

热化学预处理温度对玉米秸秆干发酵的影响

吴厚凯^{1,2} 李志合^{1,2} 王绍庆^{1,2} 王芳^{1,2} 易维明^{1,2}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东省清洁能源工程技术研究中心, 淄博 255049)

摘要: 为研究热化学处理方法对生物质干发酵制备沼气的影响, 采用鼓泡流化床热解反应器在 150℃、170℃、190℃ 和 210℃ 下对玉米秸秆进行了热化学预处理, 并与未处理的玉米秸秆原料分别进行了 35℃ 中温发酵 42 d 的实验研究。结果表明, 一定温度范围的热化学预处理能够改变木质纤维的束状结构, 能使半纤维素的质量分数有效降低 5.98% ~ 22.25%, 木质素的质量分数降低 1.75% ~ 20.99%, 从而加快启动, 提高甲烷产量。其中 190℃ 处理组 30 d 内的累积甲烷产量比未处理组提高了 16.30%, 启动时间提前了 2.10 d。结果表明热化学预处理能有效提高玉米秸秆干发酵甲烷产量, 加快干发酵的启动速率, 提高干发酵效率。

关键词: 玉米秸秆; 干发酵; 热化学预处理; 温度

中图分类号: TK6; S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0311-06

Effects of Thermo-chemical Pretreatment Temperature on Dry Anaerobic Digestion

Wu Houkai^{1,2} Li Zhihe^{1,2} Wang Shaoqing^{1,2} Wang Fang^{1,2} Yi Weiming^{1,2}

(1. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Shandong Research Center of Engineering and Technology for Clean Energy, Zibo 255049, China)

Abstract: The complicated fibrous-network structure of lignocellulose has adverse impact on the starting time of biomass dry anaerobic digestion. According to the pyrolytic properties of lignin, thermo-chemical pretreatment by using fluidized bed was put forward to pretreat the biomass. The present work was aim to investigate the influences of the thermo-chemical pretreatment technique on the biogas production via biomass dry anaerobic digestion. Experiments for the biogas production via biomass dry anaerobic digestion using the corn stalk samples treated at 150℃, 170℃, 190℃, 210℃ in a fluidized bed and untreated sample were carried out at 35℃ for 42 d, respectively. Obviously, the results showed that thermo-chemical pretreatment could change the fibrous-network structure of lignocellulose. It resulted 5.98% ~ 22.25% and 1.75% ~ 20.99% decrease on hemicellulose and lignin, and enhanced the methane production ranging in a certain temperature. The digestion time T_{80} mirrored the efficiency of fermentation, 190℃ and 210℃ pretreatments got the shortest digestion time which were shorter 3 d than the untreated of 30 d. The highest methane yield of 30 d was obtained at 190℃ pretreatment biomass sample which was 16.30% higher and the start-up time was 2.10 d less than the untreated. Other pretreatments also improved the methane yield by 1.67% ~ 9.78% and resulted the start-up time less than the untreated. Although 210℃ pretreatment could destroy the structure of lignocellulose more seriously, it also led methane production reduction due to the more wastage of hemicellulose and cellulose. The conclusions could be made that thermo-chemical pretreatment technique is one of the effective methods to improve the methane production and accelerate the start-up time of dry anaerobic digestion observably.

Key words: corn stalk; dry anaerobic digestion; thermo-chemical pretreatment; temperature

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51276103)、国家自然科学基金重点项目(51536009)、泰山学者工程专项和山东省优势学科项目

作者简介: 吴厚凯(1992—), 男, 硕士生, 主要从事生物质能研究, E-mail: wu_houkai@163.com

通信作者: 李志合(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质能源开发和综合利用技术研究, E-mail: lizhihe@sdut.edu.cn

引言

据报道,全球每年由光合作用产生的生物质总量超过 2 000 亿 t,其中木质纤维生物质占其总量的 60% 以上^[1]。根据国际能源署 2015 年的世界能源统计^[2],从 1973 年到 2013 年的 40 年间,在基础能源总量增加一倍多的基础上,生物燃料仍占据 10.2% 的份额,具有举足轻重的作用。厌氧发酵技术是一种有效利用木质纤维生物质的方式,其中干发酵技术因具有节约用水,节省管理工时,冬季耗能低,池容产气率较高,后续处理成本低等优点^[3],得到越来越多的关注。

纤维素较高的结晶度和木质素的束状结构限制了生物质颗粒直接被利用,因此在利用干发酵技术转化木质纤维生物质为生物能源过程中,首先需要对其进行预处理,以改变其束状结构,削弱木质素对纤维素的保护作用并降低纤维素的结晶度^[4],增加比表面积使其易于降解。目前研究较多的预处理方法主要有物理方法、化学方法、物理化学方法和生物方法 4 类^[5-7]。其中以机械粉碎为代表的物理方法对环境无污染,但是耗能高。以微生物降解为代表的生物方法周期较长,难以满足工业要求。因此以利用酸、碱、热预处理的化学方法及其联合处理得到了更多的关注,研究者一直在讨论如何减少化学方法对环境的污染及对生物质损耗的问题。

对于热化学预处理,国内外主要集中在蒸汽爆破、高温水热法、烘焙预处理等^[6,8],具有高效无污染的优点,但设备等较高的成本限制其发展。蒸汽爆破已经用于多种木质纤维素厌氧发酵产沼气的前期预处理中,如芒草、玉米秸秆、阔叶材等,从已有的研究中可以发现与未经预处理的麦秆相比,经过蒸汽爆破预处理的麦秆甲烷产量增加了 20% ~ 30%。为了提高麦秆沼气产量,CHANDRA 等^[9]在 200℃,饱和压力为 1.55 MPa 下实施高温液态水预处理 10 min,实现比未经预处理的麦秆产气量增加 20%。在同样的条件下预处理稻秆,甲烷产量竟是未经预处理的 222%^[10]。杨晴等^[11]利用烘焙生物质改善热解产物的品质,研究发现随着烘焙温度的升高,热解气中 CO 含量由 48% 降到 34%,H₂ 含量最大增加了 77.4%。本文以玉米秸秆为研究对象,在鼓泡流化床上进入热化学预处理,研究热化学预处理对玉米秸秆干发酵的影响,为热化学预处理的发展和生物质转化提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验以山东省淄博市收获后的玉米秸秆为原

料,将风干后的秸秆粉碎至粒径小于 4 mm,并测定基本物理化学参数后密封保存备用。接种物为沼渣与猪粪按照 2:1 的质量比在富集培养基中驯化 7 d 的混合物。其中富集培养基包括甲酸钠 5 g、乙酸钠 5 g、甲醇 5 mL、半胱氨酸 0.5 g、酵母膏 1 g、氯化铵 1 g、KH₂PO₄ 0.4 g、K₂HPO₄ 0.4 g、水 1 000 mL^[12]。实验材料的主要参数见表 1。

表 1 玉米秸秆原料、沼渣和猪粪的主要参数
Tab.1 Main parameters of corn stalk, biogas residue and pig manure

原材料	总固体质量 分数/%	挥发分质 量分数/%	碳质量 分数/%	氮质量 分数/%	碳氮比
玉米秸秆	92.89	84.72	38.24	0.79	48.41
沼渣	21.02	6.01	3.98	0.29	13.72
猪粪	38.18	20.24	9.79	1.25	7.83

1.2 实验方法

1.2.1 预处理方法

本研究采用自制的小型鼓泡流化床对玉米秸秆原料进行热化学预处理。如图 1 所示,以粒径为 20 ~ 60 目的石英砂作为床料,氮气流量为 3 m³/h,热电偶和 U 型管压差计对反应器的温度和压差变化分别进行实时监控。实验温度分别设置为 150℃、170℃、190℃ 和 210℃,待反应器达到预设温度且稳定后,打开喂料开关,开始向反应器内喂入玉米秸秆颗粒,在热载气的携带下,玉米秸秆颗粒进入收集瓶中,获取各温度下的热化学预处理干发酵实验用样品。

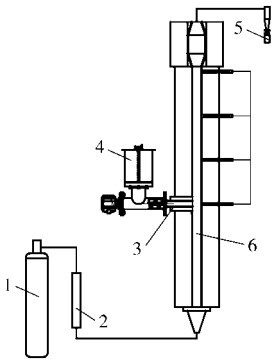


图 1 鼓泡流化床生物质热化学处理反应器示意图
Fig.1 Schematic map of bubbling fluidized bed reactor for thermo-chemical pretreatment of biomass

1. 氮气瓶 2. 转子流量计 3. 水冷套管 4. 料斗 5. 收集瓶
6. 反应器

1.2.2 实验方法

利用未处理的及上述 4 个温度水平热处理的玉米秸秆 5 组样品各 50 g 为发酵原料,分别投入到 1 L 的广口瓶中,接种量为 35%,加入相对应质量的水,调节发酵料液的总固体(TS)质量分数为 20%,使用

尿素调整各个发酵瓶的碳氮比为 25:1。充分搅拌均匀后,用橡胶塞密封,通过玻璃管和乳胶管连接集气袋,放入 35℃ 恒温培养箱中,进行干发酵。每天定时测量各组的气体成分和体积,为减小实验误差,每个处理进行 2 个重复。

1.2.3 分析方法

TS 质量分数采用 105℃ 烘干箱中干燥 8h 测定;挥发分(VS)质量分数采用马弗炉 600℃ 灼烧 2 h 测定;气体体积采用湿式流量计测量;气体成分采用便携式沼气分析仪测定;纤维素、半纤维素和木质素的质量分数根据范式洗涤法测定^[13-14]。

各组发酵的总固体去除率计算式为

$$D_{DT} = \frac{\sum M_0 T_{TS0} - \sum M_1 T_{TS1}}{\sum M_0 T_{TS0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 D_{DT} ——总固体去除率,%
 M_0 ——发酵前物料质量,g
 M_1 ——发酵后物料质量,g
 T_{TS0} ——发酵前物料总固体质量分数,%
 T_{TS1} ——发酵后物料总固体质量分数,%

累积甲烷产量的拟合曲线根据修正后的龚珀兹方程^[15]绘制,方程式为

$$P_t = P_m \exp \left(- \exp \left(\frac{R_m e}{P_m} (T - t) + 1 \right) \right) \quad (2)$$

式中 P_t —— t 时刻累积甲烷产量,mL
 P_m ——发酵结束总甲烷累积产量,mL
 R_m ——甲烷产率,mL/d
 T ——停滞时间,d
 t ——发酵时间,d

2 结果与分析

2.1 总固体含量变化

不同处理组预处理后的 TS 质量分数和发酵后 TS 降解率如表 2 所示。由表 2 可看出各温度预处理的玉米秸秆颗粒的 TS 质量分数都比未处理组要高,它们之间的差异主要是由于热化学预处理随着温度的升高会蒸发掉原料中更多的水分。在固体去除率方面,随着处理温度的升高 TS 去除率增大,210℃ 处理组达到了 36.14%,而未处理组最低为 30.27%,前者较之提高了 19.39%。这说明热化学预处理能够有效提高秸秆的总固体去除率,这主要是因为木质素和半纤维素的热解温度范围在 150℃ 到 350℃ 之间,而纤维素则在 350℃ 到 500℃ 之间^[16],这样经过热化学预处理的玉米秸秆粉末会被破坏掉一定的木质素,使秸秆的木质纤维素结构变得松散,更容易被产甲烷菌利用^[17]。

表 2 不同处理组原料 TS 质量分数及发酵后 TS 去除率
Tab.2 Initial total solid content and rate of biodegradation after digestion of different pretreatments

温度/℃	TS 质量分数/%	TS 去除率/%
未处理	92.89	30.27
150	98.67	30.95
170	98.68	31.65
190	99.05	33.63
210	99.83	36.14

2.2 玉米秸秆颗粒电镜扫描结构解析

利用扫描式电子显微镜(SEM)对未处理的及经过热化学预处理的玉米秸秆颗粒分别进行了研究,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出在放大 500 倍的情况下,未经预处理的玉米秸秆颗粒结构规整,表面光滑能看出明显的束状结构,几乎没有被破坏;而经过热化学预处理的颗粒随着处理温度的升高,木质纤维素束状结构被破坏的更为严重,表面变得更加粗糙且产生的鳞片状物质和裂纹更多。其中 210℃ 处理组有部分炭化现象。这说明热化学预处理玉米秸秆颗粒能够在一定程度上破坏木质纤维素束状结构,温度越高,破坏情况越严重,从而使表面变得粗糙有裂痕,有利于微生物的附着,从而促进干发酵的启动和进行。

2.3 玉米秸秆组分变化

热化学预处理后,各处理玉米秸秆的半纤维素、木质素和纤维素质量分数如表 3 所示。热化学预处理主要作用于半纤维素和木质素,根据表 3 可发现,经过热化学预处理的玉米秸秆半纤维素和木质素的质量分数分别减少了 5.98%~22.25% 和 1.75%~20.99%,且随着处理温度的升高,半纤维素和木质素的质量分数减少得越明显。其中 210℃ 处理组半纤维素和纤维素的质量分数分别降低了 22.25% 和 14.64%,而同样的比较在 190℃ 处理组只有 15.74% 和 9.37%。这说明热化学预处理能够有效改变木质纤维结构,且随着温度的升高,这种变化越明显,而当温度高达 210℃ 时,半纤维素和纤维素的损耗过多,一定程度上造成发酵原料的损失。

2.4 日产气量

不同处理组玉米秸秆干发酵日产气量如图 3 所示。总体上看,5 组日产气量的变化趋势大体一致,第 1 天由于加入的接种物中微生物的呼吸作用,会有较多的气体产生,但其中的气体成分多为二氧化碳,随后日产气量降低后续升高达到峰值,随着干发酵的进行共有 3 个日产气峰出现,在干发酵的后期基本趋于平缓,产气量减少。其中在产气高峰出现时间方面,190℃ 和 210℃ 预处理组的 3 个产气高峰

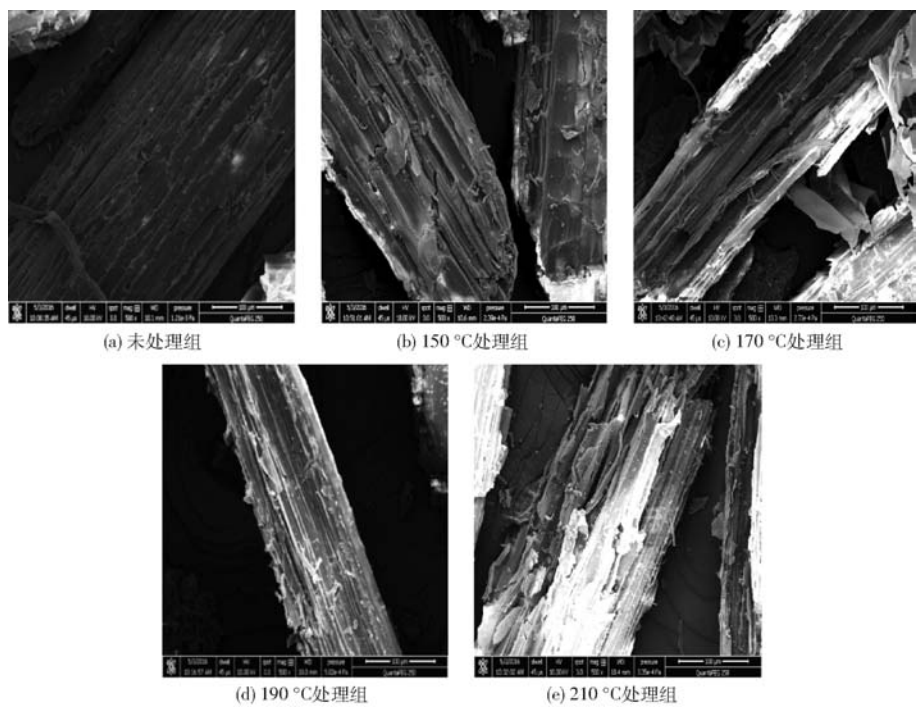


图2 不同处理组玉米秸秆颗粒电镜扫描图(×500)
Fig.2 SEM of corn stalk of different pretreatments (×500)

表3 不同处理组玉米秸秆三组分含量

Tab.3 Content of LCH with different pretreatments

温度/℃	半纤维素	木质素	纤维素
	质量分数/%	质量分数/%	质量分数/%
未处理	29.93	6.29	40.86
150	28.14	6.18	39.53
170	26.51	5.74	38.21
190	25.22	5.21	37.03
210	23.27	4.97	34.88

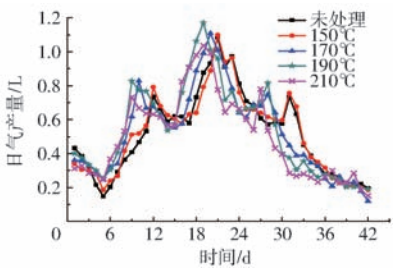


图3 不同处理组玉米秸秆日产气量曲线
Fig.3 Daily biogas production with different pretreatments

提前于其他3组,而170℃处理组落后1d左右,150℃处理组和未处理组则落后2~3d,可能是由于150℃处理温度不够高,对木质纤维结构的破坏程度不够。这说明热化学预处理能够加快干发酵的启动,加快产气高峰的出现^[18]。在日产气量方面,190℃处理组明显高于其他4组,其余各组产气量从大到小依次为170℃处理组、150℃处理组、未处理组、210℃处理组,其中210℃处理组日产量略低,可能是由于热处理温度过高在破坏木质纤维结构的同时会消耗掉部分半纤维素等干发酵原料。综上可以说明,一定范围温度的热化学预处理不仅可以加快干发酵的启动且能够提高日产气量。

2.5 累积甲烷产量

不同处理组在发酵周期内累积甲烷产量及其龚珀兹拟合曲线如图4所示,根据拟合曲线得到的方程参数见表4。从图4可以看出,各组实际累积甲烷产量从大到小依次为190℃、170℃、150℃、未处理、210℃,这与拟合结果一致。消化时间是工业生

产中原料生物消化性能的一个重要参数,本研究定义累积甲烷产量的80%为 T_{80} ,消化时间越短说明生产效率越高。实验结果表明,190℃和210℃处理组的消化时间最短为27d,未处理组的消化时间最长为30d,150℃和170℃处理组的消化时间分别为29d和28d。为了比较各处理的产气性能,根据相同发酵时间内(30d)的累积甲烷产量,可以得到各处理组比未处理组分别提高了1.67%、9.78%、16.30%、3.45%,随着处理温度的升高,累积甲烷产量也增高,但210℃时反而降低,在整个发酵阶段内,210℃处理组的累积甲烷产量比未处理组降低了3.14%。这说明热化学预处理能够提高累积甲烷产量,最高组为190℃处理,提高了16.30%,同时过高温度的热化学预处理会因损耗过多的半纤维素和纤维素从而降低累积甲烷产量。表4中停滞时间(T)能够有效反映干发酵的启动时间,其中启动最快的为190℃处理组,为7.20d,比未处理组提前了2.10d,随后的是210℃处理组的7.45d,这与实

验结果基本一致。这说明热化学预处理能够加快干发酵的启动时间,190℃和210℃处理组最为明显。

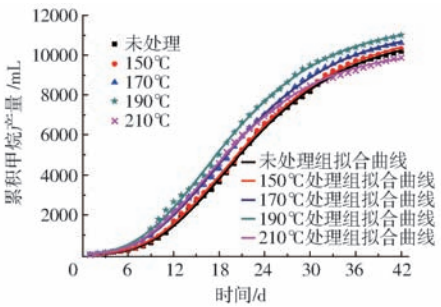


图4 不同处理组累积甲烷产量及拟合曲线
Fig. 4 Cumulative methane production and fitting results with different pretreatments

表4 修正的累积甲烷产量龚珀兹方程参数
Tab. 4 Model parameters of methane production identified from Gompertz equation

温度/℃	P_m/mL	$R_m/(\text{mL}\cdot\text{d}^{-1})$	T/d	R^2
未处理	11 106.34	438.42	9.30	0.999 6
150	11 301.20	437.93	8.96	0.999 5
170	11 463.41	450.83	7.90	0.999 2
190	11 610.13	480.38	7.20	0.999 0
210	10 331.68	440.76	7.45	0.999 4

2.6 甲烷含量

甲烷含量高低是沼气优劣的一个重要参数。图5为不同处理组在干发酵周期内甲烷体积分数变化曲线。从图5可以看出,各组甲烷体积分数在发酵过程中都是先迅速增高达到峰值之后趋于稳定,17 d之后随着发酵原料的消耗,各组甲烷体积分数先后降低,不过整个干发酵过程中甲烷体积分数保持在45%~60%之间,说明干发酵稳定性较好。其中190℃、210℃、170℃处理组先后达到各自的甲烷体积分数峰值,而150℃处理组与未处理组滞后3 d

才达到甲烷体积分数峰值,且190℃处理组甲烷体积分数峰值大于其他各组。这是由于经过热化学预处理之后,玉米秸秆颗粒的坚固结构被打破,且木质纤维中半纤维素和纤维素没有过多的损耗,这样有利于被甲烷菌利用,使干发酵迅速启动,且没有因原料的减少而降低甲烷含量。

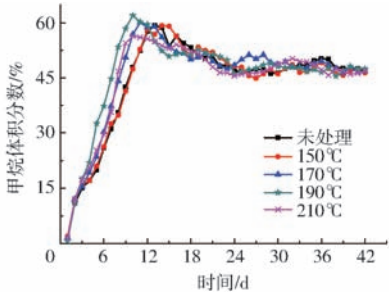


图5 不同处理组甲烷体积分数变化曲线
Fig. 5 Methane concentrations with different pretreatments

3 结论

(1)利用自制的小型鼓泡流化床热解反应器对玉米秸秆进行热化学预处理,在一定温度范围内,可以有效改变木质纤维的束状结构,降低木质纤维中的半纤维素和木质素的质量分数,利于干发酵的进行,提高沼气产量。190℃热化学预处理可以提高累积甲烷产量16.30%。而热处理温度过高(210℃)会损耗过多的半纤维素和纤维素,导致整个发酵阶段内累积甲烷产量降低3.14%。

(2)经热化学预处理组干发酵启动时间明显快于未处理组,根据龚珀兹方程参数表,各处理组启动时间都提前于未处理组,其中启动最快的是190℃处理组,启动时间为7.20 d,比未处理组提前了2.10 d。根据消化时间 T_{80} ,190℃处理组比未处理组提前3 d。表明热化学预处理方式是提高生物质干发酵效率的一种有效方法。

参 考 文 献

1 PHITSUWAN P, SAKKA K, RATANAKHANOKCHAI K. Improvement of lignocellulosic biomass in planta: a review of feedstocks, biomass recalcitrance, and strategic manipulation of ideal plants designed for ethanol production and processability[J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 58:390–405.

2 International Energy Agency. Key world energy statistics 2015[R]. Energy Balances of Non-OECD Countries-2015 edition-excerpt, 2015.

3 张韧,李清秀,刘绍鹏. 浅谈秸秆预处理在干发酵制沼气生产中的研究进展[J]. 轻工科技, 2013(12):88–89.

4 徐杰,任欢,李宁,等. 胆碱脂肪酸盐离子液体预处理水稻秸秆提高多糖酶解反应的研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(11):145–150.

XU Jie, REN Huan, LI Ning, et al. Improvement of enzymatic hydrolysis of polysaccharides in rice straw by cholinium alkanoate ionic liquid pretreatment[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(11):145–150. (in Chinese)

5 龚舒静,段青松,杨姝,等. NaOH 预处理对杂交狼尾草厌氧发酵产沼气的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(4):1970–1976.

GONG Shujing, DUAN Qingsong, YANG Shu, et al. Anaerobic fermentation of hybrid pennisetum for biogas under NaOH pretreatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(4):1970–1976. (in Chinese)

- 6 HENDRIKS A T W M, ZEEMAN G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(1):10–18.
- 7 YI Z, JIA Z, XU F, et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2014, 42(1):35–53.
- 8 关倩, 蒋剑春, 徐俊明, 等. 木质纤维生物质热化学转化预处理技术研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2014(6):56–61.
GUAN Qian, JIANG Jianchun, XU Junming, et al. Research progress of lignocellulosic biomass pretreatment methods for thermochemical conversion[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2014(6):56–61. (in Chinese)
- 9 CHANDRA R, TAKEUCHI H, HASEGAWA T, et al. Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments[J]. *Energy*, 2012, 43:273–282.
- 10 CHANDRA R, TAKEUCHI H, HASEGAWA T. Hydrothermal pretreatment of rice straw biomass: a potential and promising method for enhanced methane production[J]. *Applied Energy*, 2012, 94:129–140.
- 11 杨晴, 梅艳阳, 郝宏蒙, 等. 烘焙对生物质热解产物特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20):214–219.
YANG Qing, MEI Yanyang, HAO Hongmeng, et al. Effect of torrefaction on characteristics of pyrolytic products of biomass[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(20):214–219. (in Chinese)
- 12 李连华, 马隆龙, 袁振宏, 等. 农作物秸秆的厌氧消化试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1):335–338.
LI Lianhua, MA Longlong, YUAN Zhenhong, et al. Study on anaerobic digestion of straw stalk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):335–338. (in Chinese)
- 13 APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 21st ed, Washington, DC: APHA, 2005.
- 14 FAITHFULL N T. Methods in agricultural chemical analysis: a practical handbook[M]. Wallingford: CABI Publishing, 2002.
- 15 ZWIETERING M H, JONGENBURGER I, ROMBOUTS F M, et al. Modeling of the bacterial growth curve[J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1990, 56(6):1875–1881.
- 16 BISWAS A K, UMEKI K, YANG W, et al. Change of pyrolysis characteristics and structure of woody biomass due to steam explosion pretreatment[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(10):1849–1854.
- 17 李文哲, 丁清华, 魏东辉, 等. 稻秸好氧厌氧两相发酵工艺与产气特性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3):150–157.
LI Wenzhe, DING Qinghua, WEI Donghui, et al. Aerobic and anaerobic two-phase fermentation process and biogas production characteristic of rice straw[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):150–157. (in Chinese)
- 18 王芳, 牛卫生, 罗冰, 等. 热化学预处理玉米秸秆厌氧消化产气特性研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(8):1965–1970.
WANG Fang, NIU Weisheng, LUO Bing, et al. Biogas production characteristics of anaerobic digestion of corn stalk after thermochemical pretreatment[J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(8):1965–1970. (in Chinese)

(上接第 260 页)

- 9 王昌, 魏闯. ARIZ 在注塑模具设计冲突问题中的应用研究[J]. *机械设计与制造*, 2009, 9(9):230–232.
WANG Chang, WEI Chuang. Application and research of ARIZ algorithm in the conflict questions of plastic injection mould design[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, 9(9):230–232. (in Chinese)
- 10 韦子辉, 阎会强, 檀润华. TRIZ 理论中 ARIZ 算法研究与应用[J]. *机械设计*, 2008, 25(4):57–61.
- 11 SAVRANSKY S D. Engineering of creativity: introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving[M]. New York: RC Press, 2000.
- 12 VICTOR Fey, EUGENE Rivin. Innovation on demand[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- 13 闫晓林, 王望龙. 基于 TRIZ 和 Pro/Innovation 平台的产品创新设计[J]. *机床与液压*, 2009, 37(7):192–195.
YAN Xiaolin, WANG Wanglong. Innovation product design based on TRIZ and Pro/Innovator platform[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2009, 37(7):192–195. (in Chinese)
- 14 郝兴玉. 方草捆收集车: 中国, ZL201320429704.1[P]. 2013–07–11.
- 15 李彦. 创新方法教程(中级)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012:91–102.
- 16 张宁, 戴晓军, 郝兴玉, 等. 基于 TRIZ 的沙生灌木栽植机设计[J]. *农业工程*, 2016, 3(2):89–92.
ZHANG Ning, DAI Xiaojun, HAO Xingyu, et al. Design of desert shrub planting machine based on TRIZ theory[J]. *Agricultural Engineering*, 2016, 3(2):89–92. (in Chinese)