



# 硫酸溶液中硒铋的电化学沉积行为

姜文博<sup>1,2</sup>, 张洋<sup>2</sup>, 金伟<sup>3</sup>, 李建中<sup>1</sup>, 郑诗礼<sup>2</sup>, 张懿<sup>2</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819;

2. 中国科学院 绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190;

3. 江南大学 化学与材料工程学院 合成与生物胶体教育部重点实验室, 无锡 214122)

**摘要:** 采用电沉积从硫酸水溶液中回收硒和铋。利用线性扫描伏安法(LSV)分析对比了两者的还原行为, 并利用恒电位法进行沉积行为研究, 采用 SEM、EDS 和 XRD 对产物进行了分析。结果表明: 硒和铋共沉积行为是可逆的, 反应物扩散是反应的控制环节, 传质过程对回收过程有重要影响。当搅拌速率 700 r/min 时, 硒、铋的回收率可分别达到 84.23%、62.66%; 加入球形添加剂 2,2'-联吡啶和亚铁氰化钾, 可得到球形的硒和铋颗粒。

**关键词:** 硒; 铋; 电沉积; 传质控制; 回收; 球形颗粒

文章编号: 1004-0609(2019)-04-0821-07

中图分类号: TQ151.8

文献标志码: A

硒和铋是半导体行业中广泛应用的重要原材料。二者通常富集于经冶金处理后铜和砷的阳极泥<sup>[1]</sup>中, 传统提取方法包括萃取、吸附和离子交换等技术。近年来由于环境保护受到高度重视, 清洁高效的电化学提取方法逐渐成为研究热点。JAGMINAS 等<sup>[2]</sup>在含有铋源、TEA 和 EDTA 的水溶液中进行电沉积, 利用不同扫描速度下的峰电流的关系, 确定还原时扩散为反应主要控制环节。HAM 等<sup>[3]</sup>探究了硒铋的电沉积和溶解分离情况, 确定了产物组成与沉积电位和电解质溶液组成有极大关系。TORANE 等<sup>[4]</sup>探究了在不同硒铋摩尔比的条件, 电沉积得到硒铋产物的可能性。同时研究发现, 在硒铋沉积的电解液中添加铜<sup>[5]</sup>、镍<sup>[6]</sup>、铋<sup>[7]</sup>以及聚苯胺<sup>[8]</sup>等均可增强产物的光电效能。在硒铋共沉积的过程中, 普遍发现二者的沉淀率偏低, 且对于形貌的控制没有深入的探究。

基于目前的研究现状, 本文采用线性扫描伏安法和恒电位沉积等方法, 进行硒铋电化学沉积行为和产物形貌控制的探究。本文的实验结果可为硒铋电沉积回收的反应过程控制、回收产物的结晶化处理以及制造球形颗粒提供依据。

## 1 实验

实验所用试剂包括: 硫酸(98%), 超纯水(18

MΩ·cm), Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(分析纯), Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>(分析纯)。

电化学测试采用 CH1760E 型电化学工作站。实验采用三电极体系(见图 1), Ag|AgCl 标准电极作为参比电极, 表面包覆 IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的钛网为辅助电极, 工作电极为不锈钢。在使用工作电极前, 用沙粒为 2 μm 的砂纸抛光, 依次放入超纯水、无水乙醇和超纯水中超声处理 30 min, 控制其表面活性。工作电极采用环氧树脂将其密封于 L 型玻璃管底, 工作面积为 2 cm<sup>2</sup>。

实验开始前, 向溶液内通入氮气 10 min 排出空气。循环伏安法扫描电位范围从 -1.0 V 到 1.0 V, 扫描速率 50~200 mV/s, 电解液分别为空白电解液(25 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 含 Bi 电解液(25 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.2 g/L Bi<sup>3+</sup>), 含 Se 电解液(25 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.18 g/L SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), 含 Bi+Se 电解液(25 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.2 g/L Bi<sup>3+</sup>+0.18 g/L SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)。恒电位法分析硒铋共沉积电化学过程, 电位值 -0.2 V, 以 2,2'-联吡啶(10 mg/L)和亚铁氰化钾(20 mg/L)为添加剂, 改变搅拌速率(0~700 r/min), 反应时间 60 min, 探究球形颗粒生长的影响规律。

共沉积产物在 480 °C 焙烧 20 min, 全程氩气保护, 升温速率 5 °C/min, 自然冷却至室温。产物形貌和化学组成由热场发射扫描电镜和能谱分析仪(JSM-7001F+INCA X-MAX)表征, 用 X 射线衍射分析仪(Empyrean)进行物相分析, 采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(Optima 5300DV, USA)分析溶液中离子的浓度。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774261, 51674230)

收稿日期: 2018-01-25; 修订日期: 2018-07-28

通信作者: 李建中, 教授, 博士; 电话: 024-83686579; E-mail: lijz@mail.neu.edu.cn

郑诗礼, 研究员, 博士; 电话: 010-82544856; E-mail: slzheng@ipe.ac.cn

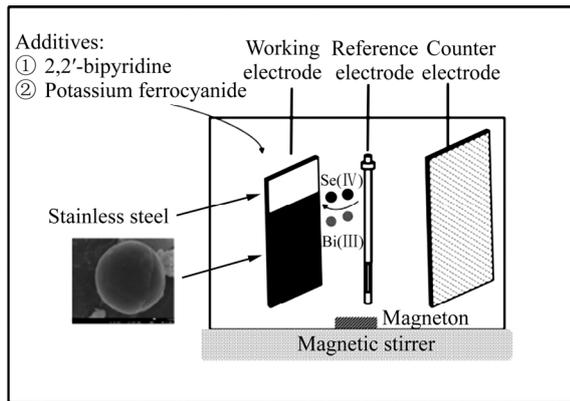


图1 实验过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental process

## 2 结果与讨论

### 2.1 电化学沉积行为分析

图2所示为不同电解液组成所对应的循环伏安曲线,其中图2(b)所示为还原部分曲线。由图2可知,空白电解液的循环伏安曲线还原峰电位为 $-0.7\text{ V}$ ,对应发生析氢反应<sup>[9]</sup>。对于含铋的电解液,铋的还原峰

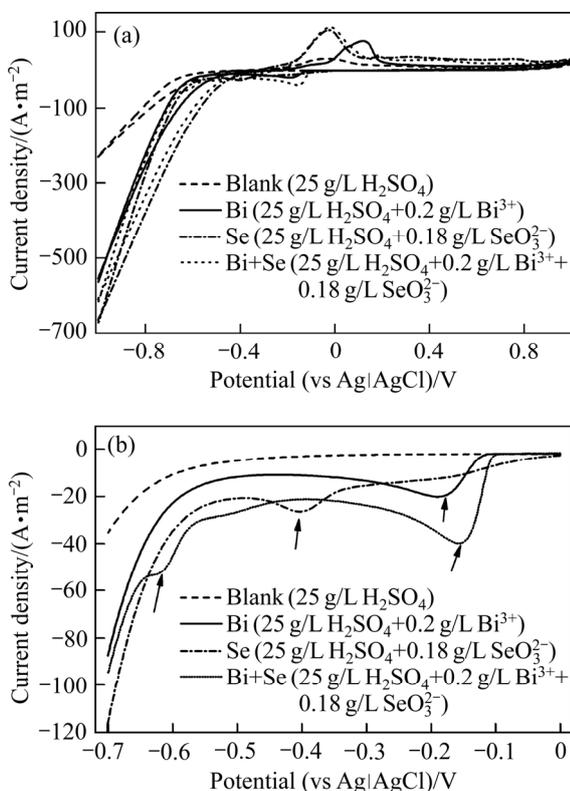
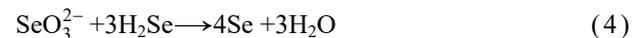
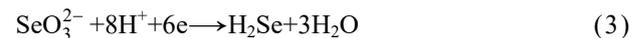
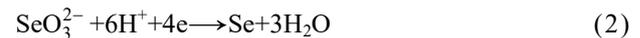
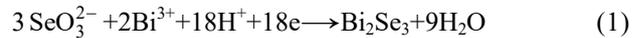


图2 不同的电解液组成所对应的线性扫描曲线

Fig. 2 Linear sweep voltammetry (LSV) curves for blank, Bi, Se and Bi+Se: (a) Complete curve; (b) Reduced fraction curve

为 $-0.18\text{ V}$ ,其对应的电流密度约为 $-20.28\text{ A/m}^2$ 。而对应的硒还原曲线,有两个还原峰,其对应的电位分别为 $-0.15\text{ V}$ 和 $-0.4\text{ V}$ ,分别表示 $\text{SeO}_3^{2-}$ 还原成单质和负二价化合物<sup>[10]</sup>。相应的反应式如式(2)和(3)。其中 $\text{SeO}_3^{2-}$ 会与反应产物 $\text{H}_2\text{Se}$ 发生归中反应(见式(4)),产生硒单质<sup>[11]</sup>。



在Bi+Se曲线中也有两个还原峰,一个在 $-0.16\text{ V}$ 处,发生硒铋共沉积反应,具体反应式见式(1);另一个峰在 $-0.62\text{ V}$ ,此时还原产物中可能会有金属铋和可溶性的硒离子出现。

图3(a)、(b)和(c)所示分别为3种电解液在不同扫描速度下的线性扫描伏安曲线。由图3可知,随着扫描速度的增加,还原峰电位均向负移动,说明无论硒、铋或是硒和铋的还原,可能都是准可逆的。其中还原峰电流与扫描速度的平方根满足以下关系式:

$$I_p = 367n^{3/2}AD^{1/2}cv^{1/2} \quad (5)$$

式中: $I_p$ 为峰值电流, A;  $D$ 为反应物的扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $A$ 为电解质与不锈钢板的实际接触面积,  $\text{m}^2$ ;  $n$ 为反应中转移的电子数;  $c$ 为电解质浓度,  $\text{mol/L}$ ;  $v$ 为扫描速度,  $\text{V/s}$ 。将图3(a)、(b)和(c)中各峰电流值与扫描速度平方根值单独列出,进行线性拟合,结果如图3(d)所示。由图3(d)可知,各线性相关系数分别为0.99113、0.99252和0.99147,数据拟合良好,从侧面说明反应控制环节应是反应物扩散。且根据计算,实验中硒和铋的扩散系数分别为 $6.26 \times 10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}$ 和 $2.12 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。二者数值较小,可以适当采取措施提高传质效率。根据动力学理论,更大的接触面积以及更高的流速均可以促进传质的进行。不同搅拌速率下的回收率列于表1,可以看到不同流速间硒和铋的回收率差别较大。

图4所示为不同搅拌速率下的产物形貌。由图4可知,无搅拌时出现不规则层状结构,且结构疏松。当速率为 $350\text{ r/min}$ 时,产物内部呈现片层状结构,外部出现类似于树枝状的结构。当速率升至 $700\text{ r/min}$ ,颗粒出现类球状的形态。对于在电极表面自然形核长大的反应物颗粒,形成片层状或许是较为理想的结构,因为颗粒逐层生长,层层覆盖是种较为简单的方式<sup>[12]</sup>。搅拌促进了传质导致形核位点增加,颗粒在位点处生长,

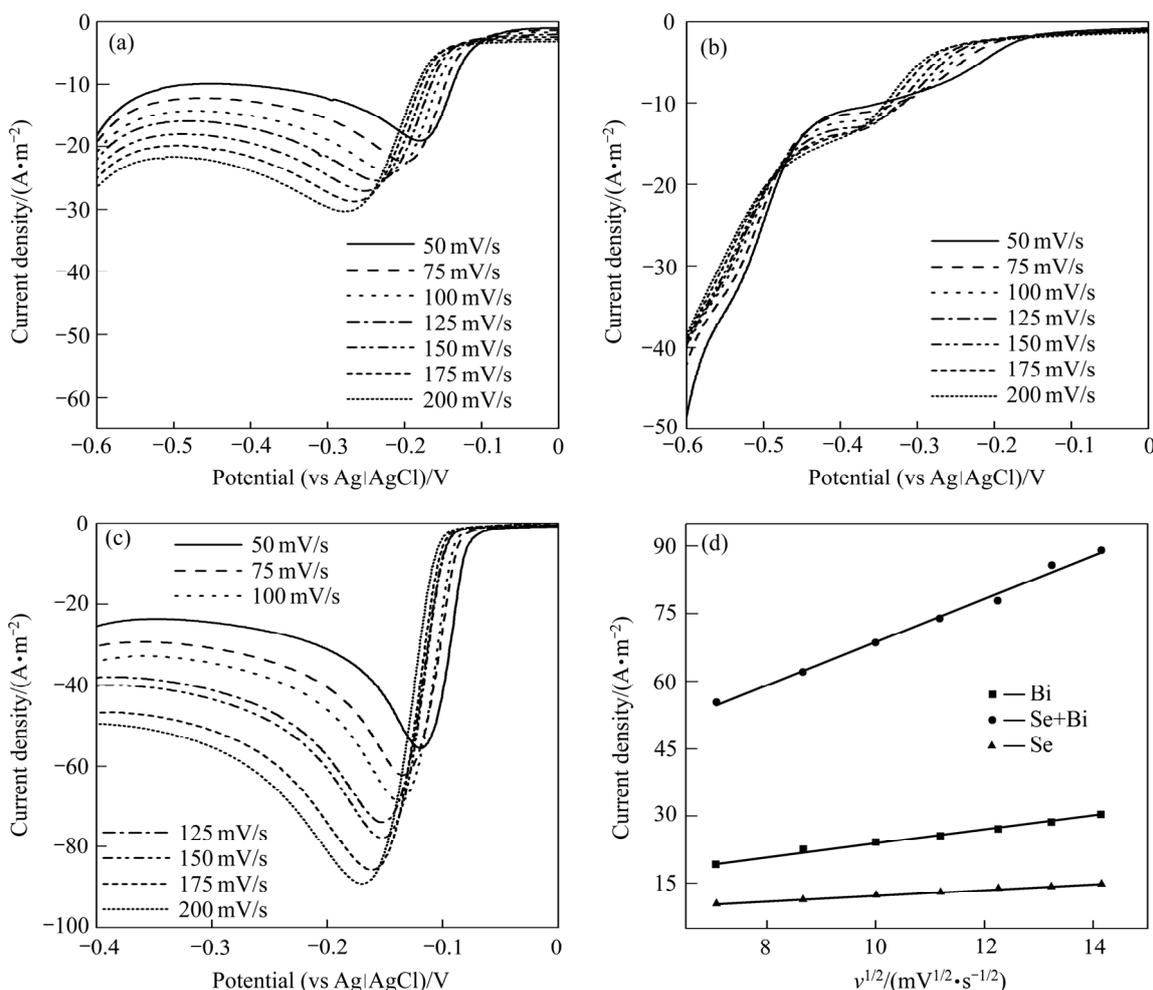


图 3 不同扫描速率(50~200 mV/s)的线性扫描伏安曲线及峰电流密度对扫描速度平方根的线性拟合

Fig. 3 CV curves at different scanning rates on stainless steel sheet: (a) Bi; (b) Se; (c) Se+Bi; (d) Linear fitting of current density to square root of scanning rate

表 1 搅拌速率对 Se 和 Bi 回收率的影响

Table 1 Stirring speed and recovery ratio

Stirring speed/ (r·min <sup>-1</sup> )	Recovery ratio/%	
	Se	Bi
0 <sup>1)</sup>	20.29	1.79
350 <sup>1)</sup>	32.67	25.40
700 <sup>1)</sup>	84.23	62.66
0 <sup>2)</sup>	11.8	15.3
350 <sup>2)</sup>	51.55	32.05
700 <sup>2)</sup>	46.81	29.95

1) Direct electrodeposition of selenium and bismuth;

2) Electrodepositio of selenium and bismuth with additives

形成不明显的结晶体。持续增加搅拌速率, 反应物粒子接触更加紧密, 颗粒持续生长, 形成类球状堆叠颗粒<sup>[13]</sup>。

## 2.2 硒和铋的共沉积行为分析

主要从传质作用和形貌控制两方面进行探究, 使用恒电位沉积法进行硒铋共沉积实验。当搅拌速率为 0~700 r/min, 时间-电流密度曲线如图 5 所示。随着搅拌速率增加, 电流密度数值逐渐增加。且经过沉积得到的产物质量也随之增加, 说明传质作用增强, 确实促进了沉积反应的进行。

沉积的直接产物中, 无明显的晶型结构, 在其衍射谱线 a(见图 6)中, 仅有一个突出的峰, 辨别不出物相。而热处理后, 可观测到 3 个基本物相: Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Se 和 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。表明沉积得到的确为硒铋共沉积产物。经过热处理后, 产物颗粒有明显聚集趋势, 平均尺寸变大(见图 4(d))。

实验表明, 电沉积直接产物结晶不完全, 在非高温条件下焙烧可以促进产物结晶化。此种条件下(无搅拌), 由于缺乏有效的传质作用, 电极表面附近和电解

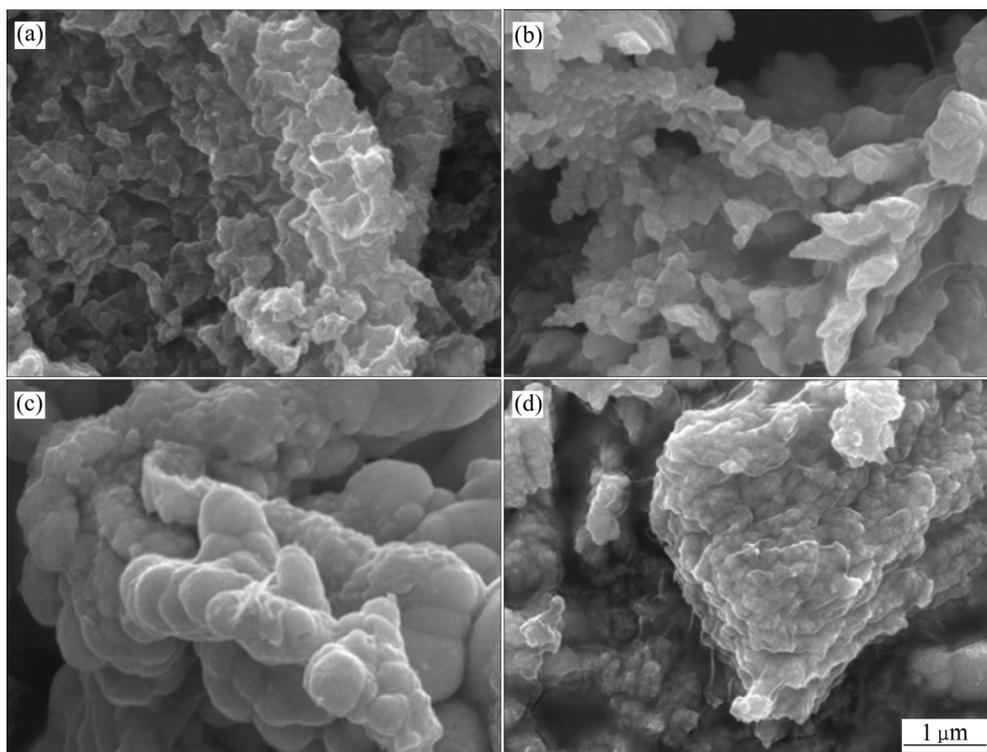


图4 不同搅拌速率下产物的SEM像

Fig. 4 SEM images of product at different stirring speeds: (a) 0 r/min; (b) 350 r/min; (c) 700 r/min; (d) SEM images of product after annealing at 0 r/min

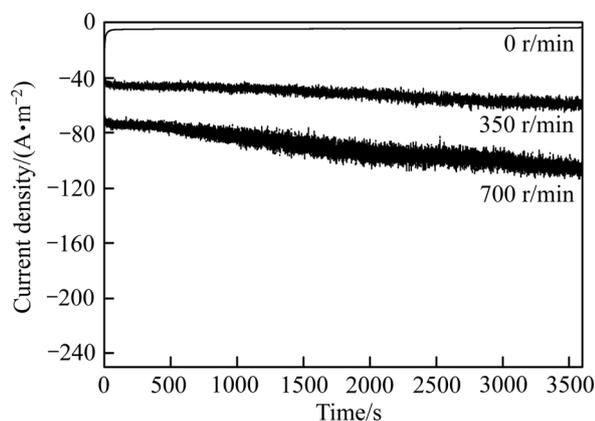


图5 不同搅拌速率(0~700 r/min)下恒电位沉积曲线

Fig. 5 Potentiostatic method with diverse stirring rates (0~700 r/min)

液中离子浓度存在巨大差距, 导致硒和铋的回收率分别为20.29%和1.79%, 电流效率约为4.3%, 电流效率( $E$ )计算式如下<sup>[14]</sup>:

$$E = \frac{96485 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{nm}{M}}{Jt} \quad (6)$$

式中:  $E$  为电流效率; 96485 为法拉第常数;  $n$  为参与

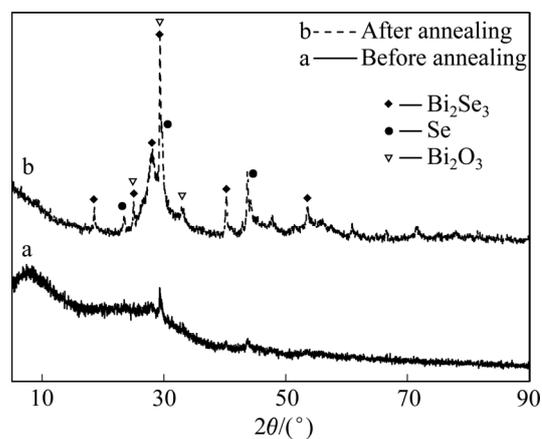


图6 热处理前后的XRD谱

Fig. 6 XRD pattern of product before and after annealing

反应的电子数量;  $m$  为产品质量;  $M$  为产物的相对分子质量;  $J$  为电流密度;  $t$  为电沉积时间。

目前回收得到的金属颗粒形状各异, 各向同性差, 本实验尝试采用加入添加剂的方法得到球形颗粒。根据之前的实验得知, 2,2'-联吡啶<sup>[15]</sup>可使物体在XYZ轴3个方向上形成, 保持大致相同的生长速率, 而亚铁氰化钾对金属阳离子具有一定的吸附作用, 阻碍相应

离子移动, 改变晶核生长方向, 颗粒呈树枝析晶状态存在, 极大地缩小了颗粒尺寸<sup>[16]</sup>。

因此, 为获得球形颗粒, 向电解液中添加 2,2'-联吡啶和亚铁氰化钾。加入添加剂的循环伏安曲线如图 7(a)所示, 还原部分如图 7(b)所示。很明显, 加入添加剂后, 硒铋的共沉积峰向负向移动, 由-0.157 V 变化到-0.164 V, 峰电流密度增大, 两种添加剂的引入可能产生协同作用, 改变了界面反应粒子浓度和扩散层厚度等相关参数, 引起电位移动, 进而改变整个反应的热力学和动力学状态。而在-0.62 V 处附近应该出现的第二个还原峰消失, 说明添加剂对于反应的过还原具有抑制作用。究其原因可能是在第一个还原峰(-0.164 V)产生的规则形貌颗粒附着在电极表面, 覆盖了其活性位点, 阻碍后续的电化学反应。

图 8 所示为加入添加剂时的恒电位-时间曲线。

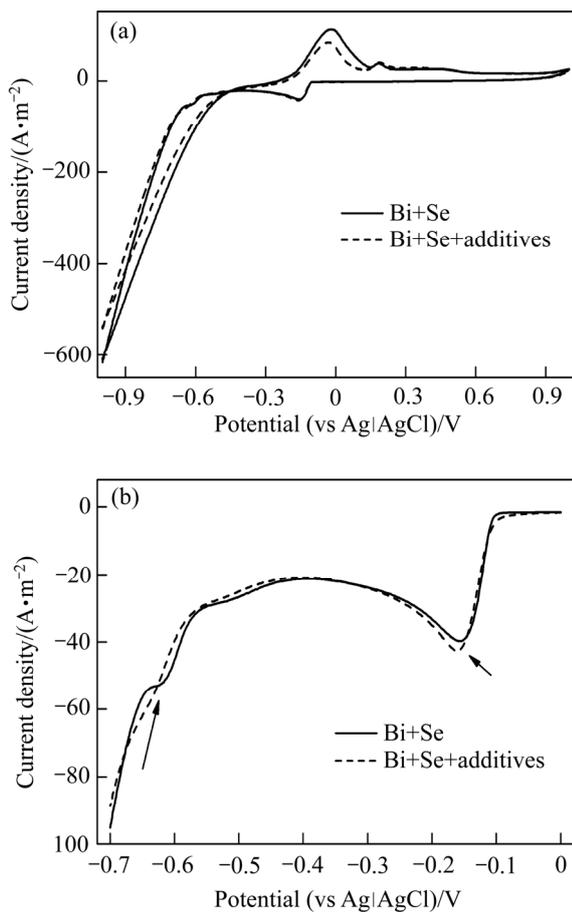


图 7 不同添加剂时线性扫描伏安曲线

Fig. 7 Linear sweep voltammetry (LSV) curves for Bi+Se+additives (25 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.2 g/L Bi<sup>3+</sup>+0.18 g/L SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+10 mg/L 2,2'-bipyridine and 20 mg/L potassium ferrocyanide) and Bi+Se(25 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.2 g/L Bi<sup>3+</sup>+0.18 g/L SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>): (a) Complete curve; (b)Reduced fraction curve

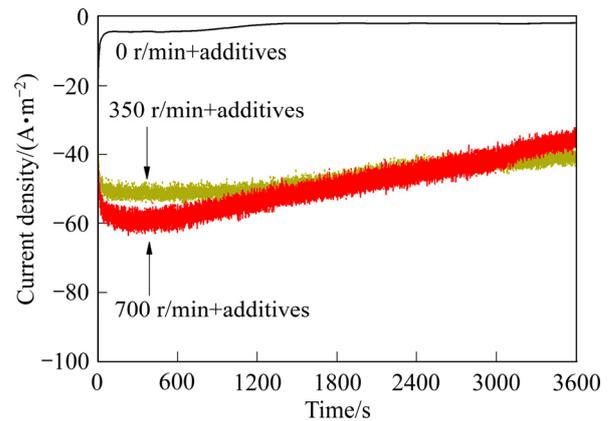


图 8 不同搅拌速率下加入了添加剂的恒电位沉积曲线

Fig. 8 Potentiostatic method for adding additives at different stirring speeds

在不同搅拌速度的条件下, 电流密度不同, 且 350 r/min 和 700 r/min 的两曲线有交叉。随着沉积反应的继续, 体系组成发生变化, 可能在某一时间段内反应控制环节发生变化。而随着传质作用的增强(见表 1), 发现硒铋的回收率逐渐上升, 但与未加添加剂相比, 回收率较小, 可能是由于添加剂在产物形成过程中控制其三维的生长速率, 导致整体生成速率略慢, 回收率降低。

图 9 所示为不同搅拌速率下加入添加剂的产物的 SEM 像。由图 9 可见, 产物呈不规则薄片状结构, 颗粒相互堆叠在一起。350 r/min 时, 可明显看到一个近似球状, 直径约为 2 μm 的颗粒。且 EDS 表明此种条件下铋和硒大致均匀分布。而 700 r/min 时, 得到的产物是球型和椭球型颗粒的聚集体, 颗粒直径范围为 0.5~3.0 μm。随着搅拌速率的增加, 颗粒逐渐成球, 不过由于传质作用过强, 导致颗粒聚集。从晶体生长的角度分析, 加入两种添加剂后, 反应进行时的过电位明显增加, 即共沉积反应的内推动力变大, 形核的活性位点数目随之上升, 同时工作电极附近的金属离子和添加剂被电子吸引, 形成沉积产物。无搅拌下反应时(0 r/min), 工作电极附近和电解液中金属离子的主要定向迁移方式为扩散, 而添加剂 2,2'-联吡啶是有机物, 电子对其吸引效果不明显, 其分布运动方式可能是随机的布朗运动, 这就导致该类添加剂未明显发挥实际作用, 进而出现图 9(a)中的颗粒形貌。对电解液进行搅拌后, 离子的主要迁移方式发生改变, 各物质均可认为一直处于均匀分布, 所以 350 r/min 时, 添加剂发挥作用, 改变产物形貌为球形; 继续增加转速, 由于匀质作用带来的可形核位点数目持续增加, 随着颗粒的长大, 颗粒间发生聚集。

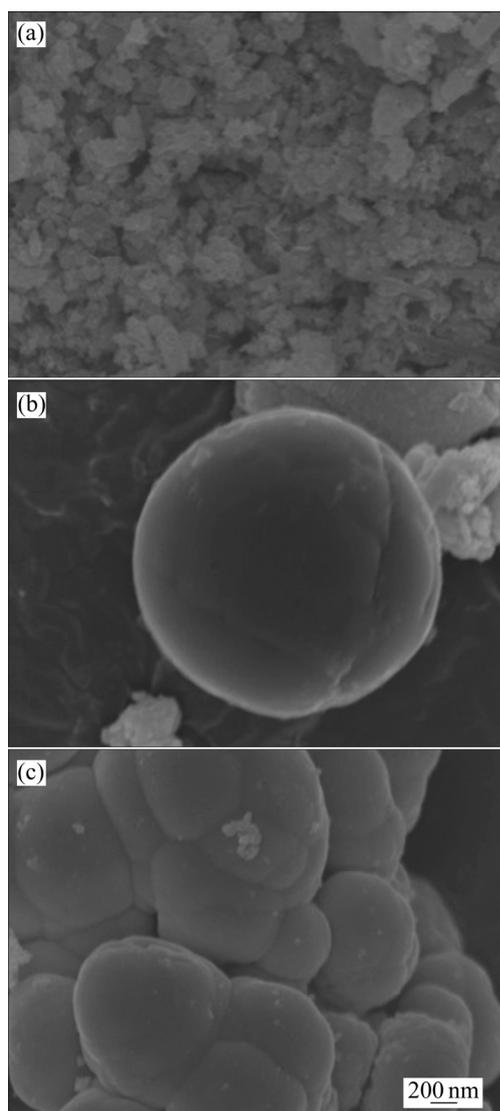


图9 不同搅拌速率下加入添加剂的产物的SEM像  
Fig. 9 SEM images of product with additives at different stirring speeds: (a) 0 r/min; (b) 350 r/min; (c) 700 r/min

### 3 结论

1) 利用线性扫描法和恒电位沉积等方法,对以硫酸为介质的电解液,进行共沉积回收硒和铋的实验探究,发现铋共沉积为准可逆反应,硒和铋的扩散系数分别为  $6.26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  和  $2.12 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,扩散为其主要控制因素;传质速率增加导致工作电极附近的活性位点增多,产物逐渐积聚,回收率也随之升高;在搅拌速率 700 r/min 条件下,硒和铋的回收率分别达到了 84.23%和 62.66%。共沉积回收直接产物为非晶形态,经热处理后,产物晶型良好。

2) 研究了在加入添加剂 2,2'-联吡啶和亚铁氰化

钾条件下得到球形颗粒的可能性,确定两种添加剂的引入可以产生协同效应,提高反应的热力学和动力学状态,在搅拌速率 350 r/min 条件下,可得到近似球形颗粒。但由于添加剂控制颗粒生长方向和速率,导致回收率略微下降。

### REFERENCES

- [1] VIKENTEVA O, VIKENTEV I. Occurrence modes of As, Sb, Te, Bi, Ag in sulfide assemblages of gold deposits of the urals[J]. IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, 2016, 123(1): 12–28.
- [2] JAGMINAS A, VALSIUNAS I, VERONESE G P, JUSKENAS R, RUTAVICIUS A. Alumina template-assisted growth of bismuth selenide nanowire arrays[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(2): 428–433.
- [3] HAM S, JEON S, PARK M, CHOI S, PAENG K J, MYUNG N, RAJESHWAR K. Electrodeposition and stripping analysis of bismuth selenide thin films using combined electrochemical quartz crystal microgravimetry and stripping voltammetry[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2010, 638(2): 195–203.
- [4] TORANE A P, LOKHANDE C D, PATIL P S, BHOSALE C H. Preparation and characterization of electrodeposited  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  thin films[J]. Materials Chemistry & Physics, 1998, 55(3): 219–222.
- [5] LI Ji-yu, JIANG Liang-xing, WANG Bo, LIU Fang-yang, YANG Jia, TANG Ding, LAI Yang-qing, LI Jie. Electrodeposition and characterization of copper bismuth selenide semiconductor thin films[J]. Electrochimica Acta, 2013, 87(167): 153–157.
- [6] KULSI C, KARGUPTA K, GANGULY S, BANERJEE D. Enhanced thermoelectric performance of n-type bismuth selenide doped with nickel[J]. Current Applied Physics, 2017, 17(12): 1609–1615.
- [7] PATIL N S, SARGAR A M, MANE S R, BHOSALE P N. Effect of Sb doping on thermoelectric properties of chemically deposited bismuth selenide films[J]. Materials Chemistry & Physics, 2009, 115(1): 47–51.
- [8] SUBRAMANIAN S, PADIYAN D P. Effect of structural, electrical and optical properties of electrodeposited bismuth selenide thin films in polyaniline aqueous medium[J]. Materials Chemistry & Physics, 2008, 107(2/3): 392–398.
- [9] MICHEL S, STEIN N, SCHNEIDER M, BOULANGER C, LECUIRE J M. Optimization of chemical and electrochemical parameters for the preparation of n-type

- $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$  thin films by electrodeposition[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2003, 33(1): 23–27.
- [10] LAI Yang-qing, LIU Fang-yang, LI Jie, ZHANG Zhi-an, LIU Ye-xiang. Nucleation and growth of selenium electrodeposition onto tin oxide electrode [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2010, 639(1): 187–192.
- [11] HERRERO E, CLIMENT V, FELIU J M. On the different adsorption behavior of bismuth, sulfur, selenium and tellurium on a Pt(775) stepped surface[J]. *Electrochemistry Communications*, 2000, 2(9): 636–640.
- [12] RAHMAN M M, SALLEH M A M, RASHID U, AHSAN A, HOSSAIN M M, RA C S. Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization—A review[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2014, 7(1): 139–155.
- [13] MOORE D T, SAI H, TAN K W, SMILQIES D M, ZHANG W, SNAITH H J, WIESNER U, ESTROFF L A. Crystallization kinetics of organic-inorganic trihalide perovskites and the role of the lead anion in crystal growth[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(6): 2350–2358.
- [14] SU Jun-ling, LIN Xiao, ZHENG Shi-li, NING Rui, LOU Wen-bo, JIN Wei. Mass transport-enhanced electrodeposition for the efficient recovery of copper and selenium from sulfuric acid solution[J]. *Separation & Purification Technology*, 2017, 182: 160–165.
- [15] CHAI Yong-zhen, CHANG Yu, SONG Rui-qin, LIU Wei, LI Yun-hui, PAN Li-hua. Synthesis and Characterization of Dimethyl 6,6'-Dimethyl-[2,2'-bipyridine]-4,4'-dicarboxylate[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2017, 34(2): 146–150.
- [16] LIU Ren-zhi, ZHANG Bing-jian, MAO Li-hui. Effect of potassium ferrocyanide on sodium chloride crystallization[J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2015, 36(6): 448–452.

## Electrochemical deposition of selenium and bismuth in sulfuric acid solution

LOU Wen-bo<sup>1,2</sup>, ZHANG Yang<sup>2</sup>, JIN Wei<sup>3</sup>, LI Jian-zhong<sup>1</sup>, ZHENG Shi-li<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Key Laboratory of Green Processes and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Synthetic and Biological Colloids, Ministry of Education, School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Electrodeposition was used to recover the valuable metals, selenium and bismuth from the sulfuric acid solution. Linear sweep voltammetry (LSV) was employed to determine the reduction behavior of selenium and bismuth, while the potentiostatic deposition was used to study the electrodeposition behavior by using SEM, EDS and XRD for product analysis. The results show that the co-deposition of selenium and bismuth is quasi-reversible reaction, in which the reactant diffusion is the rate-limiting step. The mass transportation possesses an important impact towards the recovery performance. The maximum recovery of Se and Bi reach 84.23%, 62.66%, respectively, at the stirring speed of 700 r/min. Besides, the addition of 2, 2'-bipyridine and potassium ferrocyanide can lead to the spherical particles of selenium and bismuth product.

**Key words:** selenium; bismuth; electrodeposition; mass transfer-controlled; recovery; spherical particles

**Foundation item:** Projects(51774261, 51674230) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2018-01-25; **Accepted date:** 2018-07-28

**Corresponding authors:** LI Jian-zhong; Tel: +86-24-83686579; E-mail: lijz@mail.neu.edu.cn

ZHENG Shi-li; Tel: +86-10-82544856; E-mail: slzheng@ipe.ac.cn

(编辑 龙怀中)