

# 生物冶金回收电子废弃物中贵金属 研究进展

张思敬\*, 王永平, 杨交交, 秦慧琳  
(西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**概述了生物浸出和生物吸附在电子废弃物中贵金属回收方面的研究进展,并对反应机理、等温线模型和生物吸附过程的影响因素进行了详细讨论。

**关键词:**电子废弃物;贵金属;生物冶金;回收

中图分类号:O647.32;TF18

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)08-0041-05

## Advance in biometallurgy for recovery of precious metals from electronic waste

ZHANG Si-jing\*, WANG Yong-ping, YANG Jiao-jiao, QIN Hui-lin

(School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** An overview of past achievements and present scenario of biotechnology is presented. The bioleaching of metals, the isotherm modeling, the metal binding mechanism, as well as the parameters influencing the uptake of precious metals are also discussed in detail.

**Key words:** electronic waste; precious metals; biometallurgy; recovery

据2010年联合国环境规划署发布的报告,我国每年产生超过230万t电子垃圾<sup>[1]</sup>。电子废弃物含多种元素,金含量10 g/t~10 kg/t,贵金属价值占电子废弃物总价值40%~70%<sup>[2]</sup>,因此电子废弃物的资源化回收对提高资源利用率、减轻环境污染具有积极意义。

电子废弃物中贵金属回收是一个复杂的系统工程,首先对其进行机械预处理以实现金属和非金属的分离,再通过火法冶金、湿法冶金等后处理技术对金属粗料进一步提纯。传统的火法冶金工艺易引起二次污染,湿法冶金因浸出剂,尤其是氰化物的大量使用而不断引起环境事故,这使得金属回收效率高、成本低、对环境更为友好的生物冶金技术得到了发展<sup>[3]</sup>,生物冶金技术主要包括生物浸出和生物吸附。

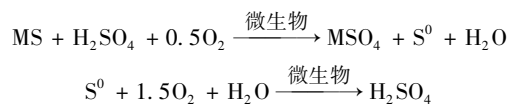
## 1 生物浸出

目前,生物浸出技术已实现工业化应用,在金、银回收方面,主要用于在贵金属矿物氰化处理前去除干扰的金属硫化物,浸出技术包括生物堆浸和搅拌釜浸出。然而,电子废弃物中贵金属生物浸出方面的研究刚刚起步,多集中在金的浸出。

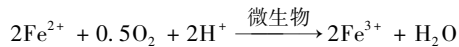
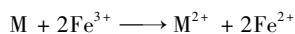
### 1.1 生物浸出机理

生物浸出是利用化能自养型微生物的催化作用,通过直接或间接的生物氧化反应,将金属从固相中溶出而进入液相的过程,用于电子废弃物中金属浸出的微生物主要有硫杆菌和氰细菌等。

硫杆菌属中的氧化亚铁硫杆菌(*T. f.*)、氧化硫硫杆菌(*T. t.*)等可用于贵金属回收前浸出Cu、Sn等贱金属。浸出机理包括直接浸出和间接浸出<sup>[4]</sup>,前者是物料中的难溶态金属被微生物的酶系统直接氧化或溶解,反应式为:



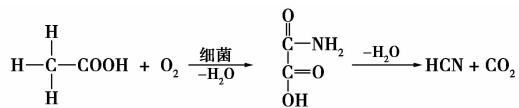
间接浸出机理以 $\text{Fe}^{3+}$ 为氧化剂氧化难溶态金属,微生物的主要作用是在自身代谢过程中将 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化成 $\text{Fe}^{3+}$ 以实现 $\text{Fe}^{3+}$ 的再生,反应如下:



项赞<sup>[5]</sup>研究了电子废弃物中金属的生物浸出机理,结果表明,硫杆菌对金属的浸出是以间接作用为主,直接作用为辅的协同浸出过程。

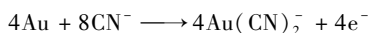
近几年,电子废弃物中贵金属的生物浸出研究

较多的是氰细菌浸出,如紫色色杆菌(*C. v*)、绿针假单胞菌(*P. c*)和巨大芽孢杆菌(*B. m*)等,主要机理为微生物代谢过程中产生的  $\text{CN}^-$  可与被氧化贵金属离子形成螯合物而溶解于水中。Li 等<sup>[6]</sup>研究表明,氰细菌(*C. v*)代谢过程中可产生  $\text{CN}^-$ , 代谢反应式为:

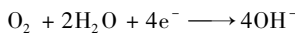


Brandl 等<sup>[7]</sup>研究了氰细菌(*C. v*)对电子废弃物碎片中金的浸出效果,初始  $\text{pH} = 7.2$ , 碎片投加量大于  $75 \text{ g/L}$ ,  $30^\circ\text{C}$ , 反应 7 d 后,培养液中产生游离  $\text{CN}^-$   $3.3 \text{ mg/L}$ ,  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$   $0.78 \text{ mg/L}$ 。Kita 等<sup>[8]</sup>研究了溶解氧对氰细菌(*C. v*)浸出电子废弃物中金的影响, $30^\circ\text{C}$ , 浸出周期 70 h,随着溶解氧浓度的提高( $0 \sim 0.25 \text{ mmol/L}$ ), 浸出液中金的浓度从  $0.04 \text{ mmol/L}$  上升到  $0.16 \text{ mmol/L}$ , 金的电位值从  $-400 \text{ mV}$  增强到  $-200 \text{ mV}$ , 浸出反应式如下。

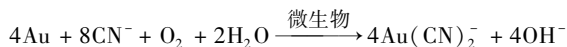
阴极:



阳极:



总反应式:



## 1.2 电子废弃物中贵金属生物浸出研究进展

近年来,许多学者开始将生物浸出技术用于电子废弃物中贵金属浸出的研究。Faramarzi 等<sup>[9]</sup>用氰细菌(*C. v*)处理含金约  $10 \text{ mg}$  的印刷电路板碎片( $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ), 金以  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  的形式被浸出,当投加量大于  $10 \text{ g/L}$ ,  $30^\circ\text{C}$ , 反应 7 h 后,体系的  $\text{pH}$  上升到 9, 金的浸出率为  $14.9\%$ , 从而证实了氰细菌浸出电路板中金的可行性。

Natarajan 等<sup>[10]</sup>对电子废弃物颗粒( $45 \sim 75 \mu\text{m}$ )用  $6 \text{ mol/L}$  的硝酸预处理以去除  $\text{Cu}$ 、 $\text{Al}$  等基本金属,用 Luria-Bertani 培养基( $\text{pH} = 9.5$ )对产氰菌(*C. v*)预培养 1 d 后,加入  $0.5\%$  ( $\text{w/v}$ ) 的电子废弃物颗粒反应 8 d, 金的浸出率为  $22.5\%$ 。

Ruan 等<sup>[11]</sup>从采矿区生长的芦苇根部分离出氰细菌(*P. c*)用于处理  $\omega_{(\text{Au})} = 0.005\%$ 、 $\omega_{(\text{Ag})} = 0.095\%$  的印刷电路板颗粒,投加量为  $16 \text{ g/L}$ ,  $\text{pH} = 7$ , 搅拌速度  $60 \text{ r/min}$ ,  $25^\circ\text{C}$  培养 3 d 后,培养液中  $\rho_{(\text{CN}^-)} = 15.52 \text{ mg/L}$ , 金和银的浸出率分别为  $8.2\%$ 、 $12.1\%$ 。Arshadi 等<sup>[12]</sup>研究了两步法浸出电脑电路板颗粒中的金,若直接用氰细菌(*B. m*)浸出, $30^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH} = 10$ , 投加量  $2 \text{ g/L}$ , 金的浸出率  $36.81\%$ 。若先用硫杆菌(*T. f*)进行预浸出,余下残渣再用氰细菌浸出,金的浸出率可上升到  $63.8\%$ 。

(上接第 40 页)

- [19] Wang P, Li D Z, Chen J, *et al.* A novel and green method to synthesize CdSe quantum dots-modified  $\text{TiO}_2$  and its enhanced visible light photocatalytic activity [J]. Applied Catalysis B; Environmental, 2014, 160/161: 217 - 226.
- [20] Liu C B, Meng D S, Li Y, *et al.* Hierarchical architectures of  $\text{ZnS-In}_2\text{S}_3$  solid solution onto  $\text{TiO}_2$  nanofibers with high visible-light photocatalytic activity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 624: 44 - 52.
- [21] 吴凤芹, 姜中生, 姚超, 等. 二氧化钛/稻壳活性炭微纳复合材料制备及光催化性能 [J]. 非金属矿, 2014, 37(5): 74 - 77.
- [22] Fattakhova-Rohlfing D, Zaleska A, Bein T. Three-dimensional titanium dioxide nanomaterials [J]. Chemical Reviews, 2014, 114(19): 9487 - 9558.
- [23] Hinkova S H, Bubnik Z, Pour V, *et al.* Degradation of food industrial pollutants by photocatalysis with Immobilized titanium dioxide [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 27: 129 - 135.
- [24] Tongon W, Chawengkijwanich C, Chiarakorn S. Multifunctional  $\text{Ag/TiO}_2/\text{MCM-41}$  nanocomposite film applied for indoor air treatment

[J]. Building and Environment, 2014, 82: 481 - 489.

- [25] Todorova N, Giannakopoulou T, Karapati S, *et al.* Composite  $\text{TiO}_2/\text{clays}$  materials for photocatalytic  $\text{NO}_x$  oxidation [J]. Applied Surface Science, 2014, 319: 113 - 120.
- [26] Hiroshi T. 光触媒图解 [M]. 张晶, 杨健, 译. 台北: 商周出版社, 2003: 48 - 49.
- [27] Hao D, Yang Z M, Jiang C H, *et al.* Synergistic photocatalytic effect of  $\text{TiO}_2$  coatings and p-type semiconductive SiC foam supports for degradation of organic contaminant [J]. Applied Catalysis B; Environmental, 2014, 144: 196 - 202.
- [28] Ahmad R, Mohsin M, Ahmad T, *et al.* Alpha amylase assisted synthesis of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles; Structural characterization and application as antibacterial agents [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 171 - 177.
- [29] Joost U, Juganson K, Visnapuu M, *et al.* Photocatalytic antibacterial activity of nano- $\text{TiO}_2$  (anatase)-based thin films; Effects on escherichia coli cells and fatty acids [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B; Biology, 2015, 142: 178 - 185.
- [30] Bai J, Zhou B X. Titanium dioxide nanomaterials for sensor applications [J]. Chemical Reviews, 2014, 114: 10131 - 10176. ■

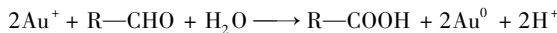
## 2 生物吸附

生物吸附是基于生物质与浸出液中金属离子通过物理、化学作用实现金属富集的过程。在贵金属回收过程中常用的生物质包括微生物(藻类、细菌、真菌等)和非活性自然物及其提取物(纤维素、壳聚糖、植物残体等)<sup>[13]</sup>。

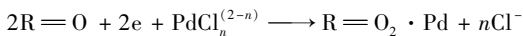
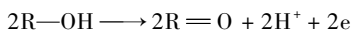
### 2.1 生物吸附机理

贵金属的生物吸附是一个非常复杂的过程,可能同时存在多种作用方式,而关键的作用方式与金属离子和吸附剂性质以及反应体系所处环境有关,其主要机理为氧化还原、离子交换、表面络合、静电吸附等。

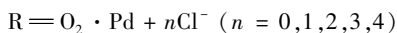
林种玉等<sup>[14]</sup>研究了巨大芽孢杆菌 D01 对贵金属离子的还原机理,FTIR 分析表明,pH = 3.5, Au<sup>3+</sup> 在细胞表面先迅速被还原为 Au<sup>+</sup>,后缓慢地被还原成 Au<sup>0</sup>,同时,细胞壁肽聚糖的醛基被氧化为羧基,反应过程如下:



Kim 等<sup>[15]</sup>研究了单宁凝胶对钯的吸附机理,XRD 分析表明,结晶 Pd<sup>0</sup> 出现在单宁凝胶表面上,证实了 Pd<sup>2+</sup> 被还原成 Pd<sup>0</sup>,反应式为:



总反应式:



傅锦坤等<sup>[16]</sup>从金、银矿区土壤中筛选出乳酸杆菌 A09 用于吸附银,室温下反应 30 min,培养液中的 pH 从 4.5 降至 3.0,TEM 分析表明,A09 表面出现了银的多晶微粒,说明 Ag<sup>+</sup> 与细胞表面的基团进行了离子交换反应而释放出 H<sup>+</sup>,使溶液的 pH 下降。Chen 等<sup>[17]</sup>研究了酿酒酵母对银的吸附过程,初始 pH = 4,SEM-EDX、TEM-EDX 和 AFM 分析表明,含 O、S、P 的基团先通过静电作用将 Ag<sup>+</sup> 吸附到细胞表面,随后 Ag<sup>+</sup> 通过离子交换作用在细胞表面沉积。

### 2.2 生物吸附模型

模型在实验室向工业化技术转换过程中发挥着重要作用,合适的模型可以帮助了解反应机理、预测吸附行为,固液体系的吸附过程探讨往往用实验数据与数学模型拟合。在贵金属生物吸附过程的研究

中,常用的模型有 Langmuir 模型、Freundlich 模型和离子交换模型等。

#### 2.2.1 Langmuir 和 Freundlich 模型

Langmuir 模型常用于描述吸附体系中金属离子吸附量与溶液中金属离子平衡浓度之间的关系,方程如下:

$$q = q_{\max} b C_{\text{eq}} / (1 + b C_{\text{eq}})$$

式中, $q$  为吸附剂的吸附容量; $C_{\text{eq}}$  为吸附后溶液中金属离子浓度; $q_{\max}$  为饱和吸附容量; $b$  为与吸附位的吸附强度有关的常数。

Freundlich 模型是基于吸附热随吸附剂表面被吸附质覆盖的面积呈对数下降的假设而建立的经验平衡模式,方程如下:

$$q = K_F C_{\text{eq}}^{1/n}$$

式中, $K_F$  和  $n$  为常数。

尽管 Freundlich 和 Langmuir 模型在贵金属生物吸附机理的探索中被广泛应用,但由于实际浸出液成分复杂,这 2 种模型并不能反映真正的吸附机理,因此,多组分吸附模型的建立必不可少。

#### 2.2.2 离子交换模型

离子交换是生物吸附金属离子的机理之一,离子交换反应为:



在理想状态下,反应平衡常数  $K_{\text{AB}}$  可表示为<sup>[18]</sup>:

$$K_{\text{AB}} = q_{\text{A}}^b C_{\text{B}}^a / C_{\text{A}}^b q_{\text{B}}^a$$

$$q_{\text{A}}/Q = 1/(1 + C_{\text{B}}/K_{\text{AB}} C_{\text{A}})$$

式中, $q_{\text{A}}$ 、 $q_{\text{B}}$  为 A、B 组分的交换容量; $C_{\text{A}}$ 、 $C_{\text{B}}$  为液相中 A、B 组分的平衡浓度; $C_0$  为溶液的总离子浓度, $Q$  为总交换容量。

上式表明, $K_{\text{AB}}$  值越大,吸附量就越大,根据其大小可以判断吸附剂对某种离子吸附选择性的强弱。

离子交换等温式通常以无量纲形式表示,对于二元离子交换体系, $Q = q_{\text{A}} + q_{\text{B}}$ , $C_0 = C_{\text{A}} + C_{\text{B}}$ ,设  $x_{\text{A}} = C_{\text{A}}/C_0$ , $x_{\text{B}} = C_{\text{B}}/C_0$ , $y_{\text{A}} = q_{\text{A}}/Q$ ,则二元体系的离子交换等温式为:

$$y_{\text{A}} = 1/(1 + x_{\text{B}}/K_{\text{AB}} x_{\text{A}})$$

利用此式,以不同的  $x_{\text{A}}$ 、 $y_{\text{A}}$  值绘出各条曲线,即离子交换平衡等温线,曲线越凸,优先吸附的选择性就越强。

### 2.3 生物吸附的影响因素

生物吸附过程受很多因素影响,制约吸附剂对金属离子吸附性能的因素主要有 pH、吸附剂用量、反应温度、搅拌速度和时间。

### 2.3.1 溶液 pH

pH 的变化会使金属离子发生水解、配合以及氧化还原反应,还会改变吸附剂表面官能团和吸附位点的状态以及溶液的氧化还原电位,从而使目标金属的化学性质发生变化<sup>[19]</sup>。

Mata 等<sup>[20]</sup>研究了 pH(2~11)对墨角藻吸附金的影响,吸附体系的初始氧化还原电位( $E_{Ag/AgCl}$ )随 pH 的升高而降低,反应 8 h 后, $E_{Ag/AgCl}$ 和 pH 均急剧下降,金的吸附容量在 pH = 7 时达最大值 0.376 mmol/g。Ting 等<sup>[21]</sup>研究了 pH(1~9)对真菌吸附  $AuCl_4^-$  的影响,吸附容量在 pH = 0.9~1.9 急剧增大,pH = 1.9~3.8 增加变缓,在 pH = 4 时达最大值 197 mg/g 后开始缓慢降低,这是由于真菌表面的 Zeta 电位在低 pH 时为正值,利于菌体对  $AuCl_4^-$  的吸附。

### 2.3.2 吸附剂用量

在吸附过程中,吸附剂的投加量适当增大可使吸附活性位点增多,进而提高吸附容量。Ma 等<sup>[22]</sup>研究了月桂丹宁胶原纤维膜对  $Pt^{4+}$  和  $Pd^{2+}$  的吸附行为,当吸附剂用量从 1 g/L 增加至 4 g/L 时, $Pt^{4+}$  (pH = 3) 的吸附率从 68.4% 增加至 97.4%, $Pd^{2+}$  (pH = 4) 的吸附率从 44.2% 增加至 95.0%。

### 2.3.3 反应温度

温度对生物吸附过程的影响因吸附体系的不同而异,与微生物的代谢机制、吸附剂所含基团的吸附热力学及吸附热容等因素有关,温度过高或过低都不利于金属离子的传输,从而降低吸附量。因此,吸附反应多在常温(20~35℃)下进行。

### 2.3.4 搅拌速度和时间

吸附反应速率主要受外膜扩散影响,适当地搅拌可使液流边界层厚度减小,金属离子从液体中心向边界层扩散的速度增大,传质阻力降低,从而提高吸附反应速率<sup>[23]</sup>。Tasdelen 等<sup>[24]</sup>研究了 DEAE-纤维素对金的吸附性能,结果表明,30℃,pH = 4.07,反应 30 min,搅拌速度从 20 r/min 提高到 120 r/min,金的吸附率增加了 50%。同时,反应时间在 0.5~2.0 h 之间变化,搅拌速度 130 r/min,金的吸附率随之提高。

此外,物料粒径、离子强度、金属离子初始浓度等也会影响吸附过程,但影响程度相对弱一些。因此,可对上述影响因素进行综合研究寻找最佳吸附条件,最终实现稳定优良的吸附效果。

## 2.4 电子废弃物中贵金属生物吸附研究进展

目前,国内外对电子废弃物中贵金属的生物吸附研究尚处于实验室阶段,研究主要针对金、铂、钯,其他贵金属鲜有研究。

Creamer 等<sup>[25]</sup>把装有脱硫弧菌和  $H_2$  源的柱形生物反应器置于电子废料浸出液中,再从菌体中回收金和钯。结果表明,脱硫弧菌对  $Au^{3+}$  和  $Pd^0$  的吸附具有选择性,当溶液中  $\rho(Cu^{2+}) \approx 2\ 000\ mg/L$  时, $Pd^{2+}$  的吸附受到抑制,因此,可以先回收金,再通入  $H_2$  还原  $Pd^{2+}$  为  $Pd^0$ ,从而实现金和钯的有效分离。

Wang 等<sup>[26]</sup>研究了磁螺旋菌对银和铜的吸附行为,投加量 10 g/L,25℃,pH = 3,反应 1 h,对于单组分体系, $Ag^+$  和  $Cu^{2+}$  的吸附率分别为 91.26%、62.23%;对于  $Ag-Cu$  体系,当  $n(Ag^+):n(Cu^{2+}) = 1:4$  时, $Ag^+$  和  $Cu^{2+}$  吸附率分别为 99%、45%,这表明  $Cu^{2+}$  可以促进磁螺旋菌对  $Ag^+$  的吸附。

李飞<sup>[27]</sup>研究表明, $L$ -半胱氨酸交联壳聚糖对  $Au^{3+}$  和  $Pd^{2+}$  具有良好的吸附能力,室温,pH = 2 时, $Au^{3+}$ 、 $Pd^{2+}$  的初始质量浓度均为 1 mg/L,在盐酸介质中共存 100 mg/L 的  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Co^{2+}$  和  $Ni^{2+}$  杂质离子,反应 3 h 后, $Au^{3+}$  和  $Pd^{2+}$  的饱和吸附容量分别为 12.7、18.2 mg/g,杂质离子干扰较弱。

Gurung 等<sup>[28]</sup>研究了双硫脲接枝柿丹宁凝胶对手机线路板酸浸液中贵金属的吸附性能,结果表明,投加量 1.0 g/L,30℃,反应 24 h 后, $Au^{3+}$ 、 $Pd^{2+}$ 、 $Pt^{4+}$  的吸附量依次为 5.18、1.8、0.67 mmol/g,吸附过程符合 Langmuir 模型。该吸附剂循环使用 5 次后,对  $Pd^{2+}$ 、 $Pt^{4+}$  的吸附率分别为 90.2%、83.0%,在实际工业线路板酸浸液处理实验中,该吸附剂对  $Au^{3+}$ 、 $Pd^{2+}$ 、 $Pt^{4+}$  仍具有良好的吸附能力。

文献[21-29]表明,生物吸附法适用于电子废弃物的小规模处理,酸性条件有利于生物质对贵金属的生物吸附,吸附过程中生物质均处于原始态或改性态,吸附容量 0.003~40 mmol/g。然而,用于贵金属吸附的生物质种类较少,吸附机理研究仍不成熟。因此,充分发挥生物质原料丰富的优势,开拓吸附剂种类,探索贵金属的生物吸附机理对其工业化实践具有重要作用。

## 3 结语

生物冶金技术是未来环保处理电子废弃物的一个很有前景的方向。目前,对贵金属的浸出和吸附

性能研究较多,相关机理研究相对较少,且研究对象单一。因此,开展多组分吸附体系研究,探索贵金属与生物质所含基团的结合与解离机理是今后研究的重点。同时,通过原子、分子水平分析技术研究贵金属在微生物表面及内部的结合部位和形态结构,特别是将微观机理与宏观模型结合起来探讨贵金属离子的吸附行为是今后的主要研究方向之一。

此外,建立合理规范的电子废弃物回收系统,开展生物冶金、湿法冶金和电化学技术等联用的集成工艺研究以促进技术创新,进而实现经济与环保的双赢亦至关重要。

### 参考文献

- [1] Steiner A. 联合国环境规划署年度报告[R]. 纽约:联合国环境规划署,2010.
- [2] Tuncuk A, Stazi V, Akcil A, *et al.* Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 25(1): 28-37.
- [3] Ilyas S, Anwar M A, Niazi S B, *et al.* Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria[J]. *Hydrometallurgy*, 2007, 88(1/2/3/4): 180-188.
- [4] Tributsch H. Direct versus indirect bioleaching[J]. *Hydrometallurgy*, 2001, 59: 177-185.
- [5] 项赞. 废旧线路板有价金属生物回收技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [6] Li J, Liang C, Ma C. Bioleaching of gold from waste printed circuit boards by *Chromobacterium violaceum*[J/OL]. *Journal of Material Cycles Waste Management*, 2014. <http://link.springer.com/sci-hub.org/article/10.1007/s10163-014-0276-4>.
- [7] Brandl H, Lehmann S, Faramarzi M A. Biomobilization of silver, gold, and platinum from solid waste materials by HCN-forming microorganisms[J]. *Hydrometallurgy*, 2008, 94: 14-17.
- [8] Kita Y, Nishikawa H, Takemoto T. Effects of cyanide and dissolved oxygen concentration on biological Au recovery[J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, 124: 545-551.
- [9] Faramarzi M A, Stagars M, Pensini E, *et al.* Metal solubilization from metal-containing solid materials by cyanogenic *Chromobacterium violaceum*[J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, 113(1/2/3): 321-326.
- [10] Natarajan G, Ting Y. Pretreatment of e-waste and mutation of alkali-tolerant cyanogenic bacteria promote gold biorecovery[J]. *Biore-source Technology*, 2014, 152: 80-85.
- [11] Ruan J, Zhu X, Qian Y, *et al.* A new strain for recovery precious metals from waste printed circuit boards[J]. *Waste Management*, 2014, 34: 901-907.
- [12] Arshadi M, Mousavi S M. Enhancement of simultaneous gold and copper extraction from computer printed circuit boards using *Bacillus megaterium*[J]. *Biore-source Technology*, 2015, 175: 315-324.
- [13] 李晓静, 梁莎, 郭学益. 生物吸附法从电子废弃物中回收贵金属的研究进展[J]. *贵金属*, 2010, 31(3): 64-69.
- [14] 林种玉, 傅锦坤, 吴剑鸣, 等. 贵金属离子非酶法生物还原机理初探[J]. *物理化学学报*, 2001, 17(5): 477-480.
- [15] Kim Y H, Nakano Y. Adsorption mechanism of palladium by redox within condensed-tannin gel[J]. *Water Research*, 2005, 39(7): 1324-1330.
- [16] 傅锦坤, 刘月英, 古萍英, 等. 乳酸杆菌 A09 吸附还原 Ag(I) 的谱学表征[J]. *物理化学学报*, 2000, 16(9): 779-782.
- [17] Chen C, Wen D, Wang J. Cellular surface characteristics of *saccharomyces cerevisiae* before and after Ag(I) biosorption[J]. *Biore-source Technology*, 2014, 156: 380-383.
- [18] Kratochvil D, Volesky B. Advances in the biosorption of heavy metals[J]. *Trends in Biotechnology*, 1998, 16(7): 291-300.
- [19] Esposito A, Pagnanelli F, Veglio F. pH-related equilibria models for biosorption in single metal system[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(3): 307-313.
- [20] Mata Y N, Torres E, Blázquez M L, *et al.* Gold(III) biosorption and bioreduction with the brown alga *Fucus vesiculosus*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166: 612-618.
- [21] Ting Y P, Mittal A K. Effect of pH on the biosorption of gold by a fungal biosorbent[J]. *Resource and Environmental Biotechnology*, 2002, 3(4): 229-339.
- [22] Ma H W, Liao X P, Liu X, *et al.* Recovery of platinum(IV) and palladium(II) by bayberry tannin immobilized collagen fiber membrane from water solution[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 278: 373-380.
- [23] Shen J, Duvnjak Z. Adsorption kinetics of cupric and cadmium ions on corn cob particles[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40: 3446-3454.
- [24] Tasdelen C, Aktas S, Acma E, *et al.* Gold recovery from dilute gold solutions using DEAE-cellulose[J]. *Hydrometallurgy*, 2009, 96(3): 253-257.
- [25] Creamer N J, Baxter-Plant V S, Henderson J, *et al.* Palladium and gold removal and recovery from precious metal solutions and electronic scrap leachates by *desulfovibrio desulfuricans*[J]. *Biotechnology Letters*, 2006, 28(18): 1475-1484.
- [26] Wang Y, Gao H, Sun J, *et al.* Selective reinforced competitive biosorption of Ag(I) and Cu(II) on *magnetospirillum gryphiswaldense*[J]. *Desalination*, 2011, 270: 258-263.
- [27] 李飞. 合成壳聚糖衍生物分离富集 Au(III), Pd(III) 和 Pt(III)[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [28] Gurung M, Adhikari B B, Kawakita H, *et al.* Selective recovery of precious metals from acidic leach liquor of circuit boards of spent mobile phones using chemically modified persimon tannin gel[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51: 11901-11913.
- [29] Cui J, Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158: 228-256. ■