

多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统 能量流动过程研究

杨雪梅¹, 张志萍², 王艳锦¹, 张 寰², 贺 超², 张全国^{1,2}

(1. 黄河科技学院现代农业工程研究院, 郑州 450063; 2. 河南农业大学农业部可再生能源新材料与装备重点实验室, 郑州 450002)

摘 要: 主要研究多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统的能量流动过程特征及其影响因素之间的相关关系, 依据太阳能、生物能及余热能等多能互补原理将整个农业废弃物厌氧发酵系统装置建在太阳能温室内, 优化农业废弃物厌氧发酵系统的高效低耗保温技术。实验研究结果表明, 通过温室能量流动过程的分析和计算, 沼气排出带走的热量是造成热量流失的主要部分, 占总热损失的43.09%, 污水排放携带走的热量次之, 占总热损失的36.05%, 地面传热造成的热损最少, 占总热损失的0.59%, 旨在为提高多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统高效低耗稳定运行性及其经济环境效益, 对进一步完善农业废弃物多联产资源化理论与技术具有重要的科学意义。

关键词: 农业废弃物; 厌氧发酵; 能量流动; 多能互补

中图分类号: TK6; S21

文献标识码: A

0 引 言

厌氧发酵技术是生物质废弃物实现资源化利用的有效途径之一。中国的农业生物质资源丰富, 将其用于沼气发酵对改善中国能源消费构成、缓解环境压力及降低农业废弃物管理成本具有重要意义^[1]。由于受季节温度变化的影响, 现有的沼气发酵系统大都存在着底物降解率和沼气产率低、热能损失严重、能量利用率低、发酵体系温度不稳定及工业化水平低等问题, 严重制约着生物质沼气发酵技术的发展^[2]。为保证沼气池低温季节能够正常使用, 就需要对沼气厌氧发酵池进行保温和增温措施。传统混凝土现浇沼气池散热系数较大, 其结构和施工工艺都不利于增加保温层^[3,4]。沼气科技工作者在利用煤炭、天然气等热源为沼气池加热增温方面也进行了大量研究工作, 取得了明显的增温效果, 但这些方法需使用不可再生能源, 易产生污染, 也将被逐渐淘汰^[5,6]。太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁能源, 将太阳能作为沼气增温热源必将成为沼气领域的一个研究重点^[7,8]。为提高厌氧发酵沼气产率, 进行厌氧发酵系统能量流动过程研究很有

必要, 既保障冬季能稳定运行, 又能实现发酵系统的节能降耗, 然而目前此类的相关报道较少。本文把整个农业废弃物厌氧发酵系统装置建立在1个太阳能温室中, 研制出1种多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统, 发酵原料为秸秆与粪便的混合原料, 利用太阳能温室、生物质锅炉燃烧加热、沼液加热回流搅拌以及液面下辅助供热系统等保持发酵池恒温(约30℃), 重点对发酵系统进行能量流动过程分析, 可为提高多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统高效低耗稳定运行的经济环境效益, 以及进一步完善农业废弃物多联产资源化理论与技术提供重要的科学参考。

1 多能互补型生物质农业废弃物厌氧发酵系统结构与工作原理

多能互补型沼气池主要采用太阳能加热和沼液加热回流搅拌技术以及液面下敷沼气燃烧加热的辅助供热管道和生物质锅炉加热的辅助供热管道, 其中沼气燃烧加热装置和生物质锅炉加热装置的运行根据天气变化进行, 当阴天或下雨天等无太阳辐射的天气以生物质锅炉加热为主要的增温途

径,这样解决传统型沼气池发酵温度低、产气率不高、发酵温度受环境影响较大、产气量小且不稳定等问题,并且能降低沼气工程的运行成本,提高沼气工程的使用寿命及经济效益。

多能互补型农业废弃物厌氧发酵装置生产工艺流程如图1所示,秸秆粪便经过预处理后,流入预加热发酵池。发酵原料在预加热发酵池里停留时吸收太阳辐射产生的热量,从而使料液温度升高,达到预加热的目的,然后进入发酵池发酵。

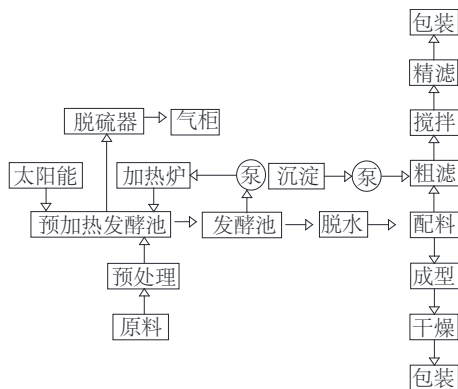


图1 多能互补型农业废弃物厌氧发酵装置
生产工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of production process for multi-energy complementary anaerobic fermentation system of agricultural residues

太阳能温室(包括钢材骨架、塑料薄膜等)设计如图2所示^[9]。一般情况下,主要依靠太阳能保温加热系统调节厌氧发酵所需的温度,实现厌氧发酵稳定进行。

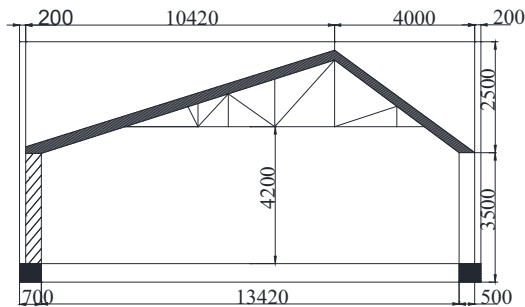


图2 太阳能温室图(单位:mm)

Fig. 2 Solar greenhouse (Unit: mm)

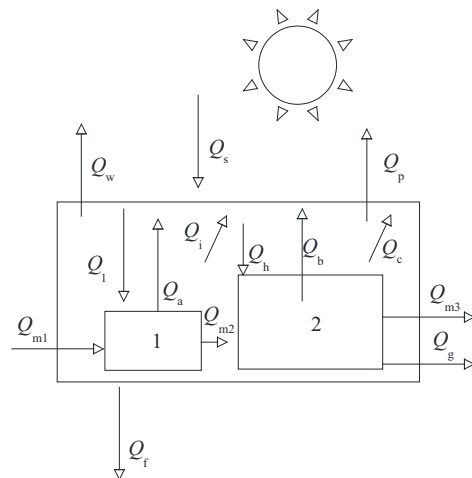
2 多能互补型发酵系统的能量流动过程分析

多能互补型农业废弃物厌氧发酵温室是一个

封闭的热力系统,它随时受到室内外诸多扰量的影响。其中,室外扰量有空气温度、湿度、太阳辐射强度、风速、风向等,室内扰量包括围护结构的散热、地面土壤的潮湿状况、缝隙漏风等^[10,11]。在这些扰量作用下,温室内的空气始终保持着动态平衡。通过对整个系统能量流动过程进行模拟研究,从理论上确定该系统的能量流动的稳定性,动态地反映温室的能量流动状况,尽可能提高太阳能和辅助能量转化利用效率,以增加温室系统的产出。通过温室能量流动过程的分析和计算,可发现系统结构是否合理和生产过程中的薄弱环节,从而提出改进措施。

2.1 厌氧发酵系统的能流图

根据能量守恒定律,输出(损失)的能量和输入(获得)的能量应相等,才能保证整个系统的温度恒定,多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统的能流如图3所示。



注:1—预加热发酵装置(即预加热发酵池);2—反应器装置(即发酵池); Q_{m1} —污水(15℃)的生物能,kJ/d; Q_i —预加热发酵装置从温室吸收的热量,kJ/d; Q_{m2} —加热后污水(20℃)的生物能,kJ/d; Q_a —预加热发酵装置的散热量,kJ/d; Q_h —补充供热量(温室供热系统热负荷),kJ/d; Q_b —反应器装置的散热量,kJ/d; Q_c —发酵微生物呼吸释放的热量,kJ/d; Q_{m3} —降解后污水(30℃)的生物能,kJ/d; Q_g —沼气生物能,kJ/d; Q_s —温室内吸收的太阳辐射热量,kJ/d; Q_r —污水输送管道的散热量,kJ/d; Q_p —渗透热损失,kJ/d; Q_e —围护结构传热(导热、辐射、对流等),kJ/d; Q_f —地面传热量,kJ/d。

图3 多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统的能流图

Fig. 3 Energy flow process for multi-energy complementary anaerobic fermentation system of agricultural residues

整个系统的能量流动过程方程式由式(1)给出:

$$Q_s + Q_{m1} + Q_1 + Q_a + Q_i + Q_h + Q_b + Q_c = Q_{m3} + Q_g + Q_p + Q_w + Q_f \quad (1)$$

分别对温室中预加热发酵系统和反应器系统进行能流分析,由于预加热发酵装置的散热量 Q_a 、反应器装置的散热量 Q_b 和发酵微生物呼吸释放的热量 Q_c 很小,一般忽略不计,经进一步计算,得式(2):

$$Q_s + 2(Q_{m1} + Q_1 + Q_h) + Q_i = 2(Q_{m3} + Q_g) + Q_p + Q_w + Q_f \quad (2)$$

在上述得失热量中,污水输送管道的散热量 Q_i 一般较小,可以忽略不计。为方便计算,能量流动过程按照有太阳光的天气状态下进行,即采暖系统的热负荷 Q_h 可简化为式(3):

$$Q_h [2(Q_{m3} + Q_g) + Q_p + Q_w + Q_f - (Q_s + 2Q_{m1} + 2Q_1)]/2 \quad (3)$$

本文中温室大棚的覆盖材料为双层玻璃纤维板,气体储存采用湿式气柜,容积 200 m³,日进料 31 m³,进料温度 $t_1=15$ °C,大棚内温度 $t_2=20$ °C,反应器温度 $t_3=30$ °C,设计用的气象资料为郑州(河南省),纬度 $L=34^{\circ}43'$ [12]。

2.1.1 污水进出温室时携带的生物能

污水进出温室时损失的生物能由式(4)给出:

$$Q_m = Q_{m3} - Q_{m1} = cm(t_3 - t_1) = cpv(t_3 - t_1) \quad (4)$$

式中, c ——污水的比热容, $c=4.2$ kJ/(kg·°C); ρ ——污水的密度, $\rho=1.0 \times 10^3$ kg/m³; v ——污水每日的进料量, $v=31$ m³/d; $t_1=15$ °C; $t_3=30$ °C。

经计算得 $Q_m \approx 1.953 \times 10^6$ kJ/d。

2.1.2 温室内吸收的太阳能辐射热量

温室内吸收的太阳辐射热量 Q_s 由式(5)给出:

$$Q_s = \tau s A_s (1 - \lambda) \quad (5)$$

式中, s ——室外水平面太阳总辐射照度, W/m²; A_s ——温室地面面积, m²; λ ——室内日照反射率, 一般约为 0.1; τ ——温室覆盖材料对太阳辐射的透过率。

按每天 8 h 的辐射量算,经计算得:

$$Q_s = \tau s A_s (1 - \lambda) \approx 5.061 \times 10^6 \text{ kJ/d}$$

其中, $\tau=0.62$; $\lambda=0.1$; $n=80$ (日期,从 1 月 1 日算起的天数,设日期为 3 月 21 日); $A_s=12 \times 30=360$ m²。

2.1.3 通过围护结构材料的传热量

通过温室围护结构材料的传热量 Q_w 由式(6)给出:

$$Q_w = \sum_j K_j A_{gj} (t_{in} - t_{out}) \quad (6)$$

式中, t_{in} ——室内温度, °C; t_{out} ——室外温度, °C; A_{gj} ——温室围护结构各部分面积, m²; K_j ——温室各部分维护结构的传热系数, W/(m²·°C)。

经计算得:

$$Q_w = \sum_j K_j A_{gj} (t_{in} - t_{out}) = 7.812 \times 10^5 \text{ kJ/d}$$

其中, $K_j=3.0$ W/(m²·°C); $t_{in}=20$ °C; $t_{out}=15$ °C; $A_{gj}=\pi \times 6 \times 5 + 16.952 \times 30 = 602.76$ m²。

2.1.4 地面传热量

地面传热情况较复杂,其传热量与地面的状况、土壤状况及其含水量等因素有关。在工程上一般采用近似计算方法,把地面沿外墙平行的方向分成 4 个计算地带,第 1 地带靠近墙角的地面面积需要计算 2 次 [13]。地面传热量 Q_f 由式(7)给出:

$$Q_f = \sum k_i A_i (t_{in} - t_{out}) \quad (7)$$

式中, k_i ——第 i 地带地面传热系数, W/(m²·K); A_i ——第 i 区面积, m²。

经计算得:

$$Q_f = \sum k_i A_i (t_{in} - t_{out}) = 3.188 \times 10^4 \text{ kJ/d}$$

其中, $K_1=0.47$; $A_1=84$ m²; $K_2=0.12$; $A_2=64$ m²; $K_3=0.23$; $A_3=72$ m²; $K_4=0.07$; $A_4=144$ m²。

2.1.5 渗透热损失

室内外空气进行热交换时,包含显热和潜热 2 部分,但在进行热负荷计算时,在运行的条件下,潜热部分所占比例很小,在工程上可忽略不计。因此渗透热损失 Q_p 由式(8)给出:

$$Q_p = 0.5 K_{\text{风速}} V N (t_{in} - t_{out}) \quad (8)$$

式中, V ——温室体积, m³; N ——每小时换气次数, h⁻¹; $K_{\text{风速}}$ ——风力因子。渗透损失随风速的增大而增大。

经计算得:

$$Q_p = 0.5 K_{\text{风速}} V N (t_{in} - t_{out}) = 3.174 \times 10^5 \text{ kJ/d}$$

其中, $V=1413$ m³; $N=1.0$; $K_{\text{风速}}=1.04$ 。

2.1.6 沼气离开温室时携带的生物能

沼气离开温室时携带的生物能由式(9)给出:

$$Q_g = 0.6 Q_{\text{CH}_4} + c_g m_g t_g = 0.6 Q_{\text{CH}_4} + c_g \rho_g v_g t_g \quad (9)$$

其中沼气中含有 60% CH₄ 和 40% CO₂, 查资料得甲烷的热值 $Q_{\text{CH}_4}=21524$ kJ/m³ [14]

$$c_g \rho_g v_g t_g = (0.6c_{g1}\rho_{g1} + 0.4c_{g2}\rho_{g2})v_g t_g \quad (10)$$

式中, c_{g1} ——CH₄离开反应器装置时的比热容, $c_{g1}=2230 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; ρ_{g1} ——CH₄离开反应器装置时的密度(30℃), $\rho_{g1}=0.72 \text{ kg}/\text{m}^3$; c_{g2} ——CO₂离开反应器装置时的比热容, $c_{g2}=1040 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; ρ_{g2} ——CO₂离开反应器装置时的密度(30℃), $\rho_{g2}=1.98 \text{ kg}/\text{m}^3$; v_g ——沼气的每日产生的体积, $v_g=0.6\times 300 \text{ m}^3/\text{d}$; $t_g=30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

经计算得: $Q_g \approx 2.334 \times 10^6 \text{ kJ}/\text{d}$ 。

2.1.7 太阳能集热器的采光面积

郑州地区3月份平均太阳辐射照度 I 约为 $17.92 \text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ [15]。

太阳集热器的采光面积 $A \approx 451 \text{ m}^2$, 则有:

$$Q_h = AI\eta_1(1 - \eta_2) \quad (11)$$

式中, I ——集热面上日平均辐射强度, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$; η_1 ——集热器全日集热效率, 取 0.55; η_2 ——管路及储水箱热损失率, 取 0.1。

2.1.8 生物质锅炉供热量

在夜间无太阳辐射热, 阴雨天太阳辐射热低时, 为了保持发酵有效地运行, 采用生物质锅炉加热管道系统来保证发酵温度, 由上述能量分析可得到生物质锅炉供热量 $Q_i=Q_h$, 即:

$$Q_i = m \cdot \eta \cdot Q_{\text{net,ar}} \quad (12)$$

式中, m ——燃料消耗量, kg ; $Q_{\text{net,ar}}$ ——生物质低位发热量, 取 $14600 \text{ kJ}/\text{kg}$; η ——热效率, 取 90%。

得出 $m=304 \text{ kg}$ 。因燃烧时间为 24 h, 可计算出锅炉的燃耗量为 $12.67 \text{ kg}/\text{h}$ 。

2.2 多能互补型农业废弃物厌氧发酵装置的运行试验

多能互补型农业废弃物厌氧发酵装置的生产性运行试验从 2017 年 7 月 12 日开始, 2017 年 11 月 13 日结束, 测试仪器设备分别为: WSS 双金属温度计、KY 型多点温度计、干湿球温度计、BSD-0.5 型湿式气体流量计、102-G 型气相色谱仪、COD 自动测定仪等 [16]。试验测试条件分别为: 进口原料秸秆、猪粪、鸡粪, 沼气池总容积 1000 m^3 , 有效容积 975 m^3 , 温室面积 800 m^2 , 供气户数 400 户, 供气管路主管网 3600 m, 分支管网 4800 m。经郑州市节能检测中心测试, 多能互补型沼气发酵装置池容产气率为 $0.75\sim 0.88 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 所产沼气的高热值为 $22.66 \text{ MJ}/\text{m}^3$, 符合沼气燃烧器具对气体质量的要求;

沼气池的各项主要性能指标均达到甚至超过设计要求, 具备推广应用的条件。

3 结 论

1) 对多能互补型农业废弃物厌氧发酵装置进行设计, 采用太阳能温室加热技术, 并采用自动控制通风采光的一体化器材, 较好地解决了农业废弃物厌氧发酵系统的加热问题, 同时采用沼液加热回流搅拌技术以及液面下敷设有辅助供热管道, 能在温度较低的冬季保持较高的发酵温度, 克服常规沼气池冬季发酵温度低的缺陷。通过温室能量流动过程的分析 and 计算, 温室系统总热损失为 $5.417 \times 10^6 \text{ kJ}/\text{d}$, 其中沼气排出带走的热量是造成热量流失的主要部分, 占总热损失的 43.09%, 污水排放携带走的热量次之, 占总热损失的 36.05%, 地面传热造成的热损最少, 占总热损失的 0.59%。天气和季节的问题是造成不同能源提供热量变化的主要原因, 在天气晴朗和平均温度较高的季节, 温室提供的热量占主要地位, 在阴雨天气和平均温度较低的季节, 生物质燃烧锅炉提供的热量占主要地位。多能互补的能量流动模式使发酵系统能保持稳定的运行, 保证了产气的稳定。

2) 多能互补型农业废弃物厌氧发酵装置池容产气率调控在 $0.75\sim 0.88 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 所产沼气的高热值为 $22.66 \text{ MJ}/\text{m}^3$, 符合沼气燃烧器具对气体质量的要求。

[参考文献]

- [1] 吴小武, 刘荣厚. 农业废弃物厌氧发酵制取沼气技术的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(26): 227—231.
- [1] Wu Xiaowu, Liu Ronghou. The research of the anaerobic fermentation of agriculture residue to produce biogas[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(26): 227—231.
- [2] 杜婷婷, 云斯宁, 朱江, 等. 生物质废弃物厌氧发酵的研究进展[J]. 中国沼气, 2016, 34(2): 46—52.
- [2] Du Tingting, Yun sining, Zhu Jiang, et al. Research progress of anaerobic fermentation of different biomass waste[J]. China Biogas, 2016, 34(2): 46—52.
- [3] Cheng Xu. Innovative approach to utilizing agro-organic wastes and Chinese ecological agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 1—6.

- [4] 张全国. 沼气技术及其应用-第四版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [4] Zhang Quanguo. Biogas technology and its application - fourth edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [5] 韩捷, 向欣, 程红胜, 等. 好氧预处理对干法沼气发酵产气量的影响及能力损失[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 246—249.
- [5] Han Jie, Xiang Xin, Cheng Hongsheng, et al. Effects of aerobic fermentation pre-treatment on dry anaerobic fermentation gas production and its energy loss[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 246—249.
- [6] 王亚静, 张弛, 高春雨, 等. 我国北方地区沼气工程冬季增温保温技术研究进展与展望[J]. 中国沼气, 2017, 35(3): 93—99.
- [6] Wang Yajing, Zhang Chi, Gao Chunyu, et al. Research progress and prospect on heat insulation and temperature increasing technology for biogas project in winter of Northern China[J]. China Biogas, 2017, 35(3): 93—99.
- [7] 寇巍, 张欢, 孙玉辉, 等. 寒冷地区沼气工程增温保温能量效益分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 708—713.
- [7] Kou Wei, Zhang Huan, Sun Yuhui, et al. Energy efficiency analysis of insulation and warming for biogas engineering in cold area[J]. Acta Energetica Sinica, 2015, 36(3): 708—713.
- [8] 王艳艳, 张旭, 赵浩亮, 等. 日光温室型秸秆沼气集中供气工程的应用分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 913—919.
- [8] Wang Yanyan, Zhang Xu, Zhao Haoliang, et al. Application analysis of centralized straw methane gas supply project in sunlight greenhouse[J]. Acta Energetica Sinica, 2017, 38(4): 913—919.
- [9] 谢建, 黄岳海. 太阳能温室与设施技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [9] Xie Jian, Huang Yuehai. Solar greenhouse and facility technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [10] 徐克生, 王琦, 王述洋, 等. 日光温室的热平衡计算[J]. 林业机械与木工设备, 2004, 32(7): 24—27.
- [10] Xu Kesheng, Wang Qi, Wang Shuyang, et al. Heat balance calculation in solar greenhouse[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2004, 32(7): 24—27.
- [11] 陈来生, 刘军. 青海东部农业区半地下式日光温室的热平衡分析[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2011, 29(5): 13—16.
- [11] Chen Laisheng, Liu Jun. Preliminary analysis to the heat balance of the semi-underground-style sunshine greenhouse in agricultural areas of East Qinghai[J]. Journal of Qinghai University: Nature Science Edition, 2011, 29(5): 13—16.
- [12] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [12] National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [13] 刘文合, 盖世臣. 太阳能辅助加热系统对日光温室内温度的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 338—341.
- [13] Liu Wenhe, Gai Shichen. Effect of solar auxiliary heating system on the temperature in solar greenhouse [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 338—341.
- [14] 熊飞龙, 朱洪光, 石惠娴, 等. 关于农村沼气集中供气工程沼气价格分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(4): 16—19.
- [14] Xiong Feilong, Zhu Hongguang, Shi Huixian, et al. Analysis on the price of the biogas for rural centralized biogas plant[J]. China Biogas, 2011, 29(4): 16—19.
- [15] 姬兴杰, 贾志军, 肖国杰. 近60年郑州市地面太阳辐射变化的影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1211—1219.
- [15] Ji Xingjie, Jia Zhijun, Xiao Guojie. Analysis of influence factors of surface solar radiation in Zhengzhou city over recent 60 years[J]. Acta Energetica Sinica, 2017, 38(5): 1211—1219.
- [16] 韩捷, 向欣, 李想. 干法发酵沼气工程无热源中温运行及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 215—219.
- [16] Han Jie, Xiang Xin, Li Xiang. Mesophilic running of dry fermentation biogas system without heating device and its effects[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 215—219.

ENERGY FLOW PROCESS FOR MULTI-ENERGY COMPLEMENTARY ANAEROBIC FERMENTATION SYSTEM OF AGRICULTURAL RESIDUES

Yang Xuemei¹, Zhang Zhiping², Wang Yanjin¹, Zhang Huan², He Chao², Zhang Quanguo^{1,2}

(1. *Institute of Agricultural Engineering, Huanghe S&T University, Zhengzhou 450063, China;*

2. *Key Laboratory of New Materials and Facilities for Rural Renewable Energy (MOA of China),*

Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the multi-energy complementary principle of solar energy, bioenergy and waste heat, the properties and internal relationship among the influence factors of energy flow inside the multi-energy complementary anaerobic fermentation system were studied. Agricultural residues were taken as substrate, the anaerobic fermentation system was built in a solar greenhouse to realize the high-efficiency and low-consumption insulation technology. Through the analysis and calculation of greenhouse energy flow process, the results showed that the main heat loss of the system was the emission of the biogas, accounting for 43.09% of the total heat loss. Heat loss from the biogas slurry discharge was 36.05%, and the heat loss caused by ground heat transfer was the least, accounting for 0.59% of the total heat loss. The analysis of energy flow process has important scientific significance for further improving the theory and technology of poly-generation of agricultural residues, and it can improve the efficiency, low consumption and stable operation of the multi-energy complementary agricultural residues anaerobic fermentation system.

Keywords: agricultural residues; anaerobic fermentation; energy flow; multi-energy complementary