

# 农作物秸秆产沼气技术研究进展

吴楠, 孔垂雪, 刘景涛, 符征鸽, 梅自力

(农业部沼气科学研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 农作物秸秆沼气技术是沼气工程中的一项重要内容, 近年来不断发展成熟。发展秸秆沼气工程不仅可以实现农业废弃物的资源化利用, 还能解决以粪便为原料的沼气工程原料不足和产气不平稳的问题。文章综述了近年来农作物秸秆沼气技术的研究进展, 主要从秸秆原料的预处理技术、厌氧消化工艺、工艺过程控制、反应器类型以及沼渣液处理等方面进行了叙述, 提出秸秆沼气的研究重点是发展高效原料预处理技术, 开发秸秆高效厌氧消化反应装置。

**关键词:** 农作物秸秆; 过程控制; 厌氧消化; 沼气; 反应装置

**中图分类号:** S216.4   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-1166(2012)04-0014-07

**Research Progress on Crop Straw Biogas Technology / WU Nan, KONG Chui-xue, LIU Jing-tao, FU Zheng-ge, MEI Zi-li / (Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China)**

**Abstract:** Crop straw biogas technology is an important content of the biogas project, which is being constantly developed in recent years. The development of crop straw biogas project could not only realize the utilization of agricultural waste, but also to solve the shortage of raw materials for manure biogas project and unstable of gas production. The article reviewed the research progress on the crop straw biogas technology in recent years at home and abroad, and expounds mainly the straw pretreatment, anaerobic digestion process, process control, digester type, and the disposal of biogas digestate. Suggestion were made for crop straw biogas digestion, which point out that effective technology of raw material pretreatment and high efficient digester should be the key for future crop biogas digestion researches.

**Key words:** crops stalk; process control; anaerobic digestion; biogas; digester

## 1 引言

中国是一个农业大国, 多种农作物的种植面积和产量都居世界首位, 每年农作物秸秆的产量达到 7 亿多吨, 相当于 3.6 亿吨标准煤所含能量, 并且随着农作物单产的不断提高, 秸秆产量也会随之不断增加<sup>[1]</sup>。传统的秸秆处理方法包括牲畜饲料、积肥还田、农村生活能源等, 但是还有相当一部分被弃置, 造成了资源的极大浪费。现阶段秸秆处理利用方法有固体成型燃料, 秸秆汽化炉处理, 秸秆沼气消化等, 其中以厌氧消化制沼气反应过程最为平和稳定, 能耗最低, 无污染, 生态和经济效益最佳<sup>[2]</sup>。以农作物秸秆为原料的沼气工程正在全国各地推广应用, 但由于使用简单改进的传统沼气消化罐, 预处理情况不够理想, 消化过程参数控制困难等问题, 使得秸秆的消化效率不高; 另外, 中高浓度的秸秆易结壳、出料困难, 所带来的连锁问题让秸秆沼气很难实现规模化应用<sup>[3]</sup>。秸秆沼气技术的进一步完善和

推广, 需要在原料的预处理和反应器的设计优化上进行更多的研究, 同时也要培养驯化消化效率更高的产甲烷菌群, 提高秸秆的处理效率<sup>[4]</sup>。

## 2 农作物秸秆沼气技术研究现状分析

目前, 国内对秸秆沼气技术的研究处于起步阶段, 截至 2011 年, 国内建成并运行的规模化秸秆沼气工程大约 10 余座, 运行时间均不足 5 年。除一体化两相厌氧消化技术外, 均未经省部级科技部门鉴定, 不同工艺技术类型也还都存在一些技术、经济及管理方面的问题。与畜禽粪便沼气工程相比, 秸秆原料的来源稳定性受季节影响较大, 直接从农民手中购入导致价格可控性较差, 加之工程能耗高等因素, 导致运行成本较高。我国秸秆沼气工程主要以集中供气为主, 可售产品为沼气和沼渣, 沼气福利性低价出售给村民作为炊事用能, 沼渣可制成有机肥还田, 但由于农民对沼渣还未完全接受, 目前基本免费提供给村民使用, 加上清洁发展机制暂未引入, 沼

收稿日期: 2012-05-07

作者简介: 吴楠(1987-), 男, 在读硕士, 主要从事生物质能源工程研究。

通讯作者: 孔垂雪, E-mail: kongchui-xue@163.com

气工程的收益不高。工程投资及运行成本高,产品收入低,造成秸秆沼气工程自负盈亏能力较差。

近年来,党中央、国务院非常重视农村沼气的建设,特别是自2008年以后增加了对秸秆沼气的扶持力度。但中央投入资金主要用于支持秸秆沼气工程建设,包括土建、设备投资,很少有针对工程后期运行和终端产品的政策和奖励机制,单靠沼气工程产品的市场盈利很难调动业主的积极性,存在未达负荷运行甚至停运的秸秆沼气工程<sup>[5]</sup>。

经过对现有沼气工程的调查发现,目前国内的秸秆厌氧消化装置都是在传统装置的基础上稍加改进形成的,不能满足秸秆高效厌氧消化需要的条件要求<sup>[6]</sup>,例如:由CSTR型消化罐改进的竖向推流式秸秆消化罐,采用回流沼液水力搅拌,一种采取上进料、下出料的方式,秸秆由重力作用向下推动,使消化过的原料被压到底部出料;另一种是上出料、下进料,原理同第一种相反,借助秸秆的浮力,漂浮在上部的原料阻止新加入原料上升到气液交界面,始终与活性污泥接触,达到充分消化的目的,消化过的原料在上部出料。但是两种工艺类型均存在原料在气液交界面浮渣结壳的问题,并且出料操作困难,虽然降低TS浓度可以减小出料难度,但同时降低了消化的效率,不能在大型工程中采用;另外采取搅拌也不能达到均匀混合的目的,因为水力搅拌不能打破结壳,而机械搅拌时秸秆会缠绕住扇叶,效果同样不理想<sup>[7]</sup>。

国外秸秆沼气工艺也在快速的发展当中,德国秸秆原料以青贮为主,采取序批式进出料方式,多个装置并联,解决产气不连续的问题,消化完全后,集中出料,连续湿式消化占主导地位,干消化仅仅在进行小规模实验示范<sup>[8]</sup>;大约90%沼气工程采用立式消化罐(完全混合式),装置容积800 m<sup>3</sup>~1500 m<sup>3</sup>,卧式消化罐(推流式工艺)主要用于小工程或高固体含量的原料,约占沼气工程的4%,主要在德国东南部地区,该地区的养殖场规模小,典型容积为150 m<sup>3</sup>~600 m<sup>3</sup>。在奥地利,采用完全混合式工艺的立式消化罐沼气工程占84%左右,标准容积500 m<sup>3</sup>~2000 m<sup>3</sup>,卧式消化罐容积为50 m<sup>3</sup>和150 m<sup>3</sup>。由于在高固体条件下可以获得良好的混合,往往推流式作为第一级,完全混合式作为第二级;完全混合式与推流式组合工艺占16%左右,而单独采用推流式工艺在奥地利基本没有<sup>[9]</sup>。

秸秆沼气工程无论采用何种工艺类型,都要经过秸秆原料的预处理、厌氧消化、进出料管理和沼渣

液的处理等环节,为达到提高秸秆产沼气的生产效率,目前国内外学者做了以下研究和探索。

## 2.1 预处理工艺

农作物秸秆的主要成分是纤维素、半纤维素和木质素等,这三种物质形成了高结晶度和聚合度的晶体结构,自然条件下很难打破晶体结构,加大了微生物分解利用的难度。如果秸秆在自然状态下进行厌氧发酵,会出现启动时间长、产气率低、浮渣结壳等问题<sup>[5,10]</sup>,因此根据厌氧消化过程对原料的要求,秸秆沼气工程应该采取适当的预处理,分为物理方法、化学方法和生物方法,经处理后,产气效率和原料利用率有显著提高<sup>[11]</sup>。

物理法目前应用较多的有机加工法和蒸汽爆破法,目的都是利用物理条件改变秸秆物理形态和内部结构,使其便于微生物的处理,通过物理法处理,秸秆的产气率会有不同程度的提高<sup>[12]</sup>。Svensson<sup>[13]</sup>研究发现,对稻草进行厌氧消化,粉碎的比未经处理的产气率提高17%;而Clarkson<sup>[14]</sup>也发现,粉碎的秸秆产气量比未经处理的提高了20%;Zhang<sup>[15]</sup>采用研磨和切碎方式处理水稻秸秆,发现研磨效果更好,相比切碎提高产气量12.5%。但是物理法的处理效果极其有限,并且工作强度很大,能耗很高,对设备要求严格,耗费大量成本,所以常常作为预处理的第一步与其他处理方法结合使用。

化学处理法包括酸处理、碱处理和氧化剂处理。酸处理是对纤维素原料进行水解,而碱处理可直接通过生化反应将木质素去除,从而打开纤维素、半纤维素和木质素的晶体结构,使得纤维素和半纤维素能更好地被利用。目前常用的试剂有NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, KOH, 氨, 氨水和尿素<sup>[10~12]</sup>。Gunaseelna<sup>[16]</sup>用浓度为10%的盐酸对水稻秸秆进行处理,发现秸秆厌氧消化的产沼气和甲烷的含量分别提高了25%和67%。艾平<sup>[17]</sup>等研究了不同浓度Ca(OH)<sub>2</sub>处理对稻秸厌氧消化的影响,发现采用9 g·L<sup>-1</sup>处理五天,COD可增加75.9%。张庭婷<sup>[18]</sup>用NaOH, 稀H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 稀HCl, 氨水四种试剂对木薯秸秆进行预处理产沼气实验:经过碱法预处理的木薯秸秆厌氧消化后的累计产气量最高,比未处理产气量提高了21.56%,明显优于氨水处理和两种酸处理。但是化学法处理会对环境产生二次污染,酸和碱浓度越高,污染就越严重。

生物法预处理是通过具有生物质降解能力的好氧微生物菌群,将秸秆中的木质素分解,从而使秸秆更利于厌氧消化菌群的分解和利用。与化学法预处

理和物理法预处理相比,生物法具有反应温和、能耗较小,设备简单,不会带来环境污染等优点,因此也成为近年来研究的热点<sup>[10~12]</sup>。目前研究较多的是白腐真菌、黄孢原毛平革菌、变色栓菌、芽孢杆菌和某些酵母菌等<sup>[19]</sup>,Yang Dongyan<sup>[20]</sup>等研究了经白腐真菌处理玉米秸秆,一定程度地提高了玉米秸秆的产气量;边义<sup>[21]</sup>等采用绿秸灵、酵素菌、石灰水和速腐剂处理玉米秸秆堆沤5天,发现经酵母菌预处理后经干发酵(TS 20%)产气率为 $455.7 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ,纤维素降解率最高,为56.9%,其次为绿秸灵、速腐剂和石灰水。

其他预处理方法还包括超声波与稀碱法联合预处理法和青贮预处理法,均能对秸秆的厌氧消化效率和产气能力有良好的提高效果。秸秆的预处理是影响秸秆沼气运行效果的重要环节,良好的预处理方式会提高秸秆的降解率和产气量。目前大都采用几种方法共同作用的方式处理秸秆原料,虽然在一定程度上提高了处理效率,但是还有很大的提升和改进空间,开发高效微生物菌剂和选择最佳的预处理方式组合,是推动秸秆沼气工程发展的重要环节<sup>[22]</sup>。

## 2.2 厌氧消化工艺过程

厌氧消化工艺过程是维持厌氧消化微生物生长繁殖和代谢有机物质的过程。1979年,Bryant<sup>[23]</sup>等人根据微生物的生理种群提出了厌氧消化的三阶段理论,每个阶段都有其独特的微生物类群。参与第一阶段的微生物,大多数为专性厌氧菌,也有不少兼性厌氧菌,统称水解与消化细菌;参与第二阶段的微生物是产氢产乙酸菌以及同型乙酸菌等一群极为重要的菌群;参与第三阶段的微生物是产甲烷菌,属于绝对的厌氧菌。三个阶段是瞬时连续发生的,在空间位置和生化反应过程中都有密切的合作。

秸秆的厌氧消化也遵循以上三个过程,但是秸秆不同于粪便等其他有机废弃物原料,秸秆的有机组成包括纤维素、半纤维素、木质素、果胶和蜡质等,质地轻、体积大、流动性差,难以分解,有效氮、磷成分少,不利于微生物消化利用<sup>[24]</sup>。基于秸秆自身物理化学性质导致的厌氧消化处理效果不理想的问题,技术人员开发了多种秸秆沼气工艺模式,下文将主要介绍根据秸秆的浓度和形态划分的三种工艺类型。

现有秸秆沼气技术和工程应用的工艺类型根据秸秆物料在反应器中的形态,大致可分为液态消化、固态消化和固-液两相厌氧消化工艺<sup>[5]</sup>。

液态消化工艺以完全混合式和自载体生物膜厌氧消化工艺为主。这两种工艺比较成熟,发酵原料

固体含量在8%左右,都是在厌氧消化器内安装有搅拌装置,通过适当搅拌改善厌氧菌群与物料接触和传质传热等效果,从而提高沼气生产效率的厌氧消化技术,在国内外应用广泛,发展成熟<sup>[5,8]</sup>。液态消化反应器为立式或卧式,通常采用序批式或连续式进出料方式,沼液回流循环使用,减少了沼液外排。但是由于水分含量高,需要很大体积的厌氧消化装置,同时需要加温和保温装置,并且搅拌能耗较高<sup>[25]</sup>。

固态消化是指秸秆在无流动水的条件下进行厌氧消化,可以将TS提高到35%左右,但TS在20%左右即可较大程度提高池容产气率和秸秆的处理效果,比较适宜<sup>[26]</sup>,而且沼渣可以直接作为肥料使用,不需脱水等其他处理。根据投料方式不同可分为序批式和连续式工艺<sup>[5,27]</sup>,由于秸秆固体浓度高,进出料困难,因此我国秸秆沼气工程以序批式投料为主,主要有覆膜槽式、车库(集装箱)式和红泥塑料厌氧消化工艺。

固-液两相消化工艺通过将固相和液相发酵原料分在不同区域,以达到产酸相和产甲烷相分离,并利用沼液回流实现循环接种<sup>[28]</sup>。方法是将水解、产酸和产甲烷三个阶段分离,分别在不同的消化罐中处理,将秸秆前两个阶段产生的混合液体进行单独的厌氧产甲烷消化,产酸过后的秸秆分批出料,液体回流再利用,这种方式避免了一体化消化罐的进出料难问题,也不会产生结壳,提高了产沼气速率<sup>[29]</sup>。

## 2.3 厌氧消化工艺参数

现在秸秆沼气工程多采用物理、化学、生物方法相结合的复合技术进行原料的预处理,以提高秸秆的厌氧消化产沼气的效率,大部分工程采用效率较低的液态消化工艺,使得秸秆沼气的利用效率大大降低。工作人员在研究完善固态消化和固-液两相消化工艺的同时,在工程运行上对影响微生物高效利用秸秆产沼气的各个因素进行了研究<sup>[30]</sup>。影响厌氧微生物生长和代谢的因素也是限制秸秆厌氧消化过程的主要因素,包括温度,厌氧条件,pH,碳氮比,微生物营养,生物固体停留时间,负荷,搅拌和混合,有毒物质和消化液的缓冲作用等<sup>[31]</sup>。

接种物的研究主要是接种物种类和接种物数量的研究。一般认为接种量应为料液的10%~30%,韩天喜<sup>[32]</sup>发现厌氧消化完全启动需要接种量15.7%,增加到62.9%和92%能提高产气量,但接种量为31%时,消化效率较高。南艳艳<sup>[33]</sup>等也发现接种量与干物质质量比为1:1.3时产气量随着接种量的增大而升高特别明显,超过1:1.5产气量增

加幅度降低,故选用干物质质量比 1:1.3~1:1.5 的接种量比较合适。

一般认为碳氮比以 20~30:1 最为适宜厌氧消化过程的进行<sup>[34]</sup>。农作物秸秆的碳氮比大都在 50:1 以上,远远高于适宜范围。目前调节碳氮比主要有两种方式。一种是添加有机氮源,即牲畜粪便,也就是所谓的共消化;但牲畜粪便的添加会影响秸秆消化潜力的测定;另一种就是添加尿素、氨水等无机氮源调节碳氮比<sup>[35]</sup>。高礼安,邓功成<sup>[36]</sup>等人经过对不同 C/N 值对消化启动、沼气产量和产气均匀性的实验研究结果表明:在常温条件下,实验设计的几种 C/N 消化物都能启动,而且启动迅速,产气量以 C/N 值为 23:1 的最高,18:1 次之,43:1 再次之;C/N 值为 33:1 时在 60 天的产气周期里,总产气率和产气量最高;C/N 值为 28:1,33:1,38:1 时均能维持比较均匀的产气量。在常温下,适当提高沼气消化的 C/N,不影响沼气消化的启动,并有利于提高产气量和维持较高水平的产气均匀性。

厌氧消化中,pH 不仅影响微生物内各种酶的活性,还能影响细胞的结构和形态,甚至决定消化的成败。水解产酸菌的适合 pH 较宽,在 5.5~8.5 之间,产甲烷菌的 pH 范围则在 6.6~7.5 之间,若 pH 低于 6.1 或高于 8.3 的时候,产甲烷菌可能会丧失活性,这也是厌氧消化中需要控制的 pH 范围<sup>[37]</sup>。王永泽<sup>[38]</sup>等在确定了影响水稻秸秆消化起始 pH 值、接种物与原料质量比、添加剂种类和剂量等,经过试验得出最佳消化工艺为:接种物与原料质量比为 1.28:1,pH 值为 7.35,活性炭作为吸附剂的添加量为 11.48 g·L<sup>-1</sup>。

南艳艳<sup>[33]</sup>等比较了水稻秸秆的中温、高温和常温消化,其中高温消化比中温消化每克产气量仅高 5 mL,中高温消化的每克产气量远高于常温消化(约为 20 mL~30 mL)。工程中考虑到能耗和实际效果,多采用中温发酵。楚莉莉<sup>[39]</sup>等采用自行设计的可控性恒温发酵装置,选取了小麦秸秆、水稻秸秆和玉米秸秆 3 种单一原料为发酵原料,以 5℃ 为一个步长,设定了 7 个恒定温度 10℃,15℃,20℃,25℃,30℃,35℃,40℃ 下的发酵方案;试验结果表明 7 个温度梯度下,3 种原料均能正常发酵产生沼气,原料产气率随温度上升而上升,40℃ 的产气效率最好,10℃ 下产气效率最差。

沼气工程的负荷常用容积有机负荷表示,即单位体积沼气装置每天所承受的有机物的数量,通常以 kgCOD·m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup> 为单位。容积负荷是沼气工程

设计和运行的重要参数,其大小主要由厌氧活性污泥的数量和活性决定。沼气工程的负荷通常用发酵原料浓度来体现,适宜的干物质浓度为 4%~10%,即发酵原料含水量为 90%~96%。若水量过多,发酵料液中干物质含量少,单位体积的产气量减少;如果水量过少,发酵料液太浓,容易积累有机酸,使沼气发酵受阻,影响沼气产量。沼气工程启动料液浓度一般调控在 6% 以下,运行浓度随温度变化在 5%~10% 范围内调控<sup>[40]</sup>。

通过搅拌可实现微生物和底物的有效接触,促进传质、传热效率,从而提高沼气消化效率<sup>[41]</sup>。沼气工程运行后,经常搅拌沼气发酵装置内的发酵原料,能使原料与产沼气微生物(即活性污泥)充分接触,促进沼气微生物的新陈代谢,使其迅速生长繁殖,提高产气率;可以打破上层结壳,使中、下层所产生的附着在发酵原料上的沼气,由小气泡聚积成大气泡,并上升到气箱内;可以使沼气微生物的生活环境不断更新,有利于它们获得新的养料。目前,沼气工程中应用较多的是以加压沼气为主的气体循环搅拌、泵循环沼液的水力搅拌、机械运动的机械搅拌。由于种植业有机废弃物的特性,机械搅拌易缠绕,沼气循环搅拌多用于可溶性废水中,故多采用水力回流搅拌,其搅拌方式有三种:一是通过手动回流搅拌装置,进行强制回流搅拌;二是通过在出料池设置小型污泥泵,依靠电力将发酵料液回流进发酵间,进行强制搅拌;三是采用生物能气动搅拌和旋动搅拌装置,利用产气和用气的动力,自动搅拌池内发酵原料<sup>[40~43]</sup>。

#### 2.4 进出料及后续处理

目前,秸秆制沼气的进出料方式分为两种,分别是上进料、下出料的传统模式和下进料、上出料的新型模式。在原料浓度较低时,两种进出料方式都能顺畅地完成进出料,但是当原料浓度较高时,上进料、下出料方式就不能很好地完成进出料,而下进料、上出料方式则能比较好的完成。由于农作物秸秆的密度低,易漂浮在表层并结壳,不能很好地与活性污泥接触,导致厌氧消化的效率低,产气量少,直接导致出料难。下进料、上出料方式可以有效缓解以上的问题,下进料时秸秆从底部漂浮到表面的过程能够更好的和活性污泥接触,增加了厌氧消化的机会,菌群能更好地利用和分解秸秆,提高了厌氧消化的效率,是一种在秸秆沼气工程中应用比较广泛的进出料方式,但是仍存在一些需要改进的问题,比如说出料保持气密性和浮渣的处理<sup>[44]</sup>。

出料之后,料液一般要经过固液分离机进行分

离,液体回流到与处理阶段的生物处理系统中,然后一起进入消化罐再利用,固体则作为肥料使用。另外的处理方式是好氧处理,设置沼渣液储存池,进行曝气处理,让其在有氧条件下被好氧微生物进一步处理,增强肥效<sup>[45]</sup>。

德国沼气工程都建有沼渣、沼液储存池,储存的沼渣、沼液经过6个月的存放后作为农作物肥料利用。根据发酵原料的种类不同,要求对沼渣、沼液进行消毒杀菌,沼渣、沼液中含有的各种重金属含量不允许超过法律规定的最大值。德国法律还规定,自2009年1月1日起运行的沼气工程,沼渣、沼液储存池必须加盖。经过有关部门调查,目前德国有48%的沼气工程中的沼液、沼渣储存池是敞开式的。敞开式储存池会导致沼渣、沼液中的氮素通过好氧分解而流失。储存池加盖后还能改善卫生环境,防止由于长期堆放产生的异味逸出<sup>[8,46]</sup>。

### 3 农作物秸秆沼气技术研究成果

针对目前农作物秸秆厌氧打搅过程中原料转化率低、消化周期长、预处理过程繁琐、进出料难等问题,白娜<sup>[47]</sup>在对秸秆沼气的研究中,不添加任何物质,进行纯秸秆消化,对玉米、小麦和油菜秸秆的产气潜力进行实验探索,研究不同消化工艺参数对秸秆消化的影响。主要结论如下:按原料种类,消化潜力从玉米、小麦到油菜秸秆依次降低。对于接种量来说,产气量随着接种量的增加而非线性增加,35%接种量最适宜;就消化温度而言,常温消化单位TS产气率不高,中高温时产气相差不大,从经济效益考虑,推荐使用35℃以上的消化温度<sup>[48]</sup>,30天的滞留期。另外粉碎粒度不同,原料在厌氧消化罐中的分布形态不同。当粉碎粒度为10 mm时,原料发生分层现象;当原料粒度达到1.7 mm时,原料能与消化液充分混合,形成较为均匀的消化介质。

另外陈小华,朱洪光<sup>[49]</sup>提出:消化过程的相分离,对于秸秆来说,水解反应是限制沼气消化效率的主要环节,低pH有利于秸秆的水解,却不利于甲烷菌的产甲烷反应的进行,在传统的沼气消化工艺中,秸秆消化的3阶段在一个反应器中,很难实现pH的分阶段控制。把水解酸化和产甲烷过程分别设定在不同的反应器中的两相反应工艺在一定程度上提高了消化效率,但真正实现相分离非常困难,两相分离技术给未来秸秆沼气的发展提供了新的思路<sup>[50]</sup>。

宋永民,陈洪章<sup>[51]</sup>在汽爆秸秆高温固态消化沼气的研究中发现,秸秆经过蒸汽爆破预处理后,在

50℃的高温条件下进行固态消化沼气,甲烷产量达到138.2 mL·g<sup>-1</sup>TS。通过单因素实验优化,确定最佳消化条件为:固液比1:7,pH值7.5,接种量35%,NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>添加量0.04 g·g<sup>-1</sup>干汽爆秸秆,纤维素酶用量30 IU·g<sup>-1</sup>干汽爆秸秆,消化温度50℃。在上述实验条件下,汽爆秸秆的甲烷产量提高至153.0 mL·g<sup>-1</sup>TS,是未汽爆秸秆的2.9倍。消化后秸秆纤维素和半纤维素的降解率分别为59.86%和67.22%。因此,蒸汽爆破预处理有助于提高秸秆的产气量和降解率。高温固态消化不仅可以缩短消化延迟期,提高产气效率,而且消化结束后不会产生大量废液,对环境友好。

王永泽<sup>[52]</sup>等在单因素实验的基础上,采用Box-Behnken设计,选取接种物与原料质量比、发酵起始pH值和活性炭添加量为工艺考察参数,对水稻秸秆发酵产沼气工艺进行了响应面法优化。确定水稻秸秆厌氧发酵产沼气的最佳工艺条件为:接种物与原料质量比1.28:1,起始pH值7.35,活性炭添加量11.48 g·L<sup>-1</sup>,此条件下每50 g水稻秸秆的沼气平均产气量为5833.2 mL,与优化前相比提高了34.4%。

R H Zhang<sup>[53]</sup>使用一种高效厌氧消化系统,即利用APS系统把稻草转化为沼气。这种厌氧消化系统运行比较稳定,是一种高效的固体废物厌氧消化装置。此系统中,把NH<sub>3</sub>添加到稻草消化液中,作为N源的补充。在稻草进行中温35℃厌氧消化前,他们尝试使用物理(机械)、加热和化学(氨水)预处理。将秸秆切成10 mm,110℃下热处理和2%氨水化学预处理后,在0.471 g<sup>-1</sup>·VS<sup>-1</sup>负荷率下,其产气量高于未经任何预处理秸秆厌氧消化产气量的17.5%。

另外H W Yu<sup>[54]</sup>开发了小规模两段生物消化系统,该技术的开发证实了从茅草废物中回收甲烷的可行性,该系统由固体相和甲烷相组成。试验结果表明,6个月后,废物中67%的挥发性固体被转化为可溶COD,此系统每千克茅草产甲烷0.15 m<sup>3</sup>,产气中甲烷含量为71%。

### 4 结语

秸秆沼气工程能充分利用农村秸秆资源,改善农村环境,同时为农村居民提供高品质的清洁能源,正受到全国范围的广泛重视。秸秆沼气工程能否高效稳定的运行,有很多限制因素,在这种情况下,改进现有工艺模式,开发更加优化高效的反应装置和工艺模式,是提高秸秆厌氧消化效率的有效手段<sup>[55]</sup>,目前实验室研究阶段的成果还需要在工程应

用中进一步实践检验,已经开发出了高效的预处理菌剂和新型的厌氧消化反应器,并对沼渣液进行处理生产有机肥,在这些研究的基础上,为秸秆沼气工程的大规模推广应用奠定了坚实的基础,相信会对秸秆沼气工程的推广应用起到积极作用。

#### 参考文献:

- [1] 谢光辉,王晓玉,任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报,2010,26(7):12-15.
- [2] 韩鲁佳,闫巧娟. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报,2002,18(03).
- [3] 李佩胜,王宏志. 关于科学发展秸秆沼气项目的探讨[J]. 节能,2008(07).
- [4] 张荣成,李秀金. 作物秸秆能源转化技术研究进展[J]. 现代化工,2005,25(6):14-17.
- [5] 陈羚,赵立欣,等. 我国秸秆沼气工程发展现状与趋势[J]. 可再生能源,2010,28(3).
- [6] 李连华,马隆龙,袁振宏,刘小凤,廖翠萍. 农作物秸秆的厌氧消化试验研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(1):335-338.
- [7] 石磊,赵由才,柴晓丽. 我国农作物秸秆的综合利用技术进展[J]. 中国沼气,2005,23(2):11-19.
- [8] 李子富,余敏娜,范晓琳. 德国沼气工程现状分析[J]. 可再生能源,2010,28(4).
- [9] 邓良伟,陈子爱. 欧洲沼气工程发展现状[J]. 中国沼气,2007,25(5):23-31.
- [10] 黄如一,何万宁,唐和建,等. 秸秆预处理产沼气对比试验[J]. 中国沼气,2008,26(4).
- [11] 刘睿,万楚筠,黄倩,等. 秸秆预处理技术存在的问题与发展前景[J]. 环境科学与技术,2009,32(5):88-91.
- [12] 焦翔翔,靳红燕,王明明. 我国秸秆沼气预处理技术的研究及应用进展[J]. 中国沼气,2011,29(1).
- [13] Lars Mattias Svensson, Lovisa Bjornsson, BoMattiasson. Enhancing performance in anaerobic high-solids stratified bed digesters by straw bed implementation [J]. Biore-source Technology, 2005.
- [14] Clarkson W W, Xiao W. Bench-scale anaerobic bioconversion of new sprint and office paper [J]. Water Science & Technology, 2000, 41(3): 93-100.
- [15] Zhang Ruihong, Zhang Zhiqin. Biogasification of rice straw with anaerobic-phased solids digester system [J]. Bioresource Technology, 1999, 68: 235-245.
- [16] Gunaeslna N. Effect of inoculums upstate ratio and pre-treatments on methane yield from path name [J]. Bio-mass and Bio-energy, 1995, 8(1): 39-44.
- [17] 艾平,张衍林,盛凯,等. 稻秸厌氧发酵产沼气预处理[J]. 农业工程学报,2010,26(7):266-271.
- [18] 张庭婷,李佳薇,王双飞. 几种生物质原料厌氧发酵制取沼气能量转换效率的比较[J]. 造纸科学与技术, 2009,28(5).
- [19] 万楚筠,黄凤洪,刘睿,等. 微生物预处理秸秆对提高沼气产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26:267-271.
- [20] Yang Dongyan, Li Xiujin. Improving biogas production of corn stalk through chemical and biological pretreatment: a preliminary comparison study [J]. Transactions of the CASE, 2003,1(5): 209-212.
- [21] 边义,刘庆玉,李金洋. 玉米秸秆干发酵制取沼气的试验[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(3):440-442.
- [22] 刘丹娅,张文阳,张辉. 不同预处理条件对小麦秸秆厌氧消化的影响[J]. 工业安全与环保,2008,34(11).
- [23] 李世密,魏雅洁,等. 秸秆类木质纤维素原料厌氧消化产沼气研究[J]. 可再生能源,2008,26(01).
- [24] 姚梦吟,刘晓风,袁月祥,等. 一株选择性降解木质素的筛选及其对玉米秸秆的降解[J]. 应用与环境生物学报,2009,15(3):427-431.
- [25] 李秀金. 山东省德州市秸秆沼气集中供气示范工程运行模式和管理经验[J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2010,4:6-9,13.
- [26] 张光明. 城市垃圾厌氧消化产酸阶段研究[J]. 重庆环境科学,1998,20(1):35-37.
- [27] 李存斌,罗光辉,郭英洲. 间歇式沼气干法发酵的研究[J]. 农机化研究,2010,3:225-227.
- [28] 朱瑾,叶小梅. 不同因素对秸秆两相厌氧消化的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(增1).
- [29] W Parawira, J S Read, B. Mattiasson, et al. Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion [J]. Bio-mass and Bio-energy, 2008,32:44-50.
- [30] 刘丹娅,张文阳,张辉. 不同预处理条件对小麦秸秆厌氧消化的影响[J]. 工业安全与环保,2008,34(11).
- [31] 胡雪竹,高宛莉,等. 秸秆厌氧消化条件优化的研究[J]. 天津农业科学,2011,17(4):102-112.
- [32] 韩天喜,张在启,等. 溢流式小型高效家用沼气池的研究[J]. 中国沼气,1990,8(3).
- [33] 南艳艳,邹华,等. 秸秆厌氧发酵产沼气的初步研究[J]. 食品与生物技术学报,2007,26(6).
- [34] 徐曾符. 沼气工艺学[M]. 北京: 农业出版社,1981:71.
- [35] 陈斯,熊承永. 再谈秸秆沼气发酵的碳氮比[J]. 中国沼气,2009,27(2).
- [36] 高礼安,邓功成,赵洪,等. 不同C/N对沼气消化均匀性影响的研究[J]. 现代农业科技,2009,4.
- [37] 赵洪,邓功成,高礼安,等. pH值对沼气产气量的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(19):216-217.
- [38] 王永泽,邵明胜,王志,等. pH值对水稻秸秆厌氧消化产气的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(31).
- [39] 楚莉莉,杨改河,等. 不同温度条件下农作物秸秆产气效率研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(2).

- [40] 岳 巍. 沼气发酵工艺参数的调控技术 [J]. 黑龙江纺织, 2009, 2.
- [41] 孙孝政, 夏吉庆, 田晓峰. 厌氧消化技术工厂化生产沼气的现状及展望 [J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(1): 109 - 112.
- [42] Zeng Xianyang, Ma Yitai, Ma Lirong. Utilization of straw in biomass energy in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(5): 976 - 987.
- [43] 苏宜虎, 陈晓东, 马洪儒. 搅拌对沼气发酵的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(28): 8961 - 8962, 9004.
- [44] 王瑞谦, 邢会敏, 等. 沼液沼渣进出料设备的研发与应用 [G] // 沼气技术和产业化发民研讨会论文选编. 北京: 新能源产业, 2009: 34 - 35.
- [45] 史玉红, 刘宏新. 沼气工程残余物资源化利用研究 [J]. 农机化研究, 2012, (2).
- [46] 张昌爱, 王艳芹, 袁长波, 等. 不同原料沼气池沼渣沼液养分含量的差异分析 [J]. 现代农业科学, 2009, 16(1).
- [47] 白 娜. 种植业有机废弃物厌氧消化产气特性及动态工艺学研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [48] 孙丽丽, 符征鸽, 等. 玉米秸麦秸秆中高温沼气发酵产气潜力及特性的研究 [J]. 中国沼气, 2008: 6(26).
- [49] 陈小华, 朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望 [J]. 农业工程学报, 2007, (03).
- [50] 卞永存, 寇 薇, 等. 农作物秸秆两相厌氧消化工艺研究进展 [J]. 可再生能源, 2009, 27(5).
- [51] 王永泽, 绍明胜, 杨 立, 等. 水稻秸秆厌氧消化产沼气工艺的响应面法优化 [J]. 化学与生物工程, 2009, 26(11).
- [52] 宋永民, 陈洪章. 汽爆秸秆高温固态消化沼气的研究 [J]. 环境工程学报, 2008, 2(11).
- [53] Zhang Ruihong, Zhang Zhiqin. Biogasification of rice straw with anaerobic-phased solids digester system [J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68: 235 - 245.
- [54] H W Yu, et al. Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion [J]. *Waste Management*, 2002(22): 1 - 5.
- [55] 成官文, 朱宗强, 胡乐宁, 等. 几种常见农业有机废物产沼气研究 [G] // 2008年(第十届)中国科协年会论文集. 郑州: 中国科协, 2008: 1 - 6.

(上接第 13 页)

### 1.2.8 碱度变化

由图 9 可知, 发酵时的碱度范围在  $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 9000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 且总体呈先下降后上升的趋势。在反应进行到第 15 天时, 碱度达到最低值  $5545.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。之后开始快速上升, 最终基本维持在  $7500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  上下, 这一段时间也正是产气高峰期。碱度在发酵结束时基本维持在  $8000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右。

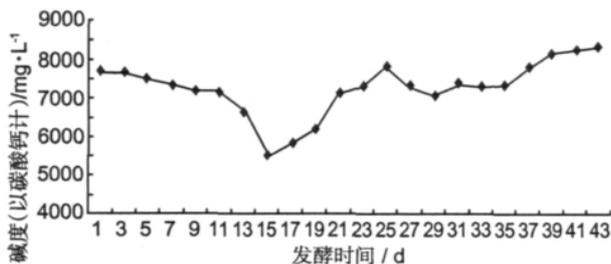


图 9 碱度含量变化曲线

## 2 实验结论

(1) 经过为期 43 天的实验, 累计产气量为  $3163 \text{ L}$ , 根据投加物料的量折算成吨垃圾产气量  $27.46 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ 。

(2) 发酵结束后, 观察和称量渗滤床反应器内的发酵剩余物质, 体积明显减小, 质量为  $73.50 \text{ kg}$

(投加物料中不可降解物质  $47.73 \text{ kg}$ , 未被降解部分和附着污泥总量为  $25.77 \text{ kg}$ ), 其减量化程度可达  $59.1\%$ 。

(3) 采用该法处理城市有机垃圾, 可以减少前处理, 只需将垃圾简单处理后便可发酵, 但发酵后的剩余物质基本不可再利用, 里面以难降解的无机物为主。

## 3 特点及应用前景

(1) 通过水解和产甲烷阶段的分离双级处理, 可以缩短水解过程的时间, 同时还能对甲烷产生过程进行调节控制。

(2) 在水解处理装置内, 由于固体物质不需要移动运转, 所以对于故障物质不敏感。

(3) 渗滤床喷淋洗涤装置是按批式方法工作, 如果需要换料或进行保养维修时, 只需要在物料基质洗涤循环之间进行, 而此时产甲烷装置仍然可以连续工作, 毋须中断。

(4) 渗滤床发酵处理工艺优化了不同微生物的生活环境, 增强系统运转稳定性。

## 参考文献:

- [1] 全 浩, 黄业茹. 垃圾焚烧与二恶英 [J]. 环境科学研究, 1998(3): 8.