



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202110024 中图分类号 X705 文献标识码 A

秦文磊, 刘吉宝, 祝金星, 等. 餐厨垃圾干式厌氧消化过程流变特性变化及其对反应器流场的影响[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 584-593. [QIN Wenlei, LIU Jibao, ZHU Jinxing, et al. Alteration of rheological properties of food waste during dry anaerobic digestion and influence on reactor fluid field[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 584-593.]

餐厨垃圾干式厌氧消化过程流变特性变化及其对反应器流场的影响

秦文磊^{1,2,3}, 刘吉宝^{1,3}, 祝金星⁴, 宋云鹏^{1,2,3}, 陈梅雪^{1,3}, 于川洋⁵, 魏源送^{1,2,3}

1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 水污染控制实验室, 北京 100085; 4. 北京环境工程技术有限公司, 北京 101318; 5. 大连市生态环境事务服务中心, 大连 116014

摘要 餐厨垃圾的有机组成是影响其干式厌氧消化性能的重要因素。以实际餐厨垃圾为研究对象, 通过向其中投加馒头改变其有机组成, 进而研究不同有机组成下物料厌氧消化过程中的流变特性变化及产甲烷特性。结果表明, 不同有机组成物料的甲烷产气量与其粘度具有一定的负相关关系, 表明物料流动性的提高有助于其产甲烷效率的提高。而物流变特性的差异则主要可归因于 TS、VS 以及溶解性有机物释放的差异。物料的屈服应力与其 TS、VS 具有一定的线性相关关系。CFD 模拟结果表明, 随着厌氧消化的进行, 反应器内流场逐渐变好, 死区率降低, 且死区率与物料 TS 质量分数、屈服应力及表观粘度呈正相关关系。因此, 针对不同有机组成物料流变特性及反应器流场的不同需选取合适的搅拌策略, 以实现搅拌效率与搅拌能耗之间的平衡。本研究结果可为优化干式厌氧消化反应器的运行提供参考。

关键词 餐厨垃圾; 干式厌氧消化; 有机组成; 流变特性; 流场模拟

餐厨垃圾有机组分质量分数较高, 利用其进行厌氧消化可以产生甲烷气体, 产生的沼渣沼液经处理后也可用作有机肥料^[1]。相比于湿式厌氧消化, 干式厌氧消化处理的有机固废的固体 (Total solid, TS) 质量分数较高, 一般可达 15%~40%, 其具有沼液产量少, 单位容积产气率高、预处理成本低等优点^[2]。物流变特性对厌氧消化的运行及性能有重要影响, 同时, 流变特性对水力过程如混合、泵送、脱水及干燥等过程均有较大影响^[3-4]。如粘度高、流动性差的物料在厌氧消化过程中容易在反应器中形成滞留区, 不利于有机质与微生物的相互作用, 并会影响厌氧消化过程中的传质传热过程, 进而影响有机质向甲烷的转化效率。因此, 物流变特性及其演变规律不光是厌氧消化过程中重要的设计参数, 也是反应器优化运行的重要控制因子^[5-6]。MIRYAHYAEI 等^[7]研究了污泥厌氧消化过程中流变特性与甲烷产气量及污泥脱水性能的对应关系。结果表明, 污泥粘度越低, 其消化过程中的产气量及挥发性固体 (Volatile solids, VS) 去除率越高。LIU 等^[8]研究了微波辅助 H₂O₂ 预处理对污泥厌氧消化流变特性的影响。结果表明, 该预处理技术可降低污泥的粘度, 提高其流动性, 并且也可降低其触变性, 进而有助于提高 VS 去除率和甲烷产气量。以上等研究结

收稿日期: 2021-10-08; 录用日期: 2021-12-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD1100603)

第一作者: 秦文磊 (1996—), 男, 硕士研究生, qw1217@outlook.com; 通信作者: 刘吉宝 (1988—), 男, 博士, 助理研究员, jbliu@rcees.ac.cn

果均表明, 有机固体废弃物厌氧消化后, 消化系统混合液的流变特性会发生变化, 流动性相对于未消化之前会有所提高, 但是对于混合液在厌氧消化过程中的流变特性变化则缺乏关注。此外, 部分类型干式厌氧反应器(如 Kompogas)采用了卧式推流、间歇进料的方式, 随着污泥厌氧消化的进行, 流变特性发生转变, 直接关系到反应器不同运行时间、不同搅拌区域的混合特性。因此, 明确不同组分物料在厌氧消化过程中的流变特性演变规律及其成因对提高厌氧消化效率、优化反应器运行至关重要。

厌氧消化反应器内混合效果主要受到局部流场的影响, 通过计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)模拟反应器内流场分布对混合过程的设计和优化十分必要^[9-10]。曹秀芹等^[11]借助实验和 CFD 模拟方法对污泥厌氧消化的混合效果及能耗进行实验和模拟, 研究得出, 针对含水率 95% 的污泥的最佳搅拌转速为 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。WU 的研究^[12-13]综合考虑了反应器形状, 搅拌桨类型和安装位置等因素对混合效果的影响, 这为反应器设计与运行的优化提供了参考。但目前厌氧消化反应器中的流场模拟主要集中于湿式厌氧消化过程, 缺乏针对干式厌氧过程流场模拟及不同组分物料在厌氧消化过程中的流场演变规律探究。

本研究采用实际餐厨垃圾物料, 通过改变其多糖, 蛋白质及脂质的质量分数, 研究不同有机组成物料厌氧消化过程中的流变特性变化及产甲烷特性, 进而明确不同有机组成物料的产气特性差异, 及各有机组成物料的表观粘度变化趋势, 以探讨不同组成物料的产气量与其粘度的关联性。同时, 以 CFD 模拟探究卧式反应器流场随物料流变特征变化的演变过程, 以期优化不同组分物料在厌氧消化过程中的搅拌策略, 为优化干式厌氧消化反应器的运行提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验原料

接种污泥取自北京某污水处理厂中温厌氧消化罐 ($37\sim 42 \text{ }^\circ\text{C}$, 停留时间为 18 d) 的消化污泥, 经过 $3500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min 后, 弃去上层污泥, 取底部高含固污泥并常温密封保存。餐厨垃圾取自食堂, 人工分拣出样品中的塑料、纸屑、骨头、木头等杂质, 用粉碎机将垃圾多次粉碎成匀浆, $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存备用。以馒头改变物料的多糖, 蛋白质及脂质的质量分数。各物料的基本特征如表 1 所示。

1.2 实验装置及方法

厌氧消化实验采取产甲烷潜势测试(BMP)装置瑞典 Bioprocess Control 公司制造的全自动甲烷测试系统 AMPTS II。反应器为 600 mL 玻璃瓶, 有效容积为 400 mL。向反应瓶依次加入接种污泥及反应底物后, 立即拧紧橡胶塞, 并向反应瓶内充 5 分钟 N_2 以排空瓶内的氧气, 保证厌氧环境。密封后的玻璃瓶放入恒温水浴锅 ($(37\pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$) 中温厌氧消化。产生的沼气经过 $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液去除 CO_2 等酸性气体, 剩余气体经过检测器自动计量并计为甲烷体积。

接种污泥与反应底物的接种比(基于 VS)为 2。实验前所有物料均稀释到与接种污泥相同的 TS 质量分数, 以排除 TS 质量分数对物料流变特性的影响。以往研究表明餐厨垃圾中碳水化合物(多糖)的质量分数基本为 30%~70%(基于干重), 而蛋白质的质量分数为 10%~30%, 脂质质量分数为 10%~30%^[14-15]。以此数值为参考标准并以多糖质量分数作为调控对象, 通过向实际餐厨垃圾中投加馒头将其多糖质量分数(基于干重)分别调至 50%(Car50%), 60%(Car60%) 和 70%(Car70%), 对照组(Control)不投加馒头, 多糖质量分数为 37.7%。每种组分比例物料均设置 3 组平行实验。

表 1 底物及接种污泥质量分数
Table 1 Mass fraction of substrates and inoculum sludge %

供试原料	TS	VS	蛋白质	多糖	脂质
餐厨垃圾	25.3	23.6	28.1	37.7	25.4
馒头	61.1	60.6	12.4	77.6	3.1
接种污泥	15.3	5.4	8.1	4.2	5.4

注: 蛋白质、多糖和脂质的质量分数基于 TS。

1.3 分析方法

污泥及各原料的的 TS、VS 质量分数采用重量法^[16]测定。厌氧过程中的污泥样品经 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min 后取上清液过膜 ($0.45\ \mu\text{m}$; Savillex) 后, 用于测定溶解性指标。溶解性多糖和溶解性蛋白质的测定分别采用 Dubious 分光光度法^[17] 和修正的 Lowry 法^[18]。固体样品中的多糖、蛋白质及脂质质量分数测定参考文献^[19]。厌氧消化过程中的污泥样品粘度采用 ConTec-Viscometer5 型流变仪 (Spindle L3C 型转子, Fungilab, 西班牙) 测定, 每个样品先在 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下预剪切 30 s, 之后再在 2 min 内剪切速率从 $0\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 测定样品粘度变化。样品的剪切应力与剪切速率采用 Herschel-Bulkley 方程拟合 (公式 1)^[20]。

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; τ_0 为屈服应力, Pa; K 为稠度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流动指数, 无量纲。

1.4 CFD 模拟方法

为了定量化分析厌氧消化过程物料的流变特征差异及其演变过程对反应器内流场的影响, 针对某实际干式厌氧消化中试反应器, 开展了相应的流场模拟研究。以某食堂的餐厨垃圾为厌氧消化物料, 通过投加外源馒头改变物料的多糖, 蛋白质及脂质质量分数, 进而研究不同组成物料厌氧消化过程中的流变特性变化, 并以此为数据基础探究不同组分物料在该实际中试厌氧消化反应器中的流场变化。该卧式搅拌干式厌氧发酵反应器长度 6 m、高度 2.8 m、回转直径 2.2 m, 容积约为 20 m^3 。搅拌桨轴心与回转圆心重合, 搅拌桨采用交错方式分布于搅拌轴上, 每 450 mm 距离分布一个桨叶, 相邻桨叶间夹角 90° , 每 4 个桨叶为一组, 共有三组 12 个桨叶。桨叶为改良的 T 型搅拌桨, 桨叶末端为勺型。进料端第一组桨叶间隔设置 4 个扰流杆, 杆与桨夹角 45° 。

反应器几何结构及网格划分如图 1 所示。CFD 模拟平台为 ANSYS Fluent 2020 R2 软件, 具体计算方法如下: 1) 模型: 模拟采用单相流模型, 湍流模型为 SST $k-\omega$ 模型; 2) 材料: 反应器中的流体材料为厌氧消化过程中的实际物料, 其非牛顿流体粘度通过 UDF 文件赋予, 密度近似于水的密度; 3) 域条件: 分为流体域和旋转域, 稳态计算时, 旋转域的旋转采用旋转坐标系方式; 瞬态计算时, 旋转域采用滑动网格方式进行旋转; 4) 边界条件: 旋转域和流体域的交接面采用 interface 方式进行耦合, 其余各壁面包括搅拌轴, 进出口, 顶盖, 底面均设置为静态壁面, 暂不考虑进出物料, 只考察物料混合过程中的流场分布; 5) 计算方式: 采用稳态求解, 搅拌桨转速设置为 $5\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 迭代步长为 1 000 步。

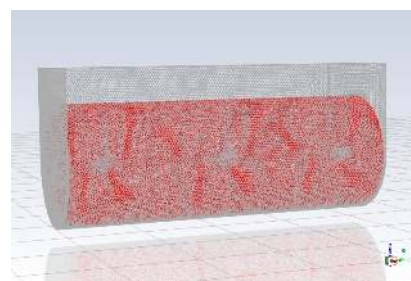


图 1 干式厌氧中试反应器几何结构及网格划分
Fig. 1 Geometry and mesh of the pilot-scale dry anaerobic digester

2 结果与讨论

2.1 不同有机组成物料厌氧消化过程中的流变及产甲烷特性

不同有机组成物料厌氧消化过程中的粘度变化趋势如图 2 所示。由图可知, 随着剪切速率的升高, 各物料的表现粘度不断降低, 表明物料为假塑型非牛顿流体^[8]。由图 2(a)~图 2(d) 可知, 随着厌氧消化的进行, 不同有机组分物料的粘度总体均呈现不断下降趋势, 表明随着厌氧消化的进行, 物料非牛顿特性减弱, 流动性变强^[21]。值得注意的是, car50% 和 car70% 的实验组前期粘度下降较快, 在第 10 天之后粘度基本达到最小值, 后期随着厌氧消化的进行粘度变化趋势不再明显。

而对照组和 car60% 的实验组粘度下降趋势则较慢，在第 5 天之后粘度才有明显下降，且这种下降趋势一直维持到第 35 天。这与不同组成物料的产气速率情况基本一致 (表 2)，即 car50% 和 car70% 实验组产气高峰相对靠前，而对照组和 car60% 实验组产气高峰比较靠后。此结果表明物料的流变特性与其厌氧消化产甲烷特性有直接关系，物料粘度下降有利于产甲烷速率的提高。

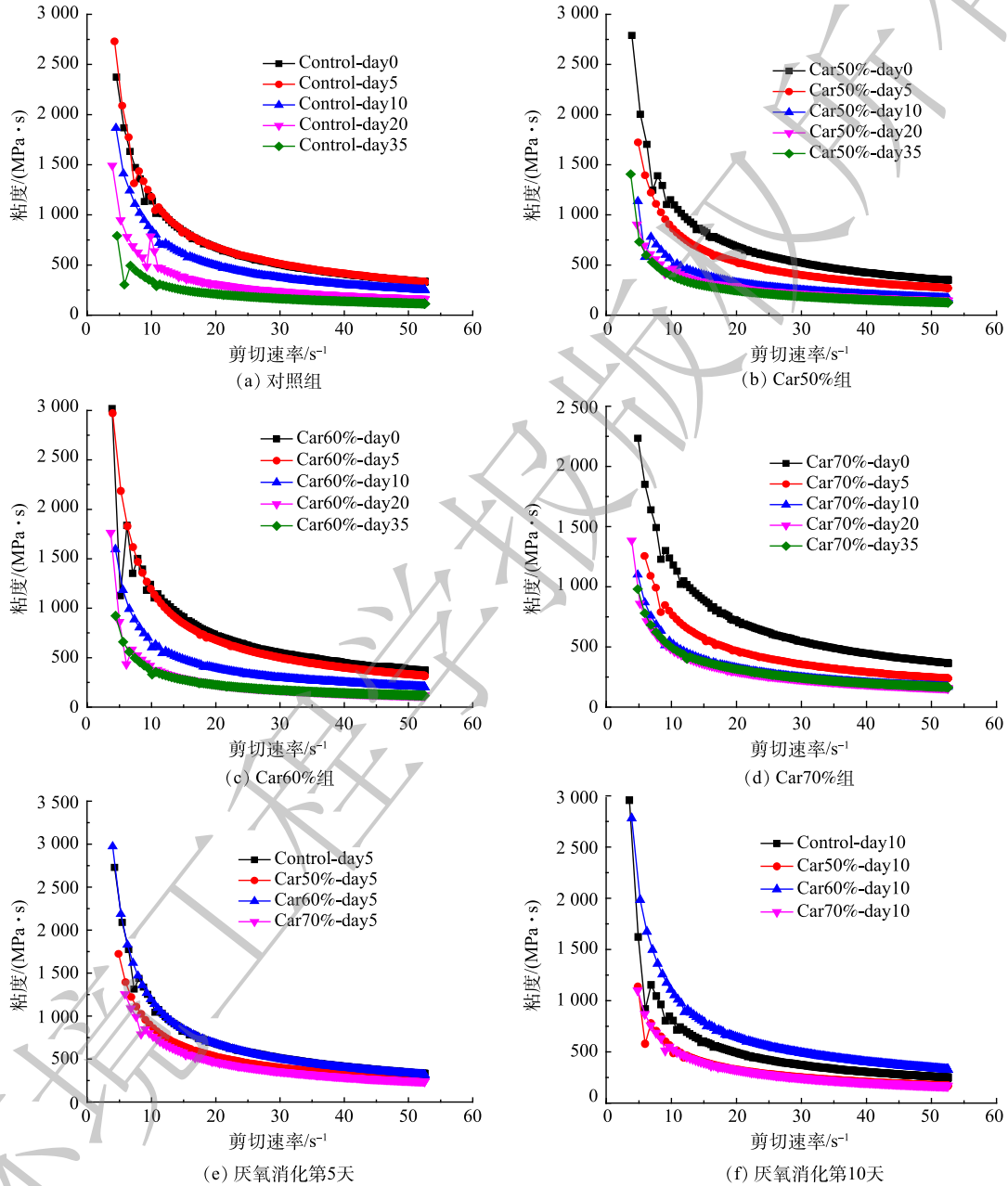


图 2 不同有机组成物料厌氧消化过程中的粘度变化

Fig. 2 Change of viscosity of substrates with different organic compositions during anaerobic digestion

图 2(e)~图 2(f) 进一步对比了厌氧消化过程中物料不同组分比例下的粘度差异，结果表明，car50% 和 car70% 实验组的表观粘度低于对照组和 car60% 实验组，这与各组物料的累积产甲烷量相对应 (表 2)。但随着厌氧消化的进行，有机物不断释放，到第 35 天各组物料的表现粘度差异不再明显。MIRYAHYAEI 等^[7] 的研究结果也表明污泥粘度越低，其消化过程中的产气量及 VS 去除率越高，

这主要由于流动性的提高可促进微生物与有机质的传质过程, 进而提高产气量; 而基质流动性较差时则可能在反应器内形成停滞区, 造成污泥聚集, 不利于微生物对有机质的利用。

各组物料厌氧消化过程中的屈服应力 τ_0 , 稠度系数 K 及流动指数 n 的变化如表 3 所示。由表 3 可知, 随着厌氧消化的进行不同组分物料的屈服应力 τ_0 和稠度系数 K 均总体呈现不断下降趋势, 表明随着反应的进行物料的假塑性减弱, 流动性变好, 但流动指数 n 的变化波动较大, 不具有明显升高趋势。同时, 对照组及 Car60% 物料的屈服应力 τ_0 普遍较另外两组更大, 这与其表观粘度结果一致, 但各组物料消化过程中的稠度系数 K 及流动指数 n 差异并不明显。

2.2 厌氧消化过程物料流变特征与有机物转化的关系

物料不同有机组分比例下厌氧消化过程中的 TS、VS 质量分数变化及所释放的溶解性蛋白质、多糖浓度变化如图 3 所示。由图 3(a) 及图 3(b) 可知, 各组物料初始 TS、VS 质量分数基本一致, 但对照组和 car60% 实验组的 TS、VS 质量分数下降较慢, 至第 35 天 TS 分别下降了 14.2% 和 11.7%, VS 分别下降了 32.1% 和 29.1%, 而 car50% 和 car70% 实验组的 TS、VS 质量分数则下降得较快, 至第 35 天 TS 分别下降了 24.8% 和 25.7%, VS 分别下降了 36.9% 和 36.2%。这与各组实验的粘度差异及产甲烷特性结果一致, 表明 TS、VS 下降越快, 有机物降解、释放越快, 粘度降低越明显, 有利于产甲烷效率的提高。TS 质量分数是影响污泥流变特性的重要因素。LIU 等^[22]的研究结果表明 TS 质量分数的升高可降低颗粒之间的距离, 加强颗粒之间的相互作用; 同时 TS 质量分数越高, 流动特性指数 n 越低, 稠度系数 K 越高, 表明其假塑性越强, 颗粒之间的相互作用得到加强。WANG 等^[23]的研究也表明厌氧消化过程中的甲烷产量会随着物料 TS 质量分数的升高而降低。由图 3(c) 可知, 随着初始物料多糖质量分数的升高, 相应的蛋白质质量分数自然降低, 消化过程中溶解性蛋白质的释放量也随之降低。同时, 各组物料所释放的溶解性蛋白质均随着厌氧消化的进行而不断升高, 也表明污泥絮体不断溶解, 有利于其屈服应力和表观粘度的降低^[24]。但各组物料溶解性多糖的释放差异并不明显(图 3(d))。

将各组物料厌氧消化过程中的 TS、VS 质量分数及各流变参数的变化汇总如图 4 所示。由图可

表 2 不同有机组成物料产甲烷特性

Table 2 Methane production characteristics of substrates with different organic compositions

实验组	累积甲烷产量/ ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	最大产甲烷速率/ 的时间/d	最大产甲烷速率/ ($\text{mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$)
Control	391.1 ± 26.5	22	41.7 ± 5.6
Car50%	427.5 ± 37.4	15	34.3 ± 5.1
Car60%	373.8 ± 12.6	26	35.3 ± 3.6
Car70%	488.7 ± 28.7	15	40.4 ± 6.9

表 3 不同组分物料厌氧消化过程中的流变参数变化

Table 3 Change of rheological parameters during anaerobic digestion

实验组	τ_0/Pa	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n	R^2
Control-day0	5.019 4	2.582 1	0.400 0	0.993 6
Control-day5	4.292 1	3.387 3	0.345 0	0.978 3
Control-day10	5.288 7	0.950 6	0.533 3	0.992 7
Control-day20	2.439 8	0.901 5	0.485 0	0.994 5
Control-day35	1.016 6	0.810 4	0.462 5	0.981 5
Car50%-day0	4.741 6	2.474 5	0.432 2	0.991 0
Car50%-day5	4.297 8	1.603 7	0.460 0	0.996 2
Car50%-day10	1.488 1	1.628 6	0.382 2	0.984 5
Car50%-day20	0.779 0	1.553 5	0.377 7	0.989 2
Car50%-day35	0.593 7	1.522 9	0.348 6	0.995 2
Car60%-day0	6.647 1	1.913 0	0.479 2	0.990 2
Car60%-day5	2.369 0	5.234 7	0.257 1	0.991 8
Car60%-day10	2.916 1	1.255 7	0.460 9	0.990 3
Car60%-day20	2.329 2	0.957 6	0.486 8	0.991 0
Car60%-day35	1.497 0	0.906 1	0.442 7	0.993 1
Car70%-day0	2.994 3	3.954 5	0.356 8	0.994 6
Car70%-day5	1.362 6	2.914 2	0.340 4	0.994 1
Car70%-day10	2.525 8	0.987 4	0.468 7	0.992 6
Car70%-day20	1.149 2	1.472 4	0.397 5	0.993 8
Car70%-day35	1.212 8	1.557 6	0.396 0	0.994 7

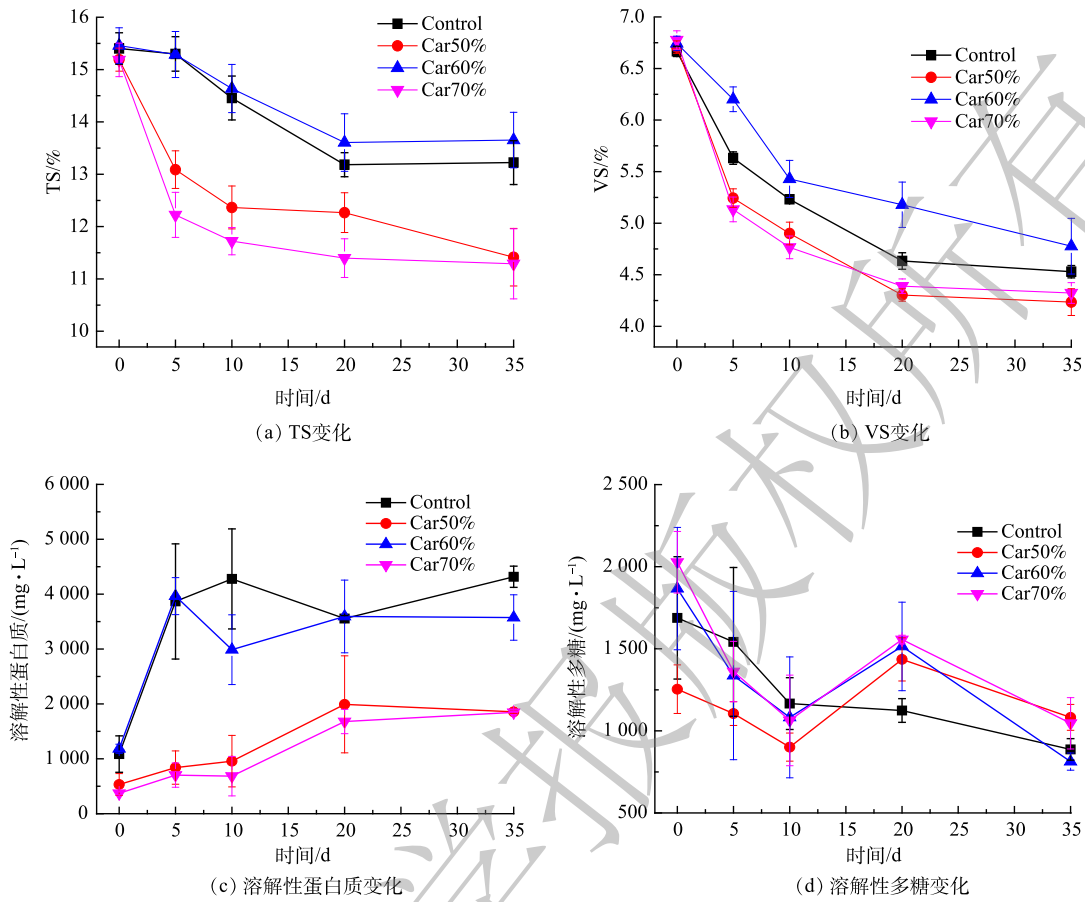


图 3 不同有机组分物料厌氧消化过程中的 TS、VS 及溶解性蛋白质、多糖变化

Fig. 3 Variation of TS, VS, soluble protein and soluble polysaccharide during anaerobic digestion

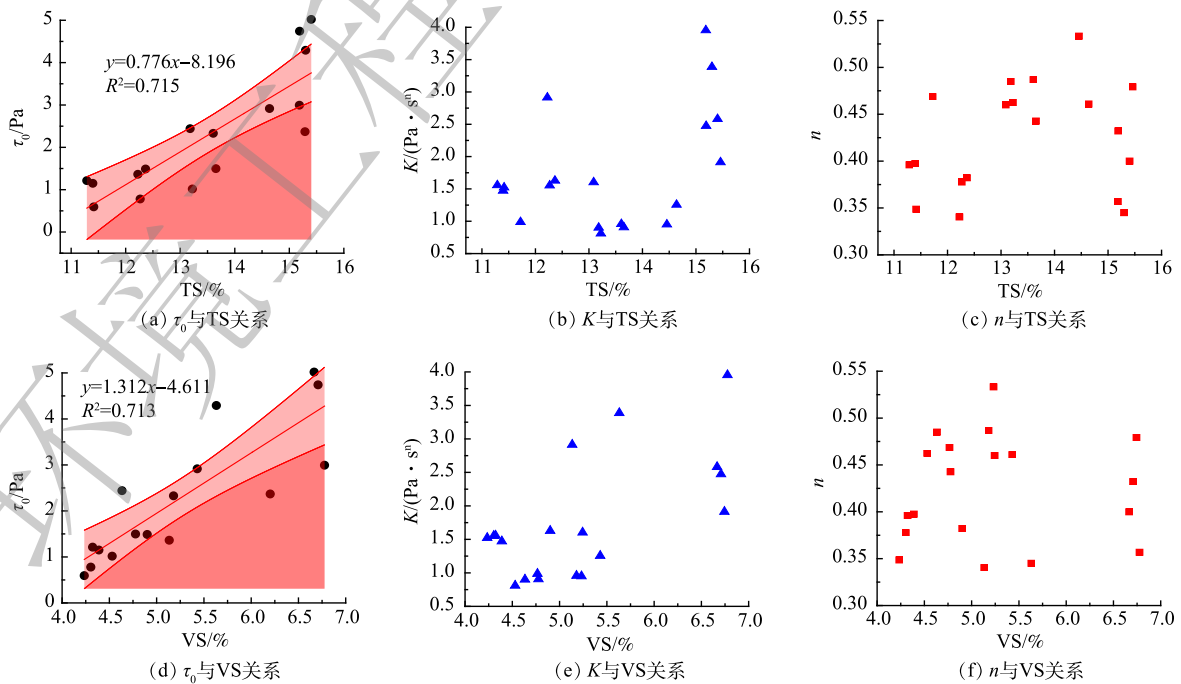


图 4 各流变参数与物料 TS、VS 的关系

Fig. 4 Relationships between rheological parameters and TS, VS of substrates

知, 物料 TS、VS 质量分数与其屈服应力 τ_0 具有一定的线性相关关系, 进一步证明 TS、VS 质量分数的降低有利于降低物料屈服应力, 提高其流动性。但物料 TS、VS 质量分数与其稠度系数 K 及流动指数 n 的相关关系并不明显。因此, TS、VS 质量分数可作为定量预测物料屈服应力的良好指标, 并可在一定程度上预测物料的流变特性。

2.3 反应器内流场随厌氧消化过程流变特征的演变

通过 CFD 流场模拟, 不同有机组成物料厌氧消化过程中的反应器流场速度梯度分布如图 5 所示, 死区 (速度梯度小于 $0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域) 率变化如图 6 所示。

由图 5 可知随着反应的进行各物料搅拌过程中的速度梯度均呈现不断升高的趋势, 表明随着反应的进行物料粘度降低, 反应器内流场逐渐变好。由图 6(a) 可知, 随着厌氧消化的进行, 反应器内死区率不断降低, 且 Car50% 和 Car70% 物料在消化过程中的死区率普遍较另外两组更低, 这与各组物料的表现粘度及产甲烷特性结果一致, 表明流动性的提高有利于物料在反应器内的有效混合, 进而提高物料的产甲烷效率。Car70% 物料由于其多糖质量分数最高, 前期水解速率较快, 在第 0~5 天死区率降低明显, 其他各组物料均在第 5~10 天死区率降低最为明显, 表明不同物料由于其组分及流变特性的不同, 死区率演变特点也各不相同。同时, 由图 6(b)~图 6(d) 可知, 各组物料搅拌过程中的死区率均与其 TS 质量分数、屈服应力 τ_0 及表观粘度 (剪切速率为 15 s^{-1}) 呈一定的正相关关系, 也表明随着反应的进行, 有机物不断释放, 物料 TS 不断降低, 屈服应力及表观粘度不断降低, 流动特性变好, 从而使反应器内混合效果变好, 死区率不断降低。因此, 结合反应器流场模拟结果, 可考虑在厌氧消化后期降低搅拌转速或减少搅拌时间, 从而在不降低搅拌效率的同时节省搅拌能耗。MAO 等^[25]研究了食物残渣和鸡粪共消化过程中搅拌模式和时长对甲烷产气量的影响。其 CFD 模拟结果表明高 TS 和高粘度会减弱叶轮的传送过程, 使得反应器内湍流度较低, 降低物料混合效果。同时, CFD 模拟结果表明当间歇搅拌时间能够使基质足够均匀时, 增加搅拌时间或改为连续搅拌无助于产气量的提高。因此, 基于厌氧消化反应器的流场模拟可为搅拌策略的优化提供重要理论基础, 从而减少实际工程的放大投资。

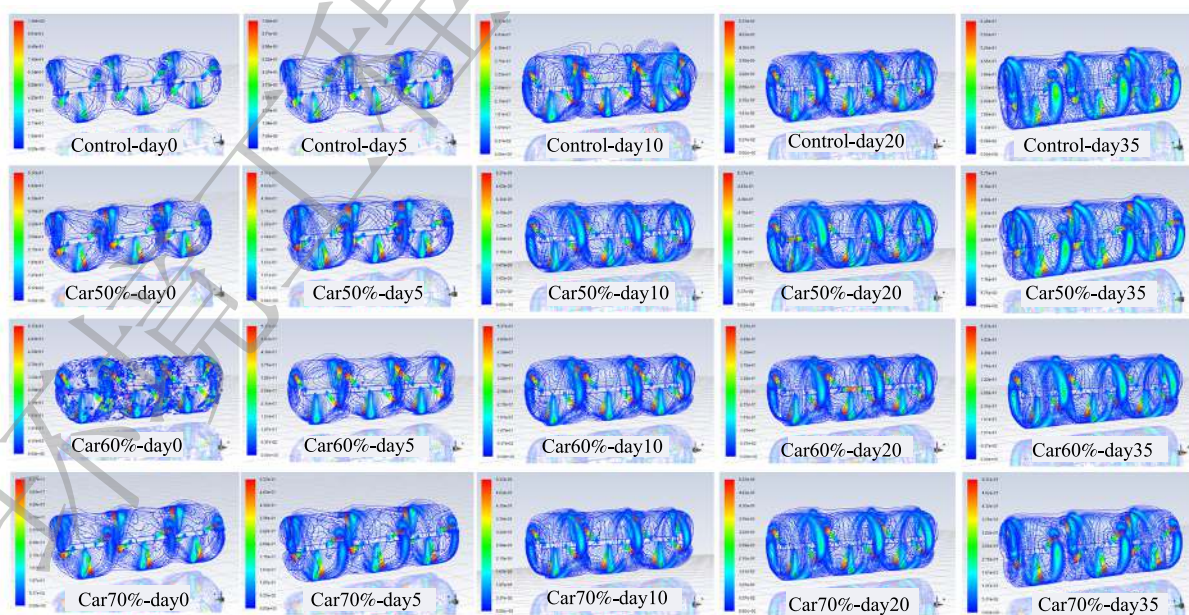


图 5 不同有机组成物料厌氧消化搅拌过程中的速度梯度分布

Fig. 5 Velocity magnitudes distribution of substrates with different organic compositions during mixing process

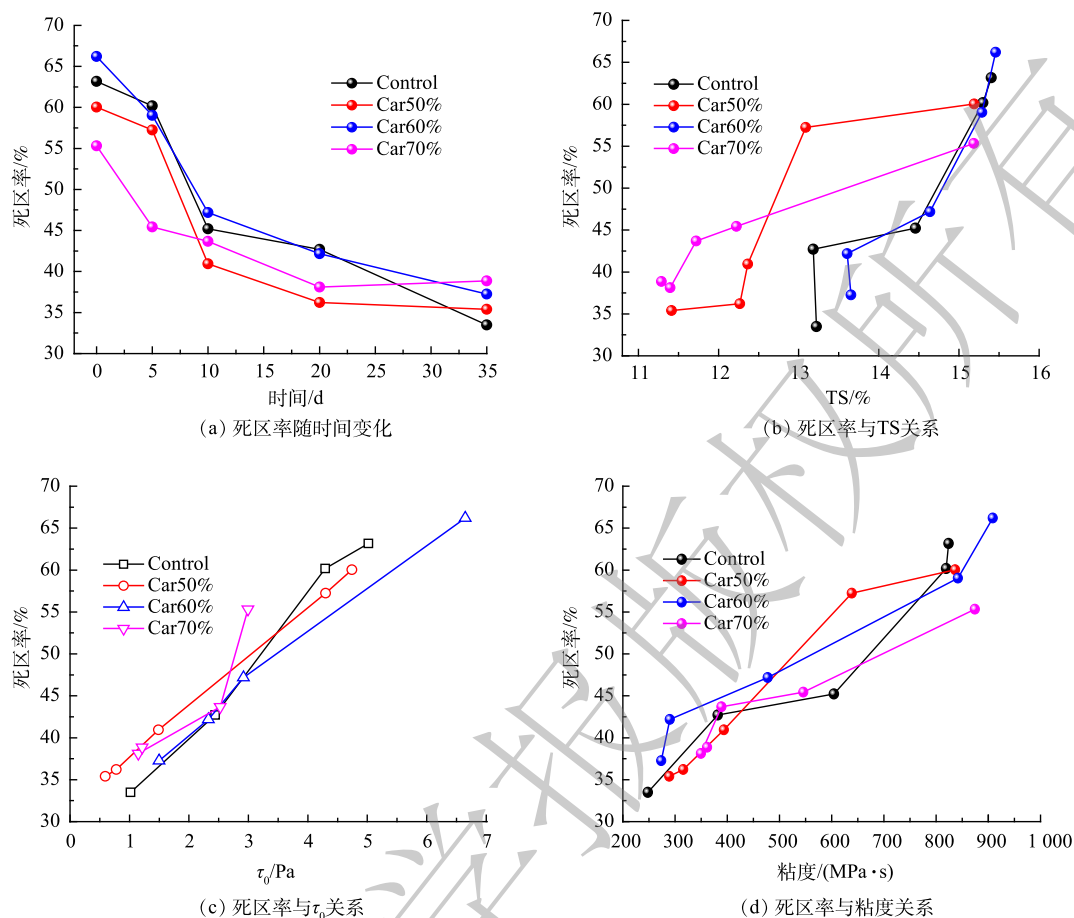


图 6 不同组分物料厌氧消化过程中的死区率变化及其与 TS、屈服应力及粘度的关系
Fig. 6 Variation of dead zone proportion during anaerobic digestion and its relationships with TS, yield stress and apparent viscosity of substrates

3 结论

1) 不同有机组成物料厌氧消化过程中的流变特性与其产甲烷效率具有重要关系，物料粘度越低，流动性越好，其甲烷产气量越高。

2) 物料流变特性的差异主要来源于 TS、VS 质量分数以及溶解性有机物释放的差异，物料 TS、VS 质量分数越高，其表观粘度越高，流动性越差，同时物料的屈服应力与其 TS、VS 质量分数具有一定的线性相关关系。

3) 随着厌氧消化的进行，物料粘度不断降低，反应器内流场逐渐变好，死区率降低，且死区率与物料 TS 质量分数、屈服应力及表观粘度具有正相关关系。

参考文献

- [1] 谭燕宏. 餐厨垃圾处理工艺及资源化技术进展[J]. 绿色科技, 2012, 3: 177-179.
- [2] GUENDOUZ J, BUFFIERE P, CACHO J, et al. Dry anaerobic digestion in batch mode: Design and operation of a laboratory-scale, completely mixed reactor[J]. Waste Management, 2010, 30(10): 1768-1771.
- [3] SEYSSIECQ I, FERRASSE J H, ROCHE N. State-of-the-art: Rheological characterisation of wastewater treatment sludge[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 16(1): 41-56.
- [4] XIA M F, WANG Z W, WU Z C, et al. Simulation and assessment of sludge concentration and rheology in the process of waste activated

- sludge treatment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(12): 1639-1645.
- [5] BREHMER M, EPPINGER T, KRAUME M. Influence of rheology on the flow pattern in stirred biogas plants[J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2012, 84(11): 2048-2056.
- [6] WANG Y L, DENTEL S K. The effect of high speed mixing and polymer dosing rates on the geometric and rheological characteristics of conditioned anaerobic digested sludge (ADS)[J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 6041-6052.
- [7] MIRYAHYAEI S, OLINGA K, MUTHALIB F A A, et al. Impact of rheological properties of substrate on anaerobic digestion and digestate dewaterability: New insights through rheological and physico-chemical interaction[J]. *Water Research*, 2019, 150: 56-67.
- [8] LIU J B, YU D W, ZHANG J Y, et al. Rheological properties of sewage sludge during enhanced anaerobic digestion with microwave-H₂O₂ pretreatment[J]. *Water Research*, 2016, 98: 98-108.
- [9] HUANG Q S, YANG C, YU G Z, et al. CFD simulation of hydrodynamics and mass transfer in an internal airlift loop reactor using a steady two-fluid model[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(20): 5527-5536.
- [10] YANG C, ZHANG J, KOCH D L, et al. Mass/heat transfer from a neutrally buoyant sphere in simple shear flow at finite Reynolds and Peclet numbers[J]. *AIChE Journal*, 2011, 57(6): 1419-1433.
- [11] 曹秀芹, 杜金海, 李彩斌. 污泥厌氧消化搅拌条件的优化分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(1): 100-105.
- [12] WU B X. CFD simulation of mixing in egg-shaped anaerobic digesters[J]. *Water Research*, 2010, 44(5): 1507-1519.
- [13] WU B X. CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters[J]. *Water Research*, 2011, 45(5): 2082-2094.
- [14] CAMPUZANO R, GONZALEZ-MARTINEZ S. Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review[J]. *Waste Management*, 2016, 54: 3-12.
- [15] NEGRI C, RICCI M, ZILIO M, et al. Anaerobic digestion of food waste for bio-energy production in China and Southeast Asia: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133: 110138.
- [16] 中华人民共和国建设部. 城市污水处理厂污泥检验方法: CJ/T 221-2005[S]. 2005.
- [17] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, 28(3): 350-356.
- [18] FROLUND B, GRIEBE T, NIELSEN P H. Enzymatic-activity in the activated-sludge floc matrix[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, 43(4): 755-761.
- [19] OHEMENG-NTIAMOAH J, DATTA T. Evaluating analytical methods for the characterization of lipids, proteins and carbohydrates in organic substrates for anaerobic co-digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 697-704.
- [20] MONTEIRO P S. The influence of the anaerobic digestion process on the sewage sludges rheological behaviour[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(11): 61-67.
- [21] MAHMOUD N, ZEEMAN G, GIJZEN H, et al. Interaction between digestion conditions and sludge physical characteristics and behaviour for anaerobically digested primary sludge[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, 28(2): 196-200.
- [22] LIU Y Q, CHEN J J, SONG J, et al. Adjusting the rheological properties of corn-straw slurry to reduce the agitation power consumption in anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272: 360-369.
- [23] WANG Y Y, ZHANG J X, LI Y Y, et al. Methane production from the co-digestion of pig manure and corn stover with the addition of cucumber residue: Role of the total solids content and feedstock-to-inoculum ratio[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306: 123172.
- [24] FARNO E, BAUDEZ J C, PARTHASARATHY R, et al. Impact of temperature and duration of thermal treatment on different concentrations of anaerobic digested sludge: Kinetic similarity of organic matter solubilisation and sludge rheology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273: 534-542.
- [25] MAO L W, ZHANG J X, DAI Y J, et al. Effects of mixing time on methane production from anaerobic co-digestion of food waste and chicken manure: Experimental studies and CFD analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122177.

(责任编辑: 金曙光)

Alteration of rheological properties of food waste during dry anaerobic digestion and influence on reactor fluid field

QIN Wenlei^{1,2,3}, LIU Jibao^{1,3,*}, ZHU Jinxing⁴, SONG Yunpeng^{1,2,3}, CHEN Meixue^{1,3}, YU Chuanyang⁵, WEI Yuansong^{1,2,3}

1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Beijing Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 101318, China; 5. Dalian Ecological and Environmental Affairs Service Center, Dalian 116014, China

*Corresponding author, E-mail: jbliu@rcees.ac.cn

Abstract The organic composition of food waste is a significant factor affecting its dry anaerobic digestion performance. This study selected real food waste as the research object, and changed its organic composition by adding steamed bread to investigate its rheological properties and methane production characteristics under different organic compositions during dry anaerobic digestion. The results indicated that the methane yields of different substrates had certain negative correlation with its viscosity, suggesting that the improvement of fluidity was beneficial to the increase of methane production efficiency. The difference in the rheological properties of food waste could mainly be attributed to the different contents of TS, VS and the release of dissolved organic matters. The yield stress of different substrates had a certain linear correlation with its TS and VS contents. The CFD simulation results demonstrated that the fluid field in the reactor became better and the dead zone proportion decreased with the progress of anaerobic digestion. Moreover, the dead zone proportion was positively correlated with the TS content, yield stress and apparent viscosity of substrates. Therefore, based on the rheological characteristics of substrates with different organic compositions and the corresponding fluid field in the reactor, it was necessary to select a suitable stirring strategy to achieve a balance between stirring efficiency and energy consumption. The results of this study can provide a reference for the optimization of the operation of dry anaerobic digestion reactor.

Keywords food waste; dry anaerobic digestion; organic composition; rheological properties; fluid field simulation