

Electrochemical Sensor for Acetaminophen Based on Gold Nanoparticles*

Ying Pang¹, Fen Xu^{1,2#}, Lixian Sun²

¹College of Chemistry and Chemical Engineering, Liaoning Normal University, Dalian

²College of Material Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin

Email: #xufen@guet.edu.cn

Received: Sep. 4th, 2013; revised: Sep. 10th, 2013; accepted: Sep. 17th, 2013

Copyright © 2013 Ying Pang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: A kind of GNPs/GC modified electrode was prepared by electrodeposited gold nanoparticles on the surface of glassy carbon electrode based on the cyclic voltammetry. Electrochemical properties and surface morphology of the modified electrode were characterized. The electrochemical behaviors of acetaminophen (ACOP) at GNPs/GC electrode were investigated by cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectrum (EIS). The influences of different experimental conditions on the electrode performance were discussed. Under optimal conditions, a linear relationship of ACOP concentration with peak current was obtained over the concentration range of 2.0×10^{-7} - 2.0×10^{-5} mol·L⁻¹ and 1.4×10^{-4} - 3.78×10^{-3} mol·L⁻¹, respectively. The detection limit was 3.6×10^{-8} mol·L⁻¹ (S/N = 3:1) and the recovery was 97.7% - 101.0%.

Keywords: Acetaminophen; Au Nanoparticles; Modified Electrode; Cyclic Voltammetry

基于金纳米粒子的对乙酰氨基酚传感器的研究*

庞莹¹, 徐芬^{1,2#}, 孙立贤²

¹辽宁师范大学化学化工学院, 大连

²桂林电子科技大学材料科学与工程学院, 桂林

Email: #xufen@guet.edu.cn

收稿日期: 2013年9月4日; 修回日期: 2013年9月10日; 录用日期: 2013年9月17日

摘要: 本文采用循环伏安法将金纳米粒子修饰在玻碳电极表面, 制备了 GNPs/GC 修饰电极。对修饰电极进行电化学及表面形貌的表征, 并通过循环伏安法和交流阻抗法研究了 ACOP 在 GNPs/GC 电极上的电化学行为。本文探讨了不同实验条件对电极性能的影响, 在最优条件下, ACOP 线性浓度范围分别为 2.0×10^{-7} ~ 2.0×10^{-5} mol·L⁻¹ 和 1.4×10^{-4} ~ 3.78×10^{-3} mol·L⁻¹, 其检出限为 3.6×10^{-8} mol·L⁻¹ (S/N = 3:1), 回收率为 97.7%~101.0%。

关键词: 对乙酰氨基酚; 金纳米粒子; 修饰电极; 循环伏安法

1. 引言

对乙酰氨基酚(ACOP 或 Paracetamol)是世界上广泛采用的药物之一, 作为人们长期使用的乙酰苯胺类

药物, 具有解热镇痛作用; 可用于抵抗轻度至中度疼痛。但过量的摄入对乙酰氨基酚会影响人体的消化系统、泌尿系统、血液系统、呼吸系统, 严重会抑制呼吸中枢, 并导致肝损伤^[1]。因此, 其质量检测十分重要。电化学法操作简便, 检测速度快, 具有较高灵敏度^[2]。

*本文得到国家自然科学基金项目(21173111, 51071081, 51071146, 50671098, 51071146, 21075011); 广西信息材料重点实验室重点基金(桂科能 1210908-217-Z)的资金资助, 特此感谢。

#通讯作者。

近年来,采用电化学方法测定 ACOP 的研究取得了很大进展。Mingqi Li^[3]等制备了 PANI-MWCNTs 复合材料修饰电极灵敏测定 ACOP 的含量。Fen Xu^[4]等研制了一种新型的 DA 电聚合膜用来测定 ACOP,大大提高了灵敏度。王正国^[5]等将 ACOP 在纳米金/十二烷基苯磺酸钠修饰电极上的电化学行为进行了研究。段连生^[6]等制备了碳纳米管粉末微电极(CNTPME),研究了 ACOP 在 CNTPME 上的电化学行为。Gareth P. Keeley^[7]等制备了热解碳薄膜,采用电化学法同时测定了对乙酰氨基酚和多巴胺。Chun-Xuan Xu^[8]等人采用 TiO₂-GR/PMR 修饰玻碳电极测定 ACOP,灵敏度较高。

金纳米粒子(GNPs)具有很好的电催化行为和加速电子传输的能力,利用这些特性制备的金纳米粒子修饰电极已应用于电化学分析^[9,10]。由于金纳米粒子有上述特点,本文将氯金酸溶液作为修饰电极的材料,采用循环伏安法(CV)制备了 GNPs/GC 修饰电极,并通过扫描电镜和电化学法对电极形貌和化学特性进行了表征。同时,研究了 ACOP 在该电极上的电化学行为。

2. 实验部分

2.1. 试剂与仪器

HAuCl₄·4H₂O 购自天津光复精细化工研究所;对乙酰氨基酚(ACOP)为分析纯,购自 Aladdin Chemistry Co. Ltd.,并用无水乙醇配制成 $1.0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ACOP 储备液,使用时用磷酸盐缓冲溶液稀释至所需浓度;铁氰化钾,氯化钾等其它试剂均为分析纯。用 Na₂HPO₄ 和 NaH₂PO₄ 配制成 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸盐缓冲溶液(pH = 6.2)。实验中所用水均为二次蒸馏水,所有实验均在室温下进行。

电化学实验是在 IM6e 电化学工作站(Zahner-Elektrok, Kronach, German)上进行的;所有电化学实验均采用三电极系统,修饰的玻碳电极(直径 3 mm,购于武汉高仕睿联科有限公司)为工作电极,Ag/AgCl(饱和 KCl)电极为参比电极,Pt 电极为对电极。SK3310 LHC 超声波清洗器(购于上海科导超声仪器有限公司)。交流阻抗在 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液中进行,交流电压的振幅为 5 mV,频率变化范围为 0.1~100 kHz。扫描电镜分析(SEM)在

JSM-5610LV SEM (JEOL, Japan)仪器上进行。

2.2. 实验方法

在修饰前将玻碳电极分别在 1500 目和 2000 目的金相砂纸上打磨后,依次在 1.0、0.3 μm 的氧化铝粉上打磨抛光至镜面,然后在 1:1 HNO₃ (V/V)、无水乙醇、二次蒸馏水中各超声洗涤 15 min,室温下晾干备用。采用循环伏安法将玻碳电极置于含 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HAuCl₄ 混合溶液中进行循环伏安扫描 60 圈,其扫描速度为 $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$,扫描电位范围为 -1.5~2.5 V,即得到 GNPs/GC 电极。将所制备的修饰电极在室温下,保存于 pH 6.2 PBS 缓冲溶液中备用。

将浓度为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ACOP 储备液用 pH 6.2 的磷酸盐缓冲溶液稀释至 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,移取 15 ml 至电解池中,以 GNPs/GC 电极作为工作电极,采用循环伏安法进行扫描,电位范围 -0.2~0.8 V,扫描速度为 $50 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$,得到 ACOP 再修饰电极上的循环伏安曲线;并对所得到的曲线进行分析。

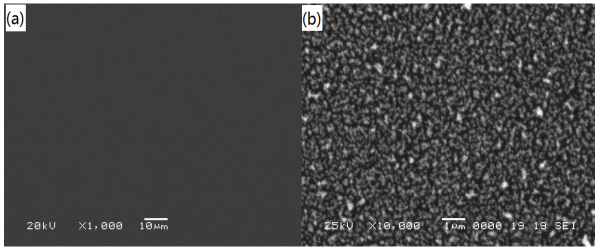
3. 结果与讨论

3.1. 修饰电极的扫描电镜分析

用扫描电子显微镜(SEM)对裸玻碳电极和 GNPs/GC 电极的表面形貌进行表征,如图 1。图 1(a)为裸玻碳电极的 SEM 图,其表面是光滑的,没有物质;而在 GNPs/GC 电极表面(见图 1(b))可看到有一层分布均匀的颗粒,这说明金纳米粒子被成功修饰在电极表面上。由于金纳米粒子均匀地分布在电极表面,因此,它增大了电极的比表面积,促进了电极表面的电子转移,起到了电催化的作用。

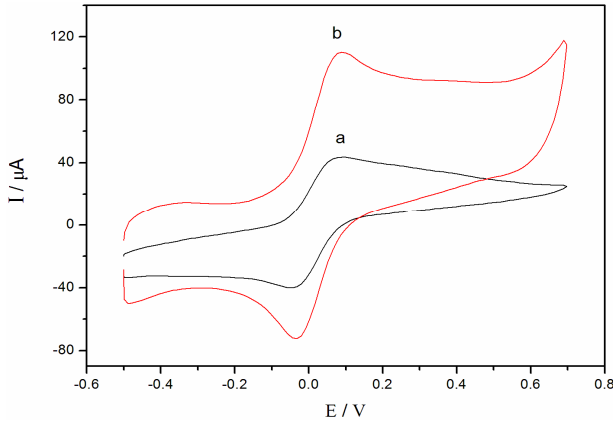
3.2. 修饰电极的电化学性质

将裸玻碳电极、GNPs/GC 电极分别在 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液中进行循环伏安扫描,扫描速度为 $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$,结果见图 2。比较两支电极的 CV 曲线,可观察到修饰了 GNPs 后的玻碳电极的 CV 曲线的氧化峰和还原峰电流均较裸玻碳电极的峰电流有所增大,且峰电位差变小,这说明金纳米粒子使电极的比表面积增大,促进了 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 电子对在电极上的电子转移,具有很好的导电性能。



(a) GC electrode; (b) GNPs/GC electrode.

Figure 1. SEM images of the modified electrodes
图 1. 不同电极的扫描电镜图



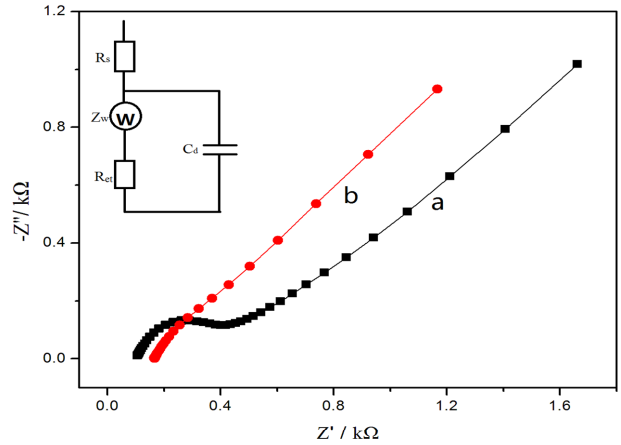
(a) GC electrode; (b) GNPs/GC electrode.

Figure 2. Cyclic voltammograms of different electrodes in $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ solutions
图 2. 不同电极在 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 中的 CV 曲线

图 3 为裸玻碳电极和 GNPs/GC 电极在 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 中的交流阻抗图谱。对交流阻抗图谱进行电路模拟(等效电路图见图 3), 其中裸玻碳电极(见图 3 中 a 曲线)的阻抗(R_{ct})约为 300Ω 。而修饰上 GNPs 后, 电极表面发生电化学反应的阻抗大大降低(见图 3 中 b 曲线), 经拟合约为 30Ω 。这进一步说明 GNPs 起到了增强电子传输的作用, 促进了 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 电子对与电极间的电子转移。

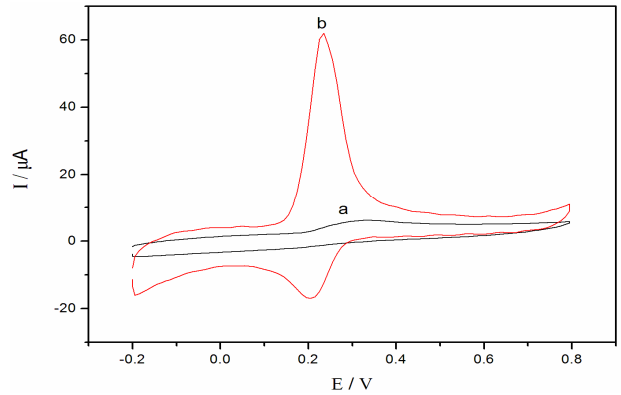
3.3. ACOP 在修饰电极上的电化学行为

图 4 为裸玻碳电极和 GNPs/GC 电极在 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ACOP}$ 溶液中的 CV 曲线, 其扫描速率为 $50 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从图中可看出, ACOP 在裸玻碳电极上只有一个氧化峰, 是典型的不可逆电极过程; 而在 GNPs/GC 电极上其 CV 曲线上出现了一对氧化还原峰, 且氧化峰电流明显提高, 约为裸玻碳电极的 10



(a) GC electrode; (b) GNPs/GC electrode.

Figure 3. Curves of EIS of different electrodes in the $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ solution
图 3. 不同电极在 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液中的交流阻抗



(a) GC electrode; (b) GNPs/GC electrode.

Figure 4. Cyclic voltammograms of different electrodes in PBS (pH 6.2) with $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ACOP}$
图 4. 不同电极在 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ACOP}$ 的 PBS (pH 6.2) 的 CV 曲线

倍以上。这表明金纳米粒子使 ACOP 电极反应变为准可逆过程, 并且对电子传递起到了良好的促进的作用。

如图 4 中 b 曲线, ACOP 的氧化峰的峰电位为 0.235 V , 与裸玻碳电极相比负移了 0.085 V , 表明 ACOP 的氧化过电位明显降低; 其还原峰电位在 0.205 V 处, 氧化峰与还原峰的电位差 ΔE_p 为 30 mV 。由文献[11]可知, 根据能斯特体系可逆性的判断依据 $[\Delta E_p = 2.303RT/(nF)]$, 即 $\Delta E_p = 59.16/n$ (测试温度为 25°C), 可得 $\Delta E_{p \text{ 理论}} = 29.58 \text{ mV}$ 。可见 ΔE_p 实验值与理论值非常接近, 这表明在玻碳电极上修饰了 GNPs 后, ACOP 在此电极上的电化学可逆性得到明显改善。

3.4. 缓冲溶液 pH 值的影响

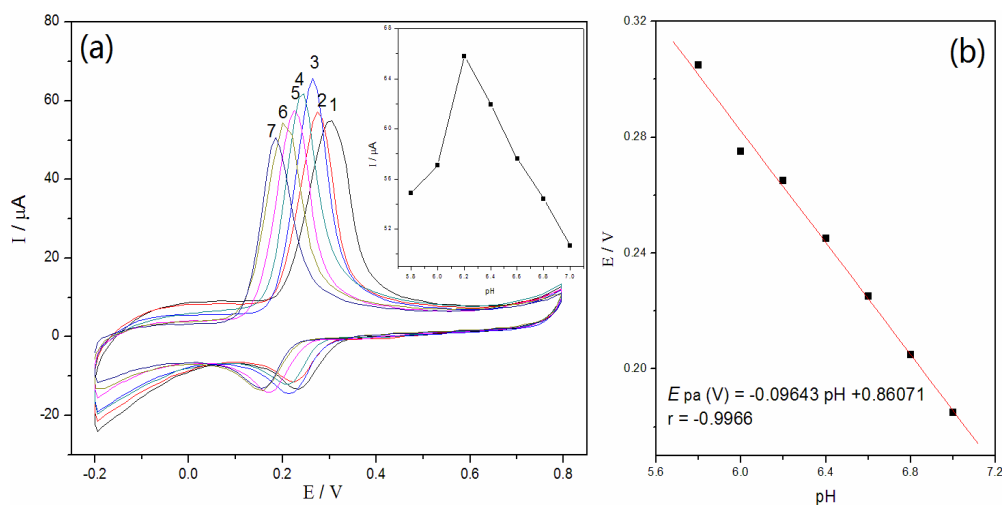
由于 ACOP 的分子结构中既有羧基、又有羟基，所以选择具有适当 pH 值的缓冲溶液对 ACOP 的氧化峰峰电流响应有很大影响，本文考察了底液 pH 值 (5.8~7.0) 对 ACOP 氧化峰电流和峰电位的影响(见图 5)。由图 5(a)可知，随 pH 值的增加，ACOP 在修饰电极上的峰电流先增大后减小，pH 值在 6.2 时峰电流达到最大。因此本实验选择 pH 为 6.2 的磷酸盐缓冲溶液。

由图 5(b)可看出，ACOP 在修饰电极上的氧化峰电位随 pH 的增加而负移，氧化峰电位随 pH 的增加呈线性变化，即 $E_{pa}(V) = -0.09643 \text{ pH} + 0.86071$ (r

$= -0.9966$)，这说明 ACOP 的反应过程有质子参与 [12]。

3.5. 修饰圈数的影响

金纳米粒子的修饰量对 ACOP 的峰电流有影响，可通过控制修饰圈数来控制修饰量。分别制备修饰圈数为 10 圈、20 圈、40 圈、60 圈、80 圈、100 圈的 GNPs/GC 电极，通过循环伏安法检测不同修饰量的 GNPs/GC 电极对 ACOP 的响应(见图 6)。实验结果表明：当扫描圈数从 10 圈增加至 60 圈，ACOP 的氧化峰电流随着圈数的增加而增大；当扫描圈数继续增大到 100 圈后，氧化峰电流随着圈数的增加有所降低。



1-7: pH 5.8, 6.0, 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 7.0.

Figure 5. Effects of solution pH on the oxidation peak current and the oxidation peak potential of ACOP
图 5. 缓冲溶液 pH 对 ACOP 氧化峰电流和峰电位的影响

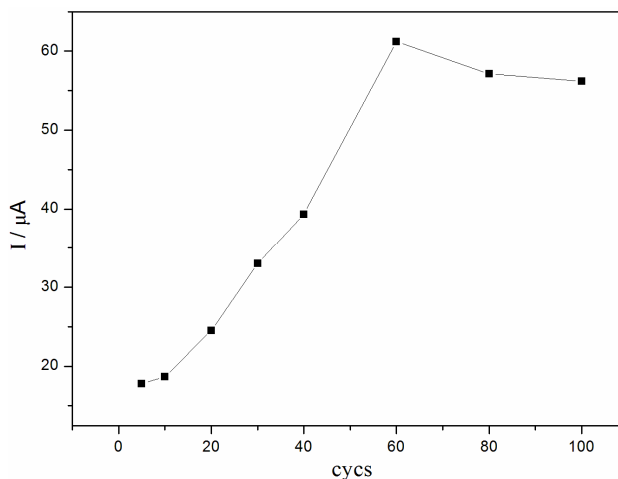


Figure 6. Effect of scan cycles on the oxidation peak current of ACOP
图 6. 不同修饰圈数对 ACOP 峰电流的影响

这由于当修饰的 GNP 超过一定量后可能发生了团聚,因而增大了电极表面的电阻,导致 ACOP 与电极之间的电子交换受阻所致。由实验结果可知,当修饰量为 60 圈时电流响应最佳,故本文选用的 GNP/GC 电极修饰圈数为 60 圈。

3.6. 扫描速率的影响

扫描速率会影响 ACOP 的电化学行为。将修饰电极置于含 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ACOP 的溶液(PBS, pH 6.2)中,测定 CV 曲线,改变扫描速度观察实验现象(见图 7(A))。结果表明,扫描速率在 20~250 mV/s 范围内,随着扫速的增加,氧化峰的峰电流逐渐增大,氧化峰电位逐渐正移。ACOP 的峰电流与扫描速率的平方根($v^{1/2}$)呈线性关系(见图 7(B)),其氧化峰电流线性回归方程为 $I_{pa}(\mu\text{A}) = -13.27951 + 10.87205v^{1/2}$ ($r = 0.99763$),还原峰电流线性回归方程为 $I_{pc}(\mu\text{A}) = 8.32017 - 3.27488v^{1/2}$ ($r = 0.9997$)。说明 ACOP 在 GNP/GC 修饰电极上的电化学反应是扩散控制过程^[13]。当扫描速率较小时,氧化峰电流较小,灵敏度较低;同时随扫描速率的增大,还原峰电位发生负移,氧化峰电位发生正移。这表明随扫描速率增大,氧化峰电流增大、灵敏度增大;但峰电位差也增大,ACOP 在该电极上的可逆性变差。因此,电化学实验选择扫描速率为 50 mV/s。

3.7. 氧化峰电流与药物浓度的线性关系及电极的重复性、重现性

在最佳条件下,ACOP 在 $2 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.4 \times 10^{-4} \sim 3.78 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,ACOP 的浓度与氧化峰电流呈良好线性关系(见图 8),其回归方程分别为 $I_{pa}(\mu\text{A}) = 1.13782c (\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}) + 1.45035$ ($r = 0.99965$)和 $I_{pa}(\mu\text{A}) = 0.0263c (\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}) + 57.1029$ ($r = 0.99952$),ACOP 的检出限为 $3.6 \times 10^{-8} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (S/N = 3:1)。实验考察了所制备的 GNP/GC 电极的重复性和重现性。用同一支 GNP/GC 修饰电极在 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ACOP 中连续测试 10 次,得到的标准偏差为 1.5%。另外,在相同条件下制备 5 支不同的 GNP/GC 修饰电极,分别在 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ACOP 中进行测量,得到的标准偏差为 2.0%,这表明该药物传感器具有良好的重复性和重现性。

3.8. 干扰试验

参考文献[14]以常见的无机离子和常用药物等共存物质对修饰电极进行了干扰测试。实验表明:对于 $2 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 的 ACOP 及测量误差在 $\pm 5\%$ 以内,500 倍的 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、甘露醇、蔗糖、 β -环糊精,200 倍的维生素 B₂、葡萄糖,100 倍的 L-谷氨酸、L-赖氨酸及 50 倍的维生素 B₁₂ 对 ACOP 测定均不产生干扰。表明该电极具有一定的抗干扰能力。

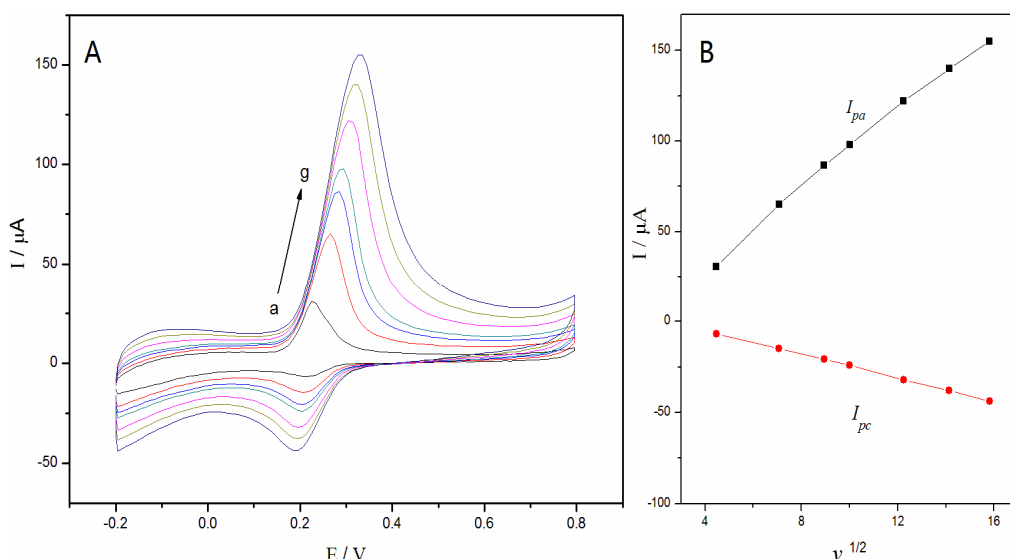


Figure 7. (A) Cyclic voltammograms of GNP/GC electrode in $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ACOP solution at various scan rates (from a to g): 20, 50, 80, 100, 150, 200, 250 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively; (B) The relationship between the peak currents and $v^{1/2}$
 图 7. (A) 不同扫速下 GNP/GC 电极在 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ACOP 溶液中的 CV 曲线; (B) 氧化峰电流和还原峰电流与 $v^{1/2}$ 的关系

3.9. 回收率实验及修饰电极的寿命

用已知浓度的ACOP原料配置三种不同浓度的样品,按照本实验方法进行操作。利用加标回收法测定ACOP的含量,结果见表1。由表1可知,其回收率为97.7%~101.0%。

本文还考察了所制备的GNPS/GC电极的储存稳定性。GNPS/GC电极不用时,储存在室温下pH 6.2的磷酸盐缓冲液中,每隔一段时间测试其在 2.0×10^{-4} mol·L⁻¹ ACOP溶液中的氧化峰电流值。结果表明:该电极连续测量20天后,其峰电流仅降低了原来的5.5%。说明该电极具有较好的储存稳定性。

4. 结论

本文采用循环伏安法将金纳米粒子修饰在玻碳电极表面,制备了GNPS/GC电极,并对其实验条件进行了优化。结果表明:当修饰圈数是60圈,扫描速率是50 mV/s,磷酸盐缓冲溶液pH = 6.2时,修饰

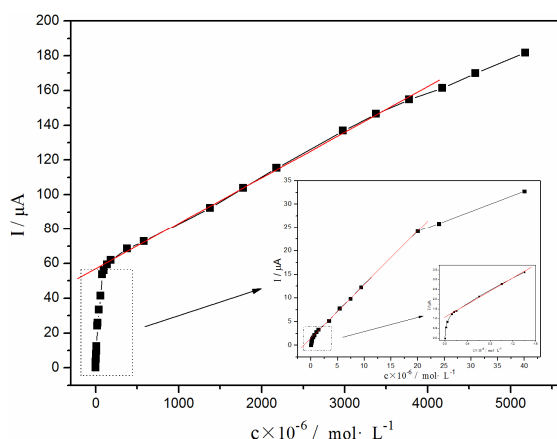


Figure 8. Calibration curves of the modified electrode for detecting ACOP

图 8. ACOP 浓度与氧化电流的关系

Table 1. Recovery test of ACOP (n* = 5)
表 1. ACOP 的回收率(n* = 5)

Samples ($\times 10^{-7}$ mol·L ⁻¹)	Added ($\times 10^{-7}$ mol·L ⁻¹)	Found ($\times 10^{-7}$ mol·L ⁻¹)	Recoveries %
2.00	4.00	5.95	98.75
2.00	6.00	8.06	101.0
20.00	35.00	55.01	100.03
20.00	50.00	69.99	99.98
200.00	200.00	395.36	97.7
200.00	1700.00	1902.63	100.15

电极对 ACOP 的催化效果最好。氧化峰峰电流随 ACOP 浓度在 $2.0 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-5}$ mol·L⁻¹ 和 $1.4 \times 10^{-4} \sim 3.78 \times 10^{-3}$ mol·L⁻¹ 范围内呈线性关系,相关系数分别为 0.99965 和 0.99952。检出限是 3.6×10^{-8} mol·L⁻¹ (S/N = 3:1)。该电极用于测定 ACOP 具有灵敏度高、重复性和重现性好,稳定性好的特点。样品回收率在 97.7%~101.0%。

5. 致谢

感谢国家自然科学基金项目(21173111、51071081、51071146、50671098、51071146、21075011),广西信息材料重点实验室重点基金(桂科能 1210908-217-Z)对本文的资金资助。

参考文献 (References)

- [1] B. D. Clayton, Y. N. Stock. Basic pharmacology for nurses. Mosby Inc., Harcourt Health Sciences Company, St. Louis, 2001.
- [2] J. C. Song, J. Yang, J. F. Zeng, J. Tan and L. Zhang. Graphite oxide film-modified electrode as an electrochemical sensor for acetaminophen. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 155 (1): 220-225.
- [3] M. Q. Li, L. H. Jing. Electrochemical behavior of acetaminophen and its detection on the PANI-MWCNTs composite modified electrode. Electrochimica Acta, 2007, 52(9): 3250-3257.
- [4] F. Xu, H. Y. Ru, L. X. Sun, Y. J. Zou, C. L. Jiao, T. Y. Wang, J. M. Zhang, Q. Zheng and H. Y. Zhou. A novel sensor based on electrochemical polymerization of diglycolic acid for determination of acetaminophen. Biosensors and Bioelectronics, 2012, 38 (1): 27-30.
- [5] 王正国, 邓勤, 郑韵英, 石海信. 对乙酰氨基酚在纳米金/十二烷基苯磺酸钠修饰电极上的电化学行为研究[J]. 化学研究与应用, 2012, 24(2): 175-180.
- [6] 段连生, 曾国平. 对乙酰氨基酚在碳纳米管粉末微电极上的电化学行为[J]. 应用化学, 2008, 25(12): 1464-1467.
- [7] G. P. Keeley, N. McEvoy, H. Nolan, S. Kumar, E. Rezvani, M. Holzinger, S. Cosnier and G. S. Duesberg. Simultaneous electrochemical determination of dopamine and paracetamol based on thin pyrolytic carbon films. Analytical Methods, 2012, 4(7): 2048-2053.
- [8] C. X. Xu, K. J. Huang, Y. Fan, Z. W. Wu and J. Li. Electrochemical determination of acetaminophen based on TiO₂-graphene/poly (methyl red) composite film modified electrode. Journal of Molecular Liquids, 2012, 165(1): 32-37.
- [9] G. M. Zeng, Z. Li, L. Tang, M. S. Wu, X. X. Lei, Y. Y. Liu, C. Liu, Y. Pang and Y. Zhang. Gold nanoparticles/water-soluble carbon nanotubes/aromatic diamine polymer composite films for highly sensitive detection of cellobiose dehydrogenase gene. Electrochimica Acta, 2011, 56(13): 4775-4782.
- [10] N. F. Atta, R. A. Ahmed, H. M. A. Amin and A. Galal. Mono-dispersed gold nanoparticles decorated carbon nanotubes as an enhanced sensing platform for nanomolar detection of tramadol. Electroanalysis, 2012, 24(11): 2135-2146.
- [11] 郑艳洁, 陈敬华, 张亚锋, 万红艳, 游勇基, 林新华. 对乙酰氨基酚在多壁碳纳米管修饰电极上的电化学行为及其测定[J]. 药物分析杂志, 2007, 27(02): 204-207.
- [12] 茹慧瑛, 徐芬, 孙立贤, 刘青山, 刘娜. 基于层层自组装技术

基于金纳米粒子的对乙酰氨基酚传感器的研究

- 的对乙酰氨基酚药物电化学传感器研究[J]. 药学学报, 2011, 46(10): 1225-1230.
- [13] D. X. Ye, Y. H. Xu, L. Q. Luo, Y. P. Ding, Y. L. Wang and X. J. Liu. LaNi_{0.5}Ti_{0.5}O₃/CoFe₂O₄-based sensor for sensitive determination of paracetamol. Journal of Solid State Electrochemistry, 2012, 16(4): 1635-1642.
- [14] 马心英, 吴义芳, 李霞. 石墨烯修饰电极的制备及其对对乙酰氨基酚的伏安测定[J]. 应用化学, 2012, 29(7): 824-829.