

# 污泥干化和焚烧厂的仿真模拟

周夏海, 朱先富

(得利满水处理系统<北京>有限公司, 北京 100026)

**摘要:** 针对市政污泥的特点, 苏伊士公司对南方某在建污泥焚烧项目创建了污泥焚烧模型, 并将 PLC 程序、SCADA 程序同仿真模型相结合, 进行了模拟测试。通过模拟测试, 一方面检验了 PLC 程序的正确性和可操作性, 另外还可以设定不同的污泥性质, 模拟干化焚烧系统的运行状态, 调整各项参数, 找到最佳运行值。调试人员通过培训, 可提前熟悉操作界面和操作习惯, 为尽快接手调试工作创造了良好的前提条件。

**关键词:** 市政污泥; 干化和焚烧模型; 仿真运行

**中图分类号:** X705 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)05-0108-04

## Simulation of Sewage Sludge Drying and Incineration Plant

ZHOU Xia-hai, ZHU Xian-fu

(Degremont Water Treatment Systems <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100026, China)

**Abstract:** SUEZ group built a sludge drying and incineration model, with respect to sewage sludge characteristics, for a plant under construction at a local municipality in South China. The simulation model was coupled with the PLC programs and SCADA programs, and tested for accuracy and usability. In addition, operation parameters were adjusted and optimized according to a variety of sludge characteristics in the simulation of sludge drying and incineration processes. Through training and practice, operation engineers could get familiar with the control panels and operation customs, in order to facilitate the transferal of the new plant.

**Key words:** sewage sludge; drying and incineration model; simulation operation

在我国大中型城市,随着人民生活水平日益提高及污水处理设施的日臻完善,产生了越来越多的污泥,然而可用于填埋脱水污泥的场所越来越少。污泥干化和焚烧作为解决这种矛盾的方法,成为今后大中型城市污泥处理的方向之一<sup>[1~3]</sup>。

相对于污水处理工艺,污泥干化和焚烧工艺具有技术要求高、逻辑关系复杂、控制精度严格、停车损失大、成熟经验少等特点。为了确保污泥焚烧厂的运行效果,苏伊士水务工程(原得利满公司)决定使用污泥干化-焚烧模型,在调试之前,对运行逻辑和运行效果进行模拟测试。

该项目相关的边界条件被代入其中,模拟系统的运行情况,得到运行数据以及各项参数之间的变

化关系等。调试之前,通过模拟运行,查找问题,提前完善程序,培训人员,为顺利调试进行积极准备。

### 1 污泥处置厂工艺简介

南方某城市兴建 800 t 湿污泥/d 的污泥处置厂,主要采用污泥干化+焚烧工艺。

污泥预干化使用薄层蒸发器,利用蒸汽将脱水污泥从 20% 含固率提高到 36% 含固率,成为半干污泥。半干污泥被柱塞泵投入焚烧炉内进行焚烧,焚烧之后的烟气首先进入空气预热器,进行能量的一级利用,用于加热流化风至 618 ℃。

换热之后的烟气温度约为 580 ℃,进入余热锅炉进行能量的二级利用。这部分烟气作为热源生产 900 kPa 的饱和蒸汽。余热锅炉出口烟气温度约为

215 ℃。之后,烟气进入后续的烟气处理系统,包括旋风除尘器、急冷器、布袋除尘器和湿式洗涤塔,最后通过烟囱排入大气。

全厂还设有辅助锅炉用于补充蒸汽;设有应急除臭系统,用于去除紧急情况下产生的恶臭。

## 2 污泥干化和焚烧系统的仿真模型

数学模型主要围绕两个主系统——污泥干化和污泥焚烧建立。

### 2.1 污泥干化模型

污泥干化模型的重要输入参数为脱水污泥的含固率、脱水污泥的进泥量、蒸汽压力;重要的输出参数为蒸汽的消耗量、半干污泥的含固率、半干污泥的产量。数学模型为经验公式,是苏伊士公司对数十个污泥干化项目的经验总结。

$$\Phi_{\text{vapourA}} = f(P_{\text{max}}, P, Q_{\text{max}}, \eta) \quad (1)$$

$$D_{\text{so\_A}} = f(\Phi_{\text{Ds\_A}}, \Phi_{\text{vapourA}}, \text{Coef}) \quad (2)$$

式中: $\Phi_{\text{vapourA}}$ 为热废气量, $P_{\text{max}}$ 为最大蒸汽压力, $P$ 为运行蒸汽压力, $Q_{\text{max}}$ 为最大蒸汽流量, $\eta$ 为换热效率, $\Phi_{\text{Ds\_A}}$ 为干化机进泥含固率, $D_{\text{so\_A}}$ 为干化机进泥量, $\text{Coef}$ 为实际泥质同设计泥质的比例系数。

通常情况下,在调整干化机进口蒸汽压力之后,干化机出口污泥含固率将在 20 ~ 30 min 后开始出现变化。为缩短模拟时间,将回馈时间调整到 2 ~ 5 min,这样既满足了回馈特点,又不至于在模拟测试时期花费过多的时间。

### 2.2 污泥焚烧模型

污泥焚烧涉及物理变化和化学变化,因此模型较污泥干化要复杂。重要的输入参数为半干污泥的含固率、污泥流量、流化风温度和流量、空气温度和流量以及尿素等投加物的温度和流量等;输出参数为燃气消耗量、烟气的流量和温度以及烟气中氧含量等。焚烧模型主要利用质量和能量守恒公式。质量平衡方程:

$$\Phi_{\text{f\_g\_m}} = F_{\text{m1}} + F_{\text{m2}} + F_{\text{m3}} + F_{\text{m4}} \quad (3)$$

式中: $\Phi_{\text{f\_g\_m}}$ 为烟气流量; $F_{\text{m1}}$ 为干燥烟气流量; $F_{\text{m2}}$ 为吹扫空气流量; $F_{\text{m3}}$ 为水分流量; $F_{\text{m4}}$ 为尿素和炉顶喷射流量。

能量平衡方程:

$$\frac{dE_{\text{g}}}{d\tau} = E_{\text{i1}} + E_{\text{i2}} + E_{\text{i3}} + E_{\text{i4}} - E_{\text{i0}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{i1}}$ 为干固体和燃气的潜热; $E_{\text{i2}}$ 为干固体带入的热量; $E_{\text{i3}}$ 为气体带入的热量; $E_{\text{i4}}$ 为水分带入

的热量; $E_{\text{i0}}$ 为水分蒸发吸收的热量。

烟气中氧气量来自于吹扫风和冷却气中的氧以及助燃空气中的过剩氧量。氧气量同烟气量的比值为烟气中的氧含量。

## 3 仿真系统简介

仿真系统主要对干化机、焚烧炉、空气预热器和余热锅炉的工艺进行仿真模拟。该仿真系统采用 174 个公式对仿真对象进行模拟。

操作人员通过 SCADA 系统向 PLC 下达指令,再由 PLC 对设备进行相应的动作,并将参数传输到仿真软件中。仿真软件收到运行状态和参数后,在后台进行计算和模拟,得到相关的运行参数。PLC 接收这些参数(例如温度、压力、流量)后,系统运行状态相应进行调整,然后 PLC 将这些数据和状态上传到 SCADA 上位机组态画面上。为尽可能保持同实际状态一致,SCADA 系统的画面和操作方式以及 PLC 程序同实际运行一致。

仿真系统分为三个模块,即污泥干化模块、污泥焚烧模块和应急除臭模块。三个模块完成各自的建模工作,两个模块之间通过同一传递参数相连。例如在本项目中,污泥干化模块同污泥焚烧模块之间相连的参数为污泥干化机出口半干污泥参数,包括半干污泥的流量、干度、热值等数据。整个仿真系统的编程工作分为三个部分,分别为上位机画面编程、PLC 逻辑编程、Control build 仿真编程。

## 4 逻辑测试

在进行仿真模拟之前,首先对功能逻辑进行测试。测试流程按照 FAT(自动化系统出厂检验标准)执行,对设备的手动、远程手动和远程自动功能进行验证。测试内容按照功能分析内容执行,分别对正常状态、异常状态进行逻辑测试。本项目共计测试 1 987 条,同仿真系统相关的逻辑测试为 876 条,在仿真模拟之前已经测试完毕,并且在测试确认单上进行了确认。

上位机同 PLC 之间进行信号核对,信号核对完毕后,操作人员在上位机上进行操作,检验虚拟设备的各项运行情况,以及系统内部逻辑运行情况。

## 5 仿真模拟

在前期的摸底中发现目前拟进入污泥焚烧厂的污泥性质较投标阶段有了一定变化,为预先了解泥质对焚烧的影响,借助仿真系统对不同泥质进行模拟,并采取了相应措施。

## 5.1 污泥含固率降低

仅仅将进泥含固率降低,而不调整污泥干化机,则从仿真模拟曲线可以得到,如果污泥含固率从25%降至20%,干化机出口污泥含固率从38%降到31%,5 min内焚烧炉内自由区的温度将从854℃降低到809℃,加注燃气10 min后则系统恢复正常。

如果对污泥干化机进行调整,使出泥含固率保持38%不变,焚烧炉自由区内的温度变化幅度明显减少(见图1)。温度从854℃下降到837℃,下降了17℃。相比较未进行干化机调整时45℃的降温,降温降幅小了很多。此外,降温后加注燃气,温度恢复的时间也相应缩短。进行干化调整后的焚烧炉自由区,温度下降后5~6 min即回到850℃。而没有进行干化调节的情况,恢复到850℃则需要10 min。

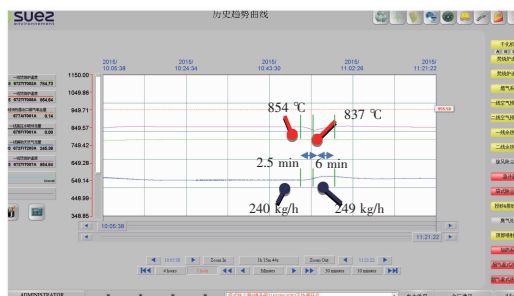


图1 污泥含固率变化对焚烧炉炉温的影响

Fig. 1 Influence of solid content on furnace temperature

综上所述可以看出,焚烧炉前端进泥条件对焚烧炉的运行会产生显著影响,而一旦焚烧炉参数变化,调整的时间会较长,因此苏伊士对前端设备的控制要求较高,例如本项目中带有进泥螺杆泵标定设备,每隔一段时间对螺杆泵进行一次标定,保证污泥投加量计量准确。根据苏伊士法国焚烧厂的经验,加装了在线污泥含固率测定仪,操作人员能及时根据不同泥质调整污泥干化机的运行参数,使干化机出口的半干污泥尽量保持稳定。实时测量干化机的前、后干化段的冷凝水温度,可以分别调整干化机进气蒸汽阀的开度,以不同的蒸汽温度对干化机前半部分和后半部分分别进行加热,保持干化机出口半干污泥品质稳定。所有措施都是为了尽量维持焚烧炉前端进泥稳定。

## 5.2 污泥热值变化

模拟进泥热值从8 329 kJ/kgDS突然降低到7 320 kJ/kgDS,结果见图2。

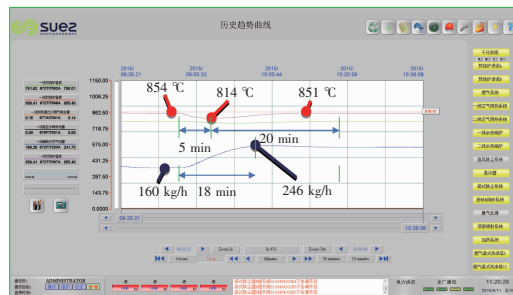


图2 污泥热值变化对焚烧炉炉温的影响

Fig. 2 Influence of sludge heat value on furnace temperature

从图2可以看出,5 min内焚烧炉内自由区的温度从854℃降到814℃,下降40℃;沙床温度从784℃降到768℃,下降16℃。20 min后,系统才能恢复正常。同时燃气量将从160 kg/h升高到246 kg/h。

由于焚烧时,焚烧炉自由区温度需要保持在850℃以上,因此保持污泥热值稳定对于焚烧效果十分重要。为了能够将焚烧炉内的温度维持在850℃以上,根据模拟测试结果,对焚烧炉的控制方式进行了调整:①将焚烧炉的正常工作温度从850℃提高到865℃,保证焚烧炉运行有一定的富裕度。②根据不同热值的泥质进行模拟,得到焚烧达标时不同的燃气量(例如上例中的246 kg/h)。当焚烧炉炉温出现波动,燃气量将按照快速调整模式(见图3),将直接分步调整至达标燃气量,然后在规定区间内进行PID微调,而不是直接采用PID进行调节,避免超调和调节速度过慢的情况,以保证焚烧炉内的温度维持在850℃以上。

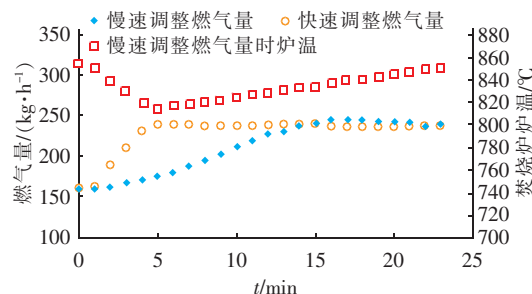


图3 焚烧炉燃气调整方式

Fig. 3 Adjusting mode of gas for incinerator

从仿真模拟结果看,相对于污泥含固率的变化,污泥热值变化对焚烧效果的影响更为明显。究其原因,当脱水污泥含水量变化时,可以通过调整干化机的运行,使干化机出口含固率尽量保持一致,这样可以减少对焚烧的影响,而热值则无法在干化阶



段进行调整。

### 5.3 焚烧炉处理量降低

在本模型中由于燃气量是自动计算得到的,当燃气量消耗到最大时,可以认为焚烧炉达到当前工况下的最大进泥量。例如当脱水污泥含固率为22%、低位热值为5 600 kJ/kgDS、半干污泥含固率为35%时,考虑到焚烧炉自由区温度为850℃以及最大的燃气供给量为325 kg/h,测试模拟系统给出的污泥供应负荷最高只能到正常处理量的85%。

当半干污泥的含固率从35%调整到38%,维持污泥热值和燃气投加量不变,在保证焚烧炉炉温维持在850℃以上的情况下,模拟系统给出的焚烧系统进泥负荷可以从85%提高到91%。

当污泥的低位热值达到10 400 kJ/kgDS,此时不仅焚烧炉的污泥负荷可以达到100%,而且无需投加燃气,焚烧炉自由区温度将达到884℃。

从模拟试验看出,焚烧炉的处理负荷同半干污泥的含固率以及污泥热值关系紧密。以上两个数据中的任意一个发生变化,都会引起焚烧系统处理量的变化。

## 6 仿真测试优点及关注点

### 6.1 仿真测试优点

① 一套完整的仿真模拟系统能够正常使用,需要自控、调试、电气和SCADA等多专业人员共同协作,可及时发现相关专业之间的界面可能存在的遗漏问题、程序中错误或者需要完善之处。

② 利用仿真系统进行热态调试、临界值调试时,无需担心设备或系统损坏。

③ 通过模拟操作,各专业人员可提前优化上位机画面。

④ 通过模拟操作,可提前培训调试人员,使其熟悉操作方式。

⑤ 通过模拟软件,在现场入口条件变化时,可快速得到工艺调整的目标值,提前调整,减少现场摸索时间。

### 6.2 仿真测试关注点

① 每次只能针对某个项目进行仿真模拟。

② 针对模拟的内容进行建模,非模拟部分采用经验值,在进行模拟结果分析时需予以注意。

③ PLC、SCADA的工作可以在今后实际运行中投入使用,但仿真模型今后运行中将不会使用。因此相对于PLC和SCADA的工作,仿真模拟需额

外进行程序编制,增加了执行成本。

④ 仿真结果同实际运行情况有一定的差距,需要在实际运行中予以不断修正。

## 7 结论

① 通过给出不同的污泥性质,在仿真模拟情况下了解焚烧炉的变化情况,指出污泥性质(污泥含固率及热值)对于焚烧至关重要。

② 通过仿真模拟结果,提前一年对污泥的泥质展开测试,并根据测试结果从20多个污水厂中选择9个污水厂作为污泥来源。再针对9种污泥进行调配,确定每条焚烧线的进泥泥质。

③ 通过仿真模拟结果,对原设计进行了调整,例如增加了污泥计量装置、污泥干度计,调整了污泥干化机的控制方式、焚烧炉的运行温度及燃气投加控制方式,以期在实际运用中能达到更好的效果。

## 参考文献:

- [1] 胡维杰,孙晓,卢骏营. 上海白龙港片区污水处理厂污泥处理处置技术探讨[J]. 中国给水排水,2016,32(2):1-5.
- [2] 陈大力,向小波,牛文台. 污泥干化、余热回收及补充热源系统的电控设计[J]. 中国给水排水,2016,32(4):94-97.
- [3] 柯乐,郑小龙,岑启航,等. 佛山市北江水厂污泥处理系统的设计与运行[J]. 中国给水排水,2015,31(24):74-78.



作者简介:周夏海(1977-),男,浙江嵊州人,硕士,工程师,主要从事给水及污水处理调试工作。

E-mail: xiahai. zhou@ suez. com

收稿日期:2016-08-12