

# 纤维乙醇酒糟与牛粪共发酵中试研究

王丰园<sup>1</sup>, 郑保海<sup>1</sup>, 鲁云凤<sup>1</sup>, 吴冬雨<sup>1</sup>, 丁凌飞<sup>2</sup>, 李玉英<sup>1\*</sup>

(1. 南阳师范学院生命科学与农业工程学院, 河南 南阳 473061; 2. 车用生物燃料技术国家重点实验室, 河南 南阳 473000)

**摘要:**为纤维乙醇酒糟与粪污共发酵工业生产提供相关依据, 试验以纤维素乙醇酒糟和牛粪为原料, 比较机械搅拌与机械回流混合搅拌两种发酵工艺。结果表明: 相比机械搅拌发酵工艺, 机械回流混合搅拌发酵工艺产气率、物料利用率、总氮去除率分别提升 41.2%、13% 和 9.1%, 化学需氧量去除率降低 10.3%。

**关键词:**纤维乙醇酒糟; 牛粪; 厌氧发酵; 共发酵; 中试

中图分类号: TQ920.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)06-0157-04

## Pilot-Scale Fermentation of Cellulosic Ethanol Distiller's Grains and Cow Dung

WANG Fengyuan<sup>1</sup>, ZHENG Baohai<sup>1</sup>, LU Yunfeng<sup>1</sup>, WU Dongyu<sup>1</sup>, DING Lingfei<sup>2</sup>, LI Yuying<sup>1\*</sup>

(1. College of life sciences and agricultural engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061; 2. State Key Laboratory of Motor Vehicle Biofuel Technology, Nanyang 473000, China)

**Abstract:** In order to provide the relevant basis for the industrial production of co-fermentation of cellulosic ethanol distiller's grains and dung, this experiment used cellulosic ethanol distiller's grains and cow dung as raw materials, adopted the self-made anaerobic fermentation device, and compared mechanical stirring (MS) and mechanical reflux mixed stirring (MRMS) fermentation process. The results show that: compared with the mechanical stirring fermentation process, the gas production rate, material utilization rate and total nitrogen removal rate using by MRMS were increased 41.2%, 13% and 9.1%, respectively, and the chemical oxygen demand removal rate was reduced 10.3%.

**Key words:** Cellulose ethanol distiller's grains; Cow dung; Anaerobic fermentation; Co-fermentation; Pilot-scale fermentation

近年来, 寻求新型能源代替传统能源是全世界的迫切任务, 以农林牧废弃物为发酵原料的纤维乙醇发酵技术越来越受到重视<sup>[1]</sup>。由于农林牧废弃物含有较高的纤维素、木质素等, 发酵过程中难以消化完全, 因此生产过程中会产生大量废料(废液及废渣)<sup>[2]</sup>, 并且这些废料中还大量可利用的有机物, 因此, 对纤维素乙醇发酵废料二次利用的研究势在必行。在废弃物资源化利用上结合沼气发酵的条件, 把工业废弃物处理与畜牧业粪污处理有机结合, 有利于实现工农一体化可持续发展<sup>[3]</sup>。

中试发酵是实验结果应用于工业化生产必不可少

的中间环节<sup>[4]</sup>。前期实验结果表明纤维素乙醇废水与粪污共发酵最佳产气条件为 pH 7.5, 20% 菌液含量, 90% 装罐率, 12% 总固体含量(TS), 4% 氮源<sup>[5]</sup>。为了研究在优化的发酵参数条件下中试发酵工艺, 本文以纤维素乙醇酒糟和牛粪为原料, 试验比较机械搅拌与机械回流混合搅拌两种发酵工艺, 旨在为纤维素乙醇废水与粪污共发酵工业生产提供相关依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

采用天冠集团沼气公司厌氧发酵后的沼液, 天冠集团纤维乙醇公司蒸馏后的酒糟, 以及南阳黄牛养殖场新鲜牛粪, 原料主要理化指标见表 1。

### 1.2 实验装置

自制 100 L 中试发酵装置(图 1)。发酵装置

收稿日期: 2019-12-30

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20A180022); 车用生物燃料技术国家重点实验室开放课题(KFKT2018002)

作者简介: 王丰园(1996-), 男, 在读硕士, 从事生物质能源研究。

通讯作者: 李玉英, 女, 博士, 教授, E-mail: lyying200508@163.com

表1 原料的理化指标

指标	TS(%)	VS(%)	pH	TN(mg/L)	TP(mg/L)	COD(mg/L)	VFA(mg/L)
沼液	0.027	0.016	7.110	0.530	0.210	102.470	0.890
酒糟	0.018	0.015	7.070	2.320	1.480	682.620	31.370
牛粪	0.156	0.094	-	-	-	-	-

注: TS为总固体含量; VS为挥发性成分含量; TN为总氮; TP为总磷; COD为化学需氧量; VFA为挥发性有机酸含量

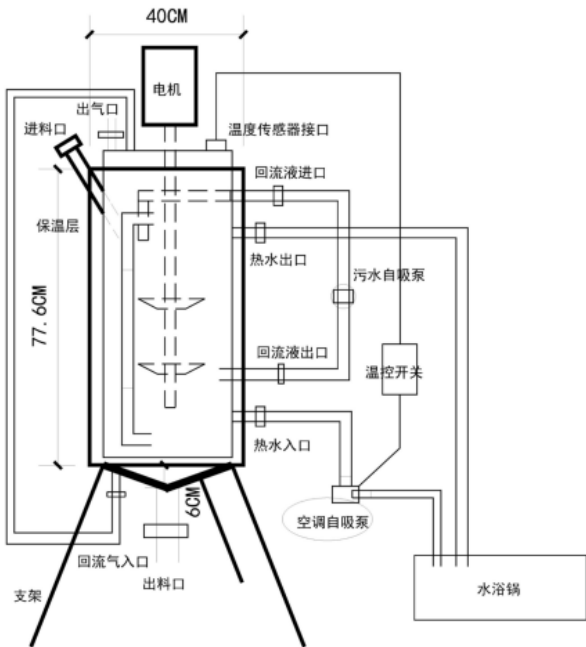


图1 100 L中试发酵装置示意图

主要由搅拌系统、保温系统、进出料口、出气口等组成。搅拌系统分为机械搅拌和液体回流搅拌两部分,其中液体回流搅拌系统由回流液进出口及污水自吸泵组成;保温系统由温度传感器、保温层、温控开关、空调自吸泵和水浴锅等组成。

### 1.3 实验设计

中试发酵采用机械回流混合搅拌(Mechanical reflux mixture stirring, MRMS)、机械搅拌(Mechanical stirring, MS),每个发酵罐装料为纤维乙醇酒糟与牛粪混合物,发酵时间为30 d。发酵条件采用由前期正交实验得到结果<sup>[5]</sup>,即pH 7.5,装罐率90%,TS 12%,其中牛粪4%,接种率20%。

MRMS运行方案:按照发酵条件装罐,采用机械搅拌与液体回流混合搅拌发酵,调pH至7.5左右,搅拌30 min取样,测定TN、TP、COD和VFA等指标。每天机械搅拌8 h,回流搅拌3次,每次1 min(流速500 mL/s)。入罐发酵至7~10 d时,每天测pH,调节pH至7.5左右,之后每3 d取样测COD和VFA,每周取样测TN和TP等指标。利用气体流量计和气体分析仪计量每日产气量并分析产气成分。

MS运行方案:按照发酵条件装罐,采用机械搅拌发酵,调pH至7.5左右,搅拌30 min取样,测定指标同MRMS。每天机械搅拌8 h,入罐发酵至7~10 d时,每天测pH,调节pH至7.5左右,之后操作同MRMS。TN、TP、COD、VFA、pH和甲烷含量等指标测定方法参照参考文献[5]。

## 2 实验结果

### 2.1 中试发酵过程中TN的动态变化

由图2可知,MS与MRMS在发酵前后TN呈现整体降低的趋势,且在整个发酵周期中MRMS的搅拌方式下发酵液中的TN的含量与MS相比较低,发酵液中TN的含量下降速率较快。

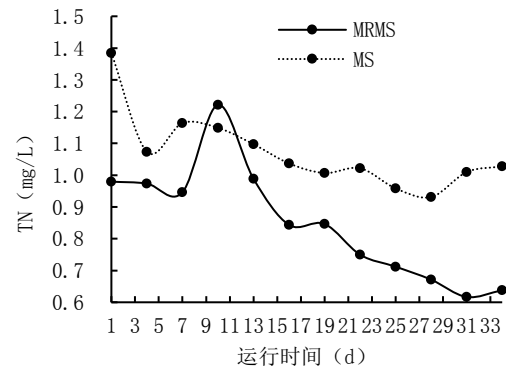


图2 两种中试发酵方案TN动态变化

### 2.2 中试发酵过程中TP的动态变化

由图3可知,MS与MRMS发酵过程中TP的变化规律差别不大,均为先增加后减少的趋势,且在发酵的第7天达到峰值,发酵结束后两种发酵方案TP含量趋于一致。

### 2.3 中试发酵过程中COD的动态变化

由图4可知,MRMS的化学COD呈现先增加后减少的趋势,且在发酵的第7天达到峰值;MS的COD含量呈现持续降低的趋势。

### 2.4 中试发酵过程中VFA与pH的动态变化

由图5可知,MS与MRMS发酵过程中VFA的变化规律差别不大,均为先增加后减少趋势,发酵结束后两种发酵方案VFA含量趋于一致。由图6可以看出,MS与MRMS发酵过程中pH变化规

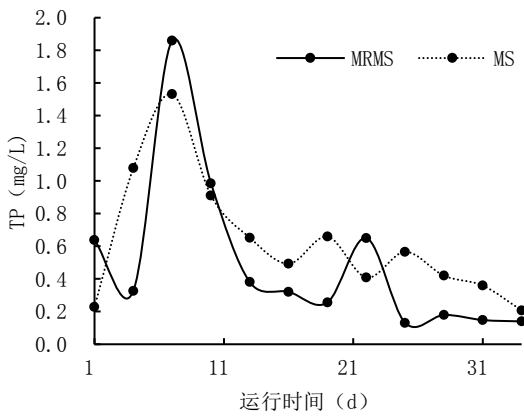


图3 两种中试发酵方案TP动态变化

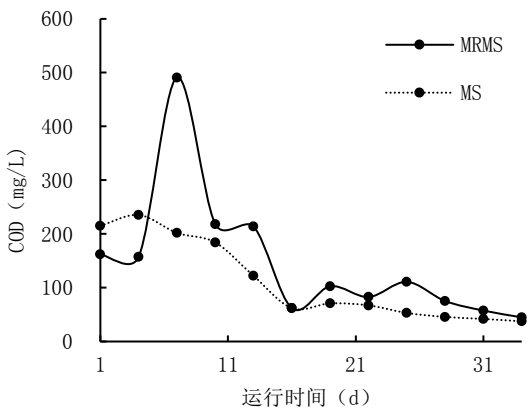


图4 两种中试发酵方案COD的动态变化

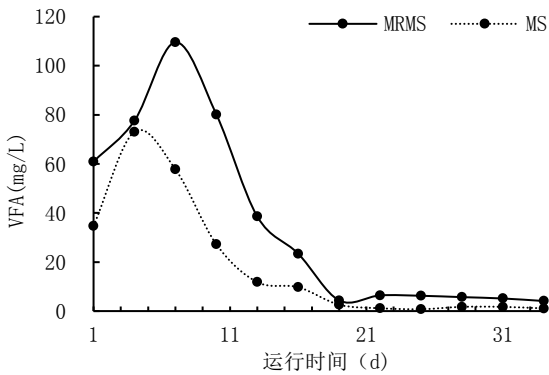


图5 两种中试发酵方案VHA含量的动态变化

律基本一致,在发酵前6 d先下降再增加,之后增长至第8天数值为7.5左右趋于稳定。

### 2.5 中试发酵过程中产气量的动态变化

由图7可见,MS与MRMS的日产气量变化规律基本一致,均在13~25 d达到产气高峰,产气高

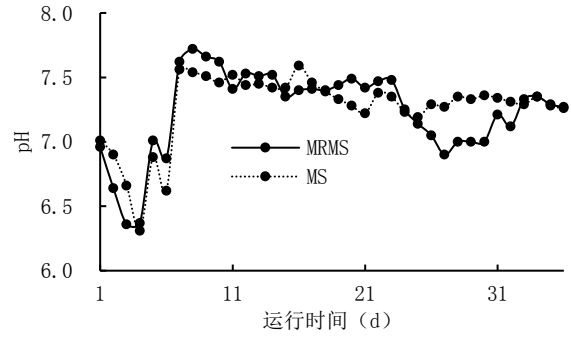


图6 两种中试发酵方案pH动态变化

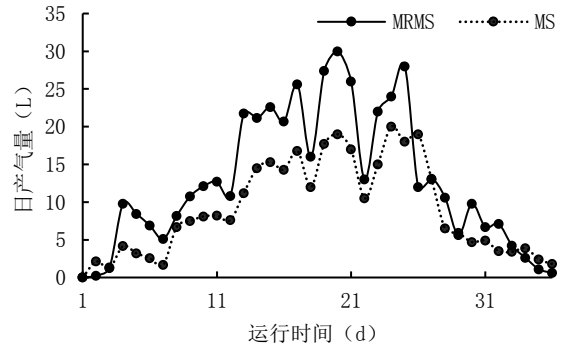


图7 两种中试发酵方案日产气量动态变化

峰期时,MRMS的日产气量高于MS。以累计产气量和运行时间做产气速率图(图8),在发酵期间MRMS产气速率高于MS,总体来看,MRMS的日产气量优于MS。

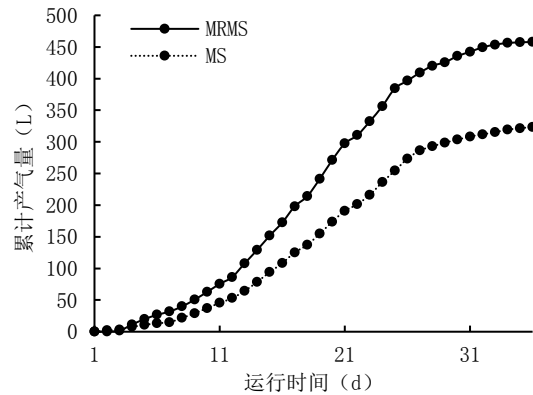


图8 两种中试发酵方案产气速率动态变化

### 2.6 中试发酵产气特性

统计容积产气率、容积日产气率、容积最高产气率和物料利用率,分析两种中试发酵方案的产气特性。由表2可知,MRMS各项数据均高于MS,其中容积产气

表2 两种中试发酵方案产气特性

实验组	容积产气率[L/L]	容积日产气率[L/(L·d)]	容积最高产气率[L/(L·d)]	物料利用率(%)
MRMS	5.088	0.141	0.333	45.300
MS	3.593	0.100	0.222	40.100

率和物料利用率分别比MS高41.6%和13%。

## 2.7 中试发酵过程产气中甲烷含量的变化

沼气的主要有效成分是甲烷,其数值的高低反映了沼气的质量。由图9可知,MS与MRMS发酵过程中甲烷含量的变化规律差别不大,但MRMS发酵过程中甲烷含量最高可达81.3%,而MS仅为51.6%。

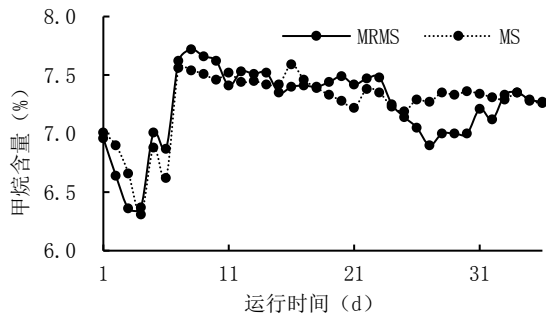


图9 两种中试发酵方案甲烷含量动态变化

## 3 结论与讨论

在纤维乙醇酒糟二次资源化利用工艺中,同等条件下,采用MRMS产气率高,与MS相比,容积产气率、物料利用率和总氮去除率分别提升41.2%、13%和9.1%,COD去除率降低10.3%。

搅拌方式及其参数对厌氧发酵产气效果影响非常显著<sup>[6]</sup>,王欣等<sup>[7]</sup>比较研究了3种搅拌方式影响牛粪高温厌氧发酵产气量,结果表明机械搅拌效果最好。薛庆玲等<sup>[8]</sup>采用强制回流沼气搅拌装置发酵畜禽粪便,沼气池产气效率可提高38%~100%。

由于纤维乙醇酒糟的特殊性,酒糟废液COD含量较高,含有大量未被酶解的微纤维,糟液易分层,本研究采用纤维乙醇酒糟与新鲜牛粪共发酵的方式,利用牛粪中含有的纤维素降解菌群辅助降解酒糟中的微纤维<sup>[9]</sup>,采用MS与MRMS探讨

不同搅拌方式对纤维乙醇酒糟降解的影响,两种中试发酵TN、TP和VFA浓度百分含量的变化规律差别不大,但MS方式的COD含量持续降低,而MRMS的COD含量是先增高后下降,且在第7天达到峰值,是MS的2.5倍,COD在发酵期间先升高后降低的规律更适合微生物发酵生产沼气,说明MRMS方式发酵的微生物群生命活力比MS高,原因可能在于前者能更好地促进罐体里发酵液混合均匀,增加与菌群的接触<sup>[10]</sup>。从沼气中甲烷含量的动态变化曲线可以看出MRMS发酵方式甲烷含量显著高于MS。由此可得出MRMS更适于农业废弃物资源化循环利用。

### 参考文献:

- [1] 付尹宣,桂双林,廖梦垠,等.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.
- [2] 黄志坚,邹晨,林晓密,等.纤维素乙醇的生产工艺及搅拌设备的进展[J].当代化工,2016(2):314-317.
- [3] 艾平,张济韬,席江,等.纤维素乙醇糟液对稻秸猪粪厌氧发酵的促进机制[J].环境工程学报,2017(12):6404-6414.
- [4] 陈琼华,周玉萍,桂林,等.韦伯灵芝漆酶生产中试研究[J].食品与发酵工业,2016,42(5):44-49.
- [5] 杨秀华,尹行,王栋,等.正交实验选择纤维素乙醇废水与粪便共发酵产沼气的最优发酵条件[J].黑龙江畜牧兽医,2016(11):20-22.
- [6] 谢梦春.稻草厌氧发酵搅拌设备参数CFD模拟与优化试验研究[D].北京:北京化工大学,2018.
- [7] 王欣,王玉鹏,刘伟,等.不同搅拌方式对浮渣层影响高温厌氧发酵产气率的研究[J].黑龙江科学,2014,5(9):6-8.
- [8] 薛庆玲,王惠生,刘艳敏.塞流式沼气池气动搅拌装置的研究[J].农机化研究,2010(3):64-67.
- [9] 付善飞,许晓晖,师晓爽,等.酒糟沼气化利用的基础研发[J].化工学报,2014(5):1913-1919.
- [10] 潘钊,娄金荣.城市污水处理常用方法探讨[J].黑龙江科技信息,2011(35):56.

(责任编辑:王丝语)

(上接第108页)

- [4] 王涛,雷锦桂,陈永快,等.海鲜菇渣复配基质在茄子栽培上的应用[J].江苏农业科学,2019,47(15):175-179.
- [5] 卢翔,夏海涛,刘星,等.不同基质配比对枫香生长的影响及效益分析[J].浙江农业科学,2020,61(1):82-85.
- [6] 张政清,何芳,张毅,等.成型压强对秸秆灰颗粒中水溶钾释放特性的影响[J].可再生能源,2018,36(6):797-803.
- [7] 陈冬冬,高旺盛,陈源泉.中国农作物秸秆资源化利用的生态效应和技术选择分析[J].中国农学通报,2007(10):143-149.
- [8] 汪婷婷,李强,艾雪竹,等.秸秆发电厂灰(渣)成分分析及其肥效初探[J].安徽化工,2017,43(3):100-101,104.
- [9] 秦茜.秸秆灰改良黏土衬垫材料强度特性与微观结构特性研究[J].建材发展导向,2017,15(20):76-78.
- [10] 易姝,赵展恒,梁玉祥.秸秆灰直接还田对土壤的影响[J].

西南农业学报,2016,29(4):891-895.

- [11] 李应超,赵林青,李辰淼,等.我国秸秆资源利用现状及其炭化利用展望[J].农业科技通讯,2018(5):12-14,66.
- [12] 王凯,洪立洲,李红阳,等.秸秆灰生物有机肥在啤酒大麦上的应用效果[J].江苏农业科学,2018,46(1):37-39.
- [13] 邵禹铭.秸秆灰渣复混肥在小白菜上的应用效果初报[J].农业科技与装备,2017(5):7-8,10.
- [14] 杨延杰,赵康,林多,等.基质理化性状与番茄壮苗指标的通径分析[J].华北农学报,2013,28(6):104-110.
- [15] 张宪政,陈凤玉,王荣富.植物生理学实验技术[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1994:43-68.
- [16] 王新右.蔬菜栽培与基质理化性状的关系探讨[J].现代农业科技,2018(13):76-77.

(责任编辑:王昱)