

doi:10.3969/j.issn.1002-2090.2016.03.021

牛粪搅拌式固定床沼气发酵条件的优化

马茹霞,洪艳华,艾士奇,邓兵,贾军,晏磊,王伟东
(黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院,大庆 163319)

摘要:以牛粪为沼气发酵原料,利用连续搅拌式反应器(Continuous stirred tank reactor, CSTR)和碳纤维载体构建搅拌式固定床反应器,研究料液浓度(TS)、碳氮比(C/N)、温度、pH、水力停留时间(HRT)和搅拌转速对甲烷产量的影响,通过响应面设计进行回归分析,结合满意度函数确定牛粪搅拌式固定床厌氧发酵工艺的最佳参数。研究表明最佳工艺条件为:TS 8%, C/N 25:1, 温度 39 ℃, pH 7.5, HRT 10 d。验证分析表明,模型预测值与试验值相吻合(偏差 2.27%),模型拟合度较好。

关键词:牛粪;搅拌式固定床;沼气;响应面分析法;发酵条件优化

中图分类号:X713 S216.4

文献标识码:A

文章编号:1002-2090(2016)03-0105-08

Optimization of Fermentation Conditions of Mixing Type Fixed Bed Reactor Using Cow Manure as the Feedstock

Ma Ruxia, Hong Yanhua, Ai Shiqi, Deng Bing, Jia Jun, Yan Lei, Wang Weidong

(1.College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319)

Abstract: Mixing type fixed bed reactor was built combining the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) and carbon fiber carrier. The effects of total solid (TS), carbon and nitrogen ratio (C/N), temperature, pH, hydraulic retention time (HRT) and stirring speed on biogas production were investigated using cow manure as the feedstock. According to the analysis of response surface method, logit and desirability function, the optimum conditions for biogas yield was as follows: materials density 8%, hydraulic retention time 10 d, temperature 39 ℃, pH 7.5, carbon and nitrogen ratio 25:1. After model validation, experimental and predictive value was consistent and the test result and the relative deviation was 2.27%.

Key words: cow manure; mixing type fixed bed; biogas; response surface analysis; optimization of fermentation conditions

随着我国奶牛养殖规模的不断扩大,大量未处理的牛粪日益成为环境污染的重要因素,对牛粪进行厌氧发酵处理是当前实现其无害化与资源化的主要的手段之一^[1]。传统的厌氧发酵连续搅拌式反应器(Continuous stirred tank reactor, CSTR)工艺具有发酵时间长、沼气产量低、微生物易随发酵产物排出而浪费等缺点^[2],如果添加适宜的载体固定反应器中的微生物进而增加微生物的滞留期,可提高反应器的发酵性能^[3]。孙宇等人以牛粪为发酵原料,筛选厌氧发

酵固定床最佳载体材料,以碳纤维薄膜为载体的沼气产量和甲烷产量分别比不加载体提高 12.1%和 15.6%^[4]。林长松等研究发现在固定床厌氧反应器中添加碳纤维载体具有较高的 COD 去除率和产气效率,能够抵抗低 pH、高负荷冲击的能力,在运行过程中不易发生反应器堵塞的现象^[5]。但实际生产应用中,在牛粪为原料的沼气发酵体系中采用固定床工艺来提高沼气产量至今还没有取得实质性进展,所以在农业废弃物资源利用化方面,探究良好的牛粪

收稿日期:2015-12-15

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD12B05-3, 2015BAD21B04);黑龙江省高校科技创新团队计划项目(2012TD006)。

作者简介:马茹霞(1992-),女,黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院 2014 级硕士研究生。

通讯作者:王伟东,男,教授,博士研究生导师, E-mail: wwdcyy@126.com。

沼气固定床发酵工艺具有重要意义。

在设计实验,建立模型时,响应面法(response surface method, RSM)能够评价多个因素作用,寻出最优条件,能有效减少实验处理次数^[6]。在沼气发酵工艺的研究中,可以通过实验设计的有限个工艺参数有效评价沼气发酵过程中某些变量之间的交互作用^[7]。在已有研究基础上,采用单因素和响应面分析结合的方法对影响沼气发酵的主要因素进行优化,提高反应体系的产气性能,为牛粪高效生产沼气技术提供理论基础与技术支持。

1 原料与方法

1.1 试验原料

沼气发酵原料为新鲜牛粪(黑龙江八一农垦大学附近养牛场),试验前粉碎大块牛粪,过筛去除其中的杂物。剩余牛粪保存于-20℃冰箱备用。经 pH 计(日本 HORIBA)测定新鲜牛粪的 pH 为 7.8,利用灼烧法测定牛粪 TS 含量为 17.89%,VS 含量为 16.95%,经碳氮元素分析仪(德国 Multi N/C 2100S)测定牛粪的 TN 含量为 1.99%,C/N 为 31.9:1。

1.2 试验装置

试验装置采用 1 L 螺口瓶,以碳纤维为载体构建搅拌式固定床反应器,利用橡胶塞密封。发酵罐顶部设有排气口和取样口,排气口通过橡胶管与 1 L 的集气袋相连,用于收集气体,通过 Geotech 公司的 GA2000 便携式沼气分析仪(Geotech Biogas Check)测定沼气中甲烷含量,通过恒温摇床(BS-1E,上海有限公司)控制发酵温度和转速,利用蠕动泵(BQ80S,北京五洲东方科技有限公司)循环进出料液调节 HRT。

1.3 试验方案

1.3.1 单因素试验

1.3.1.1 发酵料液初始 TS 对甲烷产量的影响

发酵罐装料量为 800 mL。设定初始料液浓度分别为 4%、6%、8%和 10%,初始 pH 为 7.5,添加尿素和蔗糖调节初始料液的 C/N 为 25:1,每个处理设置 4 个重复,将发酵装置置于转速为 120 r·min⁻¹ 恒温摇床上,35℃下厌氧发酵 30 d。使用便携式沼气分析仪测定产气量和甲烷含量。发酵料液装量和测定指标下同。

1.3.1.2 培养温度对产甲烷量的影响

设定发酵初始 TS 为 8% pH 值为 7.5 C/N 为

25:1,每个处理设置 4 个重复,分别置于 25、30、35 和 40℃的恒温摇床中,调节摇床转速为 120 r·min⁻¹,培养 30 d。

1.3.1.3 发酵料液初始碳氮比(C/N)对产甲烷量的影响

设定发酵初始 TS 为 8%,pH 值为 7.5,每个处理设置 4 个重复,调节初始料液的 C/N 为 20:1、25:1、30:1 和 35:1,35℃下,120 r·min⁻¹ 发酵 30 d。

1.3.1.4 搅拌转速对产甲烷量的影响

设定发酵初始 TS 为 8%,pH 值为 7.5 C/N 为 25:1,每个处理设置 4 个重复,设定搅拌速度为 80、100、120 和 150 r·min⁻¹,35℃下发酵 30 d。

1.3.1.5 初始 pH 值对产甲烷量的影响

设定发酵初始 TS 为 8% C/N 为 25:1,每个处理设置 4 个重复,调节发酵料液初始 pH 值分别为 6.0、6.5、7.0、7.5 和 8.0,35℃下,搅拌转速为 120 r·min⁻¹,培养 30 d。

1.3.1.6 HRT 对甲烷产量的影响

设定发酵初始 TS 为 8% pH 值为 7.5 C/N 为 25:1,每个处理设置 4 个重复,HRT 分别设定为 9、15、21 和 27 d,利用蠕动泵循环进出料液调节 HRT,每个处理发酵时间为两个循环,35℃下,搅拌转速为 120 r·min⁻¹,培养 30 d。

1.3.2 响应面和满意度函数分析

根据单因素试验结果,选择对发酵过程中甲烷产量具有显著影响的因素,采用 Design-Expert 7.0 软件中 4 因素 5 水平的 CCD (Central composite design)构建响应曲面模型,选择 TS、HRT、温度和 C/N 四个显著性因素作为自变量设计分析。响应变量设定为 TS、甲烷产率(Y1)和甲烷产量(Y2),自变量设定为 TS(X1)、HRT(X2)、C/N(X3)和温度(X4),其中变量的取值范围参考上述的单因素试验结果,分别设定 X1 为(2%、4%、6%、8%、10%),X2 为(4 d、10 d、16 d、22 d、28 d),X3 为(20、25、30、35、40)和 X4(25℃、30℃、35℃、40℃、45℃)。并以编码值-2、-1、0、+1、+2 分别代表自变量不同水平。

试验采用最小二乘法拟合的二次多项式方程来预测自变量与因变量的关系,得到多元二次回归方程见(1)。

$$Y_1 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 - b_3X_3 + b_4X_4 - b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 - b_{14}X_1X_4 + b_{13}X_2X_3 - b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 - b_{11}X_1^2 - b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 \quad (1)$$

其中 b_0 是参数项 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 是线性系数 b_{12} 、 b_{13} 、 b_{14} 、 b_{23} 、 b_{24} 、 b_{34} 是交互项系数 b_{11} 、 b_{22} 、 b_{33} 、 b_{44} 是二次项系数。试验设计共有 30 个试验点,试验参数变

化对试验结果的影响有 24 个析因点 ,有 6 个试验条件相同的中心点 ,用来评估模型的纯误差。

在沼气发酵工艺设计的响应曲面模型中含有 Y1 和 Y2 两个响应变量 ,而且这两个变量的最优值所对应的最佳试验条件不同 ,所以采用 Design-Expert 7.0 软件中的满意度函数 (Desirability) 分析方法 ,对该发酵工艺进行二响应、多变量的同时优化。此方法将每个响应转换成满意度函数 ,统一对各变量与 TS 甲烷产率和日产甲烷量的影响进行评价 ,并对模型的可靠性进行验证试验。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 不同初始条件对甲烷产率的影响

表 1 结果显示 ,TS 甲烷产率随着料液浓度的增加先上升后下降 ,当 TS 为 4% 时 ,TS 甲烷产率最低

(17.73 mL·g⁻¹) ;当 TS 为 8% 时 ,TS 甲烷产率最高 (33.00 mL·g⁻¹)。各个处理间有显著差异(R²<0.000 1) ,说明底物浓度与甲烷产率相关显著。起始 pH 值 (6.0~8.0)、搅拌转速对 TS 甲烷产率影响差异性均不显著。pH 值为 7.5 时 ,TS 甲烷产率最高 ,为 36.97 mL·g⁻¹。而试验发现 ,适度的搅拌有利于发酵料液充分混合 ,减少出现堵塞和喷罐的现象。随着 C/N 的增加 ,TS 甲烷产率先升高后下降 ,除 C/N 为 20:1 和 25:1 的差异不显著外 ,各处理间差异性显著 ,C/N 为 25:1 时 ,TS 甲烷产率最高。TS 甲烷产率随温度的增加先升高后略有下降 ,当温度达到 30 ℃~35 ℃时 ,TS 甲烷产率最高 ,达到了 37.25 mL·g⁻¹ ,说明适宜的温度有利于甲烷的产生 ,温度过高和过低都会影响甲烷的生成。TS 甲烷产率随 HRT 先升高后降低 ,各个处理间差异显著 ,当 HRT 为 15 d 时 ,TS 甲烷产率最高。

根据单因素试验结果 ,以 TS 甲烷产率作为衡量

表 1 单因素试验结果及方差分析

Table1 Single factor test results and variance test

影响因素	水平操作	TS 甲烷产率/ mL·g ⁻¹	F 值	P 值
料液浓度/%	4	17.73±0.36	153.43	<0.001
	6	23.27±0.68		
	8	33.00±0.94		
	10	30.71±0.83		
pH	6.5	34.36±0.71	0.13	0.971
	7.0	33.72±0.17		
	7.5	36.97±0.68		
	8.0	35.26±0.09		
搅拌转速/rpm	80	34.80±0.93	2.89	0.136
	100	36.06±0.39		
	120	36.08±0.27		
	150	35.69±1.36		
碳氮比	20:1	31.73±1.69	5.57	0.043
	25:1	34.44±3.01		
	30:1	29.21±1.84		
	35:1	26.29±0.76		
温度/℃	25	20.59±0.02	106.47	<0.001
	30	37.25±0.74		
	35	36.93±0.68		
	40	34.15±0.25		
HRT/d	9	27.82±0.66	10.36	0.005
	15	36.84±1.83		
	21	31.67±1.74		
	27	26.79±2.21		

注 :表示显著(P<0.05) ,表示极显著(P<0.001)

指标 ,用 SPASS 软件进行方差分析。结果显示 ,影响 TS 甲烷产率显著的因素为浓度、碳氮比、温度和水力

停留时间。其中 ,浓度和温度达到极显著水平 ,C/N 和 HRT 达到显著水平。pH 值和搅拌转速影响较小 ,未达到显著水平。

2.2 响应曲面优化

以产气率和甲烷产量作为评价沼气发酵效果的指标 ,选择对甲烷产率影响显著的 4 个因素(TS、C/N、HRT 和温度)进行优化 ,产气率和甲烷产量越高 ,沼气发酵效果越理想。为了得到最优化的实验条件和结果 ,建立响应变量与自变量之间的函数关系 ,构建

特定的响应曲面图 ,找出最佳响应值及其对应自变量的取值范围。

2.2.1 实验设计及响应曲面模型的方差分析

根据 CCD 试验设计 ,共进行了 30 组发酵实验 ,试验方案和结果见表 2。对结果进行多元回归拟合 ,得出 TS (X1 ,%)、HRT (X2 ,d)、C/N (X3) 和温度 (X4 ,℃)与 TS 甲烷产率(Y1 ,mL·g⁻¹)和日产甲烷量 (Y2 ,mL)的二次多项式回归方程 ,见公如(2)和公式(3)。

$$Y_1 =19.36 +2.5X_1 +0.17X_2 -0.86X_3 +0.45X_4 -$$

表 2 CCD 设计方案及试验结果
Table 2 Design matrix and results of central composite experiment design

编号	料液浓度 /%	水力停留时间 /d	碳氮比	温度 /℃	TS 甲烷产率 /mL·g ⁻¹	日产甲烷量 /mL
1	6	16	30	35	30.5	82.0
2	10	16	30	35	30.3	81.0
3	4	22	25	40	29.2	55.7
4	6	16	30	25	29.0	72.1
5	6	16	30	45	29.7	78.9
6	2	16	30	35	19.3	37.0
7	6	4	30	35	26.6	117.0
8	8	22	25	40	30.2	58.8
9	8	10	25	30	31.8	139.2
10	8	10	25	40	32.3	142.4
11	4	10	25	30	24.3	91.2
12	4	10	25	40	26.8	107.2
13	6	16	30	35	29.1	80.3
14	6	16	40	35	28.8	75.0
15	6	16	20	35	31.0	83.8
16	6	16	30	35	29.1	87.2
17	8	22	25	30	30.5	59.6
18	8	10	35	30	29.3	123.2
19	8	10	35	40	30.1	128.3
20	6	16	30	35	28.2	68.6
21	6	16	30	35	29.1	76.5
22	4	10	35	40	24.3	91.2
23	8	22	35	40	29.5	56.7
24	4	22	35	30	23.5	39.3
25	6	16	30	35	30.2	80.9
26	6	28	30	35	26.5	42.4
27	8	22	35	30	29.5	56.7
28	4	10	35	30	23.3	84.8
29	4	22	35	40	26.5	48.0
30	4	22	25	30	27.2	50.1

$$0.72X_1X_2 +0.22X_1X_3 -0.46X_1X_4 +7.5E -003X_2X_3 - 0.011X_2X_4 +0.011X_3X_4 -1.09X_1^2 -0.64X_2^2 +0.18X_3^2 +$$

$0.066X_3^2$ (2)

$Y_2 = 79.25 + 11.9X_1 - 34.65X_2 - 3.9X_3 + 2.41X_4 - 7.5X_1X_2 + 0.37X_1X_3 - 1.83X_1X_4 + 1.81X_2X_3 - 1.08X_2X_4 - 0.23X_3X_4 - 5.5X_1^2 + 12.17X_2^2 - 0.4X_3^2 - 1.37X_4^2$ (3)

TS 甲烷产率和日产甲烷量模型的方差分析 (ANOVA)结果见表 3 ,TS 甲烷产率和日产甲烷量的失拟项分别为 0.531 4 和 0.131 5 ,失拟程度都不显著 ,说明此模型可以用来预测和分析厌氧发酵 TS 甲烷产率

和日产甲烷产量。根据试验数据建立的二次多项式数学模型具有显著性 ,TS 甲烷产率的 R^2 为 0.953 5 ,日产甲烷量的 R^2 值为 0.966 80 ,说明预测值和试验值之间具有很好的拟合度。TS 甲烷产率和日产甲烷量的 Adj R2(调整确定系数)分别为 0.910 1 和 0.938 1 ,这两个模型方程分别能解释 91.01%的 TS 甲烷产率响应值变化和 93.81%的日产甲烷量响应值变化。

由表 4 可知 ,在 Y1 模型中 ,一次项 X_1 对 TS 甲

表 3 响应曲面模型的方差分析

Table 3 ANOVA of response surface quadratic model

响应值	方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F
TS 甲烷产率	模型	232.01	14	16.57	21.98	<0.001
	残差	11.31	15	0.75		
	失拟	7.56	10	0.76	1.01	0.531 4
	误差	3.75	5	0.75		
	总和	243.32	29			
日产甲烷量	模型	39 442.92	14	2 817.35	32.38	<0.001
	残差	1 305.16	15	87.01		
	失拟	1 108.97	10	110.90	2.83	0.131 5
	误差	196.19	5	39.24		
	总和	40 748.08	29			

表 4 响应曲面模型的回归系数与显著性水平

Table 4 Regression coefficients and their significance level for response surface quadratic model

模型系数	TS 甲烷产率		日产甲烷量	
	Y_1	P 值	Y_2	P 值
b_0	19.36	<0.001	79.25	<0.001
b_1	2.50	<0.001	11.90	<0.001
b_2	0.17	0.343	-34.65	<0.001
b_3	-0.86	0.002	-3.90	0.058
b_4	0.45	0.022	2.41	0.224
b_1b_2	-0.72	0.004	-7.50	0.005
b_1b_4	-0.46	0.049	-1.83	0.444
b_2b_4	-0.01	0.959	-1.08	0.649
b_1^2	-1.09	<0.001	-5.50	0.007
b_2^2	-0.65	0.001	12.17	<0.001
b_3^2	0.18	0.282	-0.40	0.825
b_4^2	0.066	0.696	-1.37	0.452

注 :表示显著($P<0.05$) ,表示极显著($P<0.001$)。

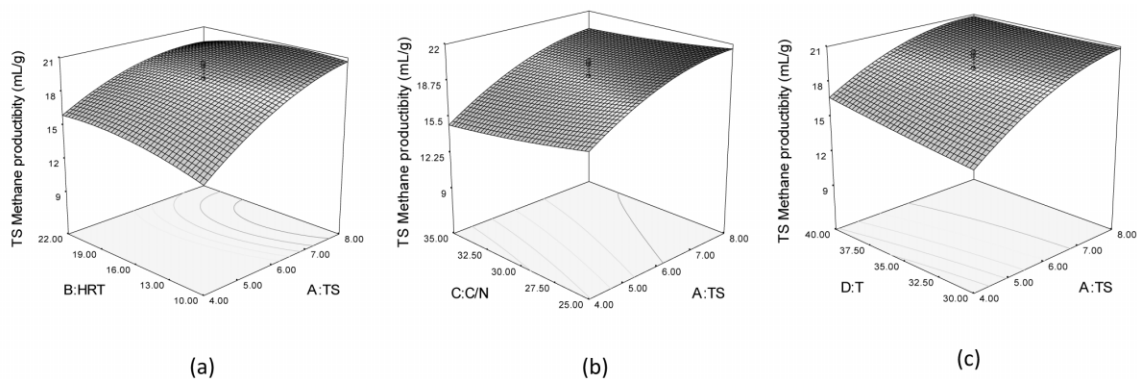
烷产率的线性效应极显著 , X_3 和 X_4 对 TS 甲烷产率响应显著 , X_2 对其相应不显著。二次项 X_{12} 对 TS 甲烷产率的曲面效应极显著 , X_{22} 对 TS 甲烷产率效应显著。交互作用对 TS 甲烷产率的影响不大 ,表明各因素对 TS 甲烷产率的影响不是简单的线性关系。结合 TS 甲烷产率的响应曲面图(图 1) (a)中可见 ,在

C/N 为 30、温度为 35 ℃、编码值 0 的情况下 ,TS 甲烷产率(Y_1)随 TS(X_1)的增加而增加 ,说明两者呈正相关性。HRT(X_2) 在范围内呈二次方程曲线变化 ,而对 TS 甲烷产率的影响不明显。TS 与 HTR 的交互性显著。由(b)可知 ,在 HRT 为 16 d、温度为 35 ℃时 ,C/N 对 TS 甲烷产率的影响也较大 ,TS 与 C/N 交互作

用不显著。在(c)中, HRT 16 d、C/N 为 30 时, TS 甲烷产率随温度的增加而增加, 影响显著, 温度与 TS 的交互性显著。结合回归方程表 5 可知, X_1 的系数为

2.5。对影响 TS 甲烷产率的因素主次顺序为: TS>C/N>温度>HTR。

在 Y2 模型中, 一次项 X_1 和 X_2 对日产甲烷量



C/N 30:1 和温度 35 °C 时, TS 与 HRT 对 TS 甲烷产率的影响(a);

HRT 16 d 和温度 35 °C 时, TS 与 C/N 对 TS 甲烷产率的影响(b);

HRT 16 d 和 C/N 30:1 时, TS 和温度对 TS 甲烷产率的影响(c)

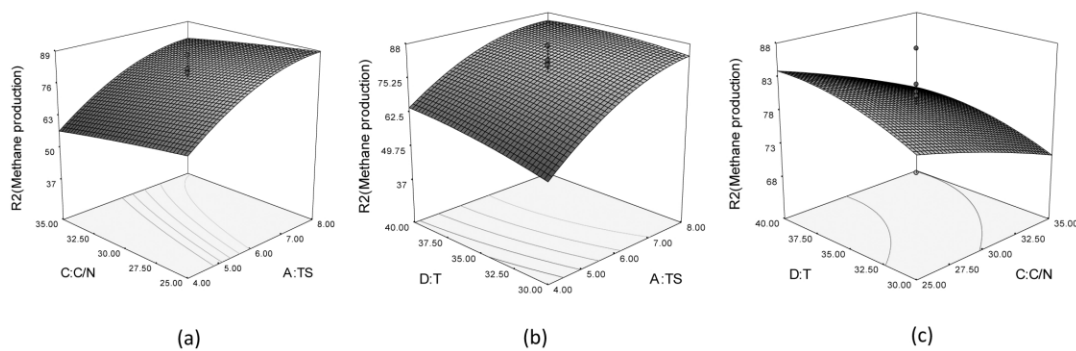
图 1 TS 甲烷产率的曲面响应图

Fig. 1 The RSM plots of TS methane yield

的线性效应极显著, 二次项 X_{22} 对日产甲烷量的响应极显著, 各因素的交互作用对日产甲烷量的影响也不大。日产甲烷量的响应曲面图如图 2 所示。(a) HRT 为 16 d、温度为 35 °C 时, 日产甲烷量随 TS 的增加而增加, 随 C/N 的增加而减小, TS 和 C/N 对日产甲烷量的影响极显著, C/N 与 TS 对日产甲烷量的交互作用不显著。由(b)可见, 在 HRT 为 16 d、C/N 为 30

时, 温度的变化对日产甲烷量的影响不显著, TS 与温度的交互作用也不显著。由(c)可知, 在 TS 为 6%、HRT 为 16 d 时, 日产甲烷量随温度的增加先增加后减小, 可见适宜的发酵温度有利于甲烷的产生。通过结合回归方程表 5, 在 Y2 模型中, 影响日产甲烷量的因素的主次顺序为: HRT>TS>C/N>温度。

2.3 满意度函数优化模型



HRT 16 d 和温度 35 °C 时, TS 与 C/N 对日产甲烷量的影响(a);

HRT 16 d 和 C/N 30:1 时, TS 与温度对日产甲烷量的影响(b);

TS 6% 和 HRT 16 d 时, C/N 和温度对日产甲烷量的影响(c)。

图 2 日产甲烷量的曲面响应图

Fig. 2 The RSM plots of methane yield per day

利用 Design-Expert 7.0 软件 Desirability 函数对 Y1 和 Y2 两个响应变量同时进行优化, 优化的试验条件包括 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 。每个自变量(X_i)和响应

量(Y_i)的重要性的取值范围为 1~5, μ 值一般设定为软件默认值。实验设定的各自变量参数条件 X_i 和响应值 Y_i 的范围见表 5。由表可知, 各响应值与参数值

的高低限都是设定为实验的默认值 ,因为 TS 甲烷产率是最关键的评价指标 ,将其重要值设为最高值 5 ,甲烷产量的重要值为 4 ,其余各项均为默认值 3。由满意度函数优化处理后得到的各变量的 di 值

表 5 满意度函数的变量范围
Table 5 The lower limit and upper limit values of the individual response of desirability

变量	目标	最低限	最高限	底限权重	高限权重	重要值
料液浓度/%	全区间	4	8	1	1	3
水力停留时间/d	全区间	10	22	1	1	3
碳氮比	全区间	25	30	1	1	3
温度/℃	全区间	30	40	1	1	3
TS 甲烷产率/mL·g ⁻¹	最大	5	50	1	1	5
日产甲烷量/mL	最大	20	500	1	1	4

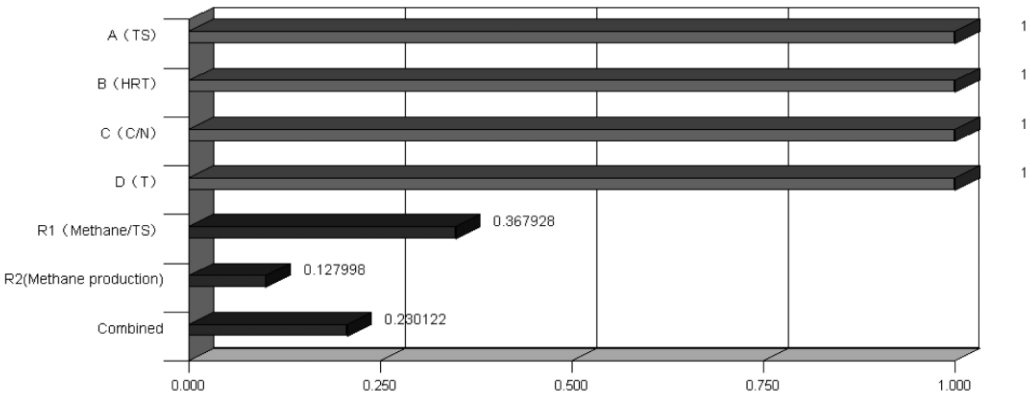


图 3 各变量的 di 及总体满意度 D 的条形图

Fig.3 Bar graph representing individual desirability of all response in correspondence with combined desirability (D)

与 D 值见图 3 ,可知 TS 甲烷产率的 di 值为 0.367 9 ,日产甲烷量的 di 值为 0.128 0 ,而其余各参数的 di 值均为 1 ,系统的总体满意度值 D 为 0.230 1。Design-Expert 7.0 软件给出的 Desirability 函数的优化方案是 :TS 8% ,HRT 10 d ,温度为 39 ℃ ,C/N 25:1。

2.4 优化处理试验验证

根据满意度函数优化的回归模型所预测出的最优条件 ,进行 3 次牛粪厌氧沼气发酵试验验证优化模型的可靠度和准确度 ,试验结果得出 :平均 TS 甲烷产率为 38.43 mL·g⁻¹ ,平均日产甲烷量为 188.2 mL ,预测值与试验值基本吻合 ,二者偏差 2.27%。由此说明响应面与满意度函数分析法相结合可以用来优化以牛粪为原料的发酵产沼气工艺。

3 讨论与结论

研究表明 ,固定床载体能将大量厌氧微生物固定 ,使反应器内保持有较高浓度的活性污泥 ,从而有

效提高反应器的运行性能^[6]。TS、温度、C/N、HRT、pH 等条件能在不同程度上影响甲烷的产出^[8-13] ,试验研究表明 ,发酵温度较低时 ,系统启动较慢 ,启动需时较长 ,TS 甲烷产率低 ,但温度过高也会抑制甲烷产出 ,TS 甲烷产率随着发酵料液浓度的增加先上升后下降 ,宋籽霖等^[14]的研究也表明 ,发酵料液浓度并不是越高越好。单因素试验中 ,pH 和搅拌转速对 TS 甲烷产率影响不显著 ,但 Khursheed.K 研究表明 ,适度的搅拌能提高产气效率 ,发酵浓度增加 ,效果越明显^[15]。分析原因 ,可能是因为应用的试验材料不同所致。

在牛粪厌氧发酵条件研究结果中表明 ,进料 TS 和 C/N 是影响牛粪厌氧消化产气效果的重要因素 ,其应用响应面法同时优化沼气产率、甲烷含量和 COD 去除率 ,筛选出三者共同的最佳条件为 TS 6.49% ,温度 35.37 ℃ ,C/N 25.36:1^[16]。试验对 TS 甲烷产率和日产甲烷量两个响应变量进行优化 ,得出对 TS 甲烷产率影响最大的两个因素是底物浓度 ,其次是 C/N。得出最终优化方案 :TS 8% ,温度 39 ℃ ,C/N 25:1 ,HRT 10 d ,与上述优化条件基本一致。但研究的

日产甲烷量更高,产甲烷效果较好可能与采用的搅拌式固定床反应器有关。

固定床对产甲烷微生物具有截留作用,适度的搅拌使发酵原料与微生物混合均匀,增加了物料与微生物的接触机会,从而提高反应效率。

参考文献:

- [1] Marlon J R ,Bartlein P J ,Daniau A ,et al. Global biomass burning a synthesis and review of holocene paleofire records and their controls [J]. Quaternary Science Reviews 2013(65) :5-25.
- [2] Scully S ,Gavin C O ,Flaherty V. Anaerobic biological treatment of phenol at 9.5~15℃ in an expanded granular sludge bed (EGSB)-based bioreactor [J]. Water Res , 2006 ,40 (20) :3737-3744.
- [3] Boulamanti A K ,Maglio S D ,Giuntoli J ,et al. Influence of different practices on biogas sustainability [J]. Biomass and Bioenergy 2013(53) :149-161.
- [4] 孙宇,王彦杰,王伟东.牛粪酸化处理及全混式固定床沼气发酵工艺[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2013.
- [5] 林长松,袁旭峰,王小芬,等.HRT对固定床厌氧反应器运行效果的影响[J].环境工程学报,2010(3):497-502.
- [6] 郭希娟,马萍,刘远洋.响应面法优化微波辅助提取蒲公英多糖工艺的研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2014,26(3):40-44.
- [7] Wang G ,Mu Y ,Yu H Q. Response surface analysis to evaluate the influence of pH ,temperature and substrate concentration on the acidogenesis of sucrose-rich wastewater [J].Biochemical Engineering Journal 2005 ,23 (2) :175-184.
- [8] Boulamanti A K ,Maglio S D ,Giuntoli J ,et al. Influence of different practices on biogas sustainability[J]. Biomass and Bioenergy 2013(53) :149-161.
- [9] Chastain J P ,Camberato J J ,Skewes P. Poultry manure production and nutrient content [J]. Clemson Extension , 2004 ,106(16) :952-1657.
- [10] 林端旭,李润东,Raninger B,等.TS对牛粪与有机垃圾联合厌氧消化特性的影响研究[J].可再生能源,2011,29(4):40-47.
- [11] Liu T ,Sung S.Ammonia Inhibition on thermophilic acetlastic methanogens [J]. Water Sci Technol 2002 ,45 (10) :113-120.
- [12] Bouallagui H ,Lahdheb H ,Romdan E. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with Co-substrates Addition [J]. Environ Manage 2009 ,90(5) :1844-1849.
- [13] Deublein D ,Steinhauser A. Biogas from waste and renewable sources an introduction [J]. Weinheim 2008 ,10 (5) :844-849.
- [14] 宋籽霖,李轶冰,杨改河,等.温度及总固体浓度对粪秆混合发酵产气特性的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):260-265.
- [15] Khursheed K ,Rebecca H ,Thomas K ,et al. Anaerobic digestion of animal waste ,waste strength versus impact of mixing[J]. Bioresource Technology 2005 ,96(16) :1771-1781.
- [16] 乔小珊,李希希,付茂梅,等.响应面法分析优化牛粪厌氧发酵工艺参数[J].环境工程学报,2014(8):3395-3402.