

基于ZIF-8/WCNT电化学传感器检测呋喃西林在实验教学中的设计与探索

郭美洁, 麻力文, 樊运康, 秦建芳, 张艳清, 杨海英*

运城学院应用化学系, 山西 运城 044000

摘要: 介绍一个新创综合实验, 基于Zn-甲基咪唑金属有机框架材料(ZIF-8)和碳纳米管(WCNT)电化学传感器检测呋喃西林, 包括金属框架材料的合成、传感器制备、测定条件优化、分析方法建立等多个模块。本实验切合本科实验教学需求, 涉及分析化学和材料化学等二级学科, 具有较强的交叉性和可拓展性, 适合于分析化学实验教学。

关键词: 新创综合实验; ZIF-8/WCNT; 电化学传感器; 呋喃西林

中图分类号: G64; O6

Design and Evaluation of a ZIF-8/WCNT-Based Electrochemical Sensor for Nitrofurazone Determination in Laboratory Teaching

Meijie Guo, Liwen Ma, Yunkang Fan, Jianfang Qin, Yanqing Zhang, Haiying Yang *

Department of Applied Chemistry, Yuncheng University, Yuncheng 044000, Shanxi Province, China.

Abstract: Herein we describe an innovative comprehensive experiment titled “Design and Evaluation of a ZIF-8/WCNT-Based Electrochemical Sensor for Nitrofurazone Determination in Experimental Teaching” used in our undergraduate program. The experiment comprises several modules, namely synthesis and characterization of Zn-MeIm metal-organic framework ZIF-8, preparation of an electrochemical sensor, optimization of experimental conditions, and development of analytical methods. The experiment involves analytical chemistry, materials chemistry, and other secondary chemistry branches. Owing to its interdisciplinary features and remarkable expansibility, the experiment is suitable for undergraduate experimental analytical chemistry teaching.

Key Words: Innovative comprehensive experiment; ZIF-8/WCNT; Electrochemical sensor; Nitrofurazone

习近平总书记2021年4月19日在清华大学考察时指出, 要提升原始创新能力, 拥有一大批创新型青年人才, 是国家创新活力之所在, 也是科技发展希望之所在。本科生要在完善理论知识的基础上, 放眼于世界科研进展, 加深学科之间相互融合, 在实验教学中积极进取, 锻炼动手操作能力和创新思维, 促进科研成果的转化^[1,2]。2018年教育部高等学校化学类专业教学指导委员会发布《化学类专业本科教学质量国家标准》, 为培养能够在化学及相关学科领域从事科学研究、教育教学等工作的化学类专业人才指明明确的方向^[3,4]。基础化学实验教学是本科生教学的重要部分, 但是现阶段实验教学中存在一些问题, 部分实验设计大多局限于单一知识点的应用, 缺乏综合性和完整性, 不能实

收稿: 2022-11-23; 录用: 2023-01-09; 网络发表: 2022-02-02

*通讯作者, Email: hyang@ycu.edu.cn

基金资助: 山西省教育厅教育教学改革课题项目(2022YJJG275, J20220994); 山西省国家级大学生创新创业项目(20220938); 运城学院教学改革项目(JG202023, JG202228)

现知识点的综合利用。实验教学考核方式不够全面高效,不能满足新时代教育改革背景下对高校人才的创新精神和创新能力的培养。因此,顺应时代的发展,设计综合化学实验,更新实验内容有着十分重要的意义。

化学实验教学是培养科学探究型人才的重要途径。习近平总书记曾指出“科技攻关要坚持问题导向”,把社会中存在的科学技术难题融入本科实验教学内容,使教学更有深度,有利于培养社会所需要的科技人才^[5]。本实验在严格遵守《化学类专业化学教学质量国家标准》的基础上作进一步拓展,指导本科生真正拥有创新能力,感悟创新对科学探索、世界发展的重要意义。本实验在分析化学和材料化学学科交叉融合的教学思路下,基于科学问题为目标导向的实验教学指导原则,引导学生发现问题。在实验过程中进行创新设计,探索分析实验结果,找出最合适的解决问题的方法,拓展学生知识面,开阔视野,构建更加合理和多样化的知识结构。

金属有机框架材料(MOFs)是新型多孔晶体材料,具有大比表面积、高孔隙度和化学稳定性等优点。MOFs材料独特的多孔结构造就其优秀的吸附与存储能力,在储氢、气体吸附、传感分析等方面都具有广阔的应用前景。因此,将MOFs材料相关研究纳入本科生实验教学体系的案例也逐渐被报道出来,这些实验教学案例可以帮助学生了解化学学科前沿,极大地激发了学生学习的积极性和科研热情^[6,7]。

本文选择重要的硝基呋喃类抗生素药物呋喃西林的电化学传感检测为研究案例,以传感界面构建和分析方法建立过程中的关键科学问题为主线,将最新发展的Zn-甲基咪唑金属有机框架材料(ZIF-8)合成及传感方法的建立开发为分析化学基础实验。该实验包含分析化学基本实验技能、材料合成和表征、分析方法学研究等模块,实验安全低毒、试剂消耗少、成本低,可转化为本科生综合化学实验。该新创综合实验具有较强的创新性,可开拓学生创新思维,提升创新能力。将科研成果与实验教学的有效结合用于基础实验教学,培养学生解决较为复杂分析方法问题的综合能力。《化学类专业本科教学质量国家标准》中提到:应注重培养学生创新意识和实践能力,引入基础和应用研究的新进展等^[3,4]。本新创实验的设计以解决存在问题和符合国家标准为导向,契合新时代化学实验教育的方针,进行实验教学的设计和探究。

1 实验部分

1.1 实验原理

呋喃西林(5-硝基-2-糠醛缩氨基脲, NFZ)是人工合成的硝基呋喃衍生物,广泛用于水产养殖,但因其具有遗传毒性和致突变性被禁止使用,建立呋喃西林检测方法非常必要。目前,已报道的检测方法有分光光度法、高效液相色谱法和液相色谱-串联质谱法等^[8,9]。这些方法存在着繁琐耗时、仪器设备昂贵、使用大量毒性有机溶剂等不足。相比之下,电化学传感方法具有设备简单、成本低等优点,在抗生素研究领域受到重视^[10-14]。各种纳米材料引入起到信号放大作用,被广泛用于电化学传感器以改善表面结构和电化学性能。

沸石咪唑酯骨架-8(ZIF-8)是沸石咪唑MOFs材料,由Zn与桥接配体咪唑中的N配位而成,表现出许多特优性能。由于ZIF-8导电性弱,金属纳米粒子或碳纳米管(WCNT)等可改善ZIF-8弱导电性,提高电化学传感器性能改善分析方法灵敏度^[10-12]。基于此理论背景,如图1所示,构建ZIF-8/WCNT电化学传感器测定NFZ实验得以开展。

1.2 试剂和材料

实验所需要的主要试剂和材料如表1所示,实验用水为去离子水。对于一个30人的班级,按5人一组,共分6组进行。该班级完成实验所需试剂用量如表1所示。

1.3 仪器和表征方法

综合上述方案,实验所需主要仪器如表2所示,其余仪器还包含:磁子、铁架台、玻璃棒、圆底烧瓶、100 mL量筒等。电化学测试均在电化学工作站CHI 760E上完成,采用三电极系统,工作电极

为修饰玻碳电极(GCE), 参比电极为Ag/AgCl (饱和KCl), 对电极为铂丝电极。取一定量呋喃西林工作溶液通氮气20 min, 考察在各修饰电极的电化学行为, 电位范围为0.4 – -1.4 V, 扫速为0.10 V·s⁻¹, 进行循环伏安扫描测试。电化学测量均在室温进行。

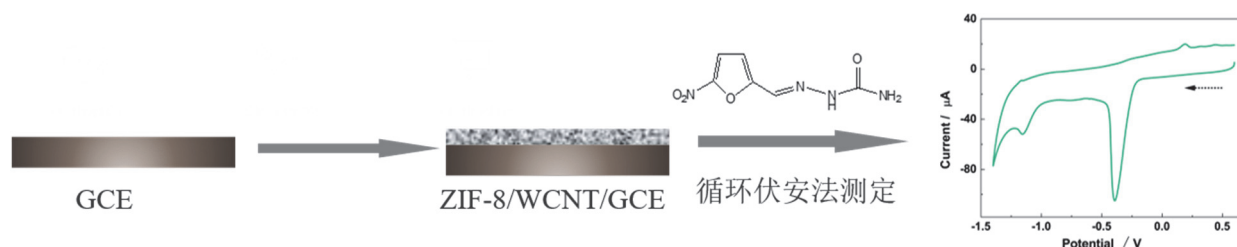


图1 电化学传感器构建和检测呋喃西林实验原理图

表1 主要实验试剂和用量

试剂名称	简称或分子式	纯度或规格	用量	生产厂家
全氟化磺酸酯	Nafion	分析纯(5%) (质量分数)	0.06 mL	美国Sigma试剂公司
呋喃西林	C ₆ H ₆ N ₄ O ₄	分析纯	0.0990 g	日本东京化成工业株式会社
二甲咪唑	MeIM	分析纯	3.70 g	阿拉丁试剂
六水合硝酸锌	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	分析纯	1.67 g	阿拉丁试剂
多壁碳纳米管	WCNT		0.02 g	江苏先丰纳米材料科技有限公司
甲醇	CH ₃ COOH	分析纯	300.0 mL	国药集团化学试剂有限公司
冰乙酸	CH ₃ COOH	分析纯	11.42 mL	国药集团化学试剂有限公司
无水乙酸钠	CH ₃ COONa	分析纯	27.22 g	国药集团化学试剂有限公司
氯化钾	KCl	分析纯	7.46 g	国药集团化学试剂有限公司
二甲基甲酰胺	C ₃ H ₇ NO	分析纯	54.0 mL	国药集团化学试剂有限公司

表2 所用主要实验仪器

仪器名称	生产厂家	规格型号
玻碳电极	武汉高仕睿联科技有限公司	Φ = 3 mm
电化学工作站	上海辰华仪器公司	CHI 760E
场发射扫描电子显微镜	日本日立公司	S-4800
电子天平	梅特勒-脱利多仪器(上海)有限公司	ME54E
高功率数控超声波清洗器	昆山市超声仪器有限公司	KQ-400KDE

1.4 实验步骤

(1) ZIF-8的合成: 室温下搅拌合成, 取1.67 g六水合硝酸锌于200–250 mL烧杯中, 加入80 mL甲醇混合(溶液A), 另取3.70 g二甲基咪唑于200–250 mL烧杯, 加入80 mL甲醇混合(溶液B), 将B液加入到A液, 搅拌24 h, 离心, 甲醇洗3次, 真空过夜干燥得到ZIF-8。

(2) ZIF-8/WCNT修饰电极制备和修饰材料选择: 分别称0.0100 g ZIF-8、WCNT, 加入到2.00 mL二甲基甲酰胺中, 超声10 min, 然后取该溶液0.20 mL, 0.5% Nafion 0.20 mL, 乙醇0.40 mL, 超声10 min, 得ZIF-8/WCNT复合材料分散液。直径3 mm玻碳电极抛光后, 在超纯水中清洗, 取5 μL滴加在GCE表面, 红外灯下干燥, 得ZIF-8/WCNT/GCE, 取各分散液按照上述操作得ZIF-8/GCE、WCNT/GCE。以修饰电极为工作电极, 分别考察呋喃西林在各修饰电极的电化学行为。

(3) 测定条件优化的探究: 各小组分别修饰不同体积 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ZIF-8/WCNT于GCE上, 修饰液体积为: $1 \mu\text{L}$ 、 $3 \mu\text{L}$ 、 $5 \mu\text{L}$ 、 $7 \mu\text{L}$ 、 $10 \mu\text{L}$ 、 $15 \mu\text{L}$ 、 $20 \mu\text{L}$, 按照步骤(2)的电化学方法进行检测, 分析峰电流可得最佳修饰量; 配制不同pH的醋酸-醋酸钠(ABS)缓冲溶液, 分析还原峰电流得最佳pH。

(4) 线性实验的探究: 各小组根据得到的最佳修饰物和最佳修饰量制备电化学传感器, 在优化的pH缓冲溶液中, 加入不同量的呋喃西林工作液, 分析峰电流值随浓度增加的变化, 建立电化学传感器检测呋喃西林的线性关系。

2 结果与讨论

2.1 合成ZIF-8和复合材料的表征

利用场发射扫描显微镜(SEM)技术对ZIF-8、WCNT和ZIF-8/WCNT复合材料进行图像扫描分析。如图2所示, 清晰可见ZIF-8材料的三维颗粒状结构, 多壁碳纳米管为互相缠绕的三维网状结构(亮色部分)。图中还可以清晰地看到ZIF-8颗粒附着在多壁碳纳米管三维网状结构中, 并且高度重叠, 和文献一致^[8]。多壁碳纳米管优异的导电性有利于增加复合材料的界面电子传递, 使得ZIF-8-WCNT复合材料的电化学性能更加优良。

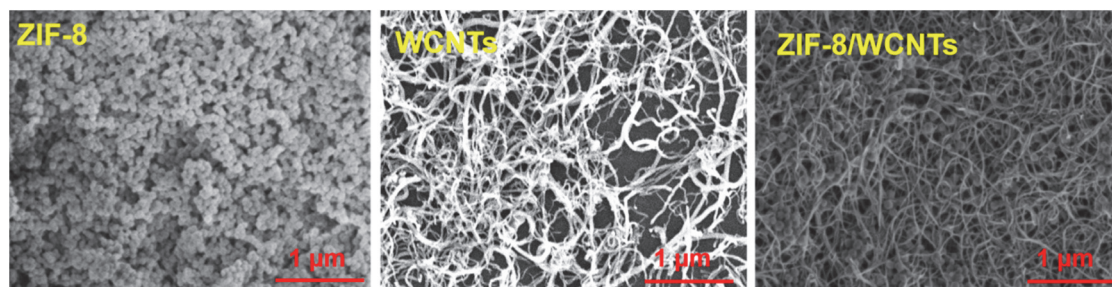


图2 ZIF-8、WCNT、ZIF-8/WCNT修饰电极的形貌

通过分析铁氰化钾氧化还原电对在不同修饰材料界面的电化学行为, 探究ZIF-8、WCNT和复合材料对界面电子转移的影响。各实验小组分别制备在玻碳电极表面滴涂三种材料制备传感器, 在 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 溶液中, 图3给出了裸玻碳电极和不同修饰电极的循环伏安图。在裸电极上表现出一对可逆的氧化还原峰, 在ZIF-8/GCE电极上峰电流下降, 这是由于ZIF-8弱导电性。WCNT和ZIF-8/WCNT修饰电极上峰电流明显增大, 这归因于WCNT良好的导电性提高了界面电子的转移; 而复合材料修饰电极上的峰电流比前两者上都高, 可能是结合了WCNT良好的导电性和ZIF-8多孔有利于扩散的优点, 促进了反应物在溶液中的扩散和电子传递。结果表明, 复合ZIF-8-WCNT是良好的传感器增敏材料。

2.2 电化学测定呋喃西林最佳修饰材料的探究

通过分析呋喃西林在不同材料上的电化学行为探究传感器的最佳修饰材料。各实验小组分别在玻碳电极表面滴涂ZIF-8、WCNT、ZIF-8-WCNT制备传感器, 在 $1.96 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 呋喃西林溶液以循环伏安技术(CV)进行检测。如图4(A)所示, 呋喃西林在GCE和ZIF-8/GCE电极上, 于 -0.40 V 左右出现一个不可逆还原峰C1; 在WCNT/GCE和ZIF-8-WCNT/GCE电极上, -0.390 V 出现还原峰C1, $+0.190 \text{ V}$ 出现氧化峰A1, 在 -1.140 V 还出现一个电流值较小的还原峰C2。其中, ZIF-8-WCNT/GCE在C1处的还原峰电流为 $92.28 \mu\text{A}$, 比WCNT/GCE上的峰电流高约30%, 高于ZIF-8/GCE和GCE上电流10倍左右, 说明复合材料增强了界面电子传导, 加速了电极反应速率, 进而增加了呋喃西林的电流响应。因此, 选择ZIF-8-WCNT修饰的GCE作为最佳修饰电极。呋喃西林可能的电化学还原机理如图5所示, C1处还原峰为呋喃西林(RNO_2)的硝基得到4电子和4质子发生还原反应生成羟胺(RNHOH); C2处还原峰为在酸性溶液中质子化的羟胺(RNHOH_2^+)进一步得到2电子1质子发生还原反应, 生成

RNH_2 ; A1为 RNHOH 失去2电子2质子发生氧化反应生成亚硝基(RNO)^[12,13,15]。C1处的还原峰电流最大, 因此选择该峰进行后续试验研究。

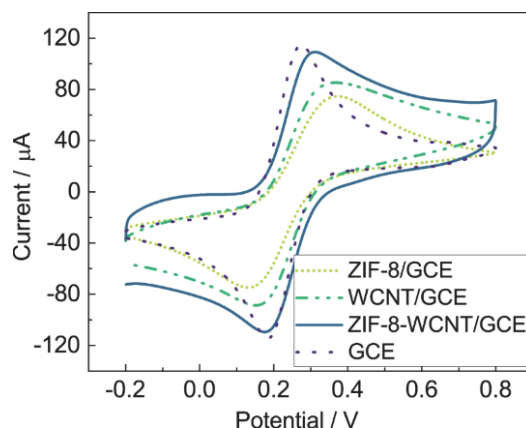


图3 不同材料传感器的电化学性质实验

GCE、ZIF-8/GCE、WCNT/GCE和ZIF-8/WCNT/GCE在 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液的循环伏安曲线, 溶液含有 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ ABS}$ (pH 5.0)和 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$, 电位扫描范围为 $-0.2 \sim +0.8 \text{ V}$, 扫描速率为 $0.10 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$

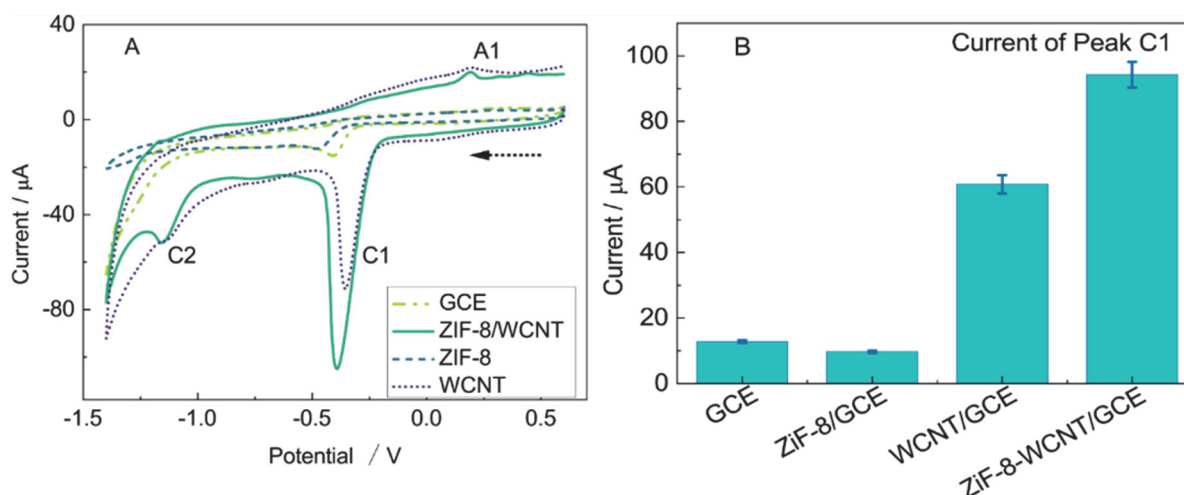


图4 传感器最佳修饰材料探究实验

(A) $1.96 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 呋喃西林在GCE、ZIF-8/GCE、WCNT/GCE 和ZIF-8/WCNT/GCE电极的循环伏安曲线, 溶液含有 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ ABS}$ (pH 5.0)和 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$, 电位扫描范围 $+0.4 \sim -1.4 \text{ V}$, 扫描速率为 $0.10 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$; (B) C1还原电流对比图

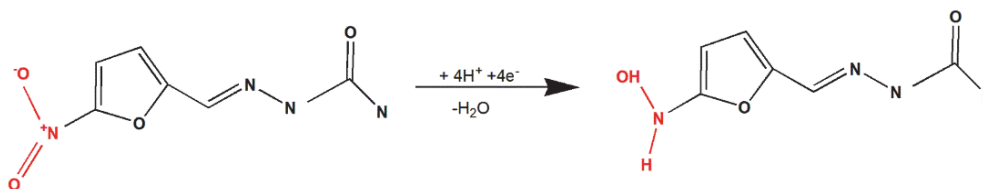


图5 呋喃西林在ZIF-8/WCNT/GCE电化学还原机理

2.3 传感器界面ZIF-8/WCNT最佳修饰量的探究

探究传感界面ZIF-8/WCNT修饰量对呋喃西林电化学行为的影响, 取不同体积 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ZIF-8/WCNT修饰于GCE上, 分别为: $1 \mu\text{L}$ 、 $3 \mu\text{L}$ 、 $5 \mu\text{L}$ 、 $7 \mu\text{L}$ 、 $10 \mu\text{L}$ 、 $15 \mu\text{L}$ 、 $20 \mu\text{L}$ 。在ABS底液中添加

入 $1.96 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 呋喃西林, 采用循环伏安技术检测, 结果如图6所示。当修饰量从 $1 \mu\text{L}$ 增加到 $5 \mu\text{L}$ 时, -0.40 V 还原峰电流不断增加。当修饰量增加到 $20 \mu\text{L}$ 时, 电流随着修饰量的增加缓慢减小, 可能是由于电极表面修饰物厚度增加阻碍了呋喃西林的扩散。因此, 选择最佳修饰量为 $5 \mu\text{L}$ 进行后续实验。

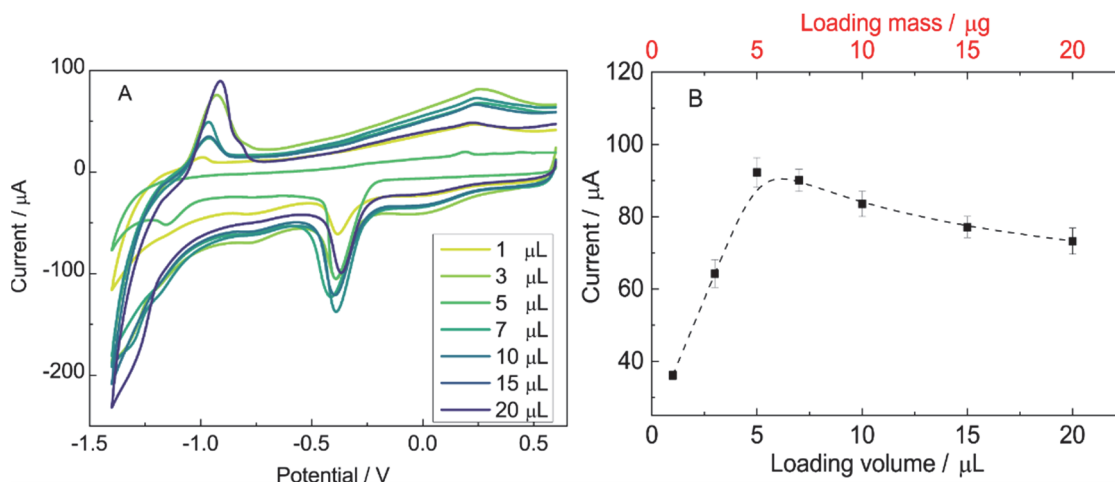


图6 ZIF-8/WCNT负载量探究实验

(A) $1.96 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 呋喃西林在不同负载量修饰的ZIF-8/WCNT/GCE电极上的循环伏安曲线, 溶液含有 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ABS (pH 5.0)和 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl, 电位扫描范围 $+0.4 - -1.4 \text{ V}$, 扫描速率为 $0.10 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$; (B) C1还原峰电流与负载量关系曲线

电子版为彩图

2.4 检测电解质最佳pH的探究

缓冲溶液的pH对检测呋喃西林的电化学信号有直接影响。本实验研究了ABS缓冲溶液pH在3.6–5.8范围内, $1.96 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 呋喃西林溶液在传感器上的电化学响应。如图7所示, 当pH在从3.6增加到5.8时, C1响应电流逐渐增大后减小, pH 5.0时峰电流最大。因此本实验缓冲溶液的最佳pH为5.0。

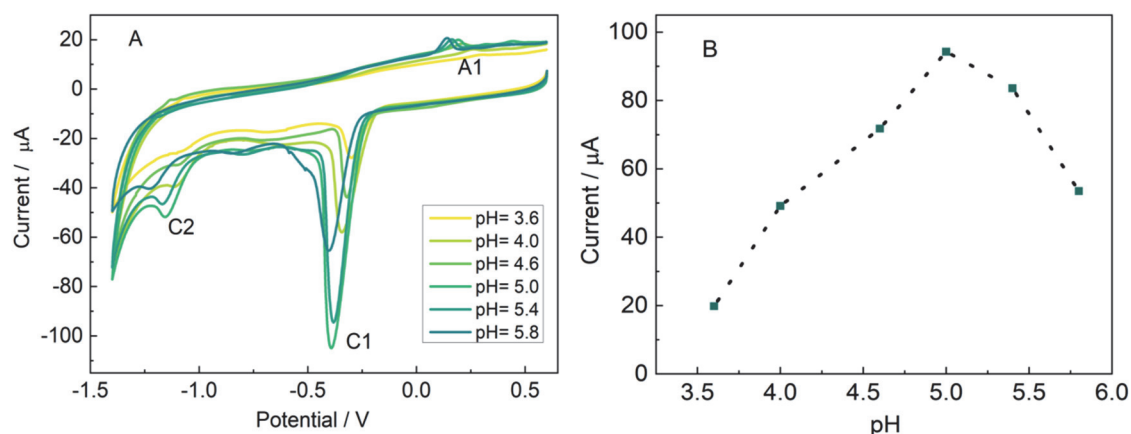


图7 最佳pH探究实验

(A) 不同pH的ABS缓冲溶液中呋喃西林在ZIF-8/WCNT/GCE电极上的循环伏安曲线, $1.96 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 呋喃西林在 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ABS (pH 5.0)和 $0.10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl, 电位扫描范围 $+0.4 - -1.4 \text{ V}$, 扫描速率为 $0.10 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$; (B) C1还原峰电流与pH关系曲线

电子版为彩图

2.5 ZIF-8/WCNT/GCE电化学传感器测定呋喃西林线性实验的探究

在上述最佳条件下，各小组制备电化学传感器，以循环伏安法对呋喃西林溶液进行检测。配制不同浓度呋喃西林，通过分析还原峰电流随浓度变化，如图8所示。峰电流随浓度增加而逐渐增加，在0.660–196 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内呈现良好的线性关系，线性回归方程为 $I_{p,c}(\mu\text{A}) = 0.420C(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}) - 0.932$ ， R^2 为0.9876，表明本实验构筑的电化学传感器具有较高的灵敏度。

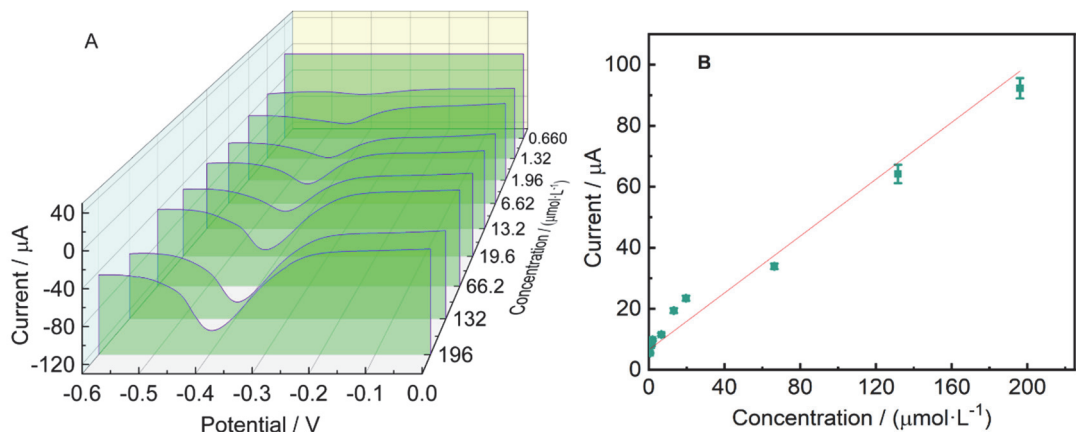


图8 检测呋喃西林的线性实验

(A) 不同浓度呋喃西林在 ZIF-8/WCNT/GCE 电化学传感器的循环伏安曲线，溶液为 0.10 mol·L⁻¹ ABS (pH 5.0)和 0.10 mol·L⁻¹ KCl，电位扫描范围 0 – -0.6 V，扫描速率为 0.10 V·s⁻¹；(B) 还原峰电流与浓度关系曲线

2.6 ZIF-8/WCNT/GCE电化学传感器测定样品中呋喃西林的探究

在上述最佳条件下，各小组制备电化学传感器，以循环伏安法对呋喃西林溶液进行检测。使用同一根ZIF-8/WCNT/GCE，按照测定方法平行测定呋喃西林溶液7次，得RSD为3.60%，说明该方法的精密度较高。根据修饰电极方法制备一批(5根)电极分别测定，所得RSD结果4.50%，说明该方法的重现性较好。将该方法用于实际样品分析以评估其应用性能，取市售的0.02 %呋喃西林溶液(相当于10.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 10.00 mL，以ABS定容50.00 mL，摇匀后作为测试液，按照前述条件进行电化学测量。另取刚配制的测试液5.00 mL，分别加入一定量呋喃西林标准溶液，以ABS定容10.00 mL，摇匀后按照前述条件进行电化学测量，进行加标回收实验。每个样品平行测定3次，取其平均值记录数据，如表3所示。

表3 ZIF-8/WCNT/GCE电化学传感器对呋喃西林溶液的检测和回收实验结果

标示值/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) ^a	测定值/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) ^b	加入量/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	测定量/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/%
10.0	10.1 (±3.20%)	10.0	9.85	98.5
		20.0	20.6	103.0

^a标示值为0.02%，换算为 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示；^b标测定值为三次测定的平均值(±RSD)

3 实验组织和运行建议

本实验涉及电化学传感器制备、电分析化学原理、材料结构表征、分析方法建立和评价、甲醇安全防范和规范处理、应用拓展等环节，建议纳入化学专业本科生的综合化学实验教学，在大二下学期或大三年级开设，总学时建议为9小时。

根据班级人数和实验室条件，以5–6人一组开展实验，每个实验室安排20–24名学生，用时3天，

每天3学时。具体实验安排如下：第一天：让学生了解实验背景，掌握实验原理和方法，学习仪器规范使用和实验中所涉及的操作。考虑到实验的安全性，根据“1.4 实验步骤”中步骤(1)由教师示范制备ZIF-8的实验操作，学生完成实验步骤(2)。第二天：测试条件优化并分析结果，小组讨论探究出最佳修饰量和pH，对应步骤(3)。第三天：线性实验和样品测定，各小组汇总实验结果，对应实验步骤(4)。整理和分析实验数据，进行总结和反思，拓展交流。本实验已在运城学院开设两个学期(材料化学本科专业基础综合实验，大三下学期)，每个班级约30人，分两大组依次进行，每大组再分3小组，每组约5人。通过近两年开设该实验教学，学生能够将课本理论内容、实验方法与实际相结合，锻炼了大学生的理论、实践能力。运行过程中存在的问题，受仪器台套数的限制，每次只能3组平行进行，每组的学生人数较多，一定程度影响实验教学的效果。

实验注意事项：

- 1) 进入实验室须佩戴完整防护设备，防止误触误碰。
- 2) 在实验过程中，要求学生规范相关操作，安全使用烘箱和电化学工作站等电器设备。
- 3) 在ZIF-8合成过程中溶剂为甲醇，必须在通风橱中进行密闭操作，严格遵守操作规程，建议佩戴耐酸碱手套和护目镜，该纳米材料由指导教师制备好，上课时给学生讲解和演示。
- 4) 废液收集存放在实验室固定容器中，交实验中心集中专业处理。
- 5) 如实记录实验现象和数据，用电化学工作站转化实验数据并借助Origin软件规范作图，进行数据的分析整合。

4 实验拓展部分

除了对学生进行实验的教学以外，还可以加入对于科研探究方面的拓展，对学生的创新思维和创新能力提升。在教学中，除了让学生学习到电化学传感方法的实验原理和操作等，对市售呋喃西林样品的准确分析表明新建立的方法可满足实际生产生活的需求，使学生了解本方法的实用性。在科研中，进一步引导学生对本实验进行复盘和总结，思考本实验中可以改进的方法和操作有哪些，如何进行改进，能否用其他方法排除杂质等干扰，从而可以更高效地检测呋喃西林？此方法能否应用到工业生产中，理论与实际进行结合方面还存在哪些待解决的问题？学生可自行设计实验方案和实验步骤，这一环节可以激发学生主观能动性，小组讨论设计方案，引导学生分析问题解决问题，不断提高学生创新能力和研究兴趣。

5 结语

本实验将ZIF-8合成和电化学传感器检测呋喃西林开发为分析化学基础实验，丰富了传感分析方法在实验教学中的应用。通过学生课堂组织、实验实践、结果分析和实验拓展，使得学生深入了解抗生素检测的意义，掌握电化学传感器制备和分析方法建立的实验过程。更重要的是，该新创实验采用问题导向型实验教学模式，可以培养学生主动思考、解决问题的能力，符合创新型实验教学要求。教学目标明确、新创实验所用试剂环境友好、实验操作安全性高，时长合理，非常适合于分析化学基础实验教学。通过该实验教学，可促进学生理论知识学习和分析化学实践之间的结合，促进化学专业人才培养质量的提高。

参 考 文 献

- [1] 耿会玲, 高锦明, 尹霞, 周文明. 大学化学, **2021**, 36 (11), 2109041.
- [2] 高洪涛, 李东祥, 孙雪梅. 大学化学, **2021**, 36 (5), 2008041.
- [3] 2013–2017年教育部高等学校化学类专业教学指导委员. 大学化学, **2017**, 32 (8), 1.
- [4] 张树永, 朱亚先. 中国大学教学, **2018**, 33 (7), 55.

-
- [5] 魏灵灵, 焦桓. 大学化学, **2020**, *35* (4), 112.
- [6] 杨雪苹, 张思贤, 赵旭芑, 沙贝. 大学化学, **2023**, *38* (8), 156.
- [7] 谢浩源, 肖伟英, 唐舒如, 邓欣, 谭竞, 吕泽成, 陈作义, 刘文婷, 许伟钦. 大学化学, **2023**, *38* (2), 227.
- [8] 姚雅娴, 徐力萍, 赵梦吃, 甘甜. 信阳师范学院学报(自然科学版), **2019**, *32* (4), 604.
- [9] 张莉, 辛晨, 赵常志. 青岛科技大学学报(自然科学版), **2019**, *40* (2), 24.
- [10] 于格格. 基于咪唑酯骨架材料(ZIF-8)及其复合物修饰电极的制备及关于研究[硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [11] Reetu, R.; Akash, D.; Boris, M.; Suman, S. *J. Electroanal. Chem.* **2022**, *909*, 116124.
- [12] 刘建华, 夏志刚, 周贤钢, 许程鑫, 吴康. 分析科学学报, **2021**, *37* (4), 541.
- [13] Charles, L. B.; Elizabeth, I. F.; Mauro, A. L. *J. Solid State Chem.* **2020**, *24*, 1969.
- [14] Cai, S.; Jiao, T.; Wang, L.; Wang, F.; Chen, Q. *Food Chem.* **2022**, *378*, 132084.
- [15] Squella, J. A.; Bollo, S.; Nunez-Vergara, L. *J. Curr. Org. Chem.* **2005**, *9*, 565.