

疏浚底泥微波干燥特性及能耗分析

韩久春¹, 方申柱², 王文江¹, 吕小凤¹, 吴燕¹

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

摘要: 分别在 462 W、595 W、700 W 微波功率下, 对不同含水率的疏浚底泥进行微波干燥试验, 微波干燥过程经历了加速干燥、恒温干燥和降速干燥阶段, 试验结果表明底泥的干燥速率、含水率及温度变化符合典型干燥特征曲线。通过分析不同因素对疏浚底泥微波干燥特性的影响, 发现含水率下降曲线受底泥初始含水率的影响不大, 低功率 (462 W) 下含水率下降趋于平缓, 高功率 (595 W、700 W) 下含水率急剧下降; 含水率和微波功率对底泥温度的影响主要体现在恒温 and 继续升温阶段, 对预热升温阶段影响较小; 相同干燥条件下, 底泥温度的最大值与功率大小成正比, 与含水率成反比例关系; 与红外干燥相比, 微波干燥大幅度地减少了干燥时间。单位能耗分析表明, 合适的微波功率可减少能耗约 9% ~ 26%。

关键词: 疏浚底泥; 微波干燥; 干燥速率; 含水率; 单位能耗

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0493-04

Microwave drying characteristics and energy consumption analysis of dredged sediment

HAN Jiur chun¹, FANG Sheir zhu², WANG Wen jiang¹, LYU Xiao feng¹, WU Yan¹

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

Abstract: The microwave drying experiments were performed on the dredged sediments with different moisture contents under the microwave output powers of 462, 595, and 700 W respectively. The microwave drying process included increased speed drying, constant speed drying, and reduced speed drying process. The results showed that the drying speed, moisture content, and temperature variation of dredged sediment agree with the typical drying characteristics curve. Effects of different factors on the microwave drying characteristics were discussed and unit energy consumption (UEC) was calculated. The initial moisture content of sediment had little influence on the variation of moisture content, which decreased gently at a lower output power of 462 W and decreased sharply at higher output powers of 595 W and 700 W. The effects of moisture content and microwave power on the sediment temperature were more obvious during the constant speed and reduced speed periods while not obvious during the increased speed period. Under the same drying condition, the maximum temperature of sediment was proportional to the microwave power whereas inversely proportional to the moisture content. Compared with infrared drying, microwave drying reduced the drying time significantly. Proper microwave power can reduce UEC by 9% to 26%.

Key words: dredged sediment; microwave drying; drying rate; moisture content; unit energy consumption

我国地域辽阔, 河湖众多, 每年通过环保疏浚工程产生的底泥量相当可观, 例如“十一五”期间, 我国重点流域的清淤量约为 26 亿 m³, 成为世界疏浚大国^[1-3]。底泥由极细的黏土胶状物质组成, 其黏土颗粒及其聚集体具有较强的吸水性质, 使得底泥中存在大量的结合水, 加上高孔隙比 (一般大于 1.0) 的特征导致孔隙中存在大量的自由水, 故而疏浚底泥

的含水率很高。不同地区的疏浚底泥性质各不相同, 为底泥的堆放、运输和处置带来极大的困难^[4-5]。

微波干燥技术凭借其表现出的加热具有选择性和均匀性、高效节能、安全环保以及易于控制等技术优势, 已在轻工业、生物化工、食品工业和环境治理等多个方面得到广泛应用^[6-9]。20 世纪 90 年代初, 国内外学者对微波干燥技术处理

收稿日期: 2014-09-01 修回日期: 2015-04-28 网络出版时间: 2015-05-13
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1558.026.html>
基金项目: 2013 年安徽省住房城乡建设科学技术计划项目 (2013YF-34)
作者简介: 韩久春 (1988-), 安徽人, 主要从事疏浚底泥资源化利用方面研究。E-mail: yyhjc20@163.com
通讯作者: 吴燕 (1976-), 湖南岳阳人, 副教授, 主要从事污染控制化学方面研究。E-mail: wuyan@tust.edu.cn

污泥进行了广泛的研究。有研究表明^[8,10-13],合理地选择微波功率、干燥时间以及污泥处理量,既能达到干燥的目的,还能降低能耗和处理成本。我国微波干燥技术与国外相比起步较晚,还处于试验研究阶段,对疏浚底泥的微波干燥过程中能效研究报道也较少。

为探讨不同因素对疏浚底泥微波干燥过程的影响,以滇池疏浚底泥为试样进行了试验,并对干燥过程中单位能耗进行了计算。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

以云南滇池经机械脱水后的疏浚底泥作为试验材料,底泥基本性质见表 1。

表 1 实验材料基本性质

Tab. 1 Basic properties of experimental materials

指标名称	初始含水率 (%)	容重 $/(g \cdot cm^{-3})$	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	pH	含盐量 (%)	有机质 (%)	孔隙率 (%)	中值粒径 $/\mu m$
指标值	44.56	0.939	2.8	5.8~6.2	0.24	7.26	66.46	5.52

采用的微波炉为格兰仕 P70D20TP C6(WO),腔体尺寸 210 mm × 315 mm × 314 mm,内腔容积为 20 L,微波输出功率分档可调,额定输出频率为 2 450 MHz;探针温度计为精创仪器仪表厂和 TM-902C 型;电子天平为天津市天马仪器厂的 TD 21001 型,精度 0.01 g。

1.2 试验方法

用含水率为 44.56% 的原泥,配制含水率分别为 50%、60%、70% 的底泥样品。将若干烧杯称重后,把各含水率的底泥均匀铺在烧杯中,并标号,记录烧杯和底泥的总重。将样品依次放入已调至中火(中高火或高火)的微波炉中进行干燥,每隔 1 min 测定一次样品质量和温度,直至烧杯与底泥的质量恒定(前后称量质量相差 0.01 g),试验结束。根据试验数据绘制干燥特性曲线。

1.3 数据处理方法

1.3.1 含水率的计算

含水率以的计算公式如下:

$$MC = \frac{m_t - m_d}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:MC 为底泥含水率(g/g); m_t 为干燥过程中 t 时刻湿泥的质量(g); m_d 为干泥的质量(g); m_0 为初始时湿泥的质量(g)。

1.3.2 干燥速率

疏浚底泥的失水效果用其干燥速度 DR 来表示,其计算公式为

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{A \Delta t} \quad (2)$$

式中:DR 为干燥过程中 $t + \Delta t$ 时刻的干燥速率($kg/(m^2 \cdot s)$); $M_{t+\Delta t}$ 为干燥过程中 $t + \Delta t$ 时刻疏浚底泥的含水率(g/g); M_t 为干燥过程 t 时刻疏浚底泥的含水率(g/g); A 为干燥过程中疏浚底泥的表面积(m^2); Δt 为前后两次测量的时间差(s)。

1.3.3 单位能耗

每干燥一个单位质量水分所消耗的能量称为干燥单位能耗,其是评定干燥工艺优劣性的一个重要指标。疏浚底泥干燥过程的能效评价可用单位能量消耗 UEC (Unit energy consumption, 单位: MJ/kg) 来表示,计算公式^[9]如下:

$$UEC = \frac{t_{on} \times P \times 3.6 \times 10^6}{M_i \times (m_i - m_f)} \quad (3)$$

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

2 结果与讨论

2.1 不同含水率对微波干燥特性的影响

含水率分别为 50%、60%、70% 的疏浚底泥,在微波功率为中火(462 W)情况下的干燥特征曲线见图 1 和图 2。

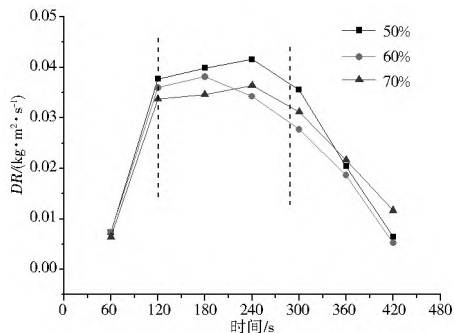


图 1 不同含水率(50%、60%和70%)底泥的干燥速率变化(中火)

Fig. 1 Variation of drying speeds of sediments with different moisture contents(50%, 60%, and 70%) at a microwave power of 462 W

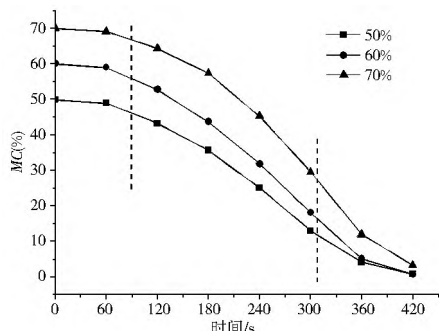


图 2 不同含水率(50%、60%和70%)底泥的含水率变化(中火)

Fig. 2 Variation of moisture contents of sediments with different moisture contents(50%, 60%, and 70%) at a microwave power of 462 W

由图 1 和图 2 可知,微波干燥速率曲线和含水率变化曲线符合典型的干燥特性曲线。微波干燥过程可分为三个阶段:加速干燥、恒速干燥和降速干燥阶段,各阶段特征如下。

(1) 微波干燥初始阶段,底泥含水率大,当微波穿透底泥时,因水分介电常数大而优先吸收微波能,温度上升很快,故干燥速率显著增加。

(2) 当接近沸腾时,底泥内部压强瞬间增大,形成径向的压力梯度,此阶段干燥速率较高并在小范围内波动,即恒速干燥阶段。

(3) 随着水分的蒸发,含水量(自由水)减少,向外的驱动力逐渐消失,干燥速率亦逐渐减小。

从各干燥阶段所占时间来看,较高干燥速率的恒速干燥阶段约占全部干燥时间的一半,对干燥效果的贡献很大。对于含水率分别为 50%、60% 和 70% 的疏浚底泥,随时间的推移,含水率逐渐减小,含水率变化趋势和曲线的斜率变化均相差不大,说明含水率在一定范围内对微波干燥过程除去水分的影响效果不明显。

2.2 不同微波功率对干燥特性的影响

对含水率 50% 的底泥在不同微波功率下进行干燥试验,考察微波功率对其干燥特性的影响,干燥速率和含水率的变化曲线见图 3、图 4。

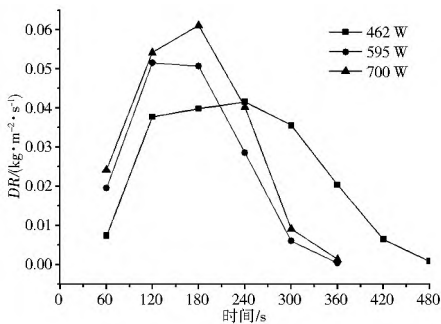


图 3 含水率 50% 的底泥在不同微波功率下的干燥速率

Fig. 3 Variation of drying speeds of sediments with the moisture content of 50% under different microwave powers

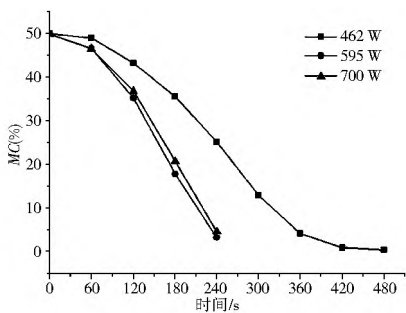


图 4 含水率 50% 的底泥在不同功率下的含水率变化

Fig. 4 Variation of moisture contents of sediments with the moisture content of 50% under different microwave powers

由图 3 和图 4 可知,特定含水率的底泥,干燥速率曲线和含水率曲线同样符合典型的干燥特征曲线。从图 3 可看出,微波功率越大,恒速干燥阶段越不明显;微波功率越小,降速阶段的干燥速率下降越平缓。从图 4 可看出,在低功率(462 W)下含水率变化趋于平缓,而在 595 W、700 W 下,含水率急剧下降。由于降速干燥阶段的底泥含水率低,微波能一部分用于水分蒸发,一部分用于加热固体物质。对特定含水率的底泥,微波功率越大,达到相同含水率所需要的干燥时间越长。通过观察底泥形态可知,底泥微波干燥后的体积大幅度减小(图 5),且底泥内部出现孔状,表面有裂痕,对工程上后续处理是有利的。

2.3 含水率与温度对底泥干燥温度的影响

为了考察含水率和微波功率对微波干燥过程中温度的影响,在特定微波功率和干燥时间下,对不同含水率(50%、60%

和 70%) 的疏浚底泥进行干燥试验,温度变化见图 6、图 7。

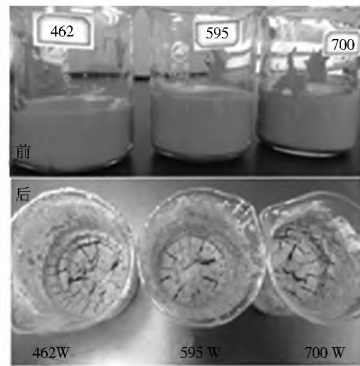


图 5 疏浚底泥微波干燥前后体积变化

Fig. 5 Volume change of sediment before and after microwave drying

由图 6、图 7 可知,微波干燥过程中,底泥温度变化经历了明显的三个阶段。

(1) 预热升温阶段。在干燥开始的 60 s 内,升温速度达到 1.6 °C/s,由初始温度 18 °C 快速升温到 95 °C 左右,升温速率受含水率和微波功率的影响不明显。底泥表面逐渐出现小气泡,并伴有小范围的喷射现象,说明水蒸气形成的速率比水分迁移速率大,这是由底泥内部剧烈的汽化作用造成的。在微波电磁场的作用下,极性分子(自由水)不断改变极性取向,使分子不停地振动,摩擦生热,因此底泥温度升高。

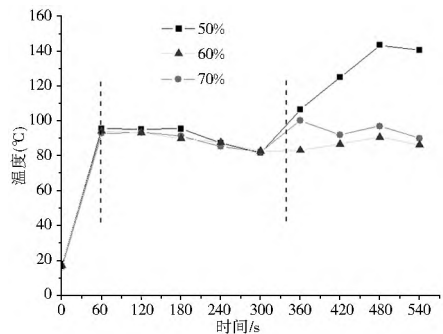


图 6 不同含水率底泥的温度的变化

Fig. 6 Variation of temperature of sediments with different moisture contents at a microwave power of 462 W

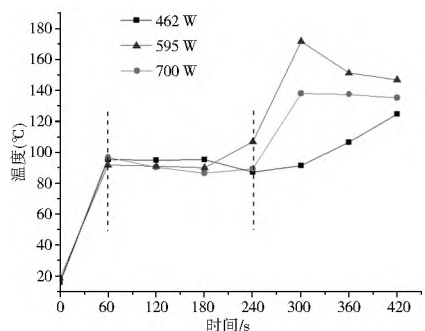


图 7 含水率 50% 的底泥在不同功率下温度变化

Fig. 7 Variation of temperature of sediments with the moisture content of 50% under different microwave powers

(2) 恒温阶段。当接近沸腾时,水汽由内向外排出,表面温度因水分蒸发吸热而比内部温度低,周围环境也不会出现高温的现象,因此底泥温度维持在一个恒定的范围内,持续大约 240 s,温度变化趋势开始出现改变。

(3) 继续升温阶段。240 s 后,底泥温度进入继续升温阶段,温度曲线明显分散,升温速度也各不相同,说明恒温和继续升温阶段底泥温度受含水率和微波功率的影响很大。在此阶段,相同微波功率下,含水率越大,底泥温度的最大值越小(含水率 50%、60%、70%的底泥温度最大值分别为约 140 ℃、90 ℃和 86 ℃);对于相同含水率的底泥,微波功率越大,底泥温度的最大值越大,达到同样温度数值的时间越短。对于特定含水率的底泥(50%),微波功率越大,底泥吸收的微波能越大,温度升得越高。

2.4 不同干燥方式对含水率的影响

分别采用微波干燥和红外干燥对含水率为 50% 的疏浚底泥进行试验,图 8 为含水率变化曲线。不难发现,微波干燥所需干燥时间远小于红外干燥,当底泥几乎完全干燥(≤ 5.0%)时,微波干燥时间约是红外干燥的 1/12。

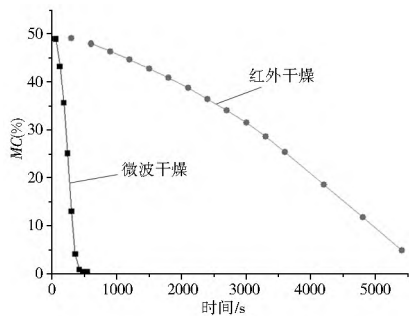


图 8 不同干燥方式下底泥含水率变化曲线

Fig. 8 Variation curves of moisture content of sediments under different drying methods

2.5 单位能耗分析

不同含水率底泥在不同微波功率下干燥至一定含水率(0~8%)所需干燥时间、干燥前的质量以及初终含水率见表 2。根据公式(3),单位能量消耗的计算结果见图 9。

表 2 单位能耗计算试验参数

Tab. 2 Experimental parameters of UEC calculation

MC (%)	功率 /W	干燥前质量 /10 ³ kg	初始含水率 (%)	最终含水率 (%)	干燥时间 /s
50	462	88.1	49.9	0.45	480
	595	71.9	49.9	3.20	240
60	700	87.3	49.9	4.60	240
	462	64.6	60.1	0.80	420
70	595	63.5	60.0	0.77	420
	700	63.3	60.0	2.70	240
70	462	58.6	70.0	3.35	420
	595	49.0	70.0	1.30	300
	700	59.3	70.0	3.90	300

由图 9 可知,特定微波功率下,随着含水率的增大,单位能耗有增大的趋势:462 W 时,含水率 70% 的底泥单位能耗比含水率 50% 的底泥高出 2.8%;595 W 时,高出 24.7%;700 W 时,高出 26.2%。另一方面,对于高含水率(70%)的底泥来说,不同的微波功率对单位能耗的影响并不明显,而对于含水率 50% 和 60% 的底泥,其在最大功率比最小功率时的单位能耗下降了 16.7% 和 8.7%。由此可知,微波干燥

疏浚底泥需要综合考虑含水率和微波功率,从降低能耗和减少时间来看,对含水率 50% 和 60% 的底泥,可选择高功率(700 W);对高含水率的底泥,可选择低功率(462 W)。

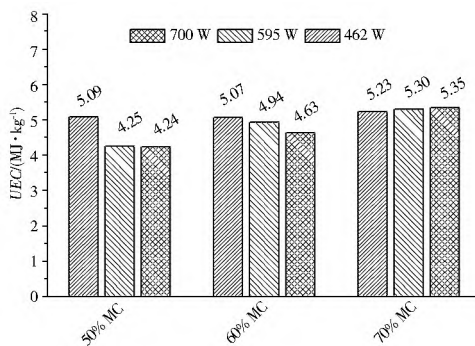


图 9 不同含水率在不同微波功率下的单位能耗

Fig. 9 Unit energy consumptions (UEC) of sediments with different moisture contents under different microwave powers

3 结论

(1) 疏浚底泥的微波干燥过程可分为三个阶段:加速干燥、恒速干燥和降速干燥阶段,各阶段特征明显。

(2) 微波干燥过程中底泥温度经历了预热升温、恒温 and 继续升温阶段,含水率和微波功率对恒温和继续升温阶段底泥温度的影响很大,对预热升温阶段影响却不明显。相同干燥条件下,底泥温度的最大值与功率大小成正比,与含水率成反比例关系。

(3) 与红外干燥相比,微波干燥可大幅度缩短干燥时间。

(4) 利用微波干燥疏浚底泥,选择合适的微波功率,可减少能耗 9%~26% 左右。

参考文献(References):

[1] 田俊峰,吴兴元,侯晓明,等.我国疏浚技术与装备“十五”“十一五”十年发展回顾[J].水运工程,2010,12:93-97. (TIAN Junfeng, WU Xingyuan, HOU Xiaoming, et al. Dredging technique and equipment in our country "10th five year plan" "11th five year plan" ten years development reviews[J]. Port & Waterway Engineering, 2010, 12: 93-97. (in Chinese))

[2] 汪顺才,张春雷,黄英豪,等.堆场疏浚淤泥含水率分布规律调查研究[J].岩土力学,2010,31(9):2823-2828. (WANG Shuncai, ZHANG Chunlei, HUANG Yinghao, et al. Study of diversification of water contents in dredged sediment storage yard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2823-2828. (in Chinese))

[3] 浩婷,周颜,田宇,等.改性 EPS 颗粒在疏浚淤泥混合轻质土中的应用[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):143-146. (HAO Ting, ZHOU Yan, TIAN Yu, et al. Application of modified EPS particles in lightweight soil mixed with dredged sludge[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 143-146. (in Chinese))

[4] 刘禹杨,吴燕,胡保安,等.疏浚底泥掺外加剂真空预压脱水技术研究[J].水利水运工程学报,2013(3):78-82. (LIU Yuyang, WU Yan, HU Baoran, et al. Research on dehydration technology of dredged sludge by admixture and vacuum preloading[J]. Hydro Science and Engineering, 2013(3): 78-82. (in Chinese))

(下转第 517 页)

- 验证[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 16-20. (FAN Hong gang, CHEN Naixiang, YANG Lin, et al. Numerical simulation and experimental verification of transient mixed free surface pressure flow [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(6): 16-20. (in Chinese))
- [7] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (GENG Yan fen. A coupled hydraulic numerical models on the urban rain flood [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [8] 张成, 傅旭东, 王光谦. 复杂内边界长距离输水明渠的一维非恒定流数学模型[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(6): 16-20 (ZHANG Cheng, FU Xudong, WANG Guangqian. One dimensional numerical model for unsteady flows in long route open channel with complex inner boundary conditions [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(6): 16-20. (in Chinese))
- [9] 李大鸣, 林毅, 刘雄, 等. 具有闸、堰的一维河网非恒定流数学模型及其在多闸联合调度中的应用[J]. 水利水电技术, 2010, 41(9): 47-51. (LI Daming, LIN Yi, LIU Xiong, et al. Numerical model of one dimensional unsteady flow for river networks with sluices and weirs and its application to combined regulation of multi sluices [J]. Engineering Mechanics, 2010, 41(9): 47-51. (in Chinese))
- [10] 李强. 长距离输水系统明满流及水力控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2006 (LI Qiang. Study on free surface pressurized flow and water level modulation hydraulic control in the long distance water diversion system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese))
- [11] 徐文卓. 长距离输水系统明满流及水位调节时的水力控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2007 (XU Wen zhuo. Study on free surface pressurized flow and water level modulation hydraulic control in the long distance water diversion system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [12] 王常红. 长距离输水隧洞水力特性数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2008 (WANG Chang hong. Numerical simulation study on hydrolic characteristics in long distance water diversion tunnels [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [13] 赵丹祿. 雨水管网水动力模拟及城市暴雨积水分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012 (ZHAO Dan lu. Storm sewer network hydrodynamic simulation and urban storm waterlogging analysis [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] 刘进, 王东黎, 杨进新. 南水北调中线 PCCP 管道的摩阻损失计算分析[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 6(1): 231-234. (LIU Jin, WANG Dongli, YANG Jinxin. Friction loss for the PCCP pipe of the South to North Water Transfer (Middle Route) Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 6(1): 231-234. (in Chinese))
- [15] 清华大学水力学教研组编. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995. Hydraulic teaching and research group. Hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1995. (in Chinese)

(上接第 496 页)

- [5] 张铮, 吴燕, 胡保安, 等. 堆场疏浚淤泥沉降规律计算[J]. 南水北调与水利科技, 2013(2): 142-146. (ZHANG Zheng, WU Yan, HU Baolan, et al. Research on Settlement Regularity of Dredged Sludge. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(2): 142-146. (in Chinese))
- [6] 王永周, 陈美, 邓维用. 我国微波干燥技术应用研究进展[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(5): 219-224. (WANG Yongzhou, CHEN Mei, DENG Weiyong. Research and development of the application of microwave drying technology at Home [J]. Drying Technology & Equipment, 2008, 6(5): 219-224. (in Chinese))
- [7] Chandrasekaran S, Basak T, Srinivasan R. Microwave heating characteristics of graphite based powder mixtures. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 48: 22-27.
- [8] Dai Q, Jiang X, Wang F, et al. PCDD/Fs in wet sewage sludge pyrolysis using conventional and microwave heating [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 104: 280-286.
- [9] Soysal Y, Öztekin S, Eren Ö. Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(4): 403-413.
- [10] Idris A, Khalid K, Omar W. Drying of silica sludge using microwave heating [J]. Applied thermal engineering, 2004, 24(5): 905-918.
- [11] 吴龙, 吴中华, 李吕勇, 等. 城市污泥热风与微波干化特性研究[J]. 干燥技术与设备, 2012(5): 259-267. (WU Long, WU Zhonghua, LI Lv yong, et al. Study on drying characteristics of sewage sludge using hot air and microwave [J]. Drying Technology & Equipment, 2012(5): 259-267. (in Chinese))
- [12] Menendez J A, Inguanzo M, Pis J J. Microwave induced pyrolysis of sewage sludge [J]. Water research, 2002, 36(13): 3261-3264.
- [13] 周健, 李志刚, 杨士伟, 等. 微波功率、辐射时间及污泥量对污泥微波干燥效能的综合影响研究[J]. 环境工程学报, 2010(10): 2378-2380. (ZHOU Jian, LI Zhigang, YANG Shiwei, et al. Study on comprehensive influence of microwave power, radiating time and sludge mass on microwave drying efficiency of sludge [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010(10): 2378-2380. (in Chinese))