

文章编号:1006-3080(2018)06-0800-07

DOI:10.14135/j.cnki.1006-3080.20171030003

城市生活垃圾焚烧过程中铅的迁移特性探究

胡济民¹, 王瑟澜², 徐浩然¹, 吴亭亭¹

- (1. 华东理工大学煤气化及能源化工教育部重点实验室, 上海 200237;
2. 上海老港固废综合开发有限公司, 上海环境实业有限公司, 上海 200237)

摘要:以上海市城市生活垃圾为对象,研究了在垃圾焚烧过程中氯化物、硫化物、氧化物对重金属铅(Pb)迁移分布的影响。使用管式炉模拟垃圾焚烧炉,采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测试铅的含量。研究结果表明:在焚烧温度为 800 ℃ 的氧化气氛下,氯和硫的加入均能促进铅更多地向飞灰中转移,且聚氯乙烯(PVC)对铅的促挥发能力略强于 NaCl,不同形态的硫对铅在飞灰中迁移影响由大到小依次为 Na_2SO_4 , Na_2S , 单质硫。 SiO_2 和 CaO 对铅均具有捕集效果,且 CaO 的捕集能力比 SiO_2 强。

关键词:垃圾焚烧;管式炉;重金属铅;迁移分布

中图分类号:X705

文献标志码:A

Partitioning of Pb during Municipal Solid Waste Incineration

HU Ji-min¹, WANG Se-lan², XU Hao-ran¹, WU Ting-ting¹

- (1. Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
2. Shanghai Laogang Integrated Solid Waste Development Company Limited, Shanghai Environmental Industry Co. Ltd, Shanghai 200237, China)

Abstract: With the acceleration of economic development and urbanization, the rapid generation of millions of tonnes of municipal solid waste has become a global issue. Incineration is an advantageous option for municipal solid waste stabilization due to its potentials for waste reduction and resource utilization compared with other methods of treatment. Incineration inevitably brings the environmental pollution related to heavy metal emission. In this study the effects of chlorides, sulfides and oxides on the migration and distribution of Pb during municipal solid waste incineration were investigated. A tube furnace equipped with an air supply system and an ash collection device were employed to simulate the incinerator. Finally, the content of heavy metal Pb was measured by an induced coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-AES). The results showed that at incineration temperature of 800 ℃, under oxidizing atmosphere, the addition of chlorine-containing substances could promote the transfer of Pb to fly ash. The effects of NaCl and PVC on the distribution of Pb in fly ash were different because the reaction products of NaCl and Pb were different from the reaction products of PVC and Pb. These results showed that NaCl had a slightly stronger effect than PVC on promotion of the volatilization of Pb during incineration. The addition of sulfur-containing chemicals could promote the transfer of Pb to fly ash. The

收稿日期:2017-11-02

作者简介:胡济民(1993-),男,江苏宝应县人,硕士生,研究方向为垃圾焚烧中重金属的迁移分布规律。E-mail:hujimin_16@163.com

通信联系人:吴亭亭, E-mail:ttwu@ecust.edu.cn

effects of different sulfur-containing chemicals on the distribution of Pb in fly ash were also different. The addition of Na^+ facilitated Pb to react with sulfur. It condensed, nucleated and reunited under the driving of airflow, and was captured by the fly ash filtration system, so that more Pb could migrate to the fly ash. The order of the influence of different forms of sulfur-containing chemicals on the migration of Pb in fly ash was $\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{S} > \text{S}$. SiO_2 and CaO showed adsorption effect on Pb. The chemical reactions between SiO_2 and Pb produced PbSiO_3 , which was easily fixed in the bottom ash. CaO also reacted with HCl to generate CaCl_2 , thereby reducing the production of metal chlorides and reducing the volatilization of heavy metals. Besides, CaO also exhibited physical adsorption capacity toward Pb. The adsorption effect of CaO was stronger than that of SiO_2 .

Key words: waste incineration; tube furnace; heavy metal Pb; migration and distribution

近年来,随着“绿水青山就是金山银山”这一科学概念逐渐深入人心,人们对于环保问题日益重视,生活垃圾处理问题则是环保领域所关注的重点之一。相比于传统的垃圾填埋法,焚烧法具有减量化、资源化等独特的优点。垃圾焚烧过程中产生的重金属通过介质进入大气,会对人们的生活环境产生巨大的威胁^[1]。掌握重金属在垃圾焚烧过程中迁移分布的特性,并选择合适的方法以减少重金属化合物的释放,是目前处理重金属污染行之有效的办法^[2]。

目前,国内外学者通过大量的实验探究和理论分析,为垃圾焚烧过程中重金属迁移分布规律的研究奠定了扎实的基础,但也存在一定的局限性。重金属的迁移转化所受影响因素众多,研究者们大多从单一因素出发,故尚缺乏统一的认识^[3-4]。在影响垃圾焚烧中重金属迁移转化的众多因素中,垃圾的组成尤为重要。由于不同国家、地区的垃圾组成及性质存在差异,导致不同研究者的研究结果难免有所不同^[5-6]。除此之外,大量的研究分析数据表明^[7],对实际生活垃圾以及焚烧后的产物进行采样分析,更有利于了解重金属的迁移分布特性。

本文在已有研究成果的基础上,选取上海市城市实际生活垃圾为样本。从多种因素出发,探究垃圾中常见的氯化物、硫化物和氧化物对铅(Pb)迁移分布的影响^[8]。通过对这些影响因素的分析,探讨城市垃圾焚烧过程中 Pb 的迁移分布规律,为实现垃圾焚烧无害化处理提供理论基础。

1 实验部分

1.1 垃圾样品的制备

城市生活垃圾成分复杂,主要包括厨余、塑料、纸张、织物、金属、竹木、砖瓦、灰土等。本实验中采用的分类垃圾由上海市环境科学研究院提供,样品

来源于上海金山永久生活垃圾处理厂。该厂将生活垃圾中的厨余、塑料、纸类、织物、竹木等进行归类,取样后置于 50 °C 的烘箱内 1 d 去除水分,取出后使用德国 Retsch 颚式粉碎仪对其进行破碎处理并通过筛子筛分,使样品的粒径达到 180 μm (80 目),满足实验要求。并参照上海市城市生活垃圾组分^[9],将归类好的样品混合均匀,完成制样。表 1 给出了城市生活垃圾组分配比。

表 1 城市生活垃圾组分配比

Table 1 Distribution ratio of municipal solid waste group

Component	$w/\%$	
	MSW in Shanghai	Test sample
Cloth	3.12	5.67
Plastic	16.03	19.61
Bamboo	2.43	2.78
Paper	3.32	12.59
Food waste	62.93	59.35
Others	12.17	0

MSW—Municipal solid waste

为进一步认识垃圾的物化特性,对垃圾样品进行工业分析、元素分析。由于垃圾组分缺少相应的标准分析方法,因此其工业分析参照煤的工业分析方法(GB/T 212—2001)进行。元素分析中的碳、氢、氮元素使用德国 Elementar Vario EL III 元素分析仪测定,硫元素使用库仑测硫仪测定,氯元素使用离子色谱法测定,氧元素的质量分数则根据空气干燥基下元素组成的换算关系(式(1))进行换算。测试结果见表 2。

$$w_C + w_H + w_O + w_N + w_S + w_{Cl} + w_M + w_A = 100\% \quad (1)$$

式中,下标 C、H、O、N、S、Cl、M、A 分别代表碳、氢、氧、氮、硫、氯元素,以及水分和灰分。

表 2 样品的元素分析和工业分析
Table 2 Ultimate and proximate analysis of the sample

$w^{1)}/\%$						$w^{2)}/\%$			
C	H	O	N	S	Cl	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}
49.352	7.593	0.796	0.224	20.401	0.331	2.956	18.347	75.628	3.069

1) Ultimate analysis; 2) Proximate analysis; ad—Air dry basis; M—Moisture; A—Ash; V—Volatile matter; FC—Fixed carbon

1.2 实验装置

实验系统示意如图 1 所示,由供气系统、焚烧装置、飞灰收集和烟气吸收 4 个部分组成。供气系统由德斯兰空气压缩机、储气罐、空气阀和转子流量计构成。焚烧装置包括程序控温管式炉、石英管,其中管式炉的最高工作温度为 1 300 ℃;石英管的尺寸为 $\varnothing 50\text{ mm}\times 1\,200\text{ mm}$,最高耐热温度为

1 100 ℃。垃圾样品使用石英舟装盛,并将其置于加热段内。飞灰采用规格为 $\varnothing 25\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 的国标 2[#] 超细无胶玻璃纤维滤筒进行收集,该滤筒对 0.3 μm 以上的颗粒捕捉效率为 99.99%,可满足本研究要求。烟气收集参照 US EPA Method 5 和 Method 29 方法进行^[10],吸收装置由空气瓶、 $w=5\%\text{HNO}_3$ 溶液和 $w=10\%\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液组成。

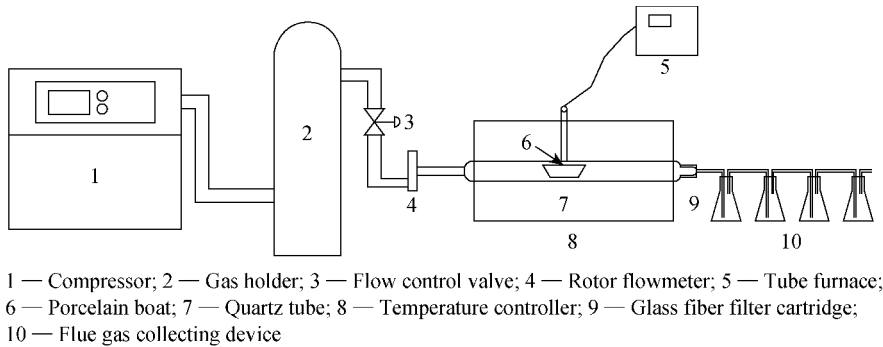


图 1 实验装置系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental device system

1.3 实验步骤及分析方法

垃圾焚烧一般在 800~1 300 ℃ 下进行^[11],本实验选用的焚烧温度为 800 ℃。当炉温达到 800 ℃ 并稳定后,将 $(2\pm 0.001)\text{ g}$ 样品放入石英舟中并缓慢推入炉膛中部,调节空气流量为 4 L/min,使其充分燃烧;实验结束后,收集石英舟中的残余物作为底渣,玻璃纤维滤筒中的收集物作为飞灰,溶液吸收瓶中的收集物作为其在烟气中的分布。由于石英舟可盛放样品量较少,焚烧而生成的底渣和飞灰的质量也较少,也容易产生偶然性误差,同时也考虑到垃圾样品的不均匀性,因此每个样品进行重复性实验,收集 5 次实验的焚烧产物进行处理分析。

在对焚烧产物进行收集的过程中,将冷却后石英舟中的残渣全部转移到烧杯里,并用 0.1 mol/L 的稀 HNO_3 冲洗石英舟内壁,并一起转移到底渣烧杯中,视为底渣样品;将滤筒取下,剪成碎片,转移至烧杯中,视为飞灰样品;将吸收瓶中的吸收液转移至烧杯中,视为烟气样品。收集好焚烧产物后,根据不同焚烧产物的性质采用不同的方法进行消解。飞灰

和烟气样品因为液体量较大而颗粒物较少,参照 Method 3005A 和 Method 3010A^[10],采用高氯酸和硝酸混酸($\text{HClO}_3\text{-HNO}_3$)进行消解;底渣采用逆王水(即 HNO_3 和 HCl 摩尔分数之比为 3:1 的混合酸)进行消解。所有样品置于加热板上加热消解,待消解结束后将所有样品过滤,转移至容量瓶中,冷却后定容,使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)对样品进行重金属浓度测量。在对实验结果进行分析讨论时,采用归一化分布^[12]来表征 Pb 在底渣、飞灰和烟气中的分布,即 Pb 的分布率为底渣、飞灰或烟气中 Pb 的质量与底渣、飞灰和烟气中所测量到的 Pb 质量总和之比。

在对烟气中的 Pb 进行 ICP-AES 检测时,Pb 的质量分数低于检测限,这是由于 Pb 属于中度挥发性重金属,焚烧过程中挥发出来的 Pb 极易在飞灰收集处冷凝^[13],在烟气中几乎检测不到 Pb 的存在。因此,在分析讨论时,以 Pb 在底渣、飞灰中的分布率来表征其迁移分布的规律。

2 结果与讨论

2.1 焚烧停留时间的确定

垃圾焚烧过程中,停留时间越长,剩余质量越少,燃烧越充分。在通入 4 L/min 空气为载气的条件下进行实验,研究焚烧停留时间与垃圾焚烧剩余产物的关系。图 2 示出了垃圾焚烧剩余产物质量与焚烧停留时间的关系。垃圾推入后 15 s 左右开始燃烧,在最初 5 min 内燃烧迅速,到 14 min 后,垃圾剩余质量达到最小,且不再变化。在本研究中,为保证每次实验的可比性,垃圾焚烧停留时间定为 14 min。

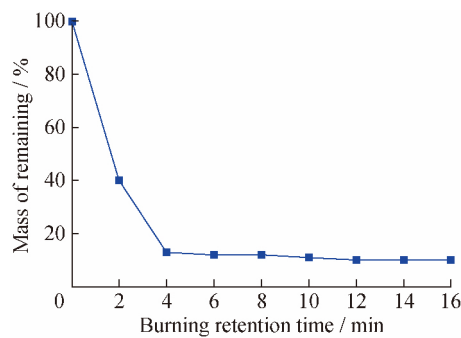


图 2 垃圾焚烧剩余产物质量与停留时间关系
Fig. 2 Relationship between mass of remaining and burning retention time of municipal solid waste incineration

2.2 重复性实验的误差分析和重金属回收率

在对 Pb 的 5 次重复性实验中,Pb 在底渣和飞

灰中的归一化分布的重复性很好。图 3 示出了未添加添加物时,5 次重复性实验的灰渣归一化分布图。由图 3 可知,Pb 在飞灰中归一化分布最低为 73.43%,最高为 75.84%,实验误差为 $\pm 1.21\%$,误差较小,可满足实验要求。在后续进行的实验当中,仍以此法检验实验的重复性好坏,使得实验数据的误差控制在合理的范围内。

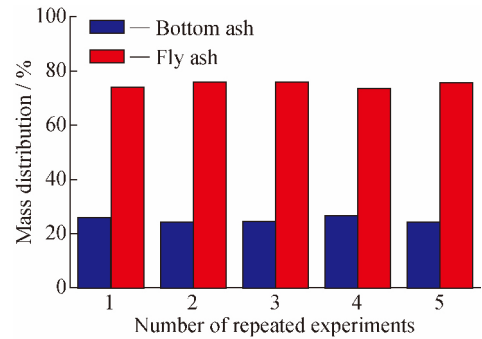


图 3 实验系统的重复性实验
Fig. 3 Repeatability experiments of experimental system

回收率是研究重金属问题上的一大难点。研究表明,尽管研究者样品处理及实验操作均按照操作规程进行,但重金属回收率仍出现较大波动,回收率的一致性不好^[14]。表 3 给出了 5 次实验中 Pb 的回收率情况。5 组实验中重金属的回收率波动范围为 72.43%~78.94%。回收率是由所有排放渠道(底渣、飞灰、烟气)的重金属回收处理和消解共同影响的,不仅是单一渠道的影响,因此回收率对归一化分布没有显著影响。重金属的回收率原则上越高越好,但实验中不追求回收率的一致性。

表 3 重金属 Pb 的回收率
Table 3 Recovery of heavy metal Pb

Repeated test times	Content of Pb/(mg · kg ⁻¹)				Recovery/%
	Bottom ash	Fly ash	Exhaust gas	Original sample	
1	14.19	40.62	0	70.18	78.10
2	12.13	38.08	0	69.32	72.43
3	12.54	39.12	0	70.24	73.55
4	14.64	40.47	0	69.89	78.85
5	13.54	42.12	0	70.51	78.94

2.3 氯对 Pb 迁移和转化特性的影响

图 4、5 分别为加入氯含量(占垃圾质量分数)为 0、0.2%、0.4%、0.6% 和 0.8% 的 NaCl、聚氯乙烯(PVC)在焚烧后灰渣中 Pb 的质量分布。图 6 给出了 2 种添加剂对 Pb 在飞灰中分布的影响。由图 4~6 可知,随着氯化物添加剂中氯的质量分数的增

大,Pb 明显地向飞灰中迁移;且无机氯(NaCl)和有机氯(PVC)对 Pb 迁移的影响有所区别:当添加 NaCl 的氯的质量分数达到 0.6% 时,飞灰中的 Pb 分布率达到 83.65% 就不再增加;而当添加 PVC 的氯的质量分数达到 0.6% 时,飞灰中的 Pb 分布率达到 84.62% 就不再增加。

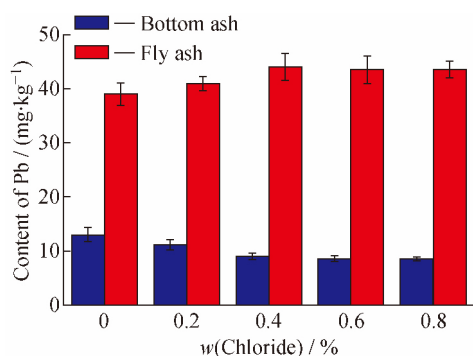


图4 添加不同质量分数氯(NaCl)后 Pb 在灰渣中的分布率

Fig. 4 Content of Pb in ash after adding different mass fractions of chloride in NaCl

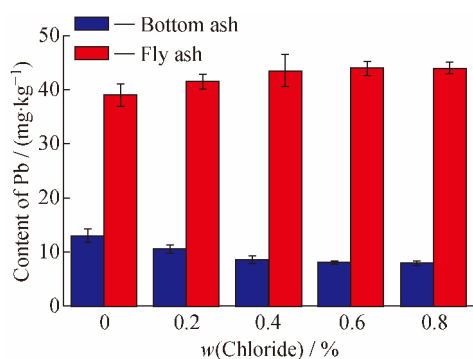


图5 添加不同质量分数氯(PVC)后 Pb 在灰渣中的分布率

Fig. 5 Content of Pb in ash after adding different mass fractions of chloride in PVC

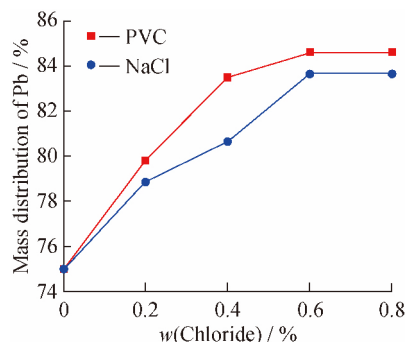


图6 氯对 Pb 在飞灰中分布的影响

Fig. 6 Effect of chlorine on the distribution of Pb in fly ash

加入 NaCl 和 PVC 焚烧后,两者与 Pb 具有不同的反应机理。陈勇等^[15]研究指出:加入 NaCl 后,在飞灰中 Pb 主要以 PbCl_2 和 PbO 的形式存在,其中 PbCl_2 主要是 Pb 与加入的 NaCl 反应所生成的高挥发性氯化物, PbO 通过气流和颗粒夹带而向飞灰中迁移。加入 PVC 后,飞灰中主要物相成分除了 PbCl_2 和 PbO 以外,还生成了特殊的产物 $\text{Pb}(\text{ClO}_4)_2$ 、 PbCl_2O_4 和 PbO_2 。同时,Yoo 等^[16]研

究指出,Na 比重金属离子对 Cl 具有更强的亲和力,会在反应时结合 Cl 使其不易释放,因此 NaCl 对 Pb 的促挥发效果比 PVC 略差。

2.4 硫对 Pb 迁移和转化特性的影响

图 7、8、9 分别为加入硫含量(占垃圾质量分数)为 0、0.2%、0.4%、0.6% 和 0.8% 的单质硫、 Na_2S 和 Na_2SO_4 焚烧后灰渣中 Pb 的质量分布。图 10 给出了硫对 Pb 在飞灰中分布的影响。由图 7、图 8 和图 9 可知,随着硫及硫化物添加剂中硫的质量分数升高,Pb 明显向飞灰中迁移;3 种添加剂促进 Pb 的迁移能力也有所差别:当添加剂中硫的质量分数达到 0.8% 时,添加单质硫、 Na_2S 、 Na_2SO_4 使 Pb 在飞灰中的分布分别为 86.79%、89.42%、93.20%。

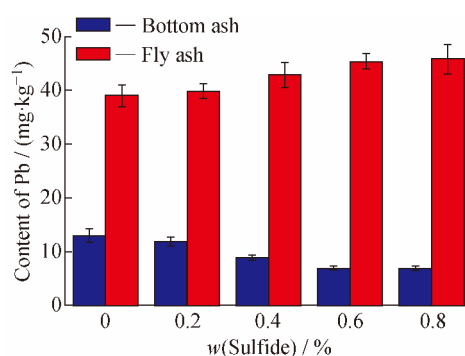
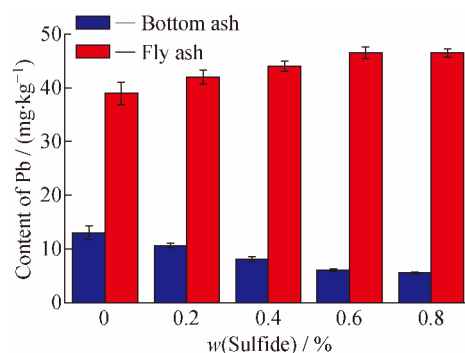


图7 添加不同质量分数单质硫后 Pb 在灰渣中的分布率

Fig. 7 Content of Pb in ash after adding different mass fractions of elemental sulfur

图8 添加不同质量分数硫(Na_2S)后 Pb 在灰渣中的分布率Fig. 8 Content of Pb in ash after adding different mass fractions of sulfide in Na_2S

由图 10 可知,硫的加入均使 Pb 更多地向飞灰中迁移。加入硫后生成 Pb 的含硫化合物,如 PbS 、 PbSO_4 、 PbS_2 等,他们更容易吸附在飞灰的表面;除此之外, Na_2S 、 Na_2SO_4 等盐类物质有助熔作用,能降低灰渣的熔点,使灰渣在反应过程中熔融,因此,

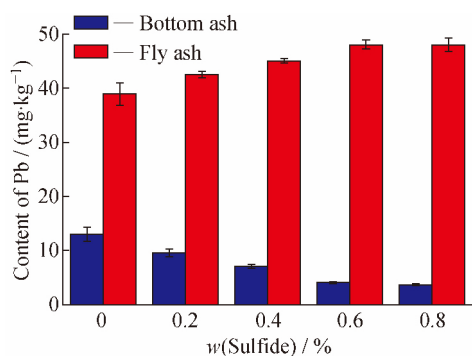


图9 添加不同质量分数硫(Na_2SO_4)后 Pb 在灰渣中的分布率

Fig. 9 Content of Pb in ash after adding different mass fractions of sulfide in Na_2SO_4

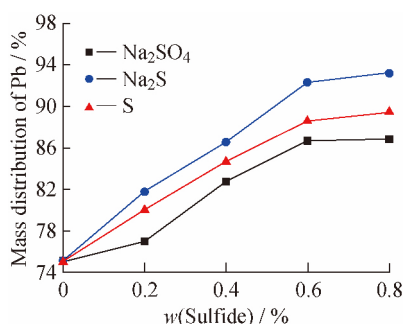


图10 硫对 Pb 在飞灰中分布的影响

Fig. 10 Effect of sulfur on the distribution of Pb in fly ash

钠盐的加入使 Pb 更容易与硫发生化学反应并挥发,在气流的带动下冷凝、成核、团聚,被飞灰过滤系统捕捉,从而有更多的 Pb 向飞灰迁移^[15]。不同形态的硫对 Pb 在飞灰中迁移影响的顺序由大到小为 Na_2SO_4 , Na_2S , 单质硫。

2.5 CaO 和 SiO_2 对 Pb 捕集能力的比较

图 11、12 分别为加入质量分数为 0、2%、4%、6%和 8%的 CaO 和 SiO_2 在焚烧后灰渣中 Pb 的质量分布。图 13 给出了 CaO 和 SiO_2 对 Pb 在飞灰中

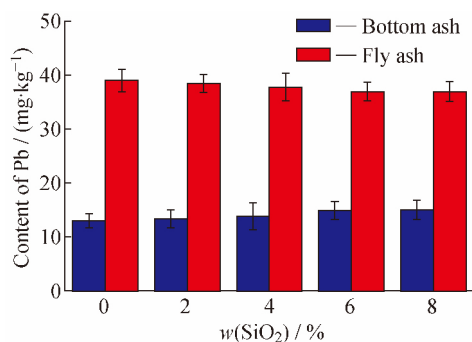


图11 添加不同质量分数 SiO_2 后 Pb 在灰渣中的分布率

Fig. 11 Content of Pb in ash after adding different mass fractions of SiO_2

分布的影响。两种添加剂对 Pb 的捕集效果差距显著, CaO 的效果要明显强于 SiO_2 , 尤其当添加剂质量分数达到 8% 时, 添加 CaO 能使 Pb 在飞灰中的质量分数下降到 53.85%, 而添加 SiO_2 仅使之达到 71.15%。

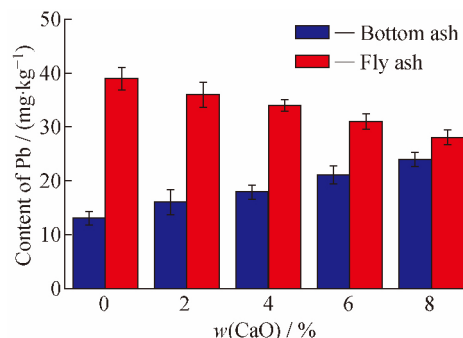


图12 添加不同质量分数 CaO 后 Pb 在灰渣中的分布率

Fig. 12 Content of Pb in ash after adding different mass fractions of CaO

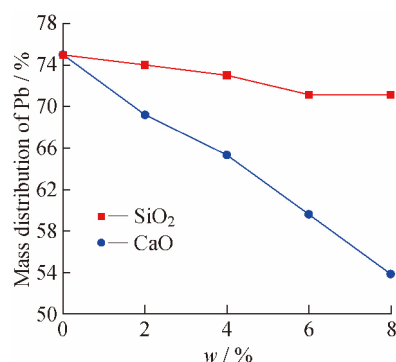


图13 CaO 和 SiO_2 对 Pb 在飞灰中分布的影响

Fig. 13 Effect of CaO and SiO_2 on the distribution of Pb in fly ash

实验结果表明, CaO 和 SiO_2 对于 Pb 均有一定的捕集效果, 但就捕集能力而言, CaO 的捕集能力强于 SiO_2 。有研究^[17]表明, SiO_2 与 Pb 发生化学反应生成 PbSiO_3 , 熔沸点较高的 PbSiO_3 容易固留在底渣中。而 CaO 的加入导致孔隙结构产生, 对气态的铅有一定的吸附作用。除此之外, CaO 也会与垃圾中的氯化物和烟气中的 HCl 反应生成 CaCl_2 , 从而减少低熔沸点的金属氯化物生成, 降低重金属的挥发^[18]。

3 结 论

本文通过在温度为 800 °C、氧化性气氛的焚烧条件下向生活垃圾样品中加入不同的氯化物、硫化

物和氧化物,研究3种类型的化合物对Pb迁移分布的影响,得出结论如下:

(1) 焚烧中氯的存在对重金属分布和迁移有显著的影响。无机氯和有机氯与Pb的反应机理不同,但均可促使Pb向飞灰中迁移,且PVC的促挥发能力略强于NaCl。

(2) 硫化物的存在均可促使Pb向飞灰中迁移。不同形态的硫对Pb在飞灰中分布影响的顺序由大到小为 Na_2SO_4 , Na_2S , 单质硫。

(3) CaO 和 SiO_2 对于Pb均有一定的捕集效果,但就对Pb的捕集能力而言, CaO 明显强于 SiO_2 。

参考文献:

- [1] 张赛,史子兴,印杰. 明胶-环氧聚醚胺交联膜的合成及其对重金属离子的吸附性能[J]. 功能高分子学报, 2016, 29(1): 29-35.
- [2] 张宣,张雪丹,白凯,等. 垃圾焚烧重金属污染防治研究分析[J]. 资源节约与环保, 2015(3): 243.
- [3] OLAF HOLM, FRANZ-GEORG SIMON. Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany[J]. Waste Management, 2017, 59(4): 229-236.
- [4] 石德智,李鹏飞,张超,等. 水热法外加硅铝添加剂稳定垃圾焚烧飞灰中的重金属[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 582-588.
- [5] 赵曦,喻本德,张军波,等. 城市生活垃圾焚烧重金属迁移、分布和形态转化研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(3): 49-55.
- [6] 乔治,陈雪莉,陈汉鼎,等. 稻草与煤共热解过程中不同赋存状态钾的迁移转化行为[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 608-614, 638.
- [7] 赵曦,黄艺,李娟,等. 大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1013-1021.
- [8] SU Y, YANG J M, LIU D B, *et al.* Effects of municipal solid waste incineration fly ash on solidification/stabilization of Cd and Pb by magnesium potassium phosphate cement[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(1): 259-265.
- [9] 崔继伟. 上海市城市生活垃圾处理及对土地资源利用的影响研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [10] WANG K S, CHIANG K Y, TSAI C C, *et al.* Effect of chlorides on emissions of toxic compounds in waste incineration: Study on partitioning characteristics of heavy metal[J]. Chemosphere, 1999, 38(8): 1833-1849.
- [11] 张衍国,武俊,李清海,等. 垃圾焚烧重金属迁移特性及其影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(12): 6-7.
- [12] 董隽,池涌,汤元君,等. 生活垃圾流化床处置中重金属迁移分布研究[J]. 燃料化学, 2016, 44(1): 121-122.
- [13] 陆胜勇,池涌,严建华,等. 垃圾焚烧中重金属污染物的迁移和分布规律[J]. 热力发电, 2003(3): 25-26.
- [14] 孙进. 重金属铜、镍、锌在生活垃圾焚烧过程中的迁移和转化特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [15] 陈勇. 垃圾焚烧中镉、铅迁移转化特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [16] YOO J M, KIM B S, LEE J C, *et al.* Kinetics of the volatilization removal of lead in electric arc furnace dust[J]. Materials Transactions, 2005, 46(2): 323-328.
- [17] GALE T, WENDT J O L. In-furnace capture of cadmium and other semi-volatile metals by sorbents[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2999-3007.
- [18] MERCEDES D S, MARTÍNEZ-TARAZONA M R. High-temperature removal of cadmium from a gasification flue gas using solid sorbents[J]. Fuel, 2005, 84(6): 717-721.

欢迎订阅

《华东理工大学学报(自然科学版)》

通信地址:上海市梅陇路130号436信箱 邮编:200237

邮发代号:4-382