

汽爆秸秆高温固态发酵沼气的研究

宋永民^{1,2} 陈洪章^{1*}

(1. 中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室, 北京 100190;
2. 山东师范大学生命科学学院, 济南 250014)

摘要 沼气液态深层发酵及秸秆的物理、化学和生物预处理方式存在效率低、污染重等问题。为了解决这些问题, 对蒸汽爆破预处理方式以及固态发酵在玉米秸秆沼气化中的应用进行了研究。秸秆经过蒸汽爆破预处理后, 在 50 °C 的高温条件下进行固态发酵沼气, 甲烷产量达到 138.2 mL/g TS。通过单因素实验优化, 确定最佳发酵条件为: 固液比 1:7, 初始 pH 值 7.5, 接种量 35%, NH₄HCO₃ 添加量 0.04 g/g 干汽爆秸秆, 纤维素酶用量 30 IU/g 干汽爆秸秆, 发酵温度 50 °C。在上述实验条件下, 汽爆秸秆的甲烷产量提高至 153.0 mL/g TS, 是未汽爆秸秆的 2.9 倍。发酵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。高温固态发酵不仅可以缩短发酵延迟期, 提高产气效率, 而且发酵结束后不会产生大量废液, 对环境友好。

关键词 汽爆秸秆 高温 固态发酵 沼气 条件优化

中图分类号 S216.4 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2008)11-1564-07

Study on biogas production by thermophilic solid-state fermentation from steam exploded corn stalk

Song Yongmin^{1,2} Chen Hongzhang¹

(1. National Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;
2. College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan 250014)

Abstract Biogas production by submerged culture and the physical, chemical, biological pretreatment of stalk have encountered with some key problems, such as low efficiency and serious pollution. Based on it, steam explosion pretreatment method and solid-state fermentation have been researched in biogas production from corn stalk. After steam explosion pretreatment, methane yield from corn stalk reached 138.2 mL/g TS, at thermophilic condition of 50 °C, by solid-state fermentation. With the single factor experimental optimization, the optimal conditions obtained were as follows: 1:7 of solid-liquid ratio, 7.5 of initial pH, 35% of inoculum size, 0.04 g of NH₄HCO₃ addition per gram dry steam exploded corn stalk, 30 IU of cellulase addition per gram dry steam exploded corn stalk and 50 °C of fermentation temperature. Under the above controlled experimental conditions, the methane yield of steam exploded corn stalk was high up to 153.0 mL/g TS, which was 2.9 times of that with no steam explosion pretreatment. The degradation rate of cellulose and hemicellulose after fermentation was 59.86% and 67.22%, respectively. Therefore, steam explosion pretreatment help improve the biogas production of corn stalk effectively with high degradation rate. Thermophilic solid-state fermentation could shorten the lag phase, enhance the biogas production efficiency. Meantime, the fermentation process produces less wastewater, which is friendly to the environment.

Key words steam exploded stalk; thermophilic; solid-state fermentation; biogas; condition optimization

近年来, 由于我国经济一直处于较高增长水平, 大量化石燃料的使用带来的环境污染日益加重, 加之储量逐渐减少, 能源和资源危机对全球和中国的影响都日益突出。在太阳能、核能和生物质能等诸多新能源当中, 生物质能是最安全、最稳定的能源, 也是目前我国重点鼓励的新能源发展领域^[1]。因此, 对于大量生物质资源的有效利用是关系到我国能源、资源、环

境和可持续发展等关键问题的重中之重。

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划项目(2004CB719700);
国家科技支撑计划资助项目(2007BAD39B01)

收稿日期: 2008-03-11; 修订日期: 2008-04-01

作者简介: 宋永民(1982~), 男, 硕士研究生, 主要从事生物质资源高值转化研究工作。E-mail: soulclan1982@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: hzhchen@home.ipe.ac.cn

沼气是一种取之不尽,用之不竭的可再生的生物质能源,作为储量有限的化石燃料的清洁替代品,在世界范围内都进行了广泛的研究。我国是最早利用沼气的国家之一,对于沼气的研究和利用有着悠久的历史,目前,我国已拥有上千万个中小型沼气池。20世纪60年代,我国曾经主要以秸秆作为沼气发酵原料,虽然产沼气潜力巨大,但是到目前为止,仍然缺乏对秸秆原料转化生物质能源的系统科学研究^[2]。沼气的生产利用在欧美等发达国家发展较快,2005~2006年间,欧盟沼气产量增长了13.6%,主要得益于农场沼气工程的贡献。2006年,欧盟生产了约 5.35×10^7 t石油当量的沼气,主要用于清洁燃料以及沼气发电^[3]。由于天然秸秆的难降解性,为了增加秸秆的转化率和利用率,在秸秆进行沼气发酵的研究中采用了许多物理^[4]、化学^[5]和生物^[6,7]预处理方法。但这些方法普遍存在污染环境和处理周期长的不足,不能满足生物物质的高效清洁转化。蒸汽爆破(steam explosion, SE)简称汽爆,是目前木质纤维素类物质预处理技术中广泛采用的一种物理化学预处理方法。汽爆时一般先把秸秆切成段,然后放入压力反应器内,通入高压蒸汽,一般所加压力为1.0~3.4 MPa,温度200~240℃,维压时间为30 s~20 min,然后迅速减压,迫使物料释放到大气中并被爆开^[8]。汽爆具有处理时间短、效果可控、无污染、成本低等优点,一般处理每千克干物料需消耗水蒸汽0.6 kg左右。

由于大量生物质资源是在自然界的碳循环中降解和再生的,绝大部分纤维素是在固体状态下被微生物降解的,所以,从固态发酵研究纤维素的降解更具有代表性^[9]。固态发酵(solid state fermentation, SSF)是人类利用微生物生产产品历史最悠久的技术之一,是指在有或几乎没有自由水的条件下,在有一定湿度的水不溶性固态基质中,用一种或多种微生物进行的一个生物反应过程,这一定义主要用于描述好氧发酵。传统的固态发酵一度被当作发酵工业中古老和落后的代名词,当液态发酵与固态发酵具有相同的经济性能时,液态发酵的许多特征使其成为较优选的方法。其中,液态发酵的传热、传质均匀性使其有较大程度的可行性^[10]。但相比之下,固态发酵却具有设备简单、能耗低、单位体积反应密度高、产物提取工艺简单和废液排放少等优点,由于能源危机和环境问题的日趋严重,这种清洁生产技术又重新得到世界各国的重视。目前,固态发酵技术在食品、医药、有机酸、生物燃料、生物农药、生物转化和生物解毒等方面都得到了一定程度的应

用^[11]。产甲烷菌能够在中温和高温2个温度范围正常产气,从已有的研究报道可知,高温发酵可以缩短发酵启动期,提高微生物的水解活性和产气活性,与中温发酵相比发酵周期更短、最终产气量更高。因此,本实验以汽爆为预处理手段,在高温条件下进行玉米秸秆固态发酵沼气,研究秸秆类生物质资源高效、清洁转化的问题。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 汽爆秸秆(steam exploded stalk, SES)

将整株玉米秸秆切至3~5 cm,按原料重量1:1加水浸润5~10 min,将浸润后的原料加入汽爆罐,通入高压蒸汽,将汽爆罐压力控制在1.3~1.5 MPa,压力维持时间3~10 min,然后迅速打开出料口泄去罐中压力,秸秆从出料口喷出并爆碎,即得蒸汽爆破处理的秸秆原料。

1.1.2 接种物

由活性污泥和鸡粪驯化而成。活性污泥为北京市高碑店污水处理厂的厌氧消化污泥,TS为41.41 g/L,VS为20.45 g/L。

1.1.3 试剂

NH_4HCO_3 、酵母抽提物和尿素等购自北京化学试剂厂,纤维素酶购自宁夏夏盛有限公司。

1.2 实验方法

100 mL玻璃瓶中装入5 g汽爆玉米秸秆,以 NH_4HCO_3 调节C/N比,接入30%驯化好的接种物,按25 IU/g干秸秆加入纤维素酶液,调整固液比为1:6, pH 7.0,搅拌均匀后用橡胶塞密封后通 N_2 5 min除去瓶中空气,连接集气瓶,于50℃恒温水浴锅中进行静置培养,每天摇瓶振荡3次。实验组与对照组各设3个平行。

1.3 检测方法

秸秆TS含量测定:105℃干燥恒重法;
秸秆VS含量测定:灼烧恒重法;
秸秆还原糖含量测定:用HPLC进行检测;
秸秆组分的测定:Van Soest法^[12];
气体体积的测定:排水法,集气瓶装满饱和食盐水以防止 CO_2 溶于水;
气体成分的测定:气相色谱检测;
pH的测定:用精密pH试纸进行检测。

2 结果与分析

2.1 汽爆对玉米秸秆组分的影响

采用蒸汽爆破对秸秆进行预处理时,对物料会

产生2种作用:水蒸汽的高温蒸煮作用和泄压时的剪切力作用。对于汽爆的2个主要控制参数:压力维持水平和压力维持时间来说,不同的参数控制对物料的物理状态和化学组分都会产生不同的作用效果。因此,实验选取压力维持在1.3 MPa、压力维持时间分别为3、5、6、8和10 min;压力维持在1.5 MPa、压力维持时间分别为3、5、6和8 min共9个条件,通过原玉米秸秆(raw corn stalk, RCS)的对照,考察不同汽爆条件对秸秆组分的影响(图1和图2)。由图1可知,在1.3 MPa维持不同时间的处理条件下,纤维素、木质素和灰分三类组分的含量变化不大,而对秸秆的作用效果主要体现在半纤维素和中性洗涤溶解物(neutral detergent solute, NDS)含量的变化上。原秸秆的半纤维素含量为34%,NDS含量为14%,随着汽爆强度的增加,半纤维素含量最终降低至13%,NDS含量升高至29%。表明汽爆主要造成了秸秆中半纤维素的降解,使之含量降低并导致NDS含量的升高。图2中也得到与图1相似的规律,半纤维素含量由34%降低至10%,NDS含量由14%上升至32%,降幅和涨幅更大。

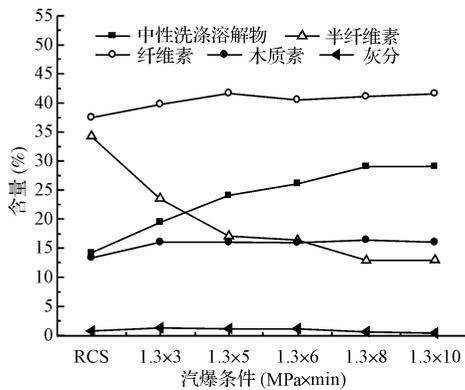


图1 维持压力1.3 MPa、不同维持时间对秸秆组分的影响
Fig.1 Effect on components of steam exploded stalk pretreated at saturated vapor pressure of 1.3 MPa

取不同条件汽爆秸秆各5 g,分别添加40倍的水,振摇水洗10 h,取1 mL用HPLC进行水洗液还原糖的测定(图3)。主要由木糖构成的半纤维素随着汽爆强度的增加其降解程度逐渐增加,因此水洗液中木糖浓度的增加较为明显,葡萄糖浓度的少量增加也是由于半纤维素的降解造成的。纤维二糖仅在未汽爆的秸秆中少量存在,而通过汽爆的降解,各汽爆条件秸秆的水洗液中均无纤维二糖存在。

2.2 不同汽爆条件秸秆的产气比较

产气实验中气体成分经气相色谱检测,所含气

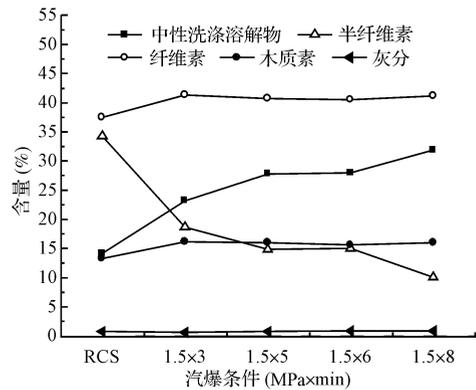


图2 维持压力1.5 MPa、不同维持时间对秸秆组分的影响
Fig.2 Effect on components of steam exploded stalk pretreated at saturated vapor pressure of 1.5 MPa

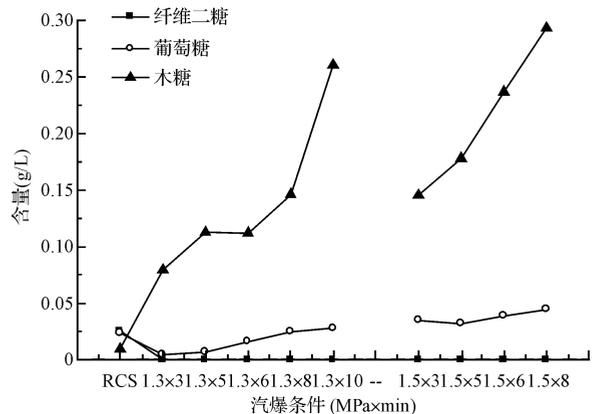


图3 汽爆条件对秸秆还原糖含量的影响
Fig.3 Effect of steam explosion condition on content of reducing sugars in steam exploded stalk

体主要为CH₄ (55% ~ 70%)和CO₂ (30% ~ 45%),实验结果中的产气量全部以甲烷的产量表示。

由于汽爆改变了天然木质纤维素致密的结构,破坏了木质素对纤维素和半纤维素的空间位阻作用,处理后的物料质地膨松,底物的可及性和接触面积大大增加,为天然纤维素中有效成分的利用创造了条件。但是,汽爆过程中伴随半纤维素的降解会产生一些有害物质,如糠醛和酚类物质,它们大多具有挥发性,大部分可在原料风干的过程中挥发掉。一般而言,随着汽爆强度的提高,有害物质的产生量会增加,而这类物质的存在会对降解和利用纤维素的微生物和酶产生抑制作用,影响产气过程。不同条件汽爆秸秆的甲烷产量如表1所示。

表 1 不同条件汽爆秸秆的甲烷产量

Table 1 Methane yield from different steam exploded stalk

汽爆条件			强度系数 R_0	甲烷产量 (mL/g TS)
饱和水蒸汽压力 (MPa)	饱和水蒸汽温度 (°C)	高压维持时间 (min)		
-	-	-	0	39.6
1.3	195	3	1 483	45.4
1.3	195	5	2 472	78.4
1.3	195	6	2 967	91.0
1.3	195	8	3 955	116.2
1.3	195	10	4 944	122.2
1.5	201.3	3	2 882	89.8
1.5	201.3	5	3 894	121.8
1.5	201.3	6	4 672	138.2
1.5	201.3	8	6 230	132.4

通过强度系数 R_0 可知,随着汽爆强度的增加,甲烷产量总体上呈上升趋势,当汽爆条件为 1.5 MPa × 6 min 时达到最大值 138.2 mL/g TS,但当汽爆条件进一步升高时产量反而下降了。因为,当汽爆强度高时,虽然较好地改善了秸秆的物理构造和底物可及性,但同时也导致半纤维素大量降解为单糖并部分转变为糠醛等物质,风干后有害物质残留多,挥发不彻底。因此,大量单糖的损失和有害物质的残存造成甲烷产量的下降。所以,1.5 MPa × 6 min 为秸秆沼气发酵的最佳汽爆条件。

2.3 汽爆秸秆发酵沼气的条件优化

沼气发酵是一个复杂的“三段式”过程,是由许多微生物和酶类共同参与,在不同因素的制约下分阶段完成的。因此,本研究进行了固液比、初始 pH、接种量、氮源、纤维素酶用量和发酵温度对沼气发酵影响的单因素实验,研究汽爆秸秆沼气发酵的最优条件。

2.3.1 不同固液比对沼气发酵的影响

由于发酵过程的复杂性和植物秸秆不易降解的特性,固含率成为沼气发酵过程中一个很重要的因素,决定了发酵能否顺利启动和产气效果。固含率过高,将对微生物的生长和底物的降解造成困难,且营养物质的浓度会出现断层,局部还会出现酸中毒现象。固含率过低,则超出了固态发酵的范畴,产生大量发酵废液,增加了处理成本。不同固液比(s:l)对沼气发酵的影响,如图 4 所示。

由图 4 可知,固液比较高时,由于发酵基质含水不充分,产气启动较慢,累积产气量不高。当固液比为 1:8 时,甲烷产量和比产气率分别达到最大值 148.0 mL/g TS 和 7.65 mL/(g VSS · d),但相对于

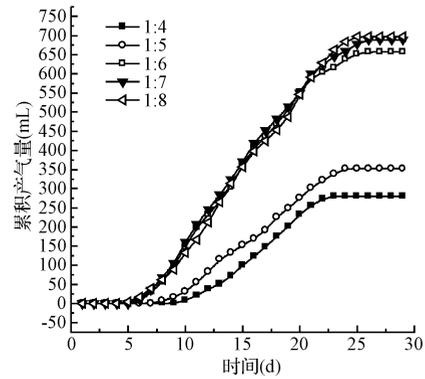


图 4 不同固液比对沼气发酵的影响

Fig. 4 Effect on biogas fermentation at different s:l

1:7 时的 146.3 mL/g TS 和 7.56 mL/(g VSS · d) 提高不明显。因此,选取 1:7 为最佳固液比,由于秸秆汽爆后吸水性增加,此时发酵基质仅含有少量游离水,既保证了物质、能量和温度的正常传递,又减少了大量废液的排放。

2.3.2 不同初始 pH 对沼气发酵的影响

由于沼气发酵是多种菌群、不同种属的微生物共同参与相互协同完成的,而不同微生物生长的最适 pH 也存在差异,其中产甲烷菌对生存环境的 pH 要求最严格也最敏感。由于产甲烷菌只能在 6.5 ~ 7.5 这一狭窄的 pH 范围内发挥活性,而一般接种物中产甲烷菌的数量是远远小于水解菌和产酸菌的,因此不产甲烷菌产生的挥发酸如果不能被及时利用将对产甲烷菌产生致命的“酸中毒”抑制作用,导致产气中断和甲烷含量低下。实验选取了不同 pH 作为沼气发酵的初始条件,产气结果如图 5 所示。

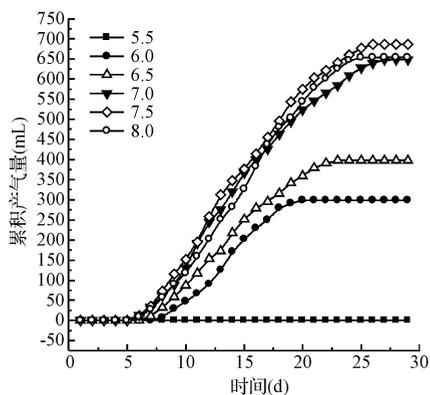


图 5 不同初始 pH 对沼气发酵的影响

Fig. 5 Effect on biogas fermentation at different initial pH

由图 5 可知,初始 pH 为 5.5 时,过低的 pH 使产甲烷菌在一开始就受到了抑制,不仅无法正常生

长繁殖,产甲烷活性也无法发挥,最终无法正常产气。随着初始 pH 的升高,产气延迟期逐渐缩短,累积产气量逐渐升高。当初始 pH 升高至 7.5 时,甲烷产量达到最大值 145.8 mL/g TS,比产气率也达到 7.54 mL/(g VSS · d),而初始 pH 为 8.0 时产气量则开始下降。因此,确定汽爆秸秆沼气发酵的最佳初始 pH 为 7.5。

2.3.3 不同接种量对沼气发酵的影响

在发酵过程中接种量是决定发酵延迟期和底物转化效率的重要因素。一般而言,随着接种量的加大,发酵延迟期逐渐缩短,产气效率逐渐提高。由于固态发酵的特点,微生物在固态培养基上的生长、对营养物的吸收和代谢产物的分泌在各处都是不均匀的,造成了发酵的不均匀。与液态发酵时接种量一般 <10% 不同,固态发酵时由于关键功能菌群的富集更加缓慢,为了提高发酵效率启动时接种量一般要达到 20% ~ 30% 才能满足正常发酵。不同接种量对汽爆秸秆沼气发酵的影响如图 6 所示。

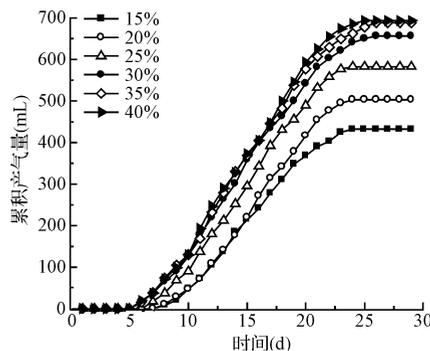


图 6 不同接种量对沼气发酵的影响

Fig. 6 Effect of different inoculum sizes on biogas fermentation

由图 6 可知,接种量较低时,发酵延迟期较长,产气周期较短,累积产气量不高。随着接种量逐渐加大,发酵延迟期逐渐缩短,产气周期变长,累积产气量逐渐增大,当接种量为 40% 时甲烷产量达到 147.3 mL/g TS,但相对于 35% 接种量时的 146.3 mL/g TS 提高并不明显。这可能是因为,接种量进一步加大也促进了水解菌和产酸菌的富集,导致代谢产物挥发酸的大量积累。因此,确定 35% 为汽爆秸秆沼气发酵的最佳接种量。

2.3.4 不同氮源对沼气发酵的影响

对于沼气发酵的微生物而言,必须拥有充足的碳源、氮源和适宜的碳氮比(C:N)才能维持发酵的正常进行。当 C:N 过高时,由于缺乏微生物代谢必要的氮元素,产气微生物活性低,产气不易启动且容

易出现酸积累;而 C:N 过低时,过量的氨态氮容易使产气过程由于“氨中毒”而受到抑制。所以,发酵时一般需要将 C:N 调至(25~30):1,不仅满足了微生物的代谢需求,适宜的氮还可以防止系统的酸化,起到缓冲作用。因此,实验选择了 2 种有机氮源——麸皮、酵母抽提物和 2 种无机氮源—— NH_4HCO_3 、尿素,来考察不同氮源对沼气发酵的影响(图 7)。

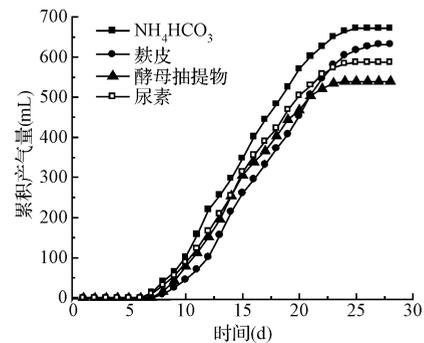


图 7 不同氮源对沼气发酵的影响

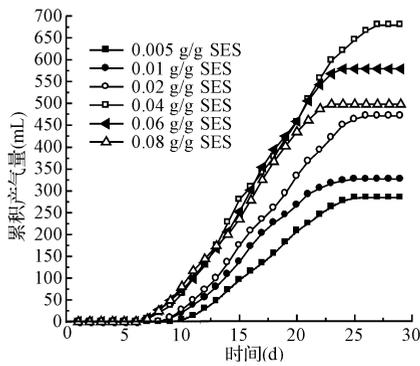
Fig. 7 Effect of different kinds of nitrogen sources on biogas fermentation

由图 7 可知,在 2 种无机氮源中,对 NH_4HCO_3 的利用效果更好,甲烷产量达到 142.6 mL/g TS,比产气率达到 8.20 mL/(g VSS · d)。在 2 种有机氮源中,对麸皮的利用效果更好,甲烷产量达到 134.0 mL/g TS,比产气率达到 7.29 mL/(g VSS · d)。但以麸皮补充氮源时发酵延迟期更长,因此,确定 NH_4HCO_3 为汽爆秸秆沼气发酵的最佳补充氮源。

随后,进一步考察了 NH_4HCO_3 的最适添加量,不同添加量对沼气发酵的影响如图 8 所示。由图 8 可知,当铵盐的添加量较低时,发酵延迟期较长,累积产气量也不高。随着铵盐添加量的增加,发酵延迟期缩短,累积产气量大幅增加,当添加量为 0.04 g/g 干汽爆秸秆时甲烷产量达到最大值 144.3 mL/g TS,比产气率为 7.46 mL/(g VSS · d)。当铵盐添加量进一步增加时,由于氮素过量,虽然发酵延迟期很短,但产气周期同样缩短,发酵过程过早的结束造成累积产气量的降低。因此,最适添加量为每克汽爆秸秆添加 0.04 g NH_4HCO_3 。

2.3.5 不同纤维素酶添加量对沼气发酵的影响

发酵初期接种物中有纤维素降解能力的微生物数量少,降解能力不足,加上秸秆难以降解的特性,发酵延迟期就比较长。添加水解类细菌或酶类有助

图 8 不同 NH_4HCO_3 添加量对沼气发酵的影响Fig. 8 Effect of different NH_4HCO_3 addition on biogas fermentation

于提高沼气发酵的产气效率和甲烷的产率。纤维素酶是专一性降解纤维素的一类酶,可以把纤维素、半纤维素降解为葡萄糖、木糖等小分子单糖,有助于微生物的利用。一般而言,以每克底物添加的滤纸酶活(FPA)单位数来表示纤维素酶的添加量。不同纤维素酶添加量对沼气发酵的影响如图 9 所示。

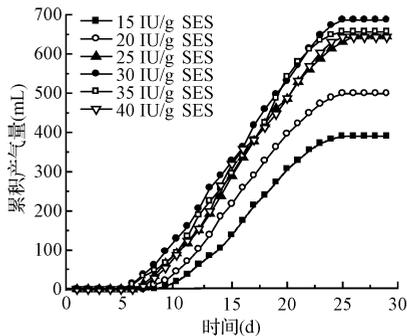


图 9 不同纤维素酶添加量对沼气发酵的影响

Fig. 9 Effect of different cellulase addition on biogas fermentation

由图 9 可知,随着纤维素酶添加量的增加,延迟期逐渐缩短,累积产气量逐渐升高,当添加量为 30 IU/g 干汽爆秸秆时甲烷产量达到最大值 145.8 mL/g TS,比产气率达到 7.94 mL/(g VSS · d)。但当酶用量进一步增加时,甲烷产量开始下降,这可能是由于虽然秸秆的水解效率提高了,为产酸菌提供了大量底物,但代谢产生的大量挥发酸无法被产甲烷菌及时利用,从而导致系统酸化产气量降低。因此,最佳纤维素酶添加量为 30 IU/g 干汽爆秸秆。

2.3.6 不同发酵温度对沼气发酵的影响

温度是制约沼气产量的重要因素,在 10 ~ 60 °C 的范围内,沼气均能发酵产气。在这一温度范围内,

一般温度越高,微生物活动越旺盛,产气量越高。但产甲烷菌有 2 个产气的最适温度区间,分别为 32 ~ 37 °C 的中温区间和 50 ~ 55 °C 的高温区间。当发酵温度处于这 2 个区间内时,产甲烷菌的活性才能得到最大程度的发挥。不同发酵温度对沼气发酵的影响如图 10 所示。

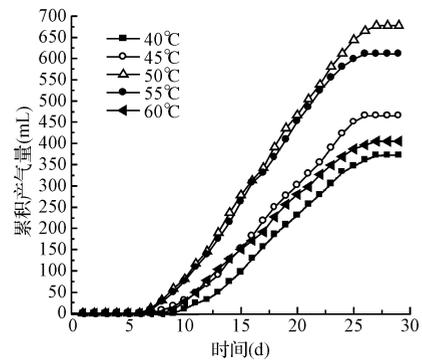


图 10 不同发酵温度对沼气发酵的影响

Fig. 10 Effect of different fermentation temperatures on biogas fermentation

由图 10 可知,当发酵温度为 40 °C 时,由于处于中温和高温的边缘,所以微生物的代谢活性不高,发酵延迟期长,累积产气量不高。随着温度逐渐向高温发酵的最适区间靠近,发酵延迟期逐渐缩短,累积产气量也大幅上升,当温度为 50 °C 时甲烷产量达到最大值 143.9 mL/g TS,比产气率也达到最大值 7.44 mL/(g VSS · d)。当温度升高到 55 °C 时,虽然发酵延迟期也较短,但由于偏离了纤维素酶的最适温度,所以产气效果开始降低。在 60 °C 发酵时,由于超出了高温发酵的最适区间,发酵延迟期较长,产气量降低。因此,确定 50 °C 为本实验条件下的最适发酵温度。

2.4 优化条件后汽爆秸秆的沼气发酵

以汽爆秸秆进行单因素发酵实验后,确定了各因素的最佳条件。将优化后的条件作为沼气发酵的初始条件,以汽爆秸秆和原秸秆在相同的条件下进行发酵,考察汽爆对秸秆发酵沼气的的影响,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,秸秆未经处理时,初期的水解过程已经存在很大阻碍,因此发酵延迟期长,产气周期短,产气效率较低,甲烷产量仅为 52.0 mL/g TS,比产气率为 3.1 mL/(g VSS · d)。而秸秆经过汽爆预处理后,底物的可及性得到改善,微生物和酶可以更有效地作用于底物,因此发酵启动加快,产气过程延

长,甲烷产量达到 153.0 mL/g TS,比产气率为 7.54 mL/(g VSS · d)。

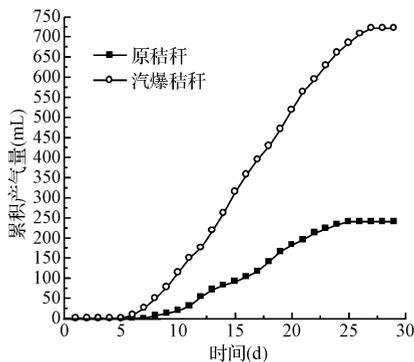


图 11 优化条件后汽爆对沼气发酵的影响
Fig. 11 Effect of steam explosion on biogas production after condition optimized

对原秸秆和汽爆秸秆沼气发酵后的残渣进行组分测定,结果见表 2。通过对发酵前后 2 种组分的含量测定,以原秸秆为底物时,发酵后纤维素含量降低了 6.93%,降解率为 18.49%,半纤维素含量降低了 7.72%,降解率为 22.53%;以汽爆秸秆为底物时,发酵后纤维素含量降低了 24.26%,降解率为 59.86%,半纤维素含量降低了 10.11%,降解率为 67.22%。可见,蒸汽爆破在增加固态发酵沼气时秸秆的降解率方面也有明显的促进作用。

表 2 发酵残渣组分降解率
Table 2 Degradation rate of components of fermentation residue (%)

原料	纤维素			半纤维素		
	发酵前	发酵后	降解率	发酵前	发酵后	降解率
原秸秆	37.47	30.54	18.49	34.26	26.54	22.53
汽爆秸秆	40.53	16.27	59.86	15.04	4.93	67.22

3 结论

(1) 蒸汽爆破作为一种高效、经济和清洁的预处理手段,可以有效提高玉米秸秆沼气发酵的产气效果。以不同条件的汽爆秸秆进行沼气发酵,确定最佳汽爆条件:饱和水蒸汽压力为 1.5 MPa,压力维持时间为 6 min。在此条件下,汽爆秸秆比原秸秆甲烷产量高出 2.5 倍。

(2) 对汽爆秸秆沼气发酵的实验条件进行单因素实验,确定最佳实验条件:固液比为 1:7,初始 pH 值为 7.5,接种量为 35%, NH_4HCO_3 的用量为 0.04 g/g 干汽爆秸秆,纤维素酶的添加量为 30 IU/g 干汽爆秸秆,发酵温度为 50℃。在此条件下进行沼气发酵,汽爆秸秆的甲烷产量为 153.0 mL/g TS,是

未汽爆秸秆的 2.9 倍;比产气率为 7.54 mL/(g VSS · d),是未汽爆秸秆的 2.4 倍。通过发酵后残渣的组分测定,汽爆秸秆纤维素的降解率为 59.86%,是未汽爆秸秆的 3.2 倍;半纤维素的降解率为 67.22%,是未汽爆秸秆的 3 倍。因此,汽爆预处理对于沼气发酵时玉米秸秆的产气量和降解率都有明显的促进作用。

(3) 采用 50℃ 的高温条件进行沼气发酵,不仅可以抑制某些中温有害微生物的生长,还能使发酵温度与纤维素酶的最佳酶解温度相一致,使底物能够快速有效地降解,缩短发酵延迟期,提高产气量和产气效率。而采用固态发酵的方式进行沼气发酵,不仅可以提高系统中菌体和营养物质的浓度,而且发酵结束后不会产生大量废液,避免了二次污染。

参考文献

- [1] 全国人大常委会办公厅. 中华人民共和国可再生能源法. 北京:中国民主法制出版社,2005
- [2] 陈小华,朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望. 农业工程学报,2007,23(3):279~283
- [3] 邓良伟,陈子爱. 欧洲沼气工程发展现状. 中国沼气,2007,25(5):23~31
- [4] Zhang Ruihong, Zhang Zhiqin. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. Biore-source Technology, 1999,68:235~245
- [5] Luo Qingming, Li Xiujin, Zhu Baonin, et al. Anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stalk. Transactions of the CSAE,2005,21(2):111~115
- [6] 何荣玉,闫志英,刘晓凤,等. 秸秆干发酵沼气增产研究. 应用与环境生物学报,2007,13(4):583~585
- [7] 杨玉楠,陈亚松,杨敏. 利用白腐菌生物预处理强化秸秆发酵产甲烷研究. 农业环境科学学报,2007,26(5):1968~1972
- [8] Weil J., Westgate P., Kohlmann K., et al. Cellulose pre-treatments of lignocellulosic substrates. Enzyme. Microbi-al. Tech.,1994,16:1002~1004
- [9] 周晓宏,陈洪章,李佐虎. 固态发酵中纤维素基质降解过程初步研究. 过程工程学报,2003,3(5):447~452
- [10] 徐福建,陈洪章,李佐虎. 固态发酵工程研究进展. 生物工程进展,2002,22(1):44~48
- [11] 陈洪章,徐建. 现代固态发酵原理及应用. 北京:化学工业出版社,2004
- [12] Goering H. K., Van Soest P. J. Forage Fiber Analysis (apparatus, reagents, procedures, and some applications). Agricultural Handbook No. 379. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington DC, 1970.1~20