

干湿耦合厌氧技术在农业领域减排固碳的优越性

李 剑¹, 马宗虎¹, 张万钦¹, 戴雅瑞^{2*}

(1. 中国华电科工集团有限公司, 北京 100160; 2. 泽荣集团工程设计咨询有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 通过对不同厌氧发酵技术比较, 提出车库式干发酵技术具有原料适应性强、处理负荷大、过程能耗低、产物后处理简单且基本无废水排放等特点; 通过对我国首次实施干湿耦合厌氧技术的河北华电丰宁生物质沼气综合利用项目分析计算, 项目投产后可年减排二氧化碳 34734 t, 可实现土壤固碳 1175.5 t; 丰宁创新模式对各类可降解有机废弃物接纳性最高、沼液排放量最少, 该集成技术在我国生物燃气产业, 尤其是我国生物质资源综合利用产业具有较好的推广潜力。

关键词: 干湿耦合; 车库式; 干发酵; 生物燃气; 减排; 固碳

中图分类号: S216.4; X705; X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2024)01-0036-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024010036

The Advantage of Carbon Reduction and Storage from Integration of Dry and Wet Anaerobic Digestion Technology Among the Agriculture Industry / LI Jian¹, MA Zonghu¹, ZHANG Wanqin¹, DAI Yaru^{2*} / (1. China Huadian an Engineering Co Ltd, Beijing 100160, China; 2. ZeRong Group Engineering Design Consulting Co Ltd, Langfang 065000, China)

Abstract: Through the comparison of the different anaerobic digestion technologies, the paper proposes the advantages of the garage type dry fermentation technology are widely adaptable of raw material, large load treatment capacity, low energy consumption, simple digestate treatment and no waste water emission. This technology covers a relatively large area, and the operating environment is relatively poor, which required to focus on breaking through above technical difficulties in the subsequent development process. Through the analysis and the calculation of the Hebei Huadian Fengning biomass gas comprehensive utilization project, which is the first industrial practice of the integration of the dry and wet fermentation biogas production technology, the result shows the project will reduce the carbon dioxide $34734 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and storage the carbon $1175.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. The Fengning innovative model of anaerobic biogas production by the integration of dry and wet fermentation has the highest acceptability for all kinds of degradable organic waste. This integrated technology has a good potential promotion for biogas industry, especially in the comprehensive utilization of biomass resources in China.

Key words: integration of the Dry and Wet Fermentation; garage Type; dry Fermentation; biogas; dmission Reduction; carbon Storage

目前全国可用于沼气生产的农业农村有机废弃物约 42.7 亿吨, 城市有机废弃物约 3.6 亿吨, 工业有机废水约 65.4 亿吨, 废弃物总沼碳减排潜力可达 9.6 亿吨^[1]。沼气生产技术主要包括湿发酵技术和干发酵技术^[2], 越来越多的研究及实践表明, 车库式干发酵技术具有原料适应性强、处理负荷大、过程能耗较低、产物后处理简单且基本无废水排放等特点^[3-5], 该技术对于农作物秸秆、厨余垃圾、畜禽粪

便、尾菜等堆积态可降解废弃物尤其适用, 废弃物经过资源化无害化处置后可以产生清洁燃气以减少对化石能源消耗, 沼渣无需固液分离即可生产有机肥料进入土壤中实现固碳功能, 同时在发酵过程中可实现沼液零排放, 有效降低了系统的运营成本。

1 厌氧发酵技术比较

根据厌氧发酵物料干物质浓度高低, 可以把厌

收稿日期: 2023-06-09

项目来源: 干湿耦合厌氧发酵沼气工程设计导则(CHDKJ23-01-52)

作者简介: 李 剑(1983-), 男, 汉族, 湖北赤壁人, 硕士, 研究方向为有机废弃物资源能源化综合利用, E-mail: lijian1@chec.com.cn

通信作者: 戴雅瑞, E-mail: 378854531@qq.com

氧发酵技术分为干发酵技术($TS \geq 15\%$)和湿发酵技术($TS \leq 12\%$)两大类^[6],笔者通过定义厌氧发酵

装置为竖式和卧式两种类型比较,得出不同厌氧发酵技术的优缺点见表1。

表1 不同厌氧发酵技术的优缺点比较表

厌氧发酵技术/对比项	序批式干发酵 (车库式)	连续式干发酵 (竖式、卧式)	湿发酵 (竖式、卧式)
发酵原料	原料适应性强,对于粗糙物料和重金属等成分耐受性强。	原料适应性较强,对物料预处理要求较高,预处理后需达到可泵送状态。	原料适应性较强,适宜有较高的含水率,较低含杂率。
发酵周期	2~3周	3~4周	3~4周
进料方式	序批式	连续式	连续式
反应级别	两相厌氧	单相厌氧	单相/两相厌氧
搅拌要求	无机机械搅拌	发酵装置内部机械搅拌	厌氧发酵装置内部机械或水力搅拌。
沼气成分	可控,沼气中甲烷含量最高可达75%以上。	不可控,根据物料产甲烷潜力决定。	不可控,根据物料产甲烷潜力决定。
沼液产量	发酵原料TS浓度高,沼液产量极低。	发酵原料TS浓度较高,沼液产量较车库式干发酵多。	发酵原料TS浓度很低,产生大量沼液。
酸化风险	多反应器,易调节	存在	存在
沼渣处理	出仓沼渣可直接堆肥	出料需要固液分离处理	出料需要固液分离处理,鸡粪及餐厨类原料固液分离难度较大。
建设投资	低	较高	较低
运营成本	无机机械磨损,系统消耗的能耗仅为系统产能的5~8%,稳定性很高,运营成本低。	进料泵及机械搅拌器运营维护成本高。	搅拌设备及固液分离设备耗能高,运营维护成本一般。

从表1中可以看出,传统湿发酵产气稳定,但是能耗较高而且会产生大量沼液,对后续土地消纳有较大的压力^[7-9];连续式干发酵操作环境较好,但是建设投资较高且运营维护成本较高;序批式干发酵(车库式)技术可以有效补充湿发酵及连续干发酵技术的不足,在节省投资的同时也降低了运营成本,同时由于消化物出仓不需要固液分离,可以大大降低后续固态有机肥生产成本,该技术属于各类可降解有机废弃物接纳性最高、沼液排放量最少的集成技术^[10-11],但是序批式干发酵技术占地面积相对较大,而且操作环境相对较差,后续发展过程中应重点突破该技术难点。

为了进一步阐述干湿耦合厌氧技术在农业领域减排固碳的优越性,本文以河北华电丰宁生物质沼气综合利用项目为例,重点对该项目工艺流程及项目实施情况进行介绍,同时根据项目设计运营参数对该项目进行减排固碳量分析测算。

2 丰宁项目简介

2.1 项目工艺流程

河北华电丰宁生物质沼气综合利用项目位于丰

宁满族自治县五道营乡五道营村,年处理牛粪47450 t、玉米秸秆2920 t,采用沼液“零排放”干湿耦合厌氧发酵工艺实现固态物料和液态物料的综合处理及利用,项目正常投产后,可年产沼气438万 m^3 ,年发电量9.0 GWh,年产固态生物有机肥1.4万t,项目主要工艺流程见图1。

从图1中可以看出,丰宁项目主要原料包括畜禽粪污及农作物秸秆,畜禽粪污利用车辆运输进场后经过除砂、调配、增温等预处理手段后,利用螺杆泵泵送至一体化厌氧发酵罐;农作物秸秆及进场的干粪利用TMR混合搅拌器加入一体化厌氧发酵罐产生的部分沼液混合,然后利用铲车运送至车库式厌氧发酵仓内,发酵产生的沼气进入落地双膜气柜缓存后,经过沼气脱水、脱硫、增压送至沼气热电联产机组(CHP)实现发电并网,一体化厌氧发酵罐产生的消化液进行固液分离后固体部分与车库式厌氧发酵仓的出仓沼渣统一运送至有机肥好氧翻抛系统,随后经过二次陈化、粉碎筛分、配料制粒及装袋打包后生产生物有机肥对外销售;一体化厌氧发酵罐产生的沼液则主要用于调配进场原料以及作为车库式干发酵喷淋液使用,当进场物料TS浓度调配

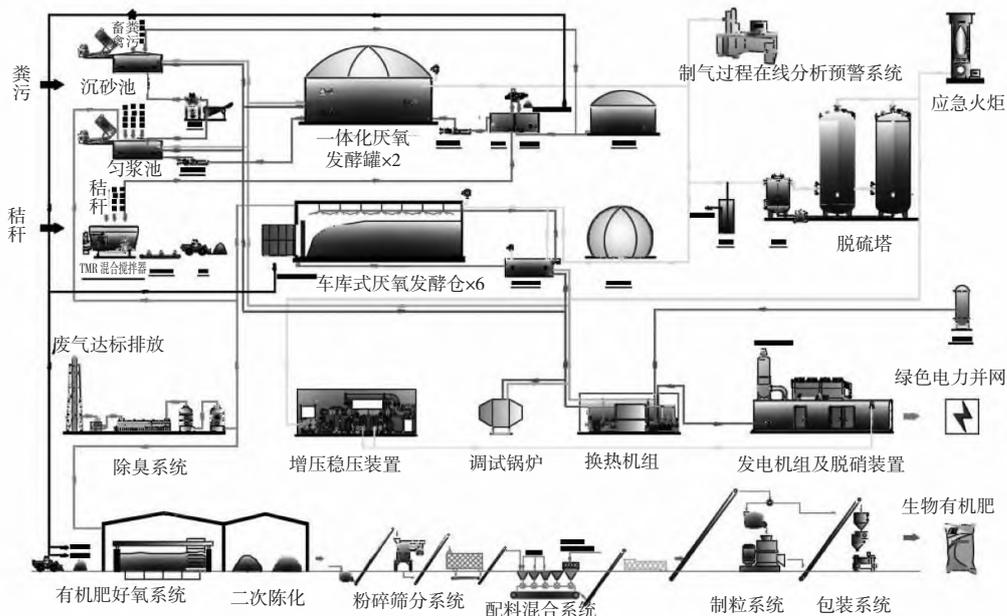


图1 工艺流程图

比例适当,可实现全场污水沼液零排放。

2.2 项目主要生产单元

河北华电丰宁生物质沼气综合利用项目根据工艺流程核心生产单元包括湿发酵单元、干发酵单元、有机肥生产单元,各单元实况见图2~4。



图2 湿发酵单元



图3 干发酵单元



图4 有机肥生产单元

项目核心生产单元中湿发酵单元主要包括2座3000 m³一体化搪瓷拼装罐厌氧发酵罐,湿发酵设计日产沼气6000 m³;干发酵单元主要包括6座1000 m³车库式发酵仓、1座900 m³渗滤液回流池,配套1座600 m³落地双膜气柜,设计日产沼气6000 m³;有机肥生产单元主要包括链板式翻抛机、粉碎筛分设备、配料制粒设备、打包设备等成套生物有机肥生产线,整体生产能力为5 t·h⁻¹,生物有机肥年总产量可达到1.4万t以上。

3 丰宁项目减排固碳分析

3.1 项目物质流分析

项目年处理牛粪47450 t、玉米秸秆2920 t,设计日产沼气量1.2万m³(CH₄ = 55%)原料产气能力见表2。

表2 丰宁项目原料产气量表

物料	日进料量	TS 设计值	日 TS 进量	产气率设计值	日产气量	日产气量合计	设计日产气量
	(t·d ⁻¹)	%	(t·d ⁻¹)	(Nm ³ ·t ⁻¹ TS)	(Nm ³ ·d ⁻¹)	(Nm ³ ·d ⁻¹)	(Nm ³ ·d ⁻¹)
牛粪	130	25	32.5	300	9750	12130	12000
秸秆	8	85	6.8	350	2380		

表3 丰宁项目原料碳指标表

原料名称	年处理量	含水量	C	年含碳量
	t	%	%	t
玉米秸秆	2920	15	53.33	1557.24
牛粪	47450	75	10.74	5096.13

表4 丰宁项目沼气碳指标表

年产沼气量	沼气 CH ₄ 含量	沼气 CO ₂ 含量	年产沼气的含碳量
m ³	%	%	t
4380000	55	45	2363.43

从表2至表4中可以看出,项目进场牛粪为130 t·d⁻¹,TS为25%,可日产沼气9750 m³;进场秸秆为8 t·d⁻¹,TS为85%,可日产沼气2380 m³,根据原料干物质含碳量分析,全年进场玉米秸秆总碳含量为1557.24 t、牛粪为5096.13 t,原料经过厌氧发酵后年产沼气438万 m³,沼气中总碳含量为2363.43 t。

3.2 项目减排固碳量分析

河北华电丰宁生物质沼气综合利用项目建设2台600 kW燃气发电机组,新建1座10 kV升压站,经主变升压至10 kV,新建一回10 kV架空线路就近

T接至35 kV 九龙变电站10 kV 九道沟518线路,新建T接线路长300 m,T接点安装一台10 kV柱上真空断路器。项目发电将并入华北电网,如果没有项目活动的沼气发电进行替代,那么华北电网将传输现有的电力。

对于AMS-III. D,基准线的温室气体排放利用下公式(1)进行计算^[12-13]:

$$BE_a = GWP_{CH_4} \times D_{CH_4} \times UF_b \times MCF_j \times B_{o,LT} \times N_{LT,a} \times VS_{LT,a} \times MS_{\%BL,j} \quad (1)$$

式中:BE_a为a年基线情况下CH₄的排放量,tCO₂e·a⁻¹;GWP_{CH₄}为CH₄的增温潜势(取值21);D_{CH₄}为温度为20℃和一个大气压下,CH₄的密度(0.00067 t·m⁻³);MCF_j为基线情景下粪便管理方式(厌氧氧化塘)的CH₄转化因子;B_{o,LT}为奶牛的粪便中挥发性固体CH₄生产潜力,m³CH₄·kg⁻¹dm;VS_{LT,a}为奶牛每年产生的挥发性固体,kg dm·d⁻¹head;N_{LT}为奶牛的存栏量,头;MS_{%BL,j}为采用开放厌氧塘方式处理粪便的比例,(100%);UF_b为不确定性的修正因子(0.94)。

$$VS_{LT,a} = (W_{site}/W_{default}) \times VS_{default} \times nd_a \quad (2)$$

式中:W_{site}为规模奶牛场奶牛群平均重量,kg;W_{default}为奶牛群的默认平均体重,kg,其中W_{default}数

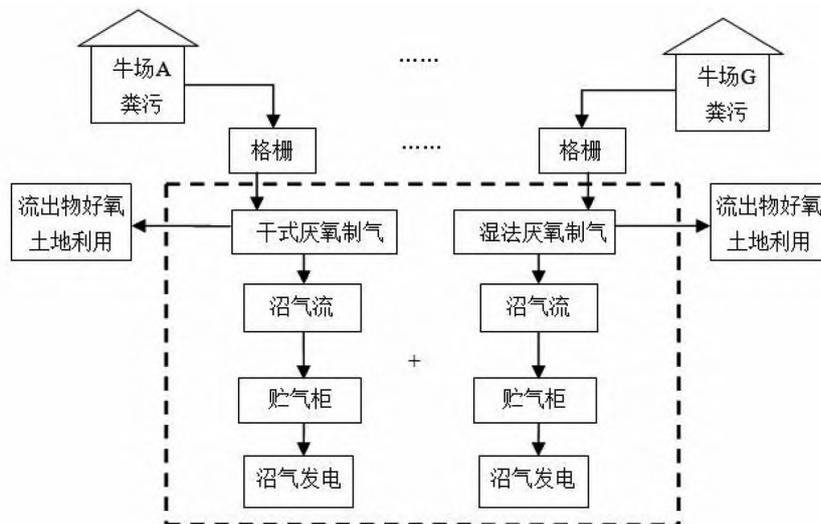


图6 项目活动边界图

值采用 IPCC2006 默认值^[14]; $VS_{default}$ 为默认值,是奶牛每日排泄的挥发性固体物的干重, $kg \cdot a^{-1} head$; nd_a 为第 a 年牛场运行的日数。公式 (2) 中的其他参数含义与公式 (1) 中的参数相同。

对于 AMS-I. D 沼气发电替代电网的那部分电所产生的排放按下式计算:

$$BE_{grid,a} = BG_{bio,a} \times EF_a \quad (3)$$

式中: $BE_{grid,a}$ 为 a 年沼气发电替代华北电网电量所产生的排放,单位为 $tCO_2 e \cdot a^{-1}$; $EG_{bio,a}$ 为项目活动沼气发电机组的发电量 (MWh); EF_a 为华北电网的排放因子, $tCO_2 e \cdot MWh^{-1}$ ^[15]。

项目活动边界将包含粪污处理系统以及可再生能源发电装置,利用厌氧发酵所产生的甲烷进行发电来替代华北电网的相应电量,因此华北电网也是项目活动的边界,项目活动边界详见图 6。

在所有参与捆绑的项目,项目活动包括厌氧消化器系统以及在项目边界外的流出物的土地利用系统,项目活动排放 (PEa) 包括:

3.2.1 整个粪污处理系统所产沼气和输运沼气过程中的物理泄漏 (PEPL, a)

公式 (4) 被用于计算物理泄漏:

$$PEPL,a = 0.10 \times GWPCH_4 \times DCH_4 \times BO,LT \times NLT,a \times VSLT,a \times MS\%i,a \quad (4)$$

式中: $PEPL,a$ 为 a 年项目活动由于物理泄漏所产生的排放, $tCO_2 e \cdot a^{-1}$; $MS\%i,a$ 为采用项目活动处理粪便的比例, % (100%)。公式 (4) 中的其他参数含义与公式 (1) 中的参数相同。

3.2.2 沼气流燃烧不完全所产生的排放 (PEflare, a)

在本项目中,所有的沼气都被用于发电,而且发电机组有非常高的性能,能够保证甲烷的完全燃烧,因此这部分排放为零。

3.2.3 项目活动用电或利用化石燃料所产生的 CO₂ 排放 (PEpower, a)

在项目活动中没有化石燃料被利用,项目活动所用电力来自沼气所发电力,属于清洁能源,因此这部分排放为零。对于 AMS-I. D,项目活动的人为排放为零。

计算基准线以及项目活动排放所用到的各种排放参数如表 5 所示。

表 5 丰宁项目排放因子参数选取表

参数	描述	排放源	选取值	数据来源
BO,LT	奶牛粪污的最大甲烷产生潜力	开放厌氧塘	$0.2m^3CH_4 \cdot kg^{-1}VS$	实验数据
MCFj	开放厌氧塘的甲烷转换因子	开放厌氧塘	66%	IPCC (2006) 第四卷 11 章表 10.17
DCH ₄	甲烷密度	开放厌氧塘	$0.00067 t \cdot m^{-3}$	AMS-III. D(Version 14)
VSdefault	奶牛日排泄的挥发性固体物的干重	开放厌氧塘	$1460 kg^{-1}VShead^{-1}d^{-1}$	IPCC (2006) 第四卷 11 章表 10.17
Wdefault	奶牛默认体重	开放厌氧塘	350 kg	IPCC (2006) 第四卷 11 章表 10.17
EFa	电网排放因子	华北电网	$1.0000 tCO_2 e \cdot MWh^{-1}$	China NDRC

3.2.4 项目的减排量 (ERa)

项目的减排量等于基准线情况下的总排放量减去项目活动的温室气体总排放量。

表 6 丰宁项目基准线碳排放量 ($tCO_2 e \cdot a^{-1}$)

排放源	开放式氧化塘及华北电网电量
开放厌氧塘	30308
净替代的电网电量	7650
基准线总排放量	37958

表 7 丰宁项目活动碳排放量 ($tCO_2 e \cdot a^{-1}$)

排放源	丰宁项目
粪污处理系统泄漏	3224
项目活动人为排放	0
项目活动总排放量	3224

表 8 丰宁项目碳减排量 ($tCO_2 e \cdot a^{-1}$)

排放源	丰宁项目
基准线总排放量	37958
项目活动总排放量	3224
项目产生的减排量	34734

从表 6 至表 8 中计算得知,丰宁项目总的基准线年排放为 37958 t 二氧化碳当量,总的项目活动年排放为 3224 t 二氧化碳当量,通过对粪污管理系统的升级每年碳排放将减少了 91.5%,项目每年可获的减排量为 34734 t 二氧化碳当量;项目固碳部分主要为生物有机肥料进入土壤后的永久固碳效应,该指标为原料含碳指标减去沼气生产碳指标,经计算年可固碳 1175.5 t。

4 结论

通过对华电丰宁生物质沼气综合利用项目核心工艺及具体实施情况进行了阐述,同时分析了该项目在减排固碳方面对碳达峰碳中和的重要贡献,主要得出以下结论。

(1) 对于湿发酵和干发酵两种不同的生物厌氧处理方式,序批式干发酵(车库式)技术在节省投资的同时也降低了运营成本,同时由于消化物出仓不需要固液分离,可以大大降低后续固态有机肥生产成本,但是序批式干发酵技术占地面积相对较大,而且操作环境相对较差,后续发展过程中应重点突破该技术难点。

(2) 河北华电丰宁生物质沼气综合利用项目作为我国第一座利用各类废弃物干湿耦合制沼气发电项目,项目投产后可年减排二氧化碳 34734 t,可实现土壤固碳 1175.5 t。

(3) 干湿耦合厌氧制气创新模式对各类可降解有机废弃物接纳性最高、沼液排放量最少,该集成技术在我国生物燃气产业,尤其是我国生物质资源综合利用产业具有较好的推广潜力。

参考文献:

- [1] 中国沼气学会. 中国沼气行业“双碳”发展报告 [R]. 南京, 2021.
- [2] 孙康泰, 张辉, 魏殉. 生物燃气产业发展现状与商业模式创新研究 [J]. 林产化学与工业, 2014, 34(5): 175 - 180.
- [3] 盛力伟, 潘亚东, 李剑. 车库型干发酵技术在我国的应用 [J]. 农机化研究, 2014(2): 222 - 225
- [4] 胡芳. 国内外干发酵研究现状及展望 [J]. 水能经济, 2018, 05: 36 - 37.
- [5] 李超, 周瀛, 刘刚金. 基于渗滤液回流的干式厌氧发酵研究进展 [J]. 可再生能源, 2016, 34(11): 1727 - 1737.
- [6] 胡鑫, 冯晶, 赵立欣, 等. 干法厌氧发酵反应器及过程控制技术研究进展 [J]. 中国沼气, 2018, 36(02): 68 - 75.
- [7] 孙子滢, 李剑, 王祯欣, 等. 利用车库式干发酵技术处理易腐垃圾现状分析及发展潜力 [J]. 中国沼气, 2019(05): 46 - 50.
- [8] 梁芳, 包先斌, 王海洋, 等. 国内外干式厌氧发酵技术与工程现状 [J]. 中国沼气, 2013, 31(03): 44 - 49.
- [9] 盛力伟, 李剑. 车库式干发酵产沼技术在农业废弃物资源化利用领域的参数分析 [J]. 农业工程, 2018(07): 54 - 58.
- [10] 吴爱兵, 曹杰, 朱德文, 等. 麦秸与牛粪混合堆沤预处理厌氧干发酵产沼气中试试验 [J]. 农业工程学报, 2015(22): 256 - 260.
- [11] 付尹宣, 桂双林, 廖梦垠. 混合厌氧发酵产沼气研究进展 [J]. 能源研究与管理, 2016, (1): 11 - 14.
- [12] 联合国清洁发展机制. 动物粪便管理系统甲烷回收: AMS-III. D-V14 [S] 荷兰: 联合国清洁发展机制, 2011.
- [13] 联合国清洁发展机制. 联网的可再生能源发电: AMS-I. D-V13 [S] 荷兰: 联合国清洁发展机制, 2009.
- [14] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: IPCC - 2006 [S] Japan: IPCC, 2006.
- [15] 联合国清洁发展机制. 电力系统排放因子计算工具: CM-001-V01 [S] 荷兰: 联合国清洁发展机制, 2014.