

## 农村户用厕所污堆肥反应器设计与试验

侯善策<sup>1,2</sup>, 沈玉君<sup>1,2</sup>, 王惠惠<sup>1,2</sup>, 周海宾<sup>1,2</sup>, 程红胜<sup>1,2\*</sup>, 张宏图<sup>1,2,3</sup>, 范盛远<sup>1,2</sup>

(1. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100121; 2. 农业农村部资源循环利用技术与模式综合性重点实验室, 北京 100121; 3. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

**摘要:** 针对农村户用厕所环境条件差、厕所处理困难等问题, 该研究研制了一种具有负压抽吸进料-螺旋盘管曝气-膜辅助加热功能的 110 L 农村户用厕所污堆肥反应器。根据工程热力学和生物学原理, 设计了厕所负压抽吸进料机构、螺旋盘管曝气系统和膜辅助加热机构等关键部件, 集成反应器控制单元, 并开展反应器性能试验。试验结果表明: 堆肥高温期 (50 ℃) 维持 5 d, 连续发酵 15 d 后, 蛔虫卵死亡率达到了 100%, 大肠菌值检测为 46 个/g ( $\leq 100$  个/g), 种子发芽指数为 88.4%, 满足《粪便无害化卫生标准》要求。该研究可为农村户用厕所污无害化处理及肥料化利用提供装备支撑。

**关键词:** 堆肥; 粪; 试验; 厕所; 无害化; 反应器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.029

中图分类号: S141.4; X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-14-0237-06

侯善策, 沈玉君, 王惠惠, 等. 农村户用厕所污堆肥反应器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 237-242.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.029 <http://www.tcsae.org>

Hou Shance, Shen Yujun, Wang Huihui, et al. Design and experiment of composting reactor for rural household toilet sewage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 237-242. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.029 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

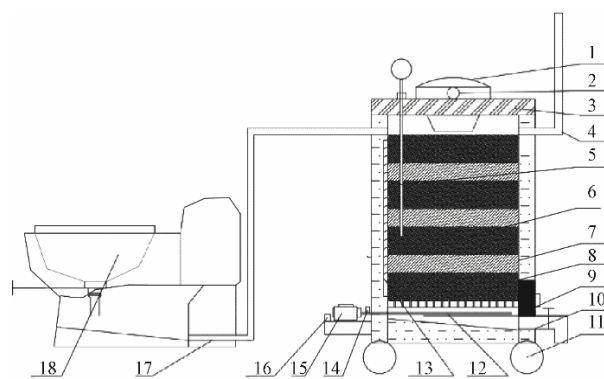
厕所污堆肥是农村厕所污资源化利用的主要途径之一, 对推进农村厕所革命具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。集约化堆肥装备多针对规模化畜禽养殖场或有机肥工程, 在堆肥工艺、处理能力、运行方式、环境友好方面与农村户用厕所污堆肥需求差距较大<sup>[3-8]</sup>。现有的农村户用厕所污堆肥反应器主要有卧式和微生物厕所污堆肥反应器等, 卧式堆肥反应器容积小, 难以实现连续堆肥; 微生物厕所污堆肥反应器需要定期更换菌种, 操作技能要求高<sup>[9-11]</sup>。由于厕所污含水率高、致病菌多、碳氮比低, 处理不好极易导致粪口疾病传播<sup>[12-13]</sup>。因此, 本研究基于现有生态旱厕产品, 提出农村户用厕所污分层堆肥工艺, 设计了一种移动式农村户用厕所污堆肥反应器 (以下简称反应器), 以为农村厕所革命提供技术与装备支撑。

## 1 反应器结构与工作原理

### 1.1 反应器结构

反应器结构如图 1 所示, 主要由粪污收集单元、好氧发酵单元、增温保温单元和曝气单元组成。收集单元主要包括坐便器、进污管和负压风机; 好氧发酵单元主要包括反应器腔体、筛板、导气管和出料口等; 增温保

温单元主要包括加热膜、保温棉和密封盖; 曝气单元主要包括曝气风机、曝气管和流量计等。采用负压风机抽吸结构自动收集厕所污; 采用环形盘管曝气结构, 配以定时器和曝气风机, 对堆肥过程进行可控曝气; 采用“膜加热+保温棉”结构, 对反应器进行增温保温, 满足寒冷气候条件下堆肥要求; 堆肥反应器整体可移动, 便于安装维护。



1. 负压风机 2. 排气孔 3. 密封盖 4. 排气管 5. 温度传感器 6. 反应器腔体 7. 保温棉 8. 筛板 9. 出料口 10. 渗滤液出口 11. 万向轮 12. 曝气管 13. 加热膜 14. 流量计 15. 曝气风机 16. 控制器 17. 进污管 18. 坐便器  
1. Negative pressure fan 2. Discharge port 3. Sealing cover 4. Exhaust pipe 5. Temperature sensor 6. Reactor cavity 7. Insulating cotton 8. Sieve plate 9. Outlet 10. Leachate outlet 11. Omni-directional wheel 12. Aeration tube 13. Heating membrane 14. Flowmeter 15. Aeration fan 16. Controller 17. Inlet sewage tube 18. Toilet

图 1 反应器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of reactor structure

### 1.2 工作原理

根据厕所污特点和粪污无害化处理需求, 采用负压进料-

收稿日期: 2020-02-27 修订日期: 2020-07-10

基金项目: 农业农村部规划设计研究院自主研发项目-寒旱区生态旱厕及粪污农用水技术研究 (ZZYFXKFZ201901)

作者简介: 侯善策, 博士生, 主要从事农业废弃物处理装备研究。

Email: hou\_shance@163.com

\*通信作者: 程红胜, 博士, 高级工程师, 主要从事农业废弃物资源化利用技术研究。Email: steerfeng@163.com

分层发酵-序批出料堆肥工艺。工作时,在筛板上预先铺放一层粉碎至 2~3 cm 的玉米秸秆,启动负压风机,将坐便器中的粪污抽吸至反应器内秸秆层上,抽吸完毕后,在粪污上方再铺放一层碎秸秆。启动曝气风机,根据厕所堆肥曝气工艺设定曝气参数,空气通过曝气盘管吹入反应器腔体内,为堆肥物料提供发酵所需氧气。根据堆肥环境,适时启动加热单元,并调整加热功率。发酵周期结束后,将物料从底部出料口排出。新粪污再通过负压风机抽吸至反应器内,进行新一批次发酵。

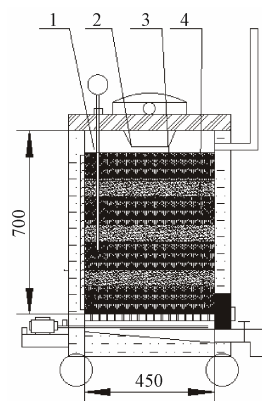
### 1.3 反应器主要技术参数

反应器参数主要根据堆肥物料质量和实际工作条件进行确定。反应器容积为 110 L、工作环境温度不低于-20℃、反应器最大功率为 1.29 kW、堆肥周期 15 d。

## 2 关键部件设计

### 2.1 反应器腔体容积确定

反应器腔体用于盛装堆肥物料,为堆肥物料提供好氧发酵环境。根据前期预试验,厕污与玉米秸秆质量比为 4:1 时发酵效果较好。根据现有生态旱厕产品技术参数,采用批次抽粪工艺,每 5 d 抽吸 1 次,每次粪污抽吸量约为 8 kg。根据堆肥经验,堆肥周期设为 15 d,为使第 1 批次物料满足发酵周期要求,反应器有效容积应能满足 3 批次抽吸的厕污堆肥体积,经测量堆肥物料容重为 375 kg/m<sup>3</sup>,故反应器有效容积应大于 80 L,同时考虑负压风机的安装空间,物料高度不应超过负压风机进气口位置(负压风机高 0.15 m)。结合现有堆肥反应器研究<sup>[5]</sup>,反应器腔体选用圆柱形,参照常见搅拌容器常用装料高径比<sup>[14]</sup>(一般为 1~2),设计反应器腔体内径为 0.45 m,反应器腔体高度为 0.7 m,总容积为 110 L,其中堆肥物料堆高为 0.5 m(其中每层秸秆高约 0.12 m,每层厕污高约 0.047 m,共 4 层秸秆,3 层厕污。),有效容积为 80 L,反应器结构如图 2 所示。



1.反应器腔体 2.负压风机 3.秸秆 4.厕污

1.Reactor cavity 2.Negative pressure fan 3.Stalks 4.Sewage

图 2 反应器腔体结构图

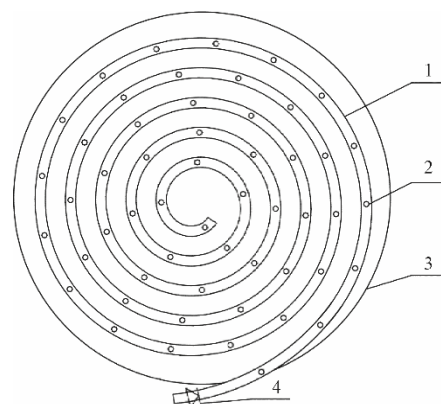
Fig.2 Structure diagram of reactor cavity

### 2.2 曝气系统设计

#### 2.2.1 曝气管路

为减小曝气阻力,提高曝气均匀性,曝气管按阿基

米德螺旋线排布,通气孔均布于管上,在通气主管上设置单向阀以防止气体回流,为便于加工,通气管采用硬质抗腐蚀胶管,管路结构如图 3 所示。管路总长度为 2 m,根据堆肥系统设计经验,选择曝气管内径选 20 mm,曝气孔的孔径为 2 mm,孔间距 200 mm<sup>[15]</sup>。



1.曝气管 2.曝气孔 3.反应器内壁 4.单向阀

1.Aeration tube 2.Aeration hole 3.Reactor inner wall 4.Check valve

图 3 曝气管路结构图

Fig.3 Structure diagram of ventilation pipeline

#### 2.2.2 曝气频率和速率

曝气频率和速率是好氧发酵过程中的关键参数,需依据理论曝气量最大值进行设计<sup>[3]</sup>。曝气量与脱水量和有机降解量密切相关,对于农村厕污堆肥,以无害化处理为主要目标,以有机质降解量作为理论曝气量的计算依据。

根据褚莲清等<sup>[16]</sup>研究,向 1 kg 干物料中通入 480 L 空气,微生物可降解 0.125 kg 有机质,根据堆肥经验,发酵物料初始含水率一般为 65%<sup>[15]</sup>,则氧化 1 kg 物料所需空气量为 168 L,以堆肥物料质量 30 kg(按厕污与玉米秸秆质量比 4:1,3 批次厕污共 24 kg,秸秆 6 kg)计算,则总曝气量为 5 040 L。

堆肥反应器采用间歇式曝气工艺,已有研究表明,堆体好氧发酵过程中氧体积分数低于 8%时,会抑制好氧发酵进程<sup>[3]</sup>,为稳定堆体内含氧量,按每 30 min 一个曝气周期计算,曝气频率为间隔 26 min 曝气 4 min<sup>[3]</sup>,计算得出曝气速率为 1.75 L/min。

#### 2.2.3 曝气风机选型

曝气风机作为曝气系统的动力源是堆肥装置重要组成部件,不同的使用条件对曝气风机的要求不同,合理选择曝气风机既能满足堆肥需求,又可节约运行成本。曝气风机选择依据为反应器曝气风量和风压。风压与压力损失密切相关。压力损失包括空气穿透堆肥物料所产生的堆体压力损失和穿过管路产生的管路压力损失。

好氧发酵过程中,空气透过物料间空隙为堆体提供发酵所需氧气,气体通过堆体过程中会产生压力损失<sup>[16]</sup>:

$$P_1 = \frac{15(1-E)\mu v_1 l^2}{E^3 d_p^3} + \frac{1.75(1-E)\rho_1 v_1^2 l}{E^3 d_p^3} \quad (1)$$

式中  $E$  为物料空隙率,取 0.8<sup>[16]</sup>;  $v_1$  为气体在堆体中的流

速, 取  $0.4 \text{ m/s}^{[16]}$ ;  $\mu$  为气体平均黏度, 取  $0.018 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{[16]}$ ;  $d_p$  为物料颗粒平均直径,  $0.1 \text{ mm}^{[16]}$ ;  $p_1$  为空气密度,  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ;  $l$  为堆体高度,  $0.5 \text{ m}$ 。带入公式 (1) 计算得出气体穿透堆肥物料所产生的压力损失约为  $900 \text{ Pa}$ 。

气体在管路中的压力损失主要为沿程压力损失  $P_2$ , 其计算公式为<sup>[16]</sup>

$$P_2 = \frac{\lambda_1 L v_2}{2gd} + \frac{\sum \xi v_2^2}{2g} \quad (2)$$

式中  $\lambda_1$  为气体与管壁之间的摩擦系数, 取  $1^{[15]}$ ;  $v_2$  为气体流速, 取  $6 \text{ m/s}^{[15]}$ ;  $d$  为管道内径, 取  $20 \text{ mm}$ ;  $L$  为管道长度,  $2 \text{ m}$ ;  $\xi$  为局部阻力系数, 取  $2.5^{[16]}$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。计算得气体在管路中的压力损失为  $1.24 \text{ kPa}$ 。

由此得出整个曝气系统的压力损失为  $1.33 \text{ kPa}$ 。考虑到物料对曝气孔可能产生的堵塞因素, 对照风机压力曲线选择最大风压  $20 \text{ kPa}$ 、最大曝气量为  $25 \text{ L/min}$  的 AC0-001 型空气压缩泵。

#### 2.2.4 负压风机选型

负压风机的型号依据抽吸厕所所需风压确定, 负压风机的压力损失主要包括厕所迁移过程中克服重力而引起的压力损失和导污管路压力损失。其中厕所重力损失根据公式 (3) 计算

$$P = \rho_2 gh \quad (3)$$

式中  $P$  为压强,  $\text{Pa}$ ;  $\rho_2$  为厕所容重, 根据实测取  $1250 \text{ kg/m}^3$ ;  $h$  为厕所提升高度, 根据反应器腔体高度, 考虑万向轮高度, 取  $h=0.75 \text{ m}$ 。计算得坐便器内厕所迁移至反应器中所需压力为  $9.2 \text{ kPa}$ 。

导污管路压力损失主要由沿程压力损失和局部压力损失组成, 其计算公式为<sup>[16]</sup>

$$p_f = \frac{\lambda_2 \rho v_3^2}{2d} \quad (4)$$

$$p_d = \frac{\sum k v_4^2}{2} \quad (5)$$

式中  $p_f$  为导污管路沿程压力损失,  $\text{Pa}$ ;  $p_d$  为导污管路局部损失,  $\text{Pa}$ ;  $\lambda_2$  为厕所与管壁之间的摩擦系数, 取  $0.45^{[16]}$ ;  $v_3$  为厕所流经导污管的速度, 取  $3.4 \text{ m/s}^{[16]}$ ;  $v_4$  为厕所经过局部弯道的速度, 取  $3.4 \text{ m/s}$ 。

计算得沿程压力损失为  $4.8 \text{ kPa}$ , 局部压力损失为  $0.01 \text{ kPa}$ , 故管路总压力损失为  $4.81 \text{ kPa}$ 。负压风机所需压力为  $10.63 \text{ kPa}$ 。结合风量和风压, 对照风机压力曲线选择最大风压  $14 \text{ kPa}$ 、最大风量  $2416 \text{ L/min}$  的 HG310-AS3 型负压风机。

#### 2.3 反应器增温保温单元

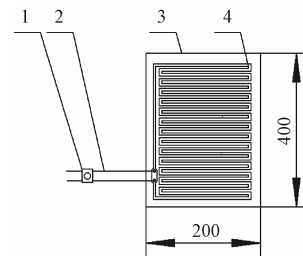
堆肥温度是影响堆肥工艺和堆体中微生物活动的重要因素, 堆体温度高于  $30^\circ\text{C}$  比较适合微生物发酵<sup>[17]</sup>。考虑到中国北方冬季气温最低可达  $-20^\circ\text{C}$ , 堆肥发酵过程需采取辅助升温措施, 根据公式<sup>[18]</sup>6 计算发酵所需外部提供热量

$$\begin{cases} q_{\text{总}} = q_e + q_w + q_a \\ q_e = \frac{kA}{b(t_1 - t_2)} \\ q_w = m_w c_{p,a} (t_1 - t_2) \\ q_a = am_{o_2} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $q_{\text{总}}$  为加热器所提供热量,  $\text{kJ}$ ;  $q_e$  为通过反应器壁散失的热量,  $\text{kJ}$ ;  $q_w$  为曝气带走的热量,  $\text{kJ}$ ;  $q_a$  为有机质降解产热,  $\text{kJ}$ ;  $k$  为保温棉热导系数, 取  $0.034 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}^{[18]}$ ;  $A$  为导热面积, 根据反应器内部腔体内表面计算得  $0.38 \text{ m}^2$ ;  $b$  为反应器壁厚, 根据实测为  $20 \text{ mm}$ ;  $t_1$  为堆体高温期温度,  $50^\circ\text{C}^{[15]}$ ;  $t_2$  为环境最低温度, 取  $-20^\circ\text{C}$ ;  $m_w$  为总通风量,  $\text{m}^3$ ;  $c_{p,a}$  为反应器体比热容, 取  $0.24 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}^{[18]}$ ;  $a$  为常数, 取  $3312.5^{[18]}$ ;  $m_{o_2}$  为降解有机质需氧量, 根据堆肥所需曝气量计算得  $1.51 \text{ kg}$ 。

考虑有机质降解产热、反应器外壁散失热量和曝气带走热量等其他热量损失, 若使整个堆肥周期维持热平衡, 计算得出加热膜最小产热值为  $12321.9 \text{ kJ}$ , 换算得膜加热器最小加热功率为  $34.2 \text{ W}$ 。

图 4 为加热膜结构图, 为避免加热器过载, 选择型号 JK-002、最大功率为  $100 \text{ W}$  的膜加热器。加热功率通过功率调节器进行调节, 同时为提升加热、保温效果, 采用“膜加热+保温棉”组合结构, 将加热膜贴敷于反应器外壁。为提升加热均匀性, 采取双膜对称布置, 贴附于反应器外壁上。



1.控温开关 2.电源线 3.加热膜 4.电阻丝

1.Temperature control switch 2.Power line 3.Heating membrane 4.Resistance wire

图 4 加热膜结构图

Fig.4 Diagram of heating membrane structure

### 3 反应器性能试验

#### 3.1 试验材料

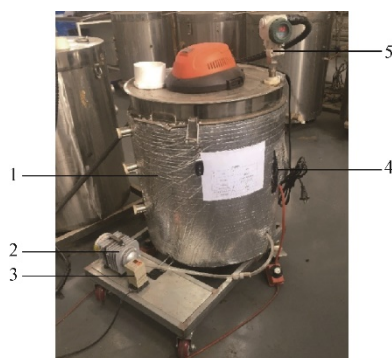
本试验于 2019 年 9 月在农业农村部规划设计研究院（双桥院区）实验室进行, 环境温度为  $17\sim 22^\circ\text{C}$ 。以厕所污、玉米秸秆为原料, 厕所污取自化粪池进粪口固体粪样, 粪便含水率为  $83.2\%$ , 碳氮比为  $2.94$ ,  $\text{pH}$  值为  $7.4$ , 玉米秸秆购自黑龙江省, 含水率  $9.65\%$ , 碳氮比为  $64.17$ ,  $\text{pH}$  值为  $7.1$ , 粉碎粒径为  $1\sim 2 \text{ cm}$ 。

#### 3.2 试验方法

采用自主研发的堆肥反应器进行静态堆肥试验（见图 5），采用序批式分层发酵方法, 将粪便和玉米秸秆按



照质量比 4:1 分层平铺于反应器中, 设置曝气频率为间隔 26 min 曝气 4 min, 曝气速率为 1.75 L/min。分别在第 0、3、6、9、12、15 d 采样, 采集到的样品置于  $-4^{\circ}\text{C}$  保存备用。



1. 反应器 2. 曝气风机 3. 控制器 4. 加热膜 5. 温度传感器  
1. Reactor 2. Aeration fan 3. Controller 4. Heating film 5. Temperature sensor

图 5 堆肥反应器

Fig.5 Composting reactor

### 3.3 分析方法

堆肥过程中, 反应器内发酵物料温度采用在线监测, 将温度传感器安置在发酵物料中心位置, 监测发酵物料中心温度; pH 值和种子发芽指数取样后实验室分析测定, 测定方法参照《堆肥工程实用手册》<sup>[15]</sup>; 蛔虫卵和粪大肠菌值委托华测检测认证集团北京有限公司检测, 反应器能耗委托农业农村部农业机械试验鉴定总站检测。

## 4 结果与分析

### 4.1 堆体感官特性

如图 6 所示。堆体在好氧发酵前 2 d, 秸秆与厕污分层排布, 臭味重。随着好氧发酵过程进行, 厕污逐渐融入秸秆缝隙, 与秸秆混成一体, 堆体颜色由黄色逐渐呈深褐色, 臭味减弱, 好氧发酵 10 d 后, 堆体呈现浅黑色, 臭味消失, 物料表面分布有白色丝状物, 堆体松散、湿润。

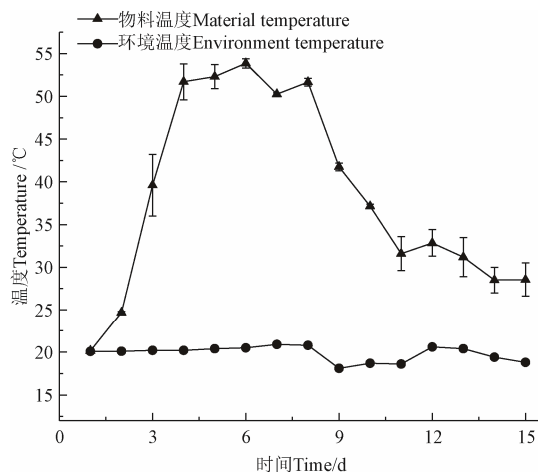


图 6 堆肥温度变化曲线

Fig.6 Changing curves of composting temperature

### 4.2 温度、蛔虫卵死亡率和粪大肠菌值

堆体温度可间接反应堆体中菌群活动的强弱和发酵所属阶段。根据《畜禽粪便堆肥技术规范》(NYT 3442—2019)<sup>[19]</sup>, 高温好氧堆肥处理有机废弃物堆体温度大于  $50^{\circ}\text{C}$  的时间应持续 5~7 d。如图 6 所示, 试验过程中, 物料发酵温度高于  $50^{\circ}\text{C}$  的时间持续 5 d。第 15 天堆肥物料蛔虫卵死亡率 100%, 粪大肠菌值为 46 个/g ( $\leq 100$  个/g), 满足粪污无害化处理要求<sup>[20]</sup>。

### 4.3 种子发芽指数变化情况

堆肥腐熟度通过种子发芽试验进行评价<sup>[21-23]</sup>。如图 7 所示, 堆肥第 15 天的种子发芽指数达到 88.4%, 与现有 30 d 堆肥周期的厕污堆肥反应器相比<sup>[24]</sup>, 反应器可以实现堆肥快速腐熟。

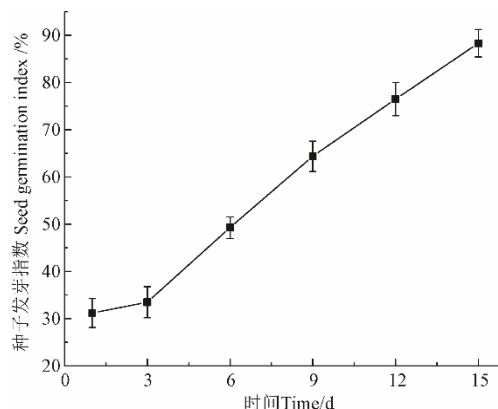


图 7 种子发芽指数变化曲线

Fig.7 Changing curves of seed germination index

### 4.4 处理周期和管护费用分析

处理周期和运行能耗是影响农村户厕推广的关键因素。为便于比较分析, 选择与目前农村常见的三格式和生物净化槽户厕对比分析, 比较不同类型厕所的处理周期和管护费用。其中处理周期是指厕污进入反应器至完成无害化处理所消耗的时间; 管护费用是指农村户厕维持稳定运行所需支付的运行管理费用。本研究所设计的厕污堆肥反应器实现厕污无害化处理的周期为 15 d, 经第三方检测日均耗电量为  $0.08 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。三格式户厕最短处理周期为 60 d<sup>[24]</sup>, 每年需清掏 2 次, 由于养分浓度低、处理费时费力, 一般采用第三方机构处理, 清理费用约 50 元/次。生物净化槽式户厕处理周期为 90 d<sup>[25]</sup>, 每年需清掏 3 次, 处理费用每次约 50 元。三格式户厕每年管护费用约 100 元<sup>[26]</sup>, 生物户厕约 150 元, 本研究设计的厕污堆肥反应器无废液产生, 处理后的剩余物为堆肥产品, 可直接还田应用, 无需第三方处理, 运行维护费仅为电费, 堆肥升温期加热器连续工作, 其余时间间断性工作, 厕污堆肥反应器每年耗电费用为 84 元。厕污堆肥反应器每年运行费用相比三格化粪池节约 16%, 比生物净化槽式户厕节约 44%。因此, 厕污堆肥反应器具有堆肥周期短、管护费用低等优势。

## 5 结论

1) 设计了一种具有负压抽吸进料-螺旋盘管曝气-膜

辅助加热功能的农村户用厕污堆肥反应器, 最大容积为 110 L, 反应器功率为 1.29 kW, 堆肥周期为 15 d, 采用负压进料-分层发酵-序批出料堆肥工艺, 曝气频率为间隔 26 min 通气 4 min, 曝气速率为 1.75 L/min。

2) 通过农村户用厕污堆肥反应器性能试验得出, 堆体温度维持 5 d 高于 50℃。堆肥结束后, 蛔虫卵死亡率达到 100%, 粪大肠菌值为 46 个/g ( $\leq 100$  个/g), 种子发芽指数达到 88.4%, 满足堆肥物料无害化和腐熟要求。农村户用厕污堆肥反应器每年管护费用较三格化粪池节约 16%, 较生物净化槽式户厕节约 44%, 表明该农村户用厕污堆肥反应器可实现厕污无害化处理和快速堆肥, 具有堆肥周期短、管护费用低等优势。

### [参 考 文 献]

- [1] 沈峥, 刘洪波, 张亚雷. 中国“厕所革命”的现状、问题及其对策思考[J]. 中国环境管理, 2018, 10(2): 45-48.  
Shen Zheng, Liu Hongbo, Zhang Yalei. The current situation, issues and strategies of “Toilet revolution” in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2018, 10(2): 45-48. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张立霖. 农村人居环境整治中关于厕所革命的思考与探索[J]. 甘肃农业, 2019(8): 111-115.
- [3] 程红胜, 隋斌, 孟海波, 等. 滚筒式沼渣好氧发酵反应器中试装置设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 232-239.  
Cheng Hongsheng, Sui Bin, Meng Haibo, et al. Design and performance test of aerobic fermentation rotary reactor pilot plant for biogas residue[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(24): 232-239. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张安琪, 黄光群, 张绍英, 等. 好氧堆肥反应器试验系统设计及性能试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 156-161  
Zhang Anqi, Huang Guangqun, Zhang Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 156-161 (in Chinese with English abstract)
- [5] 孙晓曦, 崔儒秀, 马双双, 等. 智能型规模化膜覆盖好氧堆肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 363-369.  
Sun Xiaoxi, Cui Ruxiu, Ma Shuangshuang, et al. Design and test on lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 363-369. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周燕, 梅小乐, 杜兵. 国内外生态厕所类型分析及其应用研究[J]. 北方环境, 2013, 25(6): 21-25.  
Zhou Yan, Mei Xiaole, Du Bing. The analysis and applicable study on types of foreign and domestic ecological toilets[J]. Northern Environmental. 2013, 25(6): 21-25. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杜兵, 司亚安, 孙艳玲. 生态厕所的类型及粪污处理工艺[J]. 给水排水, 2003, 29(5): 60-62.
- [8] 时红蕾, 王晓昌, 李倩. 家庭小规模好氧堆肥中人粪便处理效果评价[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(10): 93-98.  
Shi Honglei, Wang Xiaochang, Li Qian. Evaluation of small scale composting of human feces based on household application[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(10): 93-98. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周敬宣, 李冠峰, 李艳萍. 我国粪便处置现状与治理对策的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(3): 9-11  
Zhou Jingxuan, Li Guanpeng, Li Yanping. Study on status and countermeasures of the disposal of night soil in China[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control. 2003, 4(3): 9-11. (in Chinese with English abstract)
- [10] 胡涛, 王晓昌, 李倩, 等. 好氧堆肥反应器对人粪便堆肥中温降解的中试研究[J]. 环境工程学报, 2013(12): 4965-4970.  
Hu Tao, Wang Xiaochang, Li Qian, et al. A pilot scale study on a human feces composting in aerobic medium temperature composting reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013 (12): 4965-4970. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王洪波, 盛守福, 王晓昌, 等. 堆肥反应器对人粪便中不同有机成分的降解特性[J]. 中国给水排水, 2011(3): 90-92.  
Wang Hongbo, Sheng Shoufu, Wang Xiaochang, et al. Degradation characteristics of different organic components in human feces by composting reactor[J]. China Water & Waste Water, 2011 (3): 90-92. (in Chinese with English abstract)
- [12] Kumar Mathava, Ou Yan-Liang, Lin Jih-Gaw. Co-coposting of green waste and food waste at low C/N ratio[J]. Waste Management, 2010, 30(4): 602-609.
- [13] 刘歆瑜. 玉米秸秆作为生态厕所基质处理人粪便的实验研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.  
Liu Qinyu. The Study on the Experiment of Decomposing Human Feces by Bio-Toilet Using Cornstalk as Matrix[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈志平, 章序文. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [15] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [16] 褚莲清, 杨卫英, 陈全明, 等. 城市生活垃圾好氧堆肥工艺强制通风设计计算[J]. 环境卫生工程, 2001(3): 22-24.  
Chu Lianqing, Yang Weiying, Chen Quanming, et al. Forced air supply design computation in aerobic compost technology of MSW comprehensive treatment[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2001(3): 22-24. (in Chinese with English abstract)
- [17] 戴芳, 曾光明, 袁兴中, 等. 新型堆肥装置设计及其应用研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 24-28.  
Dai Fang, Zeng Guangming, Yuan Xingzhong, et al. Design of a new type of composting device and its application[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(2): 24-28. (in Chinese with English abstract)
- [18] Steele J L, Shove G C. Design charts for flow and pressure distribution in perforated air ducts[J]. Transactions of the ASAE, 1969, 12(2): 220-224
- [19] 中华人民共和国农业农村部. 畜禽粪便堆肥技术规范: NY/T 3442—2019[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [20] 中华人民共和国卫生部. 粪便无害化卫生要求: GB 7959—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [21] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

- [22] Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. BioCycle(USA), 1981, 22(2): 54-57.
- [23] Sh M Selim, Mona S Zayed, Houssam M Atta. Evaluation of phytotoxicity of compost during composting process[J]. Nature and Science, 2012, 10(2): 69-77.
- [24] 陈威, 王玉新. 应用新型好氧堆肥反应器连续投加处理人粪便的研究[J]. 环境科技, 2014, 27(4): 35-39.  
Chen Wei, Wang Yuxin. Study on the continuously feeding for treating human feces using a new type aerobic composting reactor[J]. Environmental Science and Technology 2014, 27(4): 35-39. (in Chinese with English abstract)
- [25] 宋美倩. 河北张家口万全区推广 ECO 环保方便器农村“厕所革命”有利器 [EB/OL]. (2019-05-06). [http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/201905/06/t20190506\\_32003949.shtml](http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/201905/06/t20190506_32003949.shtml).
- [26] 国家市场监督管理总局, 农村三格化粪池运行维护规范: GB/T 38837—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

## Design and experiment of composting reactor for rural household toilet sewage

Hou Shance<sup>1,2</sup>, Shen Yujun<sup>1,2</sup>, Wang Huihui<sup>1,2</sup>, Zhou Haibin<sup>1,2</sup>, Cheng Hongsheng<sup>1,2\*</sup>, Zhang Hongtu<sup>1,2,3</sup>, Fan Shengyuan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Energy and Environmental Protection, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Beijing 100121, China; 2. Key Laboratory of Technologies and Models for Cyclic Utilization from Agricultural Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China; 3. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Toilet waste composting is one of the main ways of rural toilet sewage resource utilization, which plays an important role in promoting the rural toilet revolution. In order to solve the problems of difficult disposal of rural toilet manure and poor environmental sanitation in rural toilets, a 110 L rural household composting reactor with negative pressure suction, spiral feeding- spiral coil aeration-membrane auxiliary heating was designed in this paper. The reactor structure included manure collection unit, aerobic fermentation unit, heat preservation unit and aeration unit. According to the principle of biological and thermodynamic, the negative pressure fan suction was used to collect manure automatically. In order to reduce the pressure loss of aeration fan, the aeration pipe was arranged Archimedean spiral structure, and the timer and aeration fan were used to realize controllable ventilation in composting process and improve composting quality. Insulation cotton membrane heating structure was adopted to achieve the heating and insulation of the reactor. The power of the reactor was 1.29 kW, the composting cycle was 15 d, the aeration frequency was 4 min per 26 min interval, the aeration rate was 1.75 L/min. The performance tests of composting reactor were conducted in September 2019. The manure and corn stalks with 1-2 cm particle size were placed in the reactor layer by layer according to the mass ratio of 4:1, and the samples were taken at 0, 3, 6, 9, 12 and 15 d after composting, respectively. The physical and chemical properties, such as temperature, water content, volatile solids, reliable content, seed germination index, the number of worm eggs and fecal coliforms of the samples during the aerobic fermentation process were tested, respectively. The results showed that the stalks and manure were layered with a strong odor during the first 2 d of aerobic fermentation. With the progress of aerobic fermentation, the manure gradually integrated into the gap between stalks and mixed with stalk. The color of the manure turned progressively dark brown and the odor faded. After 10 d of aerobic fermentation, the pile was dark brown, odorless, fluffier and moister with white filaments distributed on the surface. The high-temperature period lasted for 5 d. After 15 d of continuous fermentation, the fecal coliform bacteria was 46 MPN/g ( $\leq 100$  MPN/g), the mortality rate of worm egg was 100%, and the seed germination index was 88.4%, which met the sanitary standard of harmless manure. The annual maintenance cost was saving 16% compared to the three-slot septic tank and 44% compared to biological purification tank household toilets.

**Keywords:** composting; manures; experiments; sewage; harmless; reactor