

# 污泥流化床焚烧技术研究和环境影响分析

严建华 蒋旭光 池 涌 曾庭华 倪明江 岑可法

(浙江大学热能工程研究所)

**[摘要]** 在分析污泥的各种处理方法如农用填埋、抛海以及回转窑焚烧等基础上,提出了采用污泥异比重流化床焚烧新技术。着重对污泥能量的利用进行分析,并对污泥在流化床内的结团与着火特性进行试验研究,对污泥焚烧后  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、氟、氯以及重金属排放等进行了分析和试验,表明污泥流化床焚烧在技术上可行,污染物排放能满足环保要求,不致引起二次污染。是一种颇具应用前景的污泥处理方法。

**关键词** 污泥 流化床 焚烧技术 环境

**分类号** X703 TK01

## 1 前言

污泥主要来自工业和城市废水处理后的终端产物,仅以我国 1993 年国家环保局环境统计数据显示,仅工业废水就可以生产 1220 万吨污泥,若将生活污水处理后的污泥及造纸污泥等计算在内,污泥量更为可观<sup>[2]</sup>。

污泥中含有较为丰富的有机质和氮磷等营养物质,不加稳定处理的污泥任意排放,污泥中的有机物和氨、氮将大量消耗水体中的氧,造成水体水质恶化,严重影响水生物的生存,污泥中的营养物质会造成水体的富营养化,促使藻类恶性繁殖,造成赤潮和绿潮现象,影响生活用水和工农业用水,使渔业产量下降,造成巨大经济损失;污泥中还含有致病菌和寄生虫卵等危害人类健康的因素,处理不当会造成疾病的传播,故污泥的适用处理技术应使污泥减容、稳定化和无害化<sup>[3]</sup>。

因此,污泥处理总的目标是确保污泥中的有毒有害物质,无论是现在还是将来都不致对人类及环境造成不可接受的危害。处理

的基本要求是污泥体积应尽量小,污泥本身无较大危害性,处理场地适宜,设施结构合理,封场后要定期进行维护和检测<sup>[4]</sup>。

污泥处理的基本方法是通过天然或人工屏障实现有害物质同生物圈的有效隔离。

概括起来说,污泥的处理分为海洋处理和陆地处理两大类。海洋处理主要是指海洋倾倒和远洋焚烧。陆地处理包括农用、土地填埋、浅地层埋藏或深井灌注、做建筑材料、焚烧、热解处理等方法。

近年来,发达国家处理污水净化后产生的污泥,已越来越多地采用焚烧方法,因此从我国国情出发,研制适合我国的污泥焚烧炉已迫在眉睫。

## 2 污泥的焚烧处理方法简介

80 年代初,Cover 和 Greenfield 两人首先作了污泥燃料化的尝试<sup>[5]</sup>,他们直接把浓缩污泥作为原料,用高效蒸发器脱水,制取燃料,被称为 SF 流程。只要其中含有足够的有

收稿日期 1995-05-25

机成份的污泥才可以进行燃料化处理,但上述设想的系统过于复杂,运行成本高。

污泥的焚烧设备有多段炉、回转窑焚烧炉、多室焚烧炉以及流化床焚烧炉等,其中以流化床焚烧炉最具优势。焚烧法特别是流化床焚烧污泥与其它处理方法相比,有以下几个突出优点<sup>[8]</sup>:(1)大大地减少污泥的体积和重量,因而最终需要处理的物质很少,有时燃烧的灰可制成有用的产品其体积可减少(85~90)%,重量减少(65~80)%。(2)污泥的处理速度快不需要长期储存。(3)污泥可就地焚烧,不需要长距离运输。(4)可以回收能量用于发电和供热。

但是焚烧产生的空气污染和有毒物的排放必须受到严格的控制。因此,本文重点对异重流化床焚烧污泥的特性及环境影响进行分析研究。

### 3 污泥的能量利用分析

各种污泥的水份变化很大,从99%至50%均有。水份的变化对于燃料本身的热值影响很大,从而影响能量的回收。

#### 3.1 污泥的性质

试验和分析采用某白纸板厂的带式压滤后的造纸污泥(下同),其燃料分析数据见表1。

对应收到基水份为80%的造纸污泥的低位发热量为438.36 KJ/kg。对于如此低发热量的污泥,单独维持燃烧几乎是不可能的。

表1 污泥的成份分析(%)

项目	C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	M <sub>ar</sub>	V <sub>ad</sub>	M <sub>ad</sub>
含量	6.27	0.93	6.10	0.07	0.02	6.61	80	51.98	5.76

#### 3.2 水份对能量回收的影响

对于水份含量较高的燃料,其潜热损失

占了很大比例。造成可用能降低,图1是造纸污泥的可用能份额与不同水份比例的关系,由图可知,水份造成潜热损失随水份的增加增长很快。特别是当高水份时(>76%),水份的微小变化将引起污泥可用能的大幅度变化,这在实用上是值得注意的。从提高可用能份额的角度讲,我们希望水份尽可能低。但要降低水份,要增加脱水工艺和设备,这除了增加投资、设备、人力,消耗外,同样也要耗用一定的能量,要求的水份越低,脱水的能耗也越大,所以究竟将污泥水份控制在什么范围内合适必须对各方面因素进行综合比较才能确定,这是一个相当复杂的技术经济问题。

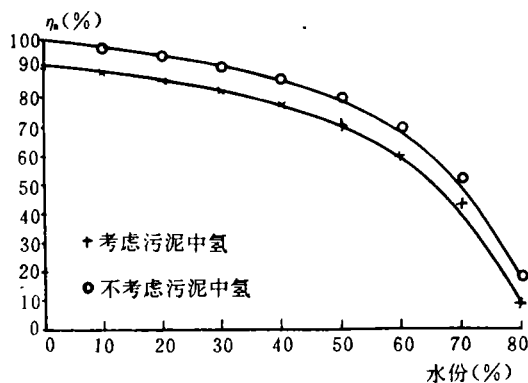


图1 可用能份额与水份的关系

#### 3.3 水份对理论燃烧温度的影响分析

高水份污泥直接送入炉内时,把大量水份带入,而大量水份对燃烧过程产生一些不利的影响,如燃烧温度下降、着火过程延迟,炉内温度波动等。图2给出了不同水份污泥在不同热空气温度下的理论燃烧温度。计算时,假定燃料是由灰份、水份和可燃份三种成分组成,前两种成分是完全惰性的。

流化床燃烧的正常温度在800~1000℃左右,因此,在炉膛绝热情况下,热空气温度为20℃时,60%水份污泥可以维持800℃以上的床温,而高于此水份,要维持稳

定燃烧,需加入一定的辅助燃料。

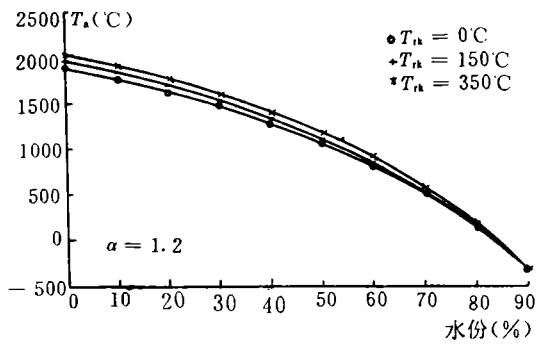


图 2 理论燃烧温度与水份的关系

#### 4 污泥的焚烧特性研究

造纸污泥中很大部分固相物由短小的纤维组成,这些纤维素的比重又比较小,如果投入流化床的污泥在干燥后还原成短小的纤维素,则在通常的流化风速下其必然会立即被吹出床层,从而形成很大的扬析损失,甚至会使正常的燃烧工况都无法组织,而如果我们用降低燃烧风速去迁就短小纤维素不被吹出的要求,又会使流化床锅炉的断面热强度低到无法接受的程度。造纸污泥能否在流化床内稳定燃烧是利用流化床燃烧技术处理造纸污泥的首要问题。

通过实验我们发现了一个十分重要的现象,即污泥在燃烧过程中的凝聚结团现象。这就是说,尽管造纸污泥中的固相物是短小的纤维素,但对相当一部分污泥而言,在其与水混合以聚集状态被投入流化床后,只要工况条件适当,它们在干燥后并不还原成短小的纤维素,而是形成具有一定强度和耐磨性的凝聚团,污泥的这种凝聚结团特性,对其流化床燃烧过程的组织有很大的意义,实际上它是在流化床内组织正常燃烧的基础,也为降低流化床燃烧过程中燃料的扬析损失创造

了极为有利的条件。

##### 4.1 试验方法

结团和着火试验是在一内径为  $\phi 30$  mm 的小型流化床上进行的。

图 3 示出了整个试验装置的简图,床体是一内径为 30 mm,高 280 mm 的罗纹瓷套管,功率为 1 千瓦的电阻丝缠绕在瓷套管外部。布风板采用多孔硅酸铝纤维板,上下由耐热不锈钢丝网压紧。床层温度通过 NiCr-NiSi 热电偶、XCT 控温仪及调压器调节。流化空气用离心式风机供给,流量由转子流量计测定,并由流量调节阀调节。

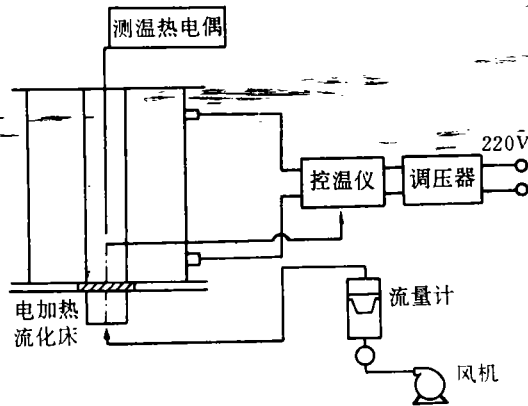


图 3 结团与着火试验系统图

为了测定污泥的结团强度,本试验采用的污泥统一制成直径为 10 mm 圆球。试验时迅速从流化床顶部给入,经一定时间后连同床料迅速倒出,经筛分后,在抗压强度测定仪上进行测定,慢慢地增大压力,以破碎前可达到的最高压力作为污泥的抗压强度值  $S_p$ ,  $S_p$  的单位为 MPa。

研究着火温度对流化床燃烧意义不大,但对指导点火启动还是很有指导作用的。对着火温度的测定采用逐步降低床温观察污泥团能否发红的逼近法,在温度较低时(小于  $700^\circ\text{C}$ )可以观察到挥发份析出,但没有火焰,

只有在温度较高(大于 700℃)才能观察到挥发份析出并燃烧产生火焰的开始时间和结束时间。

### 4.2 结团特性

试验表明污泥凝聚团的抗压强度  $S_p$  在燃烧过程中要经历较长的变化。如图 4 所示。

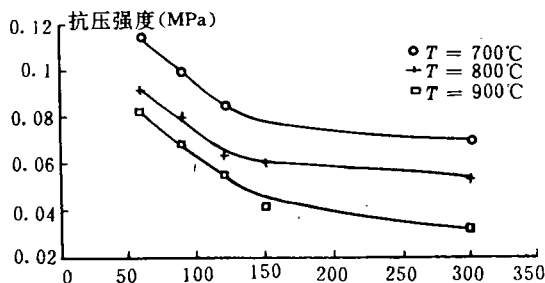


图 4 不同床温下抗压强度与时间的关系

由图可知,在同一床温下,抗压强度  $S_p$  随着时间的延长而变小,而且随着时间的延长,  $S_p$  的变化率也变小,这是由于:

(1) 在加热初期,由于加热速率高引起挥发份的快速析出,造成结构的变化,中间相的发育受到抑制,从而使结团变得“疏松”,强度也相应降低。

(2) 因为污泥挥发份较高,而表面由于粘土等物质的存在而变得比较致密,当污泥受热时,特别是骤然受热时,内部挥发份的析出由于表面比较致密以及受表面张力的作用暂时析不出来,而且随着温度的升高,这些挥发物要经历塑性阶段,最终将导致聚团体积膨胀而中心呈空心状。在这过程中将导致抗压强度急剧变小。最后这些挥发份将先通过某个薄弱处排出。这一现象也说明在利用流化床燃烧技术处理造纸污泥时,污泥挥发份是易于析出的。这对维持稳定燃烧,提高燃烧效率是有利的。

床温对结团强度有十分重要的影响,从图中可以看出,污泥的结团强度随着温度升高而降低。这是由于床温的升高引起挥发份

析出速度变大,造成结构变化也大,对中间相的发育影响也大,因此,强度也变得越低。

### 4.3 着火特性

通过观察可以发现,污泥的着火时间随水份的增加而降低,但在我们的实验温度范围内,即在床温 700 ~ 900℃ 范围内这种变化并不明显。

在床温达到一定值后(> 700℃),着火时间几乎和污泥水份没有关系,而与床温关系比较密切。其原因主要是结团体积较小,水份析出速率很高,而试验水份变化范围也不大,因而析出时间仅与床温有关。如图 5 所示。

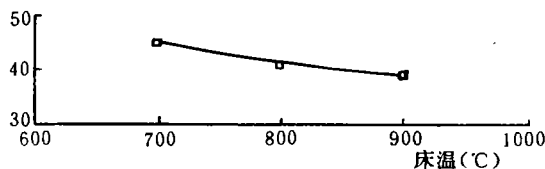


图 5 着火时间与床温变化的关系

现在再来分析水份蒸发对着火过程的影响。假定水份为完全惰性的成份,水份蒸发将引起燃料着火过程的延迟。我们没有对水份蒸发时间作专门实验,但在  $\phi 30$  mm 流化床结团试验过程中,我们发现,即使是含水为 80% 的污泥其着火时间也只有四十秒左右,而对流化床燃烧而言,燃料在炉内的停留时间通常达几十分钟甚至一、二小时,所以着火延迟几十秒不会对污泥在流化床内的燃尽有实质影响。

水份对燃烧过程的另一个可能的影响是造成炉温不稳定,而流化床内由于物料的载热,热惯性较大,从而可以有效地缓和炉温的波动,而流化床内始终有燃烧着的燃料为流化床补充热。

从以上的初步分析可以看到,流化床燃烧在燃用高水份污泥时较其它燃烧有着许多突出的优点,它能够较好地克服大量水份进

入炉内可能引起的燃烧温度降低,着火延迟及炉温波动等不利因素,从而成为处理污泥的一项重要焚烧技术。

## 5 污泥流化床焚烧环境影响分析

采用流化床焚烧法处理污泥,会不会产生二次污染呢?经过对造纸污泥在 900℃ 床温下产生灰渣中重金属锌、铜、钴、铬、镉等的含量分析,最多的锌为 295.8 mg/kg,其余四种均在 45 mg/kg 以下,远低于国标中“农用污泥中有害物质最高允许浓度”。采用离子电极法测得造纸污泥中氯离子含量为 593 mg/kg,氟离子含量为  $5.6 \times 10^{-8}$  mg/kg,可以忽略。即使所有  $\text{Cl}^-$  生成 HCl,其排放也仅为 1.81 ppm,比加拿大 CCME 标准 90 ppm 低许多,污泥中硫全部生成  $\text{SO}_2$  其最高浓度 99 mg/Nm<sup>3</sup>, $\text{NO}_x$  排放按燃料氮转化率 40% 计算为 228 ppm,均低于 GB13271-91 对锅炉大气污染排放规定值。污泥焚烧后产生的主要有害有机物(POHC)在国外已引起相当重视,如甲苯、氯乙烯、二恶英均有毒性,按美国的资源保护法规定 POHC 破坏率(DRE)要求达到 99.99% 以上。可以对各种焚烧反应的动力学方程求得达到上述要求的破坏温度和反应时间,在 850~1000℃ 的流化床焚烧条件下,可求得要求达到 99.99% 破坏率的各种 POHC 停留时间为 2S 以上,这对于采用污泥异比重流化床焚烧炉来说是不难达到

的。因而污泥流化床焚烧可以满足苛刻的环保要求。

## 6 结论

1. 对造纸污泥的研究表明污泥在流化床焚烧炉内可以形成一定强度的结团,可以采用浙大发展的异比重流化床焚烧技术,能实现良好着火。

2. 经过充分分析计算和试验研究表明,造纸污泥采用流化床焚烧技术  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、氟、氯、重金属、POHC 排放均能满足环保要求,从而不致引起二次污染。

3. 污泥流化床焚烧方法在技术上、环境上是可行的,不仅达到了污泥处理的目的,还可回收污泥中的可用能,是一种具有较好应用前景的新方法。

## 参 考 文 献

- 1 赵庆祥. 污泥处理的新途径——燃料化,化工环保,1988,8(3)
- 2 中国国家环保局 1993 年环境统计公报,1994 年
- 3 徐 颖. 污泥用作农肥处置及其环境影响. 环境污染与防治,1993,15(4)
- 4 带振明,高忠爱合编. 固体废弃物的处理与处置. 高等教育出版社,1993
- 5 Greenfield, et al. Graver-Green field Process drying of pulp mill activated sludge for energy recovery in a log fuel boiler proc. Incl waste conf, 34th, 1980
- 6 Ann Ches But Hasbach. Putting sludge to work. Pollution Engineering, Dec. 7, 1991. P62

**作者简介:**严建华,男,1962 年生。1985 年获工程热物理专业硕士学位,1990 年在职获工学博士学位,1992~1993 年赴加拿大新斯科舍工业大学作访问学者。从事循环流化床燃烧合作科研迄今。作为项目负责人和主要参加者承担了 20 余项重要科研项目,发表学术论文 60 余篇,合编专著和教材各 1 本,曾获能源部优秀教材一等奖,全国优秀教材奖和国家教委科技进步二等奖各一项,有发明专利 4 项。现任浙江大学热能工程研究所副所长,国家教委洁净燃烧技术开放实验室主任,博士生导师。(杭州市 310027)

Li Zhongqi, Sun Enzhao (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(1). -20~24

Described in this paper is a combustion technique involving a combination of travelling grate and pulverized coal firing, i. e. , the travelling grate firing and the pulverized coal firing take place in one and the same boiler furnace. Briefly discussed are the mechanism of such a kind of combustion technique and the related boiler structural design features along with a description of a new type of 58 MW hot water boiler incorporating the combined firing technique. Key words; combined firing, grate stoker, pulverized coal fired boiler

污泥流化床焚烧技术研究和环境影响分析 = A Study on Fluidized Bed Sludge Combustion Technology and Analysis of Environmental Impacts [刊/中]/Yan Jianhua, Jiang Xuguang, Chi Yong, Zeng Tinghua, Ni Mingjiang, Cen Kefa (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(1). -25~29

On the basis of analysing the various methods for the disposal of sludge, such as agricultural land filling, throwing into sea and burning in revolving kilns, the authors have come up with a new type of sludge heterospecific-gravity based fluidized bed combustion technology with emphasis on the analysis of sludge energy utilization. An experimental investigation is performed of the sludge caking and ignition characteristics when burned in the fluidized bed. Also analysed and tested are the emissions of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , fluorine, chlorine and heavy metals following the combustion of sludge, which show that the sludge combustion in the fluidized bed is technically feasible and the emissions of pollutants are within the limits demanded by environmental protection requirements with no risk of secondary pollution arising therefrom. One can therefore conclude the above-mentioned technology can be advantageously applied for the disposal of sludge. Key words; sludge disposal, fluidized bed, combustion technology, environment

论发展超临界参数锅炉 = On the Development of Boilers of Supercritical Parameters [刊, 中]/Li Zhiwang, Sun Qingfu, et al (Heilongjiang Electric Power Test Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(1). -30~32

Based on the operation practice and performance of home made 600 MW boilers of supercritical and subcritical steam conditions the authors have analysed the reliability and economics resulting from the use of power generating unit of supercritical parameters. The merit of a lower steel consumption enjoyed by supercritical pressure boilers as compared to subcritical pressure ones testifies to the great significance of developing supercritical pressure boilers. Key words; supercritical pressure, steel consumption, reliability, economics

垃圾的焚烧处理 = Garbage Disposal by way of incineration [刊, 中]/He Weical, Xuan Yinong, Lu Naixuan (Guangzhou Design Institute under the Ministry of Light Industry) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(1)-33~36

This paper gives a brief account of the new developments in garbage disposal by way of incineration and related incineration technology. Key Words; garbage, disposal by incineration

HAT 循环的一种改型—CHAT 循环 = CHAT Cycle—A Modified Version of Humid Air Turbine Cycle