

城市污水污泥干化-焚烧系统热力分析

钱柯贞^{1,2}, 陈德珍^{1,2}, 段妮娜³, 戴晓虎⁴, 杨子旭⁵

1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804;
2. 上海多源固废协同处理和能源化工程技术研究中心, 上海 201804;
3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092;
4. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092;
5. 华东理工大学化工学院, 上海 200237)

[摘要] 目前, 污水处理厂污泥安全高效处理和处置问题在我国尚未彻底解决。干化-焚烧可实现污泥的无害化和减量化, 针对典型污泥独立干化-焚烧工艺建立计算模型, 探讨了热值、一次风温度等参数对污泥燃烧温度和辅助燃料需要量等的影响。结果显示: 随着污泥热值升高, 污泥燃烧温度升高, 临界含水率上升, 热值为 10、12、14 MJ/kg 的临界含水率约为 45%、51% 和 54%; 通过提高一次风温度, 可以大幅度提高污泥燃烧温度, 但是对于热值为 12~14 MJ/kg 污泥, 在一次风温超过 200 °C 情况下, 燃烧温度超过 950 °C, 需采取降温措施; 污泥自身提供的热量无法满足污泥干化-焚烧系统整体能耗, 干化-焚烧系统的辅助燃料需要量高于仅考虑焚烧系统的需要量; 干化-焚烧系统的辅助燃料需要量随着入炉含水率的减少增加。

[关键词] 城市污泥; 干化; 焚烧; 模拟; 流化床; 热力分析

[中图分类号] TK6 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.202109211

[引用本文格式] 钱柯贞, 陈德珍, 段妮娜, 等. 城市污水污泥干化-焚烧系统热力分析[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 48-54. QIAN Kezhen, CHEN Dezhen, DUAN Nina, et al. Thermal analysis of municipal sewage sludge drying-incineration system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 48-54.

Thermal analysis of municipal sewage sludge drying-incineration system

QIAN Kezhen^{1,2}, CHEN Dezhen^{1,2}, DUAN Nina³, DAI Xiaohu⁴, YANG Zixu⁵

1. School of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Multi-source Solid Wastes Co-processing and Energy Utilization, Shanghai 201804, China;
3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;
5. School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Currently, safe and efficient treatment/disposal of residual sludge is a thorny problem in China. Drying and incineration can realize innocuity and reduction of sludge. This study establishes a calculation model for typical sewage sludge independent drying-incineration and discusses the influences of low heating value (LHV) and primary air temperature on sludge combustion temperature and auxiliary fuel requirement. The results show that, the combustion temperature and critical moisture content of the sludge increases with the sludge heat value, the critical moisture content is about 45%, 51% and 54% respectively for incineration of sludges with 10, 12 and 14 MJ/kg LHV. Increasing primary air temperature can significantly increase the combustion temperature of sewage sludge. However, when the sewage sludge is with LHV of 12~14 MJ/kg and the primary air temperature is above 200 °C, the combustion temperature will be above 950 °C, so cooling measures should be taken. The auxiliary fuel requirement of the dry-incineration system is higher than that without drying system because the heat provided by the sludge itself cannot meet the total energy consumption of the sludge dry-incineration system. The auxiliary fuel requirement of the dry-incineration system increases with the decrease of the moisture content.

Key words: municipal sewage sludge; drying; incineration; simulation; fluidized bed; thermal analysis

修回日期: 2021-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1910100, 2020YFC1908701)

Supported by: National Key Research and Development Program "Solid Waste Resources" Special Project (2020YFC1910100, 2020YFC1908701)

第一作者简介: 钱柯贞(1987), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为固体废弃物热转化技术, qiankz@tongji.edu.cn.

污泥是污水处理过程中的副产物。在我国,随着工业化和城市化的发展,污水处理率也越来越高,因此,伴随有大量污泥产生。据统计,我国每年污水处理厂产生的污泥已超过 1 300 万 t (干基)^[1]。一直以来,全国的污水处理厂均普遍存在严重的“重水轻泥”现象,污泥未得到合理安全处理处置。

目前,污泥处理的主流技术主要包括厌氧消化^[2]、好氧堆肥^[3]和焚烧^[4]。相较于厌氧消化和好氧堆肥等生物处置方法,焚烧通过高温氧化可有效分解污泥中的有机组分并消灭病菌,迅速有效地实现污泥的无害化和减量化,降低后续处置要求^[5]。国外经验已经证明焚烧是污泥处理行之有效的方法之一。干化后焚烧不仅可以回收污泥中的有机能量,而且焚烧灰可以用来回收重要的矿物元素——磷。德国污泥焚烧已经开展了近 30 年,65% 以上的污泥采用焚烧方式处理,其中 85% 以上采用流化床焚烧^[6-7]。日本早在 20 世纪 90 年代已经利用焚烧方法处理了 75% 的城市污泥^[8-9]。

近年来,我国多地也开始采用焚烧方法处理污泥。污泥焚烧可分为独立焚烧和与生活垃圾或者煤等协同焚烧^[10-11]。例如四川成都万兴环保发电厂采用生活垃圾协同污泥焚烧处置^[12]。协同焚烧处置方法往往处理量较小,可能难以满足大中型城市的污泥处置需求;此外,协同焚烧后的污泥灰渣被稀释,灰渣中磷含量大大降低,难以实现磷的回收。目前,国内上海、温州、深圳等地建设运行了多个污泥独立焚烧工程^[13-15]。

综合国外污泥处理技术的发展和我国国情,污泥独立焚烧在我国具有良好的发展前景,尤其是经济发展较好、土地资源紧张的城市。但是,与传统燃料相比,污泥是一种高水分、高灰分、低热值的劣质燃料,难以直接焚烧,往往需要先干化才可能实现稳定独立焚烧。干化-焚烧的工艺参数对热力系统的能耗和能量经济性有较大影响。例如,入炉污泥含水率较高时,需要投入辅助燃料才可实现稳定焚烧,而入炉污泥含水率较低时,则无需在焚烧炉内投入辅助燃料即可达到国家标准要求的 850 °C 焚烧温度。而低含水率污泥意味着需要在干化阶段蒸发大量水分,干化能耗较大,因此需要研究入炉含水率等参数对干化-焚烧热力系统的影响。

本文选取我国典型生活污水物性参数,综合国内外多个污泥焚烧厂的工艺路线,借助 Aspen Plus 软件建立了典型污泥干化-焚烧处理系统模型,考

察了入炉含水率、污泥热值和一次风预热温度等参数对污泥燃烧温度的影响,对比了只考虑污泥焚烧系统和同时考虑干化及焚烧系统的辅助燃料需要量,为污泥独立干化-焚烧系统设计运行提供依据。

1 污泥独立干化-焚烧工艺

1.1 工艺路线选取

污泥独立干化-焚烧的典型工艺包括机械脱水、热干化、独立焚烧、余热利用和烟气净化等单元^[14]。国外有的项目由于污泥热值较高,污泥焚烧厂还带有发电模块,但考虑到我国污泥热值低于国外,因此本模拟只研究干化及焚烧。浓缩污泥采用机械脱水方式将含水率降至 80%,但是还难以满足稳定焚烧的要求,需要采用热干化设备将其进一步干化至 70% 以下(具体含水率取决于污泥中的有机质含量)。

热干化根据干化程度可分为全干化和半干化。全干化将污泥水分降至 15% 以下,半干化通常将污泥含水率降至 30%~60%。全干化能耗较高,干化设备投资大,一般不采用,因此本文采取半干化工艺。由于污泥干化过程中会产生挥发分和粉尘,为保证运行安全,一般干化工艺采用间接加热方式。间接干化设备主要包括桨叶式、圆盘、薄层干化等。

蒸汽的带出一般用负压抽气或者通载气(空气)携带,本文选用带载气的桨叶式干化机。为提高焚烧稳定,往往需要提高入炉风温,本文利用干化机冷凝水和焚烧炉高温烟气实现对一次风的多级预热。为实现稳定焚烧,在污泥不能自持燃烧的情况下需要投辅助燃料,本文采用柴油作为辅助燃料。污泥独立干化-焚烧总体工艺路线如图 1 所示。

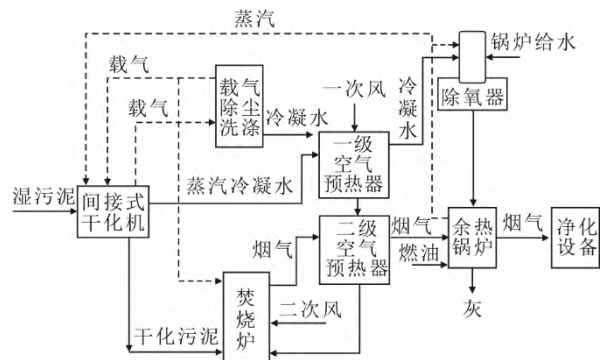


图 1 干化-焚烧工艺路线
Fig.1 Flowsheet of drying-incineration process

1.2 Aspen Plus 建模

污泥在焚烧装置中的热解、气化、燃烧过程属于多组分、多相体系的复杂化学反应过程。为了简

化焚烧模型, 本文假设污泥焚烧反应为一定温度、压力和条件下的理想体系, 并在此基础上计算整个焚烧体系达到热力学平衡态时各反应元素的组成、浓度和化学焓。污泥的焓和密度计算设定为软件自带的 HCOALGEN 和 DCOALIGT, 物理属性方法采用带有 Boston-Mathias 修正函数的 Peng Robinson 立方状态方程 PR-BM。

模型将污泥干化-焚烧系统分成四大模块(图2), 分别为干化模块、空气预热模块、焚烧模块和余热锅炉模块。DECOMP 和 BURN 模块组合模拟污泥焚烧的热解燃烧过程。Dryer、HTX、HTX1、HTX2、AIRCOOL 和 MOISTCOL 模块组合模拟污泥的干化过程。PHX1 和 PHX2 分别模拟一次风的一级和二级预热器。BOIL 和 DEOXY 分别代表余热锅炉和水除氧器。整个模拟系统设有 6 个物流入口, 分别是载气(CRAIR1)、湿污泥(WETM)、一次风(AIR1)、二次风(AIR2)、燃油(GAS1)和锅炉进水(WTIN)。焚烧炉出口物流有灰(ASH)和烟气(FLU1)。余热锅炉出口物流为蒸汽(STEAM1)。目前, 国内污水处理厂污泥的总体热值低于发达国家, 本文选用我国典型干基低位热值范围 10~14 MJ/kg 的污泥, 其成分和物性参数数据见表 1。干化-焚烧系统各设备参数设定见表 2。

表 1 污泥成份分析
Tab.1 Property analysis of sewage sludge

$w_d(A)/\%$	$w_d(S)/\%$	$w_d(C)/\%$	$w_d(H)/\%$	$w_d(N)/\%$	$w_d(O)/\%$	$Q_{LHVd}/(MJ \cdot kg^{-1})$
49.90	0.88	29.66	4.27	4.21	11.05	10.00
44.67	1.04	35.46	4.08	5.77	8.40	12.00
36.08	0.81	45.10	4.50	6.60	10.70	14.00

表 2 干化-焚烧系统参数设定
Tab.2 Parameter setting of drying-incineration system

项目	内容
环境温度/ $^{\circ}C$	25.0
湿泥处理量/ $(t \cdot h^{-1})$	5.0
干化机出口污泥温度/ $^{\circ}C$	95.0
干化机出口载气温度/ $^{\circ}C$	90.0
干化机进口载气温度/ $^{\circ}C$	40.0
干化机进口污泥温度/ $^{\circ}C$	40.0
干化后污泥含水率	0.6
干化机散热损失/ $\%$	3.0
焚烧炉过量空气系数	1.4
余热锅炉排烟温度/ $^{\circ}C$	230
焚烧炉热损失/ $\%$	8.0
空气预热器热损失/ $\%$	5.0
余热锅炉热损失/ $\%$	10.0
余热锅炉饱和蒸汽压力/MPa	0.7
一次风占总风量/ $\%$	75.0
二次风占总风量/ $\%$	25.0

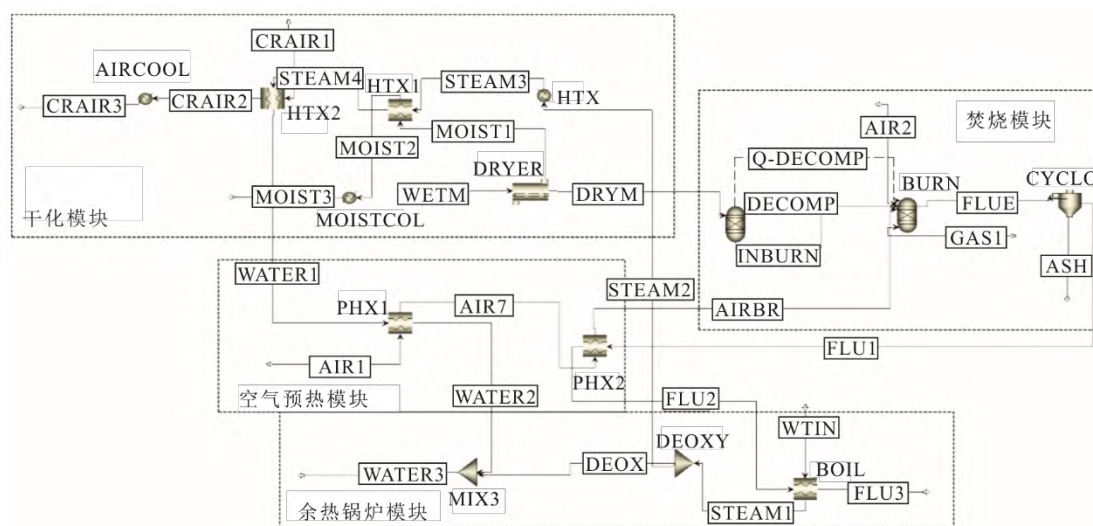


图 2 四大模块流程

Fig. 2 Flowsheet of process simulation

1.3 参数计算

1.3.1 干化所需载气量计算

桨叶式污泥干化过程载气的用量与排气温度和排气湿度有关。排气中要控制湿度以保证空气中的水蒸气不会在管道中凝结, 一般要求排出的载气

湿度不大于 70%。干化所需载气的量为:

$$W_{air} = W_{st} / (d_{air1} - d_{air0}) \quad (1)$$

式中: W_{air} 为所需载气量, kg; W_{st} 为污泥水分蒸发量, kg; d_{air} 和 d_{air0} 分别表示干化机进出口载气含水量, kg/kg (以每 kg 干空气计, 下同); 出口载气 d_{air1} 取 0.7 kg/kg。

40 °C 载气 d_{air0} 计算式为:

$$d_{air0} = \frac{0.622e}{p - (1 - 0.622e)} \quad (2)$$

式中: e 为对应温度下水的蒸汽压, Pa; p 为大气压, Pa。进入污泥干化机的载气温度为 40 °C 时, 通过查表得到 $e=7\ 375$ Pa, 算得 $d_{air0}=0.049$ kg/kg。

1.3.2 干化能耗比

$$\sigma = \frac{Q_{dry}}{Q_{in}} \quad (3)$$

式中: σ 为干化能耗比; Q_{dry} 代表污泥干化能耗, MJ/h; Q_{in} 为输入系统热量, $Q_{in}=M_S \times (Q_r + Q_s + Q_{air} + Q_{fuel})$; M_S 为污泥质量流量, kg/h; Q_r 为入炉污泥的低位热值, MJ/kg; Q_s 为污泥物理显热, MJ/kg; Q_{air} 为冷空气焓, MJ/kg; Q_{fuel} 为辅助燃料热值, MJ/kg。

2 结果分析及讨论

2.1 入炉含水率对污泥燃烧温度影响

污泥燃烧温度计算过程中, 假设化学和机械燃烧损失分别为 1% 和 4%, 焚烧炉散热损失为 3%。图 3 为入炉一、二次风温度均为 25 °C (无预热) 情况下入炉含水率 (30%~60%) 对不同热值 (10~14 MJ/kg) 污泥的燃烧温度的影响。

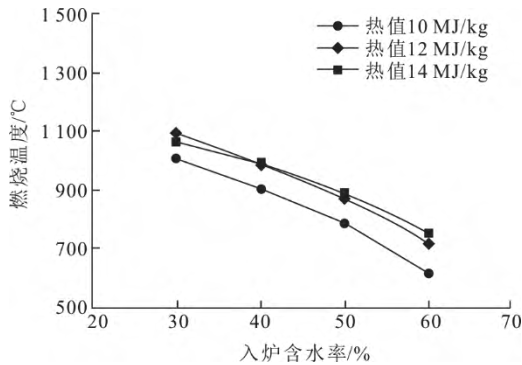


图 3 含水率对不同热值污泥燃烧温度的影响

Fig.3 The impact of moisture content on combustion temperature of the sewage sludge with different heating values

由图 3 可见, 一次风无预热情况下随着入炉含水率从 60% 降到 30%, 污泥燃烧温度迅速上升, 热值 10、12、14 MJ/kg 污泥的燃烧温度分别从 617、718、750 °C 升高到 1004、1082、1065 °C。热值 14 MJ/kg 的污泥在含水率高于 50% 时的燃烧温度高于热值 12 MJ/kg 的污泥, 而当入炉含水率低于 50% 时, 其燃烧温度与热值 12 MJ/kg 污泥燃烧温度相当。这是由于相比热值 12 MJ/kg 的污泥, 热值 14 MJ/kg 污泥的入炉空气量增幅高于热值的增幅, 在一次风无预热的情

况下, 14 MJ/kg 污泥燃烧热用于加热入炉空气的比例上升, 从而降低了燃烧温度。在一次风无预热的情况下, 热值 10、12、14 MJ/kg 的污泥可自持燃烧的最高含水率 (临界含水率) 约为 45%、51% 和 54%。

2.2 一次风温度对污泥燃烧温度影响

图 4 显示了在不添加辅助燃料情况下, 一次风温度 (100~600 °C) 及含水率 30%~60% 对不同热值 (10~14 MJ/kg) 污泥燃烧温度影响。

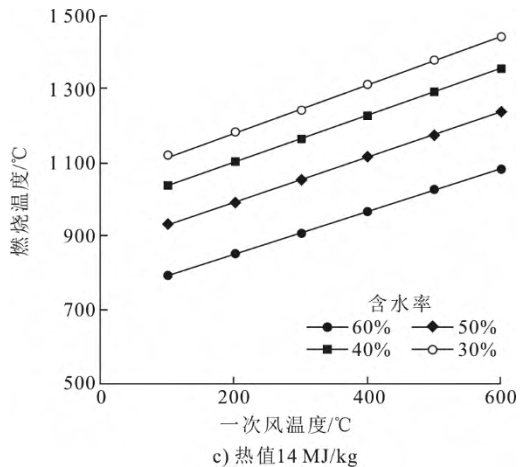
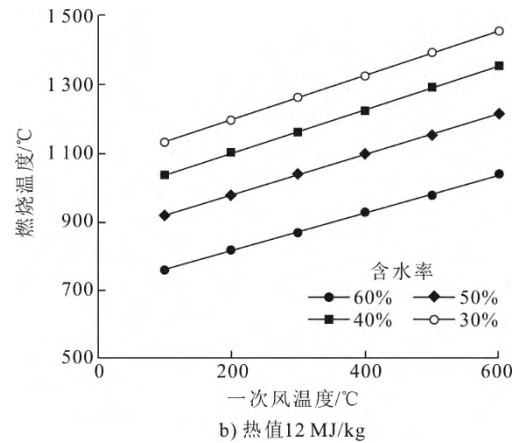
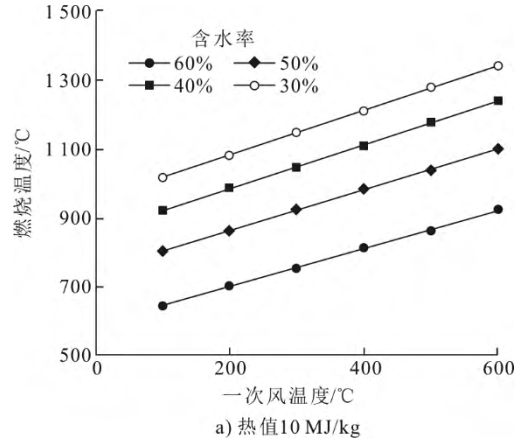


图 4 一次风温度及含水率对不同热值污泥燃烧温度影响

Fig.4 The impact of primary air temperature and moisture content on combustion temperature of the sewage sludge with different heating values

由图4可见,通过提高一次风温度,可以大幅度提高燃烧污泥燃烧温度。对于热值为10 MJ/kg的污泥,当其含水率为50%,如果将一次风温度提高到175℃,其燃烧温度可达到850℃;当其含水率为60%时,如果将一次风温度提高到500℃,燃烧温度可达到850℃。对于热值为12 MJ/kg和14 MJ/kg的污泥,当含水率为60%时,将一次风温度分别提高到250℃和200℃,燃烧温度可达到850℃。由于污泥灰分较高,灰熔点较低,一般不希望污泥焚烧炉温度过高,运行温度一般在850~950℃^[14]。对于含水率为50%、热值10 MJ/kg污泥,在一次风温度超过400℃情况下,燃烧温度超过950℃;对于热值为12~14 MJ/kg污泥,在一次风温度超过200℃情况下,燃烧温度超过950℃;当含水率为60%,只有热值12~14 MJ/kg,且一次风温度超过500℃情况下,燃烧温度才会超过950℃。而对于含水率小于40%的污泥,大部分工况的燃烧温度超过950℃,在此情况下如果不在炉内布置受热面,运行中则需要采取增大入炉空气量或者是喷水等降温措施,这会带来较大的热损失。因此如果污泥入炉含水率低于40%,为降低炉膛热负荷,可能需在炉内布置受热面。

2.3 污泥干化-焚烧系统能耗分析

污泥干化-焚烧系统的能耗/热损失以污泥干化系统能耗和余热锅炉的排烟热损失为最。图5为入炉含水率及热值对污泥干化能耗比的影响。

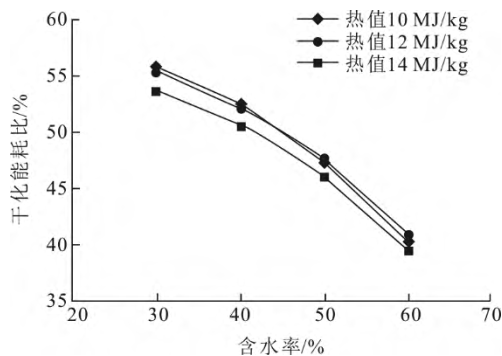


图5 含水率及热值对干化能耗比影响

Fig.5 The impact of moisture content and heating value on drying energy consumption ratio

由图5可见,随着入炉含水率的减少,干化能耗比从40%上升到55%。污泥热值对于干化能耗比的影响较小,总体呈现随热值增加干化能耗比下降的趋势。

不同干化设备需要的载气量区别较大。比如圆盘

干化机一般采用负压的方式排出蒸汽,其载气量较少。而非真空桨叶式干化机采用通入载气的方式排出蒸汽,需要较大的载气量。图6为非真空桨叶式干化机干化后含水率不同污泥所需载气量及载气干化能耗比。由图6可见,对于入炉含水率30%~60%的污泥,非真空桨叶式干化机的载气量为4 000~54 000 kg/t(以每t干污泥计,下同),加热载气能耗占干化过程总能耗的2%~6%。而从干化机出来的载气由于含有大量的水蒸气、粉尘和挥发性有机物,需采取喷淋净化等措施,能量一般难以回收。故选用较小载气量的干化形式有利于降低干化能耗。

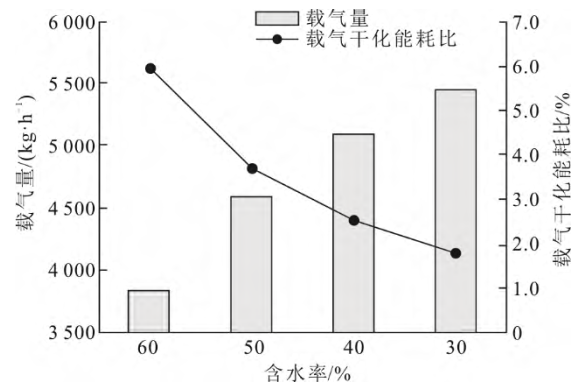


图6 干化后含水率不同所需载气量及载气干化能耗比
Fig.6 The carrier air consumption and energy consumption of carrier air of the dried sludge with different moisture contents

图7为排烟温度为230℃时污泥热值和入炉含水率对排烟热损失的影响。由图7可见,余热锅炉的排烟热损失随含水率的升高,从22%升高到40%。

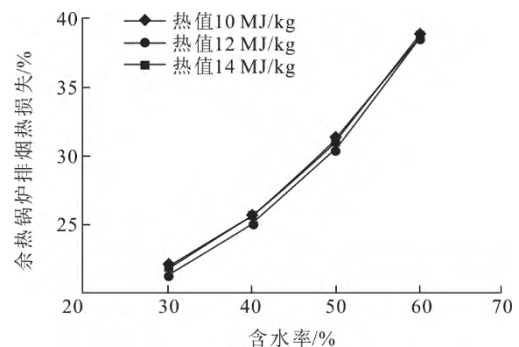


图7 不同热值和含水率污泥焚烧余热锅炉排烟热损失
Fig.7 The impact of heating value and moisture content on exhaust gas heat loss of heat recovery boiler firing sludge

表3显示了模拟计算的烟气成分。由表3可以看到,焚烧烟气主要成分为H₂O、CO₂、CO、SO₃、SO₂、NO等。随污泥入炉含水率增高,污泥焚烧烟气中的H₂O质量分数从10.5%增加到20.7%,增大了排烟热损失。

表 3 热值 12 MJ/kg 的污泥焚烧烟气模拟计算成分
单位: kg/t

Tab.3 The simulated flue gas compositions of sewage sludge with LHV of 12 MJ/kg

烟气组分	入炉污泥含水率			
	60%	50%	40%	30%
H ₂ O	1 931.53	1 435.67	1 105.49	870.49
O ₂	310.09	298.09	288.32	278.57
N ₂	5 584.02	5 583.10	5 581.84	5 580.42
NO	1.09	3.06	5.75	8.80
NO ₂	0.01	0.01	0.01	0.02
CO	0	0.01	0.07	0.29
CO ₂	1 462.75	1 472.86	1 480.45	1 487.67
SO ₂	20.24	20.60	20.69	20.72
SO ₃	0.67	0.23	0.12	0.07
总量	9 310.40	8 813.62	8 482.74	8 247.06

2.4 辅助燃料需要量分析

在不考虑干化情况下，添加辅助燃料目的为满足 850 °C 的燃烧温度；在考虑干化系统情况下，添加辅助燃料的目的为满足 850 °C 燃烧温度，以及弥补干化过程的能量缺口。为了便于比较，干化系统无额外热源。图 8 为模拟的不考虑干化情况下辅助燃料需要量及考虑干化系统情况下的辅助燃料需要量。干化-焚烧系统辅助燃料需要量模拟计算条件为一次风温度 300 °C，干化系统的散热损失设定为 3%，余热锅炉散热损失为 10%。由图 8 可见：在不考虑干化情况下，热值 10 MJ/kg、含水率 60% 的污泥，一次风温度高于 500 °C 无需辅助燃料，低于 500 °C 需要辅助燃料，一次风不加热时所需辅助燃料量最高，为 72 g/t，当其含水率为 50% 时，一次风低于 100 °C 需要投辅助燃料；热值为 12、14 MJ/kg 的污泥，仅在含水率为 60% 及一次风温度分别低于 300、200 °C 时需要投辅助燃料，其最高辅助燃料需要量分别为 46.4、30.0 kg/t，含水率低于 60% 时，不需要辅助燃料。根据德国运行经验，对于污泥这种高含灰、含氮燃料，850 °C 的运行温度就可能带来灰熔融和氮氧化物排放增加的问题。因此，在德国针对污泥独立焚烧项目，如果满足排放要求，通过审批允许降低温度标准^[5]（如果焚烧温度允许在 850 °C 以下，实际辅助燃料量应该小于本文模拟值）。

比较图 8a)和图 8b)，可以发现干化-焚烧系统的辅助燃料需要量高于仅考虑焚烧系统的燃料需要量，即使是较高热值的污泥（14 MJ/kg），在仅考虑焚烧时无需辅助燃料，干化-焚烧系统依然需要辅助燃料。这说明热值为 10~14 MJ/kg 污泥自身提

供的热量无法满足污泥干化-焚烧系统的干化能耗及各过程能量损失。随着污泥含水率的降低，污泥辅助燃料需要量均呈增加趋势，当入炉含水率从 60%降低到 30%时，热值为 10、12、14 MJ/kg 污泥的辅助燃料需要量由 16、52、96 kg/t 增加到 19、60、105 kg/t。干化-焚烧系统的干化能耗随着入炉含水率的减少而增加，说明采用低入炉含水率的策略从能耗角度看并不经济；同时，入炉含水率低意味着需要更大的干化换热面积，而干化系统投资占整个干化-焚烧项目投资比重较高，因此从投资角度采用低入炉含水率的策略也不经济。图 8b)显示，添加辅助燃油满足干化过程能量缺口时，由于焚烧炉的投油量较高，导致所有工况的污泥燃烧温度均高于 950 °C，需要采取增大过量空气系数等降温措施。因此，从能耗角度出发，采用焚烧炉添加辅助燃料的方式满足干化能量缺口的能量经济性较差，而采用外来低压蒸汽弥补干化能耗缺口更为合理。

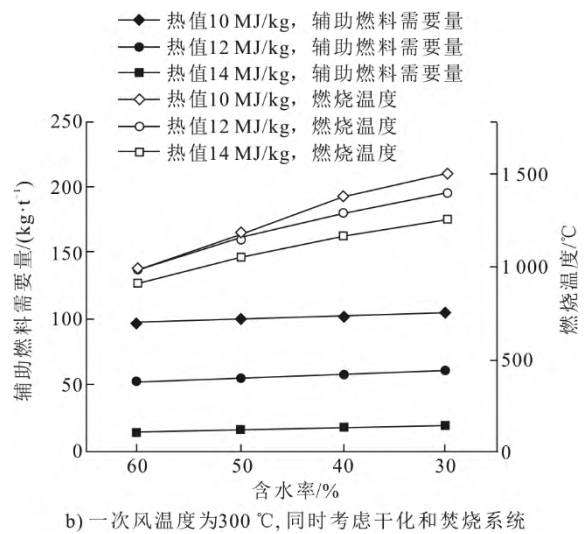
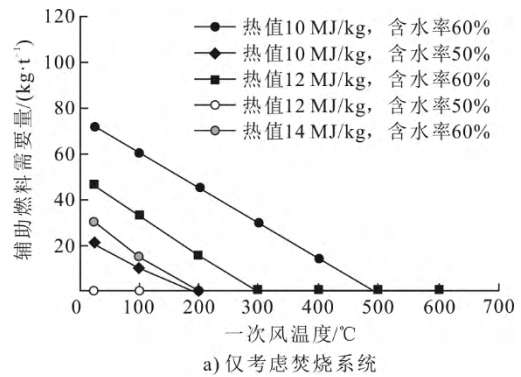


图 8 不同含水率和一次风温度下辅助燃料需要量及燃烧温度
Fig.8 The combustion temperature and required auxiliary fuels when burning sludge with different moisture contents at different primary air temperatures

3 结 论

本文模拟了典型市政污泥干化-焚烧系统,探讨了污泥热值、入炉含水率、一次风温度等对污泥干化-焚烧系统的影响,得到以下主要结论。

1) 随着污泥低位热值的升高,污泥自持燃烧对应的入炉含水率升高,热值为10、12、14 MJ/kg的污泥临界含水率分别为45%、51%、54%。

2) 通过提高一次风温度,可以大幅度提高污泥燃烧温度,但是对于热值为12~14 MJ/kg污泥,在一次风温超过200℃情况下,燃烧温度超过950℃,不利于焚烧炉的安全。可见如果污泥热值较高,一次风温度不适合太高。

3) 随着入炉含水率的减少,干化能耗比从40%上升到55%。

4) 干化-焚烧系统的辅助燃料需要量高于仅考虑焚烧系统的需要量,干化-焚烧系统辅助燃料需要量随着入炉含水率的减少而增加。表明污泥自身提供的热量无法满足污泥干化-焚烧系统整体能耗,低入炉含水率策略不经济。

【参 考 文 献】

- [1] YANG G, ZHANG G M, WAN H C. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China[J]. Water Research, 2015, 78: 60-73.
- [2] 李冬娜, 马晓军. 污泥厌氧发酵产酸机理及应用研究进展[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(2): 51-60.
LI Dongna, MA Xiaojun. Mechanism and research progress of acid synthesis during sludge anaerobic fermentation[J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(2): 51-60.
- [3] 王晓诚, 郭颖, 颜开红. 超高温自发热好氧堆肥工艺处理生活垃圾的探究[J]. 环境工程, 2020, 38(10): 183-189.
WANG Xiaocheng, GUO Ying, YAN Kaihong. Treatment of domestic waste by ultra-high temperature spontaneous heating aerobic composting process[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(10): 183-189.
- [4] 洪博文, 薛红琳, 车卫彤, 等. 污泥干化及协同焚烧处置技术分析[J]. 能源与节能, 2020(6): 86-88.
HONG Bowen, XUE Honglin, CHE Weitong, et al. Analysis of sludge drying and collaborative incineration disposal technology[J]. Energy and Energy Conservation, 2020(6): 86-88.
- [5] SCHNELL M, HORST T, QUICKER P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110367.
- [6] LEHRMANN F. Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung-Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung[R]. Kornwestheim: Schwaben-ING GmbH, 2013: 905-915.
- [7] HEIDECHE P, JÖRG S, LEHRMANN F. Stand der Klärschlamm-trocknung und Klärschlammverbrennung in Deutschland[J]. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2018, 65(7): 1-8.
- [8] 徐晓波, 孙卫东, 吕金明, 等. 日本的典型污泥焚烧工程案例及启示[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 135-138.
XU Xiaobo, SUN Weidong, LYU Jinming, et al. Enlightenment and cases study of typical sludge incineration project in Japan[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 135-138.
- [9] 水落元之, 久山哲雄, 小柳秀明, 等. 日本生活污水污泥处理处置的现状与特征分析[J]. 给水排水, 2015, 51(11): 13-16.
MOTOYUKI Mizuochi, TETUSO Kutama, HIDEAKI Koyanagi, et al. Analysis of the sludge treatment and disposal characteristics and status of domestic sewage in Japan[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(11): 13-16.
- [10] 庄僊, 许榕发, 罗伟铿, 等. 市政污泥与生活垃圾掺烧的重金属排放特征与风险[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 199-206.
ZHUANG Xi, XU Rongfa, LUO Weikeng, et al. Heavy metal emission characteristics and risks in the co-combustion of sludge sewage and municipal solid waste[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(1): 199-206.
- [11] 王琳琳. 垃圾焚烧发电厂污泥掺烧技术应用[J]. 能源与节能, 2020, 37(6): 89-91.
WANG Linlin. Application of sludge blending technology in waste incineration power plants[J]. Energy and Energy Conservation, 2020, 37(6): 89-91.
- [12] 余杰, 鱼红霞, 杜义鹏, 等. 城市垃圾焚烧厂直接掺烧城市污泥处置技术及其污染控制[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3155-3161.
YU Jie, YU Hongxia, DU Yipeng, et al. Disposal technology and pollution control of directly mixed incineration of municipal sludge in municipal solid waste incineration plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3155-3161.
- [13] 邱锐. 深圳市污泥干化焚烧工艺运行成本分析[J]. 给水排水, 2014, 50(8): 30-32.
QIU Rui. Operation cost analysis of sludge drying and incineration system in Shenzhen[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 50(8): 30-32.
- [14] 廖建胜, 李文兴, 单跃, 等. 温州市污泥集中干化焚烧厂工程设计与调试运行[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 73-77.
LIAO Jiansheng, LI Wenxing, SHAN Yue, et al. Project design and commissioning of wenzhou sludge centralized drying and incineration plant[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 73-77.
- [15] 李文兴, 郑秋鹏, 廖建胜, 等. 温州市污泥干化焚烧处理工程技术改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2): 90-95.
LI Wenxing, ZHENG Qiujuan, LIAO Jiansheng, et al. Technical transformation of sludge drying and incineration treatment project in Wenzhou city[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 90-95.

(责任编辑 杨嘉蕾)