

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.18.008

# 鼓泡流化床污泥焚烧炉焚烧控制技术研究

汪芸芸, 李梦琼, 林莉峰

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 与其他处理工艺相比,污泥焚烧处理速度快、处理量大,兼具减量化、稳定化、无害化和资源化等特点而受到越来越多的关注。污泥焚烧受热值、处理量、入炉含水率、一次风、二次风、循环风、燃烧器和喷水减温等因素的影响,良好的焚烧工况对焚烧炉长期稳定高效运行至关重要。以上海白龙港污泥二期鼓泡流化床污泥焚烧炉为对象,研究上述因素对鼓泡流化床污泥焚烧炉焚烧工况的影响。结果表明,污泥热值越高、处理量越大、入炉含水率越低,则焚烧越剧烈、温度越高,需采取有效措施防止焚烧炉超温。一次风和二次风通过过剩空气系数匹配入炉污泥量,可调节砂床温度;循环风通过风量调节控制焚烧炉温度;喷水减温对焚烧炉温度的控制取决于喷水量,不设置喷水装置的焚烧炉,因喷水量小,不作为焚烧炉污泥燃烧炉温控制措施。

**关键词:** 污泥焚烧; 鼓泡流化床; 焚烧控制; 影响因素

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)18-0042-05

## Study on Incineration Control Technology of Sludge Bubbling Fluidized Bed Incinerator

WANG Yun-yun, LI Meng-qiong, LIN Li-feng

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** With the advantage of fast treatment speed, large capacity, reduction, stabilization, harmless and resource utilization, sludge incineration has attracted more and more attention compared with other treatment processes. Sludge incineration is a complex process affected by many factors such as sludge calorific value, sludge treatment amount, water content of sludge, primary air, secondary air, recirculating air, burner and water spray temperature reduction, etc. Good incineration condition is crucial for the long-term, stable and efficient operation of the incinerator. Bailonggang sludge disposal phase II project was taken as the research subject in this paper, and the effects of the above factors on the incineration conditions of bubbling fluidized bed sludge incinerator were studied. The results showed that the incinerator temperature would be higher under higher sludge calorific value, larger treatment amount and lower sludge water content. Effective measures were needed to prevent the incinerator from being over-temperature. The sand bed temperature was adjusted by matching the primary and secondary air and the sludge quantity through the excess air coefficient. The incinerator temperature was controlled by recirculating airflow. The temperature control of the incinerator by water spray depends on the amount of water sprayed, and spray water was not used to control the temperature of the incinerator without water

基金项目: 上海市科技基金资助项目(20230730100)

通信作者: 汪芸芸 E-mail: wangyunyun@smedi.com

spraying device for the small amount of water spraying.

**Key words:** sludge incinerate; bubbling fluidized bed; incineration control; influence factor

相对于其他处置方式,污泥焚烧具有处理速度快、处理量大、占地面积小等优点,可以达到更为彻底的减量化、稳定化和无害化目的。同时,污泥焚烧后产生的热量以及性能稳定的残渣可进一步回收利用,从而达到污泥资源化的目的<sup>[1-2]</sup>。

污泥相对于其他常规燃料,其性质存在较大的波动性,必须采取各种控制措施确保焚烧状态的稳定<sup>[3]</sup>。根据国家法规要求,污泥焚烧必须同时满足温度 $\geq 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、停留时间 $\geq 2\text{ s}$ 的条件,以确保污染物的达标排放。提高焚烧温度有利于促进污泥燃烧和有毒物质的分解、破坏,但过高的焚烧温度不但会造成能量损失、 $\text{NO}_x$ 含量增加,还容易引起受热面结焦,从而降低效率甚至引起设备的损坏,因此良好的焚烧过程控制对污泥焚烧项目的稳定运行和经济性尤为重要。

## 1 白龙港污泥二期鼓泡流化床焚烧炉概况

白龙港污泥处理处置二期工程采用“离心脱水+流化床干化+流化床焚烧+SNCR+静电除尘器+布袋除尘器+湿式脱酸塔+物理吸附塔”处理工艺。污泥处理规模为486 tDS/d,共设6条焚烧处理线,分为3个生产单元,每个单元包含5条脱水线、3条干化线、2条焚烧和烟气处理线,每条焚烧线设计处理能力为100 tDS/d。

采用鼓泡流化床污泥焚烧炉,其结构见图1。

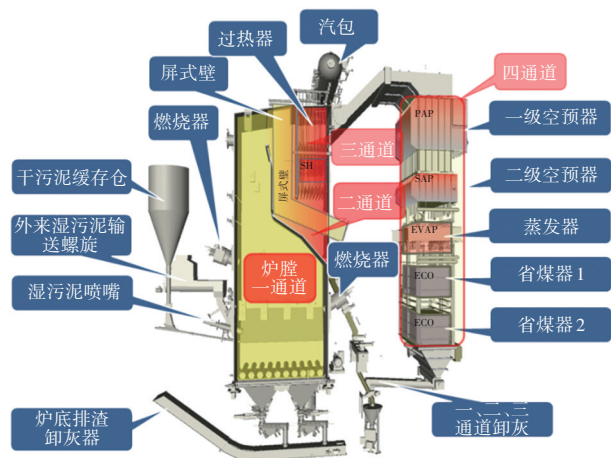


图1 鼓泡流化床焚烧炉结构

Fig.1 Structure of bubbling fluidized bed incinerator

鼓泡流化床焚烧炉主要分为四个通道,一通道

由膜式水冷壁作为壳体,内部浇筑耐火材料,是污泥焚烧的主要部位,底部设有布风管。一通道前后墙共设两台燃烧器,用于焚烧炉启动、污泥处理量低、污泥热值低的情况下维持焚烧炉运行所需的温度。一通道的焚烧炉底部还设有链式输送机,用于排出污泥焚烧剩余的炉渣。污泥在一通道内燃烧后的烟气经二通道、三通道和四通道与锅炉水、风进行换热,回收利用烟气余热,使得污泥生物质能源得到利用。

二通道和三通道亦由膜式水冷壁构成(无耐火材料),内部安装屏式水冷壁和过热器,利用污泥焚烧产生的烟气与锅炉水换热,实现热量回收利用。由于烟气中灰分含量较高,二通道和三通道设有水冷卸灰装置,收集沉积的烟气灰分。焚烧炉顶部设有汽包,焚烧炉给水被焚烧后产生的高温烟气加热后在此转化为蒸汽,供给干化机、除氧器、烟气再热器及其他用户。

四通道包括空预器(一级空预器、二级空预器)、蒸发器和省煤器,继续利用烟气余热分别加热一次风、二次风和焚烧炉给水,进一步提高烟气余热的利用效率。四通道底部同样设有卸灰装置,与二通道和三通道中的烟气沉淀灰分一起送入输灰系统,最终输送至灰仓。

焚烧炉设计2台尿素喷枪,向焚烧炉内喷入尿素溶液(压缩空气雾化)抑制污染物 $\text{NO}_x$ 的生成。焚烧炉上设有1个干污泥投料口、2个湿污泥投料口和1个外来污泥投料口,分别向焚烧炉投加干污泥(含水率 $<10\%$ )、湿污泥(含水率约为80%)以及本厂以外的半干污泥(含水率为30%~40%)。

## 2 鼓泡流化床燃烧控制

焚烧炉启动阶段首先进行锅炉吹扫,然后启动燃烧器,按照 $100\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度使炉膛温度升至 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、流化床温度 $>510\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,达到投料温度后启动干污泥投料系统向焚烧炉投加干污泥,后逐步增加干污泥的投加量,逐步降低燃烧器的负荷直至燃烧器退出。在砂床温度达到 $710\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,开始投加湿污泥,直至炉温和砂床温度达到限值范围,焚烧炉开始稳定运行。

污泥采用炉内混合的方式,入炉后的污泥落入焚烧炉流化床,与流化床内扬起的高温石英砂混合、加热、点燃、燃烧。污泥燃烧所需的氧气通过一次风、二次风补给。一次风通过一次风机送入焚烧炉底部的布风管进入焚烧炉,同时一部分一次风被作为干污泥、外来干污泥的输送气体,将污泥吹入焚烧炉中,均匀分布在砂床上。二次风通过二次风机经焚烧炉后燃室左、右侧风管和燃烧器进入焚烧炉,通过左、右侧风管进入焚烧炉的二次风作为污泥二次燃烧空气补充,确保污泥在焚烧炉炉膛充分燃烧;通过燃烧器的二次风为天然气燃烧提供空气,并作为燃烧器的冷却风。为增加焚烧炉燃烧控制的灵活性,鼓泡流化床污泥焚烧炉还设置了烟气循环系统,循环烟气取自引风机后的经除尘和脱硫的尾气,一部分循环烟气通过循环风机进入焚烧炉左、右侧,用以控制炉膛温度;一部分循环烟气作为部分一次风,保障污泥低负荷运行阶段有足够的流化风,确保砂床处于稳定的流化状态。

本工程鼓泡流化床污泥焚烧炉设计热负荷为15.1 MW,污泥焚烧炉内自持燃烧设计脱水污泥高位热值为9.59~18.34 MJ/kg、设计入炉含水率为33%~68%,单台焚烧炉设计污泥处理量>100 tDS/d。测试期间,鼓泡流化床污泥焚烧炉实际处理量为110 tDS/d,污泥入炉含水率约42%,入炉污泥干基高温发热量约11.3 MJ/kg,设计运行炉温850~1 000 °C(额定处理量条件下,建议运行温度为980 °C),一次风新风量为8 500 m<sup>3</sup>/h,二次风风量约7 500 m<sup>3</sup>/h,再循环风量约1 500 m<sup>3</sup>/h,砂床温度为780 °C,砂床床压约为10 kPa,焚烧炉出口烟气氧含量为5%~6%。

### 3 燃烧影响因素

鼓泡流化床污泥焚烧炉受污泥热值、污泥处理量、污泥入炉含水率、一次风、二次风、再循环风、燃烧器和喷水减温等因素影响,具体如下:①污泥热值越高,燃烧越剧烈,焚烧炉温度越高;相反,则越不利于燃烧,可能需要添加辅助燃料。②污泥处理量越大,焚烧炉热负荷越高,释放能量越多,焚烧温度越高;相反,焚烧温度将降低,可能需要添加辅助燃料。③污泥入炉含水率越高,可供利用的热量越少,炉膛温度越低,排烟损失越大,燃烧越不利;反之,含水率越低,可供利用的热量越多,炉膛温度越

高,排烟损失越小,越有利于燃烧。④一次风和二次风通过过剩空气系数影响燃烧,合适的过剩空气系数有利于污泥与氧气的接触混合,实现完全燃烧。但过剩空气系数不能过大,否则将降低炉内燃烧温度,增大排烟热损失,并且会使NO<sub>x</sub>产物浓度升高,根据经验,污泥燃烧过剩空气系数约为1.4~1.6。⑤通过处理后的低温低含氧量烟气回用入炉,燃烧温度越高,所需的再循环风量越大;反之,再循环风量越小。⑥在焚烧炉启动、污泥投加量低、污泥热值低的情况下,燃烧器可用于助燃,以维持焚烧炉炉膛温度。⑦焚烧炉喷水量越大,降温效果越明显;反之降温效果越差。

## 4 燃烧控制研究

### 4.1 污泥热值

白龙港污泥二期焚烧炉设计污泥热值为9.59~18.34 MJ/kg,污泥入炉含水率为32%~67%。在其他条件相对恒定的情况下,焚烧炉温度随着污泥热值的增大而升高。当污泥热值较高时,焚烧炉存在超温风险,需适量降低焚烧炉投泥量、增大入炉污泥含水率;反之,污泥热值低,焚烧炉温度较低,需适量增加焚烧炉投泥量,降低入炉污泥含水率。

### 4.2 污泥处理量

在污泥热值、过量空气系数和污泥入炉含水率等恒定的条件下,调节干污泥和湿污泥投加量,研究污泥投加量与炉温之间的关系,结果如图2所示。当污泥投加量从106 tDS/d增加至125 tDS/d(按瞬时污泥投加量折算,下同)时,鼓泡流化床焚烧炉稀相区上部温度自910 °C升至930 °C、后燃烧室温度自950 °C升至985 °C(稀相区和后燃烧室位置见图3)。

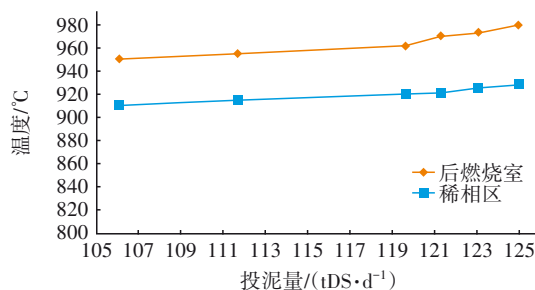


图2 污泥处理量与炉温的关系曲线

Fig.2 Relationship curve of sludge treatment amount and furnace temperature

由图2可知,焚烧炉温度随着污泥处理量的增加而升高。当焚烧炉温度因处理量增加而上升时,



建议减少污泥投加量;反之增加污泥投加量。

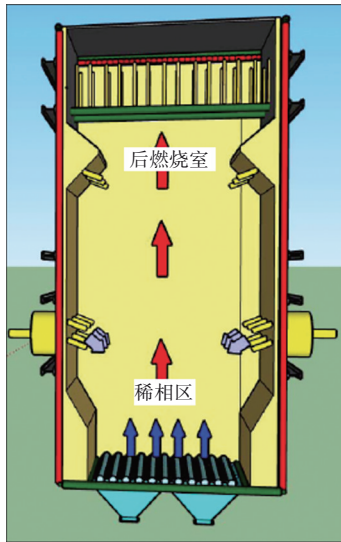


图3 鼓泡流化床焚烧炉剖面

Fig.3 Profile of bubbling fluidized bed incinerator

#### 4.3 污泥含水率

白龙港污泥二期鼓泡流化床污泥焚烧炉采用后混方式投加污泥,入炉污泥平均含水率可以通过干湿污泥投料配比进行调节,入炉污泥含水率对焚烧炉温度的影响见图4。

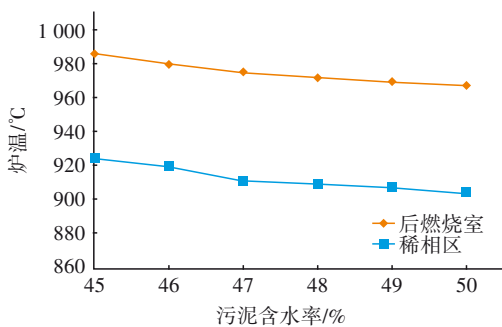


图4 污泥含水率对炉温的影响

Fig.4 Influence of sludge moisture on incinerator temperature

在污泥热值、过剩空气系数和污泥投加量恒定的条件下,当入炉污泥含水率自45%增加至50%时,稀相区温度自925℃下降至905℃、后燃烧室温度自985℃下降至970℃。

焚烧炉温度随着入炉污泥含水率的增加而降低,当焚烧炉温度较高时,可减少干污泥投加量/增加湿污泥投加量,增加入炉污泥含水率;反之可增加干污泥投加量/减少湿污泥投加量,减少入炉污泥含水率。

#### 4.4 一次风、二次风风量

一次风和二次风为污泥焚烧提供所需的氧气,通过过剩空气系数影响污泥的燃烧程度。合适的过剩空气系数可实现污泥的完全燃烧,根据经验,污泥燃烧过剩空气系数约为1.4~1.6,在设计处理量下,一次风设计最大风量为11 000 m<sup>3</sup>/h(一次风风量通过砂床温度控制)、二次风设计最大风量为16 000 m<sup>3</sup>/h。一次风和部分再循环风一起为流化床砂床流化提供动力,保证流化床充分流化。

在污泥投加量、过剩空气系数恒定的前提下,维持砂床充分流化,一次风新风量对砂床温度和二次风风量的影响见图5。当一次风风量从8 050 m<sup>3</sup>/h增至9 050 m<sup>3</sup>/h时,砂床温度从760℃上升至805℃,二次风风量从约7 800 m<sup>3</sup>/h减少至约6 800 m<sup>3</sup>/h,焚烧炉温度基本恒定。

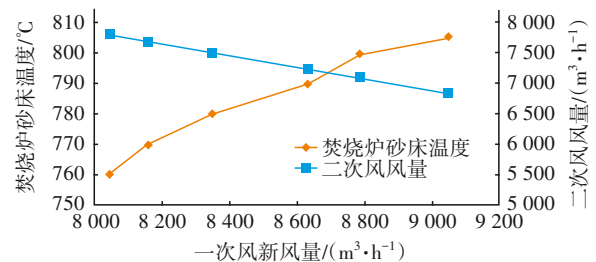


图5 一次风新风量和砂床温度、二次风风量的关系曲线

Fig.5 Relationship curve of primary air volume, sand-bed temperature and secondary air volume

为保证污泥在鼓泡流化床中充分燃烧,需根据污泥处理量的变化调整入炉空气量,以维持恒定的过剩空气系数。污泥处理量对二次风风量的影响见图6。由图6可知,随着污泥处理量的增加,为维持过剩空气系数和砂床温度的稳定,系统会自动增加二次风风量,以保证污泥充分燃烧。

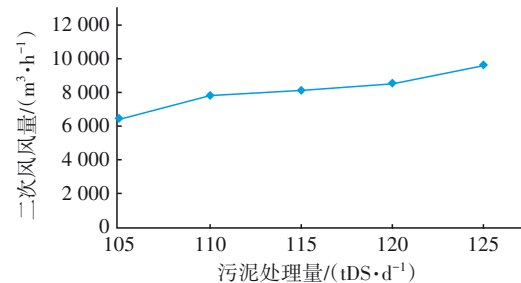


图6 污泥处理量和二次风风量的关系曲线

Fig.6 Relationship curve of sludge treatment amount and secondary air volume

在污泥热值、处理量和入炉含水率恒定的前提

下,一次风和二次风总量维持不变,但一次风和二次风可在一定的范围内相互调节。当砂床温度低于目标设定值( $780^{\circ}\text{C}$ )时,一次风新风量增加,二次风风量减少;反之,砂床温度高于设定值( $780^{\circ}\text{C}$ )时,一次风新风量减少,二次风风量增加。

#### 4.5 再循环风

污泥焚烧飞灰的灰熔点检测结果表明,其变形温度约为 $1\,130^{\circ}\text{C}$ 。因此燃烧过程需控制炉温,避免焚烧炉结焦的潜在风险。白龙港污泥二期鼓泡流化床将除尘和脱酸后的烟气作为再循环风(约 $130^{\circ}\text{C}$ )控制燃烧温度,再循环风量通过焚烧炉炉温控制,热负荷大,焚烧炉炉温高,再循环风风量大;反之,再循环风风量小。再循环风风量和焚烧炉炉温、投泥负荷关系见图7,当污泥投加负荷由 $105\text{ tDS/d}$ 提升至 $125\text{ tDS/d}$ 时,再循环风风量从 $1\,400\text{ m}^3/\text{h}$ 增加至 $2\,500\text{ m}^3/\text{h}$ ,控制焚烧炉炉膛温度 $<980^{\circ}\text{C}$ ,以防止炉膛超温和焚烧炉结焦。

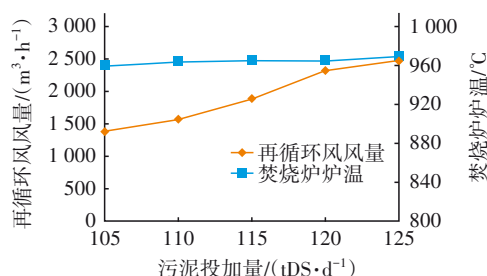


图7 再循环风风量、炉温和污泥处理量的关系曲线

Fig.7 Relationship curve of circulating air volume, furnace temperature and sludge treatment amount

#### 4.6 喷水减温

喷水减温对焚烧炉温度的影响取决于喷入焚烧炉内的水量。白龙港污泥二期鼓泡流化床焚烧炉无喷水减温装置,SNCR流量调节绝对范围较小(尿素溶液流量为 $0\sim 30\text{ L/h}$ ),向焚烧炉内喷入的水量变化较小,对炉温控制作用有限。因此在不设置喷水减温装置的焚烧炉中,SNCR不作为焚烧炉污泥焚烧温度控制措施。

### 5 结论

良好的焚烧工况对焚烧炉长期稳定高效运行至关重要,白龙港污泥处理工程焚烧炉设计上考虑了多种措施,可以实现对焚烧工况的灵活控制,确

保焚烧炉的稳定运行。

焚烧炉日常运行过程中可通过一次风风量调节和控制砂床温度,通过污泥投加量和过量空气系数确定燃烧所需总风量进而确定二次风风量。当焚烧炉炉温较高时,可通过减少污泥投加量、降低干湿污泥配比提高入炉污泥含水率和增加再循环风风量等措施,降低焚烧炉温度;反之,应增加污泥投加量、提高干湿污泥配比降低污泥入炉含水率、减少循环风风量,或当焚烧炉温度 $<850^{\circ}\text{C}$ 时启动燃烧器辅助燃烧等措施提高焚烧炉炉温。

白龙港污泥二期鼓泡流化床焚烧炉无喷水减温装置,SNCR调节作用较小,不作为焚烧炉污泥燃烧温度控制措施。

#### 参考文献:

- [1] 顾杨,王丽花. 现代污泥处理厂建设设计、运营与管理[M]. 北京:化学工业出版社,2019.  
GU Yang, WANG Lihua. Modern Sludge Treatment Plant Construction Design, Operation and Management [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019 (in Chinese).
- [2] 王志国,蓝梅,刘晓琳. 污泥焚烧技术研究[J]. 市政技术,2016,34(4):148-149,172.  
WANG Zhiguo, LAN Mei, LIU Xiaolin. Research of sewage sludge incineration technology [J]. Municipal Engineering Technology, 2016, 34 (4) : 148-149, 172 (in Chinese).
- [3] 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 Zhongmin, ZHANG Ning, et al. The study on the wastewater sludge incineration technology [J]. Environmental Engineering, 2005, 23 (6) : 48-52 (in Chinese).

作者简介:汪芸芸(1987- ),男,安徽宣城人,硕士,工程师,所长助理,研究方向为污水和污泥处理等。

E-mail:wangyunyun@smedi.com

收稿日期:2021-04-17

修回日期:2021-04-29

(编辑:丁彩娟)