

清远市电子废弃物拆解行业固体 废物分类管理体系研究*

杨丽丽, 陈 禧, 幸毅明, 王 炜, 雷 蕾, 温 勇
(环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

摘 要: 根据拆解产生的固体废物所来源的工艺环节、贮存位置, 结合国内专家意见, 将清远市电子废弃物拆解行业产生的固体废物划分为三个类别: 夹带废物、拆解废物、再生废物, 并分别测试不同类别固体废物的热值、金属成分、浸出毒性, 以评价其资源化潜力和潜在的污染风险。通过对拆解行业产生的固体废物进行“资源化、无害化”技术调研, 并重点对研究基础薄弱、产生量大的摇床污泥和废胶渣进行资源化技术研究, 最终构建了清远市电子废弃物拆解行业固体废物分类管理体系, 即“精细分类→资源化回收→无害化处置→系统监控”, 为相关管理部门对于电子废弃物拆解行业固体废物的管理决策提供政策建议, 为将来建设区域拆解固体废物再分选中心奠定理论与实践基础。

关键词: 电子废弃物; 拆解行业; 固体废物; 分类管理体系

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)06-0120-06

The Classification Management System of Solid Waste in the E-Waste Dismantling Industry in Qingyuan City

YANG Lili, CHEN Xi, XING Yiming, WANG Wei, LEI Lei, WEN Yong
(South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental
Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: The solid wastes in the e-waste dismantling industry in Qingyuan city were sampled, investigated, and divided into three categories, including entrained solid waste, solid waste generated by disassembly, solid waste generated from regeneration. The resource potential and potential risk of contamination of different solid wastes were then evaluated by testing calorific value, metal components, leaching toxicity. After investigating the resource and harmless disposal technology of solid waste in the e-waste dismantling industry, shaker sludge, waste wire and cable slag which have a large quantity and weak research foundation, we emphatically researched on the resource technology. Based on these researches, the classification management system of solid waste in the e-waste dismantling industry in Qingyuan city was built, that was “fine classification, resource recovery, harmless disposal, system monitoring”. This management system could provide policy recommendations to relevant management departments and lay the theoretical and practical basis for the future construction of regional dismantling solid waste sorting center

Key words: E-waste; dismantling industry; solid waste; classification management system

* 收稿日期: 2015-07-09

基金项目: 中央财政重金属污染防治专项资金资助项目“2013年清远电子废弃物拆解重金属污染治理项目(首期工程)”

作者简介: 杨丽丽(1985年生),女;研究方向:循环经济与清洁生产、固体废物资源化;通讯作者:陈禧;
E-mail: chenxi@scies.org

广东省清远市是全国最大的电子废弃物拆解聚集地之一，清城区内的石角、龙塘两镇是电子废弃物拆解的主要聚集区^[1]。国家《重金属污染综合防治“十二五”规划》中将清城区（龙塘镇、石角镇）列入重点区域。据统计，截至2011年，清远市共有4个废五金拆解产业聚集区，年处理能力为709万t；25家国家定点的“废五金”加工利用企业，设计加工利用规模达300万t；龙塘镇、石角镇废五金拆解散户1441户，从业人员约1.7万人，年拆解“废五金”约46万t。清远市电子废弃物拆解定点企业及聚集区拆解的主要废弃电子产品包括废旧线缆、变压器、电机、铜铝水箱等，其中，废旧线缆拆解量占拆解总量的70%左右。

经过多年努力，清远市在电子废弃物拆解行业固体废物管理方面已取得一定效果，但仍存在一些问题：

1) 没有有效的固体废物分类管理。由于当地电子废弃物拆解行业的结构复杂、对于拆解行业产生的固体废物进行分类管理的研究基础匮乏、缺少对拆解行业产生的固体废物进行全方位监管的制度和人员保障等原因，造成电子废弃物拆解行业固体废物的产生与排放不能得到全面并符合实际情况的了解，拆解行业产生的不可利用废物及危险废物没有分类管理体系指导，从而不能为废物的进一步处理处置以及综合利用奠定基础。

2) 固体废物处理有二次污染的风险。电子废弃物拆解产生的可明显辨识的危险废物管理相对较完善，而一般工业废物由拆解企业委外处理，缺少相应的技术规范指导拆解企业如何管理转移一般工业废物，导致部分固废流向没有处理能力或没有配

套污染防治措施的处置单位，这部分固体废物在处置过程中存在对环境二次污染的风险。

通过对清远市电子废弃物拆解行业产生的固体废物进行调研取样，根据拆解产生的固体废物所来源的工艺环节、调研采样时的贮存位置，结合国内专家意见，将拆解产生的固体废物划分为三个类别，并分别测试不同类别固体废物的热值、金属成分、浸出毒性。通过对固体废物“资源化、无害化”技术进行调研和实验研究，最终构建了清远市电子废弃物拆解行业固体废物分类管理体系。考虑到近两年当地政府将对拆解散户进行搬迁整治入园，因此，研究对象不包括散户，仅针对定点企业和园区（聚集区）。

1 拆解行业固体废物类别及性状

1.1 拆解行业固体废物分类

目前，电子废弃物拆解行业所产生的固体废物种类较多，没有一个分类标准，为此，广泛考察了当地从事废旧线缆、变压器、电机、铜铝水箱等电子废弃物拆解的定点企业和园区（聚集区），共采样36个，样本涉及各种电子废弃物拆解、处理、深加工产生的固体废物。

根据拆解产生的固体废物所来源的工艺环节、调研采样时的贮存位置，将拆解行业固体废物分为三大类：即夹带废物、拆解废物和再生废物；并将三类固体废物细分成7小类，详见表1。

① 夹带废物：根据我国《进口可用作原料的固体废物环境保护控制标准》^[2]，夹带废物应该以废塑料、废纸、废木料、废玻璃和废金属等物质为

表1 清远市电子废弃物拆解行业固体废物类别¹⁾

Table 1 Categories of solid waste in the e-waste dismantling industry in Qingyuan city

序号	拆解产生的固体废物类别	涵盖类别	取样位置	样本数	目前的处理方法
①	夹带废物	混合渣	不可利用废物仓贮存	17	填埋；焚烧
		混合渣	不可利用废物仓贮存	17	填埋；焚烧
		电机拆解废渣	拆解场地集中收集的废渣	1	外卖；堆弃
		自动拆解线除尘灰	铜铝水箱自动拆解线的除尘装置收集的灰	4	堆弃
②	拆解废物	摇床污泥	摇床后的污泥池、污泥堆放点	8	外卖；堆弃
		废胶渣	干式铜米机分选产生的胶渣、湿式摇床产生的胶渣	4	外卖；堆弃
		覆铜板分选残渣*	废覆铜板回收企业的固废仓、露天堆放的遗留固废	/	外卖；堆弃
③	再生废物	铝灰铝渣	熔炉产生的铝灰铝渣、除尘灰	2	堆弃；下沿铝灰回收企业处理

1) 覆铜板分选残渣在本文不作叙述，另作课题研究。样品数为36个。野外堆放的覆铜板分选残渣铜的质量分数在0.435%~1.52%之间，树脂的质量分数在33.51%~47.68%之间；企业产生的覆铜板分选残渣铜的质量分数在0.57%~1.69%之间，溴代阻燃剂及多溴联苯醚的质量分数在2.71~122.83 mg/kg之间。

主, 与生活垃圾组分物质类似; ② 拆解废物: 根据所拆解对象和拆解方式不同而有区别; ③ 再生废物: 主要以废铝冶炼所产生的废渣为主。

混合渣一般贮存在不可利用废物仓, 部分混合渣来自进口原料中的夹带废物, 与生活垃圾组分类似, 还有一部分混合渣是在拆解电子废弃物过程中产生的。因为混合渣中塑料、纸皮、胶皮、棉絮、纤维、绝缘纸等多种物质相互夹杂、难以分离, 且都贮存在一起统一委外处理, 基本没有再利用价值, 因此, 将这些固体废物划分为一类。

较大截面的废旧线缆的质量约占废旧线缆拆解总质量的 80% 左右, 利用剥线机以人工拆解为主; 其余小截面线缆由于铜线与绝缘体较难手工分离, 主要采用铜米机经干法或者湿法进行分选。剥线机产生的废胶皮很纯, 基本不含金属, 作为副产品外卖, 故不列为拆解产生的固体废物。湿法分选主要采用水力摇床工艺, 生产废水经沉淀池处理后不断重复使用, 长期积累后沉淀池中会产生一定量的摇床污泥。干法和湿法分选都会产生大量废胶渣, 目前, 部分企业将其作为副产品外卖, 但因其中含有一定量的金属、杂质较多, 故将其列为一类拆解废物。

1.2 拆解行业固体废物检测

1.2.1 夹带废物与拆解废物——混合渣

通过初步分析, 混合渣的成分多为纸屑、木头、纤维、玻璃、塑料、沙石等, 除去部分可人工辨识去除的废油、废电池等危险废物外, 其它基本属于不可再资源化利用的夹带废物、拆解废物。对混合渣进行了含水率、热值分析, 共测试了 10 个混合渣样本, 包括废电线电缆和废电机等不同来料拆解产生的主要固体废物。测试结果详见表 2。

除了 C2-2 样本的含水率达到 23.2% 以外, 其它 9 个混合渣样本的含水率在 0.12% ~ 7.06% 内, 含水率普遍很低。C2-2 样本的主要成分为棉絮样纤维, 在露天堆放过程中由于雨水打湿造成含水率相对升高。

混合渣样本的干基高位热值平均为 28 163.79 kJ/kg; 湿基高位热值平均为 27 304.27 kJ/kg; 混合渣样本热值普遍较高, 极易燃烧。按照热值由高到低排序, 热值最高的四个样本分别是 C1-1 (拆解电线电缆产生的废塑料薄膜皮)、D1-5 (拆解电线电缆产生的废胶渣)、D1-1 (拆解电机产生的油毡纸)、C2-4 (拆解电机产生的废油纸)。

经过一定的人工分拣, 混合渣中的大量一般工业固体废物可以考虑单独设置焚烧设施进行处理, 或者基于清远市的水泥产业发展基础, 将其作为替

代燃料用大中型新型干法水泥生产线进行协同处置; 其中的危险废物应交由有资质的单位处理。

表 2 混合渣的含水率和热值分析结果¹⁾

Table 2 Analysis of moisture content and calorific value on mixed slag

序号	样本编号	含水率/%	高位热值/(kJ·kg ⁻¹)	
			干基	湿基
1	C1-1	0.18	86 122.2	85 970.0
2	C2-2	23.21	18 082.0	13 885.0
3	C2-3	1.05	14 540.8	14 388.4
4	C2-4	4.74	26 904.7	25 630.5
5	C9-1	0.18	8 679.6	8 663.8
6	C9-2	6.58	17 113.9	15 988.3
7	D1-1	0.95	29 888.3	29 604.9
8	D1-3	0.14	18 538.9	18 513.5
9	D1-5	0.12	43 085.2	43 035.0
10	D1-6	7.06	18 682.2	17 363.3

1) 取自定点企业的样本编号以“C”开头, 取自园区(聚集区)的样本编号以“D”开头, 字母后面的第一个数字代表每个企业、园区(聚集区)的编号, 第二个数字代表企业、园区(聚集区)的每类样本编号, 以下同。

1.2.2 拆解废物

对于可考虑资源化再分选、再利用的部分拆解废物, 进行了元素分析和浸出毒性分析, 以评价其资源化潜力和潜在的污染风险。共测试了 10 个拆解废物样本, 主要包括混合渣、电机拆解废渣、自动拆解线除尘灰、摇床污泥、废胶渣等。测试结果详见表 3。

混合渣中铜、铁、铝含量低, 再回收的意义不大; 电机拆解废渣、自动拆解线除尘灰、摇床污泥、废胶渣中含有质量分数为 1.37% ~ 5.22% 的铜, 单从铜含量方面考虑, 具有资源化再回收的意义; 电机拆解废渣和自动拆解线除尘灰的浸出毒性超过《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GD5085.3-2007) 中的浸出毒性鉴别标准值。

1.2.3 再生废物

对于可考虑资源化再分选、再利用的再生废物, 进行了元素分析和浸出毒性分析, 以评价其潜在的污染风险和资源化潜力。测试结果详见表 4。

熔炉铝灰中含有很高含量的铝元素成分, 质量分数达到 40.1%, 根据其它文献 [3], 铝元素多以氧化物的形态存在; 铝灰中的铜、铁很少; 熔炉产生的除尘灰中, 金属很少; 熔炉铝灰和除尘灰的浸出毒性都没有超过浸出毒性鉴别标准值。

表3 拆解废物元素分析及浸出毒性分析结果¹⁾

Table 3 Analysis of metal components and leaching toxicity on the solid waste generated by disassembly

序号	样本编号	样本种类	元素分析结果 $w/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)			浸出毒性分析结果 $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			
			Cu	Fe	Al	Cu	Zn	Cd	Pb
1	D1-1	混合渣	1.05	3.57	20.8	/	/	/	/
2	D3-1	电机拆解废渣	13.7	68.1	37.5	181	305	5.03	46.8
3	C3-6	自动拆解线除尘灰	35.9	9.32	237	3.58	1 880	0.097	11.9
4	C4-1	自动拆解线除尘灰	23.9	7.26	122	851	465	0.135	8.77
5	C3-5	摇床污泥	19.9	9.23	144	/	/	/	/
6	C4-3	摇床污泥	22.3	7.32	197	/	/	/	/
7	C5-1	摇床污泥	52.2	8.1	19.3	/	/	/	/
8	C8-2	摇床污泥	47.1	14.5	25.5	/	/	/	/
9	D2-1	摇床污泥	21.9	4.2	14.1	/	/	/	/
10	C11-1	废胶渣	28.6	/	ND				

1) 浸出毒性方面,按照《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GD5085.3-2007)中的浸出毒性鉴别标准值,铜、锌、镉、铅的质量浓度限值分别为100、100、1、5 mg/L。

表4 再生废物元素分析及浸出毒性分析结果

Table 4 Analysis of metal components and leaching toxicity on the solid waste generated from regeneration

序号	样本编号	样本种类	元素分析结果 $w/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)			浸出毒性分析结果 $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			
			Cu	Fe	Al	Cu	Zn	Cd	Pd
1	C3-2	熔炉铝灰	0.11	2.67	401	0.007	1.4	0.001	0.02
2	C3-4	熔炉除尘灰	1.5	24.7	30.7	25.3	58.3	0.467	0.502

2 拆解行业固体废物的管理现状

通过对国内其它电子废弃物拆解行业聚集地区以及相关管理部门、专家的调研,课题组发现管理部门目前较关注该行业拆解产生的一些较明显易辨的危险废物,要求企业将其交付有危废处理资质的公司处理;另外,对进口电子废弃物中的夹带废物重量比例也有政策要求^[2]。浙江省某工业园内企业的主要的拆解对象为废五金、废电机,因再细致拆解的成本收益问题,拆解企业剩余的一些仍具有再分选价值的电机拆解废渣会卖给园区内的其它几家专门做拆解废渣再分选的企业,通过人工拆解+水力摇床的分选方式,回收其中的金属、塑料等物质。

然而,清远市电子废弃物拆解行业的原料种类多样,包括废五金、废电机、废电线电缆等,同时,还有一些铜、铝的深加工企业,管理部门对于成分不清、性状不明的拆解废物(例如摇床污泥、废胶渣等)和再生废物(例如铝灰铝渣等)少有监管。有些固体废物流向没有处理能力或没有配套污染防治措施的处置单位,有些被弃置堆放在山野

或道路两边,有些与生活垃圾混合运往生活垃圾填埋场填埋。大量拆解行业固体废物运往垃圾填埋场给清远市垃圾处置带来了沉重负担;而拆解固体废物如果违法弃置,日积月累,将形成大量遗留固体废物,严重污染当地环境,影响当地居民健康。

国内外对覆铜板分选残渣及铝灰铝渣都有一些研究成果报道^[4-10],但系统、全面地对电子废弃物拆解行业固体废物的处理处置管理体系和技术体系进行研究的则较少,对于摇床污泥、废胶渣等拆解废物的资源化技术鲜有研究报道。

3 拆解行业固体废物分选技术研究

针对研究较少、产生量较大的两种拆解废物—摇床污泥和废胶渣,开展了初步探索阶段的分选技术研究。

3.1 摇床污泥

采用X射线衍射、显微镜和扫描电镜对摇床污泥进行物相组成查定。由测定结果以及结合已知的原料性质可知,摇床污泥中可回收利用的金属是铜,并伴生一些有用的其他金属,如铁、铅、锌、铈、锡等,但含量都较低。铜主要以单质铜的形式

存在, 或者与其他金属元素形成合金状态。通过肉眼和显微镜观察都很难有效地找到摇床污泥中的有价金属, 塑料与金属之间夹杂非常严重。

应用标准筛将摇床污泥粉碎样品 (应用多功能切割粉碎机破碎 20 min) 筛分成 7 个粒度级别, 将筛分得到的每一粒级物料称重, 分析物料的粒级分布, 并根据《固体废物 镉 铜 铅 锌的测定 原子吸收分光光度法》(GB/T 15555.2-1995) 测定各级物料中的金属铜含量情况。由于摇床污泥破碎后有很多絮状物存在, 所以, 同一粒级物料也会分粒状物和絮状物来分别进行分析。粉碎样品筛析结果详见表 5。

表 5 摇床污泥粉碎 20 min 后粒度筛析结果

Table 5 Analysis of screening of shaker sludge after being broken for 20 minutes

粒度级别 /mm	物料分类	产率/%	铜品位/%	铜分布率/%
+1	絮状物	18.72	0.68	7.41
	粒状物	9.61	0.08	0.47
0.5~1.0	絮状物	1.07	1.09	0.67
	粒状物	24.23	0.64	8.95
0.27~0.50	絮状物	6.55	1.59	6.02
	粒状物	10.66	1.06	6.55
0.15~0.27	混合物	22.86	3.75	49.59
0.106~0.150	混合物	2.83	4.33	7.09
0.075~0.106	混合物	1.15	5.21	3.47
<0.075	混合物	2.31	7.33	9.79

铜以相对均匀的形式分布于各级别中, 随着粒度的减小铜品位缓慢增大, 但趋势不明显。粒状物和混合物的铜分布率为 85.91%。

摇床污泥中的导体和非导体相互夹杂, 与废胶渣相比, 较难通过物理的方法进行铜的再分选, 因此, 针对摇床污泥, 重点进行了酸液浸出实验研究。实验结果详见表 6。柠檬酸对摇床污泥的浸出效果最好, 最高达到 23.86%, 酸液浸出的条件仍有待进一步研究。

3.2 废胶渣

经过对重选、浮选、涡电流分选、静电分选这四种物理分选技术的试验, 最终选定静电分选作为进一步实验的技术。静电分选的铜回收率较高, 精料中含铜品位为 52.72%、铜回收率为 78.12%, 尾料中品位可以降至 0.5% 以下。同时, 通过成本分析, 每 t 废胶渣静电分选的利润约为 88.45 元 (暂没考虑废胶渣中回收废塑料可获得的经济效

益), 经济效益较好; 同时, 静电分选不产生废水废气污染, 安全性高。

表 6 摇床污泥酸液浸出结果¹⁾

Table 6 Analysis of acid leaching of shaker sludge

酸液种类	样品质量/g	样品中铜的质量/g	酸浸出的铜的质量/mg	酸浸的铜回收率/%
$\varphi = 10\%$ 硫酸	25.016 1	0.433	4.783	1.11
$\varphi = 20\%$ 硫酸	25.058 5	0.434	5.017	1.16
$\varphi = 10\%$ 柠檬酸	25.049 5	0.433	19.674	4.54
$\varphi = 20\%$ 柠檬酸	25.023 9	0.433	103.330	23.86
$\varphi = 10\%$ 醋酸	25.002 0	0.433	3.739	0.86
$\varphi = 20\%$ 醋酸	25.024 3	0.433	8.375	1.93

1) 液固比 6:1, 浸出温度 80 °C, 持续搅拌, 反应时间 4 h

4 拆解行业固体废物分类管理体系

综合分析, 针对清远市电子废弃物拆解行业固体废物的类别、性状, 提出系统的分类管理体系, 即“精细分类→资源化回收→无害化处置→系统监控”, 详见图 1。

1) 精细分类。清远市电子废弃物拆解行业固体废物大致分为三类: 夹带废物、拆解废物、再生废物; 三类固体废物中又分别包含很多来源不同的废物类别, 每一小类固体废物的产生量、成分及危害特性都不同, 需要动态化、精细化对固体废物进行分类管理, 才能实现资源节约、环境友好的固体废物处理处置目的。

2) 资源化回收。对于某些有回收价值的固体废物, 通过应用技术成熟、经济可行、环境友好的资源化处理技术, 提取和回收当中的金属、塑料等有价值成分, 不仅能够获得一定的经济效益, 同时还能减少重金属对环境的污染, 获得双赢的目的。

3) 无害化处置。对于人工可辨识的危险废物、经鉴别后认定的危险废物、没有再分选价值的固体废物、资源化处置后的剩余残渣等, 应当最终统一交由有资质的处理单位, 进行无害化处置。

4) 系统监控。建立规范的分类回收处置体系, 建设清远市电子废弃物拆解行业固体废物分类管理平台, 搭建数据信息管理系统, 全面监控固体废物产生、收运、处理处置全过程的物料流向情况。

5 问题与展望

1) 建议政府部门对电子废弃物拆解行业固体废物进行分类管理, 在政府监管下统一对固体废物进行分类收集、运输, 防止固体废物随意倾倒, 降

