



当代
杰出青年
科学文库

电子废物的物理分选 理论与技术

赵跃民 段晨龙 何亚群 著

当代杰出青年科学文库

电子废物的物理分选理论与技术

赵跃民 段晨龙 何亚群 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以电子废物资源化处理中的难点——废弃印刷电路板为例,系统地介绍了废弃电路板物理分选理论与技术,提出了电子废物高效、洁净、低成本的处理方法,是作者在电子废物资源化处理领域中的研究总结。全书共分为三篇:第一篇从废弃电路板力学性质和破碎解离机理的研究入手,提出了废弃电路板破碎分形模型和高效解离方法。第二篇进行了废弃电路板磁选、静电分选、涡电流分选和脉动气流分选的研究,建立了废弃电路板干法分选的基础理论与工艺。第三篇应用 Falcon SB40 高效离心分选机和变径水介质分选床分选回收废弃电路板中的金属,建立了废弃电路板湿法分选工艺。

本书涉及资源与环境学科的交叉领域,可供环境工程和矿物加工工程等专业的科学研究和工程技术人员参考,也可作为相关领域研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子废物的物理分选理论与技术/赵跃民,段晨龙,何亚群著. —北京:科学出版社,2009

(当代杰出青年科学文库/白春礼主编)

ISBN 978-7-03-024385-0

I. 电… II. ①赵…②段…③何… III. 电子设备-废物处理 IV. X76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 053862 号

责任编辑:周巧龙 沈晓晶/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 4 月第一次印刷 印张:31 3/4

印数:1—2 000 字数:622 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

近年来,资源循环利用及节能减排成为我国社会发展的重要理念。电子废物资源化处理作为资源循环利用的一个分支,是多学科交叉领域新的学科生长点,也是当前国际资源与环境领域研究的热点问题。电子废物的资源化处理既能保护环境、节约能源,又能实现二次资源的循环利用,受到了环境工程、矿物加工工程和冶金工程等学科的科学研究和工程技术人员广泛关注。

在电子废物各种资源化方法中,电子废物的物理分选理论与技术是重要的研究方向,具有高效、洁净、低成本的特点。《电子废物的物理分选理论与技术》一书重点阐述了作者近年来利用物理选矿方法处理电子废物中废弃电路板的研究成果,主要包括废弃电路板高效破碎解离,废弃电路板干法分选和湿法分选的理论、技术、工艺和应用。该书作者赵跃民教授是国家杰出青年基金获得者、教育部长江学者奖励计划特聘教授,多年来从事矿物加工工程领域的研究,在国内较早应用物理选矿方法处理电子废物,做出了突出贡献,取得了一系列创新性成果。这些成果在国家杰出青年基金项目“矿物资源工程”(项目编号:50025411)和国家自然科学基金项目“电子废弃物高效洁净分选回收的基础研究”(项目编号:50574094)等项目中都有显著体现。

《电子废物的物理分选理论与技术》是我国第一部以废弃印刷电路板为例,系统阐述电子废物物理分选理论与技术的专著,在理论研究、试验方法、数值手段和工程应用等方面都有重要创新和较高学术价值。

我衷心祝贺该书的出版,相信该书的出版必将进一步推动电子废物资源化处理领域的理论和应用研究。对促进二次资源的循环利用,实现我国循环经济和节能减排的目标,无疑具有重要的意义。



中国工程院院士
2009年3月3日

前 言

随着科学技术的迅猛发展,电子产品更新换代的周期越来越短,由此而产生的电子废物每年以 18% 的速度增长,成为世界上增长最快的垃圾。据统计,目前德国每年产生的电子废物达 150 万 t、法国 150 万 t、芬兰 10 万 t,整个欧洲约 600 万~800 万 t,美国产生的电子废物占全美垃圾量的 2%~5%。从 2004 年起,我国每年至少有 500 万台计算机、5000 万部手机、500 万台电视机、400 万台冰箱、500 万台洗衣机进入报废期。全世界电子废物中的 80% 出口至亚洲,其中又有 90% 进入了中国,电子废物已经成为影响我国环境安全的重大问题。与此同时,我国有色金属需求量增长迅速,10 种常用有色金属总产量 2004 年增长率达 17.53%,并连续三年居世界首位,一些重要的有色金属资源因资源匮乏或开采困难等原因而供不应求。矿产资源高效开发和二次资源循环利用已列入国家中长期科学和技术发展规划纲要,提高我国二次金属资源利用率对于建立和完善我国金属资源长期保障体系至关重要。实现电子废物的资源化处理,有利于防治污染,保护环境;有利于资源的循环利用,并节省开采、冶炼、加工需要的大量能源,促进资源的可持续利用。

电子废物资源化研究的内容很广泛,其中废弃电路板的资源化研究是重点和难点。随着电子产业的高速发展,印刷电路板被广泛地运用于信息、通信、消费性电子、军事、航天等领域。当这些电子设备报废时,大量的废弃印刷电路板也随之产生。废弃电路板潜在价值很高,包含了有色金属和稀贵金属近 20 种,所含金属的品位相当于普通矿物中金属品位的几十倍至上百倍,1t 电路板中含有 80~1500g 金和 160~210kg 铜,这相当于美国金矿品位的 40~800 倍、铜矿品位的 30~40 倍。与此同时,电路板中含有的重金属和含溴阻燃剂对土壤、环境、生物造成的潜在危害也是不可低估的,受利益驱动,采用简单酸溶、冲天炉焚烧等方式从废弃电路板中提取金属造成生态破坏的事件时有发生。因此采用高效洁净方法,实现废弃电路板的资源化迫在眉睫。

中国矿业大学从 1998 年开始运用机械物理方法进行废弃电路板资源化的研究,在国家杰出青年基金项目“矿物资源工程”(项目编号:50025411)、国家自然科学基金项目“电子废弃物高效洁净分选回收的基础研究”(项目编号:50574094)、教育部博士点基金项目“电子废弃物干法分选回收的基础研究”(项目编号:20030290015)以及煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室开放基金项目“主动脉动气流场场粒群分离行为数值模拟”(项目编号:CPEUKF06-11)等资助下,取

得了一系列创新性的成果,提出了电子废物高效洁净物理分选理论,发明了电子废物高效、洁净、低成本分选回收工艺。本书的主要内容是作者和其团队在此期间的研究总结,反映了作者近年来在电子废物资源化处理领域的最新研究成果。

全书共分为三篇:第一篇从废弃电路板力学性质和破碎解离机理的研究入手,提出了废弃电路板破碎分形模型和高效解离方法。第二篇进行了废弃电路板磁选、静电分选、涡电流分选和脉动气流分选的研究,建立了废弃电路板干法分选的基础理论与工艺。第三篇应用 Falcon SB40 高效离心分选机和变径水介质分选床分选回收废弃电路板中的金属,建立了废弃电路板湿法分选工艺。课题研究过程中,团队成员曹亦俊、温雪峰、张洪建、石常省、柴晓兰、王海锋、宋振玲、叶瑾玲、王卓雅、宋树磊、王全强等研究生付出了辛勤劳动。本书的编辑和出版得到了科学出版社及本书责任编辑的大力支持,在此一并表示感谢。

由于时间以及作者水平所限,书中错误和不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2009 年 3 月

目 录

序

前言

第 0 章 绪论	1
0.1 电子废物的概念	1
0.2 电子废物资源化的背景	3
0.3 废弃电路板的资源化处理	6
参考文献	7

第一篇 废弃电路板资源化处理现状及破碎研究

第 1 章 废弃电路板资源化处理现状	15
1.1 引言	15
1.2 印刷电路板的定义及其材料组成	15
1.3 废弃电路板的危害和回收利用价值	19
1.4 废弃电路板资源化研究现状	21
参考文献	41
第 2 章 废弃电路板材料及力学特性研究	44
2.1 引言	44
2.2 废弃印刷电路板材料性能分析	44
2.3 废弃电路板的物理性质	48
2.4 废弃电路板的力学特性研究	50
2.5 小结	64
参考文献	64
第 3 章 废弃电路板的破碎解离研究	66
3.1 引言	66
3.2 废弃电路板的粗碎研究	66
3.3 废弃电路板的破碎解离研究	71
3.4 废弃电路板的湿法破碎研究	93
3.5 废弃电路板破碎的分形机理研究	103
3.6 小结	130
参考文献	131

第二篇 废弃电路板的干法分选理论与技术

第4章 废弃电路板中磁性物料的回收	135
4.1 引言	135
4.2 废弃电路板中各种物料的磁性性质和实验方法	135
4.3 废弃电路板磁选实验结果及结论	137
参考文献	138
第5章 $-2+0.074\text{mm}$ 粒级废弃电路板中金属富集体的资源化	139
5.1 引言	139
5.2 试验方法	139
5.3 电晕电流的分布规律及对物料分选的影响	140
5.4 废弃电路板颗粒在高压电场中动力学特性的研究	159
5.5 电极结构、电压、转速分别对 $-2+0.074\text{mm}$ 粒级废弃电路板静电分选的影响	174
5.6 多因素对 $-2+0.074\text{mm}$ 粒级废弃电路板中金属富集体回收的影响	181
5.7 小结	213
参考文献	213
第6章 涡电流分选机理及应用	216
6.1 引言	216
6.2 涡电流分选设备及分选机理	216
6.3 涡电流分选应用	219
参考文献	224
第7章 脉动气流分选机理及应用	225
7.1 引言	225
7.2 气流分选原理	225
7.3 阻尼式脉动气流分选机理及应用	230
7.4 主动式脉动气流分选机理及应用	237
7.5 主动式脉动气流分选工业性应用	269
7.6 废弃电路板干法破碎——干法分选的工艺	285
7.7 小结	286
参考文献	286

第三篇 废弃电路板的湿法分选理论与技术

第 8 章 离心复合力场回收废弃电路板中金属的基础研究	291
8.1 引言	291
8.2 Falcon 离心分选机组成及分选过程	291
8.3 离心复合力场内颗粒的沉降规律	293
8.4 Falcon 离心机的分离动力学理论	295
8.5 颗粒在 Falcon 离心机中的动力学机理研究	302
8.6 离心复合力场数值模拟	313
8.7 -0.074mm 粒级废弃电路板分选实验研究	330
8.8 -0.5mm 粒级废弃电路板分选实验研究	360
8.9 小结	379
参考文献	380
第 9 章 变径水介质分选床回收废弃电路板中金属的研究	382
9.1 引言	382
9.2 分选工艺设计及原理分析	382
9.3 颗粒在变径体流场中的运动规律	385
9.4 等沉颗粒的变速运动分离学说	392
9.5 流场的分布变化规律及对物料分选的影响	397
9.6 不同粒级线路板物料的多因素正交实验分选研究	422
9.7 水流量变化对流场影响的研究	473
9.8 线路板各粒级金属物料的深度富集分离实验	478
9.9 $-0.25+0.125\text{mm}$ 粒级物料金属深度富集的全因素水平正交实验	483
9.10 废弃电路板湿法破碎-湿法分选的工艺	493
9.11 小结	494
参考文献	495

第 0 章 绪 论

0.1 电子废物的概念

电子废物 (waste electric and electronic equipment) 俗称电子垃圾, 是指废弃的电子电器设备及其零部件, 包括生产过程中产生的不合格设备及其零部件, 维修过程中产生的报废品及废弃零部件, 消费者废弃的设备^[1]。

在中国, 人们常把各种接近其“使用寿命”终点的电子产品通称为“电子废物”, 主要包括各种使用后废弃的个人计算机、通信设备、电视机、VCD 机、音响、复印机、传真机等常用小型电子产品, 电冰箱、洗衣机、空调等家用电子电器产品, 以及程控主机、中型以上计算机、车载电子产品和企事业单位淘汰的精密电子仪表等^[2]。随着电子技术的广泛应用, 电子产品已深入到人类生产生活的各个方面, 并且还在不断延伸。因此, 对电子废物具体内容给出准确的界定是不可能的。各国在研究和制定本国电子废物问题解决方案时, 通常会根据自身的实际情况, 选择一些有代表性的电子产品分析。例如, 欧盟在制定其废弃电子电器设备 (waste electronics and electricity equipment, WEEE) 管理的相关条例中, 确定了一个比较宽泛的定义, 几乎涵盖了电子和机电产品的全部领域。

美国 and 加拿大目前还没有对电子废物管理采取全国性的立法限制, 电子废物所指的范围并不明确, 但从研究者的视角来看, 一方面关注技术更新和产品淘汰速度非常快的计算机、通信及相关外围设备废弃后的循环利用问题, 另一方面则关注已经被认定为危险废物的铅、汞等重金属物质的控制, 特别是含有大量重金属铅的废弃计算机显示器和电视机显像管, 这与欧盟管理条例的侧重点是一致的。在《巴塞尔公约》文件中电子废物指电子电器废物, 并对电子电器废物的分类进行了详细规定, 见表 0-1^[3]。

中国台湾、日本的电子废物管理法已分别于 1998 年和 2000 年开始实施, 但包含的产品范围比较狭窄。第一步先提出大型家用电器的回收处理问题, 仅包含洗衣机、电冰箱、电视机和空调 4 类产品; 第二步才将计算机等信息技术产品纳入管理范围。

从 2001 年起, 我国信息产业部 (现工业和信息化部)、国家发展和改革委员会、国家环境保护总局 (现环境保护部) 就分别起草制定我国的废弃电子信息产品的污染管理办法。经过 5 年的酝酿修改, 目前由信息产业部牵头起草制定的《电子信息产品污染防治管理办法》已于 2006 年 2 月 28 日由信息产业部、国家

表 0-1 《巴塞尔公约》中对电子废物的分类

电子电器废物	
视为危险废物的 (A1180)	视为非危险废物的 (B1110)
废旧电器和电子组件或零件含有成分为名录 A 所列蓄电池和其他电池、汞开关、阴极射线管玻璃和其他活化玻璃、多氯联苯 (PCB) 电容器或污染了附件 I 中所列出的物质, 如镉、汞、铅、多氯联苯, 其造成的污染程度足以具有附件 III 所列的特性 (注意名录 B 中 B1110 的相关条目)	仅由金属或合金构成的电子装置; 电器装置和电子装置或碎片, 包括印刷电路板不附有名录 A 所列的蓄电池和其他电池、汞开关、阴极射线管玻璃和其他活化玻璃、PCB 电容器或污染了附件 I 中所列出的物质 (如镉、汞、铅、PCB), 污染的程度或对此类物质进行清除后不致使其具有附件 III 中所列出的特性 (注意名录 A 中的有关条目 A1180); 用来直接再利用而不是回收处理或最终废弃的电气或电子装置 (包括印刷电路板、电子元件及电线电缆)

发展和改革委员会、商务部、海关总署、工商行政管理总局、国家质量监督检验检疫总局、国家环境保护总局 (现环境保护部) 联合发布, 并于 2007 年 3 月 1 日施行^[4]。由国家环境保护总局牵头起草的《电子废物污染环境防治管理办法》已于 2005 年 10 月 20 日征求意见完毕, 2008 年 2 月 1 日开始实施。国家发展和改革委员会牵头制定的《废旧家电及电子产品回收处理管理条例》目前还在征求意见中。

在信息产业部制定的《电子信息产品污染防治管理办法》中, 电子信息产品的定义是“采用电子信息产品制造的电子雷达产品、电子通信产品、广播电视产品、计算机产品、家用电子产品、电子测量仪器产品、电子专用产品、电子元器件产品、电子应用产品、电子材料产品等产品及其配件”。而国家环境保护总局制定的《电子废物污染环境防治管理办法》中将电子废物分为两类, 即电子废物和电子类危险废物。其定义为“电子废物, 是指废弃的电子电器产品、电子电气设备及其废弃零部件、元器件, 包括工业生产及维修过程中产生的报废品; 旧产品或设备翻新、再使用过程产生的报废品; 消费者废弃的产品、设备; 法律法规禁止生产或未经许可非法生产的产品和设备; 根据国家电子废物名录纳入电子废物管理的物品、物质。电子类危险废物, 是指列入国家危险废物名录或者根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有危险特性的电子废物。包括含铅酸电池、镉镍电池、汞开关、阴极射线管和多氯联苯电容器等的废弃电子电器产品或电子电气设备等”。由上述两个“污染防治管理办法”可以看出, 我国制定的法律文件对电子产品的定义也是一个相对宽泛的定义, 国家环境保护总局的定义更注重其中的有害成分, 而国家发展和改革委员会的定义则更加具体。

目前, 电子废物的分类尚没有一个统一的办法。一般文字资料以电子废物大

小分类的较多,根据用途分类或按所用材料分类的方法也曾有论述。在特殊情况下,还可以按电子废物对生态、环境的危害性来分类等。欧盟在《废弃电子电气设备处理指令》中,将电子产品分成如表 0-2 所示的产品大类^[5]。

表 0-2 欧盟关于废弃电子产品和机电产品处理指令的产品分类

产品大类	具体产品种类
大型家电	电冰箱、制冷机、洗衣机、烘干机、洗碗机、电炉、微波炉、电热取暖器、电风扇、空调
小型家电	吸尘器、地毯清扫机、电熨斗、烤面包机、煎锅、磨咖啡机、电动刀、煮咖啡机、电动牙刷、剃须刀、电子钟、电子秤、吹风机
IT 和通信设备	大型主机、小型机、打印机、个人计算机、笔记本电脑、复印机、电动打字机、计算器、终端、传真机、电话机、手机、自动接听设备
消费电器	收音机、电视机、录像机、录像播放机、音响设备、电子乐器
照明设备	荧光灯、高压钠灯和其他金属卤化物灯、低压钠灯、其他照明设备
电子电机工具	电锯、电钻、电动缝纫机
电动玩具	电动火车、电动汽车、手持电子游戏机、电子游戏机
医用设备	放射治疗设备、心电图设备、透析设备、辅助呼吸机、放射性药物、实验检查设备、分析设备、冷冻设备
电子监控设备	烟雾探测器、热量调节装置、温度控制器
自动售货机	自动饮料售货机、自动商品售货机

0.2 电子废物资源化的背景

随着高新技术的迅猛发展,电子产品更新换代的周期越来越短,由此而产生的电子废物每年以 18% 的速度增长,成为世界上增长最快的垃圾。据统计,目前芬兰每年产生的电子废物达 10 万 t、德国 150 万 t、法国 150 万 t,整个欧洲为 600 万~800 万 t,美国电子废物占全美垃圾量的 2%~5%^[6]。从 2004 年起,我国每年将至少有 500 万台计算机、5000 万部手机、500 万台电视机、400 万台冰箱、500 万台洗衣机进入报废期,这尚不包括随身听、音箱、洗碗机、微波炉等小件家电。目前,我国电视机的社会拥有量为 4 亿台,且每年新增 2000 万台左右,而每年报废却仅为 480 万台^[7]。全世界电子垃圾中的 80% 出口至亚洲,其中又有 90% 进入了中国,电子垃圾已经成为影响我国环境安全的重大问题^[8]。

2002 年 2 月 25 日,巴塞尔行动网络和硅谷防止有毒物质联盟联合发表了针对以美国为首的发达国家向亚洲发展中国家出口电子垃圾的调查报告,揭露了信

息技术革命光环背后不为大众所知的电子废物跨境转移的黑幕,中国沿海乡村的电子废物产生的巨大危害引起了人们的广泛关注^[9]。以中国广东贵屿镇为例,始于1995年的电子垃圾产业,每年处理逾百万吨来自美国、日本、韩国等国的电子垃圾。由于处理手段极其原始,只是采取焚烧、破碎、倾倒、浓酸提取贵重金属、废液直接排放等方法,对当地环境造成了极大的污染。电子垃圾对人体健康的影响已经成为突出的社会问题^[10]。电子废物中含有汞、镍、硒、镉、铅、铬、氯氟碳化合物、卤素阻燃剂等有毒有害物质。铅会破坏人的神经、血液系统以及肾脏;铬化物会透过皮肤,经细胞渗透,少量便会造成严重过敏,更可能导致哮喘、破坏DNA;汞会破坏脑部神经;卤素阻燃剂的燃烧将会产生二噁英和呋喃等致癌、致畸物质^[11]。20世纪50年代发生在日本的震惊世界的水俣病,就是由于汞污染造成的。1973年发生在美国马塞诸塞州的聚溴联苯(PBB)污染事件,使人们进一步认识到了电子废物对环境和健康的危害性^[12]。由此看来,如果对这些电子废物处理不当,将对大气、水源、土壤造成严重污染,其后果不堪设想。

与此同时,我国有色金属需求量增长迅速,10种常用有色金属总产量2004年增长率达17.53%,并连续三年居世界首位,一些重要的有色金属资源因资源匮乏或开采困难等原因而供不应求,目前70%的铜资源和30%的铅锌资源依赖进口^[13]。据初步估计,到2010年,我国矿产短缺量(需进口量)将达2亿t左右,形势比现阶段更加严峻;到2020年,我国经济发展将进入第三步战略目标的中期阶段,经济接近世界平均水平,达到中等收入的国家,经济将继续保持高速发展,年增长率为5%~6%,但能保证需求的矿种仅有6种,特别是绝对需求量大的石油、铁、铜、铝、硫、磷等重要矿产缺口扩大,为2.5亿~3亿t^[14]。矿产资源供需矛盾加剧,将对国家经济的发展带来严峻的挑战,金属资源的保证程度关系到国民经济长期稳定发展和国家安全。为缓解资源与发展的矛盾,世界各国对资源的循环利用越来越重视,西方发达国家在经济和立法上对资源回收加以鼓励。目前,发达国家有色金属资源循环量约占总产量的60%以上,而我国有色金属资源循环量仅占总产量的20%左右^[15]。矿产资源高效开发和二次资源循环利用已列入国家中、长期科学和技术发展规划纲要,提高我国二次金属资源利用率对于建立和完善我国金属资源长期保障体系至关重要。电子废物中含有大量可供回收利用的金属、玻璃及塑料等,如废弃线路板中仅铜的含量就高达20%,另外还含有铝、铁等常用金属及微量的金、银、铂等稀贵金属,这使得电子废物具有比普通城市垃圾高得多的价值^[16]。电子废物作为既特殊又宝贵的资源,理应得到我们的重视和利用。

为了防止电子信息产品废弃后对环境造成污染及其他公害,实现产品清洁生产,提高资源利用效率,促进电子行业健康发展,为保护环境,越来越多的国家

开始探索电子废物管理和处理处置的途径。欧盟于2003年公布了《废弃电子电气设备处理指令》和《关于限制电子电气产品中使用有害物质的指令》(RoHS)的规定^[5,17]。《废弃电子电气设备处理指令》要求欧盟成员国确保到2005年8月13日,生产者对废弃后的家用电子产品承担部分回收、处理和处置的责任^[5]。即对于家用电子产品,主要由政府承担收集责任,生产者对政府收集后的产品承担一切责任,包括再次集中收集、处理、再循环利用和环境无害化处置等。对废弃后的非家用电子产品,由生产者承担所有的收集、处理、再循环利用和环境无害化处置责任。消费者在返还废弃产品时,不交纳任何费用。此外,生产者必须承担信息责任,即告知公众废弃电子电气产品要分类收集,返还和收集废弃电子电气产品的地点或系统,电子电气产品中存在的有害物质对环境和人体健康的潜在影响等。根据市场规律,处置费用最终还会有一部分通过各种形式由消费者分摊,分摊的比例取决于产品的需求弹性。《关于限制电子电气产品中使用有害物质的指令》(RoHS)要求欧盟成员国确保从2006年7月1日起,投放于市场的电子电气产品中不含铅、汞、镉、六价铬、聚溴二苯醚(PBDE)或聚溴联苯^[17]。

2003年8月26日,国家环境保护总局下发了《关于加强废弃电子电气设备环境管理的公告》的通知^[1]。同时国家环境保护总局还将电子废物的污染控制技术政策、技术规范和系列污染控制标准的制定列入《国家环境保护“十五”计划》。2003年底,国家信息产业部根据《清洁生产促进法》、《固体废物污染环境防治法》等有关规定,制订了《电子信息产品污染防治管理办法》,并于2005年1月1日起施行^[4]。《电子信息产品污染防治管理办法》明确规定了生产厂商、销售商、消费者以及政府部门对于废弃产品的回收、再生利用以及处理处置的相关责任和义务^[4]。国家发展和改革委员会从资源回收利用的角度将废弃家电及电子产品的回收利用列入《再生资源回收利用“十五”发展规划》,并在“十五”的发展重点中明确提出:研究开发一批急需的废弃物无害化处理技术和再生资源加工利用技术,如废弃电路板、废旧镉镍电池(二次电池)等的无害化处理技术。其中要求废家用电器和废计算机回收量达到废弃总量的80%以上。此外,为促进并规范再生金属产业的发展,国家发展和改革委员会还制订了《中国再生金属产业“十一五”及中长期发展规划》,计划到2020年建设10万t以上的再生铜企业8家、再生铝企业10家、再生铅企业4~6家,再生锌企业规模达到2万~5万t。而再生金属企业的发展必将带动位于其产业上游的电子废物资源化处理行业的发展。

综上所述,实现电子废物的资源化处理,有利于防治污染,保护环境;有利于资源的循环利用,并节省开采、冶炼、加工需要的大量能源,促进资源的可持续利用。

0.3 废弃电路板的资源化处理

电子废物资源化研究的内容很广泛,其中废弃电路板的资源化研究是重点和难点。印刷电路板以其最基础最活跃的电子部件登上国际电子产业舞台,成为电子产业不可缺少的重要组成部分。随着电子产业的高速发展,印刷电路板需求量也前所未有地增加。印刷电路板被广泛地运用于信息、通信、消费性电子、军事、航天等领域。与此同时,也产生了大量的废弃印刷电路板。废弃电路板的潜在价值很高,包含了有色金属和稀贵金属近 20 种,是一座等待开采的“金矿”,所含金属的品位相当于普通矿物中金属品位的几十倍至上百倍,1t 电路板中含有 80~1500g 金和 160~210kg 铜,这相当于美国金矿品位的 40~800 倍、铜矿品位的 30~40 倍^[18,19]。与此同时,电路板中含有的重金属(铅、汞、镍、六价铬、镉等)和含溴阻燃剂对土壤、环境、生物造成的潜在危害也是不可低估的,受暴利驱使,采用简单酸溶、冲天炉焚烧等方式从废弃电路板中提取金属造成生态破坏的事件在沿海城市时有发生。因此采用高效洁净方法,实现废弃电路板的资源化迫在眉睫。

近年来,国外学者在废弃电路板资源化基础研究工作上取得了一些进展。瑞典 Shunli Zhang 等对电子废物碎片在电磁场中的动力学特性进行了研究^[20,21];日本国家资源与环境研究中心对电子废物碎片中金属与非金属物料的光学性质差异进行研究^[22];日本 Izumikawa 等对废弃电路板物料在机械破碎作用下的力学特性与破碎后形状特性进行了深入研究^[23,24];瑞士 Result 技术公司对各种废弃电路板层压材料的冲击和离心特性进行了研究。德国的 Daimler-Berz 公司对废弃电路板进行了低温破碎和静电分选的研究^[25,26]。印度学者进行了废弃线路板磨碎和分选研究,基于单颗粒沉降模型探讨了分选的粒度范围,应用气流分选装置分离废弃线路板中金属和塑料的研究也有报道^[27,28]。瑞士和尼日利亚的学者应用物质流理论研究了废弃电路板的资源循环^[29,30]。目前国内对废弃电路板资源化研究已经形成热点,如浙江大学采用生物浸出方法回收废弃电路板中的金属;华中理工大学采用热解方法回收废弃线路板中的塑料和玻璃纤维;北京航空航天大学采用破碎和气流分选方法回收印刷电路板里的金属和非金属富集体;中国矿业大学(北京校区)采用破碎和空气摇床法分选回收废弃电路板中的有价值组分;中南大学对废弃电路板进行了剪切和冲击破碎的研究;华东理工大学开展了电子废物资源化再生循环利用的研究;清华大学开展了废旧家电资源化综合利用成套技术的研究;合肥工业大学开展了电子废物问题的绿色体系研究;上海第二工业大学成立了电子废物研究所,并开设了国内高等院校第一家电子废物处理专业;同济大学应用流化床分选回收废弃线路板中的金属,对于 0.125~0.80mm 的废

弃电路板颗粒,金属的回收率接近90%;清华大学精密仪器与机械学系的研究人员应用废弃电路板的非金属组分制造了环境友好的新材料。我国的台湾地区也在此方面做了大量有意义的工作,废弃电路板的组成、物理性质、化学性质、力学性质、破碎解离、分级分选的研究已多有报道^[31~78]。

中国矿业大学选矿工程中心二次资源再生利用研究所自1998年开始运用机械物理方法进行废弃电路板资源化的研究。初步建成废弃电路板中金属富集体回收的实验系统,采用剪切破碎机、冲击破碎机实现了废弃电路板的粗碎、细碎及金属的高效解离,采用液氮制冷装置进行了废弃电路板低温脆性破碎的研究,采用涡电流分选、脉动气流分选、磁选、静电分选、高效离心分选、液固流化床进行废弃电路板中金属富集体的回收工作,取得了较好的分选效果^[79~122]。本书旨在将课题组近年来在该领域的研究成果介绍给从事和关心电子废物资源化处理的科研工作者、高校教师、研究生和本科生,以期推动我国电子废物资源化循环利用的发展。

参 考 文 献

- [1] 国家环境保护总局.关于加强废弃电子电气设备环境管理的公告.环发[2003]143号
- [2] 何亚群,段晨龙,王海锋等.电子废弃物资源化处理.北京:化学工业出版社,2006
- [3] 李金惠,温雪峰.电子废物处理技术.北京:中国环境科学出版社,2006
- [4] 国家信息产业部.电子信息产品污染防治管理办法,2005
- [5] The European Parliament and Council Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 17 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official J Eur Union,2003
- [6] Bleiwas D, Kelly T. Obsolete computers, "gold mine", or high-tech trash? Resource recovery from recycling. U. S. Geological Survey, 2001
- [7] 国家环境保护总局.国家环境保护总局关于报废电子电器产品环境管理情况的通报,2002
- [8] 段晨龙.废弃电路板破碎机理研究.中国矿业大学博士学位论文,2007
- [9] Puckett J, Byster L, Westervelt S et al. Exporting harm: The high-tech trashing of Asia. BAN and SVTC,2002
- [10] 同童. E时代电子垃圾. 城市管理,2006,(6):60~63
- [11] 桂港.电脑污染迫再眼前.经济参考报,2000-06-09
- [12] Silicon valley toxic coalition, just say no to e-waste; Background document on hazards and waste from computes. <http://www.svtc.org/clean/pubs/sayno.htm>. 2003-01-06
- [13] 邱定蕃,吴义千,符斌等.我国有色金属资源循环利用.有色冶金节能,2005,(4):6~13
- [14] 全国政协人口资源环境委员会;矿产资源与可持续发展专题组.国内矿产资源对21世纪我国经济和社会发展需要的保证程度分析和对策建议.资源·产业,2000,(1):9~12
- [15] 邱定蕃.资源循环利用对有色金属工业发展的影响.矿冶,2003,12(4):34~36
- [16] National Safety Council. Electronic product recovery and recycling baseline report, recycling of selected electronic products in the United States, Washington D C. National Safety Council's Environmental Health Center,1999. 47

- [17] The European Parliament and Council. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 17 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). Official J Eur Union, 2003
- [18] Jung L B. The conundrum of computer recycling. *Resource recycling*, 1999, 5: 38~45
- [19] Göckmann K. Recycling of copper. *Cim Bulletin*, 1992, 3: 731~733
- [20] Zhang S L, Eric F. Intelligent Liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, 1999, 11: 295~301
- [21] Zhang S L, Eric F et al. Aluminum recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators. *Resources, Conservation and Recycling*, 1998, 9: 225~241
- [22] Shigeki Koyanaka. Micro-manipulation of small particles using the radiation pressure of laser light. *Shigen to Kankyo (Journal of NIRE)*, 1997, 5: 8~13
- [23] Koyanaka S, Ohya H, Hitoshi S et al. Recovering copper from electric cable wastes using a particle shape separation technique. *Adv Powder Technology*, 1997, 8: 103~111
- [24] Izumikawa C, Iwata H, Endoh S et al. Method of separating and recovering valuable metals and non-metals from composite materials. 美国专利: 5 630 554; 日本专利: 07~100436. 1997-05-20
- [25] Melchiorre M, Jakob R. Electronic scrap recycling. *Microelectronics Journal, IEEE*, 1996, 28: 8~10
- [26] Jakob R, Melchiorre M. Method for recycling waste from printed circuit board assemblies from electrical and electronic devices. US patent: 5683040. 1997
- [27] Murugan R V, Bharat S, Deshpande A P. Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and analysis of elutriation based on a single particle model. *Powder Technology*, 2008, 183(2): 169~176
- [28] Eswaraiiah C, Kavitha T, Vidyasagar S et al. Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, doi: 10.1016
- [29] Morf L S, Tremp J, Gloor R et al. Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste—actual levels in Switzerland. *Waste Management*, 2007, 27: 1306~1313
- [30] Nnorom I C, Osibanjo O. Electronic waste: Material flows and management practices in Nigeria. *Waste Management*, 2008, 183(2): 169~176
- [31] 路洪洲, 李佳, 郭杰等. 基于可资源化的废弃印刷线路板的破碎及破碎性能. *上海交通大学学报*, 2007, 41(4): 551~556
- [32] Li J, Lu H Z, Liu S S et al. Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 08: 47
- [33] Wu J, Li J, Xu Z M. Optimization of key factors of the electrostatic separation for crushed PCB wastes using roll-type separator. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 10: 18
- [34] Lu H Z, Li J, Guo J et al. Movement behavior in electrostatic separation: Recycling of metal materials from waste printed circuit board. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 197(1): 101~108
- [35] Li J, Xu Z M, Zhou Y H. Theoretic model and computer simulation of separation mixture metal particles from waste printed circuit board by electrostatic separator. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 09: 89
- [36] Li J, Xu Z M, Zhou Y H. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals