

## 医疗废物典型组分在热解/焚烧过程中无机氯的析出特性

梁娟娟, 李晓东, 严 密, 陆胜勇, 严建华

(浙江大学热能工程研究所能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 为研究医疗废物典型组分热解/焚烧过程无机氯的析出特性, 检测了不同热解温度、焚烧温度和气流量等工况下无机氯的释放, 分析了多种典型组分对输液管无机氯析出特性的作用。结果表明, 工况变化对医疗废物无机氯总析出的影响不大, 对  $\text{Cl}-\text{Cl}_2$  和  $\text{Cl}-\text{HCl}$  转化率的影响相对明显。与单组分输液管相比, 输液中加入纤维物质明显地促进  $\text{Cl}_2$  的生成, 但对  $\text{HCl}$  的生成表现出一定的抑制作用; 而橡胶的存在对  $\text{HCl}$  抑制作用最为显著, 使  $\text{Cl}-\text{HCl}$  转化率有很大程度地降低。

**关键词:** 医疗废物; 无机氯;  $\text{HCl}$ ;  $\text{Cl}_2$ ; 转化率

**中图分类号:** X 705      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000 - 6613 (2012) 04 - 0927 - 06

## Inorganic chlorine released from typical components of medical waste in pyrolysis/incineration

LIANG Juanjuan, LI Xiaodong, YAN Mi, LU Shenyong, YAN Jianhua

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to investigate inorganic chlorine released from the process of medical waste pyrolysis/incineration, a series experiments with different pyrolysis temperature, combustion temperature and gas flow rate were conducted; the effect of other compositions on inorganic chlorine emission from medical tube (PVC) incineration was also studied. Total conversion rate of inorganic chlorine just slightly changes under different conditions, but the variation in conversion rate of  $\text{Cl}_2$  and  $\text{HCl}$  are comparatively remarkable. Compared to the single PVC incineration, the addition of fiber can obviously promote  $\text{Cl}_2$  formation, and slightly prevent  $\text{HCl}$  release.  $\text{HCl}$  emission is significantly reduced by the presence of rubber, the conversion rate of  $\text{HCl}$  decreased.

**Keywords:** medical waste; inorganic chlorine;  $\text{HCl}$ ;  $\text{Cl}_2$ ; conversion rate

医疗废物组分复杂, 涵盖了塑料、橡胶、生物、玻璃及合成纤维类物质等多种成分。医疗废物中含有大量的输液管、输液袋、尿杯等塑料制品(主要成分是 PVC), 含氯量较高, 在废物的热处置过程中会产生有害物质和气体, 特别是  $\text{HCl}$  气体和二噁英 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and polychlorinated dibenzofurans, PCDD/Fs) 等剧毒有机污染物, 污染环境, 危害人类健康。烟气中  $\text{HCl}$ 、 $\text{Cl}_2$  都对二噁英生成有着重要影响<sup>[1-2]</sup>, 因此研究废物热处置过程中无机氯的析出特性及氯形态的

分布具有十分重要的意义。

目前医疗废物热处置过程无机氯释放的研究主要以 PVC 为模拟化合物在单纯的热解或者焚烧条件下研究  $\text{HCl}$  的排放特性<sup>[3-4]</sup>, 而涉及热解焚烧一

收稿日期: 2011-09-13; 修改稿日期: 2011-10-10。

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2007AA06Z336) 及国家重点基础研究发展计划 (2011CB201500) 项目。

第一作者: 梁娟娟 (1985—), 女, 硕士研究生。联系人: 李晓东, 教授, 博士生导师, 主要从事持久性有机污染物生成机理及控制排放研究。E-mail lixd@zju.edu.cn。

体化条件下无机氯的释放及其氯形态 (HCl 和 Cl<sub>2</sub>) 的分布特性的研究不多。本文作者所在课题组前期利用 TG-FTIR 方法分析了医疗废物典型组分的热解焚烧特性并在自行设计的小型固定床试验台上对以医用输液管(主要成分为 PVC)为有机氯源的单、双组分在热解焚烧过程中 PCDD/Fs 的生成特性进行了研究。为了进一步探讨 HCl、Cl<sub>2</sub> 与 PCDD/Fs 生成之间可能存在的关联性, 本文作者在上述研究的基础上, 选取了输液管与其它典型组分混合, 在同一试验台上进行了热解焚烧过程中无机氯的析出特性试验, 重点研究了热解温度、焚烧温度、气流量等参数对无机氯的析出规律及氯形态分布特性的影响, 以期对实际焚烧炉的氯迁移和 PCDD/Fs 排放控制提供指导。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

选取高含氯塑料类(输液管)、低含氯塑料类(针筒)、纤维类(竹棒)和橡胶类(医用橡胶手套)等有机组分进行研究。所用物料预先破碎, 平均粒径在 1~2 mm。其工业分析和元素分析如表 1 所示,

其中样品的氯含量根据高温燃烧水解-离子色谱法测定<sup>[6]</sup>。输液管是医疗废物的主要有机氯源, 为研究其它 3 种典型组分对输液管热解焚烧过程中氯析出的作用, 将 3 种典型组分和输液管均按照质量比为 1:1 进行混合, 所得混合物为: 针筒/输液管、竹棒/输液管和橡胶/输液管, 各混合物氯含量分别为 18.99%、19.04%和 19.45%。

### 1.2 试验装置和方法

热解燃烧一体化试验台如图 1 所示。该试验台主要由高温管式炉、温控装置、质量流量计、石英管、石英舟、玻璃纤维过滤装置、加热带和气体吸收装置组成。试验中的石英管由内外两个管嵌套组成, 分别作为热解管与燃烧管。实验过程中内管通入 N<sub>2</sub>, 外管中通入 O<sub>2</sub>。石英管利用管式炉进行加热。管式炉分为 3 个功能区: 热解段、燃烧段和燃后段, 各功能区的温度设置由温控装置实现, 恒温状态下精度达 ±1℃。反应气体流量由质量流量计控制, 所测气体体积均为常温常压下的体积。燃烧烟气中无机氯主要以 HCl 和 Cl<sub>2</sub> 两种形态分布, 利用两组洗气瓶吸收装置来分别吸收烟气中的 HCl 和 Cl<sub>2</sub>。前两个洗气瓶为第一组置于冰浴中, 瓶内装有

表 1 样品的工业分析和元素分析

样品	工业分析/%				元素分析/%						热值 $Q_{gr,ad} / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
	M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>	Cl <sub>ad</sub>	O* <sub>ad</sub>	
输液管	0.29	0.36	91.65	7.70	54.50	6.48	0.05	0.07	37.89	1.01	27187
针筒	0.15	0.09	99.70	0.06	83.67	13.73	0.06	0.16	0.09	2.05	46226
橡胶手套	0.57	11.76	79.92	7.75	69.85	8.40	0.18	0.67	1.01	7.56	35192
竹棒	7.63	0.64	74.85	16.88	46.29	5.80	0.20	0.09	0.15	39.20	18086

注: O\*<sub>ad</sub> 表示氧元素含量为根据质量平衡计算所得。

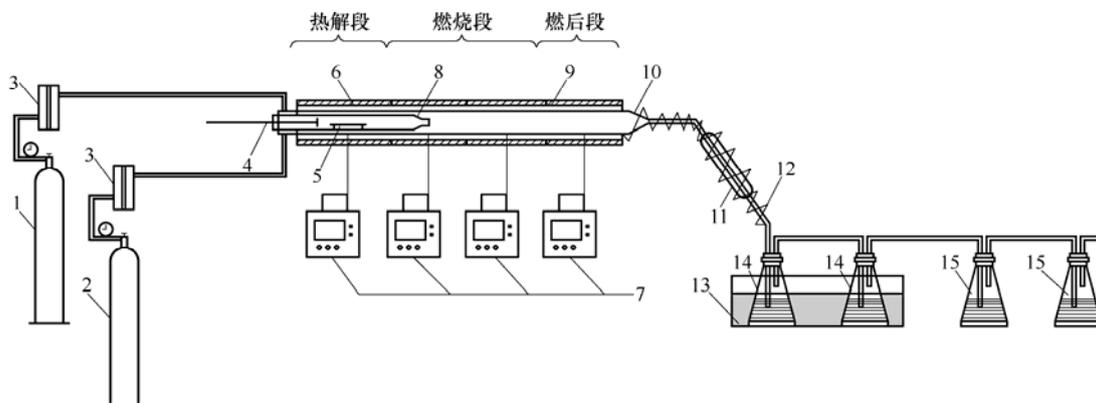


图 1 医疗废物热解焚烧试验台简图

1—氮气; 2—氧气; 3—质量流量计; 4—推杆; 5—石英舟; 6—高温管式炉; 7—温控装置; 8—内石英管; 9—隔热层; 10—外石英管; 11—过滤装置; 12—加热带; 13—冰浴; 14—HCl 吸收瓶; 15—Cl<sub>2</sub> 吸收瓶

0.05 mol/L 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液，用于吸收 HCl 气体；后两个洗气瓶为第二组，瓶内装有 0.05 mol/L 的 KI 溶液，用于吸收 Cl<sub>2</sub> 气体。KI 溶液中加入了适量的 NaHCO<sub>3</sub> 以保持溶液的微碱性，保证 I<sup>-</sup> 不被氧气氧化<sup>[7-8]</sup>。

当试验台达到设定温度后，用推杆将盛有称重试样的石英舟快速推入内石英管的热解区，在 N<sub>2</sub> 气氛下快速热解。热解产物流出内管到外管，再与 O<sub>2</sub> 混合，在燃烧段进行高温燃烧，反应气经由燃后段排出。排出的烟气通过玻璃纤维过滤装置后由气体吸收瓶进行吸收。从石英管出口至吸收瓶进口之间的管路利用加热带保温，保证其温度不低于 120 °C，避免烟气中水蒸气和其它气体的凝结造成析出氯的损失。所有试验工况下 N<sub>2</sub> : O<sub>2</sub> 体积比均为 4 : 1，燃后段温度均为恒温 300 °C，试验物料均取 0.4g。试验时物料上面覆盖适量的石英砂防止爆燃。每次试验时间设为 30 min。为减小试验误差，每种工况都进行了重复试验，试验工况见表 2。

反应结束后将吸收液定容到 500 mL，采用瑞士 Metrohm 公司生产的 792 basic IC 离子色谱仪测量 Cl<sup>-</sup> 浓度，仪器的最低检出限为 0.1 μg/L。

Cl-Cl<sub>2</sub>、Cl-HCl 转化率以及无机氯总析出率计算如式 (1) ~ 式 (3)。

$$\alpha(\text{Cl-Cl}_2) = \frac{\text{烟气中Cl转化为Cl}_2\text{的量}}{\text{物料中Cl的总量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\beta(\text{Cl-HCl}) = \frac{\text{烟气中Cl转化为HCl的量}}{\text{物料中Cl的总量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\gamma(\text{Cl-HCl 和 Cl-Cl}_2) = \frac{\text{烟气中Cl转化为HCl和Cl}_2\text{的总量}}{\text{物料中Cl的总量}} \times 100\% = \alpha + \beta \quad (3)$$

## 2 试验结果与分析

### 2.1 温度及气流量对无机氯析出特性的影响

#### 2.1.1 热解温度的影响

试验得到了医疗垃圾典型组分热解焚烧时在不同热解温度下 Cl-Cl<sub>2</sub>、Cl-HCl 的转化率及无机氯总析出率的变化曲线，如图 2、图 3 所示。由图 2 和图 3 发现，随着热解温度的增大，各物料的  $\gamma(\text{Cl-HCl 和 Cl-Cl}_2)$  变化均不大，但  $\alpha(\text{Cl-Cl}_2)$  和  $\beta(\text{Cl-HCl})$  的变化相对明显些，同时各物料相对应的  $\alpha(\text{Cl-Cl}_2)$  和  $\beta(\text{Cl-HCl})$  的曲线变化呈现相反的趋势。随着温度的升高，针筒/输液管混合物与单组分输液管的  $\alpha(\text{Cl-Cl}_2)$  都先稍有增加然后又快速减小到基本为零，表现出相同的规律；竹棒/输液管混合物与橡胶/输液管混合物的  $\alpha(\text{Cl-Cl}_2)$  曲线变化复杂，没有呈现明显的规律。从图 2 中发现，当

表 2 试验工况

变化参数	工况	热解温度/°C	焚烧温度/°C	气流量/L·min <sup>-1</sup>
热解温度	1-a	500	900	1.5
	1-b	600	900	1.5
	1-c	700	900	1.5
	1-d	800	900	1.5
焚烧温度	2-a	500	700	1.5
	2-b	500	800	1.5
	2-c	500	900	1.5
	2-d	500	1000	1.5
气流量	3-a	500	800	1.0
	3-b	500	800	1.5
	3-c	500	800	2.0
	3-d	500	800	2.5

注：每组实验工况均进行了 4 种材料的实验，也均进行了重复实验。

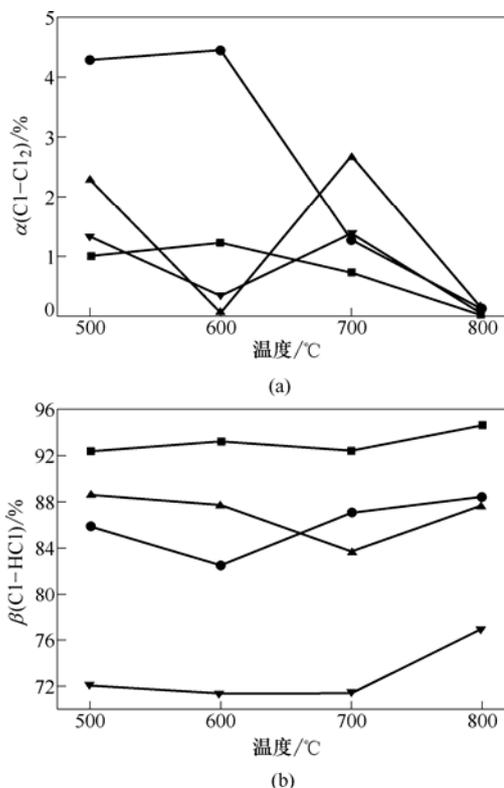


图 2 不同热解温度对 Cl-Cl<sub>2</sub> 转化率和 Cl-HCl 转化率的影响

■ 输液管；● 输液管+针筒；▲ 输液管+竹棒；▼ 输液管+橡胶

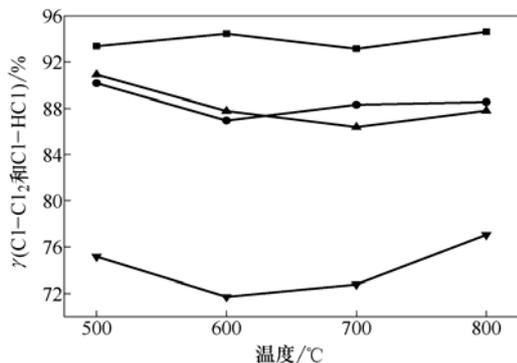


图 3 不同热解温度对无机氯总析出率的影响  
 ■输液管; ●输液管+针筒; ▲输液管+竹棒; ▼输液管+橡胶

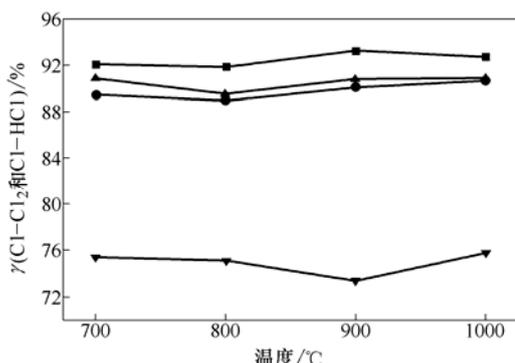


图 5 不同焚烧温度对无机氯总析出率的影响  
 ■输液管; ●输液管+针筒; ▲输液管+竹棒; ▼输液管+橡胶

热解温度为 500~600 °C 时, 针筒/输液管混合物的  $\alpha$  (CI-Cl<sub>2</sub>) 高达 4.5%, 与其它物料相比高出 2~9 倍。当热解温度达到 800 °C, 所有实验物料基本没有 Cl<sub>2</sub> 生成。这可能是由于热解温度决定了物料的升温速率和反应过程, 随着热解温度的升高, 物料的反应速度加快, 导致其热解行为和热解产物分布发生变化。当热解温度过高, 导致物料热解速度过快, 物料间或者热解产物之间未来得及相互作用, 氯基本上全部以 HCl 的形式析出。

2.1.2 焚烧温度的影响

图 4 和图 5 显示了不同焚烧温度下各物料的无

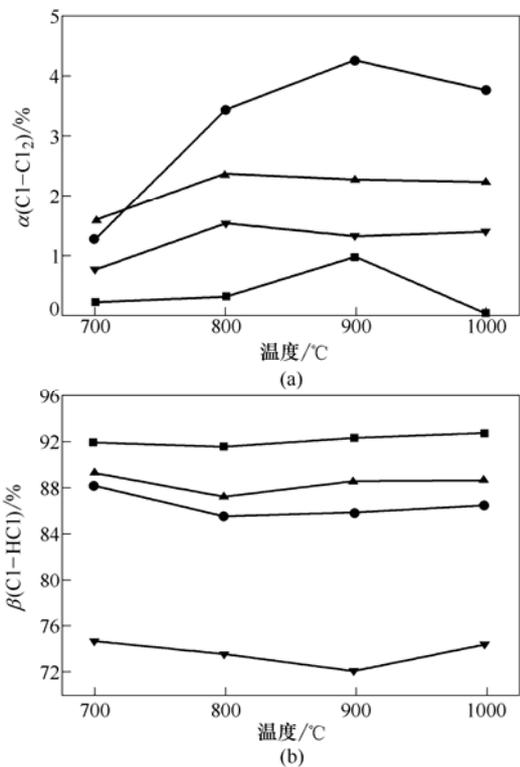


图 4 不同焚烧温度对 CI-Cl<sub>2</sub> 转化率和 CI-HCI 转化率的影响  
 ■输液管; ●输液管+针筒; ▲输液管+竹棒; ▼输液管+橡胶

机氯析出特性。从图中可以看出, 焚烧温度对各物料  $\gamma$  (CI-HCI 和 CI-Cl<sub>2</sub>) 基本没有影响。除针筒/输液管混合物外, 其它物料的  $\alpha$  (CI-Cl<sub>2</sub>) 和  $\beta$  (CI-HCI) 曲线随着焚烧温度升高的变化幅度也都很小, 但总体上  $\alpha$  (CI-Cl<sub>2</sub>) 与  $\beta$  (CI-HCI) 的曲线变化依然呈相反趋势。当焚烧温度小于 900 °C 时, 针筒/输液管混合物的  $\alpha$  (CI-Cl<sub>2</sub>) 呈快速上升趋势, 从 700 °C 时 1.2% 增大到 900 °C 时的最大值 4.3%, 在 900 °C 时单组分输液管的转化率也出现了最大值 (1.0%)。这可能是两者热解产物中的部分有机氯化物在高温焚烧过程中被分解转化为了 Cl<sub>2</sub>, 且随着温度的升高, 焚烧更为彻底, 对有机氯化物的破坏程度增大, 有利于 Cl<sub>2</sub> 生成。但是, 竹棒/输液管和橡胶/输液管两种混合物的  $\alpha$  (CI-Cl<sub>2</sub>) 和  $\beta$  (CI-HCI) 随焚烧温度升高的变化很小, 这说明焚烧温度对这两种混合物的热解产物焚烧时的氯析出特性的影响很小。

2.2.3 气流量的影响

气流量反映了反应过程中气体成分对过程的影响, 直接决定了氧气的含量。试验得出的各物料热解焚烧时无机氯的释放随气流量的变化曲线, 见图 6 和图 7。从图中看出, 各物料  $\gamma$  (CI-HCI 和 CI-Cl<sub>2</sub>) 的曲线随着气流量增大的波动很小, 表明气流量的改变对无机氯总析出量的影响不明显。另 3 种混合物料的  $\alpha$  (CI-Cl<sub>2</sub>) 曲线变化规律基本一致。当气流量小于 1.5 L/min 时, 随着气流量的增大, 3 种混合物料的 Cl<sub>2</sub> 的析出均有较大提高, HCl 的析出却表现出减小的趋势。当气流量大于 1.5L/min 时, 继续增大气流量对 Cl<sub>2</sub> 析出已基本没有影响。这种情况可能是这个过程中存在着可逆反应[式 (4)], 随着物料的热解, 医疗废物中的氯不断地析出, 当气

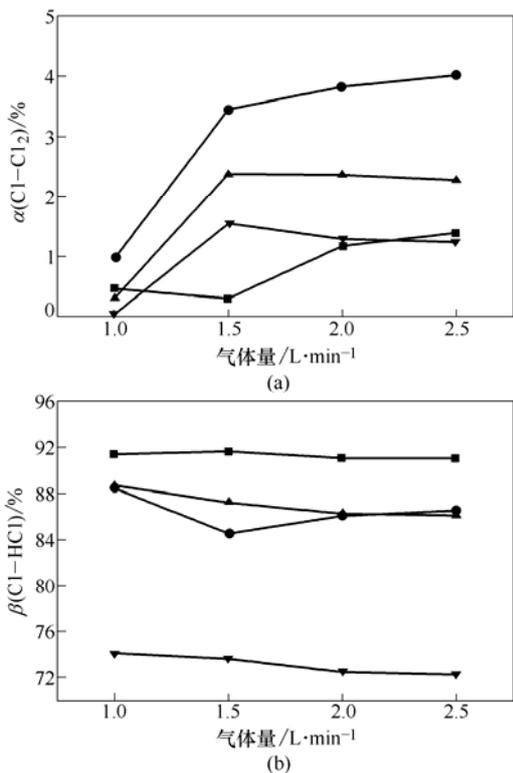


图 6 不同气流量对 Cl-Cl<sub>2</sub> 转化率和 Cl-HCl 转化率的影响  
 ■输液管；●输液管+针筒；▲输液管+竹棒；▼输液管+橡胶

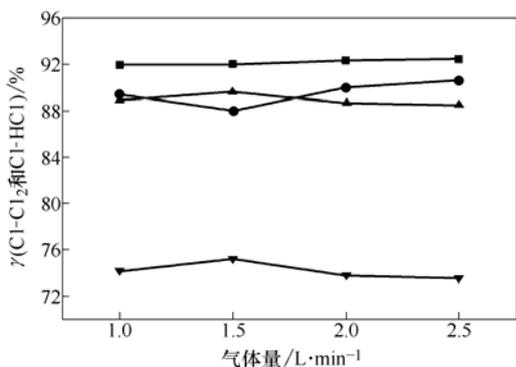


图 7 不同气流量对无机氯总析出率的影响  
 ■输液管；●输液管+针筒；▲输液管+竹棒；▼输液管+橡胶

流量较小时，焚烧时 O<sub>2</sub> 含量较低，不利于反应向右进行，此时生成的 Cl<sub>2</sub> 很少；当空气流速增加时，O<sub>2</sub> 含量增大，促进了小部分 HCl 转化为 Cl<sub>2</sub>，从而使得 α(Cl-Cl<sub>2</sub>) 增大，β(Cl-HCl) 减小。但当流速增加到一定值时，反应达到平衡状态，生成的 Cl<sub>2</sub> 达到最大量，此时再增加流速，氯的析出也不会有多大的变化了。



## 2.2 组分之间的相互作用对无机氯析出特性的影响

综合以上分析，就某种确定的试验物料而言，试验工况（温度和气流量）的变化对其无机氯析出特性的影响都不大。而对于不同试验物料，它们的无机氯析出特性有着明显的差异，这表明不同组分对输液管氯析出存在不同作用。

与单组分输液管相比，其它 3 种典型组分的加入均会使 α(Cl-Cl<sub>2</sub>) 转化率有所提高，而 β(Cl-HCl) 和 γ(Cl-HCl 和 Cl-Cl<sub>2</sub>) 有不同程度的减小。这说明在热解焚烧过程中两组分之间发生了相互反应，并且医疗材料在制造过程中加入的各种添加剂（如稳定剂、增塑剂、着色剂等）也可能参与反应。这些复杂的反应促进了 Cl<sub>2</sub> 生成，而活性较强的 Cl<sub>2</sub> 在一定程度上增强了有机化合物的氯代作用而导致有机氯化物的析出量增大，或者也可能部分热解释放出来的氯与材料中的添加剂结合形成固体含氯化合物，从而使 HCl 和无机氯的释放量有所降低。各物料在所有试验工况下生成的 Cl<sub>2</sub> 与 HCl 相比都要小 1~2 个数量级，说明 HCl 是氯的主要转化形式，这与金余其等<sup>[5]</sup>得出的 PVC 在焚烧时 Cl-HCl 转化率较高（83%~92%）而 Cl-Cl 转化率较低（<7%）的结论相符。

从图 2、图 4 和图 6 中发现，针筒（主要成分为 PP）与输液管（主要成分为 PVC）混合后的 β(Cl-HCl) 降低，α(Cl-Cl<sub>2</sub>) 有较大程度提高。刘义彬等<sup>[9]</sup>研究认为 PP 与 PVC 混合热解时存在自由基反应，反应生成的氯自由基向 PP 转移，抑制了 HCl 的进一步生成。而分子间自由基转移能有效降低混合物的热稳定性，促进了混合物热解，从而可能促进 Cl<sub>2</sub> 的析出。输液管中加入竹棒后降低了 HCl 的排放，这与 Kuramochi 等<sup>[10]</sup>的研究结果一致，表明纤维的存在对 PVC 的 HCl 析出具有一定的抑制作用。这是由于 PVC 热解析出的 HCl 作为 Lewis 酸促进纤维素的分解，纤维素析出较多的酸类物质阻碍了 HCl 的生成。但是，竹棒与输液管混合后 α(Cl-Cl<sub>2</sub>) 有明显提高，表明纤维素对 PVC 的 Cl<sub>2</sub> 生成具有明显地促进作用，而 Cl<sub>2</sub> 促进二噁英生成的能力比 HCl 强，这也验证了肖志伟等<sup>[11]</sup>得出纤维能明显地促进 PCDD/Fs 生成的结论。当橡胶手套与输液管混合时，看出橡胶对输液管 HCl 生成和无机氯的释放表现出明显的抑制作用，γ(Cl-HCl 和 Cl-Cl<sub>2</sub>) 和 β(Cl-HCl)

都有都显著降低, 仅在 70%~75%之间, 充分证明了橡胶具有较好的脱氯效果。这可能与橡胶手套(主要成分是天然橡胶)的热解产物主要是不饱和烯烃有关。烯烃的化学性质较为活泼, 与 PVC 热解时析出的氯发生复杂反应生成有机氯化物或是增加了残渣中的含氯量, 从而减少了 HCl 和无机氯总量的析出。

此外, 观察试验样品在同种工况中的氯析出行为, 还可以发现如下规律: ①针筒/输液管混合物与单组分输液管在热解焚烧过程中 $\alpha$ (Cl-Cl<sub>2</sub>)、 $\beta$ (Cl-HCl)以及 $\gamma$ (Cl-HCl 和 Cl-Cl<sub>2</sub>)的曲线变化趋势都分别基本一致, 这表明针筒的加入不会改变输液管的氯析出规律, 只改变析出量。这可能是由于针筒(主要成分为 PP)与输液管(主要成分为 PVC)都属于塑料类高分子有机聚合物, 分子结构相似并且组成成分比较单一, 除了 PVC 热解产生 HCl, 两者的热解行为和热解产物比较相似, 所以针筒与输液管混合热解反应过程中基本体现了单组分输液管的热解行为规律。两组分间的相互作用的结果仅是减小了 PVC 的无机氯析出量, 而不改变氯的析出行为。②竹棒/输液管与橡胶/输液管的氯析出规律也基本相同, 只是析出量不同, 在相同工况下竹棒/输液管的 $\alpha$ (Cl-Cl<sub>2</sub>)、 $\beta$ (Cl-HCl)以及 $\gamma$ (Cl-HCl 和 Cl-Cl<sub>2</sub>)均比橡胶/输液管的大。可见竹棒、橡胶与输液管之间的相互作用具有相似性, 但具体原因还需要进行相关方面的研究。

### 3 结 论

利用小型固定床试验台进行了医疗废物典型组分混合物的热解-焚烧试验, 研究了不同工况下的无机氯的析出规律, 主要结论如下。

(1) 试验工况(热解温度、焚烧温度和气流量)对各物料无机氯总析出率影响不大。而对 Cl-Cl<sub>2</sub>转化率和 Cl-HCl 转化率的影响相对明显些, 而且总体上这两者的转化率曲线变化规律总是呈现相反的趋势。

(2) 其它典型组分与输液管混合后, 两组分之间发生各种复杂反应。与单组分输液管相比, 所有混合物均会使 Cl-Cl<sub>2</sub>转化率有所提高, 而 Cl-HCl 的转化率和无机氯总析出率都所减小。结果表明, 纤维素对 PVC 的 Cl<sub>2</sub>生成具有明显地促进作用, 但对 HCl 的生成具有一定的抑制作用, 而加入橡胶能显著地降低 PVC 的 HCl 析出。

(3) 针筒/输液管混合物与单组分输液管在热解焚烧过程中 Cl-Cl<sub>2</sub>、Cl-HCl 的转化率以及无机氯总析出率的曲线变化趋势表现出一致性, 但析出量不同。

### 参 考 文 献

- [1] Wey M Y, Liu K Y, Yu W J, 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.
- [2] Coutinho M, Pereira M, Rodrigues R, et al. Impact of medical waste incineration in the atmospheric PCDD/F levels of Porto, Portugal [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 362 (1-3): 157-165.
- [3] 邓娜, 张于峰, 赵薇, 等. 聚氯乙烯(PVC)类医疗废物的热解特性研究[J]. *环境科学*, 2008, 29 (3): 837-843.
- [4] 卿山, 王华, 何屏. 医疗废物焚烧过程中氯的析出试验[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29 (6): 23-26.
- [5] 肖志伟. 医疗废物典型组分化特性认识及其热解焚烧特性的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [6] 李晓东, 杨忠灿, 陆胜勇, 等. 城市生活垃圾氯含量测定方法的研究[J]. *燃料化学学报*, 2002, 30 (6): 563-567.
- [7] Liu K, Pan W P, Riley J T. A study of chlorine behavior in a simulated fluidized bed combustion system[J]. *Fuel*, 2000, 9 (9): 1115-1124.
- [8] Jin Y Q, Tao L, Chi Y, et al. Conversion of bromine during thermal decomposition of printed circuit boards at high temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186 (1): 707-712.
- [9] 刘义彬, 马晓波, 陈德珍, 等. 废塑料典型组分共热解特性及动力学分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30 (23): 56-59.
- [10] Kuramochi H, Nakajima D, Goto S, 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.
- [11] 肖志伟, 李晓东, 陈彤, 等. 医疗废物组分及氯含量对 PCDD/Fs 分布特性的影响[J]. *化工进展*, 2010, 29 (7): 1358-1362.