

# 污泥高级厌氧消化前后的热风对流干燥特性

詹咏<sup>1</sup>, 叶汇彬<sup>1</sup>, 董滨<sup>2</sup>, 黄远东<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 利用热风对流干燥技术对脱水污泥及高级厌氧消化后的污泥进行了对流干燥试验。研究了风温、风速和样品厚度对污泥的干燥效果。结果表明, 在相同的工况下, 高级厌氧消化后的污泥的干燥效率高于脱水污泥的干燥效率。在风温、风速和污泥厚度分别在 120 °C、6 m/s 和 10 mm 的工况下, 脱水污泥的最高干燥速率为 80.7 mg/(g·min), 而厌氧消化沼渣的最高干燥速率为 486.2 mg/(g·min), 厌氧消化沼渣的干燥速率是脱水污泥干燥速率的 6 倍。在实际处理中, 污泥可考虑先经过高级厌氧消化之后, 再通过对流干燥达到减量的目的。

**关键词:** 污泥; 高级厌氧消化; 沼渣; 干燥

**中图分类号:** X 705 **文献标志码:** A

## Characteristics of advanced anaerobic digestion biogas residue by hot air convection drying

ZHAN Yong<sup>1</sup>, YE Huibin<sup>1</sup>, DONG Bin<sup>2</sup>, HUANG Yuandong<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The convection drying experiments were carried out on the dewatered sludge and the advanced anaerobic digestion biogas residue by hot air convection drying technology. The effects of hot air temperature, flow rate, and sample thickness on sludge drying were investigated. The results show that the drying efficiency of sludge after the advanced anaerobic digestion is higher than that of dewatered sludge under the same conditions. The maximum drying rate of the advanced anaerobic digestion biogas residue was 486.2 mg/(g·min), which was 6 times of that of dewatered sludge 80.7 mg/(g·min) under the hot air temperature 120 °C, flow rate 6 m/s and sample thickness 10 mm. In the actual treatment, the sludge may be first subjected to the advanced anaerobic digestion, and then reduced by means of drying.

**Keywords:** sludge; advanced anaerobic digestion; anaerobic digestion residue; drying

收稿日期: 2019-09-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402504); 国家自然科学基金资助项目 (51578397); 上海市科技人才计划项目 (17XD1420500)

第一作者: 詹咏 (1970-), 副教授. 研究方向: 水污染控制工程方向. E-mail: jannet6@163.com

通信作者: 董滨 (1978-), 教授. 研究方向: 城市污泥资源化能源化技术研究. E-mail: tj\_dongbin@vip.163.com

随着我国污水处理的现代化进程发展, 污泥作为固体废弃物逐渐成为环境方面的重点社会问题。污泥含水率通常很高, 并且散发浓烈的异味和存在有毒有害物质, 如若无法合理处理此类固体废弃物, 将对周边环境及人类产生非同寻常的危害<sup>[1]</sup>。因此需开发先进技术, 在将污泥作为固体废弃物处理和处置的同时, 把污泥当中的有机质转变为可以加以利用的能源。在实现污泥减量化、稳定化、无害化的基础上, 达到污泥可持续化利用, 这已成为世界上污泥处理处置研究的重中之重<sup>[2]</sup>。高级厌氧消化技术相比传统中温厌氧消化, 更易于提高挥发性固体负荷降解率<sup>[3]</sup>。Deng 等<sup>[4]</sup>研究了两种不同的城市污泥的热风对流干燥特性以及动力学特性。Mahmoud 等<sup>[5]</sup>研究了干燥温度、热风风速、湿度等不同因素与干燥速率之间的函数关系。马学文等<sup>[6]</sup>研究解析了不同质量的污泥固体颗粒在恒温干燥条件下的干燥特性; 魏海娟<sup>[7]</sup>研究了油泥的薄层干燥特性和各物料样品的薄层干燥动力学模型。冯俊亭等<sup>[8]</sup>则是对污泥进行干燥特性试验, 得出为有效提高污泥干燥速率, 可将干燥温度提升至沸点以上, 同时还提出了两种模拟模型——简变扩散模型及污泥干化常扩散模型, 用来预测不同工况下污泥含水率随干化时长变化的曲线趋势。文献中大多处理研究对象是污水污泥, 很少涉及沼渣干燥。在对流干燥实验中, 热风温度、热风流速及污泥厚度通常被认为是影响干燥的几个重要因素<sup>[9]</sup>。

本文对 SS<sub>0</sub>(脱水污泥)及 SS<sub>1</sub>(脱水污泥经高级厌氧消化后产生的沼渣)进行对流干燥试验, 研究热风风温、风速及样品厚度对污泥干化特性的影响, 进而更深入地探究污泥的对流干燥过程, 为优化污泥热干燥过程、降低干化时间和提高干化效率提供基础数据和依据。

# 1 材料和方法

## 1.1 试验材料

### 1.1.1 试验样品

本次试验样品有两种: 一种来自上海曲阳污水处理厂的脱水污泥, 编号为 SS<sub>0</sub>; 另一种来自脱水污泥经高级厌氧消化后的污泥, 编号为 SS<sub>1</sub>。样品统一保存在 4 ℃ 的环境中(冰箱), 其基本性质见表 1。其中, M<sub>ad</sub> 为水分; A<sub>d</sub> 为灰分(干基);

V<sub>d</sub> 为挥发分(干基); FC<sub>d</sub> 为固定碳(干基)。

表 1 脱水污泥的基本性质  
Tab.1 Basic characteristics of dewatering sludge

| 编号              | 工业分析/%          |                 |                 |                  |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                 | M <sub>ad</sub> | A <sub>ad</sub> | V <sub>ad</sub> | FC <sub>ad</sub> |
| SS <sub>0</sub> | 5.17            | 27.8            | 67.03           | 0                |
| SS <sub>1</sub> | 6.25            | 38.04           | 55.71           | 0                |

### 1.1.2 试验仪器

试验主要使用仪器明细见表 2。

表 2 试验仪器明细表  
Tab.2 List of experimental instruments

| 名称         | 型号        | 厂家             |
|------------|-----------|----------------|
| 电子分析天平     | ME204E    | 梅特勒-托利多集团      |
| 电子分析天平     | LT1002    | 深圳市伟创杰检测仪器有限公司 |
| 鼓风干燥箱      | DHG-9140A | 上海一恒科学仪器有限公司   |
| 马弗炉        | sx2-6-10  | 上海实研电炉有限公司     |
| 快速水分测定仪    | MA35      | 德国赛多利斯公司       |
| 希玛专业型数字风速仪 | 100836    | 香港希玛仪器有限公司     |

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 试验工况

该试验将用到 SS<sub>0</sub>, SS<sub>1</sub> 两种样品, 都通过如下表 3 工况进行试验, 对干燥过程的主要影响因素进行研究。

表 3 试验工况  
Tab.3 Experimental conditions

| 参数名称                        | 数值                     |
|-----------------------------|------------------------|
| 污泥厚度/mm                     | 5, 10, 15              |
| 热风风速/(m · s <sup>-1</sup> ) | 2, 4, 6                |
| 热风风温/℃                      | 80, 100, 120, 130, 140 |

### 1.2.2 试验方法

试验操作过程如下: 首先选择一种试验工况, 将加热鼓风机的加热温度与风速设定为所需值, 开始预加热, 待设备稳定运行后, 取出试验样品。将样品按长方体的形状制成工况要求下厚度的薄饼状, 之后再放置在物料托盘上置于干燥装置中, 操作定温对流干燥试验。每相隔 5 min 对样品质量进行一次测量记录。当需要进行其他工况的试验时, 仅需改变试验工况, 重复以上操作过程即可。

1.3 数据分析方法

根据测量所得数据计算几个相关量<sup>[10-11]</sup>，如干基含水率、湿分比、干燥速率，其定义及计算如下。

干基含水率为污泥当中的水分质量同实时污泥质量之比，其表达式为

$$M = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100\% \tag{1}$$

式中： $M$ 为干基含水率； $m_i$ 为实时污泥质量； $m_f$ 为绝干污泥质量。

湿分比为污泥中某一时刻所含水分质量同初始水分质量之比，其表达式为

$$MR = \frac{m_i - m_f}{m_0 - m_f} \tag{2}$$

式中： $MR$ 为湿分比，无量纲； $m_0$ 为初始污泥质量。

干燥速率为污泥中所含水分损失的快慢程度，其表达式为

$$DR = \frac{M_i - M_{i-1}}{\Delta t} \times 10^{-3} \tag{3}$$

式中： $DR$ 为干燥速率， $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})$ ； $M_i$ 为*i*时刻污泥干基含水率； $M_{i-1}$ 为*i-1*时刻污泥干基含水率； $\Delta t$ 为*i*与*i-1*时刻时间之差。

按照所得试验数据结果，以时间为*x*对含水率为*y*(过去文献中多数是用干基含水率作图，而因为在实际干燥工业中通常用湿基含水率来作产品目标，因此本文采用湿基含水率)作图，最终获得的是污泥含水率随时间变化的干燥曲线。同时再把干燥速率对时间变化作图得干燥速率曲线。

2 结果与讨论

2.1 脱水污泥对流干燥试验结果分析

2.1.1 热风温度对脱水污泥干燥的影响

图1和图2提供了在热风流速为4 m/s、样品厚度为10 mm的对流干燥条件下，SS<sub>0</sub>在不同干燥温度下的湿分比和干燥速率的变化趋势。

从图1可知，SS<sub>0</sub>的湿分比随着热风温度的提升，SS<sub>0</sub>的湿分比斜率依次增大，即失重的速率依次增大，干燥所需时间依次缩短，但不成比例。80℃的曲线相对其他温度最为平缓，干燥至相同水分所需时间也最多。而风温在140℃的条件下，SS<sub>0</sub>干燥至最终所需时间大致是90 min，而80℃条件下则需要220 min，后者是前者所需时间的2.4倍。当样品SS<sub>0</sub>在初始MR、污泥种类及厚度相同的情况下，干燥的热风温度提升，干燥

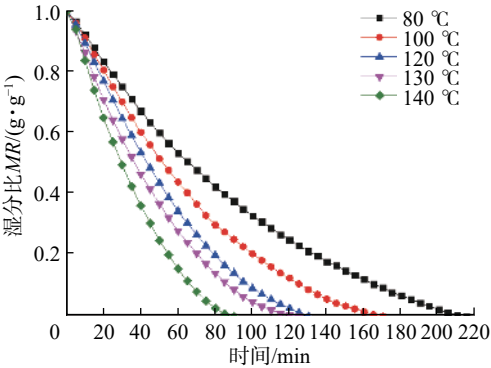


图1 SS<sub>0</sub>在不同热风温度下的湿分比

Fig. 1 Wet ratio of SS<sub>0</sub> at different hot air temperatures

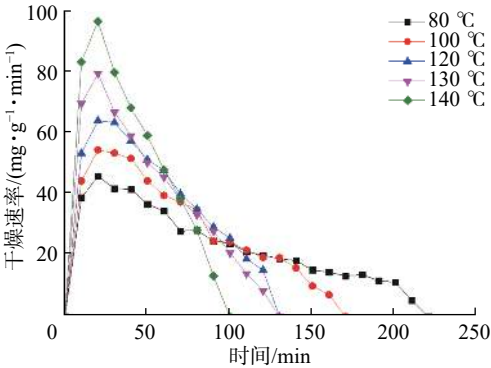


图2 SS<sub>0</sub>在不同热风温度下的干燥速率

Fig. 2 Drying rate of SS<sub>0</sub> at different hot air temperatures

时长随之变短，干燥速率加快。这表明，在干化过程中，温度越高，热空气对污泥水分的热推动力越大，更有便于接触面的水分挥发和内部水分向接触面转移。

图2为SS<sub>0</sub>在不同热风温度下的干燥速率随干燥时长的变化趋势图。对比图中的5个热风温度可知，热风温度为80℃时，干燥速率趋势可见相对平缓，先上升至最高干燥速率47.6 mg/(g·min)，然后进入降速干燥阶段；而温度在100℃条件下，最高干燥速率为57.2 mg/(g·min)；之后温度为120，130，140℃时，可以看到干燥速率变化幅度较大，最大干燥速率依次为65.4，78.9，98.6 mg/(g·min)。当热风温度从80℃提高到140℃的时候，最大干燥速率增大2.1倍。这表明，热风温度越高，初始干燥速率达到最高的数值就越高。

热风温度高，污泥在更高的加热条件下，短时间内样品吸收热量也越多。而且，高温还有破坏间隙水的作用，加快了内部水分向表面的迁移，使污泥内部的水分子自由运动更为剧烈。以

上作用都是推动对流干燥的动力, 因此干燥过程中热风温度对脱水污泥来说是影响其干燥时间的因素之一。

2.1.2 热风流速对脱水污泥干燥的影响

图 3 和图 4 分别在热风温度 120 ℃、样品厚度为 10 mm 条件下, 不同的流速条件下 SS<sub>0</sub> 的湿分比 MR 及干燥速率的曲线情况。热风流速在 2~6 m/s 范围内, 流速越高, 干燥速率越大, 干燥时长则越小。流速为 2 m/s 时, 最终干燥需要的时间是 180 min; 而在 4 m/s 的热风流速条件下, 所用干燥时间便减少为 130 min; 而从 4 m/s 的热风流速上升至 6 m/s 时, 缩短至 110 min。流速每降低 2 m/s, 干燥时间分别增加 18.2% 和 63.6%。所以流速亦是影响干燥效率的重要因素, 流速越大, 干燥效率越高。

由图 4 可知, 最大干燥速率会随着热风流速的上升而变大, 当风速分别为 2, 4, 6 m/s 时, 干燥速率依次为 47.1, 64.3, 80.7 mg/(g·min)。薄层污泥样品都是单面传质且接触空气的表面积相同, 风速越大, 越有利于污泥与热风进行质热交换。原理是热空气在相对湿度保持不变的情况

下, 风速越大, 单位时间内通过污泥表面的空气体积就越大, 不单单能够较快带走样品表面的水分, 同时还可以保持污泥表面水分浓度和热空气中水蒸气浓度的差值, 更有利于热干燥的进行。

2.1.3 污泥样品厚度对脱水污泥干燥的影响

图 5 和图 6 给出了 SS<sub>0</sub> 在不同样品厚度条件下热风温度为 120 ℃、热风流速为 2 m/s 时, 其湿分比及干化速率的变化情况。

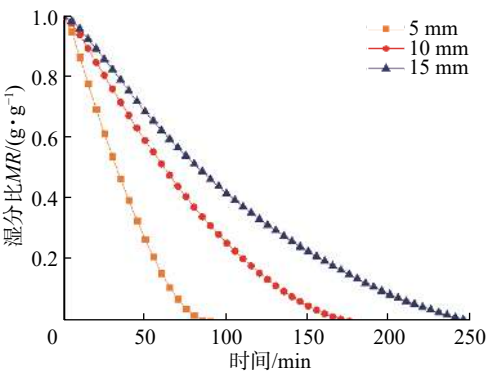


图 5 SS<sub>0</sub> 在不同样品厚度下的湿分比  
Fig.5 Wet ratio of SS<sub>0</sub> at different sample thicknesses

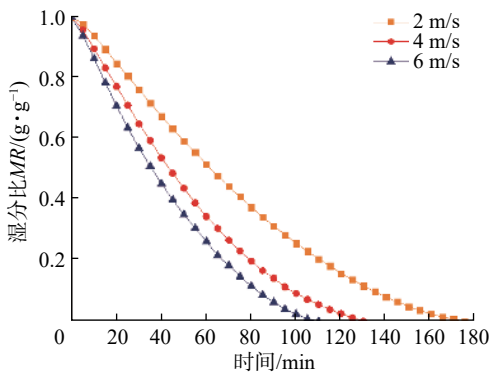


图 3 SS<sub>0</sub> 在不同热风流速下的湿分比  
Fig. 3 Wet ratio of SS<sub>0</sub> at different hot air flow rates

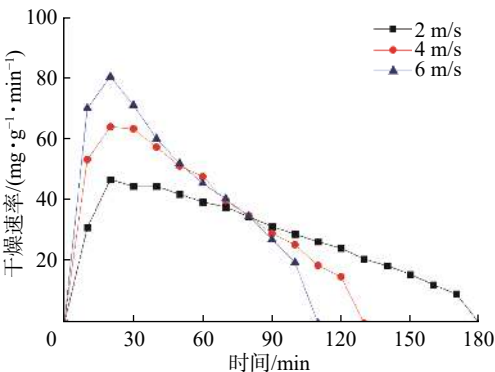


图 4 SS<sub>0</sub> 在不同热风流速下的干燥速率  
Fig. 4 Drying rate of SS<sub>0</sub> at different hot air flow rates

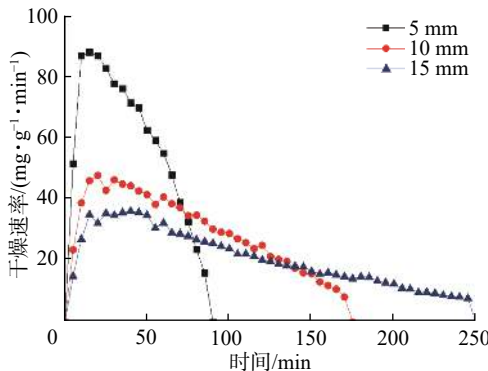


图 6 SS<sub>0</sub> 在不同样品厚度下的干燥速率  
Fig.6 Drying rate of SS<sub>0</sub> at different sample thicknesses

由图 5 可知, 在样品厚度变薄的情况下, SS<sub>0</sub> 的湿分比下降速率明显。5 mm 的样品干燥所需时长大约是 85 min, 同时 15 mm 厚度的样品干燥速率则是 250 min 左右, 后者的干燥时间是前者的 2.94 倍。就图 6 中干燥速率方面而言, 污泥样品的厚度变大的过程中, 干燥速率跟着逐渐减小, 5 mm 厚的样品最大干燥速率是 88.2 mg/(g·min), 而 15 mm 厚的样品最大干燥速率则是 36.3 mg/(g·min)。这表明, 在样品厚度变薄的情况下, 单位质量的污泥样品空气的接触表面积随之增大, 干燥速率亦增大。

在相同的热风温度条件下, 单位传热面积的



污泥接收到的热量是一样的，但是一部分的热量传达到了污泥内部，厚度大的污泥样品质量较大，内部的温度梯度也较大，因此需要传入污泥样品内部的热量也需要大于厚度较薄的污泥样品，即实际用于蒸发水分的热量需要小于厚度较小的污泥样品。同时，污泥本身特质就是多孔介质的，厚度越小，热空气越容易将污泥样品的平均温度升高，污泥样品内的水分向固体接触面扩散需要克制的内部阻力也变小，扩散速率加速，水分就越容易从内至外迁移，干燥速率随之升高，最终干化需要的时长也跟着减少。

2.2 污泥高级厌氧消化沼渣对流干燥试验结果分析

2.2.1 热风温度对消化沼渣干燥的影响

SS<sub>1</sub> 在热风流速 4 m/s、样品厚度 10 mm、不同热风温度的对流干燥情况下，其湿分比和干燥速率的变化情况如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可知，与脱水污泥 SS<sub>0</sub> 试验结果类似，随着热风温度的升高，SS<sub>1</sub> 的湿分比斜率依次增大，即失重的速率依次增大，干燥所需时间也越

短，但不成比例。80 ℃ 的曲线相对其他温度较为平缓，干燥达到相同含水量需要的时间也最长。而风温在 140 ℃ 的条件下，SS<sub>1</sub> 干燥至最终所需时间大致是 85 min，而 80 ℃ 条件下则需要约 170 min，后者是前者所需时间的 2 倍。风温为 120 ℃ 和 130 ℃ 时，所需干燥时间几乎一致。当样品 SS<sub>1</sub> 在初始含有水分、污泥种类及厚度相同的情况下，干燥的热风温度升高，干燥达到终点的时长也随之变短，干燥速率加快。

同时将 SS<sub>0</sub> 与 SS<sub>1</sub> 在不同热风温度下的湿分比图作对比，风温在 80 ℃ 的条件下，SS<sub>0</sub> 需要的干燥时间是 220 min，SS<sub>1</sub> 需要的干燥时长仅为 170 min。从干燥时间来看，SS<sub>1</sub> 的干燥时间明显小于 SS<sub>0</sub> 的干燥时间。

图 8 为在不同热风温度条件下 SS<sub>1</sub> 的干燥速率随干燥时长的变化趋势图。对比图中的 5 个热风温度可知，当热风温度在 80 ℃ 和 100 ℃ 时，干燥速率趋势相对平缓，先上升至最高干燥速率 85.9 mg/(g·min) 和 101.7 mg/(g·min)，然后进入降速干燥阶段；在温度为 120，130，140 ℃ 的工况下，可以看到干化速率的变化幅度较大，最大干燥速率依次为 142.5，151.3，156.2 mg/(g·min)。这表明，热风温度升高，初始干燥速率达到最高的数值随之增大；140 ℃ 和 80 ℃ 的最大干燥速率数值相差甚多。当热风温度由 80 ℃ 上升达到 140 ℃ 时，最大干燥速率增大 180%。

在不同热风温度下，将 SS<sub>0</sub> 与 SS<sub>1</sub> 的干燥速率趋势作对比，例如在风温 140 ℃ 条件下，SS<sub>0</sub> 的最大干燥速率为 98.6 mg/(g·min)，而 SS<sub>1</sub> 的最大干燥速率是 156.2 mg/(g·min)。再结合湿分比图来看，在不同的热风温度下，SS<sub>1</sub> 的干燥效率明显高于 SS<sub>0</sub>，沼渣相对于脱水污泥的水分更容易被脱除，效率更高。这是因为经过高级厌氧消化后，污泥内部的细胞膜被破坏，使内部结合水释放出来变成了更易去除的自由水，导致 SS<sub>1</sub> 的水分增大，挥发分变小，使其水分更容易挥发。

2.2.2 热风流速对消化沼渣干燥的影响

图 9 和图 10 给出了 SS<sub>1</sub> 在不同的热风流速条件下，热风温度为 120 ℃、样品厚度为 10 mm 时，其湿分比及干燥速率的变化趋势。热风流速在 2~6 m/s 范围内，风速逐渐升高，干燥速率随之增大，干燥时间减少。在风速 2 m/s 工况下，最终干燥需要的时间大约是 120 min；在风速 4 m/s

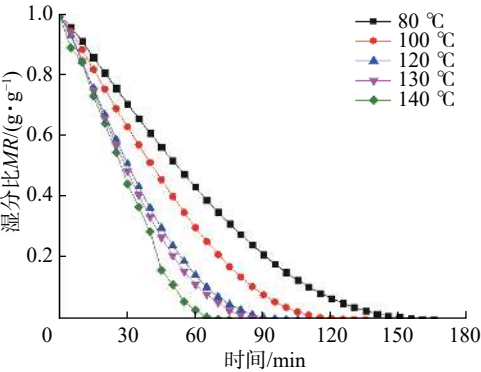


图 7 SS<sub>1</sub> 在不同热风温度下的湿分比

Fig. 7 Wet ratio of SS<sub>1</sub> at different hot air temperatures

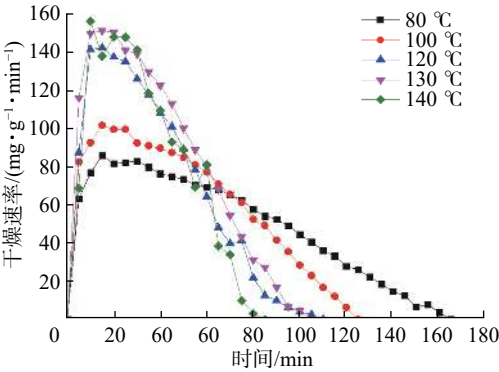


图 8 SS<sub>1</sub> 在不同热风温度下的干燥速率

Fig. 8 Drying rate of SS<sub>1</sub> at different hot air temperatures

时,所需干燥时间则缩短为 105 min;而在风速 6 m/s 时,干燥时间缩短至 80 min。热风流速每降低 2 m/s,干燥时长分别增加 31.3% 和 50%。

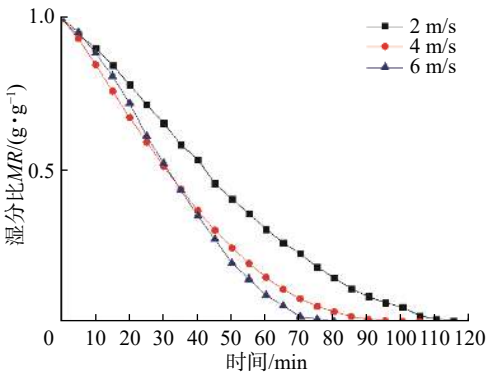


图9 SS<sub>1</sub> 在不同热风流速下的湿分比  
Fig.9 Wet ratio of SS<sub>1</sub> at different hot air flow rates

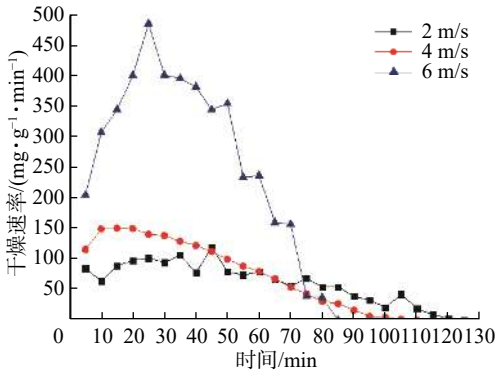


图10 SS<sub>1</sub> 在不同热风流速下的干燥速率  
Fig.10 Drying rate of SS<sub>1</sub> at different hot air flow rates

由图 10 可知,最大干燥速率会随着热风流速的上升而增大,分别为 119.8, 142.5, 486.2 mg/(g·min)。薄层污泥样品都是单面传质,且与空气接触的表面积相同,风速越大,越有利于污泥与热风进行质热交换。

将 SS<sub>0</sub> 与 SS<sub>1</sub> 在不同热风温度下的湿分比图作对比,在风速为 2 m/s 的工况下,SS<sub>0</sub>, SS<sub>1</sub> 所需的干燥时间分别为 180 min 和 120 min;在热风流速为 6 m/s 的工况下,SS<sub>0</sub>, SS<sub>1</sub> 所需的干燥时间分别为 110 min 和 80 min。从干燥时间来看,不同热风流速条件下,SS<sub>1</sub> 的干燥时间明显小于 SS<sub>0</sub> 的干燥时间。再将 SS<sub>0</sub> 与 SS<sub>1</sub> 在不同干化温度下的干燥速率趋势图作对比,SS<sub>0</sub> 的最大干燥速率分别为 47.1, 64.3, 80.7 mg/(g·min), SS<sub>1</sub> 的最大干燥速率分别为 119.8, 142.5, 486.2 mg/(g·min)。对比之下,明显看到 SS<sub>1</sub> 的最大干燥速率都高于 SS<sub>0</sub> 的最大干燥速率。最后再结合湿分比图来看,在不

同的热风风速工况下,SS<sub>1</sub> 的干燥效率明显高于 SS<sub>0</sub>。同理,污泥经高级厌氧消化产生的沼渣,其自身的特性相对于脱水污泥已经发生了变化,如活化能小于脱水污泥,所以在相同的工况下,SS<sub>1</sub> 的干燥效率高于 SS<sub>0</sub>。

2.2.3 样品厚度对消化沼渣干燥的影响

图 11 和图 12 给出了 SS<sub>1</sub> 在不同样品厚度工况下、热风温度为 120 ℃、热风流速为 2 m/s 时,其湿分比及干化速率的变化情况。

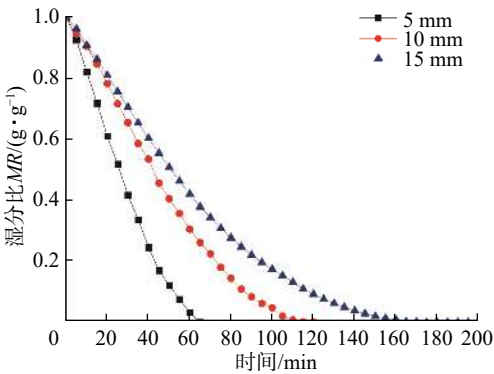


图11 SS<sub>1</sub> 在不同样品厚度下的湿分比  
Fig.11 Wet ratio of SS<sub>1</sub> at different samples thicknesses

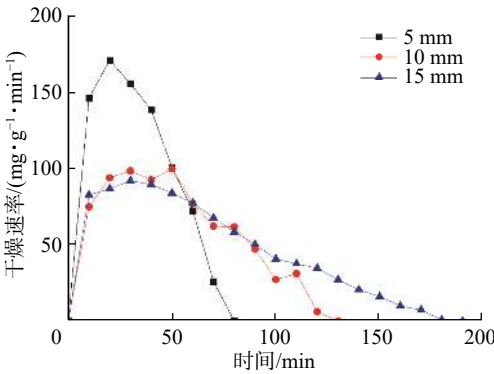


图12 SS<sub>1</sub> 在不同样品厚度下的干燥速率  
Fig.12 Drying rate of SS<sub>1</sub> at different sample thicknesses

如图 11 可见,随着样品厚度变薄,SS<sub>1</sub> 的湿分比下降速率明显。5 mm 的样品干燥需要的时长大约是 65 min, 15 mm 厚度的样品干燥时间约是 190 min, 后者的干燥时间是前者的 2.92 倍。同时就图 12 中干燥速率方面而言,样品 SS<sub>1</sub> 的厚度逐渐增大,干燥速率随之减少,样品在 5 mm 厚度下的最大干燥速率是 170.8 mg/(g·min),而 15 mm 厚的样品干燥速率最高达到 91.8 mg/(g·min)。这表明,污泥沼渣样品的厚度越小,单位质量的沼渣样品接触空气的表面积就越大,干燥速率也就越大,试验结果与 SS<sub>0</sub> 类似。

将 SS<sub>0</sub> 与 SS<sub>1</sub> 在不同热风温度下的湿分比图作对比, 在样品厚度为 5 mm 的条件下, SS<sub>0</sub> 干燥至最终所需时间大致是 85 min, 而 SS<sub>1</sub> 干燥所需总时长大致为 65 min; 在样品厚度为 15 mm 的条件下, SS<sub>0</sub> 所需的干燥时长是 250 min, 而 SS<sub>1</sub> 所需的干燥时间为 190 min。从干燥时间来看, SS<sub>1</sub> 的干燥时间在不同样品厚度下依旧明显小于 SS<sub>0</sub> 的干燥时长。再将 SS<sub>0</sub> 与 SS<sub>1</sub> 在不同样品厚度下的干燥速率图作对比, 样品 SS<sub>0</sub> 厚度为 5 mm 后的最大干燥速率为 88.2 mg/(g · min), 15 mm 厚的样品 SS<sub>0</sub> 最大干燥速率为 36.3 mg/(g · min); 样品 SS<sub>1</sub> 厚度为 5 mm 的最大干燥速率为 170.8 mg/(g · min), 15 mm 厚的样品最大干燥速率为 91.8 mg/(g · min)。对比之下, 明显看到 SS<sub>1</sub> 的最大干燥速率都高于 SS<sub>0</sub> 的最大干燥速率。在实际工厂生产和工艺中, 可考虑将污泥先经过厌氧消化之后, 再通过干化手段来减量, 可大大缩短干化时间, 减少干化成本。

3 结 论

本文对脱水污泥样品 SS<sub>0</sub> 及高级厌氧消化污泥沼渣 SS<sub>1</sub> 进行对流干燥实验, 并从样品干燥过程中主要影响干燥效率的热风温度、热风流速及样品厚度的干燥特点进行探究分析, 得出以下结论:

a. 结合 SS<sub>0</sub> 和 SS<sub>1</sub> 自身的特性, 可以发现: 污泥经高级厌氧消化后产生的沼渣, 其内部的部分细胞膜被破坏, 使内部结合水释放出来变成了更易去除的自由水; 污泥经高级厌氧消化后降低了自身的活化能, 活化能越小, 其干燥阻力越小。在实际工厂生产和工艺中, 可考虑将污泥先经过高级厌氧消化后, 再通过干化手段来减量, 可大大缩短干化时间, 减少干化成本。

b. 不论污泥样品的干燥实验工况和种类如何, 干燥过程的基本规律都基本相似, 按主要曲线规律可划分为两个阶段: 升速阶段和降速阶段。在对流干燥过程中, 热风温度、热风风速和

样品厚度是能够作用导致干燥效果有所改变的几个重要要素。

参考文献:

[1] 张辰, 王逸贤, 谭学军, 等. 城镇污水处理厂污泥处理稳定标准研究[J]. 给水排水, 2017, 43(9): 137-140.

[2] 孔祥娟, 王洪臣, 张辰, 等. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南研究[J]. 建设科技, 2016(7): 44-46.

[3] 张冬, 董岳, 黄瑛, 等. 国内外污泥处理处置技术研究与应用现状[J]. 环境工程, 2015, 33(S1): 600-604.

[4] DENG W Y, YAN J H, LI X D, et al. Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer[J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(24): 5117-5124.

[5] MAHMOUD A, OLIVIER J, VAXELAIRE J, et al. Advances in Mechanical Dewatering of Wastewater Sludge Treatment[M]//SHARMA S K, SANGHI R. Wastewater Reuse and Management. Dordrecht: Springer, 2013: 253-303.

[6] 马学文, 翁焕新, 章金骏. 不同形状污泥干燥特性的差异性及其成因分析[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 803-809.

[7] 魏海娟. 白龙港污水处理厂污泥厌氧消化运行特性分析[J]. 给水排水, 2018, 54(10): 53-55.

[8] 冯俊亭, 盛守祥, 冯连顺, 等. 典型污泥处置技术性能及经济性对比分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(6): 90-92.

[9] SADI T, MEZIANE S. Mathematical modelling, moisture diffusion and specific energy consumption of thin layer microwave drying of olive pomace[J]. *International Food Research Journal*, 2015, 22(2): 494-501.

[10] BARRERA-DÍAZ C, MARTÍNEZ-BARRERA G, GENCEL O, et al. Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(1): 108-115.

[11] HAN Y, ZHOUI M, WAN, et al. Optimization of sludge dewatering process by inorganic conditioners under mild thermal treatment[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2016, 57(59): 1-9.

(编辑: 董伟)