

疏浚底泥微波干燥特性及耗能分析

方申柱¹, 韩久春², 王文江², 吴燕²

(1. 安徽交通航务工程有限公司, 合肥 230011; 2. 天津科技大学 材料科学与化学工程学院, 天津 300457)

摘要: 为了探索疏浚底泥有效干燥处理的新途径, 对疏浚底泥进行微波干燥试验, 探讨了不同底泥厚度和微波功率对疏浚底泥微波干燥特性的影响, 分析了微波干燥过程中单位能量消耗, 并引入薄层干燥模型对底泥干燥过程进行模拟。结果表明, 随着底泥厚度的依次增加, 干基含水率下降速率逐渐降低, 干燥所需时间逐渐延长; 微波功率越大, 干燥时间明显缩短; 10 mm 厚底泥最大干燥速率约是 40 mm 的 3.0 倍。单位耗能分析表明, 不同厚度底泥在 280 W 下单位耗能较低, 能量利用更加充分。通过分析试验数据, 确定了疏浚底泥微波干燥过程中水分比变化适用 Modified Page I 模型, 且模型拟合较好, 可用于预测不同厚度疏浚底泥微波干燥至不同含水率所需干燥时间。

关键词: 关键词: 微波干燥; 疏浚底泥; 干燥特性; 耗能分析; 干燥模型

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1128-05

Microwave drying characteristics and energy consumption analysis of dredged sediment

FANG Sheir zhu¹, HAN Jiu chun², WANG Weir jiang², WU Yan²

(1. Anhui Province Traffic Navigation Engineering Co., Ltd, Hefei 230011, China; 2. School of Materials Science and Chemical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In this paper, microwave drying of dredged sediment was carried out using domestic microwave oven in order to explore a new way of effective dry processing for dredge sediment. Effects of different sediment thicknesses and microwave power outputs on the drying characteristics of dredged sediment by microwave energy were discussed and the unit energy consumption was analyzed, and thin layer drying model was introduced to simulate the drying process. The results showed that the decreasing rate of dry basis moisture content reduced and the drying time extended with the increasing of sediment thickness successively the drying time shortened significantly with the increasing of the powers; and the maximum drying rate of 10 mm thick sediment was about 3.0 times of that of 40 mm thick sediment. The unit energy consumption analysis showed that the unit energy consumption was lower under 280 W for different thicknesses of sediment, and energy utilization was more effective. Modified Page I model was determined to be applicable to analyze the microwave drying of sediment through the analysis of experimental data, and the model had good fittings. Therefore, the model can be used to predict the drying time for different thicknesses of dredged sediment with different moisture contents.

Key words: microwave drying; dredged sediment; drying characteristics; energy consumption analysis; drying model

疏浚底泥是清除湖泊、河流、航道等内源污染而产生的一种固体沉淀物。由于底泥含水率高, 且含有少量微生物等特点, 对底泥的堆放、运输和处置带来极大的困难。为了有效地处理疏浚底泥, 必须对底泥进行深度脱水处理, 实现减量化。常用的底泥深度脱水方法主要有机械脱水、药剂脱水以及热干燥^[1-3]。然而机械脱水很难将底泥的含水率脱除至 50% 以下^[4,5], 药剂脱水需要根据不同地区底泥的特点研究不同的配比, 因而本文利用微波干燥进行底泥的深度脱水干化。

微波干燥因具有干燥速率快、干燥均匀、节能环保及易于智能控制等优势, 广泛应用于食品、药材和化工等行业。国内外研究者早已利用微波技术对污泥及废弃物进行处理^[6,7], 但如何在高效率与耗能问题之间寻找一个平衡点是该技术得以应用的关键。因此, 本试验对疏浚底泥微波干燥特性进行研究, 探讨其干燥规律, 并对其耗能进行了分析。在分析试验数据的基础上, 确定了疏浚底泥微波干燥的数学模型, 用于预测干燥过程不同时刻的含水率, 为微波干燥在疏浚底泥资源化处理方面提供理论依据。

收稿日期: 2014-11-21 修回日期: 2015-10-09 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2201.056.html>

作者简介: 方申柱(1977-), 男, 安徽合肥人, 高级工程师, 主要从事疏浚淤泥的脱水技术研究。E-mail: 383086310@qq.com.

通讯作者: 吴燕(1976-), 女, 湖南岳阳人, 副教授, 博士, 主要从事污染控制化学方面研究。E-mail: wuyan_tust@163.com.

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

试验材料:疏浚底泥采挖于天津科技大学人工湖,并对其基本物性进行测定,初始含水率为 44.56%, pH 为 5.80~6.20, 孔隙率为 66.46%, 容重和密度分别为 0.94 g/cm³ 和 2.80 g/cm³, 有机质含量为 7.26%, 含盐量为 0.24%, 并用 Ls 激光衍射粒度分析仪测定底泥中值粒径为 9.62 μm。

试验设备:微波炉, P70D20TP C6(WO), 功率分档可调(700、595、462、280 W), 额定输出频率为 2.450 MHz, 腔体尺寸 210 mm × 315 mm × 314 mm, 格兰仕微波炉电器有限公司; 环刀, 100 cm³, 市售。

1.2 试验方法

试验采用精度为 0.01 g 的电子天平进行数据采集。首先制取一定直径的疏浚底泥柱, 高度分别为 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm, 将制好的样品放入微波炉中, 在微波炉的中低火(280 W)、中火(462 W)、中高火(595 W)、高火(700 W)四个档位下依次进行干燥, 每隔 1 min 测定一次各个样品的质量, 直至含水率降至 8% 以下为止, 计算各测量点样品的含水率和干燥速率, 绘制干燥特性曲线。由于样品体积与箱式干燥器体积之比 0.2%, 忽略干燥过程中水汽的影响。

1.3 数据处理

1.3.1 水分比

不同条件下疏浚底泥含水量的变化可以用含水百分比(MR)表示^[7]如下:

$$MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e) \times 100\% \quad (1)$$

式中:MR 为底泥含水百分比(%); M₀ 为初始单位干底泥中含水率(g/g); M_e 为干燥平衡时单位干底泥中含水率(g/g); M_t 为干燥过程中单位干底泥中含水率(g/g)。

1.3.2 干燥速率

某测量时刻底泥的干燥速率计算公式见式(2)。

$$DR_n = \frac{X_{n-1} - X_n}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:DR_n 为某测量时刻底泥的干燥速率 g/(g·s); X_{n-1} 为某测量时刻前一次底泥的干基含水率(%); X_n 为某测量时刻底泥的干基含水率(%); Δt 为前后两次测量的时间差(s)。

2 结果与分析

2.1 微波干燥特性曲线

制备不同厚度(10 mm、20 mm、30 mm、40 mm)的底泥样品, 置于微波炉(功率为 280 W、462 W、595 W、700 W)中进行干燥, 测定不同时刻底泥的重量, 绘制其干燥特性曲线。

图 1 和图 2 为不同条件下底泥的干基含水率和速率变化曲线图。从图 1 中曲线变化可以看出, 各种厚度底泥在不同微波功率下干燥所得的含水率变化趋势大体一致。微波干燥初始阶段, 底泥含水率变化较大。在不同功率下, 当底泥处于薄层时, 其含水率急剧下降, 在较短时间内达到干燥要求, 随着底泥厚度的增加, 其含水率下降的速率降低, 达到干燥要求时所需的时间增长。

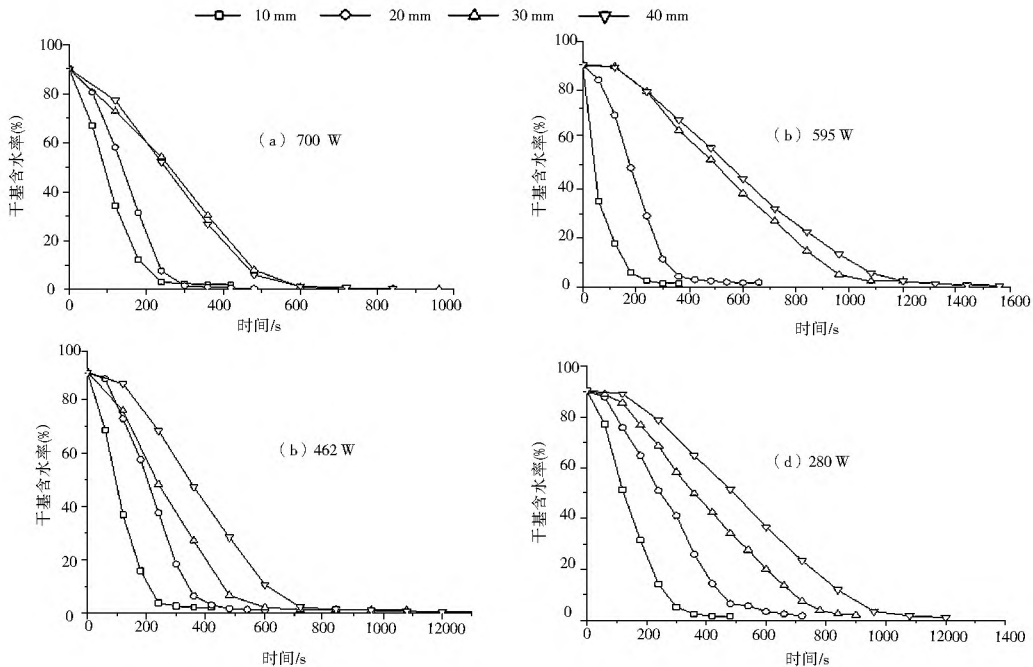


图 1 不同厚度疏浚底泥在不同功率下干基含水率随时间变化曲线

Fig.1 Variation curves of dry basis moisture content with time for the dredged sediment with different thicknesses under different microwave powers

从图 1 可知, 在高功率(595 W 和 700 W)下, 10 mm 厚底泥基本干燥所需时间为 6~7 min, 而 40 mm 厚底泥达到基本干燥的时间约为 14~20 min, 这是由于底泥厚度越大, 聚积在底泥内部的水分越多, 干燥所需时间越长, 这与图 2 中不同厚度底泥的干燥速率曲线图所呈现的趋势是相同的。

如在 462 W 时, 初始厚度为 10 mm 的底泥能达到的最大干燥速率约为 0.532 g/(g·s), 是初始厚度为 20 mm 的底泥恒速时干燥速率(约为 0.333 g/(g·s))的 1.6 倍, 是初始厚度为 40 mm 的底泥恒速时干燥速率(约为 0.177 g/(g·s))的 3.0 倍。

从图 2 可知,底泥在干燥过程中大致经历了加速干燥段、短暂的恒速干燥段和降速干燥段,随着底泥厚度的增加,恒速阶段越来越明显。这主要是由于干燥初期,底泥体系吸收大量微波辐射的能量,使得底泥体系温度升高,水分汽化速率加快,因此在干燥初期水分蒸发速率呈上升趋势。底泥

厚度越大则含有的水分总量越多,蒸发时间随之延长。当底泥处于较低厚度时,同时由于底泥的量和含有的水分有限,同时微波强烈的穿透能力,使得底泥体系内部水分向外扩散的阻力很小,导致在较短时间内底泥体系温度达到湿球温度,因而预加热阶段极短。

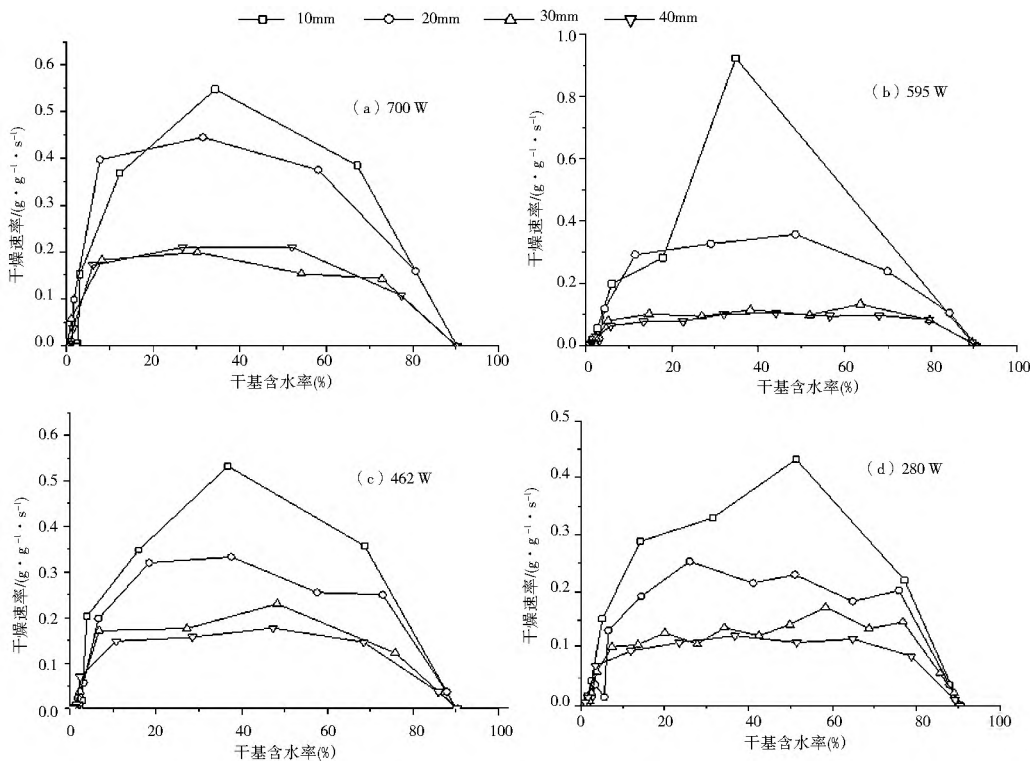


图 2 不同厚度底泥在不同功率下干燥速率曲线

Fig. 2 Variation curves of drying rate for different thicknesses of dredged sediment under different powers

2.2 微波干燥的耗能分析

每干燥一个单位质量水分所消耗的能量称为单位耗能,其是评定干燥工艺优劣性的一个重要指标。单位耗能(unit energy consumption, UEC, 单位: MJ/kg) 计算公式如下^[9]:

$$UEC = \frac{t_{op} \times P \times (1 - M_i)}{m_i \times (M_i - M_f)} \quad (3)$$

式中: t_{op} 为总干燥时间(s); P 为微波功率(W); M_i 为初始含水率(%); m_i 为初始重量(kg); M_f 为终止含水率(%)。

在疏浚底泥微波干燥过程中,其中水分蒸发所需要的热量和物料升温所需要的热量是微波干燥耗能的有效能量,热损失的定量计算比较复杂,本试验忽略不计。通过试验,记录不同厚度疏浚底泥在不同微波干燥功率下达到干燥目标所需的时间及干燥前的质量,试验结果见表 1。

表 1 不同功率下微波干燥的单位耗能

Tab. 1 Unit energy consumption of microwave drying under different powers

功率 / W	疏浚底泥厚度 / mm			
	10	20	30	40
700	7.02	5.10	4.31	3.97
595	5.25	5.05	5.68	5.69
462	4.98	4.22	4.29	3.76
280	3.22	3.08	2.24	2.10

从表 1 中可知,低厚度疏浚底泥的微波干燥单位耗能普遍高于高厚度疏浚底泥的,这说明低厚度下疏浚底泥的微波干燥存在大量能量的浪费,其中以 700 W 下 10 mm 底泥的干燥尤为明显。在薄层状态时,基本上随着厚度的增加,疏浚底泥的微波干燥单位耗能呈现降低的趋势,达到一定厚层时,单位耗能又会有不同幅度的提高。而 700 W 下,疏浚底泥的微波干燥单位耗能一直处于降低趋势,说明此时底泥干燥过程的能量利用逐渐合理,浪费变少。而在干燥后期,随着时间的延长,疏浚底泥的干基含水率下降较为缓慢,同样会导致高功率下疏浚底泥干燥过程存在相对较高的单位耗能。从表 1 中可知,280 W 时,疏浚底泥的微波干燥单位耗能在各个厚度下均处于较低的数值,干燥更加合理,能量利用更加充分,单位耗能值均低于其他干燥机耗能模拟计算值 4.99 MJ/kg^[10]。

2.3 干燥模型

2.3.1 干燥模型的建立

图 3 是 700 W 下疏浚底泥的水分比曲线图,分析可知,疏浚底泥的水分比与时间并不呈线性关系。由于微波干燥与对流干燥的干燥机理不同,故不能直接采用对流干燥模型的研究方法。因此对水分比进行对数处理,重新进行对比。

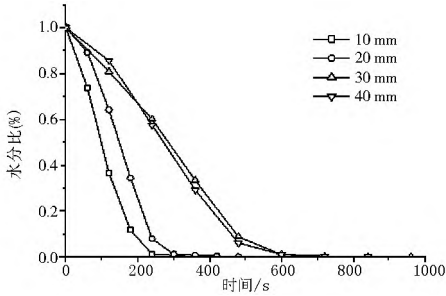


图3 疏浚底泥微波干燥水分比与时间的关系
Fig. 3 Variation of MR with time for dredged sediment by microwave drying

图4为进一步处理后595 W和280 W下疏浚底泥微波干燥的 $\ln(MR)-t$ 关系图,从图中可以清楚地知道, $\ln(MR)$ 与 t 呈一定的指数关系,并非线性关系,因此需要对数据进行下一步处理。图5为进一步处理后以 $\ln[-\ln(MR)]$ 对 $\ln(t)$ 作得到的曲线,从图中可知, $\ln[-\ln(MR)]$ 与 $\ln(t)$ 呈现一定的线性关系,即两者存在如下关系:

$$\ln[-\ln(MR)] = y \ln t - \ln k \quad (4)$$

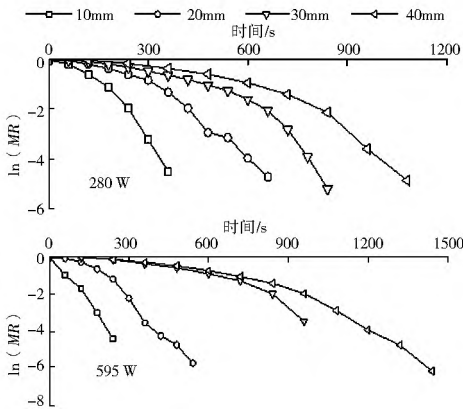


图4 疏浚底泥微波干燥的 $\ln(MR)$ 与时间的关系
Fig. 4 Variation of $\ln(MR)$ with time for dredged sediment by microwave drying

将式(4)进行处理后可知,其与Page和Modified Page I模型具有相同的公式结构,因此可以假定Page和Modified Page I模型能够模拟疏浚底泥的微波干燥过程。

模型如下。

Page 模型^[11]: $MR = \exp(-kt^y)$

Modified Page I 模型^[12-14]: $MR = \exp(-kt^y)$

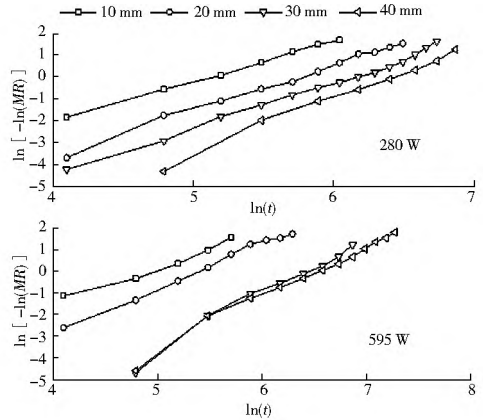


图5 疏浚底泥微波干燥的 $\ln[-\ln(MR)]$ 与 $\ln(t)$ 关系
Fig. 5 Variation of $\ln[-\ln(MR)]$ with $\ln(t)$ for dredged sediment by microwave drying

2.3.2 水分比模型的拟合

从表2中Page及Modified Page I模型拟合的参数结果可以得知,两者均能较好地模拟疏浚底泥的微波干燥过程,其中Modified Page I模型的模型参数 R^2 略大, χ^2 稍小,相比而言Modified Page I模型的模型拟合相关度更高,因此,采用Modified Page I模型模拟疏浚底泥的微波干燥过程。表3列出了其他功率下疏浚底泥干燥的Modified Page I模型模拟参数值。

表2 595 W下疏浚底泥微波干燥Page及Modified Page I模型拟合结果

Tab. 2 Fitting results of dredged sediment under different thicknesses by microwave drying (power: 595 W) between Page and Modified Page I drying models

模型	厚度/mm	模型参数值	R^2	χ^2	RSS
Page	10	$k = 1.886 \times 10^{-2}, y = 0.9589$	0.994	2.931×10^{-4}	0.00147
	20	$k = 5.816 \times 10^{-6}, y = 2.239$	0.999	1.509×10^{-4}	0.00136
	30	$k = 1.228 \times 10^{-6}, y = 2.119$	0.995	7.050×10^{-4}	0.00638
	40	$k = 1.911 \times 10^{-6}, y = 2.014$	0.998	2.685×10^{-4}	0.00322
Modified Page I	10	$k = 0.00654, y = 1.003$	0.997	3.598×10^{-4}	0.00144
	20	$k = 0.00459, y = 2.275$	0.999	1.457×10^{-4}	0.00131
	30	$k = 0.00162, y = 2.195$	0.996	6.642×10^{-4}	0.00598
	40	$k = 0.00145, y = 2.069$	0.998	2.478×10^{-4}	0.00297

3 结论

(1) 不同厚度疏浚底泥在不同功率下干燥效果明显不同。高功率(700W和595W)能够明显缩短干燥时间。底泥越厚,干燥时间越长,最大干燥速率的值反而越低。底泥在干燥过程中大致经历了加速干燥段、短暂的恒速干燥段和降速干燥段。

(2) 700 W时,疏浚底泥的微波干燥单位耗能一直处于

降低趋势,且能量利用逐渐合理,浪费变少。280 W时,疏浚底泥的微波干燥单位耗能在各厚度下均处于较低的值,能量利用更加充分。

(3) 引入薄层干燥模型,对疏浚底泥干燥过程进行模拟,计算得到Modified Page I模型具有较高的模型相关系数(R^2 均在0.993以上)及较低的 χ^2 值,适用于不同厚度疏浚底泥微波干燥过程的模拟,可用于预测不同厚度疏浚底泥微波干燥至不同含水率所用的大致时间。

表 3 不同条件下 Modified Page I 模型的拟合结果

Tab. 3 Fitting results obtained from Modified Page I model under different conditions

功率/W	厚度/mm	模型参数值	R^2	χ^2	RSS
700	10	$k=0.00791, y=1.885$	0.999	4.718×10^{-5}	3.372×10^{-4}
	20	$k=0.00588, y=2.349$	0.998	2.938×10^{-4}	0.00206
	30	$k=0.00306, y=1.935$	0.993	0.00104	0.00731
	40	$k=0.00317, y=2.104$	0.998	3.337×10^{-4}	0.002
462	10	$k=0.00518, y=2.061$	0.999	6.794×10^{-5}	5.435×10^{-4}
	20	$k=0.00407, y=2.422$	0.999	2.217×10^{-4}	0.002
	30	$k=0.00326, y=1.922$	0.998	3.273×10^{-4}	0.00262
	40	$k=0.0023, y=2.274$	0.999	1.597×10^{-4}	0.0016
280	10	$k=0.00466, y=2.013$	0.999	1.792×10^{-4}	0.00672
	20	$k=0.00319, y=2.062$	0.997	4.586×10^{-4}	0.00504
	30	$k=0.00215, y=2.020$	0.996	4.922×10^{-4}	0.00689
	40	$k=0.00164, y=2.260$	0.998	3.559×10^{-4}	0.0032

参考文献(References):

- [1] 戴鼎立, 何圣兵, 陈雪初, 等. 改善环保疏浚底泥脱水干化效能的实验研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1901-1906. (DAI Ding li, HE Sheng bing, CHEN Xue chu, et al. Experimental study on improving the dewatering and drying performance of environment friendly dredged sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5): 1901-1906. (in Chinese))
- [2] 于荣丽, 孙铁珩, 孙丽娜, 等. 微生物絮凝剂用于河道疏浚底泥快速脱水的研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5): 35-39. (YU Rong li, SUN Tie heng, SUN Li na, et al. Research of microbial flocculants in dredging sediment dewatering[J]. Environmental Pollution & Control, 2012, 34(5): 35-39. (in Chinese))
- [3] 林莉, 李青云, 吴敏. 河湖疏浚底泥无害化处理和资源化利用研究进展[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 80-88. (LIN Li, LI Qing-Yun, WU Min. Advance in research on harmless treatment and resource utilization of dredged sediment of rivers and lakes[J]. Journal of Yangtze River Science Research Institute, 2014, 31(10): 80-88. (in Chinese))
- [4] 吴学伟. 基于两级液态调质理论的污泥处理处置技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (WU Xue wei. Based on the theory of the two stage liquid conditioning sludge disposal technology [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [5] 刘禹杨, 吴燕, 胡保安, 等. 太湖疏浚底泥的脱水技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 72-76. (LIU Yu yang, WU Yan, Hu Bao an, et al. Study on dehydration technology of dredged sludge in Tai Lake[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 72-76. (in Chinese))
- [6] Fernandez Y, Mendez J A. Influence of feed characteristics on the microwave assisted pyrolysis used to produce syngas from biomass wastes[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 91(2): 316-322.
- [7] Tian Y, Zuo W, Ren Z, et al. Estimation of a novel method to produce bio oil from sewage sediment by microwave pyrolysis with the consideration of efficiency and safety[J]. Bioresource technology, 2011, 102(2): 2053-2061.
- [8] 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). LIU Kai, MA Xiao qian, XIAO Han min. Experiment and kinetics model analysis on thin layer drying of paper mill sludge[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2011, 39(2). (in Chinese))
- [9] Du G, Wang S, Cai Z. Microwave drying of wood strands[J]. Drying technology, 2005, 23(12): 2421-2436.
- [10] 尹晓慧, 尹思万. 顺流连续式粮食干燥机节能工艺探讨[J]. 现代化农业, 2009(4): 42-42. (YIN Xiaohui, YIN Siwan. Discussed on energy saving technology of downstream continuous grain drier. Modern agriculture, 2009(4): 42-42. (in Chinese))
- [11] Akgun N A, Doymaz I. Modelling of olive cake thin layer drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(4): 455-461.
- [12] Akpinar E K, Bicer Y, Yildiz C. Thin layer drying of red pepper[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(1): 99-104.
- [13] Taheri Garavand A, Rafiee S, Keyhani A. Study on effective moisture diffusivity, activation energy and mathematical modeling of thin layer drying kinetics of bell pepper[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(2): 128-131.
- [14] 吴亚娟. 城市生活垃圾典型组分水分分布特性及干燥过程试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (WU Ya juan. Study on the moisture distribution and drying process of MSW components[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))