

污泥/煤流化床混烧底灰中的重金属毒性研究

赵晓莉^{1,2,3} 朱伟¹ 徐德福^{2,3} 邱林倩² 张超² 杨创²

摘要

研究了污泥与煤按不同质量比例混烧后,底灰中的重金属形态分布与浸出毒性.结果表明:30:70的泥煤比使底灰中重金属硫化物及有机态和残渣态所占比例最大,即生物无效部分比例最大;在浸出毒性实验中,30:70的泥煤比使底灰重金属浸出量最小.由此推出,对环境毒害程度最小的泥煤质量比为30:70,即该实验条件下最优泥煤质量比为30:70.

关键词

泥煤质量比;混烧;底灰;重金属形态;毒性

中图分类号 X705

文献标志码 A

收稿日期 2011-06-16

资助项目 国家自然科学基金(50979028)

作者简介

赵晓莉,女,副教授,研究方向为固体废物处理与资源化. zhaoxiaoli2187@163.com

1 河海大学 环境学院,南京,210098

2 南京信息工程大学 环境科学与工程学院,南京,210044

3 南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室,南京,210044

0 引言

随着城市化的发展,污水处理率相应提高,污水厂的副产物——城市污水污泥成为一种数量巨大的、迫切需要妥善处置的废弃物.城市污水厂污泥的最终处置是国内外共同面临的难题和挑战^[1].与传统方法如填埋^[2]、丢弃^[3]和堆肥^[4]等相比,污泥焚烧逐渐成为热点研究问题^[5].焚烧最大限度地减小了污泥体积,使污泥的最终处置极为便利^[6],因此焚烧法逐渐被人们所关注.污泥的单独焚烧处理技术受污泥高含水量的限制,该技术有待优化和完善.污泥与煤的混烧成为研究污泥处理与处置的新技术^[7].污泥与煤混烧,较之其他污泥焚烧方式,具有投资少、烟气中有机污染物浓度低、运行费用和烟气治理费用低、热量可最大回收等优点^[8-9].由于污泥和煤中含有多种重金属,污泥与煤的混烧在以废治废的同时,重金属元素及其形成的化合物以烟雾或尘埃状态散布在大气中,或停留在残渣中,且数量很大.重金属在环境中以多种形态存在,不同形态的重金属具有不同的生物有效性^[10],焚烧底灰作为一种特殊的固体废弃物,其中重金属的存在形态影响底灰的处置方式,因此研究重金属的毒性及形态具有重要意义^[11].

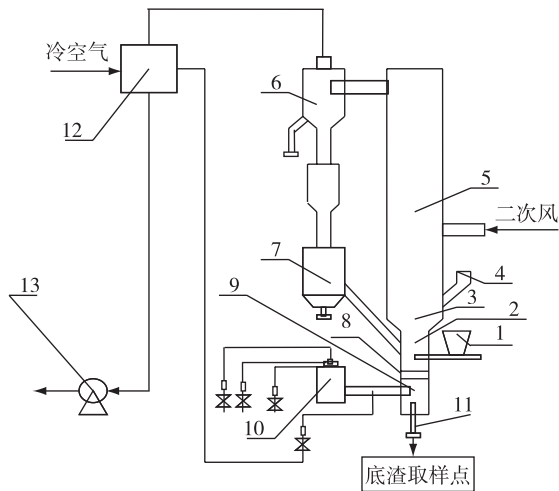
国内外对循环流化床焚烧污泥技术已有相关研究,但大多是针对污泥的单独焚烧进行的^[12],而污泥混合其他废弃有机物的焚烧研究较少,而且不同方式的污泥焚烧产生的底灰性质是有所差别的.本试验选用苏州角直印染厂的污泥及山东洗煤场的煤泥,力求达到以废治废的效果.通过设置不同的混合比例,在现场进行焚烧实验,对泥煤混烧后产生的底灰中的不同形态重金属含量及其浸出毒性进行分析测试,为选取最优泥煤比提供数据支持,也为污泥的资源化利用及最终处置提供依据.

1 实验材料与方法

1.1 焚烧装置

污泥与煤混烧的循环流化床焚烧系统如图1所示.整个焚烧装置是苏州热能厂的现场实验装置,由循环流化床焚烧炉本体、启动燃烧室、送引风系统、污泥加料系统、加煤系统、高温旋风分离器、返料装置、尾部烟道、测量、取样和运行操作控制系统等组成.

循环流化床焚烧炉内有本体分风室、密相区、过渡区和稀相区4



1—给煤系统;2—密相区;3—过渡段;4—污泥加入点;5—稀相区;6—旋风分离器;
7—返料器;8—布风板;9—风室;10—启燃室;11—排渣管;12—换热器;13—引风机

图1 循环流化床焚烧炉系统示意

Fig. 1 Flow chart of circulating fluidized-bed incinerator system

部分,总高为7 m.密相区高为1.16 m,内截面面积为0.23 m×0.23 m,过渡区高为0.2 m,稀相区高为4.56 m,内截面面积为0.46 m×0.395 m.送引风系统由空气压缩机和引风机组成,由压缩机送来的一次风经预热后送去风室,二次风未经预热从稀相区下部送入炉膛.煤由安装在密相区下部的螺旋给料系统加入焚烧炉,污泥由安装在稀相区下部的特制叶轮给料器经下斜管加入.循环流化床焚烧系统布置了相应的烟气、飞灰和底渣的取样点.由于本实验重点研究底灰性质,故只在图1中标出底渣取样点.

1.2 实验材料

在本次试验中,焚烧的污泥来自苏州甬直印染污

水处理厂;作为焚烧辅助燃料的煤泥,来自山东洗煤场.污水污泥和煤的元素分析及工业分析数据见表1.

采用不同泥煤质量比(0,10:90,20:80,30:70,40:60),然后在现场焚烧试验中,根据煤泥和污泥的含水率,换算成现场试验的体积比.由于污泥及煤泥的含水量比较大,当泥煤质量比超过40:60后,就引起温度的很大波动,要添加大量油料才能保证焚烧的顺利进行,故此比例选择控制在40:60及以下.污泥和煤泥混烧后的底灰作为实验研究材料,要求不同泥煤比混烧后的底灰分别取3份,混合后备用.

1.3 实验仪器

实验仪器主要有LG16-W型台式高速离心机,SHA-B恒温水浴振荡器和JY2000-2电感耦合等离子体发射光谱仪.

1.4 实验方法

1.4.1 底灰中不同形态重金属测定方法

各种形态的重金属提取方法按照 Tessier 等^[13]的5步连续提取法.

1.4.2 底灰浸出毒性分析

采用《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》取得浸出液^[14].

2 实验结果与讨论

2.1 底灰中不同形态重金属质量分数

不同泥煤质量比混烧,底灰中不同形态重金属质量分数见表2—6.

为了更为直观地比较在不同泥煤比的条件下,底灰中各重金属5种形态的分布情况,将以上数据

表1 污泥和煤泥的元素分析和工业分析

Table 1 Elemental analysis and industrial analysis of sludge and coal slime

原料	质量分数/10 ⁻²										热值/ (kJ/kg)
	C	H	O	N	S	Cl	水	灰烬	挥发物	固定碳	
污泥	24.83	3.31	14.39	4.47	1.13	1.33	97.95	44.58	42.74	5.39	768.5
煤泥	62.50	3.20	2.80	1.60	2.20	1.41	22.32	50.68	21.01	26.71	3 178.0

表2 不同泥煤质量比混烧底灰可交换态重金属质量分数

Table 2 Exchangeable heavy metals contents in bottom ash produced by co-combustion

泥煤质量比	质量分数/10 ⁻³							
	Cd	Zn	Mn	Pb	Fe	Ni	Cr	Cu
0	0.048	5.390	9.460	13.375	21.576	7.810	3.854	1.801
10:90	1.678	9.471	9.815	14.286	77.525	5.211	4.588	3.429
20:80	1.780	10.730	9.868	14.659	53.169	5.320	4.241	2.504
30:70	0.048	8.111	9.641	15.735	52.555	4.345	4.830	3.104
40:60	2.390	8.514	9.176	14.576	18.803	1.421	3.983	1.171

折算为每种重金属不同形态占据的百分比,根据不同形态占据的百分比作图(图2—6).其中,可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态为生物有效部分;硫化物及有机态和残渣态为生物无效部分.

由图2看出:单纯的煤泥焚烧底灰中,Cd几乎不存在可交换态,但在碳酸盐结合态、铁锰氧化态、硫化物及有机态中较均匀的分布,有一定的生物可利用性和迁移性;Zn、Mn、Pb、Fe和Ni在5种形态中均占有一定比例,其中毒性较大的Pb主要以不稳定

态存在;Cr主要以残渣态、硫化物及有机态存在,较为稳定;在泥煤质量比为0的条件下,Cu是8种重金属中最为稳定的,因为有接近90%的Cu都是以残渣态、硫化物及有机态存在的.综上所述,当泥煤质量比为0时,只有Cu的稳定性表现突出,其他几种重金属都有一定的或较强的生物可利用性.故泥煤质量比为0的焚烧底灰所表现出的重金属形态分布特征并不令人满意.

表3 不同泥煤质量比混烧底灰碳酸盐态重金属质量分数

Table 3 Carbonate heavy metals contents in bottom ash produced by co-combustion $\times 10^{-3}$

泥煤质量比	Cd	Zn	Mn	Pb	Fe	Ni	Cr	Cu
0	1.949	7.608	24.306	17.640	53.589	1.421	4.856	1.026
10:90	2.153	12.796	9.773	12.961	45.361	4.345	4.386	2.479
20:80	1.066	13.451	11.040	30.269	134.374	4.345	5.305	1.739
30:70	2.629	13.653	10.175	17.681	215.001	9.218	4.603	3.253
40:60	2.663	9.824	10.500	15.943	100.731	5.852	4.448	1.598

表4 不同泥煤质量比混烧底灰铁锰氧化态重金属质量分数

Table 4 Manganese oxidation state heavy metal contents in bottom ash produced by co-combustion $\times 10^{-3}$

泥煤质量比	Cd	Zn	Mn	Pb	Fe	Ni	Cr	Cu
0	2.051	12.091	56.245	51.428	24.940	6.619	7.728	1.893
10:90	1.678	6.901	11.683	17.474	69.178	3.479	5.744	2.346
20:80	1.440	8.313	10.954	15.073	107.710	6.078	5.228	3.130
30:70	1.576	10.529	9.515	16.108	45.408	3.370	4.169	2.545
40:60	1.304	7.405	9.121	13.789	22.114	3.588	4.164	1.175

表5 不同泥煤质量比混烧底灰硫化物及有机态重金属质量分数

Table 5 Sulfuric and organic heavy metal contents in bottom ash produced by co-combustion $\times 10^{-3}$

泥煤质量比	Cd	Zn	Mn	Pb	Fe	Ni	Cr	Cu
0	1.949	13.904	24.178	23.395	55.021	13.333	11.110	2.794
10:90	2.594	14.861	26.974	57.720	116.714	7.160	33.034	42.780
20:80	1.678	9.421	11.230	16.936	67.020	9.218	5.646	6.691
30:70	0.829	13.400	9.885	31.783	82.355	4.886	4.685	4.351
40:60	1.203	6.248	9.585	13.873	52.690	6.619	4.360	3.135

表6 不同泥煤质量比混烧底灰残渣态重金属质量分数

Table 6 Residual heavy metals contents in bottom ash produced by co-combustion $\times 10^{-3}$

泥煤质量比	Cd	Zn	Mn	Pb	Fe	Ni	Cr	Cu
0	0.524	9.119	9.704	14.245	75.901	2.721	14.835	33.223
10:90	2.696	18.288	16.335	24.265	25.101	5.320	19.489	11.916
20:80	2.390	51.990	39.461	63.543	30.760	12.120	36.659	70.585
30:70	3.783	26.223	67.693	59.889	22.809	21.845	89.658	61.038
40:60	3.478	9.925	11.228	19.959	19.298	9.109	26.896	37.168

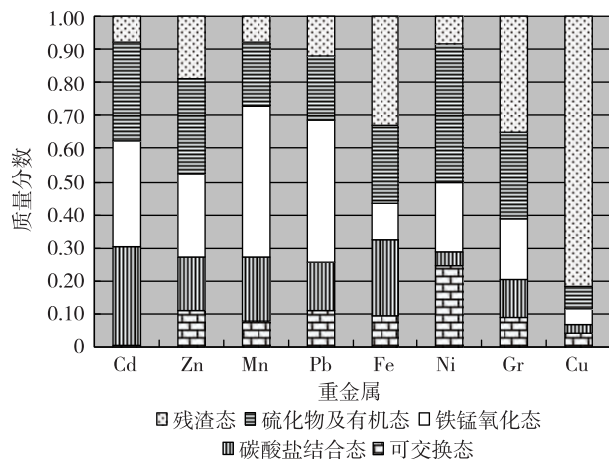


图2 泥煤质量比为0时底灰中不同形态重金属质量分数
Fig. 2 Heavy metal speciation distribution of bottom ash from sludge combustion

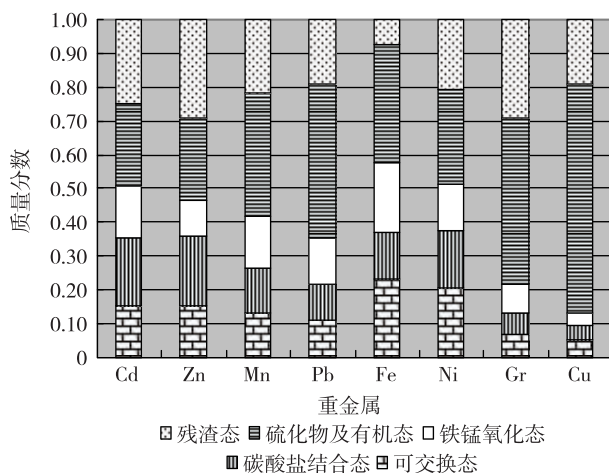


图3 泥煤质量比为10:90时底灰中不同形态重金属质量分数
Fig. 3 Heavy metal speciation distribution of bottom ash with 10% of sludge to coal ratio

由图3看出:泥煤质量比为10:90时的混烧底灰中,Cd、Ni的5种形态分布比较均匀;Cr和Cu2种重金属主要以残渣态、硫化物及有机态存在,十分稳定;Fe主要以可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态这3种稳定性较差的形态存在,其生物可利用性较强;Mn和Pb形态分布较为相似,生物无效部分与有效部分的比例约为3:2,性质较为稳定;Zn的生物有效与生物无效部分比例约为1:1,稳定性较弱.综上所述,当泥煤质量比为10:90时,除了Cr和Cu具有明显的高稳定性,其他几种重金属往往呈现出介于稳定与不稳定之间的状态.显然,10:90的泥煤质量比没有表现出比较明显的优势.

由图4看出:泥煤质量比为20:80时的混烧底灰中,Cr和Cu主要以硫化物及有机态、残渣态存在,生物无效部分比例非常大,十分稳定,这与泥煤质量比为10:90时表现出的情况相似;Cd和Ni形态分布较为接近,其生物无效和有效部分比例约为1:1,稳定性较弱;Pb、Mn和Zn都比较稳定,且3种元素稳定性依次递增,其中Pb的稳定性还有待增强;Fe主要以不稳定态存在,是泥煤质量比为20:80时稳定性最差的一种金属.综上所述,当泥煤质量比为20:80时,底灰重金属的稳定性虽稍强于泥煤质量比为0和10:90的情况,但其中Cd和Pb的稳定性一般,考虑到这2种重金属的高毒性,20:80的泥煤质量比只能说是差强人意.

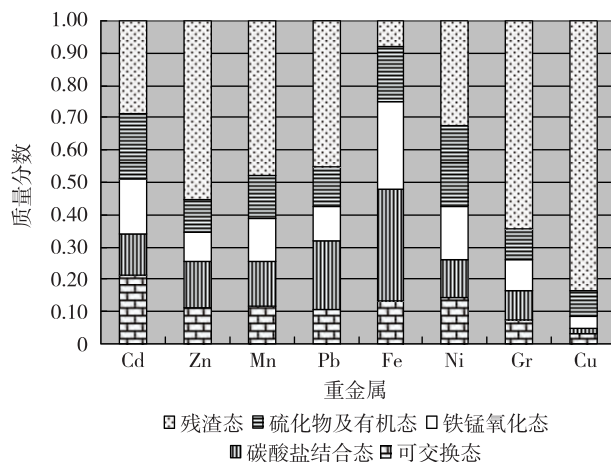


图4 泥煤质量比为20:80时底灰中不同形态重金属质量分数
Fig. 4 Heavy metal speciation distribution of bottom ash with 20% of sludge to coal ratio

由图5看出:泥煤质量比为30:70时的混烧底灰中,重金属的形态分布非常有特点,除Fe以外,其他所有元素的残渣态和硫化物及有机态的比例都在50%以上,即生物无效部分的比例都在50%以上.其中,Pb和Ni的生物无效部分比例均在60%以上;Mn的生物无效部分比例在70%以上;Cr和Cu依旧稳定性极好,生物无效部分比例均接近90%.需要特别说明的是,当泥煤质量比为30:70时,Cd的生物无效部分比例虽然仅略过50%,但与其他几种泥煤质量比混烧底灰中的Cd相比,其生物无效部分的比例已经是最大的了.由以上分析可以看出,30:70的泥煤质量比具有非常明显的环境优势.

由图6看出:泥煤质量比为40:60时的混烧底灰中,Cd、Zn、Mn、Pb和Fe主要以可交换态、碳酸盐

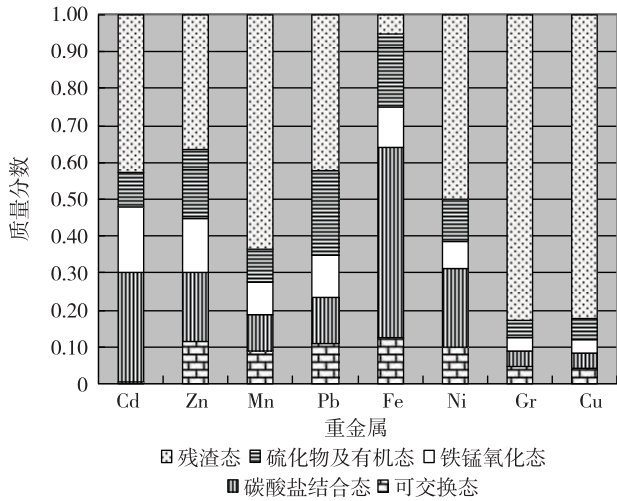


图5 泥煤质量比为 30 : 70 时底灰中不同形态重金属质量分数

Fig. 5 Heavy metal speciation distribution of bottom ash with 30% of sludge to coal ratio

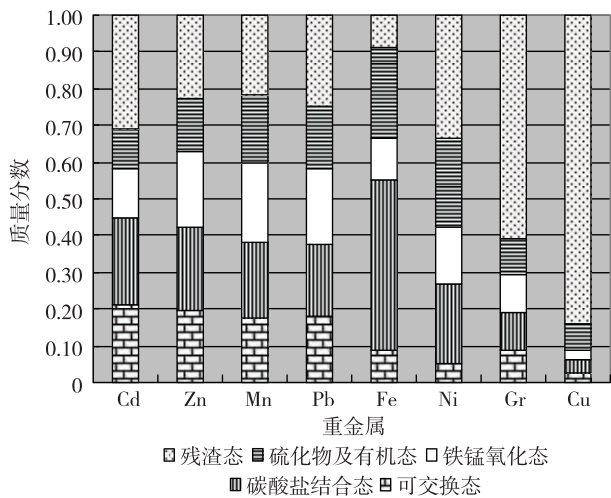


图6 泥煤质量比为 40 : 60 时底灰中不同形态重金属质量分数

Fig. 6 Heavy metal speciation distribution of bottom ash with 40% of sludge to coal ratio

结合态、铁锰氧化态这 3 种稳定性较差的形态存在, 此时 Cd 的可交换态甚至在几种泥煤比混烧底灰中含量最大, 其生物有效性在几种泥煤比混烧底灰中也相应最高, 对环境相当不利; Ni 的生物有效和无效部分比例约为 1 : 1, 稳定性较弱; 只有 Cr 和 Cu 稳定性较好, 但上述 4 种泥煤比也都呈现出 Cr 和 Cu 稳定性最好的特征. 由以上分析可以看出, 40 : 60 的泥煤质量比混烧底灰中重金属稳定性相较其他几种泥煤比时更差, 故 40 : 60 的泥煤质量比不予考虑. 30 : 70 的泥煤质量比对环境的毒害程度最小, 为最佳泥煤比.

2.2 底灰浸出毒性

有关文献证明, 固体废物中浸出毒性实验取得的浸出液中, 重金属大多以可交换态存在^[15]. 因此, 探讨污泥底灰中重金属的浸出量对于预测其潜在的生物有效性和迁移性同样具有重要环境意义. 按照不同泥煤质量比混烧后底灰中的重金属浸出量见表 7.

可以看出, 虽然浸出液中重金属质量浓度都不高, 有的甚至远远低于浸出毒性的国家标准阈值^[13], 但是由于重金属会在植物的叶茎或根部富集, 最终通过食物链转移到人体, 导致人类重金属中毒, 故其危害不可忽视. 表 7 中划线数据为不同泥煤质量比混烧后底灰重金属浸出量的最小值, 有 5 种重金属都在泥煤质量比为 30 : 70 时浸出量最小, 其中也包括毒性最大的 Cd 和 Pb. 故 30 : 70 的泥煤质量比混烧底灰重金属浸出毒性对环境的影响最小, 这与上文得出的最优泥煤质量比为 30 : 70 相吻合.

3 结论

1) 不同泥煤质量比混烧, 底灰中的各种重金属形态分布差异较大. 本文所研究的 8 种重金属, 其中 Cd、Mn、Pb、Ni 和 Cr 5 种重金属均在泥煤质量比为

表 7 不同泥煤质量比焚烧底灰重金属浸出质量浓度

Table 7 Heavy metal leaching amount of bottom ashes produced by co-combustion

mg/L

泥煤质量比	Cd	Zn	Mn	Pb	Fe	Ni	Cr	Cu
0	0.009 745	0.033 655	0.056 755	0.499 885	0.056 16	0.094 37	0.002 94	0.0041 65
10 : 90	0.007 87	<u>0.029 62</u>	0.000 25	0.281 76	0.033 06	<u>0.061 455</u>	0.003 395	0.004 645
20 : 80	0.006 51	0.045 54	0.000 7	0.266 69	0.032 66	0.089 17	0.004 9	0.004 005
30 : 70	<u>0.005 755</u>	0.038 69	<u>0.000 115</u>	<u>0.254 4</u>	0.035 605	0.069 25	<u>0.002 07</u>	<u>0.000 9</u>
40 : 60	0.006 195	0.013 1	0.000 805	0.258 605	0.036 61	0.122 52	0.003 455	0.002 02
文献[14]限值	0.3	50	/	3	/	10	10	50

30:70 时生物无效部分比例呈现最大值,其中包括毒性较大的 Cd 和 Pb,所以 30:70 的泥煤质量比是非常具有环境优势的;当泥煤质量比为 0 或 20:80 时,个别金属会呈现出最大生物无效部分比例,但它们都不是毒性较大的金属种类,比如 Fe;当泥煤质量比为 10:90 时,底灰中各种重金属的生物有效和生物无效部分比例比较接近,没有呈现出明显的特征;当泥煤质量比为 40:60 时,底灰中重金属稳定性在几种泥煤比中表现最差,故其不予考虑。

2) 对比不同泥煤质量比混烧底灰的浸出液中各重金属浸出量,Cd、Mn、Pb、Cr 和 Cu 这 5 种金属均在泥煤质量比为 30:70 时浸出量最小,毒性较大的 Cd 和 Pb 同样包含在其中. 浸出毒性实验进一步证实了 5 种泥煤质量比中最佳泥煤质量比为 30:70,其中重金属对环境毒害最小。

参考文献

References

- [1] 林云琴,周少奇. 我国污泥处理处置与利用现状[J]. 能源环境保护,2004,18(6):15-18
LIN Yunqin,ZHOU Shaoqi. Investigation and analysis on the dieposal and treatment of sludge in China[J]. Energy Environmental Protection,2004,18(6):15-18
- [2] 刘峰,万新南,陈希伟. 浅谈中国城市污泥的处置[J]. 环境科学与管理,2009,34(8):116-119
LIU Feng,WAN Xinnan,CHEN Xiwei. On the disposal of sewage sludge[J]. Environmental Science and Management,2009,34(8):116-119
- [3] 廖选亭,盛健. 城市污泥处理处置及综合利用研究现状与建议[J]. 安全与环境工程,2006,13(2):62-65
LIAO Xuanting,SHENG Jian. Research status and view on treatment, disposal and utilization of sewage sludge[J]. Safety and Environmental Engineering,2006,13(2):62-65
- [4] 张树国,吴志超,张善发,等. 上海市污水处理厂污泥处置对策研究[J]. 环境工程,2004,22(1):75-78
ZHANG Shuguo,WU Zhichao,ZHANG Shanfa, et al. Study of countermeasures for sludge disposals of Shanghai wastewater treatment plants[J]. Environmental Engineering,2004,22(1):75-78
- [5] Çinar S, Onay T T, Erdinçler A. Co-disposal alternatives of various municipal wastewater treatment-plant sludge with refuse Onay, Aysen Erdinçler[J]. Advances in Environmental Research,2004,8(3/4):477-482
- [6] 张翔,宋丽华,邢莉玲,等. 城市污水处理厂污泥焚烧处理的探讨[J]. 安徽化工,2006,143(5):50-51
ZHANG Xiang,SONG Lihua,XING Liling, et al. The discussion on the urban sewage treatment plant sludge incineration processing[J]. Anhui Chemical Industry,2006,143(5):50-51
- [7] 刘烨,田一梅,从月宾. 污泥处置与资源化新技术探讨[J]. 四川环境,2004,23(6):528-529
LIU Ye,TIAN Yimei,CONG Yuebin. Discussion on new techniques of sludge disposal and use as resources[J]. Sichuan Environment,2004,23(6):528-529
- [8] 矫维红,那永洁,郑明辉,等. 城市下水污泥焚烧过程中二次污染物排放特性的试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2006,7(4):74-77
JIAO Weihong,NA Yongjie,ZHENG Minghui, et al. Experimental study on pollutant emissions of sewage sludge incineration[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control,2006,7(4):74-77
- [9] 吕清刚,那永洁,包绍麟,等. 城市垃圾与煤在 CFBC 试验台上的混烧试验[J]. 工程热物理学报,2003,24(2):347-350
LÜ Qinggang,NA Yongjie,BAO Shaolin, et al. Experimental study on CFBC co-firing of municipal solid waste and coal[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2003,24(2):347-350
- [10] 卢静,王忠柯,叶和清,等. 燃煤重金属污染抑制的研究进展[J]. 环境科学与技术,2002,25(5):40-42
LU Jing,WANG Zhongke,YE Heqing, et al. Progress in restraining of heavy metal pollution of coal combustion[J]. Environmental Science and Technology,2002,25(5):40-42
- [11] 刘淑静,李爱民,袁维波. 温度对污泥焚烧残渣中重金属形态分布及残渣综合毒性的影响[J]. 安全与环境学报,2008,8(1):43-44
LIU Shujing,LI Aimin,YUAN Weibo. Effect of temperature on the heavy metal fraction distribution and comprehensive toxicity on incineration residue of sewage sludge[J]. Journal of Safety and Environment,2008,8(1):43-44
- [12] 吕清刚,范晓旭,那永洁,等. 城市下水污泥和煤/LPG 在循环流化床上的混烧试验研究[J]. 工程热物理学报,2006,27(2):339-342
LÜ Qinggang,FAN Xiaoxu,NA Yongjie, et al. Co-combustion of wet sewage sludge and coal/LPG in a pilot scale circulating fluidized bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2006,27(2):339-342
- [13] Tessier A,Campbell P G,Bisson M C. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Anal. Chem.,1979,51(7):844-851
- [14] 环境保护部. HJ 557—2009 固体废物浸出毒性浸出方法:水平振荡法[S]. 2010
Ministry of Environmental Protection of the PRC. HJ 557-2009 Solid waste-extraction procedure for leaching toxicity:Horizontal vibration method[S]. 2010
- [15] 朱萍,李晓晨,马海涛,等. 污泥中重金属形态分布与可浸出性的相关性研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):121-124
ZHU Ping,LI Xiaochen,MA Haitao, et al. Correlation between chemical forms and leachability of heavy metals in sludge samples[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2007,35(2):121-124

Research on heavy metal toxicity of bottom ashes produced in co-combustion of sludge and coal in fluidized beds

ZHAO Xiaoli^{1,2,3} ZHU Wei¹ XU Defu^{2,3} QIU Linqian² ZHANG Chao² YANG Chuang²

1 College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098

2 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The heavy metal speciation distribution and leaching toxicity are analyzed in bottom ashes produced by co-combustion of sewage sludge and coal with different ratios. The results show that the biologically invalid portions, namely sulfuric, organic and residual forms of heavy metal increase to maximum with the ratio of sewage sludge to coal being 30%. Meanwhile, the leaching toxicity of heavy metal is least with the ratio of sewage sludge to coal being 30%. The conclusion of optimum ratio of sewage sludge to coal under our experiment condition is 30%, or in other words, the 30% of sewage sludge to coal ratio in co-combustion can dispose of the sewage sludge effectively as well as discharge least heavy metal toxicity to the environment.

Key words ratio of sewage sludge to coal; co-combustion; bottom ashes; heavy metal speciation; toxicity