

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0476

赵英孜, 蒋友胜, 张建清, 等. 2015. 深圳市废弃物焚烧炉飞灰中二噁英含量水平和特征分析[J]. 环境科学学报, 35(9): 2739-2744

Zhao Y Z, Jiang Y S, Zhang J Q, et al. 2015. Levels and characteristic analysis of dioxins in fly ash from waste incinerators of Shenzhen [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(9): 2739-2744

深圳市废弃物焚烧炉飞灰中二噁英含量水平和特征分析

赵英孜^{1,3}, 蒋友胜¹, 张建清^{1,*}, 刘德全², 周志华², 周健¹, 林晓仕¹, 李顺巨³, 陈思杨³

1. 深圳市疾病预防控制中心, 深圳 518055

2. 深圳市环境监测中心站, 深圳 518049

3. 深圳市能源环保有限公司, 深圳 518052

收稿日期: 2015-03-03

修回日期: 2015-05-07

录用日期: 2015-05-21

摘要: 采用同位素稀释的高分辨气相色谱/高分辨磁式质谱联用仪 (HRGC/HRMS) 对深圳市 8 所垃圾焚烧炉飞灰中二噁英进行准确定量检测, 分析比较不同炉型、不同种类废弃物焚烧炉飞灰中的二噁英浓度水平和分布情况。结果发现 8 所废弃物焚烧炉飞灰中二噁英浓度差异较大, 5 所往复炉排生活垃圾焚烧炉样品中二噁英的质量浓度和 TEQ 浓度平均值都小于热解型医疗垃圾焚烧炉。两所不同的工业危险废物焚烧炉中, 以烧废物矿油的立式筒焚烧炉的二噁英含量远大于以焚烧电路板为主的回转窑焚烧炉。不同焚烧炉飞灰中二噁英异构体的浓度分布具有相类似的特征, 高氯代二噁英的含量明显高于低氯代二噁英同系物。不同的 PCDD/Fs 单体对 I-TEQ 的贡献率在不同的焚烧设备中十分相似, 2,3,4,7,8-PeCDF、1,2,3,7,8-PeCDD、2,3,4,6,7,8-HxCDF 3 种单体是 TEQ 浓度的主要贡献单体。在布袋除尘器前喷淋活性炭能有效吸附烟气中二噁英, 将其转移到飞灰中。本研究是首次针对深圳市运行中的废弃物焚烧炉进行飞灰中二噁英排放分析, 为二噁英排放监控提供重要的基础数据。

关键词: 二噁英; 飞灰; 焚烧炉; 活性炭

文章编号: 0253-2468(2015)09-2739-06

中图分类号: X511

文献标识码: A

Levels and characteristic analysis of dioxins in fly ash from waste incinerators of Shenzhen

ZHAO Yingzi^{1,3}, JIANG Yousheng¹, ZHANG Jianqing^{1,*}, LIU Dequan², ZHOU Zhihua², ZHOU Jian¹, LIN Xiaoshi¹, LI Shunju³, CHEN Siyang³

1. Shenzhen Center for Disease and Prevention, Shenzhen 518055

2. Shenzhen Environmental Monitoring Center, Shenzhen 518049

3. Shenzhen Energy Environment Engineering Company Limited, Shenzhen 518052

Received 3 March 2015;

received in revised form 7 May 2015;

accepted 21 May 2015

Abstract: Levels of PCDD/Fs in fly ash from eight incinerators in Shenzhen were accurately quantitative and qualitative analyzed using isotope dilution high resolution gas chromatograph/high resolution double-focusing magnetic mass spectrometry (HRGC/HRMS), and concentration and distribution of PCDD/Fs in fly ash from different furnaces and different types of waste were further compared. The results showed that concentrations of PCDD/Fs in fly ash varied largely. Both of the average mass concentration and TEQ concentration of PCDD/Fs in five reciprocating gate municipal wastes incinerators were less than those in pyrolysis medical incinerator. In the two hazardous waste incinerators, the PCDD/Fs levels of vertical drum hazardous waste incinerator were greater than those of rotary kiln hazardous waste incinerator. The distributions of PCDD/Fs homologues in fly ash from these eight incinerators were

基金项目: 深圳市环境中 POPs 的监测研究, 深圳市大气细颗粒物持久性有机污染物的污染特征及人群暴露风险研究 (No. JCYJ20120616154147373)

Supported by the POPs Monitoring Research in the Environment of Shenzhen and the Levels and Characteristics of POPs and Population Exposure Risk Assessment in Atmospheric Fine Particulate Matter in Shenzhen (No. JCYJ20120616154147373)

作者简介: 赵英孜 (1991—), 女, E-mail: 2906281673@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: 969676617@qq.com

Biography: ZHAO Yingzi (1991—), female, E-mail: 2906281673@qq.com; * Corresponding author, E-mail: 969676617@qq.com

similar and the concentrations of higher-chlorinated PCDD/Fs homologues were remarkably higher than those of lower-chlorinated homologues. Moreover, the contribution rate of PCDD/Fs homologues to TEQ was quite similar in different incinerators, and 2,3,4,7,8-PeCDF, 1,2,3,7,8-PeCDD and 2,3,4,6,7,8-HxCDF were the three predominant contributors to the total concentration of TEQ. Spraying activated carbon in front of the bag-type dust collector could effectively adsorb PCDD/Fs in flue gas and transfer them to fly ash. This study was the first to reveal the dioxins emissions from running waste incinerators in Shenzhen and provided important data for the monitoring of dioxin emissions.

Keywords: PCDD/Fs; fly ash; incinerator; activated carbon

1 引言 (Introduction)

二噁英是指由一个或二个氧原子连接二个被氯原子取代的苯环而构成的芳香族有机化合物的总称,包含多氯代二苯并二噁英(PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(PCDFs)两大类同系物(孙敬龙, 2011),是首批被列入《斯德哥尔摩公约》的12种物质之一,具有生物蓄积性、高毒性、难降解等特点.自1977年在荷兰阿姆斯特丹城市生活垃圾焚烧炉排放的飞灰和烟道气中检出二噁英后(Olie *et al.*, 1977),普遍认为废物焚烧是环境中二噁英的一个主要来源,其中生活垃圾、医疗垃圾和工业危险废弃物是3种最常见的垃圾焚烧来源.废物焚烧产生的二噁英主要分布在飞灰、炉渣、尾气中,由于飞灰中含有较多未燃烧完全的炭,同时含有促使二噁英生成的氯元素和多种具有催化性质的金属元素,因而能吸附绝大部分的二噁英.研究表明,飞灰中的二噁英含量占垃圾焚烧排放总量的50%~90%(郭辉东, 2011).

深圳市目前已建成投入运营的焚烧发电厂有7座,垃圾焚烧处理能力 $7875 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,焚烧处理率51%,发电装机总容量145 MW,发电量约11.6亿 $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$,总规模国内最大.飞灰作为垃圾焚烧排

放的重要危险固废,对其二噁英含量的监控是不容忽视的.而截至目前尚未有针对深圳市焚烧炉内飞灰中二噁英污染水平开展过调查报道,本文采集了深圳市8所废弃物焚烧厂(其中包括5所生活垃圾,两所危险工业废物焚烧厂,一所医疗废物焚烧厂),进一步采用同位素稀释的高分辨气相色谱/高分辨双聚焦磁式质谱联用仪(HRGC-HRMS)二噁英超痕量检测技术方法,对样品进行二噁英准确度和定量分析,首次揭示深圳市废弃物焚烧过程中飞灰中二噁英的浓度水平和及其单体分布特征,为废弃物焚烧无害化和飞灰的安全合理利用提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 样品采集

对深圳市的8所焚烧厂进行飞灰样品的采集,焚烧炉的主要运行和设计参数如表1所示.取样期间焚烧厂已稳定运行,其中A、B、C、D、E为生活垃圾焚烧厂,F和G为危险工业废物焚烧厂,H为医疗垃圾焚烧厂.C焚烧厂共采集3个样品(其活性炭投加量不同),A、B、F、G、H焚烧厂各采集两个样品(分天采样),D、E焚烧厂各采集1个样品,共计15个样品.样品采自布袋除尘器后的刮板输送机,采集后放置于通风干燥处,避免吸湿和碳化.

表1 采集样品的垃圾焚烧炉主要参数
Table 1 Parameters of the sampling incinerators

焚烧炉编号	焚烧物种类	焚烧炉炉型	单炉规模/($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)	烟气处理设备
A	生活垃圾	往复炉排	225	半干式反应塔+活性炭吸附+袋式除尘器
B	生活垃圾	往复炉排	355	半干式反应塔+活性炭吸附+袋式除尘器
C	生活垃圾	往复炉排	372	半干式反应塔+活性炭吸附+袋式除尘器
D	生活垃圾	往复炉排	240	半干式反应塔+活性炭吸附+袋式除尘器
E	生活垃圾	往复炉排	225	半干式反应塔+活性炭吸附+袋式除尘器
F	危险工业废物 (以废物矿油为主)	立式圆筒	24	袋式除尘器
G	危险工业废物 (以电路板为主)	回转窑	30	半干式急冷塔+活性炭吸附+袋式除尘器
H	医疗垃圾	热解炉	13.32	半干式反应塔+活性炭吸附+袋式除尘器

2.2 样品前处理

2.2.1 样品提取 称取 0.1~0.3 g 飞灰,滴加浓度为 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸进行处理.滤纸过滤盐酸处理液并用去离子水转移完全.将残留灰渣的滤纸放进预先加有 ^{13}C 标记的 PCDD/Fs 内标的纸套筒中,用甲苯溶剂连续索氏提取 24 h;滤液用二氯甲烷萃取 3 遍,与索氏提取液混合后用旋转蒸发浓缩仪浓缩至 1 mL 左右,放置通风处干燥 24 h 待用.

2.2.2 样品净化 加入 150 mL 正己烷于浓缩液中,超声溶解后加入 30% 酸性硅胶至溶液澄清,70 °C 水浴振荡 1 h 后过滤,滤液浓缩至微干.经自动纯化仪过活性炭柱,再经手工酸性硅胶柱及氧化铝柱净化(手工柱:取玻璃滴管,底部填充玻璃棉后,从下至上依次装入 0.5 cm 无水硫酸钠、10 cm 30% 酸性硅胶或活化氧化铝、0.5 cm 无水硫酸钠,干法装柱,轻敲色谱柱,使吸附剂分布均匀),净化液用高纯氮气吹扫,溶剂转换为壬烷,加入 PCDD/Fs 进样内标,用于仪器分析.

2.3 仪器分析

参考国际上通用 EPA1613 方法,采用同位素内标稀释技术进行高分辨气相色谱/双聚焦磁式质谱仪检测分析,对样品中 PCDD/Fs 的 17 种单体同系物进行定性和定量分析.

气相色谱条件色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱,进样口温度:280 °C,不分流进样,程序升温;EI 离子源,温度 260 °C,以选择性多离子监测(MID)模式同时监测目标化合物及其同位素内标化合物离子,仪器分辨率高于 10000.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 深圳市垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的浓度水平分析

如表 2 所示,8 所废弃物焚烧炉样品浓度差异较大,同一焚烧炉、不同时间采集的样品之间也有浓度差异.原因在于燃烧物料、焚烧工况与烟气净化工况的变动等多种因素都会影响二噁英的生成(严建华等,2004).

表 2 飞灰样品的质量浓度和 TEQ 浓度

Table 2 Sampling mass concentration and TEQ concentration of fly ash

焚烧炉型号	样品编号	质量浓度/ ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	质量浓度均值/ ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	TEQ 浓度/ ($\text{ng}(\text{I-TEQ})\cdot\text{g}^{-1}$)	TEQ 浓度均值/ ($\text{ng}(\text{I-TEQ})\cdot\text{g}^{-1}$)	
往复炉排生活垃圾	A	A1	18.27	42.93	0.67	1.22
		A2	67.58		1.76	
	B	B1	120.63	81.14	7.68	5.26
		B2	41.64		2.83	
	C	C1	28.63	17.74	1.05	0.70
		C2	15.65		0.62	
		C3	8.93		0.44	
	D	D1	162.98	162.98	2.57	2.57
	E	E1	2.62	2.62	0.25	0.25
	立式圆筒危险废物	F	F1	590.38	362.49	32.79
F2			134.60	7.76		
回转窑危险废物	G	G1	18.87	17.63	1.03	0.82
		G2	16.39		0.61	
热解炉医疗垃圾	H	H1	236.74	359.58	2.54	6.21
		H2	482.42		9.87	

对 8 所废弃物焚烧炉的二噁英质量浓度和 TEQ 浓度进行比较, A~E 5 所往复炉排生活垃圾焚烧炉的质量浓度和 TEQ 浓度均值都小于热解型医疗垃圾焚烧炉 H,这与邹川对于生活垃圾与医疗垃圾焚烧炉产生飞灰中二噁英含量比较研究结果一致(邹川,2012).这可能与垃圾组成、燃烧工况有关,医疗

垃圾主要由含氯的塑料制品组成,在燃烧不充分的情况下,会产生大量不完全燃烧产物,而这些都是二噁英生成的前驱物,在合适的温度范围及飞灰中重金属的催化条件下,就会生成二噁英.

两种工业危险废物焚烧炉的比较中,立式筒焚烧炉 F 处理是以废物矿油为主的危险工业废物,回

转窑焚烧炉 G 处理以电路板为主的工业危险废物。由表 2 可知焚烧炉 F 中飞灰的二噁英含量远高于焚烧炉 G, 分析原因主要有以下三点: 一是焚烧炉 F 的烟气处理仅使用了布袋除尘器系统, 而焚烧炉 G 采用了半干式急冷塔+活性炭喷入+布袋除尘器烟气处理工艺, 二噁英合成的最合适温度是烟气、灰烬冷却后的低温区, 占总生成量 90% 以上 (Cheng and Hu, 2010), G 中半干式急冷塔能将烟气温度迅速冷却至 200 °C 以下, 越过了二噁英易再次合成的温度区, 从而降低了其二噁英的含量; 二是回转窑焚烧炉在旋转过程中, 固体在窑内挑动及抛掷程度加大, 增加了固体和氧气的接触面积, 更有利于废物的焚烧; 三是焚烧原料的不同, 废物矿油中含有烷烃、多环芳烃、苯系物、酚类, 这些碳氢化合物与氯源在催化剂的作用下能形成 PCDD/Fs 前驱物(氯代芳香族化合物), 进一步生成 PCDD/Fs。

国家环境保护部于 2008 年修订的《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889—2008) 中规定生活垃圾焚烧飞灰和医疗废物焚烧残渣(包括飞灰、底渣) 填埋时, 二噁英含量必须低于 $3 \mu\text{g} (\text{I-TEQ}) \cdot \text{kg}^{-1}$ (即 $3 \text{ ng} (\text{I-TEQ}) \cdot \text{g}^{-1}$), 而在 15 个采集飞灰样品中, 来自于生活垃圾焚烧炉 B、危险废物焚烧炉 F、医疗垃圾焚烧炉 H 中有部分样品的二噁英含量超过限值, 因此要尤其注意对飞灰进行稳定化处理,

防止飞灰运输过程中产生扬尘, 致使二噁英扩散至大气中。

3.2 垃圾焚烧炉飞灰中 PCDD/Fs 单体分布特征分析

如图 1 所示, 比较各焚烧炉飞灰中 17 种单体的质量浓度分布, PCDD/Fs 中六至八高氯代同系物的浓度均高于四至五低氯代同系物, 这是因为在焚烧炉烟气降温过程中, 二噁英的再合成区域更有利于高氯代单体二噁英同系物的形成; 此外, 高氯代同系物挥发性较低, 更容易凝结在飞灰中。

往复炉排生活垃圾焚烧炉与回转窑危险废物焚烧炉 G 中, 单体质量浓度分布趋势大体相同, PCDDs 的高氯代远高于其低氯代, 而 PCDFs 的高氯代与低氯代相差不大, 其中 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDD、OCDD 为两种焚烧炉的主要质量浓度贡献单体。往复炉排生活垃圾焚烧炉 A~E 中 OCDD (46.81%)、1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDD (21.56%) 为主要贡献单体; 回转窑危废焚烧炉 G 中, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDD (33.55%)、OCDD (30.13%); 立式筒危废焚烧炉 F 中, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDF (24.43%)、OCDF (25.67%) 为质量浓度主要贡献单体; 热解型医疗垃圾焚烧炉 H 中, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDF (22.20%)、OCDF (26.83%)、OCDD (32.38%) 为主要贡献单体。

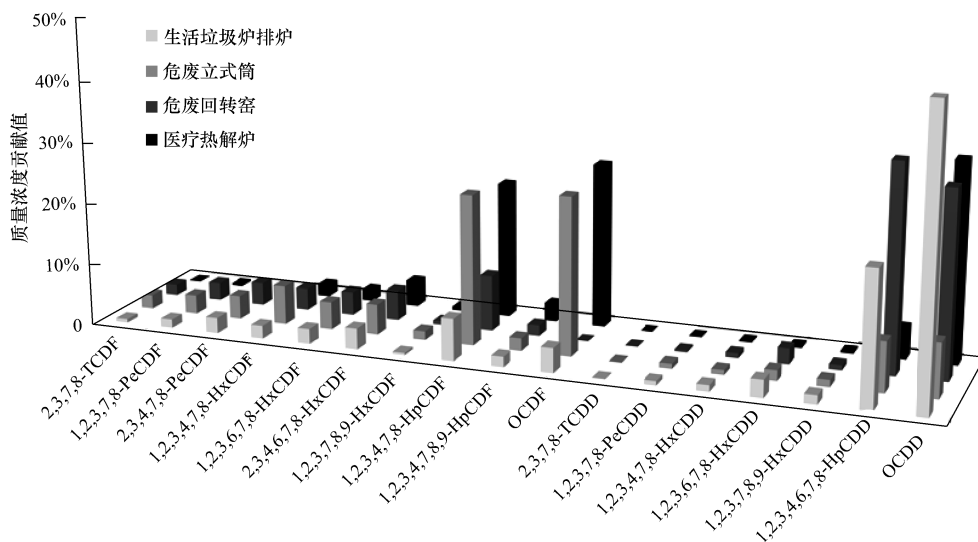


图 1 四种炉型中二噁英单体质量浓度分布

Fig.1 Profile of monomer mass concentration for PCDD/Fs in four kinds of furnace type

如图 2 所示, 比较各焚烧炉飞灰中 17 种单体的 TEQ 浓度分布, 发现不同的 PCDD/Fs 单体对 I-TEQ 的贡献率在不同的垃圾焚烧设备中十分相似,

2,3,4,7,8-PeCDF、1,2,3,7,8-PeCDD、2,3,4,6,7,8-HxCDF 是其 TEQ 浓度的主要贡献单体。其原因在于不同单体对 I-TEQ 的贡献率不仅与单体的质量浓

度有关而且与其 I-TEF 值有关。17 种单体中, 2, 3, 7, 8-TCDD、2, 3, 4, 7, 8-PeCDF、1, 2, 3, 7, 8-PeCDD 的 I-TEF 值较高, 分别为 1、0.5、0.5。因此, 焚烧炉中 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF、1, 2, 3, 7, 8-PeCDD 两种单体对 TEQ 浓度贡献率较大; 2, 3, 7, 8-TCDD 单体的质量浓度太低, 因而对 TEQ 浓度贡献率仅为 0.33% ~ 2.11%。

5 个往复炉排生活垃圾焚烧炉中, 以 2, 3, 4, 7,

8-PeCDF (33.23%)、1, 2, 3, 7, 8-PeCDD (16.81%) 为主要贡献单体; 立式筒危险废物焚烧炉 F 中, 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF (34.43%)、1, 2, 3, 7, 8-PeCDD (14.22%) 为主要贡献单体; 回转窑危险废物焚烧炉 G 中, 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF (39.56%)、2, 3, 4, 6, 7, 8-HxCDF (10.57%) 为主要贡献单体; 热解型焚烧炉 H 中, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HxCDF (24.17%)、2, 3, 4, 7, 8-PeCDF (22.40%) 为主要贡献单体。

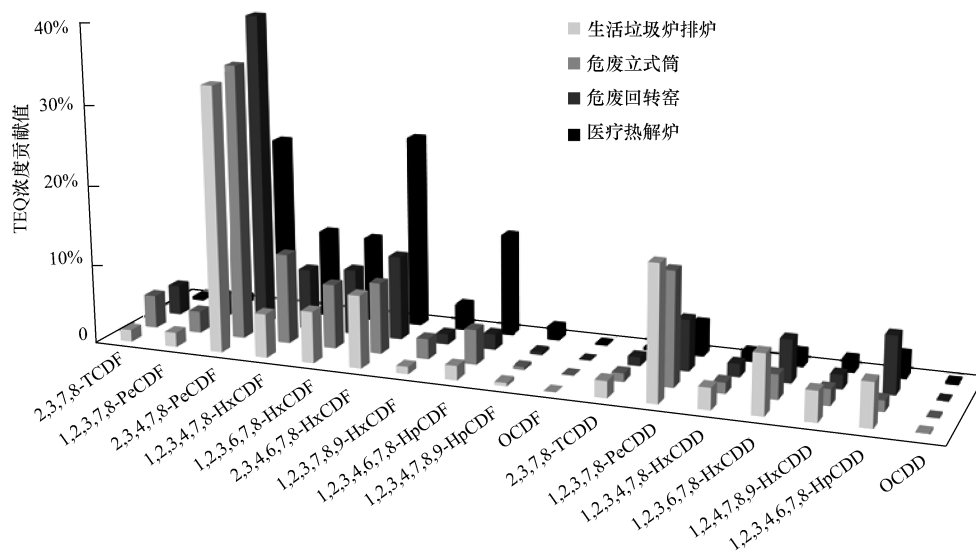


图 2 4 种炉型中二噁英单体 TEQ 浓度分布

Fig.2 Profile of monomer TEQ concentration for PCDD/Fs in four kinds of furnace type

陈彤等对飞灰中二噁英的分布研究发现, 当 PCDDs/PCDFs 比值小于 1, 说明在垃圾焚烧过程中飞灰中二噁英主要通过 denovo 从头合成反应途径生成; PCDDs/PCDFs 比值大于 1, 则说明二噁英主要通过前驱体反应途径生成(陈彤, 2006)。如表 3 所示, 本文研究的 8 种废物焚烧炉中 PCDDs/PCDFs 比值范围为 0.3~7.0。往复炉排生活垃圾焚烧炉 A~E (PCDDs/PCDFs = 1.2~7.0) 和回转窑危废炉 (PCDDs/PCDFs = 2.1) 中的 PCDDs/PCDFs 均大于 1, 即以 PCDDs 为主, PCDD/Fs 主要通过前驱体反

应途径生成。陈彤、黄文等(陈彤, 2003; 黄文等, 2012)对往复炉排生活垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的分布研究, 也发现往复炉排生活垃圾中 PCDDs/PCDFs 比值大于 1, 与本文研究结果一致。而立式筒危废炉 F 和热解医疗炉 H 中以 PCDFs 为主, 即 PCDD/Fs 主要通过 denovo 从头合成反应途径生成。高洪才等对不同垃圾焚烧设备中二噁英排放特征研究发现医疗垃圾中 PCDFs 的含量要高于 PCDDs (高洪才等, 2009)。

表 3 飞灰样品中 PCDDs/PCDFs 质量浓度比值

Table 3 Mass concentration ratio of PCDDs/PCDFs in fly ash samples

焚烧炉编号	A	B	C	D	E	F	G	H
PCDDs/PCDFs	7.0	1.8	1.8	3.8	1.2	0.3	2.1	0.7

3.3 活性炭投加对飞灰中二噁英浓度的影响

除 F 炉以外, 本文研究的焚烧炉采用的烟气处理系统是目前国内最普遍应用的活性炭喷入系统+袋式除尘器的组合工艺, 而 F 焚烧炉则采用简单的

布袋除尘器。活性炭喷入系统+袋式除尘器的组合工艺, 脱除二噁英的方法为在布袋除尘器前喷入活性炭粉末, 吸附二噁英后的活性炭粉末和飞灰一起被布袋除尘器捕获。

对生活垃圾往复炉排焚烧炉 C 进行活性炭投加试验(试验期间不改变其它焚烧工况),活性炭投加量分别为 $6 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $11 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $16 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。图 3 为不同活性炭投加量时,烟道气和飞灰中 PCDD/Fs 质量浓度分布,随着活性炭投量的增加,烟道气中 PCDD/Fs 质量浓度降低,其原因可能在于,烟气处理系统中,投入活性炭粉末量越多,对二噁英的去除效率越高,随着活性炭投量逐渐增加,烟道气中 PCDD/Fs 含量降低。飞灰中 PCDD/Fs 质量浓度先增加后降低,吸附烟气中 PCDD/Fs 的活性炭粉末被布袋除尘器收集进入飞灰中,或者一定量活性炭的注入可能会改变飞灰的基本特征,也可能会增加二噁英类的再生(姬亚,2012),导致活性炭投量在 $6 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 到 $11 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 时飞灰中 PCDD/Fs 含量增加,这与金宜英等对布袋除尘器中添加活性炭研究结果相同(金宜英等,2003),随着活性炭投加由 $11 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加到 $16 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,活性炭吸附烟气中 PCDD/Fs 逐步趋于饱和,使得进入飞灰中的活性炭未完全利用,飞灰中单位 PCDD/Fs 浓度反而降低。

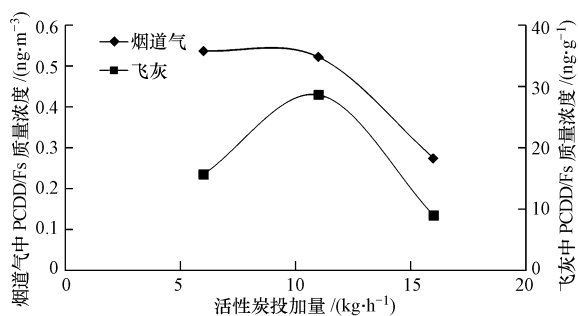


图 3 不同活性炭投量下烟道气与飞灰中 PCDD/Fs 质量浓度
Fig.3 Mass concentration of PCDD/Fs under different activated carbon dosage in flue gas and fly ash

4 结论 (Conclusions)

1) 8 所废弃物焚烧炉飞灰中二噁英浓度差异较大,比较发现 5 所往复炉排生活垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的质量浓度和 TEQ 浓度均值都小于热解型医疗垃圾焚烧炉。2 所不同的工业危险废物焚烧炉中,以烧废物矿油的立式筒焚烧炉的二噁英含量远大于以焚烧电路板为主的回转窑焚烧炉。

2) 比较分析八所废弃物焚烧炉飞灰中 PCDD/Fs 的 17 种单体分布,以质量浓度计,飞灰中二噁英的六至八高氯代同系物含量远高于四至五低氯代

同系物。5 所往复炉排生活垃圾焚烧炉和回转窑危险废物焚烧炉中 PCDD/Fs 分布以 PCDDs 为主,PCDD/Fs 主要通过前驱体反应生成;立式筒危险废物焚烧炉和热解医疗垃圾焚烧炉中以 PCDFs 为主,PCDD/Fs 主要通过 denovo 从头合成反应途径生成。以 TEQ 浓度计,不同的 PCDD/Fs 单体对 I-TEQ 的贡献率在不同的垃圾焚烧设备中十分相似,2,3,4,7,8-PeCDF、1,2,3,7,8-PeCDD、2,3,4,6,7,8-HxCDF 3 种单体是飞灰中 TEQ 浓度的主要贡献单体。

3) 在布袋除尘器前喷淋活性炭能有效吸附烟气中二噁英,进而将其转移到飞灰中。随着活性炭投量的增加,烟气中二噁英含量降低,飞灰中含量先增后降,说明在活性炭投量过量时,未能有效吸附二噁英的活性炭增多,导致飞灰中二噁英含量不增反降。

参考文献 (References):

- 陈彤. 2003. 垃圾焚烧过程飞灰中二噁英的分布特性及控制技术初步研究[D]. 杭州: 浙江大学
- 陈彤. 2006. 城市生活垃圾焚烧过程中二噁英的形成机理及控制技术[D]. 杭州: 浙江大学
- Cheng H, Hu Y N. 2010. Curbing dioxin emissions from municipal solid waste incineration in China: Re-thinking about management policies and practices [J]. *Environment Pollution*, 9(158): 2809-2814
- 高洪才, 倪余文, 张海军, 等. 2009. 不同垃圾焚烧设备中二噁英的排放特征和 I-TEQ 指示物的研究[J]. *环境科学*, 30(5): 1545-1550
- 郭辉东. 2011. 垃圾焚烧飞灰中二噁英削减技术研究[J]. *环境科学与技术*, 34(12H): 152-154
- 黄文. 2012. 两种典型生活垃圾焚烧炉二噁英的排放特征[C]. 持久性有机物论坛(2012)暨第七届持久性有机污染物全国学术研究会论文集. 141-143
- 姬亚. 2012. 活性炭联合布袋脱除烟气中二噁英的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学
- 金宜英, 田洪海, 聂永丰, 等. 2003. 3 个城市生活垃圾焚烧炉飞灰中二噁英类分析[J]. *环境科学*, 24(3): 21-25
- Olie K, Vermeulen P L, Hutzinger O. 1977. Chlorodibenzo-p-dioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the Netherlands[J]. *Chemosphere*, 6(8): 445-459
- 孙敬龙. 2011. 城市生活垃圾焚烧过程中二噁英合成机理及其拟制方法实验研究[D]. 天津: 天津大学
- 严建华, 陆胜勇, 李晓东, 等. 2004. 流化床垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的分布[J]. *工程热物理学报*, 25(1): 155-158
- 邹川. 2012. 典型行业 PCDD/Fs 排放特征及其控制研究[D]. 广州: 华南理工大学