

污泥掺烧生物质的重金属排放特性研究

贾红娟^{1,2},任强强¹,王 昕^{1,2},那永洁¹

(1. 中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对城市污泥焚烧面临的重金属污染严重等问题,提出了在城市污泥中掺烧生物质解决重金属污染的新方法,并利用5 kW 鼓泡流化床进行试验研究,考查城市污泥掺烧生物质过程中重金属的含量和形态分布特性及燃烧飞灰中重金属的浸出毒性。结果表明:城市污泥掺烧生物质使Cd和As的挥发性降低,Pb、Cu和Cr的挥发性增加,对Hg的挥发性影响很小;城市污泥掺烧麦秆对Zn的挥发性影响不大,掺烧棉秆使Zn的挥发性降低;城市污泥掺烧生物质都使飞灰中Pb、As的形态稳定性降低,使Zn的形态稳定性增加,对Cu、Cr的形态稳定性影响较小;污泥掺烧不同生物质对飞灰中重金属浸出量和浸出率的影响不同,棉秆与麦秆相比更有利于降低飞灰中重金属的浸出量和浸出毒性。

关键词:城市污泥;生物质;重金属;形态特性;浸出性

中图分类号:TQ534.9 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)02-0108-06

Characteristics of heavy metals emission during co-combustion of municipal sewage sludge and biomass

JIA Hongjuan^{1,2}, REN Qiangqiang¹, WANG Xin^{1,2}, NA Yongjie¹

(1. Institute of Engineering Thermal Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Co-combustion of municipal sewage sludge (MSS) and biomass was proposed to solve heavy metal pollution problem. Experiments were conducted in a 5 kW fluidized bed combustor to investigate heavy metal characteristics containing contents distribution, speciation distribution and leachability. The results showed that the volatility of Cd and As decreased, the volatility of Pb, Cu and Cr increased, and the volatility of Hg had little change during co-combustion of MSS and biomass. For Zn, co-combustion of MSS and cotton straw reduced the volatility and co-combustion of MSS and wheat straw had little effect on the volatility. Co-combustion of MSS and biomass had different influence on the stability of different heavy metals in fly ash. Pb and As decreased, Zn increased, Cu and Cr had little change. Co-combustion of MSS and biomass also had different influence on the leachability of different heavy metals in fly ash. Compared with wheat straw and cotton straw, co-combustion of MSS and cotton straw was more advantageous to reduce the amount of leaching and toxicity of heavy metals in fly ash.

Key words: municipal sewage sludge; biomass; heavy metal; speciation; leachability

0 引 言

随着城市污水处理设施的增多及处理率的提高,目前我国每年产生的污泥数量十分巨大,如何安全经济地处理污泥已成为世界各国面临的环境问题^[1]。流化床污泥焚烧技术具有减容、减量和资源

化等显著优势,已成为污泥资源化利用的重要方式和研究热点^[2-4]。污泥焚烧飞灰中磷含量较高,已成为磷来源的一种渠道,将为日趋紧张的磷资源提供重要保障^[5-7]。

目前污泥焚烧面临的主要问题是重金属污染,污泥中的重金属元素 Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、As、Hg 等

收稿日期:2015-11-17;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.02.022

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51476169)

作者简介:贾红娟(1990—),女,山西运城人,硕士研究生,从事循环流化床锅炉方面的科研工作。E-mail:jhsibby@163.com

引用格式:贾红娟,任强强,王 昕,等.污泥掺烧生物质的重金属排放特性研究[J].洁净煤技术,2016,22(2):108-113.

JIA Hongjuan, REN Qiangqiang, WANG Xin, et al. Characteristics of heavy metals emission during co-combustion of municipal sewage sludge and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 108-113.

在焚烧过程中会以不同形式存在于烟气、飞灰和底渣中。Adam 等^[8-9]发现城市污泥焚烧飞灰中富集重金属,会使飞灰中磷的生物有效性降低,重金属成为飞灰磷回收及土壤利用的主要障碍。飞灰中重金属的毒性不仅取决于重金属的含量,还取决于重金属的存在形态。许多研究者就如何降低污泥焚烧飞灰中重金属的毒性展开了研究。刘敬勇等^[10]研究发现 CaO、Al₂O₃、粉煤灰和高岭土等有利于污泥焚烧过程中重金属固定并且残留在底渣中,不同固体吸附剂对不同重金属迁移的抑制效果有很大差异。Yao 等^[11-13]研究发现添加硅酸盐、铝基及钙基等吸附剂会与铅和铬等重金属发生化学反应,可以控制污泥焚烧过程中重金属的排放,吸附剂对重金属的捕捉能力取决于吸附剂的化学成分和比表面积。Scotto 等^[14]在热重反应器上发现石灰石、高岭土和黏土等不同吸附剂对镉和铅的吸附能力不同。Vogel 等^[15-16]研究发现将氯基添加剂与污泥焚烧飞灰在 800~1 000 °C 进行混合燃烧处理,可以明显降低飞灰中重金属的浸出毒性,提高飞灰中磷的生物有效性。污泥焚烧过程中添加固体吸附剂对重金属稳定化有较好的作用,但由于不同固体吸附剂对不

同重金属的吸附能力不同,因此添加固体吸附剂较难实现多种重金属的协同稳定化。向污泥焚烧飞灰中添加氯基添加剂对降低飞灰中重金属的毒性具有较好作用,但没有实现在污泥焚烧过程中对重金属的脱除,增加了能耗,同时引发了二次污泥。生物质富含 Si、Ca、Mg、Al 等多种矿物质成分和 Cl 元素,可以同时实现固体吸附剂和氯基添加剂的作用。然而国内外关于利用生物质解决焚烧污泥的重金属问题的研究鲜有报道。笔者通过在焚烧污泥中掺烧生物质,研究了污泥单独燃烧和添加 2 种不同生物质后燃烧时重金属的分布特性,分析了焚烧飞灰中重金属的浸出毒性,可为污泥清洁燃烧技术的发展提供参考。

1 原料特性

实验用污泥为北京市清河城市污水处理厂的干化污泥颗粒,粒径为 0~4 mm,50% 的切割粒径 d_{50} 为 1.6 mm。实验用生物质为产自河北省的麦秆和棉秆,2 种生物质均已制成直径 8 mm、长 5~10 mm 的圆柱型成型燃料。3 种燃料的工业分析和元素分析结果见表 1。

表 1 燃料的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of fuels

原料	工业分析/%			元素分析/%					热值/ (MJ·kg ⁻¹)
	A_d	FC_d	V_d	$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(O_d)$	$w(N_d)$	$w(S_d)$	
污泥	33.39	9.69	56.92	34.85	4.92	19.92	5.99	0.93	13.67
麦秆	6.97	19.73	73.30	45.10	5.60	41.56	0.57	0.20	16.46
棉秆	11.79	20.02	68.19	43.22	5.13	38.79	0.92	0.15	16.02

污泥中 Cu、Zn 采用电感耦合等离子光谱分析仪(ICP)测定,As、Hg 采用原子荧光光谱仪(AFS)测定,Cr、Cd、Pb 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。表 2 为污泥中以上 7 种重金属元素含量检测结果。麦秆和棉秆的重金属含量很低,因此忽略。

表 2 污泥中重金属含量

Table 2 Heavy metal contents in sewage sludgemg

mg/kg						
Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	As	Hg
1.17	25.30	169.00	805.00	70.00	8.40	4.65

实验所用床料为石英砂,粒径为 0.25~

0.355 mm,成分见表 3。石英砂的重金属含量极低,忽略不计。

表 3 石英砂成分分析

Table 3 Composition analysis of quartz sand %

SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
96.330	0.067	0.084	1.550	0.068	1.850	0.011	0.024

注:表中数值为摩尔分数。

2 实验装置和方法

2.1 实验装置

实验在 5 kW 鼓泡流化床上进行,实验装置如图 1 所示^[17]。炉膛内径 100 mm、高 1 750 mm,炉膛包裹在电加热炉中,电炉分为上、中、下三段控温。

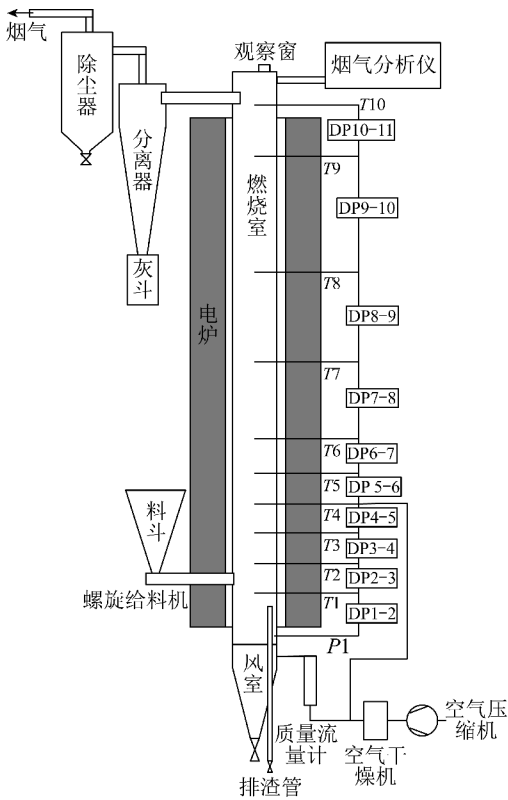


图1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

实验所用流化风全部由空气压缩机提供。压缩空气经干燥后从炉膛底部进入炉膛,采用质量流量计对流化风量进行调节和控制。

在炉膛布风管垂直高度180、280、380、480、580、680、880、1 130、1 380和1 680 mm处分别布置了10个温度测点(T1~T10)和10个压力测点(DP1-2~DP10-11),对炉膛的不同位置进行温

$$\text{归一化分布} = \frac{\text{底渣、飞灰和烟气中任一重金属质量}}{\text{底渣、飞灰和烟气中所测量到的重金属元素质量总和}} \quad (1)$$

为了解污泥掺烧生物质对飞灰中重金属形态分布的影响,采用改进的BCR三步连续提取法^[19]对飞灰样品进行分步提取,该提取方法将飞灰中的重金属分为4种形态:酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态。

为了解焚烧飞灰中重金属的浸出毒性,采用EPA制定的重金属浸出方法 Toxicity Characteristic of Leaching Procedure (TCLP) 对飞灰样品中重金属的浸出量进行分析。为更加清楚了解重金属浸出的比例,定义浸出率为元素在浸出液中的含量除以元素在相应飞灰中的含量^[20]。

度和压差测量。

用螺旋给料机将燃料从炉膛密相区给入,给料口位于距离布风管垂直高度230 mm处,通过调节螺旋给料机转速调整给料量。为保证给料顺畅,生物质破碎成粒径 ≤ 5 mm,污泥不破碎。生物质与污泥分别在105℃烘箱中烘干,然后以一定质量比掺混再进行给料。

流化风量、给料机转动频率、炉膛温度和压差测量数据均由安捷伦(34970A)数据采集器采集保存,并在实验过程中对采集数据在线显示。在炉膛顶部烟气出口位置设有烟气取样口,利用傅立叶红外烟气分析仪(FTIR DX4000)和KM9106烟气分析仪对烟气成分进行在线分析。

2.2 实验方法

利用电炉对炉膛加热,床层温度(380 mm处温度)达到600℃时开始加入燃料。待床层温度达到设定值,稳定运行后进入工况。实验过程中通过灰斗对飞灰进行收集取样,除尘器中飞灰含量很少,可以忽略。实验结束后打开风室,排出底渣,对底渣取样。实验中保持流化风速为0.48 m/s,过量空气系数为1.3~1.4。

为便于分析燃料焚烧过程中重金属的分布特性,采用归一化分布表征重金属在3个排放渠道的分布(底渣、飞灰和除尘器后烟气),见式(1)^[18]。底渣和飞灰中重金属含量的检测方法与污泥中重金属的检测方法相同。假设重金属的回收率为100%,则烟气中重金属含量为燃料中重金属总量减去重金属在飞灰和底渣中的含量。

3 结果和讨论

3.1 重金属的分布特性

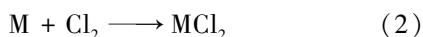
本实验共进行了3个工况:工况1,900℃污泥单独燃烧;工况2,900℃污泥与麦秆混合燃烧(掺混质量比30%);工况3,900℃污泥和棉秆混合燃烧(掺混质量比30%)。不同工况下重金属的归一化分布见表4。由表4可以看出,Cd、Pb、Cu、Zn和As主要分布于底渣和飞灰中,为中度挥发性重金属;Cr主要分布于底渣中,为难挥发性重金属;Hg几乎全部分布于烟气中,为易挥发性重金属。

表4 重金属的归一化分布
Table 4 Distribution of heavy metals

项目	归一化分布/%						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	As	Hg
工况1 烟气	13.81	2.02	7.24	9.52	4.31	36.49	99.57
工况1 飞灰	26.08	27.24	19.79	21.61	15.30	24.13	0.25
工况1 底渣	60.11	70.73	72.97	68.87	80.39	39.39	0.18
工况2 烟气	10.84	6.81	8.96	10.34	3.38	32.16	99.57
工况2 飞灰	25.03	25.94	29.04	20.86	25.96	28.77	0.29
工况2 底渣	64.13	67.25	62.00	68.80	70.66	39.06	0.14
工况3 烟气	12.48	6.98	10.42	4.18	3.50	12.71	99.06
工况3 飞灰	20.97	23.14	20.67	24.79	16.29	43.44	0.57
工况3 底渣	66.55	69.88	68.91	71.03	80.21	43.85	0.37

污泥掺烧生物质使 Cd 在底渣中的含量增加, As 在烟气中的含量减少,说明污泥掺烧生物质抑制了 Cd、As 的挥发,使其更易于向固相中迁移。侯海盟^[21]采用 FactSage 6.1 软件计算了重金属元素在污泥焚烧过程中的形态和分布以及 Cl 对重金属迁移的影响,结果表明,在 900 °C 时, Cd 全部以气态 Cd(g)、CdO(g) 和 Cd(OH)₂(g) 存在且 Cl 含量对 Cd 的挥发性没有影响。因此污泥掺烧生物质后 Cd 的挥发性降低很可能是由于生物质中富含的矿物质对 Cd 的捕捉作用加强导致的。Hu 等^[22]研究结果表明 As 在温度超过 900 K 时主要以 As₂O₃(g) 形式存在, As 在烟气、飞灰及底渣中的形态转化主要取决于 As₂O₃(g) 与 Ca 基、Fe 基及 Al 基等无机化合物的反应,气态 As 与无机化合物反应可生成砷酸盐,从而对 As 具有较好的捕捉能力。因而污泥掺烧生物质降低了 As 的挥发性是由于生物质中富含矿物质成分,增加了对气态 As 的捕捉,从而抑制了其挥发。

污泥掺烧生物质使 Pb 和 Cu 在烟气中的含量增加, Cr 在底渣中的含量减小,说明污泥掺烧生物质促进了 Pb、Cu 和 Cr 的挥发,使其更易于向气相中迁移。Vassileva 等^[23]的研究结果表明,固体燃料中重金属(M)及其化合物在高温条件下会与 Cl 化合物发生反应:



污泥掺烧生物质促进了 Pb、Cu 和 Cr 的挥发,这很可能是由于生物质中富含的 Cl 元素与重金属发生化学反应生成了熔沸点较低的重金属氯化物,

从而促进了 Pb、Cu 和 Cr 的挥发。

污泥掺烧不同生物质对 Zn 的影响不同,污泥掺烧棉秆使 Zn 在飞灰和底渣中的含量增加,在烟气中的含量减少,说明污泥掺烧棉秆抑制了 Zn 的挥发,使 Zn 更易于向固相中迁移;污泥掺烧麦秆对 Zn 的归一化分布影响不大。污泥掺烧棉秆使 Zn 的挥发性降低,很可能是由于棉秆中氯元素对 Zn 挥发的促进作用小于矿物质成分对其的捕捉作用,而与棉秆相比,麦秆中含有更丰富的氯元素,对 Zn 挥发的促进作用更大。Hg 几乎全部分布于烟气中,污泥掺烧生物质对 Hg 的归一化分布影响很小,这是由 Hg 极易挥发的性质决定的。

3.2 飞灰中重金属的形态分布特征

图2为不同工况下焚烧飞灰中重金属的形态分布特征,可以看出不同重金属在飞灰中的主要存在形态是不同的。飞灰中重金属 Cr 大多以残渣态存在,残渣态在飞灰中的含量占 95% 以上,化学性质稳定; Pb 和 Cu 主要以残渣态存在,部分以酸溶态、可还原态和可氧化态存在,化学性质相对稳定; Cd、Zn 和 As 的酸溶态和可还原态比例较高,两态之和占 50% 左右,具有较强的生物可利用性和迁移性,对环境的潜在危害性较大。

比较工况 2 和工况 1 的飞灰重金属形态分布特征可以看出,污泥掺烧麦秆对 Cd、Cu 和 Cr 的形态分布影响较小; Pb 在残渣态的含量略有减少,在可还原态的含量有较少增加,说明污泥掺烧麦秆降低了 Pb 在飞灰中的稳定性; Zn 在残渣态和可氧化态的含量明显增加,在酸溶态和可还原态的含量明显减少,说明污泥掺烧麦秆使飞灰中 Zn 的稳定性明显增加; As 在残渣态的含量明显减少,在酸溶态的含

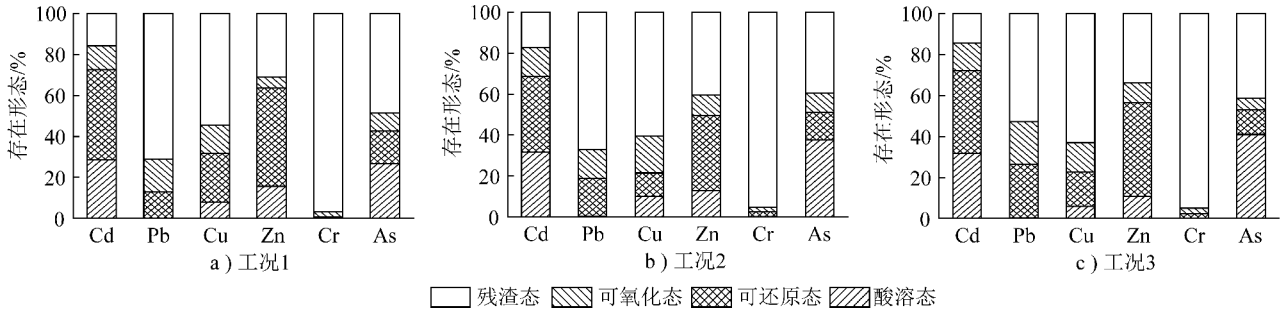


图2 飞灰中重金属存在形态分布特性

Fig. 2 Speciation distribution of heavy metals in fly ash

量明显增加,说明污泥掺烧麦秆使飞灰中 As 的稳定性明显降低。

比较工况 3 和工况 1 的飞灰重金属形态分布特征可以看出,污泥掺烧棉秆对 Cu、Cr 的形态分布影响较小;Cd 在残渣态和可氧化态的含量略增加,在酸溶态和可还原态的含量略减少,稳定性增加;Pb 在残渣态的含量明显减少,稳定性降低;Zn 在残渣态和可氧化态的含量明显增加,在酸溶态和可还原态的含量明显减少,说明污泥掺烧棉秆使飞灰中 Zn 的稳定性明显增加;As 在残渣态的含量明显减少,在酸溶态的含量明显增加,说明污泥掺烧棉秆使飞灰中 As 的稳定性明显降低。

比较污泥掺烧麦秆和棉秆对重金属形态分布的影响可以看出,污泥掺烧生物质都使 Pb、As 的稳定态含量降低,使 Zn 的稳定态含量增加,对 Cu、Cr 的形态分布影响较小,不同生物质对 Cd 的形态分布影响不同。

3.3 飞灰中重金属的浸出毒性

本文从浸出量和浸出率 2 个角度分析飞灰中重金属的浸出毒性,其中浸出量由飞灰中重金属的含量和重金属的存在形态共同决定,直接反映飞灰的浸出毒性;浸出率由重金属的存在形态决定,反映了飞灰中重金属的稳定程度。不同工况下飞灰中重金属的浸出量和浸出率分别见表 5 和表 6。

表 5 飞灰中重金属的浸出量

Table 5 Heavy metals leachability contents in fly ash

项目	浸出量/(mg·L ⁻¹)						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	As	Hg
工况 1	0.060	0.006	2.11	17.80	0.002	1.09	—
工况 2	0.046	0.011	2.74	8.86	0.028	1.39	—
工况 3	0.023	0.005	1.73	7.73	0.008	1.34	—

表 6 飞灰中重金属的浸出率

Table 6 Heavy metals leachability ratios in fly ash

项目	浸出率/%					
	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	As
工况 1	34.34	0.15	11.01	17.84	0.01	71.37
工况 2	34.42	0.35	12.15	11.50	0.15	83.89
工况 3	27.10	0.25	14.05	11.01	0.04	94.18

由表 5 可以看出,飞灰中 Cd、Pb 和 Cr 的浸出量较低,均小于 0.1 mg/L;Cu、Zn 和 As 的浸出量相对较高,均大于 1 mg/L;Hg 在浸出液中未检出。污泥掺烧不同生物质对飞灰中重金属浸出量的影响不

同。污泥掺烧麦秆使飞灰中 Pb、Cu、Cr、As 的浸出量增加,使 Cd、Zn 的浸出量降低。污泥掺烧棉秆使飞灰中 Cr、As 的浸出量增加,使 Cd、Pb、Cu、Zn 的浸出量降低。与麦秆相比,棉秆更有利于降低飞灰中重金属的浸出量和浸出毒性。

由表 6 可以看出,飞灰中 Pb 和 Cr 的浸出率都较低,其余重金属的浸出率相对较高,说明飞灰中 Pb、Cr 主要以较为稳定的形式存在,这与飞灰中重金属 Pb、Cr 主要以稳定的残渣态存在的形态分布特征一致。污泥掺烧不同生物质对重金属浸出率的影响不同。污泥掺烧麦秆对 Cd、Cu 和 Cr 的浸出率影响较小,使 Pb、As 的浸出率增加,Zn 的浸出率明

显降低,这与污泥掺烧麦秆对飞灰中重金属形态分布的影响一致。污泥掺烧棉秆使飞灰中重金属 Cd、Zn 的浸出率降低,Pb、As 的浸出率增加,对 Cu、Cr 的浸出率影响较小,这与污泥掺烧棉秆对重金属形态分布的影响一致。

4 结 论

1) 污泥掺烧麦秆和棉秆,Cd 和 As 的挥发性降低,Pb、Cu 和 Cr 的挥发性增加,对 Hg 的分布影响很小。污泥掺烧麦秆对 Zn 的挥发性影响不大,污泥掺烧棉秆使 Zn 的挥发性降低。

2) 污泥掺烧生物质使 Pb、As 的稳定态含量降低,使 Zn 的稳定态含量增加,对 Cu、Cr 的形态分布影响较小。不同生物质对 Cd 的形态分布影响不同。

3) 污泥掺烧不同生物质对飞灰中重金属浸出量和浸出率的影响不同。污泥掺烧生物质对重金属浸出率的影响与对重金属形态分布的影响一致。棉秆与麦秆相比更有利于降低飞灰中重金属的浸出量和浸出毒性。

参考文献:

[1] 武宏香,赵增立,何方,等.污泥与煤、木屑燃烧过程中重金属排放特性研究[J].环境工程学报,2011,5(11):2593-2599.
Wu Hongxiang, Zhao Zengli, He Fang, *et al.* Volatility of heavy metals in co-combustion of sludge with coal and wood[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(11): 2593-2599.

[2] Van Caneghem J, Brems A, Lievens P, *et al.* Fluidized bed waste incinerators; design, operational and environmental issues[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(4): 551-582.

[3] Chirone R, Salatino P, Scala F, *et al.* Fluidized bed combustion of pelletized biomass and waste-derived fuels[J]. Combustion and Flame, 2008, 115(1/2): 21-36.

[4] Han X X, Niu M T, Jiang X M, *et al.* Combustion characteristics of sewage sludge in a fluidized bed[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(32): 10565-10570.

[5] Vogel C, Adam C, McNaughton D. Determination of phosphate phases in sewage sludge ash-based fertilizers by raman microspectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2013, 67(9): 1101-1105.

[6] Skoglund N, Grimm A, öhman M, *et al.* Combustion of biosolids in a bubbling fluidized bed part I: main ash forming elements and ash distribution with a focus on phosphorus[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 1183-1190.

[7] Weigand H, Bertau M, Hübner W, *et al.* RecoPhos: full-scale fertilizer production from sewage sludge ash[J]. Waste Management, 2013, 33(3): 540-544.

[8] Adam C, Peplinski B, Michaelis M, *et al.* Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery [J]. Waste Management, 2009, 29(3): 1122-1128.

[9] Adam C, Kley G, Simon F G. Thermal treatment of municipal sewage sludge aiming at marketable P-fertilisers[J]. Materials Transactions, 2007, 48(12): 3056-3061.

[10] 刘敬勇,孙水裕,陈涛.固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响[J].环境科学,2013,34(3):1166-1172.
Liu Jingyong, Sun Shuiyu, Chen Tao. Effects of adsorbents on partitioning and fixation of heavy metals in the incineration process of sewage sludge[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1166-1172.

[11] Yao H, Naruse I. Control of trace metal emissions by sorbents during sewage sludge combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 3009-3016.

[12] Yao H, Mkilaha I S N, Naruse I. Screening of sorbents and capture of lead and cadmium compounds during sewage sludge combustion[J]. Fuel, 2004, 83(7/8): 1001-1007.

[13] Yao H, Naruse I. Using sorbents to control heavy metals and particulate matter emission during solid fuel combustion[J]. Particulate, 2009, 7(6): 477-482.

[14] Scotto M V, Uberoi M, Peterson T W, *et al.* Metal capture by sorbents in combustion processes[J]. Fuel Processing Technology, 1994, 39(1/2/3): 357-372.

[15] Vogel C, Adam C. Heavy metal removal from sewage sludge ash by thermochemical treatment with gaseous hydrochloric acid[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(17): 7445-7450.

[16] Vogel C, Exner R M, Adam C. Heavy metal removal from sewage sludge ash by thermochemical treatment with polyvinylchloride[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(1): 563-567.

[17] 腾海鹏.生物质流态化燃烧粘结失流特性研究[D].北京:中国科学院工程热物理研究所,2011:15-17.

[18] 陈勇.垃圾焚烧中镉、铅迁移转化特性研究[D].北京:清华大学,2008:41.

[19] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. Journal of Environmental Monitor, 1999, 1(1): 57-61.

[20] 邵敬爱.城市污水污泥热解试验与模型研究[D].武汉:华中科技大学,2008:107.

[21] 侯海盟.城市下水污泥循环流化床焚烧及排放特性试验研究[D].北京:中国科学院工程热物理研究所,2013:74-80.

[22] Hu Hongyun, Liu Huan, Chen Juan, *et al.* Speciation transformation of arsenic during municipal solid waste incineration[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35: 2883-2890.

[23] Vassileva S V, Braekman-Danheux C, Laurent P, *et al.* Behaviour, capture and inertization of some trace elements during combustion of refuse-derived char from municipal solid waste[J]. Fuel, 1999, 78(10): 1131-1145.