

超声预处理提升湿垃圾产沼率的应用研究

吴健*

(上海黎明资源再利用有限公司, 上海 201209)

摘要: 对超声预处理提升湿垃圾产沼率进行了应用研究, 研究表明: 当采用不同的超声时间(1h、2h)及超声频率(20 kHz 和 40 kHz) 预处理湿垃圾浆料时, 获得的产甲烷潜力的提升效果不同。不同的超声预处理实验组相对于对照组均有提升湿垃圾浆料产甲烷潜力的效果。当选择 40 kHz 超声频率预处理湿垃圾浆料 2 h 时, 获得的湿垃圾浆料的最大累积产甲烷量比对照组高出 12.83%, 最大比产甲烷速率相对于对照组高出 11.46%。

关键词: 湿垃圾; 超声预处理; 产沼; 厌氧消化

中图分类号: S216.4; X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)01-0083-05

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023010083

Study on Application of Ultrasonic Pretreatment to Improve the Biogas Yield of Wet-type Waste / WU Jian* / (Shanghai Liming Resources Reuse Co Ltd, Shanghai 201209, China)

Abstract: The application of ultrasonic pretreatment to improve the biogas production rate of wet-type waste was studied. The results showed that the enhancement effect of methane production potential was different when the wet-type waste slurry was pretreated with different ultrasonic time (1h, 2h) and ultrasonic frequency (20 kHz and 40 kHz). Compared with the control group, different ultrasonic pretreatment experimental groups could improve the methane production potential of wet-type waste slurry. When the wet-type waste slurry was pretreated with 40 kHz ultrasonic frequency for 2 hours, the maximum cumulative methane production of the wet-type waste slurry was 12.83% higher than that of the control group, and the maximum specific methane production rate was 11.46% higher than that of the control group.

Key words: wet-type waste; ultrasonic pretreatment; biogas yield; anaerobic digestion

上海市的湿垃圾(也称为“餐厨垃圾”)处理工厂绝大部分采用厌氧消化(Anaerobic Digestion, 缩写为“AD”)的主体工艺, 厌氧消化可实现湿垃圾的减量化及资源化, 其自动化程度高、所需人力少、容易控制恶臭气体散发, 产生的沼气可用于发电, 沼渣可进行肥料化利用, 经济价值高^[1-2]。但是在餐厨垃圾厌氧消化产沼气系统的运行过程中, 普遍发现存在厌氧消化停留时间较长、纤维类浮渣易结壳、高含固率进料下有机物去除率偏低、单位质量餐厨垃圾产沼量少、厌氧出水水质较差、高负荷下有机酸(VFAs)易累积等问题^[15], 某些处理厂甚至出现工艺运行失败的情况。

厌氧消化过程的水解阶段被认为是有机物厌氧消化的主要限速阶段。餐厨垃圾水解速率与垃圾中的有机物种类和含量、有机物颗粒尺寸等因素有关。餐厨垃圾中含有碳水化合物(约 40% ~ 50%)、蛋白

质(约 20% ~ 30%)、脂肪(约 10% ~ 20%) 3 大类物质, 其中碳水化合物中以纤维素、半纤维素及一小部分以木质素的形式存在的物质可降解较差^[3-4]。由于碳水化合物结构的复杂性, 微生物在这一转化过程中面临困难。就有机物颗粒尺寸而言, 粒径越小, 有机物比表面积越大, 与厌氧微生物接触面积越大, 水解速率越快。

为了克服这些问题, 加快厌氧消化速率, 提高沼气产量, 研究人员通常会对餐厨垃圾采取一定的预处理措施, 包括物理法、化学法、机械法、生物法和联合预处理法^[5-11]。超声预处理是一种常用的机械预处理措施。在超声预处理过程中, 蒸汽产生气泡, 然后破裂导致生物质分解。超声波振子产生强烈的流体剪切力, 会导致汽泡的形成, 从而改变作用物质的理化性质, 破坏物质结构, 减小物料颗粒粒径, 加速有机质溶出, 提高厌氧消化效率。

收稿日期: 2022-05-18 修回日期: 2022-07-20

项目来源: 华东师范大学上海有机固废生物转化工程技术研究中心 2021 年度开放课题(SERC2021C09)

作者简介: 吴健(1987-), 男, 中级工程师, 主要从事有机固废资源化研究等工作, E-mail: woojan@aliyun.com

通信作者: 吴健, E-mail: woojan@aliyun.com

1 材料与方法

1.1 实验原料

本实验用的湿垃圾经过除杂、制浆、提油后的湿垃圾浆料取自上海某有机质固废处理厂均质罐,而湿垃圾浆料产甲烷潜力试验用沼液则取自该厂 CSTR 厌氧消化反应器。

1.2 实验设备

本实验采用的两台由无锡某公司生产的超声波预处理小试装置频率分别为 20 kHz 和 40 kHz。实验采用 RTK-18 型的全自动产甲烷潜力测试装置进行超声预处理前后湿垃圾浆料的产甲烷潜力测试。

1.3 检测方法

总化学需氧量 (TCOD) 采用哈希消解比色法^[12]; 挥发性脂肪酸 (VFA) 采用哈希脂化法^[12]; TS 测定采用 105℃ 烘干法 (DHG9140, 上海慧泰); VS 测定采用 600℃ 马弗炉灼烧法 (SG-XL1100, 中科院上海光机所); 原料 pH 值测定采用多参数水质分析仪 (DZS-706, 上海雷磁)。

1.4 实验方法

1.4.1 不同超声时间对湿垃圾浆料产甲烷潜力的影响

根据超声预处理装置在造纸厂制浆领域的市场调研情况,选择常规的 20 kHz 的超声频率的小试装置进行不同超声时间对湿垃圾浆料产甲烷潜力影响的试验。

将采集自均质罐的湿垃圾浆料 10 L 用电动搅拌机搅拌均匀,并设置 1 个对照组,3 个实验组,分别命名为 CG、EG1、EG2、EG3。对照组取 1 L 湿垃圾浆料,不做超声预处理,等待后续实验。实验组 EG1、EG2、EG3 用 3 个同样的 2 L 烧杯,分别取 1 L 搅拌均匀的湿垃圾浆料,放入 20 kHz 超声小试设备,并在超声设备放入清水至水位完全超过烧杯内湿垃圾浆料液位。开启超声预处理装置,在超声时间为 30 min、1 h 及 2 h 的时候分别取出 EG1、EG2、EG3 烧杯,将对照组及实验组超声预处理后的湿垃圾浆料各取 20 mL 进行产甲烷潜力测试实验^[13],并通过 Modified Gompertz 进行数学模型拟合,以评估不同超声预处理对餐厨浆料有机质增溶效果及厌氧消化过程的影响。Modified Gompertz 数学模型的公式如下所示^[14]:

$$P(t) = P_{max} \times \exp - \exp \left[\left(R_{max} \times \exp(1) / P_{max} \right) (\lambda - t) + 1 \right]$$

式中: $P(t)$ 为 t (d) 时刻的累积产甲烷量, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$; P_{max} 为最大产甲烷量, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$; R_{max}

为最大比产甲烷速率, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VSd}^{-1}$; λ 为延滞时间, d。此公式中参数 P_{max} 、 R_{max} 、 $P(t)$ 单位中的 gVS 指单位质量进料基质。

本次实验取 10 L 有机质厂厌氧沼液于中温 37℃ 水浴条件预反应 3 天,主要目的是尽可能降低厌氧发酵液其有机物本底值,减少其对产甲烷潜力测试过程的影响,用于实验的沼液指标如下: VFA 为 $1251 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD 为 $10460 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 8.03、TS 为 2.92%、VS 为 42.9%。

1.4.2 不同超声频率对湿垃圾浆料产甲烷潜力的影响

将采集自均质罐的湿垃圾浆料 10 L 用电动搅拌机搅拌均匀,并设置 1 个对照组,2 个实验组,分别命名为 CG、EG20、EG40。

对照组取 2 L 湿垃圾浆料,不做超声预处理,等待后续实验。实验组 EG20、EG40 用两个同样的 1 L 烧杯,分别取 1 L 搅拌均匀的湿垃圾浆料,放入 20 kHz 和 40 kHz 的两个超声小试设备,并在两个超声设备放入清水至水位完全超过烧杯内湿垃圾浆料液位。同时开启两个超声预处理装置,超声预处理时间固定在 1 h。将对照组及实验组超声预处理后的湿垃圾浆料各取 20 mL 进行产甲烷潜力测试实验^[11],并通过 Modified Gompertz 进行数学模型拟合,以评估不同超声预处理对餐厨浆料有机质增溶效果及厌氧消化过程的影响,Modified Gompertz 数学模型公式如 1.4.1 节所示。

本次实验所取沼液数量及预处理方式如 1.4.1 节。用于实验的沼液指标如下: VFA 为 $1730 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、SCOD 为 $12210 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 7.92、TS 为 4.35%、VS 为 37.1%。

1.4.3 40 kHz 超声频率对湿垃圾浆料产甲烷潜力的影响

将采集自均质罐的湿垃圾浆料 10 L 用电动搅拌机搅拌均匀,并设置 1 个对照组 (CG1), 1 个实验组 (EG401)。对照组取 1 L 湿垃圾浆料,不做超声预处理,等待后续实验。实验组 EG401 同 1.4.2 实验组的处理方法,超声预处理时间固定在 2 h。将对照组及实验组超声预处理后的湿垃圾浆料各取 20 mL 进行产甲烷潜力测试实验^[11],并通过 Modified Gompertz 进行数学模型拟合,以评估不同超声预处理对餐厨浆料有机质增溶效果及厌氧消化过程的影响。本次实验所取沼液数量及预处理方式如 1.4.1 节。用于实验的沼液指标如下: VFA 为 $1330 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、SCOD 为 $11950 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 8.04、TS 为 3.20%、VS 为 39.1%。实验用湿垃圾浆料原料的

TCOD 为 157200 mg·L⁻¹、SCOD 为 113800 mg·L⁻¹、TS 为 10.6%、VS 为 84.8%。

2 结果与讨论

2.1 不同超声时间对湿垃圾浆料产甲烷潜力的影响

由表 1 分析可知,不同超声预处理组与对照组相比,除 TCOD 这项外无显著差异。TCOD 出现显著差异的原因主要与微小粒径的有机悬浮颗粒物的增加有关。由于餐厨浆料原料的不均质性,原液进行 TCOD 检测时,较大颗粒的有机物由于移液(移液管口细小,没法吸取较大颗粒样品)、取样量小(COD 高量程测试方法仅取样 0.2 mL)、大比例稀释等原因,一般不容易被检测、计算而成为 TCOD 的一部分。而经过超声预处理之后,湿垃圾浆料变得更均质,较多的大颗粒有机悬浮颗粒在超声波的空化等作用下被瓦解成更细小的有机悬浮颗粒,被检测成为 TCOD 的一部分,因而超声实验组的 TCOD 相较对照组均有明显的增加,实验组 EG1、EG2、EG3 的 TCOD 相较对照组分别增加 24.17%、19.56% 及 14.39%。超声预处理实验组较对照组的 SCOD 并没有显著增加,说明超声预处理并没有增溶 SCOD 的效果。

表 1 不同超声时间预处理实验组及对照组湿垃圾浆料理化性质

实验组	TCOD	SCOD ^b	TS	VS	pH 值
	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	%	%	
对照组 CG	135500	103300	10.3	84.2	3.84
实验组 EG1	168250	90800	10.2	86.4	3.81
实验组 EG2	162000	84900	9.9	87.1	3.83
实验组 EG3	155000	96200	11.0	85.3	3.80
显著性检验 <i>p</i> 值 ^a	0.021	0.060	0.817	0.059	0.094
显著性差异分析	有	无	无	无	无

注:a:采用单样本 T 检验,实验组数值与对照组进行显著性差异分析,若 *p* < 0.05 则有显著性差异; b:SCOD 是指采用 3000 rpm 离心 3 min 获得的上清液的 COD。

由图 1 及表 2 拟合结果分析,对照组 CG 与实验组 EG1、EG2、EG3 拟合曲线的 R² 值分别为 0.9981、0.9986、0.9982、0.9979, R² 值均大于 0.99,说明拟合效果较好。

对照组 CG 获得的最大比产甲烷速率为 291.1 mL·g⁻¹VS·d⁻¹; 超声预处理 30 min 实验组 EG1 获得的最大比产甲烷速率为 292.7 mL·g⁻¹VS·d⁻¹; 超声预处理 1 h 实验组 EG2 获得的最大比产甲烷速率为 301.8 mL·g⁻¹VS·d⁻¹; 超声预处理 2 h 实验组 EG3 获得的最大比产甲烷速率为 305.3 mL·g⁻¹VS·d⁻¹。由最大比产甲烷速率分析,从对照组到实验组 EG1、

EG2、EG3,最大比产甲烷速率呈现递增趋势,说明超声预处理对提升最大比产甲烷速率有一定的效果。超声预处理 2 h 实验组 EG3 获得的最大比产甲烷速率最高,为 305.3 mL·g⁻¹VS·d⁻¹,比对照组高出 4.88%。统计分析结果表明,实验组 EG2 相对于 CG 组、EG1 组的最大比产甲烷速率无显著差异(*p* > 0.05),而实验组 EG3 相对于 CG 组、EG1 组的最大比产甲烷速率具有显著差异(*p* < 0.05),表明超声预处理时间为 2 h 时,获得的湿垃圾厌氧消化产甲烷加速的效果最好。

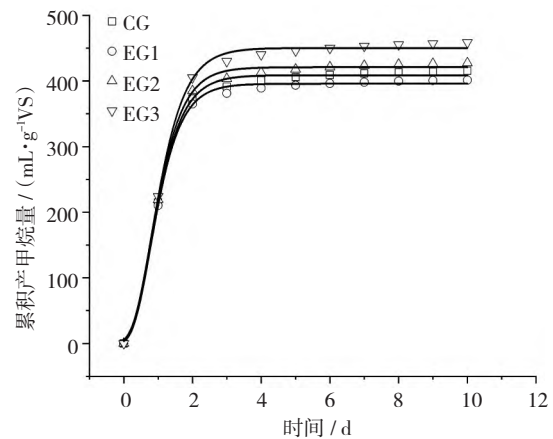


图 1 不同超声时间预处理实验组累积产甲烷量 Modified Gompertz 模型拟合图

从最大累积产甲烷量分析可知,对照组 CG 及实验组 EG1、EG2、EG3 的最大累积产甲烷量理论值分别为 408.7 mL·g⁻¹VS、395.9 mL·g⁻¹VS、420.9 mL·g⁻¹VS、450.2 mL·g⁻¹VS,该趋势与最大累积产甲烷量实际值一致,说明拟合效果较好。实验组 EG3 的理论最大累积产甲烷量相对于其它组具有显著差异(*p* < 0.05),EG3 组的理论最大累积产甲烷量比对照组 CG、EG1 组、EG2 组分别高出约 10.15%、13.71%、6.96%。从理论最大累积产甲烷量分析,EG3 组的实际最大累积产甲烷量比对照组 CG、EG1 组、EG2 组分别高出约 10.40%、14.28%、7.27%。以上分析说明,当超声预处理时间 2 h 时,预处理对湿垃圾产最大累积甲烷量的提升具有最佳效果。

表 2 不同超声预处理实验组 Modified Gompertz 模型参数统计

组别	P_{max} 理论值 (mL·g ⁻¹ VS)	P_{max} 实际值 (mL·g ⁻¹ VS)	$\frac{R_{max}}{VS \cdot d^{-1}}$ (mL·g ⁻¹ VS·d ⁻¹)	λ/d	R ²
CG	408.7	415.4	291.1	0.26	0.9981
EG1	395.9	401.3	292.7	0.28	0.9986
EG2	420.9	427.5	301.8	0.27	0.9982
EG3	450.2	458.6	305.3	0.27	0.9979

对反应后的发酵液 VFA 指标进行分析, 对照组 CG 及实验组 EG1、EG2、EG3 的 VFA 水平分别为 $1950 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1940 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1770 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1110 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随着超声预处理时间的加长, 出水的 VFA 数值逐渐降低, 超声预处理 2 h 的发酵液 VFA 指标相对于对照组低 47.08%, 湿垃圾浆料获得了较好的降解效果。

2.2 不同超声频率对湿垃圾浆料产甲烷潜力的影响

由表 3 分析可知, 不同超声预处理实验组与对照组 CG 相比, 各项指标均无显著差异。但值得注意的是, 不论是 TCOD 还是 TS, 经不同频率超声预处理后都有所增加。分析主要原因是对照组的餐厨原液不是很均质, 而超声预处理之后, 较多的大颗粒有机悬浮颗粒在超声波的空化等作用下被瓦解成更细小有机悬浮颗粒, 被检测而成为 TCOD 或 TS 的一部分。各超声实验组 SCOD 并没有显著增加, 相较于对照组还有下降的趋势, 考虑主要是超声后原来不易被离心沉降的轻质悬浮物被破坏, 转移至离心固相中, 导致 SCOD 的降低, 超声过程并没有发现使 SCOD 增溶的效果。

表 3 不同超声频率预处理实验组及对照组湿垃圾浆料理化性质

实验组	TCOD	SCOD ^b	TS/%	VS/%	pH 值
	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			
对照组 CG	155800	113400	10.5	85.3	4.02
实验组 EG20	171600	96600	11.0	83.8	3.99
实验组 EG40	161000	93800	11.1	83.4	4.04
显著性检验 p 值 ^a	0.500	0.099	0.058	0.075	0.874
显著性差异分析	无	无	无	无	无

注: a: 采用单样本 T 检验, 实验组数值与对照组进行显著性差异分析, 若 $p < 0.05$ 则有显著性差异。b: SCOD 是指采用 3000 rpm 离心 3 min 获得的上清液的 COD。

由图 2 及表 4 拟合结果分析, 对照组 CG 与实验组 EG20、EG40 拟合曲线的 R^2 值分别为 0.9980、0.9973、0.9971, 均大于 0.997, 拟合效果较好。

对照组 CG 获得的最大比产甲烷速率为 $265.0 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}\cdot\text{d}^{-1}$; 20 kHz 超声预处理实验组 EG20 获得的最大比产甲烷速率为 $270.5 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}\cdot\text{d}^{-1}$; 40 kHz 超声预处理实验组 EG40 获得的最大的最大比产甲烷速率为 $246.5 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}\cdot\text{d}^{-1}$ 。20 kHz 超声组相对于对照组获得了最大比产甲烷速率的提升, 但 40 kHz 频率组最大产甲烷速率却低于对照组, 通过显著性分析发现, 实验组的最大比产甲烷速率与对照组相比没有显著差异 ($p > 0.05$), 分析主要原因为近期环境气温升高 (30°C 左右), 餐厨水解酸化作用增强, 相对较易降解物质增多, 所以最大比产甲烷速率没有显著差异。

从最大累积产甲烷量分析可知, 对照组 CG 及实验组 EG20、EG40 的理论最大累积产甲烷量分别为 $438.2 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$ 、 $461.7 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$ 、 $474.3 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$, 该理论最大累积产甲烷量与实际值的趋势一致, 说明拟合效果较好。实验组 EG20、EG40 理论最大累积产甲烷量相对于 CG 组无显著差异 ($p > 0.05$), 但从实际最大累积产甲烷量分析, EG20、EG30 组的实际最大累积产甲烷量比对照组 CG 分别高出约 5.95% 及 8.50%。以实际最大累积产甲烷量作为评估标准, 不同超声预处理频率均有沼气增产的效果, 且超声频率选择 40 kHz 时的沼气增产效果较好。

2.3 40 kHz 超声频率对湿垃圾浆料产甲烷潜力的影响

由图 3 及表 5 分析, 不论是对照组还是超声实验组, 拟合曲线的 R^2 值都超过 0.999, 拟合效果较理想。

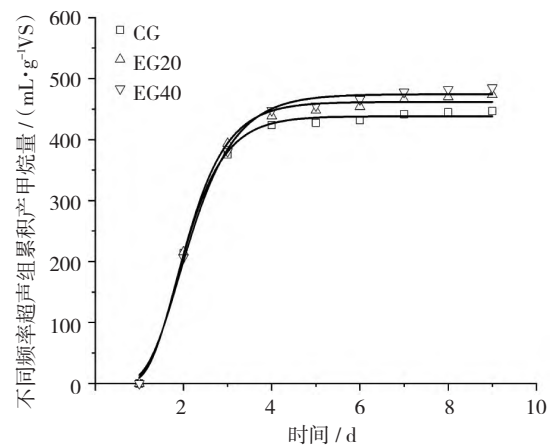


图 2 不同超声频率预处理实验组累积产甲烷量 Modified Gompertz 模型拟合图

表 4 不同超声预处理实验组 Modified Gompertz 模型参数统计

组别	P_{\max} 理论值	P_{\max} 实际值	$\frac{R_{\max}}{\lambda/d}$	λ/d	R^2
	($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$)	($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$)	($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}\cdot\text{d}^{-1}$)		
CG	438.2	447.0	265.0	1.21	0.9980
EG20	461.7	473.6	270.5	1.22	0.9973
EG40	474.3	485.0	246.1	1.19	0.9971

从实验结果分析, CG1、EG401 组获得的最大比产甲烷速率分别为 $285.4 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $318.1 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}\cdot\text{d}^{-1}$, EG401 的最大比产甲烷速率相对于对照组 CG1 高出 11.46%。从最大累积产甲烷量分析可知, 对照组 CG1 及实验组 EG401 的理论最大累积产甲烷量分别为 $343.2 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$ 、 $386.5 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$ 。

VS,该结果与实际值趋势一致,说明拟合效果较好。EG401 组的实际最大累积产甲烷量比对照组高出 12.83%。在选择较长的超声时间及较大的超声频率下,不论是最大比产甲烷速率还是最大累积产甲烷量,EG401 组均高于对照组,证明选择 40 kHz 频率下超声预处理 2 h 是小试情况下较好的超声条件选择。

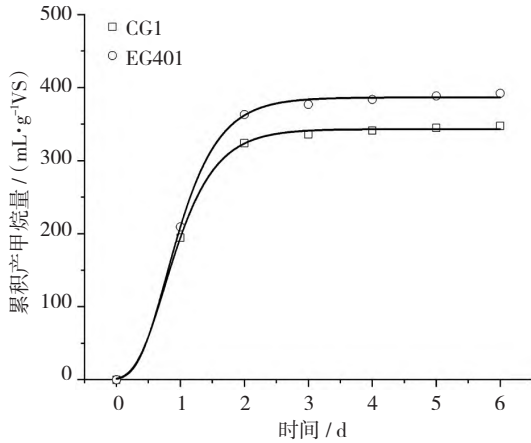


图3 40 kHz 超声频率预处理实验组累积产甲烷量 Modified Gompertz 模型拟合图

表5 不同超声预处理实验组 Modified Gompertz 模型参数统计

组别	P_{max} 理论值 ($mL \cdot g^{-1} VS$)	P_{max} 实际值 ($mL \cdot g^{-1} VS$)	R_{max} ($mL \cdot g^{-1} VS \cdot d^{-1}$)	λ/d	R^2
CG	343.2	347.6	285.4	0.31	0.9995
EG401	386.5	392.2	318.1	0.33	0.9993

3 结论

通过超声预处理设备对湿垃圾浆料预处理后的产甲烷潜力的影响进行研究,研究结果表明:

(1)不同超声预处理时间对湿垃圾浆料提升产甲烷潜力的影响不同,超声预处理时间为 2 h 时,获得的湿垃圾厌氧消化产甲烷加速的效果最好。实验组实际最大累积产甲烷量比对照组高出约 10.40%。

(2)不同超声频率对提升湿垃圾浆料产甲烷潜力的效果不同,频率较高的 40 kHz 实验组获得的湿垃圾浆料的沼气增产效果较好。

(3)当选择 40 kHz 超声频率预处理 2 h 时,获得的湿垃圾浆料的最大累积产甲烷量比对照组高出 12.83%,最大比产甲烷速率相对于对照组高出 11.46%。

参考文献:

[1] 王炯科,汤晓玉,王文国. 餐厨垃圾干式厌氧发酵研究进展[J]. 中国沼气,2021,39(3):35-41.
[2] 田启欢,姚建刚,谭婧,等. 甘蔗物料与餐厨垃圾协同

厌氧发酵及工程参数分析[J]. 中国沼气,2022,40(2):27-31.
[3] Kavitha S, Banu J R, Priya A A, Uan D K, et al. Liquefaction of food waste and its impacts on anaerobic biodegradability, energy ratio and economic feasibility[J]. Appl Energy, 2017, 208: 228-238.
[4] Shanthi M, Banu J R, Sivashanmugam P. Effect of surfactant assisted sonic pretreatment on liquefaction of fruits and vegetable residue: characterization, acidogenesis, biogas yield and energy ratio[J]. Bioresour Technol, 2018, 264: 35-41.
[5] Yeshanew M M, Frunzo L, Lens P N L, et al. Mass loss controlled thermal pretreatment system to assess the effects of pretreatment temperature on organic matter solubilization and methane yield from food waste[J]. Front Environ Sci, 2016, 4: 62.
[6] Kaushik R, Parshetti G K. Enzyme-assisted hydrothermal treatment of food waste for co-production of hydrochar and bio-oil[J]. Bioresource Tech, 2014, 22: 1-7.
[7] Gadhe A, Sonawane S S, Varma M N. Ultrasonic pretreatment for an enhancement of biohydrogen production from complex food waste[J]. Int J Hydrogen Energy, 2014, 39: 7721-7729.
[8] Shanthi M, Banu J R, Sivashanmugam P. Synergistic effect of combined pretreatment in solubilizing fruits and vegetable residue for biogas production: hydrolysis, energy assessment[J]. Fuel, 2019, 250: 194-202.
[9] Elbeshbishy E, Hafez H, Nakhla G. Viability of ultrasonication of food waste for hydrogen production[J]. Int J Hydrogen Energy, 2012, 37: 2960-2964.
[10] Elbeshbishy E, Hafez H, Dhar B, et al. Single and combined effect of various pretreatment methods for biohydrogen production from food waste[J]. Int J Hydrogen Energy, 2011, 36: 11379-11387.
[11] Shanthi M, Banu J R, Sivashanmugam P. Synergistic effect of combined pretreatment in solubilizing fruits and vegetable residue for biogas production: hydrolysis, energy assessment[J]. Fuel, 2019, 250: 194-202.
[12] 哈希公司. 水质分析实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
[13] 吴健, 华银锋, 沈国清, 等. 餐厨垃圾半干法厌氧发酵工程运行分析与污泥回流调控研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(6): 684-690.
[14] Sevillano C B A, Gómez X, Martínez J, et al. Effect of char addition on anaerobic digestion of animal by-products: Evaluating biogas production and process performance[J]. Environmental Science and Pollution, 2020, 27(19): 1-13.
[15] 徐家英. 氨氮对厌氧发酵脂肪酸浓度的影响研究[J]. 中国沼气, 2021, 39(5): 12-16.