

# 我国电子废弃物处理处置技术路线选择研究

阎利<sup>1,2</sup>, 刘应宗<sup>1</sup>, 王靖<sup>1</sup>

(1. 天津大学管理学院, 天津 300072; 2. 安阳工学院建筑工程系, 河南安阳市 455000)

**[摘要]** 我国电子废弃物的处理处置正向产业化方向稳步推进。概述了国内外电子废弃物处理处置技术现状。遵循循环经济理念, 基于我国国情, 提出了我国在电子废弃物处理处置技术路线选择中应遵循的主要原则, 建立了工艺流程的概念模型。分析了我国在实施该技术路线中可能遇到的障碍并给出了解决建议。

**[关键词]** 电子废弃物; 处理与处置; 技术路线; 工艺流程; 循环经济

**[中图分类号]** X7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)05-0079-05

## 1 引言

我国电子电器产品(特别是家用电器)的普及始于上世纪80年代, 最近几年将出现废旧电器更新换代的高峰, 大量废旧电器被遗弃而形成电子废弃物(waste electrical and electronic equipment, WEEE), 并逐渐成为城市固体废弃物的重要组成部分。电子废弃物中含有多种有毒有害物质, 处理处置不当将对周围环境和人群造成严重危害。加之我国经济的持续高速发展对各种资源的再生利用提出了愈来愈高的要求, 如何妥善有效地处理处置电子废弃物并力求使其资源化, 已成为伴随我国社会经济发展而产生的一个全新课题。

某些发达国家为降低电子废弃物的处理成本, 出于经济利益驱动, 近年来向我国广东、浙江等部分地区大量非法越境转移电子废弃物, 并在当地以极为原始、野蛮的方式进行处理, 严重破坏了当地的生态环境, 同时对操作人员安全和周边居民健康构成严重威胁。2002年巴塞尔行动网络(BAN)和硅谷有毒物质联盟(SVTC)在一份报告中联合披露了我国广东贵屿等地野蛮拆解处理进口电子废弃物的情况, 引起我国政府和公众的普遍震惊<sup>[1]</sup>。

可以说, 我国的电子废弃物处理处置问题既有来自国内社会经济发展产生的迫切需求, 又有来自发达国家电子废弃物非法入境的较大环境压力, “内忧外患”兼而有之。积极寻求适应我国国情的电子废弃物处理处置技术方案, 加快推动电子废弃物处理处置的产业化, 已成为我国迫在眉睫的现实问题。

## 2 国内外电子废弃物处理处置技术现状及评价

### 2.1 国内电子废弃物处理处置现状及评价<sup>[2,3]</sup>

目前我国对电子废弃物的处理处置主要有两种方式: 一是将尚有使用价值的旧电器拼装和简单维修后, 销售给城乡低收入群体或流动群体使用。这种方式目前仍是一种自发的市场行为, 虽然延长了电器的生命周期, 实现了电子废弃物使用价值的最大化, 具有经济效益和社会效益上的合理性, 但由于缺乏系统规范的安全性和可靠性检测以及有效的市场监管, 在一定程度上造成消费者使用上的安全隐患。因此在进行电子废弃物处理处置技术方案选择时, 虽可考虑吸取其合理性因素, 但决不能全盘采纳。

**[收稿日期]** 2005-07-11; **[修回日期]** 2005-09-06

**[作者简介]** 阎利(1975-), 男, 河南安阳市人, 天津大学博士研究生, 安阳工学院讲师, 主要研究领域: 工程材料、工程管理  
刘应宗(1945-), 男, 山西临猗县人, 天津大学教授, 博士生导师

另一种方式是将完全丧失使用功能的废电器,在未采取任何环保措施的情况下,采用人工拆解和酸洗、火烤等方式处理,仅使其中很小部分资源再生利用(如各种金属),而将处理产生的废渣、废液等各种废弃物就地堆放、焚烧或填埋。这种方式目前在浙江和广东的部分地区普遍存在,虽然工艺简单易行,处理成本极低,可产生一定的经济效益,但操作安全得不到保证,而且严重破坏当地生态环境,资源浪费严重,社会效益和环境效益极差。从发展循环经济和实施可持续发展战略的高度考虑,此方式亦不应成为我国电子废弃物处理处置技术路线的备选方案。

## 2.2 发达国家电子废弃物处理处置技术现状及评价<sup>[4-6]</sup>

欧盟、日本、美国等发达国家自上世纪90年代初即开始电子废弃物的研究,相继建设了各具特色的电子废弃物处理处置设施,逐渐形成了适合其国情的技术路线。我国台湾地区近年来也建设了若干处理设施。综观发达国家和地区现有的电子废弃物处理处置技术方案,主要有以下两种类型可供我国借鉴参考。

一类以欧盟国家的技术路线为代表。欧盟经济发达,但人工费用较高,因而普遍采用机械化和自动化程度较高的流水线来处理电子废弃物。首先将废旧电器整机喂入多级机械破碎系统,各种零部件破碎至一定尺度后依次采取重力分选、静电分选、磁选等多种分选技术,分离出铁、铜、铝、塑料、玻璃等材料。含有毒有害物质的主要零部件(如电视机显像管),一般在机械破碎前拆除后交由专门处理机构进行无害化处理。机械处理方法因不需要考虑产出品干燥、污水污泥处理和二恶英(dioxin)排放等问题,工艺路线简洁流畅,处理效率较高,与原始的湿法(酸洗)和火法技术相比,具有技术上的优越性,值得我国学习。但由于其设备昂贵,运行能耗和处理成本高,不完全适应我国国情。

另一类以日本模式为代表。高度机械化和自动化同样是日本处理技术的特点,但同欧洲国家的处理工艺相比,在以机械处理为主的流程中相对较多地加入人工拆解工序,在破碎前进行最大程度的人工拆解,具有合理性和借鉴意义。日本自2001年实施《家用电器再生法》以来,已在全国相继建立了40余座示范性处理工厂。不过从实际运行情况

来看,大多数处理设施亏损经营,经济效益欠佳,其示范意义和教育宣传意义远大于现实意义。这一点是我国在进行电子废弃物处理处置技术路线选择时必须认真思考和极力避免的。

## 3 我国电子废弃物处理处置技术路线选择的主要原则

电子废弃物的处理处置是涉及我国可持续发展、构建和谐社会的一个重大问题,其技术路线选择必须充分尊重国情,借鉴吸收发达国家的成功经验,以循环经济减量化、再利用、资源化和再制造等理念为指导,既妥善解决电子废弃物对环境造成的危害问题,又能综合利用各种资源,做到社会效益、经济效益和环境效益的有机统一。概括地讲,技术可行、经济合理、环境友好是对电子废弃物处理处置技术路线选择的总要求。建议在选择技术路线时具体遵循以下原则。

### 3.1 充分利用我国劳动力资源丰富的优势,最大限度地降低处理成本

我国劳动力资源丰富、人工费用相对低廉,这是发达国家所不可比拟的优势,为最大限度地降低我国电子废弃物的处理处置成本创造了条件。我国电子废弃物的处理处置和再生利用,应在保证操作安全、环境友好和规范作业的前提下,尽可能采用人工方式进行。比如电视机显像管、电冰箱压缩机等主要零部件可以人工拆解和机械拆解相结合,废塑料、废钢铁和废玻璃等可再生材料可采用人工分选与机械自动分选相结合的方式等进行等。

人工处理具有如下优势。首先可创造新的工作岗位,扩大就业,缓解就业压力和矛盾。其次可降低初期设备投资,减少造价高昂的设备进口,降低运行成本。另外还可改善处理效果,尤其是不同材料的分选效果。研究表明,铜、铝分选若完全采用机械分选,分离率约为85%~90%,而人工分选可达到接近100%<sup>[3]</sup>。人工处理的缺点是处理效率较低,且必须对操作人员采取一定的劳动保护措施,强化作业流程的规范性,以确保健康和安

全。与人工处理工艺相配套,须研制开发适宜的手动工具,做到高效手动工具与专用设备相结合,实现处理效率和经济效益的最优化。废旧电器零部件众多,构造复杂,人工拆解需给操作人员配备大量结构简单、成本低廉、便于操作、维修方便的专用手动工具。但对于含有毒有害物质的零部件,从安

全、环保和处理效率等方面考虑，则必须采用专用设备进行处理。

### 3.2 选用环境友好技术，不能造成环境的二次污染

电子废弃物中含有大量重金属和其他有毒有害成份，如多氯联苯、铅、汞等，对此类零部件的处理必须选用环境友好技术，不能造成环境的二次污染。对拟选用的工艺技术应进行环境影响评价，确保对周边生态环境无不良影响，确保操作人员的健康和安全。在经济效益和环境效益发生冲突时，应以环境效益为重。我国广东、浙江部分地区现有的处理处置方式，决不可采用。

### 3.3 实施“再制造”，最大限度地提高产出品附加值

再制造工程是以产品全寿命周期设计和管理为指导，以优质、高效、节能、节材、环保为准则，以先进技术和产业化为手段，来修复或改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称<sup>[7]</sup>。废旧电器中有相当一部分尚未进入报废期，主要功能尚好，可称作“旧电器”。这类旧电器可经过简单维修、更换部分零部件、检测合格等再制造流程，保持原有用途或改造为其他用途后以“再生机”的形式进入市场销售。我国居民消费水平具有梯度层次，城乡低收入群体或流动群体均有购买使用再生机的需求，市场潜力较大。经维修并检测合格的少量零部件也可出售给家电维修部门使用。

对完全丧失功能的“废电器”，可经破碎、分选后分离出纯度较高的各种材料（如铁、铜、铝、各种贵金属、塑料、玻璃等），依据材料特性进入相关市场销售。也可考虑对此类材料进行深加工，实现资源化再生。例如废塑料可熔融挤出造粒后再生为塑料粒子；废弃阴极射线管（cathode ray tube, CRT）玻璃可返回玻壳公司原生产流程再制造新的玻壳，亦可用于生产民用玻璃或各种建材制品等<sup>[8]</sup>。总之，应最大限度地实现各种材料的循环利用，尽可能地提高电子废弃物处理处置产出品的附加价值，提高经济效益。

### 3.4 优化处理处置流程，做到运行可靠、工艺流畅、技术先进适用

电子废弃物的处理处置是一个较为复杂的系统工程，涉及多种电子电器产品的拆解、破碎、分类、分选、无害化处理 and 再制造，技术复杂，工艺烦琐，各工艺之间互相关联、彼此制约，因此应确

保处理处置设施的工艺线路流畅、运行安全可靠。可行的技术和工艺应同时体现先进性和适用性，技术集成应统筹考虑各工艺和设备的特点，对各项工艺流程进行优化，使之成为环环相扣、密切配合、扬长避短、线路流畅的有机整体。

## 4 适合我国国情的电子废弃物处理处置技术路线

基于上述原则，在充分考虑我国国情、广泛吸收借鉴发达国家成功经验的基础上，笔者提出了我国电子废弃物处理处置的技术路线，建立了主要工艺流程的概念模型（见图 1）。该路线主要由检测、可用零部件与再生机生产、破碎分选与再生材料资源化、有毒有害物质的无害化处理等四部分组成。

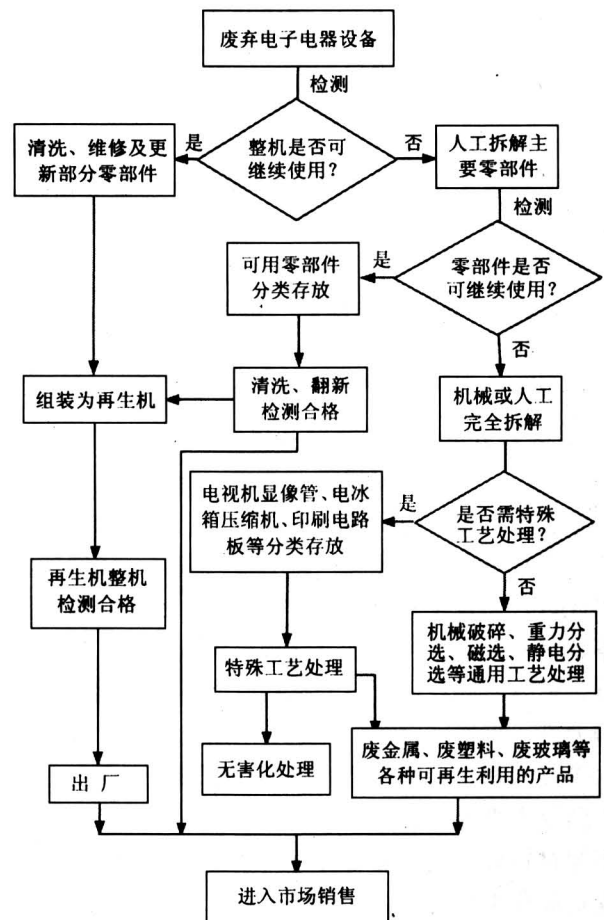


图 1 我国电子废弃物处理处置的工艺流程图

Fig.1 Proposed process flowchart for the WEEE recycling in China

### 4.1 整机及主要零部件检测

回收至处理处置设施的各种废旧电器应首先进

行检测,区分“废电器”与“旧电器”。整机外观良好、使用年限较短、无重大功能缺陷、经简单维修和更新部分零部件后可继续使用的旧电器,进入再生机生产工序。整机破损严重、丧失主要功能、不可继续使用的废电器进入人工拆解流程,拆除显像管、压缩机等主要零部件,并对其进行第二次检测,判断是否可继续使用。可用零部件分类存放,经清洗、翻新和检测后参与组装为再生机,或作为旧零部件进入市场销售。不可继续使用的零部件一并进入破碎分选流程。

检测工作须由经验丰富的维修工借助专用仪器在工作台上进行。考虑到电子电器产品的使用安全性和可靠性,在对整机和主要零部件检测时尤须考虑绝缘电阻、泄漏电流、电磁兼容性能等指标。检测时还应评估维修成本,若维修成本高于再生机市场价值,则应放弃维修而果断拆解。

#### 4.2 可用零部件与再生机生产

可用零部件与再生机的生产是延续电器生命周期、实现电子废弃物再利用和资源化的重要途径,主要包括维修、更换部分零部件(如机壳)、更换连接导线、补充工作介质(如电冰箱压缩机制冷剂)、再生机整机性能检验、包装出厂等工序。进入市场销售的再生机须加贴再生电器标签和生产厂家铭牌,以与原生机区别。

#### 4.3 破碎分选与再生材料的资源化

对不可继续使用的零部件进一步分类,将不含有毒有害物质的零部件送入破碎分选等通用处理流程,而将可能危害环境、影响健康和安全的特殊零部件送入无害化处理流程。在通用处理流程,各类零部件依据自身特性可分别采用机械或人工方式拆解,拆解后的各种材料分类存放。不可继续拆解的部分进入机械破碎系统,尔后采用机械自动方式与人工方式相结合的分选。经上述处理后,产出品可大致分为废金属、废塑料、废玻璃等几大类材料,不同材料分别进入市场销售或做进一步深加工,实现资源化再生。

#### 4.4 有毒有害物质的无害化处理

电子废弃物中含有毒有害物质的零部件主要包括电视机显像管、电冰箱压缩机、电冰箱绝热材料、印刷电路板等。此类零部件均应以安全和环境友好的方式拆解或破碎,并进行无害化处理。例如废弃印刷电路板采用低温等离子体技术处理后可生成金属共熔体、硅酸盐玻璃体和洁净尾气等三类物

质,金属共熔体可进入有色冶炼厂加工提纯,玻璃体可用于生产建筑材料或安全填埋,达标尾气可直接排入大气<sup>[2]</sup>。国内外与此相关的技术发展较快,工艺设计人员应密切跟踪,积极寻求适应我国国情的更加环保和经济的处理工艺。

## 5 我国电子废弃物处理处置技术路线的实施障碍与解决建议

我国电子废弃物处理处置的研究起步较晚,与发达国家相比,在相关基础研究、处理处置设备研发、处理设施的建设、回收物流体系的健全及法律法规制订和实施等方面均存在较大差距,这些因素构成了我国电子废弃物处理处置产业化的障碍。适宜的处理处置技术路线若脱离相关技术的深入研究和法律法规体系、回收物流体系、社会舆论环境等非技术因素的支撑,亦不可能得到良好的贯彻和实施。建议我国在以下几方面积极采取行动,以推动我国电子废弃物的处理处置产业化朝着健康良性的方向发展。

第一,深入开展电子废弃物相关的基础研究和应用研究,如我国电子废弃物基础数据的测定、处理处置工艺研发、处理设备研制等。积极推动电器制造商实施“绿色设计”和“绿色制造”,尽量选用环境危害小、毒性低的材料,提高电器产品的易拆解性和易回收性,将可再生资源的使用最大化。

第二,建立高效有序的电子废弃物回收物流体系,加快建设示范性处理处置设施。处理处置设施的稳定运行离不开健全的回收物流体系。我国最近建成的某处理处置设施由于回收不到足够的电子废弃物而经常出现“无米下锅”的情况,造成设备闲置,严重影响设施的长期正常运营<sup>[9]</sup>。建议国家从电子废弃物的回收责任、回收处理的特许经营制度、回收处理的监管机制等方面尽快立法,加大执法力度,为处理处置设施的稳定运行创造良好的外部环境<sup>[10]</sup>。

第三,尽快制定完善有关技术标准。如电子电器产品报废标准、再生机和再生零部件技术标准、无害化处理技术标准等,确保再生机和再生零部件的安全和可靠,促进电子废弃物处理处置产业的规范化,同时便于政府实施有效监管。

## 6 结语

电子废弃物的处理处置是个较为复杂的系统,

它涉及环境工程、安全工程、材料加工工程、机械工程、工业自动化等多个专业,通过多学科交叉、综合并系统化后而集成为一个新兴的边缘性学科。在实践中除考虑技术因素外,还必须同时兼顾国情,制订适宜的法律法规和经济激励政策,营造与技术环境相适应的外部经济和法律氛围。我国电子废弃物处理处置的研究和实践刚刚起步,大量深入细致的研究开发工作亟待展开,因此应充分吸取发达国家的成功经验,加快研究步伐,在实践中不断探寻并完善适应我国国情的电子废弃物处理处置技术路线。

**致谢:**感谢中国有色金属工业再生资源公司为本研究提供的资助。

#### 参考文献

- [1] The Basel Action Network (BAN), Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC). Exporting Harm: The High-Tech Trashing of Asia [R]. 2002. 2
- [2] 天津大学. 天津市废旧电器回收再生利用示范工程可行性研究报告[R]. 天津: 2004. 9
- [3] 中国家用电器研究院. 废旧家用电器回收与再生利用技术研究项目总报告[R]. 北京, 2004. 3
- [4] Jirang Cui, Eric Forsberg. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*. B99 2003: 243 ~ 263
- [5] Panasonic Corporation. [EB/OL]. <http://panasonic.co.jp/eco/en/metec/index2.html> 2005 - 10 - 25
- [6] 阎利, 刘应宗, 黄文雄. 废旧家用电器的机械破碎与分选技术[J]. *中国工程科学*. 2005, 7 (12): 24 ~ 30
- [7] 徐滨士. 装备绿色再制造工程及其发展前景[J]. *装备指挥技术学院学报*. 2003, (1): 1 ~ 4
- [8] 阎利, 刘应宗, 王绍东. 电子废弃物的建材化处理处置与再生利用[A]. 第九届全国水泥和混凝土化学及应用技术会议论文汇编(下卷)[C]. 广州: 2005. 9
- [9] 范俊. 电子垃圾处理厂为何“无米下锅”[EB/OL]. <http://www.people.com.cn/GB/huanbao/36686/3061777.html>. 2004 - 12 - 17
- [10] 韩立琳, 胡晓峰. 我国电子废弃物立法的困局与出路[J]. *环境保护*, 2005, (5): 27 ~ 30

## Study on the Technical Route Selection for WEEE Recycling in China

Yan Li<sup>1,2</sup>, Liu Yingzong<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>1</sup>

(1. School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Department of Civil Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang, Henan 455000, China)

**[Abstract]** The treatment and disposal of WEEE in China is forging ahead into commercial practice steadily. The state-of-art of WEEE recycling approaches both at home and abroad were summarized. According to circular economy thinking and China's current situation, four essential principles for the selecting of WEEE recycling technical route were presented. A conceptual process flow model was established as well. Potential barriers to the implementation of this technical route were also analyzed and resolutions were proposed.

**[Key words]** waste electrical and electronic equipment (WEEE); treatment and disposal; technical route; process flow; circular economy