doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.036

有机污泥干燥特性与干燥模型研究

于镇伟[1]　陈坤杰[1]　高　崎[2]　陈　淼[1]　於海明[1]
(1.南京农业大学工学院,南京 210031;2.上海上药杏灵科技药业股份有限公司,上海 201703)

摘要:为了有效处理含水率较高且体积庞大的有机污泥,实现与低温热解工艺相结合,进一步完善污泥处理与利用知识体系,研究了干燥温度与升温速率对污泥干燥过程中的质量、失重率、含水率、热量的影响。同时研究了不同温度下污泥的干燥速率和含水率的变化规律,并建立了污泥干燥的数学模型。实验结果表明:从不同干燥特性曲线可以看出,污泥的干燥特性符合理论的 3 个阶段,预热时间极短,恒速阶段持续时间也不长,最后的减速阶段时间最长。干燥终温为 240℃时污泥干化时间最短,速率最快。二次模型的预测值与实测值决定系数为 0.992 4,均方根误差和残差平方和分别为 0.035 和 0.032,与其他数学模型相比,二次模型对污泥干燥过程的拟合优度最高。

关键词:污泥;热重分析;干燥特性
中图分类号:X705　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)10-0286-06

Drying Characteristics and Mathematical Modeling of Organic Sludge

YU Zhenwei[1]　CHEN Kunjie[1]　GAO Qi[2]　CHEN Miao[1]　YU Haiming[1]
(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *SPH Xing Ling Sci. & Tech. Pharmaceutical Co.*, *Ltd.*, *Shanghai* 201703, *China*)

Abstract: The purpose was to deal with organic sludge with high content and large volume effectively, and achieve to combine sludge drying with low temperature pyrolytic process. The current study focused on the effect of drying temperature and heating rate on rate of weight loss and moisture content as well as quality of sludge during drying process. The rate of drying and moisture content of sludge was also investigated at different temperatures. Furthermore, a mathematical model was developed for sludge drying. The experimental result showed that the drying characteristics of sludge had resemblance with the theoretical three stages of drying, and the rule of three stages was also obvious from different drying characteristic curves. It took very little time to warm up, and the constant speed state did not last long, while the most time was used during the final decelerating phase. With the increase of temperature, the faster the evaporation of the sludge was, the sooner the largest drying rate was, and the bigger the value was. Compared with the effect of experiment at 250℃, the effect of experimental at 240℃ was more ideal. The results showed that maximum drying rate and minimum drying time was observed for sludge at 240℃ drying temperature. The determination coefficient for the predictive and measured values of the quadratic model were 0.992 4, with a RMSE and RSS of 0.035 and 0.032, respectively. Quadratic model had better correlation coefficient to the sludge drying process. The needed time could be calculated approximately with the required water content that could be gotten through the model equation. This would be of some reference value for industrial production and research.

Key words: sludge; thermogravimetric analysis; drying characteristics

引言

污泥是一种典型的固体沉淀物,主要是由人类生产生活产生的污水经过处理后得到的,组成极其复杂,并且数量庞大,处理难度非常大[1]。有机污泥的最终处置问题已经成为国内外热点研究问

收稿日期:2017-07-07　修回日期:2017-08-08
基金项目:国家自然科学基金项目(51102136)
作者简介:于镇伟(1992—),男,博士生,主要从事固体废弃物处理与利用研究,E-mail:zhenweiyu615@126.com
通信作者:於海明(1974—),男,副教授,主要从事农产品加工与无损检测技术研究,E-mail:yuhaiming@njau.edu.cn

题[2-3]。

传统的污泥处置方法，如填埋法、堆肥法、填海法和焚烧法等[4-6]，都可以达到一定的无害化、稳定化处理目的。但这些传统的处置方法存在的各种弊端逐渐显现，同时污泥低温热解工艺逐渐成为污泥处置的主要方式。在污泥低温热解前必须对其进行干化处理。国内已经有一些关于污泥干化处理的研究，如：张增强[7]研究 70℃左右的污泥堆肥干化工艺；饶宾期等[8]研究了污泥在 80℃时的热泵污泥干燥技术；刘凯等[9]研究了污泥在 80 ~ 160℃的薄层干燥。在这些众多污泥干化的研究中未见有结合污泥热解技术进行相关研究。

本文结合污泥低温热解工艺的需求，对热解工艺中污泥干化技术的相关参数进行研究，通过对污泥干燥曲线的分析，探讨干燥温度对整个干化过程的影响规律，采用不同的拟合方法得到数学模型，验证各种模型的准确性，并相互比较拟合优度。以促进完整污泥低温热解工艺的研究，充分实现污泥的减量化和稳定化处理[10-12]。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料与装置

实验材料：实验用污泥取自南京水务集团有限公司桥北污水处理厂，通过机械压滤得到片状污泥，厚度约为 6 mm，测得含水率约为 82.6%。

实验仪器：STA409 型热重分析仪（德国 NETZSCH 公司）；101 - 1A 型电热恒温鼓风干燥箱（上海锦昱科学仪器有限公司）；OTF - 1200X 型单温区管式炉（合肥科晶材料技术有限公司）；JM - A20002 型电子天平（上海光正医疗仪器有限公司）。

1.2　实验方法

（1）热重实验利用热重分析仪来完成，分别以 5、10、15、20 K/min 的升温速率，从室温（293 K）升至 800 K，加热炉通入氩气保护气，流速为 20 mL/min，样品量为 10 mg，实验参比是 Pt，记录热重曲线，分析热反应特性。

（2）设置 5 组实验组，每组取 40 g 污泥，放入预热好的电热恒温干燥鼓风箱。每 8 min 取出称量一次，重复上述步骤，直到污泥湿基含水率低于 20% 停止实验。同样的操作分别完成 140 ~ 220℃的 9 组实验。

（3）利用单温区管式炉进行 220、230、240、250℃的实验。当温度恒定在目标温度时同样每 8 min 取出称量一次，重复步骤直到污泥湿基含水率低于 20% 时停止，每组温度重复 5 次，最终取平均值。

1.3　干燥模型

物料干燥过程是一个复杂的热量和质量传递过程，经过众多学者对不同物料的实验研究，总结了几种常用的经验、半经验干燥数学模型，用于定量描述物料干燥规律[13-15]。常见的描述农产品物料的薄层干燥模型如表 1 所示[16-19]。

表 1　薄层干燥模型

Tab. 1　Mathematic models for heat pump drying of litchis

序号	模型名称	模型方程
1	Newton	$M = \exp(-kt)$
2	Modified Page	$M = \exp(-kt^b)$
3	Henderson and Pabis	$M = a\exp(-kt)$
4	Logarithmic	$M = a\exp(-kt) + b$
5	Wang and Singh	$M = 1 + at + bt^2$

上述模型方程中 M 为水分比，用于表示一定干燥条件下物料中还有多少水分。计算公式为

$$M = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \tag{1}$$

式中　M_t——某时刻物料干基含水率

M_e——物料平衡干基含水率

M_o——物料初始干基含水率

均方根误差 R 和卡方 χ^2 分别定义为

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(M_{pre,i} - M_{exp,i})^2}{N}} \tag{2}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(M_{exp,i} - M_{pre,i})^2}{N - n} \tag{3}$$

式中　$M_{pre,i}$、$M_{exp,i}$——水分比的预测值和实验值

N——观测次数

n——回归模型中常数项的个数

2　实验结果分析

2.1　热重实验分析

污泥中的水以自由水和结合水的形式存在，实验过程中污泥被加热水分升华、汽化，失去自由水和结合水等，污泥的质量就会发生变化。热重曲线能清楚地体现污泥在不同温度下产生的变化，根据质量的变化就可以计算出实验污泥最终失去了多少物质[20-21]。

由图 1 可知，当升温速率为唯一变量时，4 次实验得到的曲线整体上走向和变化趋势基本一致。随着升温速率由 10℃/min 到 30℃/min 不断提高，所得 TG 曲线和 DTG 曲线的趋势向高温区域偏移越来越明显。

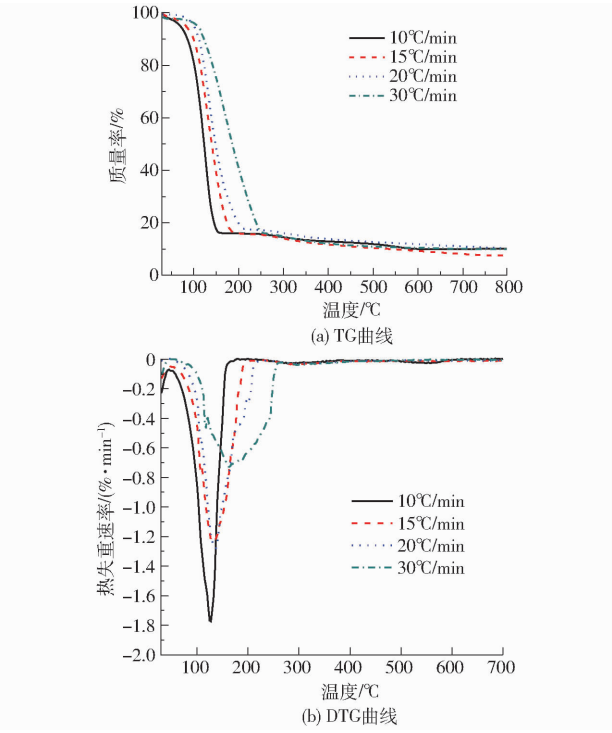

图 1 不同升温速率的热重曲线

Fig. 1 Thermogravimetric curves at different heating rates

图 2 是升温速率为 20 ℃/min 时的污泥热重曲线,主要分析 TG 曲线和 DSC 曲线[12]。污泥的湿基含水率随温度的增加而减小,并且在 110 ~ 240℃之间下降速率非常大,而在 110℃以下和 240℃以上曲线较为平缓,变化速率小,说明这 2 个阶段水分蒸发缓慢。根据图 2 中 DSC 曲线可得,在 0 ~ 270℃之间,曲线呈一个波峰状态,证明此时污泥是在吸热,用于水分的蒸发,而在 270℃左右时,曲线呈现一个微小的波谷状态,证明此时污泥已有放热,而这种现象使得污泥本身的热量释放,导致了能量的损失,因此实验温度不得高于 260℃。

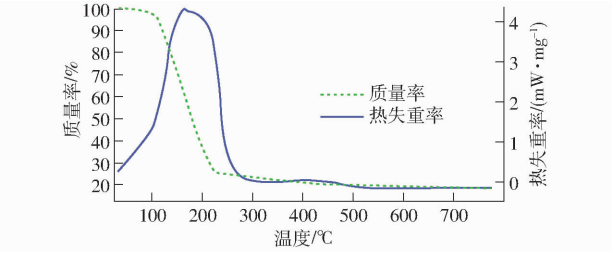

图 2 污泥热重分析

Fig. 2 Thermogravimetric analysis of sludge

综上所述,污泥的含水率在 110 ~ 240℃之间时变化明显,下降速率大,且污泥的质量变化是由水分的蒸发所导致。

2.2 污泥含水率变化分析

由图 3 分析可知,同一温度下,开始时污泥含水率下降逐渐加快,当干基含水率低于 0.5% 时,含水率降低的速度开始减缓。随着温度的增加,曲线整体逐渐向左偏移,同种污泥干化到相同干基含水率所需要的时间变小,曲线的平均斜率也变大。污泥整个干燥过程基本呈指数变化规律。

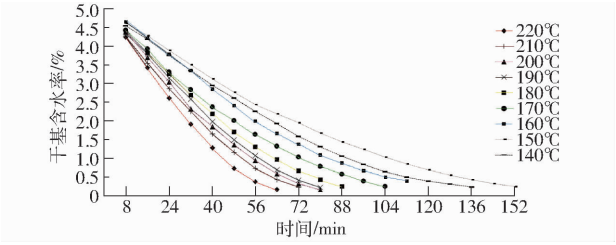

图 3 140 ~ 220℃污泥干燥曲线

Fig. 3 Drying curve of sludge from 140℃ to 220℃

图 4 是图 3 相对应的湿基含水率随时间的变化规律,通过湿基含水率可以更加直观地发现,污泥初期干燥速率较低,然后逐渐加快。通过对图 3 和图 4 的综合分析,以污泥干燥到湿基含水率为 20% 为基准,发现 220℃所需的时间最短,约为 60 min,用时最长的为 140℃和 150℃,分别需要 134 min 和 140 min。

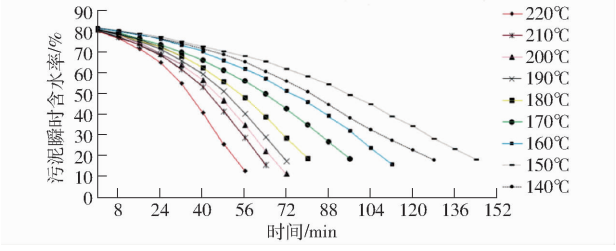

图 4 140 ~ 220℃污泥干燥曲线(湿基)

Fig. 4 Sludge drying curve at 140℃ to 220℃

由图 5 可知,所有的曲线也基本符合指数规律。在相同温度下,曲线的变化规律同干燥箱得到的曲线规律相同,都是在干化前期含水率不断加快,后期缓慢趋向于零,直至完全干燥。其中 230℃和 240℃的曲线斜率较大,并且两者相差甚小,基本重合,250℃的斜率大于 230℃和 240℃的斜率。

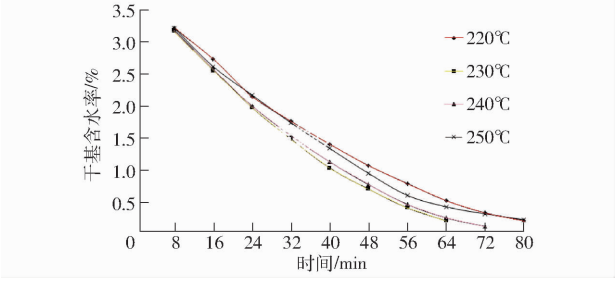

图 5 管式炉得到 220 ~ 250℃污泥干燥曲线

Fig. 5 Drying curve of sludge from 220℃ to 250℃

根据图 6 湿基含水率的干燥曲线图,发现用时最短的 230℃和 240℃大约需要 62 min,而用时最长的是 220℃实验组,用时约为 76 min。

由于实验设备不同,220℃在两种设备下干燥至

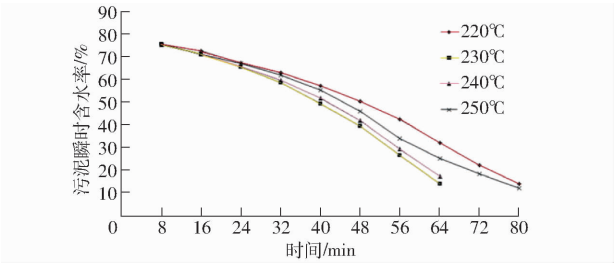

图 6　220 ~ 250℃ 污泥干燥曲线(湿基)

Fig. 6　Sludge drying curve (wet base) at 220℃ to 250℃

20% 含水率的时间也不同,但是通过两组不同设备下的 220℃ 实验,便可解决设备条件限制导致的实验联系中断问题。

综上所述,240℃ 是污泥干燥实验过程中首选温度。

2.3　污泥干燥速率变化分析

由图 7 可知,通过鼓风干燥箱得到每个温度下,污泥的干燥平均速率与时间变化的曲线都呈现出抛物线的趋势,并且峰值前曲线的斜率比峰值后曲线的斜率大,即曲线是由慢而快地上升达到峰值后,又缓慢下降,逐渐趋向于零。当温度升高,则曲线的起始点就越高,曲线峰值出现越早,且峰值数值越大。160℃ 以下的曲线,出现了比较明显的上下波动,但总体趋势相同。

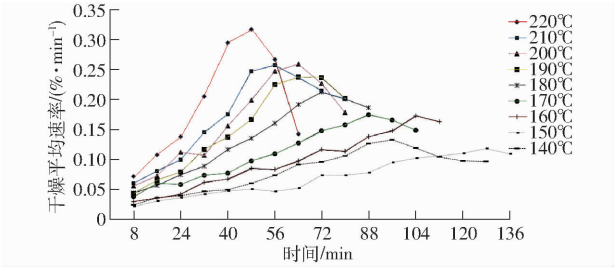

图 7　140 ~ 220℃ 污泥干燥速率变化曲线

Fig. 7　Variation of sludge drying rate from 140℃ to 220℃

由图 8 可知,管式炉得到的每个温度的曲线规律与干燥箱得到的曲线规律基本相同,220℃ 污泥的平均速率在以上 4 组温度中最低,240℃ 污泥的干燥平均速率最高,其干燥速率随时间规律上升,相较 230℃ 而言更加稳定。而 250℃ 得到的效果反而不及 240℃ 和 230℃。

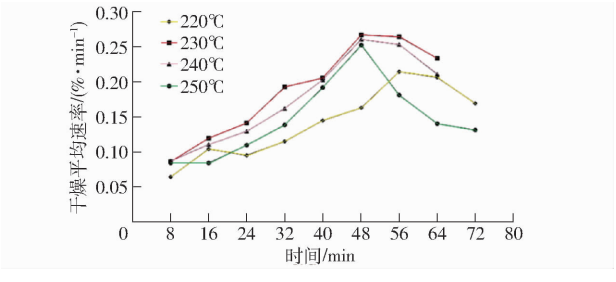

图 8　220 ~ 250℃ 污泥干燥速率变化曲线

Fig. 8　Variation of sludge drying rate with time at 220℃ to 250℃

综上所述,240℃ 的温度下,污泥干燥的平均速率最大,且干燥到目标含水率用时最少,最符合工业生产中的节能理念。

图 9 体现出 240℃ 时污泥的干燥特性,本次实验重复了两次,两次得到的曲线基本重合,说明实验有较好的重复性。相关文献把污泥干燥过程分为 3 阶段,分别为预热阶段、恒速阶段和降速阶段[18]。从图 8 可以看出,污泥的恒速阶段时间非常短,而预热阶段相较于降速阶段也较为短暂,主要过程还是降速阶段。预热阶段主要是因为污泥加热后,有限的表面自由水迅速蒸发,因此时间较短。而恒温阶段是指在水分蒸发过程中,污泥本身温度保持不变,主要原因是处在污泥最核心的间隙水会逐步向污泥表面迁移,达到表层后向空气蒸发,从数学上讲,当间隙水由内向外迁移的速度大于等于污泥外层水蒸发的速度时,就会出现污泥温度恒定的现象,而这样的过程通过图像可知,持续时间也不长。当恒温过程到达某个临界点时,即污泥内部水分扩散的速度开始小于污泥表面水分蒸发的速度时,就开始了污泥干燥的降速阶段,此时污泥表面水分来不及得到补充就会出现一块一块的干区,而核心区域的水分迁移到表面的距离越来越长,受到阻力也越来越大,因此污泥不得不继续吸热升温使内部的水分得以蒸发,因此整个过程是一个降速的过程。

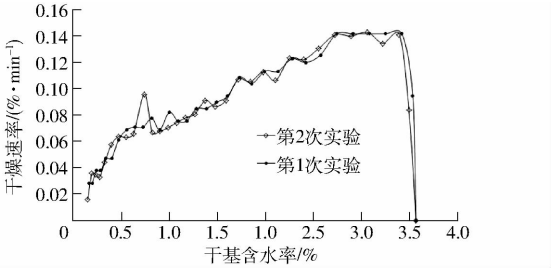

图 9　污泥在 240℃ 时的干燥速率曲线

Fig. 9　Drying rate curves of sludge at 240℃

2.4　模型的建立

从相关性系数、均方根差、残差平方和来看(表 2),二次模型曲线和三次模型曲线是针对实验数据拟合度最高的曲线模型。而在 t 值显著性差异中显示,三次模型曲线的显著度为 0.082(0.082 > 0.05),因此需要剔除该项,发现得到的仍为二次曲线。

最终得到的模型方程为

$$M = 3.191 - 0.0559t + 0.00052(t - 32)^2$$

在 SPSS 软件中对实验数据进行非线性回归分析得到表 3。根据表 3 中的相关系数 R 可知,

Newton 和 Modified Page 这 2 个模型的相关系数呈现负相关,说明模型拟合结果不可靠,拟合函数与实验值无法对应,模型不可用。而 Logarithmic 模型的相关系数 R 大于 0.99,也是最接近 1 的,同时均方根误差和残差平方和都十分接近于零,因此理论上可以得到在上述的几个数学模型中,Logarithmic 模型拟合优度最高,是用来描述 240℃时污泥干燥过程的最佳模型。

模型的参数方程为

$$M = 5.299\exp(-0.018t) - 1.565$$

表 2 污泥干燥数学模型曲线估计表(240℃)

Tab. 2 Calculation curve of sludge drying mathematical model (240℃)

曲线估计	相关系数	均方根误差	残差平方和	F 的显著性	t 的显著性		
					t	t^2	t^3
线性	0.987	0.181	0.850	<0.0001	0	—	—
二次	0.999	0.035	0.032	<0.0001	0	0	—
三次	1.000	0.033	0.028	<0.0001	0	0.015	0.082
复合	0.974	0.215	1.205	<0.0001	0	—	—
指数	0.974	0.215	1.205	<0.0001	0	—	—

表 3 240℃时 5 个干燥模型拟合数据

Tab. 3 Data of five drying models at 240℃

模型	参数	相关系数	均方根误差	残差平方和
Newton	t = 0.001	负相关	1.258	41.165
Modified Page	k = 26.181 b = −53.297	负相关	1.154	34.614
Henderson and Pabis	a = 5.299 k = 0.034	0.989	0.166	0.714
Logarithmic	a = 5.299 k = 0.018	0.999	0.046	0.054
Wang and Singh	k = −1.565 a = 0.075 b = −0.002	0.416	1.009	26.458

将实验数据中随机取出的 8 组数据代入得到的两个数学模型进行验证。表 4 是分别使用回归线性分析得到的二次数学模型和非线性回归分析得到的 Logarithmic 模型对随机从实验数据中取出的 8 组数据进行验证得到的结果。

为了更简明地比较两个模型的准确度,将在 240℃的温度下干燥时的污泥干基含水率变化的理论值和实验值,通过图 10 和图 11 来进行验证比较,并在图中表示出 R^2 和斜率,发现两个模型得到的散点图的趋势线均接近 45°,但是比较 R^2 和斜率的值发现,线性回归分析得到的二次模型的趋势线斜率为 0.992 5,比 Logarithmic 模型趋势线斜率更接近于 1,同时图 10 趋势线的截距比图 11 趋势线更接近于 0。

表 4 二次模型和 Logarithmic 模型的数据验证结果对比

Tab. 4 Comparison of data validation results between quadratic model and Logarithmic model

模型	序号	时间/min	实验值/%	理论值/%	绝对误差/%	相对误差/%
二次模型	1	6	3.259	3.204	0.055	1.688
	2	16	2.432	2.428	0.004	0.164
	3	24	1.866	1.882	0.016	0.857
	4	32	1.379	1.402	0.023	1.668
	5	40	1.005	0.988	0.017	1.692
	6	48	0.654	0.640	0.014	2.141
	7	56	0.348	0.357	0.009	2.586
	8	64	0.167	0.141	0.026	15.569
	平均		1.389	1.380	0.021	3.296
Logarithmic 模型	1	6	3.259	3.192	0.068	2.084
	2	16	2.432	2.408	0.025	1.008
	3	24	1.866	1.875	0.009	0.487
	4	32	1.379	1.414	0.035	2.526
	5	40	1.005	1.014	0.009	0.913
	6	48	0.654	0.668	0.014	2.209
	7	56	0.348	0.369	0.021	5.971
	8	64	0.167	0.110	0.057	34.357
	平均		1.388	1.381	0.030	6.194

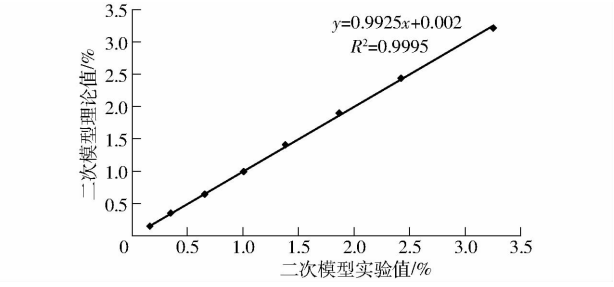

图 10 二次模型理论值与实验值之间的关系

Fig. 10 Relationship between theoretical and experimental values of quadratic model

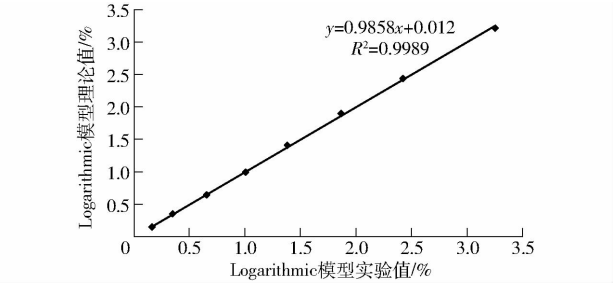

图 11 Logarithmic 模型理论值和实验值之间的关系

Fig. 11 Relationship between theoretical values and experimental values of Logarithmic model

3 结论

(1)通过污泥的含水率随时间的变化规律可知:在相同温度的干燥实验中,瞬时干燥速率呈现先慢后快又减慢的规律。随着温度的升高,污泥的水分蒸发得越快,最大的干燥速率出现得越早、数值也

越大。250℃的实验效果不及240℃时效果理想，因此确定240℃为最佳干燥温度。

（2）污泥的干燥特性符合干燥理论的3个阶段且规律十分明显，预热时间极短，恒速阶段持续时间也不长，最后的减速阶段时间最长。因此在工业生产过程中需要对减速阶段采取相关措施，来提高污泥的干燥速率。

（3）通过对各模型进行对比，发现二次模型更适合本次实验的数据。通过模型方程可推算出达到所需含水率使用的时间，计算成本能耗，为工业生产和研究提供了一定的参考。

参 考 文 献

1 张万钦，戚丹丹，吴树彪，等. 不同预处理方式对污泥厌氧发酵的影响[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(9)：187－198. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20140931&flag = 1. DOI：10. 6041/j. issn 1000-1298. 2014. 09. 031.
ZHANG Wanqin，QI Dandan，WU Shubiao，et al. Effect of different pretreatment methods on sewage sludge anaerobic digestion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(9)：187－198. (in Chinese)

2 LI Jie，PLOUGONVEN E，FRAIKIN L，et al. Positive operations on wastewater sludge drying：comparison of back-mixing and sawdust addition[J]. Energy & Fuels，2016，30(4)：3014－3019.

3 OJEDA G，MATTANA S，BONMATI M，et al. Soil wetting-dryingand water-retention properties in a mine-soil treated with composted and thermally-dried sludge[J]. European Journal of Soil Science，2011，62(5)：696－708.

4 刘志强，彭望明，徐爱祥. 市政污泥干燥技术现状及研究进展[J]. 给水排水，2009，45(增刊1)：266－269.

5 刘敏，张旭，顾国维，等. 太阳能干燥污泥的试验研究[J]. 太阳能学报，2012，33(5)：868－873.
LIU Min，ZHANG Xu，GU Guowei，et al. Experimental study on solar sludge drying [J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2012，33(5)：868－873. (in Chinese)

6 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)：1661－1667.
MA Xuewen，WENG Huanxin. Effects of temperature and granule size on sludge drying characteristics[J]. Journal of Zhejiang University：Engineering Science，2009，43(9)：1661－1667. (in Chinese)

7 张增强. 污水处理厂污泥堆肥化处理研究[J]. 农业机械学报，2011，42(7)：148－154.
ZHANG Zengqiang. Composting sewage sludge of wastewater treatment plant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(7)：148－154. (in Chinese)

8 饶宾期，曹黎. 太阳能热泵污泥干燥技术[J]. 农业工程学报，2012，28(5)：184－188.
RAO Binqi，CAO Li. Technical research on sludge drying by solar energy and heat pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2012，28(5)：184－188. (in Chinese)

9 刘凯，马晓茜，肖汉敏. 造纸污泥薄层干燥实验及动力学模型分析[J]. 燃料化学学报，2011，39(2)：149－154.
LIU Kai，MA Xiaoqian，XIAO Hanmin. Experinent and kinetics model analysis on thin layer drying of paperm Ill sludge[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology，2011，39(2)：149－154. (in Chinese)

10 马德刚，朱红敏，翟君，等. 电渗透脱水污泥干燥特性曲线及干燥模型[J]. 环境工程学报，2014，8(2)：740－744.
MA Degang，ZHU Hongmin，ZHAI Jun，et al. Drying characteristic of electroosmosis curve and drying model dewatering sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2014，8(2)：740－744. (in Chinese)

11 熊思江，章北平，玉东科，等. 干燥污泥与含水污泥的热解动力学研究[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2011，39(2)：1124－1128.
XIONG Sijiang，ZHANG Beiping，YU Dongke，et al. Study on pyrolysis kinetics of dried and wet sewage sludge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology：Natural Science Edition，2011，39(2)：1124－1128. (in Chinese)

12 LI Bo，WANG Fei，CHI Yong，et al. Study on optimal energy efficiency of a sludge drying-incineration combined system[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management，2014，16(4)：684－692.

13 吴静. 城市污水污泥干燥特性及转筒干燥过程研究[D]. 济南：山东大学，2010.

14 黄小丽，肖波，王振华，等. 过热蒸汽干燥稻米力学特性试验[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(2)：199－203. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20140233&flag = 1. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 02. 033.
HUANG Xiaoli，XIAO Bo，WANG Zhenhua，et al. Mechanical characteristics of rice dried with superheated steam [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(2)：199－203. (in Chinese)

15 DANISH M，HU Jing，ZHOU Pin，et al. A new drying kinetic model for sewage sludge drying in presence of CaO and NaClO[J]. Applied Thermal Engineering，2016，106：141－152.

16 李长友，方壮东. 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J]. 农业机械学报，2014，45(5)：179－184. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20140528&flag = 1. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 05. 028.
LI Changyou，FANG Zhuangdong. Analytical models of multistage counter flow drying and tempering process of grain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(5)：179－184. (in Chinese)

17 张绪坤，孙瑞晨，王学成，等. 污泥过热蒸汽薄层干燥特性及干燥模型构建[J]. 农业工程学报，2014，30(14)：262－266.
ZHANG Xukun，SUN Ruichen，WANG Xuecheng，et al. Drying models and characteristics of thin layer sludge in superheated steam drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2014，30(14)：262－266. (in Chinese)

18 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.
JIANG Ruixun，LI Aimin，WANG Weiyun. Thin layer drying characteristics and kinetics model of dewatered sludge[J]. China Environmental Science，2009，29(1)：22－25. (in Chinese)

19 关志强，王秀芝，李敏，等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J/OL]. 农业机械学报，2012，43(2)：151－158，191. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20120230&flag = 1. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 02. 030.
GUAN Zhiqiang，WANG Xiuzhi，LI Min，et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2012，43(2)：151－158，191. (in Chinese)

20 马志豪，张小玉，王鑫，等. 基于热重分析法的生物柴油-柴油发动机颗粒排放研究[J]. 农业机械学报，2011，42(9)：26－29.
MA Zhihao，ZHANG Xiaoyu，WANG Xin，et al. Particulate emissions of engine fuelled with biodiesel-diesel blends using thermo-gravimetric analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(9)：26－29. (in Chinese)

21 赵卫东，刘建忠，周俊虎，等. 褐煤等温脱水热重分析[J]. 中国电机工程学报，2009，29(14)：74－79.
ZHAO Weidong，LIU Jianzhong，ZHOU Junhu，et al. Investigation on the isothermal dewatering of brown coal by thermobalance [J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(14)：74－79. (in Chinese)