

颗粒状污泥的干燥特性及表观变化

马学文, 翁焕新*, 章金骏

(浙江大学环境与生物地球化学研究所, 杭州 310027)

摘要:对 3 种不同质量等级的污泥颗粒(2.5、5 和 10 g)在 100、200、300、400 和 500℃ 下进行恒温干燥实验,通过观察污泥的失重特征和表观形态的变化,深入研究了污泥干燥过程、失重速率的变化规律。结果表明,污泥在 100 ~ 200℃ 下的干燥过程分为加速阶段、恒速阶段和降速阶段,而在 300 ~ 500℃ 下并没有真正的恒速阶段,但污泥表面产生的大量裂缝维持了较高的平均失重速率;污泥的平均失重速率与干燥温度呈二次方关系。在 100 ~ 200℃ 时污泥的干燥过程不受颗粒大小影响,在 300 ~ 500℃ 时同样大小污泥颗粒的干燥过程类似。在 100 ~ 300℃ 时,直至焦化的干燥过程中并未发生有机物热分解;在 400 ~ 500℃ 时,干燥过程中会伴随着部分有机物分解。

关键词:污泥;污泥颗粒;污泥干燥;干燥特性;表观变化

中图分类号:X705 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2011)08-2358-07

Drying Characteristics and Apparent Change of Sludge Granules During Drying

MA Xue-wen, WENG Huan-xin, ZHANG Jin-jun

(Institute of Environment & Biogeochemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Three different weight grades of sludge granules(2.5, 5, 10 g) were dried at constant temperature of 100, 200, 300, 400 and 500℃, respectively. Then characteristics of weight loss and change of apparent form during sludge drying were analyzed. Results showed that there were three stages during sludge drying at 100-200℃: acceleration phase, constant-rate phase, and falling-rate phase. At 300-500℃, there were no constant-rate phase, but due to lots of cracks generated at sludge surface, average drying rates were still high. There was a quadratic nonlinear relationship between average drying rate and drying temperature. At 100-200℃, drying processes of different weight grade sludge granules were similar. At 300-500℃, drying processes of same weight grade of sludge granules were similar. Little organic matter decomposed till sludge burning at 100-300℃, while some organic matter began to decompose at the beginning of sludge drying at 400-500℃.

Key words: sewage sludge; sludge granules; sludge drying; drying characteristics; apparent change

城市污水处理过程中会产生大量的污泥,污泥处理已经成为我国一个重要的环境问题。污泥经过机械脱水后含水率仍然高达 70% ~ 80%,热干化是降低污泥水分、减小污泥体积的一种有效方法^[1-3],是进行焚烧或进一步资源化利用的关键一步^[4-6],它不仅可杀灭细菌使污泥卫生化,而且可以使污泥中的活性重金属向稳定态转化^[7,8]。但是由于污泥的干燥特性不同于普通物料,以及对污泥干燥特性的认识不足,直接影响了污泥干燥器的设计和运转管理。国内外学者对污泥的干燥特性开展了一些研究^[9-18],这些研究归纳起来有 2 个特点:①污泥干燥温度主要集中在 2 个极端,即 200℃ 以下或 800℃ 以上;②污泥干化时的形态多为自然态、饼状或薄层。对流干燥是污泥干燥中广泛应用的一种工艺^[19],对流干燥过程中污泥多呈球形颗粒状,特别是独立供热的污泥干燥系统,干燥温度往往会达到 400℃ 以上^[20,21],为了提高污泥的干燥效率,同时尽量避免污泥中有机物的分解,从而降低尾气处理的难度,必须深入了解污泥颗粒的干燥特性及干

燥过程中的变化规律。

本研究对 3 种不同质量的污泥球状颗粒(2.5、5 和 10g)在 100、200、300、400 和 500℃ 下进行恒温干燥实验,通过观察污泥的失重特征和表观形态的变化,深入研究了污泥干燥过程失重速率的变化规律以及有机物的分解规律,以期建立行之有效的污泥干燥工艺和系统提供理论依据和技术参数。

1 材料与方法

实验材料:本研究的污泥样品来自浙江省桐乡污水处理厂机械脱水后的新鲜污泥,该污水厂工业废水和生活污水分别占处理水量的 23% 和 77%,工业废水主要为印染和制革废水,污泥的含水率为 70% ± 0.5%。其中污泥的性质见表 1(其中 $\omega(\text{H}_2\text{O})$ 、 $\omega(\text{S})$ 、 $\omega(\text{P})$ 、 $\omega(\text{OC})$ 分别为污泥中水、

收稿日期:2010-10-19;修订日期:2011-01-12

基金项目:浙江省重大科技项目(2005C13005,2005C23051)

作者简介:马学文(1982~),男,博士后,助理研究员,主要研究方向为污泥处理及资源化利用,E-mail: maxuewen@126.com

* 通讯联系人, E-mail: gswenghx@zju.edu.cn

硫、磷和有机质所占质量分数, q 、 ρ 为绝干污泥的热值和密度)。

表 1 实验污泥的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of sludge

$\omega(\text{H}_2\text{O})$ /%	q / $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$\omega(\text{S})$ /%	$\omega(\text{P})$ /%	ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\omega(\text{OC})$ /%
70 ± 0.5	9 466.4	1.60	1.98	1.05	51.91

(1) 实验一 干燥实验采用恒温干燥(装置见图 1)。将污泥制成质量分别为 (2.5 ± 0.05) 、 (5 ± 0.1) 和 (10 ± 0.1) g 的球状颗粒,分别置于 100、200、300、400 和 500℃ 的烘箱中进行恒温干燥,并记录其质量变化,100℃ 时干燥至恒重为止,200℃ 以上时直至污泥冒烟或有焦味溢出(称为“焦化”)时作为干燥的终点(称为“焦点”)。

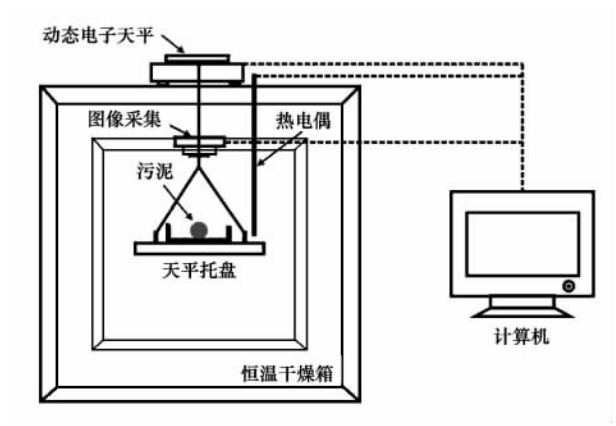


图 1 恒温干燥实验装置示意

Fig. 1 Experimental equipment of constant-temperature drying

污泥在 100℃ 干燥时,失去的基本是水分,最大失重率约等于含水率;在 100℃ 以上干燥时,可能会有部分有机物发生热分解,因此本研究对污泥干燥过程中的失重率和失重速率进行了计算。污泥失重率的计算公式为:

$$\omega = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \tag{1}$$

式中, ω 为失重率, m_0 为污泥颗粒的初始质量, m_t 为干燥时间 t 时污泥的质量。

由于污泥在干燥过程中体积缩小,并且会产生裂缝,污泥与干燥气体的接触面积无法计算,因此计算单位质量的污泥失重速率,计算公式为:

$$v = \frac{m_1 - m_2}{(t_2 - t_1) \times m_1} \tag{2}$$

式中, v 为失重速率, m_1 、 m_2 为干燥过程中 t_1 、 t_2 时刻的污泥质量。

(2) 实验二 为分析污泥干燥过程中有机物的

分解情况,对污泥干燥过程中的干基变化进行了分析,具体步骤为:取若干污泥颗粒,分别在 100、200、300、400 和 500℃ 下进行恒温加热一段时间后记录其质量并取出,同时用数码相机记录其表观形态的变化,然后放入 105℃ 的烘箱中干燥至恒重,并记录其最终质量;再取若干污泥颗粒,增加加热时间,重复上述实验。干燥后污泥的残留干基率计算公式为:

$$R = \frac{m_{\text{db}}}{m_0} \tag{3}$$

式中, R 为残留干基率, m_{db} 为干燥后污泥的残留干基质量。

2 结果与讨论

2.1 不同温度下各污泥颗粒的失重特征及其表观变化

图 2 显示了 2.5、5、10 g 这 3 种污泥颗粒在不同温度下的失重速率曲线。从中可以看出,各颗粒污泥 100℃ 和 200℃ 的失重速率曲线比较平滑,污泥的整个干燥过程非常明显地呈现出 3 个阶段,即加速阶段、恒速阶段和降速阶段。从 300℃ 开始,恒速干燥阶段的失重速率开始大幅度地波动,但是仍然保持较大的平均失重速率,该阶段也是污泥干燥的主要阶段,可以称之为“类恒速阶段”。随着温度升高,类恒速阶段失重速率的波动逐渐增大。图 2 中还可以发现,同质量污泥颗粒在不同温度的类恒速阶段的波动趋势非常相似,例如 2.5 g 污泥在失重率 25% ~ 35% 左右失重速率达到一个峰值,然后在失重率 40% ~ 45% 时失重速率达到一个谷值。

根据对污泥干燥过程的观察发现,在 100℃ 时没有出现焦化现象,200℃ 时的焦化现象基本上在水分完全蒸发完后才会出现,而在 300℃ 以上时,污泥焦化现象在污泥中尚存有部分水分时就已经出现。污泥焦化时残留水分与干燥温度和颗粒大小有关,从总趋势看,随着温度升高焦化时残留水分逐渐升高,300、400 和 500℃ 焦化时的平均失重率分别为 65.74%、63.42% 和 60.74%;随着污泥颗粒增大焦化时残留水分逐渐升高,例如 300℃ 时 2.5、5 和 10 g 污泥颗粒焦化时的失重率分别为 67.94%、65.72% 和 63.56%。

不同大小的污泥颗粒在不同温度进行干燥时,其表观变化也不相同。图 3 显示了 10 g 污泥颗粒在不同温度下干燥的表观变化俯视图(图中右上角数据为污泥的失重率),可以看出,在 100、200℃ 下的整个干燥过程中,污泥颗粒基本保持完整的形状;在

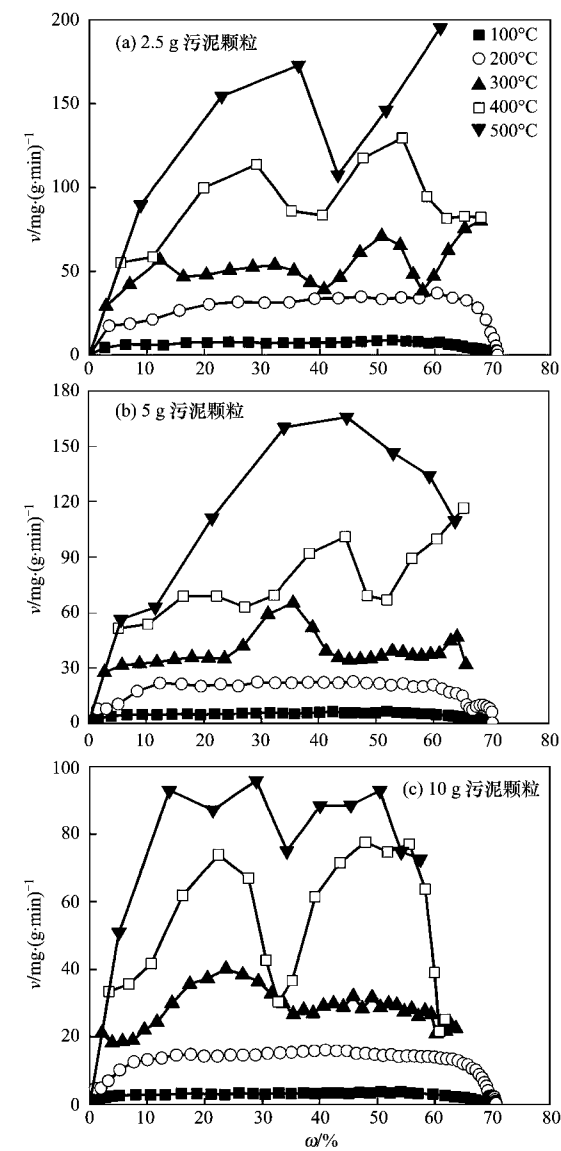


图2 不同温度下各污泥颗粒的失重速率曲线
Fig.2 Weight loss rate curves of each sludge granule drying at different temperature

300 ~ 500℃ 下的干燥过程中,污泥颗粒出现大量的裂缝.失重率 25% ~ 30% 左右时裂缝数量较少但是较大,到达 35% ~ 40% 时初期的大裂缝反而逐渐闭合,且出现明显的干湿区,到 45% ~ 50% 时干湿区仍然存在,但是裂缝的发育也达到最高,50% 以后干湿区逐步消失.

结合图 2(c) 可以发现,裂缝的发育情况和失重速率曲线的趋势是相吻合的.300 ~ 500℃ 干燥时,表面水分蒸发速率极高,表层快速失水开始收缩,但是内层失水收缩缓慢,抑制了外层的收缩,因此外层产生拉应力补偿内层的压应力.当外层拉应力超过横纹抗拉弹性极限时,污泥表面会产生永久变形,即裂

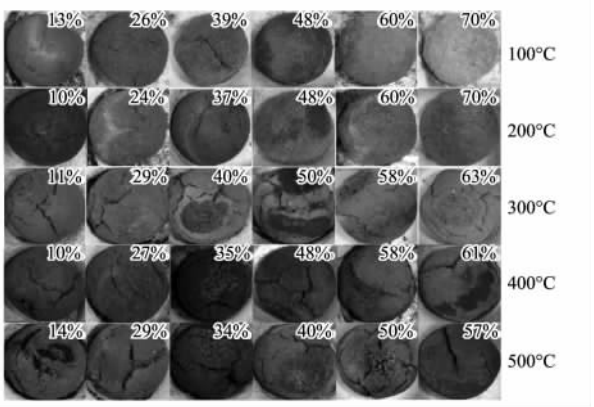


图3 10 g 污泥颗粒在不同温度干燥过程中的表观变化(俯视图)
Fig.3 Apparent form change of sludge granules (10 g) during sludge drying at different temperature (vertical view)

缝产生,而裂缝的产生增大了表面积,使得污泥失重速率进一步升高,在裂缝发育最大时失重速率达到一个峰值.裂缝产生使得内层水分快速下降并收缩,表面的裂缝逐渐闭合,失重速率逐渐下降,失重速率逐渐降至谷值.但是内层的拉应力大于横纹抗拉强度,则会发生内裂或蜂窝裂,导致许多小裂缝的产生,同样又增加了蒸发的面积,失重速率重新升高,达到新的峰值.

2.2 颗粒大小和温度对污泥失重速率和失重过程的影响

从图 2 可以看出,污泥的失重速率随干燥温度升高而变大,通过计算各污泥颗粒的平均失重速率,可以看出污泥的平均失重速率和干燥温度呈二次方关系(图 4).但是即使在相同温度下,不同颗粒大小污泥的失重速率也不相同.在同样的干燥温度下,小颗粒污泥的平均失重速率要大于大颗粒污泥,例如在 100℃ 时 2.5 g 污泥颗粒的平均失重速率为 5.1

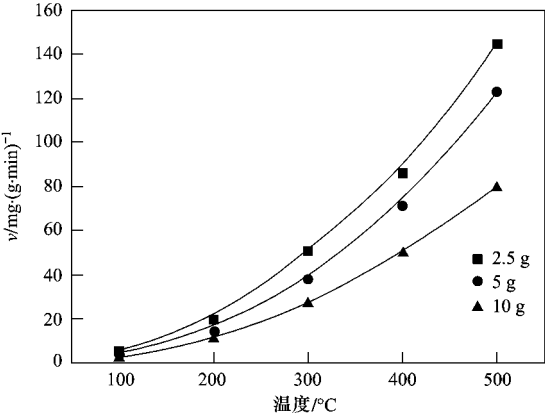


图4 污泥平均失重速率与污泥颗粒质量的关系
Fig.4 Change of average drying rate with sludge weight

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 而 10 g 污泥颗粒的平均失重速率仅为 $2.4 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$. 而且低温下小颗粒污泥的平均失重速率也有可能大于高温下大颗粒污泥的平均失重速率, 例如在 300°C 时 2.5 g 污泥颗粒的平均失重速率为 $50.4 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 略大于 400°C 时 10 g 污泥颗粒的平均失重速率 $48.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$. 小污泥颗粒的平均失重速率要大于大污泥颗粒, 主要是由于小污泥颗粒的比表面积比较大, 因此单位质量污泥的失重速率要大于大污泥颗粒.

100°C 和 200°C 时污泥颗粒的失重速率都比较低, 虽然失重速率受到温度和颗粒大小的影响, 但是其干燥过程却非常相似. 通过将其失重速率进行归一化处理(图 5), 可以看出 3 种污泥颗粒在 100°C 和 200°C 时失重速率曲线非常相似, 各干燥阶段的比例比较接近, 同样在失重率 10% ~ 20% 完成了加速阶段, 而在失重率 50% ~ 60% 左右开始由恒速阶段进入降速阶段.

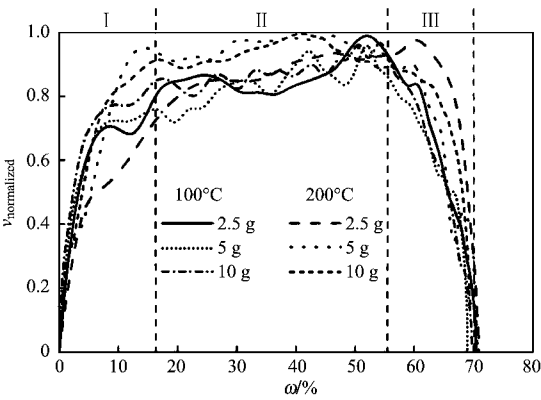


图 5 污泥颗粒在 100 ~ 200℃ 的归一化失重速率图
Fig. 5 Normalized curve of weight loss rate of sludge granules drying at 100-200℃

在 300°C 以上时, 污泥干燥过程中呈现不同程度的裂缝, 正是这些裂缝的出现维持了污泥的高失重速率, 同时也是由于裂缝的发育导致了污泥失重速率的波动. 通过对 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 的失重速率曲线进行归一化处理后发现(图 6), 同种污泥颗粒在不同温度的干燥过程虽然不同, 但是失重速率随失重率变化的趋势非常相似, 例如 2.5 g 污泥同样在失重率 40% ~ 45% 达到谷值, 在 50% ~ 60% 之间达到峰值; 10 g 污泥颗粒在失重率 25% 左右达到峰值, 在失重率 35% 左右失重速率达到谷值, 在失重率 50% 左右又达到一个新的峰值. 这主要是由于 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 干燥时, 污泥的干燥过程受到裂缝发育的影

响, 而裂缝的发育取决于污泥本身的结构、形态和尺寸, 因此同质量污泥在不同温度下的干燥过程类似.

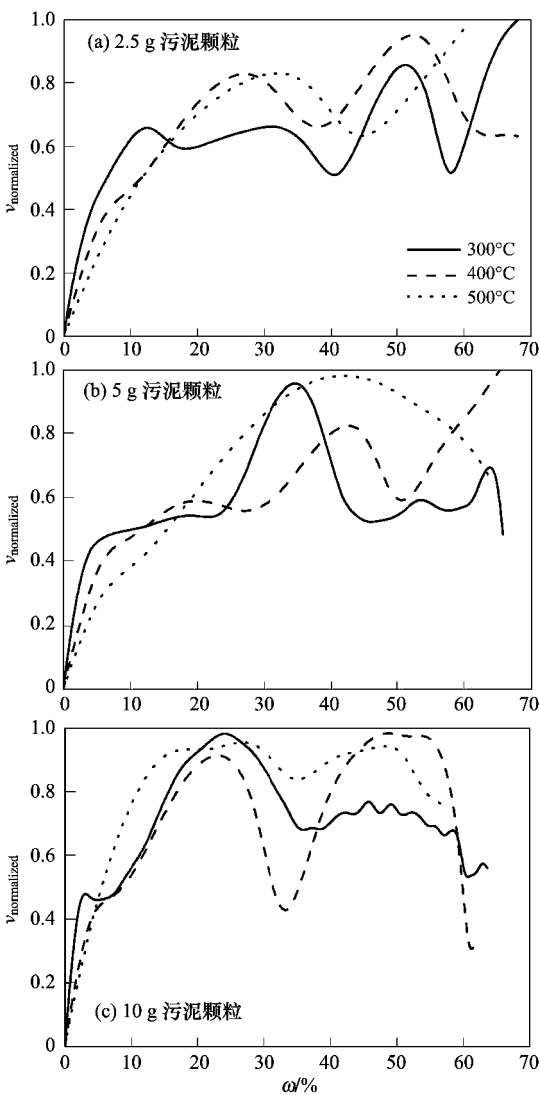


图 6 污泥颗粒在 300 ~ 500℃ 的归一化失重速率曲线
Fig. 6 Normalized curve of weight loss rate of sludge granules drying at 300-500℃

2.3 污泥干燥过程中有机物的分解

污泥干燥的目的是去除污泥中的水分, 如果在干燥过程中有机物发生分解会对整个污泥干燥过程造成影响, 这些影响包括: ①降低干燥热利用率, 污泥干燥的目的是为了水分蒸发, 如果有有机物分解必然会消耗一部分热量, 使有效用于水分蒸发的热量减少, 从而降低干燥热利用率; ②有机物的分解产物会随尾气排出, 这增加了尾气的处理难度; ③污泥的热值来自有机物, 干燥过程有机物分解会降低污泥可利用的热值资源.

通过对风干污泥的热稳定分析可以看出(图7),污泥在整个加热过程中存在2个失重阶段,第一阶段为20~150℃,属于吸热峰,反映了水分的蒸发,其中在100℃以前有6.5%的水分失去,在100~150℃时,仍然有3.8%的水分失去,此部分水为内部结构水;第二阶段为150~550℃,属于放热峰,反映了污泥中有机物分解或燃烧.污泥在100℃测出的含水率为 $70\% \pm 0.5\%$,此时的干基为 $30\% \pm 0.5\%$,而干基中尚存部分结构水,去除这部分结构水的真正干基率为 $28.9\% \pm 0.5\%$.污泥干燥过程中的失重仅包括水分蒸发和有机物分解,如果污泥干燥过程中干基含量低于原污泥质量的 $28.9\% \pm 0.5\%$,即发生有机物的分解.

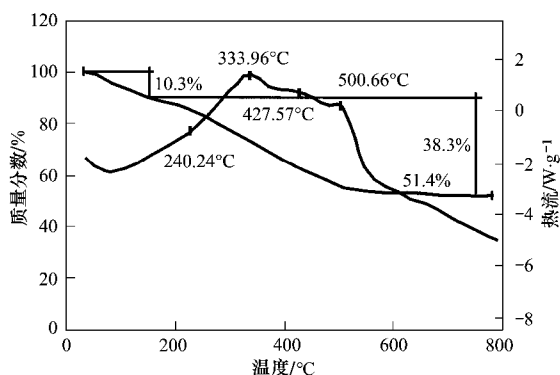


图7 污泥的DSC-TGA图

Fig. 7 DSC-TGA curve of sludge

通过对污泥残留干基率的分析发现(图8),100~300℃干燥温度下,污泥的残留干基率保持在30%左右,说明在这个干燥温度范围内,污泥中的有机物基本未发生分解,而且结构水也并未失去;当干燥温度在400℃时,污泥的平均残留干基率降至28.37%~29.44%,说明有部分结构水在高温失去或有部分有机物发生了分解,而且小颗粒污泥的失重率更高;当干燥温度达到500℃时,污泥的残留干基率降至27.54%~28.15%,说明在干燥过程中已经有部分有机物发生分解,小颗粒污泥的分解程度更加明显.

但是对不同失重率污泥的残留干基率进行测定(图8)发现,污泥中结构水的失去或有机物的分解并不是随着干燥过程的进行而逐渐加剧,即污泥中结构水失去和有机物分解与干燥时间无关,而仅与污泥颗粒大小和干燥的温度有关.例如,500℃时5g污泥颗粒经过2min干燥后,失重率仅10%,取出后在105℃下测其干基率仅为原始湿污泥的27.59%,

说明有大约2.85%~6.16%的有机质发生了分解,而此后一直到8min失重率达到63.67%时,残留干基率基本未发生变化(变化幅度在 $27.92\% \pm 0.5\%$ 以内).这说明高温干燥过程中,并不是污泥温度的升高导致有机物的分解,而是高温热空气产生的热辐射在极短时间内使得部分有机物发生了分解,由于热辐射穿透力有限,因此对于小颗粒污泥的作用要大于大颗粒污泥,并且热辐射随着温度升高穿透力逐渐增强.

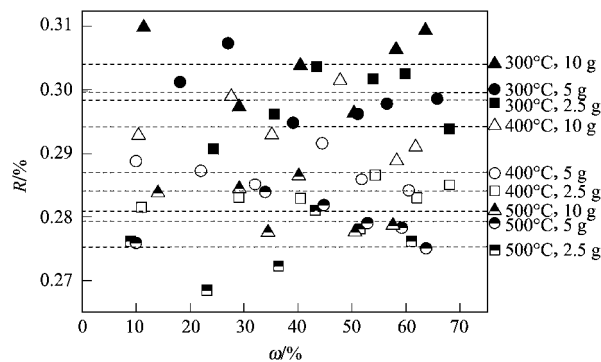


图8 污泥颗粒在300~500℃干燥时的残留干基率

Fig. 8 Residual dry basis of each granule dried at 300-500°C

2.4 污泥干燥的特殊性分析

一般物料的干燥过程分为加速阶段(预热阶段)、恒速阶段和降速阶段,恒速阶段物料表面的温度等于干燥气体的湿球温度,此时的干燥速率与物料无关,大约等于纯水的汽化速率,而降速阶段的失重速率则取决于物料的性质,如湿含量、颗粒直径等^[22].从污泥干燥特性的分析可以看出,尽管污泥的干燥过程也呈现加速、恒速和降速3个阶段,但是同样干燥温度下不同污泥颗粒的失重速率是不相同的,这说明了污泥不同于一般物料.因此,对污泥干燥的原理进行分析是必要的.

2.4.1 污泥失重速率的决定因素

物料的干燥特性取决于物料的性质,而物料的性质主要取决于其中水分结合形式^[22].污泥中水分的结合形式主要有3种:结构水(需要高温才能去除)、吸附水(水分只有通过热干燥的方式才能去除)和自由水(可以通过机械方式去除)^[23].污泥的基本单元为胶羽(flocs),胶羽拥有巨大表面积与高度亲水性,因此带有大量的吸附水^[24,25].吸附水与结构水的含量即机械脱水的上限,污水厂机械脱水污泥的上限值一般为70%~80%.

按照传统的物料干燥经验,一般自由水在恒速

阶段去除,而吸附水在降速阶段去除^[22].机械脱水污泥含有的水分除了结构水外,基本上为吸附水,因此如果按照传统物料干燥经验,应该在预热结束后直接进入降速阶段,而没有恒速干燥阶段.但是实验结果可以看出在 100 ~ 200℃ 时污泥干燥存在明显的恒速阶段,而且是污泥的主要干燥阶段.这说明污泥的物性不同与普通物料,含水率为 70% ~ 80% 的污泥呈团糊状,在干燥的过程中泥团内部的水分有足够的时间扩散至污泥表面,并使污泥表面保持湿润.而吸附水的去除除了需要必要的水分蒸发热量外,还需要额外的热量,因此恒速阶段污泥的失重速率取决于污泥表面单位面积内获得的热量,而不是污泥表面的温度.污泥表面从热空气获得的热量一部分用于水分的蒸发,还有一部分用于使物料的温度升高,大污泥颗粒用于使物料温度升高的热量比例要大于小污泥颗粒,从而真正用于水分蒸发的热量比较小,因此在同样的干燥温度下,大污泥颗粒的失重速率要小于小污泥颗粒.

2.4.2 污泥干燥过程中表面温度的变化

污泥干燥过程中污泥表面与热空气直接接触,污泥表面温度要大于内部温度,水分蒸发和有机物分解都是从表面开始,污泥表面温度过高将会引起污泥有机物的分解,因此对污泥表面温度的研究是很必要的.从实验结果可以推断出污泥干燥过程中污泥表面温度的变化趋势.图 9 中显示了 2 种不同的情况,第 1 种为温度较低(200℃ 以下),A—B 段为加速阶段,污泥表面温度从室温逐渐升高,直至 B 点达到热空气的湿球温度,随后污泥进入恒速阶段,整个阶段污泥表面的温度保持不变,到达 C 点进入降速阶段,污泥表面温度逐渐升高,但是由于仍然有内部水分蒸发导致污泥表面温度升高速度减缓,直至 D 点污泥内部水分几乎全部蒸发完,污泥表面温度快速升高直至热空气温度(F 点).如果热空气温度高于有机物的分解温度(如 200℃),就会出现污泥的焦点 E,否则(如 100℃)污泥有机物不会分解.第 2 种为温度较高(300℃ 以上),A—B' 段为加速阶段,由于温度升高速率快,而且由于失重速率比较大,其加速阶段失重率要大于低温条件下;B'—C' 段为类恒速阶段,由于裂缝的产生保持了较高的平均失重速率,虽然此时污泥表面出现了干区,但是由于此时水分蒸发强度大,污泥表面的平均温度仍然较低;当进入降速阶段后虽然污泥内部尚存部分水分,但是已经无法使表面温度降低,污泥表面温度快速升高,并且很快达到焦点 E',最终达到热空气温度

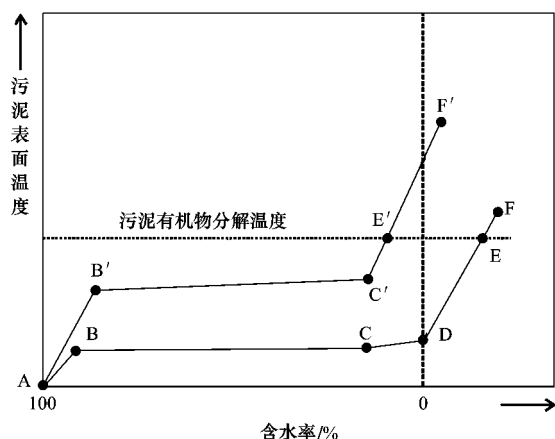


图 9 污泥干燥过程表面温度的变化趋势

Fig. 9 Change of surface temperature during sludge drying

(F'点).

3 结论

(1) 球状污泥颗粒在 100 ~ 200℃ 干燥时基本保持完整形状,干燥过程分为 3 个阶段:加速阶段、恒速阶段和降速阶段,而且 3 种污泥颗粒在 100℃ 和 200℃ 时失重速率曲线非常相似,各干燥阶段的比例比较接近.

(2) 球状污泥颗粒在 300 ~ 500℃ 干燥时,由于污泥失重速率非常大,在干燥过程中污泥产生了大量的裂缝,使得污泥干燥过程中没有恒速阶段,而是干燥速率波动较大的类恒速阶段,污泥的干燥过程受到裂缝发育的影响,因此同质量污泥在不同温度下的干燥过程类似.

(3) 在污泥表面焦化前的干燥过程中,100 ~ 300℃ 时,污泥中的有机物基本未发生分解,而且结构水也并未失去;400℃ 时,有部分结构水失去或有部分有机物发生分解,而且小颗粒污泥的失重率更高;500℃ 时,干燥过程中已经有部分有机物发生了分解,同样小颗粒污泥的分解程度较明显.

参考文献:

- [1] Fytli D, Zabanitou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(1):116-140.
- [2] Stasta P, Boran J, Bebar L, et al. Thermal processing of sewage sludge [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(13):1420-1426.
- [3] Ruiz T, Wisniewski C. Correlation between dewatering and hydro-textural characteristics of sewage sludge during drying [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 61(2):204-210.
- [4] 丘锦荣, 吴启堂, 卫泽斌, 等. 城市污泥干燥研究进展[J].

生态环境, 2007, **16**(2): 667-671.

[5] Houdková L, Boráň J, Ucekaj V, *et al.* Thermal processing of sewage sludge- II [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, **28**(16):2083-2088.

[6] Park K T, Lim B R, Lee S K. Drying characteristics of sewage sludge using vacuum evaporation and frying [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management,2010,**12**(3):235-239.

[7] 翁焕新. 污泥无害化、减量化、资源化处理新技术[M]. 北京:科学出版社, 2009. 65-73.

[8] 翁焕新, 傅凤霞, 刘瓚, 等. 污泥干化使重金属形态变向稳定的原因分析[J]. 环境科学学报,2010,**30**(7):1401-1409.

[9] Deng W Y, Yan J H, Li X D, *et al.* Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **162**(1):186-192.

[10] Ohm T I, Chae J S, Kim J E, *et al.* A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **168**(1): 445-450.

[11] Yi S M, Pagilla S R, Seo Y C, *et al.* Emissions of polychlorinated biphenyls (PCBs) from sludge drying beds to the atmosphere in Chicago [J]. Chemosphere, 2008, **71**(6):1028-1034.

[12] 褚赞, 翁焕新, 章金骏, 等. 污泥干化过程中苯系物(BTEX)的释放及其致癌风险评价[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(4): 777-785.

[13] 刘峰. 城镇污泥干燥过程中胶粘性的研究[D]. 天津:天津大学, 2008.

[14] 姜瑞勋, 李爱民, 王伟云. 脱水污泥薄层干燥特性及动力学模型分析[J]. 中国环境科学, 2009,**29**(1):22-25.

[15] 王兴润, 金宜英, 王志玉, 等. 污水污泥间壁热干燥实验研究[J]. 环境科学, 2007,**28**(2):407-410.

[16] 李爱民, 曲艳丽, 杨子贤, 等. 污水污泥干燥过程中表观形态变化及水分析出特性[J]. 化工学报, 2004, **55**(6): 1011-1015.

[17] 马学文, 翁焕新. 温度与颗粒大小对污泥干燥特性的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, **43**(9):17-23.

[18] 刘长燕, 葛仕福. 污泥干燥特性及其模型[J]. 化工装备技术, 2010, **31**(1):1-4.

[19] USEPA (U. S. Environmental Protection Agency). Biosolids Technology Fact Sheet Heat Drying [S]. Washington: US EPA/832/F-06/029. 2006.

[20] Wang L, Shammas N K, Hung Y T. Biosolids Engineering and Management Volume 7 (Handbook of Environmental Engineering) [M]. New York: Humana Press, 2008. 273-342.

[21] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 200-210.

[22] 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 671-692.

[23] 金国森. 干燥设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 22-37.

[24] 李笃中, 何品晶. 污泥性质、胶羽结构与处置[J]. 科技导报, 2004, **9**:26-30.

[25] 朱敬平, 李笃中. 污泥处置(Ⅲ): 污泥后处理[J]. 国立台湾大学台大工程学刊, 2001, **83**:59-81.