

污泥与一般固废协同焚烧可行性研究

赵发敏

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 城市污水处理厂污泥干化焚烧作为污泥无害化处理的主要技术,越来越多应用于工程化。污泥焚烧在进行理论工艺计算时,可得到污泥燃烧发热量、烟气组成、烟气焓值等关键技术参数。本文采用燃煤锅炉热力计算方法,通过理论计算分析不同含水率对污泥焚烧烟气温度的影响,并通过内插法计算得到污泥可自持燃烧的含水率,同时通过理论计算不同含水率污泥焚烧烟气温度达到标准要求的850℃时,需要添加的辅助燃料(一般工业固废)的量。研究标明,污泥含水率越高,污泥焚烧烟气温度越低,需要补充的辅助燃料越多;一般工业固废的热值较高,可以作为污泥的辅助燃料,可协同污泥焚烧。

[关键词] 污泥焚烧;工业固废;含水率;烟气温度;辅助燃料

[中图分类号] X703 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2023)05-0078-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.05.015

0 前言

污泥是污水经过处理后转化的固态凝聚态沉降物,是非特定行业生产过程中产生的一般固体废物,体积0.5%~1%。污泥中有机物含量高,含水率高(可达99%以上),且不易脱水,颗粒细小,呈胶体结构,热值较高,干燥后可以焚烧无害化处理。

污泥处置市场空间巨大。据统计^[1],2020年我国含水率80%的污泥产量已超过6500万t,预计2025年我国污泥年产量将突破9000万t。污泥富集了污水处理过程中50%以上的污染物,如重金属、毒性有机物、致病微生物等,如得不到妥善处理,会对水环境和土壤环境造成巨大威胁,造成人类饮水和食品安全问题^[2]。因此国家出台一系列政策规划和指导污泥处理处置。2022年,国家发展改革委、住房城乡建设部、生态环境部联合印发的《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》要求到2025年,全国新增污泥(含水率80%的湿污泥)无害化处置设施规模不少于2万t/d,城市污泥无害化处置率达到90%以上,地级及以上城市达到95%以上,基本形成设施完备、运行安全、绿色低碳、监管有效的

污泥无害化资源化处理体系^[3]。

污泥焚烧可解决污泥难分解和填埋可能造成地下水源污染的问题,从根本上减少污泥最终填埋量,彻底杀灭病菌、病原体等有害有机物,是一种彻底的、完全的处置方式,在国内外大中型工程中有较多应用^[4]。

目前,污泥焚烧进入焚烧炉时要求其含水率满足焚烧炉排烟温度要求,实现自持燃烧。因此,污泥需要干化到一定含水率才能进入焚烧炉,而且污泥自持燃烧虽然解决了辅助燃料用量的问题,但是污泥的干化仍需要消耗大量的热。一般固体废物中,如不可回收的废旧纺织品、废皮革制品、废橡胶等废弃资源具有一定的热值,可作为固体燃料,与污泥一同进行焚烧处理处置。

本文以南方某污水处理厂产生的污泥为例,通过套用燃煤锅炉热力计算方法,分析服装、制鞋业产生的一般工业固废作为固体燃料对入炉污泥含水率的影响,探讨污泥和一般固体废弃物协同焚烧的可行性。

1 污泥含水率对焚烧烟气温度的影响

污泥独立干化焚烧典型的技术是污泥机械脱水后进行热干化,然后进入焚烧炉单独焚烧。机械脱水方式只能将浓缩污泥含水率降至80%,在不添加辅助燃料的情况下,该含水率无法满足稳定焚烧的要求,需要将污泥进一步干化。

污泥焚烧时要求焚烧炉内烟气温度不低于850℃,

[收稿日期] 2023-06-17

[作者简介] 赵发敏(1984—),男,硕士,工程师,主要从事危险废物、污泥焚烧处理处置工艺及设备设计等工作。

[引用格式] 赵发敏. 污泥与一般固废协同焚烧可行性研究[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(5): 78-82.

烟气停留时间不小于 2 s, 所以污泥带入焚烧炉内的水分最终以蒸汽的形式与烟气一起排出焚烧炉。水蒸气的汽化潜热带走了污泥中一定的能量, 剩余的热量才是污泥焚烧的热量。

不同含水率污泥焚烧时损失的热量和流化床中的理论燃烧温度关系如下: 含水率越高, 损失的热量越多, 在不添加辅助燃料条件下理论燃烧温度越低。相关研究^[5]表明当污泥干基低位发热量为 837 kJ/kg, 含水率为 76.9% 时, 水蒸气汽化热损失达到 100%, 为了维持焚烧炉出口烟气温度, 含水率越高, 需要添加的辅助燃料量越多。钱柯贞等^[6]的研究也表明在不同污泥热值下, 污泥含水率影响污泥焚烧烟气温度, 含水率越高, 对污泥的焚烧烟气温度影响越大; 污泥热值越高, 污泥可自持燃烧的含水率越高。

根据污泥中有机质的含量, 一般将污泥干化至含水率 40% ~ 60%, 使污泥在焚烧炉内能够自持燃烧, 这不仅有利于节省污泥干化能耗, 同时降低污泥焚烧辅助燃料用量, 节约运行成本。

1.1 热力学计算

取 1 kg 污泥完全燃烧, 过剩空气系数取 $\alpha = 1.4$, 空气含水量为 $0.0161 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 污泥燃烧的气态产物理论体积计算公式见式(1) ~ (4)。

$$V_{\text{CO}_2} = 1.866 \times \frac{C_{\text{ar}}}{100} \quad (1)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0.7 \times \frac{S_{\text{ar}}}{100} \quad (2)$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22.4}{28} \times \frac{N_{\text{ar}}}{100} \quad (3)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22.4}{18} \times \frac{W_{\text{ar}}}{100} + \frac{22.4}{2.016} \times \frac{H_{\text{ar}}}{100} \quad (4)$$

式中: V_{CO_2} 、 V_{SO_2} 、 V_{N_2} 、 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 为污泥燃烧后产生的 CO_2 、 SO_2 、 N_2 和 H_2O 气态产物的理论体积, m^3 ; C_{ar} 、 S_{ar} 、 N_{ar} 、 W_{ar} 、 H_{ar} 为 C、S、N、水分、H 元素在污泥中的质量百分数, %。

污泥完全燃烧需要的理论干空气体积 V_{k} 按式(5)计算。

$$V_{\text{k}}^0 = \frac{1}{0.21} \left(1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 5.55 \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100} - 0.7 \frac{O_{\text{ar}}}{100} \right) \quad (5)$$

完全燃烧需要的理论空气体积 V_{k} 见式(6)。

$$V_{\text{k}} = \alpha V_{\text{k}}^0 \quad (6)$$

完全燃烧产生约理论烟气体积 V_{yq} 见式(7)。

$$V_{\text{yq}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + (V_{\text{N}_2} + 0.79V_{\text{k}}) + (V_{\text{H}_2\text{O}} + 0.0161V_{\text{k}}) \quad (7)$$

假设助燃空气温度为 400 °C, 助燃空气的焓值 H_{k} 计算见式(8)。

$$H_{\text{k}} = V_{\text{k}} H_{\text{k}}^0 \quad (8)$$

式中: H_{k}^0 为 1 m^3 湿空气在温度 t °C 的理论焓值, 见表 1。

表 1 气体和灰分理论焓值表 kJ/m^3

| 温度 $t/^\circ\text{C}$ | $H_{\text{RO}_2}^0$ | $H_{\text{N}_2}^0$ | $H_{\text{H}_2\text{O}}^0$ | H_{k}^0 | H_{A}^0 |
|-----------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|------------------|------------------|
| 100 | 170 | 130 | 2 177 | 132 | 81 |
| 200 | 357 | 260 | 2 315 | 266 | 169 |
| 300 | 559 | 392 | 2 470 | 403 | 264 |
| 400 | 772 | 527 | 2 629 | 542 | 360 |
| 500 | 996 | 664 | 2 796 | 684 | 458 |
| 600 | 1 222 | 804 | 2 972 | 830 | 560 |
| 700 | 1 461 | 946 | 3 148 | 979 | 662 |
| 800 | 1 704 | 1 093 | 3 336 | 1 130 | 767 |
| 900 | 1 951 | 1 243 | 3 524 | 1 281 | 875 |
| 1 000 | 2 202 | 1 394 | 3 721 | 1 436 | 984 |

注: $H_{\text{H}_2\text{O}}^0$ 为假定烟气压力为 0.1 MPa 下, 根据理想气体方程算的过热水蒸气焓值; RO_2 为三原子气体 CO_2 、 SO_2 。

污泥完全燃烧产生的烟气在 t °C 时的焓值计算公式见式(9)。

$$H_{\text{yq}}^0 = V_{\text{RO}_2} H_{\text{RO}_2}^0 + (V_{\text{N}_2} + 0.79V_{\text{k}} H_{\text{N}_2}^0) + (V_{\text{H}_2\text{O}} + 0.0161V_{\text{k}}) H_{\text{H}_2\text{O}}^0 + (\alpha - 1) V_{\text{k}}^0 + \frac{A_{\text{ar}}}{100} H_{\text{A}}^0 \quad (9)$$

式中: $H_{\text{RO}_2}^0$ 、 $H_{\text{N}_2}^0$ 、 $H_{\text{H}_2\text{O}}^0$ 、 H_{A}^0 分别为 1 m^3 各种气体及 1 kg 灰分在温度 t °C 时的焓值。

1.2 污泥含水率与烟气温度

以南方某城市污泥为例, 不同含水率情况下污泥的成分质量百分数见表 2。

表 2 不同含水率污泥成分分析 %

| 指标 | 含水率 (W_{ar}) | | | | |
|------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 80.76 | 70.00 | 60.00 | 50.00 | 40.00 |
| 灰分(A) | 9.66 | 15.09 | 19.97 | 24.85 | 30.12 |
| C_{ar} | 4.68 | 7.31 | 9.68 | 12.04 | 14.59 |
| H_{ar} | 0.81 | 1.27 | 1.67 | 2.08 | 2.53 |
| O_{ar} | 3.22 | 5.03 | 6.66 | 8.28 | 10.04 |
| N_{ar} | 0.58 | 0.91 | 1.20 | 1.49 | 1.81 |
| S_{ar} | 0.23 | 0.36 | 0.48 | 0.59 | 0.72 |
| Cl_{ar} | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.13 | 0.16 |

根据公式(9)绘制 1 kg 不同含水率污泥完全燃烧焓值与温度的关系表(表 3)。

表 3 1 kg 不同含水率污泥完全燃烧焓值与温度的关系表

| 温度/ ℃ | kJ/kg | | | | |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 含水率/% | | | | |
| | 40.00 | 50.00 | 60.00 | 70.00 | 80.76 |
| 100 | 2 131.990 | 2 223.516 | 2 334.583 | 2 440.490 | 3 825.096 |
| 200 | 2 744.048 | 2 678.913 | 2 739.334 | 2 786.459 | 4 189.866 |
| 300 | 3 190.795 | 3 158.953 | 3 168.479 | 3 155.911 | 4 587.337 |
| 400 | 2 746.399 | 3 650.891 | 3 608.233 | 3 534.596 | 4 994.874 |
| 500 | 4 317.558 | 4 157.480 | 4 061.860 | 3 926.190 | 5 418.987 |
| 600 | 4 905.893 | 4 680.096 | 4 530.808 | 4 332.030 | 5 861.572 |
| 700 | 5 503.506 | 5 210.361 | 5 177.504 | 4 742.52 | 6 307.131 |
| 800 | 6 123.231 | 5 761.421 | 5 500.858 | 5 171.658 | 6 777.096 |
| 900 | 6 750.502 | 6 318.700 | 6 000.956 | 5 604.577 | 7 249.480 |
| 1 000 | 7 390.840 | 6 888.678 | 6 513.556 | 6 049.719 | 7 739.041 |

由表 3 可知,含水率越高,污泥完全燃烧相同温度条件下,污泥的焓值越高,表明含水率越高,要达到相应的烟气温度,需要补充越多的辅助燃料。

表 4 1 kg 不同含水率的污泥完全燃烧的烟气焓值及对应的烟气温度

| 含水率/% | 40.00 | 50.00 | 60.00 | 70.00 | 80.76 |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 烟气焓值/kJ·kg ⁻¹ | 7 285.068 1 | 6 401.822 5 | 5 526.839 8 | 4 651.154 3 | 3 705.685 6 |
| 烟气温度/℃ | 983.60 | 914.58 | 805.20 | 677.74 | <100 |

从表 4 可以看出,1 kg 污泥完全燃烧,污泥含水率对焚烧后的烟气温度影响较大,污泥含水率越高,焚烧烟气温度越低。若要保证污泥焚烧温度达到标准要求的 850 ℃,需要添加辅助燃料;含水率越高,烟气温度越低,需要添加的辅助燃料用量越多。

根据内插法,当焚烧温度达到标准要求的 850 ℃ 时,污泥进炉含水率为 55.89%,即污泥在炉内自持燃烧的含水率为 55.89%,此时不需要添加辅助燃料,这与多数工程污泥干化焚烧入炉含水率 40% ~ 60% 范围的实际情况相符,但是将污泥含水率从 80.76% 热干化至 55.89%,需要较高的能耗。将 1 kg 污泥含水率从 80% 干化至 55.89%,理论上需要消耗的热量为 0.65 MJ。污泥干化的能量不能完全靠污泥焚烧提供,需要额外补充^[7-10]。所以污泥干化后再进行焚烧,并不是最经济的处理处置技术。

目前,污泥达到入炉含水率有两种方式,一种是直接将污泥干化至能够自持燃烧的入炉含水率;另一种是将部分污泥干化至含水率 40%,然后与部分

1 kg 污泥完全燃烧发热量计算公式见式(10) ~ (11)。

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{gr,ar}} - 212H_{\text{ar}} - 0.8(O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}}) - 24.4W_{\text{ar}} \quad (10)$$

$$Q_{\text{gr,ar}} = Q_{\text{gr,d}} \times \frac{100 - W_{\text{ar}}}{100} \quad (11)$$

式中: $Q_{\text{net,ar}}$ 为收到基低位发热量,kJ/kg; $Q_{\text{gr,ar}}$ 为收到基高位发热量,kJ/kg; $Q_{\text{gr,d}}$ 为干基高位发热量,kJ/kg;212为污泥中每1%氢的汽化热校正值,kJ/kg;0.8为污泥中每1%氧和氮的汽化热校正值,kJ/kg;24.4为收到基污泥中每1%水分汽化热校正值,kJ/kg。

根据热量平衡,污泥完全燃烧的排烟热量 H_{y} 计算见式(12)。

$$H_{\text{y}} = (Q_{\text{net,ar}} + H_{\text{k}}) \times (1 - 10\%) \quad (12)$$

式中:10%为散热损失。

根据公式(1) ~ (12)计算 1 kg 污泥不同含水率完全燃烧的烟气焓值,再根据表 3,通过内插法计算得到相应的烟气温度(表 4)。

未干化污泥混合至入炉含水率。因这两种方式最终污泥含水率相同,所以污泥干化消耗的热量相同。因污泥含水率在 40% ~ 60% 时呈粘滞状态^[11],若直接干化至此区间,污泥正好处于粘滞区,具有很强的粘附力,不利于输送进料。所以建议工程设计中采用第二种方式,将干化后的污泥和未干化的污泥按照混合后达到入炉含水率的比例直接送入焚烧炉,当污泥热量发生变化时,可直接通过调节干化污泥量或未干化污泥量来控制焚烧工况。

2 一般固废作为辅助燃料可行性分析

南方某污水处理厂产生的污泥,服装、制鞋业产生的一般固废基础元素分析见表 5。

从表 5 可以看出,南方某城市一般工业固废热值较高,且元素含量处于同一数量级,可以与污泥协同焚烧处理。一般工艺固废热值远高于污泥热值,可以用作污泥焚烧的固体燃料,辅助含水率较高的污泥焚烧达到标准要求的 850 ℃。

表5 污泥和一般工业固废基础特性

| 指标 | 污泥 | | 一般工业固废 | |
|--|---------|--------|----------|----------|
| | 干基 | 收到基 | 干基 | 收到基 |
| 含水率(W_{ar})/% | — | 80.76 | — | 6.79 |
| 低位热值/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 9 872 | — | 20 595.1 | 19 026.8 |
| 高位热值($Q_{gr,d}$)/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 10 815 | — | 22 071 | — |
| 灰分(A)/% | 50.23 | 9.66 | 9.72 | 9.06 |
| 挥发分/% | 42.54 | 8.18 | 80.75 | 75.27 |
| 固定碳/% | 7.23 | 1.39 | 9.52 | 8.88 |
| C_{ar} /% | 24.32 | 4.68 | 54.94 | 51.21 |
| H_{ar} /% | 4.19 | 0.81 | 6.56 | 6.11 |
| O_{ar} /% | 16.76 | 3.22 | 25.53 | 23.80 |
| N_{ar} /% | 3.04 | 0.58 | 2.44 | 2.27 |
| S_{ar} /% | 1.2 | 0.23 | 0.10 | 0.09 |
| Cl_{ar} /% | 0.27 | 0.05 | 0.71 | 0.66 |
| Hg/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | — | — | 0.004 | 0.02 |
| Cr/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 352.597 | 67.848 | — | — |

通过公式(1)~(12)计算,当污泥含水率分别为60%、70%和80.76%时,1 kg 污泥完全焚烧,烟气温度达到850℃时需要添加的固废量见表6。

表6 完全焚烧1 kg 不同含水率污泥,烟气温度达到850℃时需要添加的固废量

| 含水率/% | 60.00 | 70.00 | 80.76 |
|----------|-------|-------|-------|
| 添加固废量/kg | 0.009 | 0.038 | 0.096 |

由表6可以看出,添加固废燃料有助于焚烧烟气温度的提升,含水率越低,需要添加的固废量越少;含水率越高,需要添加的固废量越多。理论上,污泥不进行任何干化的情况下,只要添加足够的固废燃料同样可以使焚烧烟气温度达到标准要求。

理论计算表明,污泥和一般工业固废协同焚烧可以提高污泥焚烧的烟气温度,虽然一般工业固废会含有一定量的重金属元素,有些甚至是污泥中没有的重金属元素,但因污泥焚烧已经配备完整的烟气净化处理工艺,去除重金属效果比较好,现有运行污泥焚烧处置厂烟气中重金属指标排放均合格,因此固废可以协同焚烧。

所以,一般工业固废中的废塑料、皮革制品、制鞋边角料等高热值固体废物等可以转化成优质的高热值替代燃料,替代不可再生的化石能源作为燃料使用,从而实现固废变废为宝,这是实现能源结构调整、资源高效利用以及循环利用、环境生态综合治理

与保护,以及我国工业绿色发展和可持续发展的重要途径之一,是碳中和背景下的新风口,为实现“双碳”目标助力赋能。

3 结束语

本文通过燃煤锅炉热力计算方法,模拟市政污泥干化焚烧入炉含水率对烟气温度的影响。结果表明,污泥含水率越高,污泥焚烧烟气温度越低;当污泥仅采用机械干化,含水率在80%以上时,直接焚烧污泥烟气温度小于100℃。同时采用内插法计算污泥能够自持燃烧的含水率为55.89%。

在污泥含水率大于等于60%时,通过添加一般工业固废作为辅助燃料,仍能够使污泥焚烧烟气温度达到标准要求的850℃,说明一般工业固废作为辅助燃料可行。如果入炉污泥以收到基含水率(80%)为入炉含水率,通过添加大量的一般工业固废辅助燃料,仍可以满足焚烧烟气标准温度的要求,污泥协同一般工业固废焚烧在理论上可行。当然污泥协同一般工业固废焚烧仍需要在工程中进一步实践。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2021-10-12)[2022-03-01]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdkgknr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [2] 李雄伟,李俊,李冲,等. 我国污泥处理处置技术应用现状及发展趋势探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(16):26-30,35.
- [3] 华煜,杨东海,戴晓虎. 以无害化为目标、资源化手段补齐污泥处理短板[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(1): 85-89.
- [4] 赵发敏,李兴杰,冯楠,等. 污泥处理处置技术的应用研究及进展[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(6):50-54.
- [5] 李晓东,岑玉虹. 污泥流化床焚烧技术的研究及应用[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(2):159-162.
- [6] 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):49-52.
- [7] 胡维杰,周友飞,陈汝超,等. 上海市石洞口片区污泥干化焚烧处理工程设计总结与分析[J]. 给水排水, 2018, 54(9):34-41.
- [8] 胡维杰,周友飞,陈汝超,等. 石洞口污水处理厂污泥干化焚烧二期工程工艺要点解析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(16):41-47.
- [9] 林莉峰,王丽花. 上海市竹园污泥干化焚烧工程设计

- 及试运行总结[J]. 给水排水, 2017, 53(1): 15 - 21.
- [10] 贝舒瑜. 污泥干化焚烧处理工艺分析——以上海白龙港污泥处理工程为例[J]. 中国设备工程, 2021(15): 124 - 126.
- [11] YAN Jianhua, DENG Wenyi, LI Xiaodong, et al. Experimental and Theoretical study of agitated contact drying of sewage sludge under partial vacuum conditions[J]. Drying Technology, 2009, 27(6): 787 - 796.

Feasibility Study on Co-incineration of Sludge and General Solid Waste

ZHAO Famin

Abstract: As the main technology of sludge harmless treatment, sludge drying and incineration in urban sewage treatment plants are more and more used in engineering. In the theoretical process calculation of sludge incineration, many key technical parameters such as sludge combustion calorific value, flue gas composition and flue gas enthalpy can be obtained. In this paper, the thermal calculation method of coal-fired boiler was used to analyze the influence of different moisture content on the temperature of sludge incineration flue gas through theoretical calculation, and the moisture content of sludge self-sustaining combustion was calculated by interpolation method. At the same time, the amount of auxiliary fuel (general industrial solid waste) needed to be added when the temperature of sludge incineration flue gas with different moisture content reaches 850 °C required by the standard was calculated theoretically. The research shows that the higher the moisture content of sludge, the lower the temperature of sludge incineration flue gas, and the more auxiliary fuels need to be supplemented; generally, industrial solid waste has a high calorific value and can be used as an auxiliary fuel for sludge, which can be used in conjunction with sludge incineration.

Key words: sludge incineration; general industrial solid waste; moisture content; flue gas temperature; auxiliary fuel