

废线路板处理工艺中持久性有毒物质环境释放特征

毛佳迪¹, 马维宇¹, 吴军莲², 王玲玲², 于南洋¹, 韦斯^{1*}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210093; 2. 江苏省固体废物监督管理中心, 江苏 南京 210036)

摘要:以江苏省某示范企业为例,对废线路板退锡和粉碎 2 个处理阶段的有组织、无组织废气以及废线路板处理余物中的持久性有毒物质(PTS)进行检测,并对其环境释放特征进行分析。结果表明,退锡阶段无组织废气中氯代二噁英类物质的浓度显著高于有组织废气,粉碎阶段有机和无机 PTS 浓度均高于退锡阶段,无机 PTS 的环境释放主要为悬浮颗粒物中的 Pb、Cd、Cr 及其化合物。通过 PTS 物质流分析可知,无机 PTS 释放质量分数(0.0%~22.0%)高于有机 PTS 释放质量分数(0.0%~1.0%),在金属和非金属粉末中含有大量的有机 PTS。提出,采用自动化设施,减少工人的车间工作时间,降低其职业暴露风险,并关注废线路板处理余物的后续使用与处理。

关键词:废线路板;回收处理;持久性有毒物质;环境释放特征

中图分类号:X76

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2019)03-0006-06

Environmental Release Characteristic of PTS in Waste Circuit Board Treatment Process

MAO Jia-di¹, MA Wei-yu¹, WU Jun-lian², WANG Ling-ling², YU Nan-yang¹, WEI Si^{1*}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; 2. Jiangsu Provincial Solid Waste Supervision and Management Center, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

Abstract: This study takes one standard enterprise in Jiangsu Province as an example to analyze the environmental release characteristic of persistent toxic substance (PTS) in organized emission, unorganized emission and electronic waste residue during the treatment of waste circuit boards by detecting their concentration. The results showed that the concentration of chlorinated dioxins in the unorganized emission was significantly higher than that in the organized emission. In addition, the concentration of organic and inorganic PTS in the grinding technique is higher than that in the de-stannous technique. Among them, inorganic PTS is mainly composed of Pb, Cd, Cr and their compounds in suspended particulate matter. According to PTS material flow analysis, the release ratio of inorganic PTS (0.0%~22.0%) is higher than that of organic PTS (0.0%~1.0%). Unfortunately, a large amount of organic PTS remains in metal and non-metal powders. Therefore, further attention needs to be paid to the subsequent use and processing of waste circuit board processing residues. Moreover, it is proposed to use automated facilities to reduce the worker's workshop time to reduce the risk of occupational exposure.

Key words: Waste circuit board; Recovery treatment; Persistent Toxic Substance; Environmental release characteristic

20 世纪以来,技术的革新和经济的发展导致电子设备的快速更新换代,产生了大量的废弃电子产品,全世界的电子废弃物产生量每年已超过 5 亿 t^[1]。目前,我国已进入电器电子产品报废高峰期^[2],据中华人民共和国商务部流通业发展司统计的数据,我国每年电器电子产品的产生量超过 6.10×10^6 t,且每年以 5%~10% 的速度快速增长^[3]。

废弃电器电子产品中含有大量稀贵金属,具有很高的回收利用价值^[4]。在此背景下,针对废弃

电器电子产品拆解回收的产业链条逐渐形成。虽然废弃电器电子产品,特别是作为拆解产物的废线路板中,含有大量的稀贵金属使其极具回收价值,

收稿日期:2019-01-03;修订日期:2019-03-01

基金项目:全球环境基金项目资助(5044);江苏省环保科研课题基金项目资助(2017001);江苏省环境监测科研基金项目资助(1317)

作者简介:毛佳迪(1993—),女,在读硕士研究生,研究方向为环境化学。

* 通讯作者:韦斯 E-mail: weisi@nju.edu.cn

但其中还含有大量的持久性有毒物质 (Persistent Toxic Substance, PTS)^[5-8], 例如在焊锡中含有重金属铅, 而覆铜层压板中起黏合作用的树脂中, 含有大量阻燃剂类物质^[9-10]。因此, 在对废线路板进行处理处置的过程中需要关注这些有毒有害物质的释放。

对于废旧线路板的处理, 在缺乏控制的情况下, PTS 会在处理过程中产生危害性更大的副产物并逐步释放于环境^[11], 如二噁英类物质 (多氯、多溴代二苯并二噁英和二苯并呋喃)^[12-13]。废线路板中典型的 PTS 见表 1。

表 1 废线路板中典型的 PTS

PTS	说明	PTS	说明
多溴联苯醚	列入斯德哥尔摩公约 ^[15] 欧盟 RoHS 指令	四溴双酚 A	应用最广的阻燃剂
六溴环十二烷	列入斯德哥尔摩公约	1,2-双(2,4,6-三溴苯氧基)乙烷	新型溴代阻燃剂
得克隆	新型氯代阻燃剂	十溴二苯乙烷	新型溴代阻燃剂
有机磷酸三酯类	新型磷系阻燃剂	多溴联苯	欧盟 RoHS 指令
铅	欧盟 RoHS 指令	镉	欧盟 RoHS 指令
汞	欧盟 RoHS 指令	六价铬	欧盟 RoHS 指令

由于 PTS 对生态安全和人群健康的潜在危害^[14], 废线路板处理过程应当削减这些污染物的环境释放强度, 达到 PTS 减排的目的。

2016 年原国家环境保护部对《国家危险废物名录》进行修订, 并于 2016 年 8 月 1 日开始实施。修订后的《国家危险废物名录》中考虑到废线路板 (包括废线路板上附带的元器件、芯片、插件、贴脚等) 中有害物质的毒性, 将其列为危险废物 (900-045-49)。同时将废覆铜板、印刷线路板、电路板破碎分选回收金属后产生的废树脂粉也列为危险废物 (900-451-13)。我国《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996) 中规定, 铅、汞、镉、锡及其化合物在固定排放源的排放限值分别为 0.70, 0.012, 0.85, 8.5 mg/m³。

目前, 江苏省规范拆解企业除一家采用机械处理法与焚烧法结合以外, 其余全部采用机械物理法对废旧线路板进行回收。现以江苏省某示范企业为例, 分析该企业机械物理法处理工艺中 PTS 的赋存介质以及赋存含量, 结合存量研究和各类赋存

介质中污染物的含量研究, 由物质平衡等计算出污染物的量, 对废线路板处理过程中 PTS 的环境释放特征进行分析。

1 研究方法

1.1 样品采集

以江苏省某示范企业为例, 进行废弃电子电器拆解场地的实地采样研究。2016 年, 《国家危险废物名录》未修订时, 该企业针对废弃电器电子产品拆解产物——废线路板, 实际处理产能达到 1 × 10⁴ t/a, 目前已不再自行处理。企业主要废弃电子电器回收利用工艺流程见图 1。根据生产流程和工艺, 将采样分为线路板的退锡和粉碎 2 个阶段, 采集无组织排放的环境空气悬浮颗粒物及降尘, 有组织排放的废气以及废线路板处理余物 (树脂粉末与金属粉末的成品) 进行 PTS 检测。

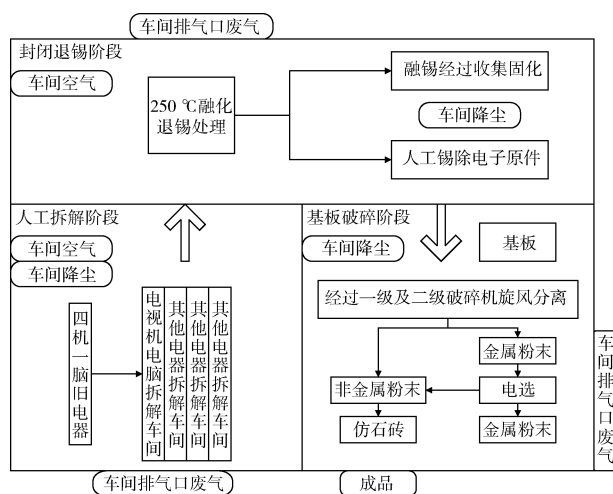


图 1 企业废弃电子电器回收利用处理工艺流程

对于退锡及粉碎过程的降尘, 在样品采集之前先将采样点使用经过甲醇清洗的毛刷进行除尘处理, 在经过一天的生产以后, 使用毛刷采集采样点新产生的灰尘, 包置于锡纸中带回实验室进行处理。该企业在退锡与粉碎的工段, 废气通过旋风分离以及布袋除尘以后通过烟气道排放进入大气环境中。对于企业的有组织废气, 根据原国家环境保护总局《排污口规范化整治技术要求 (试行)》(国家环保局环监 [1996] 470 号) 进行采样, 采用等速跟踪的方式进行采样, 采样时长为 2 h; 对于无组织废气, 采用总悬浮颗粒物 (TSP) 空气切割采样器, 以 100 L/h 的采样流量进行 6 h 采样, 利用玻璃纤

维膜进行切割,得到空气中的 TSP。

1.2 仪器、项目及方法

仪器:Agilent 7890B/JMS-800D UltraFocus 高分辨气相色谱与高分辨质谱联用仪(HRGC-HRMS,美国 Agilent 公司);Agilent 7890A/JMS-Q1000GC MK II 气相色谱质谱联用仪(GC-MS,美国 Agilent 公司);iCAP Qc 四极杆电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,赛默飞世尔科技有限公司);FP32 原子荧光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)。

检测项目:3 类有机 PTS 为多氯二苯并对二噁

英/呋喃(PCDD/Fs)、多溴联苯(PBBs)、多溴联苯醚(PBDEs);4 种无机 PTS 为铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、六价铬(Cr⁶⁺)。

检测方法:《环境空气和废气 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.2-2008)检测 PCDD/Fs;《电子电气产品 六种限用物质(铅、汞、镉、六价铬、多溴联苯和多溴二苯醚)的测定》(GB/T 26125-2011)检测 PBBs、PBDEs、Pb、Hg、Cd、Cr⁶⁺。具体检测仪器、项目、方法信息见表 2,内标信息见表 3。

表 2 检测仪器、项目、方法信息

检测方法	定量方法	前处理技术	仪器	检测项目	检出限
《HJ 77.2-2008》	内标法	索氏提取	HRGC-HRMS	PCDD/Fs	0.05~0.25 pg/m ³
《GB/T 26125-2011》	外标法	消解法	GC-MS	PBBs、PBDEs	100~2 000 mg/kg
			FP32 原子荧光光度计	Hg	4 mg/kg
			ICP-MS	Pb、Cd	10 mg/kg
				Cr ⁶⁺	2 μg/g

表 3 内标信息

氯原子取代数	所使用内标
四氯	¹³ C ₁₂ -2,3,7,8-T ₄ CDD/Fs
五氯	¹³ C ₁₂ -1,2,3,7,8-P ₅ CDD/Fs ¹³ C ₁₂ -2,3,4,7,8-P ₅ CDF
六氯	¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,7,8-H ₆ CDD/Fs ¹³ C ₁₂ -1,2,3,6,7,8-H ₆ CDD/Fs ¹³ C ₁₂ -2,3,4,6,7,8-H ₆ CDF ¹³ C ₁₂ -1,2,3,7,8,9-H ₆ CDF
七氯	¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,6,7,8-H ₇ CDD/Fs ¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,7,8,9-H ₇ CDF
八氯	¹³ C ₁₂ -O ₈ CDD

2 结果与讨论

2.1 废线路板处理过程中环境释放特征

2.1.1 退锡阶段的 PTS 环境释放特征

废线路板处置过程废气中有机 PTS 含量见表 4。由表 4 可知,在退锡阶段的有组织废气中,未检测到 PBBs 的存在,ρ(∑PBDEs)为 60.31 ng/m³,排放速率为 298.02 μg/h;毒性当量(TEQ)ρ(∑PCDD/Fs)为 0.002 8 ng/m³,排放速率为 0.001 4 μg/h。由于废线路板中含有大量过渡金属,起催化作用,降低了二噁英的生成温度,导致退锡阶段生成二噁英。目前我国并没有 PBBs 与 PBDEs 的排放标准,有组织废气中氯代二噁英类

物质的排放质量浓度低于《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484-2001)中 0.5 ng TEQ/Nm³ 的限值。

在退锡阶段的车间环境空气中,ρ(∑PBBs)为 1.84 ng/m³,ρ(∑PBDEs)为 32.56 ng/m³,TEQ ρ(∑PCDD/Fs)为 0.23 ng/m³,其中氯代二噁英类物质的浓度显著高于有组织废气。依据二噁英类物质人体每日耐受量为 4 pg/kg,职业工人质量 70 kg 计算,该工段工人吸入车间空气量限值为 1.2 m³/d。通过技术改造,该工段采用自动化控温序批次密闭退锡炉,相对敞开式人工退锡炉有效削减无组织排放和工人的暴露时间,正常工况下,工人只在加料和卸料过程中进入工段,降低了二噁英的暴露风险。同时,应当建立规范的工段操作流程,注意温度控制和仪器的密封,以减少 PBBs、PBDEs 和二噁英的释放。

表 4 废线路板处置过程废气中有机 PTS 质量浓度^①

项目	ρ(∑PBBs)/ (ng·m ⁻³)	ρ(∑PBDEs)/ (ng·m ⁻³)	ρ(∑PCDD/Fs)/ (ngTEQ·m ⁻³)
退锡阶段有组织废气	—	60.31	0.002 8
退锡阶段车间空气	1.84	32.56	0.23
粉碎阶段有组织废气	—	64.20	0.049
粉碎阶段车间空气	9.68	106.35	

①“—”表示所有的目标物均低于检出限,所有的目标物加和以低于检出限计算,下同。

废线路板处置过程中无机 PTS 质量浓度见表 5。在退锡阶段,无机 PTS 的释放主要为悬浮颗粒物中的 Pb、Cd、Cr 及其化合物。由于退锡阶段的密封措施与废气收集系统良好,在退锡车间没有检测到挥发性 Hg,其他无机 PTS 浓度也低于粉碎车间。在废线路板的退锡阶段,所有的有标准限值规定的 PTS 均未超过《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)的无组织排放限值(Pb、Hg、Cd 分别为 0.006 0, 0.001 2, 0.040 mg/m³)。虽然未超过标准限值,但需进一步优化改进,例如可以减少颗粒物的逸散以减少颗粒物中 Pb、Cd、Cr 的长期暴露。

表 5 废线路板处置过程中无机 PTS 质量浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

项目	退锡车间空气	退锡车间 TSP	粉碎车间空气	粉碎阶段废气	粉碎车间 TSP
$\rho(\text{Hg})^{\text{①}}$	—	—	0.004 8	—	—
$\rho(\text{Pb})$	—	1.101	—	154.408	13.479
$\rho(\text{Cd})$	—	0.008	—	0.245	0.010
$\rho(\text{Cr}^{6+})$	—	0.185	—	95.45	0.394

①单位为 mg/m^3 , 检出限为 0.002 5 mg/m^3 。

2.1.2 粉碎阶段的 PTS 环境释放特征

由表 4 可知,粉碎阶段的有机 PTS 质量浓度高于退锡阶段,由于在粉碎过程中,废线路板的温度上升导致有机 PTS 的挥发,此外温度的上升也会导致二噁英类物质的合成。粉碎过程的有组织废气中,仍然未检测到 PBBs, $\rho(\sum \text{PBDEs})$ 为 64.20 ng/m^3 , 排放速率为 233.43 $\mu\text{g}/\text{h}$; TEQ $\rho(\sum \text{PCDD}/\text{Fs})$ 为 0.049 ng/m^3 , 排放速率为 0.001 5 $\mu\text{gTEQ}/\text{h}$ 。有组织废气中氯代二噁英类物质的排放浓度低于《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)中 0.1 ngTEQ/Nm^3 限值。该工段采用二级机械破碎处理后通过旋风分选设施实现自动化的废线路板处理的金属粉末和非金属粉末的收集。正常工况下只在加料和卸料过程中,工人进入工段,降低了污染物的暴露风险。

废线路板处理余物中有机 PTS 质量比见表 6。由表 6 可知,粉碎阶段中大量的废线路板被机械破碎成小颗粒,空气颗粒物大量增加。由于空气颗粒物在悬浮阶段能吸附各类逸散的物质,导致环境空气和 TSP 中的无机 PTS 质量浓度高于退锡阶段。因此,在废线路板的粉碎阶段,需要进一步加强无机 PTS 的控制措施,减少颗粒物的逸散。此外,应

当关注破碎工人的职业暴露风险,建立规范的工段操作流程,减低职业暴露风险。

表 6 废线路板处理余物中有机 PTS 质量比 ng/g

项目	$\omega(\sum \text{PBBs})$	$\omega(\sum \text{PBDEs})$
拆解余物之金属粉末	—	13 260.0
拆解余物之树脂粉末	13.1	43 937.4

2.2 废线路板处理过程中的 PTS 物质流分析

2.2.1 PTS 物质流核算方法

据调查^[16],线路板中非金属的含量约为 60%,金属的含量约为 35%,元器件的比重约为 5%,采用该比例进行废线路板组成估算。

依据监测数据,应用如下方法进行核算:(1)按照废气有组织排放收集率 90% 估算企业有组织和无组织排放源强;(2)污染物排放量按照 $1 \times 10^4 \text{ t/a}$ 估算;(3)每年按 360 d 计算,每日运行时间为 24 h;(4)未检出浓度按照检出限的 1/2 计算;(5)所有 PTS 核算为单位废线路板处理产生的 PTS 量;(6)污染物排放流量为排放速率乘以单位废线路板处理耗时。

溴代二噁英类物质是废线路板处理过程中广泛检出的物质,由于本次监测并未覆盖该类物质,依据文献研究废线路板低温处理过程中的结果^[12],发现溴代二噁英类物质在废线路板处理过程中的产生量是氯代二噁英类物质的 100 ~ 1 000 倍,因此本次估算采用 500 倍进行计算。

2.2.2 PTS 物质流核算结果

依据监测数据,以整个系统中的 PTS 流入为整体,对整个处理过程中 PTS 的迁移过程做出分析得到物质流,见图 1、图 2。

根据表 4、表 5、表 6 及物质流核算方法,废线路板机械物理法中 PTS 物质流分析结果见表 7。1 t 废线路板中赋存 50 kg 元器件,32.2 g 的 Pb, 64.6 mg 的 Cd, 1.8 g 的 Cr, 93.5 mg 的 Hg, 8.6 mg 的 PBBs 和 31.0 g 的 PBDEs。通过有组织和无组织方式排放进入环境的污染物量为: $\omega(\text{Pb}) = 715.6 \text{ mg}/\text{t}$, $\omega(\text{Cd}) = 1.1 \text{ mg}/\text{t}$, $\omega(\text{Cr}) = 442.2 \text{ mg}/\text{t}$, $\omega(\text{Hg}) = 5.6 \mu\text{g}/\text{t}$, $\omega(\text{PBBs}) = 58.9 \mu\text{g}/\text{t}$, $\omega(\text{PBDEs}) = 0.9 \text{ mg}/\text{t}$ 。

总体而言,释放的无机 PTS 总量高于有机 PTS,由于有机 PTS 的转化,产生 0.038 μgTEQ 的氯代二噁英类物质和 18.70 μgTEQ 溴代二噁英类物质。

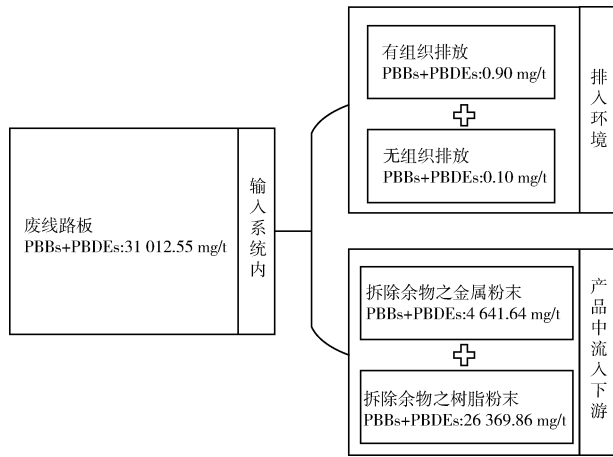


图 1 机械法处理过程中有机 PTS 的物质流过程

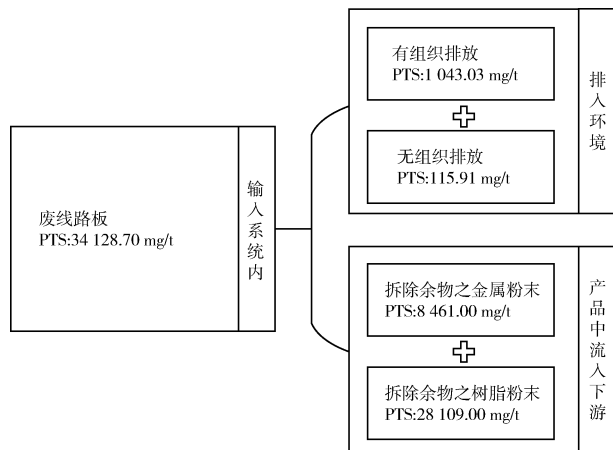


图 2 机械法处理过程中无机 PTS 的物质流过程

表 7 废线路板机械物理法中 PTS 物质流分析结果 mg/t

项目	废线路板 PTS 赋存量	有组织排放	无组织排放	金属粉末赋存	非金属粉末赋存
ω (元器件)	50 ^①				
ω (Pb)	32 162.6	644.0	71.6	4 718.0	26 729.0
ω (Cd)	64.6	1.0	0.1	3.5	60.0
ω (Cr)	1 808.0	398.0	44.2	136.0	1 230.0
ω (Hg)	93.5	0.005	0.000 56	3.5	90.0
ω (PBBs)	8.55	0.053	0.005 9	0.63	7.86
ω (PCDD/Fs)	—	0.034 ^②	0.003 7 ^②	—	—
ω (PBDD/Fs)	—	16.80	1.86	—	—
ω (PBDEs)	31 004	0.85	0.094	4 641	26 362

①单位为 kg/t;②单位为 $\mu\text{gTEQ/t}$ 。

无机 PTS 释放比重为 0.0% ~ 22.0% ,有机 PTS 释放比重为 0.0% ~ 1.0% ,说明机械物理法可以很好地控制有机污染物的释放。由于该企业在工段中采用良好的密封和完善的废气收集系统,导致易挥发性的 Hg 和有机物极少逸散至车间空气,大量残留至余物中。Pb、Cd、Cr 及其化合物吸附在

粉碎阶段形成的空气颗粒物和降尘中,导致无机 PTS 的释放高于有机 PTS。

在金属和非金属粉末中含有大量的有机 PTS,是后续废线路板处理余物的使用与处理过程中关注的重点。此外,二噁英类物质仍然是废线路板处理中的关键问题,虽然有组织的排放可以有效控制,但车间环境相关的职业暴露应当受到关注。

3 结论

(1) 退锡阶段无组织废气中氯代二噁英类物质的浓度显著高于有组织废气,但并未超过《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484—2001)的 0.5 ng TEQ/Nm³与《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)的 0.1 ng TEQ/Nm³排放限值。

(2) 粉碎阶段有机和无机 PTS 浓度均高于退锡阶段,无机 PTS 的环境释放主要为悬浮颗粒物中的 Pb、Cd、Cr 及其化合物。车间空气中各类 PTS 都存在浓度较高的情况,企业通过采用自动化设施,减少工人在车间的工作时间,降低了工人的职业暴露风险。

(3) 通过 PTS 物质流分析可知,无机 PTS 释放质量分数(0.0% ~ 22.0%)高于有机 PTS 释放质量分数(0.0% ~ 1.0%) ,在金属和非金属粉末中含有大量的有机 PTS。无机 PTS 是示范企业下一步减控的重点。此外,大部分的 PTS 仍停留在废线路板处理余物中,对于下游产品例如仿石砖以及金属粉末等的利用要对其进行充分说明,以作为下游产品使用时的 PTS 减控指导参考。

[参考文献]

[1] DATO P. Economic analysis of e-waste market[J]. International Environmental Agreements Politics Law & Economics, 2017, 17(6):1-23.

[2] 吴俊锋,高岩,姚敏,等. 我国废旧家电回收处理中 POPs/PTS 的产生与减排研究[J]. 环境科技, 2017, 30(5):66-70.

[3] ONGONDO F O, WILLIAMS I D, CHERRETT T J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes[J]. Waste Management, 2011, 31(4): 714-730.

[4] 于可利. 废弃电器电子产品中的稀贵金属回收利用[J]. 资源再生, 2016(1):46-48.

[5] LEUNG A O W, DUZGOREN-AYDIN N S, CHEUNG K C, et al. Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China[J].

- Environmental Science & Technology, 2008, 42 (7): 2674 - 2680.
- [6] ORTÑO N, CONESA J A, MOLTÓ J, et al. Pollutant emissions during pyrolysis and combustion of waste printed circuit boards, before and after metal removal [J]. Science of The Total Environment, 2014 (499): 27 - 35.
- [7] 冷湘梓, 姚敏, 余辉, 等. 废弃电器电子产品中废线路板的 POPs 排放控制研究 [J]. 污染防治技术, 2018, 31 (1): 55 - 58.
- [8] WANG R, XU Z. Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review [J]. Waste Management, 2014, 34 (8): 1455 - 1469.
- [9] 顾明事, 李兴福, 赵泽华, 等. 江苏省废线路板处置利用现状及管理对策研究 [J]. 污染防治技术, 2017, 30 (5): 90 - 94.
- [10] 许鹏. 废弃印刷线路板热解及热解气焚烧机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [11] SOLER A, CONESA J A, ÑIGUEZ M E, et al. Pollutant formation in the pyrolysis and combustion of materials combining biomass and e-waste [J]. Science of The Total Environment, 2018 (622 - 623): 1258 - 1264.
- [12] DUAN H, LI J, LIU Y, et al. Characterizing the emission of chlorinated/brominated dibenzo-p-dioxins and furans from low-temperature thermal processing of waste printed circuit board [J]. Environmental Pollution, 2012 (161): 185 - 191.
- [13] 黄蓉, 毕承路, 赵文杰, 等. 废线路板粉末中二噁英含量的测定 [J]. 中国环境监测, 2016, 32 (6): 130 - 134.
- [14] MREMA E J, RUBINO F M, BRAMBILLA G, et al. Persistent organochlorinated pesticides and mechanisms of their toxicity [J]. Toxicology, 2013, 307: 74 - 88.
- [15] 京都议定书. 斯德哥尔摩公约 [J]. 信息导刊, 2005 (21): 23.
- [16] 张杜杜, 徐东军. 废旧线路板非金属材料综合利用 [J]. 再生资源与循环经济, 2009, 2 (10): 38 - 41.
-
- (上接第 5 页)
- [23] 李军状, 朱法华, 李小龙, 等. 燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物测试研究进展与方法构建 [J]. 电力科技与环保, 2018, 34 (1): 37 - 44.
- [24] United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). EPA method 202 best practices handbook [Z]. Washington, D. C.: U. S. EPA, 2016.
- [25] United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). Determination of particulate matter emissions from stationary sources: Method 5 [S]. Washington, D. C.: U. S. EPA, 2017.
- [26] 赵金宝, 赵珊, 李峰. Nafion 干燥器除湿技术在 VOC 监测上的应用 [J]. 分析仪器, 2018 (2): 6 - 13.
- [27] 林源. 便携式烟气预处理器技术在比对监测中的应用 [J]. 环境监控与预警, 2016, 8 (6): 37 - 39.
- [28] United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). Measurement of PM_{2.5} and PM₁₀ by dilution sampling (constant sampling rate procedures): CTM 039 [S]. Washington, D. C.: U. S. EPA, 2004.
- [29] ISO. Stationary source emissions-test method for determining PM_{2.5} and PM₁₀ mass in stack gases using cyclone samplers: ISO 25597—2013 [S]. Switzerland: ISO, 2013.
- [30] 周楠, 曾立民, 于雪娜, 等. 固定污染源稀释通道的设计和场外测试研究 [J]. 环境科学学报, 2006, 26 (5): 764 - 772.
- [31] 李兴华, 段雷, 郝吉明, 等. 固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用 [J]. 环境科学学报, 2008, 28 (3): 458 - 463.
- [32] 韩斌. 燃煤尘稀释采样器的设计及成分谱建立方法研究 [D]. 天津: 南开大学, 2009.
- [33] 李兴华, 曹阳, 蒋靖坤, 等. 固定污染源 PM_{2.5} 稀释采样器的研制 [J]. 环境科学学报, 2015, 35 (10): 3309 - 3315.
- [34] CANO M, VEGA F, NAVARRETE B, et al. Characterization of emissions of condensable particulate matter in clinker kilns using a dilution sampling system [J]. Energy & Fuels, 2017, 31 (8): 7831 - 7838.

栏目编辑 王湜