

垃圾焚烧中硫化合物对重金属 Pb 迁移分布影响

陈勇, 张衍国*, 李清海, 嵇玉群, 陈昌和

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 采用管式炉和模拟垃圾对垃圾焚烧中硫化合物(包括 S、 Na_2S 、 Na_2SO_3 、 Na_2SO_4)、焚烧温度、重金属初始加入浓度以及焚烧停留时间对 Pb 迁移分布的影响进行了研究. 使用 ICP-AES 分析技术(美国 EPA 消解方法)对重金属浓度进行测量. 结果表明, 垃圾焚烧中 4 种硫化合物的加入均使得 Pb 在底渣中的分布比例比未加入硫化合物时的分布比例降低. Pb 在底渣中的分布比例随加入 S 和 Na_2S 含量的增加而减少, 相应地在飞灰中的分布随 S 和 Na_2S 加入量的增加而增加, 而 Pb 的迁移分布比例受 Na_2SO_3 和 Na_2SO_4 含量变化的影响不显著. 温度的升高使得 Pb 向飞灰中的分布比例逐渐增加, 整个试验温度范围内 Pb 在烟气中的分布均为 0. 初始浓度的增加也使 Pb 在底渣中的分布比例逐渐升高, 飞灰中的分布比例逐渐下降. 停留时间的增加会使得 Pb 在底渣中的分布比例降低, 相应地在飞灰中的分布比例会增加.

关键词: 城市固体垃圾; 焚烧; 重金属; 铅; 硫; 硫化合物; 迁移分布

中图分类号: X705; TK09 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0819-06

Effects of Sulfur Compounds on Pb Partitioning in a Simulated MSW Incinerator

CHEN Yong, ZHANG Yan-guo, LI Qing-hai, ZHUO Yu-qun, CHEN Chang-he

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The effect of sulfur compounds (including sulfur, sulfide, sulfite and sulfate), initial concentration of heavy metal and operating conditions on Pb emission in MSW incineration were investigated using a simulated tubular furnace with the simulated MSW. Operating conditions of the experiment included combustion chamber temperature and MSW residence time. The concentration of Pb was measured by ICP-AES after the digesting of samples including bottom ash, fly ash and flue gas according to related USEPA methods. The results indicated that all 4 sulfur compounds tended to increase Pb partitioning in fly ash and decrease Pb partitioning in bottom ash. The increasing of S and Na_2S content tended to decrease Pb partitioning in bottom ash, meanwhile, the content of Na_2SO_3 and Na_2SO_4 have no significant effects on Pb partitioning. Incineration temperature showed a significant effect on Pb volatilization, and thus the Pb partitioning in fly ash increasing along with temperature went upwards. Pb did not partition in flue gas during the whole experimental temperature range. Furthermore, the effect of initial concentration of heavy metal had a significant influence on Pb partitioning. The more initial concentration of Pb was, the more Pb partitioned in bottom ash. MSW residence time was also investigated. The longer MSW residence time was, the less Pb partitioned in bottom ash.

Key words: MSW; incineration; heavy metal; Pb; sulfur; sulfur compounds; partitioning

随着土地资源的紧张、垃圾填埋费用的增加, 焚烧处理以减容化、减量化、无害化、余热利用等优点而逐渐成为经济发达国家生活垃圾的主要处理技术之一, 中国也正在积极发展自己的垃圾焚烧技术. 设计和运行的缺陷与不足使得垃圾焚烧不可避免地产生二次污染, 特别是其中的重金属污染, 已成为目前垃圾焚烧环保方面的研究热点^[1-4]. 研究表明, 几乎所有垃圾组分中均含有一定量重金属. 随着人们生活水平的提高, 高浓度重金属物质如油漆、塑料等的不断使用^[5,6], 垃圾中重金属的含量呈上升趋势. 前人研究表明^[7-9], 垃圾焚烧中重金属的迁移分布不仅与焚烧环境、重金属及化合物的物化特性有关, 更多地还与垃圾中氯、硫、水分等组分有关. 我国原生垃圾热值偏低, 掺煤燃烧是我国垃圾焚烧行业的一大特点, 而煤中含有大量的硫. 纺织、颜料、橡胶工

业、造纸、洗涤剂、肥皂业等广泛采用含硫化合物, 因此垃圾中硫的存在形式较为复杂. 关于氯对重金属迁移分布的影响, 国内外学者展开了相应研究^[9-11], 但有关硫对重金属影响的实验研究仍鲜见文献报道. Pb 由于其在生活、生产中的广泛应用及其对环境和人体的危害性已经引起人们的广泛关注, 成为各国垃圾焚烧领域限排的重金属之一, 各国对垃圾焚烧金属污染物的限制排放标准如表 1 所示. 本实验以 Pb 为研究对象, 考察不同价态的硫化合物及焚烧条件等对重金属 Pb 迁移分布的影响.

收稿日期: 2007-03-17; 修订日期: 2007-06-17

作者简介: 陈勇(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体废弃物的清洁燃烧及污染防治, E-mail: yong-chen03@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhangyg@mail.tsinghua.edu.cn

表 1 各国垃圾焚烧金属污染物排放标准(标准状态)/mg·m⁻³

Table 1 Regulations for emission control of heavy metals on MSW incineration(standard condition)/mg·m⁻³

重金属	德国 11% O ₂	美国 7% O ₂	瑞典 10% CO ₂	英国 11% O ₂	中国 11% O ₂
Hg	0.05	0.1	0.05	0.21 ~ 0.39	0.2
Cd	0.026	0.01	0.002	< 0.1 ~ 3.5	0.1
Pb	0.358	0.1	0.06	0.1 ~ 50	1.6

1 材料与方法

1.1 模拟垃圾制备方法

表 2 模拟垃圾样品组成

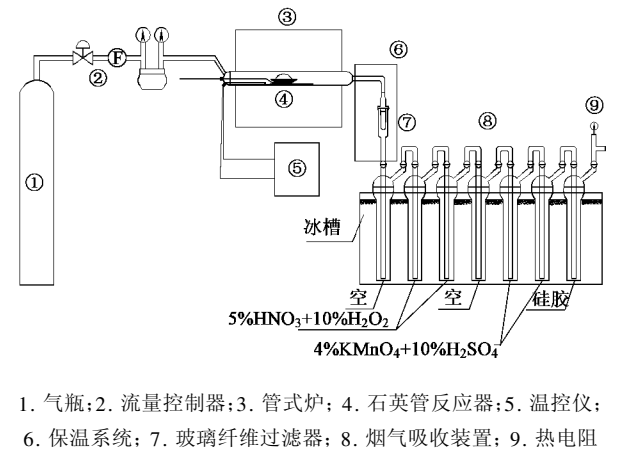
Table 2 Composition of the simulated MSW samples

模拟垃圾 样品原料	元素分析/%				工业分析/%				热值 /kJ·g ⁻¹	模拟样 配比/%
	C	H	O	N	S	水份	灰份	挥发份		
面粉	43.47	6.74	46.76	2.93	0.10	12.75	0.54	79.04	31.21	40
纸张	39.44	5.60	53.73	1.13	0.10	9.41	7.46	83.55	15.94	25
木屑	48.04	6.34	44.65	0.97	ND	42.56	0.57	56.51	19.17	10
塑料	85.34	14.57	0.09	0	ND ¹⁾	0.09	0.56	99.87	46.15	10
棉布	41.34	6.28	50.88	1.47	0.03	6.73	0.82	92.33	16.66	5
惰性物质(Al ₂ O ₃ + SiO ₂)										10

1)ND: 未检出

1.2 实验装置及实验方法

图 1 为管式炉实验系统,前人的研究^[13]已经证明该方法是一种有效模拟实际炉排焚烧炉重金属迁移分布的实验手段.



1. 气瓶; 2. 流量控制器; 3. 管式炉; 4. 石英管反应器; 5. 温控仪; 6. 保温系统; 7. 玻璃纤维过滤器; 8. 烟气吸收装置; 9. 热电阻

图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the laboratory scale simulated grate incinerator and single-metal absorption system

装置主要由供气部分、管式炉反应器、飞灰捕捉、烟气吸收、温度检测及控制,系统检密等组成部分.焚烧室为一内径为 55 mm,长1 200 mm 的石英管,设计有一次风和二次风口,通过一、二次风流量控制燃烧效果.燃烧室采用具有 PID 自整定功能的

研究中所用垃圾根据中国的典型垃圾成分及比例进行制备.表 2 为本研究中模拟垃圾样品的组成,使用面粉、硬纸壳、木屑、棉布、聚乙烯(PE)及惰性物质(Al₂O₃, SiO₂)模拟垃圾中典型成分,如厨余、纸张、木头、破布、塑料以及少量的不可燃质(如玻璃、陶瓷、砂土等).每次模拟垃圾量为 5 g.由于垃圾模拟组分中 Pb 含量非常低,可忽略不计,故重金属添加中不考虑垃圾重金属的背景浓度.实验中重金属 Pb 以(CH₃COO)₂Pb·3H₂O 的形式加入,添加浓度 1 500 mg/kg.

KSG60-11 快速升温管式炉加热,程序跟踪精度为 ± 1℃.飞灰由玻璃纤维滤筒进行捕集,对 3μm 以上的颗粒捕捉效率为 99.99%.根据 US EPA Method5,必须保证过滤器处温度在 100℃以上,防止烟气冷凝.烟气吸收根据 US EPA Method 5 和 Method29 进行.

本研究试验温度为 850℃,考察当量 S 占垃圾的 0.0%、0.1%、0.5%、1.0% 质量分数的硫化合物对 Pb 的影响,试验方案详见表 3.待模拟垃圾准备好后加入硫化合物,添加去离子水调节垃圾水分含量为 50%,用以模拟中国实际垃圾平均含水率.待反应温度达到设定的实验温度并稳定后,在给定时间内将盛有样品的石英舟缓慢推入燃烧室中部,调节一、二次风流量使垃圾燃烧充分,待燃烧结束后再将石英舟反向拉出.焚烧时间实验前通过预试验确定,保证垃圾燃烧充分.对焚烧炉出口飞灰过滤系统进行保温,防止烟气冷凝.试验结束后,收集石英舟中的残余物作为底灰,滤筒中的捕捉物和石英管冲洗下来的残留物作为飞灰,吸收瓶中的捕捉物作为重金属在烟气的分布.同时考察 550 ~ 1 000℃温度范围内温度对 Pb 迁移分布的影响,Pb 初始浓度影响范围主要考察 1 000 ~ 2 000 mg/kg 3 个浓度的影响.捕捉下来的物质经过标准消解程序后使用 ICP-AES 进行分析,消解参照 US Method 3005a, 3010b 和 3050b 方法进行.重金属在底灰,飞灰和烟气中分布

表 3 硫化物对重金属 Pb 迁移分布影响实验方案

Table 3 Experiment schedule of sulfur compounds effect on Pb partitioning

S 含量 /%	物理组成/%						添加重 金属 Pb/g	添加硫化物/g			
	厨余	纸张	木屑	织物	PE	惰性物质		S ¹⁾	Na ₂ S ²⁾	Na ₂ SO ₃ ²⁾	Na ₂ SO ₄ ²⁾
0.00	40	25	10	5	10	10	0.013 7	0	0	0	0
0.10 ¹⁾	40	25	10	5	10	10	0.013 7	0.005 0	0.012 2	0.019 7	0.022 2
0.50	40	25	10	5	10	10	0.013 7	0.025 0	0.060 9	0.098 4	0.110 9
1.00	40	25	10	5	10	10	0.013 7	0.050 0	0.121 9	0.196 9	0.221 9

1) 中国垃圾中 S 的基本含量为 0.10%, 硫化物的含量变化范围为 0.0% ~ 1.0%; 2) 硫化物的质量通过含有当量 S 进行折算

采用归一化分布表示:

归一化分布 = $\frac{\text{底渣、飞灰和烟气中各自重金属质量}}{\text{底渣、飞灰和烟气中所测量到的重金属质量总和}}$

2 结果与讨论

2.1 焚烧时间的确定

图 2 为垃圾焚烧时间对底灰残留质量的影响. 焚烧过程中, 垃圾停留时间越长, 石英舟中的底灰也就越少. 实验发现, 垃圾在推入后 30 s 左右开始燃烧, 推入过程主要模拟固定床中的垃圾干燥过程. 超过 3 min 后, 底灰质量变化减缓, 到 12 min 后, 底灰质量达到最小. 为保证每次试验的一致性, 每次试验垃圾的焚烧时间均定为 12 min.

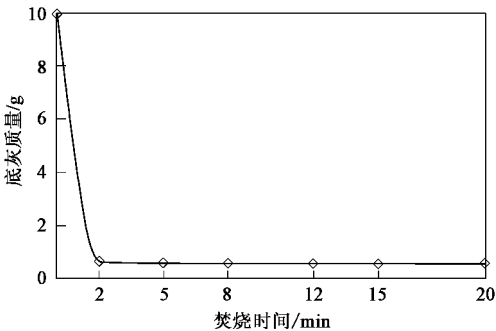


图 2 焚烧时间对底灰残留质量的影响

Fig.2 Effect of incineration time on the weight of bottom ash for synthetic wastes without presence of heavy metal

2.2 硫化物对 Pb 迁移分布的影响

图 3 为硫化物含量对 Pb 迁移分布的影响. 由图 3 可见, 随 S 含量的增加, Pb 在底渣中的分布逐渐减少. 当 S 的质量分数在 0.1% 时 Pb 在底渣中的分布比例为 56.3%, S 的质量分数为 1.0% 时, Pb 在底渣中的分布达到最小, 为 47.3%. 试验温度 (850℃) 下在烟气中均未检测到 Pb 的分布, 全部分布在底渣和飞灰中. 由于采用归一化分布, 因此 Pb 在飞灰中的变化趋势与其在底渣中变化趋势相反. Na₂S 加入量的增加使得 Pb 在底渣中分布的也逐渐降低, 影响规律与 S 对 Pb 迁移分布的影响类似.

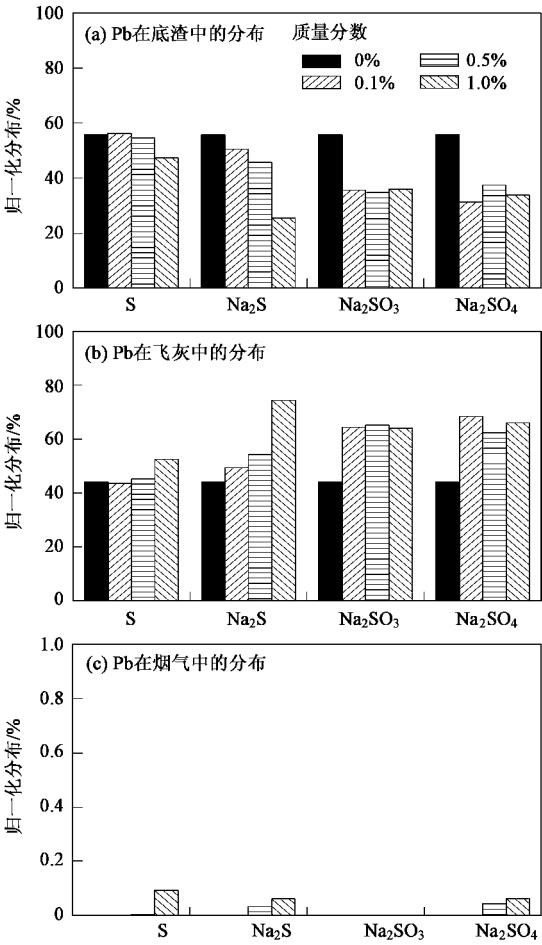


图 3 硫化物对 Pb 迁移分布的影响(850℃)

Fig.3 Effects of sulfur compounds on Pb partitioning (850℃)

当 Na₂S 质量分数为 0.1% 时, Pb 在底渣中的分布为 50.5%, 随后随着 Na₂S 加入量的增加, Pb 在底渣中的分布逐渐减少, 在飞灰中分布逐渐增加, 在烟气中的分布几乎为 0. 当 Na₂S 质量分数为 1.0% (10 倍于垃圾中平均硫含量) 时, Pb 在底渣中的分布达到最小, 为 25.5%. 热力学计算表明, 在氧化性氛围下 Na₂SO₃ 能很快被氧化成 Na₂SO₄, 因此 Na₂SO₃ 对 Pb 迁移分布的影响实则是 Na₂SO₄ 对 Pb 迁移分布的影响. 从试验结果来看, Na₂SO₃ 和 Na₂SO₄ 对 Pb 迁

移分布规律的影响规律表现出了一致性,也验证了理论计算的正确性,在此仅以 Na_2SO_4 为例进行描述. Na_2SO_4 的加入使得 Pb 在底渣中的分布急剧减少,在飞灰中的分布急剧增加,随 Na_2SO_4 含量的增加, Pb 在底渣逐渐增加,但增加幅度有限,如图 3 所示. 当未加入 Na_2SO_4 时, Pb 底渣中的分布为的 55.8%, 加入 Na_2SO_4 后, 其质量分数在 0.1% ~ 1.0% 之间, Pb 在底渣中的分布在 31.4% ~ 37.5% 之间变化. 同理在分灰中分布一样, 当未加入 Na_2SO_4 时, Pb 在飞灰中的分布为 44.2%, 加入 Na_2SO_4 后, 无论 Na_2SO_4 量多少, Pb 在飞灰中的分布在 62.5% ~ 68.6% 范围内变化. 在试验温度下 (850℃), 无论何种硫化化合物, Pb 在烟气中的分布均在低于 0.1% 的范围内波动. 由于实验中可能存在的污染、干扰、误差等, 因此可认为试验条件下 Pb 在烟气中分布为 0, 即 Pb 只在底渣和飞灰中分布.

分析显示, 当含硫化化合物质量分数为 0.1% 和 0.5% 时, 它们对 Pb 在飞灰中分布影响大小顺序依次为 Na_2SO_4 (Na_2SO_3) > Na_2S > S, 如图 4 所示. 当含硫化化合物质量分数为 1.0% 时, 其对 Pb 在飞灰中分布影响顺序依次为 Na_2S > Na_2SO_4 (Na_2SO_3) > S.

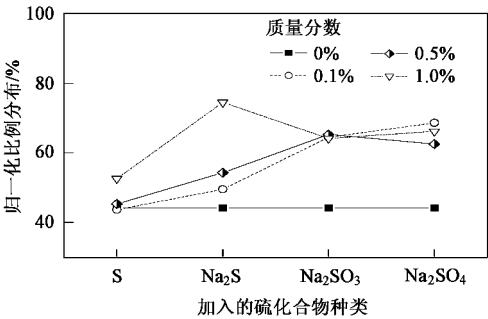


图 4 不同硫化化合物对 Pb 在飞灰中迁移分布的影响(850℃)
Fig.4 Effect of sulfur compounds on Pb partitioning in fly ash(850℃)

实验结果表明, 硫化化合物的加入均使得 Pb 在底渣中的分布少于未加入硫化化合物时 Pb 在底渣中的分布, 即硫化化合物的加入更易使 Pb 向飞灰中迁移. 图 5 给出了固体燃料中的重金属在燃烧过程中的总体迁变过程^[14].

根据 Cahill 等^[15]对重金属的分类, Pb 属于中度挥发性重金属. 从图 5 可见, 重金属 Pb 在焚烧过程中主要经历蒸发、气相和表面反应、冷凝成核和团聚及飞灰吸附等 4 个主要过程. 硫化化合物的加入使 Pb 易与之反应形成相应硫化物和硫酸盐, Pb 的硫化物和硫酸盐的熔点均高于其氧化物的熔点, 如表 4 所

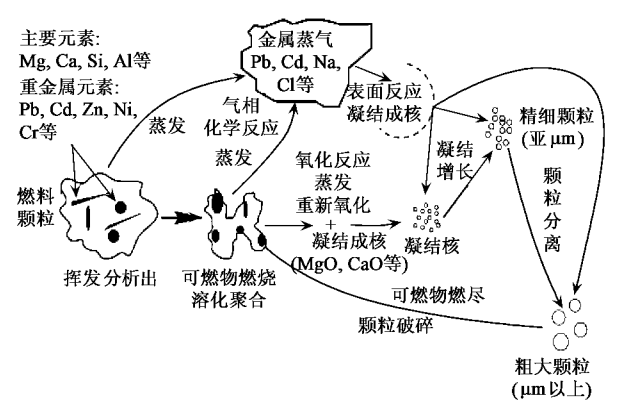


图 5 焚烧过程中重金属迁变过程示意
Fig.5 Overall picture of heavy metal in solid fuel combustion systems

示. 同等情况下, Pb 的硫化物和硫酸盐更难挥发, 更难向飞灰中迁移, 但实验结果却恰好相反. 实验发现 Na_2S 、 Na_2SO_4 等盐类物质的加入对灰渣有助熔效果, 能降低灰渣的熔点, 能使得其在反应过程中熔融, 使得重金属更易挥发和与硫化化合物发生化学反应, 在气流的带动下冷凝成核团聚, 被飞灰吸附捕捉, 从而有更多的重金属向飞灰迁移. 垃圾焚烧中重金属迁移分布影响因素主要有焚烧条件(包括焚烧温度、焚烧气氛、停留时间)、颗粒运动、气流夹带、重金属初始浓度, 重金属相关化学反应及生成物质的熔沸点, 考察硫化化合物对重金属 Pb 的迁移分布影响时, 除了考虑化学反应及生成物质的熔沸点, 还应综合其它影响因素进行考虑. 硫化化合物对 Pb 的影响不仅与重金属蒸发、气相和表面反应、冷凝成核团聚等有关, 与硫化化合物的加入对灰渣熔点的影响有关外, 还与垃圾中不可燃物质(Si、Al 化合物)有关.

表 4 中国垃圾焚烧限排重金属 Pb 及其化合物熔点/沸点/℃
Table 4 Physical properties of heavy metal Pb and its compounds/℃

金属	元素	氧化物	硫化物	硫酸盐
Pb	328/1745	886/1 472	1 114/1 280	1 170/-

2.3 温度对重金属 Pb 分布的影响

表 5 为温度对 Pb 迁移分布的影响. 结果表明, 随着温度的升高, Pb 在底渣的分布逐渐减少, 550℃ 时 Pb 在底渣中的分布为 56.7%, 1 000℃ 时仅为 32.3%. 飞灰中 Pb 的分布随着温度的升高从 550℃ 时的 43.3% 升高到 1 000℃ 时的 67.7%, 整个考察温度范围内, 未检测到 Pb 在烟气中的分布.

其它试验影响条件一致的情况下, 温度对 Pb 的迁移分布的影响主要是其对 Pb 化学反应以及生成物熔沸点的影响, 进而影响到重金属物质的挥发性,

最终对重金属迁移分布产生影响.随温度的升高,Pb 的蒸发压力显著升高.Pb 的硫酸盐在低温时较为稳定,但随温度的升高逐渐开始分解.焚烧中温度越高,化学反应越剧烈,颗粒的运动也会越强烈,从而更易使 Pb 及其化合物蒸发,随烟气一起流动,发生凝结、成核,并向飞灰中迁移分布.

表 5 温度对重金属 Pb 迁移分布的影响

温度 /℃	归一化分布/%		
	底渣	飞灰	烟气
550	56.70	43.30	0.00
700	51.20	48.80	0.00
1 000	32.26	67.74	0.00

2.4 初始浓度对 Pb 分布的影响

表 6 为重金属初始浓度对 Pb 迁移分布的影响.结果表明,随初始重金属浓度的增大,Pb 在底渣中的分布逐渐增加,相应地在飞灰中的分布逐渐降低,基本呈线性变化,烟气中的重金属近乎为 0.

表 6 重金属初始浓度对 Pb 迁移分布的影响(850℃)

浓度 /mg·kg ⁻¹	归一化分布/%		
	底渣	飞灰	烟气
1 000	34.93	65.07	0.00
1 500	51.64	48.36	0.00
2 000	56.53	43.47	0.00

Pb 浓度的增加并不仅是底渣、飞灰、烟气中的绝对数值的变化,归一化分布不变,而是整个分布发生了变化.Pb 初始浓度为1 000 mg/kg时,其在底渣的分布为 34.9%,当浓度增至2 000 mg/kg时,其在底渣中分布为 56.5%.Pb 的迁移分布受焚烧温度、颗粒浓度、颗粒流动以及重金属的蒸发、吸附等因素影响.初始浓度越高,在一定的焚烧时间、颗粒浓度、流动特定基础上,对 Pb 迁移转化影响能力有限,其停留在底渣中量也越多.实验发现重金属初始浓度对 Pb 在底渣、飞灰中的迁移分布有重大影响,对 Pb 在烟气中的分布几乎没有影响.Pb 在烟气中的分布主要焚烧温度的影响.

2.5 垃圾焚烧停留时间的影响

图 6 为垃圾焚烧停留时间对 Pb 迁移分布的影响.实验中发现,停留时间的增加使得 Pb 从底渣向飞灰迁移的比例增加,当停留时间为 12 min 时,在飞灰中的分布最多,相应地在底渣中的分布最少.停留时间的增加延长了 Pb 化学反应时间、挥发时间以及气流、颗粒的作用时间,更易使 Pb 向飞灰中的迁移.

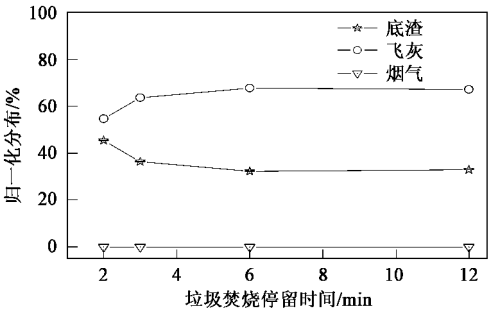


图 6 垃圾焚烧停留时间对重金属 Pb 迁移分布的影响(850℃)
Fig. 6 Effect of residence time on Pb partitioning(850℃)

2.6 重金属 Pb 质量平衡分析

本研究中重金属质量平衡定义为从焚烧后产物回收 Pb 的质量与焚烧前加入 Pb 质量的比值,如表 7 所示.结果表明,研究中能获得较为满意的重金属回收率,实验结果可靠.由于垃圾成分复杂,焚烧后里面含有 SiO₂, Al₂O₃ 以及 Na、K 的化合物,焚烧中与重金属 Pb 形成复杂的化合物,这些复杂化合物在酸消解过程中造成一定困难,对 Pb 的回收率有一定影响.在实验中,Pb 的质量平衡在 59.7% ~ 81.7% 之间,质量平衡不封闭主要有以下几个原因:①重金属 Pb 及其化合物吸附在焚烧炉管壁内,未能完全清洗回收;②反应生成的 Pb 的复杂化合物在消解过程中未能完全消解进分析溶液;③模拟垃圾准备过程中微量重金属的称量以及后期复杂的处理过程会带来一定的累积误差.

3 结论

(1)4 种硫化物的加入均易使 Pb 从底渣向飞灰迁移.850℃实验温度下,Pb 全部分布在底渣和飞灰中,在烟气中分布为 0.

表 7 重金属 Pb 的质量平衡

指标	焚烧温度/℃				初始浓度/mg·kg ⁻¹			停留时间/min			
	550	700	850	1 000	1 000	1 500	2 000	2	3	6	12
Pb 质量平衡/%	69.45	80.43	61.90	72.80	81.74	68.55	59.74	79.89	74.64	72.80	76.10

(2)温度对 Pb 与其它物质的化学反应及其生成物挥发性有着重要影响,温度的升高使 Pb 在底渣中分布呈线性下降,逐渐向飞灰中迁移.

(3)初始重金属浓度对 Pb 在底渣和飞灰中的分布有重要影响.初始重金属浓度越高,Pb 在底渣中的分布越多,在飞灰中的分布比例越少.Pb 在烟气中的分布主要受温度影响,重金属初始浓度对 Pb 在烟气中的分布没有影响.Pb 初始浓度与其在底渣中的分布且呈一定线性关系.

(4)垃圾焚烧停留时间的增加使得 Pb 在底渣中分布逐渐减少,相应地在飞灰中的分布增加.

参考文献:

- [1] 董长青,金保升,兰计香,等. 燃煤循环流化床掺煤烧城市垃圾过程中酸性气体的排放[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):32-37.
- [2] 李建新,严建华,池涌,等. 异重流化床垃圾与煤混烧重金属的排放特性[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):179-183.
- [3] Hasselrris A, Licata A. Analysis of heavy metal emission data from municipal waste combustion[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 47(1-3):77-102.
- [4] Linak W P, Wendt J O L. Toxic metal emissions from incineration: mechanisms and control[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1993, 19(2):145-185.
- [5] Jakob A, Stucki S, Kuhn P. Evaporation of heavy metals during the heat treatment of municipal solid waste incinerator fly ash[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(9), 2429-2435.
- [6] Hunsicker M D, Crockett T R, Labode B M A. An overview of the municipal waste incineration industry in Asia and the former Soviet Union[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 47(1-3):31-42.
- [7] Abanades S, Flamant G, Gauthier D. Modeling of heavy metal vaporisation from a mineral matrix[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 88(1):75-94.
- [8] Hasan B, Hermann M. Factors Determining the Element Behavior in Municipal Solid Waste Incinerators. 1. Field Studies[J]. Environ Sci Technol, 2000, 34(12):2501-2506.
- [9] Wang K S, Chiang K Y, Lin S M, *et al.* Effects of chlorides on emissions of hydrogen chloride formation in waste incineration[J]. Chemosphere, 1999, 38(7):1571-1582.
- [10] Chiang K Y, Wang K S, Tsai C C, *et al.* Formation of heavy metal species during PVC-containing simulated MSW incinerator[J]. Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2001, 36(5):833-844.
- [11] Wey M Y, Hwang J H, Chen J C. The behavior of heavy metal Cr, Pb and Cd during waste incineration in fluidized bed under various chlorine additives[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1996, 29(3):494-500.
- [12] Verhulst D, Buckens A. Thermodynamic behavior of metal chlorides and sulfates under the conditions of incineration furnaces[J]. Environ Sci Technol, 1996, 30:50-56.
- [13] Jorg W, Stucki S. Similarity laws for the tubular furnace as a model of a fixed-bed waste incinerator[J]. Chemical Engineering and Technology, 1999, 22(3): 209-222.
- [14] Yousif S, Lockwood F C, Abbas T. Modeling of toxic metal emissions from solid fuel combustors[A]. In: Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion[C]. The Combustion Institute: 1998. 1647-1654.
- [15] Cahill C A, Newland L W. Comparative efficiencies of trace metal extraction from municipal incinerator ashes[J]. J Environ Anal Chem, 1982, 11:227-239.