

# 蒸汽爆破技术在秸秆厌氧发酵中的应用

王许涛<sup>1,2</sup>, 张百良<sup>1\*</sup>, 宋安东<sup>1</sup>, 罗志华<sup>1</sup>, 任天宝<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 郑州 450002; 2. 平顶山工学院, 平顶山 467044)

**摘 要:** 该文采用蒸汽爆破技术对秸秆进行预处理, 探讨提高秸秆厌氧发酵产气量的新工艺。研究蒸汽爆破预处理的关键参数“爆破压力”和“保留时间”对秸秆厌氧发酵效果的影响。结果表明: 蒸汽爆破预处理后的秸秆比未经预处理秸秆厌氧发酵的产气量提高 34%~67.36%, 蒸汽爆破预处理压力在 3.0 MPa、保留时间为 90 s 时, 每克干秸秆厌氧发酵沼气的产量最大值达到 304.72ml; 蒸汽爆破预处理后, 秸秆厌氧发酵的启动时间和发酵周期大大缩短。

**关键词:** 蒸汽爆破; 厌氧发酵; 爆破压力; 产气量

**中图分类号:** S216.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-8-0189-04

王许涛, 张百良, 宋安东, 等. 蒸汽爆破技术在秸秆厌氧发酵中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 189—192.

Wang Xutao, Zhang Bailiang, Song Andong, et al. Application of steam-exploded technology to anaerobic digestion of corn stover[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 189—192.(in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

沼气作为一种清洁高效的能源已经得到了认可, 但以秸秆为主要原料的沼气工程却很少, 这与秸秆的成分和结构特性有关。秸秆主要成分是半纤维素、纤维素和木质素, 在纤维细胞的次生壁中, 微细纤维、木素、半纤维素中组分均呈不连续的层状结构, 彼此粘结又互相间断。这种结构不利于厌氧菌对纤维素的利用, 从而导致消化效率和产气率较低, 投入产出效益差。适当的预处理可以改善厌氧菌对秸秆的消化能力。

蒸汽爆破技术最早用于纸浆生产, 现正逐渐被用作生物质能源转换预处理技术<sup>[1-6]</sup>。通过化学、生物及其它方法对秸秆进行预处理来提高秸秆消化率的研究已有

很多报道<sup>[7-12]</sup>, 但将蒸汽爆破技术运用到秸秆的预处理发酵上还鲜有报道。本实验采用的蒸汽爆破装置的爆破脉冲宽度仅为 0.00875 s, 在此瞬间释放高密能量完成爆破来破坏秸秆结构, 实现秸秆的半纤维素、纤维素和木质素的分离, 旨在提高秸秆的可降解性和利用率, 为废弃秸秆的沼气化利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1) 玉米秸秆

玉米秸秆取自河南农业大学科教试验园区, 挑选干净的秸秆去根自然风干后(含水率在 10%以内), 制备成 2~4 cm 长的试样备用。秸秆主要成分见表 1。

表 1 玉米秸秆的主要组成成分  
Table 1 Main composition of corn stalk

项目	纤维素/%	木质素/%	半纤维素/%	酸不溶灰分/%	含水率/%	TS/%	VS/TS/%	灰分/%	C/N/%
含量	32.75	10.38	34.66	0.85	6.6	93.4	93.7	6.3	37.5

#### 2) 污泥

污泥是取自郑州市污水处理厂的厌氧污泥, 污泥的总固体(TS)含量为 8.73%, pH 值为 7.50, 呈黑色絮凝状, 取回后用塑料桶密封保存备用。

### 1.2 试验装置

#### 1) 蒸汽爆破试验台

蒸汽爆破试验台由河南省鹤壁市正道重机厂生产的

QB-200 型蒸汽爆破装置, 最高蒸汽压力可达 6 MPa, 加热功率为 8 kW, 有效爆腔容积为 0.405 L。该汽爆台采用气弹技术, 可以在 0.00875 s 内完成压力释放, 不同于过去所谓的汽爆方式(膨化和热喷), 实现了真正意义上的爆破。

#### 2) 发酵试验装置

发酵装置(图 1)主要有 2500 mL 的消化瓶, 2500 mL 的集气瓶和 1500 mL 的收集瓶组成。消化瓶上设气体和液体取样管, 便于进行发酵醪液和沼气的取样化验。

### 1.3 试验内容与方法

#### 1) 秸秆蒸汽爆破预处理

将秸秆分别在不同压力和保留时间下进行爆破处理, 压力水平分别为: 3.0、2.5、2.0 MPa, 保留时间分别为 60、90 和 150 s。爆破后秸秆的主要成分见表 2。

收稿日期: 2007-12-11 修订日期: 2008-03-20

作者简介: 王许涛(1971—), 男, 河南平顶山人, 博士生。郑州 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 450002。

Email: dsands@163.com.

\*通讯作者: 张百良(1941—), 男, 河南汤阴人, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源。郑州 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 450002。Email: hauzblo@yahoo.com.cn

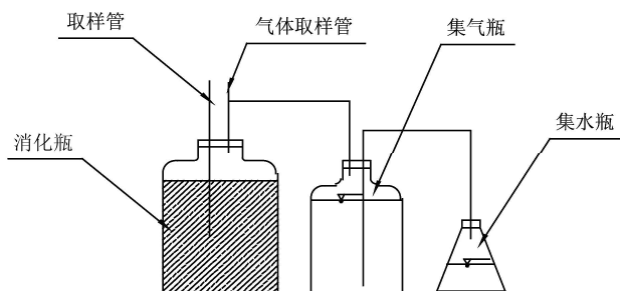


图 1 厌氧发酵试验装置

Fig.1 Experimental setup for batch anaerobic digestion

表 2 蒸汽爆破秸秆的主要成分

Table 2 Main composition of the steam-exploded corn stalk

项 目	2.0 MPa, 60 s	2.0 MPa, 90 s	2.0 MPa, 150 s	2.5 MPa, 60 s	2.5 MPa, 90 s	2.5 MPa, 150 s	3.0 MPa, 60 s	3.0 MPa, 90 s	3.0 MPa, 150 s
木质素	10.9	9.52	9.87	12.75	11.76	13.25	11.51	11.53	10.31
半纤维素	26.88	26.01	19.14	12.11	12.30	10.08	9.88	8.84	6.18
纤维素	30.69	29.20	30.64	32.59	35.34	35.93	31.04	30.75	30.95

## 2 结果与分析

### 2.1 不同蒸汽爆破条件下秸秆发酵沼气产量变化

#### 2.1.1 单位产气量的变化

经不同汽爆压力处理的秸秆常温厌氧发酵的单位产气量如图 2 所示。未经过汽爆的秸秆单位干物质的产气量为 182.08 mL, 经爆破预处理后秸秆较未汽爆的秸秆产气量增加 34%~67.36%。在压力 3 MPa, 保留时间 90 s 的条件下, 爆破预处理的秸秆常温下每克干物质最高产气量达到 304.72 mL。同一个汽爆压力下, 在保留时间小于 90 s 时, 随着保留时间的延长, 单位干物质秸秆的产气量呈上升的趋势; 保留时间在 90 s 到 150 s 区间, 随着保留时间的递增, 产气量稍有下降。在不同的爆破压力下, 保留时间小于 90 s 时, 产气量还有一定差距, 但在保留时间大于等于 90 s 后, 产气量差距逐渐缩小。保压时间为 90 s 时, 3.0、2.5 和 2.0 MPa 压力下每克干物质的产气量分别为 304.72、301.3 和 297.24 mL。可以看出, 随着蒸汽爆破压力的增加, 秸秆产气量提高, 但增幅度较小。

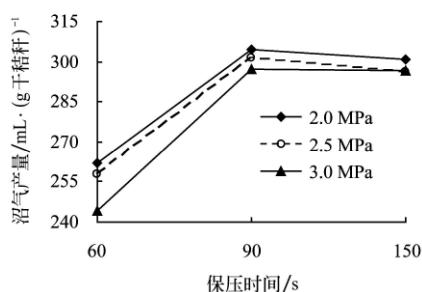


图 2 不同汽爆压力和保留时间下沼气的产气量

Fig.2 Biogas production rate under different steam-exploded pressure and retention time

#### 2.1.2 产气规律

不同爆破压力的产气规律见图 3~5。未处理秸秆的产气高峰在第 19 d 出现, 蒸汽爆破压力 2.0、2.5 和 3.0 MPa

### 2) 厌氧发酵试验

发酵过程中采用的发酵料液的总固体 (TS) 为 5%, 污泥接种量为 20%, 发酵温度在 23℃ 左右, 由于秸秆中的碳氮比较高, 试验中采用加  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  调节碳氮比至 25:1, 每瓶中加入汽爆后干物质秸秆 50 g, 每种汽爆秸秆样品发酵处理进行两次重复。

### 3) 测定方法

纤维素、半纤维素、木质素的测定按范氏 Van Soest 纤维测定法<sup>[13]</sup>; 总固体 (TS) 和挥发性固体物 (VS) 采用烘干法测定; 产气量的测定采用排水集气法, 每天计量一次。

的主产气高峰出现在 19、15 和 11 d, 压力越高, 主产气高峰提前越多。这说明较高蒸汽爆破压力溶出降解更多半纤维素, 同时溶出部分木质素, 将秸秆变得多孔疏松, 提高了细菌对纤维素的可及度, 秸秆更易消化。2.0、2.5 和 3.0 MPa 压力下的日最大产气量分别为 810、830 和 1082 mL, 且基本都出现在保留时间为 90 s 的条件下。压力较低、保留时间较短的蒸汽爆破预处理秸秆的产气曲线到达产气高峰的时间较长, 接近未处理秸秆的产气规律。压力大于 2.0 MPa, 保留时间为 60 s 时的产气分散且高峰低, 预处理时间高于 60 s 的条件下, 在发酵前 20 d 产气比较集中且峰高较高, 20 d 后发酵产气量开始稳步下降, 30 d 后, 日产气量基本都降到 200 mL 以下。而未处理秸秆 30 d 后还有一个产气的小高峰, 在接近第 40 d 时产气量才降至 200 mL/d 以下, 发酵启动和结束时间都较经蒸汽爆破预处理的秸秆要晚 10 d 左右。

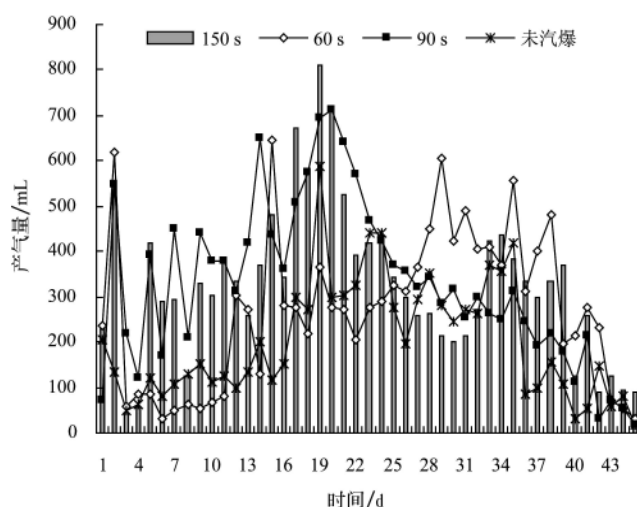


图 3 2.0 MPa 压力下不同保留时间汽爆秸秆产气变化曲线

Fig.3 Daily biogas production curve under the steam-exploded pressure 2.0 MPa

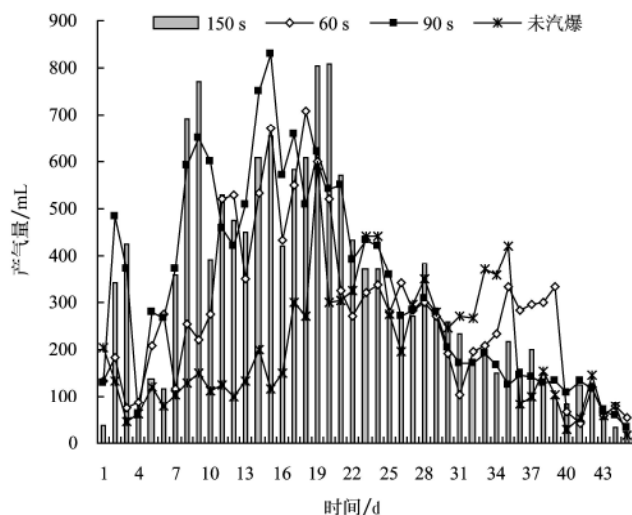


图 4 2.5 MPa 压力下不同保留时间汽爆秸秆产气变化曲线  
Fig.4 Daily biogas production curve under the steam-exploded pressure 2.5 MPa

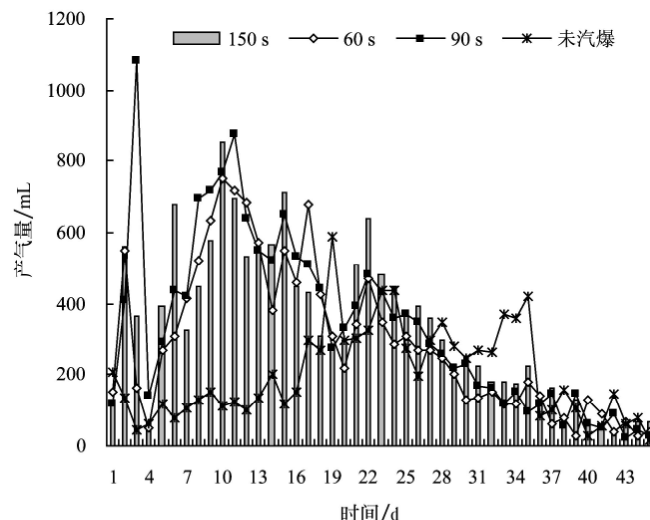


图 5 3.0 MPa 压力下不同保留时间汽爆秸秆产气变化曲线  
Fig.5 Daily biogas production curve under the steam-exploded pressure 3.0 MPa

图 6 是 2.0、2.5 和 3.0 MPa 爆破压力下不同保留时间处理秸秆与未经爆破的秸秆累计产气量的曲线图。从图 6 中可以看出未处理秸秆的曲线处在最下面，整个发酵周期呈平缓增长趋势，依次向上分别是爆破压力为 2.0、2.5、3.0 MPa、保留时间为 60 s 条件下的 3 条曲线，它们相对于未处理秸秆的曲线的斜率大大增加，在发酵进行到 20 d

时，沼气产量已经达到总产量的 60% 左右，而未处理秸秆产气量则只有总产量的 40%。当保留时间大于等于 90 s 时，经汽爆处理的秸秆发酵曲线变化规律趋于一致，启动时间短，在发酵 20 d 时，沼气产量已经达到总产量的 70%，此后增速开始放缓。

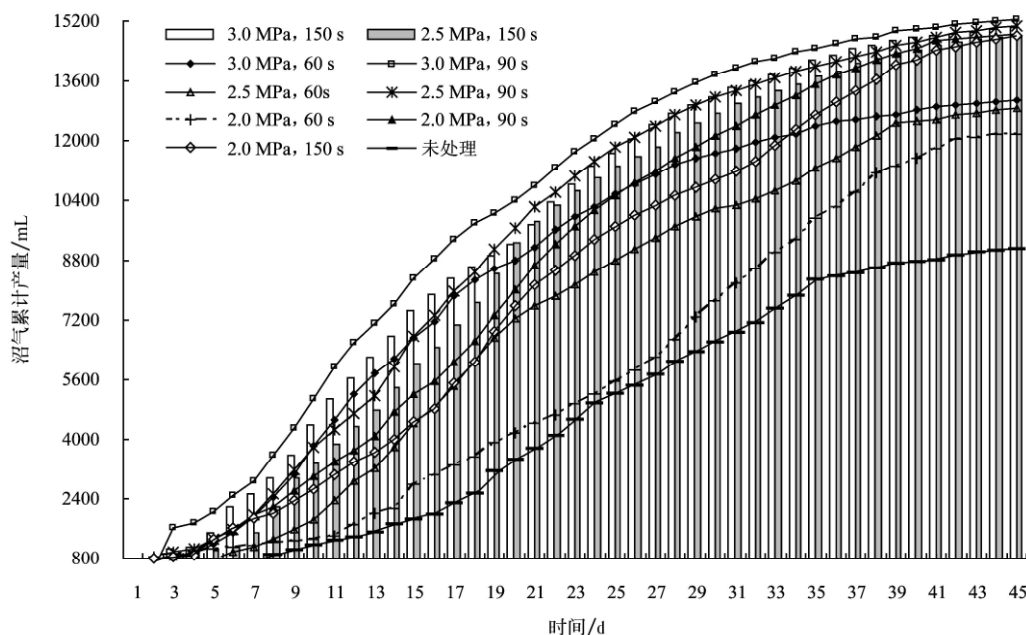


图 6 不同汽爆条件下的累计产气量  
Fig.6 Cumulative biogas production under different steam-exploded condition

## 2.2 蒸汽爆破技术提高秸秆发酵产气率的机理分析

蒸汽爆破原理是将秸秆置于密闭容器中，将高压蒸汽（通常大于 1 MPa）注入容器，蒸汽会通过秸秆表层微孔渗入到秸秆组织内部并与容器压力达到平衡，然后在毫秒级(0.00875s)的时间内将秸秆暴露于大气下。由于植物秸秆表层微孔很小，此时渗入秸秆组织内部的蒸汽只

有很少部分通过微孔泄出，其余大部分高压蒸汽在压差作用下完成绝热膨胀做功，对物料的细胞壁物理结构形成冲击，破坏细胞壁结构，同时在秸秆内的高温水分在细胞壁被破坏后会瞬间汽化，从而进一步对秸秆细胞结构冲击和剪切，使纤维发生一定的机械断裂。爆腔内高温高压环境加剧纤维素内部氢键的破坏，游离出新的羟

基, 纤维素内有序结构发生变化, 增加了纤维素的吸附能力。秸秆组织致密的表面变得多孔柔软, 细菌对纤维素的可及性大大增加<sup>[14]</sup>, 秸秆被降解能力提高, 产气速率和产气量得到提升。

### 3 结论与讨论

蒸汽爆破后秸秆常温发酵产气量大大提升, 比未处理秸秆高 34%~67.36%, 而且启动快, 发酵周期大大缩短, 主产气区域相对集中, 比较适合大规模的沼气和工业沼气发电的项目。3 种压力对应保压时间 90 s 和 150 s 条件下, 经蒸汽爆破预处理秸秆的常温产气量都在每克干物质 296 mL 以上, 主产气区主要集中在前 20 d。如果在中温条件下发酵, 其产气量和发酵周期会更加适合工业化沼气发电项目, 这将为秸秆高效清洁转化利用开辟新的出路。

虽然秸秆在 3.0 MPa、90 s 条件下爆破发酵得到的产气量(每克干物质 304.72 mL)最高, 但 2.5 MPa、90 s 处理条件的产气量是每克干物质 301.3 mL, 仅比 3.0 MPa 少 3 mL, 压力的增加就意味能耗上升, 加之实际生产中超过 2.5 MPa 的压力不易获得, 所以选择 2.5 MPa 作为汽爆压力较为合理。保留时间大于 90 s 时, 继续增加保留时间秸秆产气量的变化不再明显, 甚至有下降的趋势, 所以保压时间以 90 s 为宜。因此, 应用于厌氧发酵沼气生产的最佳爆破处理参数应为: 压力 2.5 MPa、保留时间 90 s。由于用于蒸汽爆破的压力属于高压, 实际应用中应综合考虑经济性和可实施性, 确定合适的爆破压力。

#### [参 考 文 献]

- [1] 孙智谋. 混合酶及汽爆法提高秸秆发酵酒精的产量[J]. 酿酒科技, 2004, 5: 75—78.
- [2] 陈洪章, 李佐虎. 无污染秸秆汽爆新技术及其应用[J]. 纤维素科学与技术, 2002, 10(3): 47—51.
- [3] 廖双泉, 邵自强, 马凤国, 等. 剑麻纤维蒸汽爆破处理研究[J]. 纤维素科学与技术, 2002, 10(6): 45—49.
- [4] Jeoh T, Agblevor F A. Characterization and fermentation of steam exploded cotton gin waste[J]. Biomass and Bioenergy, 2001, 21: 109—120.
- [5] Alfani F, Gallifuoco A, Saporosi A, et al. Comparison of SHF and SSF processes for the bioconversion of steam-exploded wheat straw[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2000, 25: 184—192.
- [6] Excoffier G, Toussaint B, Vignon M R. Saccharification of steam-exploded polar wood[J]. Biotechnol Bioeng, 1991, 38: 1308—1317.
- [7] Neves L, Ribeiro R, Oliveira R, et al. Enhancement of methane production from barley waste[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, (30): 599—603.
- [8] 周 岭, 石长青, 潘霞霞, 等. 生物质厌氧消化的试验研究[J]. 塔里木农垦大学学报, 2003, 15(4): 12—16.
- [9] Yang Dongyan, Li Xiujin, Gao Zhijian. Improving biogas production of corn stalk through chemical and biological pretreatment: a preliminary comparison study[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 209—213.
- [10] 吴 江, 徐龙君, 谢金连, 等. 碱浸泡预处理对固体有机物厌氧消化的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 252—259.
- [11] 庞云芝, 李秀金, 罗庆明. 温度和化学预处理对玉米秸厌氧消化产气量的影响[J]. 生物加工过程, 2005, 3(1): 37—41.
- [12] Penaud V, Delgenes J P, Moletta R. Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1999, 25: 258—263.
- [13] 张丽英. 料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [14] 陈洪章, 刘丽英. 蒸汽爆碎技术原理及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

## Application of steam-exploded technology to anaerobic digestion of corn stover

Wang Xutao<sup>1,2</sup>, Zhang Bailiang<sup>1\*</sup>, Song Andong<sup>1</sup>, Luo Zhihua<sup>1</sup>, Ren Tianbao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Renewable Energy of Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Pingdingshan Institute of Technology, Pingdingshan 467044, China )

**Abstract:** Steam-exploded technique was applied as corn stalk pretreatment to biogas enhancement in the process of anaerobic digestion. The effects of steam pressure, retention time in anaerobic digestion processes of steam-exploded corn stalk were investigated. The results showed that the steam-exploded corn stalk is more easily to be digested than the unpretreated. The ability to be digested of the steam-exploded corn stalk improved as the increase of steam pressure, the biogas production are greatly enhanced in the range of 34 to 67.36 percent. The biogas production can reach 304.72 mL/g of dry corn stalk with the pressure of 3.0 MPa and the retention time of 90 s. The start-up time and the period of anaerobic digestion of steam pretreated corn stalk were all significantly shortened.

**Key words:** steam explosion; anaerobic digestion; steam-exploded pressure; biogas production