

气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理 增强玉米秸秆产甲烷性能

许城^{1,2}, 张婷婷^{2,3}, 谢佳芳^{2,3}, 赵全保^{2,3}, 张新颖^{1*}

(1.福州大学环境与安全工程学院,福建福州 350108; 2.中国科学院城市环境研究所,城市污染物转化重点实验室,福建厦门 361021; 3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了降低玉米秸秆碱预处理过程中药剂的成本,探究了气吹脱沼液辅助 CaO(投加量 3%、5%、6%和 8%)联合预处理对玉米秸秆厌氧消化产甲烷性能的影响,并与未气吹脱沼液辅助 CaO 预处理进行对比。结果表明,相比未气吹脱沼液辅助 CaO 和未预处理组,气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理组能获得最高的木质素降解率和累积甲烷产量,其中气吹脱沼液辅助 8% CaO 联合预处理组的累积甲烷产量达到 209.24 mL/g VS,较未预处理组(124.27 mL/g VS)提高 68.36%。工程经济分析表明,气吹脱 1 h 高温厌氧沼液辅助 3% CaO 联合预处理组能在最低 CaO 投加量下获得最高利润达 533.47 元/t 秸秆,较未预处理组提高 50.30%。

关键词:氧化钙;沼液;气吹脱;预处理;木质素

中图分类号:S216.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S1-0130-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S1.027

Enhanced production of methane from corn straw by CaO pretreatment assisted with aerating biogas slurry

XU Cheng^{1,2}, ZHANG Ting-ting^{2,3}, XIE Jia-fang^{2,3}, ZHAO Quan-bao^{2,3}, ZHANG Xin-ying^{1*}

(1.College of Environment & Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2.CAS Key Laboratory of Urban Pollutants Conversion, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:In order to reduce the cost of chemicals used in the alkaline pretreatment of corn straw, the effect of the combined pretreatment by CaO (with dosages of 3%, 5%, 6% and 8%) assisted with aerating biogas slurry on the methane production from anaerobic digestion of corn straw is investigated, and compared with the pretreatment without aerating biogas slurry. It is indicated that the highest lignin degradation rate and cumulative methane production are obtained in the combined pretreatment group compared to the group without any pretreatment and the group pretreated by CaO alone. In particular, the cumulative methane yield by the combined pretreatment group is 209.24 mL/g_{VS}, 68.36% higher than that (124.27 mL/g_{VS}) by the group without any pretreatment. It is shown through engineering economic analysis that the maximum profit of 533.47 RMB per ton of corn straw can be obtained with the lowest CaO dosage when high temperature anaerobic biogas slurry has been aerated for 1 hour combining with 3% CaO pretreatment, which represents an increase of 50.30% compared to the group without any pretreatment.

Key words:calcium oxide; biogas slurry; aeration; pretreatment; lignin

我国作为全球最大的农业生产国之一,仅 2018 年就产生 2.57 亿 t 玉米秸秆^[1]。当前玉米秸秆的处理方式仍以焚烧和废弃处理为主,焚烧处理方式不仅对大气造成严重污染,加剧温室效应,还对土壤造成严重的破坏;废弃处理方式不仅造成资源浪费,还影响周围环境。目前,厌氧消化被认为是实现玉米秸秆清洁能源化和资源化利用的主要途径之一^[2]。例如,厌氧消化可利用秸秆中的碳水化合物

(纤维素和半纤维素)生产沼气^[1]。然而,秸秆中还存在难以降解的木质素,与半纤维素共同在纤维素周围形成了结构稳定的保护层,严重阻碍了微生物对秸秆的水解^[3]。在厌氧消化产甲烷之前对秸秆进行预处理,破坏木质纤维素的结构,是提升秸秆产气效率的重要步骤^[4]。目前,秸秆厌氧消化的预处理方法主要有物理、化学和生物预处理^[5]。其中,生物预处理法因其不产生二次污染、处理条件温和、

收稿日期:2023-02-22;修回日期:2023-05-11

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52170058);国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(52027815);福建省引导性项目(2020N0031)

作者简介:许城(1998-),男,硕士生,研究方向为生物质资源化利用;张新颖(1984-),女,博士,副教授,研究方向为废水的资源化利用,通讯联系人,xyz_8471@163.com。

能耗低等优点,成为近几年的研究热点^[6]。

沼液预处理作为生物法中的一种,富含多种能够降解木质纤维素的微生物^[7],具有循环再利用沼液和成本低等优点,但相比物理和化学预处理方法,沼液预处理效果有限且时间较长。近年来,有研究发现,生物和化学联合预处理能够显著提高秸秆的生物降解性,提高厌氧消化的产气性能^[8]。例如,Zhao 等^[9]采用 1% NaOH 和能够降解木质纤维素的酶联合预处理秸秆,甲烷产率相比未预处理组提高 20.24%。碱和微生物联合预处理虽然能够显著破坏木质纤维素的结构,但投入碱造成预处理成本增加及后续沼液的盐浓度提高,影响后续发酵效率。Guan 等^[10]研究利用 10% CaO 和沼液联合预处理秸秆,甲烷产率相比未预处理组提高 81%。CaO 虽然成本相对较低,对管道的腐蚀性较小,但 Ca²⁺ 易与厌氧发酵液中的 CO₃²⁻ 结合生成 CaCO₃ 沉淀在反应器底部,造成反应器堵塞^[11]。上述研究虽然存在成本较高或难以连续运行的问题,但证明了预处理浆液的 pH 提高能增强预处理效果。有研究发现,曝气吹脱去除废水中的酸性 CO₂ 组分可提高废水的 pH^[12-13]。由于曝气吹脱对废水的 pH 提升有限(最高提升至 10 左右),基于此,本文提出气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理的方法,并与未气吹脱沼液辅助 CaO 和未预处理组进行比较,旨在减少预处理过程中的药剂投加量,并对新方法的经济性进行评估。

1 实验

1.1 材料

玉米干秸秆取自江苏省连云港市的农田,用粉碎机粉碎后过 40 目筛网。接种污泥是取自处理化工废水的厌氧 EGSB 反应器的厌氧颗粒污泥(广西益普环境工程有限公司)。沼液取自中国漳州市漳浦县养猪场的发酵罐(已固液分离),发酵底物是猪粪。玉米干秸秆、接种物和沼液的性质如表 1 所示。

表 1 玉米干秸秆、接种污泥和沼液的性质

	玉米干秸秆	沼液	接种物
TS/%	90.86±0.08	0.34±0.01	2.85±0.35
VS(以 TS 计)/%	71.45±0.84	57.33±0.78	63.80±0.66
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	—	853.1±13.71	540.7±6.97
纤维素/%	41.51±0.39	—	—
半纤维素/%	37.87±0.54	—	—
木质素/%	18.79±1.06	—	—
SCOD/(mg·L ⁻¹)	—	1003±91.65	528.5±14.73

注:TS 和 VS 分别指玉米秸秆的总固体以及挥发性固体含量。

1.2 实验方法

1.2.1 预处理实验

采用沼液(Liquid fraction of digestate, LFD)进行实验。气吹脱实验在一个 1 L 的宽口试剂瓶中进行,吹脱温度为 55℃,空气通过一个曝气头泵入溶液底部,空气流量设定为 2 L/min。曝气前,将沼液放置在恒温水浴中预热 15 min。曝气 1 h 后,将沼液取出冷却。气吹脱沼液(Aerated liquid fraction of digestate, A-LFD)的 pH 为 9.2,投加不同浓度的 CaO(3%、5%、6% 和 8%,以秸秆的 TS 计)进入气吹脱沼液中,搅拌至沼液的 pH 稳定后对秸秆进行预处理,固液比设定为 1:15,预处理时间设定为 2 d,同时设置未气吹脱沼液辅助 6% CaO^[8]和未气吹脱沼液辅助 10% CaO^[10]预处理组进行对比,预处理时间分别为 3 和 2 d。实验设计及分组命名如表 2 所示,实验设置 6 组平行,其中 3 组进行后续厌氧消化,另外 3 组过滤后进行后续分析。

表 2 气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理实验设计

实验组	CaO 投加量(以秸秆 TS 计)/%	吹脱时间/h	预处理时间/d	分组
3% A-LFD	3	1	2	低投加组
5% A-LFD	5	1	2	低投加组
6% A-LFD	6	1	2	低投加组
6% LFD	6	0	3	低投加组
8% A-LFD	8	1	2	高投加组
10% LFD	10	0	2	高投加组

1.2.2 厌氧消化实验

厌氧消化实验装置由 500 mL 的蓝盖玻璃试剂瓶(工作容积为 400 mL)、1 000 mL 的蓝盖玻璃试剂瓶、量筒及橡胶管组成。1 000 mL 的蓝盖玻璃试剂瓶含有 800 mL 的 1 mol/L NaOH 溶液,用于吸收沼液中的 CO₂ 和 H₂S,并通过排水法测量甲烷体积^[14]。将预处理后的固液混合物接入接种污泥,污泥接种量为 15 g/L(以 MLSS 计)^[15],接种后用去离子水定容至 400 mL,密封后放置在恒温水浴振荡器上进行厌氧消化,厌氧消化温度设定为(35±1)℃,每日记录甲烷产量。

1.2.3 检测方法

TS 和 VS 采用重量法^[16]测定;纤维素、半纤维素和木质素分别根据纤维素、半纤维素及木质素试剂盒(优选生物科技,上海)测定;pH 采用 Mettler Toledo 型 pH 计测定;SCOD 使用连华科技 5B-3B 型多参数水质分析仪测定;溶解性有机物分析采用

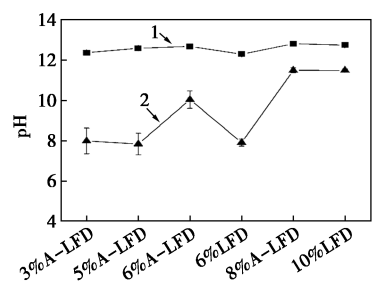
日立荧光分光光度计(F-4600,日本)测定。

2 结果与讨论

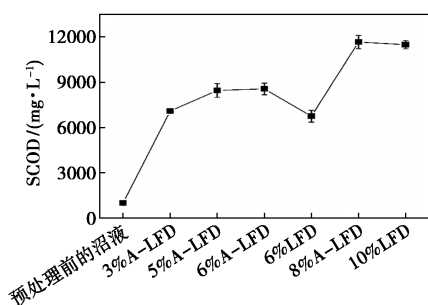
2.1 预处理前后沼液的性质变化

预处理前后沼液的 pH 变化如图 1(a) 所示。由图 1(a) 可知,在气吹脱沼液中加入 CaO,所有实验组的 pH 均能高于 12,低投加组中 3% A-LFD、5% A-LFD 及 6% A-LFD 的 pH 均能高于 6% LFD,高投加组中 8% A-LFD 的 pH 也高于 10% LFD,主要是由于吹脱去除了沼液中的酸性 CO₂ 组分,促进了体系中的 CO₃²⁻ 与 HCO₃⁻ 水解,CaO 结合沼液中的水生成 Ca(OH)₂,Ca(OH)₂ 电离 OH⁻ 结合水解的 OH⁻,进而导致更高的 pH。所有实验组预处理后沼液的 pH 均下降,这主要归因于:①OH⁻ 与玉米秸秆中木质纤维素的化学键发生反应而被消耗;②预处理过程产生了有机酸中和了部分 OH⁻[17]。

预处理前后沼液的 SCOD 变化如图 1(b) 所示。由图可见,预处理前沼液的 SCOD 为 1 003 mg/L,预处理后沼液的 SCOD 明显增大。低投加组的 SCOD 质量浓度增加到 6 752 ~ 8 558 mg/L,高投加组 SCOD 质量浓度增加到 11 490 及 11 668 mg/L。这表明气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理提高了秸秆的水解效率。由于木质纤维素的结构被强碱性沼液破坏,导致秸秆中可溶性有机物释放到沼液中,这些可溶性有机物能够作为后续厌氧消化可利用的底



1—预处理前的沼液;2—预处理后的沼液
(a) 预处理前后沼液的 pH 变化



(b) 预处理前后沼液的 SCOD 变化

图 1 预处理前后沼液的性质变化

物。高投加组释放可溶性有机物浓度高于低投加组,主要是由于增强沼液的碱性,能够促进可溶性有机物释放[18]。

2.2 预处理前后玉米秸秆的木质纤维素变化

预处理前后玉米秸秆的木质纤维素变化如图 2 所示。由图 2 可知,所有预处理组的纤维素、半纤维素和木质素含量均降低。与未预处理的玉米秸秆相比,低投加组中纤维素降解率为 10.32% ~ 11.37%,半纤维素降解率为 10.23% ~ 16.30%,木质素降解率为 23.03% ~ 29.79%。高投加组中 10% LFD 和 8% A-LFD 纤维素降解率分别为 13.55% 和 15.29%,半纤维素降解率分别为 23.28% 和 25.70%,木质素降解率分别为 31.18% 和 31.36%。气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理的半纤维素及木质素的降解率均高于未吹脱沼液辅助 CaO,主要是由于气吹脱沼液辅助 CaO 能够达到更高的 pH,对木质纤维素结构的破坏作用更佳。此外,本研究的木质素降解率高于 Guan 等[8]所报道的木质素去除率(22.45%)。在预处理过程中,木质素的降解及碳水化合物(纤维素和半纤维素)的释放能够改善玉米秸秆的生物降解性。

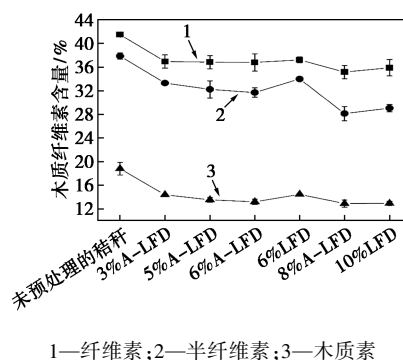


图 2 预处理前后玉米秸秆的木质纤维素变化

2.3 预处理前后沼液中溶解性有机物的变化

预处理前后沼液中溶解性有机物的变化如图 3 所示。预处理前沼液主要溶解性有机物为类富里酸($E_x = 225 \sim 275 \text{ nm}$, $E_m = 400 \sim 425 \text{ nm}$)、多环芳烃类腐殖酸($E_x = 280 \sim 300 \text{ nm}$, $E_m = 400 \sim 425 \text{ nm}$)及聚羧酸类腐殖酸($E_x = 300 \sim 325 \text{ nm}$, $E_m = 400 \sim 425 \text{ nm}$);低投加组 3% A-LFD、5% A-LFD、6% A-LFD 和 6% LFD 预处理秸秆后的沼液主要溶解性有机物为类酪氨酸($E_x = 200 \sim 225 \text{ nm}$, $E_m = 300 \sim 325 \text{ nm}$)及类酪氨酸蛋白($E_x = 250 \sim 300 \text{ nm}$, $E_m = 300 \sim 325 \text{ nm}$);高投加组 8% A-LFD 和 10% LFD 组预处理秸秆后的沼液主要溶解性有机物为聚羧酸类腐殖酸($E_x = 300 \sim 350 \text{ nm}$, $E_m = 400 \sim 425 \text{ nm}$)及多环芳烃类腐殖

酸($E_x = 275 \sim 300 \text{ nm}$, $E_m = 350 \sim 400 \text{ nm}$)。低投加组及高投加组预处理秸秆后沼液中的溶解性有机物不同,高投加组主要为腐殖酸类有机物(大分子),低投加组主要为小分子的有机物。表明气吹脱沼液辅助低投加量的CaO联合预处理能够促进秸秆中小分子有机物的释放,有利于后续产酸菌直接利用。

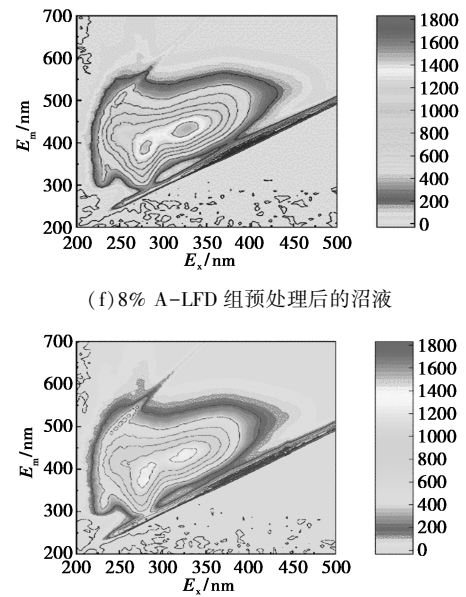
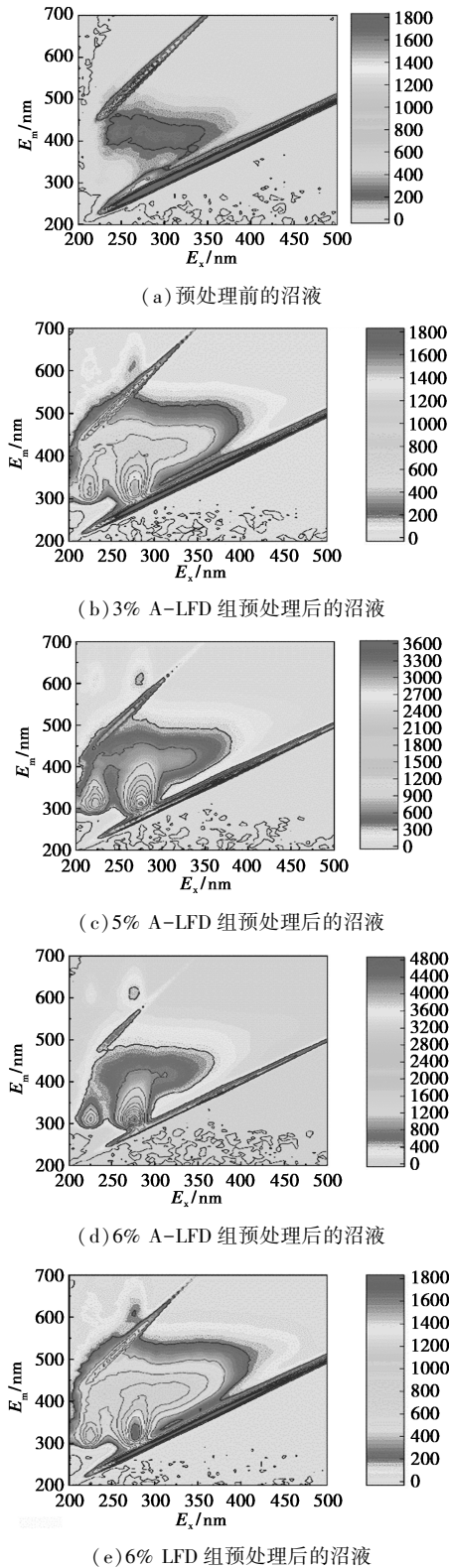
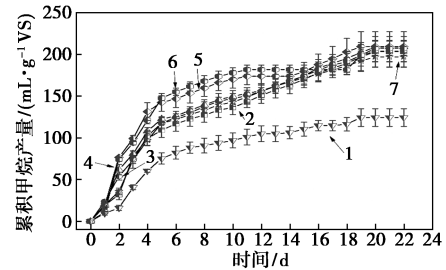


图3 预处理前后沼液中溶解性有机物变化

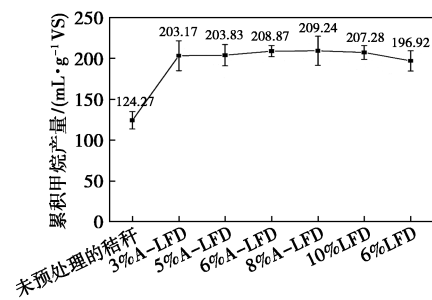
2.4 预处理对秸秆厌氧发酵产甲烷性能的影响

预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷性能的影响如图4所示。图4(a)显示了累积甲烷产量随时间的变化,前6 d 甲烷产量迅速增长,6 d 后甲烷产率开始降低,直到发酵结束,主要原因是:①发酵前期厌氧微生物利用预处理期间释放的可溶性有机物快



1—未预处理组;2—3% A-LFD 组;3—5% A-LFD 组;4—6% A-LFD 组;5—8% A-LFD 组;6—10% LFD 组;7—6% LFD 组

(a) 累积甲烷产量随时间的变化



(b) 累积甲烷产量

图4 预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷性能的影响

速生产甲烷;②由于发酵中后期剩余玉米秸秆中复杂有机物的难降解性导致甲烷产率降低,如纤维素、蛋白质和腐殖酸等。在图 4(b)中,未预处理秸秆累积甲烷产量为 124.27 mL/g VS,低投加组中 3% A-LFD、5% A-LFD、6% A-LFD 和 6% LFD 累积甲烷产量分别为 203.17、203.83、208.87 和 196.92 mL/g VS。高投加组中 8% A-LFD 和 10% LFD 分别为 209.24 和 207.28 mL/g VS。可以观察到相较未气吹脱沼液辅助 CaO 组和对照组,气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理组能获得最高的累积甲烷产量,表明气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理能够显著提高玉米秸秆的甲烷产量。此外,气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理对秸秆甲烷产量的提升率高于 Gu 等^[19]用 Ca(OH)₂ 预处理方式(36.70%),Guan 等^[8]用 CaO 联合沼液预处理方式(57.56%)。

2.5 经济性分析

根据 Guan 等^[8]采取的工程经济分析方法,对预处理的玉米秸秆进行简单的经济分析,净利润为甲烷利润与预处理成本的差值,以 1 t 秸秆(以 TS 计)为计算基础,没有额外计算复杂的成本消耗,如人工成本、秸秆成本、运输成本和仪器设备成本等,具体经济分析结果如表 3 所示。预处理的成本主要包括药剂成本、加热成本和曝气成本,以 2022 年 10 月中国石油和化工网平均市场价格计,分别为 CaO 900 元/t、动力煤 800 元/t、液化天然气 4 元/m³。加热成本考虑实际厌氧沼液的余热,分为高温厌氧沼液(55℃)和中温厌氧沼液(35℃)。根据固液比(1:15)计算出所需燃煤,35℃加热至曝气温度 55℃需 42.86 kg。曝气成本根据单位时间气液比计算出所

表 3 预处理方法的经济性分析

实验组	加热成本/元				净利润/元		
	药剂成本/元	利用高温沼液余热	利用中温沼液余热	曝气成本/元	甲烷利润/元	利用高温沼液余热	利用中温沼液余热
未预处理	0	0	0	0	354.93	354.93	354.93
3% A-LFD	27	0	34.29	19.80	580.27	533.47	499.18
5% A-LFD	45	0	34.29	19.80	582.13	517.33	483.04
6% A-LFD	54	0	34.29	19.80	596.53	522.73	488.44
6% LFD	54	0	0	0	562.40	508.40	508.40
8% A-LFD	72	0	34.29	19.80	597.60	505.80	471.51
10% LFD	90	0	0	0	592.00	502.00	502.00

注:以上数据均以 1 t 秸秆(以 TS 计)为计算基础。

需风量为 66.67 m³/min,选择罗茨鼓风机(风量为 27.7~79.7 m³/min,功率为 30~90 kW),根据 2022 年中国平均工业电费为 0.66 元/(kW·h),计算出曝气成本为 19.8 元/h。由表 3 可见,利用中温厌氧沼液余热条件下,3% A-LFD 相比 6% LFD 预处理组,净利润虽相差 9.22 元,但药剂 CaO 投加量能够减少 50%,预处理时间缩短了 33%。利用高温厌氧沼液余热条件下,3% A-LFD 预处理组能够获得最高的利润(533.47 元),较未预处理组提高 50.30%。

3 结论

(1)气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理能够有效降解木质素,释放纤维素及半纤维素,促进可溶性有机物释放,改善秸秆的生物降解性。其中,木质素降解率最高可达到 31.36%

(2)气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理组获得的累积甲烷产量高于未气吹脱沼液辅助 CaO 组和未预处理组,表明气吹脱沼液辅助 CaO 联合预处理能够增强玉米秸秆的产甲烷性能。

(3)工程经济分析表明,选择 3% A-LFD 组即气吹脱 1 h 高温厌氧沼液辅助 3% CaO 联合预处理作为最佳预处理方式,能够获得最高的净利润 533.47 元/t 秸秆,较未预处理组提高 50.30%,预处理时间及药剂投加量较未气吹脱沼液辅助 6% CaO 组(6% LFD)分别能够减少 33%及 50%。

参考文献

- [1] Khan M F S, Akbar M, Xu Z, *et al.* A review on the role of pretreatment technologies in the hydrolysis of lignocellulosic biomass of corn stover[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2021, 155: 106276.
- [2] Zheng Y, Zhao J, Xu F Q, *et al.* Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 42: 35-53.
- [3] Carrillo A, Colom X, Sunol J J, *et al.* Structural FT-IR analysis and thermal characterisation of lyocell and viscose-type fibres[J]. *European Polymer Journal*, 2004, 40(9): 2229-2234.
- [4] 曹运齐,解先利,郭振强,等.木质纤维素预处理技术研究进展[J]. *化工进展*, 2020, 39(2): 489-495.
- [5] 徐琬莹,田建茹,左华,等.纤维素生物质厌氧消化的生物预处理研究进展[J]. *中国沼气*, 2019, 37(3): 9-20.
- [6] Hu Y, Pang Y, Yuan H, *et al.* Promoting anaerobic biogasification of corn stover through biological pretreatment by liquid fraction of digestate (LFD) [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 167-173.

(下转第 141 页)

- L-lysine gemini surfactants pended with reactive groups[J].Tetrahedron Letters,2008,49(11):1759-1761.
- [3] 王跃虎.阳离子柔软剂的合成及抑制黄变的开发和应用[D].西安:西安工程大学,2011.
- [4] 徐慧杰,姜亚洁,耿涛,等.阳离子表面活性剂合成研究进展[J].日用化学品科学,2020,43(6):48-54.
- [5] 徐浩,耿二欢,许佳斌,等.不同饱和度酯基季铵盐的合成及性能研究[J].中国洗涤用品工业,2021,(11):60-66.
- [6] 刘佳焯.双酯基季铵盐表面活性剂的合成及性能研究[J].河南化工,2011,28(23):37-39,50.
- [7] 姜平均,朱红军,丁徽,等.双酯基 Gemini 季铵盐织物柔软剂的制备与性能研究[J].印染助剂,2011,28(5):27-29.
- [8] Tatsumi T,Zhang W,Kida T,*et al.*Novel hydrolyzable and biodegradable cationic gemini surfactants:1,3-bis[(acyloxyalkyl)dimethylammonio]-2-hydroxypropane dichloride [J]. Journal of Surfactants and Detergent,2000,3:167-172.
- [9] 全国表面活性剂和洗涤用品标准化技术委员会.GB/T 9104—2008 工业硬脂酸试验方法[S].北京:中国标准出版社,2008:3-4.
- [10] 全国表面活性剂和洗涤用品标准化技术委员会.GB/T 16801—2013 织物调理剂抗静电性能的测定[S].北京:中国标准出版社,2013:3-4.
- [11] 王杰,姚晨之.织物洗涤剂柔软性能测试方法的研究[J].日用化学工业,2021,51(3):190-194,207.
- [12] 温朋鹏,孙永强,孙晋源,等.乙氧基化三酯基季铵盐的性能研究[J].日用化学品科学,2014,37(9):69-71.
- [13] 杨伟光,曹玉朋,鞠洪斌,等.油酸酰胺基季铵盐 Gemini 表面活性剂的制备及性能[J].应用化学,2021,38(2):220-227.
- [14] Hussain S M S,Kamal M S,Murtaza M.Synthesis of novel ethoxylated quaternary ammonium gemini surfactants for enhanced oil recovery application[J].Energies,2019,12(9):1733.
- [15] 马江涛,王万绪,王丰收,等.N-酰基苯丙氨酸钠表面活性剂的合成和性能研究[J].应用化工,2020,49(3):592-596.
- [16] Abo-Riya M, Tantawy A H, El-Dougdoug W. Synthesis and evaluation of novel cationic gemini surfactants based on guava crude fat as petroleum-collecting and dispersing agents[J].Journal of Molecular Liquids,2016,221:642-650.
- [17] Xu D, Ni X, Zhang C, *et al.* Synthesis and properties of biodegradable cationic gemini surfactants with diester and flexible spacers[J].Journal of Molecular Liquids,2017,240:542-548.
- [18] Zhou M,Zhang Z,Xu D,*et al.*Synthesis of three gemini betaine surfactants and their surface active properties [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2017,74:7-13.
- [19] Hoque J,Akkapeddi P,Yarlagadda V,*et al.*Cleavable cationic antibacterial amphiphiles:Synthesis,mechanism of action,and cytotoxicities[J].Langmuir,2012,28(33):12225-12234.
- [20] Jin X,Zu Z,Gong Q,*et al.*Synthesis and properties of anionic surfactants containing oxyethylene group or/and branched tail [J]. Journal of Dispersion Science and Technology,2011,32(6):898-902.
- [21] 赵国玺,朱德民.十二烷基聚氧乙烯醚硫酸钠的表面活性研究[J].日用化学工业,1996,(3):1-3.
- [22] 李文静,孙永强,史修启,等.乙氧基化酯基季铵盐的性能研究[J].印染助剂,2012,29(11):11-14.
- [23] 郭珊,付博敏,范汉明.纺织品黄变机理及改善方案[J].纺织科技进展,2019,(6):7-9. ■

(上接第 134 页)

- [7] Guo X,Chen G,Liu F,*et al.*Promoting air gasification of corn straw through biological pretreatment by biogas slurry:An initiative experimental study[J].Fuel Processing Technology,2019,191:60-70.
- [8] Guan R,Li X,Wachemo A C,*et al.*Enhancing anaerobic digestion performance and degradation of lignocellulosic components of rice straw by combined biological and chemical pretreatment [J]. Science of the Total Environment,2018,637:9-17.
- [9] Zhao X, Luo K, Zhang Y, *et al.* Improving the methane yield of maize straw: Focus on the effects of pretreatment with fungi and their secreted enzymes combined with sodium hydroxide [J]. Biore-source Technology,2018,250:204-213.
- [10] Guan R, Yuan H, Zhang L, *et al.* Combined pretreatment using CaO and liquid fraction of digestate of rice straw: Anaerobic digestion performance and electron transfer [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2021,36:223-232.
- [11] 王远飞,韩若冰,刘雨,等.垃圾焚烧厂渗滤液厌氧系统防堵塞的工程实践[J].广东化工,2021,48(15):171-173.
- [12] Lisitsin D,Hasson D,Semiati R.The potential of CO₂ stripping for pretreating brackish and wastewater desalination feeds [J]. Desalination,2008,222(1-3):50-58.
- [13] Zhao Q B, Ma J, Zeb I, *et al.* Ammonia recovery from anaerobic digester effluent through direct aeration [J]. Chemical Engineering Journal,2015,279:31-37.
- [14] Kumar V, Rawat J, Patil R C, *et al.* Exploring the functional significance of novel cellulolytic bacteria for the anaerobic digestion of rice straw [J]. Renewable Energy,2021,169:485-497.
- [15] Zhang R H, Zhang Z Q. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system [J]. Bioresource Technology, 1999,68(3):235-245.
- [16] Lei Z, Chen J, Zhang Z, *et al.* Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation [J]. Bioresource Technology,2010,101(12):4343-4348.
- [17] Deng Y, Qiu Y, Yao Y, *et al.* Weak-base pretreatment to increase biomethane production from wheat straw [J]. Environmental Science and Pollution Research,2020,27(30):37989-38003.
- [18] Torres M L, Llorens M D E. Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes [J]. Waste Management,2008,28(11):2229-2234.
- [19] Gu Y, Zhang Y, Zhou X. Effect of Ca(OH)₂ pretreatment on extruded rice straw anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2015,196:116-122. ■