

污水处理厂污泥干化焚烧处理可行性分析

李 博 王 飞 严建华* 池 涌

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要 以绍兴污水处理厂脱水污泥为研究对象,通过实验分析了污泥进行干化焚烧处理的可行性。对污泥泥质进行分析,采用桨叶式污泥干化机对污泥的热干化特性、干化过程污染排放特性进行研究,使用流化床污泥焚烧试验装置对污泥焚烧工况及焚烧过程中污染物的排放特征进行研究。结果表明,绍兴污水处理厂脱水污泥的泥质特征与大多数污水污泥类似,灰分较高、发热量较低,需干化后才可实现稳定燃烧;污泥在小型桨叶式污泥干化机内的干化速率最高达到 $0.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,并随污泥干化的进行而逐渐降低;干化过程产生的常规污染气体中氨气浓度最高,可达 $170 \text{ mg}/\text{Nm}^3$;污泥干化冷凝水的COD高达 $820 \text{ mg}/\text{L}$,氨氮等指标也很高。污泥干化系统的设计需充分考虑污泥热干化过程中气体和液体污染物的排放,设置相应的处理设施。污泥干化至含水率30%时,可在不投加辅助燃料的情况下实现流化床焚烧炉内的焚烧处理,干化污泥焚烧时需关注烟气中常规污染气体和重金属的控制,焚烧灰渣浸出毒性未超过国标限值。

关键词 污泥 污泥干化焚烧 污泥处理

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)10-3399-06

Feasibility analysis on drying and incineration of sewage sludge from a wastewater treatment plant

Li Bo Wang Fei Yan Jianhua Chi Yong

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract Experiments were carried out in a paddle sludge drying machine and a fluidized bed incinerator to analyze the feasibility of drying and incineration treatment of sewage sludge from Shaoxing Wastewater Treatment Plant (WTP). The sludge natures, as well as the contaminants emission during the treatment process were detected. Results show that, the sludge from Shaoxing WTP has similar characteristics with other sewage sludge, as the ash content is relatively high and the heating value is relatively low. The drying rate can reach up to $0.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ in the small paddle drying machine and a drop of drying rate also appear during the process. The concentration of ammonia, which is the main pollution gas during the sludge drying process, can reach up to $170 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. The condensate from sludge drying process should be treated before discharge, as its COD can reach up to $820 \text{ mg}/\text{L}$. Sewage sludge from Shaoxing WTP would combust without any auxiliary fuel when its water content is lower than 30% after drying. The noxious gases and heavy metals in the flue gas should be taken seriously. The leaching toxicity of sludge incineration ash is below the national standard limits.

Key words sewage sludge; sludge drying and incineration; sludge treatment

绍兴污水处理厂是以处理印染废水为主的综合污水处理厂,经过一、二、三期工程建设及挖潜改造,其设计处理规模已达110万t/d。由于印染污水产生的污泥排放量较高,目前每日产生含水率85%的污泥达到3000t左右。绍兴市污水处理厂的污水污泥除一部分外运至绍兴市中环再生能源发展有限公司一期工程 and 绍兴南方水泥有限公司进行焚烧处理以外,主要以填埋为主要处置方式,在运输和处理过程中对周围的环境造成了二次污染。规划的污泥处理处置设施建设迫在眉睫。

以焚烧为核心的处理方法是目前污泥处置最彻底、最快捷的方法,它能使有机物全部碳化,可最大限度地减小污泥体积^[1-4]。污泥焚烧能使污泥成为一种

基金项目:国家重点基础研究发展(973)计划(2011CB201506);水体污染控制与治理科技重大专项资助(2009ZX07317-003);国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA064704);浙江省重大科技专项资助项目(2007C03003)

收稿日期:2011-08-23;修订日期:2011-12-09

作者简介:李博(1984~),男,博士研究生,主要从事污泥处理处置方面研究。E-mail: liboe@zju.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yanjh@zju.edu.cn

燃料,将污泥中的热值利用,转换为电能或者热能,变废为宝。污泥焚烧产生的能量用于污泥干化,可降低污泥处理系统的能耗,从而降低污泥处理成本。

脱水污泥的含水率一般为80%左右,要进行焚烧处理,必须先降低其含水率,提高污泥热值,以节省焚烧处理的费用,并达到更优的焚烧效果。干化是进一步降低脱水污泥含水率的有效手段。干化后的污泥体积大幅度减小,且形状成为颗粒,有利于进一步的焚烧处理^[5]。早在20世纪40年代,日本和欧美就已经用直接加热鼓式干化器来干化污泥^[6]。由于污泥热干化技术要求和处理成本较高,所以这项技术直到20世纪80年代末期在瑞典等国家的成功应用之后,才在发达国家推广起来。在发达国家污泥干化和燃料化焚烧被认为是有望取代现有的污泥处理技术最有发展前途的方法之一^[7]。国内外现已开展了大量的污泥干化技术研究及工程实践^[8-12],深圳市和上海市也已相继开工建设大型污泥干化焚烧处理工程,以解决当地的污泥处理处置难题。

污泥干化和焚烧过程中污染物的排放是值得关注的问题。研究表明^[13-16],污泥泥质及污泥焚烧工况均会对 NO_x 、 SO_2 、重金属及二恶英的产生和排放产生影响。无论是污泥单独焚烧、与生活垃圾协同焚烧还是进入燃煤锅炉掺烧,其常规污染物、重金属污染物及二恶英的排放均不得超过相应国家标准规定的限值。污泥焚烧产生的灰渣也应在检测后根据国标的规定进行处置或综合利用。

为探索绍兴污泥干化焚烧处理可行性,以绍兴市某污水处理厂脱水污泥为研究对象,通过对污泥泥质特性、干化特性、焚烧特性及处理过程污染物排放特性的研究,为绍兴市污泥处理处置技术路线的选择、项目建设方案的编制、污泥处理处置规划的制定提供参考。

1 研究内容与方法

1.1 污泥泥质特性分析

对于污泥泥质的检测,目前还没有标准方法。参考煤质检测的国标方法“全水分测定方法(GB/T 211-2007)”、“煤的工业分析方法(GB/T 212-2008)”、“煤的发热量测定方法(GB/T 213-2008)”、“煤中碳和氢的测定方法(GB/T 476-2008)”、“煤中全硫的测定方法(GB/T 214-2007)”对与污泥干化焚烧工艺路线密切相关的泥质特性进行分析,包括污泥含水率、工业分析、发热量和元素分析。

1.2 污泥热干化及污染物排放特性实验

使用小型桨叶式间歇污泥干化机,以加热至180℃的导热油为热源,对污泥进行干化,每批次处理量为1 kg,实验装置如图1所示。用真空泵为干化机提供载气,并维持干燥机内部负压运行。污泥干化产生的水蒸汽随载气进入冷凝器冷凝后收集,并根据在线记录的冷凝液重量变化,计算污泥干化速率。绘制污泥的干化特性曲线,分析污泥干化的粘滞区。

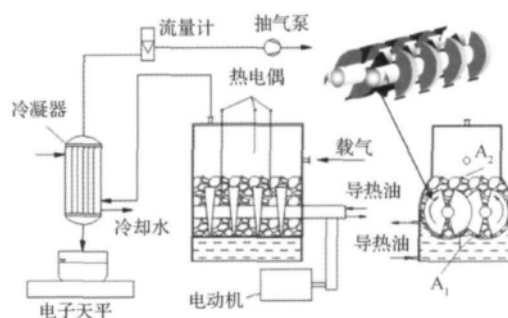


图1 小型桨叶式污泥干化机实验系统

Fig. 1 Bench scale experiment system of paddle sludge drying machine

使用处理量为1 t/d的桨叶式污泥干化机,以导热油为热源,在180℃下,对污泥进行干化,实验装置如图2所示。使用GASMET-DX4000傅立叶红外在线烟气分析仪对污泥干化过程中排放的尾气进行检测,检测项目包括: HCl、HF、HCN、 NH_3 、有机酸、甲烷、丙烷。污泥干化产生的水蒸汽随载气进入冷凝器后凝结并收集。根据水质分析国标方法“水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法(HJ/T 399-2007)”、“水质 氨的测定 纳氏试剂比色法(GB

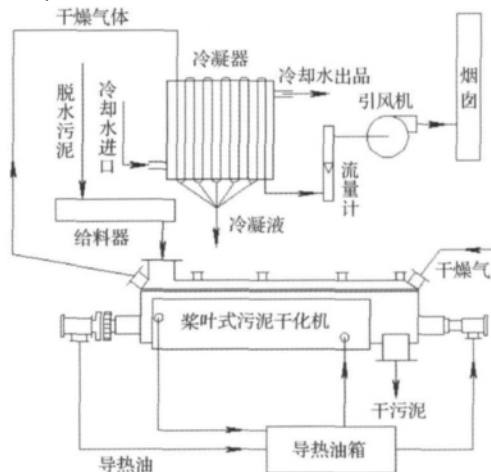


图2 桨叶式污泥干化中试实验台系统

Fig. 2 Pilot scale experiment system of paddle sludge drying machine

7479-87) ”、“水质 生化需氧量的测定 微生物传感器快速测定法(HJ/T 86-2002) ”,测定冷凝液 COD、BOD、氨氮,使用梅特勒-托利多 LP115 型便携式 pH 计测定冷凝液的 pH 值。

1.3 污泥焚烧及污染物排放特性实验

采用小型流化床污泥焚烧试验台进行绍兴污泥

焚烧实验,实验装置如图 3 所示。炉膛由刚玉陶瓷管制成,采用电阻丝分 3 段加热,炉膛内径为 60 mm、高度 1 100 mm,炉膛内部加热段高度为 745 mm。炉膛下部的空预器和炉膛内部共布置了 5 只测温热电偶,采用智能温控仪保证炉膛内温度稳定。污泥由螺旋给料机在距离布风板 350 mm 处给入炉膛。

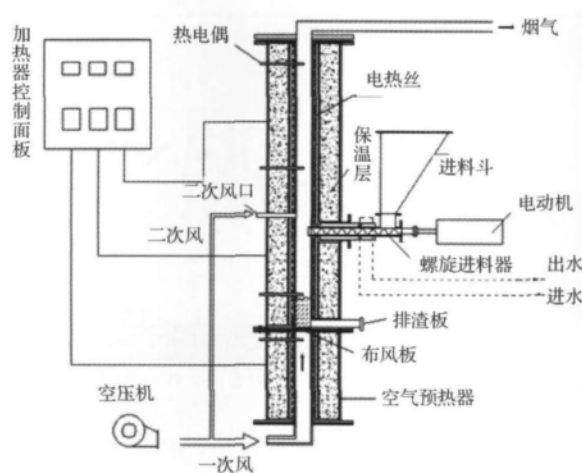


图 3 流化床污泥焚烧实验系统

Fig. 3 Experimental system of fluidised bed sludge incineration

根据污泥泥质分析结果,确定污泥焚烧实验的工况,在实验过程中测定焚烧污染物排放情况。采用 GASET-DX4000 傅立叶红外在线烟气分析仪测定常规烟气浓度,采用美国环保局标准“USEPA-23”和“USEPA-4613”方法进行二恶英采样和分析,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对烟气中重金属镉、汞、铅浓度进行测定。参考国标方法“危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别(GB 5083.3-2007)”对污泥焚烧飞灰和底渣重金属进出浓度进行检测。

2 研究结果

2.1 污泥泥质特征

根据绍兴污泥的含水率、工业分析、元素分析和发热量分析结果,其含水率为 82.71%,空气干燥基灰分 46.40%,空气干燥基挥发分为 48.05%,空气干燥基固定碳为 4.57%,空气干燥基含碳量为 27.96%,空气干燥基含氢量为 3.53%,空气干燥基含氮量为 2.24%,空气干燥基含硫量为 6.10%,空气干燥基含氧量为 12.79%,空气干燥基低位发热量为 11 592 kJ/kg。由检测结果可见,绍兴污泥脱水后含水率偏高,仍达 82% 以上,污泥脱水装置的

运行情况需进行改善。绍兴污泥的工业分析、元素分析和发热量分析结果与一般市政污泥的平均水平相当,污泥中灰分含量较高,碳含量较低,发热量较低,在进行焚烧处理时可投加辅助燃料以实现焚烧炉的稳定运行。

根据表 1 所示的绍兴污泥重金属元素含量分析结果,绍兴污泥中的重金属镍、铜、砷超过了国标“农用污泥中污染物控制标准(酸性土壤),GB 4284-84”和“城镇污水处理厂污泥处置农用泥质(B 级污泥),CJ/T 309-2009”两项限值;重金属镉、铅锌超过了国标“农用污泥中污染物控制标准(酸性土壤),GB 4284-84”规定的限值。由于绍兴污泥中多种重金属元素含量超过了污泥农用和土地利用的国标限值,绍兴污泥不适宜直接进行农用,可通过干化焚烧的方式进行处理,对干化焚烧后的灰渣进行处置时,还应对其中的重金属元素含量和浸出毒性进行检测,以避免残留的重金属对环境的污染。

2.2 污泥干化特性研究结果

将绍兴污泥样品置于小型空心桨叶式干化机中进行污泥干化特性实验,污泥干化速率曲线如图 4 所示。

表1 污泥中重金属含量

Table 1 Heavy metals contents in sludge (mg/kg DS)								
元素	铬	镉	汞	铅	镍	铜	锌	砷
含量	325.2	5.3	0.025	529.4	274.5	365.0	1 428.9	106.0
农用污泥中污染物控制标准 (酸性土壤) GB 4284-84	600	5	5	300	100	250	500	75
城镇污水处理厂污泥处置农用泥质 (B级污泥) CJ/T 309-2009	1 000	15	15	1 000	200	150	3 000	75

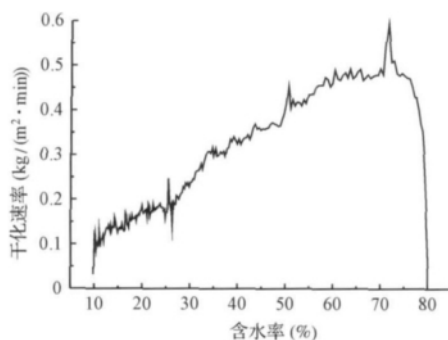


图4 污泥干化速率曲线

Fig. 4 Drying rate curve of sludge

冷态的机械脱水污泥外形呈块状,进入干化机后其温度不断升高,干化速率逐渐加快。污泥干化速率最高可达到 $0.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。当污泥的温度上升至与空心热轴的温度相同时,含水率降至70%左右。随着污泥的受热升温及空心桨叶的搅动,污泥变得十分粘稠,粘附在空心热轴上,污泥不能随空心热轴的转动而搅拌。随着干化的进行,干化速率呈下降趋势。

使用1 t/d 桨叶式干化机对绍兴污泥进行干化,采用GASMET-DX4000 烟气分析仪对干化过程产生的HCl、HF、HCN、NH₃、甲酸、乙酸、甲烷、丙烷等污染性气体进行检测,检测点位置设置在干化机内,实验结果见图5。

由实验结果可以看出,污泥干化过程中产生最多的气体是氨气(NH₃)。氨气是恶臭性气体,是污泥干化臭气味的主要来源。绍兴污泥干化过程中产生的污染性气体的浓度比其他污泥稍高,可通过污泥干化尾气处理装置进行处理。

COD和pH值是污泥干化冷凝液水质的两个重要指标,“城市污水处理厂污水污泥排放标准,GB 18918-2002”规定污水水质的pH排放标准为6.5~8.5,COD浓度二级处理标准为<120 mg/L,一级处理标准为<250 mg/L。

根据绍兴污泥干化冷凝水检测结果,在180℃

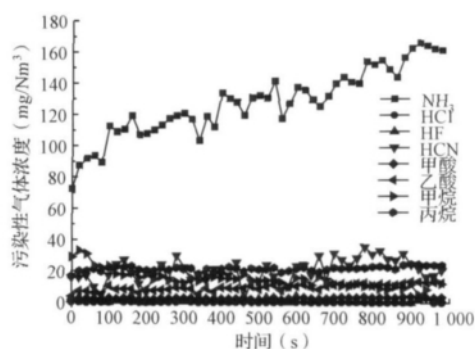


图5 污泥干化过程中污染性气体排放特性

Fig. 5 Characteristics of pollution gases emission in sludge drying process

干化时,其COD为820 mg/L,BOD₅为351 mg/L,氨氮为122.5 mg/L,pH值为8.7。污泥干化冷凝水的COD浓度超过排放标准,但与污水处理厂处理能力相比,污泥干化产生的冷凝液水量不大,且可生化性较好,可回到污水处理厂生化处理工艺内进行处理。

2.3 污泥焚烧特性研究结果

污泥采用流化床工艺进行焚烧处理时,焚烧炉的炉温一般都设计在850℃左右,但污泥焚烧时能否达到设计的炉温与污泥泥质的热工特性,特别是污泥的发热量有很大关系。通过理论计算和实验验证,确定绍兴污泥干化至含水率30%时,可在流化床锅炉内顺利着火燃烧,并使床温达到850℃。

干化后的绍兴污泥在流化床实验装置内焚烧过程中CO、SO₂、NO_x、HCl等常规污染物排放浓度随时间的变化趋势如图6所示。由绍兴污泥流化床焚烧实验烟气排放检测结果看出,绍兴污泥焚烧时产生的SO₂浓度非常高,其他浓度较高的污染气体还有CO和NO_x。

由表2所示的干烟气中污染气体浓度,根据国标“生活垃圾焚烧污染控制标准,GB 18485-2001”,绍兴污泥焚烧时SO₂、NO_x和HCl排放浓度均超标。但上述测试结果均为未经过尾部烟气处理系统的原始排放浓度值,主要目的是为实际工程中尾部烟气

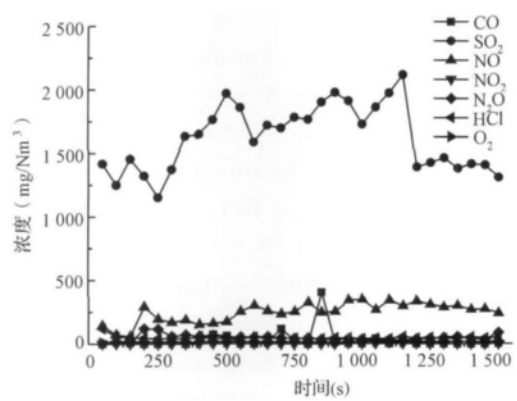


图 6 污泥焚烧过程中常规污染气体排放情况
Fig. 6 Characteristics of conventional pollution gases emission in sludge incineration process

处理系统的设计提供参考值。绍兴污泥进行焚烧处理时应考虑合理设置尾气处理装置,以保证污泥焚烧尾气达标排放。

表 2 污泥焚烧尾气中污染性气体排放浓度均值
Table 2 Mean concentration of pollution gas emission in sludge incineration process
(mg/Nm³ ,氧量 11% 干烟气)

项 目	平均浓度	生活垃圾焚烧污染控制 标准 GB 18485-2001
CO	236	150
SO ₂	9 946	260
NO _x	1 598	400
HCl	200	75

绍兴污泥焚烧过程中,二恶英排放检测结果是 0.237 ng/Nm³,该检测结果是未经任何尾气处理措施的烟气中二恶英的含量。国标“生活垃圾焚烧污染控制标准,GB18485-2001”中规定的焚烧炉二恶英排放限值为 1.0 ng I-TEQ/m³,欧盟标准为 0.1 ng/Nm³。绍兴污泥焚烧烟气中二恶英含量低于生活垃圾焚烧二恶英排放标准,实际工程中经过布袋除尘器的过滤,和活性炭吸附后,大量的飞灰被捕集,二恶英的排放浓度还会有大幅度降低。

国标“生活垃圾焚烧污染控制标准,GB 18485-2001”对固体废弃物焚烧过程排放烟气中重金属的量做出了明确规定。绍兴污泥焚烧产生的烟气中镉、汞、铅含量的检测结果见表 3。重金属镉、铅均超过国标“生活垃圾焚烧污染控制标准,GB 18485-2001”所规定的限值,焚烧烟气应采取相应的处理措施,以使烟气能够达标排放。

表 3 污泥焚烧烟气中重金属含量
Table 3 Heavy metals content in sludge incineration flue gas (mg/kg)

重金属	浓度	生活垃圾焚烧污染控制 标准 GB 18485-2001
镉	22.8	0.1
汞	0.013	0.2
铅	112	1.6

绍兴污泥焚烧灰渣重金属浸出特性检测结果见表 4。由检测结果可见,绍兴污泥焚烧灰渣的重金属浸出毒性未超过国标“危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别,GB 5085.3-2007”规定的限值,污泥焚烧的灰渣可作为建材原料等进行综合利用。

表 4 污泥焚烧灰渣中重金属浸出毒性
Table 4 Leaching toxicity of sludge incineration ash (mg/kg)

项 目	灰	渣	危险废物鉴别标准浸出 毒性鉴别 GB 5085.3-2007
铍	0.00065	0.00044	0.02
铬	0.0072	0.0032	15
镍	1.11	0.53	5
铜	1.49	0.59	100
锌	11.16	4.82	100
砷	0.45	0.37	5
硒	0.034	0.017	1
银	2.6×10^{-6}	$< 10^{-6}$	5
镉	0.81	0.033	1
钡	0.079	0.063	100
汞	< 0.0001	< 0.0001	0.1
铅	0.0062	0.0025	5

3 结 论

根据对绍兴污泥泥质特性、干化和焚烧特性以及处理过程中污染物排放特性的研究,可得出以下结论:

- (1) 绍兴污泥工业分析、元素分析和发热量分析结果与其他污泥接近,发热量较低,焚烧处理前必须进行干化。
- (2) 绍兴污泥的干化速率较高,最高可达 0.6 kg/(m²·min),粘滞区影响较小。干化产生尾气的中氨气浓度较高,在干化工艺设计时应考虑尾气处理装置的设置,避免污泥干化臭气的散播。干化水蒸气冷凝液也应处理后达标排放。
- (3) 绍兴污泥焚烧产生的烟气中 SO₂、NO_x 和

HCl 浓度较高,均超过国标规定的限值,未经处理的烟气中重金属镉和铅浓度也超标。焚烧烟气中二恶英排放量未超过国标规定的限值。焚烧灰渣的重金属浸出毒性未超出国标规定的限值,焚烧灰渣可以进行综合利用。

参考文献

- [1] Mininni G., Di Bartolo Zuccarello R., Lotito V., et al. A design model of sewage sludge incineration plants with energy recovery. *Water Science and Technology*, **1997**, 36(11): 211-218
- [2] Ogada T., Werther J. Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed. *Fuel*, **1996**, 75(5): 617-626
- [3] Werther J., Ogada T. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, **1999**, 25(1): 55-116
- [4] 李军, 王忠民, 张宁. 污泥焚烧工艺技术研究. *环境工程*, **2005**, 23(6): 48-52
Li Jun, Wang Zhongmin, Zhang Ning. The study on the wastewater sludge incineration technology. *Environmental Engineering*, **2005**, 23(6): 48-52(in Chinese)
- [5] 李爱民, 曲艳丽, 杨子贤, 等. 污水污泥干燥过程中表观形态变化及水分析出特性. *化工学报*, **2004**, 55(6): 1011-1015
Li Aimin, Qu Yanli, Yang Zixian. Surface configuration and moisture transference during sewage sludge drying. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, **2004**, 55(6): 1011-1015(in Chinese)
- [6] 黄凌军, 杜红, 鲁承虎, 等. 欧洲污泥干化焚烧处理技术的应用与发展趋势. *给水排水*, **2003**, 29(11): 19-22
Huang Lingjun, Du Hong, Lu Chenghu. Application and development of sludge drying and incineration in Europe. *Water & Wastewater Engineering*, **2003**, 29(11): 19-22(in Chinese)
- [7] Lowe P. Developments in the thermal drying of sewage sludge. *J. Inst. Waste & Environ. Mang.* **1995**, 9(6): 306-310
- [8] Yamahata Y., Izawa H. Experimental study on application of paddle dryers for sludge cake drying. *Proceeding of the 4th International Drying Symposium, Kyoto*, **1984**
- [9] Imoto Y., Kasakura T. The state of the art of sludge drying in Japan. *Drying Technology*, **1993**, 11(7): 1495-1522
- [10] 马侠, 蒋旭光, 马增益, 等. 桨叶式干化机污泥干化试验研究. *能源工程*, **2006**(3): 57-60
Ma Xia, Jiang Xuguang, Ma Zengyi, et al. Experimental study on drying sewage sludge with paddle dryer. *Energy Engineering*, **2006**, 4(3): 57-60(in Chinese)
- [11] Vesilind P. A., Ramsey T. B. Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge. *Waste Management*, **1996**, 14(2): 189-196
- [12] 王兴润, 金宜英, 王志玉, 等. 污水污泥间壁热干燥实验研究. *环境科学*, **2007**, 28(3): 407-410
Wang Xingrun, Jin Yiyang, Wang Zhiyu, et al. Experimental research on indirect thermal drying process of sewage sludge. *Environmental Science*, **2007**, 28(3): 407-410(in Chinese)
- [13] Shimizu T., Toyono M. Emissions of NO_x and N₂O during co-combustion of dried sewage sludge with coal in a circulating fluidized bed combustor. *Fuel*, **2007**, 86(15): 2308-2315
- [14] Shao J., Yan R., Chen H., et al. Emission characteristics of heavy metals and organic pollutants from the combustion of sewage sludge in a fluidized bed combustor. *Energy & Fuels*, **2008**, 22(4): 2278-2283
- [15] Yasuhara A. Role of inorganic chlorides in formation of PCDDs, PCDFs, and coplanar PCBs from combustion of plastics, newspaper, and pulp in an incinerator. *Environmental Science and Technology*, **2002**, 36(18): 3924-3927
- [16] Park J. M., Lee S. B., Kim J. P., et al. Behavior of PAHs from sewage sludge incinerators in Korea. *Waste Management*, **2009**, 29(2): 690-695