

## Au-Pt 双金属纳米颗粒在玻碳电极上的自组装

于志辉 田 密 焦庆影 夏定国\*

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

**摘要** 利用硼氢化钠还原  $\text{HAuCl}_4$  和  $\text{H}_2\text{PtCl}_4$  的混合溶液, 制备了 Au-Pt 双金属纳米颗粒. UV-Vis、TEM、ED、XRD、XPS 等研究结果表明双金属纳米颗粒为 Au-Pt 合金. 在玻碳电极上通过有机偶联层半胱氨酸进行了 Au-Pt 双金属纳米颗粒的自组装, 得到 Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极, 并通过 SEM 对其表面结构进行了表征, 粒子的平均粒径为 12.6 nm. 用循环伏安法对 Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极的电化学性能进行了测试. 结果表明 Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极具有良好的电催化甲醇氧化性能.

**关键词:** 双金属纳米颗粒, Au-Pt, 自组装

**中图分类号:** O646

## Self-assembling Nanobimetallic Particles of Au-Pt on Glassy Carbon Electrode

YU, Zhi-Hui TIAN, Mi JIAO, Qing-Ying XIA, Ding-Guo\*

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, P. R. China)

**Abstract** Nanobimetallic particles of Au-Pt alloy were synthesized by reducing  $\text{HAuCl}_4$  and  $\text{H}_2\text{PtCl}_4$  mixture solution with  $\text{NaBH}_4$ . UV-Vis spectra, transmission electron microscopy (TEM), and X-ray diffraction (XRD) results revealed that the alloy was single phase with face-centered cube structure. The Au-Pt/Cysteine/glassy carbon electrode was prepared by self-assembling nanobimetallic particles on glassy carbon substrate modified with cysteine and was characterized with scanning electron microscopy (SEM). The average diameter of the particles was 12.6 nm. The electrochemical performance of Au-Pt/Cysteine/glassy carbon electrode was studied by cyclic voltammetry method. The result showed that the electrode of Au-Pt/Cysteine/glassy-carbon had good electrocatalytic activity for methanol oxidation.

**Keywords:** Nanobimetallic particles, Au-Pt, Self-assemble

分子有序单层组装膜是近年来分子有序自组装化学中的研究热点. 通过对自组装分子的设计控制表面组成及结构可以实现特定功能, 如对某些分子或某些离子具有高选择性的识别功能, 进行离子检测及实现特定电催化反应, 在电化学和电分析化学领域有着巨大的应用前景. 以往的纳米粒子自组装膜的研究采用 Au 或碳做基底, 纳米粒子在带有氨基或另一巯基的硫醇修饰的电极表面组装单层

膜<sup>[1]</sup>, 组装的粒子为单金属<sup>[2-6]</sup>, 有关 Au-Pt 双金属的催化研究已有一些报道<sup>[7-8]</sup>, 但利用自组装技术制备双金属催化电极及其电化学的研究还不多见, 与单金属比较, 两种金属的协同作用表现出更好的催化活性. 本研究采用硼氢化钠法制备了纳米 Au-Pt 双金属溶胶, 以半胱氨酸为偶联层, 利用自组装技术在玻碳电极上制备了 Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极, 并对其电化学性能进行初步研究.

Received: December 15, 2005; Revised: April 27, 2006. \*Correspondent, E-mail: dgxia@bjut.edu.cn; Tel: +8610-67396158.

国家十五规划 863 项目(2002AA302404), 国家“973”计划(2002CB211807)资助

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器与药品

TU-1800 紫外可见分析仪、JEOL-2010 透射电镜、JEOL JSM 6005F 扫描电镜、MD110-2 电子天平、WYK-302 直流稳压电源、273A 恒电位仪、玻碳电极、氯金酸(>96%)、氯铂酸(>96%)、硼氢化钠(>96%)均产自上海, PVP(K-30,  $M_w=40000$ )为化学纯, 丙酮、 $H_2O_2$ (30%)、 $NH_4F$ 、 $HNO_3$ 、 $K_2Cr_2O_7$ 、L-半胱氨酸均为分析纯。

### 1.2 玻碳电极上 Au-Pt 双金属纳米颗粒的自组装

采用硼氢化钠法制备了纳米 Au、纳米 Pt 及纳米 Au-Pt 双金属溶胶<sup>[9]</sup>。玻碳电极用丙酮浸洗 30 min, 在 80 °C Piranha 溶液[98% $H_2SO_4$  与 30% $H_2O_2$  体积比为 4:1]中处理 10 min, 用二次水清洗。在 49% $Hf$  与 40% $NH_4F$  体积为 1:7 溶液中清洗 90 s 后, 用二次水清洗。在  $NH_3 \cdot H_2O$ 、 $H_2O_2$ 、 $H_2O$  体积比为 1:1:6 的溶液中 80 °C 处理 15 min, 用二次水清洗。在  $HCl$ 、 $H_2O_2$ 、 $H_2O$  体积比为 1:1:6 的溶液中 85 °C 处理 10 min, 用二次水清洗。在 10% $HNO_3$  与 2.5% $K_2Cr_2O_7$  的混合溶液中氧化 1 min。处理后的玻碳电极上滴上  $0.1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$  的半胱氨酸溶液, 使之均匀覆盖, 置于 35~50 °C 烘箱中保持 2 h, 二次水洗涤。将带有偶联层半胱氨酸的玻碳电极置于纳米 Au-Pt 双金属溶胶中, 暗处组装数小时, 即可得到 Au-Pt 双金属/半胱氨酸/玻碳电极。

### 1.3 Au-Pt 双金属纳米颗粒、自组装电极的性能测试及结构表征

制备的纳米溶胶经过紫外可见分光光度分析, 透射电镜、纳米溶胶粒度分析及 XPS 分析, 确定溶胶中纳米颗粒组成、晶体结构及粒子大小。将金属溶胶在 50 °C 下旋转蒸发成浓溶液, 再进行真空干燥得到固体粉末, 用 XRD 对粉末进行结构分析。通过扫描电镜分析, 观察组装电极的表面结构。

在  $1.0 \text{ mol} \cdot L^{-1} CH_3OH$  和  $0.5 \text{ mol} \cdot L^{-1} H_2SO_4$  溶液中, 以 Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极为工作电极, Pt 电极为对电极,  $Hg/Hg_2SO_4$  电极为参比电极, 扫描速率为  $50 \text{ mV} \cdot s^{-1}$ , 用 273A 恒电位仪进行循环伏安扫描, 测定 Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极对甲醇的催化性能。用  $Hg/Hg_2SO_4$  作参比电极, Pt 作对电极, 扫描速度为  $50 \text{ mV} \cdot s^{-1}$ , 在浓度为  $5 \text{ mmol} \cdot L^{-1} Fe(CN)_6^{4-}$  溶液体系(含  $0.1 \text{ mol} \cdot L^{-1} KCl$ )中对不同组装电极进行电化学性能测试。

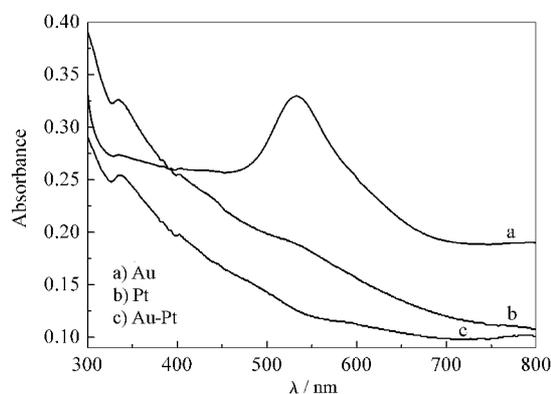


图1 Pt、Au、Au-Pt 纳米溶胶的吸收光谱图  
Fig.1 UV-Vis spectra of Pt monometallic, Au monometallic, and Au-Pt bimetallic colloids

## 2 结果与讨论

### 2.1 纳米溶胶的紫外可见吸收光谱

图1为 Au 溶胶、Pt 溶胶以及双金属溶胶的紫外可见光谱图。金属的胶体分散体系在紫外-可见波段有一个吸收带, 亦即有一个宽的吸收频段, 这一现象起因于等离子共振激发和能带之间的跃迁, 它们是粒子的金属本质的特征表现<sup>[10-12]</sup>。图1中 a 为 Au 溶胶的吸收曲线, 可以看出单金属纳米 Au 溶胶在 520 nm 处有吸收峰, b 为 Pt 溶胶的吸收曲线, 单金属纳米 Pt 溶胶在可见光区则基本没有吸收。c 为 Au-Pt 双金属溶胶的吸收曲线, 在 520 nm 处没有出现吸收峰, 说明在双金属纳米颗粒中并没有单独 Au 纳米颗粒的存在, 这与文献[10]报道的 Au-Pt 双金属的吸收光谱相一致。

### 2.2 纳米溶胶的成分、形貌和结构

图2为 Au-Pt 双金属溶胶的电子能谱, 从图中可以看出双金属粒子中含有 Pt、Au 两种成分, Pt 的含量为 12%, Au 的含量为 16%, 两种元素的含量较接近。

采用美国贝克曼库尔特公司 N4Plus 超细颗粒

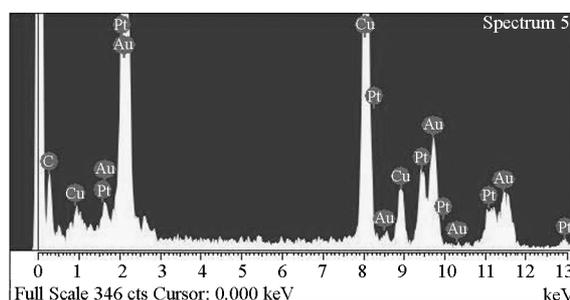


图2 Au-Pt 双金属溶胶的电子能谱  
Fig.2 EDS image of Au-Pt bimetallic colloids

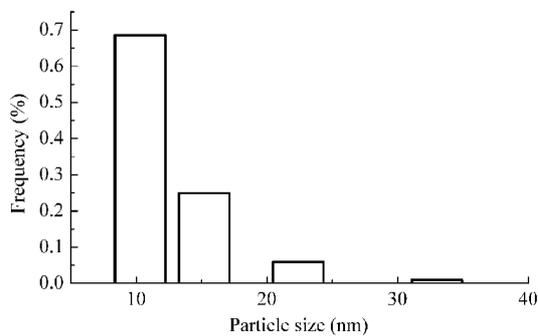


图3 Au-Pt 双金属溶胶粒径分布柱状图

Fig.3 Histogram of Au-Pt bimetallic colloids

粒度分析仪进行了的溶胶粒度分析,分析结果给出纳米粒子平均粒径为 12.6nm,其中粒径为 10.3 nm 的纳米粒子占 68.6%,图 3 为粒径分布柱状图,图 4 为 Au-Pt 双金属溶胶的 TEM 结果,可以看出纳米粒子的粒径约为 10 nm,两个分析结果基本一致.

图 5 为 Au-Pt 双金属溶胶的选区电子衍射分析

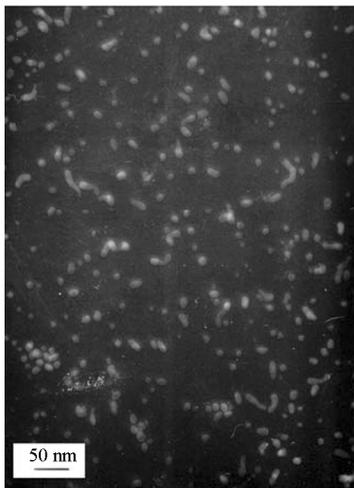


图4 Au-Pt 双金属溶胶的透射电镜图

Fig.4 TEM image of Au-Pt bimetallic colloids

结果.谱图的一系列同心的圆环说明该纳米颗粒为多晶粒子.由测定各衍射环 R 值经指标化所得的电子衍射分析数据<sup>[13]</sup>列于表 1 中.

在 Au-Pt 体系中,可能存在的有单质 Au、单质 Pt 及金属间化合物 Au<sub>3</sub>Pt.表 1 的数据结果表明,实验所得的 d 值数据与 Au 多晶电子衍射的标准值相比较,较为接近;而与 Au<sub>3</sub>Pt 多晶电子衍射的标准值和 Pt 多晶电子衍射的标准值相差较远,说明该溶胶中的纳米颗粒为 Pt 固溶于 Au 的合金,呈面心立方结构.

### 2.3 纳米溶胶的 XRD 分析

图 6 是 Pt、Au 单金属纳米颗粒以及 Au-Pt (1:1) 双金属纳米颗粒的 XRD 图谱.对照标准图谱,图 6a 中在 38.16°、44.33°、64.63°、77.58°位置出现的衍射峰分别对应 Au 的(111)、(200)、(220)、(311)晶面.在图 6c 中 39.55°、45.87°、67.25°位置出现的衍射峰分别对应 Pt 的(111)、(200)、(220)晶面. Au-Pt 双金属纳

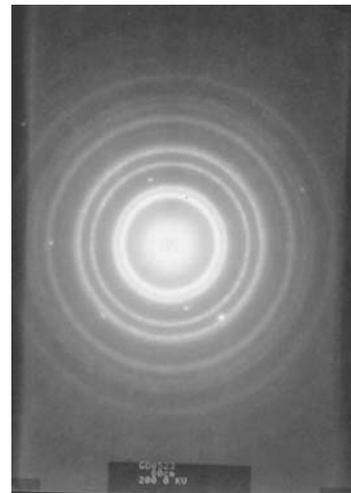


图5 Au-Pt 双金属溶胶电子衍射谱图

Fig.5 ED image of Au-Pt bimetallic colloids

表 1 Au-Pt 双金属电子衍射分析数据

Table 1 Data of ED analysis for Au-Pt bimetallic colloids

Cycle number	Exp	N	hkl	l/l <sub>0</sub>	Exp	Standard		
	R/mm				d/nm	d(Au <sub>3</sub> Pt)/nm	d(Au)/nm	d(Pt)/nm
1	8.3	3	111	90	0.2419	0.22500	0.23550	0.22650
2	9.5	4	200	90	0.2114	0.19600	0.20390	0.19616
3	13.6	8	220	60	0.1476	0.13900	0.14420	0.13873
4	16.0	11	311	60	0.1255	0.11800	0.12300	0.11826
5	16.8	12	222	40	0.1195	0.11300	0.11774	0.11325
6	21.5	19	331	50	0.0934	0.09000	0.09350	0.09000
7	24.5	20	420	40	0.0820	0.08770	0.09120	0.08073
8	25.8	24	422	30	0.0778	0.08000	0.08320	0.08008

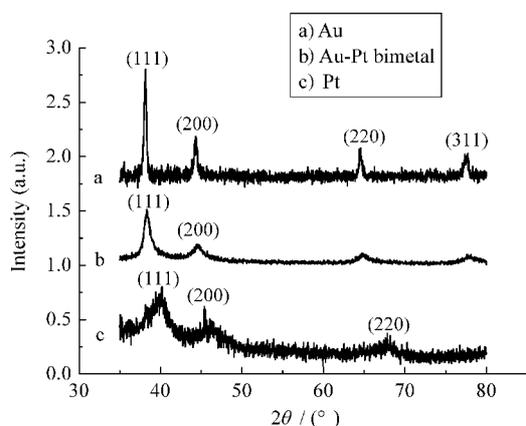


图6 Pt,Au 纳米单金属、Au-Pt(1:1)双金属纳米颗粒 XRD 图谱

Fig.6 XRD spectra of monometallic Pt, monometallic Au, and Au-Pt bimetallic nanoparticles

米颗粒的XRD 图谱中(图 6b)衍射峰出现在  $37.99^\circ$ 、 $44.166^\circ$ 、 $64.46^\circ$ 、 $77.44^\circ$ 位置,可以看出双金属纳米颗粒的衍射峰明显不同于 Pt 而与 Au 的衍射峰相近.

图 7 为 Au-Pt 双金属纳米颗粒在高角度的 XRD 图谱. 在高角度的 XRD 分析中, Au、Pt 标准衍射峰位置差别比低角度大, Au 的特征衍射峰在  $110.802^\circ$ 、 $115.264^\circ$ , 而 Pt 的特征衍射峰在  $117.716^\circ$ 、 $122.812^\circ$ ; 从图 7 可以看出, 衍射峰出现在  $110.6^\circ$ 、 $115^\circ$ , 说明 Pt-Au 双金属的衍射峰与 Au 标准衍射峰更接近. 从高角度的 XRD 图谱更好说明了 Au-Pt 双金属纳米颗粒为 Pt 固溶于 Au 的固溶体.

#### 2.4 纳米溶胶的 XPS 分析

图 8 是 Au-Pt 双金属纳米颗粒溶胶的 X 射线光电子能谱表征的图谱. 从谱图中可以看出, 在  $84.2\text{ eV}$  和  $87.9\text{ eV}$  处出现了  $\text{Au}^0$  的  $4f_{7/2}$  和  $4f_{5/2}$  两个轨道

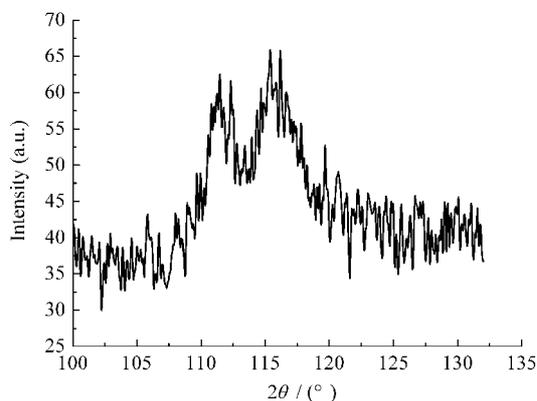


图7 Au-Pt 双金属纳米颗粒高角度 XRD 图谱

Fig.7 XRD spectra of Pt-Au(1:1) bimetallic nanoparticles

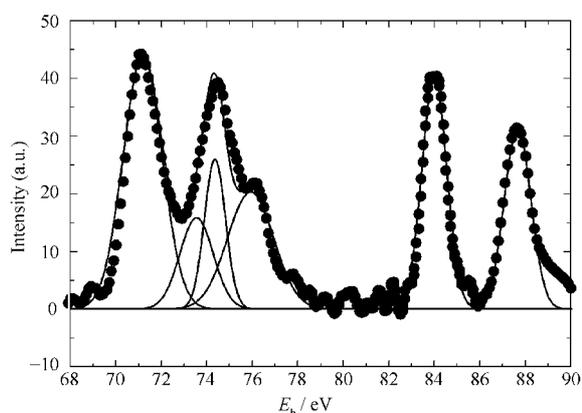


图8 Au-Pt(1:1)双金属纳米颗粒的 XPS 图谱

Fig.8 XPS of Au-Pt(1:1) bimetallic nanoparticles

的特征峰, 在  $71.4$  和  $73.6\text{ eV}$  分别有  $\text{Pt}^0$  的  $4f_{7/2}$  和  $4f_{5/2}$  两个轨道的特征峰, 说明 Au-Pt 双金属纳米颗粒中的两种金属主要是以原子的状态存在. 在  $74.8\text{ eV}$  和  $75.6\text{ eV}$  位置上有两个弱的吸收峰应为  $\text{Pt}^{4+}$  的特征峰, 说明纳米颗粒中有少量的  $\text{PtO}_2$  存在, 这是由于在制备纳米粒子的过程中, 少量  $\text{PtCl}_2$  没有被还原, 以  $\text{PtO}_2$  的形式混于纳米颗粒中. 这与其它文献关于 Pt 晶体结构分析报道一致<sup>[14-15]</sup>.

#### 2.5 组装电极在 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 体系中的电化学性能

图 9 为不同的组装玻碳电极在  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$  体系中的电极性能测试结果. 曲线 1、2、3 和 4 分别为纯玻碳电极, 在双金属浓溶液中组装后的 Au-Pt/半胱氨酸/GC 电极, 半胱氨酸/GC 电极和在双金属稀溶液中组装后的 Au-Pt/半胱氨酸/GC 电极在亚铁氰化钾和铁氰化钾混合溶液中的循环伏安曲线.

利用电话性电对亚铁氰化钾/铁氰化钾在不同电极表面具有不同的电化学响应, 通过简单的循环

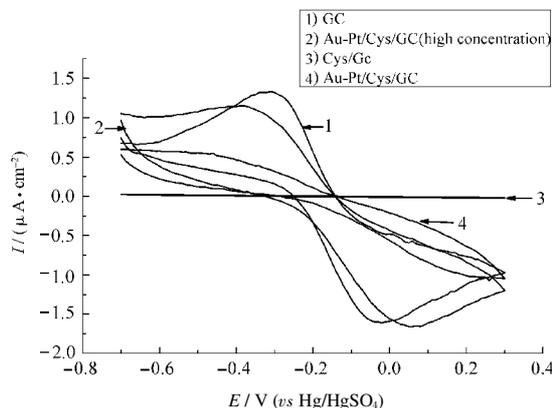


图9 组装电极在  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$  体系中的电化学性能

Fig.9 The electrochemistry performance of electrode in  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$  system

伏安方法,非常直观证明了玻碳电极表面的偶联层与纳米颗粒结合后的电化学响应.从循环伏安图中可以看出,曲线3几乎没有氧化还原峰,这说明玻碳电极上只连接偶联层时,由于偶联层几乎完全覆盖了电极表面,大大抑制了电子在电极表面的转移.当偶联层表面组装了双金属纳米颗粒后,纳米颗粒促进了亚铁氰化钾/铁氰化钾电对在电极上电子得失反应的进行,即电对的可逆性变好,表现为峰差  $\Delta E_p$  的减小和电流强度的增大;电极可逆性的恢复程度和吸附纳米颗粒的量有关,在浓溶液中组装的电极,表面纳米颗粒致密,电对的可逆性能恢复得好,峰差  $\Delta E_p$  较小、电流强度较大,如曲线2.而在稀溶液中组装的电极,表面纳米颗粒排列疏松,电对的可逆性能恢复较差,如曲线4.

## 2.6 组装电极对甲醇氧化的催化性能

图10为Pt/半胱氨酸/玻碳电极、Au/半胱氨酸/玻碳电极、Au-Pt双金属/半胱氨酸/玻碳电极、半胱氨酸/玻碳电极以及玻碳电极在  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  硫酸和  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醇混合溶液中连续扫描得到的循环伏安图.对比玻碳电极、半胱氨酸/玻碳电极在  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  硫酸和  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醇混合溶液中连续扫描得到的循环伏安结果,可以看出,玻碳电极(曲线1)、半胱氨酸/玻碳电极(曲线2)以及 Au/半胱氨酸/玻碳电极(曲线5)在  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  硫酸和  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醇混合溶液中没有甲醇催化峰,而 Pt/半胱氨酸/玻碳电极(曲线3)在正向电位扫描中,当电位低于  $0 \text{ mV}$  时,甲醇的氧化电流趋近于零;随着电位升高,甲醇的氧化电流迅速增加,在  $292 \text{ mV}$  处达到最大值  $5.8 \text{ mA}$ ,在负向电位扫描过程中,在  $60 \text{ mV}$  出现

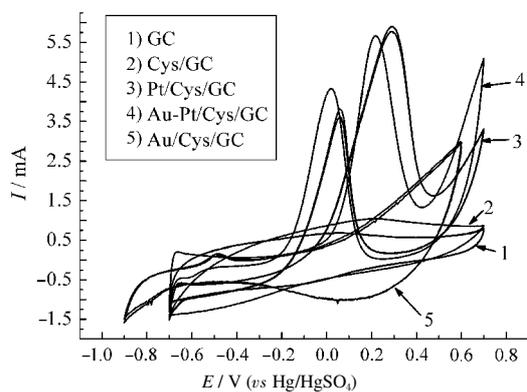


图10 自组装电极在  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$  和  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{OH}$  中的循环伏安图

Fig.10 CVs of the self-assembled electrodes in  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$  and  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{OH}$

甲醇的氧化电流峰,正、负向电位扫描中氧化电流峰的电位相差约  $232 \text{ mV}$ . Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极(曲线4)在正向电位扫描中,甲醇的氧化电流出现在  $216 \text{ mV}$  处达到最大值  $5.7 \text{ mA}$ ,在负向电位扫描过程中,在  $20 \text{ mV}$  出现甲醇的氧化电流峰,正、负向电位扫描中氧化电流峰的电位相差约  $196 \text{ mV}$ .说明 Pt/半胱氨酸/玻碳电极、Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极都有对甲醇的催化性能.相比之下,甲醇在 Au-Pt/半胱氨酸/玻碳电极氧化峰的峰值电位低于在 Pt/半胱氨酸/GC 电极上的峰值电位,说明甲醇在 Au-Pt/半胱氨酸/GC 电极上氧化所需能量较低, Au-Pt/半胱氨酸/GC 电极具有很好的电催化活性,且其氧化活性高于 Pt/半胱氨酸/GC 电极.与文献报道的其它铂修饰电极相比<sup>[16-18]</sup>,甲醇在 Au-Pt/半胱氨酸/GC 电极上的氧化电位负移.

图11是电位恒定在  $0.3 \text{ V}$  时, Au-Pt/半胱氨酸/GC 电极在  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$  和  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{OH}$  中的计时电流曲线,从图可以看出,放电  $600 \text{ s}$  后,电流衰减缓慢并逐渐趋于平稳,说明 Au-Pt/半胱氨酸/GC 电极具有很好的稳定性.

## 2.7 组装电极表面结构表征

图12为在双金属纳米颗粒的浓溶液中和稀溶液中组装相同时间的 Au-Pt/半胱氨酸/GC 的 SEM 图.黑色背景上的白色亮点为 Au-Pt 纳米颗粒.从图中可以看出,纳米颗粒的粒径约为  $12 \text{ nm}$ ,纳米颗粒比较均匀的分散在电极表面,在浓溶液中组装的电极表面纳米颗粒分布致密,而在稀溶液中组装的电极表面纳米颗粒分布疏松,这与电化学测试结果一致.所以,要想得到致密的组装表面,应选择较浓的

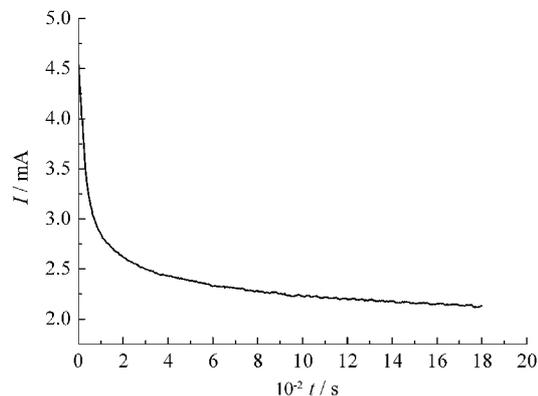


图11 Au-Pt/半胱氨酸/GC 在  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$  和  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{OH}$  混合溶液中的计时电流曲线

Fig.11 Chronoamperometry of the Au-Pt/Cys/GC electrode in  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4 + 1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{OH}$

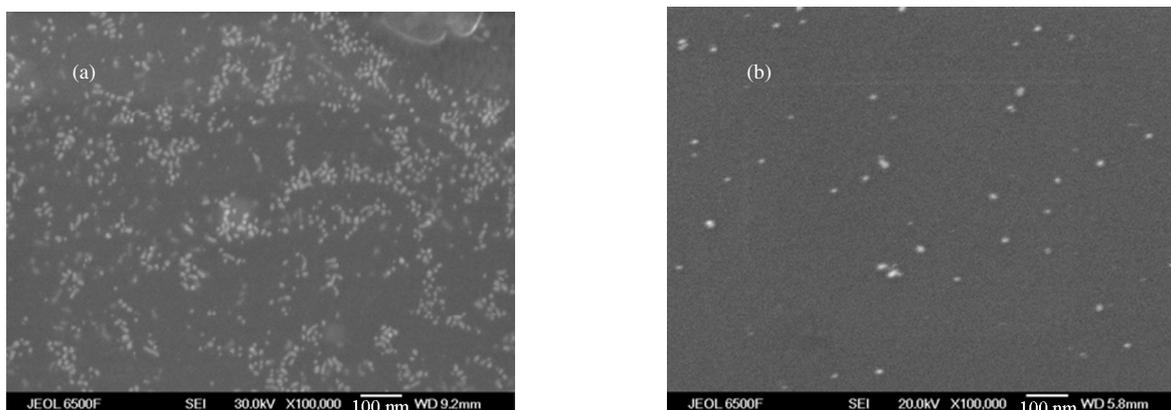


图 12 在双金属浓溶胶(a)和稀溶液(b)中组装的 Au-Pt/半胱氨酸/GC 的 SEM 图

Fig.12 SEM images of Au-Pt/Cys/glassy-carbon self-assembled in dense(a) and thin(b) colloidal sol

纳米溶胶液. 当然, 组装时间的长短, 也会影响组装表面粒子的致密程度<sup>[9]</sup>.

### 3 结论

利用硼氢化钠法可以制备出 Au-Pt 双金属合金纳米溶胶, 合金中原子比例接近 1:1, 粒子的平均粒径为 12.6 nm. 通过偶联层半胱氨酸在玻碳电极上完成 Au-Pt 双金属纳米颗粒的自组装, 所制备电极对甲醇具有良好的催化性能.

### References

- Peng, Z. Q.; Wang, E. K. *Chinese Journal of Chemistry*, **2000**, **5**: 58
- Downard, A. J. *Electroanalysis*, **2000**, **12**(14): 1085
- Toshiharu, T.; Mikio, M.; Masahiro, H. *Adv. Mater.*, **1997**, **9**(1): 65
- Zoval, J. V.; Biernacki, P. R.; Penner, R. M. *Anal. Chem.*, **1996**, **68**(9): 1585
- Finot, M. O.; Braybrook, G. D.; McDermott, M. T. *J. Elec. Chem.*, **1999**, **466**: 234
- Li, F. L.; Zhang, B. L.; Wang, E. K.; Dong, S. J. *J. Electroanal. Chem.*, **1997**, **422**: 27
- Luo, J.; Maye, M. M.; Kariuki, N. N.; Wang, L. Y.; Njoki, P.; Lin, Y.; Schadt, M.; Naslund, H. R.; Zhong, C. J. *Catalysis Today*, **2005**, **99**: 291
- Luo, J.; Njoki, P. N.; Lin, Y.; Wang, L. Y.; Zhong, C. J. *Electrochemistry Communications*, **2006**, **8**: 581
- Xu, J. Z.; Yang, P.; Hua, N. P.; Hu, C. S.; Du, Y. K. *Chemical Research and Application*, **2003**, **15**(6): 838 [徐娇珍, 杨平, 华南平, 杜玉扣. 化学研究与应用 (*Huaxue Yanjiu yu Yingyong*), **2003**, **15**(6):838]
- Supriya, D.; Parthasarathi, B.; Sampath, S. *J. Col. Inter. Sci.*, **2005**, **290**: 117
- Wokaun, A.; Gordon, J. P.; Liao, P. F. *Phys. Rev. Lett.*, **1982**, **48**: 957
- Meier, M.; Wokaun, A. *Optics Lett.*, **1983**, **8**: 581
- Zuo, Y. S.; Chen, W. Z.; Liang, W. Modern research techniques in materials. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2000:121 [左演声, 陈文哲, 梁伟. 材料现代分析方法. 北京: 北京工业大学出版社, 2000:121]
- Cho, K. C.; Hwang, K. C.; Sano, T.; Takeuchi, K.; Matsuzawa, S. *J. Photochem. Photobio, A*, **2004**, **161**: 155
- Vorontsov, A. V.; Savinov, E. N.; Jin, Z. S. *J. Photochem. Photobiol. A*, **1999**, **125**: 113
- Chen, W.; Sun, S. G.; Si, D.; Chen, S. P. *Acta Phys. -Chim. Sin.*, **2003**, **19**(5):57 [陈卫, 孙世刚, 司迪, 陈声培. 物理化学学报(*Wuli Huaxue Xuebao*), **2003**, **19**(5):57]
- Yu, W. Y.; Liu, H. F.; Liu, M.; Liu, Z. J. *Reactive & Functional Polymers*, **2000**, **44**(1):21
- Wang, A. B.; Yin, G. P.; Shi, P. F. *Carbon*, **2006**, **44**: 133
- Fu, X. Y.; Mu, T.; Wang, J.; Zhu, T.; Liu, Z. F. *Acta Phys. -Chim. Sin.*, **1998**, **14**(11):968 [符小艺, 牟涛, 王健, 朱涛, 刘忠范. 物理化学学报(*Wuli Huaxue Xuebao*), **1998**, **14**(11):968]