

废旧电路板加热拆解过程中颗粒物的排放及其在人体呼吸系统的沉积特征*

纪 昂¹ 王建波¹ 郭 杰^{1,2#} 许振明¹ 杨义晨³ 李英顺³

(1.上海交通大学环境科学与工程学院,上海 200240;2.上海电子废弃物资源化产学研合作开发中心,上海 201209;

3.上海新金桥环保有限公司,上海 201201)

摘要 废旧电路板(WPCB)表面焊接有大量电子元器件,从资源高效回收的角度出发,需要对 WPCB 进行加热拆解以便于电子元器件及电路板基板材料的后续处理。WPCB 加热拆解过程将释放大量的烟雾污染物,易造成环境污染并危害工人健康。对 WPCB 加热拆解过程释放颗粒物的粒径分布、颗粒物数浓度和颗粒物质量浓度等特征进行研究,核算不同粒径段颗粒物的排放系数,并研究了加热拆解过程中颗粒物在人体呼吸系统的沉积特征。总体看来,WPCB 加热拆解过程所释放的颗粒物中,数量上以细颗粒物为主,粒径越小的颗粒物数浓度越高,质量上以大颗粒为主,粒径越大的颗粒物质量浓度越高。WPCB 加热拆解过程中,颗粒物数浓度排放系数为 3.30×10^5 个/ cm^3 ,质量浓度排放系数为 $9.55 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。工人操作过程中吸入的颗粒物主要沉积在呼吸系统的鼻腔咽喉部位、气管支气管部位和肺部部位,3个部位的沉积通量分别为 $3.32, 1.26 \times 10^{-1}, 1.99 \times 10^{-1} \text{ mg}/\text{h}$,合计每小时约有 3.65 mg 颗粒物进入工人的呼吸系统,需要对工人提供呼吸系统的保护措施。

关键词 废旧电路板 颗粒物 排放系数 呼吸暴露

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.06.001

Particulate matter emission and deposition characteristics in human respiratory system during waste printed circuit boards heating and disassembling process JI Ang¹, WANG Jianbo¹, GUO Jie^{1,2}, XU Zhenming¹, YANG Yichen³, LI Ying-shun³. (1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. Shanghai Cooperative Centre for WEEE Recycling, Shanghai 201209; 3. Shanghai Xin Jinqiao Environmental Protection Co., Ltd., Shanghai 201201)

Abstract: There was a large number of electronic components on the surface of waste printed circuit boards (WPCB). From the perspective of efficient recycling of WPCB, it was very important to remove the electronic components on WPCB. The most common way was heating and melting the solder between electronic components and printed circuit board. While large amount of pollutants would released during the heating and disassembling process, and it would cause environmental pollution and harm to the health of workers. In this research, the characteristics of particle size distribution, number concentration and mass concentration were determined experimentally in the process of heating and disassembling WPCB. The deposition characteristics of the particulate matter in human respiratory system were also studied. The results showed that the majority of the particulate in number were fine particulate matter, and the particle number concentration was higher when particle size smaller. Large particles contributed more of particle mass, with the greater the particle size, the higher the particulate mass concentration. During the treatment process, the emission coefficient of the particle number concentration was $3.30 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, and the emission coefficient of mass concentration was $9.55 \text{ mg}/\text{m}^3$. The deposition fluxes of particulate matter inhaled in the respiratory system of the nose and throat, trachea and bronchus, alveolar area was $3.32, 1.26 \times 10^{-1}, 1.99 \times 10^{-1} \text{ mg}/\text{h}$, respectively. About 3.65 mg particulate matters was inhaled into the worker's respiratory system every hour. It's necessary to provide protection measures for workers' respiratory system.

Keywords: waste printed circuit boards; particulate matter; emission coefficient; inhalation exposure

随着科技的快速发展,越来越多的电器电子产品被淘汰遗弃,成为电子废弃物(WEEE)。2014年,全球 WEEE 总量约为 4 180 万 t,并以每年 200

万 t 的速度持续增长。我国作为最大的发展中国家,年均 WEEE 产生量达 600 万 t 以上,是仅次于美国的第二大 WEEE 制造国。预计到 2020 年,我国

第一作者:纪 昂,男,1992 年生,硕士研究生,主要从事电子废弃物资源化及污染特征研究。* 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.21307030);上海电子废弃物资源化产学研合作开发中心开放基金资助项目。

电器电子产品年报废数量将达到 1.37 亿台^[1]。WEEE 中含有许多可以回收利用的资源,是一座巨大的“城市矿山”,但对 WEEE 的处置方法不当,将会使其中的重金属、有机污染物释放出来^[2],对环境和人体健康造成严重的危害^[3-6]。

WEEE 中经济价值较大的资源多集中在电路板上^[7]。不同电器电子产品的电路板各不相同,但处理处置方法大同小异,即先进行加热拆解去除电路板上的电子元器件,再通过物理破碎或化学浸溶等方法分别回收电子元器件和电路板基板中的可重复利用资源。在拆解废旧电路板(WPCB)的过程中,由于高温加热和敲打振荡使许多污染物随之释放出来,造成大气污染^[8]。我国《废弃电器电子产品规范拆解处理作业及生产管理指南(2015年)》中规定:“以加热等方式拆解电路板上元器件、零部件等,使用负压工作台,设置能够有效收集烟尘、有害气体的废气收集处理系统。”但在实际研究中,负压工作台并不能完全去除拆解过程中产生的污染,仍有许多污染物未能被废气收集处理系统收集,这些污染物以气态或附着在颗粒物上的形式释放到环境中,通过呼吸暴露^[9]或皮肤暴露^[10]等形式对人体造成危害。此外,也会对厂区周边环境造成污染^[11-13]。

以往的文献着重对 WPCB 处理过程中产生的气态污染物(如挥发性有机化合物(VOCs))^[14]及其对周边环境的影响^[15-20]进行研究,缺乏对于 WPCB 加热拆解过程中的颗粒物排放特征及车间内工人颗粒物暴露情况的研究^[21-22]。为此,本研究通过在上海某电子废弃物回收处理公司的 WPCB 加热拆解车间进行实地检测,分析了 WPCB 加热拆解过程中产生的颗粒物的粒径分布及排放特征,并研究颗粒物在操作工人呼吸系统的沉积特征,为操作工人的职业防护提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验介绍

本研究采样地点位于上海某电子废弃物回收处理公司的 WPCB 加热拆解车间,该车间面积约为 40 m²,采样期间车间内有 3 名工人对 WPCB 进行加热拆解,每个操作台均设置负压集尘罩对操作过程产生的烟气进行负压收集及后续尾气处理。为合理评估工人的实际暴露量,将颗粒物采样点设置在集尘罩外部,位于操作工人的口鼻处附近,采样过程共持续 10 min,采样流速为 10.0 L/min,气体未稀释。

1.2 采样仪器

本研究采用电子低压撞击器(ELPI,芬兰 Dekati 公司)对车间空气中不同粒径段颗粒物的数浓度进行实时测量和记录。ELPI 通过电晕放电对气溶胶粒子荷电,气流逐级通过撞击器将颗粒物粒径分级,各级切割粒径分别为 9.920、6.680、4.000、2.390、1.600、0.948、0.613、0.382、0.263、0.157、0.095、0.054、0.028 μm,将空气中的颗粒物分为 12 个粒径段,各粒径段的空气动力学平均直径分别为 8.080、5.120、3.060、1.940、1.220、0.760、0.480、0.310、0.200、0.120、0.070、0.040 μm(例如,空气动力学平均直径 0.040 μm 对应 0.028~0.054 μm 粒径段),剩余气流由 ELPI 末端排出^[23-25]。各级撞击器分别配有电流放大器和静电计,通过各级静电计显示的电流计算各级颗粒物数浓度和质量浓度,采样时 ELPI 通过数据线与计算机连接,将所得数据实时传输并保存在计算机中。

2 结果和讨论

2.1 颗粒物排放特征

对采样期间不同粒径段颗粒物的数浓度随时间的变化规律进行分析,发现颗粒物排放总体呈周期性的变化规律,这是由于在 WPCB 加热拆解车间中,工人在操作台对每一块 WPCB 的处理流程、操作时间基本一致。本研究将每块 WPCB 的加热拆解流程视为一个完整操作,据统计,每个完整操作用时约 50 s,期间包含两个阶段:(1)加热熔锡阶段,在此阶段,工人夹取待拆解 WPCB,将含锡的一面放入操作台高温锡水中加热,使焊锡熔化,该阶段用时约 30 s;(2)去除元器件阶段,在此阶段,操作工人利用钳子等工具,通过敲打、刮除等方式去除加热后 WPCB 的元器件,该阶段用时约 20 s。在 WPCB 加热熔锡阶段,基板和焊锡受热后会连续释放大量的气体污染物,由于集尘罩的负压作用,大部分颗粒物被吸入通风管道及尾气处理系统。在去除元器件阶段,操作工人用钳子夹住 WPCB 敲打、振动时会对集尘罩内部气流造成扰乱,使部分颗粒物逸出集尘罩。

图 1 为一个完整的 WPCB 加热拆解过程中(188~237 s),不同粒径段的颗粒物数浓度随时间的变化规律。由图 1 可见,前 30 s 左右的加热熔锡阶段产生的颗粒物数浓度相对较少,峰型不明显;后 20 s 左右的去除元器件阶段,颗粒物数浓度有明显的上升,形成一个污染峰,这是由于工人敲打、振动 WPCB 对集尘罩内部气流造成扰动所致。生成的颗

颗粒物主要为空气动力学平均直径在 $0.200\ \mu\text{m}$ 以下粒径段的颗粒物,且颗粒物粒径越小,其数浓度越高。

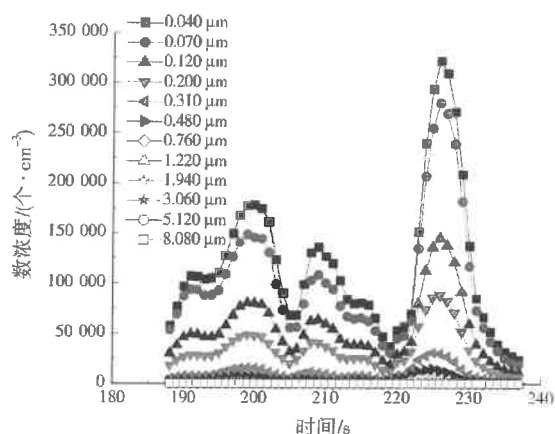


图1 一个完整过程中不同粒径段的颗粒物数浓度
Fig.1 Number concentration of particles with different sizes in a whole process

2.2 颗粒物粒径分布

图2为加热熔锡阶段和去除元器件阶段颗粒物数浓度粒径分布情况。由图2可见,WPCB加热拆解过程中产生的颗粒物大多为细颗粒物,总体看来颗粒物粒径越小,数浓度越高。加热熔锡阶段和去除元器件阶段颗粒物数浓度的粒径分布基本一致,均是以空气动力学平均直径为 0.040 、 $0.070\ \mu\text{m}$ 粒径段的颗粒物数浓度最高,即粒径在 $0.028\sim 0.095\ \mu\text{m}$ 的颗粒物数浓度最高,随粒径增加,颗粒物数浓度逐渐降低。且任何一个粒径段均是去除元器件阶段所产生的颗粒物更多,空气动力学平均直径大于 $1.940\ \mu\text{m}$ 粒径段的颗粒物更是主要来自去除元器件阶段。

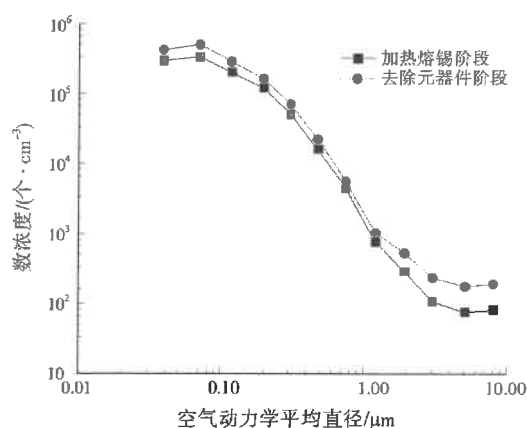


图2 两个阶段的颗粒物数浓度粒径分布
Fig.2 Particle size distribution of number concentration in two stages

图3为加热熔锡阶段和去除元器件阶段颗粒物质量浓度粒径分布情况。由图3可见,在WPCB加热拆解过程中产生的细颗粒物虽然数浓度很大,但

质量浓度很小,说明空气中的颗粒物质量主要由粒径较大的颗粒物贡献。在WPCB加热拆解的两个阶段中,颗粒物质量浓度的粒径分布基本一致,颗粒物质量浓度随粒径增加逐渐升高,去除元器件阶段所产生的颗粒物质量浓度更大。

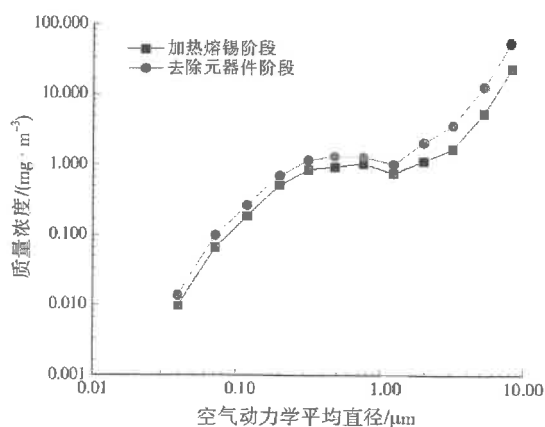


图3 两个阶段的颗粒物质量浓度粒径分布
Fig.3 Particle size distribution of mass concentration in two stages

2.3 颗粒物排放系数

由上述分析可知,在WPCB加热拆解过程中将释放出不同粒径的颗粒物,各粒径段颗粒物具有不同的数浓度和质量浓度。在此,假设加热拆解车间运行过程中产生的颗粒物污染可视为若干个单次加热拆解过程之和,且车间内单位时间颗粒物排放浓度与一个完整的WPCB加热拆解过程中颗粒物平均排放浓度相同,则颗粒物的数浓度排放系数和质量浓度排放系数计算方法如下:

$$nEF_i = \frac{\sum N_{i,t}}{T} \quad (1)$$

$$cEF_i = \frac{\sum C_{i,t}}{T} \quad (2)$$

式中: nEF_i 为第*i*个粒径段颗粒物的数浓度排放系数,个/ cm^3 ; $N_{i,t}$ 为第*i*个粒径段颗粒物在*t*时刻($t=1\sim 50\text{ s}$)产生的颗粒物数浓度,个/ cm^3 ; T 为一个完整的WPCB加热拆解周期, $T=50\text{ s}$; cEF_i 为第*i*个粒径段颗粒物的质量浓度排放系数, mg/m^3 ; $C_{i,t}$ 为第*i*个粒径段颗粒物在*t*时刻产生的颗粒物质量浓度, mg/m^3 。

根据采样数据计算不同粒径段颗粒物的数浓度排放系数及质量浓度排放系数,结果见表1。由表1可见,不同粒径段颗粒物中,小颗粒物的数浓度排放系数更高,而大颗粒物的质量浓度排放系数更高。将所有粒径段颗粒物排放系数相加后,得到WPCB

加热拆解过程中颗粒物的数浓度排放系数为 3.30×10^5 个/ cm^3 , 质量浓度排放系数为 $9.55 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

表1 WPCB加热拆解过程中颗粒物的排放系数
Table 1 Particle emission coefficient in the process of heating and disassembling WPCB

空气动力学 平均直径/ μm	nEF_i /(个· cm^{-3})	cEF_i /($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
0.040	1.17×10^5	3.71×10^{-3}
0.070	1.05×10^5	2.00×10^{-2}
0.120	5.83×10^4	5.18×10^{-2}
0.200	3.52×10^4	1.45×10^{-1}
0.310	1.02×10^4	1.64×10^{-1}
0.480	3.61×10^3	2.09×10^{-1}
0.760	8.25×10^2	1.87×10^{-1}
1.220	1.77×10^2	1.70×10^{-1}
1.940	6.44×10	2.47×10^{-1}
3.060	3.57×10	5.38×10^{-1}
5.120	2.61×10	1.84
8.080	2.17×10	5.98

与印刷电路板生产企业相比,电路板生产车间的空气中 PM_{10} 质量浓度为 $27.1 \sim 289.8 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $22.1 \sim 212.3 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ [26]。而 WPCB 加热拆解过程中排放的 PM_{10} 质量浓度约为 $9.55 \text{ mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度约为 $1.20 \text{ mg}/\text{m}^3$, 污染程度远高于电路板生产企业,同时也显著高于阴极射线显像管(CRT)显示器回收过程中的 PM_{10} 质量浓度 ($316.9 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) [27]。

2.4 颗粒物在人体呼吸系统的沉积特征

本研究采用国际防辐射委员会(ICRP)提供的简化模型,利用操作工人口鼻位置 ELPI 采集的颗粒物检测数据,对加热拆解车间操作工吸入颗粒物在呼吸系统中的沉积特征进行研究。假设颗粒物主要沉积在人体呼吸系统的鼻腔咽喉部位、气管支气管部位和肺泡部位,3个部位颗粒物沉积量均与颗粒物的粒径有关。则根据式(3)可以计算得到不同粒径段颗粒物在人体呼吸系统不同部分的沉积通量:

$$D_{i,j} = DF_{i,j} \times cEF_i \times V \quad j=1,2,3 \quad (3)$$

式中: $D_{i,j}$ 为第 i 个粒径段颗粒物在第 j 个部位的沉积通量($j=1$ 为鼻腔咽喉部位, $j=2$ 为气管支气管部位, $j=3$ 为肺泡部位), mg/h ; $DF_{i,j}$ 为第 i 个粒径段颗粒物在第 j 个部位的沉积系数, $DF_{i,j}$ 计算相对复杂,具体参见文献[28]; V 为正常成人的呼吸速率,取 $0.45 \text{ m}^3/\text{h}$ [29]。

根据 ELPI 检测数据,通过式(3)计算得到不同粒径段颗粒物在人体呼吸系统不同部位的沉积通量,结果见表2。

由表2计算可得,人体呼吸系统的鼻腔咽喉部

位、气管支气管部位和肺泡部位的颗粒物总沉积通量分别为 3.32 、 1.26×10^{-1} 、 $1.99 \times 10^{-1} \text{ mg}/\text{h}$,即每

表2 颗粒物在人体呼吸系统的沉积通量
Table 2 Particle deposition flux in the human respiratory system

空气动力学 平均直径/ μm	$D_{i,1}$ /($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)	$D_{i,2}$ /($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)	$D_{i,3}$ /($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)
0.040	7.99×10^{-5}	1.49×10^{-4}	6.17×10^{-4}
0.070	2.38×10^{-4}	3.87×10^{-4}	1.94×10^{-3}
0.120	4.72×10^{-4}	4.71×10^{-4}	2.62×10^{-3}
0.200	1.68×10^{-3}	5.63×10^{-4}	4.09×10^{-3}
0.310	3.46×10^{-3}	3.55×10^{-4}	4.38×10^{-3}
0.480	8.76×10^{-3}	6.21×10^{-4}	7.47×10^{-3}
0.760	1.61×10^{-2}	1.38×10^{-3}	9.10×10^{-3}
1.220	2.81×10^{-2}	2.77×10^{-3}	9.68×10^{-3}
1.940	6.44×10^{-2}	6.18×10^{-3}	1.34×10^{-2}
3.060	1.84×10^{-1}	1.46×10^{-2}	2.27×10^{-2}
5.120	7.16×10^{-1}	3.63×10^{-2}	4.61×10^{-2}
8.080	2.30	6.21×10^{-2}	7.65×10^{-2}

小时约有 3.65 mg 颗粒物进入工人的呼吸系统。虽然大部分颗粒物沉积在鼻腔咽喉部位,但也有部分颗粒物进入到气管支气管甚至肺泡部位,对工人的呼吸系统造成潜在危害。若按工人每日工作时间为 8 h 计算,则每天约有 29.20 mg 颗粒物进入工人的呼吸系统中,说明仅仅通过工作台上方的负压排气装置并不能保证工人的呼吸健康,为降低工作中的健康风险,建议工人佩戴能够有效过滤细颗粒物的口罩进行操作。

3 结论

(1) 总体看来,WPCB加热拆解过程所释放的颗粒物中,数量上以细颗粒物为主,粒径越小的颗粒物数浓度越高;质量上以大颗粒物为主,粒径越大的颗粒物质量浓度越高。WPCB的加热拆解流程包含加热熔锡、去除元器件两个阶段,其中去除元器件阶段颗粒物排放更大。

(2) WPCB加热拆解过程颗粒物的数浓度排放系数为 3.30×10^5 个/ cm^3 ,质量浓度排放系数为 $9.55 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。操作工吸入的 PM_{10} 约为 $9.55 \text{ mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 约为 $1.20 \text{ mg}/\text{m}^3$,颗粒物污染严重。

(3) 操作工吸入的颗粒物在呼吸系统的鼻腔咽喉部位、气管支气管部位和肺泡部位的沉积通量分别为 3.32 、 1.26×10^{-1} 、 $1.99 \times 10^{-1} \text{ mg}/\text{h}$,每小时约有 3.65 mg 颗粒物进入工人的呼吸系统,需要加强对操作工呼吸系统的职业防护措施。

参考文献:

[1] 中国物资再生协会.2015年我国电子废弃物回收产业运营态势

- 及行业政策环境分析[J].中国资源综合利用,2015,33(11):7.
- [2] DENG W J, LOUIE P K K, LIU W K, et al. Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and PM_{2.5} at an electronic waste recycling site in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(36): 6945-6955.
- [3] LI Jia, LU Hongzhou, GUO Jie, et al. Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(6): 1995-2000.
- [4] WONG M H, WU S C, DENG W J, et al. Export of toxic chemicals - a review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling[J]. Environmental Pollution, 2007, 149(2): 131-140.
- [5] CHEN Duohong, BI Xinhui, LIU Ming, et al. Phase partitioning, concentration variation and risk assessment of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the atmosphere of an e-waste recycling site[J]. Chemosphere, 2011, 82(9): 1246-1252.
- [6] WEN Sheng, GONG Yan, LI Jingguang, et al. Particle-bound PCDD/Fs in the atmosphere of an electronic waste dismantling area in China[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2011, 24(2): 102-111.
- [7] HADI P, XU Meng, LIN C S K, et al. Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 234-243.
- [8] GUO Jie, ZHANG Rang, XU Zhenming. PBDEs emission from waste printed wiring boards during thermal process[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(5): 2716-2723.
- [9] LUO Pei, BAO Lianjun, GUO Ying, et al. Size-dependent atmospheric deposition and inhalation exposure of particle-bound organophosphate flame retardants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 301: 504-511.
- [10] WU Chenchou, BAO Lianjun, TAO Shu, et al. Dermal uptake from airborne organics as an important route of human exposure to e-waste combustion fumes[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(13): 6599-6605.
- [11] 姚海燕, 白建峰, 顾卫华, 等. 电子废弃物拆解场地周边 PM_{2.5} 污染趋势分析[J]. 广州化工, 2016, 44(11): 175-178.
- [12] 胡珊, 张远航, 魏永杰. 珠江三角洲大气细颗粒物的致癌风险及源解析[J]. 中国环境科学, 2009, 29(11): 1202-1208.
- [13] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 592-597.
- [14] CHEN Jiangyao, ZHANG Delin, LI Guiying, et al. The health risk attenuation by simultaneous elimination of atmospheric VOCs and POPs from an e-waste dismantling workshop by an integrated de-dusting with decontamination technique[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 301: 299-305.
- [15] BI Xinhui, SIMONEIT B R T, WANG Zhenzhen, et al. The major components of particles emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of South China[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(35): 4440-4445.
- [16] GU Zeping, FENG Jialiang, HAN Wenliang, et al. Characteristics of organic matter in PM_{2.5} from an e-waste dismantling area in Taizhou, China[J]. Chemosphere, 2010, 80(7): 800-806.
- [17] REN Zhaofang, XIAO Xiao, CHEN Deyi, et al. Halogenated organic pollutants in particulate matters emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of Southern China[J]. Chemosphere, 2014, 94: 143-150.
- [18] GUO Jie, LIN Kuangfei, DENG Jingjing, et al. Polybrominated diphenyl ethers in indoor air during waste TV recycling process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 439-446.
- [19] KIM Y H, WYRZYKOWSKA CERADINI B, TOUATI A, et al. Characterization of size-fractionated airborne particles inside an electronic waste recycling facility and acute toxicity testing in mice[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11543-11550.
- [20] ZHENG Xiangbin, XU Xijin, YEKEEN T A, et al. Ambient air heavy metals in PM_{2.5} and potential human health risk assessment in an informal electronic-waste recycling site of China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, 16: 388-397.
- [21] 韦思业. 山西和顺地区农村室内细颗粒物和多元芳烃的污染与呼吸暴露研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [22] 李岫雯, 曾辉, 倪宏刚. 办公室内颗粒物携带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 1989-1997.
- [23] DUAN Jingchun, TAN Jihua, WANG Shulan, et al. Size distributions and sources of elements in particulate matter at curbside, urban and rural sites in Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(1): 87-94.
- [24] KIM B, LEE J S, CHOI B S, et al. Ultrafine particle characteristics in a rubber manufacturing factory[J]. Annals of Occupational Hygiene, 2013, 57(6): 728-739.
- [25] LI Xiang, KONG Haohui, ZHANG Xinying, et al. Characterization of particle size distribution of mainstream cigarette smoke generated by smoking machine with an electrical low pressure impactor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(4): 827-833.
- [26] 周鹏. 印刷电路板生产企业多溴联苯醚和重金属污染排放特征以及对典型区域环境的影响研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [27] YANG Yichen, FANG Wenxiong, XUE Mianqiang, et al. TSP, PM₁₀ and health risk assessment for heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) in the ambience of the production line for waste cathode ray tube recycling[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(2): 296-302.
- [28] 罗沛. 大气颗粒态典型半挥发性有机污染物的粒径分布及人体呼吸暴露风险评估[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2015.
- [29] ZHANG Kai, ZHANG Baozhong, LI Shaomeng, et al. Calculated respiratory exposure to indoor size-fractionated polycyclic aromatic hydrocarbons in an urban environment[J]. Science of the Total Environment, 2012, 431(5): 245-251.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2016-12-10)