

# 螺旋挤压机筛网孔径对牛粪固液分离效果的影响

王 明<sup>1</sup>, 赵胜雪<sup>2</sup>, 李旭荣<sup>1</sup>, 易宝军<sup>1</sup>, 晏水平<sup>1</sup>, 张衍林<sup>1</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070; 2. 八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

**摘 要:** 以螺旋挤压式固液分离机为研究对象, 主要考察筛网孔径(0.3、0.5和0.7 mm)对牛粪固液分离效果的影响。实验结果表明, 0.3 mm孔径筛网的固液分离效率最高, 可分离出牛粪中60.9%的固体物质, 而0.5与0.7 mm孔径筛网的分离效率分别是50.1%和41.5%; 0.3 mm分离液的甲烷产量最高为147.62 mL/(gVS), 其次为0.5 mm分离液为138.94 mL/(gVS); 固液分离过程会损失原牛粪液30%~40%的甲烷产量, 0.3 mm分离液的产气回收率不到60%, 而0.5和0.7 mm则略高, 且均约为70%。综合考虑固液分离效率、甲烷产量及产气回收率等指标, 推荐装配0.5 mm孔径筛网。

**关键词:** 沼气; 农业废弃物; 厌氧发酵; 甲烷

中图分类号: S216.4

文献标识码: A

## 0 引 言

近些年, 采用畜禽养殖废弃物发酵产沼气的研究和应用得到快速发展<sup>[1,2]</sup>。然而, 由于粪污种类及成分组成的差异, 其厌氧发酵特性也不尽相同<sup>[3]</sup>。研究证实, 牛粪中粗纤维含量占总固体部分的40%以上<sup>[4]</sup>, 而这些纤维大多不可被厌氧菌群所利用, 致使其产气效率要显著低于其他动物粪便<sup>[5]</sup>。有研究表明, 采用螺旋挤压机将牛粪中粗纤维分离出来, 可有效改善牛粪的厌氧发酵性能和发酵料液的传质传热特性<sup>[6-8]</sup>, 而分离出来的固体纤维还可用于成型燃料或牛床垫料<sup>[9]</sup>。关正军等<sup>[8]</sup>研究了牛粪经固液分离后的厌氧产气效果, 其结果表明, 在中温发酵条件下, 分离液的VS产气率提高了32.68%。Kaparaju等<sup>[10]</sup>研究了牛粪中不同粒径固体的产气效率, 发现小于0.25 mm的固体经过厌氧发酵后, 其产气效率高于粒径大于2 mm的固体颗粒一倍以上。

螺旋挤压式固液分离机的筛网是其重要组成部件之一, 筛网孔径大小会直接影响固液分离效果, 孔径过大, 分离效率太低, 而孔径过小, 则又会影响分离速率。然而, 关于筛网孔径大小对固液分

离过程影响的相关研究还未见报道。据此, 本研究以牛粪为研究对象, 分别采用0.3、0.5和0.7 mm的孔径筛网对其进行固液分离试验, 重点考察筛网不同孔径对牛粪固液分离后理化特性及产甲烷特性的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

本试验采用的牛粪取自华中农业大学兽医院牛棚, 牛粪取回后挑拣出草秆等杂物。在进行固液分离之前, 用自来水将干牛粪稀释至TS约为13%的可流动性料液, 以便可泵入固液分离机。厌氧发酵接种物取自华中农业大学农业废弃物处理实验室厌氧发酵中式装置(总体积/有效容积: 500 L/400 L; 发酵底物: 猪粪; 运行温度(35±1)℃; pH值7.58±0.15; 悬浮物固体浓度(suspend solids, SS)浓度(47.5±1.71)g/L。接种物取回后, 采用连续式喂料方式, 用牛粪(TS=8%)驯化至少15 d以上, 待产气平稳后停止驯化并储存于4℃冰箱备用。

### 1.2 固液分离试验

牛粪固液分离采用山东潍坊川泰机械生产的

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 中央高校基本科研业务专项(2662015QD034; 2015PY077)

通信作者: 张衍林(1957—), 男, 学士、教授、博士生导师, 主要从事柑橘生产机械化与生物质资源开发利用研究。zhangyl@mail.hzau.edu.cn

CT200 型固液分离机进行,其理论上处理牛粪可达 15~20 m<sup>3</sup>/h,机器标配的筛网孔径为 0.7 mm,本研究在其基础上又选配了 0.3 和 0.5 mm 孔径筛网。牛粪固液分离后,分别测定原牛粪、分离固体及分离液中干物质含量、挥发性固体、氨氮等理化参数,考察固液分离过程对牛粪中主要养分分布的影响。并用分离后固体部分中的干物质量与分离前牛粪中的干物质量的比值来表示固液分离效率,如式(1)所示。

$$A = \frac{TS_{\text{分离固体}} \times m_{\text{分离固体}}}{TS_{\text{原牛粪}} \times m_{\text{原牛粪}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $A$  ——固液分离效率,表示牛粪中固含物的分离程度,%;  $TS_{\text{分离固体}}$  ——固液分离后固体部分中干物质含量,%;  $TS_{\text{原牛粪}}$  ——固液分离前原牛粪中干物质含量,%;  $m_{\text{分离固体}}$  ——固液分离后得到的固体部分质量,kg;  $m_{\text{原牛粪}}$  ——固液分离前所用牛粪的总质量,kg。

### 1.3 沼气化潜力测试

沼气化潜力测试采用瑞典 AMPTS-II 全自动甲烷潜力测试系统,每个反应器容积为 500 mL。为了考察某种物料的最大沼气化潜力,该测试一般采用湿法批式厌氧发酵方式进行,发酵周期为 15~30 d。测试前,将原牛粪及其分离液的含固率均调至相同水平( $TS=6\%$ ),然后与接种物按照体积比 1:1 进行混和。每个反应器中装入 400 mL 混配好的料液,发酵温度设定为( $935 \pm 1$ ) °C。

研究表明,采用修正的 Gompertz 模型对实际实验获得的产气数据进行拟合并修正,可以获得更加接近于真实物料的产气潜力数据<sup>[11~13]</sup>。因此,本研究在评估牛粪及其分离液的产气潜力上,以修正的 Gompertz 模型估计数值为参考依据修正的 Gompertz 模型如式(2)所示。

$$y = A \exp \left\{ -\exp \left( \frac{\mu_m e}{A} (\lambda - t) + 1 \right) \right\} \quad (2)$$

式中,  $y$  ——第  $t$  日的物料累计产气量, mL/g;  $A$  ——物料最大产气潜力, mL/(gVS) (VS 为发酵物质中的挥发性物质);  $\mu_m$  ——最大产气速率, mL/(gVS·d);  $\lambda$  ——产气延迟时间, d;  $e$  ——自然常数, 2.718282;  $t$  ——发酵时间, d。

### 1.4 产气回收率计算

牛粪经固液分离后,主要是将液体部分用于沼

气发酵。然而,在固液分离过程中,随着不溶性固体纤维被分离的同时,不可避免地会导致一部分可溶性物质随之分离到固相中去,即会损失一部分可被生物利用的有机物质。因此,本研究中引入产气回收率这一概念来评估固液分离过程对牛粪中可被生物转化成分的损失程度。产气回收率的计算公式为:

$$RR = \frac{y_{\text{Liquid}} \times VS_{\text{Liquid}}}{y_{\text{Raw}} \times VS_{\text{Raw}}} \times (1 - A) \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $RR$  ——产气回收率,%;  $y_{\text{Liquid}}$  ——分离液甲烷产率, mL/(gVS);  $VS_{\text{Liquid}}$  ——分离液中 VS 含量(以干物质计),%;  $y_{\text{Raw}}$  ——未进行固液分离的原牛粪甲烷产率, mL/(gVS);  $VS_{\text{Raw}}$  ——原牛粪中 VS 含量(以干物质计),%;  $A$  ——固液分离效率,即分离后固体部分中干物质含量占原牛粪中总干物质含量的百分数。

### 1.5 分析方法

$TS$ 、 $VS$  采用电热鼓风干燥箱、箱式电阻炉,并根据标准方法测定<sup>[14]</sup>; pH 值采用实验室用数显酸度计 PHS-3C 测定;氨态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )采用 Foss Kjeltec 2300 全自动凯式定氮分析仪根据仪器标准分析方法测定;产甲烷潜力测试,采用 AMPTS-II 全自动甲烷测试系统进行,在该系统中,沼气产出后首先经碱液吸收掉  $\text{CO}_2$  组分,然后再由气体体积计量装置测出剩余气体的体积,即为发酵过程的甲烷产量;修正的 Gompertz 模型拟合采用 SPSS19.0 数据分析软件进行,按照式(2)所示自定义模型并进行非线性回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 牛粪固液分离效果

在牛粪固液分离实验中,螺旋挤压固液分离机先后共换装了 0.3、0.5 和 0.7 mm 3 种不同孔径的筛网。分离后共得到 3 份分离固体和 3 份分离液体样品,其理化参数如表 1 所示。从表 1 可看出,筛网孔径越小获得的分离固体越多,其中 0.3 mm 孔径筛网分离出的固体质量占原牛粪的 27.6%,其干物质分离效率可达 60% 以上,分别是 0.5 和 0.7 mm 的筛网分离效率的 1.2 和 1.5 倍。由于固体组分的分离,分离液中干物含量则由分离前的 13% 分别降至

7.2%、7.8%和 8.4%,这刚好符合湿法发酵工艺的要求<sup>[15]</sup>。而各组分分离液干物质中的 VS(74.3%~77.0%)均要较分离前牛粪的 VS(83.1%)有所降低,表明分离液总固体成分中无机盐组分比例上升,而有机物质比例下降。这是由于分离液总固体成分中无机盐组分比例上升,而有机物质比例下降,表明占原牛粪中挥发性组分的固体纤维已被大量分离出来,而可溶

性无机盐类化合物则留在液体组分当中。分离液中 TKN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均有所升高,表明固液分离过程对可溶性成分起到一定浓缩作用;牛粪固液分离后,分离液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在 TKN 中的比例呈升高趋势,分离固体中的比例则比较低,表明原牛粪中有一部分固态氨氮类化合物随分离过程进入固体部分当中,而  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  则多被保留在液体部分中。

表1 牛粪及固液分离后的理化参数

Table 1 Characteristics of dairy manure and separated samples

参数	原牛粪	分离液/mm			分离固体/mm		
		0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
处理量/kg	50	35.5	38.8	41.3	13.8	10.5	7.8
分离比/%	—	71.0	77.6	82.6	27.6	21	15.6
分离效率A/%	—	—	—	—	60.9	50.1	41.5
pH	7.46	7.52	7.49	7.45	7.37	7.41	7.30
TS/%	13.0	7.2	7.8	8.4	28.7	31.0	34.6
VS/% <sup>a</sup>	83.1	74.3	74.7	77.0	91.8	91.9	91.4
TKN/g·kg <sup>-1</sup>	2.5	2.9	2.7	2.6	1.6	1.9	2.3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/g·kg <sup>-1</sup>	0.79	1.07	0.94	0.88	0.11	0.29	0.40
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/TKN/%	31.60	36.90	34.81	33.85	6.86	15.18	17.59

注:<sup>a</sup>代表基于干物质。

2.2 产甲烷潜力测试

由于在实际生产中,牛粪经过固液分离后,主要是将液体部分进行产沼气发酵。因此本研究中,主要针对分离前原牛粪与牛粪经固液分离后获得的液体部分进行产气潜力评价。发酵过程总共进行 30 d,实际获得的累计产气过程曲线与采用修正的 Gompertz 模型拟合的产气过程曲线如图 1 所示。

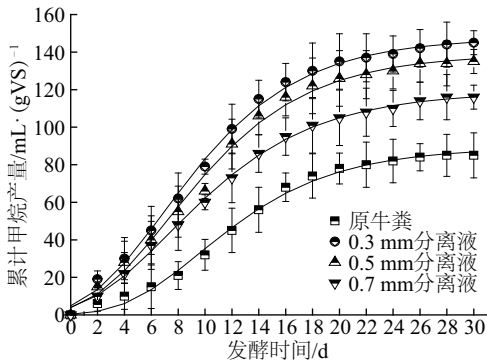


图1 实测累计产气与拟合产气曲线

Fig. 1 Curves of measured accumulated gas production and fitted gas production

从图 1 中可看出,分离液与原牛粪相比具有更高的产气效率,原牛粪、0.3、0.5 和 0.7 mm 分离液在发酵 30 d 后获得的实测甲烷产量分别为 86.8、145.2、136.4 和 116.1 mL/(gVS),且筛网孔径越小获得的分离液中每单位 VS 的甲烷化潜力就越大。这表明牛粪中的固体纤维在较短时间内很难被有效转化成甲烷,而经过固液分离后,牛粪中纤维被分离,易被微生物利用物质被浓缩。

通过修正的 Gompertz 模型分别对 4 个实验组的实测累计产气过程进行拟合,其拟合曲线(图 1 实线)与实测产气过程比较一致,且 4 组模型的决定系数  $R^2$  均在 0.99 以上(表 2),与文献报道的  $R^2$  值在 0.9830~0.9998 的范围内波动相一致<sup>[12,13]</sup>,表明模型拟合良好。如表 2 所示,原牛粪与 0.3、0.5 和 0.7 mm 分离液的最大产甲烷潜力估计值分别为 89.16、147.62、138.94 和 118.85 mL/(gVS),与实测产气量较为接近,表明通过 30 d 的发酵周期,各实验组中可被生物转化的有机物质已近乎消耗殆尽;0.3、0.5 和 0.7 mm 分离液的最大产气速率 $\mu_m$ 分别为 9.69、8.98 和 7.24 mL/((gVS)·d),均要高于原牛粪

的 5.83 mL/((gVS)·d),这表明分离液中的有机物质更易被微生物消化利用,且筛网孔径越小,获得分离液中的有机物质被微生物利用的速度越快;此外,分离液沼气发酵过程的迟滞时间更短,表明固液分离后,改善了牛粪液发酵过程中的传质转热作用,这与关正军等<sup>[8]</sup>的研究结果相一致。

表2 牛粪及分离液产甲烷动力学模拟结果

Table 2 Fitting results of methane production kinetics of raw dairy manure and separated liquids

样品	最大产甲烷潜力		最大产气速率		迟滞时间		$R^2$
	$A/\text{mL}\cdot(\text{gVS})^{-1}$		$\mu_{\text{m}}/\text{mL}\cdot(\text{gVS})^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$		$\lambda/\text{d}$		
	估计值	标准差	估计值	标准差	估计值	标准差	
原牛粪	89.16	1.88	5.83	0.31	3.95	0.39	0.9951
0.3 mm 分离液	147.62	1.84	9.69	0.36	1.29	0.28	0.9968
0.5 mm 分离液	138.94	2.42	8.98	0.45	1.58	0.37	0.9949
0.7 mm 分离液	118.85	1.27	7.24	0.21	1.33	0.22	0.9977

2.3 固液分离后的产气回收率

虽然对牛粪进行固液分离,其目的是去除不可被生物转化的固体纤维类物质,但在固液分离过程中,不可避免地会使一部分可被生物利用的物质随同被分离出去。这就会使单位质量原牛粪的最终产气量减少,从而不利于提高牛粪的沼气化利用率。因此,对分离液中产气回收率的评估,也是影响筛网孔径选择的关键因素之一。根据式(3)计算得各实验组的沼气回收率如表 3 所示。

表3 产气回收率

Table 3 Recovery rate of methane production

参数	原牛粪	0.3 mm 分离液	0.5 mm 分离液	0.7 mm 分离液
$\text{CH}_4/\text{mL}\cdot(\text{gVS})^{-1}$	89.16	147.62	138.94	118.85
$\text{VS}_{\text{raw}}/\%$	83.1	—	—	—
$\text{VS}_{\text{liquid}}/\%$	—	74.3	74.7	77.0
$A/\%$	—	60.9	50.1	41.5
$RR/\%$	—	57.9	70.0	72.3

注: \*代表基于干物质。

从表 3 可知,虽然 0.3 mm 分离液的产气潜力最大,但其沼气回收率最低,不到 60%,表明在固液分离过程中,其可被生物降解的有机成分损失了 40%以上;而 0.5 和 0.7 mm 分离液获得沼气回收率相对较高且较为接近,分别是 70.0%和 72.3%,表明分离过程中有机成分损失小于 30%。

3 结 论

1)筛网孔径越小固体分离效率越高,但分离液总固体中的 VS 比例下降,而  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量有所升高,表明固液分离过程对可溶性无机盐和氮氮化合物有一定浓缩作用。

2)分离液的 VS 产气效率均要高于原牛粪,且所用筛网孔径越小,获得的分离液产甲烷效率就越高。0.3 mm 分离液的产甲烷效率最高,可达到 147.62 mL/(gVS),约是原牛粪的 1.6 倍。

3)约有 30%~40%可被生物利用的物质在固液分离过程中损失,即进入固体部分当中。0.3 mm 孔径筛网获得的分离液,其产气回收率不到 60%,而 0.5 和 0.7 mm 则略高且相互较为接近,约为 70%。

综上所述,在选择螺旋挤压式固液分离机的筛网孔径时,除了考虑固液分离效率和 VS 产气效率之外,同时还要兼顾产气回收率,过低的产气回收率会减少原料的沼气化利用效率。根据本实验的研究结果,推荐装配 0.5 mm 孔径的筛网。

[参考文献]

[1] 吴小芳,王贤华,杨海平,等.农村生物质沼气系统的生命周期分析[J].太阳能学报,2014,35(8):1550—1555.

[1] Wu Xiaofang, Wang Xianhua, Yang haiping, et al. Life cycle assessment of rural biogas system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(8): 1550—1555.

[2] 盛 婧,孙国峰,郑建初.典型粪污处理模式下规模养猪场农牧结合规模配置研究Ⅱ.粪污直接厌氧发酵处理模式[J].中国生态农业学报,2015,23(7):



- 886—891.
- [2] Sheng Jing, Sun Guofeng, Zheng Jianchu. Pig farm-cropland configuration under typical waste treatment mode- A case study of direct anaerobic fermentation of manure[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 886—891.
- [3] 周 博, 朱振国, 周建斌, 等. 杨凌地区不同畜禽有机肥养分及重金属含量研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 714—718.
- [3] Zhou Bo, Zhu Zhenguo, Zhou Jianbin, et al. Contents of nutrients and heavy metals in the different livestock and poultry manure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(3): 714—718.
- [4] Angelidaki I, Ahring B K. Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure[J]. Water Science and Technology, 2000, 41(3): 189—194.
- [5] 韩娅新, 张成明, 陈雪兰, 等. 不同农业有机废弃物产甲烷特性比较[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 258—264.
- [5] Han Yaxin, Zhang Chengming, Chen Xuelan, et al. Methane production performance comparison of different agricultural residues [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 258—264.
- [6] Bergland W, Dinamarca C, Bakke R. Efficient biogas production from the liquid fraction of dairy manure [J]. Environmental Engineering Science, 2014, 31(11): 631—642.
- [7] 关正军, 毕兰平, 李文哲, 等. 牛粪高效厌氧发酵技术[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 123—126.
- [7] Guan Zhengjun, Bi Lanping, Li Wenzhe, et al. Technology on improving anaerobic fermentation of dairy manure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 123—126.
- [8] 关正军, 李文哲, 郑国香, 等. 固液分离对牛粪利用效果的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(13): 259—263.
- [8] Guan Zhengjun, Li Wenzhe, Zheng Guoxiang, et al. Effect of solid-liquid separation on utilization of dairy manure [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(13): 259—263.
- [9] 彭英霞, 李俊卫, 王浚峰, 等. 奶牛场固体牛粪用作卧床垫料的工艺分析[J]. 中国奶牛, 2015, (2): 47—51.
- [9] Peng Yingxia, Li Junwei, Wang Junfeng, et al. Analysis of dried solid manure used as bedding for dairy farm[J]. China Dairy Cattle, 2015, (2): 47—51.
- [10] Kaparaju P L N, Rintala J A. Effects of solid-liquid separation on recovering residual methane and nitrogen from digested dairy cow manure [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(1): 120—127.
- [11] Altaş L. Inhibitory effect of heavy metals on methane-producing anaerobic granular sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2): 1551—1556.
- [12] 张 毅, 孔晓英, 李连华, 等. 能源草厌氧发酵产气性能与动力学分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 191—196.
- [12] Zhang Yi, Kong Xiaoying, Li Lianhua, et al. Biogas production performance and dynamics of anaerobic digestion of different energy grasses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 191—196.
- [13] Lo H M, Kurniawan T A, Sillanpää M E T, et al. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(16): 6329—6335.
- [14] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] State Environmental Protection Administration, Editorial Committee for monitoring and analysis of water and wastewater. Monitoring and analysis method of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] Jha A K, Li J, Zhang L, et al. Comparison between wet and dry anaerobic digestions of cow dung under mesophilic and thermophilic conditions [J]. Science, 2013, 134(3484): 971.

## EFFECT OF MESH APERTURE OF SCREW EXTRUDER ON SOLID-LIQUID SEPARATION OF CATTLE MANURE

Wang Ming<sup>1</sup>, Zhao Shengxue<sup>2</sup>, Li Xurong<sup>1</sup>, Yi Baojun<sup>1</sup>, Yan Shuiping<sup>1</sup>, Zhang Yanlin<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Agriculture Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*; 2. *College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China*)

**Abstract:** Taking the spiral extrusion solid-liquid separator as the research object, the effect of screen mesh aperture (0.3, 0.5 and 0.7 mm) on solid-liquid separation of cattle manure was mainly investigated. The experimental results show that the maximum solid-liquid separation efficiency is obtained by using the screen mesh with aperture of 0.3 mm, 60.9% of solid material can be separated from cattle manure, while the separation efficiency of screen mesh with aperture of 0.5 and 0.7 mm are 50.1% and 41.5%, respectively. The maximum methane yield of 147.62 mL/g is obtained from the separated liquid by 0.3 mm screen mesh, and the second is 138.94 mL/g obtained from the 0.5 mm screen mesh. The solid-liquid separation process will lose 30%-40% of methane yield for raw cattle manure, the methane recovery for the 0.3mm separated liquid is less than 60%, while 0.5 and 0.7 mm are slightly higher, their methane recoveries are all around of 70%. Comprehensively considering the solid-liquid separation efficiency, methane yield and gas recovery rate, the screen mesh of 0.5mm aperture is recommended to install.

**Keywords:** biogas; agricultural wastes; anaerobic digestion; methane