doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.027

导气措施与渗滤液回流方式对干发酵产沼气影响中试*

杜　静[1]　朱德文[2]　钱玉婷[1]　陈永生[2]　陈广银[1]　常志州[1]

(1.江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心,南京 210014;2.农业部南京农业机械化研究所,南京 210014)

摘要:为了获得有利于提高干发酵产气效率的工程调控措施,以水稻秸秆和新鲜牛粪为原料,采用柔性顶膜车库式干发酵装置,在常温(环境温度 22~36℃)和发酵干物质质量分数 16% 条件下,研究导气管与渗滤液回流方式对沼气干发酵产气效果的影响。结果表明,通过在库内铺设垂向、横向导气管以及采用渗滤液回流调控措施,有助于提高发酵物料的产气效率,整个发酵周期(86 d)试验库平均容积产气率达 0.36 $m^3/(m^3 \cdot d)$(原料产气率达 155 m^3/t(以 TS 计,下同)),明显高于对照库(0.28 $m^3/(m^3 \cdot d)$,原料产气率 120 m^3/t);从发酵物料被淋洗的效果看,消化液每天回流方式比产气量下降后回流的方式好,并且建议对喷淋装置的等流量分配问题、回流泵选型与回流管布局及规格的匹配问题作进一步深入研究。

关键词:沼气　干发酵　导气措施　渗滤液喷淋方式　工程调控　车库式

中图分类号:X705;S216.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2013)S2-0143-06

Effect of Gas Guide Measurement and Leachate-recirculation on Gas Production from Dry Fermentation

Du Jing[1]　Zhu Dewen[2]　Qian Yuting[1]　Chen Yongsheng[2]　Chen Guangyin[1]　Chang Zhizhou[1]

(1. *Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center*, *Nanjing* 210014, *China*

2. *Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: In order to obtain the engineering control measures helpful to improve the dry fermentation efficiency, taking fresh cow dung and rice straws as raw materials, the effect of gas guide measurement and leachate-recirculation on gas production from dry fermentation was analyzed under the conditions of room temperature (ambient temperature of 22 ~ 36℃) and the total solid concentration of 16%. The results indicated that biogas efficiency was improved through regulation measures including laying vertical and horizontal vent-tubes. The average volume of biogas yield was up to 0.36 $m^3/(m^3 \cdot d)$ (the gas yield with raw materials was 155 m^3/t of total solid), higher than the comparison garage(0.28 $m^3/(m^3 \cdot d)$, the gas yield with raw materials was 120 m^3/t of TS) in the whole fermentation cycle(86 d). From the effect of leached with fermentation materials, it was concluded that the garage by returning spray digestive liquid every day was more effective. Furthermore, the equal flow distribution with spray device, matching of the pump selection and layout of return pipe should be in-depth researched.

Key words: Biogas　Dry fermentation　Air guide measure　Leachate spray mode　Engineering control　Garage-type

引言

20 世纪 80 年代,美国、法国、荷兰、丹麦等国家相继建立了采用干法发酵技术处理垃圾的试验工厂。欧洲在连续式和间歇式干发酵方面早已开始研究并得到了商业化运作[1~2]。车库式干发酵技术作为欧洲沼气干法发酵技术的主要类型之一,由于具有运行管理简单、运行能耗低等优点,具有

收稿日期:2013-05-04　修回日期:2013-07-02

*江苏省科技支撑计划资助项目(BE2012775、BE2010353)

作者简介:杜静,助理研究员,主要从事农业固体废弃物资源化技术研究,E-mail:dj1982111@126.com

通讯作者:常志州,研究员,主要从事农业固体废弃物资源化技术研究,E-mail:czhizhou@hotmail.com

非常好的应用前景[3]。对于农作物秸秆为主的原料,由于原料总固体含量(TS)较高,若采用湿式发酵工艺,必须添加适量水,但发酵完毕后又产生大量的沼液,产生目前大部分沼气工程存在的沼液处理问题,而采用干法发酵工艺,则可以解决上述难题。

德国于 20 世纪 90 年代起,开始进行间歇式沼气干法发酵技术及工业级装备的研发。2002 年,德国 BIOFERM 公司、BEKON 公司等厂家生产的车库型工业级装备投入实际运行。目前,欧洲每年用于处理城市垃圾的厌氧干发酵装置的总处理能力已达到 5.7×10^7 t,超过湿法工艺装置的总处理能力 4.8×10^7 t[4]。2001 ~ 2005 年间新建沼气发酵系统中,干发酵处理能力占总规模的 41%,而 2006 ~ 2010 年的新建工程中干发酵占 71%[5]。从 20 世纪 80 年代起,国内对沼气干法发酵技术进行了大量研究[6~12]。然而,由于干法厌氧发酵取样以及系统控制等难度较大,研究工作相对开展少,也不系统、不深入,特别是在工程平台上开展的干法研究则更少[13~19]。目前研究大多集中于城市垃圾处理方面[20~21],且侧重于工艺调控技术的研究,而对中试工程的调控措施研究鲜见报道。本文以柔性顶膜车库式干发酵装置为试验平台,通过导气管及渗滤液回流方式等调控措施的设计,研究适宜该工艺条件的工程调控措施:一方面将实验室模拟试验的消化液回流量及回流方式的结果在工程条件下进行验证试验;另一方面通过创新性的垂向导气管和横向导气管设计,研究导气管设计对干发酵工艺产气效果的影响,以期为示范工程运行提供相应的工程调控参数。

1 材料与方法

1.1 发酵原料

水稻秸秆取自江苏省常熟市田娘农场,经秸秆粉碎机搓揉后(长度为 10 ~ 20 cm)备用。水稻秸秆的总固体含量(Total solid,TS)为 90.49%(质量分数,下同),挥发性固体含量(Volatile solid,VS)为 78.27%(质量分数,下同),碳氮比为 54.05。新鲜牛粪取自江苏省常熟市田娘农场附近某奶牛场,TS 为 14.87%,VS 为 11.35%,碳氮比为 30.18。接种污泥取自邻近的 CSTR 反应器(发酵原料为猪粪和牛粪)中部发酵沼液,沼液的 TS 为 3.78%,VS 为 2.35%,化学需氧量(Chemical oxygen demand,COD)2 004 mg/L,pH 值 7.17。

1.2 试验装置

试验采用新型柔性顶膜车库式干发酵装置(由农业部南京农业机械化研究所与江苏省农业科学院共同研究开发),即常规车库式干发酵工艺与红泥塑料覆膜技术的结合,目的在于通过顶部进料方式弥补车库式发酵工艺对池容利用率不高的缺点,该装置的规格为:单库容积 75 m^3,共 2 个库,总容积 150 m^3,地上式钢混结构,顶部搭建钢架大棚作为保温措施。试验地点为江苏省常熟市田娘有机肥厂内,试验装置实物图及内部布局图如图 1、2 所示。

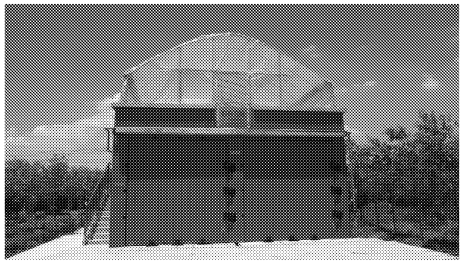


图 1 柔性顶膜车库式干发酵装置

Fig. 1 Flexible roof membranes of garage-type dry anaerobic digester

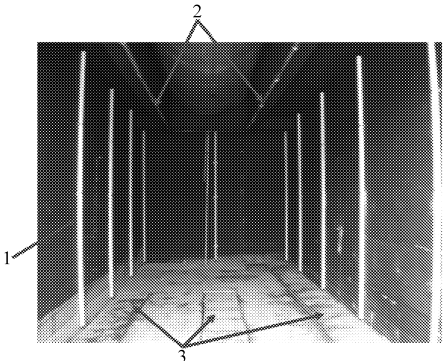


图 2 库内布局图

Fig. 2 Layout inside of garage-type dry anaerobic digester

1. 垂向导气管 2. 沼液喷淋管 3. 沼液渗滤槽及加热管道

1.3 试验设计

发酵试验于 2012 年 5 月 21 日至 8 月 15 日进行,发酵周期共计 86 d。试验设计 2 个处理,分别表示为试验库和对照库,如表 1 所示。所采用的导气管材质为 PP 给水管(冷水管型,Φ50 mm),导气管均做打孔处理(孔径 10 mm,纵向间距 100 mm,横向即以横截面四等分处各打一个孔),垂向导气管长度以库内高度减去 200 mm(即库内安装位置为离库内地面 100 mm 处),而横向导气管长度为 1 000 mm,其打孔处理方式与垂向导气管类同,每当库内物料的高度上升 1 m,放置 8 ~ 12 根横向导气管(注意横向导气管必须安放于搓揉秸秆中,防止与粪便物料直接接触而堵塞气孔);试验库和对照库的顶端均安装有沼液回流喷淋管,呈长方形,采用镀锌管材质(管径 Φ40 mm),喷淋孔孔径 Φ8 mm,每个喷淋管截面上设计 5 个喷淋孔(喷淋孔在截面上的角度分别为 0°、180°、225°、270°、315°),相邻 2 个喷淋管截面

间的距离为 200 mm。表 1 中对渗滤液回流方式及回流量的设计参照文献[22]。

表 1　试验设计

Tab. 1　Experimental design

方案设计	试验库	对照库
装料方式	库内分层装料	库内分层装料
是否安放导气管	垂向 + 横向	否
渗滤液回流方式	覆膜后 10 d 内每天回流，后续待产气量下降时回流	每天回流
渗滤液回流量	占总渗滤液的 60%	全部回流

试验开始前将挡水板放好，水稻秸秆经秸秆搓揉机（SFSC720 型，江苏正昌集团）搓揉并直接吹入库内，待平铺 40 ~ 50 cm 时，将新鲜牛粪投放入调节池，经搅拌后泵入库内并基本铺匀，继续粉碎秸秆，再添加新鲜牛粪，如此往复，装料完毕后安放物料挡板，密封好库门即可。加入部分沼液调节库内物料含水率为 75%，启动循环泵反复喷淋使物料充分吸水，然后静置堆沤 5 d 后，加入沼液调节库内物料含水率为 84%（即发酵物料 TS 为 16%），覆盖红泥塑料膜，然后依照设计方案进行运行调控。

发酵初期（以 15 d 计）间隔 1 d 采集 1 次气体样品，并在回流操作完毕后采集渗滤液样品，后续每 5 d采集 1 次气体样品和渗滤液样品，气体样品采用集气袋收集，而渗滤液样品采集后于 4℃ 下保存备用，适时带回实验室分析。

发酵完毕后对 2 个处理均分层采集沼渣约 10 kg（少量多次方式采集，层次划分为 0 ~ 50 cm，150 ~ 200 cm，每层 6 个点），取样点示意图如图 3 所示，然后在塑料薄膜上摊开混匀后，采用四分法缩分至 1 kg，带回实验室进行 VS 测定。

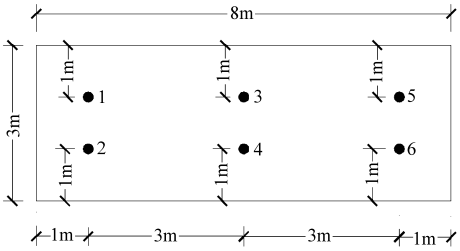


图 3　沼渣取样点示意图（黑色圆点为取样点）

Fig. 3　Diagram of sampling point with residue

1.4　分析方法

TS 的测定采用 105℃ 干燥 24 h，差重法测定；VS 的测定采用 550℃ 灼烧 4 h，差重法测定；消化液的 pH 值采用精密 pH 计（雷磁 PHS - 3C）测定；化学需氧量和可溶性化学需氧量（Soluble chemical oxygen demand，SCOD）的测定参照 GB1194—89《COD 测定重铬酸钾法》；挥发性有机酸（Volatile fat acid，VFA）各组分分析采用岛津 GC - 2014 气相色谱仪测定，使用 Stabilwax - DA 30 m × 0.53 mm × 0.25 μm 型毛细管柱，FID 检测器，检测器温度为 240℃，进样器温度为 150℃，不分流，测定组分为乙醇、乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、异丁酸和异戊酸。沼气组分测定采用 GC - 9890A 型气相色谱仪，TDX - 02B 型色谱柱（Φ4 mm × 0.5 m），以 H_2 为载气，载气流量为 30 mL/min，TCD 检测器，柱温 100℃，检测器温度 120℃，进样量 0.5 mL，外标法测定沼气样品中的 CH_4 和 CO_2 含量。

2　结果与分析

2.1　对干发酵产气特性的影响

由图 4 可知，试验库和对照库日产气量变化趋势相似，均为波动变化。试验库日产气量出现 2 个峰值，分别为第 6 天和第 25 天左右，最高峰值为 53.39 m^3，容积产气率可达 0.71 $m^3/(m^3 \cdot d)$，而对照库则无明显峰值出现，整个发酵过程中日产气量均平稳，可能与好氧堆沤预处理的效果有关，从堆沤结束后的现场可知，对照库物料表层布满灰白色菌落，且菌落偏大，而试验库则仅有零星菌落斑点出现于表层。从累计产气量分析看，试验库总固体产气量为 155 m^3/t，高出对照库 29.17%（120 m^3/t），经测算，整个发酵周期试验库平均容积产气率达 0.36 $m^3/(m^3 \cdot d)$，明显高于对照库（0.28 $m^3/(m^3 \cdot d)$），表明在装料量及装料方式等工程调控措施相同条件下，通过铺设垂向和横向导气管、增加沼液回流喷淋措施有助于提高混合物料干发酵的沼气产出。

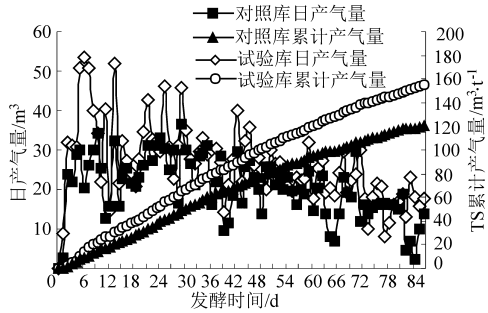


图 4　厌氧发酵过程中日产气量和累计产气量的变化

Fig. 4　Daily and cumulative biogas yields during anaerobic digestion

从图 5 试验库和对照库所产沼气的组分变化来看，变化趋势相似，但试验库在发酵第 12 天甲烷体积分数达 50% 以上，较对照库提前 3 d，而峰值出现于第 20 ~ 25 天，随后有所下降并稳定于 50% 之上，而 CO_2 含量则随沼气中甲烷含量的变化而相应变化，随后稳定于 40% 左右，由此表明沼气组分的变化与本试验中的工程调控措施无关，主要与发酵物料性状有关。

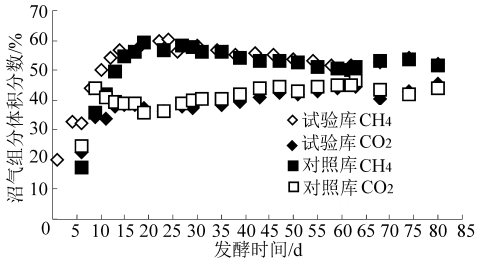


图 5 车库式干发酵所产沼气组分体积分数的变化

Fig. 5 Changes in composition of biogas from garage-type dry anaerobic digestion

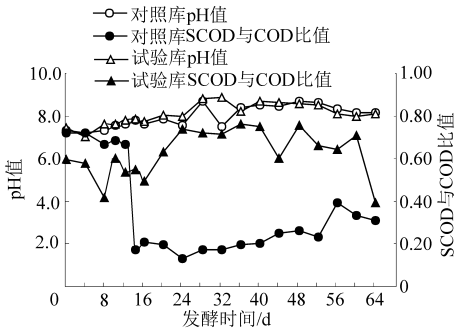


图 6 发酵液中 pH 值和 SCOD 与 COD 比值的变化

Fig. 6 Changes of pH value and SCOD/COD ratio in fermentation broth

2.2 对厌氧发酵液特性的影响

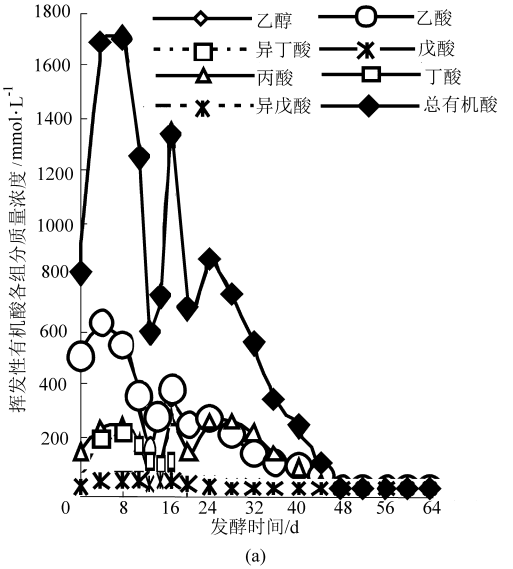
2.2.1 发酵液中 pH 值和 SCOD 与 COD 比值的变化

发酵过程中试验库和对照库发酵液的 pH 值和 SCOD 与 COD 比值的变化情况见图 6。厌氧发酵初始的 pH 值均在 7.3 ~ 7.5 之间,这与加入沼液的 pH 值较高有关。试验库和对照库的变化趋势相似,发酵初期 pH 值有所降低,随后迅速升高至 8.5 ~ 8.7,再继续下降并稳定于 8.0 左右,明显高于正常的厌氧发酵 pH 值(6.8 ~ 7.5)[23],这与装料配方中添加尿素(为调节物料碳氮比为 30)导致氨挥发现象有关,表明在粪草混合厌氧发酵中,即使所添加粪便量还不足以使混合物料的碳氮比调节至最佳(一般认为 20 ~ 30)[23],而随着发酵过程的进行,微生物的作用在消耗掉大量碳源的同时仅利用了少量的氮源,从而使发酵物料的碳氮比达到适宜水平,因此无需外加尿素等无机氮源。

厌氧发酵过程是厌氧微生物将发酵基质中的有机物通过复杂的生物化学反应转化为 CH_4 和 CO_2 的过程,其中水溶性有机物迅速被厌氧微生物分解利用,而难降解的大分子有机物则被特定微生物分解并缓慢融入发酵液中,使发酵液中的 COD 大幅增加,而以 COD 形式存在的有机物必须经厌氧微生物作用进一步降解为 SCOD 后,方可被代谢形成挥发性脂肪酸(VFA),从而获得产生 CH_4 和 CO_2 的中间产物。因此,SCOD 与 COD 比值一定程度上反映了发酵物料被厌氧微生物降解程度的好坏。从图 6 中可以看出,试验库和对照库 SCOD 与 COD 比值变化趋势各不相同,试验库表现为"降低→增加→降低→增加→降低",峰值出现于第 25 天左右,与此阶段的日产气量处于峰值正好吻合,而对照库则表现为发酵初期的 SCOD 与 COD 比值最高(达 0.72),发酵 12 d 后迅速降低,随后基本稳定于 0.2,表明对照库物料在厌氧发酵前的堆沤预处理期间,被降解为可溶态的有机物更多,导致堆沤结束时 SCOD 与 COD 比值偏高,而随着大量水溶性有机物被进一步分解利用,其 SCOD 与 COD 比值随之明显下降。

2.2.2 发酵液中挥发性有机酸的变化

发酵过程中回流喷淋操作完毕后,采集消化液样品,对挥发性有机酸进行了组分分析,如图 7 所



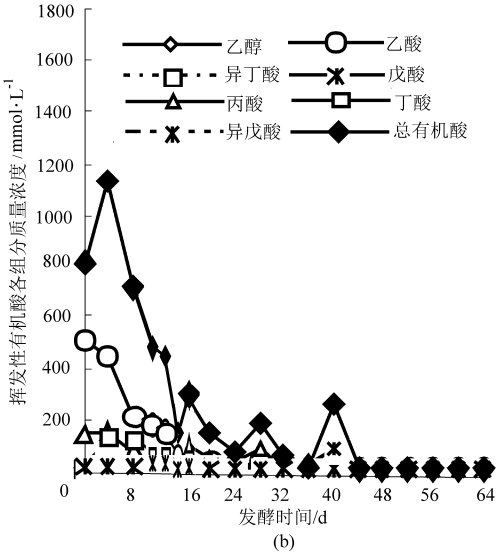


图 7 挥发性有机酸各组分变化

Fig. 7 Change of composition with volatile organic acids

(a) 试验库 (b) 对照库

示。结果显示，发酵液中存在乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸、戊酸和异戊酸，而乙醇未检测出。从总挥发性有机酸的变化来看，试验库明显高于对照库，且变化趋势与其日产气量变化趋势相呼应。从挥发性有机酸各组分变化来看，无论试验库还是对照库，均以乙酸为主要产物，丁酸和丙酸次之，这与有关的研究结果相同[24~25]。

2.3　对发酵物料降解均匀性的影响

发酵完毕后，采用少量多次方式分层采集混合物料样品，分析沼渣中的挥发性有机物含量（VS），以判断发酵系统内物料被降解的均匀性。从图 8 中上层和下层比较分析来看，对照库的上下层物料 VS 更加接近，而试验库中除 1、3、4 取样点外，其余都表现出上下层物料 VS 差异大，对各取样点综合分析来看，试验库取样点之间的差异明显大于对照库，特别是第 5、6 取样点，下层物料的 VS 明显低于上层，表明试验库的喷淋均匀性较差，可能与试验所设计的消化液喷淋装置中各喷淋孔流量不一致所造成的。因此，采用每天回流的消化液喷淋方式对物料淋洗的效果较好，并且建议对喷淋装置的等流量分配问题深入研究。

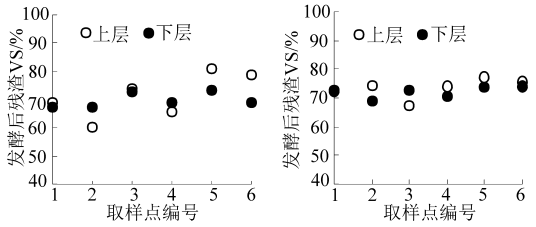


图 8　不同深度的发酵后残渣 VS 变化

Fig. 8　Change of volatile solid with fermentation residue from various depths

（a）试验库　（b）对照库

3　结论

（1）采用车库式干发酵工艺，以水稻秸秆和新鲜牛粪为原料，在常温（环境温度 22~36℃）和发酵 TS 16% 条件下，通过在库内铺设垂向、横向导气管及采用渗滤液回流调控措施，有助于提高发酵物料产气效率，整个发酵周期（86 d）试验库平均容积产气率达 0.36 $m^3/(m^3 \cdot d)$（原料产气率达 155 m^3/t），明显高于对照库（0.28 $m^3/(m^3 \cdot d)$，原料产气率 120 m^3/t）。

（2）从发酵物料被淋洗的效果来看，消化液每天回流方式比产气量下降后回流的方式好，并且建议对喷淋装置的等流量分配问题、回流泵选型与回流管布局及规格的匹配问题深入研究。

参　考　文　献

1　Weiland P. Biogas production: current state and perspectives[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(4): 849~860.

2　Verma S. Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes [D]. Columbia: Columbia University, 2002.

3　李超，卢向阳，田云，等. 城市有机垃圾车库式干发酵技术[J]. 可再生能源，2012，20(1)：113~119.
Li Chao, Lu Xiangyang, Tian Yun, et al. Garage-type dry anaerobic fermentation technology for organic fraction of municipal solid waste [J]. Renewable Energy Resources, 2012, 20(1): 113~119. (in Chinese)

4　叶小梅，常志州. 有机固体废物干法厌氧发酵技术研究综述[J]. 生态与农村环境学报，2008，24(2)：76~79.
Ye Xiaomei, Chang Zhizhou. State of arts and perspective of dry anaerobic digestion of organic solid waste [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(2): 76~79. (in Chinese)

5　Liu G T, Peng X Y, Long T R. Advance in high-solid anaerobic digesti on of organic fraction of municipal solid waste[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(4): 151~157.

6　刘晓风，廖银章，刘克鑫. 城市有机垃圾厌氧干发酵研究[J]. 太阳能学报，1995，16(2)：170~173.
Liu Xiaofeng, Liao Yinzhang, Liu Kexin. The study on anaerobic dry fermentation of municipal organic wastes[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1995, 16(2): 170~173. (in Chinese)

7　曲静霞，姜洋，何光设，等. 农业废弃物干法厌氧发酵技术的研究[J]. 可再生能源，2004(2)：40~41.
Qu Jingxia, Jiang Yang, He Guangshe, et al. Research on dry anaerobic fermentation by agricultural refuse [J]. Renewable Energy Resources, 2004 (2): 40~41. (in Chinese)

8　李想，赵立欣，韩捷，等. 农业废弃物资源化利用新方向-沼气干发酵技术[J]. 中国沼气，2006，24(4)：23~27.
Li Xiang, Zhao Lixin, Han Jie, et al. The new direction of agricultural residues utilization in China: biogas dry fermentation technology [J]. China Biogas, 2006, 24(4): 23~27. (in Chinese)

9　吴满昌，孙可伟，李如燕. 有机生活垃圾高温干式厌氧处理技术探讨[J]. 能源研究与信息，2005，21(4)：187~191.
Wu Manchang, Sun Kewei, Li Ruyan. High-temperature dry anaerobic-digestion process for treating municipal solid wastes [J]. Energy Research and Information, 2005, 21(4): 187~191. (in Chinese)

10　张光明. 高固体厌氧消化法处理城市垃圾[J]. 农村生态环境，1996，12(3)：46~49.
Zhang Guangming. High solid anaerobic digestion of municipal solid waste [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1996, 12(3): 46~49. (in Chinese)

11　冷成保，肖波，杨家宽，等. 城市生活垃圾（MSW）厌氧消化处理研究[J]. 江苏环境科技，2001，14(1)：4~6.

Leng Chengbao, Xiao Bo, Yang Jiakuan, et al. Study of municipal domestic refuse by anaerobic digestion treatment [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2001, 14(1): 4 ~ 6. (in Chinese)

12 张望,李秀金,庞云芝,等. 稻草中温干式厌氧发酵产甲烷的中试研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(5):2 075 ~ 2 079.
Zhang Wang, Li Xiujin, Pang Yunzhi, et al. A pilot study on mesophilic dry anaerobic digestion of rice straw [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 2 075 ~ 2 079. (in Chinese)

13 Borjesson P, Berglund M. Environmental systems analysis of biogas systems—part Ⅰ: fuel-cycle emissions [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(5): 469 ~ 485.

14 Liug T, Peng X Y, Long T R. Advance in high-solid anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste [J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(4): 151 ~ 157.

15 Hartmann H, Ahring B K. Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an over-view[J]. Water Science and Technology, 2006, 53(8): 7 ~ 22.

16 Guendouz J, Buffiere P, Cacho J, et al. Dry anaerobic digestion in batch mode: design and operation of a laboratory scale, completely mixed reactor[C]//11th World Congress on Anaerobic Digestion, 2007: 223 ~ 227.

17 Salminen E, Rintala J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughter house-waste—a review [J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1): 13 ~ 26.

18 Schauss K, Ratering S, Schnell S. Impact of fermented organic fertilizer on trace gas emission in organic agriculture[M]. Kassel: Kassel University Press GMBH, 2005: 589 ~ 592.

19 Moller K. Systemwirkungen Einer"Biogaswirtschaft"im Okologischen Landbau: Pflanzenbauliche Aspekte, Auswirkungen aufden N-Haushalt und auf die Spurengasemissionen [J]. Biogas Journal, 2003(1): 20 ~ 29.

20 艾平,张衍林,袁巧霞,等. 厌氧干发酵处理畜禽粪便的影响因子[J]. 华中农业大学学报,2009,28(3):377 ~ 400.
Ai Ping, Zhang Yanlin, Yuan Qiaoxia, et al. Impact factors on the anaerobic solid state fermentation of livestock manure [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(3): 377 ~ 400. (in Chinese)

21 韩捷,向欣,李想. 覆膜槽沼气规模化干法发酵技术与装备研究[J]. 农业工程学报,2008,24(10):100 ~ 104.
Han Jie, Xiang Xin, Li Xiang. Technology and equipment of large scale biogas dry fermentation in membrane covered [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 100 ~ 104. (in Chinese)

22 徐霄,叶小梅,常志州,等. 秸秆干式厌氧发酵渗滤液回流技术研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(6):1 273 ~ 1 278.
Xu Xiao, Ye Xiaomei, Chang Zhizhou, et al. Technique on recycle of leachate in biogas production from rice straw with dry anerobic digestion[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1 273 ~ 1 278. (in Chinese)

23 任南琪,王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004:30 ~ 31.

24 Lun Shiyi, Wu Jing, Chen Jian. Ananerobic waste treatment: efficient separation of the acid methane forming phase using two UASB Reactors [J]. Process Biochemistry, 1998, 30 (6): 523 ~ 529.

25 Zoetemeyer R J, Van Den Heuvel J C. PH influence on acidogenic dissimulation of glucose in an anaerobic digester [J]. Water Research, 1982, 16(3): 303 ~ 311.