

黄贮秸秆两相厌氧发酵产沼气发酵参数优化研究

刘伟, 苏小红, 王欣, 范超

(黑龙江省能源环境研究院, 哈尔滨150009)

摘要:我国东北地区秸秆收获后发干黄化, 采用黄贮预处理法处理秸秆并进行厌氧发酵产沼气, 既能解决秸秆储存利用的季节性和时效性问题, 又能生产绿色能源沼气, 有较好的应用前景。本研究以黄贮后的玉米秸秆为发酵原料, 研究两相厌氧发酵过程中温度和固含量变化对产气效果的影响, 从而优化两相厌氧发酵工艺。通过试验得到优化后的工艺参数分别为: 发酵浓度15%、发酵温度55℃, 以期为我国北方秸秆大型沼气工程的应用提供参考。

我国东北地区玉米秸秆资源丰富, 秋季收获后的秸秆发干黄化。基于秸秆青贮原理, 采用秸秆黄贮法, 既能解决北方地区秸秆原料的堆放贮存问题, 又能提高秸秆的可生化性, 有利于秸秆的后续利用[1-3]。秸秆厌氧发酵技术是以秸秆为原料, 通过厌氧微生物代谢作用将秸秆类生

物质转化为 CH_4 和 CO_2

等的过程, 既能将废弃秸秆有效处理, 又能生产绿色能源沼气, 得到了国内外学者的广泛关注, 也是目前秸秆资源化利用的主要方式之一[4-6]。通过黄贮法预处理秸秆并厌氧发酵技术产气, 我国地沼气工程应用上具有广阔的推广前景[7-10]。

厌氧发酵过程包括水解、酸化、产氢产乙酸和产甲烷四个过程。其中, 产氢产乙酸菌群与产甲烷菌群属互赢共生菌群[11], 可将其化为产甲烷相。而水解酸化阶段以降解大颗粒有机物为主, 将其化为酸化相, 这样就在工艺上根据微生物的特性将厌氧发酵过程分为了水解酸化相和产甲烷相。通过此种方法, 使水解酸化相与产甲烷相分别放在独立的反应器内进行, 可保证水解产酸微生物和产甲烷微生物各自处于最优的生长环境中, 充分富集和发挥两种微生物的效力[12-15]。

本研究根据实验室前期对黄贮秸秆厌氧发酵实验参数的摸索, 成功搭建了两相厌氧发酵装置, 并进行了初步启动试验。但为了优化两相厌氧发酵工艺参数, 尽最大可能提升产气量, 本研究将重点优化黄贮秸秆两相厌氧发酵系统各工艺参数, 提升沼气产量, 实现秸秆沼气发酵的高效、可控运行, 为秸秆大型沼气工程实际应用提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

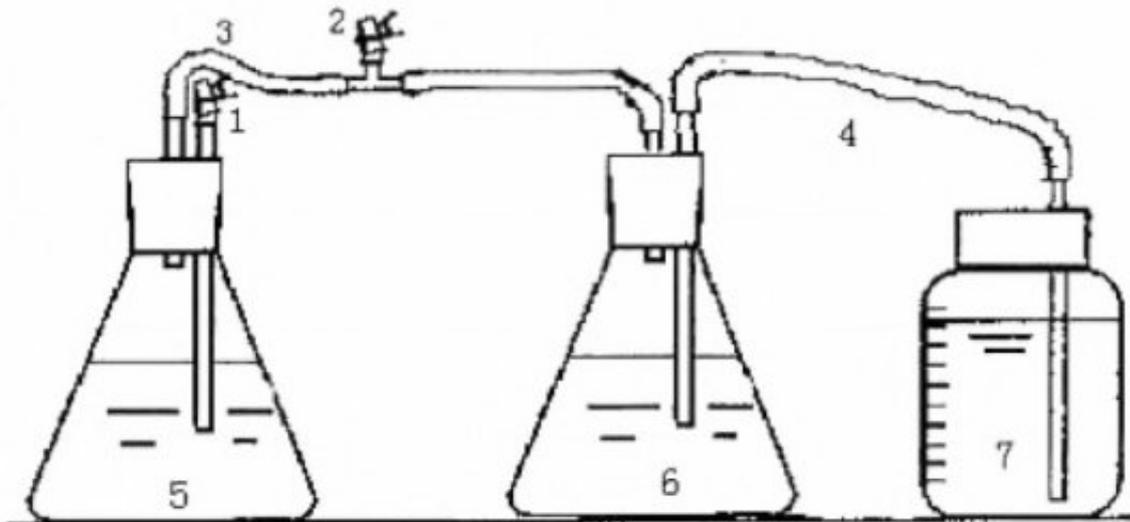
本试验所用玉米秸秆采自黑龙江省能源环境研究院院内, 为秋季收获后的秸秆。粉碎成1~3cm小段, 55℃烘箱中烘干5~6h后测其总固体含量(TS)为89.9%, 挥发性固体含量(VS)为79.3%。采用黄贮预处理方法将烘干秸秆原料进行预处理, 黄贮条件为含水率70%, 时间90d, 备用。接种物为厌氧发酵中试发酵罐中的沼液。

1.2 试验设计

黄贮秸秆通过两相厌氧发酵装置进行产甲烷试验。考察不同发酵温度、固含量和pH值对产气性能的影响, 温度梯度设定为中温35℃、高温55℃, 分别标记为35T、55T; 固含量梯度设定为9%、11%、13%、15%、17%, 分别标记为TS9、TS11、TS13、TS15、TS17。同时以传统批式黄贮秸秆厌氧发酵试验组作为对照组, 标记为CK, 研究两相发酵过程中不同发酵参数下的产气效果, 并对比分析两相发酵装置与传统批式黄贮秸秆厌氧发酵产气特性。

1.3 试验装置及调试启动方法设计

传统批式发酵装置采用排水集气法, 装置具体连接如图1所示。



注：1. 橡胶塞 2. 排气口 3. 气体收集管 4. 排液管
5. 厌氧发酵罐 6. 排水集气瓶 7. 液体收集器

Note: 1. Rubber plug 2. Exhaust port 3. Gas collection tube
4. Drain tube 5. Anaerobic fermentation tank
6. Drain and collect air bottle 7. Liquid collector

图1 传统批式厌氧发酵装置

Fig. 1 The traditional batch device on anaerobic fermentation

两相厌氧发酵装置采用图2所示的实验装置。水解酸化相与产甲烷相装置相同，容积为20L，垂直搅拌，水套加热。

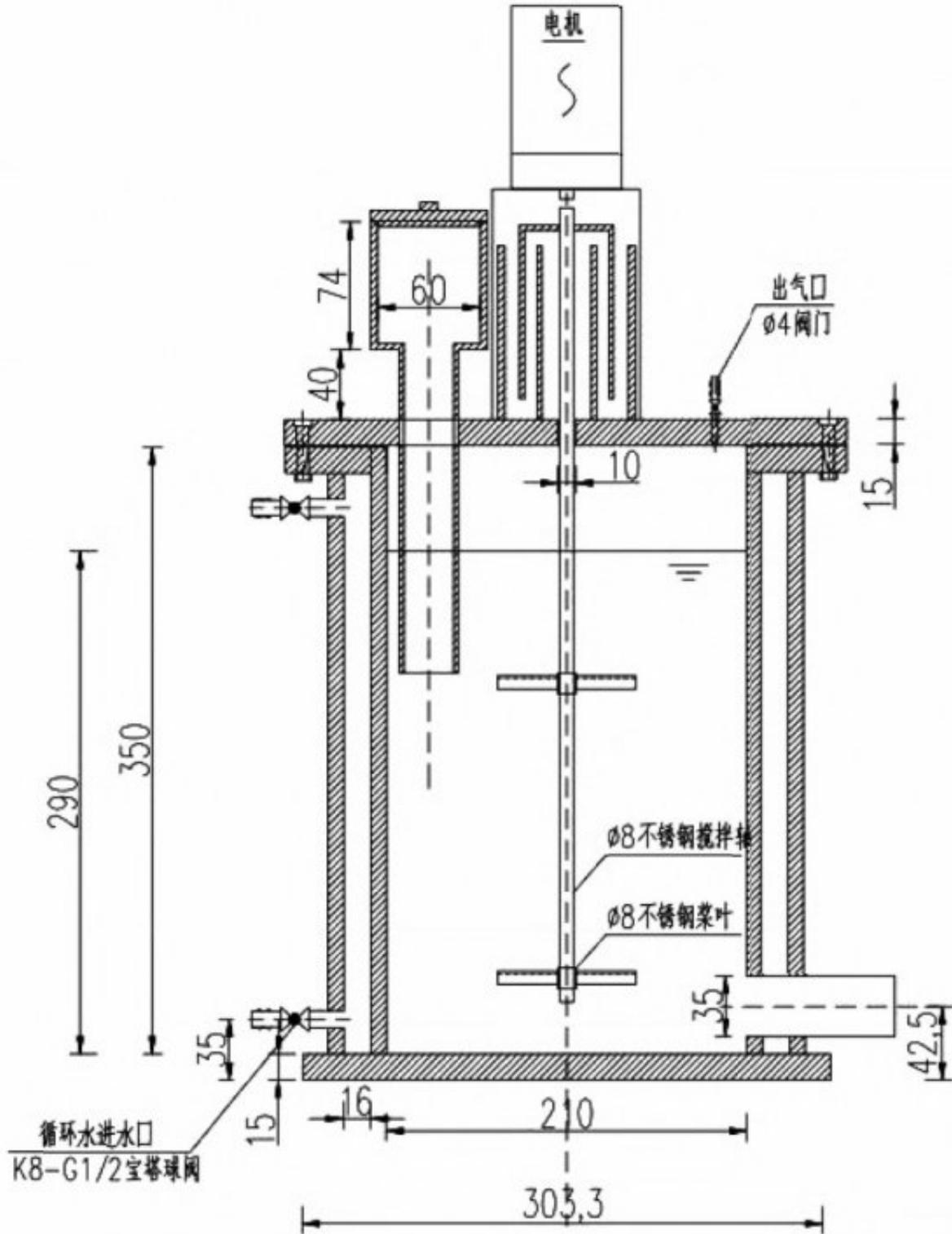


图 2 两相厌氧发酵实验装置

Fig. 2 The experimental apparatus of two - phase anaerobic fermentation

水解酸化相启动方法：加入6L接种物启动酸化罐，稳定运行数日后加入黄贮秸秆进行酸化调试，Eh控制在+50mv以下，pH为5.0，微生物以厌氧兼氧产酸菌、水解菌为主，常温厌氧发酵，连续发酵数日，不产气终止，即为酸化成功。

产甲烷相启动方法：加入6L接种物启动甲烷罐，严格厌氧条件，高温控制为55℃，pH控制为7.0，产甲烷菌大量富集，接种物的挥发性固体消耗殆尽后，即为启动成功。待甲烷相启动成功后，加入酸化罐酸化好的原料，进行两相厌氧发酵产甲烷试验。

1.4 试验仪器与设备

药典标准筛；精密pH计（PHS-3C）、DHZ-DA型电热鼓风干燥机、马弗炉（天津中环试验电炉制造有限公司生产）、FA1004精密电子天平（上海精科天平厂生产）。

2 结果与分析

2.1 不同发酵温度对黄贮秸秆两相厌氧发酵产气效果的影响

本部分试验研究了中温35℃、高温55℃对黄贮秸秆两相厌氧发酵产沼气效果的影响，并与传统批式厌氧发酵系统做对照，发酵时间为28d，每日记录产气量，结果如图3所示。

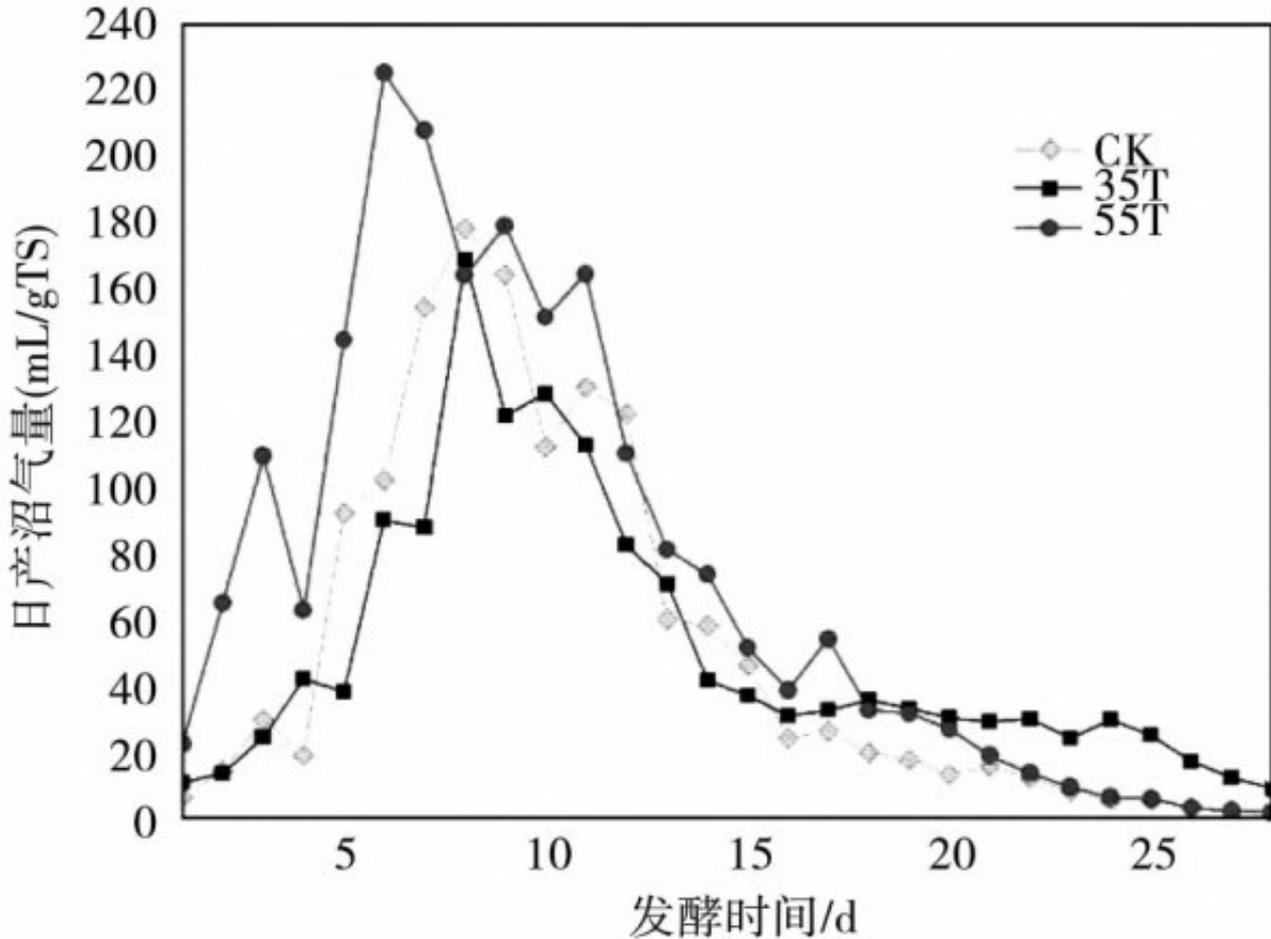


图3 不同发酵温度下黄贮秸秆两相厌氧发酵日产沼气的量

Fig. 3 The daily methane production on two-phase anaerobic fermentation of corn straw from yellow corn silage at different fermentation temperatures

由图3可知，温度对黄贮秸秆两相厌氧发酵产沼气有显著影响。在选取的35、55两种常用的发酵温度及传统批式秸秆厌氧发酵日产沼气的对比试验中，3个试验组均出现了两个产气高峰。55T试验组比35T试验组和CK试验组先进入产气期。55T试验组在第6d进入第一个产气高峰，35T试验组和CK试验组在第8d进入产气高峰，可见55高温发酵启动较快。3个试验组均在第一个产气高峰时出现了最大日产量，55T试验组达到226mL/gTS，35T试验组达到188.5mL/gTS，CK试验组达到168mL/gTS。随着试验的进行，3个试验组的沼气产量均呈下降趋势，其中55T试验组及CK试验组在发酵进行到第20d时产气基本结束，35T试验组仍继续产气。比较而言，55T试验组和CK试验组较35T试验组产气时间缩短8d左右，这是由于55T试验组采用高温55的发酵温度，发酵体系内微生物代谢活跃，底物消耗较快，导致后期发酵原料中可被微生物利用的有机物尽早消耗殆尽，这也是高温发酵可缩短发酵时间、提高产气速率的原因。此外，由于55T试验组采用两相厌氧发酵，发酵原料在酸化相内进行充分酸化后进入产甲烷相，增加了发酵底物的生化性，因而较传统批式秸秆发酵系统产气效果好。

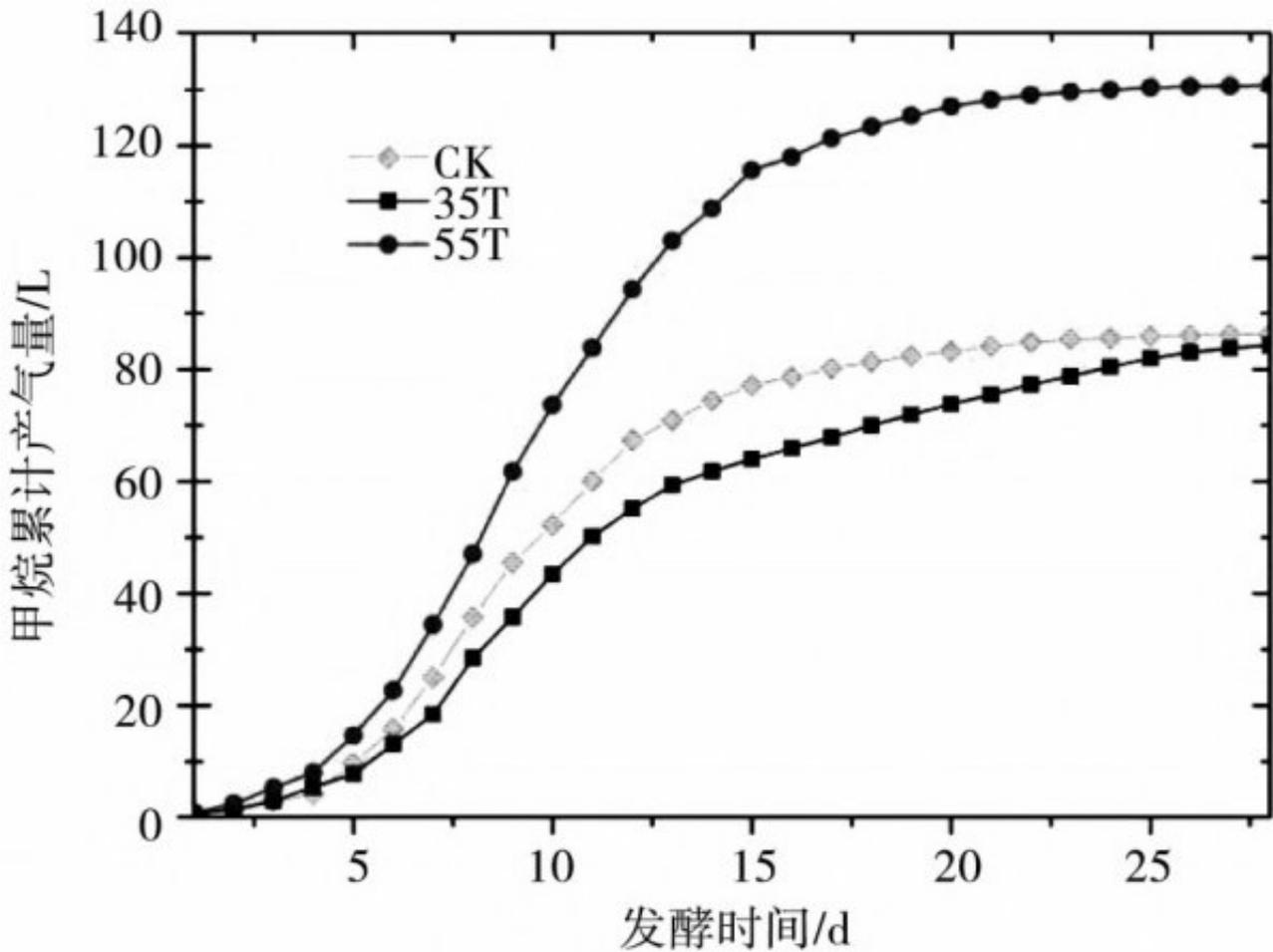


图 4 不同发酵温度下黄贮秸秆厌氧发酵甲烷累积产气量

Fig. 4 The cumulative methane production on two - phase anaerobic fermentation of corn straw from yellow corn silage at different fermentation temperatures

从图4中可看出，发酵温度不同导致黄贮秸秆厌氧发酵累积产气量相差较大。其中，55T试验组累积产气量最大，可达130.7L左右，CK试验组的累积产气量为86.26L，35T试验组累积产气量为84.3L。在相同实验系统内，55 试验组累积产气量较35 试验组高出55%，由此看出，发酵温度对黄贮秸秆厌氧发酵的产气效果影响显著。

2.2固含量对黄贮秸秆两相厌氧发酵产气效果的影响

发酵系统的固含量直接反映发酵过程中总发酵干物质质量和水分的配比情况，固含量的高低直接影响微生物的营养及代谢。

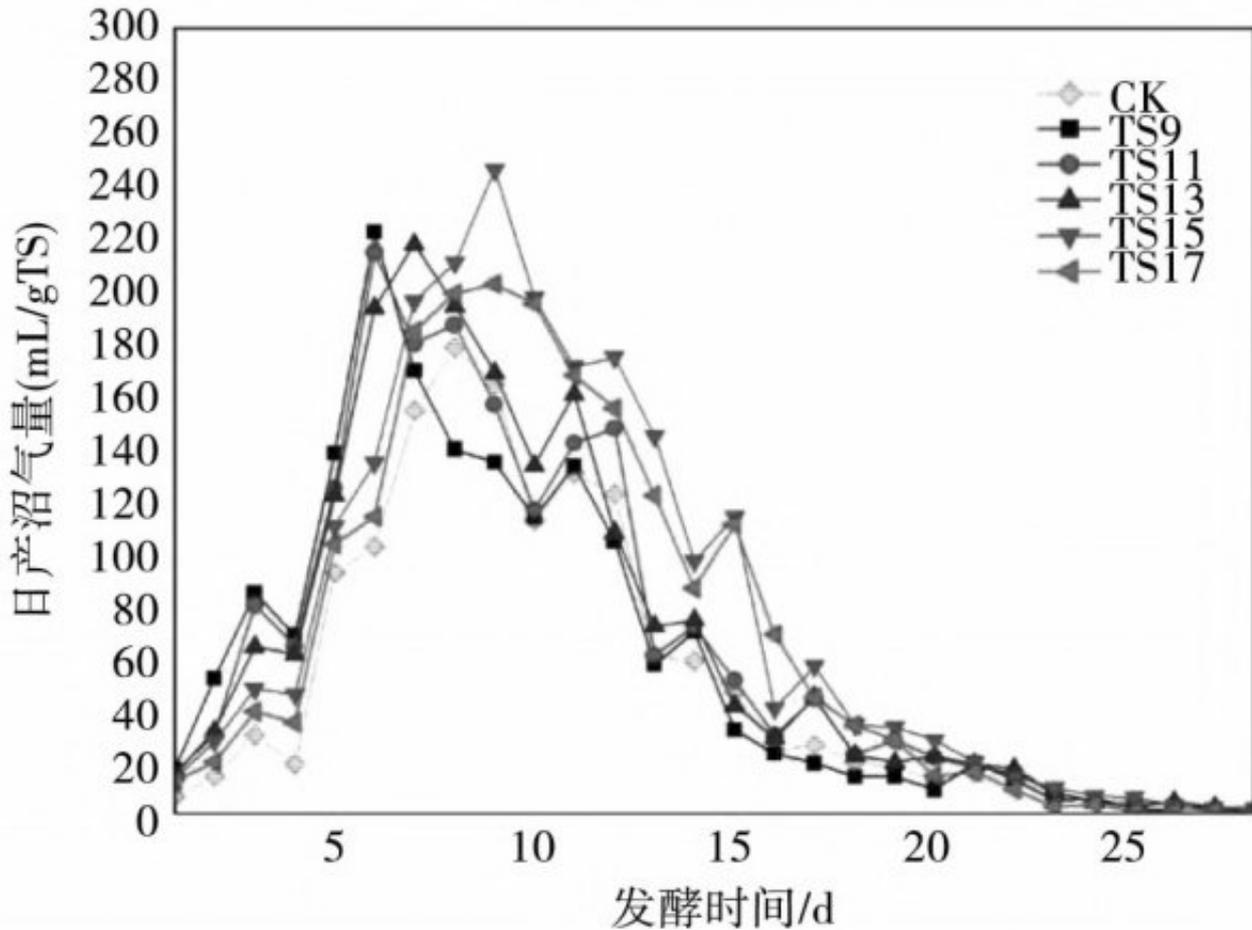


图5 固含量对高温两相厌氧发酵日产沼气流量的影响

Fig. 5 The daily methane production on two - phase anaerobic fermentation of corn straw from yellow corn silage at different fermentation concentration

由图5可知：不同固含量的发酵试验组日产沼气流量不同。CK试验组的日产沼气流量低，说明采用两相厌氧发酵装置能使原料通过充分水解酸化后再进行产甲烷，产气效果较好。从变化幅度上来看，发酵前期即第二个产气高峰出现前，各试验组日产气量呈现上升的趋势，CK试验组上升幅度相对其他试验组最小。对于两相厌氧发酵装置，日产沼气流上升幅度随着固含量的增大而减小，最大的是TS9试验组，其次是TS11、TS13、TS15，说明在发酵前期，批式发酵装置启动速度均较两相厌氧发酵试验组慢。对于两相厌氧发酵，固含量越高启动速度越慢，TS9试验组即固含量为9%，启动速度较快，符合发酵浓度低易启动的特点。在第二个产气高峰后，日产沼气流呈现下降趋势，下降幅度变化规律与发酵前期相反，固含量越高后期日产气量下降幅度越大，较早进入衰败期，这可能是发酵前期干物质分解过多，导致后期发酵原料中可利用成分不足的缘故。

从日产气量上来看，固含量对日产沼气流有显著影响。在一定范围内，固含量越高，日产沼气流越高。日产沼气流最大值出现在发酵第9d时TS15试验组，其当日产气量达到246mL/gTS，其次是TS17试验组，最大日产气量达到202mL/gTS，CK试验组最低。

从图6中可以看出，不同试验组累积产气量差异显著。CK试验组较两相厌氧发酵试验组的累积产气量少，为86.28L；TS15试验组的累积产气量最多，达130.77L，较CK试验组提升了52%；其次是TS17试验组，累积产气量达117.84L；再

次是TS13试验组、TS11试验组。说明并非固含量越高产气效果越好，当固含量超过15%时，累积产气量呈现下降趋势。

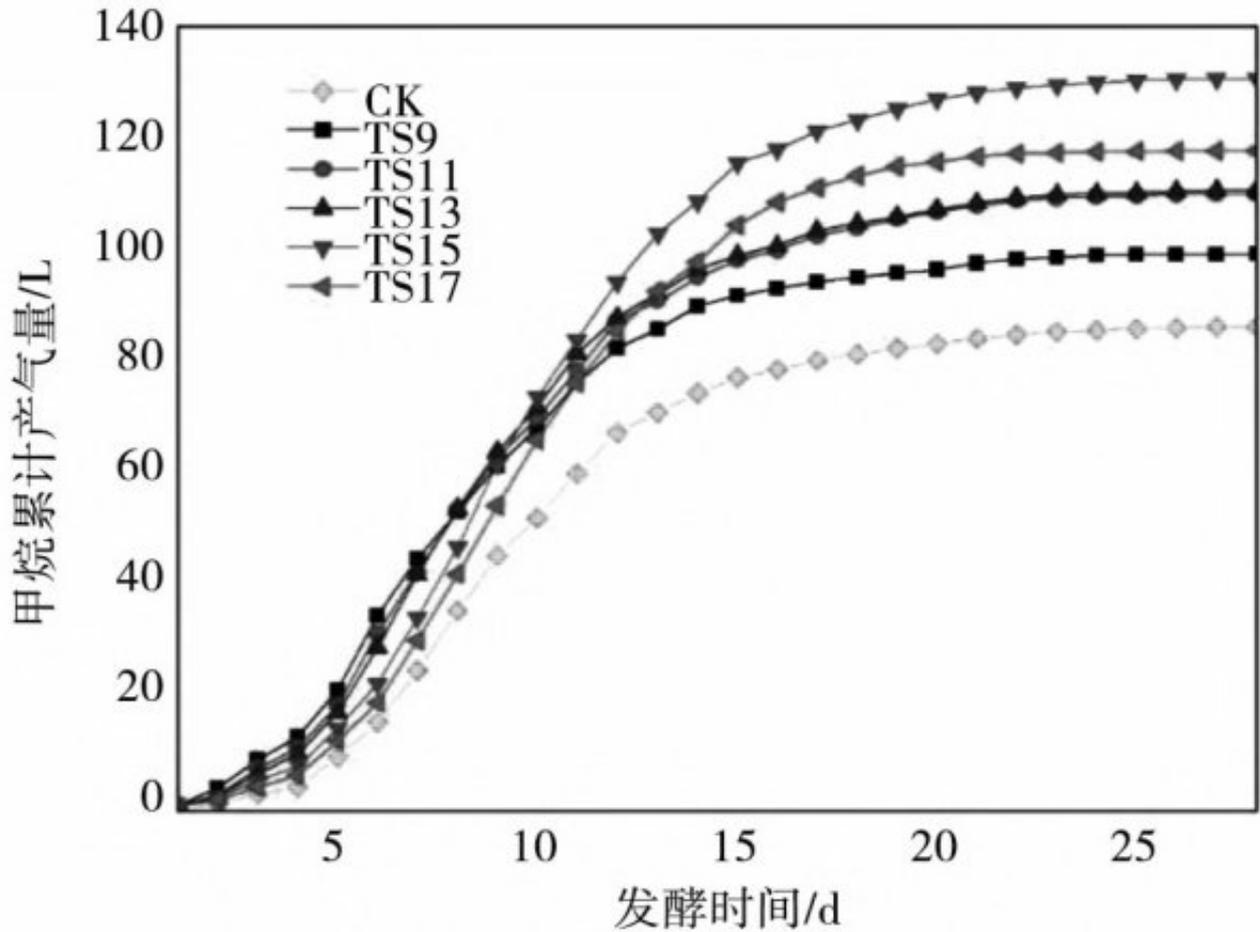


图 6 固含量对高温两相厌氧发酵累积产气量的影响

Fig. 6 The cumulative methane production on two - phase anaerobic fermentation of corn straw from yellow corn silage at different fermentation concentration

3结论

以黄贮玉米秸秆为发酵原料，在综合分析厌氧发酵机理的基础上，依据生物相分离、改进发酵系统、运行工艺优化为思路开展两相厌氧发酵过程中温度、固含量等参数的变化规律研究，从而优化两相厌氧发酵工艺，通过试验得到以下结论：

A.发酵温度对黄贮秸秆两相厌氧发酵产气影响较大。相对于中温发酵系统，55℃ 高温厌氧发酵产气效果较好，发酵启动快且缩短了发酵时间，发酵时间约为20d以内。相较传统批式黄贮秸秆厌氧发酵系统，秸秆高温两相厌氧发酵产气效果提高了51%左右。通过本部分试验可为寒区秸秆沼气工程的温度工艺参数优化提供一定的理论参考。

B.通过对不同固含量的影响试验分析，固含量为15%的两相厌氧发酵产气效果好，较传统的批式黄贮秸秆厌氧发酵提升了52%。所以在固含量参数上可选择15%作为两相厌氧发酵装置的发酵固含量。

参考文献：

- [1] 刘建成,安永福,王晓芳. 北方地区玉米秸秆黄贮技术[J]. 养殖与饲料,2014,(02): 31 - 32.
- [2] 马广英,张文举,徐清华,等. 秸秆黄贮优化方案及其对小麦、玉米、油菜秸秆处理的影响[J]. 中国草食动物科学,2014,(02):64.
- [3] 鄂佐星,金城,潘丽娜,等. 北方高寒地区能源生态模式适用技术探索[J]. 中国沼气,2001,19(01): 40 - 42.
- [4] 李步青,代学猛,代永志. 农作物秸秆厌氧发酵制沼气工程设计研究[J]. 安徽农业科学, 2015,43(09): 268 - 270.
- [5] 宋籽霖. 秸秆沼气厌氧发酵的预处理工艺优化及经济实用性分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [6] Hassan M, Ding W M, Bi J H, et al. Methane enhancement through oxidative cleavage and alkali solubilization pretreatments for corn stover with anaerobic activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2016, (200): 405 - 412.
- [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,2011,29(01): 29 - 33.
- [8] 付广青,杜静,叶小梅,等. 青贮水稻秸秆厌氧发酵产沼气特性[J]. 江苏农业学报,2016,32(01):90 - 96.
- [9] 任海伟,姚兴全,李金平,等. 青贮玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产气性能的试验研究[J]. 中国沼气,2015,33(01): 28 - 32.
- [10] Mamusek J. Removal of hardly fermentable ballast from the maize silage to accelerate biogas production [J]. Industfial Crops and Products,2013,(44): 253 - 257.
- [11] 任南琪,王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [12] 李建政,任南琪,王爱杰,等. 二相厌氧生物工艺相分离优越性的探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1998,31(02): 50 - 56.
- [13] 吴振兴,陈晓晔,杨占春,等. 秸秆两相厌氧消化产酸相发酵工艺[C]//第三届全国化学工程与生物化工年会论文摘要集(下),2006.
- [14] 白晓凤,李子富,尹福斌,等. 鸡粪与玉米秸秆混合“干-湿两相”厌氧发酵启动研究[J]. 中国沼气,2014,32(02): 22 - 25.
- [15] 朱瑾,叶小梅,常志洲,等. 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(01): 79 - 85.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/195406.html>