

冯磊, 李润东, 李延吉. 2009 酸解微波预处理对秸秆厌氧消化的促进作用 [J]. 环境科学学报, 29(11): 2339–2344
Feng L, Li R D, Li Y J. 2009. Anaerobic digestion of straw after microwave pretreatment with acid [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(11): 2339–2344

酸解微波预处理对秸秆厌氧消化的促进作用

冯磊, 李润东*, 李延吉

沈阳航空工业学院清洁能源与环境工程研究所, 辽宁省清洁能源重点实验室, 沈阳 110136

收稿日期: 2009-02-24 修回日期: 2009-04-20 录用日期: 2009-08-05

摘要: 以秸秆为研究对象, 比较微波酸化预处理作用下对秸秆厌氧消化产气特性的影响, 实验中研究甲烷产生速率、pH 值、甲烷气体体积分数及生物降解率 4 个参数的变化趋势, 结果表明: ①微波酸化预处理对秸秆厌氧消化有明显效果, 累计产甲烷气量由未被预处理的 186 mL·g⁻¹ 上升到 245.4~303.4 mL·g⁻¹ (以有机物质计), 达到最大甲烷产生速率时间由原来的第 12 d 提前至 4~11 d 不等, 最大甲烷产生速率由原来的 14.11 mL·g⁻¹·d⁻¹ 上升到 18.64~33.19 mL·g⁻¹·d⁻¹; ②经过微波酸化预处理的甲烷体积分数由原来的 52.1% 提高至 64.5% 左右, 其生物能范围也由未处理前的 19.71 MJ·m⁻³ 提高至 24.41 MJ·m⁻³, 物料降解率由未预处理的 44.1% 提高至 64.25%。
关键词: 秸秆; 微波; 酸化; 预处理; 厌氧消化

文章编号: 0253-2468(2009)11-2339-06 中图分类号: X705 文献标识码: A

Anaerobic digestion of straw after microwave pretreatment with acid

FENG Lei, LIRundong*, LIYanji

Institute of Clean Energy and Environmental Engineering, Liaoning Province Clean Energy Key Laboratory, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110136

Received 24 February 2009; received in revised form 20 April 2009; accepted 5 August 2009

Abstract High-energy biogas was generated through anaerobic digestion of straw pretreated with acid and microwave energy. In laboratory experiments the pH, gas production rate and concentration of methane in the gas were monitored. The main conclusions are: ① There was an obvious effect of microwave acidification pretreatment on the efficiency of anaerobic digestion of the straw. The average accumulated gas production from non-pretreated and pretreated straw amounted to 186.1 and 245.4~303.4 mL·g⁻¹, respectively, a significant increase after pretreatment. The maximum daily gas production was also increased to 14.11 and 18.64 to 33.19 mL·g⁻¹·d⁻¹, respectively, and was reached after a distinctly shorter period of time (12 d for non-treated straw, but 4 to 11 d for the pretreated straw). ② The CH₄ concentration in the biogas increased from 52.1% to 64.5%, which is equivalent to an increase in bio-energy yield from 19.71 to 24.41 MJ·m⁻³. Furthermore, the extent of mineralization was increased from 44.1% to 64.25%.

Keywords straw; microwave; acidification; pretreatment; anaerobic digestion

1 引言 (Introduction)

纤维素是世界上最丰富的可再生资源, 中国的纤维类资源极为丰富, 仅秸秆和皮壳每年可达 6 × 10⁸ t, 其中玉米秸秆约占 35% (管小冬等, 2006; 李湘等, 2006), 但这些原料大部分被烧掉, 其能量利用率低, 只有 10% 左右, 如果将生物质气化成气体或液体燃料 (如酒精、氢气、柴油等), 热效率可达 30% 以上 (孙智谋, 2004). 随着人们环境意识的不断增强以及政府对环境问题的日益关注, 以纤维素

类物质为原料生产甲烷的研究越来越受到重视 (常秀莲, 2001; 马晓建等, 2004). 目前, 国内外有很多秸秆降解方面的研究 (孙智谋, 2004), 包括物理方法、化学方法和微生物法. 其中微生物法处理秸秆由于其特有的优点已日益成为科研工作者研究的热点. 在微生物降解过程中, 为了提高降解效率, 在微生物接种前通常要对秸秆进行预处理. 不同的预处理方法由于其原理不同, 必然会对秸秆的降解效果产生不同的影响 (常秀莲, 2001). 而国内关于微波酸化预处理方法对秸秆微生物降解效率方面研

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才”支持计划 (No NCET-07-0564); 辽宁省高校优秀人才计划项目 (No 2006R41)
Supported by the New Century Excellent Researcher Award Program from Ministry of Education of China (No NCET-07-0564) and Liaoning High College New Century Excellent Researcher Project (No 2006R41)
作者简介: 冯磊 (1979—), 男, 讲师, E-mail: fl_icee@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: nrllee@163.com
Biography: FENG Lei (1979—), male, lecturer, E-mail: fl_icee@163.com; * Corresponding author, E-mail: nrllee@163.com
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究尚显不足.如许宪松等 (2006)应用微波技术处理稻壳进行固态发酵,李湘等 (2006)研究了酸化预处理对秸秆微生物降解过程的影响,均取得一定效果.但二者均单一研究了每种预处理技术对生物质厌氧消化的影响,未深入研究酸化后的秸秆在微波预处理后的厌氧消化降解影响,本研究填补了此研究的空白.

本实验的目的是比较不同的强化酸和微波酸化预处理作用下对秸秆厌氧消化产气特性的影响,希望为秸秆的预处理方法和沼气发酵工艺研究提供一些基础数据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验装置

本实验采用自行设计的厌氧消化反应器,如图1所示,实验装置由 2个广口瓶 (1L)和 1个容量瓶 (1L)组成,分别作为原料消化罐,沼气集气瓶和出水收集瓶,用抗老化处理的胶皮管连接,组成一套气体连通装置.装置在连接时,务必保证气密性.

消化液的 pH 用精度为 ± 0.01 数字型酸度计测量.沼气的成分由气相色谱 (GC-14B)测得.

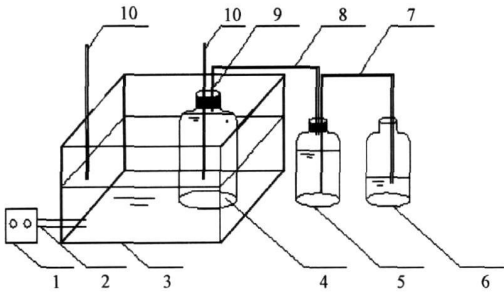


图 1 厌氧消化实验装置图 (1 控制器, 2 加热棒, 3 水浴锅, 4. 样品反应器, 5. 集气瓶, 6 集水瓶, 7 出水管, 8. 导气管, 9. 检测管, 10 温度计)

Fig 1 Schematic of anaerobic digestion(1 Controller 2 Heating 3 Water-bath 4 Reactor 5. Gas collection bottle 6 Water collection bottle 7 Outlet pipe 8 Gas tube 9. Detector tube, 10 Thermometer)

2.2 实验材料及性质

实验所用秸秆来自于沈北新区某农田, 秸秆在取用时基本未有天然降解现象, 将秸秆切割后研磨, 过 100目筛孔, 烘干后备用; 接种物来至北部污水处理厂厌氧消化污泥, 经过 3个月的驯化后使用. 秸秆及接种物湿基状态的主要参数见表 1.

表 1 秸秆和接种物湿基状态的主要参数

Table 1 Characteristics of wet straw and inoculum			
实验材料	TS	VS	pH
秸秆	14.25%	90.50%	6.50
接种物	9.33%	37.77%	7.44

2.3 实验物料预处理

精确称取 4份一定量秸秆到 200mL烧杯中, 标记为 1[#]、2[#]、3[#]和 4[#], 分别加入浓度为 0.2%、4% 和 6%的硝酸 25mL, 摇匀, 浸泡 30min后放入微波反应器中, 在 450W 强度下微波 10min, 将样品取出后冷却, 经滤斗过滤后用蒸馏水冲洗数次烘干备用 (张木明等, 2006), 实验物料信息见表 2.

表 2 实验物料信息

Table 2 Experimental conditions						
实验	接种物 /mL	秸秆 /g	酸浓度	微波强度 /W	微波时间 /min	进料 VS
0 [#]	200	10	-	-	-	90.5%
1 [#]	200	10	0	450	10	87.8%
2 [#]	200	10	2%	-	-	87.1%
3 [#]	200	10	4%	-	-	85.9%
4 [#]	200	10	6%	-	-	89.1%
5 [#]	200	-	-	-	-	-

2.4 实验设计

本实验使用 12套消化反应器 (Vol 1L), 共做 6组实验, 每组实验做 2个平行样品, 结果取平均值. 除 5[#]实验中只加入 200mL接种物, 不加入样品外, 其他 5组加入同浓度等体积接种物的同时, 加入 10g干样品 (不含水), 实验中加入 10g干样品是考虑消化罐的物料负荷, 过多的物料分解产生的有机酸会降低消化液的 pH 值, 影响沼气的产出. 样品的进料信息见表 2实验 (11组)样品均用自来水定容 1L, 反应器用蜡密封好后将其放入电热恒温水浴锅中, 在 37℃ 条件下恒温培养 50d (Hansen et al., 2004).

消化液用注射器提取, pH 值由数字型酸度计测试后再将消化液注回反应器内, 其测量为每日 1次.

沼气产量采用排水计量法测量, 其测量为每日 1次. 沼气的成分累计由气相色谱分析, 分析条件如下. 色谱柱: 中国科学院大连化学物理研究所国家色谱研究分析中心生产的不锈钢填充柱, 填料为 TDX-01, 2m × 3mm; 检测器: TCD; 载气: He 流速 20 mL · min⁻¹; 电流: 100 mA; 衰减: 1; 检测温度: 200℃; 柱箱温度: 180℃; 进样温度: 200℃.

3 数据分析 (Data analysis)

3 1 平均甲烷产生速率换算

0[#] ~ 4[#]实验的净产气量 (w_0) 等于其自身的总产气量 (w_1) 减去 5[#] 实验中接种物的产气量 (w_2), 而甲烷产生速率 = $w_0 / 50$

3 2 生物能产量

沼气产能是应用测量单位质量沼气高热值 (根据体积比) 计算的, 沼气的组成主要包括 CH₄ 和 CO₂, 忽略痕量气体. 沼气在 0℃ 和 1Pa 条件下的高热值是根据甲烷气体在 20℃ 和 1Pa 条件下 (假设为理想状态下) 的高热值计算出来 (Rao *et al.*, 2000, Culp *et al.*, 1991).

$$E_B = E_0 \times C_B$$

(1)

式中, E_B 表示沼气产能 ($\text{kJ} \cdot \text{L}^{-1}$), $E_0 = 37.84 \text{ kJ} \cdot \text{L}^{-1}$, 表示甲烷气体热值, C_B 为甲烷气体体积分数.

3 3 厌氧最终生物降解率

厌氧最终生物降解率根据公式 (2) 得到 (Rao *et al.*, 2000):

$$UAB = (T_0 - R_0) / T_0 \times 100\%$$

(2)

式中, UAB 为厌氧最终生物降解率, T_0 为总有机质 (g), R_0 为剩余有机质 (g).

厌氧条件下非可生物降解率 (R_f) 可以由质量平衡求得 (崔宗均等, 2002):

$$R_f = 1 - UAB$$

(3)

4 结果 (Results)

4 1 微波酸化预处理对甲烷产生速率的影响

由图 2 微波酸化预处理对甲烷产生速率影响的

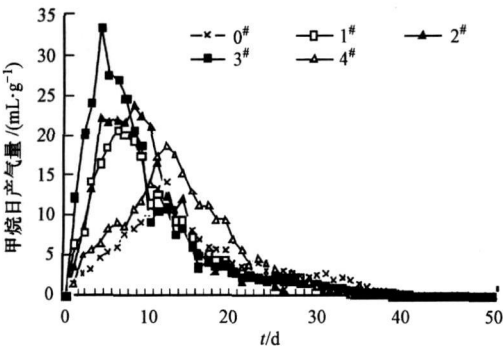


图 2 微波酸化预处理对甲烷产生速率的影响

Fig 2 Impact of microwave acidification pretreatment on daily CH₄ production

趋势图可以看出, 在为期 50d 的厌氧消化过程中, 未被预处理的秸秆 (0[#]) 和经过微波酸化预处理的秸秆 (1[#] ~ 4[#]), 其厌氧消化甲烷产生速率均呈现先增加到峰值后再降低的趋势. 未经过预处理的秸秆在厌氧消化反应的第 12d 达到最大甲烷产生速率, 其值为 $14.11 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 而经过微波酸化预处理的 1[#] ~ 4[#] 各实验在第 4~11d 达到最大甲烷产生速率, 为 $18.64 \sim 33.19 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 不等, 累计甲烷产量由未处理的 $186.1 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $245.4 \sim 303.4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.

由图 2 可以看出: 经过微波酸化预处理的 1[#] ~ 4[#] 实验中, 3[#] (4% 稀硝酸) 实验的处理效果最好, 第 4d 即达到最大甲烷产生速率, 为 $33.19 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 而 1[#] 和 2[#] 分别在第 6 和 8d 达到最大甲烷产生速率, 为 20.47 和 $23.63 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 4[#] 反应最慢, 在第 11d 达到最大甲烷产生速率, 为 $18.64 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

总的来说, 微波酸化预处理对秸秆厌氧消化有明显效果, 整个消化过程的累计甲烷产量由未被预处理的 $186.1 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $245.4 \sim 303.4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中 3[#] 实验上升了 63.1%, 达到最大甲烷日产气量时间由原来的第 12d 提前至第 4~11d 不等, 最大甲烷产生速率由原来的 $14.11 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 上升到 $18.64 \sim 33.19 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

4 2 微波酸化预处理对厌氧消化过程 pH 变化的影响

秸秆厌氧消化过程中 pH 值变化趋势见图 3 由图 3 可见, 在为期 50d 的厌氧消化过程中, 未被预处理的秸秆 (0[#]) 和经过微波酸化预处理的秸秆 (1[#] ~ 4[#]) 的 pH 值均呈现先降低后升高的趋势, 反应结束时 pH 值持续在 6.8~7.1 之间, pH 值的变化规律同其他厌氧消化实验相符.

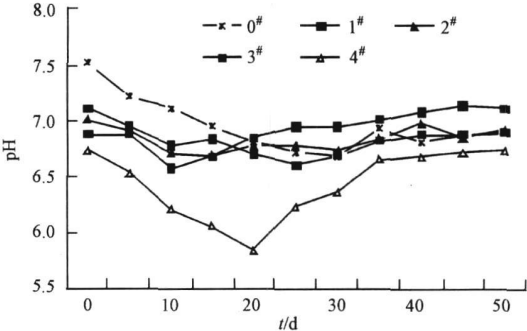


图 3 微波酸化预处理对厌氧消化过程 pH 值的影响

Fig 3 Impact of microwave acidification pretreatment on pH during anaerobic digestion

由图 3可以看出, 未经过微波酸化预处理的 0[#] 实验在反应的第 30d pH 值达到最低, 为 6.68, 1[#]、2[#]、3[#] 3组实验的 pH 值, 分别在第 25、15、10d 达到最低, 约为 6.6~6.7, 而 4[#] 在第 20 d 达到最低, 为 5.86.

总的来说, 无论秸秆是否经过微波处理, 消化液的 pH 值均呈现先降低再升高的趋势, 反应结束时 pH 值持续在 6.8~7.1 之间; 其中 4[#] 实验的 pH 值最低, 达到 5.86.

4.3 微波酸化预处理对甲烷体积分数变化的影响

由图 4可以看出, 在为期 50d 的厌氧消化过程中, 未被预处理的秸秆 (0[#]) 和 经过微波酸化预处理的秸秆 (1[#]~4[#]), 其甲烷气体的体积分数呈先增加, 后降低的趋势. 在消化的起始阶段, 所有物料的甲烷体积分数都很低, 未被预处理实验的甲烷体积分数为 30%, 而经过微波酸化预处理的甲烷体积分数约为 40%~50%, 随着产气量的增加, 甲烷气体体积分数逐渐增加, 经过微波酸化预处理的 1[#]~4[#] 实验在反应的第 7~25d 达到最大体积分数, 约为 75%~80%, 而未经过微波酸化预处理的 0[#] 实验在反应的第 30d 达到最大体积分数, 约为 75%, 消化反应后期浓度回落到 30%~40% 左右. 经过微波酸化预处理的甲烷体积分数平均体积分数约为 64.5% 左右, 远远高于未经过微波酸化预处理的 52.1%. 根据文中 2.2 节计算, 其生物能范围也由未处理前的 19.71 MJ m^{-3} 提高至 24.41 MJ m^{-3} , 提高了 23.82%.

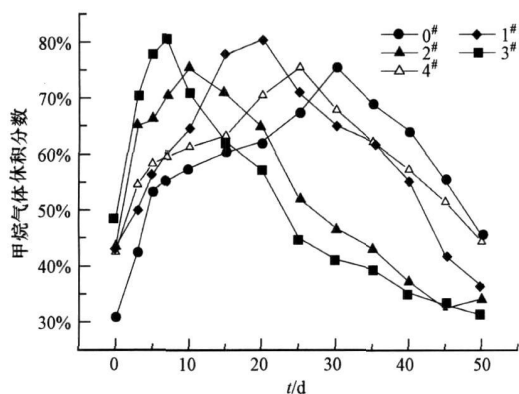


图 4 微波酸化预处理对甲烷体积分数的影响

Fig 4 The impact of microwave acidification pretreatment on CH_4 concentration

4.4 微波酸化预处理对厌氧消化生物降解率的影响

秸秆厌氧消化的最终生物降解率和非可生物

降解率通过公式 (2)、(3) 求得. 由图 5 可见, 在为期 50d 的厌氧消化过程中, 未被预处理秸秆 (0[#]) 的生物降解率为 44.1%, 而经过微波酸化预处理秸秆 (1[#]~4[#]) 的平均生物降解率为 64.25%, 提高了 20.15%, 经过微波酸化预处理的秸秆的生物降解力同其他有机物质, 如马铃薯 (86%~91%) 和酿酒谷物 (66%~78%) 的相当 (Rao et al., 2000; Culp, 1991; Cho, 1995).

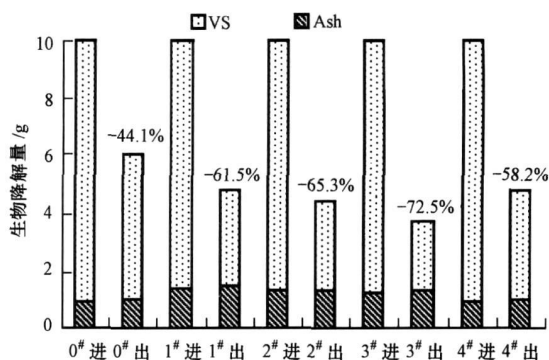


图 5 消化前后底物化学成分及最终厌氧生物降解率

Fig 5 Initial and digested substrate composition and ultimate anaerobic biodegradability

5 讨论 (Discussions)

5.1 微波酸化预处理对甲烷产生速率影响的分析

在为期 50d 的厌氧消化过程中, 0[#]~4[#] 实验的甲烷产生速率均呈现先增加至峰值后再降低的趋势, 这主要是由于接种物对秸秆要有一个适应过程, 有机物质厌氧消化要经历水解、酸化、气化过程, 实验起始阶段主要发生的是水解、酸化反应, 此时甲烷日产气量较少, 随着微生物对秸秆适应性的增加, 甲烷日产气量逐渐增加, 达到峰值后由于秸秆中能被水解酸化的纤维素-半纤维素已被微生物利用, 剩余成分较难或不易水解, 因此, 产气量逐渐减少, 反应结束时无气体产出.

同时, 由图 2 可以看出, 微波酸化预处理对秸秆厌氧处理效果明显, 整个消化过程的累计甲烷产量由未被预处理的 $186.1 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $245.4 \sim 303.4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中 3[#] (4% 稀硝酸) 实验的处理效果最好, 第 4d 即达到最大甲烷产生速率, 为 $33.19 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 3[#] 累计甲烷产量上升了 63.1%; 4[#] 实验效果最差, 在第 11d 达到最大甲烷产生速率, 为 $18.64 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. 微波酸化预处理对秸秆厌氧处理效果明显是由于秸秆中 98% 以上是纤维素-半纤

纤维素-木质素成分, 由于纤维素、半纤维素、木质素具有牢固的结晶构造, 酶分子及水分子难以侵入到内部中, 其结晶部分比无定形部分难降解, 秸秆水解限制了甲烷化过程, 因此, 未被预处理的秸秆在反应的第 12d 达到最大甲烷产生速率, 而经过微波酸化预处理的秸秆, 经过微波和弱酸的共同作用, 在一定程度上破坏了纤维素-半纤维素-木质素的结晶构造, 疏松其网状连接键, 暴露出纤维素和半纤维素, 并使纤维素的晶区变小, 改善其超分子结构, 使基质更易被微生物水解, 并且在酸度为 4%, 450W 条件下微波处理 10min, 其晶体结构破坏越严重, 越有利于水解, 促进甲烷化的形成。

5.2 微波酸化预处理对厌氧消化过程中 pH 变化的影响分析

由图 3 可以看出, 无论秸秆是否经过微波酸化预处理, 消化液的 pH 值均呈现先降低再升高的趋势, 反应结束时 pH 值持续在 6.8~7.1 之间; 这主要是由于在反应初期, 秸秆同 200mL 接种物一同加入到消化罐中, 接种物的初始 pH 值呈弱碱性, 而起始阶段接种物对秸秆的降解需要一段适应过程, 秸秆未发生或部分发生水解、酸化, 因此, 消化液起始阶段呈中性或弱碱性。随着反应的进行, 厌氧微生物对秸秆的适应性增加, 秸秆酸化反应也明显增加, pH 值逐渐下降, 此时有机酸的产生促进产甲烷菌的繁殖代谢, 产甲烷菌分解有机酸产生甲烷, 导致消化液 pH 值回升, 反应结束时可被利用的有机酸均被甲烷化, 反应结束时消化液的 pH 值在 6.8~7.1 之间。

整个消化过程中, 3[#]实验的 pH 值下降最快, 第 10d 达到 6.58, 4[#]实验达到最低, 第 20d 时达到 5.86。这要是由于在酸度为 4%, 450W 条件下微波处理 10min, 秸秆晶体结构破坏越严重, 暴露出纤维素和半纤维素, 使基质更易被微生物水解, 形成酸化反应; 而 4[#]实验, 由于其秸秆采用 6% 的硝酸处理, 过多的酸积累导致 pH 值下降到 5.86 过低的 pH 值抑制了产甲烷菌的活性, 限制了甲烷化的过程, 这同图 2 产气结果吻合。

5.3 微波酸化预处理对甲烷体积分数变化的影响分析

在整个厌氧消化过程中甲烷气体的浓度呈先增加, 后降低的趋势, 这主要是由于秸秆中可被降解的有机物质在厌氧条件下先发生水解, 产生有机酸, 此时为水解酸化反应, 仅发生部分甲烷化反应,

产生的气体以 CO_2 为主, 随着反应的进行, 产甲烷菌的数量逐渐增加, 产甲烷菌利用有机酸完成甲烷化过程, 产气中甲烷体积分数明显增加, 最高达到 75%~80%, 反应后期, 有机质浓度下降, 甲烷体积分数也回落到 30%~40%。

除 4[#]实验采用 6% 的硝酸处理, 过多的酸积累抑制了甲烷化的过程外, 其他 3 组微波酸化预处理后秸秆达到最大甲烷体积分数的时间由原来的第 25d 提前至 10~20d, 甲烷气体体积分数由原来 52.1% 提高至 64.5%, 其生物能范围也由未处理前的 $19.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 提高至 $24.41 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$, 提高了 23.82%。图 2、3、4 综合比较可以看出, 这主要是由于微波及酸化共同预处理破坏了秸秆中纤维素-半纤维素-木质素的结晶构造, 促进秸秆的水解酸化, 这有利于甲烷化的形成, 因此, 整个消化反应的甲烷气体浓度及达到最大浓度的时间均提高。

5.4 微波酸化预处理对厌氧消化生物降解率的影响

由图 5 可见, 经过微波酸化预处理的秸秆 (1[#]~4[#]) 的平均生物降解率由原来的 44.12%, 提高至 64.25%, 提高了 20.13%, 主要是由于微波及酸化共同预处理破坏了秸秆中纤维素-半纤维素-木质素的结晶构造, 提高秸秆的水解酸化比率, 从而提高了秸秆的生物降解率。

同时计算的非生物降解力也证实了秸秆在进行厌氧消化过程中, 可生物降解的物质不能完全被转化成沼气, 一部分有机物质在微生物生长和繁殖的过程中被利用, 厌氧生物降解率和非可生物降解率取决于可生物降解物质的迁移途径。

6 结论 (Conclusions)

1) 微波酸化预处理对秸秆厌氧消化有明显促进效果, 整个消化过程的累计甲烷产量由未被预处理的 $186.1 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $245.4 \sim 303.4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中, 3[#]实验效果最为明显, 上升了 63.1%; 达到最大甲烷产生速率时间由原来的第 12d 提前至第 4~11d 不等, 最大甲烷产生速率由未处理的 $14.11 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 上升到 $18.64 \sim 33.19 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2) 经过微波酸化预处理的甲烷体积分数约为 64.5% 左右, 远远高于未经过微波酸化预处理的 52.1%。其生物能范围也由未处理前的 $19.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 提高至 $24.41 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$, 提高了 23.82%; 生物降解率由未预处理的 44.1%, 提高至 64.25%。

提高了 20 15% .

参考文献 (References):

常秀莲. 2001 木质纤维素发酵酒精的探讨 [J]. 酿酒科技, (2): 39—42

Chang X L. 2001. Investigation on alcoholic fermentation with lignocelluloses [J]. Liquormaking Science & Technology, (2): 39—42(in Chinese)

Cho J K, Park S C, Chang H N. 1995. Biochemical methane potential and solid-state anaerobic digestion of Korean food wastes [J]. Bioresource Technology 52 (3): 245—253

崔宗均, 李美丹, 朴哲, 等. 2002 一组高效稳定纤维素分解菌复合系 MC1 的筛选及功能 [J]. 环境科学, 23(3): 393—400

Cui Z J, Li M D, Piao Z, *et al* 2002. Selection of a composite microbial system MC1 with efficient and stability cellulose degradation bacteria and its function [J]. Environmental Science 23(3): 393—400 (in Chinese)

Culp A W. 1991. Principles of Energy Conversion. Series in Mechanical Engineering [M]. Singapore: McGraw-Hill 521

管小冬. 2006 农作物秸秆资源利用浅析 [J]. 农业工程学报, 22(1): 104—106

Guan X D. 2006. Analysis of crop stalk utilization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 22(1): 104—106 (in Chinese)

Hansen T L, Schmitt J E, Angelidaki I *et al* 2004. Method for determination of methane potentials of solid organic waste [J]. Waste Management 24 (4): 393—400

李湘, 魏秀英, 董仁杰. 2006 秸秆微生物降解过程中不同预处理方法的比较研究 [J]. 农业工程学报, 22(1): 110—116

Li X, Wei X Y, Dong R J 2006 A study of degradation efficiency of

com straw pretreated with different methods [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 22(1): 110—116 (in Chinese)

马晓建, 赵银峰, 祝春进, 等. 2004 以纤维素类物质为原料发酵生产燃料乙醇的研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 30(11): 77—81

Ma X J, Zhao Y F, Zhu C J *et al* 2004. Research on the production of fuel alcohol from the material of cellulose [J]. Food and Fermentation Industries 30(11): 77—81 (in Chinese)

Rao M S, Singh S P, Singh A K, *et al* 2000 Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW: Assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage [J]. Applied Energy 66(1): 75—87

孙智谋. 2004 混合酶及汽爆法提高秸秆发酵酒精的产量 [J]. 酿酒科技, 125(5): 75—78

Sun Z M. 2004 Mixed enzyme and steam blasting method to improve the output of stalk alcohol fermentation [J]. Liquormaking Science & Technology 125(5): 75—78 (in Chinese)

许宪松, 周玉杰, 张建安, 等. 2006 微波预处理稻壳对纤维素酶固态发酵的影响 [J]. 可再生能源, 128(4): 21—25

Xu X S, Zhou Y J, Zhang J A, *et al* 2006. Effects of microwave pretreated rice hull on cellulose production by solid state fraction Renewable Energy [J]. 128(4): 21—25 (in Chinese)

张木明, 徐振林, 张兴秀, 等. 2006 预处理对稻草秸秆纤维素酶解产糖及纤维素木质素含量的影响 [J]. 农产品加工学刊, 3 (58): 4—6

Zhang M M, Xu Z L, Zhang X X, *et al* 2006 Effects of pretreatments on the enzymatic hydrolysis and the content of cellulose and lignin of rice straw [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing 3 (58): 4—6 (in Chinese)