

玉米秸秆蒸汽爆破用于厌氧发酵的技术评价

李刚¹, 李东亮², 王许涛^{3*}, 国超¹

(1. 河南农业大学农业部农村可再生能源重点开放实验室, 郑州 450002; 2. 川渝中烟工业公司技术研发中心, 成都 610066; 3. 河南城建学院, 平顶山 467044)

摘要: 蒸汽爆破可破坏木质纤维素结构, 提高纤维素、半纤维素的转化利用率, 是秸秆类物质利用的一种有效预处理方式。作者研究了玉米秸秆蒸汽爆破处理及其厌氧发酵过程中的能量平衡关系, 结果表明相同维压时间下蒸汽爆破处理后玉米秸秆厌氧发酵过程中的能源转化率随着压力增大而增大, 而在相同压力条件下均在 90 s 维压时间时得到最大能源转化率。玉米秸秆蒸汽爆破后在常温条件下厌氧发酵的最小和最大能源转化率分别为 8.39% 和 11.68%, 是对照组的 1.38 倍和 1.92 倍。但对蒸汽爆破玉米秸秆厌氧发酵的增量效益-费用比分析表明, 因玉米秸秆蒸汽爆破处理而引起厌氧发酵产气量增加所形成产气的能量增加量小于蒸汽爆破处理所消耗的能量, 从能量转换角度来说蒸汽爆破并不是玉米秸秆厌氧发酵的最经济处理方式。

关键词: 秸秆, 厌氧消化, 能源转换, 蒸汽爆破, 增量效益-费用比

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.046

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0286-05

李刚, 李东亮, 王许涛, 等. 玉米秸秆蒸汽爆破用于厌氧发酵的技术评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 286-290.

Li Gang, Li Dongliang, Wang Xutao, et al. Technology evaluation of steam exploded corn stalk anaerobic fermentation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 286-290. (in Chinese with English abstract)

0 引言

作为一个农业大国, 中国有着丰富的秸秆资源, 但随着经济的快速发展, 原作为农村生活用能和牲畜饲料的农作物秸秆逐步沦为农业废弃物, 其不当处置造成了严重的环境污染。近年来, 随着化石能源供应紧张和环境问题的日益突出, 以秸秆为主的生物质能成为后续能源发展的重要技术方式^[1-4]。但秸秆作为一种典型的木质纤维素聚合物, 木质素的包绕结构阻碍了微生物对纤维素和半纤维素转化和利用, 破坏木质纤维素结构成为提高秸秆生物转化效率的重要技术措施^[5-7]。蒸汽爆破作为一种预处理方式, 可以有效实现木质素、纤维素、半纤维素结构的分离, 提高后继工艺对纤维素、半纤维素的利用率, 逐步被应用于秸秆厌氧发酵、纤维素燃料乙醇发酵等技术领域^[8-11]。目前, 对以蒸汽爆破作为预处理手段的生物能源生产技术研究主要集中于对生物转化环节的研究, 突出蒸汽爆破措施对产量的提升效果。因而, 蒸汽爆破也仅被作为一种预处理手段对待, 对于其处理过程的能量转换关系缺少相关的研究。虽有文献对厌氧发酵过程的能量转换效率进行分析, 但这些分析都是基于理论推算且忽略了厌氧发酵过程中的基本能量平衡,

未能考虑接种物所带入能量和产气中因 CH_4 含量不同而引起的产出能量的变化^[12-13], 由此计算出的能源转化效率还值得商榷。由于蒸汽爆破处理需要使用高温高压的饱和蒸汽作为工作介质, 这些外界能量输入将对秸秆能源化利用过程的经济性能产生很大的影响^[14]。文章以玉米秸秆蒸汽爆破处理后用于厌氧发酵为研究对象, 分析了玉米秸秆蒸汽爆破和厌氧发酵过程的能量平衡关系, 探讨了蒸汽爆破玉米秸秆进行厌氧发酵的能量转换关系, 从能量学角度对玉米秸秆汽爆处理及厌氧发酵过程中能量投入产出的影响进行对比分析, 为秸秆厌氧发酵的工程应用提供参考数据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

玉米秸秆, 河南农业大学科教园区, 去根后自然风干, 粉碎至 2~3 cm, 低位发热量(空气干燥基) $Q_{\text{ad,net}}=14500$ kJ/kg。活性污泥, 郑州市五龙口污水处理厂, 含水率 99.4%, $Q_{\text{ad,net}}=12680$ kJ/kg。

1.2 仪器设备

QB-200 蒸汽爆破工艺试验台, 鹤壁市正道重型机械厂, 爆腔容积为 405 mL, 试验时单次秸秆爆破量质为 35 g, 蒸汽充实量约为 200 mL。

气相色谱仪: Agilent6820, 美国安捷伦科技有限公司。

XRY-1A 数显氧弹式热量计, 上海昌吉地质仪器有限公司。

1.3 试验方法

秸秆粉碎后先进行蒸汽爆破(爆破压力分别为 2、2.5、

收稿日期: 2010-06-27 修订日期: 2010-08-18

作者简介: 李刚(1975—), 男, 河南郸城人, 博士, 讲师, 主要从事可再生能源转换技术研究。郑州 河南农业大学农业部农村可再生能源重点开放实验室, 450002。Email: energy789@126.com

*通信作者: 王许涛(1971—), 男, 河南平顶山人, 博士, 副教授, 从事可再生能源转换技术研究。平顶山 河南城建学院, 467044。

Email: dsands@163.com.

3 MPa, 各压力条件下的保压时间为 60、90、120 s), 取爆破后的秸秆 200 g (干质量) 于 2 500 mL 发酵瓶中进行常温厌氧发酵, 温度变化范围为 22~27°C, 使用活性污泥作接种物, 污泥添加量为 20 g (干质量), 发酵料液总固体质量分数为 8%, 发酵周期为 45 d, 同时将未经汽爆的秸秆作试验对照。测量发酵产气量和产气中甲烷含量, 换算产出的可转换能量。

2 秸秆蒸汽爆破及厌氧发酵过程中的能量平衡

2.1 蒸汽爆破过程的能量平衡

蒸汽汽爆是使用高温高压饱和蒸汽对原料进行处理的过程, 其工作原理如图 1。由蒸汽发生器产生的饱和水蒸气在密闭爆腔中逐步渗透到木质纤维素结构内部, 从而使细胞壁内外压力逐步趋于一致; 当气泵通过连杆打开爆腔出料口时, 在巨大压差作用下细胞内的蒸汽冲破细胞壁物质的阻挡, 瞬间释放, 从而对细胞壁形成破坏, 实现木质素、纤维素和半纤维素的分离。同时, 部分半纤维素、果胶等不稳定物质也在高温高压蒸汽作用下发生化学反应而转化为其他小分子物质。因此蒸汽爆破是一种外界能量作用下的物理分离和化学转化过程, 其蒸汽爆破过程中的能量平衡关系如图 2 和式 (1) 所示。

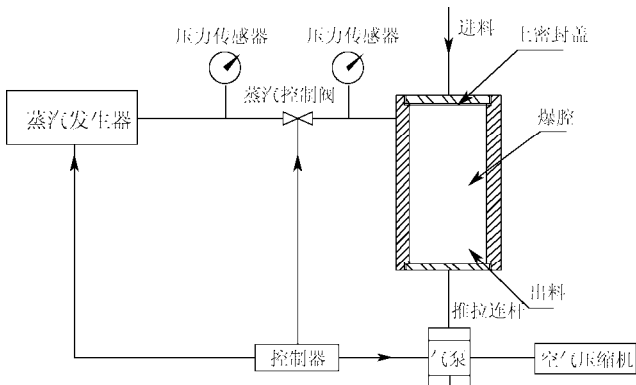


图 1 蒸汽汽爆工作原理图
Fig.1 Principle diagram of steam explosion

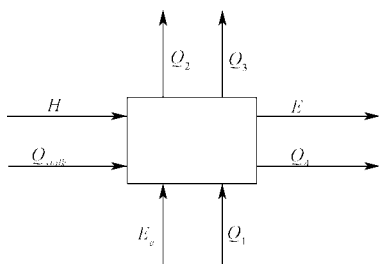


图 2 蒸汽爆破过程能量平衡图
Fig.2 Energy balance of steam explosion

$$H + Q_{stalk} + E_e + Q_1 = Q_2 + E + Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

式中, H 为饱和蒸汽的焓值, 由相应工作压力决定; Q_{stalk} 为秸秆所含能量; E_e 为空气压缩机及控制线路所消耗电能; Q_1 为秸秆显热; Q_2 为爆破后秸秆所含能量; Q_3 为散热损失, 主要由爆腔及输气管路向环境中散热形成; E 为爆出物的动能, 爆破瞬间物料在压力作用下形成, 由物料质量和压力大小决定; Q_4 为爆出物的显热。

蒸汽爆破作为一种预处理形式, 其输出能量中 Q_3 、 E 均不能为后继工艺所利用, 同时由于汽爆过程与后继的利用过程还存在较长的时间间隔, 由爆出物携带的显热 Q_4 也无法为后继工艺所利用。因此蒸汽爆破过程输入能量仅能通过物料内能变化对后继工序的能量转换产生影响。

2.2 爆破秸秆厌氧发酵过程的能量平衡

厌氧发酵过程是一个生物转化过程, 厌氧微生物通过自身代谢将原料中的有机质分解为以 CH_4 、 CO_2 为主的气态产物和水溶性物质, 在气态生成物中 CH_4 是主要的可利用能源 (H_2 和 H_2S 虽是含能气体, 但因含量极少而常被忽略不计, 且 H_2S 一般还要作为有害成分进行脱除), 生成的水溶性物质和原料中不完全分解物则形成发酵残留物。以活性污泥作为接种物时, 秸秆厌氧发酵过程中的能量平衡如图 3 和式 (2) 所示。

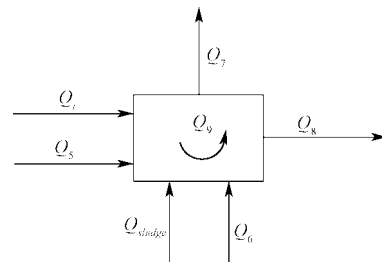


图 3 秸秆厌氧发酵过程中的能量平衡图
Fig.3 Energy balance of stalk anaerobic fermentation

$$Q_i + Q_5 + Q_{sludge} + Q_6 = Q_7 + Q_8 + Q_9 \quad (2)$$

式中: Q_i 为秸秆所具有的能量; Q_5 为秸秆的显热; Q_{sludge} 为活性污泥所具有的能量; Q_6 为活性污泥的显热; Q_7 为气态生成物所具有的能量; Q_8 为发酵固液产物所含有的化学能及显热; Q_9 为发酵微生物生长、代谢所消耗的能量。

由于爆破秸秆的厌氧发酵过程是在室温条件进行的, 其进料显热和产物显热可忽略不计, 此时秸秆和接种物活性污泥所具有的化学能是系统能量的主要输入者; 而在输出能量中仅有气态产物中的 CH_4 、 H_2 和 H_2S 所具有能量才能转为能源使用, 其他能量主要以化学能的形式存在于 CO_2 和固液发酵产物中。

2.3 蒸汽爆破秸秆厌氧发酵过程中的能量平衡

当将蒸汽爆破与厌氧发酵 2 个工序作为一个系统物料生产过程考虑时, 由于其过程在室温环境发生, 因物料显热引起的能量变化可忽略不计; Q_i 秸秆所具有的能量为爆破秸秆所具有的能量 Q_2 , 即 $Q_i=Q_2$, 此时反应体系的能量平衡关系如图 4 和式 (3)。

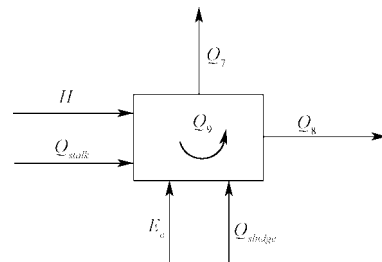


图 4 蒸汽爆破秸秆厌氧发酵过程的能量平衡图
Fig.4 Energy balance of steam exploded stalk anaerobic fermentation

$$H + E_e + Q_{sludge} + Q_{stalk} = Q_7 + Q_8 + Q_9 \quad (3)$$

在蒸汽爆破秸秆厌氧发酵系统中仅有气态产物中的 CH₄、H₂ 和 H₂S 所具有的热能可以转化为其他能量形式, 从能源利用角度分析, 这也是系统产能中的主要有用能, 此时系统的能量转换效率为:

$$\eta = \frac{\text{有用能}}{\text{投入能量}} \times 100\% = \frac{Q_{CH_4} + Q_{H_2} + Q_{H_2S}}{Q_{stalk} + H + E_e + Q_{sludge}} \times 100\% \quad (4)$$

如前所述, 当不计发酵气态产物中少量 H₂ 和 H₂S 所具有的能量时, 式 (4) 转化为

$$\eta = \frac{Q_{CH_4}}{Q_{stalk} + H + E_e + Q_{sludge}} \times 100\% \quad (5)$$

3 蒸汽爆破秸秆厌氧发酵过程中的能量关系分析

3.1 能量转换效率分析

不同汽爆处理条件下玉米秸秆厌氧发酵产气量和甲烷含量如表 1 所示。

表 1 不同汽爆处理条件下玉米秸秆厌氧发酵产气量和甲烷含量
Table 1 The yield of biogas and methane content in anaerobic fermentation of steam exploded corn stalk

	2 Mpa			2.5 Mpa			3 Mpa			
	未汽爆	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s
产气量/L	9.3	12.2	14.9	14.5	12.9	15.1	14.8	13.2	15.5	15.2
CH ₄ 体积分数/%	57.44	65.41	68.53	70.46	68.21	71.64	70.68	71.17	72.35	69.51

基于不同爆破工艺条件下所供工作介质焓及其发酵产气结果不同, 而试验所用材料秸秆和污泥的热值为定值, 式 (5) 可转换为

$$\eta_{(P,T)} = \frac{Q_{CH_4(P,T)}}{Q_{stalk} + H_{(P,T)} + Q_{sludge} + E_{e(P,T)}} \times 100\% \quad (6)$$

E_{e(P,T)}由蒸汽爆破频率决定, 正常工作情况下 60、90、120 s 保压时间对应的单次平均工作周期为 500、550、600 s, 试验时使用 ZB-0.67/8-B20 空气压缩机为气泵提供动力, 其额定功率为 1.1 kW, 因空气压缩机为间歇性工作, 其工作中所贡献的能量以一定工作周期内加工物料质量 (干重) 与加工时间的比值即单位质量能耗计, 工作过程中 60、90、120 s 3 种保压时间下对应的单位质量能耗分别为 924、880、772 kJ/kg; 由于控制线路消耗的电能较小可忽略不计。由 (式) 6 可得秸秆不同蒸汽爆破预处理条件下的能量转换效率如表 2 所示。

表 2 不同汽爆处理条件下秸秆厌氧发酵的能源转换效率
Table 2 Energy conversion efficiency in anaerobic fermentation of steam exploded corn stalk

	2 Mpa			2.5 Mpa			3 Mpa			
	未汽爆	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s
η/%	6.08	8.39	10.76	10.83	9.19	11.33	11.06	9.76	11.68	11.07

注: Q_{net,CH₄}=35 906 kJ/m³; Q_{net,H₂}=10 794 kJ/m³; Q_{net,sludge}=12 680 kJ/kg。

从表 2 中可见, 未经蒸汽爆破处理的玉米秸秆在室温厌氧发酵过程转化为气态能源的能量仅占输入能量的 6.08%, 其他能量则以化学能形式存在于固液发酵产物中, 而经过不同汽爆工艺处理的玉米秸秆在厌氧发酵过程中转化为可用能的比例均高于对照组, 分别提高了 37.99%~92.11%, 其中在压力为 3MPa、维压时间为 90 s 的汽爆处理条件下, 玉米秸秆厌氧发酵过程中最大能源转化率 η_{(3,90)max} 达到 11.68%, 是对照组的 1.92 倍。对比各组处理可以看出, 在相同维压时间下物料过程中能源转换效率随着爆破处理压力的增大而增大, 即 η_(3,T)>η_(2.5,T)>η_(2,T), 这说明随着蒸汽压力的增加爆破处理对玉米秸秆中木质纤维结构的破坏能力增强, 纤维素、木质素的分离程度增加, 降低了木质素对纤维素的屏蔽作用, 在一定程度上提高了纤维素被微生物降解转化能力。

对于相同爆破压力条件下, 3 组处理均在维压时间为 90 s 时达到最大能源转换率, 这主要是因为蒸汽爆破过程中的维压过程不仅是一个饱和蒸汽向玉米秸秆细胞结构渗透的过程, 在这个渗透过程中秸秆中的半纤维素、果胶质等非定型物质在高温高压条件下也发生化学转化, 保压时间的长短则决定着这些非定型物质的转化程度, 进而影响这些物质被后继厌氧发酵微生物利用的程度, 过短的保压时间则不能实现高压蒸汽向细胞结构完全渗透, 影响木质素、纤维素的分离效果进而影响秸秆的能源转换效率, 过长的保压时间则可导致非定型物质的分解转化, 降低了原料中可转换物质含量。

3.2 蒸汽爆破玉米秸秆厌氧发酵过程中的增量效益-费用比 (ΔB/ΔC) 分析

对比玉米秸秆未处理与爆破处理后进行厌氧发酵过程的能量平衡关系可知, 玉米秸秆蒸汽爆破与未处理厌氧发酵过程中引入的能量除都包含物料所含有能量、活性污泥带入能量外, 还引入了蒸汽所携带能量和气泵工作所消耗的能量, 为了对这部分相对于常规发酵所引入的额外能量进行分析, 使用增量效益-费用比 (ΔB/ΔC) 进行评价, 其评价方程为

$$\frac{\Delta B}{\Delta C} = \frac{\text{净增加的收益能量}}{\text{净增加的投入能量}} = \frac{Q_{out2} - Q_{out1}}{Q_{in2} - Q_{in1}} \quad (7)$$

式中, Q_{out2} 为秸秆蒸汽爆破处理后厌氧发酵获得的可转化能量; Q_{out1} 为秸秆厌氧发酵所获得的可转化能量; Q_{in2} 为秸秆蒸汽爆破处理和厌氧发酵所投入的能量; Q_{in1} 为秸秆厌氧发酵所投入的能量。

不同蒸汽爆破处理情况玉米秸秆厌氧发酵过程中的增量效益-费用比如表 3。

表 3 蒸汽爆破玉米秸秆厌氧发酵过程中的增量效益-费用比
Table 3 Incremental benefit-cost ratio in anaerobic fermentation of steam exploded corn stalk

	2Mpa			2.5Mpa			3Mpa		
	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s
ΔB/ΔC	0.359	0.686	0.751	0.438	0.717	0.732	0.481	0.718	0.689

从表中可以看出在相同爆破压力条件下, ΔB/ΔC 随着保压时间的增加而增加, 其相对增加产出能量逐步接

近爆破投入能量, 出现这种情况的主要原因在于保压操作过程中并没有额外能量的输入, 保压时间的增加对物料的转化有一定的促进作用。但在试验所确定试验条件下, 爆破玉米秸秆厌氧发酵过程中的增量效益-费用比均小于 1, 说明蒸汽爆破玉米秸秆厌氧发酵的增量能量产出小于因采用蒸汽爆破处理而投入的能量。如果单纯从能量学角度分析, 蒸汽爆破处理玉米秸秆用于厌氧发酵在经济条件上不具有可行性。当考虑秸秆废弃物能源高品位转化、清洁化利用及由此带来的生态环境效益时, 蒸汽爆破可作为一种秸秆厌氧发酵的参考原料处理方式。

3 结 论

1) 蒸汽爆破有利于提高玉米秸秆厌氧发酵过程中的能量转换效率。试验条件下蒸汽爆破玉米秸秆厌氧发酵的能量转换效率比对照分别提高了 1.38~1.92 倍; 试验在饱和蒸汽压力为 3 Mpa, 维压时间为 90s 的条件下得到的蒸汽爆破玉米秸秆厌氧发酵过程中的最高能量转换效率为 11.68%。

2) 玉米秸秆蒸汽爆破处理时, 在相同维压时间条件下其厌氧发酵过程中的能量转换效率随着压力的升高而升高。

3) 增量效益-费用比分析表明, 玉米秸秆因蒸汽爆破而在厌氧发酵过程中增加的能量产出小于因蒸汽爆破而引入的能量。

4) 从能量学角度考虑, 现有条件蒸汽爆破并不是玉米秸秆厌氧发酵最经济的原料处理方式。

[参 考 文 献]

- [1] Wright L. Worldwide commercial development of bioenergy with focus on energy crop based projects[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2006, 30 (8/9):706-714.
- [2] 张百良, 宋华民, 李世欣. 生物能源发展及科技创新机遇[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 285—288.
Zhang Bailiang, Song Huamin, Li Shixin. Bioenergy development and opportunity of technological innovation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2): 285—288. (in Chinese with English abstract)
- [3] Office of the biomass program, Energy efficiency and renewable energy, U.S. Department of energy. Biomass multi-year program plan[R]. <http://www1.eere.energy.gov/biomass/>. 2010, 3.
- [4] European Commission. Political framework and user requirements of biomass resource assessments for energy[R]. <http://www.eu-bee.info/default.asp?SivuID=24158>. 2009, 10.
- [5] Arthur J Ragauskas, Charlotte K Williams, Brian H Davison, et al. The path forward for biofuels and biomaterials[J]. *Science*, 2006, 311: 484—489.
- [6] 杨世关, 李继红, 孟卓, 等. 木质纤维素原料厌氧生物降解研究进展[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(增刊 1): 120—123.
Yang Shiguan, Li Jihong, Meng Zhuo, et al. Review on anaerobic biodegradation of lignocellulose[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Supp1): 120—123. (in Chinese with English abstract)
- [7] Hatakka A I. Biological pretreatment of lignocellulose for enzymatic hydrolysis of cellulose[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1984, 9(4): 363—364.
- [8] Jiebing Li, Göran Gellerstedt, Kai Toven. Steam explosion lignins: their extraction, structure and potential as feedstock for biodiesel and chemicals[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(9): 2556—2561.
- [9] Kaar W E, Gutierrez C V, Kinoshita C M. Steam explosion of sugarcane bagasse as a pretreatment for conversion to ethanol[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14(3): 277—287.
- [10] Jin Wang, Zheng-Bo Yue, Tian-Hu Chen, et al. Anaerobic digestibility and fiber composition of bulrush in response to steam explosion[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(17): 6610—6614.
- [11] 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)
- [12] 张庭婷, 李嘉薇, 王双飞. 几种生物质原料厌氧发酵制取沼气能量转换效率的比较[J]. *造纸科学与技术*, 2009, 28(3): 36—41.
Zhang Tingting, Li Jiawei, Wang Shuangfei. Study on the energy conversion efficiency of biogas from anaerobic fermentation with several biomass materials[J]. *Paper Science and Technology*, 2009, 28(3): 36—41. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王志红, 刘守华. 沼气发酵能量转换效率的研究[J]. *辽宁师专学报*, 2002, 4(3): 84—87.
Wang Zhihong, Liu Shouhua. Energy conversion efficiency of anaerobic fermentation[J]. *Journal of Liaoning Teachers College*, 2002, 4(3): 84—87. (in Chinese with English abstract)
- [14] Encarnacion Ruiz, Cristobal Cara, Paloma Manzanares, et al. Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2008, 42: 160—166.

Technology evaluation of steam exploded corn stalk anaerobic fermentation

Li Gang¹, Li Dongliang², Wang Xutao³, Guo Chao¹

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

2. Technology R & D Center, China Tobacco Chuanyu Industrial Corporation, Chengdu 610066, China;

3. Henan university of urban construction, Pingdingshan 467044, China)

Abstract: Steam explosion as an effective pretreatment can separate hemi-cellulose, cellulose and lignin from lignocelluloses such as stalk and wood, and enhance yield of production from lignocelluloses with chemical and biological methods. Energy balance of corn stalk steam explosion and anaerobic fermentation were analyzed based on the experiments in the paper. The energy conversion rate of anaerobic fermentation with steam exploded corn stalk increased with the increasing of steam pressure at the same pressure retention time, and the maximums in the same steam pressure were got at the 90 s pressure retention time in each group. The minimum and maximum energy conversion rates of anaerobic fermentation with steam exploded corn stalk were 8.39% and 11.68% at room temperature, which are 1.38 times and 1.92 times than that of the control. But the analysis of incremental benefit-cost ratio showed the expended energy for steam explosion is greater than the increased additional energy output in anaerobic fermentation with steam exploded corn stalk compared with the control. From this point of view, it is not an economic way for steam explosion method.

Key words: straw, anaerobic digestion, energy conversion, steam explosion, incremental benefit-cost ratio