

废弃线路板重金属浸出毒性方法的比较研究

赵国华, 黄卓辉, 郑正*, 罗兴章

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 使用 4 种毒性浸出方法[中国的 GB 5086.1-1997, GB 5086.2-1997, 美国的 1311 (TCLP)、1312 (SPLP)]综合评价废弃线路板的重金属浸出毒性, 并依此选择一种适合评价废弃线路板重金属生态危害的方法. 结果表明, 这 4 种方法中, 使用 TCLP 方法浸出液的重金属 (Cu、Pb、Ni、Mn、Zn 和 Fe) 浓度均超过其他 3 种方法, 且浸出液中 Pb 的浓度超过相应的标准数倍, 因此废弃线路板属于危险废弃物; 而使用我国现有的浸出实验方法, 浸出液的重金属浸出量低, 实验条件与实际的环境条件相差大, 对危险废物的控制不利, 而使用 TCLP 方法可以较好地评价废弃线路板重金属浸出毒性; 浸出液中这 6 种重金属浓度随着浸出液的初始 pH 值降低和废弃线路板粉末粒径的减小而增大.

关键词: 废弃线路板; 浸出毒性; 重金属; TCLP

中图分类号: X131.2; X502 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1533-06

Different Leaching Procedures for Heavy Metal Toxicity of Waste PCBs

ZHAO Guo-hua, HUANG Zhuo-hui, ZHENG Zheng, LUO Xing-zhang

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The purpose of this paper is to evaluate the hazardous of heavy metals of waste printed circuit boards (PCBs) by using four kinds of methods (GB 5086.1-1997, GB 5086.2-1997 from China and 1311 (TCLP), 1312 (SPLP) from USA), and the four kinds of methods are compared to choose a better way to identify toxicity characteristics of waste PCBs. The results show that the leaching concentrations of heavy metals (Cu, Pb, Ni, Mn, Zn and Fe) in the leachate after TCLP are much higher than that after the other three kinds of methods, the concentration of Pb is over the standards, so the waste PCBs may be the hazardous solid waste, the TCLP could be the appropriate way to assess the heavy metals hazardous characteristics of waste PCBs. The leaching concentrations by the leaching methods used in China are relatively lower, which could be disadvantageous to control the hazardous wastes. The initial pH and particle size of waste PCBs have great effect on the leachability of heavy metals from waste PCBs.

Key words: printed circuit boards (PCBs); leaching characteristic identification; heavy metal; TCLP

电子工业迅猛发展, 随之产生大量的电子废弃物, 印刷线路板 (printed circuit boards, PCBs) 是电子产品的必备元件, 因此废弃线路板的产生量也迅速增加. 迄今为止, 全球约 17% 的线路板在中国生产, 我国已成为继日本之后的全球第二大线路板生产国^[1]. 废旧印刷线路板是玻璃纤维强化树脂和多种金属的混合物, 成分十分复杂, 其中的金属含量高达 28%^[2], 属于典型的电子废弃物. 线路板中含有多种金属元素, 如 Cu、Pb、Zn、Cd、Se、Cr 等, 这些金属都属于对环境有毒的元素, 在环境中会随着雨水和河流的冲刷和浸泡从废弃线路板中淋溶出来进入水体和土壤, 威胁自然环境和人类健康. 目前对废弃线路板的研究主要集中于线路板绿色生产工艺的开发和废弃线路板资源化利用两方面, 对废弃线路板的重金属毒性研究比较少. 因此研究废弃线路板的物理化学性质和重金属元素的毒性特征是非常必要的.

在有害废弃物的鉴别和管理以及有害废弃物陆地处置限制法规 (land disposal restrictions) 的实施过程中, 毒性特性是一个重要的法定指标. 毒性特性

(toxicity characteristics) 在固体废弃物的管理范畴中就是指浸出毒性特性, 在我国称为浸出毒性, 是有害废弃物的重要特性^[3]. 世界现行的固体废物浸出毒性实验方法很多, 都可用于评估污染物在环境中的潜在浸出毒性, 但是使用不同的方法有时会得出不同的实验结果^[4]. 本实验以废弃线路板粉末作为研究对象, 分别采用中国和美国的浸出毒性实验方法鉴别废弃线路板的重金属浸出特性, 比较这几种方法用于鉴别废弃线路板浸出毒性的适宜性, 以期废弃线路板的管理以及相关处理、处置和资源化利用标准的制订提供实验数据.

1 材料与方法

1.1 使用设备

振荡设备: 频率 $[(110 \pm 10) \text{次/min}]$ 可调的往

收稿日期: 2008-06-16; 修订日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40803025)

作者简介: 赵国华 (1980 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向是固体废弃物的资源化, E-mail: njughzhao@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: zzheng@nju.edu.cn

复式水平振荡机;提取瓶:1 L 或 2 L 具旋盖和内盖的玻璃或聚乙烯广口瓶;过滤装置:真空泵及玻璃过滤器;滤膜:0.45 μm 微孔滤膜和中速定量滤纸;电导率仪:DDS-11AW; pH 计: METER 6219;分析天平: BS 110S, 精度为 $\pm 0.000\text{ g}$;筛:涂 Teflon 筛网,孔径分别为 2 mm 和 5 mm;原子吸收分光光度计: SOLAAR M6, Thermo.

表 1 废弃线路板的化学组成¹⁾/%

Table 1 Chemical composition of waste PCBs/%																	
样品	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Br	P ₂ O ₅	CuO	PbO	ZnO	NiO	MnO	Fe ₂ O ₃	NaO	SnO ₂	Cl	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
1	44.2	14.2	7.32	5.54	0.04	1.94	0.12	0.015	0.008	0.012	0.70	0.12	0.24	9.15	0.17	9.38	0.27
2	43.4	15.1	8.26	8.11	0.05	1.86	0.10	0.014	0.007	0.013	0.65	0.15	0.18	7.6	0.13	7.45	0.31

1)样品 1 表示粒径 <2 mm 的废弃线路板粉末;样品 2 表示粒径 <5 mm 的废弃线路板粉末

1.3 浸出实验方法

采用 4 种方法对废弃线路板的浸出毒性进行综合鉴别评价,这 4 种浸出方法分别是我国的 GB5086.1-1997^[5]和 GB 5086.2-1997^[6],美国环境保护署(USEPA)方法 1311(TCLP)^[7]和方法 1312

1.2 样品

实验样品为拆除电子元件后基板的粉末,选择粒径 <2 mm(样品 1)和粒径 <5 mm(样品 2)的废弃线路板粉末作为研究对象.废弃线路板的组成由 X 射线荧光光谱仪(ARL-9800)分析,结果以氧化物的形式表示,其主要组成见表 1.对浸出液检测的金属元素包括 Cu、Zn、Mn、Fe、Pb 和 Ni.

表 2 4 种浸出方法的实验参数

Table 2 Key parameters of the four leaching tests									
方法	浸取剂	液固比/ L·kg ⁻¹	振荡时间 /h	放置时间 /min	振荡方式	转速 /r·min ⁻¹	样品质量 /g	粒径/ mm	滤膜/ μm
GB 5086.1-1997	去离子水	10	18	30	翻转	30±2	70	5	0.45
GB 5086.2-1997	去离子水	10	8	960	水平	110±10	100	5	0.45
TCLP	碱性废物,用 pH 为 2.88 的 0.1 mol/L 醋酸溶液 ¹⁾ 非碱性废物,用 pH 为 4.93 的 0.1 mol/L 醋酸溶液 ²⁾	20	18±2	—	翻转	30±2	100	9.5	0.6~0.8
SPLP	用 pH 为 4.2 的 HNO ₃ /H ₂ SO ₄ 水溶液 ³⁾	20	18±2	—	翻转	30±2	100	9.5	0.6~0.8

1)量取 5.7 mL 冰醋酸,加入 500 mL 水; 2)上述溶液中加入 1 mol/L NaOH 溶液 64.3 mL; 3)m(HNO₃):m(H₂SO₄)=60:40

限制,翻转振荡都改为水平振荡方式.

2 结果与讨论

2.1 废弃线路板的性质

2.1.1 废弃线路板的化学组成

由表 1 可知废弃线路板的组成以 Si、Ca、Al、K 等元素为主.废弃线路板的重金属以 Cu 的含量最高,样品 1 的 Cu、Pb、Zn、Mn 和 Ni 含量分别为 15 498.0、1 114.0、120.0、93.0 和 63.0 mg·kg⁻¹,这与其他一些废弃物(如市政垃圾焚烧的底灰和飞灰)组成比较相似^[9~11],但是废弃线路板中有的重金属含量更高.其 Cu 含量是矿区污染土壤 Cu 含量的 100 多倍^[9];为某焚烧炉灰 Cu 含量的 3 倍多^[10],是电镀污泥 Pb 含量的 2 倍^[11],为某城市生活垃圾焚烧飞灰中 Cu 含量的 10 倍^[12].样品 1 的 Cu、Pb、Zn、

(SPLP)^[8].其中,GB 5086.1-1997 和 GB 5086.2-1997 是我国危险废物浸出毒性鉴别标准方法,TCLP 法是美国 RCRA 法典中指定的危险废物鉴别方法,SPLP 法是模拟酸雨的典型浸出方法.本研究中进行的 4 个实验是参照表 2 规定的参数,因为实验室条件的

Ni、Fe 含量均比样品 2 的含量高,这主要是因为重金属易富集在粒径比较小的颗粒上.有报道认为粉煤灰中的 Cu、Zn、Pb、Cd 含量随粒径减小有不同程度的增加,细粒径灰中的重金属元素总量高于粗粒径灰,在细粒径灰中有明显富集的趋势^[13].李建新等^[14]认为随着飞灰颗粒尺寸的减小,其中所富集的重金属(Pb、Cd、Cu、Zn)浓度增加.Liu 等^[15]认为 Cu 和 Pb 主要集中在粒径为 4.5~1.0 mm 的市政垃圾的底灰上.这可能因为微小尺寸颗粒比表面积较大更易富集高浓度的重金属.利用带能谱的扫描电镜(S-3400N II)研究废弃线路板粉末的形态和主要矿物组成(图 1).线路板粉末 SEM 图如图 1(a)所示,表明废弃线路板粉末主要由杆状和球状的聚合物组成;图 1(a)中标示“+”的能谱分析图为图 1(b),图 1(b)进一步印证了 XRD 的分析结果.综上所述

废弃线路板与市政垃圾焚烧底灰、飞灰或者矿渣尾渣一样对环境危害较大,因此需要对废弃线路板物理化学性质作更多的研究。

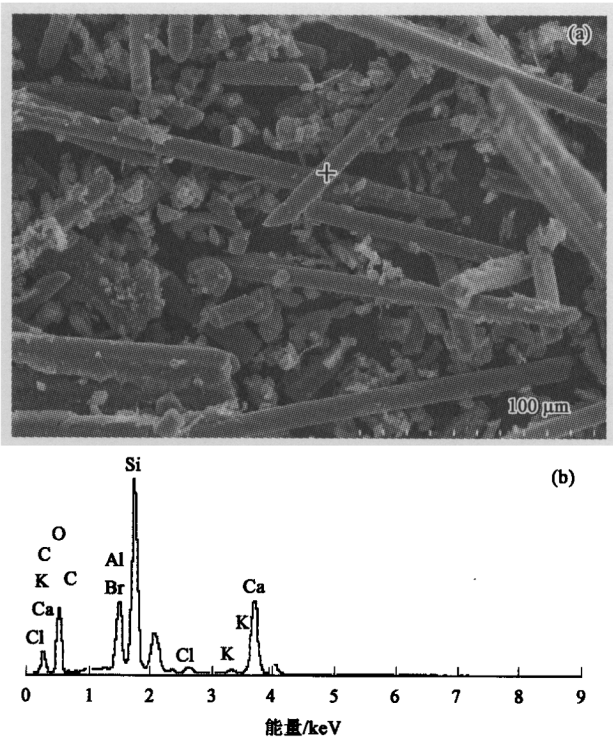


图1 废弃线路板粉末(<2 mm)SEM及能谱图
Fig.1 SEM photograph and EDS of waste PCBs powder (< 2 mm)

2.1.2 废弃线路板的物理性质

含水率采用烘干法(105℃烘至恒重),DGG09070B电热恒温鼓风干燥箱,结果显示废弃线路板的含水率为0.1%,比其他工业废弃物或者飞灰的湿度低^[11,16]。

废弃线路板的pH测定采用电位法,液固比为1:5和1:10,振荡10 min,静置20 min后用pH仪测定,结果分别为8.55和7.65,表明废弃线路板是碱性物质,与其它研究报道中飞灰的pH值接近^[17,18]。

废弃线路板粉末(<2 mm)的粒径分布(南京师范大学,Malvern 2000激光粒度分析仪)如图2所示,其粒径分布近似正态分布,这与其它对飞灰的粒径研究结果一致^[19,20],大部分颗粒集中于19~222 μm之间,占质量分数的80%左右;粒径<19 μm和>222 μm的颗粒所占质量分数分别为16%和11%,中值粒径为66.89 μm。

2.2 浸出液的重金属含量比较

采用不同浸取方法后浸出液的重金属测定结果见表3。

(1)2种样品使用4种方法浸出后,其浸出液的

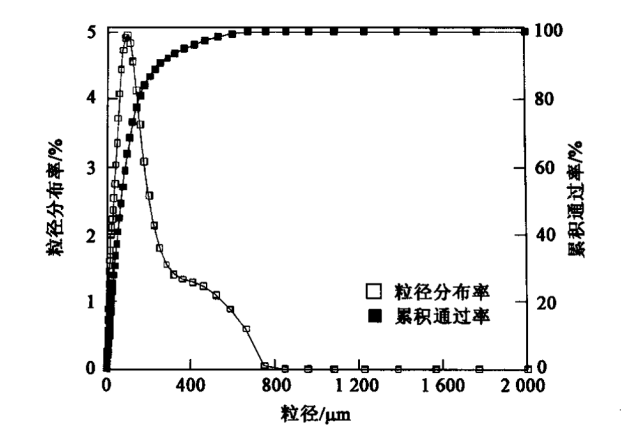


图2 粒径<2 mm的废弃线路板粉末的粒径分布
Fig.2 Powder size distribution of waste PCBs powder (< 2 mm)

重金属(Cu、Pb、Zn、Ni、Mn、Fe)浓度均为样品1>样品2,由此可见,随着粉末粒径的减少,除Ni外各重金属的浸出量均呈增加的趋势.这与一些研究结果一致^[19,21].齐文启认为试样颗粒越小,金属(Cu、Pb、Zn、Ni、Cd、Mn)的浸出量越大(除Sb和Si).冯军会等^[19]认为细颗粒飞灰对重金属浸出量贡献较大,Cr、Ni、Zn、Hg、Pb、Zn浸出量随飞灰粒径的减小呈增加的趋势.这可能是因为细颗粒飞灰的比表面积和吸附容量高,对重金属尤其对挥发性重金属有较强的吸附能力,这些元素在较细颗粒的状态下会有更高的浸出率.重金属Ni的含量变化与粒径变化的相关性不大。

(2)样品1使用除TCLP方法的其他3种方法的浸出液重金属浓度相近,SPLP方法浸出液的Pb未检出;TCLP方法后浸出液的各种金属的浸出浓度最高,浸出液的6种重金属(Cu、Pb、Zn、Ni、Mn和Fe)的浸出浓度分别是其他3种方法重金属浸出浓度的1200、360、200、3、14和30倍,表明浸出方法对废弃线路板中重金属的浸出浓度影响比较大。

(3)样品2使用中国2种方法后浸出液中除Cu、Fe外,其他4种重金属均未检出;SPLP方法的浸出液Pb和Mn未检出,其他4种重金属浓度与中国的2种方法的重金属浸出浓度相近;使用TCLP方法后浸出液的各种金属的浸出浓度最高,Cu和Fe的浓度分别是其他3种方法重金属浸出浓度的1100倍和7倍左右。

(4)这4种浸出方法中,采用TCLP方法后浸出液的重金属浓度最高,翻转振荡法比水平振荡法要剧烈,采用翻转振荡可以避免在提取容器中出现死角,使固体颗粒与浸取液充分接触,有利于打破局部

的平衡状态,使组分充分浸出,因此翻转振荡法中组分的浸出量要高于水平振荡法^[24,25].因此如果在本实验中使用翻转振荡方法,浸出液的重金属浓度会更大.

(5)实验结果与相应的标准(表 4)比较发现,使用我国的浸出毒性实验方法认为废弃线路板不是危险固体废弃物,而使用美国的 TCLP 方法后 Pb 超过标准值数倍,则废弃线路板属于危险固体废弃物,这 2 种结果矛盾.通过比较表 4 的相关标准发现我国的重金属标准虽然比美国的标准严格,但是本实验的结果表明,使用我国浸出毒性方法重金属浸出浓度要比美国的 TCLP 方法重金属浸出浓度低数倍至数百倍,这与刘峰等^[25]的研究结果一致.我国现有

的危险废物鉴别标准指标少,浸出方法的浸出率低,实验方法缺乏方法学依据,而且不符合实际的填埋场现场和我国酸雨严重的现状,不利于危险废物的控制.因此本实验认为使用 TCLP 方法可以较好地评价废弃线路板中重金属的危害.并且已有许多文献报道认为使用 TCLP 方法可以更好地评价市政垃圾焚烧飞灰和底灰、锌渣、矿区土壤等的重金属浸出毒性^[9,26,27].

(6)因为生产废弃线路板的工艺以及处理处置废弃线路板的技术不同,本实验所用的废弃线路板不能代表所有废弃线路板的性质,因此还需要对其他不同种类的废弃线路板作相关研究,得出比较全面的结论.

表 3 不同浸取方法的重金属测定结果¹⁾/mg·L⁻¹

Table 3 Heavy metals content after different leaching methods/mg·L ⁻¹							
方法	样品	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn	Fe
GB 5086.1-1997 法	1	0.37	0.25	0.03	0.13	0.07	0.41
	2	0.29	未检出	未检出	未检出	未检出	0.11
GB 5086.2-1997 法	1	0.44	0.11	0.07	0.27	0.08	0.41
	2	0.35	未检出	未检出	未检出	未检出	0.11
TCLP 法	1	370.7	72.14	7.41	0.43	0.97	13.1
	2	330.6	31.67	5.68	0.41	0.62	0.78
SPLP 法	1	0.34	未检出	0.08	0.16	0.06	0.18
	2	0.20	未检出	0.06	0.13	未检出	0.13

1)数据是 2 个平行实验样品的结果求平均值所得

表 4 浸出毒性鉴别方法的标准值/mg·L⁻¹

Table 4 Limit values some metals of GB 5085.3-1996 and 40CFR261.24/mg·L ⁻¹						
方法	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn	Fe
GB 5085.3-1996	50	3	50	10	—	—
40CFR261.24	—	5	—	—	—	—

2.3 不同浸取方法 pH、Eh 和电导率的变化

电导率的数值能够反映溶液中的总离子浓度和离子强度,电导率与离子强度和总离子浓度之间呈线性关系,电导率随着离子浓度和离子强度的增加而增大,离子强度等于每种离子的量浓度乘以该离子的价数的平方所得诸项之和的一半,氧化还原电位(Eh)是反映溶液氧化还原能力的一项数值,Eh 越低,还原态物质还原倾向越强,即供电子能力越强;反之,Eh 越高,氧化态物质氧化倾向越强,即接受电子能力越强.为了更好地了解浸出液离子强度的变化,在实验前后对浸出液的 pH、Eh 和氧化还原电位进行测定(表 5).由表 5 看出:①浸取液的初始 pH 值和浸取液的组成影响重金属的浸出浓度.4 种方法的浸取液与废弃线路板粉末混合后,我国的 2

种方法的浸出液呈碱性,TCLP 和 SPLP 法的浸取液在实验前都是呈酸性,与线路板粉末混合后 pH 均升高,SPLP 的浸出液甚至变为弱酸性,实验后浸出液的 pH 除 TCLP 方法为酸性,其他 3 种方法的浸出液 pH 都呈碱性,主要是因为线路板粉末含有 Ca、Mg 和 Al 等的化合物,具有一定的缓冲能力,文献^[10,22,23]认为,Al 和 Ca 化合物(如 CaCO₃、CaO、Al₂O₃)的溶解是飞灰具有缓冲能力的主要因素,在有少量酸存在的情况下,CaO 首先溶解出,而铝化合物则不溶;随着初始 pH 值的降低,酸性增大,CaO 逐渐完全溶解,Al₂O₃也开始溶解,当可溶的铝化合物和钙化合物都在溶液中时,废弃线路板板缓冲能力耗尽.尽管 SPLP 方法的初始浸取液也是酸性,在实验后浸出液变为碱性,主要跟浸取剂有关,SPLP 的浸取液是 pH 值为 4.2 的 HNO₃ 和 H₂SO₄ 的混合溶液,TCLP 的浸取液 pH 值为 2.88 醋酸缓冲溶液.TCLP 方法的浸出液重金属浓度最高,因此,酸性条件和浸出液的组成对重金属的浸出起着重要的作用,与其他学者的研究结果一致^[10,13,20,28,29].可能是因为许多重金属在碱性条件下会形成氢氧化物的沉

淀,造成重金属的检出量偏小.②SPLP 法的浸出液电导率变化最大,其 SPLP 法的浸出液离子强度变化最大.③TCLP 法浸出液氧化还原电位的变化有变小的趋势,在 TCLP 实验的浸出过程中发生了强烈的

氧化还原反应,溶液中的重金属被氢离子氧化成高价态,然而采用我国的 2 种方法得到的结果,其数值变化不具有规律性,不能从中推断出浸出过程中的氧化还原反应情况,尚需进一步研究.

表 5 不同浸取方法 pH、Eh 和电导率的变化

Table 5 Change of pH, Eh and conductivity before and after the different leach test							
方法	样品	pH		Eh		电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	
		实验前	实验后	实验前	实验后	实验前	实验后
GB 5086.1-1997	1	8.51	9.51	50	122	1 271	1 226.9
	2	8.00	9.11	117	79	904	1 038
GB 5086.2-1997	1	8.53	9.34	74	99.5	1 082	1 234.3
	2	8.78	8.87	92	90	902	1 037
TDLP 法	1	3.66	3.87	63.5	34.5	809	893
	2	3.73	3.99	108.5	36	542.1	589.5
SPLP 法	1	6.56	8.84	71.5	154	204	892.5
	2	6.83	8.69	104	37.5	221.7	731

3 结论

(1) 废弃线路板中重金属成分复杂,有的重金属含量较高,例如样品 1 (粒径 < 2 mm) 的废弃线路板粉末中 Cu、Pb 的含量分别达到 15 498.0 mg·kg⁻¹ 和 1 114.0 mg·kg⁻¹;废弃线路板粉末的重金属含量随废弃线路板粉末粒径减小而增大.

(2) 采用 TCLP 方法浸出液的重金属浓度比采用其它 3 种方法的浓度高,其中 Pb 超过相应的标准值 6 倍以上,废弃线路板属于危险废弃物.因此在废弃线路板填埋或者资源化利用之前,必须对其含有的重金属进行处理.比较废弃线路板使用这 4 种方法浸出液的重金属浓度,并和相应的标准比较,采用 TCLP 方法可以更好地评价废弃线路板中重金属的浸出毒性特征.

(3) 影响废弃线路板粉末中重金属浸出浓度的因素主要有浸取液的组成和 pH 值以及废弃线路板粉末的粒径等.其中重金属的浸出浓度随浸取液的初始 pH 值升高而减小,随着废弃线路板粉末的粒径减小而增大.

参考文献:

[1] LaDou J. Printed circuit board industry[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2006, **209**: 211-219.

[2] Veit H M, Diehl T R, Salami A P, *et al.* Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap [J]. Waste Management 2005, **25**: 67-74.

[3] 王炳华,赵明. 固体废弃物浸出毒性特性及美国 EPA 的实验室测定(待续) [J]. 干旱环境监测,2001, **4**: 224-233.

[4] 席北斗,王琪,张晓萱,等. 不同浸出毒性鉴别方法对垃圾焚烧飞灰浸出毒性鉴别的适宜性[J]. 环境科学研究,2005, **18** (增

刊): 17-22.

[5] GB 5086.1-1997, 固体废物浸出毒性浸出方法翻转法[S].

[6] GB 5086.2-1997, 固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法[S].

[7] Method 1311, Toxicity characteristic leaching procedure[S].

[8] Method 1312, Synthetic precipitation leaching procedure[S].

[9] 孙叶芳,谢正苗,徐建明,等. TCLP 法评价矿区土壤重金属的生态环境风险[J]. 环境科学,2005, **26**(3): 152-156.

[10] 陆胜勇,池涌,严建华,等. 初始 pH 值、液固比对某焚烧炉灰重金属渗滤的影响[J]. 环境科学学报,2003, **23**(1): 48-51.

[11] 刘刚,蒋旭光,池涌,等. 危险废物电镀污泥热处置特性研究 [J]. 环境科学学报,2005, **25**(10): 1355-1360.

[12] 张晓莹,席北斗,王琪,等. 垃圾焚烧飞灰熔融过程中重金属的固化机理以及渣渣浸出特性的研究[J]. 环境污染与防治, 2005, **27**(5): 330-332.

[13] 王翠珍,周广柱,韩作振. 矽石电厂不同粒径粉煤灰中重金属分布规律的研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2007, **26**(3): 37-40.

[14] 李建新,严建华,池涌,等. 垃圾焚烧飞灰重金属含量与渗滤特性分析[J]. 环境科学学报,2004, **24**(1): 168-170.

[15] Liu Y, Li Y, Li X, *et al.* Leaching behavior of heavy metals and PAHs from MSWI bottom ash in a long-term static immersing experiment [J]. Waste Management, 2008, **28**: 1126-1136.

[16] 池冬华,刘振鸿. NaAc (pH = 3) 缓冲液浸出焚烧飞灰中重金属的实验研究[J]. 云南环境科学,2004, **23**(4): 27-29.

[17] 乔秀臣,林宗寿,寇世聪,等. 废弃粗粉煤旋水泥系统固化重金属废弃物的探讨[J]. 武汉理工大学学报,2005, **27**(3): 23-26.

[18] 王陆军,金明吉,富田太平. 城市固体废物焚烧炉飞灰中重金属酸溶出研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2006, **31** (6): 90-94.

[19] 冯军会,何晶晶,曹群科,等. 不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属分布和浸出性质[J]. 环境科学研究,2005, **18**(40): 63-66.

[20] 王涛,刘廷凤,高占放,等. 城市垃圾焚烧飞灰中重金属的形态及酸浸出性研究[J]. 环境化学,2007, **26**(5): 658-661.

[21] 齐文启,齐斐,陈树渝. 试样粉碎程度对固体废物浸出毒性试验的影响[J]. 上海环境科学,1995, **14**(5): 9-14.

- [22] Van Herck P, Van der Bruggen B, Vogels G, *et al*. Application of computer modeling to predict the leaching behavior of heavy metals from MSWI fly ash and comparison with a sequential extraction method[J]. *Waste Management*, 2000, **20**: 203-210.
- [23] Van der Bruggen B, Vogels G, Van Herck P. Simulation of acid washing of municipal solid waste incineration fly ashes in order to remove heavy metals [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, **57**: 127-144.
- [24] 阎雨平. 固体废物中重金属浸出试验方法的研究[J]. *环境监测管理与技术*, 1994, **6**(4): 17-19.
- [25] 刘锋, 孙思修, 王鲁昕, 等. 对用于危险废物鉴别的几种浸出方法比对研究[J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(1): 23-26.
- [26] 张海军, 于颖, 倪余文, 等. 采用巯基捕收剂稳定化处理垃圾焚烧飞灰中的重金属[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1899-1904.
- [27] 姜永海, 席北斗, 李秀金, 等. 添加剂对垃圾焚烧飞灰熔融特性的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 2288-2292.
- [28] 姜永海, 席北斗, 李秀金, 等. 不同浸取剂对垃圾焚烧飞灰浸出特性影响研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2400-2403.
- [29] 王峰, 王伟, 万晓. 定 pH 值下垃圾焚烧飞灰酸中和容量与元素浸出行为的研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 529-534.