特征有利于改善催化剂的导电性、暴露更多活性位点,以促进氧气在催化剂表面的吸附和物质传输,降低反应能垒,从而改善催化活性。



(a) FePc (b) FePc-SCN-MXene

图2 催化剂的SEM图像

UV-vis吸收光谱用于分析FePc和FePc-SCN-MXene中金属铁中心的变化。如图3(a)所示,与未经处理的FePc相比,FePc-SCN-MXene在213 nm处的吸收峰消失。结合光谱中这一现象引导学生思考,这可能是由于轴向配位后FePc-SCN-MXene中Fe的3d电子发生去局域化作用。因此,中心Fe原子的电子密度有所降低,有利于提高活性位点的氧吸附能力,从而提升FePc-SCN-MXene的本征活性。催化剂的红外光谱如图3(b)所示,FePc-SCN-MXene催化剂上所有拉伸振动峰与FePc基本一致,表明FePc通过轴向配位成功加载到SCN-MXene上。其中,729 cm^{-1} 处对应C—H平面外拉伸振动峰,1608、1117和1075 cm^{-1} 对应C—H的平面内拉伸振动峰,而1331 cm^{-1} 处的峰可归因于C=C或C=N伸缩振动。学生通过以上结果可以进一步验证FePc的Fe中心与SCN-MXene发生了轴向配位,得出FePc与SCN功能化MXene成功复合的结论。



(a) 紫外及可见光谱图

(b) 红外光谱图

图3 FePc和FePc-SCN-MXene的UV-vis吸收光谱和红外光谱图

如图 4(a) 所示, FePc-SCN-MXene 的 XPS 全谱中显示出 Fe、F、O、Ti、N 和 C 元素, 其中 F 的端基是在氢氟酸剥离单层 MXene 时产生的, S、C 和 N 元素的存在则证明了 MXene 上的 SCN 功能化。如图 4(b) 所示, Fe 的 $2p_{3/2}$ 的峰位于 709.8 eV 处, $2p_{1/2}$ 的峰位于 723.5 eV 处, 表明 FePc-SCN-MXene 复合物中 Fe 元素的价态仍然为 +2 价, 轴向配位并没有改变中心 Fe 原子的价态, 仅改变局域电子密度。如图 4(c) 所示, Ti

2p 峰可以分为 Ti $2p_{3/2}$ 和 Ti $2p_{1/2}$, 证实了复合物中 Ti-C, Ti-OH, Ti-O 和 Ti-F 的存在。图 4(d) 中 532.2 eV 和 531.0 eV 两处的 O 分峰证实了 C—O 和 C=O 的存在, 表明酞菁铁的大环骨架未被破坏。图 4(e) 所示的 N 元素在 399.1 eV 处的峰表明存在 Fe-N₄, FeN₄ 作为主要活性位点源于 FePc 的大环结构。图 4(f) 中 286.0、284.8 eV 两处的 C 1s 分峰分别对应 C—C 和 C—O—C, 也证明了 MXene 与 FePc 的成功复合。

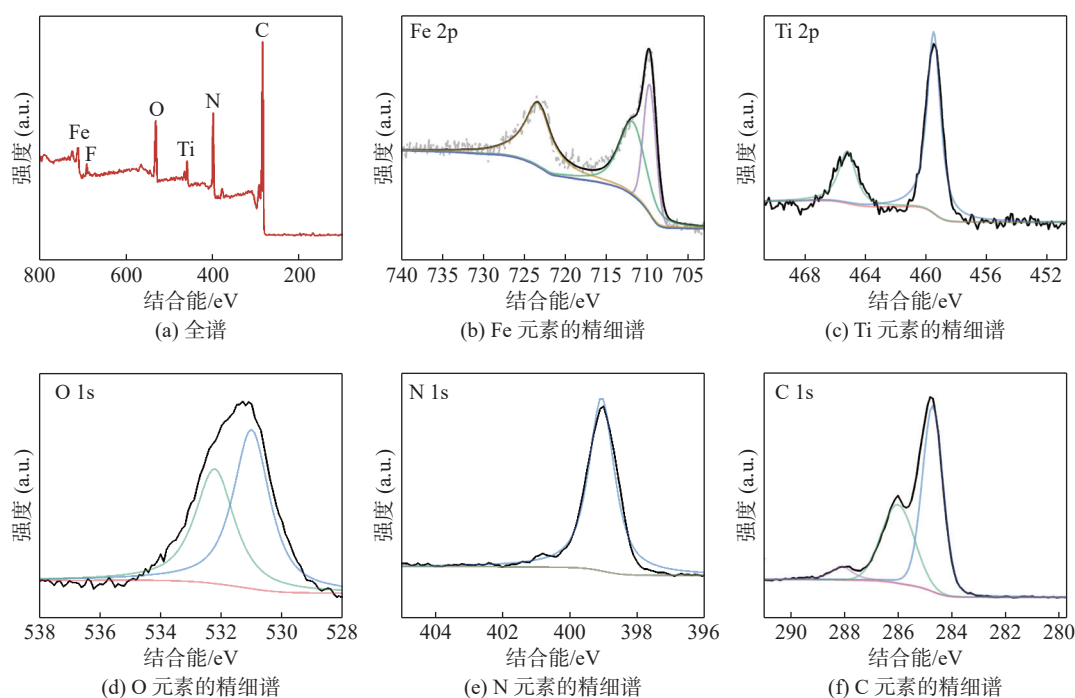


图 4 FePc-SCN-MXene 的 XPS 全谱和各元素的 XPS 高分辨精细谱

2.2 催化剂的电化学性能表征

前文通过 SEM、红外和 XPS 等物理表征对催化剂的形貌和化学组成等进行了分析, 为进一步考察催化剂 ORR 活性, 分别测试了材料在 Ar 和 O₂ 饱和 0.1 mol/L KOH 电解液中的 CV 曲线。如图 5 所示, 两种催化剂在 Ar 饱和的电解液中都没有还原峰, 而在 O₂ 饱和和电解液中均出现明显的还原峰。值得一提的是, FePc-SCN-MXene 的还原峰电位为 0.9 V, 远高于 FePc 对应的 0.68 V, 表明 FePc-SCN-MXene 相较 FePc 具有更好的 ORR 性能。

进一步使用线性扫描伏安法对具有不同轴向配位的 FePc-X-MXene 催化剂进行测试。由图 6(a) 可以看出, 功能化的 MXene 与 FePc 复合可以显著提高 ORR 催化性能。此外, 各催化剂的起始电

位、半波电位和极限电流密度对比总结如表 1 所示。FePc-X-MXene 的极限电流密度均显著高于 FePc, 特别是 FePc-SCN-MXene 催化剂的半波电位达到 0.91 V, 相较其他具有轴向配位的催化剂更具优势。这可能是由于 SCN 通过轴向配位成功将 FePc 引入到 MXene 上, SCN 改善了活性位点铁原子的电子结构。为了考察催化剂在 ORR 过程中的动力学, 进一步计算了各催化剂的 Tafel 斜率。如图 6(b) 所示, FePc-SCN-MXene 的 Tafel 斜率仅为 29.55 mV/dec, 远低于 FePc (51.24 mV/dec)、FePc-Cl-MXene (57.33 mV/dec)、FePc-I-MXene (58.31 mV/dec) 和 FePc-OH-MXene (49.97 mV/dec)。以上结果表明, FePc-SCN-MXene 具有更好的催化活性和更快速的 ORR 动力学。

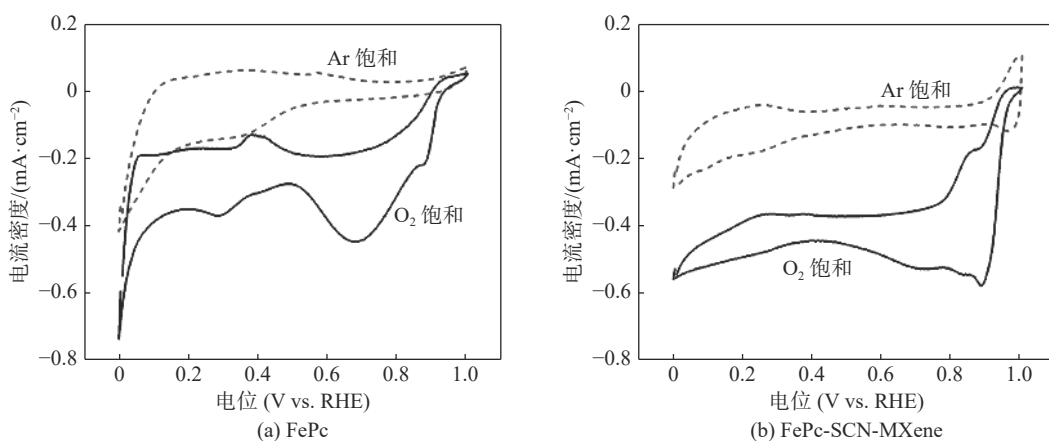
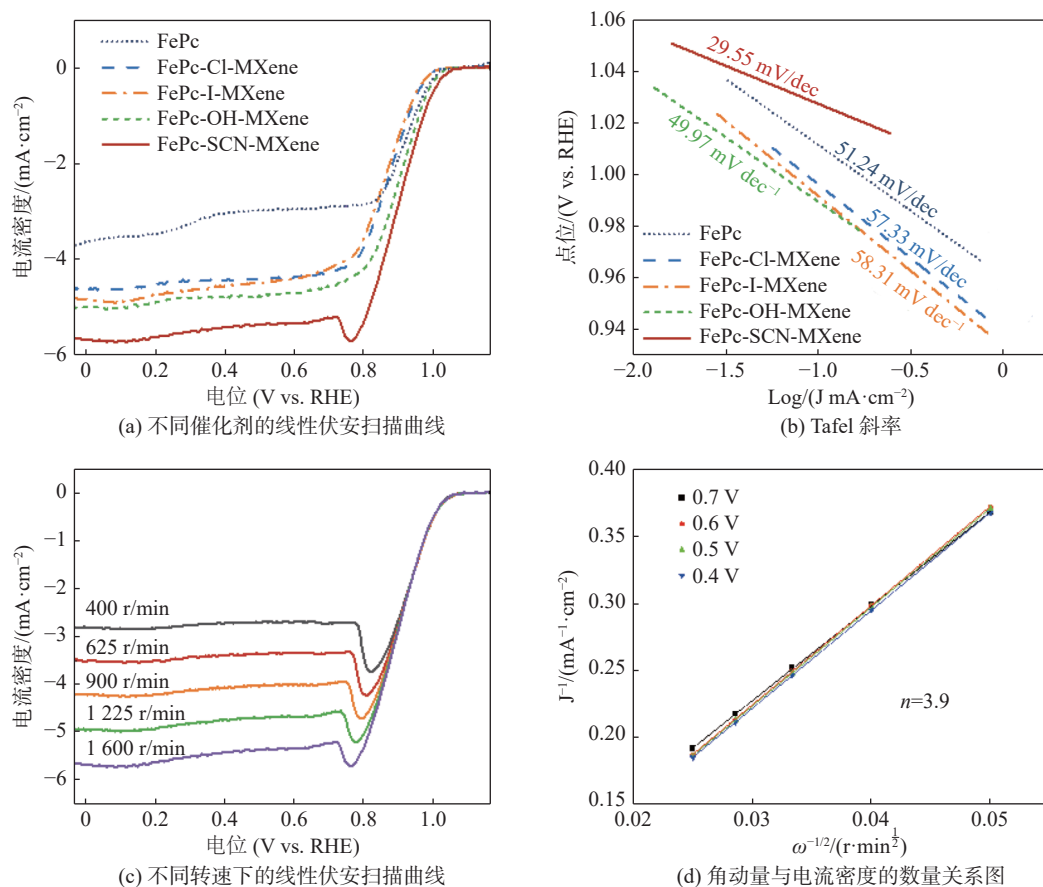
图5 催化剂在 Ar 饱和、O₂ 饱和 0.1 mol/L KOH 溶液中的 CV 曲线, 扫描速率 50 mV/s

图6 一系列 FePc-X-MXene 与 FePc 的 LSV 曲线对比(测试条件: 扫描速率 10 mV/s, 圆盘转速 1 600 r/min)、不同催化剂对应的 Tafel 斜率以及不同转速下 FePc-SCN-MXene 催化剂的 LSV 曲线及 K-L 曲线

表1 不同催化剂起始电位、半波电位与极限电流密度对比

催化剂	起始电位/V	半波电位/V	极限电流密度/(mA·cm ⁻²)
FePc	1.03	0.89	3.0
FePc-SCN-MXene	1.05	0.91	5.4
FePc-OH-MXene	1.02	0.90	4.8
FePc-Cl-MXene	1.00	0.87	4.4
FePc-I-MXene	1.00	0.86	4.5

为了进一步考察催化过程中 ORR 机理,测试了 FePc-SCN-MXene 催化剂在不同转速下(400、625、900、1225、1600 r/min)的 LSV 曲线。结果如图 6(c)所示,电流密度随着转速增加而增大,符合一级动力学规律^[11]。通过 K-L 方程计算得到转移电子数如图 6(d)所示,FePc-SCN-MXene 催化剂转移电子数为 3.9,表现出近似 4 电子 ORR 过程的高效选择性,表明该催化剂有望应用于锌空电池空气阴极。

2.3 柔性锌空电池性能测试

为了考察 FePc-SCN-MXene 的实际应用性能,将催化剂组装到柔性锌空电池上进行了一

系列测试。图 7(a)为三个 FePc-SCN-MXene 基柔性锌空电池串联起来点亮 LED 屏的示意图,展示了 FePc-SCN-MXene 的潜在应用前景。图 7(b)为 FePc-SCN-MXene 电池的放电曲线和功率密度曲线,在 70 mA/cm^2 时达到最大功率密度 37.5 mW/cm^2 。此外,如图 7(c)所示,该 FePc-SCN-MXene 电极在 2 mA/cm^2 电流密度下可以实现长达 13 h 的稳定放电时间。FePc-SCN-MXene 基柔性锌空电池的稳定性能测试在 1 mA/cm^2 的电流密度下循环(图 7(d))持续时间 20 h 以上,电池充放电的电压差没有发生明显衰减,证实了该催化剂的结构稳定赋予其良好的稳定性^[12]。

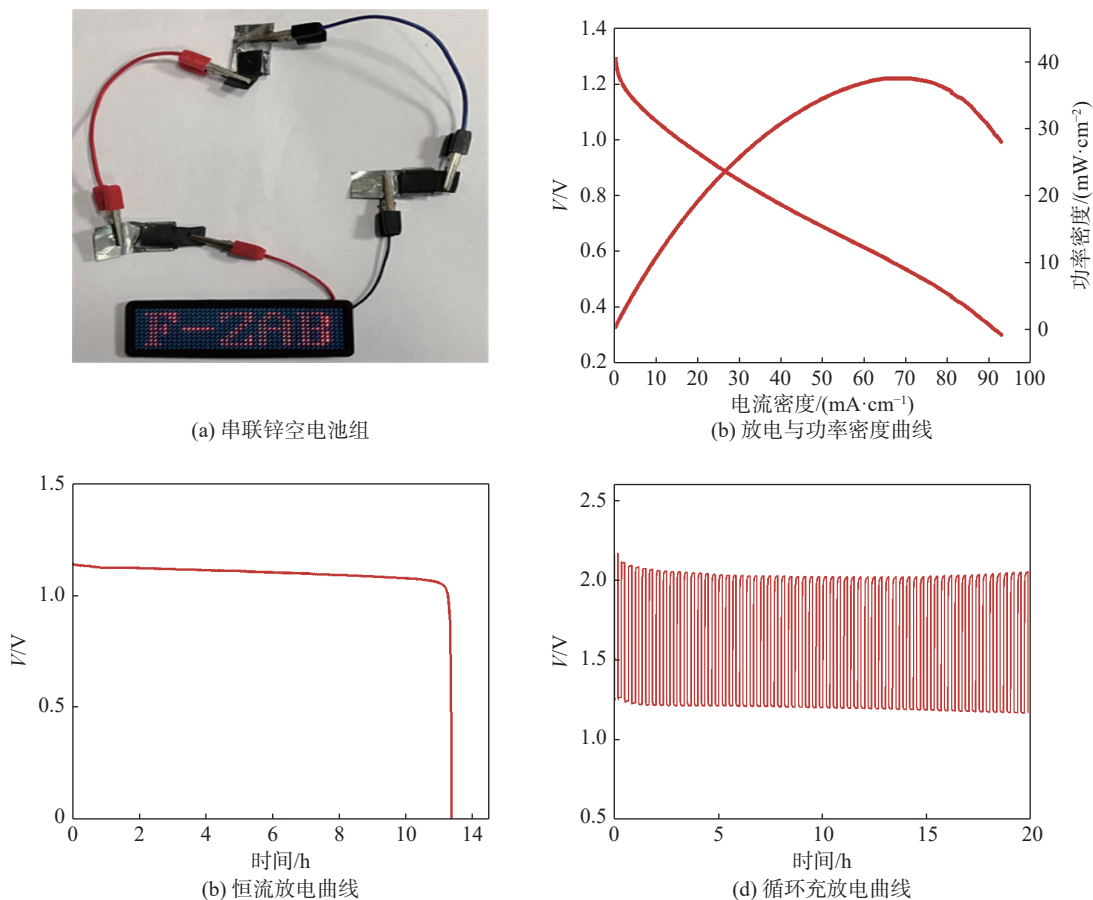


图 7 FePc-SCN-MXene 组装至柔性锌空电池的电池性能测试结果

考虑到现实生活中实际使用柔性电池时电池会不可避免发生弯折,进一步将电池在弯折状态下进行测试。柔性锌空电池开路电位如图 8(a)所示,在弯折的情况下电池仍保留 1.55 V 的稳定开路电位。我们进一步测试了各角度弯折下的循环充放电,电池的弯折示意图如图 8(b)所示。在弯

折的情况下该柔性电池依旧能像未弯折一样正常循环充放电,如图 8(c)所示,证实了 FePc-SCN-MXene 催化剂在柔性电子设备中的可用性。经过以上电池性能测试,学生开始反思自己操作的每个步骤,总结可能存在的影响因素,也对电池组装及性能测试有了认识,达到了教学基本目标。

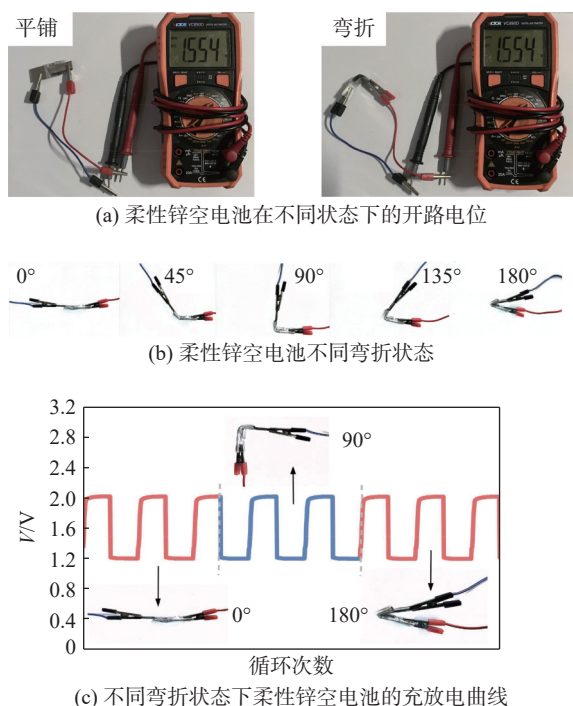


图8 弯折状态下 FePc-SCN-MXene 组装至柔性锌空电池的电池性能结果

3 结束语

本实验设计将多种官能团修饰在 MXene 上获得 X-MXene(X 为 Cl、I、OH、SCN), 进一步将 FePc 负载到功能化的 MXene 上, 以获得高分散的催化活性位点。通过改变轴向配体, 调控 Fe 中心的电子结构, 进而提高复合催化剂的 ORR 活性。在电化学性能测试中, 优化后的 FePc-SCN-MXene 催化剂半波电位达到 0.91 V, 极限电流密度大幅提高, Tafel 斜率仅为 29.55 mV/dec, 表现出良好的 ORR 活性和动力学。在电池性能测试中, FePc-SCN-MXene 组装的柔性锌空电池也表现出了良好的综合性能。本实验结合当前新能源新材料的热点, 通过材料制备、性能测试和数据分析, 层层递进, 激发了学生对新能源专业的兴趣和继续深入科研训练的热情, 取得了较显著的教学效果。此外, 本实验仅初步针对以 Fe 为活性中心的 FePc 进行改性, 激发了学生对催化剂材料活性中心调控策略的思考, 也吸引学生自发地查阅文献, 以设计多元化的活性中心和大环种类为目标, 进一步拓展对大环化合物催化材料改性的思路。

参考文献

- [1] 吴小帅, 史转转, 杨晓刚, 等. 浅谈新工科背景下新能源材料与器件专业建设思路[J]. *广州化工*, 2022, 50(13): 237-238.
- [2] 宋鸽, 王建, 王慧, 等. 基于科研平台的新能源材料与器件专业本科实验教学改革探索[J]. *中国轻工教育*, 2022, 25(6): 77-82.
- [3] LEONG K W, WANG Y F, NI M, et al. Rechargeable Zn-air batteries: Recent trends and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111771.
- [4] 滕浩天, 王文涛, 韩晓峰, 等. 柔性锌-空气电池进展与展望[J]. *物理化学学报*, 2023, 39(1): 19-34.
- [5] SHI W Y, ZHANG J, DONG X R, et al. Stabilizing Pt₃Co intermetallic nanocrystals on Co₃ZnC/Co in N-doped carbon for efficient oxygen reduction reaction and high-performance zinc-air batteries[J]. *Carbon*, 2023, 214: 118321.
- [6] ZAGAL J H, SPECCHIA S, ATANASSOV P. Mapping transition metal-MN₄ macrocyclic complex catalysts performance for the critical reactivity descriptors[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2021, 27: 100683.
- [7] LI X Y, WU X S, ZHAO Y, et al. Promoting oxygen reduction reaction by inducing out-of-plane polarization in a metal phthalocyanine catalyst[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(30): e2302467.
- [8] JASINSKI R. A new fuel cell cathode catalyst[J]. *Nature*, 1964, 201: 1212-1213.
- [9] 刘超, 李茜, 郝丽芬, 等. MXene 的功能化改性及其应用研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(4): 1020-1028.
- [10] 于鑫萍, 周炎, 张军, 等. 利用循环伏安法模拟技术理解电极过程可逆性[J]. *化学教育(中英文)*, 2020, 41(24): 61-64.
- [11] PENG W, WANG Y, YANG X X, et al. Co₉S₈ nanoparticles embedded in multiple doped and electrospun hollow carbon nanofibers as bifunctional oxygen electrocatalysts for rechargeable zinc-air battery[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 268: 118437.
- [12] ZHANG Y N, WANG J B, ALFRED M, et al. Co-Nx-enriched porous carbon nanofibers as efficient oxygen electrocatalyst for flexible Zn-air batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 544: 231865.

编辑 王燕