

文章编号:1673-0062(2014)01-0046-09

废弃电路板回收技术与方法研究进展

唐德文,邹树梁,刘衣昌,刘益强

(南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:随着电子制造业飞速发展,废弃电路板急剧增加,如何有效处理废弃电路板并提高它的利用率已成为大家所关注的热点问题.废弃电子线路板如果处理不当将会对环境造成严重的污染,综合利用好废弃电路板又可产生巨大的经济价值.本文阐述我国进行废弃电子线路板回收和处理的重要性和紧迫性,在此基础上,分别对废弃电路板机械处理法、化学法、生物湿法冶金技术、超临界流体技术等回收与处理技术与方法的研究现状进行了综述,并对其研究重点和发展趋势做出展望.

关键词:废弃电路板;回收技术与方法;研究进展

中图分类号:X76 **文献标识码:**A

Research Development of Printed Circuit Board Recycling Technologies and Methods

TANG De-wen, ZOU Shu-liang, LIU Yi-chang, LIU Yi-qiang

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: With view to the current situation of waste printed circuit board (PCB) disposition in China, waste printed circuit boards will cause serious environmental pollution, and the use of waste printed circuit boards can be an enormous economic value. This paper introduced the great need and importance of PCB recovery and recycling, the main technologies and equipments including mechanical separation, chemical, biological hydrometallurgical technology, supercritical fluid technology. And for sustainable development, the author came up with a prospect on the further studies in this field.

key words: waste printed circuit board; recycling technology and method; research development

收稿日期:2013-11-04

基金项目:中国博士后基金资助项目(2013M542123);湖南省重大专项基金资助项目(2012FJ1007);湖南省自然科学基金资助项目(11JJ4035);湖南省教育厅基金资助项目(11C1089);衡阳市科技局基金资助项目(2011KG22);高等学校博士科研基金资助项目(2010XQD28)

作者简介:唐德文(1976-),男,湖南邵阳人,南华大学机械工程学院副教授,博士.主要研究方向:先进制造技术及装备.

0 引 言

当今 IT 技术发展极其迅速,加快了电子废弃物的产生以及家用电器的推陈出新,进而导致废弃电路板数量的急剧增加. 据调查,我国目前大约共有 6.5×10^9 台洗衣机、电视机及电冰箱急需处理. 预计至 2016 年底,我国 PCB 电路板将以 331×10^9 美元即占据全世界 46% 的产值而成为全球最大的 PCB 电路板生产基地^[2]. 我国正面临着被电子垃圾包围的危险. 废弃电路板中含有大量的有毒有害成分(如有机塑料、聚合溴化联苯及无机重金属等). 若不对其做出及时且有效的处置,则对环境的质量和人们的生活将造成不可估量的影响,如图 1.

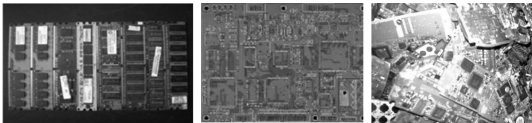


图 1 常用 PCB 线路板示意图

Fig.1 Commonly used PCB circuit board schematic

目前,我国尚有 80% 的废弃电路板没有得到充分有效的利用和处理,造成了废弃电路板内有效资源的浪费,对环境和动植物也产生严重污染. 但考虑到电路板含有大量有毒有害成分,若处理不当,则极易造成水土及空气污染,所以对它们既不能深埋或随意丢弃,又不能进行简单的焚烧处理. 值得注意的是,废弃电路板中含有某些比普通矿床高几倍甚至几十倍以上的重金属元素,其中所蕴含的经济价值是无比巨大的^[1],见表 1. 因

此,合理的对废弃电路板电子元器件与重金属的回收和利用,不仅可以缓解废弃物处理压力,防止二次污染,而且还可实现低成本、高效益处理.

表 1 电脑线路板中所含的物质成分的百分含量

Table 1 The percentage of material component in computer circuit boards

物质名称	百分含量 /%	物质名称	百分含量 /%	物质名称	百分含量 /%
树脂塑料	272	银	0.45	铂	0.03
锑	10	钴	0.07	锡	20
钡	0.11	溴化物	25	钽	0.17
铜	130	金	0.45	镧	0.02
锌	4	铈	0.04	镍	18
铍	0.08	铅	24	钼	0.14
铁	40	镉	0.34	汞	0.01

1 废弃电路板分类及特点

废弃电路板具有材料种类多、制造工艺复杂(主要制造工序有蚀刻、钻孔、照相、图形转移、孔金属化以及表面金属涂敷)等特点,若不对其进行妥善处理而直接填埋,会对环境造成污染. 例如土壤和地下水因废弃电路板中的聚氯乙烯、铅、汞等有毒成分渗入土壤而被污染;人体器官和组织则因为废弃电路板中的铬、铜、镍、金、银等重金属而受到不同程度的损害^[2-4]. 目前,基于用途的多样性,废弃电路板形成了种类及结构形式多样等特点. 例如,纸基板、合成纤维板以及玻璃布基板等废弃电路板是按绝缘材料特点分类的,见表 2. 而单、双、多及软板和平面板等废弃电路板又是按结构形式和用途分类的,见表 3.

表 2 按绝缘材料分废弃电路板分类及特点

Table 2 Classification and features of the PCBS according to the insulation materials

分类	材质	名称	代码	特点
刚性覆铜薄板	纸基板	酚醛树脂覆铜箔板	FR-1	经济性,阻燃
			FR-2	高电性,阻燃(冷冲)
			XXXPC	高电性(冷冲)
			XPC 经济性	经济性(冷冲)
		环氧树脂覆铜箔板	FR-3	高电性,阻燃
		聚酯树脂覆铜箔板		用于挠性板,工作条件在 105 ℃ 以下
	玻璃布基板	玻璃布—环氧树脂覆铜箔板	FR-4	优异介电性能、高机械性能、好的抗化学性和耐热性;紫外线阻断和自动光学检测兼容
		耐热玻璃布—环氧树脂覆铜箔板	FR-5	机械加工性良好,且较 FR-4 机械性能、介电性能、耐热性和耐潮性更高
		玻璃布—聚酰亚胺树脂覆铜箔板	GPY	耐高温达 400 ℃ 以上,无明显熔点,高绝缘性能,103 赫下介电常数 4.0,属 F 至 H 级绝缘材料
		玻璃布—聚四氟乙烯树脂覆铜箔板		良好的电气性能和较高机械强度,高频电路用

续表

分类	材质	名称	代码	特点
复合材料基板	环氧树脂类	纸(芯) - 玻璃布(面) - 环氧树脂覆铜箔板	CEM-1, CEM-2	(CEM-1 阻燃); (CEM-2 非阻燃)
		玻璃毡(芯) - 玻璃布(面) - 环氧树脂覆铜箔板	CEM3	阻燃
	聚酯树脂类	玻璃毡(芯) - 玻璃布(面) - 聚酯树脂覆铜箔板	GPY	强度高
		玻璃纤维(芯) - 玻璃布(面) - 聚酯树脂覆铜板		性能介于环氧树脂覆铜箔板和聚酯树脂覆铜箔板之间
特殊基板	金属类基板	金属芯型		Cu-invar-Cu 结构
		包覆金属型		刚性好、轻度高、散热性好
	陶瓷类基板	氧化铝基板	Al ₂ O ₃	
		氮化铝基板	AlN	机械应力强,强度高、导热率高、绝缘性优良;结合力强,防腐蚀;形状稳定性高;
		碳化硅基板	SiC	
		低温烧制基板		
	耐热热塑性基板	聚砜类树脂		加热后尺寸稳定性优异且耐热性能非常好
	挠性覆铜箔板	聚酯树脂覆铜箔板		耐热性好、电性能高、可挠性好
		聚酰亚胺覆铜箔板		

表 3 按结构形式分废弃电路板的结构、特点和用途

Table 3 The structure characteristics and uses of PCBS according to the form of the structure

名称	典型工艺	特点	板厚/mm	用途
单面板	采用层压纸板和玻璃布板加工制成	印制板缝缘基板的一面有印制导线	2 ~ 5	一般要求的电子设备
双面板	采用环氧纸板和玻璃布板加工制成	电路板的绝缘基板的两面都有印制导线,其上布线密度较高,能减小自身的面积和电子设备的体积	0.2 ~ 5	要求高电子设备,如计算机、仪器仪表等
多层板	内层导电图形与绝缘粘结片叠合压制而成,外层为敷箔板制成	由三层或三层以上的印制导线和绝缘材料层压合成的印制板,但制造工艺复杂,金属化孔的可靠性差,损坏时难以修复	1.2 ~ 2.5	元器件容量大,导线短而直,屏蔽性能高的电子设备
软板	以软层状塑料或其他软质绝缘材料为基材而制成	优点:可以卷绕、自由弯曲、折叠;能任意拉伸、旋转、按空间任意安排布局;很好的散热性;低返工性 缺点:过薄;载重性能差;检测难度大	0.25 ~ 1	有单层、双层和多层之分,可用于形状复杂的电子设备
平面板	采用专用胶将铜箔板热压到印刷线路基板上而制成	将导线镶入绝缘基板内使导线与基板表面齐平,一般会镀一层耐磨的金属在印制导线上		用于转换开关、电子计算机的键盘

2 废弃电路板回收技术国内外研究现状

目前,仍然有许多关键性问题阻碍着废弃电路板回收技术进一步的发展.例如,由于废弃电路板材料成分和制作方式不同,电路板单体颗粒度小,使电路板单体分离的难度增大;非金属材料中由于一些特殊添加剂的存在,使非金属材料的处置变得相当困难.近年来,国内外众多的学者对废

弃电路板的回收技术与方法已做了许多研究和总结,其中机械处理法、物理法、化学法、生物湿法冶金技术及超临界流体技术是废弃电路板最常用的回收和处理技术.

2.1 机械处理法

机械处理法是一种以废弃电路板不同的机械物理性能、不同有价金属的富集量以及不同成本的分离方法为分选标准的方法.废弃电路板的破碎是机械处理法中的关键步骤之一.目前,切碎

机、锤碎机、锤磨机和旋转破碎机 etc 是废弃电路板厂采用的主要电路板破碎设备,见图 2. Shun 等人研究废弃电路板破碎后颗粒的形状和大小对分选的效率 and 效果的影响,研究发现,金属基本上附着物在废弃电路板破碎颗粒达到 0.6 mm 大时,其解离率可达到 100 %^[5].



图 2 线路板回收再处理设备

Fig.2 Circuit board recycling processing equipment

日本 NEC 公司设计出了废弃电路板的两级破碎回收工艺流程^[6],见图 3. 其设计的基本思路如下:首先,电路板上存在着许多表面元件和穿孔元件,采用红外加热或者垂直和水平冲击这两级去除的方法,可使它们无损伤脱落,以便循环利

用;然后对余下的电路板采用加热、冲击和表面剥蚀的方法以使其表面上的 96% 的焊料脱落. 瑞士 Result 技术公司为实现对由多层复合材料构成的废弃电路板有效破碎,成功研制出一种新设备,其能在超音速下实现多层复合制件的有效破碎^[7]. Scandinavian Recycling AB (SR) 公司就新型机械处理方法和高效回收设备的开发方面做出了诸多有益探索^[8].

德国 Daimler-Benz Ulm Research Centre 成功研发出了一种旋转式废旧电路板破碎机. 其原理是根据废电路板中不同材料的磁性、电性和密度的差别进行分类,再通过安装着一套能够自由旋转的压碎环,使旋转切刀和固定切刀产生的剪切力使废弃电路板破碎. 预破碎、液氮冷冻、粉碎、分离和静电分选等为其基本的处理工艺工序. 该工艺有如下优点:1) 液氮冷冻对自动拆卸方法有利;2) 由于大量的热会在废弃电路板破碎时产生,因此为防止加热的废电路板融化焊料,先将废旧电路板放置在 -196 ℃ 的液氮中燃烧(氧化)一段时间,避免其产生有害气体;3) 分选出尺寸小于 0.1 mm 的废旧电路板颗粒,极大的方便了粉尘中贵金属的回收^[9].

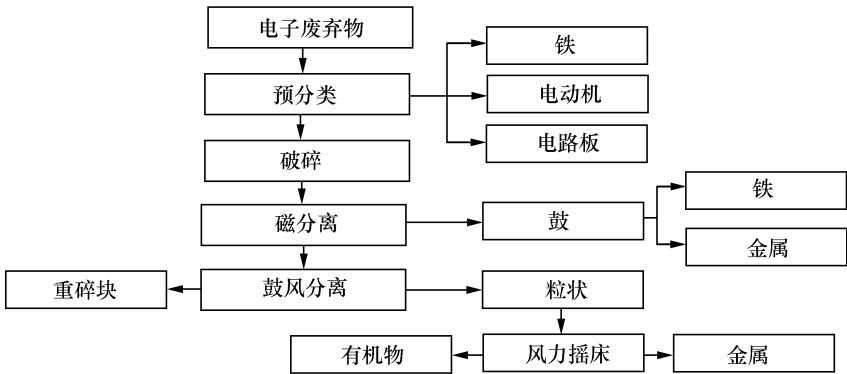


图 3 废旧电路板机械处理的方法

Fig.3 Mechanical processing method of waste circuit board

2.2 物理法

物理法包括拆卸、破碎、分选三个步骤. 其原理是依据废弃电路板内不同材料物理性能的差异进行分选的方法,方法简单易行是采用物理法回收分选废弃电路板的一个突出优点,但因所分选的产品并不能作为最终产品而必需进行二次分离处理,所以该方法又有分选效率低的缺点.

在拆卸方面,刘志峰等人^[10]采用液态介质加热和超声振动相结合的方法进行焊锡去除,实现

对废弃电路板的拆卸. 刘伟国^[11]为实现废弃电路板表面焊锡脱焊,采用空气、红外线、激光和液体四种加热的方法进行了对比研究,并成功建立了脱焊评价新方法以及电路板元器件拆卸力数学模型. 潘晓勇等人^[12]为了解决废弃电路板上的插装电子元器件的有效且自动拆解难题,专门设计出一套以钎料吹扫为前提的废弃电路板插装元器件拆解新工艺流程. 刘国勇^[13]等人采用空气加热方法,结合数值模拟技术对影响高效拆解废弃电路

板电子元器件的熔焊效率的原因进行了研究. 易荣华等人^[14]提出了一种能对废弃电路上的电子元器件进行自动纯物理拆卸的新型装置——螺旋拆卸装置,并对其结构与组成以及工作原理做了详细介绍. Cui 等人^[15]也致力于废弃电路板电子元器件无损拆解装置的创新性研究,他们在综合考虑了成本、效率、污染、损耗等众多因素的前提下,研制了一种既高效又节能环保的废弃电路板元器件无损拆解装置,见图 2.

在破碎方面,干法破碎和湿法破碎是废弃电路板破碎常见的两种方法. 干法破碎时会出现局部高温现象,这必然导致大量有毒气体和粉尘的产生,因此,加工的同时必须进行除尘和排风,以降低其对环境的污染和工作人员的伤害. 湿法破碎是在破碎过程中引入水,可有效解决局部高温和粉尘问题,但废水处理困难,回收成本高. 贺靖峰^[16]等针对废弃电路板中金属成分的回收工艺进行了创新型设计,大致工艺流程如下:首先对废弃电路板采用湿法破碎,然后依据破碎产品的粒度级进行分级,最后用变径分选床完成分选步骤,得到最终产品. 蓝巧武等^[17]为使废旧线路板的回收处理实现节能减排和有价金属高效回收的目标,采用高速涡流破碎和微分解离相结合的新工艺,整个工艺流程实行全封闭式处理,使得破碎过程二次污染小,金属回收率达到了 98%. 曾伟民等^[18]比较了冲击元件分别为刀片和锤头的冲击式破碎机与锤头式破碎机,就破碎效果而言,前者显然要优于后者. 梁翊翊等^[19]研制了一款针对微小废弃线路板的微型高速万能粉碎机,可实现尺寸为 10 mm * 10 mm * 1.5 mm 的微小废弃线路板物料粉碎.

在分选方面,常常把废弃电路板中各组分在密度、电性和磁性上的差异作为组分分选的依据,目前普遍采用的分选方法为密度分选、电磁分选以及化学分选等. Le 等人^[20]对废弃电路板的破碎产物进行分析,发现利用破碎物在高压电场或磁场所表现出的电性或磁性的差异能实现混合物有效分离. 如采用单一分选方法对废弃电路板破碎物进行分选,分选效果差,如采用磁电分选与密度分选相结合的方法,效果显著. 余璐璐等人^[21]针对传统的高压静电分选技术的缺点(分离效率低和产量低),研发出了风选——高压静电分选技术,实验得到金属纯度高,且回收率达 93.85%. 高压静电分选技术有其局限性,具体表现在静电分选效果受到破碎产物中含有大量的非

金属及粒度级极小的细非金属粉的严重影响. 为解决上述问题,周蕾^[22]在高压静电分选之前进行风力分选,该方法既保证了分选过程的稳定性,又保证了分选效率,使破碎废弃电路板混合颗粒组分富集,达到分选的目的.

2.3 化学法

化学法依据废弃电路板中不同组分具有不同的化学性质,进行不同提取方法. 其中,焚烧、热解以及湿法冶金技术是目前最常用的化学法.

焚烧法包括了普通焚烧与防氧化焙烧. 普通焚烧是利用焚化炉燃烧分解电路板破碎产物中的可燃物,使金属和难熔物富集. 防氧化焙烧法是在高温环境下将废弃电路板紧密地叠加在一起进行焙烧,使得可燃物燃烧碳化,线路板中的金属未被氧化. 焚烧法具有减容、减量、资源化等优点,但易产生 HBr、二噁英等剧毒物质,其工艺流程见图 4. Xiu^[23-24]提出了采用流化床焚烧方法研究废线路板资源化利用.

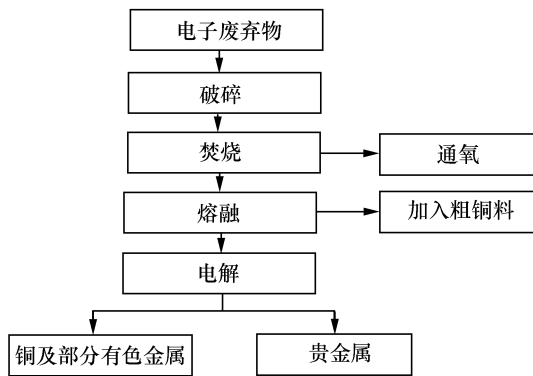


图 4 火法冶金工艺流程图

Fig. 4 Flow diagram of pyrometallurgy process

热解是使废弃电路板中的有机物在惰性气体保护下进行加热,当加热到一定温度时,有机物将发生分解反应,生成以气体形式存在的相对分子质量较低的碳氢化合物,将其从反应器中排出处理后再利用,接着利用物理法回收余下的固体物质(主要为金属、陶瓷和玻璃纤维混合物). 近几年来,众多科研工作者对废弃电路板热解的机理、特性、热解产物的分析与利用及工艺的优化等各方面做了大量研究^[25-28]. Bhaskar 等人^[29]对研究发现,废弃电路板热解后生成的产物包含液、气、固三种状态,液态产物主要有苯酚、对异丙基苯酚及含其他官能团的芳香族化合物;气态产物主要有二氧化碳、溴甲烷及丙烯等小分子烷烃等;固态

产物主要为玻璃纤维. 针对如何排放电路板热处理产物溴代二恶英的问题,冯涛^[30]对溴代二恶英的形成和抑制方法进行了研究. 丘克强和周益辉^[31]设计了对废弃电路板回收效率高的真空热解的装置^[32],见图 5,该装置对废弃电路板上的焊锡和有机物质进行同步回收,从而达到有效分离焊锡和其他金属的目的.

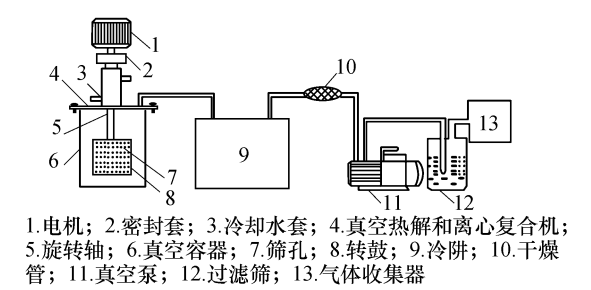


图 5 废弃电路板真空热解装置

Fig. 5 Equipment of PCBS vacuum pyrolysis

湿法冶金使用强酸(硝酸、王水、硫酸)、强碱、强氧化剂、络合剂或几种试剂,混合溶解线路板中的金属,把金属转为液相,与非金属等物质分离,然后采取置换、电解、浮选、沉淀、离子交换、蒸馏结晶等工艺回收提纯金属. 由于湿法冶金方法的高污染性,逐渐出现了许多环保型的化学处理方法,如加压氨浸法、酸化氯化铁溶液/过硫酸铵—氯化钠体系/双氧水浸法、盐酸/正丁胺/硫酸铜法、碘化法、空气氧化—氨法浸法等^[32-33],其工艺流程见图 6. 王继峰等^[34]为有效从废弃电路板中回收得到超细铜粉而设计了一套新型回收工艺:首先通过物理分选得到含铜量较高的组分,然后对其进行氧化氨浸处理得到浸出液,接着对浸出液进行萃取,再经过二次还原,最后通过沉淀得到铜粉(铜粉粒度可达到 1.5 μm). Kim^[35]采用石硫合剂、次氯酸盐、溴化法相结合的方法提取线路板中的金,取得了良好的效果.

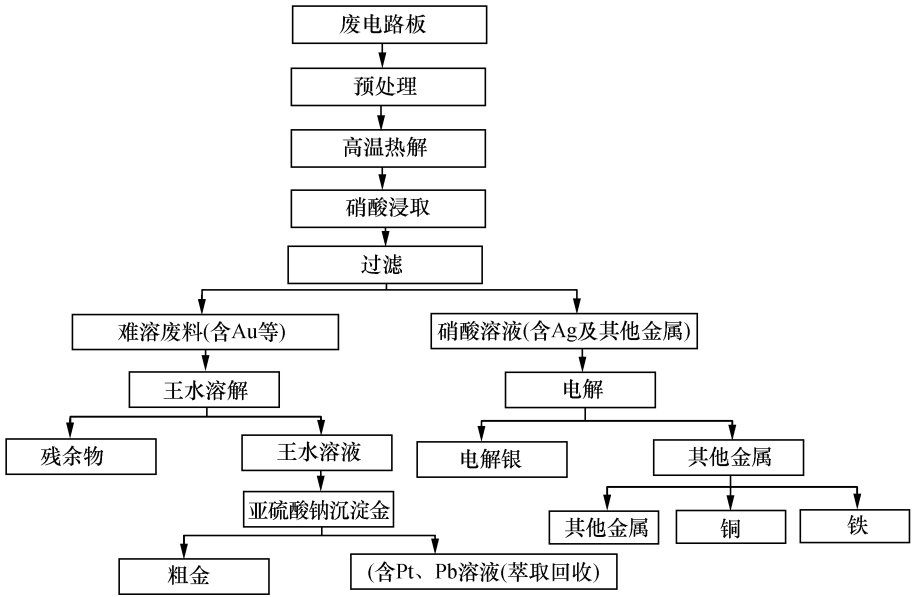


图 6 湿法处理技术工艺流程图

Fig. 6 Flow diagram of wet processing process

2.4 生物湿法冶金技术

生物湿法冶金技术借助微生物的生物吸附、积累和浸出性,使废弃电路板中的铬、铜、镍、金、银等金属溶解到含有微生物的浸出液中. 周培国等^[36]研究了细菌的生成和铜的浸出效果与活性炭的添加量之间的关系. Kamberovic^[37]研究了嗜酸性细菌混培物(MCAB)技术对废弃印刷线路板

中有价金属影响因素,并建立了 MCAB 浸出 MPCBs 机理模型. 张婷等^[38]利用聚合酶链式反应——变性梯度凝胶电泳技术,对接种物为嗜酸性细菌废弃线路板生物浸出实验进行分析,分析结果表明,在嗜酸性细菌的作用下,48 h内铜的浸出率能达到 96.36%,其工艺流程^[40]见图 7.

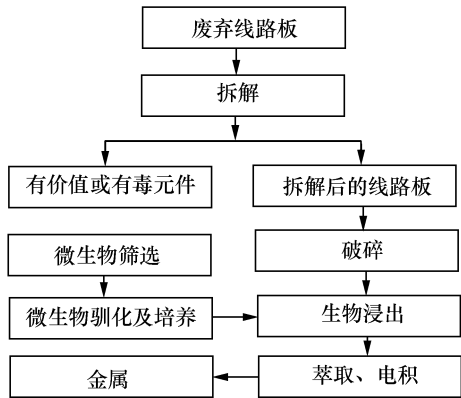


图 7 废弃线路板生物浸出工艺流程
Fig. 7 Flow diagram of abandoned PCB biological leaching

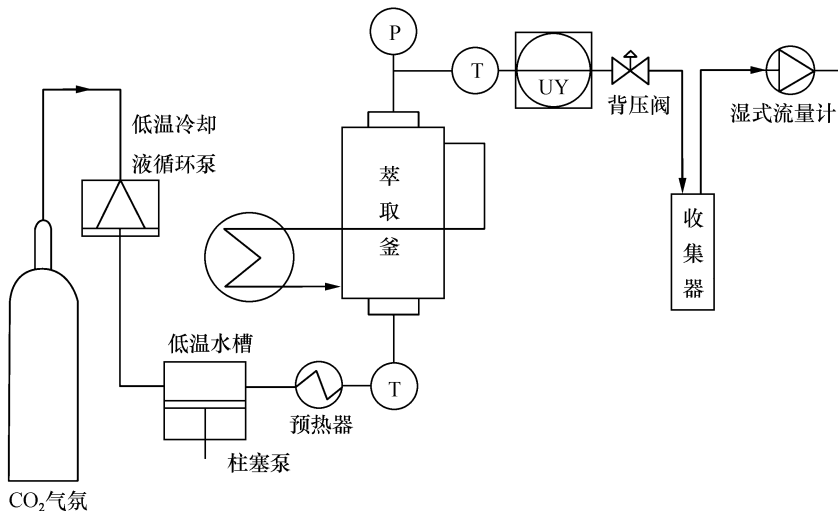


图 8 超临界分离萃取流程图
Fig. 8 The flow chart of supercritical extraction

3 结 论

随着信息技术的快速发展,电子垃圾数量迅猛增长,如何低成本、高效无污染回收废弃电路板中的有价值物质,已经成为国际研究热点难点问题.废弃电路板的分离方法多,其机械分离具有工艺简单、易操作、回收成本低,环境友好等优点,但回收的成品还需进一步分离,而且设备昂贵;化学方法具有处理的金属产品纯度高的优点,但处理过程中废水废气废渣的产生加大了后处理的难度;生物分离法不仅成本低,处理工艺简单易行,而且实现了对环境的低污染,但其浸取时间过长、效率过低等明显不足.超临界流体法虽然具有如回收率高、工艺流程简单、环境性能好等优点,但该技术相关理论不成熟,且所需专业设备昂贵.因此,

2.5 超临界流体分选技术

超临界流体技术(Supercritical Fluids, SCF)是用超临界流体特殊的物性,使得废弃电路板中的粘结层被破坏,从而实现电路板层与层之间的充分分离,进而使电路板得以完全回收.李新宇等人^[39]利用有限元分析软件模拟,研究了在超临界 CO₂ 的作用下废弃线路板,其内部应力分布及其变化规律,其工艺流程见图 8.为回收具有高附加值的阻燃剂,王璟等^[40]研究了超临界 CO₂ 萃取条件下,萃取时间、压力、温度等参数对废电路板磷酸三苯酯(TPP)萃取效率的影响.刘志峰等^[41]对有无超临界 CO₂ 作用下的线路板分层效果方面做了对比实验,研究发现,超临界 CO₂ 流体促进了分层过程,优化了分层效果.

开展操作简单、工艺性好、回收效率高、环境友好的处理设备和工艺研究是废弃电路板低成本、高效率的回收与利用的关键问题.

参考文献:

[1] 张磊,陈亮,陈东辉. 废弃电子印刷线路板中 Cu 和 Pb 的浸出实验[J]. 环保科技,2007,13(2):25-28.
[2] XIA S D, WANG J H, XIE G, et al. Research on technology of electronic waste resourceization[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(S2): 138-141.
[3] 黄文平,李兴福. 线路板含铜污泥资源化与处置技术研究进展[J]. 化工技术与开发,2011,40(9):44-48.
[4] 杨继平,潘晓勇,向东,等. 废弃旧路板物理拆解方法及其试验验证[J]. 机械工程学报,2010,46(23): 192-198.

- [5] Zhang S, Frosserg E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap [J]. Powder Technology, 1999, 105 (1/2/3): 295-301.
- [6] Yokoyama S, Ikuta Y, Iji M. Recycling system for printed wiring boards with mounted parts [C]//EcoDesign'99: First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Washington D C, USA: Ieee Computer Society Press, 1999: 814-817.
- [7] 牛冬杰, 马俊伟, 赵由才. 电子废弃物的处理处置与资源化 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 80-101.
- [8] 王野平, 李晓祥. 机械分离回收方法处理电子废弃物探讨 [J]. 上海环境科学, 2009, 28 (2): 80-83.
- [9] Zhou Y H, Qiu K Q. A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards [J]. Journal of Hazardous materials, 2010, 175 (1/2/3): 823-828.
- [10] 刘志峰, 李辉, 胡张喜, 等. 废旧家电中印刷电路板元器件脱焊技术研究 [J]. 家电科技, 2007, 229 (1): 32-34.
- [11] 刘伟国. 电路板元器件拆卸方法及拆卸力研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [12] 潘晓勇, 龙旦凤, 杨继平, 等. 废旧电路板钎料吹扫去除试验研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (19): 192-198.
- [13] 刘国勇, 张少军, 朱冬梅, 等. 废线路板电子元器件高效拆解熔焊效率影响因素研究 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38 (4): 596-601.
- [14] 易荣华, 陈晓勇, 沈玲珑, 等. 自动拆卸废弃电路板上电器元件装置研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2007, 194 (9): 46-48.
- [15] Cui J, Forsberg E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 99 (3): 243-263.
- [16] 贺靖峰, 段晨龙, 何亚群, 等. 废弃电路板湿法破碎与分选回收金属研究 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (4): 112-116.
- [17] 蓝巧武, 刘鑫. 废旧线路板环保解离回收处理技术 [J]. 广东化工, 2011, 38 (21): 265-268.
- [18] 曾伟民, 朱海珍, 叶子婕, 等. 生物湿法冶金技术回收废弃线路板中有价金属的研究进展 [J]. 有色金属科学与工程, 2013, 4 (1): 26-30.
- [19] 梁翹翹, 张小平, 舒长河. 一款微型高速万能粉碎机粉碎废旧线路板性能分析 [J]. 矿冶, 2009, 18 (1): 72-77.
- [20] Le H L, Jeong J, Lee J C, et al. Hydrometallurgical process for copper recovery from waste printed circuit boards (PCBs) [J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, 2011, 32 (2): 90-104.
- [21] 余璐璐. 破碎废旧电路板风选—高压静电分选技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [22] 周蕾. 破碎废旧电路板混合颗粒物料风力—高压静电复合分选特性与优化设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [23] Xiu F R, Zhang F S. Recovery of copper and lead from waste printed circuit boards by supercritical water oxidation combined with electro kinetic process [J]. Journal of hazardous materials, 2009, 165 (1/2/3): 1002-1007.
- [24] Xiu F R, Zhang F S. Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 178 (1): 628-634.
- [25] Goosey M, Kellner R. Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards [J]. Circuit World, 2003, 29 (3): 33-37.
- [26] 朱灶. 废旧线路板真空热解油合成热固性酚醛树脂研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [27] Malkow T. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal [J]. Waste Management, 2004, 24 (1): 53-79.
- [28] 湛志华, 丘克强. 添加物对废弃环氧电路板真空热解产物的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, 42 (8): 2234-2238.
- [29] Bhaskar T, Kaneko J, Muto A, et al. Pyrolysis studies of PP/PE/PS/ PVC/HIPS-Br plastics mixed with PET and dehalogenation (Br, Cl) of the liquid products [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2004, 72 (1): 27-33.
- [30] 冯涛. 电路板热处置过程中溴代二恶英生成和抑制的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [31] 丘克强, 周益辉. 一种真空条件下高效回收废弃电路板的方法及装置: 中国 CN101444784 [P]. 2009-06-03.
- [32] 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.
- [33] 李晶莹, 黄璐, 徐秀丽. 废旧线路板次氯酸盐法浸金的实验研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5 (2): 453-456.
- [34] 王继峰, 李静, 杨建广. 一种从废旧电路板中回收铜的新工艺 [J]. 湿法冶金, 2012, (31) 2: 106-109.
- [35] Kim E Y, Kim M S, Lee J C, et al. Selective recovery of gold from waste mobile phone PCBs by hydrometallurgical process [J]. Journal of hazardous materials, 2011, 198: 206-215.
- [36] 周培国, 郑正, 彭晓成, 等. 活性炭对细菌浸出线路板中金属铜的影响研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4 (6): 1426-1430.

山地车零部件各大模块的划分及其配置规则的确定都在功能结构规划设计阶段完成,山地车零部件模块划分与可供选择的类型如表 2 所示。

表 2 山地车基本组件属性表
Table 2 Basic component attribute table of mountain bike

序号	零部件名称	类型
1	车把	{直握式,立握式,垂握式,手提式,混合式}
2	变速系统	{18 速摩擦变速系统,6 速定位式变速系统}
3	调速控制器	{转把式变速把,拇指式变速把}
4	刹车系统	{铝合金刹车系统,油压式碟刹系统,机械式碟刹系统}
5	避震系统	{前避震型,前后避震型}
6	避震器	{阻力胶式,弹簧式,气压式,油压式}
7	中轴	{A 型,B 型}
8	多级飞轮	{五飞,六飞,七飞}
9	多级链轮	{双链轮,三链轮}
10	车圈	{铝合金圈,钢圈}

4 总 结

本文从面向产品配置的角度,在产品平台的基础上,结合产品功能结构原理模型等信息集成平台形成产品族设计链,建立可视化产品数据三视图,为产品的快速变型设计和敏捷配置提供充分的技术支持,从而实现产品全生命周期的快速

配置.最后以山地自行车为例对研究方法进行了说明,该配置方案对同行业的其他产品配置具有一定的借鉴意义,同时对其他行业的配置设计也有一定的借鉴与指导意义。

参考文献:

[1] Sabin D, Weigel R, Weigel R. Product configuration frameworks a survey [J]. IEEE Intelligent System, 1998,13(4):42-49.

[2] 贾延林. 模块化设计[M]. 北京:机械工业出版社,1993.

[3] Stone R B, Wcadams D A, Kayyalethekkel V J. A product architecture-based conceptual DFA technique [J]. DesignStudies, 2004,25(3):301-325.

[4] 何莹. 关系数据库的模式抽取[J]. 信息技术, 2009,33(8):117-120.

[5] Du X H, Jiao J X, Tseng M M. Architecture of product family: fundamentals and methodology [J]. Concurrent Engineering: Research and Application, 2001,9(4):309-325.

[6] Siddique Z. Common platform develop: design for product variety [D]. Atlanta, Ga., USA: Georgia Institute of Technology, 2000.

[7] 杨青海. 大批量定制原理与若干关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[8] 高飞,肖刚,潘双夏,等. 产品功能模块划分方法[J]. 机械工程学报, 2007,43(5):29-35.

[9] 李军鹏. 面向大规模定制的复杂产品模块规划方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

[10] 谢健文. 产品族模型快速构建与智能配置关键技术研究[D]. 广州:广东工业大学,2003.

[39] 李新宇,刘志峰,刘光复,等. 超临界 CO₂ 环境下线路板分层机理的模拟与分析[J]. 现代制造工程, 2007(8):1-5.

[40] 王璟,王宏涛,李军,等. 超临界 CO₂ 萃取废电路板中阻燃剂的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008,47(4):547-551.

[41] 刘志峰,章王生,张洪潮,等. 超临界 CO₂ 流体环境中线路板分层实验分析[J]. 环境工程学报, 2011,5(7):1617-1622.

(上接第 53 页)

[37] Kamberovic Z J. Hydrometallurgical process for extraction of metals from electronic waste-part ii: development of the processes for the recovery of copper from Printed Circuit Boards (PCB)[J]. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 2011,17(3):139-149.

[38] 张婷,朱能武,程丹,等. 嗜酸性细菌浸出废旧线路板过程中微生物群落的聚合酶链式反应变性梯度凝胶电泳分析[J]. 过程工程学报, 2012,12(3):466-471.