乙酸在电催化厌氧消化中的降解动力学研究

刘志男，蒋东云，周 亶，康厚智，曾佳楷，陈荣斌
（桂林电子科技大学 生命与环境科学学院，广西 桂林 541000）

摘 要：在电催化作用下，厌氧消化可以提高沼气中的甲烷含量。文章以乙酸为底物，研究了电催化厌氧消化体系的产沼气动力学和底物降解动力学。实验发现，投加不同质量浓度（8.3，10.0，11.7 g/L）的乙酸后，沼气中的甲烷含量随着乙酸质量浓度的增加而上升，当乙酸质量浓度为 11.7 g/L 时，批次实验的平均甲烷含量达到 80.6%。基于电催化厌氧消化过程的碳平衡关系，利用一级动力学模型和 Gompertz 模型进行了动力学研究。研究表明：3 种质量浓度下的乙酸转化效率分别为 85.6%，97.2%和 97.4%，其中生物质增量占比分别为 22.1%，29.9%和 28.5%；两种模型对产沼气过程拟合的相关性系数 R^2 均大于 0.99，对乙酸降解过程拟合的相关性系数 R^2 均大于 0.90，其中一级动力学模型对乙酸降解过程的拟合效果更优。

关键词：电催化厌氧消化；乙酸降解动力学；碳平衡；一级动力学；Gompertz

中图分类号：TK6；S216.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)11-1435-08

0 引言

随着工业革命和人类文明的发展，化石燃料燃烧等人为排放温室气体的行为使得全球变暖的速度越来越快[1,2]。减少对化石燃料的依赖，增加对生物质能的利用是未来能源的发展方向[3]。厌氧消化（Anaerobic Digestion，AD）是利用废弃有机物产生清洁能源的技术[4]，可以减少环境污染[5]。废弃有机物若处理得当，将会是潜在的可再生能源，比如动物粪便，是厌氧消化所需的良好原材料。在厌氧消化产生的沼气中，甲烷含量为 55%~65%，CO_2 含量为 30%~45%[6]，其中较高含量的 CO_2 限制了沼气的利用，因此，有人提出了用微生物电解池辅助厌氧消化，即电催化厌氧消化（Electrocatalytic-Anaerobic Digestion，EAD）。这是一种通过增强电子转移，提高 H^+ 还原 CO_2 的能力，将沼气中的 CO_2 转化为甲烷，从而提高沼气中甲烷含量的方法[7,8]。有研究表明，EAD 的能量回收效率远高于传统厌氧消化，相比于提纯沼气，电解池需要输入的电能可忽略不计[9]。

厌氧消化是由多个阶段组成的复杂过程，其中，沼气产量以及甲烷含量取决于各阶段的生物化学过程以及传质过程的效率，这些过程受温度、pH 值、沼气成分等因素的影响。因此，须要建立数学模型将这些因素与接种物、底物联系起来，分析、预测厌氧消化系统的行为，以便对厌氧消化系统进行优化和控制。研究人员建立了许多数学模型来描述厌氧消化的过程，多数预测沼气和甲烷生产的模型是基于机理和经验模型（基于数据或实验）[10]，其中包括厌氧消化数学模型（ADM1）[11]、Logistic 模型[12]、一级动力学模型[13]、Gompertz 模型[14]等。相较于传统 AD，有关 EAD 动力学建模的相关研究较少，因为 EAD 存在微生物的厌氧代谢与电化学作用的耦合过程。Kanellos G [15] 使用 ADM1 模型建立了 EAD 处理废弃活性污泥的动力学模型，与传统 AD 相比，EAD 提高了甲烷产量以及底物的降解速率。Zou L[16]以猪粪为底物研究了 EAD 反应器在不同电压下的运行效果，并采用一级动力学和 Gompertz 模型对沼气和甲烷的累积产量进行了研究，结果表明，两种动力学模型均展现了良好的拟合效果。

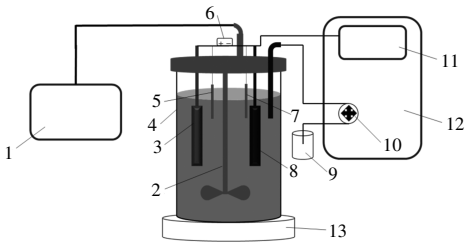
本文通过连续投加不同质量浓度的乙酸作为底物，研究其在电催化条件下的降解动力学，并基于实际电催化厌氧消化过程的数据校准和修正 EAD 乙酸降解动力学模型，研究结果为电催化厌氧消化的智能化控制提供了算法基础。

1 材料和方法

1.1 实验装置与方法

图 1 为 EAD 反应器示意图。本实验使用的单

收稿日期：2024-03-11。
基金项目：广西重点研发计划项目（桂科 AB18221104）。
通信作者：蒋东云（1967-），女，高级工程师，研究方向为有机固体废弃物资源化、高浓度废水处理技术和专用设备研制。
E-mail：jdongyun@guet.edu.cn



1-集气袋;2-磁力搅拌装置;3-阴极;4-玻璃发酵罐;5-pH 探头;6-可调电源;7-温度探头;8-阳极;9-进料瓶;10-进料蠕动泵;11-数据储存与显示;12-控制柜;13-加热装置。

图 1 EAD 反应器示意图

Fig.1 Schematic diagram of EAD reactor

室 EAD 反应器主体是有效容积为 3.2 L 的圆柱形玻璃厌氧发酵罐，在其顶部设有收集气体和投加底物的接口，此外还有监测 pH 值以及温度的装置,加热器被放置在发酵罐底部。

EAD 反应器所用的接种污泥来自本课题组连续运行 4 a 的厌氧消化反应器，该反应器在中温条件下(37.5±0.5) ℃稳定运行,其中的污泥表现出了稳定的产甲烷能力。先对接种污泥进行预处理，过滤掉污泥中的无机杂质并对其进行浓缩纯化，预处理后厌氧污泥的总固体 (Total Solids,TS)含量为 9.0%,挥发性固体(Volatile Solids,VS)含量为 5.2%,pH 值为 7.93。取 3.0 L 预处理好的厌氧污泥接种于 EAD 反应器。合适的电极材料(如碳毡和碳刷等) 会优化 EAD 反应器的产气表现[17],本文选择碳刷作为阴、阳极材料,以恒电压法启动反应器,电压设置为 1.2 V。反应器温度控制在(37.5±0.2) ℃,搅拌转速设为 120 r/min。使用乙酸作为有机碳源进行批次投料，投料间隔为 4 d,通过测量启动过程中的沼气产量、甲烷含量以及挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acids,VFAs)浓度来分析、判断 EAD 反应器的启动效果。

本实验将乙酸作为唯一底物，研究不同质量浓度乙酸的降解趋势,根据课题组的实验经验,依次添加 25,30,35 g 乙酸,沼液体积为 3.0 L,对应的乙酸的质量浓度依次为 8.3,10.0,11.7 g/L。每个质量浓度的乙酸连续投加 4 个批次，每批次发酵时长为 96 h (以上 3 个质量浓度分别记为 A,B,C，质量浓度为 8.3 g/L 时的 4 个批次依次记为 A1,A2,A3,A4,以此类推)。重复投加的目的是让微生物群落在经过增长繁殖之后保持微生物数量的稳定，以便研究不同乙酸质量浓度下的动力学特征。

1.2 分析方法

本文使用岛津 GC-17A 型气相色谱仪测量沼气中的甲烷含量，该仪器使用 PEG-20M (30 m×0.53 mm×0.5 μm)色谱柱,检测器为氢火焰离子化检测器。使用珀金埃尔默 Clarus 590 GC 型气相色谱仪测量 VFAs 的质量浓度,该仪器使用 InertCap FFAP(30 m×0.25 mm×0.25 μm)气相色谱柱,检测器为氢火焰离子化检测器。采用排水集气法收集沼气，并通过测量排出水的体积来确定沼气的体积。

1.3 动力学研究方法

本文采用一级动力学模型与 Gompertz 模型,对投加乙酸的 EAD 反应器中的产沼气过程进行描述,其表达式分别为

$$y=A\cdot(1-e^{-kt}) \tag{1}$$

$$y=A\cdot e^{-b\cdot e^{-ct}} \tag{2}$$

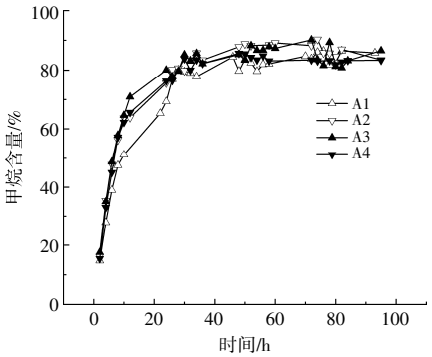
式中:y 为 t 时刻的累积沼气产量,L;t 为时间,h;A 为理论最大沼气产量,L，与底物投加量有关;k 为反应速率常数,h^{-1},通常与底物质量浓度有关;b 为增长速率常数,h^{-1};c 为产气延滞时间,h;e 为自然对数。

2 结果与讨论

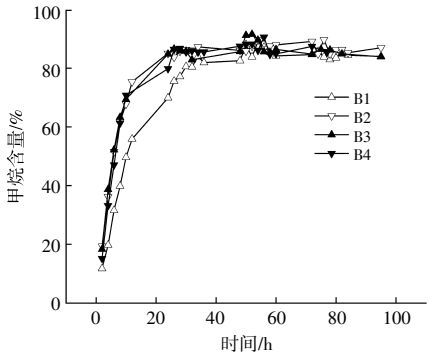
2.1 EAD 的乙酸降解和产甲烷特征

当底物质量浓度较低时，微生物的生长速率与底物投加量呈正相关[18]。与传统 AD 相比,EAD 可以提高有机物的降解率和挥发性脂肪酸的转化效率,并有利于产甲烷微生物的生长繁殖[19]。当底物质量浓度较高时，微生物可以充分利用底物进行生长和代谢,从而提高生长速率。以乙酸作为唯一投加底物,EAD 系统的甲烷含量变化如图 2 所示。

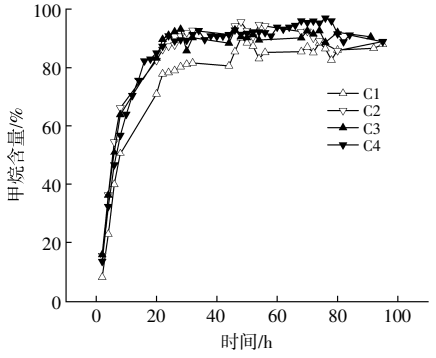
从图 2 可以看出:所有批次的甲烷含量均在



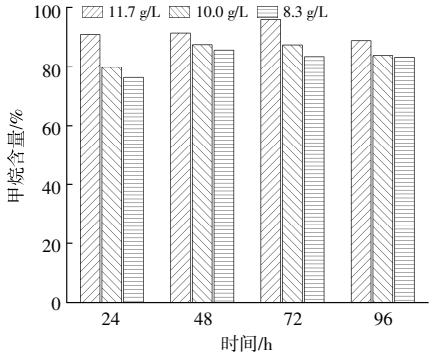
(a)底物投加量为 8.3 g/L



(b)底物投加量为 10.0 g/L



(c)底物投加量为 11.7 g/L



(d)3 种底物投加量下的甲烷含量

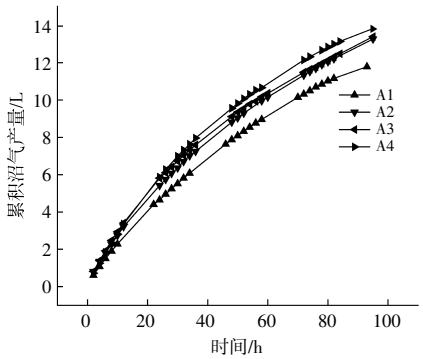
图 2　底物投加量与沼气中甲烷含量的关系

Fig.2 Relationship between substrate dosages and methane concentration in biogenic gases

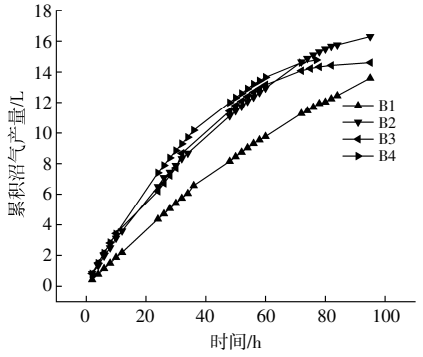
0~20 h 迅速增长,说明当底物较为充足时,产甲烷菌较为活跃，繁殖迅速，甲烷含量快速增至85%~94%,这得益于电催化条件下更多的 CO_2 被转化为 CH_4;在 20 h 之后,甲烷含量增长缓慢,反映出反应后期的底物供应较之前有所不足。此时的产甲烷菌群落数达到了一种相对稳定的状态,这进一步表明甲烷含量的变化与微生物群落的稳定性之间存在一定的关联。随着底物质量浓度的增加,甲烷含量呈现出上升趋势,特别是在底物质量浓度为 11.7 g/L 的情况下，甲烷含量的增幅更为显著。在相同底物质量浓度的不同批次中,第一批次的甲烷含量增长较慢，而后续批次的甲烷含量增长规律较为相似。这表明,处于第一批次的微生物群落正在适应新的环境,仍在生长繁殖,而到了后续批次，微生物群落的生长繁殖逐步趋于稳定。

EAD 系统的累积沼气产量如图 3 所示。

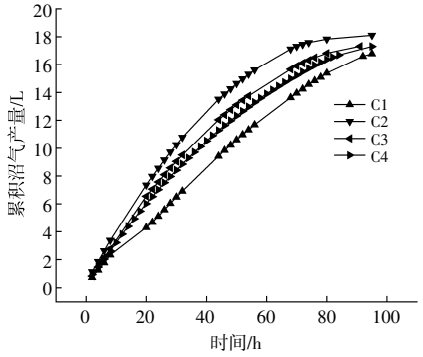
从图 3 可以看出,随着底物质量浓度的增加,累积沼气产量呈现出明显的增长趋势。这说明随着底物质量浓度的增加,产甲烷微生物更加活跃,产甲烷微生物的数量也会相应增加。因此,底物质量浓度的增加可以促进 EAD 中产甲烷微生物的生长和繁殖,从而增加沼气的产量。在相同底物质



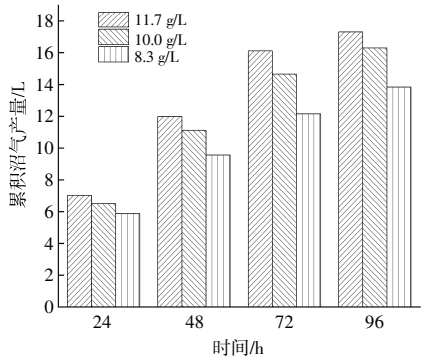
(a)底物投加量为 8.3 g/L



(b)底物投加量为 10.0 g/L



(c)底物投加量为 11.7 g/L



(d)3 种底物投加量下的累积沼气产量

图 3 底物投加量与累积沼气产量的关系

Fig.3 Relationship between substrate dosages and cumulative biogas production

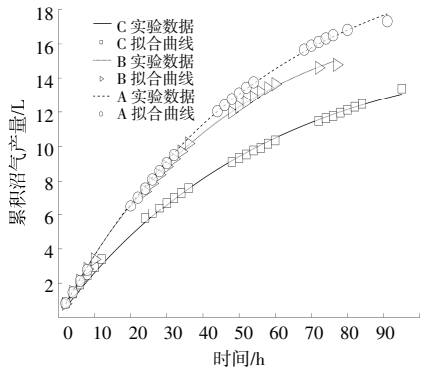
量浓度下，第一批次的累积沼气产量普遍低于其他批次,这表明重复投加相同质量浓度的底物后，累积沼气产量会有所增益，这同样说明首个批次的微生物群落在适应新环境，产甲烷微生物的数量还没有趋于稳定,仍在增殖。剩余批次的累积沼气产量以及产气速度都大致相同，这表明在产甲烷微生物适应了相同的底物质量浓度后，其繁殖规律和活跃程度亦大致相同。

2.2 EAD 过程动力学研究

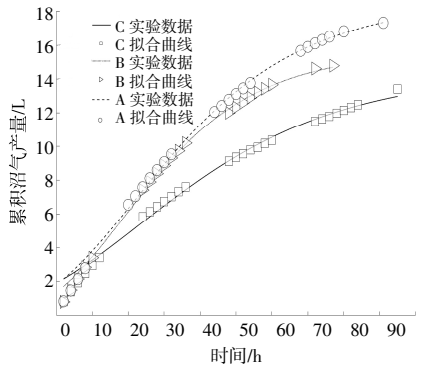
2.2.1 EAD 产沼气过程

本文采用一级动力学模型和 Gompertz 模型模拟产沼气过程，两种模型对累积沼气产量的拟合结果如图 4 所示。两种模型的动力学参数如表 1 所示。

从图 4 可以看出,Gompertz 模型在批次投料开始时的拟合效果不够理想，一级动力学模型的拟合效果整体上优于 Gompertz 模型。基于 Gomerptz 模型的各个批次沼气产率(实际批次沼气产量/理论最大沼气产量)均高于基于一级动力模型的各个批次沼气产率,其中最高达到了96.28%。由表 1 可知,一级动力学模型具有更高的拟合系数(R^2)和更低的均方根误差(RMSE),说明 Gompertz 模型对批次沼气产量的预测更优，而一级动力学模型对批次产沼气过程的预测更优。



(a)基于一级动力学模型的产沼气动力学曲线



(b)基于 Gompertz 模型的产沼气动力学曲线

图 4 不同底物投加量下累积沼气产量与时间的拟合曲线

Fig.4 Fitted curves of cumulative biogas production versus time for different substrate dosages

表 1 不同底物投加量下动力学方程各参数比较

Table 1 Comparison of the parameters of kinetic equations under different substrate dosages

动力学参数		底物投加量/g·L^{-1}		
		8.3	10.0	11.7
一级动力学模型	A	15.59	18.25	22.33
	K	0.019	0.02	0.018
	R^2	0.999 58	0.999 35	0.999 66
	RMSE	0.086 12	0.131 79	0.088 384
Gompertz 模型	A	13.52	15.37	17.85
	b	2.293	2.662	2.642
	c	0.037 78	0.046 29	0.044 57
	R^2	0.992 41	0.997 43	0.995 94
	RMSE	0.329 49	0.241 93	0.334 26

2.2.2 EAD 乙酸降解过程

本文以乙酸为唯一底物进行批次投料,在 EAD 系统中进行一系列生化反应后,投加的乙酸会在微生物的作用下转化为沼气（CH_4+CO_2)、沼液中剩余的乙酸根以及微生物细胞，这是一个动态转化过程。根据吴云[20]提出的碳元素转移机理，本文从碳守恒的角度来考虑此动态过程的碳转化关系,并提出碳平衡方程。在此方程中,投加的乙酸将转化为沼气、液相中的乙酸根和生物质(微生物细胞),具体关系见式(3)。

$$C_{乙酸}=C_{沼气}+C_{液相中的乙酸根}+C_{生物质} \quad (3)$$

为了统一单位计算碳平衡关系,将代表 $C_{沼气}$ 的累积沼气产量转换为等物质的量碳的乙酸根浓

度(产生 1 mol 的沼气将消耗 1 mol 的乙酸根)。在标准状况下,理想气体的摩尔体积为 22.4 L/mol,乙酸的摩尔质量为 60 g/mol,EAD 反应器的体积为 3 L,1 mol 沼气 (CH_4 和 CO_2) 和 1 mol 乙酸(CH_3COOH)中碳元素的物质的量之比为 1:2。将某时刻的累积沼气产量 y 转换为某时刻产生沼气所消耗的底物质量浓度 S_g (每升沼液中产生的沼气所消耗掉的乙酸质量),则 S_g 的计算式为

$$S_g=y\cdot\frac{60}{22.4\times3\times2} \tag{4}$$

批次投料后, 每隔 1 d 检测一次乙酸根质量浓度,直至批次结束,检测结果如图 5 所示。

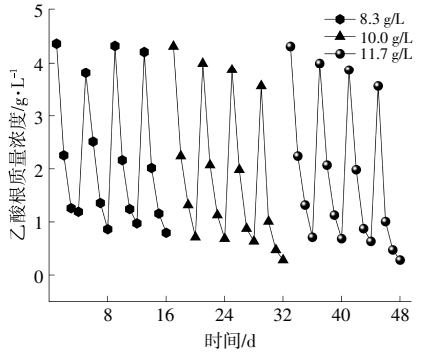


图 5　乙酸根质量浓度随时间的变化关系

Fig.5 The variation of acetate ion mass concentration over time

从图 5 可以看出,3 种投加量前 3 个批次的最终乙酸根质量浓度均高于第 4 个批次,3 种投加量第 4 批次的最终乙酸根质量浓度分别为 0.973,0.283,0.302 g/L,由此计算出 3 种投加量的乙酸转化率分别为 85.6%,97.2%和 97.4%。乙酸投加量增加并未造成乙酸根过量残留,由此可以看出,EAD 体系对底物质量浓度变化的适应性较强。

根据多次重复实验得到的结果, 结合每个批次的乙酸投加量、累积沼气产量、批次末尾剩余的乙酸根质量浓度, 计算出了不同底物质量浓度下每批次转化为生物质所消耗的乙酸量 S_w,当底物投加量 S_0 分别为 8.3,10.0,11.7 g/L 时,S_w 分别为 1.84,2.99,3.34 g/L。S_w 和 S_0 的关系为

$$S_w=-0.138\,41S_0^2+3.209\,34\cdot S_0-15.262\,6 \tag{5}$$

微生物的生长繁殖贯穿整个厌氧消化过程。其中, 底物降解速率和生物质增加速率并不是线性相关。为了更好地描述批次中某时刻的微生物生物质增长所消耗的底物质量浓度,须对式(5)进行优化, 即引入 $t/(t+n)$ 对 S_w 进行校正, 得到式(6)。其中,t 为时间,n 为实数(n>0)。$t/(t+n)$用来描述微生物的增长滞后于底物的降解, 并且与时间相关。当 t=0 时,$t/(t+n)$=0,表示批次开始时微生物对底物的利用率低,随着时间的推移,$t/(t+n)$的数值增加,微生物对底物的利用率逐渐增加。

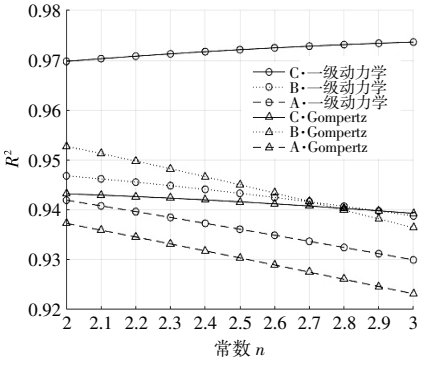
$$S_w=\left(-0.138\,41S_0^2+3.209\,34\cdot S_0-15.262\,6\right)\cdot\frac{t}{t+n} \tag{6}$$

经过上述的讨论与计算, 得到了碳平衡方程中相应的参数, 为了计算液相中的乙酸根质量浓度,由式(3)转换得到式(7),再得到液相中的乙酸质量浓度 S_t 的平衡方程,如式(8)所示。

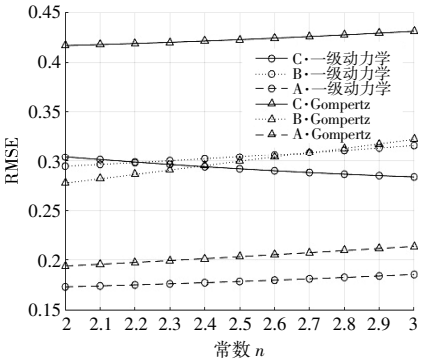
$$C_{\text{液相中的乙酸根}}=C_{\text{乙酸}}-C_{\text{沼气}}-C_{\text{生物质}} \tag{7}$$

$$S_t=S_0-S_g-S_w \tag{8}$$

在式(6)中,n 为一个常数,为了建立碳平衡方程,对 n 进行赋值,通过不断赋值发现,当 $n\in[2,3]$时,方程的拟合效果更佳,因此取 $n\in\{x\mid x=2.1+0.1k,k\in N,0\leqslant N\leqslant9\}$。对不同底物质量浓度下基于两种模型所建立碳平衡方程的 R^2 和 RMSE 进行比较,结果如图 6 所示。



(a)R^2



(b)RMSE

图 6　建模实验中不同 *n* 值下 R^2 和 RMSE 的比较

Fig.6 Comparison of R^2 and RMSE for different n values in modeling experiments

从图 6 可以看出,当 $n\in[2,3]$时,$R^2\in(0.92,0.98)$,RMSE $\in(0.15,0.45)$,均具有良好的拟合效果。

选取 n=2.8 进行拟合,此时生物质增长所消耗的底物浓度随时间变化的关系如图 7 所示。

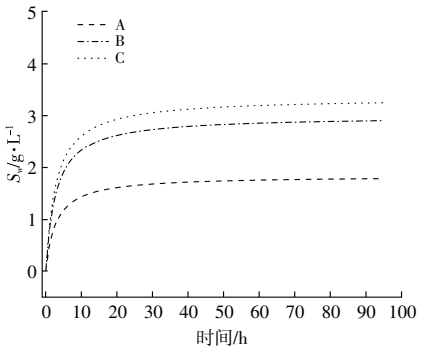
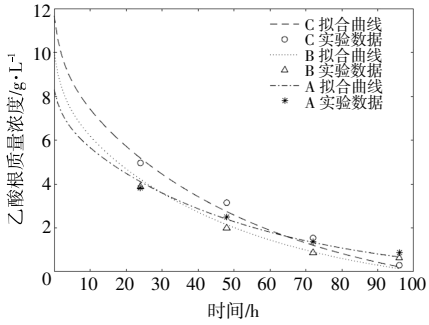


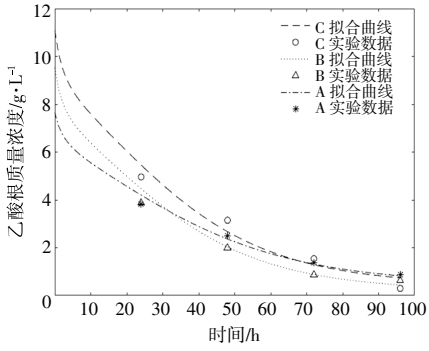
图 7 生物质增长所消耗的底物质量浓度随时间变化的关系

Fig.7 Change in substrate mass concentration versus time due to biomass growth

将实验数据及拟合方程代入式(8),基于两种动力学模型建立底物降解动力学,利用 MATLAB 软件将实验所测定的乙酸根质量浓度与所建立的底物降解动力学拟合曲线进行比较,结果如图 8 所示。两种模型的拟合度验证结果见表 2。



(a)一级动力学模型



(b)Gompertz 模型

图 8 不同底物投加量下的底物降解动力学曲线

Fig.8 Substrate degradation inetics under different substrate dosages

表 2 两种模型的拟合度验证

Table 2 Goodness-of-fit validation of two functions

模型	指标	A	B	C
一级动力学模型	R^2	0.97	0.94	0.97
	RMSE	0.18	0.31	0.29
Gompertz 模型	R^2	0.93	0.94	0.94
	RMSE	0.35	0.31	0.43

结合图 8 和表 2 可以看出:基于两种动力学模型的拟合曲线均动态地描述了底物随时间变化的降解过程,且实验数据与动力学曲线拟合度高,R^2 均大于 0.90,这表明了所建立的动力学方程可以准确描述 EAD 动力学过程;与 Gompertz 方程相比,基于一级动力学模型所建立的底物降解动力学方程在每个底物质量浓度的模型评价指标(R^2 和 RMSE)均优于 Gompertz 方程,说明一级动力学模型更适合用于建立底物降解动力学方程。

本节首先利用累积沼气产量与时间的关系,采用一级动力学方程以及 Gompertz 方程,并借助 MATLAB 软件进行拟合,得到了累积沼气产量与时间的数学表达式。随后,提出了 EAD 碳平衡方程,并计算出不同底物质量浓度下,整个批次中生物质增长消耗的底物质量浓度,并赋予其与时间相关的函数。根据 EAD 碳平衡方程和两种动力学模型,进一步求出了 EAD 过程液相中乙酸根质量浓度与时间的关系,这一成果可应用于模拟 EAD 系统的运行过程,用于预测 EAD 系统中乙酸降解的趋势。

通过对实验数据与拟合方程的动力学曲线进行对比分析,发现在 3 种底物质量浓度下,基于两种动力学模型所建立的底物降解动力学方程的相关性系数 R^2 均高于 0.90,显示出较高的拟合度,而且一级动力学方程的模型评价指标均优于 Gompertz 方程,这表明基于一级动力学模型所建立的底物降解动力学模型能够更准确地描述 EAD 过程的乙酸降解变化趋势和特征。

拟合中存在的误差可能来自以下方面。

①碳平衡模型:在构建模型时,通过碳平衡计算出微生物生长繁殖所消耗的乙酸质量浓度,但是,具有厌氧消化产甲烷功能之外的其他微生物的生长代谢可能存在一部分碳损耗。

②内源性代谢:在 EAD 系统中,微生物死亡释放 C,N,P 等元素的速率各不相同,与外部添加

的乙酸代谢速率也不一致，这会导致微生物数量增长的规律性受到影响。

③参数拟合:在动力学方程中,反应速率常数是通过实验数据拟合得来的，因此参数拟合值的误差会对模型的预测结果产生影响。

3　结论

在 EAD 反应器中，随着周期性添加底物,甲烷含量变化速度加快,沼气生成速率相应提高,累积沼气产量随之增多。在实验研究的基础上,本文首先对累积沼气产量与时间的关系进行拟合,建立了两种产沼气动力学方程,其相关性系数 R^2 均大于 0.99。其次,对电催化过程的碳平衡关系进行分析,将生物质增量、沼气产量与剩余乙酸根质量浓度相关联,得到底物降解的动力学函数关系。研究表明,3 种底物投加量下的乙酸转化率分别为 85.6%,97.2%和 97.4%。两种底物降解动力学模型的相关性系数 R^2 均大于 0.90。其中,一级动力学模型对乙酸降解过程的拟合效果更佳，相关性系数 R^2 达 0.97。

参考文献:

[1] Wu D,Li L,Zhao X,et al. Anaerobic digestion:A review on process monitoring [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,103:1-12.

[2] Rocher-Ros G,Stanley E H,Loken L C,et al. Global methane emissions from rivers and streams[J].Nature,2023,621(7979):530-535.

[3] Hadj T B. Nonlinear impact of biomass energy consumption on ecological footprint in a fossil fuel - dependent economy [J]. Environmental Science and Pollution Research,2021,28(48):69329-69342.

[4] Wang W,Lee D. Valorization of anaerobic digestion digestate:A prospect review[J].Bioresource Technology,2021,323:124626.

[5] Almomani F,Bhosale R R,Khraisheh M A M,et al. Enhancement of biogas production from agricultural wastes via pre-treatment with advanced oxidation processes[J].Fuel,2019,253:964-974.

[6] Hamzah A F A,Hamzah M H,Che Man H,et al. Effect of organic loading on anaerobic digestion of cow dung:Methane production and kinetic study [J].Heliyon,2023,9(6):e16791.

[7] 梁家伟,周亶,蒋东云,等.生物电化学系统强化厌氧消化的机理和底物效应 [J]. 中国沼气,2023,41(6):26-33.

[8] EscapaA, MateosR, MartínezE J, et al. Microbial electrolysis cells:An emerging technology for wastewater treatment and energy recovery. From laboratory to pilot plant and beyond [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,55:942-956.

[9] Chen Y,Yu B,Yin C,et al. Biostimulation by direct voltage to enhance anaerobic digestion of waste activated sludge [J].RSC Advances,2016,6 (2):1581-1588.

[10] Obileke K, Mamphweli S, Meyer E L, et al. Development of a mathematical model and validation for methane production using cow dung as substrate in the underground biogas digester[J].Processes,2021,9(4):643.

[11] Batstone D J,Keller J,Angelidaki I,et al. The IWA anaerobic digestion model No 1 (ADM1) [J].Water Science and Technology,2002,45(10):65-73.

[12] Scarcelli P G,Serejo M L,Paulo P L,et al. Evaluation of biomethanization during co-digestion of thermally pretreated microalgae and waste activated sludge,and estimation of its kinetic parameters [J].Science of The Total Environment,2020,706:135745.

[13] 李玉倩,马俊伟,袁海荣,等.玉米秸秆两级 CSTR 厌氧消化工艺动力学性能研究 [J]. 可再生能源,2022,40(1):1-7.

[14] 刘永侠,宋培学,唐响超,等.水热炭对餐厨垃圾厌氧消化性能影响研究 [J]. 可再生能源,2023,41(10):1287-1293.

[15] Kanellos G, Tremouli A, Arvanitakis G, et al. Computational analysis of the kinetic processes of microbial electrolysis cell-assisted anaerobic digestion using the ADM1[J].Water,2023,15(22):3939-3957.

[16] Zou L,Wang C,Zhao X,et al. Enhanced anaerobic digestion of swine manure via a coupled microbial electrolysis cell [J].Bioresource Technology,2021,340:125619.

[17] Rozendal R A,Hamelers H V M,Euverink G J W,et al. Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis[J].International Journal of Hydrogen Energy,2006,31(12):1632-1640.

[18] Jin Q,Wu Q,Shapiro B M,et al. Limited mechanistic link between the Monod Equation and Methanogen Growth:Aperspective from metabolic modeling [J]. Microbiology Spectrum,2022,10(2):e2221-e2259.

[19] Lee B,Park J,Shin W,et al. Microbial communities change in an anaerobic digestion after application of

microbial electrolysis cells [J]. Bioresource Technology, 2017,234:273-280.

[20] 吴云. 餐厨垃圾厌氧消化影响因素及动力学研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.

Study on the degradation kinetics of acetic acid in electrocatalytic anaerobic digestion

Liu Zhinan, Jiang Dongyun, Zhou Dan, Kang Houzhi, Zeng Jiakai, Chen Rongbin
(School of Life & Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: In electrocatalytic anaerobic digestion, the methane content in biogas can be enhanced. With acetic acid as the substrate, this study investigated the kinetics of biogas production and substrate degradation in an electrocatalytic anaerobic digestion system. Experimental results showed that with the addition of different initial acetic acid concentrations(8.3, 10.0,11.7 g/L), the methane content in biogas increased with increasing acetic acid concentration. When the acetic acid concentration was 11.7 g/L, the average methane content reached 80.6% in batch experiments. Based on the carbon balance relationship in the electrocatalytic anaerobic digestion process, kinetic studies were conducted using both the first-order kinetic model and the Gompertz model. The study revealed that acetic acid conversion efficiencies at the three concentrations were 85.6%, 97.2%, and 97.4%, with biomass growth accounting for 22.1%, 29.9%, and 28.5% of the carbon distribution, respectively. The correlation coefficients (R^2) for both models in fitting the biogas production process were greater than 0.99, and those for the acetic acid degradation process were above 0.90, with the first-order kinetic model demonstrating a better fit for acetic acid degradation.

Keywords: electrocatalytic anaerobic digestion; acetic acid degradation kinetics; carbon balance; first-order kinetic; Gompertz