

干式厌氧发酵反应器设计研究

姚 鹏, 郑晓宇, 武京伟, 童胜宝, 汪昱昌, 邹 婷, 肖诚斌, 赵 彬
(光大环保技术研究院(南京)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 从干式厌氧发酵的温度和搅拌方式、筒体加热方式和强度校核、搅拌轴的机械强度校核等方面全面阐述了反应器的设计过程。中温机械搅拌是干式厌氧发酵的优选方式,短管支撑式蜂窝夹套不仅可以保持温度相对恒定,而且还可以增加筒体强度,很好地满足工艺和设计要求。同时,夹套设计中拉撑的设计需要从拉撑间距和单根拉撑所需截面面积两方面进行强度校核。搅拌轴的设计应首先考虑搅拌功率,然后从搅拌轴的屈服强度、挠度、疲劳强度和刚度几个方面来对搅拌轴机械强度进行校核。该反应器的设计,为干式厌氧发酵技术应用提供支持。

关键词: 干式厌氧; 反应器; 加热方式; 搅拌轴

中图分类号: S216.4 文献标志码: B 文章编号: 1000-1166(2023)02-0076-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023020076

Design Study on Reactor of Dry Anaerobic Fermentation / YAO Peng, ZHENG Xiaoyu, WU Jingwei, TONG Shengbao, WANG Yuchang, ZOU Ting, XIAO Chengbin, ZHAO Bin / (Everbright Environmental Protection Technological Development (Nanjing) Limited, Nanjing 211106, China)

Abstract: The design of the reactor, which is the key equipment of dry anaerobic fermentation, was investigated in this study. The design process including temperature, stirring method of dry anaerobic fermentation, heating method and strength checking of the cylinder, and the mechanical strength checking of the stirring shaft. It was concluded that medium-temperature mechanical agitation was the preferred method for dry anaerobic fermentation. And the short-tube-supported honeycomb jacket could keep temperature relatively constant, as well as increasing the strength of the shell, which could meet the requirements of the process and design. At the same time, the design of the bracing in the jacket design need to be checked for strength from the spacing of the bracing and the cross-sectional area required by a single bracing. The design of the stirring shaft need consider stirring power first, and check the mechanical strength of the stirring shaft from the yield strength, deflection, fatigue strength and stiffness of the stirring shaft. This paper could well guide the design of the reactor, which could provide support for the application of dry anaerobic fermentation technology.

Key words: dry anaerobic; reactor; heating method; mixing shaft

在厌氧发酵中,主要分为湿式厌氧发酵和干式厌氧发酵,其分类的依据是发酵物料含固率(TS)浓度的高低。行业中规定湿式厌氧发酵一般TS < 20%,而干式厌氧发酵TS含量通常在20%~40%^[1]。与湿式厌氧相比,干式厌氧具有容积负荷高、产气率高、发酵产物易处理等特点,可以避免沼液大量积累而无法处理的问题,可广泛应用于厨余垃圾处理、畜禽粪便处理、秸秆制气等方面,是目前厌氧发酵技术研究的热点^[2-8]。

干式厌氧发酵的基本处置包括了预处理、干式厌氧发酵、固液分离及沼气再利用等环节。其中,干式厌氧发酵作为最主要的环节,需要在干式厌氧发

酵反应器中完成。干式厌氧发酵反应器作为整个工艺流程的关键设备,起着举足轻重的作用。所以,干式厌氧发酵反应器的设计至关重要。

国外对干式厌氧发酵的研究起步较早,整体技术水平较高,应用范围较广泛。目前,国外比较主流的反应器主要有比利时Dranco发酵设备、法国的Valorga发酵设备、瑞典的Komogas发酵设备和德国的Linde-KCA发酵设备等,这些设备已在欧洲多个国家达到商业化生产程度^[2]。我国干式厌氧发酵的研究起步较晚,农业农村部规划设计研究院、农业农村部南京农机化所等,均在这方面取得了一定的研究进展,但大多只停留在科研机构和高校实验室

收稿日期: 2022-07-02 修回日期: 2022-09-30

项目来源: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100603)

作者简介: 姚鹏(1984-),男,汉,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为环保设备, E-mail: yao_p@cebenvironment.com.cn

研究试验阶段,缺乏实际的大型规模化产业化的工程案例。

1 设计概况

1.1 物料参数

设计处理物料量为 $40 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的厨余垃圾,其物料参数见表 1。

表 1 厨余垃圾物料参数

项目	1	2	3	4	5	6	7	平均值
含固率 TS / %	22.12	26.75	28.36	26.24	25.84	23.85	24.56	25.39
挥发性固体含量 VS / %	14.38	18.36	19.98	17.86	18.26	17.85	16.78	17.64
pH 值	5.05	5.52	5.38	5.22	5.41	5.64	5.12	5.33

1.2 温度

发酵微生物对温度极其敏感,温度的变化直接影响沼气的产量^[9]。研究表明^[10],厌氧微生物生长发酵的较为适宜的温度约为 35°C (中温发酵)和 55°C (高温发酵)。中温发酵工艺具有良好的系统稳定性,厌氧发酵过程中所需热量少,便于管理,适合干式厌氧发酵工艺,故本项目设计为中温发酵。

1.3 搅拌

干式厌氧发酵中存在着混合不均匀的现象,常利用搅拌使有机质均匀分布,促进微生物的传质传热,防止局部酸化,提高原料利用率,加快分解速度,提高产气量,增加底物与接种物间接触,确保系统稳定运行^[11]。最常用的搅拌方式有沼气回流搅拌、出水回流搅拌和机械搅拌^[12]。机械搅拌是最有效的搅拌方式,可有效提高系统传质性能、抑制组分危害、提高反应器有效容积等^[13]。同时,有研究者推荐在干式厌氧发酵系统中采用低转速、高扭矩、大桨叶搅拌器^[14]。该类型搅拌系统,适用于高粘度、特高粘度物料的混合,近年来颇受关注^[15]。

综上所述,结合工程经验,干式厌氧发酵反应器选用机械搅拌,搅拌转速可调,最大转速为 5 Rpm 。

2 设计过程

2.1 设备外形尺寸的确定

干式厌氧发酵反应器壳体采用 U 型槽结构,物料停留时间以 28 d 计,有效容积为 1120 m^3 。取填充系数 0.8 ^[16],需要设计总容积为 1400 m^3 的干式厌氧发酵反应器。结合工程经验,反应器筒体长径比为 $3.5 \sim 4.5$,故设计反应器壳体回转半径为 3.5 m 、整体高度为 8 m 、整体长度为 28 m (见图 1)。

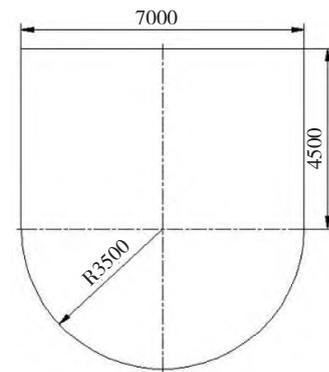


图 1 干式厌氧发酵反应器壳体端面图

2.2 反应器筒体的设计

2.2.1 反应器筒体加热及保温

温度是影响干式厌氧反应平稳运行且提高产气率的主要参数,主要是因为厌氧菌在发酵时的活性与温度的变化密切相关,具有很强的敏感性,当温差变化较大时会抑制厌氧菌的活性,因此在设计发酵反应器时必须考虑维持库内物料温度的稳定性^[17]。在实际发酵中,通常要求温差控制在 $\Delta T \leq 1^\circ\text{C}$ ^[18],如果环境温度的波动超出 $1^\circ\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ 就会对消化过程产生严重影响,甚至抑止菌种生长,反应停止。因此,为使发酵物料能快速达到发酵所需的温度并且保持基本恒定,必须采用有效的加热措施,保证发酵温度在发酵工程中满足上述工艺要求。

2.2.1.1 反应器加热方式

对于厌氧发酵系统而言,常用的换热方式大约有 3 种^[17]: 1) 内置蛇管或盘管换热; 2) 外置换热系统; 3) 夹套换热系统。由于干式厌氧发酵物料浓度高和粘稠性的特点,内置蛇管或盘管周围易产生物料堆积和挂料现象,会大大降低传热效果。由于干法厌氧消化物料含固量较高、物料粘度大、物料的传热系数远低于液体,若采用外置换热系统,要在规定的时间内输送规定温度的物料,就必须增加

传热有效长度,或者采用多级输送。而装置的长度变大,则结构将变得复杂;如果采用多级输送,则会增加成本。因此,从结构和成本上考虑,该方式不是本系统的最佳选择^[19]。综上所述,本项目干式厌氧发酵反应器筒体的设计采用夹套的传热方式。

2.2.1.2 反应器加热过程中所需总热量

反应器在加热过程中热量平衡:

$$Q = Q_g + Q_s + Q_L + Q_w + Q_R$$

式中: Q 为反应器加热过程中所需总热量, kJ; Q_g 为沼气带走的热量, kJ; Q_s 为反应器散失的热量, kJ; Q_L 为沼液流出带走的热量, kJ; Q_w 为加热过程中物料升温所需的热量, kJ; Q_R 为物料反应过程中的生物反应热, kJ。

其中,沼气和沼液带走的热量以及反应过程中的生物反应热都很小,故在计算过程中忽略,即 Q_g 、 Q_L 、 Q_R 均为 0。

$$Q_w = C_x \times m \times (T_0 - t_0)$$

式中: C_x 为物料平均定压比热容, $3.56 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}$; m 为反应器内物料,取每天进料量 40000 kg ; T_0 为物料加热后温度 35 °C ; t_0 为物料进入反应器时的温度,此处取所在地区 1 月份月温度平均值 9 °C 。

计算得到:

$$Q_w = 4.98 \times 10^6 \text{ kJ}$$

反应器热损失 Q_s :

$$Q_s = \frac{(T_0 - t_0) / 2 - t_f}{10000R_s} \times \tau_j$$

式中: t_f 为环境温度,此处取所在地区 1 月份月温度平均值 9 °C ; τ_j 为加热时间 24 h ; R_s 为反应器物料与环境之间的总热阻,由下列公式计算:

$$1/R_s = A / (d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + d_3/\lambda_3 + 1/a)$$

式中: A 为传热面积, 755.8768 m^2 ; d_1 、 d_2 、 d_3 为反应器内壁厚度、保温层厚度和外壁厚,分别是 0.02 m 、 0.022 m 、 0.001 m ; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为反应器壁传热系数、保温层传热系数、器壁与空气换热系数,分别是 46.48 、 0.039 、 $8.141 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。计算得到 R_s 。

$$R_s = 9.09 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$$

从而得到 Q_s :

$$Q_s = 1.66 \times 10^6 \text{ kJ}$$

综上所述,每天进料 40000 kg 的条件下,需要的总热量 Q :

$$Q = Q_s + Q_w = 6.62 \times 10^6 \text{ kJ}$$

2.2.1.3 反应器壳体保温厚度设计

该反应器为圆筒形设备,而根据工业设备及管道绝热工程设计规范(GB50264—2013)^[20],其中, D_1 为内绝热层外径; D_0 为设备外径, 7.1 mm ; T_0 为物料温度 308.15 K ; T_a 为环境温度,取所在地区 1 月份月温度平均值 273.15 K ; $[Q]$ 为每平米绝热层外表面积为单位的最大允许热损失量, $52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; α_s 为绝热层外表面与周围空气的换热系数 $8.141 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; λ 为保温层传热系数,保温材料用玻璃棉制品 $0.046 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

$$D_1 \ln \frac{D_1}{D_0} = 2\lambda \left(\frac{T_0 - T_a}{[Q]} - \frac{1}{\alpha_s} \right)$$

得到 $D_1 = 7.150 \text{ m}$,保温厚度为 25 mm 。

2.2.2 反应器筒体强度的校核

目前,最常用的夹套有整体夹套、半圆管夹套、型钢夹套和短管支撑式蜂窝夹套^[21]。短管支撑式蜂窝夹套,不仅可以提高夹套的压力,还可以增加筒体的抗失稳能力^[22]。考虑到本设计筒体的直径为 7 m ,且采用的是 U 型槽结构,极易失稳,所以筒体加热方式采用短管支撑式蜂窝夹套。

反应器筒体(含夹套)的强度可以用拉撑结构的模型来计算。筒体的设计条件见表 2。

表 2 筒体设计参数

名称	符号	数值		单位
		壳体	夹套	
介质	—	厨余垃圾	热水	—
计算压力	P_c	0.002	0.02	MPa
设计温度	t	60	100	°C
材质	—	Q235B	Q235B	—
设计温度许用应力	$[\sigma]_p'$	113	113	MPa
钢板负偏差	C_1	0.3	0.3	mm
腐蚀裕量	C_2	1	0	mm
内径	D_i	7000	7080	mm
焊接接头系数	ϕ	0.85	0.85	—
名义厚度	δ_{ep}	20	12	mm
有效厚度	δ_p	18.7	11.7	mm

2.2.2.1 拉撑间距 L 的计算^[23]

已知设计压力、拉撑结构下壳体与夹套厚度,通过拉撑间距 L 的计算来验证轻度强度是否满足要求。其计算公式为:

$$L = \frac{\delta_p}{\sqrt{\frac{P_c}{[\sigma]_p' k}}}$$

式中: δ_p 为有效厚度 $\delta_p = \delta_{ep} - C_1 - C_2$; K 为拉撑装设方法的常数,取值 2.2。计算结果为: 对于夹套 $L_1 = 1304.4$ mm, 对于壳体 $L_2 = 2084.9$ mm, 取 $L = 1304.4$ mm。根据图 2 $L_{max} = 1239.9$ mm $\leq L$, 满足要求。

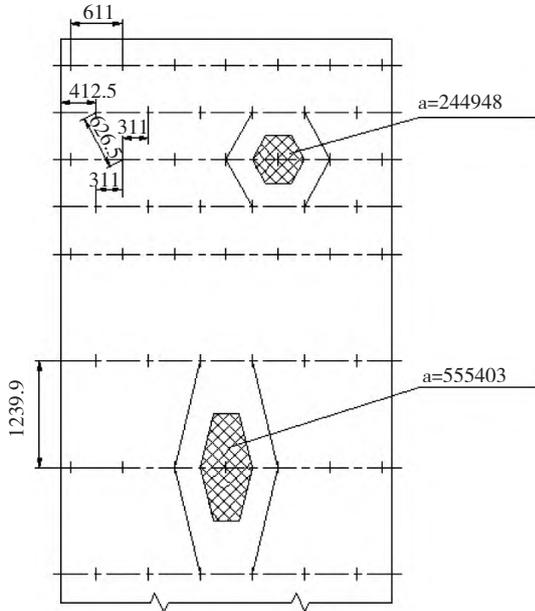


图 2 夹套展开示意图

2.2.2.2 单根拉撑所需截面面积核算^[23]

单根拉撑所需截面面积计算公式为:

$$a = \frac{1.1W}{[\sigma]_p}$$

式中: W 为单根拉撑所受轴向载荷; $W = P_c \times$ 单个支撑承载的面积; $[\sigma]_p$ 为设计温度下支撑材料的许用应力, 由于支撑材料选用 20# 钢管, 取值 147 MPa。其中, 如图 2 所示, 单个支撑承载的最大面积为 555403 mm², 计算得到 $a = 83.12$ mm²。实际使用的钢管规格为 $\phi 57 \times 3$ mm, 单个支撑截面积为 508.9 mm²。由于实际设计的截面积大于计算所需的截面积, 所以拉撑结构设计合理。

综上所述, 反应器筒体(含夹套)的强度满足设计要求。

2.3 搅拌轴的设计

2.3.1 搅拌轴的设计

搅拌轴主体由轴头、空心轴管和叶片组成, 叶片交错布置在轴管上。轴上设有叶片连接件, 叶片和轴均可拆卸, 方便检修维护。结合前期的中试实验, 对反应器搅拌轴优化设计, 桨杆采用 200 × 200 mm 方钢, 末端宽度为马蹄形结构, 尺寸为 200 × 400

mm, 叶片之间的间距为 1500 mm, 搅拌轴的外形见图 3。

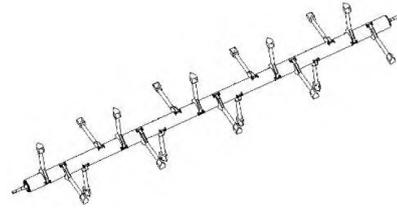


图 3 搅拌轴外形图

2.3.2 搅拌轴搅拌功率的确定

利用 Fluent 软件对干式厌氧发酵搅拌反应器运行过程进行流体模拟分析。图 4 ~ 图 6 为转速 5 Rpm、桨叶间距为 1.5 m 的条件下, 各截面速度分布。模拟过程监测搅拌扭矩为 14257 N·m⁻¹, 并计算搅拌功率, 得到搅拌功率分别为 7.5 kW。

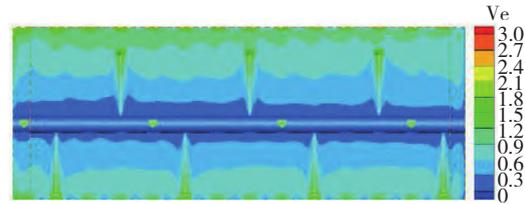


图 4 桨叶纵向刻画、合速度分布

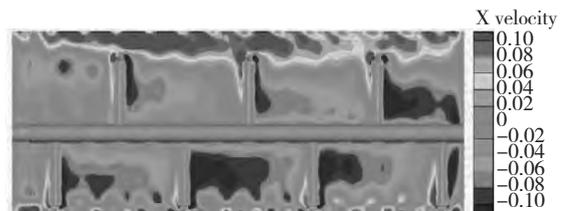


图 5 桨叶纵向剖面、X 方向速度



图 6 桨叶横向剖面、X 方向速度

2.3.3 搅拌轴机械强度的核算^[24]

搅拌轴主要由定位轴承、轴头、轴管和叶片组成。强度计算时, 将叶片对轴的作用力看作均布于轴上的载荷。以下主要从搅拌轴的屈服强度、挠度、疲劳强度和刚度几个方面来对搅拌轴机械强度进行核算。

搅拌轴的设计条件见表 3。

表3 搅拌轴的设计参数

项目名称	代号	单位	数值
工作温度	t	℃	80
轴管外径	D_o	m	0.92
轴管内径	D_i	m	0.81
焊接接头系数	K_s	—	1.0

2.3.3.1 搅拌轴屈服强度计算

根据按第四强度理论:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

式中: σ_0 为合成应力; σ 为弯曲应力; τ 为剪切应力。

首先计算弯曲应力 σ ,图7中 $L=28.23$ m、 $a=0.765$ m、 $b=26.7$ m。由于叶片和轴管的重量为 40900 kg ,叶片和轴管排开的液体体积约为 24 m³。在考虑浮力的作用下 ,叶片和轴管产生的均布载荷 q 为 6.329 kN·m⁻¹。均布载荷作用下轴承处的弯矩 M 的计算式为:

$$M = \frac{q}{2L^2} \left[\left(Lb^3 - \frac{b^4}{4} \right) - \left(La^3 - \frac{a^4}{4} \right) \right] - q \frac{b^2 - a^2}{2}$$

$$= -624.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

弯曲应力 σ 计算式为:

$$\sigma = \frac{M}{K_s W}$$

式中: $W = \frac{\pi}{32} \times \frac{[D_o^4 - D_i^4]}{D_o} = 0.03$ m³ ,计算得到

$\sigma_s = 20.83$ MPa。

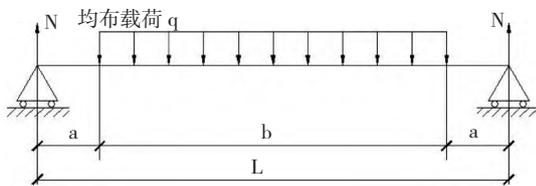


图7 搅拌轴筒图

剪切应力计算公式为:

$$\tau_1 = T \frac{D_o/2}{I_{p1}}$$

式中: 传递的扭矩为 $T = 9550 \frac{P}{n} = 14325$ N·m。

轴中心处的极惯性矩为 $I_{p1} = \frac{\pi}{32} (D_o^4 - D_i^4) = 0.03$ m⁴ ,计算得到剪切应力 $\tau_1 = 0.22$ MPa。由于轴端采用的是阶梯设计 ,直径 D 分别为 0.85 mm、0.21 mm、0.18 mm、0.17 mm 和 0.16 mm ,且惯性矩计算

公式为:

$$I_{p2} = \frac{\pi}{32} D^4$$

扭转剪应力计算公式为:

$$\tau_2 = T \frac{D/2}{I_{p2}}$$

分别计算各处的扭转剪应力 ,直径最小处扭转剪应力最大 τ_2 为 17.8 MPa。所以 ,最大剪应力 τ 的计算值取 17.8 MPa。

综上所述 ,按第四强度理论计算得到 $\sigma_0 = 37.21$ MPa ,轴管采用 20# 钢管 ,最大许用应力 $[\sigma]^1 = 140$ MPa ,由于 $\sigma_0 < [\sigma]^1 \times K_s$,所以搅拌轴屈服强度满足要求。

2.3.3.2 搅拌轴的挠度计算

搅拌轴的挠度主要由叶片和轴管的自身重力作用产生 ,因此搅拌轴的挠度由两部分组成。由于叶片和轴管都按照均布载荷来计算 ,因此两者产生的最大挠度均在两支撑点的中点处 ,可以通过叠加得到。

首先计算叶片产生的最大挠度:

$$y_{1 \max} = \frac{q_1 b L^2}{384 E I} \left[8 - 4 \left(\frac{b}{L} \right)^2 + \left(\frac{b}{L} \right)^3 \right]$$

式中: 叶片自身的均布载荷 q_1 为 2869 N·m⁻¹ ,弹性模量 $E = 2.0 \times 10^{11}$ Pa 计 ,轴管惯性矩 $I = 0.03$ m⁴ ,计算得到 $y_{1 \max} = 4.22$ mm。

其次计算轴管产生的最大挠度:

$$y_{2 \max} = \frac{5 q_2 L^4}{384 E I}$$

式中: 轴管自身的均布载荷 q_2 为 3117 N·m⁻¹ ,计算得到 $y_{2 \max} = 4.59$ mm。

综上所述 ,经叠加得:

$$y_{\max} = y_{1 \max} + y_{2 \max} = 8.81 \text{ mm}$$

由于 $\frac{y_{\max}}{L} = \frac{8.81}{28.23} = 0.31$ mm·m⁻¹ $< [\frac{y_{\max}}{L}] =$

0.5 mm·m⁻¹ ,因此轴管在 180℃ 时的挠度在允许范围内 ,满足设计要求。

2.3.3.3 搅拌轴疲劳强度校核

轴的疲劳强度采用安全系数法进行校核 ,根据轴的几何尺寸 ,计算轴的危险截面处的安全系数数值是否满足许用安全系数数值。危险截面安全系数 S 的校核公式为:

$$S = \frac{S_\sigma \times S_r}{\sqrt{S_\sigma^2 \sigma + S_r^2}} \geq S_p$$

式中: $S_\sigma = \frac{\sigma - 1}{K_\sigma \sigma_a + \psi_a \sigma_m}$; $S_\tau =$

$\frac{\tau - 1}{K_\tau \tau_a + \psi_\tau \tau_m}$; 查阅手册 $K_\sigma = 1.90$ $K_\tau = 1.70$ $\beta =$

0.90 $\psi_\sigma = 0.34$ $\psi_\tau = 0.21$ $\varepsilon_\sigma = 0.6$ $\varepsilon_\tau = 0.6$ 。

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{M}{z}$$

其中: $Z = \frac{\pi D_0^3}{32} [1 - (\frac{D_i}{D_0})^4]$,计算得 $Z = 3.05 \times$

10^{-2}m^3 , $M = 624900 \text{ Nm}$,计算得 $\sigma_m = \sigma_a = 20.49 \text{ MPa}$ 。
 $\sigma_{-1} = 0.27(\sigma_b + \sigma_s)$ $\tau_{-1} = 0.156(\sigma_b + \sigma_s)$,
 其中 $\sigma_b = 360 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 180 \text{ MPa}$,计算得到 $\sigma_{-1} = 145 \text{ MPa}$ $\tau_{-1} = 80 \text{ MPa}$ 。

$$\tau_m = \tau_a = \frac{T}{2 \times Z_p}$$

其中: $T = 14325 \text{ Nm}$ $Z_p = 2Z$,计算得到 $\tau_m = \tau_a = 0.12$ 。
 $S_\sigma = 1.8$ $S_\tau = 198.5$,计算得到 $S = 1.8$ 。由于 $S > S_p = (1.3 - 1.5)$ 故设计满足疲劳强度要求。

2.3.3.4 搅拌轴的刚度计算

搅拌轴的刚度分为扭转刚度和弯曲刚度,前者以扭转角 φ 来度量,后者以偏转角 θ 来度量。

扭转角 φ 按照 $\varphi = 73580 \frac{T}{D_0^4 [1 - (\frac{D_i}{D_0})^4]}$,计算

得到 $0.0004^\circ \cdot \text{m}^{-1}$,对于反应器搅拌轴,选用扭转角为 $0.25 \sim 0.50^\circ \cdot \text{m}^{-1}$,由于 $\varphi \leq \varphi_p$,可见该轴的扭转刚度符合要求。

偏转角按照公式 $\theta = \frac{q b L^2}{48 E I} [3 - (\frac{b}{L})^2]$ 来计算,

其中 $q = 6.329 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, $E = 2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$,计算得到 $\theta = 9.8 \times 10^{-4}$,由于搅拌轴的支撑轴承选用的是圆柱滚子轴承,而圆柱滚子轴承处许用的偏转角 $\theta_p = 0.0025$,由于 $\theta < \theta_p$,偏转角满足圆柱滚子轴承的使用要求,设计合理。

表4 搅拌轴机械强度汇总表

项目	屈服强度 MPa	挠度 ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)	疲劳强度 (安全系数)	刚度 (偏转角)
计算值	37.21	0.31	1.8	0.00098
许用值	140	0.5	1.3~1.5	0.0025

综上所述,由表4可知,搅拌轴屈服强度、挠度、疲劳强度和刚度均满足设计要求,搅拌轴设计合理。

2.4 反应器整体设计

除了上述筒体和搅拌轴的设计外,干式厌氧发酵反应器还包括电机减速机、密封系统等。其中,电机减速机通过联轴器和搅拌轴前端直接连接,传动轴和筒体之间设有密封系统,采用盘根和旋转唇形密封结合的方式,很好地防止了筒体内部的泄露。反应器外形见图8。

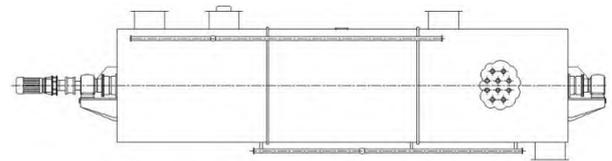


图8 反应器外形图

2.5 沼气产量估算

根据前期对原料的调研,本项目处理的厨余垃圾 TS 约为 25% ,VS/TS 约为 0.7。中温干式厌氧发酵 VS 的降解率约为 63% ~ 67% [25] ,计算中 VS 的降解率取中位数 65%。沼气密度按照 $1.215 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,40 t 厨余垃圾产生的沼气为 $40 \times 25\% \times 0.7 \times 65\% \times 1000 / 1.215 = 3745 \text{ Nm}^3$ 。干式厌氧发酵反应器的有效容积为 1120 m^3 ,容积产气率 $3745 / 1120 = 3.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3 讨论

干式厌氧发酵反应器的设计,首先根据处理规模,结合工艺参数,诸如填充率等来确定反应器的设计总容积,根据工程实际确定反应器的外形尺寸,然后开始具体的设计。由于反应器主要由筒体、搅拌轴、电机减速机、密封等部分组成,对以上几个部分需分别设计。干式厌氧发酵的温度控制要求比较苛刻,所以要在筒体设计时考虑加热方式,加热方式的选择需结合工艺条件以及设备的特点,本文选择的是短管支撑式蜂窝夹套。接下来在考虑设计条件的情况下,对筒体进行强度校核。搅拌轴的设计应结合中试结果和工程经验设计校核。

4 结论

干式厌氧发酵广泛应用于厨余垃圾处理、畜禽粪便处理、秸秆制气等方面,具有很好的应用价值和发展前景,而反应器是整个干式厌氧发酵工艺流程的关键设备。干式厌氧发酵反应器的设计中,发酵温度和搅拌方式是主要的参数,中温机械搅拌是干式厌氧发酵的优选方式。干式厌氧发酵过程中,需

要保持温度的相对稳定,对反应器筒体设计加热装置,短管支撑式蜂窝夹套不仅可以保持温度相对恒定,还可以增加筒体强度。夹套设计中拉撑的设计需要从拉撑间距和单根拉撑所需截面面积两方面进行强度校核。搅拌轴的设计首先考虑搅拌功率,然后从搅拌轴的屈服强度、挠度、疲劳强度和刚度几个方面来对搅拌轴机械强度进行校核,看是否满足设计要求。本文从上述方面,综合考虑了干式厌氧发酵反应器的设计,满足了设计要求。同时,对反应器的电机减速机、密封系统等也进行了设计,形成了反应器的整套设计文件。

参考文献:

- [1] Guendouz J, Buffière 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.
- [2] 李冰峰, 张大雷. 干式厌氧发酵技术现状与国内应用项目简介[J]. *可再生能源*, 2021, 30(3): 294–299.
- [3] 路朝阳, 汪宏杰, 于景民, 等. 农村废弃物厌氧干发酵技术研究进展[J]. *河南化工*, 2015, 32(2): 27–11.
- [4] Ninchols E. Overview of anaerobic digestion technologies in Europe[J]. *BioCycle*, 2004, 45(1): 47–49.
- [5] 叶小梅, 常志州. 有机固体废物干法厌氧发酵技术研究综述[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(2): 76–79.
- [6] Yu H, Huang G H. Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(6): 2005–2011.
- [7] 秦丞志, 张奇, 赵建伟等. 餐厨垃圾干式厌氧发酵技术研究进展及展望[J]. *现代化工*, 2022, 42(2): 1–9.
- [8] 王炯科, 汤晓玉, 王文国. 餐厨垃圾干式厌氧发酵研究进展[J]. *中国沼气*, 2021, 39(3): 35–41.
- [9] Karagiannidis A, Perkoulidis G. A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(8): 2355–2360.
- [10] 李晶宇, 罗立娜, 李文哲, 等. 温度对牛粪两相厌氧发酵特性的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(08): 4027–4031.
- [11] Rocamora I, Wagland S T, Villa R, et al, Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance [J]. *Biore-source Technology*, 2020, 299: 1–11
- [12] 傅国志, 李秀金, 袁海荣, 等. 搅拌对麦秸厌氧消化性能影响的试验研究[J]. *可再生能源*, 2011, 29(2): 65–68.
- [13] 翟晓东. 基于 CFD 数值模拟研究机械搅拌强度对连续式厌氧发酵的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [14] Christopher J R, Michael E H, Todd B V. Anaerobic digestion of processed municipal solid waste using a novel high solids reactor: maximum solids levels and mixing requirements [J]. *Biotechnology Letters*, 1990, 12(3): 235–240.
- [15] 杨浩, 邓良伟, 刘刘, 等. 搅拌对厌氧消化产沼气的的影响综述[J]. *中国沼气*, 2020, 28(4): 3–9.
- [16] 李靖. 基于干清牛粪的半干式厌氧发酵工艺及装备研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2021.
- [17] 晏水平. 畜禽粪便高温厌氧干发酵罐加热保温研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2004.
- [18] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 143–144.
- [19] 邱荣娥. 干法厌氧发酵反应器设计与启动实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [20] 国家住房和城乡建设部. 工业设备及管道绝热工程设计规范: GB 50264–2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [21] 王凯, 虞军. 搅拌设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [22] 董大勤, 袁凤隐. 压力容器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 656.
- [23] 国家技术监督局. 压力容器: GB/T 150–2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [24] 成大先. 机械设计手册第2卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 6–19–6–31.
- [25] 刘晓兰. 干式厌氧发酵处理厨余垃圾的工况分析[J]. *节能与环保*, 2022(05): 44–46.