

机器学习强化干式厌氧消化工艺处理 有机固废的工程实践

王 玥^{1,2}, 李阳青^{1,2}, 张云霞^{1,2}, 常宝军^{1,2}, 于 淼^{1,2}

(1. 天津市市政工程设计研究总院有限公司, 天津市 300000; 2. 天津市基础设施耐久性企业重点实验室, 天津市 300000)

摘 要: 以西南地区某工程为例, 提出面向厨余垃圾的机器学习强化的干式厌氧消化工艺, 介绍了总体工艺技术框架、厌氧消化及脱水工艺流程、关键设计指标及主要设备规格。建立以挥发性脂肪酸与总碱度为核心的双因子状态评估模型, 采用在线式最小二乘支持向量机算法构建数据驱动的状态预测模型, 对高风险的调试阶段进行指标实时预测, 强化干式厌氧消化工艺的抗风险能力, 数据驱动模型的均方差为0.003 4。实际运行数据表明, 该工艺在有机负荷、有机质降解率、沼渣与原料比方面表现良好。

关键词: 干式厌氧消化工艺; 厌氧消化; 厨余垃圾; 支持向量机; 机器学习; 性能评价

中图分类号: X705

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0116-05

Engineering Practice of Dry Anaerobic Digestion Process for Organic Solid Waste Treatment by Machine Learning Reinforcement

WANG Yue^{1,2}, LI Yangqing^{1,2}, ZHANG Yunxia^{1,2}, CHANG Baojun^{1,2}, YU Miao^{1,2}

(1. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300000, China; 2. Tianjin Enterprise Key Laboratory of Infrastructure Durability, Tianjin 300000, China)

Abstract: Taking a project in the southwest region as an example, a machine learning enhanced dry anaerobic digestion process for kitchen waste is proposed. The overall technological framework, anaerobic digestion and dewatering process flow, key design indicators and main equipment specifications are introduced. A two-factor state evaluation model centered on volatile fatty acids and total alkalinity is established. An online least squares support vector machine algorithm is adopted to construct a data-driven state prediction model, which predicts the indicators in real time during the high-risk commissioning stage, thereby enhancing the risk resistance of the dry anaerobic digestion process. The mean square error of the data-driven model is 0.0034. The actual operation data show that this process performs well in terms of organic loading, organic matter degradation rate, and the ratio of biogas residue to raw material.

Keywords: dry anaerobic digestion process; anaerobic digestion; kitchen waste; support vector machine; machine learning; performance evaluation

0 引 言

随着垃圾分类工作深入推进,我国厨余垃圾在产生量及分出率两个方面均呈现大幅增长。根据统计数据,2021年城镇生活垃圾清运量达到31 150万t,厨余垃圾的产量约为12 600万t,相较于垃圾分类工作实施前,厨余垃圾的分出率同比增长约42.6%。厨余垃圾的末端处置及资源化利用已经成为垃圾分类工作高质量推进的迫切需求^[1-2]。

由于我国幅员辽阔,各地区经济发展和饮食习

惯差异化较大,厨余垃圾成分复杂,具有含水量高、有机质含量高、营养元素含量丰富等特点^[3-4]。

目前,厨余垃圾资源化的主要方式为生物处理技术及热处理技术^[5]。生物处理技术利用微生物及昆虫等作为转化载体,实现厨余垃圾向沼气、肥料及蛋白等高值再生产品的转化,主要包括厌氧消化技术、好氧发酵技术及昆虫养殖处置技术^[6-8];热处理技术主要利用厨余垃圾的自身热值及有机组分,将其转化为热能、生物炭、腐殖酸等再生产品,主要包括焚烧技术、热解技术、水热处理技术等^[9-10]。厌氧消化因具有能源工质回收率高、规模化效应显著等特点^[11],逐步成为了我国厨余垃圾处理项目的主流技术,在已建项目中占比达76.1%^[12]。在已建成的

收稿日期: 2025-12-23

作者简介: 王玥(1989—),男,硕士,高级工程师,从事给排水及环境工程的设计与研究工作。

项目中,厌氧消化技术主要分为湿式及干式两种模式,其在经济效益与环境效益方面各具特色,但干式厌氧因沼液产生量少,从全生命周期的碳排放角度考虑,更具碳减排优势,更有利于推动环境产业全链条实现“双碳”目标^[13]。相对应地,干式厌氧消化工艺因进料含固率高、有机负荷高,且设计温度较高,因过负荷及欠负荷造成生物体系崩溃的风险较高。

本文提出了面向厨余垃圾的机器学习强化的干式厌氧消化工艺技术路线,在西南某大型厨余垃圾处理项目中应用实施,取得了良好的运行效果,同时,针对干式厌氧调试阶段的高酸化风险,提出基于递推最小二乘支持向量机的智能化厌氧消化状态评估模型,对调试过程关键指标有效建模并实时预测,保障调试过程的稳定性。本文首先介绍了项目总体设计方案,提出干式厌氧消化处置的总体工艺流程,阐述了厌氧消化系统的详细设计;其次提出了基于支持向量机的干式厌氧状态评估模型;最后介绍了项目运行的实际情况。其经验可为同类项目的设计与建设提供参考。

1 工艺设计

1.1 原料特征

本项目进场原料主要为服务范围内的家庭厨余垃圾,根据前期调研,主要成分如表1所示。

表1 厨余垃圾的主要成分

序号	成分	占比/%
1	易腐类	40.9
2	软杂质	27.1
3	硬杂质	18.9
4	有害垃圾	2.5
5	其他(卫生用品)	2.4
6	混合类(小于10 mm)垃圾	4.1
7	大件、建筑垃圾	4.1
合计		100

1.2 工艺流程

进场的厨余垃圾需要经预处理以满足干式厌氧消化的进料条件。本项目预处理采用“单级破碎+多级筛分”工艺。

厨余垃圾依次通过板链给料机、破袋破碎机、滚筒筛、弹跳筛及螺旋挤压机实现对杂物的去除及物料粒径的控制,穿插设置多个磁选装置对铁磁类物质进行回收,最终形成满足干式厌氧消化进料条件的有机原料,主要指标见表2。

本项目设计两条平行生产线,单条生产线处理

表2 干式厌氧消化原料条件

序号	名称	数值
1	含固率/%	25~35
2	粒径/mm	≤50
3	有机质含量/%	≥60

能力为100 t/d。经预处理后的有机原料进入“卧式推流干式厌氧消化”系统,依次经过料坑暂存、抓斗上料、进料仓暂存、螺旋输送运至换料箱进行充分混合、均质,然后进入厌氧消化罐。经过消化的物料进入三级脱水系统进行固液分离:在消化罐中经过消化的剩余物料首先进入振动筛机进行振动筛分脱水,沼液进入沼液暂存池,沼渣进入螺杆挤压机进行挤压脱水;经挤压脱水后,固渣外运处置,剩余液相进入卧式离心机;离心处理后的沼渣汇总外运处置,液相进入厂区污水处理站集中处理。厌氧消化产生沼气进入厂区沼气净化系统净化处理后,用于沼气发电。工艺流程详见图1。

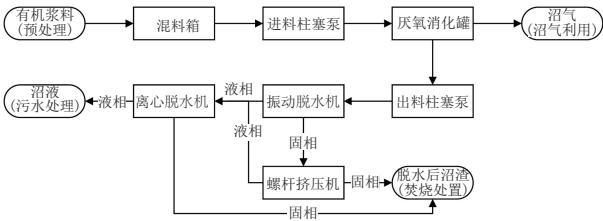


图1 干式厌氧消化及脱水系统工艺流程图

2 详细设计

2.1 进料单元

进料系统由进料抓斗、进料仓、螺旋、混料箱、进料柱塞泵构成。考虑到分类初期厨余垃圾成分相对较差,杂质偏多,故采用适应能力更强的抓斗进料方式。物料经抓斗抓至进料仓内,通过底部双螺旋输送至混料箱内,在混料箱内完成称重并与回流消化液混合,通过柱塞泵输送至厌氧消化罐中。主要设计参数如下:

- (1)抓斗起重机: $V=5\text{ m}^3$ 。
- (2)进料仓: $V=100\text{ m}^3$,材质为304不锈钢,输送方式为 $\phi 500$ 双螺旋。
- (3)混料箱: $V=2.5\text{ m}^3$,搅拌轴为电机驱动双轴搅拌,功率为 $2\times 7.5\text{ kW}$ 。
- (4)柱塞泵:处理能力为 10 t/h ,驱动方式为液压驱动。
- (5)进料模式:24 h连续进料。

2.2 厌氧消化罐

设置两座有效容积为 $2\,250\text{ m}^3$ 的卧式厌氧消化

罐。厌氧罐体为卧式钢混结构罐体,底部配有圆弧罐底,通过与搅拌器配合能达到无死角搅拌。物料以推流式方式,持续从罐体进料端往出料端移动。在罐顶均匀分布4个取样点,用于取样分析,时刻监测罐内的生物特性。主要设计参数如下:

- (1)有效容积:2 250 m³。
- (2)进料含固率:约25%。
- (3)水力停留时间:约16 d。
- (4)容积有机负荷:约7.2 kg VS/(m³·d)。
- (5)有机质降解率(以VS计):约75%。
- (6)VS(分解)产气率:≥470 L/kg VS。

为确保搅拌效果,厌氧消化罐内设计一套双端悬浮卧式单轴搅拌器,通过变桨距交替桨叶设计,完成罐内物料的搅拌、推动及浮渣破除,并实现厌氧消化反应沿物料流动方向同步进行,大幅度提高反应效能。搅拌系统主要设计参数如下:

- (1)长度约37 m,搅拌半径约4.125 m,功率约为18.5 kW。
- (2)转速:0.3 r/min。

为确保厌氧消化罐罐内物料温度稳定,配置梯级温度调节系统,本项目采用三级加热系统,确保物料在高温厌氧的情况下,系统温度误差在±1℃以内。首先,在物料管道设置夹套式换热装置,利用高温将物料温度升到35℃左右;其次,在厌氧消化罐内沿轴向布置4组电加热枪,将物料温度短时间内迅速加热至42℃;第三,在罐底前、中、后段安装有大面积的盘管加热系统,对罐内进行保温:

- (1)消化温度:(42±1)℃。
- (2)进料套管换热器物料出口温度:35℃。
- (3)电加热枪设定温度:42℃。
- (4)盘管换热系统保温设定温度:42℃。

2.3 出料及回流单元

为确保底部无机类物料顺利排出,避免下沉物在罐内累积,厌氧消化罐出料口位于罐体尾端底部,当物料推送至出料端口时,由柱塞泵将物料强制排出,全密闭输送至脱水车间。主要设计参数如下:

- (1)柱塞泵处理能力:10 t/h,驱动方式为液压驱动。
- (2)出料模式:24 h连续出料。

厌氧消化罐尾部设置了循环回流泵,将尾端剩余消化物回流至前端,与新鲜物料混合,保持罐内菌种强度,提升厌氧效能。主要设计参数如下:

- (1)柱塞泵处理能力:10 t/h,驱动方式为液压驱动。

- (2)回流模式:可调节的间歇回流。

2.4 脱水单元

消化残留物通过出料柱塞泵送至脱水系统,脱水工艺设置为三级阶梯脱水:消化后残留物依次通过振动筛、螺杆挤压机完成固液分离,分离后固渣外运处置,液相进入离心脱水机,经絮凝剂改性后,最终完成高速分离。主要设计参数如下:

- 脱水后固渣含固率:≥25%;
剩余沼液含固率:≤1%。

3 数据驱动状态评估模型

3.1 数学模型

支持向量机(support vector machine, SVM)是一种基于数据统计的机器学习理论,由Vapnik等人提出^[14]。得益于其优异的小样本学习能力与泛化性能,该方法已在过程建模、数据挖掘、模式识别及故障诊断等多个学术与工程领域得到广泛应用。从本质上说,支持向量机回归算法的求解就是解决在不等式约束下二次规划问题,其计算的复杂度随着数据的增加而指数增长,所以并不适应于实时的在线建模与控制。为了简化支持向量机的计算难度,Suykens等人提出最小二乘支持向量机回归算法(least square support vector machine, LSSVM)^[15],该方法将原有优化问题中的不等式约束转化为等式约束,利用最小二乘方法求解,降低计算维度^[16]。本项目利用递推最小二乘支持向量回归算法^[17]建立干式厌氧消化状态评估模型。

挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acid, VFA)与碱度(Alkalinity, ALK)的比值广泛用于预警厌氧消化系统酸化(比值过高)或氨化(比值过低)的风险^[18-19]。当VFA/ALK>0.3时,表明厌氧消化系统能力过饱和;当VFA/ALK为0.1~0.3时,表明厌氧消化系统能力适宜。目前,在实际工程项目现场,通常采用实验室滴定法测量VFA及ALK^[20],测量程序复杂且周期较长,难以有效预警干式厌氧调试的酸化风险。本文利用前述递推式最小二乘支持向量回归算法建立以数据驱动的状态预测模型,通过流量、温度、液位、pH等可测控制变量结合机器学习模型对VFA/ALK实时预测,实现厌氧系统失稳状态的前置预警,全面降低调试风险。

首先定义过程输入输出数据集合,根据厌氧消化过程反应机理,定义VFA/ALK为模型输出输出变量 y ,将厨余垃圾进料流量、启动结构物(木屑)投加

流量、接种物(沼渣)投加流量、消化罐液位、消化罐温度、消化罐pH作为控制变量 x ,建立多变量最小二乘支持向量机数据模型。样本数据结合如下式:

$$(x^1, y^1), (x^2, y^2), \dots, (x^r, y^r)$$

其中:

$$x^i \in R^6, y^i \in R^1$$

即样本数据的输入维数为6,输出维数为1,数据长度为 r 。

利用非线性核函数 $\phi(\cdot)$ 将样本数据集映射到高维数据空间内,构成高维线性函数:

$$f_i(x) = w_i^T \phi(x) + b_i$$

其中:

$$i = 1, 2, \dots, m, w \in R^d$$

根据最小二乘支持向量机理论中的结构风险最小化,构建在等式约束下的最优化求解问题,利用Lagrange方法及KKT(karush kuhn tucker)条件进行求解,得到模型输出为:

$$Y = AK + B$$

其中, K 矩阵形式如下:

$$K = \begin{bmatrix} k(x^1, x^1) & \cdots & k(x^1, x^r) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x^r, x^1) & \cdots & k(x^r, x^r) \end{bmatrix},$$

$$k(x^i, x^j) = \phi(x^i) \phi(x^j)$$

$k(x_i, x_j)$ 为核函数,本项目选择为RBF核函数:

$$k(x_i, x) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\sigma^2}\right)$$

A 和 B 为最小二乘支持向量机的拟合参数,利用递归最小二乘方法(recursive least square, RLS)求解。

3.2 模型评价

本文将前述数据模型应用于项目启动调试阶段,对厌氧消化系统状态指标进行预测,得到预测结果,如图2所示。

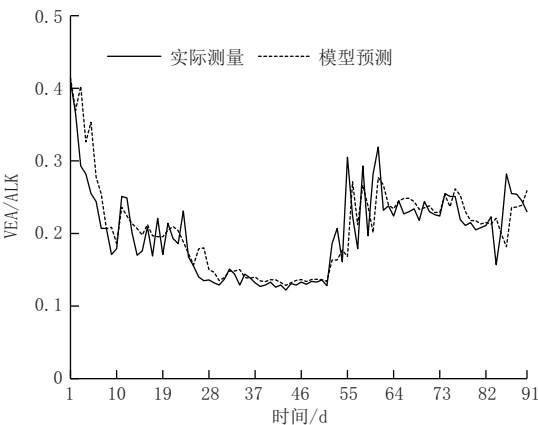


图2 模型预测与实际测量对比图

模型均方差为:

$$E_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y(i) - \hat{y}(i))^2}{N}} = 0.0034$$

根据图2中所表征的数据拟合趋势及模型均方差,可以看出基于支持向量机的数据模型实现了对干式厌氧消化过程状态评估指标VFA/ALK的有效建模及预测。

4 运行分析

项目自2023年启动调试,关键运行数据如图3、图4所示。

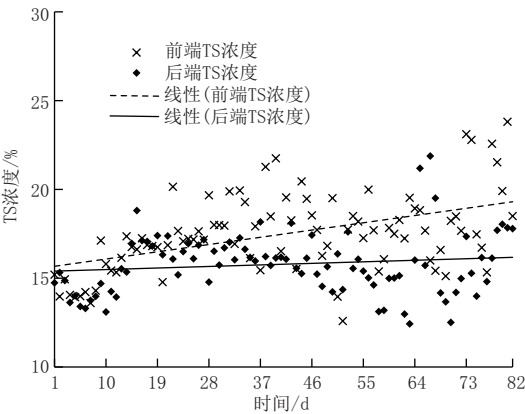


图3 干式厌氧前后端TS浓度变化图

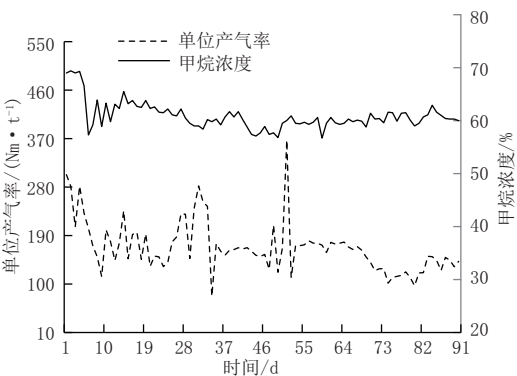


图4 单位产气率及甲烷浓度

图3数据显示,厌氧罐内物料TS浓度沿物料推动风向持续下降,表明厌氧罐内消化反应随物料运行方向同步进行,从而有效提高系统运行效能;图4数据显示,干式厌氧消化工艺具有出色的产气性能,其平均单位产气率为140 Nm³/t,沼气中甲烷含量平均为60.50%。

项目投产后,总体运行平稳、产气稳定,综合平均运行指标如表3所示。

根据表3中的运行数据可以看出,干式厌氧消化工艺对厨余垃圾具有良好的适应性,有机负荷达到9.12 kgVS/m³,脱水沼渣含固率为37%,固体减量化率

表3 实际运行指标表

名称	数值
有机负荷/(kgVS·m ⁻³)	9.12
VS降解率/%	79.09
单位甲烷产量/(L·kg ⁻¹ VS)	656.76
甲烷含量/%	61.41
脱水沼渣含固率/%	37.00
固体减量化率/%	61.86

61.86%

5 结 语

(1)基于机器学习强化的干式厌氧消化工艺对厨余垃圾处理呈现良好的适应性,实际运行数据表明,有机负荷达到9.12 kgVS/m³,脱水沼渣含固率为37%,固体减量化率为61.86%,平均单位产气率为140 Nm³/t。

(2)通过采用在线式最小二乘支持向量机算法构建数据驱动的状态预测模型,对高风险的调试阶段进行指标实时预测,强化干式厌氧消化工艺在调试阶段的抗风险能力。本数据驱动模型的均方差为0.003 4。

参考文献:

[1] 强敬雯,王晚晴,唐曼玉,等.厨余垃圾厌氧消化对沼气微生物及环境的影响[J].中国农业科技导报,2024,26(6):159-169.

[2] 卢义程.污泥与餐厨垃圾协同厌氧处理工程设计与探讨[J].给水排水,2023,59(12):30-35.

[3] 杜昆,池涌,王立贤.厨余垃圾水热转化制取有机肥的试验研究[J].环境工程,2023,41(8):162-168.

[4] 靳晨曦,孙士强,盛维杰,等.中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J].中国环境科学,2022,42(3):1240-1251.

[5] 史真超,葛恩燕,何品晶,等.基于碳氮平衡模型评价厨余垃圾厌氧消化工程[J].中国环境科学,2022,42(8):3804-3811.

[6] 胡钢,孙建亭,刘思源,等.厨余垃圾湿式与干式厌氧消化处理全链条碳排放比较分析[J].环境生态学,2024,6(5):146-150.

[7] 姚丽铭,王亚琢,范洪刚,等.餐厨垃圾处理现状及其热解技术研究进展[J].化工进展,2023,42(7):3791-3801.

[8] 葛佳音,吴冰思,单福征,等.上海生活垃圾理化性质演变与径向基函数神经网络模型预测:兼论垃圾分类的影响[J].环境污染与防治,2023,45(9):1195-1207.

[9] 田启欢,高彦达,宫亚斌,等.厨余垃圾中高温高效厌氧产沼中试研究[J].环境卫生工程,2024,32(2):39-45.

[10] 孙文瑾,王雪梅,李子富.厨余垃圾厌氧发酵定向产酸的影响因素[J].化工进展,2024,43(10):5778-5790.

[11] 杨光,史波芬,周传斌.我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价[J].环境科学,2023,44(6):3024-3033.

[12] 杨梦霞,沈鹏飞,陈小欢.以产物为导向的厨余垃圾厌氧发酵方式分析与建议[J].环境工程,2024,42(10):140-146.

[13] 张星星,焦彭博,杨汇莹,等.剩余污泥与餐厨垃圾协同厌氧消化研究进展[J].中国环境科学,2022,42(5):2179-2194.

[14] Vapnik V. The nature of statistical learning theory[M]. USA: Springer, 2000.

[15] 王玥.模型与数据融合驱动的间歇过程自适应迭代学习控制[D].北京:北京化工大学,2014.

[16] 张浩然,汪晓东.回归最小二乘支持向量机的增量和在线式学习算法[J].计算机学报,2006,29(3):400-406.

[17] Wang J, Wang Y, Cao L, et al. Adaptive iterative learning control based on unfalsified strategy for Chylla-Haase reactor[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2014, 1(4): 347-360.

[18] 胡钢,孙建亭,刘思源,等.厨余垃圾湿式与干式厌氧消化处理全链条碳排放比较分析[J].环境生态学,2024,6(5):146-150.

[19] 王凯军,王婧瑶,左剑恶,等.我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状分析及建议[J].环境工程学报,2020,14(7):1735-1742.

[20] 林晓凤.厨余垃圾干式厌氧发酵过程中的挥发性脂肪酸测定方法研究[J].环境卫生工程,2024,32(3):42-46;53.