

文章编号: 1000-582X(2013)01-127-06

城镇生活垃圾与污水厂污泥一体化处理反应器开发

吴正松^{1,3}, 智悦¹, 何强¹, 唐世田², 凌建军³, 潘明霞³

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆三峡环保(集团)有限公司, 重庆 401147; 3. 凌志环保股份有限公司, 江苏 宜兴 214200)

摘要: 针对国内城镇生活垃圾与污水厂污泥处理存在的问题, 在污泥浓缩消化理念的基础上, 开发了城镇生活垃圾与污水厂污泥一体化处理反应器。反应器由垃圾仓和污泥仓 2 个部分组成, 垃圾仓采用好氧堆肥、污泥仓采用厌氧消化的方式进行, 实现了垃圾和污泥在同一个反应器中处理的目标。在垃圾好氧堆肥所产生的热量维持污泥仓 32~36 °C 条件下, 反应器运行的效果为: 处理污泥 20 L/d, 垃圾 15 kg/d, 进泥含水率为 97.2%~99.8%, VS/TS 为 0.45~0.69 时, 排泥含水率为 92.7%~96.1%, VS/TS 为 0.28~0.42; 垃圾仓进料含水率为 73.5%, VS/TS 为 0.65~0.88 时, 垃圾出料含水率为 48.6%, VS/TS 为 0.32~0.44。试验结果表明: 城镇生活垃圾与污水厂污泥一体化处理反应器作为污泥和垃圾处理设备, 对污泥和垃圾的减量及稳定效果良好。

关键词: 污泥; 生活垃圾; 一体化处理; 反应器

中图分类号: X705

文献标志码: A

Development of integrated reactors for domestic garbage and town sludge

WU Zhengsong¹, ZHI Yue¹, HE Qiang¹, TANG Shitian², LING Jianjun³, PAN Mingxia³

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Sanxia Environmental Groups, Chongqing 401147, China;

3. Lingzhi Environmental Protection Co. Ltd., Yixing, Jiangsu 214200, China)

Abstract: Aiming at domestic garbage aerobic compost and town sludge anaerobic treatment, on the basis of reactor TISTD (the integrated of sludge thickening and digestion) which is developed by the authors' team, a TIDGTS (the integrated of domestic garbage and town sludge) reactor is designed. The reactor is made up of garbage and sludge chambers. Aerobic compost is adopted in the garbage chamber, while anaerobic fermentation is used in the sludge chamber, thus garbage and sludge can be treated in the same reactor. 32~36 °C of sludge digestion can be ensured by the heat from sludge digestion, and 20 L sludge and 15 kg garbage can be treated per day. While inlet sludge moisture content is 97.2%~99.8% and VS/TS is 0.45~0.69, the discharged sludge moisture content is 92.7%~96.1% and VS/TS is 0.28~0.42. When the inlet garbage moisture content is 73.5% and VS/TS is 0.65~0.88, the discharged garbage moisture content is 48.6% and VS/TS is 0.32~0.44. The results show that the efficiency of concentration and digestion is near to TISTD which is heated by heating wire.

Key words: sludge; domestic garbage; integrated treatment; reactor

收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC2011AB7074); 重庆大学研究生科技基金(CDJXS11210008)

作者简介: 吴正松(1974-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为污泥和城市生活垃圾处理与处置, (E-mail)zhswu2006@cqu.edu.cn。

随着国内污水厂污水处理总量及处理深度的不断增加,污泥的产量也随之增长^[1],据统计,2009年,全国投运城镇污水厂产生含水率为80%左右的污泥2 005万t^[2]。城市污水厂污泥不仅含水率高,体积大,易腐败,有恶臭^[3-4],还含有病原微生物、多种有机和无机污染物及重金属^[5-6]。同样,城市生活垃圾量的增长也十分迅速,全世界垃圾年均增长速度为8.42%,而中国垃圾增长率达到10%以上,全世界每年产生垃圾4.9亿t,仅中国每年就产生近1.5亿t^[7]。作为城市生活垃圾的主要组成部分,餐厨垃圾在城市垃圾中所占比例分别为北京37%、天津54%、上海59%、广州57%、济南41%^[8]。由于其含水率和有机物含量较高,极易在较短时间内腐烂发臭和滋生蚊蝇等^[9]。因此,对污泥和餐厨垃圾的处理刻不容缓。目前,发达国家对污泥和生活垃圾的无害化、减量化和资源化都有明确的规定^[10-11],很多学者对污泥消化和生活垃圾的堆肥进行了深入的研究:Erden等研究了臭氧与超声波对污泥生物消化的影响^[12],Tokumura等利用光-Fenton法对污泥消化效果进行了试验研究^[13],Rathod等将用 γ 射线处理过的污泥作为农业肥料并分析了其养分、微量元素、重金属等对农作物的影响^[14];Jolanun等用新型粘土颗粒作为餐厨垃圾堆肥填充剂^[15],Karnchanawong等研究了不同通风方式对家庭有机垃圾在垃圾桶中堆肥的影响^[16]。但关于污泥与垃圾一体化处理设备的开发与研究在国内外尚未见报道。笔者在本课题组研究开发的污泥浓缩消化一体化反应器的基础上,结合生活垃圾厌氧/好氧堆肥原理开发了污水处理厂污泥和生活垃圾一体化处理反应器,现对该反应器的开发思路、构造、运行原理及试验运行结果进行分析,为今后该反应器的实际应用提供理论依据。

1 反应器的设计

1.1 设计要点

在污泥浓缩消化一体化反应器 ICSTD^[17]、MISTD^[18]、TISTD^[19]等的基础上,结合垃圾厌氧/好氧堆肥处理原理进行设计。反应器的设计主要考虑:1)污泥浓缩消化和垃圾堆肥之间的热能传递;2)增加污泥消化过程中搅拌所需的气体量;3)污泥相分离的重要性;4)污泥仓有良好的水力条件;5)垃圾仓进出料及内部操作优化设计;6)结构简单。

1.2 设计负荷及实验工况

本试验规模为小试,设计负荷、实验工况也根据小试的要求来确定。

1.3 反应器各部尺寸

利用已初步确定好的反应器型式和设计负荷、实验工况,设计出反应各部分的尺寸。污泥仓尺寸参考 TISTD 反应器,设计投配率为30%,垃圾仓与污泥仓的体积设计是按照城镇垃圾实际产生量与同等规模城镇污水厂的污泥产生量的比例来确定,设计比例为1:1。

1.4 反应器的优化

利用商用 CFD 软件 FLUENT 对 TISTD 反应器即一体化反应器内的污泥浓缩消化仓的流场进行了模拟,确定了进泥管的位置以及气管出口高度和尺寸等。通过试验并根据垃圾与污泥的热量平衡方程确定了垃圾仓与污泥仓的容积比为5:1。反应器具体的构造参数见表1。

表 1 TIDGTS 反应器的构造参数

项目	功能分区						
	总体	垃圾外仓	污泥仓				
			外反应室	内反应室	污泥压缩区	沉淀出水区	集气室
有效容积/L	710	600	56	25	6	20	3
过水面积/m ²	0.10		0.07	0.03	0.03	0.09	
功能	垃圾堆肥和污泥浓缩与消化	垃圾好氧堆肥	污泥浓缩与酸化	污泥浓缩与消化	污泥浓缩	上清液澄清排水	集气

2 反应器的构造及运行原理

2.1 TIDGTS 反应器的构造

TIDGTS 反应器由污泥仓和垃圾仓 2 部分组成,污泥仓由外反应室、内反应室、沉淀出水区、污泥压缩区以及集气室 5 部分组成。外反应室与内反应室下部通过过水孔相连接,上部连接处是一三相分离器。垃圾仓则围绕于外反应室外,两个处理仓互不相通。垃圾仓的上方设置垃圾进料口,下方设置垃圾出料口,在垃圾仓内设有曝气管,曝气管从垃圾仓上方一直延伸到垃圾仓下方,曝气管上均匀设置通气孔。反应器构造示意图如图 1 所示。

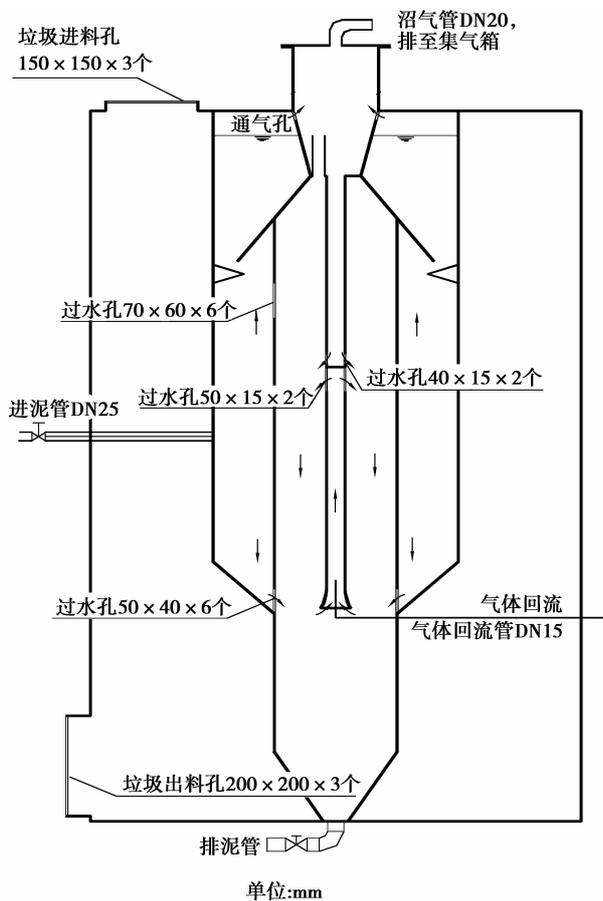


图 1 TIDGTS 反应器构造示意图

2.2 TIDGTS 反应器的运行原理

利用人工或泵吸的方式将剩余污泥送入高位配泥箱,污泥采用间歇方式依靠重力作用由外反应室底部进入,在外反应室完成初步浓缩和水解酸化反应,上清液排出反应器,底部浓度较高的污泥由于重力沉降及液位压差作用进入内反应室,在此进

入由于内循环形成的污泥床,与其中大量的厌氧微生物充分接触反应,可降解的有机物大部分被转化为沼气。外反应室产生的少量气体经三相反应器进入集气室,在此处与内反应室的气体合流后通过沼气管进入洗气瓶,经洗气后进入集气室,并通过集气室内的循环泵和气体回流管抽至污泥内反应室的内循环管。内循环管被分成上下两部分,在分割处都留有通气孔,在回流沼气的带动下,内循环管下部首先实现了循环;然后回流的沼气与内反应室产生的沼气一起上升,同时把内反应室中上部的混合液经上升管提升至三相分离器,被分离的沼气进入集气室排走,分离出来的泥水混合液将沿着内循环管回到内反应室中部,从而在内反应室中上部又实现了一个循环。在这 2 个循环的作用下,使内反应室厌氧污泥处于“流化状态”,从而保证了基质与微生物之间的充分接触。沉降性能好的污泥被内循环淘汰进入污泥压缩区,沉降性能差的污泥继续进入内循环。

在垃圾仓内填塞一定数量的垃圾,垃圾在垃圾仓内发酵产热产气,一部分热量通过外反应室的边壁传至污泥仓供污泥消化,而另外一部分热量则用于保持垃圾仓内的温度;通过鼓风机和曝气管向垃圾仓供给空气,以保持垃圾好氧堆肥条件,产生的废气由废气管收集后作进一步处理。

3 TIDGTS 反应器运行试验

3.1 运行试验条件

试验用污泥取自重庆市某污水处理厂,在实验室自制的 SBR 中培养;垃圾取自某大学校园,以厨余垃圾为主。试验进泥的 pH 为 6.35~7.98,含水率为 97.2%~99.8%,VS/TS 为 0.45~0.69;试验垃圾容重为 0.62 t/m³,含水率为 73.5%,VS/TS 为 0.65~0.88。

污泥启动采用厌氧污泥接种的方式,厌氧污泥取自同一实验室的污泥厌氧反应器,第一天加入 50 L 厌氧污泥,之后每天加入 15 L 新鲜污泥继续培养驯化,4 d 后加至设计液面,此时反应器运行稳定,污泥驯化基本完成。在 20 L/d 的污泥日处理量下进行处理效能实验,其对应投配率为 18.2%,考察 TIDGTS 反应器的处理效能。运行试验流程如图 2 所示。

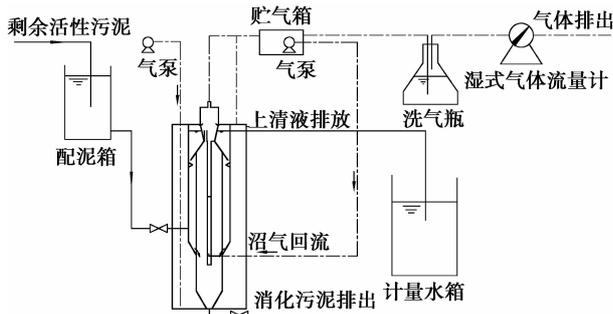


图 2 运行试验流程图

3.2 试验结果与讨论

3.2.1 温度

温度能直接影响垃圾和污泥的反应进程,是反应器开发是否成功的关键因素之一。反应器各部分的温度变化如图 3 所示。

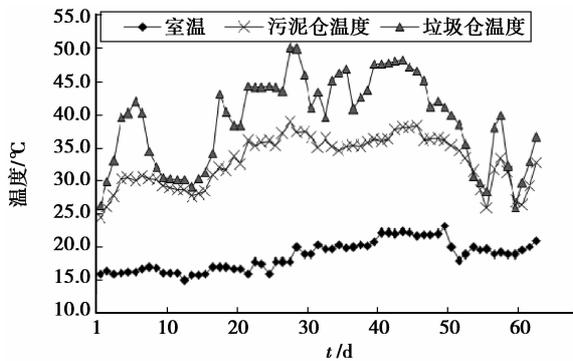


图 3 温度的变化曲线

从图 3 可知,在垃圾仓启动前期,其温度变化比较剧烈,升温快,降温也快,不利于污泥仓甲烷菌的生长。在试验中后期通过控制通风量和新鲜垃圾添加量来控制温度剧烈波动,以创造适宜甲烷菌生长的温度条件。试验结果表明,在垃圾发酵供热的条件下,污泥仓温度能在较长的时间内维持在 32~36 °C 之间,即能保证其中温消化所需的温度条件,说明依靠垃圾发酵产热供给污泥消化所需的温度条件是可行的。

3.2.2 含水率

含水率常常用来评价污泥浓缩效果。图 4 为反应器进泥含水率与排泥含水率的变化曲线。

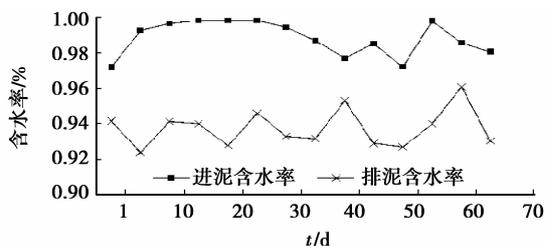


图 4 污泥含水率的变化曲线

由曲线变化趋势可以看出,进泥含水率比较高而且有一定幅度的波动,一般在 97.2%~99.8% 之间;而稳定运行后排泥含水率在 92.7%~96.1% 之间,低于普通浓缩池的 97%,说明 TIDGTS 的浓缩效果优于普通浓缩池。

水份含量直接影响垃圾堆肥发酵速度和腐熟程度,含水率过高(>70%)或过低(<20%)都不利于好氧堆肥的进行^[20],所以含水率是好氧堆肥化的关键因素之一。本次试验的好氧堆肥以厨余垃圾为主,从图 5 中可以看出,其起始含水率相对较高,达到 73.5%,在好氧发酵过程中,含水率逐渐下降,45 d 后降为 48.6%。可见反应器内含水率有利于垃圾好氧堆肥,同时垃圾减量效果明显。

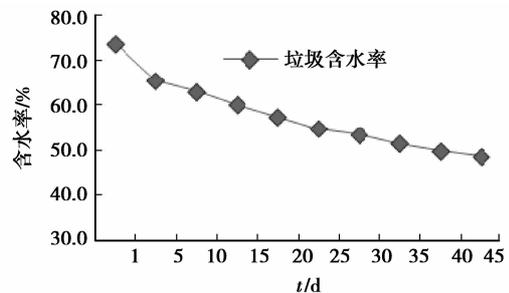


图 5 垃圾含水率的变化曲线

3.2.3 VS/TS 值

厌氧消化的最主要目的就是生物降解有机物,使得处理基质达到稳定状态^[21]。一般基质中用 VS 表示有机物含量^[22],TS 表示总固体量,通过测定 VS/TS 可以了解剩余污泥在反应器中的稳定化程度。由图 6 可以看出,进泥的 VS/TS 为 0.45~0.69,排泥的 VS/TS 为 0.28~0.42,有机物分解率达到 37% 以上,说明反应器具有较好的厌氧消化和稳定功能。

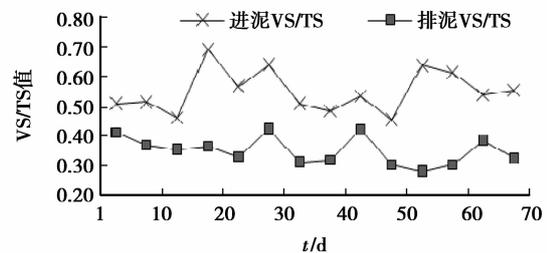


图 6 污泥 VS/TS 的变化曲线

在垃圾堆肥过程发生的各种生化反应中,有机质是微生物赖以生存和繁殖的基本条件,因此有机质的变化能在一定程度上反映堆肥的进程,一些学者通过研究堆肥过程中有机质的降解率来判断堆肥的腐熟度。试验发现,进料垃圾 VS/TS 为 0.65~0.88 时,

在反应器运行的第45天后,测得出料垃圾的VS/TS为0.32~0.45,说明垃圾好氧堆肥进行顺利。

3.2.4 pH值

pH值是影响厌氧消化过程的重要因素,是评价厌氧工艺稳定性的重要参数之一^[23-24],产甲烷菌的适宜pH在6.5~7.5之间。

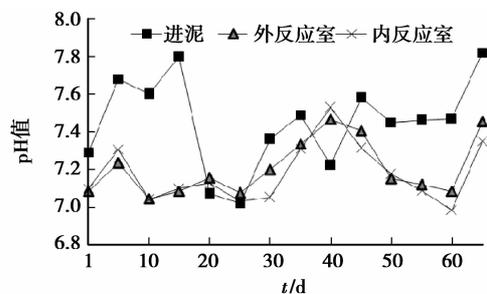


图7 污泥pH的变化曲线

由图7可知,虽然进泥pH在7.02~7.82之间波动,但内反应室pH保持在6.98~7.53、外反应室保持在7.04~7.47之间,基本在产甲烷菌的适宜pH范围之内,说明反应室有利于产甲烷菌的生存。

3.2.5 污泥比阻

一般认为,当污泥比阻值大于 $1.0 \times 10^9 \text{ s}^2/\text{g}$ 时,不易脱水;当污泥比阻值为 $(0.5 \sim 0.9) \times 10^9 \text{ s}^2/\text{g}$ 时,脱水性能一般;当污泥比阻值小于 $0.5 \times 10^9 \text{ s}^2/\text{g}$ 时,容易脱水^[25-26]。对进泥和排泥的比阻进行了测定,结果表明,排泥比阻与进泥的相比有所升高,但低于 $0.9 \times 10^9 \text{ s}^2/\text{g}$,可以进行机械脱水。

4 结论

1)通过借鉴课题组开发的ICSTD、MISTD和TISTD等3套污泥同时浓缩消化新型反应器,开发了城镇生活垃圾与污水厂污泥一体化处理反应器,实现了城镇生活垃圾与污水厂污泥的一体化处理目标。

2)TIDGTS反应器依靠垃圾发酵来维持污泥中温消化所需温度条件,进泥含水率97.2%~99.8%,VS/TS0.45~0.69时,排泥含水率92.7%~96.1%,VS/TS0.28~0.42;垃圾进料垃圾含水率为73.5%,VS/TS为0.65~0.88,垃圾出料含水率48.6%,VS/TS为0.32~0.45。运行效果良好。

3)TIDGTS反应器出泥含水率较低,处理流程简单,降低了污泥处理成本,同时该反应器集垃圾与污泥处理功能于一体,充分利用了垃圾发酵所产生的热量,降低了污泥处理能耗和基建投

资费用,便于运行管理,特别适用于中小城镇的污泥处理。

参考文献:

- [1] 刘云海,李秀金.利用生物反应器处理生活垃圾试验研究[J].环境工程,2009,27(S1):356-360.
LIU Wenhai, LI Xiujin. An experimental study on disposal of domestic refuse by bioreactors [J]. Environmental Engineering, 2009, 27(Sup1):356-360.
- [2] 王洪臣.污泥处理处置设施的规划建设与管理[J].中国给水排水,2010,26(14):1-6.
WANG Hongchen. Planning construction and management of sludge treatment and disposal facilities [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(14):1-6.
- [3] 胡锋平,朱自伟,李伟民,等.城市污水处理厂污泥浓缩工艺的应用与发展趋势[J].重庆建筑大学学报,2004,26(5):124-127.
HU Fengping, ZHU Ziwei, LI Weimin, et al. Application and trend of development of sludge thickening technology in municipal wastewater treatment plant [J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2004, 26(5):124-127.
- [4] 王永霞,樊建军,莫卫松.超声波技术在污泥处理中的应用[J].重庆建筑大学学报,2007,29(3):91-94.
WANG Yongxia, FAN Jianjun, MO Weisong. Application of ultrasound technique in sludge treatment [J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2007, 29(3):91-94.
- [5] 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.
- [6] Hong J L, Hong J M, Otaki M, et al. Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan [J]. Waste Management, 2009, 29(2):696-703.
- [7] 付建丽,李炳俊.优化垃圾处理技术 加快环卫循环经济发展[J].环境卫生工程,2009,17(4):37-39.
FU Jianli, LI Bingjun. Optimizing waste treatment technology and accelerating development of environmental sanitation recycle economy of China [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2009, 17(4):37-39.
- [8] 薛祖源.国外若干城市垃圾的处理现状和动向[J].现代化工,2003,23(5):57-59.
XUE Zuyuan. Current situation and tendency of urban garbage disposal in some foreign cities [J]. Modern Chemical Industry, 2003, 23(5):57-59.
- [9] 王向会,李广魏,孟虹,等.国内外餐厨垃圾处理状况概述[J].环境卫生工程,2005,13(2):41-43.
WANG Xianghui, LI Guangwei, MENG Hong, et al.

- Discussion on treatment status of food residue [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2005, 13(2): 41-43.
- [10] Fytali D, Zabaniotou 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.
- [11] Levis J W, Barlaz M A, Themelis N J, et al. Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada [J]. *Waste Management*, 2010, 30(8/9):1486-1494.
- [12] Erden G, Demir O, Filibeli A. Disintegration of biological sludge: Effect of ozone oxidation and ultrasonic treatment on aerobic digestibility [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(21):8093-8098.
- [13] Tokumura M, Sekine M, Yoshinari M, et al. Photo-Fenton process for excess sludge disintegration [J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(4):627-633.
- [14] Rathod P H, Patel J C, Shah M R, et al. Recycling gamma irradiated sewage sludge as fertilizer: A case study using onion (*Allium cepa*) [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(2):223-233.
- [15] Jolanun B, Towprayoon S. Novel bulking agent from clay residue for food waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(12):4484-4490.
- [16] Karnchanawong S, Suriyanon N. Household organic waste composting using bins with different types of passive aeration [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(5):548-553.
- [17] 何强, 郑伟青, 刘鸿霞, 等. 污泥同时浓缩消化新型反应器的开发研究 [J]. *环境工程学报*, 2009, 11(3): 2077-2081.
HE Qiang, ZHENG Weiqing, LIU Hongxia, et al. Research on integrated reactors for sludge thickening and digestion [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 11(3):2077-2081.
- [18] 杜俊, 何强, 刘鸿霞, 等. ICSTD 反应器处理污泥的启动试验研究 [J]. *环境工程学报*, 2009, 8(3): 1429-1432.
DU Jun, HE Qiang, LIU Hongxia, et al. Study on startup experiment of sludge treatment by internal circulation thickening and digestion (ICSTD) reactor [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 8(3):1429-1432.
- [19] 刘鸿霞, 何强, 李进丰, 等. 改良型污泥浓缩消化反应器的试验研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(11): 63-65.
LIU Hongxia, HE Qiang, LI Jinfeng, et al. Experimental study on modified integrative sludge thickening and digestion reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(11):63-65.
- [20] 聂永丰. 三废处理工程技术手册. 固体废物卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [21] 付胜涛, 水利, 严晓. 剩余活性污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化 [J]. *环境科学*, 2006, 27(7):1459-1463.
FU Shengtao, SHUI Li, YAN Xiao. Co-digestion of waste activated sludge and kitchen garbage [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7):1459-1463.
- [22] Bouallagui H, Torrijos M, Godon J J, et al. Two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2004, 21(1):193-197.
- [23] Takashina M, Kudoh Y, Tabata N. Complete anaerobic digestion of activated sludge by combining membrane separation and alkaline heat post-treatment [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(5):477-481.
- [24] Zupančič G D, Roš M. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(14):2255-2267.
- [25] 施周, 谢敏. 混凝剂对水厂排泥水沉降及脱水性能的改善 [J]. *中国给水排水*, 2003, 19(12):40-42.
SHI Zhou, XIE Min. The improving effect of coagulant on the sedimentation and dehydration of sludge drainage water in water plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(12):40-42.
- [26] 吕斌, 杨开, 洪汉清. 东湖底泥的脱水性能试验研究 [J]. *中国给水排水*, 2003, 19(5):56-58.
LÜ Bin, YANG Kai, HONG Hanqing. Experimental study on the dehydration performance of the Donghu Lake sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(5):56-58.

(编辑 郑洁)