

餐厨废弃物厌氧发酵工艺优化

袁丽霞^{1,2}, 陈祥松^{1,2}, 刘伟伟^{1,3*}, 毛碧飞^{1,2}, 吴金勇^{1,2}, 姚建铭^{1,2} (1. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031; 2. 安徽省淮南新能源研究中心, 安徽淮南 232000; 3. 安徽农业大学工学院, 安徽合肥 230036)

摘要 [目的]考察温度、有机负荷、接种量3个关键参数对餐厨废弃物厌氧发酵过程的综合影响。[方法]采用正交试验法综合考察了批量式发酵过程餐厨废弃物产沼气及降解效果,并进行了验证试验。[结果]温度是影响餐厨废弃物厌氧发酵的显著因素;最佳发酵条件为温度35℃、接种量350g、有机负荷40g,在此条件下发酵产气中平均CH₄含量可达68.75%,TS产气率及VS产气率分别为661.96和708.97mL/g,能源转化效率可达79.92%。[结论]可为以餐厨废弃物为原料的沼气工程提供技术参考。

关键词 餐厨废弃物;厌氧发酵;参数;正交试验;优化

中图分类号 S216 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)36-0100-04

Optimization of Anaerobic Digestion of Food Waste

YUAN Li-xia^{1,2}, CHEN Xiang-song^{1,2}, LIU Wei-wei^{1,3*} et al (1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031; 2. Huainan New Energy Research Center, Huainan, Anhui 232000; 3. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036)

Abstract [Objective] Three key parameters (temperature, organic loading and inoculation amount) were investigated for the influence of food waste anaerobic digestion. [Method] Orthogonal test was conducted to investigate biogas production and raw materials degradation in batch fermentation reactors. The verification test was also carried out. [Result] Temperature was the most significant influence factor; the optimum parameters for food waste anaerobic digestion were 35℃, 350g of inoculation amount and 40g of organic loading. The average methane concentration was 68.75%, the total solid (TS) and volatile solids (VS) biogas production rate were 661.96 and 708.97 mL/g, and the energy conversion rate reached 79.92%. [Conclusion] The present work provides a technical reference for the large scale food waste biogas project.

Key words Food waste; Anaerobic digestion; Parameters; Orthogonal test; Optimization

我国餐厨废弃物年产生量超过5000万t,其资源浪费相当于233万hm²玉米的能量产出和200万hm²大豆的蛋白质产出,可养活2亿~3亿人^[1-4]。餐厨废弃物含有大量淀粉、糖类、蛋白质、油脂等营养物质,以及氮、磷、钾、钙及多种微量元素,是良好的生物质资源,可用于好氧堆肥、厌氧发酵产甲烷(CH₄)和氢气、生产微生物油脂及乙醇等^[5-9]。厌氧发酵是餐厨废弃物无害化、资源化处理的重要工艺^[5,7]。大量研究及工程实践表明,厌氧发酵过程受原料、预处理、接种物、有机负荷、温度、pH、搅拌及发酵工艺等多种生化、物理及工程因素的影响^[10]。在此方面,国内外大量研究报道了原料预处理及混合配比、发酵温度、pH、接种量(比例)、有机负

荷、工艺方式等因素对餐厨废弃物厌氧发酵的影响^[11-18],获得多种特定条件下良好的工艺方式及参数,但针对多因子的综合研究鲜见报道。笔者通过正交试验考察了温度、有机负荷、接种量对餐厨废弃物厌氧发酵过程的影响,旨在为以餐厨废弃物为原料的沼气工程提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 发酵原料及接种物 发酵原料取自安徽农业大学欣苑学生宿舍中午时段餐厨废弃物(热值为20.39kJ/g,油脂含量为2.88%),人工分选去除非生物质组分,按照文献[19-20]进行复合酶解预处理;接种物为35℃培养的正常厌氧活性污泥。各原料及接种物基本理化性质见表1。

表1 餐厨废弃物及接种污泥基本理化性质

Table 1 The physical and chemical characteristics of food waste and activated sludge

样品 Sample	总固体(TS) Total solid//%	挥发性固体(VS) Volatile solid//%	pH	碳(C) Carbon//%	氮(N) Nitrogen//%	C/N
餐厨废弃物 Food waste	27.36	93.37	6.14	58.35	3.26	17.90
接种物 Activated sludge	13.43	47.39	8.50	24.59	2.41	10.20

1.2 检测方法 TS及VS含量采用重量法测定^[21];小试装置厌氧发酵产气采用气相色谱仪(浙江福立,9790II型)测定其主要组分,色谱条件:柱长4m,担体为13X分子筛,TCD检测器,高纯氩气作为载气,流速为40mL/min,柱温120℃,

热导池和进样器温度为150℃,进样量1mL,以峰面积定量,校正归一法计算气体组分浓度;放大验证试验产气成分采用红外沼气成分分析仪(武汉四方,Gasboard-3200型)检测;餐厨废弃物热值采用美国Parr公司6300型量热仪测定。

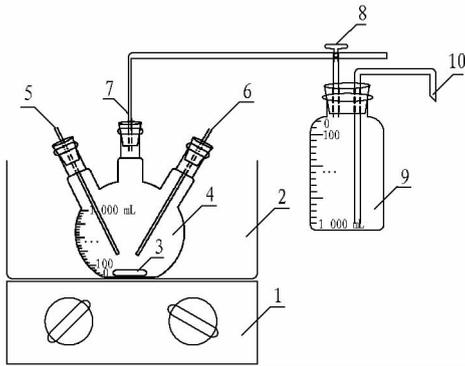
基金项目 合肥物质科学技术中心方向项目培育基金项目(2014FXCX006);淮南科技计划项目(2014A15);中科院合肥分院等离子体物理研究所科学基金项目(DSJJ-15-YY02)。

作者简介 袁丽霞(1980-),女,河南商水人,工程师,博士,从事生物质能源与开发利用研究。*通讯作者,副教授,博士,从事生物质能源与开发利用研究。

收稿日期 2016-12-19

1.3 试验装置 采用专利厌氧发酵小试装置^[22]进行正交试验,用标定了校准体积刻度的饱和NaCl水溶液收集产气并计量体积(图1);针对正交试验进行的放大试验在20L玻璃全混式厌氧反应器(CSTR)(郑州长城,GR-20L)中进行。

1.4 试验设计 发酵温度(A)、接种量(B)、有机负荷(C)是厌氧发酵过程的3个重要影响因子,也是各类原料厌氧发



注:1. 磁力搅拌器;2. 恒温水浴锅;3. 磁力搅拌子;4. 厌氧发酵反应器;5. 温度检测器;6. pH 检测器;7. 生物气体导管;8. 三通调节阀;9. 集气瓶;10. 排水管。

Note: 1. Magnetic stirrer; 2. Thermostat water bath; 3. Magnetic stirring; 4. Anaerobic fermentation reactor; 5. Temperature detector; 6. pH value detector; 7. Biological gas conduit; 8. Triplet adjuster valve; 9. Gas collecting bottle; 10. Drainage pipe.

图1 厌氧发酵试验装置

Fig.1 Anaerobic digestion equipment device

酵过程的关键参数。笔者参考前期试验结果及相关文献报道^[11,17-18],采用 $L_9(3^4)$ 正交试验方法进行发酵条件优化,借助 Design Exper 软件进行正交试验设计与数据分析,物质和条件因子及水平的设计见表2、3。以只添加300 g 接种物、不添加发酵原料作为空白对照(CK)。3次重复。

表2 $L_9(3^4)$ 正交试验因素水平

Table 2 Factors and levels of $L_9(3^4)$ orthogonal test

水平 Level	因素 Factor		
	发酵温度(A) Fermentation temperature// $^{\circ}\text{C}$	接种量(B) Inoculation amount//g	有机负荷(C) Organic loading//g
1	22.2 ~ 25.9*	250	40
2	35	300	50
3	55	350	60

注: * 表示发酵温度为常温(22.2 ~ 25.9 $^{\circ}\text{C}$)。

Note: * is normal temperature (22.2 ~ 25.9 $^{\circ}\text{C}$).

图3 各试验组因素水平组合

Table 3 Combination of factors and levels in each experimental group

试验号 Test No.	因素水平 Factor and level	试验号 Test No.	因素水平 Factor and level
1	$A_1B_1C_1$	6	$A_2B_3C_1$
2	$A_1B_2C_2$	7	$A_3B_1C_3$
3	$A_1B_3C_3$	8	$A_3B_3C_2$
4	$A_2B_1C_2$	9	$A_3B_3C_2$
5	$A_2B_2C_3$		

2 结果与分析

2.1 沼气和 CH_4 日产量的变化 厌氧发酵30 d内各试验组沼气日产量及 CH_4 日产量的变化分别见图2、3。

从图2、3可见,各试验组在设定范围内沼气日产量和 CH_4 日产量的变化规律基本一致,均呈上升—稳定—衰竭的

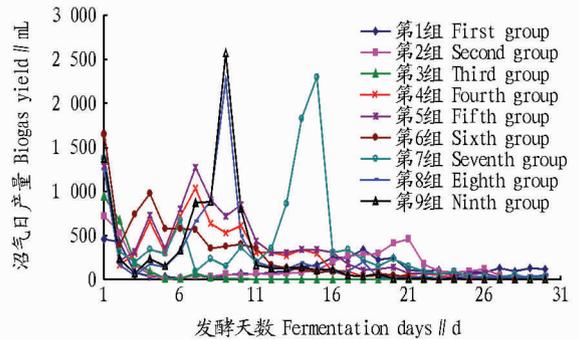


图2 各试验组沼气日产量变化

Fig.2 The change of daily biogas yield in each group

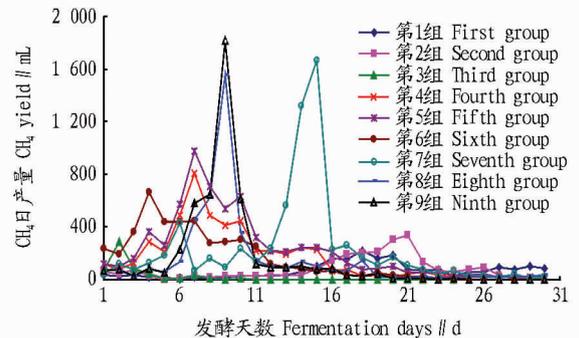


图3 各试验组 CH_4 日产量变化

Fig.3 The change of daily methane yield in each group

过程,符合批次厌氧发酵的原料降解规律。不同的是第1天由于兼性发酵及系统处于水解开始阶段,日产气量均较高(其中第4~9组均高于1200 mL),但其 CH_4 含量较低,折合 CH_4 日产量并不高。可以明显看出,各试验组均出现1个沼气日产量(第1天产气中 CH_4 含量过低,不作为统计对象)及 CH_4 日产量峰值,其中第7、8、9组峰值产沼气及产 CH_4 量较高,分别达到2295.30、2255.25、2560.40 mL和1661.12、1554.60、1814.78 mL,峰值产气时间分别为第15、9、9天;第1、3、4、5、6组均在第4~7天出现产沼气量及产 CH_4 量峰值,第2组产沼气量及产 CH_4 量峰值出现在第21天,分别为455.00、332.70 mL,较为滞后且较小;各试验组中,第3组产气效果最差,从发酵第5天开始基本停止产气,经测定该反应器内料液pH为4.38。原因可能与该组接种量(350 g)及有机负荷(60 g)均较高,造成系统酸化有关,因为在常温发酵条件下,厌氧发酵微生物种群数量及活性相对较低,产甲烷菌难以及时分解产酸菌产生的有机酸而产生沼气,从而产生有机酸积累及抑制产 CH_4 。比较各试验组的发酵条件可以看出,采用常温发酵的第1~3组,尽管日均温为22.2~25.9 $^{\circ}\text{C}$,也可满足厌氧微生物生长的温度要求,但其总体产气效果较差,如第1组在发酵后期至结束时,日产气量仍在100 mL以上。说明常温条件下,厌氧发酵对原料的降解速度慢,发酵效率较低。但中温(35 $^{\circ}\text{C}$)和高温(55 $^{\circ}\text{C}$)发酵条件下厌氧发酵的4~9组,产气效果均较好。

2.2 发酵工艺条件优化 根据 $L_9(3^4)$ 正交试验结果,以各组 CH_4 总产量为衡量指标进行直观数据分析及方差分析,结

果见表4。由表4可知,3个因素对试验结果的影响从大到小依次为发酵温度、接种量、有机负荷,最优试验组合为 $A_3B_1C_3$,由于 A_2 与 A_3 的 k 值相当,考虑到运行能耗,初步选择最优的试验组合为 $A_2B_1C_3$,即发酵温度 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、接种量 250 g 、有机负荷 60 g 。

方差分析表明, F_B 、 F_C 均小于 $F_{0.01}(9.00)$,表明接种量、有机负荷产气效果对 CH_4 总产量均无显著影响; $F_{0.01}(9.00) < F_A(10.51) < F_{0.05}(19.00)$,表明发酵温度对转化率的影响显著。

2.3 产气效果综合评价 进一步对各组试验数据进行统计分析,计算各组沼气的产量、 CH_4 总产量,对应原料的TS、VS产气率,以及有效发酵时间、能源转化效率等数据,结果见表5。

表4 正交试验设计及结果

Table 4 Design and results of orthogonal test

试验号 Test No.	因素 Factors			空白 Blank	CH_4 总产量 CH_4 yield//mL
	A	B	C		
1	1	1	1	1	2 022.38
2	1	2	2	2	2 337.18
3	1	3	3	3	539.84
4	2	1	2	3	5 004.55
5	2	2	3	1	6 601.28
6	2	3	1	2	4 504.24
7	3	1	3	2	6 805.72
8	3	2	1	3	4 457.99
9	3	3	2	1	4 889.89
k_1	1 633.133	4 610.883	3 694.870	4 504.517	
k_2	5 370.023	4 498.817	4 077.207	4 549.047	
k_3	5 417.867	3 311.323	4 648.947	3 367.460	
R	3 784.734	1 299.560	954.077	1 181.587	

注:空白列为误差列。

Note:The blank column is error column.

表5 各试验组产气效果综合分析

Table 5 Comprehensive analysis of biogas production effect in each group

试验组 Test group	沼气总产量 Total biogas yield mL	CH_4 总产量 CH_4 yield mL	平均 CH_4 含量 Average CH_4 yield//%	TS产沼 气率 Biogas production rate by TS mL/g	VS 产沼气率 Biogas prod- uction rate by VS mL/g	TS产 CH_4 率 CH_4 Production rate by TS mL/g	VS产 CH_4 率 CH_4 Produ- ction rate by VS mL/g	有效料液 滞留时间 Effective material retention time	能源转 化率 Energy conversion rate//%
1	4 037.40	2 022.38	50.10	368.88	395.07	184.79	197.92	第1~30天	35.89
2	4 590.35	2 337.18	50.92	335.53	359.35	170.85	182.98	第15~26天	33.18
3	2 037.24	539.84	26.50	124.09	132.90	32.88	35.22	第1~8天	6.39
4	8 413.33	5 004.55	59.49	614.99	658.65	365.83	391.81	第2~15天	71.04
5	10 532.25	6 601.28	62.68	641.57	687.13	402.12	430.68	第2~20天	78.09
6	7 821.34	4 504.24	57.59	714.64	765.38	411.57	440.80	第2~14天	79.92
7	11 430.27	6 805.72	59.54	696.27	745.71	414.58	444.02	第2~22天	80.51
8	7 854.19	4 457.99	56.76	717.65	768.61	407.35	436.27	第2~18天	79.10
9	8 487.13	4 889.89	57.62	620.39	664.45	357.45	382.83	第2~16天	69.41

由表5可知,各试验组中以第3组厌氧产气效果最差,TS产 CH_4 率、VS产 CH_4 率分别仅为 32.88 、 35.22 mL/g ,不到第4~9试验组(中温、高温发酵组)的20%,能源转化效率仅为 6.39% 。这可能是由于系统有机酸过度积累,进而酸化停止产气。说明常温条件下尽管可以通过加大接种量的方法提高系统启动负荷,但其发酵效率仍处于较低水平,极易造成发酵失败。在同样为最高有机负荷(60 g)的条件下,第5、7试验组沼气总产量和 CH_4 总产量最高。分别达到 $10 532.25$ 、 $6 601.28\text{ mL}$ 和 $11 430.27$ 、 $6 805.72\text{ mL}$;平均 CH_4 含量也较高,分别达到 62.68% 、 59.54% ;VS产 CH_4 率也分别高达 430.68 、 444.02 mL/g 。说明这个试验组原料利用率及发酵效率较高。尽管第5、7组的能源转化率分别达到 78.09% 、 80.51% ,但其有效料液滞留时间分别长达 19 、 21 d ,相应工程规模及投资较大,影响推广应用。而第6组除同样具有很高的VS产 CH_4 率(440.80 mL/g)及能源转化率(79.92%)之外,其有效料液滞留时间仅 13 d 。这与该组较高的接种量和有机负荷有关,该组为中温($35\text{ }^\circ\text{C}$)发酵条件,接种量达到 350 g ,而其有机负荷仅 40 g 。该反应器内在启动初期即拥有优势的厌氧微生物菌群,不易造成有机酸的现象,因此发酵效率高、周期短。

综上,从餐厨废弃物厌氧发酵工程的效率及稳定性方面

考虑,参考各试验组有效料液滞留时间及能源转化效率等指标,以第6组作为最佳发酵条件组合,即中温 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、接种量 350 g 、有机负荷 40 g 。

2.4 验证及放大试验结果 按照以上综合分析确定的最佳发酵条件,以发酵温度 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、接种量 $7 000\text{ g}$ 、有机负荷 800 g ,采用 20 L 玻璃CSTR厌氧反应器进行验证及放大试验。 30 d 发酵时间内沼气日产量及 CH_4 日产量见图4。

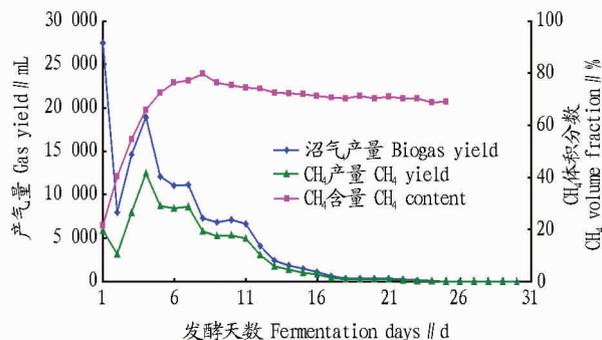


图4 餐厨垃圾发酵过程中日产气量变化

Fig.4 The change of daily biogas yield in fermentation process of food waste

从图4可见,餐厨废弃物厌氧发酵效果良好, 30 d 的发

