



# SnCl<sub>4</sub>-HCl 体系废电路板元器件的分离及锡的回收

李陵晨, 杨建广, 闫万鹏, 丁 龙, 南天翔, 陈 冰

(中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 针对现有废旧线路板元器件分离及锡回收工艺所存在环境污染严重、效率低、难以大规模推广应用等问题, 采用超声辅助下 SnCl<sub>4</sub>-HCl 体系退除元器件管脚处焊锡, 达到废线路板元器件分离的目的; 同时, 采用隔膜电积技术回收退锡液中的锡并再生出 SnCl<sub>4</sub>-HCl 退锡剂。结果表明: 在反应温度 50 °C、Sn<sup>4+</sup>浓度 30 g/L、盐酸浓度 4.0 mol/L、超声频率 40 kHz、超声功率 100 W 的条件下, 反应 20 min 后废线路板元器件管脚及过孔处的焊锡全被退除。以退锡后的液体为电解液, 采用隔膜电积技术回收退锡液中的锡; 在温度 35 °C、电流密度 200 A/m<sup>2</sup>、异极距 5 cm、石墨板为阳极、不锈钢板为阴极的条件下进行隔膜电积 8 h, 阴极得到了平整致密的电积锡, 阴极电流效率 97.3%, 电锡纯度 99.9%, 阳极电流效率为 88.8%, 阳极液再生出 SnCl<sub>4</sub>-HCl 溶液, 可作为退锡液返回用于超声退锡。

**关键词:** 废线路板; 元器件分离; 锡; 再生; 隔膜电积技术

文章编号: 1004-0609(2019)-07-1543-08

中图分类号: TF814; O646.541

文献标志码: A

近年来, 随着电子信息技术迅猛发展和人们对物质文化生活更高水平的追求, 我国电子电器产品更新换代速度明显加快, 同时产生大量的电子废弃物。印刷线路板(PCB)是各类电子电器产品的重要组成部分, 主要由印刷有电气连接导电图形的绝缘基板与若干元器件通过低温软钎焊方式焊接而成。当电子电器产品废弃后, 其中的印刷线路板也随之而废弃, 但研究发现, 电子电器产品报废后, 印刷板线路作为一个整体虽然失去了原有功能, 但其上元器件如二极管、三级管、光电器件、电容电阻以及各种集成电路等功能大都良好。从废弃电路板上清洁、高效分离这些元器件, 对于废线路板资源的循环利用具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

目前, 废线路板主要先通过“剪切-破碎”进行预处理, 再进行各种分选回收金属及非金属组分等<sup>[3-4]</sup>。但实践中发现, 若不先将废线路板上的各类元器件分离而直接“剪切-破碎”, 不仅无法有效回收各种元器件, 而且由于线路板上的焊锡延展性极佳, “剪切-破碎”时极易相互粘附形成大大小小的“锡团”, 严重阻碍“剪切-破碎”的顺利进行。因此, 目前废线路板资源再生处理中, 均须先分离其上的元器件。

迄今为止, 从废弃线路板上分离元器件所采用的高温烘烤-人工拆解法<sup>[5-6]</sup>、强酸直接浸泡法<sup>[7-8]</sup>、切

割-敲打-铲除法等<sup>[9-11]</sup>, 均存在环境污染重、效率低、难以大规模推广应用等问题, 是目前废弃线路板资源再生领域急需突破的瓶颈。杨建广等<sup>[12-16]</sup>提出并研究了一种超声辅助下 SnCl<sub>4</sub>-HCl 体系元器件分离并清洁回收锡的新工艺, 所采用的 SnCl<sub>4</sub>-HCl 退锡剂在超声波辅助下能有效地退除元器件管脚及过孔内的锡, 从而实现元器件从废线路板上的快速无损分离。同时, 采用隔膜电积技术可以高效地回收退锡液中的锡并再生退锡剂, 实现流程的闭路循环, 具有流程短、能耗低、无废水排放的优点。本文主要介绍废弃线路板上元器件分离的条件优化过程, 以及隔膜电积回收退锡液中的锡并再生退锡剂的试验效果, 为研究同行提供相关的参考。

## 1 实验

### 1.1 试验原料

试验采用的废线路板由湖南某环保技术公司提供, 主要为报废电脑拆解的主板(见图 1(a)), 其上包含二极管、三级管、电容、电阻以及各种集成电路等。试验前将其分割为面积相等的若干小块(见图 1(b)),

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574294)

收稿日期: 2018-06-25; 修订日期: 2019-01-30

通信作者: 杨建广, 教授, 博士; 电话: 0731-88830470; E-mail: jianguang\_y@163.com

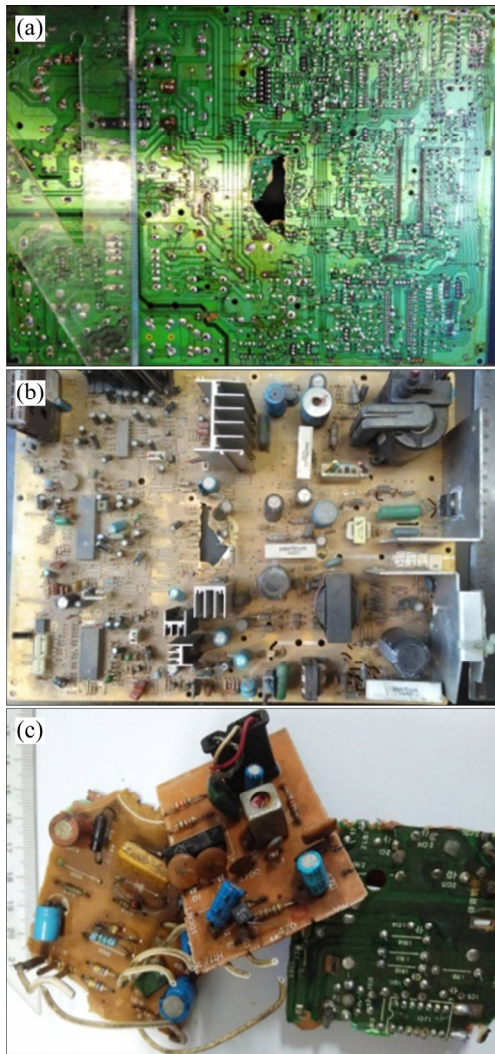


图1 某报废电脑拆解的主板光学照片

Fig. 1 Optical photos of scrapped computer disassembled motherboard: (a) Whole motherboard optical photo; (b) Split motherboard optical photo

用于超声辅助分离元器件条件优化试验。其余原料如  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{HCl}$  等，均为从湖南某化学品公司购得的分析纯级试剂。

## 1.2 试验方法及原理

$\text{SnCl}_4\text{-HCl}$  体系超声辅助分离元器件并清洁回收锡的工艺包括超声辅助退锡及退锡液隔膜电解沉积两个主要过程，试验流程示意图如图2所示。

### 1.2.1 退锡及元器件分离过程

线路板上的各类元器件通常采用线焊法、载带法、倒装法、梁式引线法等封装技术连接到电路板上，其焊接面在元器件同一层面。目前，元器件的安装多数采用插入式，而插入式需要在连通导线交汇处钻上一个公共孔，这个孔一般称为过孔。不管是插入式还是贴片式元器件，要达到拆卸的目的，首先得将过孔内的含锡脱焊，且既要使其中的焊锡脱落干净，又不能损坏元器件，这也是目前元器件分离的难点之一。

本研究采用的  $\text{SnCl}_4\text{-HCl}$  体系超声辅助分离元器件的主要原理，即是在超声波辅助下，以  $\text{SnCl}_4$  和盐酸溶液为退锡剂，对废弃电路板上元器件管脚及过孔中锡进行选择浸出，在特定功率的超声辅助下，能加速过孔中锡的溶解而又不损坏元器件性能。退锡结束后，元器件完全松动，通过振动或拍打等操作轻易地将其从线路板上分离。

退锡过程中，管脚及过孔中锡均可被  $\text{SnCl}_4$  选择性浸出进入浸出液(如式(1)所示)。少量进入溶液的  $\text{Cu}^{2+}$  也可在后续逆流循环退锡中被锡置换入渣(如式(2)所示)。

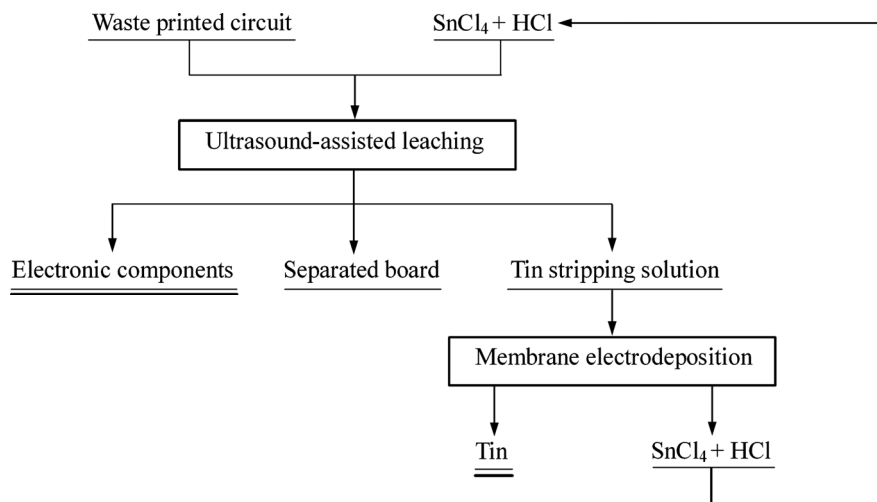


图2  $\text{SnCl}_4\text{-HCl}$  体系超声辅助元器件分离并清洁回收锡的工艺流程示意图

Fig. 2 Flow charts of ultrasound-assisted separation of components in  $\text{SnCl}_4\text{-HCl}$  system and clean recovery of tin

### 1.2.2 隔膜电积过程

退锡得到的退锡后液提取锡及再生  $\text{SnCl}_4$  主要通过隔膜电积过程实现, 退锡液隔膜电积在阴离子隔膜电解槽中进行。电积时以钛板为阴极, 石墨为阳极。

阴极电积主反应为



阳极主反应为



采用单因素试验法考察了退锡温度、酸度、 $\text{Sn}^{4+}$  浓度、超声功率等因素对废线路上元器件分离效果的影响。为更好地评定线路板焊锡的脱除情况, 制定了一个线路板退锡情况标准, 如图 3 所示。其中图 3(a) 为退锡前的线路板, 焊锡脱除效果定为 0 级; 图 3(b) 所示为线路上少量焊锡脱除(焊锡退除率  $< 20\%$ ), 焊锡脱除效果定为 1 级; 图 3(c) 所示为线路上部分焊锡脱除(焊锡退除率  $20\% \sim 60\%$ ), 焊锡脱除效果定为 2 级; 图 3(d) 所示为线路上大部分焊锡脱除(焊锡退除率  $60\% \sim 90\%$ ), 焊锡脱除效果定为 3 级; 图 3(e) 所示为线路上焊锡全部脱除(焊锡退除率  $100\%$ ), 焊锡脱除效果定为 4 级; 图 3(f) 所示为焊锡脱除后, 从线路上分离得到的元器件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 退锡温度的影响

在超声波频率  $40 \text{ kHz}$ 、超声功率  $100 \text{ W}$ 、 $\text{Sn}^{4+}$  浓度  $50 \text{ g/L}$ 、盐酸浓度  $4 \text{ mol/L}$  条件下, 分别考察反应温度为  $20$ 、 $30$ 、 $40$  和  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  时废线路板焊锡脱除的效果, 试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 反应温度对废线路上焊锡的溶解具有显著的促进作用。随着反应温度的升高, 废线路板焊锡的溶解速度加快, 焊锡退除效果逐渐增强, 并在温度  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  时达到最大。这说明反应温度的升高, 致使反应分子运动加剧, 加快了反应物之间的反应速率, 从而强化了焊锡在  $\text{HCl-SnCl}_4$  溶液中的溶解。但实验中发现, 温度超过  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  后,  $\text{HCl}$  酸雾挥发加剧。综合考虑, 选择最佳退锡温度为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 盐酸浓度的影响

为更好地通过试验考察盐酸浓度对退锡效果的影响, 在开展本因素试验时未选择上述获得的最佳温度  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 而是选择为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 并在超声波频率  $40 \text{ kHz}$ 、

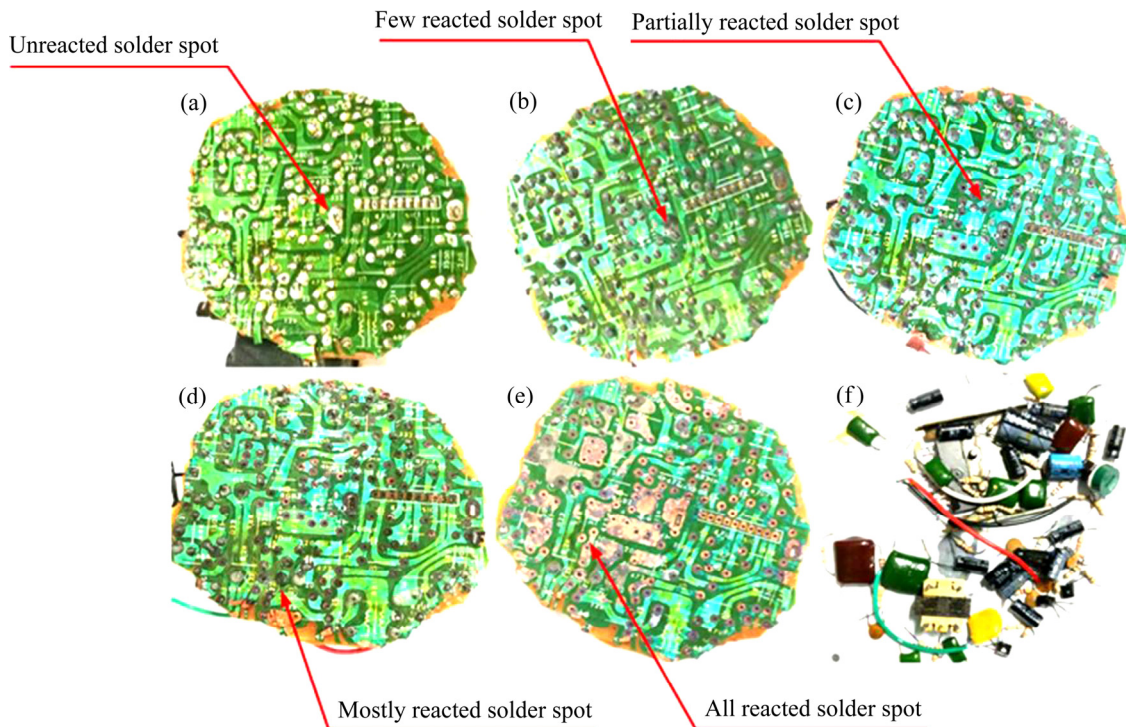


图 3 不同时间下废线路板的脱锡情况等级

**Fig. 3** Grades of solder removal from waste circuit boards at different times: (a) Level 0: Unreacted raw materials; (b) Level 1: Few separated; (c) Level 2: Partially separated; (d) Level 3: Mostly separated; (e) Level 4: All separated; (f) Separated components

超声功率 100 W、 $\text{Sn}^{4+}$ 浓度 50 g/L 的条件下, 考察盐酸浓度分别为 3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 mol/L 时废线路板焊锡脱除的效果, 试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 盐酸浓度对废线路板焊锡的脱除呈正相关影响。废线路板上焊锡的脱除效果随盐酸浓度的增加而逐渐增强, 并在盐酸浓度为 4.5 mol/L 达到了最大。在此浓度下, 在  $\text{SnCl}_4\text{-HCl}$  体系中反应 10 min 可实现线路上部分焊锡的脱除, 继续反应到 20 min, 可实现全部焊锡的脱除。这说明盐酸浓度的增加有利于强化焊锡的溶解, 增加反应的盐酸用量有利于退锡反应的进行, 但是过高的盐酸会恶化生产环境。因此, 综合考虑, 本研究选择盐酸浓度为 4.0 mol/L。

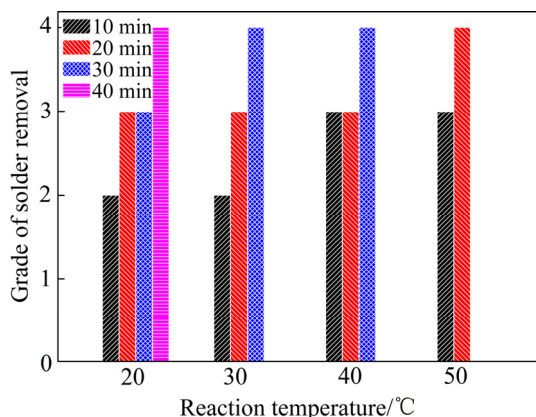


图 4 反应温度对废线路板上焊锡脱除效果的影响

Fig. 4 Effect of reaction temperature on removal of solder from waste circuit boards

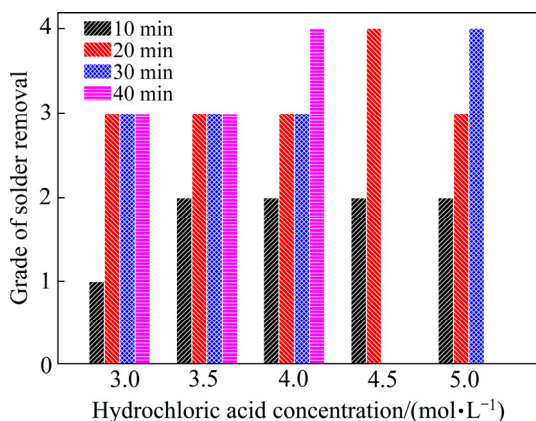


图 5 盐酸浓度对废线路板上焊锡脱除效果的影响

Fig. 5 Effect of hydrochloric acid concentration on removal of solder from waste circuit boards

### 2.3 超声功率的影响

在  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度 50 g/L、盐酸浓度 4.0 mol/L、温度为 20 °C、超声频率为 40 kHz 的条件下, 考察超声功率 0、20、50、80 和 100 W 对废线路板焊锡脱除的影响, 试验结果如图 6 所示。

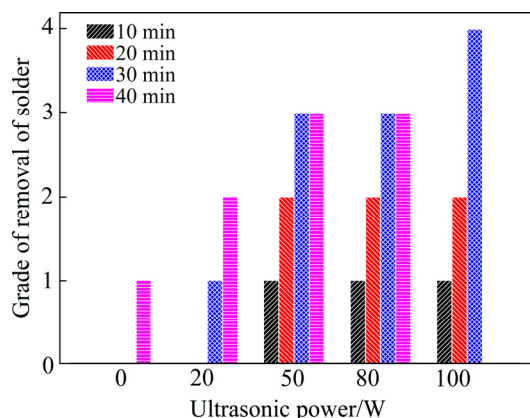


图 6 超声功率对废线路板上焊锡脱除情况的影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic power on removal of solder from waste circuit boards

由图 6 可知, 超声对废线路板的退锡影响非常显著。在没有施加超声的条件下, 反应 40 min 只有个别焊锡脱出; 随着超声功率的增加, “超声空化效应”增强, 废线路板上焊锡的脱除效果明显增强; 在超声功率最大值下, 30 min 可实现废线路板焊锡的全部退除。试验中发现, 随着超声功率的增加及超声退锡时间的延长, 线路板的电容及电感等元器件损耗率随之增加, 实验所采用的超声波发生器的最大功率为 100 W。综上所述可知, 本研究中选择超声功率最佳值为 100 W。

### 2.4 $\text{Sn}^{4+}$ 浓度的影响

在超声波频率为 40kHz、超声功率为 100 W、盐酸浓度 4.0 mol/L、温度为 20 °C 的条件下, 考察  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度分别为 20、30、40、50 和 70 g/L 时废线路板上焊锡脱除的效果, 试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度对废线路板的退锡影响显著。当  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度为 20 g/L 时, 随着溶解时间的延长, 废线路板上焊锡由部分脱落达到大部分脱落; 当  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度升至 30 g/L 时, 废线路板上的焊锡在浸泡溶解 20 min 时就可实现全部脱除; 之后, 随着  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度继续升高至 70 g/L 时, 线路板上的焊锡全部退除反而需要的时间有所延长。分析其原因, 主要是由于随着溶液中锡离子浓度的增加, 溶液黏度相应增大<sup>[17]</sup>, 而随着溶液黏度的增大, 由“超声空化效应”空化泡崩溃时释放出的冲击波强度也就越弱<sup>[18]</sup>。本研究中超声“空化效应”对线路板退锡效果影响显著, 试验发现, 当  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度为 30 g/L 时退锡效果最佳, 因此, 本研究选择此浓度值为退锡液中的最佳  $\text{Sn}^{4+}$ 浓度。

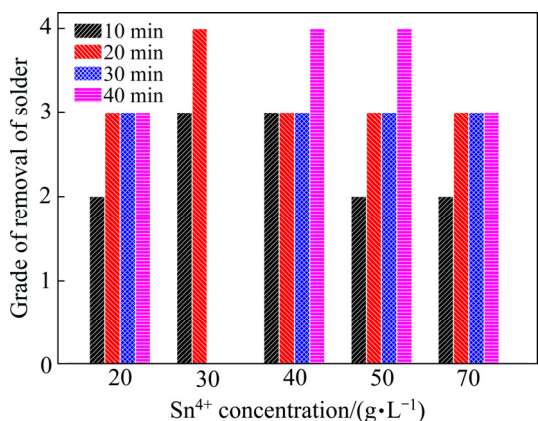


图 7 Sn<sup>4+</sup>浓度对废线路上焊锡脱除效果的影响  
Fig. 7 Effect of Sn<sup>4+</sup> concentration on solder removal from waste circuit boards

2.5 综合条件实验

值得指出的是, 由于实验原料中 Sn 含量约 7%。通过上述超声辅助退锡后, 所得的退锡液中 Sn<sup>2+</sup>的含量约为 10 g/L, 尚有 20 g/L 的 Sn<sup>4+</sup>未还原完毕。为此将该退锡后液进行多次循环退锡以提高退锡液中的 Sn<sup>2+</sup>浓度, 同时通过循环退锡, 也可将溶液中少量的 Cu<sup>2+</sup>置换分离。经多次循环退锡并加入少量锡粉净化

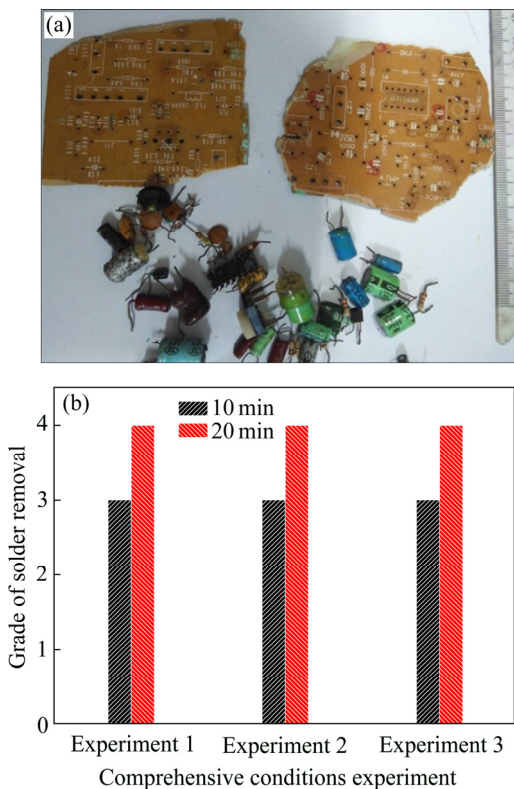


图 8 综合条件实验结果  
Fig. 8 Experiment results under comprehensive conditions: (a) Board and components after tin recovery; (b) Grade of removal of solder

后<sup>[19]</sup>, 所得退锡液主要元素经 ICP-AES 分析结果如表 1 所列。

表 1 循环退锡液主要化学成分分析

Table 1 Chemical composition of circulation solution (g/L)

Sn	Pb	Cu	Fe	H <sup>+</sup>
63.32	0.03	0.01	1.17	3.9

2.6 循环退锡液隔膜电积实验

将上述综合条件实验获得的循环退锡液分别泵入到隔膜电解槽的阴、阳极室, 在之前研究获得的隔膜电积优化条件<sup>[19]</sup>下(温度 35 °C, 电流密度 200 A/m<sup>2</sup>, 异极距 5 cm, 石墨板为阳极, 不锈钢板为阴极)进行了 8 h 的隔膜电积实验。在阴极获得了表面致密平整的电积锡(见图 9), 电积锡纯度为 99.9%, 阴极电流效率为 97.3%; 在阳极获得了 Sn<sup>4+</sup>浓度为 56.4 g/L 的阳极液, 阳极电流效率为 88.8%, 阳极电解后液主要化学成分及含量分析如表 2 所列。该溶液完全可作为退锡剂返回用于废电路板退锡分离元器件使用。

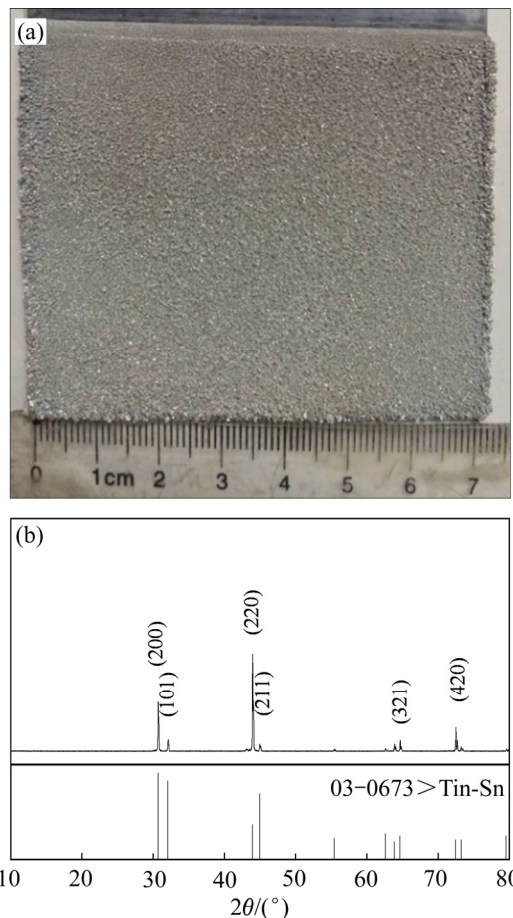


图 9 循环退锡液隔膜电积锡光学照片及 XRD 谱  
Fig. 9 Optical photo(a) and XRD pattern(b) of membrane electrodeposition tin from circulating tin stripping solution

表2 阳极电解后液主要化学成分分析

Table 2 Chemical composition of anolyte solution after membrane electrodeposition (g/L)

Sn <sub>t</sub> <sup>1)</sup>	Sn <sup>4+</sup>	Pb	Cu	Fe	H <sup>+</sup>
63.5	56.4	0.03	0.01	1.16	4.0

1) Sn<sub>t</sub> is total Sn concentration.

## 2.7 经济技术指标

本工艺的直接经济成本估算如表3所列。工艺成本估算结果表明,采用超声辅助下 SnCl<sub>4</sub>-HCl 体系分离废弃线路板元器件并回收锡工艺具有很好的成本优势,每吨锡回收成本估算为 3580 元人民币。

本工艺以废弃线路板为原料,四氯化锡和盐酸为退锡剂,退锡后得到的电子元器件及“光板”可作为二次资源出售,不存在固废问题;而隔膜电积提锡过程溶液闭路循环,可实现工艺废水的近零排放;常温下退锡及电锡中少量挥发的酸雾,可通过负压抽离、冷凝回用或碱吸方式进行处理。因此,本工艺实施过程不存在“三废”污染问题。

表3 每吨锡回收成本估算

Table 3 Estimated cost per ton of tin recovered

Cost item	Value	Unit price/ yuan	Cost/ yuan
Power consumption	3200 kW·h	1	3200
Acid consumption	300 kg	0.6	180
Others	—	—	200
Total			3580

## 3 结论

1) 提出并采用基于超声辅助下 SnCl<sub>4</sub>-HCl 体系去除废线路板上锡并分离元器件的新工艺,以四氯化锡和盐酸为退锡剂,在超声强化作用下,加速对废弃线路板中锡的选择性浸出,同时又不损坏元器件的性能。退锡后液分别泵入隔膜电积阴、阳极室,隔膜电积后在阴极得到电积锡,在阳极室则得到四氯化锡,可作为退锡剂返回退锡使用,实现了溶液的闭路循环。

2) 采用单因素试验法,考察了反应温度、Sn<sup>4+</sup>浓度、盐酸浓度、超声功率对线路板上焊锡去除效果的影响,获得了最优退锡条件:反应温度 50 °C、超声频率 40 kHz、超声功率 100 W、Sn<sup>4+</sup>浓度 30 g/L、盐酸浓度为 4.0 mol/L。在此条件下对废线路板进行退锡,10 min 后可实现废线路板上大部分焊锡的脱除,

20 min 可脱除全部焊锡,实现线路板上元器件的高效分离。

3) 循环退锡液通过隔膜电积处理,阴极可以得到形貌致密平整的电积锡,其纯度为 99.9%,电流效率为 97.3%;在阳极室可以再生出 Sn<sup>4+</sup>浓度为 56.4 g/L 的阳极液,阳极电流效率为 88.8%,所得阳极液可作为退锡剂返回用于废线路板退锡分离元器件使用。

## REFERENCES

- [1] HADI P, XU M, LIN C S, HUI CW, MCKAY G. Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283: 234-43.
- [2] NING C, LIN C S K, HUI D C W, MCKAY G. Waste printed circuit board (PCB) recycling techniques[J]. *Topics in Current Chemistry*, 2017, 375(2): 43.
- [3] 祁正栋, 刘洪军. 废旧电路板中有色金属的机械物理回收技术[J]. *材料导报*, 2015, 29(17): 122-127.  
QI Zheng-dong, LIU Hong-jun. The mechanical-physical recycling technology for nonferrous metals from waste printed circuit boards[J]. *Materials Review*, 2015, 29(17): 122-127.
- [4] 周益辉, 丘克强. 回收废弃印刷电路板焊锡的新技术[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(7): 1883-1889.  
ZHOU Yi-hui, QIU Ke-qiang. A new technology for recycling solder from waste printed circuit boards[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(7): 1883-1889.
- [5] 尚海利, 王平, 栾晓彦, 吴六顺, 李辽沙. 废弃印刷线路板资源化处理的研究进展[J]. *化工环保*, 2008, 28(2): 132-136.  
SHANG Hai-li, WANG Ping, LUAN Xiao-yan, WU Liu-shun, LI Liao-sha. Research progresses of reusing waste printed circuit boards[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2008, 28(2): 132-136.
- [6] 殷琨, 彭晓成, 周培国, 蒋彬. 电子废弃物的污染与处理技术[J]. *中国资源综合利用*, 2006, 24(2): 25-28.  
YIN Kun, PENG Xiao-cheng, ZHOU Pei-guo, JIANG Bin. Pollution and treatment technology of electronic waste[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2006, 24(2): 25-28.
- [7] 童汉清, 于湘. 废弃线路板回收处理技术的研究进展及其应用[J]. *电子测试*, 2013(9): 252-254.  
TONG Han-qing, YU Xiang. Development and application

- on waste printed circuit boards recycling technology[J]. *Electronic Test*, 2013(9): 252–254.
- [8] 李 静, 杨建广. 以废旧印刷电路板为原料制备超细铜粉的研究[J]. *湖南有色金属*, 2012, 28(3): 57–61.  
LI Jing, YANG Jian-guang. Preparation of ultrafine copper powder from waste printed circuit boards[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2012, 28(3): 57–61.
- [9] 白庆中, 王 晖, 韩 洁, 聂永丰. 世界废弃印刷电路板的机械处理技术现状[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2001, 2(1): 84–89.  
BAI Qing-zhong, WANG Hui, HAN Jie, NIE Yong-feng. The status of technology and research of mechanical recycling of printed circuit board scrap[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2001, 2(1): 84–89.
- [10] CUI J, FORSSBERG E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 99(3): 243–263.
- [11] 路洪洲, 李 佳, 郭 杰, 许振明. 基于可资源化的废弃印刷线路板的破碎及破碎性能[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(4): 551–556.  
LU Hong-zhou, LI Jia, GUO Jie, XU Zhen-ming. Pulverization characteristics and pulverizing of waste printed circuit boards (printed wiring boards) based on resource utilization[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(4): 551–556.
- [12] LEI J, YANG J G. Electrochemical mechanism of tin membrane electro-deposition in chloride solutions[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2017, 92(4).
- [13] NAN T, YANG J G, CHEN B. Electrochemical mechanism of tin membrane electrodeposition under ultrasonic waves[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42: 731–737.
- [14] YANG J G, LEI J, PENG S Y, LVY L, SHIW Q. A new membrane electro-deposition based process for tin recovery from waste printed circuit boards[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 304: 409–416.
- [15] 杨建广, 雷 杰, 彭思尧, 李峻源, 何 静, 杨声海, 唐朝波, 陈永明. 一种从锡阳极泥中回收锡的工艺: 中国, CN201510043995.4[P]. 2015–05–20.  
YANG Jiang-guang, LEI Jie, PENG Si-yao, LI Jun-yuan, HE Jing, YANG Sheng-hai, TANG Chao-bo, CHEN Yong-ming. A process for recovering tin from tin anode mud: China, CN201510043995.4[P]. 2015–05–20.
- [16] 杨建广, 李峻源, 雷 杰, 杨声海, 何 静, 唐朝波, 陈永明. 一种基于盐酸–锡盐体系的退锡水及从废退锡水中回收锡的方法: 中国, CN201410011267.0[P]. 2014–04–23.  
YANG Jiang-guang, LI Jun-yuan, LEI Jie, YANG Sheng-hai, HE Jing, TANG Chao-bo, CHEN Yong-ming. Tin-stripping solution based on tin hydrochloride system and method tin recovery from waste tin-stripping solution: China, CN201410011267.0[P]. 2014–04–23.
- [17] 侯满州, 李成容, 王英利, 封家福, 詹先成, 李琳丽. 强电解质溶液粘度的研究[J]. *化学通报*, 2011, 74(4): 356–360.  
HOU Man-zhou, LI Cheng-rong, WANG Ying-li, FENG Jia-fu, ZHAN Xian-cheng, LI Lin-li. Study on the viscosity of strong electrolyte solution[J]. *Chemistry*, 2011, 74(4): 356–360.
- [18] 王萍辉. 超声空化影响因素[J]. *河北理工学院学报*, 2003, 25(4): 154–161.  
WANG Ping-hui. A study and analysis on influencing factor of the ultrasonic cavitation[J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2003, 25(4): 154–161.
- [19] 雷 杰. 铜锡多金属粉氯盐体系隔膜电积新工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2016.  
LEI Jie. A novel process based on membrane electrodeposition from metal fractions in the chloride system[D]. Changsha: Central South University, 2016.

## Separation of electronic components from waste printed circuit board and tin recovery in SnCl<sub>4</sub>-HCl system

LI Ling-chen, YANG Jian-guang, YAN Wan-peng, DING-long, NAN Tian-xiang, CHEN Bing

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Addressing the problems of serious environmental pollution, low efficiency, difficult to large-scale application and other issues in the separation of waste circuit board components and tin recycling process, a novel technology using an ultrasonic assisted process based on the SnCl<sub>4</sub>-HCl system was proposed. The technology adoption diaphragm electrowinning method recovered the tin from the tin stripping solution and regenerated the SnCl<sub>4</sub>-HCl stripping agent. The results show that, after 20 min at the reaction temperature of 50 °C, Sn<sup>4+</sup> concentration of 30 g/L, hydrochloric acid concentration of 4.0 mol/L, ultrasonic frequency of 40 kHz and ultrasonic power of 100 W, the waste circuit board components are separated completely. Under the conditions of temperature of 35 °C, current density of 200 A/m<sup>2</sup>, heteropolar distance of 5 cm, graphite as anode and stainless-steel as cathode, the diaphragm electrowinning was carried out for 8 h. The cathode obtained flat and compact tin with cathode current efficiency of 97.3% and tin purity of 99.9%. The SnCl<sub>4</sub>-HCl solution is regenerated from the anode liquid and the anode current efficiency is 88.8%, which can be used as the reaction liquid for ultrasonic stripping tin.

**Key words:** waste printed circuit board; components separation; tin; recovery; membrane electro-deposition

**Foundation item:** Project(51574294) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2018-06-25; **Accepted date:** 2019-01-30

**Corresponding author:** YANG Jian-guang; Tel: +86-731-88830470; E-mail: jianguang\_y@163.com

(编辑 李艳红)