

# 城镇污泥干化焚烧处置技术与工艺简介

闻哲<sup>1</sup>, 王波<sup>1</sup>, 冯荣<sup>1</sup>, 徐芳倩<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海睿信玻璃技术装备工程有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 本文介绍了污泥的基本特性, 对直接热干化、间接热干化、直接-间接联合热干化和其它污泥干化技术的工作原理和优缺点进行了比较, 重点讨论单独焚烧、电站锅炉掺烧、垃圾焚烧炉掺烧和水泥窑掺烧等污泥焚烧技术的工艺路线、应用情况和技术特点。分析可知, 污泥干化焚烧技术类型多样, 采用烟气或蒸汽对污泥进行干化都是可行的, 干化污泥单独焚烧、电站锅炉掺烧或者水泥窑协同处置等都有成功案例, 应根据具体条件选择合适的工艺, 其中将污泥干化后利用流化床焚烧炉进行单独焚烧或在电站锅炉上进行掺烧是最具应用前景的技术路线, 而污泥输送、高效干化技术与设备开发及厂区臭气治理等是有待进一步研究的问题。

**关键词:** 固体废弃物; 污泥处置; 干化; 焚烧

中图分类号: X705 文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.09.001

## 引言

城镇污水处理厂是污泥的主要来源, 随着我国社会经济的发展, 污水处理量和污泥产量都越来越大。据环境保护部统计, 2014年全国城镇污水处理设施总设计处理能力1.71亿m<sup>3</sup>/日, 平均日处理水量1.35亿m<sup>3</sup>。污泥产量与污水处理工艺及标准的高低有关系, 约占处理水量的0.3%~0.5% (以含水率97%计)<sup>[1]</sup>, 按每万m<sup>3</sup>污水产生约1t干污泥量折算, 2014年全国每天产生的污泥量已经达到了1.35万t全干污泥, 折合约6.75万t含水率80%的污泥。

污泥是由水分、有机颗粒和无机颗粒等组成的絮状体, 其中含有大量重金属、病原体和难降解的有毒有机物, 还会散发臭气, 如果不对污泥加以有效的处理, 会严重污染环境, 影响人们的身体健康, 污泥处置和资源化利用, 已成为环境保护的重点。目前,

污泥的预处理有调理、浓缩、脱水、稳定化和干化等技术, 污泥的最终处置包括填埋、土地利用、建材利用、生物处理和焚烧等方式, 热解、气化和热水解等新兴技术也正在研究开发。

污泥焚烧是一种常见的污泥最终处置方法, 污泥中的有机物在高温条件下与充足的氧气发生燃烧反应后彻底转化为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O等产物, 从而实现污泥减容、减量和无害化的技术。要达到良好的处理效果, 应满足“3T”原则, 即保证合适的焚烧温度 (Temperature)、可燃质和氧气充分混合 (Turbulence) 以及反应完成所需的停留时间 (Time)。污泥经过浓缩和机械脱水处理后仍有较高的含水率, 为了降低进入锅炉的污泥含水率, 提高污泥热值, 需要对污泥进行干化。通过干化可以把脱水污泥中的水分进一步蒸发去除, 避免或减少辅助燃料消耗, 降低锅炉排烟热损失。因此干化结合焚烧的处理处置技术能最大限度地实现污泥的减量化和资源化, 具有良好的应用前景。

## 1 污泥干化技术

污泥干化中水分的去除主要经历蒸发过程和扩散过程, 包括传统热干化、太阳能干化、微波加热干化、超声波干化及生物干化等技术。目前应用最广泛的是热干化技术<sup>[2~3]</sup>, 污泥热干化技术根据热介质与污泥的接触方式又可分为直接热干化、间接热干化和直接-间接联合热干化技术。

### 1.1 直接热干化技术

直接热干化是利用热烟或热风等介质, 与污泥直接接触, 在高温作用下污泥中的水分被蒸发, 使污泥的含固率提高至85%以上<sup>[4~5]</sup>, 该技术可在无氧

收稿日期: 2015-07-14; 修订日期: 2015-10-20

作者简介: 闻哲 (1991-), 男, 浙江舟山人, 上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 王波 (1981-), 男, 四川珙县人, 上海理工大学副教授。

或低氧环境中进行操作,干化后污泥呈颗粒状,粒径大小可以控制,干燥乏气循环回用,减少尾气的排放,降低处理总成本。相关的干化设备包括喷雾干化塔、带式干化机、滚筒式干化机、旋流闪蒸污泥干化机等。

以喷雾干化为例,其工作原理是利用雾化器将污泥分散为雾滴,并用热空气进行干燥。由于污泥在高温条件下易燃烧,常采用下向流并流干燥,如图1所示<sup>[6]</sup>,即喷嘴安装在塔的顶部,污泥和热空气均从塔顶进入,并在温度最高区域接触混合,污泥中的水分迅速蒸发,使得空气温度急剧下降;当颗粒运动到塔的下部时,干化完毕,空气温度也降低至最低点。

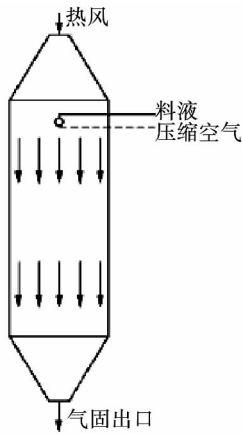


图1 下向流并流干燥示意图

Fig. 1 Parallel flow drying in the downward flows

这种技术的优点是污泥和热介质直接接触,传输效率及蒸发速率高,干燥流程短,设备结构紧凑,初期投资较低;缺点是采用高温烟气或热风作为加热热源,可用能损失大;干燥尾气的流量大,尾气净化和余热回收难度高;干燥系统的抑燃、防爆要求比较苛刻。

### 1.2 间接热干化技术

间接热干化是由加热设备提供的蒸汽或导热油通过干化设备的传热元件表面将热量传递给另一侧的污泥,使污泥中的水分蒸发。污泥蒸发的水分进入冷凝器中加以冷凝,热介质全部或部分回到原系统中循环利用。主要设备有桨叶式干化机、间接接触回转式干化机、转盘式干化机、薄层干化机等<sup>[7~8]</sup>。

常用的桨叶式干化机如图2所示,主要传热面

是焊接在两根空心轴上的空心桨叶热轴表面,叶片为楔形,对污泥有搅拌、挤压的作用。由于两个相互啮合的热轴异向旋转,可以清理污泥,防止粘壁而影响传热效果。桨叶式干化机传热面大,结构紧凑,占地面积小;无需空气循环,内部含氧量低,装置安全可靠;可通过调整进泥量、污泥输送速度、供热量等措施,防止进泥含水率的波动,但其本身没有轴向推力,物料机械清空存在难度,换热面不具备机械强制更新,容易结垢。

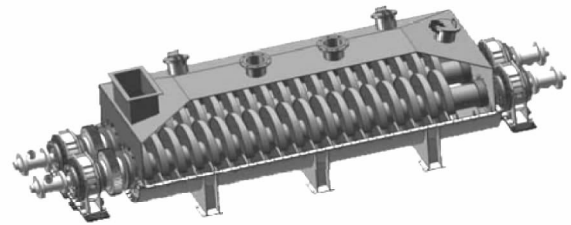


图2 桨叶式干燥机结构示意图

Fig. 2 Structure of a propeller type dryer

间接热干化技术采用低压蒸汽等低品位热源,可用能损失小,系统热效率高;干燥尾气处理量小,干化蒸汽容易冷凝;可有效避开污泥的塑性阶段,且操作温度较低,污泥中可燃成分损失少;系统安全性好,自动化程度高。但污泥和热媒属于间壁式换热,传热系数低于直接接触换热,干化速率较低,单位干化面积处理量小,设备体积大,初期投资较高,干化设备的传热元件结构复杂,运动部件多,耐腐蚀、防磨损的要求高。

### 1.3 直接-间接联合热干化技术

直接-间接联合热干化是直接接触加热和间接接触加热两种方式相结合的干化技术,如流化床干化技术<sup>[9]</sup>。

流化床干化机主要由风箱、中间段和抽吸罩组成,如图3所示。通过流化床下部风箱,将循环气体送入流化床,污泥颗粒在床内流态化并混合,通过循环气体不断流过并加热物料层,同时还在床层内布置了埋管,管内通蒸汽或导热油,对管外污泥颗粒进行加热,达到干化的目的。这种技术的优点是设备比较紧凑,缺点是系统比较复杂,流化风机电耗较高,埋管磨损较快。

### 1.4 其它污泥干化技术

随着科技的进步与时代的发展,一些新兴污泥

干化技术不断涌现,如太阳能干化技术、微波干化技术、电渗透污泥干化脱水技术等<sup>[10~12]</sup>。太阳能干化具有显著的节能效果,工艺相对成熟,技术要求低,易于建设,但其效率不高,干化时间长,占地面积大,同时易造成污泥内部的厌氧消化,产生恶臭气体。微波干化污泥能高效地去除水分,对重金属有一定的稳定作用,有利于污泥的最终处置,但所用设备复杂,不能连续运行。

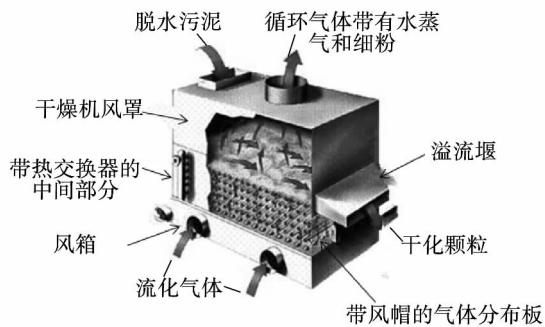


图3 流化床干化机结构示意图

Fig. 3 Fluidized bed dryer

综上所述,污泥干化技术工艺类型众多,但传统的热干化技术仍是目前主流干化技术。评价干化技术的优劣,很大程度上要结合干化机的使用环境和条件,如干化现场的地理位置、空间大小、污泥处理量、污泥特性、污泥干化后用途和热源条件等。在满足一定的干化率、无二次污染的前提下,应充分利用干化产品资源化等手段来降低干化成本,如何发挥不同干化技术的优势,将是未来污泥干化技术研究和发展的方向。

## 2 污泥焚烧工艺

根据焚烧系统使用的燃料,污泥焚烧可分为单独焚烧和与其他燃料混合焚烧;根据是否进行干化处理,污泥焚烧分为直接焚烧和干化后焚烧;根据所采用的焚烧装置,污泥焚烧可分为炉排炉焚烧、流化床焚烧、熔融炉焚烧、回转窑焚烧和电站锅炉掺烧等。

### 2.1 污泥单独干化焚烧工艺

#### 2.1.1 工艺原理

污泥的含水率较高,在不添加或添加少量辅助燃料的情况下,为了维持燃烧稳定,脱水污泥一般先

进行一定程度的干化再单独焚烧。干化程度主要根据能量平衡和实际需要确定,分为完全干化后焚烧和半干化后焚烧。

完全干化系统蒸发水分多、干化能量需求大、系统安全性要求高。当污泥中砂质成分含量较大时,设备材质等需要特别考虑耐磨特性,且存在粉尘多、易燃易爆及磨损等问题,实际应用较少,半干化后焚烧工艺则应用较多。干化污泥含固率应控制在70%以下,既要保证干化设备不在污泥的粘滞区域工作,又要满足污泥干化焚烧系统自身能量平衡的需要。干化后的污泥再送至专用的污泥焚烧炉进行焚烧,产生的高温烟气热能用于焚烧炉本身空气加热和污泥预干化热媒介质加热。

在污泥单独干化焚烧系统中,普遍采用流化床焚烧炉,也有个别采用回转窑或其它燃烧设备。流化床既可以直接焚烧机械脱水污泥,也可以焚烧干化后的污泥,其用于污泥焚烧处置具有以下优点<sup>[13~15]</sup>:(1)床料处于流动状态且本身能储存大量热量,物料快速分散均匀,传质传热速率快,使床层反应温度均匀,床内温度能得到较好控制,很少发生局部过热现象;(2)结构简单、燃烧效率高,可以在较低过量空气系数下运行,稳定性高;(3)燃料适用性广,适合处理污泥这种热值低、挥发份含量高的劣质燃料;(4)能减少有害气体 $SO_2$ 和 $NO_x$ 等的排放,对环境更友好等。相比之下,回转窑焚烧炉对给料的预处理要求低,运行控制较为简单,但其炉体转动缓慢,污泥处理量不大,耐火材料衬里磨损严重,维修频率较高,燃烧不易控制,燃烧效率也不是很高,主要是因为污泥在回转过程中形成球团,外部被烧结而内部没有完全燃烧。因此,流化床焚烧炉得到了较好的应用,是目前市场占有率最高的污泥焚烧设备<sup>[16]</sup>。

#### 2.1.2 应用实例

1995年,韩国进道公司承担清州污水处理厂污泥的焚烧处理项目,由浙江大学热能所开发制造了65 t/天污泥流化床焚烧炉<sup>[17~18]</sup>。该流化床焚烧炉以油作辅助燃料,采用低流化风速的异密度流化床技术,不设溢流口;炉膛出口设U形分离器分离细床料和飞灰,以减小床料损失,提高燃尽程度;焚烧炉采用床下点火方式,实现点火自动控制。

上海石洞口污水厂污泥干化焚烧工程处理规模300 t/天,低温干化和高温焚烧二套系统串联运行,

如图 4 所示。脱水污泥经过流化床干化机干化,将含水率降低到 10% 后进入流化床锅炉焚烧,污泥焚烧产生的高温烟气用来加热导热油,冷却后的烟气经过脱硫和除尘,通过烟囱排入大气,热导热油进入流化床污泥干化机,作为干化污泥的加热介质,放出热量后的导热油再回到锅炉中吸热。当污泥焚烧提供的热量不能满足干化需要时,可向流化床锅炉中添加适量的煤。

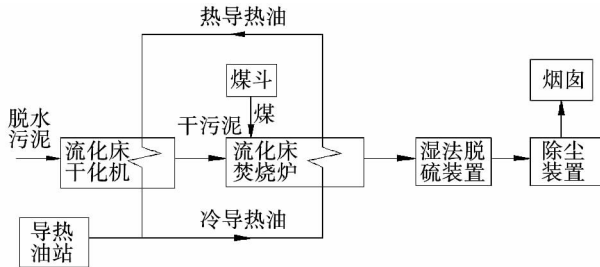


图 4 石洞口污泥处理工程工艺流程图  
Fig. 4 Flow chart for the sludge treatment process in Shidongkou project

嘉兴新嘉爱斯公司污泥干化焚烧热电联产工程设计总规模 2 050 t/天,采用污泥蒸汽干化和循环流化床单独焚烧技术,焚烧工艺中添加了部分煤作为补充燃料,产生蒸汽部分用于污泥干化,同时配套 50 MW 发电机组。

上海竹园污泥处理工程设计规模为 750 t/天,采用半干化、焚烧、烟气处理工艺,使用桨叶式干化机将污泥含水率从 80% 降至 40% 左右,干化后的污泥进入鼓泡流化床单独焚烧,烟气进入余热锅炉产生蒸汽供污泥干化使用,是目前国内最大的污泥干化焚烧工程。

绍兴市环兴污泥处理有限公司污泥干化焚烧工程设计总规模 1 200 t/天,采用污泥烟气喷雾干燥技术和回转窑焚烧技术。干化后的污泥在回转窑中焚烧产生的高温烟气,作为污泥干化的热介质,湿污泥进入干化段前通过雾化器雾化后喷入高温烟气中进行干燥。

(3) 技术特点

污泥单独干化焚烧厂是专为污泥的焚烧而设计新建,技术针对性强,能最大限度的实现污泥无害化、减量化和资源化的处置,在污染物排放的总量控制方面也是较优的方案。

但是,由于目前普遍采用抽取蒸汽在干化机中

对污泥进行间壁式加热干化<sup>[19-20]</sup>,单独的污泥干化焚烧厂会受到可用蒸汽量和干化机性能的限制,干化后污泥仍有较高的含水率,锅炉排烟温度高,热效率低,处理规模也较小,干化过程产生的高含湿乏气的余热,也缺乏足够的冷却介质进行回收利用。单独焚烧污泥所产生的灰渣中,重金属含量较高,后续处理要求高,资源化利用难度大。总体而言,新建一座专门用于污泥干化焚烧的工厂需要很大的资金投入,成本较高。

2.2 电站锅炉掺烧工艺

2.2.1 工艺原理

由于火力发电厂中有大量的蒸汽和烟气可作为污泥干化的热源,电站锅炉燃煤消耗量大,炉膛火焰温度高,利用火力发电厂进行污泥干化焚烧有巨大的潜力<sup>[21-23]</sup>。

在电厂中进行污泥干化有三种不同的方法:一是利用锅炉排烟余热进行直接干化,烟气低速流过污泥层,并与污泥直接接触,吸收污泥中的水分,由于排烟温度较低,这种干化方法所需烟气量大、干化速率较低,尾气处理量大;二是抽取低压蒸汽作为干燥介质,在桨叶式干化机或圆盘干化机等设备中对污泥进行间接干化,这种干化方法可充分利用低压蒸汽余热,降低汽轮机冷端损失,系统热效率高;三是借鉴褐煤机组高温炉烟干燥技术,抽取炉膛出口高温烟气、除尘器出口冷烟气和热风混合后作为干燥介质,该方法干化速率高、流程短,但可用能损失一般比蒸汽干化大,安全性要求高。目前国内在运行的掺烧系统大多属于依托现有发电厂进行的技改项目,因此普遍采用蒸汽干化方式,以减少对原有发电系统的改造。

污泥在电厂的焚烧,根据锅炉型式不同又可以分为两大类:

(1) 流化床锅炉污泥掺烧技术

在早期的电厂掺烧污泥中,脱水污泥一般未经干化就直接送入炉内,污泥随后被大量处于流化状态的高温惰性床料冲散,呈颗粒状在流化床内燃烧,掺烧比大约在 20% ~ 25% 之间,其所占床料重量比很小,燃尽率高,且不会产生黏结。近年来,污泥一般先进行干化,再送入流化床锅炉内燃烧。

(2) 煤粉锅炉污泥掺烧技术

该技术是先将污泥干化,干化后的污泥输送到炉前,与煤混合进入制粉系统并研磨至所要求的细

度后,再进入锅炉燃烧。

### 2.2.2 应用实例

华电滕州新源热电公司于 2008 年 12 月在 150 MW 机组上成功运行城市污泥干化焚烧系统。该系统抽取电厂锅炉烟气,对含水率 75%~80% 的城市污泥进行干化,干化后的污泥掺入电厂输煤系统,送入锅炉燃烧,开创了国内 100 MW 以上机组污泥掺烧处置的先河。

北仑电厂污泥干化焚烧项目一期工程设计规模 200 t/天,工艺流程如图 5 所示。含水率 80% 的湿污泥由污泥运输车送入湿污泥仓,通过双螺旋输送机打入污泥泵中,再由泵送至圆盘式干化机进行蒸发脱水,出来的干污泥含水率在 20%~40% 之间,通过皮带输送机被送到干污泥储仓进行储存,待电厂指定的输煤系统工作时,将干污泥送到输煤皮带上,与原煤混合后入炉焚烧。干化机中的加热蒸汽来自电厂,蒸汽冷凝后产生的疏水通过热交换装置,利用余热可加热生活水;湿污泥蒸发产生的废气经洗涤塔冷却净化处理后再进入生物除臭系统,达到国家二级排放标准后直接排放。嘉兴电厂 250 t/

天污泥干化焚烧项目也采用这种工艺路线,在 300 MW 锅炉上进行掺烧。

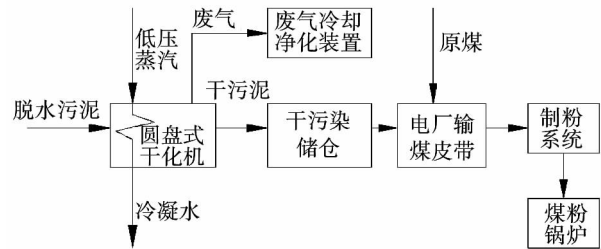


图 5 北仑电厂污泥处理工程工艺流程图

Fig. 5 Flow chart for the sludge treatment process in Beilun Power Plant

在德国,利用煤粉锅炉掺烧污泥已有多个成功的工程,如表 1 所示<sup>[24]</sup>。这些污泥处置工程的特点是处理规模大,混烧比例多数在 5% 左右,掺烧少量污泥,不会影响电厂环保指标达标。美国威斯康辛州和底特律市也有这类混烧发电厂,日本则是将污泥与煤粉共同造粒制成污泥燃料,然后进行混烧。

表 1 德国污泥与煤掺烧工程实例

Tab. 1 Examples of the projects burning coal diluted and mixed with sludge in Germany

公司名称	锅炉类型	锅炉容量/MW	污泥状态	投产时间	湿污泥掺烧比例/%	干物质质量比例/%	折算干污泥处置规模 t/a
Boxberg, VEAG	褐煤煤粉炉	2×500	脱水	1999 年	3~5	1	30 000
Buschhaus BKB	褐煤煤粉炉	930	脱水干化	1998 年	5	5	80 000
Frankenll Bayernwerke	无烟煤煤粉炉	1 047	脱水干化	1998 年	5	1.5	35 000

### 2.2.3 技术特点

电站锅炉掺烧污泥的优势明显;第一,电站锅炉炉内燃烧稳定,温度高,污染物分解彻底;第二,电站锅炉容量大,燃料消耗量大,即使掺烧较低比例的污泥,能实现的污泥处理量仍然很大,而且不会对锅炉安全运行产生影响;第三,现代大型电厂往往装备有先进的烟气净化系统,它能对污泥燃烧带来的污染物进行净化处理,不会引发环保问题。实践证明,污泥占燃煤总量的 5% 以内,对电厂环保指标达标以及安全运行无不利影响。

但是电站锅炉掺烧也存在以下问题:一是需增加污泥储运、干化,臭气和粉尘控制等所需的设备,会增加一定的投资;二是当臭气控制设施不到位时,

可能会严重影响厂区工作环境,从而降低电厂掺烧污泥的积极性;三是干化后的污泥存在自燃、爆炸的隐患,污泥中的氮、硫和重金属含量较高,掺烧比例过高则会导致混烧过程中 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 和重金属排放增加,降低电厂发电效率。

### 2.3 垃圾焚烧炉掺烧工艺

垃圾发电厂具有完备的焚烧系统和尾气处理系统,为污泥掺烧提供了条件。将污泥和生活垃圾掺混入炉焚烧,在炉膛高温作用下,可将有毒有害有机物氧化分解,污泥焚烧产生的热量可回收用于发电。垃圾焚烧炉烟气出口温度高于 850 ℃,炉内烟气停留时间大于 2 s,可有效抑制焚烧过程中二噁英及其它有害不完全燃烧产物的形成。常用的燃烧装置包

括机械炉排炉和流化床炉等<sup>[25~26]</sup>。

1934年,美国密歇根州安装的一套多层炉排炉污泥焚烧系统,至今已有80多年的历史。在日本,含水率80%左右的污泥大多数分散到各垃圾焚烧厂进行掺烧处置,如日本长野垃圾焚烧厂,处理量为180 t/天,脱水污泥掺烧比例为5%~10%。深圳盐田垃圾焚烧厂是国内第一个自主设计炉排的垃圾焚烧发电厂,掺烧污泥约40 t/天,处理设备和技术工艺比较先进,烟尘排放等各项指标均达到了欧共体标准,远远低于国家标准。

我国垃圾焚烧行业经过多年发展,以机械炉排炉为主的垃圾焚烧工艺逐渐完善,具有一定的规模,相对于新建一座污泥焚烧厂而言,大大降低投资<sup>[27]</sup>。但是污泥与垃圾掺烧不可避免地存在一些问题:(1)炉排炉机械设备较多,结构复杂,运行控制和设备维护工作量大,热效率低;(2)含水率高的污泥与垃圾掺烧时会降低燃料的低位热值,需控制掺烧比例,污泥与垃圾在炉排上混合不理想时,也会引起焚烧波动;(3)为保证掺烧效果,往往向焚烧炉添加辅助燃料,增加运行成本等。以上因素制约了垃圾焚烧厂掺烧污泥发电技术的推广应用。

#### 2.4 水泥窑掺烧工艺

将干燥后的污泥或污泥焚烧后的焚烧灰投入水泥窑中混烧是污泥建材化利用的一种重要形式。水泥窑协同处置污水处理厂污泥,是将污泥采用密封的运输方式,输送到指定地点后利用水泥窑窑尾的高温进行煅烧处置,最终转化成水泥熟料产品,无废弃物遗留。

广州越堡水泥有限公司采用干化后计量入窑处置污泥,在6 000 t/天生产线上新建一座日处理污泥600 t(含水率80%)的干化处置中心<sup>[28]</sup>,将污泥干化后作为燃料进行焚烧,焚烧残渣替代黏土作为硅质、铝质原料,该工程的干化系统和水泥窑衔接布置,采用旋流喷腾直接干化工艺,利用窑尾废弃余热烘干污泥,提高热效率,实现规模化处置污泥的能力。

用水泥厂煅烧设备处理污水污泥,不仅解决了污泥的处理处置问题,还可以利用污泥替代部分水泥原料生产熟料。水泥回转窑的温度一般在1 350℃以上,燃烧气体的总停留时间约为20 s,有机物几乎全部分解,基本不排放二噁英类物质,并且

回转窑工况稳定,处理量大,不会影响水泥产品的质量。

尽管不少企业在利用水泥窑协同处置污泥方面获得了成功,但其技术仍不够成熟,项目的生产和折旧成本较高,尤其是含水率高的湿污泥直接进入1 000℃以上的烟室后,会造成烟室温度出现较大波动,使得能耗加大,且如果处置不当,会产生臭气污染。

#### 2.5 其它污泥焚烧工艺

除了上述主流技术外,还有污泥熔融焚烧、热解-焚烧、气化-焚烧等技术。比如,在日本东京以南的Nanbu污泥熔融焚烧厂,每日处理含固量20%的湿污泥160 t,是日本最大的污泥熔融焚烧厂<sup>[29]</sup>,湿污泥被预先干燥到含固率达80%以上,经磨制后送入旋风熔融炉同气体燃料混烧,烟气热量被余热锅炉和空气预热器利用,锅炉产生的蒸汽用于污泥的干燥;德国Obrigheim污水处理厂采用Eco Dry污泥处理系统<sup>[30]</sup>,结合转鼓式干化系统与旋风炉焚烧系统,部分干化的污泥与湿污泥返混,使污泥含水率降低至35%左右,被热气流送入转鼓式干燥器,焚烧炉产生的高温烟气通过热交换器回收热量,经吸收塔净化处理后排入大气。目前,这些技术受到系统复杂、操作要求高等因素的制约,应用实例还比较少。

#### 2.6 污泥干化焚烧工艺的发展趋势

综观国内外污泥焚烧处置技术的研究和应用情况,污泥干化焚烧技术类型多样,采用烟气或蒸汽对污泥进行干化都是可行的,干化污泥单独焚烧、在电站锅炉上掺烧或者是水泥窑协同处置等都有成功案例,应根据具体情况因地制宜地选择合适的工艺。污泥焚烧系统的技术难点在于如何确保污泥输送的稳定性,提高干化机的效率和寿命,控制厂区内污泥臭气的扩散,以及焚烧烟气的净化处理。

相比之下,污泥焚烧最具应用前景的技术发展路线有两条:一是将污泥干化后利用流化床焚烧炉进行单独焚烧,二是将污泥干化后在电站锅炉上进行掺烧。当依托电站锅炉掺烧污泥时,通常采用蒸汽干化系统,可减少对现有系统的改造,获得较高的热效率;特别地,对于采用高温炉烟干燥的褐煤发电机组,可充分利用已有褐煤干燥系统对污泥进行高温烟气干化。当新建独立的污泥焚烧厂时,采用蒸

汽干化与流化床锅炉相结合的方式可以减少辅助燃料的消耗,有利于重金属等污染物排放总量的控制。在处理规模、投资和运行成本方面,依托大型电站锅炉进行污泥掺烧更有优势。

### 3 总结与展望

污泥处理问题已经成为目前我国亟待解决的环境问题之一,传统的污泥处置方法已不适应当今社会的发展要求。在土地资源日趋紧张,土壤和地下水保护问题日益突出的背景下,污泥焚烧具有占地面积小、处理量大、处理速度快、无害化相对彻底等优点,有良好的推广应用价值。

我国在污泥焚烧处置技术领域已进行大量的研究和应用,但也存在一些问题值得进一步深入探讨:

(1) 污泥的输送。目前投运的污泥干化焚烧系统中,大多采用螺杆泵或柱塞泵进行湿污泥输送,用刮板输送机和卡车进行干化污泥的输送和转运。随着污水来源和处理工艺的多样化,送到焚烧厂的污泥的含水率和输送性能波动较大,杂质较多,对污泥输送系统的适应能力和运行稳定性提出了更高的要求。污泥输送和转运过程中的臭气扩散,对生产环境影响很大,制约了电厂掺烧污泥的积极性,也有待彻底解决;

(2) 污泥干化新工艺开发和干化设备国产化。污泥干化是污泥焚烧系统中的关键环节,需要消耗大量的热量,成本很高,成为制约污泥焚烧工艺发展的关键因素之一,开发高效、节能、紧凑的干化新工艺具有重要意义。国内生产具有自主知识产权的大容量、高效率污泥干化设备的企业还比较少,许多工程中都采用进口设备;

(3) 电站锅炉掺烧污泥的系统设计。现有的电站锅炉掺烧污泥项目,基本上都是原有发电系统投运多年后再建设的,污泥的输送和干化等系统与原有发电系统的集成难以达到最优化,造成污泥输送线路长、布置困难、运行成本高等问题。

总之,开发新型污泥焚烧处置技术,扩大处置容量,提高干化效率,降低系统能耗,实现污染物零排放,将是污泥处置领域的一个重要发展方向。

#### 参考文献:

[1] 张贺飞,徐燕,曾正中,等.国外城市污泥处理处置方式研究

及对我国的启示[D].环境工程,2010,28(S1):434-438.

ZHANG He-fei,XU Yan,ZENG Zheng-zhong,et al. Municipal sludge treatment and disposal modes in overseas and its enlightenment for China [D]. Environmental Engineering,2010,28(S1):434-438.

[2] Zhonghao Rao,Yuemin Zhao,Congliang Huang,et al. Recent developments in drying and dewatering for low rank coals [J]. Progress in Energy and Combustion Science 2015,46:2-5.

[3] Jiang J G,Du X J,Yang S H. Analysis of the combustion of sewage sludge-derived fuel by a thermogravimetric method in China [J]. Waste Management 2010,30(7):1407-1413.

[4] 王睿坤,刘建忠,虞育杰,等.城市污泥特性及其干化技术[J].给水排水,2010,36:153-157.

WANG Rui-kun,LIU Jian-zhong,YU Yu-jie,et al. Municipal sludge characteristics and drying technologies [J]. Water Supply and Drainage 2010,36:153-157.

[5] 李辉,吴晓芙,蒋龙波,等.城市污泥脱水干化技术进展[J].环境工程,2014,32(197):105-106.

LI Hui,WU Xiao-fu,JIANG Long-bo,et al. Progress in the municipal sludge dewatering and drying technologies [J]. Environmental Engineering,2014,32(197):105-106.

[6] 王平,杭世珺,黄鸥,等.喷雾干燥与回转窑焚烧联合处理污泥技术的工程应用[J].给水排水,2013,39(1):44-48.

WANG Ping,HANG Shi-jun,HUANG Ou,et al. Applications of the atomization drying and rotary kiln incineration combined sludge processing technologies in engineering projects [J]. Water Supply and Drainage 2013,39(1):44-48.

[7] Thijs Defraey. Advanced computational modelling for drying processes-A review [J]. Applied Energy 2014,131:324-326.

[8] 张辰.污泥处理处置技术与工程实例[M].北京:化学工业出版社,2006:138-139.

ZHANG Chen. Sludge treatment and disposal technologies and engineering examples [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2006:138-139.

[9] 邓文义.污泥间接式干化机理及处置过程中过程污染物排放特性研究[D].浙江:浙江大学能源系,2009.

DENG Wen-yi. Study of the emission characteristics of pollutants in the indirect type sludge drying mechanism and sludge treatment process [D]. Zhejiang: Department of Energy Source Zhejiang University,2009.

[10] 张栋,王三反.新型污泥干化技术综述[J].江苏农业科学,2013,41(7):337-338.

ZHANG Dong,WANG San-fan. Survey of new sludge drying technologies [J]. Jiangsu Agricultural Science,2013,41(7):337-338.

[11] 李家祥,贺阳,范跃华.4种污泥干化技术及设备的比较与展望[J].中国市政工程,2013,(1):80-83.

LI Jia-xiang,HE Yang,FAN Yue-hua. Comparison and prospects

- of the drying technologies and equipment items for four kinds of sludge [J]. *China Municipal Engineering* 2013 (1): 80–83.
- [12] LyesBennamoun. Solar drying of wastewater sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012 (16): 1064–1065.
- [13] 刘沪滨. 各种焚烧炉在市政下水污泥焚烧中的应用 [J]. *中国高新技术企业* 2009, 15: 34–35.  
LIU Hu-bin. Applications of various incinerators in municipal sewage sludge incineration [J]. *China High-tech Enterprises*, 2009, 15: 34–35.
- [14] 叶东, 刘英. 鼓泡焚烧炉在污泥焚烧领域中的应用 [J]. *广州化工* 2010, 38(2): 163–164.  
YE Dong, LIU Ying. Applications of the bubbling incinerators in the domain of sludge incineration [J]. *Guangzhou Chemical Industry* 2010, 38(2): 163–164.
- [15] 李云玉. 循环流化床一体化污泥焚烧工艺实验研究 [D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012.  
LI Yun-yu. Experimental study of the integrated sludge incineration technology in circulating fluidized beds [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermo-physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [16] Wenyi Deng, Jianhua Ya, Xiaodong Li et al. Emission characteristics of volatile compounds during sludge's drying process [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2009, 162: 186–192.
- [17] 池涌, 李晓东, 严建华, 等. 洗煤泥与污泥处理焚烧技术及工程实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 113–114.  
CHI Yong, LI Xiao-dong, YAN Jian-hua, et al. Coal washing-produced mud and sludge incineration technology and engineering examples [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 113–114.
- [18] 李晓东, 岑宇虹. 65 t/d 高水分城市废水污泥流化床焚烧炉的研制开发 [J]. *电站系统工程* 2000, 16(6): 356–359.  
LI Xiao-dong, CEN Yu-hong. Development of a 65 t/d high water content municipal waste water and sludge fluidized bed incinerator [J]. *Power Plant System Engineering*, 2000, 16(6): 356–359.
- [19] J. Vaxelaire, J. M. Bongiovanni, P. Mousques, et al. Thermal drying of residual sludge [J]. *Pergamon Press* 2000, 34(17): 4318–4323.
- [20] 祝初梅, 田辉, 赵娟. 污泥干化焚烧热平衡计算 [J]. *中国资源综合利用* 2013, 31(2): 29–31.  
ZHU Chu-mei, TIAN Hui, ZHAO Juan. Sludge drying and incineration heat balance calculation [J]. *China Resource Comprehensive Utilization* 2013, 31(2): 29–31.
- [21] 李军, 王忠民, 张宁, 等. 污泥焚烧工艺技术研究 [J]. *环境工程* 2005, 23(6): 48–52.  
LI Jun, WANG Zhong-min, ZHANG Ning, et al. Research of the sludge incineration technologies [J]. *Environmental Engineering*, 2005, 23(6): 48–52.
- [22] 张成, 王丹, 夏季, 等. 煤粉掺烧干化污泥的燃烧特性及能效分析 [J]. *热能动力工程* 2012, 27(3): 384–386.  
ZHANG Cheng, WANG Dan, XIA Ji, et al. Combustion characteristics and analysis of the energy-efficiency of a coal-fired boiler burning pulverized coal diluted and mixed with dried sludge [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2012, 27(3): 384–386.
- [23] Murakami T, Suzuki Y, Nagasawa H, et al. Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery [J]. *Fuel Processing Technology* 2009, 90(6): 778–783.
- [24] 李金红, 何群彪. 欧洲污泥处理处置概况 [J]. *中国给水排水*, 2005, 21(1): 101–103.  
LI Jin-hong, HE Qun-biao. Survey of the sludge treatment and disposal in Europe [J]. *China Water Supply and Drainage* 2005, 21(1): 101–103.
- [25] 石靖宇. 垃圾焚烧发电厂中掺烧干化污泥探讨 [J]. *环境卫生工程* 2015, 23(5): 5–7.  
SHI Jing-yu. Exploratory study of the combustion diluted and mixed with dried sludge in waste incineration power plants [J]. *Environmental Sanitation Engineering* 2015, 23(5): 5–7.
- [26] 刘海, 王定国, 郑雪艳, 等. 炉排式垃圾焚烧炉中掺烧污泥方式研究 [J]. *重庆科技学院学报* 2015, 17(3): 119–120.  
LIU Hai, WANG Ding-guo, ZHENG Xue-yan, et al. Research of the combustion modes to dilute and mix with sludge in chain grate type incinerators [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology* 2015, 17(3): 119–120.
- [27] 高云涛. 垃圾协同半干化市政改性污泥焚烧试运行掺烧比例分析 [D]. 北京: 清华大学环境学院, 2014.  
GAO Yun-tao. Analysis of the dilution and mixing proportion in waste synergy semi-dried municipal denatured sludge incineration trial run operation [D]. Beijing: College of Environmental Engineering under Tsinghua University, 2014.
- [28] 张小雄, 陈文和, 邓明佳, 等. 利用水泥窑协同处置城市污水处理厂污泥 [J]. *中国水泥* 2011(2): 51–54.  
ZHANG Xiao-xiong, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, et al. Collaborative disposal of the sludge in municipal sewage treatment plants by making use of cement kilns [J]. *China Cement*, 2011(2): 51–54.
- [29] AnetaMagdziarz, Malgorzata Wilk. Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion [J]. *Energy Conversion and Management* 2013, 75: 425–428.
- [30] Murakami T, Suzuki Y, Nagasawa H, et al. Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery [J]. *Fuel Processing Technology* 2009, 90(6): 778–783.

(刘瑶 编辑)



城镇污泥干化焚烧处置技术与工艺简介 = **Brief Introduction of the Urban Sludge Drying Incineration Disposal Technology and Its Process** [刊, 汉] / WEN Zhe, WANG Bo, FENG Rong ( College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093 ), XU Fang-qian ( Shanghai Ruixin Glass Technology and Equipment Engineering Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200120) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(9). - 1 ~ 8

Described were the basic characteristics of sludge and compared were also the working principles as well as the merits and demerits of the direct heat drying, indirect heat drying, direct-indirect combined heat drying and other sludge drying technologies. In this connection, the process roads, applications and design features of the single incineration, diluted and mixed combustion in utility boilers, diluted and mixed combustion in waste incinerators and in cement kilns were discussed as the emphasis. It has been known from the analytic results that the sludge drying technologies are diversal and both drying sludge by using flue gases or steam are feasible. The dried sludge single incineration, diluted and mixed combustion in utility boilers or cooperative disposal in cement kilns all have their own successful examples and a proper process should be chosen according to the concrete conditions. Among all above-mentioned, the single incineration of dried sludge in a fluidized bed incinerator or diluted and mixed combustion in a utility boiler is regarded as the most promising technical route. However, the sludge transmission, development of a high efficiency drying technology and equipment items as well as the processing of stinky gases in a plant territory etc. are deemed as the problems to be studied in the near future. **Key words:** solid waste, sludge disposal, drying, incineration

纳米流体在泡沫金属管内强化换热的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Intensified Heat Exchange of a Nano-fluid inside a Foam Metal Tube** [刊, 汉] / SUN Bin, LIU Yang ( College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(9). - 9 ~ 14

To achieve the aim of enhancing the heat exchange, the foam metal materials at various radia were inserted into the core area inside a tube and the nano-particles were also added to the basic solution. Through comparing the temperature and velocity fields inside a foam metal tube and a bare tube and analyzing the effect of the foam metal materials on the enhancement of the heat exchange, the influence of the foam metal filling ratio and the nano-fluid on the flow and heat exchange performance was studied. It has been found that the simulation results are in good agreement with the test ones given in the literatures, to fill the foam metal materials in the core area inside the tube can enhance the heat exchange performance and to add the nanofluid can improve the heat exchange effectiveness. Under the condition of a low flow speed, the heat exchange effectiveness will become better and better with an increase of the filling ratio and the concentration of the nanofluid, however, there exists an optimum matching between the foam metal filling ratio and the volumetric fraction of the nanofluid. In the range under investigation, when the filling depth is 6 mm and the volumetric fraction of the nanofluid is 0.3%, the comprehensive heat exchange performance is regarded as the optimum. To increase the flow speed and the filling ratio can contribute to enhancing the heat ex-