

# 固体废物焚烧过程中铬的释放及脱除研究

吴沛东, 张军营, 赵永椿, 袁媛, 李小龙, 郑楚光

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

## Release and Removal of Chromium During Municipal Solid Waste Incineration

WU Peidong, ZHANG Junying, ZHAO Yongchun, YUAN Yuan, LI Xiaolong, ZHENG Chuguang

(State Key Lab of Coal Combustion (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Chromium released during municipal solid waste (MSW) incineration is highly toxic and carcinogenic. Effects of temperature, residue time and chlorine on release and removal of different forms of chromium during MSW incineration were investigated in a drop tube furnace. The results show that the higher temperature, more residue time and more chlorine increase the release of total chromium, O<sub>2</sub> and CaO accelerate Cr(III) transformation to Cr(VI). The retention rate of the four sorbents for total-Cr follows the sequence of bentonite > zeolite > CaO > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while the retention rate of the four sorbents for Cr(VI) follows the sequence of CaO > zeolite > bentonite > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The removal rate of the sorbent is also influenced by temperature and chlorine.

**KEY WORDS:** municipal solid waste (MSW); chromium; hexavalent chromium; release; absorption

**摘要:** 固体废物焚烧中 Cr 的排放会危害环境。文中采用立式管式炉作为实验装置,通过模拟固体废物中添加定量不同形态含铬化合物,采用氧化铝、氧化钙、沸石和膨润土作为吸附剂,研究不同热力学条件、氯含量对固体废物焚烧过程中总 Cr 和 Cr(VI)形态迁移转化及脱除效率的影响。结果表明温度的提高、停留时间的增加、氯含量的增加会促进总 Cr 和 Cr(VI)的释放, O<sub>2</sub> 和 CaO 会促进 Cr(III)向 Cr(VI)转化。对总铬的脱除效率: 膨润土>沸石>氧化钙>氧化铝; 对六价铬的脱除效率: 氧化钙>沸石>膨润土>氧化铝。除氧化钙之外, 温度对总 Cr 和 Cr(VI)的脱除效率影响较小, 氯会减弱吸附剂的脱除能力。

**关键词:** 固体废物焚烧; 铬; 六价铬; 释放; 脱除

## 0 引言

由于焚烧法具有减量化、无害化、资源化和余

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51176060, 41172140); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2011CB201504)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51176060, 41172140); The National Basic Research Program (973 Program) (2011CB201504).

热利用等优点,逐渐成为现在最主要的固体废物处理技术之一。而在固体废物焚烧中,重金属是最受关注的污染物之一<sup>[1-2]</sup>。在固体废物中,铬主要以 Cr(III)和 Cr(VI)形态存在,其中 Cr(VI)比 Cr(III)的毒性强 100~1 000 倍<sup>[3]</sup>, Cr(VI)能与核酸结合,对呼吸道、消化道有刺激、致癌和诱变作用<sup>[4-5]</sup>。因此对焚烧过程中铬的释放、迁移、转化规律的研究显得尤为重要。

Cahill<sup>[6]</sup> 等人通过观察飞灰中重金属化合物的存在形式首先提出了蒸发-凝结的迁变机制; Yousif<sup>[7]</sup> 指出重金属在燃烧过程中主要经历了蒸发、相和表面反应、冷凝成核团聚和飞灰吸附 3 个主要过程; Belevi 等<sup>[8]</sup>在炉排焚烧炉的实验研究发现铬迁移方式以夹带为主; Marani 等<sup>[9]</sup>在循环流化床实验台进行实验研究,发现在 850 °C 左右,铬相对稳定,蒸发现象不明显; Wang<sup>[10]</sup>在管式炉中,用掺混 FeCl<sub>3</sub> 的模拟固体废物实验研究了金属氯化物对迁移和转化的影响,发现底渣中铬主要以 Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> 形态出现; Wey<sup>[11]</sup>在流化床实验台用模拟固体废物成分研究不同运行条件和氯化物对 Cr 挥发性和形态的影响指出,无论是有机氯还是无机氯,飞灰中铬元素最主要的形态都是 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Lima<sup>[12]</sup>调查 2 个固体废物焚烧炉、1 个生物质燃烧炉和 1 个生物质与油混烧炉中,发现飞灰中六价铬的含量在 4%~8%; Chen<sup>[13]</sup>、Dirk<sup>[14]</sup>、Soruma<sup>[15-16]</sup>、Menard<sup>[17]</sup>利用热力学平衡计算研究了多种焚烧条件下六价铬的生成机制; 李建新<sup>[18]</sup>采用模拟固体废物在小型流化床实验台上研究发现当温度高于 800 °C 时,铬才有明显挥发现象,水分对挥发影响不明显。

本文通过在立式管式炉上用模拟固体废物作为原料,研究固体废物焚烧过程中温度、停留

时间、氯和水分对 Cr(III)和 Cr(VI)形态迁移转化的影响, 并分析 4 种吸附剂对不同形态铬的吸附效果及影响因素。

## 1 实验装置及分析方法

### 1.1 固体废弃物配置

实验中所用模拟固体废弃物是根据中国固体废弃物的典型成分及比例配制而成, 表 1 为模拟固体废弃物的组成及成分分析。

表 1 模拟固体废弃物样品组成

Tab. 1 Chemical composition of simulated MSW

样 品	元素分析(干燥基)/%					水分(空气 干燥基)/%
	C	H	O	N	S	
纸张	39.44	5.60	53.73	1.13	0.10	3.89
面粉	43.47	6.74	45.88	2.93	0.98	8.48
棉布	41.34	6.28	50.36	1.47	0.55	3.67
木屑	48.04	6.34	43.75	0.97	0.90	4.76
塑料	91.55	7.78	0	0.45	0	0.04
总量	43.27	5.82	38.68	1.67	0.53	5.03

实验中使用面粉、硬纸壳、木屑、棉布、聚乙烯(PE)及惰性物质( $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ )模拟固体废弃物, 通过加入去离子水来调节模拟固体废弃物中的水分。由于固体废弃物模拟组分的 Cr 含量非常低, 重金属添加中不考虑固体废弃物重金属的背景浓度<sup>[19]</sup>。考虑到分析仪器检测限的限制和分析的方便和准确, 通常试验研究所添加的 Cr 浓度要远高于固体废弃物中 Cr 的平均浓度。试验中 Cr(III)以  $Cr(CH_3COO)_3 \cdot 6H_2O$  的形式添加, 添加量为每 1 g 模拟固体废弃物中添加 5.2 mg  $C_6H_5O_6Cr \cdot 6H_2O$ , Cr(VI)以  $Na_2CrO_4 \cdot 4H_2O$  形式添加, 添加量为每 1 g 模拟固体废弃物中添加 0.9 mg  $Na_2CrO_4 \cdot 4H_2O$ , 使得模拟固体废弃物中 Cr(III)浓度为 800  $\mu g/g$ , Cr(VI)含量为 200  $\mu g/g$ 。

### 1.2 实验装置

图 1 为立式管式炉实验系统示意图, 其中反应器部分参考 Diaz-Somoano<sup>[20-22]</sup>的实验研究。该装置主要由供气装置、管式炉加热器、内外套管反应器、尾气处理系统和检测系统等组成。供气装置由  $N_2$ 、 $O_2$  和水蒸气构成, 由质量流量计控制通入气体流量为 1 L/min。反应器由内外两套管组成, 内套管底部砂芯用以放置吸附剂, 瓷舟放置模拟固体废弃物样品, 温控仪控制加热温度。尾气通过 0.5 mol/L 的  $HNO_3$  溶液处理。混合气体从内套管将模拟固体废弃物中的挥发性含铬物质载入, 通过下方的吸附剂, 进入外套管后排入尾气处理装置。

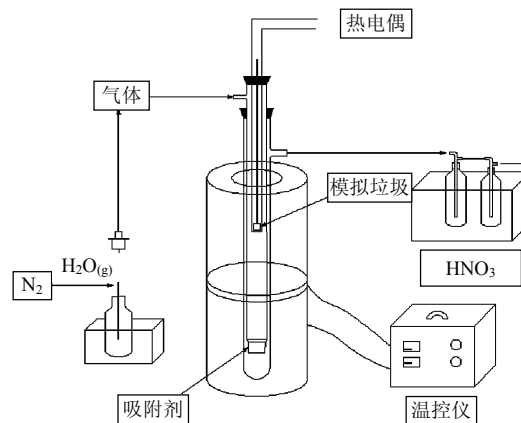


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of fixed-bed reactor

### 1.3 实验步骤及分析方法

为了研究不同温度、停留时间等条件下总铬及六价铬的释放和脱除, 控制实验温度为 800~1400  $^{\circ}C$ , 载入气体流量为 1 L/min, 停留时间为 5~60 min, 水分的含量为 5%~60%, 氯的含量为 0.05%~5%, 添加方式有添加 PVC 和添加 NaCl 两种, 吸附剂有膨润土、沸石、氧化钙和氧化铝 4 种。加热之前先将 1.5 g 吸附剂与 4.5 g 二氧化硅混合并放入内套管底部的砂芯上, 待加热器温度稳定, 通入一定量气体后, 将装有模拟固体废弃物的小瓷舟放入套管内, 调节气体流量及其他实验条件, 待达到设定的停留时间后将其取出。实验结束后收集好瓷舟内的残渣和砂芯上的吸附剂备用。

样品和吸附剂中的铬的含量通过电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)(ELAN DRC-e, PerkinElmer 公司, 美国)和高效液相色谱仪(HPLC)(1100 LC/MSD Trap, Agilent 公司, 美国)联用进行分析测试, 测总铬含量的样品通过  $HF-HNO_3-HClO_4$  体系进行微波消解, 测六价铬含量的样品则参照 US EPA Method 3060A 和 EPA 7199 进行碱性消解<sup>[23-24]</sup>。总铬 total Cr 或六价铬 Cr(VI)的释放率和脱除率定义为:

$$E = \frac{M_{\text{raw}} C_{\text{raw}} - M_{\text{resi}} C_{\text{resi}}}{M_{\text{raw}} C_{\text{raw}}} \quad (1)$$

$$R = \frac{M_{\text{sorb}} C_{\text{sorb}}}{M_{\text{raw}} C_{\text{raw}} - M_{\text{resi}} C_{\text{resi}}} \quad (2)$$

式中:  $E$  为铬或六价铬的释放率;  $R$  为铬或六价铬的脱除率;  $M_{\text{raw}}$  为固体废弃物原重, kg;  $M_{\text{resi}}$  为残渣重量, kg;  $M_{\text{sorb}}$  为吸附剂重量, kg;  $C_{\text{raw}}$  为铬或六价铬在原始固体废弃物中的含量, mg/kg;  $C_{\text{resi}}$  为铬或六价铬在残渣中的含量, mg/kg;  $C_{\text{sorb}}$  为铬或六价铬在吸附剂中的含量, mg/kg。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟固体废弃物中总铬与六价铬的释放规律

#### 2.1.1 温度的影响

图 2 表示的是模拟固体废弃物在停留时间为 30 min、通入  $N_2$  时不同温度下总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率。如图 2 所示,随着温度的升高,总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率都有一定的提高,但总 Cr 提高较 Cr(VI) 略多:总 Cr 的释放率由 800 °C 时的 8.3% 升高至 1400 °C 时的 19.6%, Cr(VI) 的释放率由 800 °C 时的 5.7% 升高到 1400 °C 时的 13.1%, 实验结果与 Wang<sup>[10]</sup> 等人研究相符。分析原因是铬是一种高沸点,蒸发压力较低的重金属,因此较难挥发,而温度的升高能增加其蒸发压力,促进其蒸发<sup>[25]</sup>。

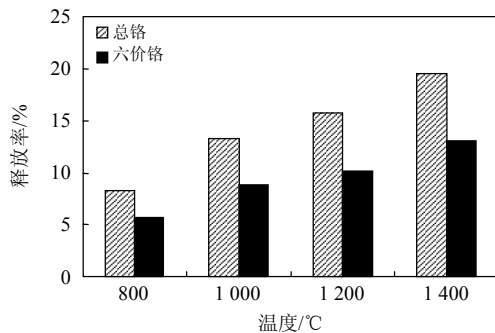


图 2 温度对铬的释放的影响

Fig. 2 Effect of temperature on chromium emission

#### 2.1.2 停留时间的影响

图 3 为在 1000 °C 下通入  $N_2$  时停留时间对总 Cr 和 Cr(VI) 释放的影响。如图 3 所示,当停留时间由 5 min 增加至 60 min 时,总 Cr 的释放率由 3.3% 增加至 13.6%, Cr(VI) 的释放率由 3.4% 增加至 11.2%, 说明增加停留时间能提高总铬及六价铬的释放。在 30 min 之后,总 Cr 的释放率基本保持不变,而 Cr(VI) 的释放率仍在提高,表明此时有部分 Cr(III) 被氧化成为 Cr(VI)。

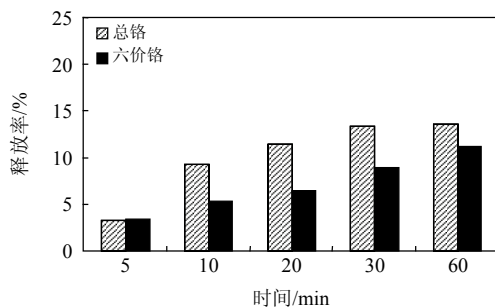


图 3 停留时间对铬的释放的影响

Fig. 3 Effect of retention time on chromium emission

#### 2.1.3 气氛( $O_2/N_2$ 的比例)的影响

不同气氛也会影响固体废弃物焚烧时重金属

的挥发<sup>[26]</sup>,图 4 为在 1000 °C、停留时间为 30 min 时不同  $O_2/N_2$  的比例对总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率的影响。实验结果表明,当  $O_2/N_2$  由 0/1 变为 1/0 时,总 Cr 的释放率由 13.3% 增加至 16.5%, Cr(VI) 的释放率由 8.8% 降至 1.7%。说明当  $O_2/N_2$  的比例增大时,总 Cr 的释放率会逐渐升高,但变化较小;而 Cr(VI) 的释放率则会明显降低,这是因为  $O_2$  的增多能促进模拟固体废弃物中 Cr(III) 氧化成 Cr(VI),导致残渣中 Cr(VI) 增多,而使 Cr(VI) 的释放率降低。计算可以得到,在全部通入  $O_2$  的条件下,固体废弃物中有 7.1% 的 Cr(III) 转化成 Cr(VI)。Frandsen<sup>[27]</sup> 指出在氧化性氛围下,铬会以气态的  $CrO_3$  出现在烟气中,还原性氛围下则多以  $Cr_2O_3$  存在于底渣中。因此,为了降低铬的释放以及三价铬向六价铬的转化,应使固体废弃物焚烧环境尽量为还原性氛围。

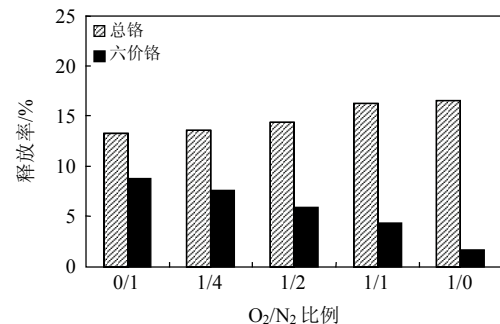


图 4 不同  $O_2/N_2$  比例对铬的释放的影响

Fig. 4 Effect of  $O_2/N_2$  ratio on chromium emission

#### 2.1.4 氯的影响

图 5 为在 1000 °C 下通入  $N_2$ ,停留时间为 30 min、添加氯的含量为 0.1% 时,不同氯的添加方式对总 Cr 和 Cr(VI) 释放的影响。如图 5 所示,当不添加任何氯时,总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率为 13.3% 和 8.8%;当添加 NaCl 时,总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率为 20.1% 和 12.7%;当添加 PVC 时,总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率为 16.1% 和 10.2%;当同时添加 NaCl 和 PVC 时,总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率为 18% 和 11.3%。实验结果说明:无论采用无机氯还是有机氯的添加方式,都会增加总 Cr 和 Cr(VI) 的释放,且添加 PVC 比添加 NaCl 对促进铬释放的作用更大。其原因可能是氯的存在使金属与其反应生成更易挥发的金属氯化物,另外氯的加入延迟了金属化合物的凝结过程,降低了露点温度,使其更易挥发<sup>[8]</sup>。而添加 PVC 比添加 NaCl 使铬的释放增加更多,是因为 NaCl 分子间的结合力大于 PVC 分子间的结合力,PVC 易分解提供出更多的 Cl 可以与铬结合生成易挥发的氯化物<sup>[28]</sup>。加入 PVC 后,系统中生成

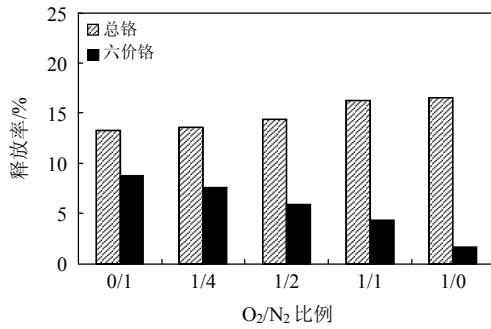


图 5 不同氯的添加方式对铬的释放的影响  
Fig. 5 Effect of different kinds of chlorine on chromium emission

自由 Cl 和 HCl, 它们一部分与 Cd 生成相应的高挥发性氯化物 CrCl<sub>3</sub>, 另一部分与系统中的 Na、K 生成相应的氯化物(NaCl、KCl), 生成的 Na、K 氯化物与 CrCl<sub>3</sub> 生成直接化合生成 Na<sub>2</sub>CrCl<sub>5</sub>、K<sub>4</sub>CrCl<sub>7</sub> 等。另外, PVC 的加入还使 Cr 生成了相应的氯酸盐 Na[Cr(ClO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>]<sup>[10]</sup>。

近年来由于城市固体废弃物组成结构的不断变化, 氯的含量呈明显增加的趋势<sup>[29]</sup>。为了进一步考察氯含量的影响, 实验研究了不同氯含量下铬的释放率。图 6 为在 1000 °C 下通入 N<sub>2</sub>, 停留时间为 30 min 时, 不同氯(NaCl)含量下模拟固体废弃物焚烧中总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率。如图 6 所示, 当不添加任何氯时, 总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率为 13.3% 和 8.8%; 当氯含量为 0.05% 时, 总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率为 16.2% 和 10.4%; 当氯含量为 0.1% 时, 总 Cr 和 Cr(VI) 的释放率为 20.1% 和 12.7%。实验结果表明总 Cr 的释放率在氯的含量小于 0.1% 时会随着氯的含量增加而升高, 在氯的含量大于 0.1% 时, 基本不随氯的增加而变化; Cr(VI) 的释放率在氯的含量小于 0.5% 时会随着氯含量的增加而升高, 在氯的含量大于 0.5% 时, 基本不随氯的增加而升高, 甚至有轻微下降。

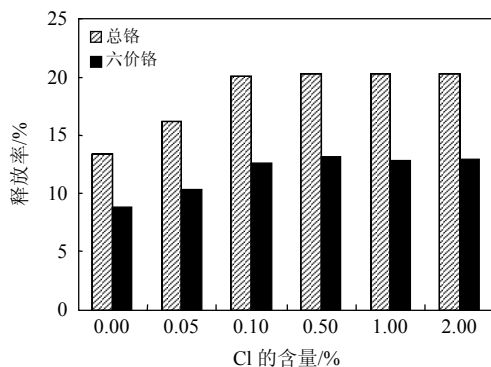


图 6 不同氯的含量对铬的释放的影响  
Fig. 6 Effect of different chlorine concentrations on chromium emission

## 2.2 模拟固体废弃物焚烧烟气中总铬和六价铬的脱除

实验研究了 4 种吸附剂与二氧化硅混合后对焚烧烟气中总铬和六价铬的脱除, 并重点考察了温度及氯对脱除的影响。各组实验均进行了空白实验, 研究发现二氧化硅对吸附剂脱除铬的影响较小, 可以忽略不计。

图 7 为在停留时间为 30 min、通入 N<sub>2</sub> 时不同温度下不同吸附剂与空白样相对总 Cr 的脱除率, 如图 7 所示, 在不同温度下, 氧化铝对总 Cr 的脱除率在 22% 左右, 氧化钙对总 Cr 的脱除率在 28% 左右, 膨润土对总 Cr 的脱除率在 44% 左右, 沸石对总 Cr 的脱除率在 36% 左右; 实验结果表明, 无论在何种温度下, 对于总 Cr 的脱除率, 都有: 膨润土 > 沸石 > 氧化钙 > 氧化铝, 且温度的变化对吸附剂的脱除效果影响不大。这是由于膨润土及沸石具有类似分子筛特性, 孔隙结构利于吸附铬<sup>[30]</sup>, 而 Chen<sup>[31]</sup> 的研究认为高温下形成的重金属化合物也会影响吸附剂的脱除效果。

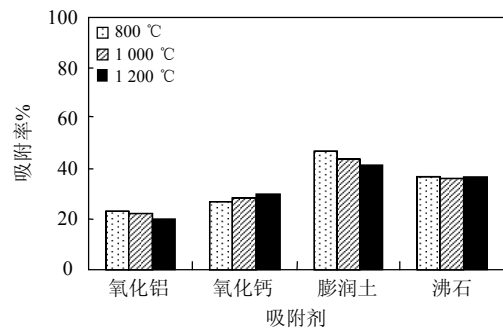


图 7 不同温度下不同吸附剂对总 Cr 的脱除率  
Fig. 7 Remove rate of total chromium by different sorbents at different temperature

图 8 为在 1000 °C 下、停留时间为 30 min、通入 N<sub>2</sub> 时不同温度下不同吸附剂与空白样相对六价铬的脱除率, 如图 8 所示, 在 800 °C 下, 氧化铝、氧化钙、膨润土、沸石 4 种吸附剂对于 Cr(VI) 的脱除率分别为 14%、21%、17%、18%; 在 1000 °C 下, 4 种吸附剂的脱除率分别为 23%、75%、28%、33%; 在 1200 °C 下, 4 种吸附剂的脱除率分别为 24%、76%、31%、33%。结果表明, 不同温度下对于 Cr(VI) 的脱除率, 都有氧化钙 > 沸石 > 膨润土 > 氧化铝, 温度的变化会较强地影响氧化钙对于六价铬的吸附。分析原因是由于存在  $\text{CaO} + 0.5\text{Cr}_2\text{O}_3 + 0.75\text{O}_2 \rightarrow \text{CaCrO}_4$  的反应<sup>[32]</sup>, 氧化钙能使三价铬转化为六价铬, 因此导致计算结果中氧化钙对六价铬的吸附效率较高。而 800 °C 与 1000 °C 时吸附效果相差较大

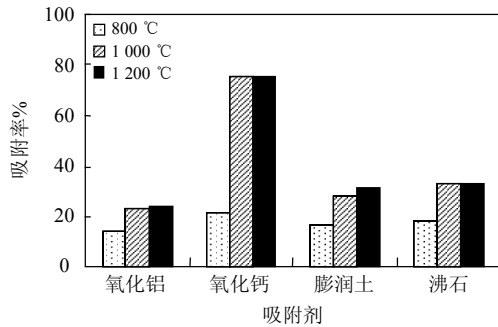


图8 不同温度下不同吸附剂对Cr(VI)的脱除率

Fig. 8 Remove rate of hexavalent chromium by different sorbents at different temperature

的原因是由于该反应需要在1000 °C才能进行<sup>[33]</sup>。

图9—10为在1000 °C下、停留时间为30 min、通入N<sub>2</sub>时不同氯含量下不同吸附剂与空白样相比

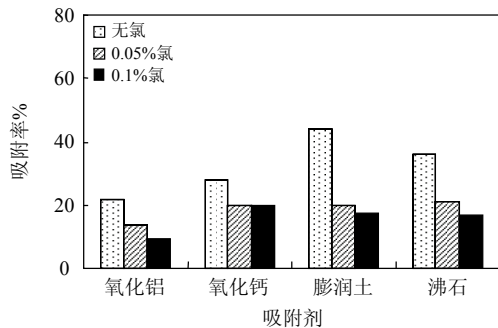


图9 不同氯含量下不同吸附剂对总Cr的脱除率

Fig. 9 Remove rate of total chromium

by different sorbents with different chlorine concentrations

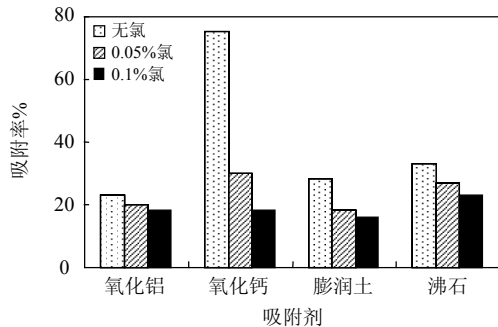


图10 不同氯含量下不同吸附剂对Cr(VI)的脱除率

Fig. 10 Remove rate of hexavalent chromium

by different sorbents with different chlorine concentrations 对总铬和六价铬的脱除率。如图所示,氯的增加会使4种吸附剂对总Cr和Cr(VI)的脱除率都有一定程度的降低,这与Barros<sup>[34]</sup>的研究结果相近。分析原因是Cr优先于Cl反应生成铬的氯化物,而减少了铬与吸附剂的反应,一定程度上削弱了吸附剂的脱除作用<sup>[35]</sup>。

### 3 结论

通过研究不同热力学条件、氯含量和水分对固体废弃物焚烧过程中总Cr和Cr(VI)形态迁移转化

及脱除效率的影响,可以得出以下结论。

在其他条件不变的情况下:

1) 温度的升高会增加铬的蒸发压力,促进铬的蒸发,但对Cr(VI)的促进作用较总Cr小;由于Cr(VI)的释放过程较长且平稳,因此停留时间越长,铬的挥发越充分,但到一定时间总Cr的挥发会基本稳定。

2) O<sub>2</sub>的增加能够促进总Cr的释放,但影响较小,同时O<sub>2</sub>还能促进Cr(III)氧化成Cr(VI),在全部通入O<sub>2</sub>的条件下,固体废弃物中有7.1%的Cr(III)转化成Cr(VI)。

3) 氯能与铬形成易挥发的氯化物,促进铬的释放,使铬更易向飞灰或烟气中迁移,且有机氯对铬的释放影响要大于无机氯。当氯的含量大于0.5%时,总Cr的释放率基本不再随氯含量增多而变化,而Cr(VI)会随着氯含量的增加有轻微降低。

4) 4种吸附剂对于总铬的脱除效率:膨润土>沸石>氧化钙>氧化铝;对于六价铬的脱除效率:氧化钙>沸石>膨润土>氧化铝。除氧化钙之外,温度对总铬及六价铬的吸附影响较小;由于氯能优先与铬反应,因此能在一定程度上减弱吸附剂的吸附能力。通过 $\text{CaO} + 0.5\text{Cr}_2\text{O}_3 + 0.75\text{O}_2 \rightarrow \text{CaCrO}_4$ 这一反应,氧化钙能够在一定条件下将Cr(III)转化成Cr(VI)。

### 参考文献

- [1] 陈勇. 垃圾焚烧中重金属Cd, Pb迁移和转化规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.  
Chen Yong. The distribution and transformation of the heavy metals Cd, Pb during MSW incineration [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008(in Chinese).
- [2] 张衍国, 李清海, 康建斌. 清洁焚烧发电技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 23-26.  
Zhang Yanguo, Li Qinghai, Kang Jianbin. Clean MSW incineration technology[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2004: 23-26(in Chinese).
- [3] Grabarczyk M, Korolczuk M, Tyszczyk K. Extraction and determination of hexavalent chromium in soil samples[J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2006, 386(2): 357-362.
- [4] Vernet J. Heavy Metal in the Environment[M]. B. V.: Elsevier Science Publishers, 1991: 132-146.
- [5] 蒋与刚, 刘静, 庞伟. 铬的安全性与毒理学研究进展[J]. 国外医学: 地理分册, 2006, 27(3): 97-99.  
Jiang Yugang, Liu Jing, Pang Wei. Advances in the safety

- of chromium[J]. *Foreign Medical Science(Section of Medgeography)*, 2006, 27(3): 97-99 (in Chinese).
- [6] Cahill C, Newland W. Comparative efficiencies of trace metal extraction from municipal incinerator ashes [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1982, 11(3): 227-239.
- [7] Yousif S. Modeling of toxic metal emissions from solid fuel[C]//Twenty-Seventh Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, 1998, 27(2): 1647-1654.
- [8] Belevi H, Moench H. Factors determining the element behavior in municipal solid waste incinerators. 1. Field studies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(12): 2501-2506.
- [9] Marani D, Braguglia C. Behavior of Cd, Cr, Mn, Ni, Pb and Zn in sewage sludge incineration by fluidized bed furnace[J]. *Waste Management*, 2003, 23(2): 117-124.
- [10] Wang K S, Chiang K Y. The effects of FeCl<sub>3</sub> on the distribution of the heavy metals Cd, Cu, Cr, and Zn in a simulated multi metal incineration system[J]. *Environment International*, 2001, 26(4): 257-263.
- [11] Wey M Y, Ou W Y. Pollutants in incineration flue gas [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 82(3): 247-262.
- [12] Lima A, Ottosen L. Characterization of fly ash from bio and municipal waste[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(3): 277-282.
- [13] Chen J C, Wey M Y, Chiang B C, et al. The simulation of hexavalent chromium formation under various incineration conditions[J], *Chemosphere*, 1998, 36(7): 1553-1564.
- [14] Verhulst D, Buekens A. Thermodynamic behavior of metal chlorides and sulfates under the conditions of incineration furnaces[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(1): 50-56.
- [15] Søruma L, Flemming J. Frandsen. On the fate of heavy metals in municipal solid waste combustion .Part II. From furnace to filter[J]. *Fuel*, 2004, 83(11): 1703-1710.
- [16] Sørum L, Frandsen F J, Hustad J E. On the fate of heavy metals in municipal solid waste combustion Part I: devolatilisation of heavy metals on the grate[J]. *Fuel*, 2003, 82(18): 2273-2283..
- [17] Ménard Y, Asthana A. Thermodynamic study of heavy metals behavior during municipal waste incineration [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2006, 84(4): 290-296.
- [18] 李建新. 垃圾焚烧过程重金属污染物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).
- [19] Li Q H, Meng A H. Investigation of heavy metal partitioning influenced by flue gas moisture and chlorine content during waste incineration[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(5): 760-768.
- [20] Diaz-Somoano M, Martinez M. Retention of zinc compounds in solid sorbents during hot gas cleaning processes[J]. *Energy Fuels*, 2005, 19(2): 442-446.
- [21] Diaz-Somoano M, Martinez M. Retention of trace elements using fly ash in a coal gasification flue gas [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2002, 77(3): 396-402.
- [22] Diaz-Somoano M, Martinez M. High temperature removal of cadmium from a gasification flue gas using solid sorbents[J]. *Fuel*, 2005, 84(6): 717-721.
- [23] Diaz-Somoano M, Lopez-Anton M. Trace element removal from hot gasification flue gases using solid sorbents[J]. *Global NEST Journal*, 2006, 2(8): 137-145.
- [24] Krishna P, Gladis M. Preconcentrative separation of chromium(VI) species from chromium(III) by coprecipitation of its ethyl xanthate complex onto naphthalene[J]. *Talanta*, 2004, 63(3): 541-546.
- [25] Klain D, Andren A. Path way of 37 trace elements through coal-fired Power Plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 1975, 9(9): 973-979.
- [26] 王学涛, 金保升. 气氛对焚烧飞灰熔融过程中重金属行为的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(7): 47-52. Wang Xuetao, Jin Baosheng. Influence of atmospheres on behavior of heavy metals during melting process of fly ashes from municipal solid waste incinerator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(7): 47-52(in Chinese).
- [27] Frandsen F. Trace elements from combustion and gasification of coal: An equilibrium approach[J]. *Progress in Energy of Combustion and Science*, 1994, 20(2): 115-138.
- [28] Wang K S, Chiang K Y. Effects of chlorides on emissions of toxic compounds in waste incineration: Study on partitioning characteristics of heavy metal [J]. *Chemosphere*, 1999, 38(8): 1833-1849.
- [29] 李建新, 严建华. 利用流化床实验台研究生活垃圾焚烧重金属分布规律[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(17): 100-104.

- Li Jianxin, Yan Jianhua. The partitioning of heavy metals during MSW incineration on fluidized bed furnace [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 100-104(in Chinese).
- [30] 王昕晔, 黄亚继. 炉内添加剂对垃圾焚烧过程中重金属捕集影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 15-21.  
Wang Xinye, Huang Yaji. Experimental study on the capture of heavy metals by in-furnace additives during MSW incineration[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(32): 15-21(in Chinese).
- [31] Chen J C, Wey M Y. The adsorption of heavy metals by different sorbents under various incineration conditions [J]. Chemosphere, 1998, 37(13): 2617-2625.
- [32] Donald W, Chris C. Chromium behavior during thermal treatment of MSW fly ash[J]. Hazard Mater, 2002, 90(1): 39-49.
- [33] Hu H Y, Luo G Q. Fate of chromium during thermal treatment of municipal solid waste incineration(MSWI) fly ash[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2795-2801.
- [34] Barros A M. Chloride influence on the incorporation of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and NiO in clinker: a laboratory evaluation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 93(2): 221-232.
- [35] Chiang K Y, Wang K S. Chloride effects on the speciation and partitioning of heavy metal during the municipal solid waste incineration process[J]. Science of the Total Environment, 1997, 203(2): 129-140.



吴沛东

收稿日期: 2013-10-10。

作者简介:

吴沛东(1990), 男, 工学硕士, 从事垃圾焚烧中重金属释放与控制方面研究, wupeidong1990@163.com;

张军营(1963), 男, 教授, 博士生导师, 从事温室气体排放控制、燃烧污染物的排放与控制、煤洁净转化、锅炉灰沉积和腐蚀机理方面的研究。

(责任编辑 王庆霞)