

模拟垃圾焚烧中 HCl 实时释放特性试验研究

冯丽, 蒋旭光, 李春雨, 安春国, 严建华

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Experimental Study on HCl Real-time Emission Characteristics in Simulated Municipal Solid Waste Incineration

FENG Li, JIANG Xu-guang, LI Chun-yu, AN Chun-guo, YAN Jian-hua

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: According to the composition of municipal solid waste, simulated municipal solid waste (SMSW) was prepared and used in the tests. The chlorine content of SMSW was regulated by adding different content of organic chloride(PVC) and inorganic chloride(NaCl), and a lab-scale tube furnace was applied to investigate the emission characteristics of HCl during SMSW incineration. The gaseous HCl emission was measured by Fourier transform infrared spectrometer(FTIR). Results show that compared to the combustion of SMSW with NaCl, the HCl concentration is relatively higher in the incineration of SMSW with PVC. With the chlorine content increasing, the HCl absorption from SMSW combustion with PVC quickly increases. However, there is no significant change in the case of SMSW incineration with NaCl. The HCl release beginning temperature in the incineration of SMSW with PVC is around 250 °C and the maximum concentration value of HCl occurs at 300 °C. Gaseous HCl emission can be detected above 900 °C in SMSW incineration with NaCl.

KEY WORDS: simulated municipal solid waste; incineration; HCl; emission

摘要: 根据城市生活垃圾的组成, 配制模拟城市生活垃圾, 通过添加有机氯化物(PVC)和无机氯化物(NaCl)调节模拟垃圾的含氯量, 并在实验室条件下用管式炉对模拟垃圾的焚烧产物 HCl 的释放特性进行研究。同时, 采用傅里叶变换红外光谱烟气分析仪对垃圾焚烧产生的 HCl 气体进行实时检

测。结果表明, 相对于焚烧添加 NaCl 的模拟垃圾而言, 添加 PVC 的模拟垃圾焚烧产生的 HCl 体积分数较高。随着含氯量的增加, 含 PVC 的模拟垃圾焚烧产生的 HCl 体积分数增加, 而含 NaCl 的模拟垃圾产生的 HCl 则变化不大。程序升温时, 焚烧添加 PVC 的模拟垃圾时发现在 250 °C 开始释放出 HCl 气体, 在 300 °C 左右释放出的体积分数最大, 然后缓慢减弱并延续到 600 °C 左右。焚烧添加 NaCl 的模拟垃圾时, 发现当温度大于 900 °C 时检测到一定体积分数的 HCl 气体。

关键词: 模拟垃圾; 焚烧; HCl; 释放

0 引言

垃圾焚烧产生的二次污染问题日益显现, 主要包括飞灰污染、烟气中二噁英、重金属及有害气体污染, 其中 HCl 是最主要的污染气体之一, 浓度^[1]一般可达到 100~1 000 mg/m³。HCl 是人类活动造成全球酸化的第 3 大罪魁祸首, 还会促进毒性有机挥发物二噁英的生成。它有很强的腐蚀性, 会造成受热面的高温腐蚀损毁、尾部受热面和烟道的低温腐蚀, 造成 MSW 发电厂效率较低且很难提高, 和燃煤锅炉 40% 的发电效率相比, 焚烧垃圾的电厂效率低于 20%^[2-3]。HCl 对人体的危害也很严重, 能腐蚀皮肤和粘膜, 致使声音嘶哑, 严重者出现肺水肿以至死亡^[3]。

因此, 有必要对 HCl 在垃圾焚烧过程中的释放特性进行研究, Kuensheng Wang 等^[4]人发现 PVC 是垃圾中有机氯化物焚烧产生 HCl 的主要物质源, 而无机氯化物产生 HCl 的主要来源是厨余中的 NaCl。前人对 HCl 排放的研究多集中在使用热天平对 PVC 等有机物的热解和热解模型的建立^[5]上, 由于其实验工况相对单一, 无法获知 HCl 的具体排放

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2007AA061302, 2007AA06Z336); 浙江省重大科技专项(2007C13084); 浙江省自然科学基金项目(X506312, R107532); 浙江省科技计划项目(2008C23090)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2007AA061302, 2007AA06Z336); Major Science and Technology Projects of Zhejiang Province (2007C13084); Project Supported by Natural Science Foundation of Zhejiang Province(X506312, R107532); Zhejiang Province Science and Technology Projects(2008C23090)。

特性;部分研究建立在实验室条件下焚烧垃圾产生的 HCl 气体采用化学法进行吸收,并用离子色谱法、硫氰酸汞分光光度法、硝酸银容量法对吸收溶液中的氯离子进行测定^[6-9],但是这些测定方法都是吸收溶液中的 Cl 离子,溶液中 Cl 离子来源可能是 HCl 气体,也可能是 Cl₂、NaCl 蒸汽被水溶液吸收,而且只能获得一段时间内 Cl 总量,不能得到 HCl 体积分数随温度的实时变化曲线,为了排除其他物质对 HCl 的干扰,本文挑选几种典型垃圾组分按照一定的比例模拟城市生活垃圾的组成,在电加热管式炉反应器中进行燃烧,并采用型号为 Gasmeter DX-4000 的傅里叶变换红外光谱烟气分析仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)对产生的 HCl 气体进行实时检测,探讨 HCl 随垃圾中氯源、含氯量及温度变化的释放特性。

1 模拟城市生活垃圾的组成及特性

城市生活垃圾种类繁多、成分复杂、波动性大,

表 1 为各文献^[10-15]中模拟城市生活垃圾(simulated municipal solid waste, SMSW)的组成和配比及其参考当时中国的实际生活垃圾情况,为保证样品具有代表性,根据参考文献,配成本文所需 SMSW 见表 2,表 3 为 SMSW 中各组分的工业及元素分析。

城市生活垃圾中含有大量的氯源,有机氯化物主要来源于塑料、皮革和橡胶,而无机氯化物主要是以 NaCl 等盐分形式存在厨余垃圾中,图 1 为 SMSW 中各组分的平均氯含量,从图 1 可以看出,塑料含氯较低,这是因为选用的塑料为普通矿泉水瓶,成分为聚乙烯,不含氯元素,而实际的城市生活垃圾中 PVC 类塑料、硬质塑料类较多,含氯量均在 100 mg/g 以上^[16];同时,厨余由大米、面粉和菜叶配制而成,但实际生活中厨余垃圾含有大量的 NaCl。从图中可以看出,除了橡胶制品含氯量为 0.01%外,其他含氯量均较低,但橡胶在模拟垃圾中所占比例仅为 4%,无论是加权平均所得还是实际测定,混合后的模拟垃圾含氯量均较少,只有

表 1 各参考文献中模拟城市生活垃圾组成
Tab. 1 Composition of SMSW in the references

垃圾组分/%									作者
厨余	纸	塑料橡胶类	织物	灰土类	金属	竹木	玻璃陶瓷类	其他	
34.52	3.03	16.28	3.93	41.98	0.26	0	0	0	李香排 ^[10]
31.91	3.66	19.53	3.59	40.07	0.53	0.71	0	0	李威武 ^[11]
52.00	4.90	11.20	1.18	20.64	1.28	1.08	0.80	3.00	李建新 ^{[12]*}
45.00	9.00	8.00	3.00	30.00	0	0	0	5.00	李建新 ^[12] (模拟)
50.29	14.17	0.61	1.16	32.05	0.92	0	0.80	0	吕国强 ^{[13]*}
48.00	6.00	1.00	1.00	42.00	1.00	0	1.00	0	吕国强 ^[13] (模拟)
35.00	9.00	2.00	0	22.40	0	24.80	1.80	5.00	金保升 ^[14]
47.70	1.63	0.40	0.47	0	0	0	0	49.80	李晓东 ^[15]

*表示作者参考的当时国家城市生活垃圾组成。

表 2 模拟城市生活垃圾的组成
Tab. 2 Composition of SMSW in the sample

厨余(大米、面粉、菜叶)	砖瓦、沙石	杂草、木竹	塑料、橡胶	玻璃	金属(锌粉、铜粉)	纸张	织物	%
45	30	5	8	1	1	6	4	

表 3 模拟城市生活垃圾的工业及元素分析
Tab. 3 Proximate analysis and ultimate analysis of SMSW

样品	工业分析/%				元素分析/%				
	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{daf}	H _{daf}	N _{daf}	S _{t,daf}	O _{daf}
纸张	6.34	8.00	73.61	12.05	43.92	7.42	0.18	-	48.48
织物	5.38	0.10	87.72	6.80	44.52	3.57	0.16	-	51.76
面粉	6.72	0.70	73.49	19.09	46.27	7.23	2.65	0.18	43.66
橡胶	0.23	8.14	90.58	1.05	79.28	11.22	0.58	-	8.93
玻璃	0.01	99.07	-	0.92	27.15	61.80	7.49	-	-
大米	7.80	0.46	90.42	1.32	44.63	8.62	1.60	-	45.15
杂草木竹	7.00	5.97	70.27	16.76	49.66	6.42	1.16	-	42.76
砖瓦沙石	0.13	98.22	0.64	1.01	12.77	79.79	3.19	4.26	-
菜叶	7.07	8.97	60.33	20.63	47.90	5.05	5.32	0.60	41.13
塑料	0.42	0.00	95.77	3.81	64.05	4.97	0.06	0.10	30.82
模拟垃圾	4.65	33.01	52.72	9.62	49.02	5.98	2.17	-	42.83

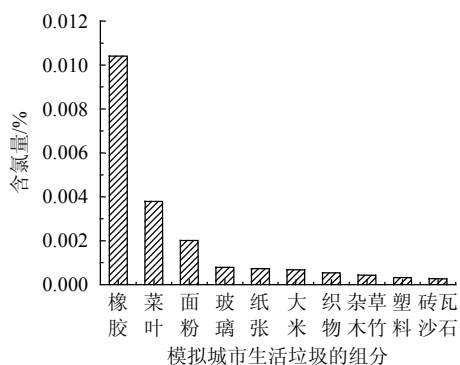


图 1 模拟城市生活垃圾各组分平均氯含量
Fig. 1 Average chlorine content of each component in SMSW

0.001 6%。为了使样品更接近实际，实验特性更为明显，实验结果有较好的重复性，在模拟垃圾中人为添加 PVC(代表有机氯化物)、NaCl(代表无机氯化物)保证 SMSW 的氯含量，实验测得 PVC 的含氯量为 55.02%，计算得到 NaCl 的含氯量为 60.68%。

2 实验装置及实验工况

2.1 实验装置

实验在电加热管式炉中进行，如图 2 所示。石英管内径为 32 mm，长度为 130 cm。石英管水平放置在加热炉上，一、二燃室均采用电加热升温程序控制，二燃室和烟气分析仪采用硅胶管连接，为了防止 HCl 吸附在管路上，硅胶管采用加热带包裹，垃圾燃烧产生的烟气采用 Gasetm DX-4000 烟气分析仪进行实时检测，气氛采用空气。

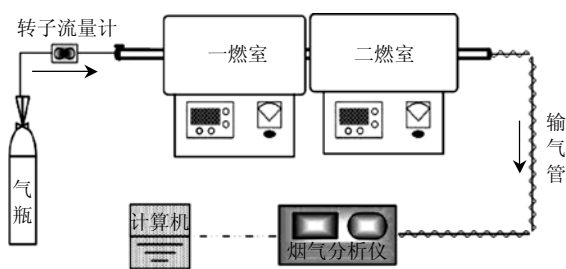


图 2 实验流程图

Fig. 2 Schematic diagram of reaction installation

Gasetm DX-4000 烟气分析仪，采用傅里叶变换红外原理，部分技术参数如下：典型检出限： 1×10^{-6} ；测量精度：相应标定量程内的 $\pm 2\%$ ；波长： $900 \sim 4200 \text{ cm}^{-1}$ 。该仪器可实现长时间连续释放监测、工业过程气体分析、实验室分析等。HCl 的红外光谱吸收区域 I 为 $3116 \sim 2893 \text{ cm}^{-1}$ ，如果烟气在高温区停留时间较短，烟气中存在有机气体，则该区域就会被 CH_4 的吸收带和烷烃的吸收区域覆盖，相比较于 CH_4 和烷烃的吸收强度，HCl 吸收带的吸

收强度较弱。因此在该吸收区域，由于 CH_4 和烷烃的联合影响，不能确定 HCl 的吸收峰^[17]，郭晓汾^[18]选择 HCl 的其他吸收区域 II ($2873 \sim 2565 \text{ cm}^{-1}$) 进行研究，该吸收区域只是部分吸收峰被反应生成的其他有机物覆盖，选择吸收强度明显大于有机物的吸收峰，从而确定 HCl 的释放特性。在本实验中为了排除反应生成有机物的干扰，设置二燃室以延长燃烧时间，保证反应产生的有机物完全燃烧，排除其对检测气体的干扰。设定参数如下：空气流量为 2 L/min，加热带温度为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ，一燃室为程序升温，升温速率为 $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ，终温为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ，二燃室设置温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ，但加热无机氯化物时，因为 NaCl 的熔点为 $801 \text{ }^\circ\text{C}$ ，同时考虑到石英管的耐热极限，选择 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为一燃室终温，二燃室设置温度为 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 实验工况设计

实验所需物料为根据表 2 配好的模拟垃圾，所需组分经过破碎、研磨并烘干，混合均匀后取 0.5 g，通过添加 PVC、NaCl 的含量，配置成不同含氯量的混合垃圾，Kuensheng Wang 等^[4]人添加氯化物 (PVC、NaCl、 C_2Cl_4 等) 使含氯量在 $0 \sim 1.6\%$ 变化研究氯化物对 HCl 生成的影响；M.Y. Wey 等^[8]人通过在锯屑中添加 PVC 和 NaCl 配成含氯量为 0.1%，0.3%，0.5%，1.0%，2.0%，5.0% 的模拟垃圾来研究氯含量对 HCl 生成的影响，参考上述文献，表 4 为本实验设计的添加 PVC 和 NaCl 后 SMSW 的含氯量。

表 4 添加氯化物后模拟城市生活垃圾含氯量

Tab. 4 Chlorine content of regulated SMSW %

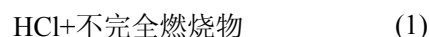
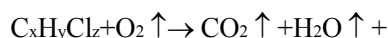
添加 PVC 的 SMSW 含氯量	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
添加 NaCl 的 SMSW 含氯量	0.5	0.8	1.0	2.0	5.0

3 实验结果及讨论

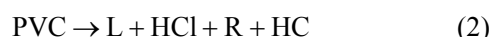
3.1 添加有机氯的 SMSW 焚烧时 HCl 的释放特性

向原混合垃圾中添加 PVC 配制的有机氯含量，分别为 0.2%，0.4%，0.6%，0.8%，1%，观察 HCl 体积分数随温度的变化。

垃圾中的有机氯化物如废塑料(如 PVC、PVDC)、橡胶、皮革等燃烧生成 HCl，有机氯化废物的取代基被脱除，总的反应结果^[19]可以表示为



对 PVC，其热解产生 HCl 的反应^[20]为



式中：L 为凝结性有机物；R 为固体焦炭；HC 为

碳氢化合物。

图3为添加PVC的SMSW在升温速率为20℃/min,空气流量为2L/min焚烧时生成的HCl随温度变化的实时释放特性曲线(折算到单位质量SMSW产生HCl的体积分数),由图3可以看出:HCl析出的温度为250~600℃,析出体积分数在300℃左右达到最大,随后HCl的析出缓慢减弱并延续到600℃左右。郭晓汾等^[5]认为PVC的燃烧过程分为脱氯、挥发分析出和碳燃烧3个阶段,240~340℃是PVC的脱氯阶段,从470℃开始燃烧,这与热解脱氯过程类似。马师白^[21]和鲁军^[22]认为PVC热解存在2个阶段,氯原子主要在第1阶段250~300℃以HCl的形式释放出来,在300℃时达到最快脱氯反应速率。说明PVC中Cl主要在低温阶段(250~350℃)以HCl的形式析出。李水清等^[23]在固定床燃烧PVC的实验结果也表明HCl的生成主要在低温区200~350℃。杨忠灿^[16]通过PVC的管式炉燃烧实验说明PVC在200~600℃可以完成氯的析出。HCl的实时释放特性实验很好地验证了含有有机氯化物(PVC)的SMSW焚烧析出HCl在较低的温度(<600℃)范围内就可以完成。

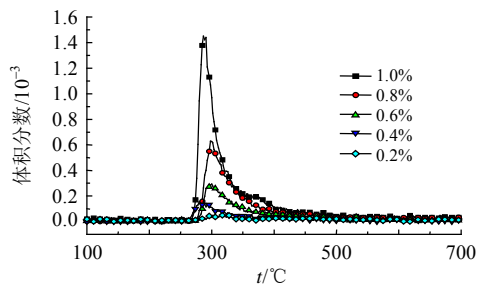


图3 有机氯含量不同时HCl随温度的释放特性

Fig. 3 HCl emission characteristics with temperature for different organic chlorine content

图4为添加PVC后不同含氯量的SMSW焚烧产生HCl的体积分数最大值随含氯量的变化(折算到单位质量SMSW产生HCl的体积分数),由图4可以看出,随着氯含量的增加,HCl释放出的体积

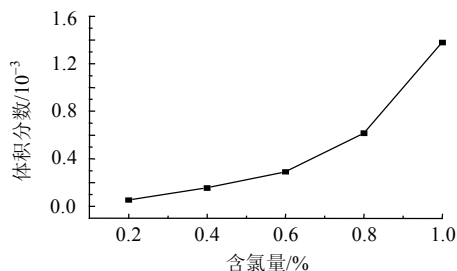


图4 HCl最大析出体积分数随含氯量的变化

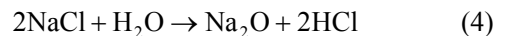
Fig. 4 HCl maximum concentration value for different organic chlorine content

分数最大值也随之增加,有机氯含量0.2%~1%,产生的HCl体积分数为 5×10^{-5} ~ 1.4×10^{-3} ,含氯量为0.2%~0.6%时,线性较好,含氯量为0.8%~1%对应HCl体积分数的最大值偏离线性且偏离较大,这是因为含氯量越高时,HCl最大析出浓度附近点越少,析出时间越短,说明析出速率加快,造成瞬间值过大。

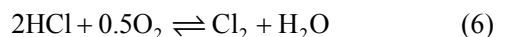
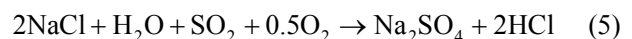
3.2 添加无机氯的SMSW焚烧时HCl的释放特性

向原混合垃圾中添加NaCl配制不同的无机氯含量,分别为0.5%,0.8%,1%,2%,5%,观察HCl释放浓度随温度的变化。

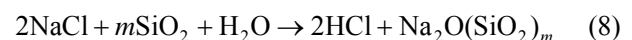
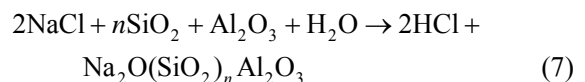
NaCl和KCl这些无机氯化物,大量存在于厨余中,也被认为是生活垃圾焚烧产生HCl的重要来源。NaCl焚烧产生HCl的生成机制^[16]可能为:



垃圾中S、O和水分含量较高时,还可能发生如下反应^[24-25]:



另外,NaCl还被认为可以和灰分中湿的氧化铝和SiO₂反应生成钠的铝/硅化合物和HCl,反应^[26]如下:



式中: $n=4$; $m=4$ 或 2 。

图5为添加NaCl的SMSW在升温速率为20℃/min,空气流量为2L/min焚烧时生成的HCl随温度变化的实时释放特性曲线(折算到单位质量SMSW产生HCl的体积分数),由图5可以看出:当温度大于900℃时,可以检测到一定的HCl析出,随着含氯量从0.5%~5%变化,HCl的释放没有明显差别,均在 $0 \sim 4 \times 10^{-5}$ 。解强等^[27]人通过TGA-FTIR联用技术研究MSW热反应过程中氯释放特性时也发现,在温度大于1000℃后可以明显检测到HCl的吸收峰。M.Y. Wey等^[8]人通过流化床燃烧有机氯化物(锯屑PVC中Cl含量分别为0.1%,0.3%,0.5%,1.0%,2.0%,5.0%)发现析出的HCl质量分数为 5×10^{-5} ~ 2×10^{-3} ,远远高于无机氯化物(锯屑+NaCl中Cl含量分别为0.1%,0.3%,0.5%,1.0%,2.0%,5.0%)的HCl为体积分数 1×10^{-5} ~ 5×10^{-5} ,这与本实验结果类似。杨忠灿^[16]也发现,在高温区 $\text{Cl}_{\text{NaCl}} \rightarrow$

HCl 不足 3%, 在 900 °C 也只有 2.67%。Ramona Schröer 和 A.I. Urban^[28]在试验燃烧装置中焚烧 NaCl 和木头混合物的研究中表明, 混合物中 89% 的氯源自 NaCl, 但是焚烧后仅 17% 的氯转移到烟气中。无机氯化物燃烧析出 HCl 低的原因可能是: 1) NaCl 的晶格能远高于 PVC 的晶格能, 因此有机氯化物比无机氯化物更容易获得氯离子, 无机氯化物较高的晶格能和较低的氯离子释放速率, 增加了重金属氯化物的生成潜能, 从而降低 HCl 的生成^[4]; 2) 不管对于有机氯化物还是无机氯化物, 在 800 °C 焚烧释放出的 HCl 量要超过 700 °C。因为 NaCl 的 SMSW 中的 Na 和硅砂、杂质反应产生低熔点的结晶影响燃烧效率, 从而阻碍了 HCl 的析出^[8]。

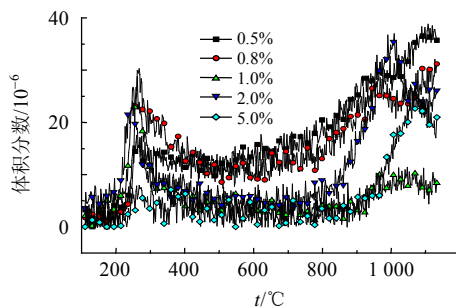


图 5 无机氯含量不同时 HCl 随温度的释放特性

Fig. 5 HCl emissions characteristics with temperature for different inorganic chlorine content

从图 5 还可以看出在温度为 300 °C 左右, HCl 有一定体积分数的析出, 不超过 3×10^{-5} , 这主要来自模拟城市生活垃圾本身含有少量有机氯化物燃烧产生的 HCl 气体, 符合有机氯化物析出特性。

4 结论

利用小型电加热管式炉, 在模拟生活垃圾中添加有机氯化物和无机氯化物, 研究程序升温时 HCl 的释放特性, 得出以下结论:

1) 程序升温时, 含 PVC 的 SMSW 焚烧时在 250~600 °C 析出 HCl 气体, 在 300 °C 左右析出浓度最大, 然后缓慢减弱并延续到 600 °C 左右;

2) 相比较于添加 NaCl, 含 PVC 的 SMSW 焚烧产生 HCl 的体积分数较高, 随着有机氯含量增加, HCl 析出明显增加;

3) 在含 NaCl 的 SMSW 焚烧过程中, 在 900 °C 以上检测到一定体积分数的 HCl 气体, 直到燃烧终温 1150 °C, 含氯量从 0.5%~5% 变化, HCl 的释放没有明显差别, 均在 $0 \sim 4 \times 10^{-5}$ 。在温度为 300 °C 左右, 析出 HCl 的体积分数值较小, 不超过 3×10^{-5} ,

这主要来自模拟城市生活垃圾本身含有少量有机氯化物燃烧产生的 HCl 气体。

参考文献

- [1] 汪雄平, 陈德珍, 吴家正. 废弃物焚烧炉烟气中 HCl 的脱除[J]. 能源技术, 2001, 22(6): 268-271.
Wang Xiongping, Chen Dezhen, Wu Jiazheng. Removal of HCl gas from refuse incinerator flue gases[J]. Energy Technology, 2001, 22(6): 268-271(in Chinese).
- [2] 仲兆平, 金保升, 兰计香, 等. 城市生活垃圾与煤混烧过程中二噁英的排放与净化研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 184-188.
Zhong Zhaoping, Jin Baosheng, Lan Jixiang, et al. Dioxins emission and purification during co-combustion of municipal solid waste and coal mixing[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 184-188(in Chinese).
- [3] 冯立斌, 张衍国, 吴占松, 等. 城市生活垃圾焚烧中的气体污染与防治[J]. 环境保护, 1999(2): 16-19.
Feng Libin, Zhang Yanguo, Wu Zhansong, et al. The gas pollution and control in municipal solid waste incineration[J]. Environmental Protection, 1999(2): 16-19(in Chinese).
- [4] Wang K, Chiang K, Liu S, et al. Effects of chlorides on emissions of hydrogen chloride formation in waste incineration [J]. Chemosphere, 1999, 38(7): 1571-1582.
- [5] 郭晓汾, 杨雪莲, 李海滨, 等. 聚氯乙烯燃烧特性及 HCl 的生成机理[J]. 燃料化学学报, 2000(2): 67-70.
Guo Xiaofen, Yang Xuelian, Li Haibin, et al. Combustion characteristics of PVC[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2000(2): 67-70(in Chinese).
- [6] Liu K, Pan W, Riley J. A study of chlorine behavior in a simulated fluidized bed combustion system[J]. Fuel, 2000, 79(9): 1115-1124.
- [7] Hidetoshi Kuramochi, Daisuke Nakajima, Sumio Goto, et al. HCl emission during co-pyrolysis of demolition wood with a small amount of PVC film and the effect of wood constituents on HCl emission reduction[J]. Fuel, 2008, 87(13-14): 3155-3157.
- [8] Wey M, Liu K, Yu W, et al. Influences of chlorine content on emission of HCl and organic compounds in waste incineration using fluidized beds[J]. Waste Management, 2008, 28(2): 406-415.
- [9] 金余其, 徐旭, 李威武, 等. 城市垃圾焚烧 HCl 排放与脱除试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(4): 270-273.
Jin Yuqi, Xu Xu, Li Weiwu, et al. Experimental research on emission and capture of HCl in MSW incineration[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(4): 270-273(in Chinese).
- [10] 蒋旭光, 李香排, 李琦, 等. 氯化物排放与燃烧脱氯技术工业性试验研究[J]. 热力发电, 2004(3), 37-39.
Jiang Xuguang, Li Xiangpai, Li Qi, et al. Industrial experiment study on chloride emission and dechlorination technology[J]. Thermal Power Generation, 2004(3), 37-39(in Chinese).
- [11] 李威武. 废弃物焚烧中含氯有害物质的生成和控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
Li Weiwu. The study on emission and removal of HCl and dioxin in the incineration of MSW[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1999(in Chinese).
- [12] 李建新. 垃圾焚烧过程重金属污染迁移机理及稳定化处理技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

- Li Jianxin. Transfer mechanism of heavy metals during MSW incineration and solidification/stabilization technology of heavy metals in MSW fly ash[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004(in Chinese).
- [13] 吕国强. 城市生活垃圾焚烧过程中硫与氯的行为研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
Lü Guoqiang. The behaviors of sulfur and chlorine in the MSW incineration[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004(in Chinese).
- [14] 金保升, 董长青, 仲兆平, 等. 流化床焚烧生活垃圾及尾气净化实验研究[J]. 污染防治技术, 2002, 15(1), 1-6.
Jin Baosheng, Dong Changqing, Zhong Zhaoping, et al. Experimental study on the co-firing of municipal refuse in a fluidized bed [J]. Pollution Prevention Technique, 2002, 15(1), 1-6(in Chinese).
- [15] Li Xiaodong, Yan Jianhua, Chi yong, et al. Study of a fluidized bed combustion technology co-firing municipal solid waste and coal and its applications[C]. Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Georgia, 1999.
- [16] 杨忠灿. 垃圾焚烧过程中氯源对氯化氢及二噁英排放特性影响的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
Yang Zhongcan. Study on effects of chlorine sources on emission of HCl and PCDD/Fs during municipal solid wastes incineration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003(in Chinese).
- [17] Shao D, Hutchinson E, Cao H, et al. Behavior of chlorine during coal pyrolysis[J]. Energy & Fuel, 1994(8): 402.
- [18] Guo Xiaofen, Yang Xuelian, Li Haibin, et al. Release of hydrogen chloride from combustibles in municipal solid waste [J]. Environmental Science Technology, 2001, 35(10): 2001-2005.
- [19] 张益, 赵由才. 生活垃圾焚烧技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 260-261.
Zhang Yi, Zhao Youcai. Municipal solid wastes incineration technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2000: 260-261 (in Chinese).
- [20] 董长青, 金保升, 仲兆平, 等. 燃煤循环流化床焚烧城市生活垃圾过程中酸性气体排放[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 32-37.
Dong Changqing, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Acid gas emiddiond during mixing-firing of municipal solid waste and coal in a circulating fluidzed bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 32-37(in Chinese).
- [21] 马师白, 殷剑君, 鲁军, 等. PVC 的热解脱氯动力学分析[J]. 环境化学, 2001(2): 173-178.
Ma Shibai, Yin Jianjun, Lu Jun, et al. Study on the treatment and recovery as resource of PVC waste: (1) kinetic analysis of PVC pyrolysis dechlorination[J]. Environmental Chemistry, 2001(2): 173-178(in Chinese).
- [22] 鲁军, 马师白, 高晋生, 等. 含氯有机废料资源化处理基础研究 II 热重法研究 PVC 热解脱氯过程[J]. 华东理工大学学报, 2002(28): 63-65.
Lu Jun, Ma Shibai, Gao Jinsheng, et al. Treatment and recovery as resources of chlorine-containing organic waste II. PVC pyrolysis dechlorination by using thermogravimetric technique[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2002(28): 63-65(in Chinese).
- [23] 李水清, 池涌, 李威武. 固定床 PVC 燃烧脱氯的机理和试验[J]. 环境科学, 2001, 22(2): 95-100.
Li Shuiqing, Chi Yong, Li Weiwu. Experimental and mechanism analyses on HCl emission control during PVC combustion in fixed beds [J]. Chinese Journal of Enviromental Science, 2001, 22(2): 95-100(in Chinese).
- [24] Wei X, Lopez C, von Puttkamer T, et al. Assessment of chlorine-alkali-mineral interactions during co-combustion of coal and straw [J]. Energy Fuels, 2002, 16(5), 1095-1108.
- [25] Xie W, Liu K, Pan W, et al. Interaction between emissions of SO₂ and HCl in fluidized bed combustors[J]. Fuel, 1999, 78(12), 1425-1436.
- [26] Jakob A, Stucki S, Struis R. Complete heavy metal removal from fly ash by heat treatment: influence of chlorine on evaporation rates [J]. Environmental Science Technology, 1996, 30(11), 3275-3283.
- [27] 解强, 沈吉敏, 张宪生, 等. 热处理过程中城市生活垃圾氯释放特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(6): 641-645.
Xie Qiang, Shen Jimin, Zhang Xiansheng, et al. Behavior of chlorine in municipal solid waste during heat treatment[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(6): 641-645(in Chinese).
- [28] Ramona Schröer, Urban A I. Report: new reliable method for the measurement of chlorine in refuse-derived fuels through combustion experiments in a pilot plant[J]. Waste Management& Research, 2010, 28(2): 185-189.



冯丽

收稿日期: 2009-12-03。

作者简介:

冯丽(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事生活垃圾焚烧以及煤和垃圾混烧产生 HCl 的控制机制研究, yoohyee@gmail.com;

蒋旭光(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 本文通讯作者, 主要从事洗煤泥流化床锅炉、洗煤泥煤矸石混烧流化床锅炉、有机废水及污泥流化床焚烧炉和城市生活垃圾流化床焚烧锅炉的研究以及技术推广工作, 共计发表论文 100 多篇, jiangxg@cmee.zju.edu.cn。

(责任编辑 张媛媛)