



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

矫维红^{1,2,3} 那永洁² 郑明辉¹ 吕清刚²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在 0.15 MWt 循环流化床燃烧试验台上进行了城市下水污泥与煤的混烧试验, 分析了烟气中的二次污染物排放特性。分析结果表明, 利用循环流化床焚烧城市下水污泥时, 添加辅助燃料(如煤)及改变焚烧条件, 不仅可以达到稳定燃烧的目的, 而且有利于抑制焚烧中二次污染物(如 CO 及二恶英等有机污染物)的生成。分析了焚烧污泥污染物的排放特性, 为采用焚烧方式处理城市下水污泥提供了基础性试验数据。

关键词 污泥 焚烧 污染排放

中图分类号 X505 **文献标识码** A **文章编号** 1008-9241(2006)04-0074-04

Experimental study on pollutant emissions of sewage sludge incineration

Jiao Weihong^{1,2,3} Na Yongjie² Zheng Minghui¹ Lu Qinggang²

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract Experiments of co-firing of sewage sludge and coal were made on a 0.15 MWt circulating fluidized bed combustor. The pollutants from incineration were analyzed. The results showed that not only incineration of sewage sludge was steadied but also the pollutants in flue gas were reduced by adding assistant fuel and changing conditions of incineration in CFB combustor. The mechanisms of pollutant emissions and control were studied. The basic experimental data for incineration of sewage sludge were provided.

Key words sludge; incineration; pollutant emission

1 前言

城市下水污泥的处置与其他废弃物一样, 以减量化、稳定化、无害化和资源化为原则, 处置方式主要包括土地填埋、农田利用、填海和焚烧等。土地填埋法需占用大量土地且需作防渗处理, 近年来这种方式所占比例越来越小, 填海方法会对环境造成污染已被禁止使用, 如欧共体规定在 1998 年 12 月 31 日之后将禁止污泥排海^[1]; 城市下水污泥中含有大量病原菌、寄生虫、铬和汞等重金属以及其他有毒有害物, 各国对农用污泥的标准越来越严格, 如德国《污泥管理条例》规定用于花园及其他农业用地的污泥, 有害物质需低于限定值并有施用量的限值等。

焚烧可以迅速和较大程度地使污泥减容、杀灭病菌、分解有毒有害污染物, 但会产生二次污染物。国外在城市下水污泥焚烧方面已做了一定的研究并已开始应用^[2~4], 近年来国内学者也开始了污泥燃

烧特性的研究, 如污泥水分对焚烧的影响及污泥的结团特性^[5], 污泥焚烧底灰中重金属在底渣中的富集^[6], 污泥的热解特性^[7]等, 但是基于较大尺度循环流化床的污泥焚烧研究工作还没有充分展开。

本文在已有研究^[8,9]的基础上, 进一步分析了城市下水污泥在焚烧过程中二次污染物的排放特性, 为采用焚烧方式处置城市下水污泥提供基础性试验数据。

2 试验

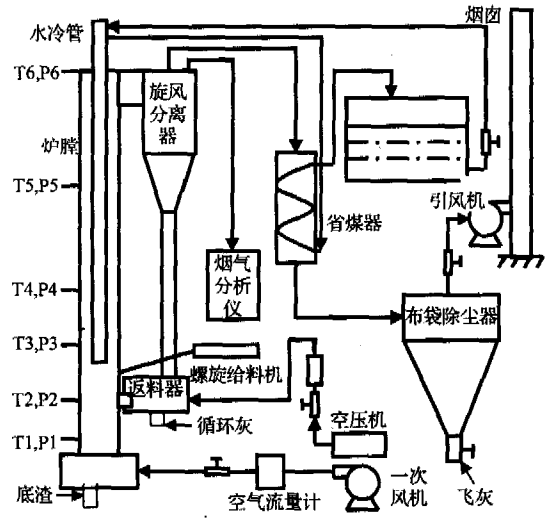
2.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。炉膛高度 6000 mm、内径 300 mm。布风板上方 1520 mm 处的温度确定为

收稿日期: 2005-03-31; 修订日期: 2005-05-08

作者简介: 矫维红(1969~), 女, 工程师, 主要从事固体废物燃烧排放特性的研究。E-mail: jiaowh@cfb.etp.ac.cn

炉膛温度。试验中炉膛温度为 700 ~ 900 ℃,通过调节从炉膛顶部插入的一根水冷管的深度来调节炉膛温度。试验装置的详细描述参见文献[9]。



T1 ~ T6 为温度测点,P1 ~ P6 为压力测点
图 1 0.15 MWt 循环流化床燃烧试验装置
Fig.1 0.15 MWt CFBC pilot plant

2.2 试验燃料特性及燃烧工况

分别使用了成型颗粒状干燥污泥和消化过的机械脱水污泥,辅助燃料分别为大同煤和聚乙烯(PE)。2 种污泥和大同煤的燃料特性见表 1。

表 1 燃料的工业分析与元素分析 Table 1 Immediate and elementary analysis of fuel			
	大同烟煤	干燥污泥	消化过的机械脱水污泥
工业分析			
M _{ar} (%)	5.30	7.40	76.30
M _{ad} (%)	4.54	6.54	4.34
A _{ad} (%)	15.10	35.49	46.83
V _{daf} (%)	30.61	82.53	97.05
FC _{ad} (%)	55.76	10.13	1.45
Q _{net,ar} (MJ/kg)	25.87	12.81	0.64
元素分析			
C _{ad} (%)	67.13	31.86	25.95
H _{ad} (%)	3.67	3.97	3.76
N _{ad} (%)	0.68	4.72	2.97
S _{ad} (%)	1.23	1.88	1.46
O _{ad} (%)	7.65	15.54	14.7
Cl _{ad} (%)	0.03	0.28	0.23
Ca _{ad} (%)	0.29	2.53	2.00

注:表中脚注 ar 表示收到基;ad 表示空气干燥基;daf 表示干燥无灰基;net,ar 表示收到基低位发热量

用干燥污泥做不同含水率、不同炉膛温度、不同混烧比(干燥污泥的热值与煤或聚乙烯和干燥污泥的总热值之比)下的焚烧特性试验,按照一定的混烧比将干燥污泥与煤掺混后一起加入炉膛,不同的含水率由从加煤点直接向炉膛中喷入不同量的水来实现,炉膛温度分别为 700 ℃、800 ℃和 900 ℃,折算的含水率分别为 30% 和 60%,炉膛后的过量空气系数为 1.2,详见文献[9]。

在消化过机械脱水污泥与煤混烧条件下做加石灰石的脱硫对比试验,炉膛温度控制在 850 ℃。

3 结果与讨论

3.1 干污泥与煤、聚乙烯混烧时的排放特性

分别设定炉膛温度为 700 ℃、800 ℃和 900 ℃,污泥与煤、聚乙烯的混烧比为 100%、70% 和 25% 时,研究污泥与煤、聚乙烯混烧过程中不同炉膛温度及混烧比对烟气排放特性的影响。烟气中各成分浓度值已换算成标准状态下(11% O₂,干烟气)的数值。

3.1.1 CO 的排放特性

CO 浓度随炉膛温度的变化曲线见图 2。

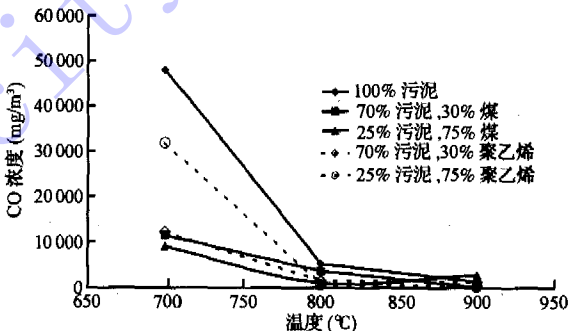


图 2 CO 浓度随温度的变化
Fig.2 CO concentration changing with temperature

随着炉膛温度的升高,CO 浓度总体下降很快,炉膛温度大于 800 ℃ 以上,CO 浓度较低。

干燥污泥与煤混烧时,在相同的炉膛温度下,随着混烧比的降低,烟气中 CO 浓度减少;干燥污泥与聚乙烯混烧时,700 ℃ 时 CO 浓度的变化趋势与煤相反,这是由于与聚乙烯的混烧比降低,使得在低温下有大量的聚乙烯颗粒在炉膛后部燃烧所致,而 800 ℃、900 ℃ 时,由于炉膛温度高,燃烧反应速率加快,从而使这种后燃现象变得不很明显。

100% 焚烧干燥污泥时,CO 浓度很高,加入辅助燃料后,CO 浓度显著减少。因此,加入辅助燃料不



仅使燃烧稳定,提高燃烧效率,还有利于减排烟气中的有机污染物。

3.1.2 SO₂ 的排放特性

SO₂ 浓度随炉膛温度的变化曲线见图 3。

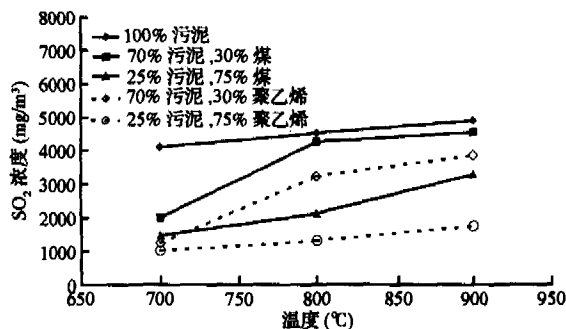


图 3 SO₂ 浓度随温度的变化

Fig. 3 SO₂ concentration changing with temperature

随炉膛温度的升高,烟气中 SO₂ 浓度增加,这与煤的燃烧过程中炉膛温度对 SO₂ 排放浓度的影响趋势是一致的;相同炉膛温度下,混烧比降低时,SO₂ 浓度减少。

由表 1 中的数据可换算出,干燥污泥的干燥无灰基的硫含量为 3.24%、钙含量为 4.37%、Ca/S 摩尔比为 1.07,此时的自脱硫效率为 43.3%,这样的脱硫效率是较低的。可见,干燥污泥含钙量虽然较高,但能用于脱硫的有效钙并不多,因此在用固体废弃物中的钙含量来考虑脱硫效率时,仅用固体废弃物中的钙含量来考虑脱硫是不合理的,即不能以固体废弃物中本身所含钙量来作为脱硫效率的参考值。

3.2 机械脱水污泥与煤混烧时的排放特性

3.2.1 烟气排放特性

消化后的机械脱水污泥与大同煤的混烧试验的炉膛温度控制在 850℃,试验过程中使用美国热电子公司的燃煤烟气分析系统对烟气中的 CO₂、CO、SO₂ 和 NO_x 成分进行了实时分析,并对烟气中的 HCl 和二恶英类进行了采样分析。脱硫剂为普通石灰石,脱硫试验的钙硫摩尔比为 2(污泥中的钙也计算在内,此时污泥本身的钙硫摩尔比为 1.09)。烟气排放分析结果见表 2。

由表 2 中的试验结果可以看出,CO 和 NO_x 的含量很低,而 SO₂ 和 HCl 含量较高。由于循环流化床燃烧方式具有燃烧温度低、在低过量空气系数下燃烧及分级供风等特点,这些因素都是降低 NO_x 排放的有效措施,因此,在污泥与煤的混烧试验中,虽然污泥中的氮含量较高,但烟气排放中 NO_x 的含量

却较低。当钙硫摩尔比为 2 时,试验中石灰石的脱硫效率为 44.2%,与干燥污泥与煤混烧时的自脱硫效率 43.3% 相比较没有明显提高;脱氯效率为 54.6%,因此加入石灰石后,由于石灰石同时具备脱硫脱氯的作用,SO₂ 和氯化氢的排放浓度都降低,但要继续降低烟气中 SO₂ 和 HCl 的浓度,应增加钙硫摩尔比以提高效率。

表 2 机械脱水污泥与煤混烧的烟气排放特性

Table 2 Characteristics of flue gas from co-firing of sewage sludge and coal

工 况	CO ₂ (%)	CO (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)	HCl (mg/m ³)
脱硫前	10.8	96	603	134	273
脱硫后	-	-	339	-	124

注:烟气中各成分浓度值已换算成标准状态下 11% O₂ 时干烟气中的数值

3.2.2 飞灰中重金属的排放特性

对消化过的机械脱水污泥与煤混烧试验的飞灰进行了取样,依据《危险废弃物浸出毒性鉴别方法水平振荡法》制备飞灰样品浸出液后,使用等离子发射光谱仪分析飞灰浸出液中重金属含量,结果见表 3。消化过的机械脱水污泥与煤混烧后的飞灰的重金属浸出毒性值皆低于《危险废弃物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB5085.3-1996)中规定的限值。

以上数据说明,污泥焚烧飞灰中重金属的浸出毒性远远低于国家标准中规定的最高允许浓度值。

3.2.3 烟气中二恶英类的排放特性

在未加入石灰石的试验条件下,二恶英类的采样在布袋除尘器之前的烟道上进行。依据美国环保局 EPA Method 0023A 进行二恶英类的采样,参照 EPA 8290 中规定的分析方法,采用气相色谱-质谱联用仪对二恶英类化合物进行分析。

二恶英类的分析结果见表 4,总毒性当量为 0.26 ng TEQ/m³,小于《危险废弃物焚烧污染控制标准》(GB18484-2001)中规定的二恶英类排放限值(0.5 TEQ ng/m³)。

4 结 论

对于具有高挥发分、高灰分、低热值特点的城市下水污泥,在进行污泥焚烧处理时,为了达到较低的排放,炉膛温度最好设定在 800℃ 以上;添加辅助燃料,如煤、废塑料等,不仅可以达到稳定燃烧的目的,

表 3 飞灰中重金属的浸出毒性分析结果

Table 3 Analytical result of extraction
toxicity of heavy metals in fly ash

种 类	含 量 (mg/L)	国标中规定的浸出液最高 允许浓度值 (mg/L)
Be	0.0009	0.1
Ba	0.4218	100
Cd	0.0139	0.3
Ni	0.0237	10
As	0.0613	1.5
Zn	0.0873	50
Cu	0.0483	50
Cr	0.3512	10
Pb	0.4689	3

表 4 烟气中(除尘器前)二恶英类化合物分析结果

Table 4 Analytical result of dioxins in flue gas

化合物	数 值 (ng/m ³)
2,3,7,8-四氯代二苯并二恶英 (TCDD)	<0.01
1,2,3,7,8-五氯代二苯并二恶英 (PeCDD)	0.05
1,2,3,4,7,8-六氯代二苯并二恶英 (HxCDD)	0.03
1,2,3,6,7,8-六氯代二苯并二恶英 (HxCDD)	0.04
1,2,3,7,8,9-六氯代二苯并二恶英 (HxCDD)	0.11
1,2,3,4,6,7,8-七氯代二苯并二恶英 (HpCDD)	0.13
八氯代二苯并二恶英 (OCDD)	0.14
2,3,7,8-四氯代二苯并呋喃 (TCDF)	0.79
1,2,3,7,8-五氯代二苯并呋喃 (PeCDF)	0.18
2,3,4,7,8-五氯代二苯并呋喃 (PeCDF)	0.30
1,2,3,4,7,8-六氯代二苯并呋喃 (HxCDF)	0.32
1,2,3,6,7,8-六氯代二苯并呋喃 (HxCDF)	0.17
1,2,3,7,8,9-六氯代二苯并呋喃 (HxCDF)	<0.02
2,3,4,6,7,8-六氯代二苯并呋喃 (HxCDF)	0.10
1,2,3,4,6,7,8-七氯代二苯并呋喃 (HpCDF)	0.26
1,2,3,4,7,8,9-七氯代二苯并呋喃 (HpCDF)	<0.02
八氯代二苯并呋喃 (OCDF)	0.04
TEQ	0.26 TEQ ng/m ³

而且有利于抑制焚烧中二次污染物的生成。本试验表明,在污泥焚烧过程中,通过调整焚烧工况,其二次污染物的排放能够得到有效控制,循环流化床焚烧技术在污泥的处理上具有一定的应用前景。

参 考 文 献

[1] Council of the European Economic Communities. Directive Concerning Urban Wastewater Treatment (91/271/EEC) . L135/40-52,1991

[2] Werther J. ,Ogada T. Sewage sludge combustion. Progress in Energy and Combustion Science,1999,25:55 ~ 116

[3] Corella,Jose,Toledo,Jose M. Incineration of doped sludge in fluidized bed. Fate and partitioning of six targeted heavy metals. I. Pilot plant used and results. Journal of Hazardous Materials,2000,80:81 ~ 105

[4] Giuseppe Mininni, Vincenzo Lotito, Roberto Passino, Ludovico Spinosa. Influence of sludge cake concentration on the operating variables in incineration by different types of furnaces. Water Science and Technology,1998,38:71 ~ 78

[5] 李晓东,岑宇虹. 污泥流化床焚烧技术的研究及应用. 燃烧科学与技术,2002,8(2):159 ~ 162

[6] 李爱民,曲艳丽. 污泥焚烧底灰中重金属残留特性的实验研究. 环境污染治理技术与设备,2002,3(11):20 ~ 24

[7] 赵长遂,黄超. 造纸污泥热解试验和化学动力学研究. 南京工程学院学报(自然科学版),2003,1(2):1 ~ 6

[8] 吕清刚,那永洁,等. 城市垃圾与煤在 CFBC 实验台上的混烧实验. 工程热物理学报,2003,24(2):347 ~ 350

[9] 吕清刚,李志伟,等. CFBC 混烧城市污泥与煤: N₂O 和 NO 的排放. 工程热物理学报,2004,25(1):163 ~ 166