

# 规模化秸秆沼气工程集成技术及工程运行效果研究

冯 晶<sup>1</sup>, 刘国华<sup>1</sup>, 马继涛<sup>2</sup>, 赵立欣<sup>1\*</sup>, 姚宗路<sup>1</sup>, 于佳动<sup>1</sup>, 李明新<sup>2</sup>, 王海蛟<sup>2</sup>

(1. 农业农村部规划设计研究院, 农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;

2. 三河天龙新型建材有限公司, 三河 065200)

**摘要:** 集成秸秆沼气先进技术提高工程经济性是秸秆沼气工程可持续发展的关键。为进一步提高秸秆沼气发酵效果, 提升沼气工程运行效益, 该研究针对秸秆预处理、秸秆厌氧发酵、搅拌优化、沼液回流等关键环节进行了研究和分析, 提出了“秸秆青贮-秸秆微好氧水解预处理-优化搅拌 CSTR 中温厌氧发酵-沼液近全量回流”的秸秆沼气工程集成技术。通过对河北省三河市天龙规模化生物天然气工程 1#发酵罐启动过程进行监测与分析, 表明该集成技术在实际运行过程中, 秸秆干物质产气量可达 555.78 m<sup>3</sup>/t, 沼气中 CH<sub>4</sub> 体积分数保持在 56%左右, H<sub>2</sub>S 体积分数稳定在 162×10<sup>-6</sup>左右, 工程启动运行效果良好。上述结果表明, 该本研究所提出的秸秆沼气集成技术在实际工程运行中可取得稳定、高效地运行效果。

**关键词:** 秸秆; 沼气; 集成技术; 稳定高效; 工程运行

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.z.013

中图分类号: S216.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-Supp.-0081-05

冯 晶, 刘国华, 马继涛, 赵立欣, 姚宗路, 于佳动, 李明新, 王海蛟. 规模化秸秆沼气工程集成技术及工程运行效果研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊): 81-85. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.z.013 <http://www.tcsae.org>  
Feng Jing, Liu Guohua, Ma Jitao, Zhao Lixin, Yao Zonglu, Yu Jiadong, Li Mingxin, Wang Haijiao. Study on integrated technology of large scale straw biogas plant and its operation effect [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(Supp.): 81-85. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.z.013 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

中国是世界上秸秆资源最为丰富的国家之一。据调查统计, 2017 年, 中国秸秆可收集资源量已达到 8.37 亿 t 以上, 资源化利用率突破 80%, 但仍有 1.37 亿 t 秸秆未有效利用。秸秆原料的产气量较高, 其 TS 产气潜力一般在 300 m<sup>3</sup>/t 以上<sup>[1]</sup>。此外, 秸秆原料用于厌氧发酵产沼气还具易于储存、发酵过程中臭气产量少等优点。规模化沼气工程已经成为秸秆资源化利用的重要手段之一<sup>[2]</sup>。

近年来, 中国沼气产业快速发展, 尤其是 2015 年以后, 农业农村部和国家发展改革委启动了全国农村沼气转型升级工作, 政府对于农村沼气的扶持政策基本转向了规模化大型沼气工程以及规模化生物天然气工程<sup>[3]</sup>。同期发布的《全国农村沼气发展“十三五”规划》也对“十三五”时期中国农村沼气资源以及产业发展进行了规划与布局<sup>[4]</sup>。可以认为, 规模化沼气工程与生物天然气工程已经成为中国沼气产业发展的主体。

然而, 尽管国内外针对秸秆厌氧发酵工艺等开展了大量研究, 然而目前对于秸秆沼气工程实际运行中存在的秸秆产气率低、运行不稳定等问题仍缺少系统方案。同时, 目前的研究对于实际秸秆沼气工程的启

动运行状况缺少分析报道。针对上述问题, 本研究提出了秸秆厌氧发酵集成技术, 并以采用该技术的河北省三河市天龙沼气工程为例, 对沼气工程启动运行过程进行分析, 以期为中国规模化秸秆沼气工程建设和运行提供借鉴。

## 1 秸秆沼气工程关键技术

### 1.1 原料预处理工艺

秸秆类原料由纤维素、半纤维素、木质素相互交织而成, 纤维素质量分数为 40%~55%、半纤维素质量分数为 10%~25%、木质素质量分数为 20%~30%<sup>[2]</sup>。秸秆原料空间结构致密, 难以被生物降解和利用, 是秸秆类原料进行厌氧发酵产沼气的限速步骤<sup>[5]</sup>。在沼气发酵前对秸秆进行预处理, 可以降低秸秆中纤维素的结晶度, 脱除木质素, 增加纤维的多孔性, 促使微生物、胞外酶等与纤维素、半纤维素等充分接触, 可有效提高原料的可生物降解性能, 促进厌氧发酵产气<sup>[6]</sup>。同时, 在秸秆类原料的预处理阶段还可以同时对原料 C/N、原料浓度、温度等进行调节和改善。

目前, 常用的秸秆预处理方法主要有物理方法、化学方法与生物处理法。物理法主要包括机械破碎、超声、水热处理等, 其中机械破碎技术可以减小生物质的粒径, 改变生物质的晶体结构、促进微生物、酶与底物的接触面积, 促进酶水解效率, 并且技术兼容性好, 常与其他预处理技术联合应用。化学法主要是通过添加酸、碱等化学物质, 破坏纤维素和半纤维结构, 破坏结晶性, 促进木质纤维素分解<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期: 2018-06-22 修订日期: 2018-10-25

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项“中部平原地区沼气多元化利用技术及配套设备集成与示范”(201403019)

作者简介: 冯 晶, 高级工程师, 博士, 主要从事农业废弃物厌氧发酵技术装备研究。Email: fengjing0204@sina.com

\*通信作者: 赵立欣, 研究员, 主要从事农业废弃物资源化研究。

Email: zhaolixin5092@163.com

目前较为成熟的化学预处理方法为NaOH预处理法,已在多处沼气工程中应用。但实践表明,通过添加NaOH对秸秆进行预处理,尽管具有不错的预处理效果,但高浓度Na<sup>+</sup>对于沼气发酵均有显著地抑制作用,并且预处理过程易引起二次污染,同时大量NaOH的添加也对沼渣沼液的农田利用造成限制<sup>[8]</sup>。这些因素都制约了NaOH预处理法的大面积推广。

生物法即利用微生物对秸秆进行预处理,参与生物预处理的微生物均具有较强的纤维素分解能力<sup>[9]</sup>,包括秸秆青贮、秸秆菌剂添加、沼液预处理等过程。生物法处理条件温和且无需专门的设备设施,一般成本较低,处理效果较好,近年来已经成为研究和应用的热点<sup>[2]</sup>。微好氧水解预处理是在兼氧条件下,由水解细菌等微生物将非溶解性大分子有机物在胞外酶的作用下分解为小分子有机物,为后续厌氧发酵等过程提供基质<sup>[10]</sup>。众多研究结果表明,微好氧水解技术是秸秆生物预处理技术的潜在技术之一,具有显著的预处理效果,在微好氧曝气条件下,秸秆在菌群的作用下分解产酸,对后续厌氧发酵效果具有较好的促进作用<sup>[11]</sup>。

笔者所在团队利用酵母目(*Saccharomycetales*)、粪壳菌目(*Sordariales*)、肉座菌目(*Hypocreales*)、乳杆菌目(*Lactobacillales*)等多类微生物混配菌剂,采用全混式环状曝气秸秆连续预处理装置,对微好氧曝气条件下青贮秸秆微生物水解预处理特征进行研究。在TS质量分数为5%,溶氧质量浓度1~6 mg/L,搅拌速率为50 r/min,水力停留时间HRT为48 h条件下,秸秆木质纤维素降解率达48%以上,预处理后秸秆的产气量可提升20%,高峰产气时间缩短3 d。据此测算,在同等产气规模下,可降低厌氧发酵池容20%以上,显著提高秸秆沼气工程效益<sup>[12]</sup>。

## 1.2 厌氧发酵工艺选择

常用的厌氧发酵反应器类型主要有全混式反应器(CSTR)、塞流式反应器(plug flow reactor, PFR)、升流式厌氧污泥床反应器(upflow anaerobic sludge bed, UASB)、升流式固体反应器(upflow solid reactor, USR)、竖向推流式厌氧反应器(VPF)、横推流式连续干发酵等多种类型。中国秸秆沼气工程普遍采用CSTR与VPF。

CSTR一般采用圆柱形反应器,原料进入后,通过反应器内的搅拌装置立即与反应器内微生物进行完全混合。对于秸秆沼气工程,由于需要破碎发酵液上层浮渣,需要设置搅拌破壳装置,保证产气正常进行。CSTR单体发酵容积可达5 000 m<sup>3</sup>以上,适用于规模化沼气工程。但CSTR反应器无法使污泥停留时间(sludge retention time, SRT)和微生物停留时间(microbial retention time, MRT)在大于水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)的情况下运行,需要消化器体积较大;为保证发酵效果要有足够的搅拌,能量消耗较高。CSTR工艺单体发酵容积可达到5 000 m<sup>3</sup>,进料TS质量分数为5%~12%,容积产气率一般可达1.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)左右。

VPF工艺采用上进料下出料方式,秸秆等原料经机械粉碎后投入搅拌池配料,从上部进料,罐内原料通过重力作用层层堆积,新进入发酵罐的原料推动早先进入的原料在竖直方向向下流动,促进原料与液体的混合,

增加发酵菌群与原料的接触机会,当发酵完全的原料到达下部出料口位置时便进行出料,出料过程可以自然出料,原料利用很高,并不受季节影响。VPF工艺一般单体发酵容积小于2 500 m<sup>3</sup>,进料TS质量分数为6%~8%,容积产气率最高可达1.3 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)。

笔者所在团队通过对全国大量秸秆沼气工程进行调研,对2种沼气工艺的基本参数进行了梳理和总结,如表1所示。2种发酵工艺中,CSTR发酵工艺应用普遍,工艺技术更为成熟,已经成为中国秸秆沼气工程建设的主流。

表1 全混式与竖向推流式厌氧发酵工艺参数  
Table 1 Parameters of CSTR and VPF

发酵池类型 Fermentation tank type	干物质量 Dry matter content/%	水力停留时间 Hydraulic retention time/d	容积产气率 Volumetric gas production rate/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	单池池容 Fermentation tank volume /m <sup>3</sup>	典型案例 Typical case
全混式 CSTR	5~12	20~40	0.6~1.0	300~5 000	河北三河市天龙建材沼气工程、河北临漳县润泽沼气工程
竖流式 VPF	6~8	50~90	1.0~2.0	300~1 500	青县耿官屯大型秸秆沼气工程、黄骅市常郭镇西排村秸秆沼气工程

## 1.3 搅拌优化技术

CSTR反应器的主要特征在于通过气力搅拌、水力搅拌以及机械搅拌等方式实现发酵料液的完全混合,进而避免秸秆原料上浮结壳,同时还可以促进传质传热过程,实现秸秆与微生物的充分接触,有效利用发酵容积<sup>[12]</sup>。不恰当的搅拌,可能导致反应器内存在运行死区,导致反应器容积未能得到充分利用,造成投资浪费。同时,也有大量研究表明,不恰当的搅拌也可能引起厌氧发酵过程运行失败<sup>[13]</sup>。目前的研究及应用实践中,CSTR反应器一般采用连续搅拌方式,这种方式的另一缺陷是搅拌过程的能耗较高。文献报道表明,CSTR反应器进行厌氧发酵时,搅拌过程的能耗可占到整个工程能耗的8%~58%<sup>[14]</sup>。通过对CSTR反应器内搅拌过程的优化,将显著提高厌氧发酵过程的运行效率,降低反应器的投资,提升整个沼气工程的效益<sup>[15]</sup>。

目前,对于CSTR反应器内的优化研究,主要集中在对于搅拌工艺优化以及搅拌流场优化等方面。搅拌工艺优化研究主要是通过对搅拌方式、搅拌速率、搅拌频率等搅拌工艺参数进行调整优化,进而提高发酵效率与工程运行效益。而对于搅拌流场优化研究主要是根据相应混合指标,通过理论计算对反应器内混合均匀程度进行判断。目前常采用CFD方法,对反应器构型、挡板、搅拌等进行仿真模拟计算,探讨不同条件下反应器内流场的变化,进而提出较优的搅拌条件。

笔者所在团队,建立了CSTR反应器搅拌及流场优化方法,通过建立反应器CFD仿真模型,结合反应器内的混合原料流变特性分析,对CSTR反应器内部流态进行仿真模拟,并结合反应器内流场欧拉数等特征参数对流场进行判断,对反应器构造、搅拌装置结构、搅拌方式以及挡板等进行优化。

## 1.4 沼液回流技术

当前,在沼气工程实践中,采用CSTR与VPF等湿法发酵工艺都会产生大量的沼液。沼液中含有丰富的养分,被认为是一种优良的有机肥料,但目前,沼液肥效仍未获得液肥市场的认可,已经成为制约沼气工程规模的主要瓶颈之一。大量沼液的储存需要建设大规模的沼液储存池,增加沼气工程的投资,并且在储存过程中,沼液会释放 $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等臭气,对周边环境造成污染<sup>[16]</sup>。因此,减少沼液产生是秸秆沼气工程降低建设运行成本、提高效益的关键。

沼液回流是解决上述问题的重要措施<sup>[16]</sup>。通过沼液回流可以显著提高厌氧发酵系统的缓冲能力,有助于维持厌氧发酵反应器内物料保持比较均衡的营养比例,可以在一定程度上延长接种物在发酵体系中的停留时间,保持菌群的稳定,提高发酵过程的稳定性,从而实现秸秆的高效厌氧发酵<sup>[17]</sup>。

笔者所在团队对沼液回流与不回流条件下秸秆厌氧发酵特征进行了比较分析,结果表明,在TS为8%、发酵温度为 $42\text{ }^\circ\text{C}$ 、停留时间为30d的条件下,利用牛粪调整发酵体系C/N至25左右,对不同沼液回流比例下CSTR反应器进行长期的运行试验,结果表明在沼液回流80%条件下,秸秆厌氧发酵产气量比未回流条件下提高97%~180%;并且沼液未回流条件下,厌氧发酵反应器运行180d后pH值降低,之后产气率逐步降低,直至反应器内发酵料液酸化。基于上述研究结果,笔者所在团队提出针对青贮玉米秸秆中温厌氧发酵条件下,以80%沼液回流比例为较优条件<sup>[18]</sup>。

## 2 秸秆沼气技术集成

基于以上关键技术分析与研究,笔者所在团队提出了秸秆沼气工程集成工艺。秸秆进场后首先进行青贮保存,之后经过微好氧水解曝气预处理后进入CSTR发酵罐进行中温全混式厌氧发酵,厌氧发酵的剩余物经过固液分离后沼渣排出生产有机肥,沼液回流至厌氧发酵罐。沼气经净化提纯后生产生物天然气。发酵罐启动时,采用牛粪对秸秆的营养成分进行调节,在预处理池内,秸秆与经过沉砂与预升温处理后的牛粪进行混合,调节C/N至25~30。具体工艺流程图如图1所示。

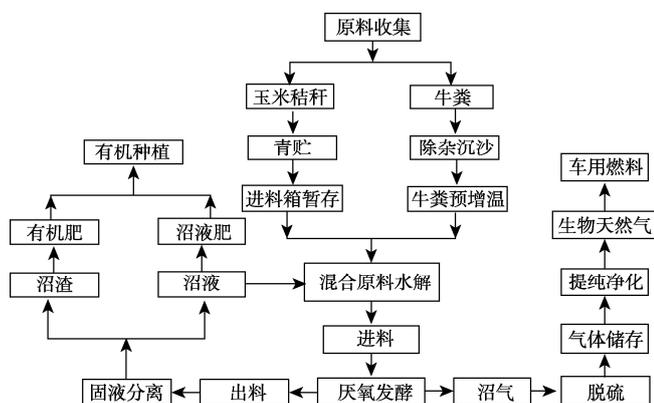


图1 秸秆沼气工艺技术路线

Fig.1 Technology route of straw biogas project

## 3 案例研究

### 3.1 工程概述

三河生物天然气工程由三河天龙新型建材有限公司投资建设,为2015年第一批由国家发改委和农业农村部确立的规模化生物天然气试点工程。工程总投资1.1亿元,占地 $7.3\text{ hm}^2$ 。工程满负荷 $(2.5\sim 3.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d}))$ 运行年可处理有机废弃物38.8万t,生产生物天然气 $2\,117\text{ m}^3$ ,沼渣沼液制成固态、液态有机肥。

### 3.2 技术方案

#### 3.2.1 原料收集体系

工程采购秸秆回收型农作物收割机及配套秸秆收储设备,建立三河市秸秆收储运体系,以收割服务换秸秆。秸秆进场后粉碎至 $2\sim 3\text{ cm}$ ,经压实后以塑料膜覆盖。工程采用周边牛场水冲粪进行物料调配。粪污采用密封吸粪车运至除砂池,经除砂处理后的牛粪由地下运输管道泵入牛粪预热池暂存。牛粪预热池内设置搅拌机进行匀浆,料液质量分数为3%左右。池内通过加热盘管,对料液进行预热,保证其温度在 $35\sim 38\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

#### 3.2.2 秸秆水解预处理系统

工程共修建4座秸秆水解池,每座 $251.2\text{ m}^3$ ,水解池配竖向机械搅拌装置,2层桨叶位置分别位于水解池上部和下部,池面设有进料口,秸秆进料由秸秆进料箱、输送皮带组成,输送至水解池进料口进料;牛粪进料由管道完成,利用潜污泵从牛粪预热池泵入各水解池,完成秸秆和牛粪物料的混合。水解池内反应温度保持中温 $35\sim 38\text{ }^\circ\text{C}$ ,秸秆原料的TS质量浓度为10%左右,控制停留时间36h。池内搅拌装置功率为 $84\text{ W}/\text{m}^3$ ,曝气强度 $2.5\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,进出料频次为 $6\sim 8\text{ 次}/\text{d}$ 。启动时,用牛粪与尿素调节预处理池内氨氮质量浓度至 $2\,200\text{ mg}/\text{L}$ 以上。

#### 3.2.3 厌氧发酵系统

厌氧发酵系统由9座相互连通厌氧发酵罐组成,可实现罐与罐间的相互导料。罐体上部和下部分别设有进料口,一般从下部进料,特殊情况下从上部进料进行破壳;出料口位于罐上部和下部,一般从上部出料。罐体内搅拌装置位于罐中间位置,搅拌轴安装上、中、下3层桨叶,并在罐壁安装挡板。罐内产生的沼气经位于罐体顶部的出气口,沿罐壁沼气输送管道自上而下输送至储气装置。CSTR发酵罐设计发酵温度 $42\text{ }^\circ\text{C}$ ,HRT为40d,发酵罐内物料设计含固率为9%。采用间歇搅拌(20min开,20min停),搅拌功率为22kW。为维持发酵罐稳定运行,进出料频次为 $6\sim 8\text{ 次}/\text{d}$ ,出料沼液经固液分离,沼渣含固率约为22%,沼液含固率约为6%,沼液全回流至牛粪预热池与牛粪混合。

#### 3.2.4 沼气储存及净化系统

发酵罐内产生的沼气经过脱硫后进入储气柜中储存。提纯时,沼气先通过冷冻干燥系统,再进入增压系统,通过三级膜吸附提纯的方式将甲烷体积分数约60%提纯至97%以上,制备生物天然气。

主要构筑物设计运行参数如表2所示。

### 3.3 工程运行情况

目前,三河沼气工程已对工程进行启动,以1#CSTR罐为例对反应器启动过程中的运行情况进行说明和探讨

(图2)。发酵罐每日进料青贮秸秆原料 5 t, 其含固率在 30%左右, VS/TS 平均为 88.1%。秸秆首先进入水解池进行预处理, 预处理池内每日通过回流沼液调节物料含固率, 并保持在 9%左右。经过预处理后水解池内有机酸质量浓度可达到 15 000 mg/L 以上。之后水解池内经过预处理的原料泵入 CSTR 发酵罐内进行厌氧发酵。启动过程中, 厌氧发酵罐内物料质量分数为 9%, 每日进料有机负荷为 0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d) 左右。在此启动条件下, 发酵罐日产气量在 400~1 100 m<sup>3</sup> 的范围内波动, 日均产气量 733 m<sup>3</sup>, 秸秆干物质产气量为 555.78 m<sup>3</sup>/t。沼液中 CH<sub>4</sub> 体积分数持续波动, 但随着运行时间的延长, 沼液中 CH<sub>4</sub> 体积分数逐渐趋向于稳定保持在 56%左右。沼液中 H<sub>2</sub>S 体积分数逐渐降低, 并稳定在 162×10<sup>-6</sup> 左右。随着运行时间的延长, 沼液 pH 值从 7.8 左右波动上升, 并最终稳定在 8.0

左右, 发酵罐运行状况稳定。

表 2 主要构筑物设计实际负荷运行参数  
Table 2 Main structure operating parameters

主要构筑物 Main structure	处理量 Processing capacity/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	TS 质量 分数 TS content/%	停留时间 Hydraulic retention time/d	进料频率 Feed frequency (次·d <sup>-1</sup> )	单次进料量 Single feed amount/m <sup>3</sup>
牛粪预热池 Preheating tank of cow dung	84	6	3.1	8	10.5
秸秆水解池 Hydrolysis tank of straw	672	10	1.5	8	84
厌氧发酵罐 Anaerobic fermenter tank	672	8~9	40	8	84

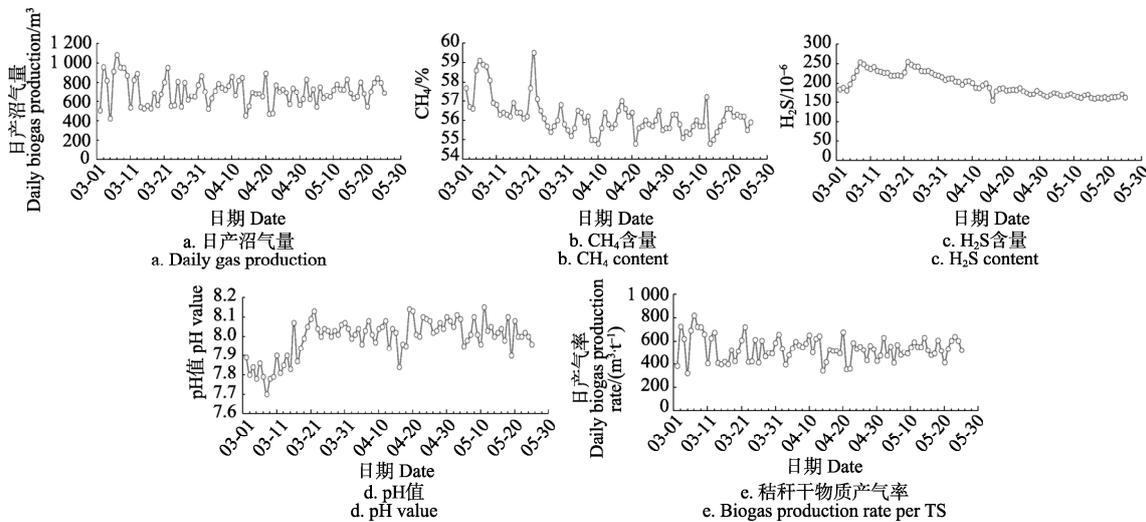


图 2 沼气工程运行状况

Fig.2 Biogas plant running performance

#### 4 结论与讨论

通过厌氧发酵获取沼气是作物秸秆资源化利用一条非常有潜力的技术路径。但目前, 中国秸秆沼气工程仍未获得大规模的推广, 在秸秆预处理、秸秆厌氧发酵工艺、搅拌技术、沼液回流等关键环节, 缺少成熟、经济的解决方案。本提出了“秸秆青贮-秸秆微好氧水解预处理-搅拌优化 CSTR 中温厌氧发酵-沼液近全量回流”的秸秆沼气工程集成技术, 该技术在河北省三河市天龙规模化生物天然气工程中运行稳定。该集成技术对中国秸秆沼气的推广具有一定的支撑作用。

本研究提出了一种可行的秸秆沼气集成解决方案, 但针对上述关键技术仍需进一步优化, 还应结合实际工程的应用效果对集成技术的经济效益进行深入探讨和分析。此外, 本研究仅利用玉米秸秆进行了研究, 对于麦秆等原料的应用效果仍有待检验。

#### [参 考 文 献]

- [1] 杨立, 张婷, 王永泽, 等. 不同秸秆厌氧发酵产沼气的比较[J]. 可再生能源, 2008, 26(5): 46-52.  
Yang Li, Zhang Ting, Wang Yongze, et al. Comparison on the biogas production effect of different stalks anaerobic fermentation [J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(5): 46-52.

- [2] 崔文文, 梁军锋, 杜连柱, 张克强. 中国规模化秸秆沼气工程现状及存在问题[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 121-125.  
Cui Wenwen, Liang Junfeng, Du Lianzhu, et al. The current situation and problems of the large-scale biogas plants for straw in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(11): 121-125.
- [3] 国家发展改革委. 国家发展改革委和农业部联合推动农村沼气工程转型升级[EB/OL](2015-04-20)(2018-11-02).  
[http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201504/t20150423\\_689034.html](http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201504/t20150423_689034.html)
- [4] 国家发展改革委 农业部. 关于印发《全国农村沼气发展“十三五”规划》的通知[EB/OL](2017-01-25)(2018-11-02).  
[http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/10/content\\_5167076.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/10/content_5167076.htm)
- [5] 黄开明, 赵立欣, 冯晶, 等. 复合微生物预处理玉米秸秆提高其厌氧消化产甲烷性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 184-189.  
Huang Kaiming, Zhao Lixin, Feng Jing, et al. Pretreatment of corn stalk by composite microbial strain improving its methane production performance by anaerobic digestion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 184-189.
- [6] 李秋园, 代淑梅, 杨粤. 玉米秸秆发酵生产燃料乙醇的预处理技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4551-4556.  
Li Qiuyuan, Dai Shumei, Yang Yue, et al. Research progress on pretreatment technology for producing fuel ethanol by corn stalk [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(12): 4551-4556.

- [7] 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(1): 29-33.  
Jiao Xiangxiang, Yan Hongyan, Wang Mingming. Research progress of straw pretreatment for anaerobic fermentation producing biogas in China[J]. China Biogas, 2011(1): 29-33.
- [8] 张鸣, 刘芳, 刘畅, 等. 不同碱液处理对玉米秸秆中温发酵产气的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 6-10.  
Zhang Ming, Liu Fang, Liu Chang, et al. Effects of different alkaline pretreatment on biogas production of corn straw under mesophilic anaerobic fermentation[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(5): 6-10.
- [9] 邵帅. 木质纤维素预处理过程的关键技术突破及其应用拓展[D]. 上海: 华东理工大学, 2018.  
Shao Shuai. Study on the Pretreatment Technology of Lignocellulose for Overcoming the Crucial Technical Barriers and Its Extended Applications[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018.
- [10] 汪楚乔, 洪锋, 曾学良, 等. 微需氧生物预处理对稻草秸秆厌氧消化的影响[J]. 中国沼气, 2018, 36(3): 44-48.  
Wang Chuqiao, Hong Feng, Zeng Xueliang, et al. Effect of micro-aeration pretreatment on anaerobic digestion of rice straw[J]. China Biogas, 2018, 36(3): 44-48.
- [11] 于佳东. 纤维质农业废弃物微好氧化化机理及高含固率两相厌氧发酵工艺研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
Yu Jiadong. Characterization of Microaerobic Acidification and High Solid Content Two-phase Anaerobic Digestion Technology Using Lignocellulosic Agricultural Waste[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [12] 黄开明, 赵立欣, 冯晶, 等. 复合微生物预处理玉米秸秆提高其厌氧消化产甲烷性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 184-189.  
Huang Kaiming, Zhao Lixin, Feng Jing, et al. Pretreatment of corn stalk by composite microbial strain improving its methane production performance by anaerobic digestion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 184-189.
- [13] Kariyama I D, Zhai X, Wu B. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review[J]. Water Research, 2018, 143: 503-517.
- [14] Kowalczyk A, Harnisch E, Schwede S, et al. Different mixing modes for biogas plants using energy crops[J]. Applied energy, 2013, 112: 465-472.
- [15] Subramanian B, Pagilla K R. Anaerobic digester foaming in full-scale cylindrical digesters-effects of organic loading rate, feed characteristics, and mixing[J]. Bioresource Technology, 2014, 159: 182-192.
- [16] Hu Y, Shen F, Yuan H, et al. Influence of recirculation of liquid fraction of the digestate (LFD) on maize stover anaerobic digestion[J]. Biosystems Engineering, 2014, 127: 189-196.
- [17] Stabnikova O, Liu X Y, Wang J Y. Anaerobic digestion of food waste in a hybrid anaerobic solid-liquid system with leachate recirculation in an acidogenic reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 41(2): 198-201.
- [18] Feng Jing, Zhao Lanlan, Zhao Lixin, et al. The impact of the blending of agricultural waste on the characteristics of biogas production with the method of wet anaerobic fermentation [C]//Zhengzhou. The 13th Asian Biohydrogen and Biorefinery symposium, 2018.

## Study on integrated technology of large scale straw biogas plant and its operation effect

Feng Jing<sup>1</sup>, Liu Guohua<sup>1</sup>, Ma Jitao<sup>2</sup>, Zhao Lixin<sup>1\*</sup>, Yao Zonglu<sup>1</sup>, Yu Jiadong<sup>1</sup>, Li Mingxin<sup>2</sup>, Wang Haijiao<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Engineering Planning and Design, Key laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 2. Sanhe Tianlong New Building Materials Co., Sanhe 065200, China)

**Abstract:** In China, the production of corn straw annually has become a problem, because of lack of resource utilization. Producing biogas with corn straw is one of the available ways to solve this problem. However, this way still not be promoted widely. The main reason is the low rate of return with the traditional craft. Integrating advanced technology of straw biogas plant is the key for sustainable development of straw biogas industry, focusing on the improvement of engineering economy. Our study team had conducted many researches on the key steps of straw biogas plant, such as straw pretreatment, straw anaerobic fermentation, agitation optimization, biogas slurry recirculation, and developed several key technologies. The corn stalk has a compact structure, thus it was not able to be degraded easily in the anaerobic fermenter. The mixture of *Saccharomycetales*, *Sordariales*, *Hypocreales*, *Lactobacillales* and other microbial as the pretreatment agent were applied in our studies study. And the pretreatment was carried out in a continuous mixed reactor with continuous aeration. Under these conditions, the degradation rate of straw lignocellulose could reach above 48%. After pretreatment, the gas production rate of straw was increased by 20%, and the peak-time of gas production was shortened by more than 3 days. The CSTR and vertical plug flow (VPF) fermentation reactor were compared in this study. The results showed that the CSTR fermentation technology was more common and mature. The reactor structure, the structure of the stirring device, the stirring style and the baffle plate all had a significant influence on the mixing effect of the CSTR. Our study team had developed an optimization method using a CFD simulation. The anaerobic fermentation only with corn straw, the anaerobic process was not stable because of easy acidification and nutritional imbalance. In our research, we applied the recirculation of biogas slurry to the anaerobic fermentation process. The results showed that recirculation of biogas slurry could help keeping the fermentation process stable. Under the conditions with recirculation of 80% biogas slurry, the biogas production rate of maize silage was increased by 97%-180%. Based on these single technologies, we proposed an integrated technology of "stalk silage-micro aerobic hydrolysis pretreatment-CSTR medium temperature & stirring optimization-biogas slurry near fully recirculation". The integrated technology had been employed in the Tianlong biogas plant in Sanhe, Hebei Province. The operation results showed that the biogas production rate of straw reached 555.78 m<sup>3</sup>/t with a relatively high CH<sub>4</sub> concentration of 56% and low H<sub>2</sub>S concentration of 162×10<sup>-6</sup>, which proved that the integrated technology could be stable and efficient in the actual operation of a large-scale biogas plant.

**Keywords:** straw; biogas; integrated technology; stable and efficient; actual plant operation