

# 辅料对比对污泥生物-物理联合干燥的影响

阳金龙, 杜琼, 李东, 韩融, 赵岩, 王洪涛\*

(清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:**利用自主研制的污泥生物-物理联合干燥反应系统研究了脱水污泥: 树皮: 回流污泥分别为 7: 3: 0.5、9: 3: 0.5 和 12: 3: 0.5 时, 污泥生物-物理联合干燥过程中温度、含水率等参数的变化规律. 结果表明, 污泥温度随干燥时间延长先增大后减小, 含水率在 0~96 h 逐渐降低, 继续延长反应时间, 则变化不明显. 当脱水污泥: 树皮: 回流污泥为 9: 3: 0.5 时, 污泥温度迅速升高, 在 48 h 达到 3 组辅料配比最大值 67℃, 并在 55℃ 以上保持 72 h, 而后迅速降低, 经过 168 h 处理后含水率从 74.1% 降低到 61.8%, 获得水分去除率最大值 43.5%. 辅料对比对生物-物理干燥过程具有重要影响, 通过向脱水污泥添加适宜配比的辅料, 能改善堆体渗透性, 有利于快速激发并维持微生物活性, 提高干燥过程污泥温度, 增强水分去除效果.

**关键词:**污泥; 微生物; 含水率; 回流污泥; 干燥

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)08-2365-06

## Influence of Accessories Mixing Ratio on Sludge Biophysical Co-Drying

YANG Jin-long, DU Qiong, LI Dong, HAN Rong, ZHAO Yan, WANG Hong-tao

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Parameters (temperature, water content and so on) in the process of sludge biophysical co-drying were studied in self-made biophysical co-drying reactor. The sludge: tree bark: recycled sludge was set as 7: 3: 0.5, 9: 3: 0.5, 12: 3: 0.5 respectively. The results suggested that sludge temperature first increased then decreased along with drying time, water content decreased in the first 96 h, then had no obvious variability. While sludge: tree bark: recycled sludge was 9: 3: 0.5, the temperature of sludge spiraling, received to max 67℃ at 48 h under three different accessories mixture ratio, and was kept for 72 h above 55℃, then spiraling, the final water content of sludge decreased from 74.1% to 61.8%, received the optimal water content removing rate 43.5%. Accessories mixing ratio had important influence on the process of sludge biophysical co-drying, sludge with proper mixing ratio can modify the structure of sludge, improve sludge permeability, arouse and keep microorganism activity, which will enhance sludge temperature and strengthen water content removal rate.

**Key words:** sludge; microorganism; water content; recycled sludge; drying

经机械脱水后, 污泥含水率仍高达 85% 以上, 且难以继续脱除, 导致其后续处理处置困难, 已成为环境领域一大难题<sup>[1]</sup>. 对污泥进行干燥预处理, 可显著提高其热值<sup>[2]</sup>, 使其具有较高资源化价值<sup>[3]</sup>. 传统干燥预处理技术中, 间壁热干燥和直接加热干燥存在着能耗高、热效率低、二次污染严重等问题<sup>[4]</sup>. 污泥生物-物理联合干燥以微生物分解污泥有机物产生的热量为动力, 并结合强制机械通风去除污泥水分, 干燥过程不需要添加额外的化石燃料, 能耗低<sup>[5,6]</sup>, 干燥后污泥含水率显著降低、热值提高<sup>[7]</sup>, 可根据干燥产物性质进行堆肥、填埋、焚烧发电等多途径后续处理处置, 具有较强经济技术可行性, 已受到国内外学者广泛关注<sup>[8~10]</sup>.

然而, 污泥生物-物理联合干燥技术发展时间较短, 对其研究主要集中在基质温度、通风量、通风方式等实验参数对干燥过程的影响<sup>[11~13]</sup>, 在上述实验参数相同的条件下, 堆体渗透性、压实性对干燥过程中污泥温度维持、微生物新陈代谢状态有重要

影响<sup>[14~17]</sup>, 是污泥生物-物理联合干燥的限制因素, 但鲜见报道.

本实验向脱水污泥添入辅料以调节其初始含水率和改善堆体渗透性<sup>[18]</sup>, 并利用自主研制的污泥生物-物理干燥反应系统研究了不同辅料配比污泥生物-物理联合干燥特性, 其内置的铰链和抄板, 能疏松堆体, 增大堆体孔隙度和增强污泥干燥均匀性, 本研究结果对于揭示污泥生物-物理联合干燥的影响因素及其机制具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料

经带式压滤后的脱水污泥取自昆山市城北区污

收稿日期: 2010-10-31; 修订日期: 2011-03-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07313-002)

作者简介: 阳金龙 (1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理处置及其资源化, E-mail: yjl08@mails.tsinghua.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: htwang@mail.tsinghua.edu.cn

水处理厂,现取现用,辅料购自上海丘山环保科技有限公司的樟松和落叶松树皮,脱水污泥及回流物料特征如表 1 所示.

表 1 实验原料成分特征

Table 1 Characteristics of experimental materials

原料	取样次数	含水率/%	VS/TS/%
脱水污泥	1	88.13	60.57
	2	88.65	59.55
	3	88.51	61.17
回流物料	1	12.49	91.74
	2	13.72	92.35
	3	11.65	92.74

1.2 生物-理联合干燥装置

自主研制的生物-物理联合干燥系统主要由空气泵、空气流量计、螺旋进料机、滚筒干燥反应器(直径 1 m,长 3 m)、可控伴加热电缆、温度控制器、排气口、取样口、电机组成,温度控制器将可控伴加热电缆恒定在某个设定温度值,对滚筒干燥反应器起到保温和预热作用,以加速反应器快速启动,电机带动筒体旋转,以翻转堆体或出料,其结构如图 1 所示.滚筒干燥反应器内部结构主要由布气系统、抄板及铰链组成,布气系统内的布气板和布气管上钻有 5 mm 微孔,以使反应器内空气分布均匀,抄板和铰链在筒体旋转过程中具有混合和疏松堆体作用,其结构如图 2 所示.

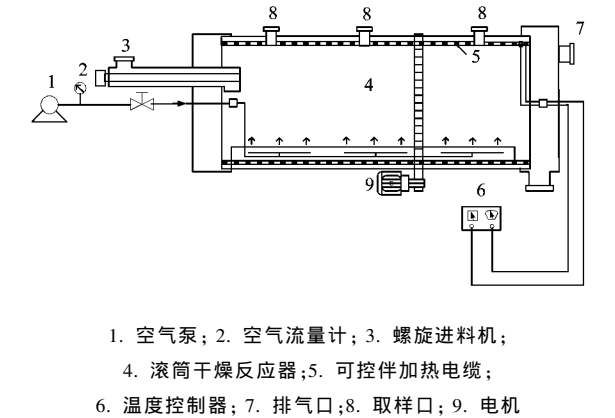


图 1 生物-物理联合干燥系统(纵剖面)

Fig. 1 Bio-physics co-drying system

1.3 实验方法

辅料由树皮和回流污泥组成,采用循环利用方式,以降低处理成本,当树皮:回流污泥的质量比低于3:0.5时,则加入新树皮,以确定树皮与回流污泥比例保持不变.实验采用批式进料,将脱水污泥和辅料按一定比例混合均匀后,通过螺旋进料机将物料

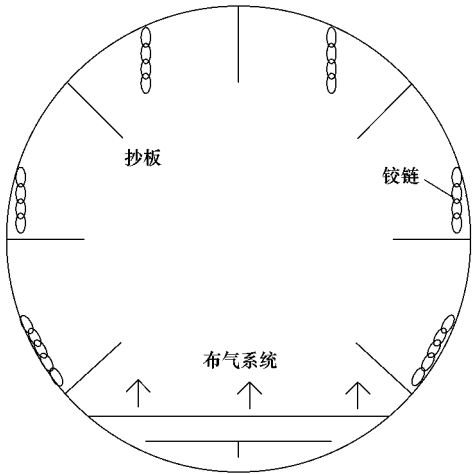


图 2 滚筒干燥反应器内部结构(横截面)

Fig. 2 Internal structure of roller drying reactor

送入滚筒干燥反应器内,物料总质量控制在(600±15) kg(容积率 75%).进料完毕后,空气泵连续向反应器中通入空气,流量以 VS 计为 30 L·(kg·h)<sup>-1</sup>,可控伴加热电缆工作温度设定为 40℃,干燥过程中电机带动干燥反应器每 12 h 旋转 18 min,以翻转堆体.3 批进料脱水污泥:树皮:回流污泥的质量比分别为7:3:0.5、9:3:0.5、12:3:0.5,干燥过程中每 24 h 采样和监测 1 次,取生物-物理干燥反应器前、中、后 3 个取样口测定值的平均值.

1.4 分析方法

TS:105℃烘干至恒重,电子天平(AL204,梅特勒-托利多仪器有限公司)、电热鼓风干燥箱(HG-9145A,上海一恒科技仪器有限公司);VS:600℃灼烧至恒重,马弗炉(SX2.5-10,上海东量建材试验设备有限公司);含氧量:氧气气体检测报警仪(CPR-B4,北京康尔兴科技有限公司);空气湿度:分体式温湿度计(AR847,上海理达仪器厂);pH 值=[m(污泥):m(去离子水)=1:10],玻璃电极法,微机型 pH/mV 计(PHS-25CW,上海理达仪器厂).

由于在污泥生物-物理联合干燥过程中灰分的质量保持不变,因此用以下公式计算水分去除量:

$$M_{\text{ash}} = M_{\text{TS}} - M_{\text{VS}}$$
$$M_{\text{water}} = \left[ \frac{M_{2\text{ash}} \times (1 - \text{OM}_1) \times (1 - \text{MC}_1)}{M_{2\text{ash}} \times (1 - \text{OM}_1) \times (1 - \text{MC}_1)} - \frac{M_{1\text{ash}} \times (1 - \text{OM}_2) \times (1 - \text{MC}_2)}{M_{2\text{ash}} \times (1 - \text{OM}_1) \times (1 - \text{MC}_1)} \right] \times 100\%$$

式中, $M_{\text{ash}}$ 为污泥灰分质量,kg; $M_{\text{TS}}$ 为污泥固体质量,kg; $M_{\text{VS}}$ 为污泥有机物质量,kg; $M_{\text{water}}$ 为水分去除率,%; $\text{MC}_1$ 为污泥的初始含水率,%; $\text{MC}_2$ 为污泥

的最终含水率,% ;  $OM_1$  为污泥的初始有机质含量,% ;  $OM_2$  为污泥的最终有机质含量,% ;  $M_{1ash}$  为污泥初始灰分质量,kg ;  $M_{2ash}$  为污泥最终灰分质量,kg.

2 结果与讨论

2.1 辅料配比对污泥生物-物理联合干燥温度的影响

微生物活性维持,需要适宜温度条件,不同辅料配比条件下污泥温度随干燥时间变化曲线如图 3 所示,可以看出辅料配比对污泥生物-物理联合干燥的温度影响较大.

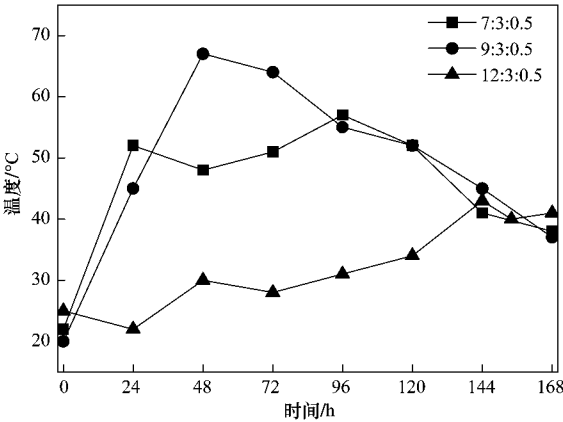


图 3 不同辅料配比温度随干燥时间的变化曲线  
Fig.3 Temperature variation curve along with time under different backflow ratio

从图 3 可以看出,随着停留时间延长污泥温度先升高,达到最大值后迅速降低.当脱水污泥:树皮:回流污泥为9:3:0.5时,0~48 h 污泥温度快速升高到最大值 67℃,并在 55℃ 以上保持 72 h,一般认为,堆体温度在 55℃ 条件下保持 72 h 以上,可以杀灭堆料中所含病原菌,满足堆肥卫生学指标和堆肥腐熟的要求<sup>[19]</sup>,当脱水污泥:树皮:回流污泥为7:3:0.5和 12:3:0.5 时,温度最大值分别为 57℃ 和 43℃,这说明辅料配比对干燥过程中污泥温度具有重要影响,Leonard 等<sup>[20]</sup>认为温度是影响微生物干燥过程的关键因素,而过高或过低的辅料配比均不利于堆体温度升高,在 3 组配比中,当脱水污泥:树皮:回流污泥为9:3:0.5 时,污泥中微生物的活性能被迅速激发,且高温期最长.

2.2 辅料配比对污泥生物-物理联合干燥含水率的影响

含水率是微生物降解动力学的重要参数,含水率过高,微生物生命活动所必须的氧气难以渗透入

微生物细胞内,处于厌氧状态,含水率过低将抑制微生物的活性.污泥含水率随干燥时间的变化如图 4 所示,可以看出一定量的污泥中,辅料添入比例越高,污泥初始含水率越低,反之越高.

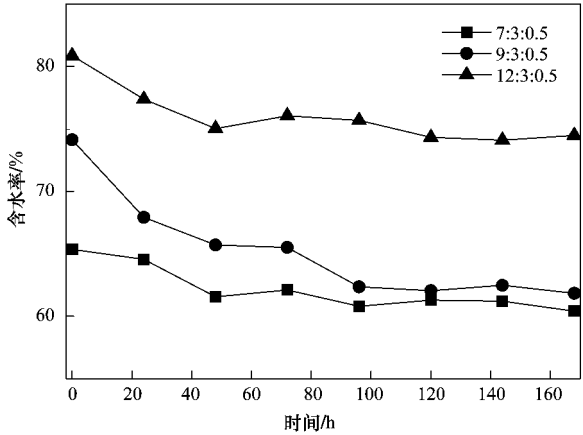


图 4 不同辅料配比含水率随干燥时间的变化曲线  
Fig.4 Water content curve along with time under different backflow ratio

从图 4 可以看出,脱水污泥:树皮:回流污泥为9:3:0.5和7:3:0.5时,0~96 h 污泥含水率随停留时间延长逐渐下降,96~168 h 变化不明显.这可能是因为,0~48 h 污泥处于升温阶段,机械通风将污泥表面迁移到气相的水分去除,含水率随停留时间延长迅速下降,48~96 h 污泥温度迅速升高到 50℃ 以上,此时主要以微生物新陈代谢过程中产生的热量将水分迁移到气相中<sup>[9]</sup>,含水率逐渐下降,96~168 h 时温度迅速降低到 50℃ 以下,在此温度下,水分难以摆脱黏性污泥的束缚.当脱水污泥:树皮:回流污泥为12:3:0.5 时,干燥过程中污泥温度较低,最高为 43℃,0~48 h 机械通风是水分去除的主要动力,污泥表面的水分被去除后,污泥内部的水分难以迁移到表面,导致 48~168 h 时含水率随停留时间延长变化不明显.当脱水污泥:树皮:回流污泥为9:3:0.5 时,污泥水分去除率最大,含水率由初始 74.1% 降低到 61.8%,水分去除率为 43.5%,比脱水污泥:树皮:回流污泥为7:3:0.5 和 12:3:0.5 时,水分去除率为 19.1% 和 30.6% 高.

2.3 辅料配比对污泥生物-物理联合干燥堆体含氧量的影响

微生物降解有机物,需要污泥中的氧气作为电子受体.污泥中的含氧量随干燥时间变化曲线如图 5 所示,可以看出随干燥时间延长污泥中的含氧量呈现先降低后升高的趋势.

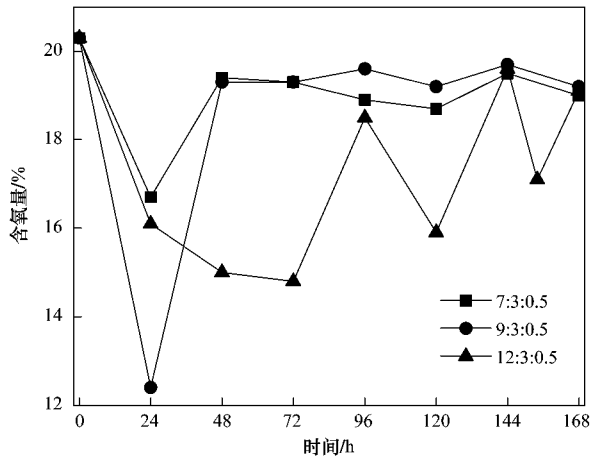


图5 不同辅料配比含氧量随干燥时间的变化曲线

Fig.5 Oxygen percent curve along with time under different backflow ratio

从图5可以看出,当脱水污泥:树皮:回流污泥为7:3:0.5和9:3:0.5时,污泥中的含氧量在0~24 h显著降低,达到最小值后迅速升高并稳定在19%左右,这可能是因为干燥开始时,污泥温度迅速升高,微生物活性较强,大量分解有机物,氧气消耗量较大,而堆体在干燥初期处于压实状态,氧气供给不足,含氧量迅速降低到最小值.由于抄板不断将物料抄起、混合,铰链不断将结块污泥打碎,堆体变得松散,空气渗透性增强<sup>[14,15]</sup>,氧气供给增加,24 h后污泥中的含氧量迅速升高,并动态稳定在19%左右.当脱水污泥:树皮:回流污泥为12:3:0.5时,整个干燥过程污泥温度较低,微生物活性不强,0~72 h污泥中的含氧量缓慢下降到最小值14.8%,在72~168 h时,呈缓慢上升状态,并在168 h时达到最大值19.1%,这可能是因为污泥含水率高、黏性大,混入污泥的比例过高,干燥初期,污泥相互粘结,渗透性较差,干燥过程中,反应器的动态旋转难以疏松堆体,导致整个干燥过程中氧气供给不足,污泥温度较低.综上所述,辅料配比是影响污泥间粘结状态和堆体渗透性的重要参数,对污泥生物-物理干燥过程具有重要影响.

2.4 辅料比对污泥生物-物理联合干燥 pH 的影响

pH 值对微生物活性有重要影响,微生物适宜生长的 pH 值约为 6.5~8.5,不同辅料配比下污泥 pH 值随干燥时间的变化曲线如图6所示.

从图6可以看出,污泥 pH 值在0~96 h时,呈现逐渐增大的趋势,这可能是因为微生物新陈代谢

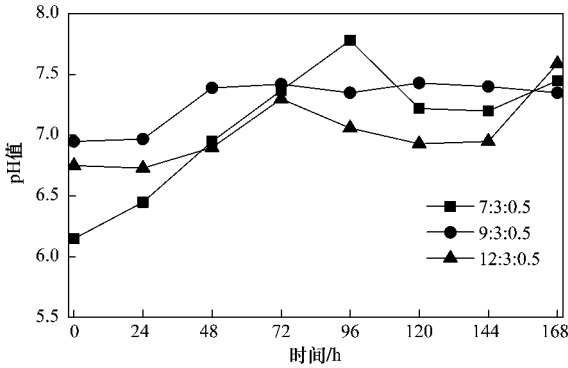


图6 不同辅料配比 pH 值随干燥时间的变化曲线

Fig.6 The pH curve along with time under different backflow ratio

活动能将污泥中的酸性物质分解,导致 pH 值逐渐升高,继续延长干燥时间,pH 变化不大.在停留时间为168 h时,不同辅料配比污泥 pH 值均低于8.5,处于微生物适宜生长的范围之内,这说明 pH 值不是微生物新陈代谢的限制因素.

2.5 辅料比对污泥生物-物理联合干燥相对湿度的影响

通入的空气将污泥颗粒表面迁移到气相的水分排出反应器而将水分去除,这将导致反应器内空气湿度增加,空气温度越高,空气饱和湿度越大,其带走水分的能力越强,不同辅料配比空气相对湿度随干燥时间的变化曲线如图7所示.

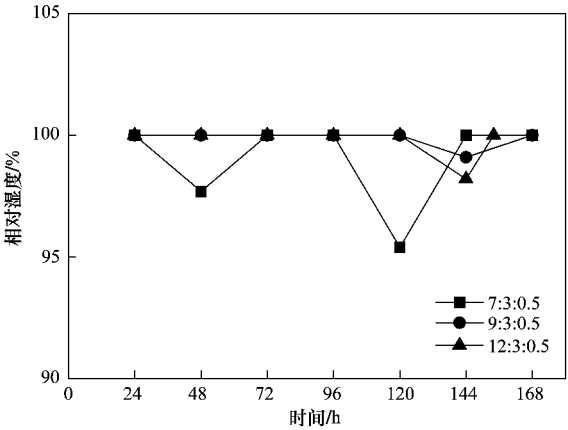


图7 不同辅料配比相对湿度随干燥时间的变化曲线

Fig.7 Relative humidity curve along with time under different backflow ratio

从图7可以看出,不同辅料配比,空气相对湿度基本呈饱和状态,这说明空气中的水分可能遇冷凝结而重新回到污泥中,导致污泥水分去除率下降.通风一方面提供微生物生长所必须的电子受体,另一

方面将迁移到气相的水分通过空气对流带出干燥反应器<sup>[21]</sup>,从图 7 与图 5 对比可以得出,通风量(以 VS 计)为  $30 \text{ L} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$  时,污泥没有处于厌氧状态,因此还需要进一步研究,确定污泥干燥的最佳通风量,以降低空气相对湿度,避免水分冷凝返回堆体,提高水分去除率。

## 2.6 辅料配比对污泥生物-物理联合干燥 VS 的影响

污泥生物-物理联合干燥主要是利用微生物好氧降解有机物产生的热量将污泥表面的水分迁移到气相中,污泥中 VS 的降解,可以表征微生物活性强弱,不同辅料配比 VS 随干燥时间的变化曲线如图 8 所示。

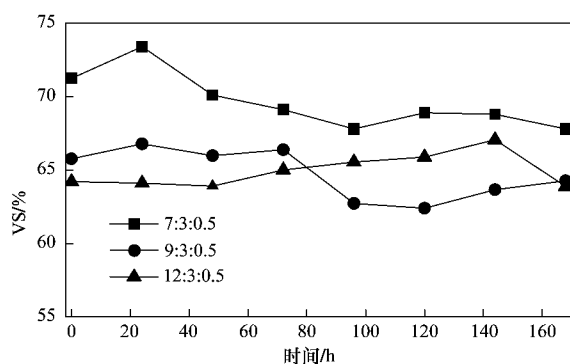


图 8 不同辅料配比 VS 随干燥时间的变化曲线

Fig. 8 VS curve along with time under different backflow ratio

从图 8 可以看出,脱水污泥:树皮:回流污泥为 7:3:0.5 和 9:3:0.5 时,微生物首先分解污泥中易降解有机物产热,且产热量大于通风散失的热量,污泥温度升高,0~96 h 时 VS 呈逐渐降低趋势。随着难降解有机物比例不断增加,微生物产热量下降,当产热量小于通风散失的热量时,污泥温度降低,这又进一步抑制微生物对 VS 的降解,因此温度降低和难降解有机物比例增加的双重相互作用对微生物降解 VS 产生抑制,是导致 96~168 h 时污泥中 VS 降解较少的主要原因,这与张相峰等<sup>[22]</sup>在研究温度控制对蔬菜废物和花卉秸秆共堆肥影响的结论一致。当脱水污泥:树皮:回流污泥为 12:3:0.5 时,污泥温度较低,VS 随着停留时间的延长几乎不发生变化,这说明在此配比下微生物的新陈代谢活动较弱。从图 8 可以看出,污泥生物-物理联合干燥停留时间为 7 d,比堆肥显著缩短,且 VS 降解减少<sup>[23]</sup>,控制污泥的生物-物理联合干燥条件,可实现快速去除污泥水分同时降低污泥有机质消耗,提高污泥堆肥、焚烧等后续处理的资源化利用价值。

## 3 结论

(1) 辅料配比对污泥生物-物理联合干燥过程具有重要影响,通过向脱水污泥中混入适宜配比辅料,快速激发微生物活性分解有机物产热和减少堆体热量散失是提高水分去除率的关键。

(2) 本研究所有实验条件中,脱水污泥:树皮:回流污泥为 9:3:0.5 是污泥生物-物理联合干燥的最佳配比,污泥温度在 48 h 时达到最大值  $67^{\circ}\text{C}$ ,并在  $55^{\circ}\text{C}$  以上保持 72 h,且水分去除率最大为 43.5%。

(3) 控制污泥生物-物理联合干燥反应条件,可利用微生物新陈代谢产生的热量快速去除污泥水分同时降低有机质消耗,提高污泥堆肥、焚烧等后续处理的资源化利用价值。

## 参考文献:

- [1] Low E W, Chase H A. Reducing production of excess biomass during wastewater treatment [J]. *Water Research*, 1999, **33** (5): 1119-1132.
- [2] Lhadi E K, Tazi H, Aylaj M. Organic matter evolution during co-composting of the organic fraction of municipal waste and poultry manure [J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97** (16): 2117-2123.
- [3] James B A, Kane P W. Sludge dewatering and incineration at Westvaco [J]. *North Charleston. S. C. Tappi Journal*, 1991, **74** (5): 131-137.
- [4] 易浩勇. 污泥间干燥特性及干燥过程研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [5] Barrena R. In search of a reliable technique for the determination of the biological stability of the organic matter in the mechanical-biological treated waste [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162** (2-3): 1065-1072.
- [6] Dufour P. Control engineering in drying technology: Review and trends [J]. *Drying Technology*, 2006, **24** (7): 889-904.
- [7] Kraft D L, Orender H C. Considerations for using sludge as a fuel [J]. *Tappi Journal (United States)*, 1993, **76** (3): 175-183.
- [8] Choi H L. Composting high moisture materials: biodrying poultry manure in a sequentially fed reactor [J]. *Compost Science Utility*, 2001, **9** (4): 303-311.
- [9] Ahn H K, Richard T L, Choi H L. Mass and thermal balance during composting of a poultry manure—Wood shavings mixture at different aeration rates [J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42** (2): 215-223.
- [10] Navaee-Ardeh S, Bertrand F, Stuart P. Key variables analysis of a novel continuous biodrying process for drying mixed sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101** (10): 3379-3387.
- [11] Richard T L. Moisture relationships in composting processes [J]. *Compost Science & Utilization*, 2002, **10** (4): 286-302.

[12] Velis C A, Longhurst P J, Drew G H. Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering [ J ]. Bioresource Technology, 2009, **100** ( 11 ): 2747-2761.

[13] Sugni M, Calcaterra E, Adani F, Biostabilization-Biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow [ J ]. Bioresource Technology, 2005, **12**(96): 1331-1337.

[14] Navaee-Ardeh S, Bertrand F, Stuart P R. Emerging biodrying technology for the drying of pulp and paper mixed sludges [ J ]. Drying Technology, 2006, **24**(7): 863-878.

[15] Parry J L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review [ J ]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1985, **32**(1): 1-29.

[16] Simpson W T. Drying wood: A review-Part II [ J ]. Drying Technology, 1983, **2**(3): 353-368.

[17] Zhang D Q, He P J, Shao L M. Sorting efficiency and combustion properties of municipal solid waste during bio-drying [ J ]. Waste Management, 2009, **29**(11): 2816-2823.

[18] 张相锋,王洪涛,聂永丰. 高水分蔬菜和花卉废物序批式进料联合堆肥的中试 [ J ]. 环境科学, 2002, **24**(6): 148-151.

[19] 陈玲,赵建夫,李宇庆,等. 城市污水厂污泥快速好氧堆肥技术研究 [ J ]. 环境科学, 2005, **26**(5): 192-195.

[20] Leonard A, Blacher S, Marchot P. Convective drying of wastewater sludges: influence of air temperature, superficial velocity, and humidity on the kinetics [ J ]. Drying Technology, 2005, **23**(8): 1667-1679.

[21] Frei K M, Cameron D, Stuart P R. Novel drying process using forced aeration through a porous biomass matrix [ J ]. Drying Technology, 2004, **22**(5): 1191-1215.

[22] 张相锋,王洪涛,聂永丰. 温度控制对蔬菜废物和花卉秸秆共堆肥的影响 [ J ]. 环境科学, 2006, **27**(1): 171-174.

[23] 张相锋,王洪涛,聂永丰. 通风量对蔬菜和花卉废弃物混合堆肥的影响 [ J ]. 农业工程学报, 2005, **21**(10): 134-137.