

## 技术进展

# 电子废料中的贵金属回收技术进展

林 晓<sup>1,2</sup>, 曹宏斌<sup>1</sup>, 李玉平<sup>1</sup>, 郑诗礼<sup>1</sup>, 张 懿<sup>1</sup>

(1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 电子工业的迅猛发展产生了大量电子废料, 既破坏环境又浪费金属资源。详细介绍了火法冶金、湿法冶金等传统处理电子废料的化学方法, 以及近几年发展起来的物理法和生物法, 并进一步介绍了各技术对环境的影响。同时简要介绍国外电子废料回收领域的新发展, 并对我国电子废料回收业的发展提出了建议。

**关键词:** 电子废料; 贵金属; 化学法回收; 物理法回收; 生物法回收

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2006)06-0012-05

## Advances in precious metal recovery from WEEE

LIN Xiao<sup>1,2</sup>, CAO Hong-bin<sup>1</sup>, LI Yu-ping<sup>1</sup>, ZHENG Shi-li<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>

(1. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Waste from electrical and electronic equipment (WEEE) is known as a very severe environmental problem, and also a problem of squandering metal resource. The advances in technologies for the recovery of these metal are reviewed in detail. The chemical, physical and biological methods are introduced and analyzed from the environmental sense. The development in this field in advanced countries is introduced. Finally, some advice is given for the recovery of WEEE in China.

**Key words:** WEEE; precious metals; chemical recovering method; physical recovering method; biological recovering method

电子电器是制造业中增长最快的领域之一, 电子电器设备废弃后形成大量的废料。近年来市场的扩大与技术创新进一步促使报废电子电器设备总量的增加。发达国家平均每人每年产生 14~20 kg 电子废料<sup>[1]</sup>, 全世界每年产生上亿吨电子废料。从 2003 年起, 我国每年至少有 500 万台电视机、400 万台冰箱、500 万台洗衣机报废。欧盟将电子废料分为十大类<sup>[2]</sup>: 大型家电、小型家电、IT 和通信设备、音视频设备、照明设备、电动工具及玩具、休闲及体育设备、医疗设备、监控设备、自动贩卖机。

电子废料不同于一般的市政固体垃圾, 主要由塑料、玻璃、金属等组成, 最大的特点是金属含量很高, 以一台电脑主机加显示器为例, 其玻璃、塑料和金属质量分数分别占 24.88%、22.99% 和 52.01%<sup>[3]</sup>。过去, 填埋是处理电子废料的主要方法, 爱尔兰环境署 1987 年的一份报告表明<sup>[4]</sup>, 91% 的市政垃圾是通过填埋处理, 其中电子废料对环境造成了很大的危害: 塑料板难以降解, 重金属污染环境等。随着垃圾与日俱增, 垃圾填埋场对环境的污

染日益严重, 可用的垃圾填埋场越来越少。对于我国来说, 形势更为严峻。不仅国内电子废料产生量急剧增加, 国外也大量输入, 电子废料产生量最大的美国对电子废料主要采取出口处理, 其中 80% 被运到亚洲, 其中 90% 丢弃在中国<sup>[5]</sup>。

应该看到的是, 这些废料同时也是一种宝贵的资源。据报道, 1 t 电子板卡可以分离出 129.73 kg 铜、0.4536 kg 黄金、19.96 kg 锡。而且电子废弃物中的金属纯度非常高, 比如一些金元件的纯度可达到 99.999%<sup>[6]</sup>。所以, 电子废弃物也被称为是一种“高品位的矿石”。但国内在电子电器生产过程中技术和管理落后, 回收项目窄、效率低, 二次污染比较严重, 所以有必要对目前电子废料的回收方法进行研究。

## 1 化学回收方法

化学回收作为废弃物回收的传统技术, 主要有火法冶金、湿法冶金回收方法。火法冶金是利用高温将贵金属熔融于其他金属熔炼物料或熔盐中呈合

收稿日期: 2006-02-28; 修回日期: 2006-04-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50234040)

作者简介: 林晓(1983-), 男, 硕士生; 曹宏斌(1971-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事环境生物化工研究, 通讯联系人, hbcao@home.ipe.ac.cn。

金态流出,再进一步精炼处理<sup>[7]</sup>。湿法冶金是利用王水、硝酸等物质将贵金属从电子废料中溶出或沉淀出来,再进行处理。

### 1.1 火法冶金回收

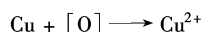
铜是电子行业应用最为广泛的金属材料,电路板主要用铜作为电子导体,根据用途和工艺的不同还含有其他金属。熔炼回收技术是目前应用最为广泛的方法,常用作含铜电子废弃物的二级处理。熔炼回收含铜电子废料的基本步骤是:将废料经拆解、粉碎等预处理后,在高温下通过把固体金属熔融为液态来分离金属铜和其他物质<sup>[3,8]</sup>,再经氧化还原处理以提高金属含量,具体步骤是:先将预处理过的物料通入铜熔炼炉,铜在高温下熔融,金、银、钯等贵金属会溶解在熔融态的铜里,而其他金属(如铅、镉、铍)会被氧化,这些金属氧化物在熔融态铜中的溶解度很小,密度也小于铜,容易形成渣相浮在表面。一部分金属在高温下形成气体进入后续的工段加以回收;渣相进入其他熔炉中进一步精炼;将溶解有贵金属的熔融铜铸成铜电极,进行电解精炼回收得到铜和贵金属。电解精炼工艺中,阳极铜溶于硫酸中,铜富集到阴极上得到99.55%以上纯度的商品铜。溶解在铜中的金、银、钯贵金属沉积为池底泥,经过熔融、选择性溶解、富集等一系列步骤得到所需的贵金属<sup>[9]</sup>。

利用电子废料中含有的塑料等高产热物质可节约能耗,显示器中的玻璃在生产纯铅的过程中还可作为助熔剂<sup>[10]</sup>,但重金属和卤素元素等物质燃烧后会产生有毒气体和金属颗粒烟雾,同时熔渣中含有水银、二噁英、呋喃等有毒物质,会产生二次污染<sup>[11]</sup>,必须严格控制尾气排放。

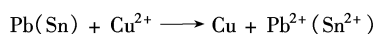
### 1.2 湿法冶金回收

#### 1.2.1 全湿法

全湿法<sup>[12]</sup>处理工艺利用原料中存在的元素,通过自身的氧化还原反应去除杂质,降低了处理成本。印刷电路板料中主体金属元素为铜,同时含有Pb、Sn等杂质元素。在一定条件下根据原料中Pb、Sn含量的不同,选择合适的氧化剂,浸出一定量的Cu:



当溶液中 $\text{Cu}^{2+}$ 达到一定量时即可自动发生如下反应:



通过控制溶液中氧化剂的加入量,使得该反应的最终结果是Pb、Sn被溶解脱落,从而使Cu与Pb、Sn元素分离。得到的Cu屑经过滤、洗涤、烘干等操

作,可得高纯度的铜。

浙江省冶金研究院提出一种电子废料的贵金属回收再生方法<sup>[13]</sup>:先将废电子元件磨成粉状,经过磁选筛分得到含贵金属的粉料;然后在装有贵金属粉料的容器中依次加入盐酸、络合剂,在加热条件下滴加双氧水后浸出至少15h,抽去上清液得到浸出液;在上述浸出液内加入铁粉,得到贵泥;最后对贵泥进行精提。

#### 1.2.2 从厚膜涂层工艺产品中回收贵金属

李世鸿等<sup>[14]</sup>通过焙烧除去有机物,用机械方法分解破碎尺寸大的电路元件。用硝酸溶解焙烧渣中的银,用盐酸沉淀出AgCl。AgCl经洗涤后用氨水溶解,过滤后用水合肼还原出海绵银,银的纯度可达99.95%以上。如果物料中含有钯,则母液还要进行钯回收处理。

Gloe<sup>[15]</sup>利用水冶工艺从电子废料特别是从厚膜涂层工艺废料中回收金、银、钯和钌。利用 $\text{HNO}_3$ 和 $\text{HCl}/\text{Cl}_2$ 的混合物将金、银、钯溶解,然后从浸出液中沉淀下来作为精矿。妨碍贵金属溶解的玻璃基材涂层用氟化物溶液浸出除去,使含钯层剥落,继而进行熔融、沉淀、溶解、阳离子交换回收。这种方法不但能够回收贵金属,同时陶瓷基材还可再用于生产。

#### 1.2.3 从镀金废件中回收金

在制造电子元件时,为了提高其表面的抗腐蚀能力和导电性能,往往要镀上一层黄金。电子工业对金元件的纯度要求高、用量大,回收提纯效益非常明显,也是目前电子废料的主要回收目标。

王同聚等<sup>[16]</sup>将镀金废件在850℃的高温炉内熔烧1h,冷却后取出,用质量分数为40%的硝酸溶液将元件镀层内部的金属溶于硝酸,洗涤杯底沉积物,得镀层黄金。将粗金提纯可得到99.99%的金粉。朱萍等<sup>[17]</sup>采用双氧水和硫酸作为反应试剂,从印刷电路板废料中回收金和铜。在适宜的硫酸浓度及用量、固液比、双氧水用量、反应时间等条件下,金的剥离率可达98.75%,铜的回收率达99.43%。所得的金可通过锌粉置换得到金泥,金泥用稀硝酸处理后得到粗金粉,硫酸铜溶液可经结晶或电解得到铜,所用试剂无毒、廉价,反应过程中无有害物质产生。

## 2 物理方法

近年来,人们对电子废弃物回收的要求不断提高,力求达到经济和环境双重效益,最大限度地回收所有金属、使用无毒试剂、尽量低的能量需求。这就需要逐渐从以前的重点回收贵金属(金、银、铂、

钡)的火法冶金等传统方法转向回收所有金属,包括低含量廉价金属如镉,以避免环境污染,缓解越来越严峻的环境问题<sup>[18]</sup>。

电子废料具有金属含量高,解离度大,粒径大小适合得到高纯度金属等特性,通过对一些采矿行业中应用的矿石分选技术的改进,物理法不仅作为化学法的预处理方法,在直接回收方面也发展很快。物理方法由于不存在化学法可能带来的二次污染,可同时对多种金属进行回收,效率也很高,因此得到了长足的发展,一些新工艺如涡流分离法、磁力分离法、静电分离法都已广泛用于回收工业<sup>[19-20]</sup>。

### 2.1 密度分离法

由于电子废料中各组分密度大小不同,因此可在一定设备中利用重力或水流、气流进行组分分离<sup>[21]</sup>。颗粒的运动不仅取决于物料的密度,还与颗粒的大小、形状等因素有关,一般来说,大颗粒运动受到的影响更大<sup>[22]</sup>。在这类处理技术的利用中,对于不同组成的电子废料,回收方法也不同。比如废弃电脑主要含有丙烯腈-丁二烯-苯乙烯三元共聚物(ABS)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)材料(密度在 1.0 ~ 1.5 g/cm<sup>3</sup>),印刷电路板主要是环氧树脂加固的玻璃纤维(密度 1.5 ~ 2.0 g/cm<sup>3</sup>)。在使用浮选法分离时,工艺就不尽相同。一般对粒径小于 2 mm 的金属颗粒可基本完全分离<sup>[18]</sup>。

Zhang 等<sup>[23]</sup>提出的涡流分离法使用切割、造粒对电子废料进行预处理,由于金属与非金属载体(塑料等)的连接并不像在自然界中的金属矿石中那样紧密,预处理后金属和塑料可以基本分离,进入涡流分离设备后,金属和塑料颗粒被分入不同的收集盒,可基本分离完全;得到的金属颗粒经锤磨达到合适粒径,通过进一步分离纯化可获得纯度较高的金属产品。他们指出,金属颗粒的形态分布取决于粉碎方式和分离方法,分离方法的选择将直接影响回收效果。

清华大学<sup>[24]</sup>提出从富含铜的电子废料中回收金属和非金属材料的工艺:首先用破碎机将富含铜的电子废料进行粗破碎,再利用磨粉机进行粉碎,粗破碎和磨粉过程中加喷水或喷雾,将电子废料制成粉体,使得电子废料中的金属和非金属以微粒的形式析出;将磨粉后的电子废料送入摇床中,以水为介质进行重力分选,将电子废料粉末中的金属和非金属分开;最后采用转炉将分选后的金属粉末铸成电解阳极,用电解法提纯铜,采用湿法冶金技术提炼阳极泥中的金、银、铂、钯等贵金属。

Mohabuth 等<sup>[25]</sup>提出了垂直振动分离方法:利用密度的不同,在水中将粒度相近的塑料和铜颗粒进行垂直振动分离,可将二者分层。同时他们发现:低频振动下,铜颗粒会富集到塑料层的表面;高频振动下,铜颗粒会富集于 2 层塑料中间,形成“三明治”结构。这种方法简单易操作,但还停留在实验室研究阶段。

### 2.2 磁电分离法

很早就有利用磁性来分离回收铁等磁性金属的应用研究。近 10 多年,一种利用永磁体的分离技术在回收产业界迅速发展,最早是用于汽车及市政固体废弃物的回收中,继而发展到电子废料等各种废物的回收中。当导电的物料颗粒暴露在不断交互变换的磁场中时,会产生感应电流,形成与外加磁场相反的磁场。这种外加磁场与感应电流之间相互作用会产生电动力学运动,利用电动力学运动进行分离。

Zhang 等<sup>[26]</sup>用电动力学分离法处理含铜质量分数 11%、铝质量分数 7% 的废料,可将出料纯度提升到 34% 的铜和 22% 的铝,回收率达到 87% ~ 99%。对大多数固体电子废弃物,用该法能回收 95% ~ 99% 的铜。

温学峰等<sup>[27]</sup>使用滚筒静电分选法:先让物料通过高压电场,再让所有颗粒与接地圆筒接触,这样导体物料所带的电荷很快就会消失,而非导体物料则能长时间地保留所带电荷,利用这一原理可实现金属与非金属的分离。大部分印刷电路板等电子废弃物中金属的粒径在 0.074 mm 以上,经过粗破碎和细破碎后,金属与非金属基本解离,而且 2 类物质的导电性差别显著,十分适合于静电分选。通过静电分选,铜和铝的回收率分别达到 95% 和 90%。对于细粒级物料,分选效果不好,他们建议改用摩擦电选或浮选的方法进行金属富集体的有效回收。国外在静电分离方面也有很多应用报道。

### 2.3 光学成像分离法<sup>[23]</sup>

光学成像分离是通过测量颗粒的颜色、材质、形态、传导性等性质借助电脑进行高质量分类,从而将混合物料分离为高纯组分。随着 CCD 传感器、电脑、软件技术的发展,光学成像分离方法正逐渐用于回收和采矿业界。德国开发的此类设备通过装备 10 亿色的高速相机和电导传感器,可以识别出不同的金属,能以 10 t/h 的速度处理大小为 5 ~ 50 mm 或 10 ~ 100 mm 的物料流。

## 3 生物法

生物法回收重金属技术具有效率高、成本低、

能耗少、污染小等优点,有广阔的应用前景。早在20世纪80年代,国内就有生物法回收贵金属的相关报道,当时采用方法的基本原理是利用三价铁离子的氧化性将贵金属合金中的其他金属氧化溶解,使贵金属裸露出来便于回收,还原的2价铁离子被细菌再氧化用于浸取<sup>[28]</sup>,近年来这类方法有了很大的发展。

国内,林种玉等<sup>[29]</sup>的研究发现,从生态环境中分离筛选出的巨大芽孢杆菌株具有较强的吸附和还原 $Pt^{4+}$ 的能力。该菌体通过细胞壁和活性基团的作用提供电子,将废液中的铂离子较快速地还原为 $Pt^{4+}$ ,继而缓慢地还原成 $Pt^0$ 。吸附率可达94%,吸附量达94 mg/g。

英国伯明翰大学(University of Birmingham)正在研究把生物法应用到电子废料的贵金属回收中。最初,他们只是将金属浸在硝酸和盐酸中,然后通入装有细菌的反应器,发现细菌会将金属沉积在细胞壁上,收集细菌就可以回收金属,效率约为90%,速度比一般方法快50%,而且温度低,药品使用量小,回收的钯、金比化学方法回收的质量还好。通过和企业合作,该实验已经进行到中试规模,运用生物电化学-湿法冶金-电化学3种技术将反应分成2步进行,可以同时回收电路板上的贵金属和焊料上的锡、铅<sup>[30]</sup>:首先,加入一种化学溶剂A,只溶解焊料,利用电解方法回收溶液中的金属,同时将溶剂A再生;再使用另一种溶剂将铜溶解,电解得到铜并回收溶剂;利用湿法冶金技术从剩下的电路板渣中提取贵金属;最后将得到的沥出液通入柱式生物反应器,微生物从低浓度的溶液中将贵金属富集到细胞表面,金属富集到一定程度后会脱离细胞悬浮在溶液中。

利用这种方法,可以实现一次反应同时回收贵金属、铜和焊锡,而且各个产品独立,不需要分离。而使用铜熔炼的火法冶金回收工艺,则会有5%左右的铅进入污泥,0.1%的铅进入气相<sup>[31]</sup>。生物法耗能少,对环境危害低,但已知的可利用菌种有限,不易放大,目前尚无工业化的报道。

#### 4 国外电子废料回收情况

2003年2月,欧盟通过报废电子电器设备指令(WEEE Directive)<sup>[2]</sup>。WEEE Directive于2005年8月13日开始生效,并制定了2006年12月31日前达到电子废料回收75%、设备再利用65%的目标<sup>[2]</sup>。目前,欧洲和美国等发达国家已建立一套比较完善的

电子废料回收处理系统。

在欧洲,一般将分类后的各种电子废料送到相应的专门加工厂处理。电子废料中的金属、塑料、电路板等材料均在专门的回收公司进行处理和再加工,可提取金、银等贵金属和稀有金属;回收的铁、铝、铅、铜、锌等金属铸造成含不同成分的铝锭、铅锭和铁锭提供给客户;回收的铅、水银等有害物质则被送到专门的有害垃圾处理厂处理。在美国,电子废料有专门负责拆解的公司,有专门负责电路板回收的公司,有专门提炼贵金属的公司等。由于专业化处理,美国电子废料回收再利用率达97%以上。

#### 5 建议

我国囤积了大量的电子废料,由此引发的环境问题日益突出,电子废料问题亟待解决。经过对国内外电子废料回收情况的研究,笔者提出以下一些建议:

##### (1) 认识到回收电子废料的巨大经济价值

电子工业每年消耗金200多t,银4000t以上,量大利高。美国环境保护署(EPA)指出,回收利用电子废料中的材料代替原材料还可节约60%以上的能源<sup>[32]</sup>。我国资源短缺,更应该大力开发废料回收技术。推动切合实际、成熟可行的先进工艺产业化、规模化以有效回收贵金属资源,从而解决电子工业带来的环境问题,缓解国内的能源和资源紧张。

##### (2) 充分认识到电子废料对环境的破坏,建立高效的回收管理系统

电子废料已经对我国广东贵屿等一些地区的生态环境和饮用水系统产生了严重破坏,但国内尚无成熟完善的回收体系。建议通过建立消费者、生产者、回收者共同参与的体系解决电子废料的问题,消费者向收集点上交废旧电子电器设备、生产者承担部分回收责任、收集回收者在回收贵金属的同时也分离出有毒物质以保证环境效益。

##### (3) 积极开展国际合作

越来越多的国家认识到电子废料这类环境问题是全球性的问题,1992正式生效的巴塞尔公约(Basel Convention)有效地约束了电子废料等有害废物越境转移。2004年美国环境署也禁止向中国、印度、西非等国出口电子废料<sup>[33]</sup>。欧洲的一些国家已开始介绍先进的技术和管理经验,帮助发展中国家进行电子废料的处理。

##### (4) 倡导循环经济,开发替代技术,从源头上减少电子废料

随着电子产业的继续迅猛发展,电子废料还会保持 4% 以上的增长率,是市政固体废物增长率的 3 倍<sup>[34]</sup>。所以,仅仅处理废物是不够的,必须引入循环经济意识,通过资源的循环利用以更低的成本获得高效益;同时,从产品的开发设计上引入生态环保观念,从源头上促成污染最小化,设计出长寿命、可升级、便于维修、可再利用的设备。

### 参考文献

- [1] Darby L, Obara L. Household recycling behavior and attitudes towards the disposal of small electrical and electronic equipment[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, 44(1): 17 - 35.
- [2] EU. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment(WEEE)[J]. Official Journal of the European Union, 2003, 46: 24 - 38.
- [3] Enviro RIS. Information technology(IT) and telecommunication(Telecom) waste in canada[EB/OL](2000 - 10)[2006 - 01 - 15]. <http://www.epsc.ca/pdfs>.
- [4] Irish EPA. National waste database summary 1998[R/OL]. Ireland: Irish EPA, 1998[2006 - 01 - 15]. <http://www.epa.ie/pubs/docs/Nat.%20Waste%20Summary.pdf>.
- [5] Puckett J, Bvster L. Exporting harm: The high-tech trashing of Asia[R]. Seattle: Basel Action Network(BAN), 2002 - 02 - 25.
- [6] Holliday R, Corti C, Goodman P. Gold-the cost effective, recyclable electronic material[R/OL][2006 - 01 - 15]. [http://www.gold.org/discover/sci\\_indu/presentations/](http://www.gold.org/discover/sci_indu/presentations/).
- [7] 胡天觉, 曾光明, 袁兴中. 从家用电器废物中回收贵金属[J]. 中国资源综合利用, 2001(7): 12 - 15.
- [8] International Precious Metals Institute(IPMI). Environmentally sound management used mobile telephones[R/OL](2003 - 07 - 14)[2006 - 1 - 16]. <http://www.ipmi.org>.
- [9] Lehner T. E&HS aspects on metal recovery from electronic scrap[C]//IEEE symposium on electronics and the environment, 2003: 318 - 322.
- [10] Silicon Valley Toxics Coalition. Background document on hazards and waste from computers[R]. San Jose: Silicon Valley Toxics Coalition, 1999.
- [11] Wilkinson S, Duffy N, Crowe M, et al. Waste from electrical & electronic equipment[M]. Ireland: Ireland Environmental Protection Agency, 2001.
- [12] 姚洪, 林桂燕. 拆解电路板中的铜回收及其化工产品的制备[J]. 中国物资再生, 1998(12): 17.
- [13] 姚洪, 王洪涛, 傅昌荣, 等. 电子废料的贵金属再生回收方法: CN, 1458291[P]. 2003 - 11 - 02.
- [14] 李世鸿, 易联寿. 从厚膜工艺产生的废料中回收银工艺的研究[J]. 中国物资再生, 1997(12): 10 - 11.
- [15] Gloe. 电子废料特别是厚膜涂层工艺废品中贵金属的回收[J]. 广西冶金, 1991(3): 53 - 59.
- [16] 王同聚, 王瑞雪. 从含金废料中回收金与金的提纯[J]. 再生资源研究, 1997(4): 29 - 31.
- [17] 朱萍, 古国榜. 从印刷电路板中回收金和铜的研究[J]. 稀有金属, 2002, 26(3): 214 - 216.
- [18] Zhang S L, Forssberg E. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap resources[J]. Conservation and Recycling, 1997, 21(4): 247 - 269.
- [19] Wilson R J, Veasey T J, Squires D M. The application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes[J]. Minerals Engineering, 1994, 7(8): 975 - 984.
- [20] Cui J R, Forssberg E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 99(3): 243 - 263.
- [21] Wills B. Mineral processing technology[M]. 4th ed. Oxford: Pergamon Press, 1988: 377 - 381.
- [22] Cui Jirang. Mechanical recycling of consumer electronic scrap[D]. Lulea: Lulea University of Technology, 2005.
- [23] Zhang S L, Forssberg E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap[J]. Powder Technology, 1999, 105: 295 - 301.
- [24] 清华大学. 从富含铜的电子废料中回收金属和非金属材料的工艺: 中国, 1396281[P]. 2003 - 02 - 12.
- [25] Mohabuth N, Miles N. The recovery of recyclable materials from waste electrical and electronic equipment(WEEE) by using vertical vibration separation[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, 45(1): 60 - 69.
- [26] Zhang S L, Forssberg E. Optimization of electrodynamic separation for metals recovery from electronic scrap[J]. Resources, Conservation and Recycling 1998, 22(3/4): 143 - 162.
- [27] 温学峰, 范英宏. 用静电选的方法从废弃电路板中回收金属富集体的研究[J]. 环境工程, 2004, 22(2): 78 - 80.
- [28] He F, Fu Q, Lu Y. Degilding of waste gilded electronic parts by bacterial leaching[J]. Min Met(China), 1987, 1: 26 - 30.
- [29] 林种玉, 周朝晖, 吴剑鸣, 等. Pt<sup>4+</sup> 生物吸附作用的谱学表征[J]. 厦门大学学报, 2003, 42(5): 612 - 616.
- [30] Barlow G. Bio-electrochemical technology for metal recovery from scrap printed circuit boards[R/OL](2004)[2006 - 1 - 15]. <http://www.dti.gov.uk/biowise>.
- [31] Geigbig J, Socolof M. A life-cycle environmental impact evaluation of Tin-lead and Lead free solder: Electronic design, manufacturing and the environment symposium[C]. California: University of California, 2003.
- [32] Institute of Scrap Recycling Industries Inc(ISRI). Scrap recycling: Where tomorrow begins[R]//ISRI. Washington D C: ISRI, 1996: 16 - 24.
- [33] Kettle J. Stop exporting waste or face prosecution EA warns[EB/OL](2004 - 12 - 15)[2006 - 01 - 15]. [http://www.edie.net/news/news\\_story.asp?id=9327&channel=0](http://www.edie.net/news/news_story.asp?id=9327&channel=0).
- [34] ICER. ICER(2000) UK status report on waste from electrical and electronic equipment[R]. London: Industry Council for Electronic Equipment Recycling(ICER), 2000. ■