

基于 Fluent 的厌氧反应器加热保温装置 参数优化与经济分析

段 鹏¹, 罗子成¹, 刘煜超¹, 苏 钊¹, 胡署根^{1*}, 房彦山², 陈 诚³

(1. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 湖南 长沙 410007; 2. 中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 广东永葆生机环保科技有限公司, 广东 广州 510620)

摘 要: 提升厌氧反应器温度可提高其在低温环境条件下的反应效率。为了优化厌氧反应器加热保温装置工艺参数,降低加热系统投资,以永州市某科研项目现场已有的小型仿生肠道式厌氧反应器为对象,利用计算流体力学的数值模拟方法对装置内部的温度场展开研究。重点考察加热温度和保温材料的选用对反应器加热保温效果的影响,同时以温度场模拟结果为基础计算装置的热能损耗量,并对不同加热方式进行经济性评价。综合分析后得出:当热风送风温度为 35 ℃、选择发泡水泥作为保温材料时,热风加热保温工艺在满足中温厌氧发酵条件下加热保温效果最优,该条件下装置的总热能损耗量为 428.24 MJ·d⁻¹;采用沼气发电余热利用的加热方式最为经济,其电能出售收入为 20281 元,费用年值为 4047 元。此优化方案可为仿生肠道式厌氧反应器热风加热保温装置的设计改进提供理论指导。

关键词: 厌氧反应器; 温度场模拟; 加热; 保温; 经济分析

中图分类号: S216.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)06-0072-09

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023060072

Parameter Optimization and Economic Analysis of an Anaerobic Reactor Heating and Insulation Device Based on Fluent / DUAN Peng¹, LUO Zicheng¹, LIU Yuchao¹, SU Zhao¹, HU Shugen^{1*}, FANG Yanshan², CHEN Cheng³ / (1. China Energy Engineering Group Hunan Electric Power Design Institute Co Ltd, Changsha 410007, China; 2. China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co Ltd, Urumqi 830002, China; 3. Guangdong Yongbao Shengji Environmental Protection Technology Co Ltd, Guangzhou 510620, China)

Abstract: Raising the temperature of the anaerobic reactor can improve its reaction efficiency under low temperature environmental conditions. In order to optimize the process parameters of the anaerobic reactor heating and insulation device and reduce the investment of the heating system, this paper takes the existing small-scale bionic intestinal anaerobic reactor in a scientific research project in Yongzhou City as the object, and uses the numerical simulation method of computational fluid dynamics to investigate the temperature field inside the device. This study focuses on the influence of heating temperature and insulation material selection on the heating and insulation effect of the reactor. According to the temperature field simulation results, the thermal energy loss of the device is calculated, which is the basis of the economic evaluation of different heating methods. After comprehensive analysis, it is concluded that the device is heated and insulated optimally under the condition of medium temperature anaerobic fermentation when the hot air supply air temperature is 35 ℃ and the foamed cement is selected as the insulation material. The total heat energy loss of the device at this point is 428.24 MJ·d⁻¹, with the best economics of waste heat utilization for biogas power generation, which has a revenue of RMB 20281 from the sale of electricity and an annual value of RMB 4047 in costs. This optimization plan can provide theoretical guidance for the design improvement of the hot air heating and insulation device of the biomimetic intestinal anaerobic reactor.

Key words: anaerobic reactor; temperature field simulation; heating; insulation; economic analysis

仿生肠道式厌氧反应器是一种根据人体肠道消化原理构思,利用肠道式管网替代固定容积的传统

完全混合发酵罐的非完全混合反应器,通过延伸发酵容器长度,从时间和空间上把水解、酸化、产乙酸

收稿日期: 2023-03-14 修回日期: 2023-06-07

作者简介: 段 鹏(1996-),女,硕士,主要研究方向农业生物环境与能源工程, E-mail: Duan_PengP@163.com

通信作者: 胡署根, E-mail: shugen-01@163.com

和产甲烷各阶段有机动态分开,各类菌群各司其职,效率更优,从而极大提高发酵效率。此反应器无需机械装置,结构简单、能耗低、稳定性好,处理效率和产气量较高,适用于各类可生化性好的高浓度有机废水或含有机固废(粒径小于5 mm)的混悬液的处理。目前此反应器在农村污水处理领域已有较广泛的应用。温度的适宜程度决定了反应器内厌氧菌群的发酵产气效率。南方冬季普遍湿冷,厌氧反应器在低温下难以维持良好的产气效率,通过适当提升反应器料液或周围环境温度的方法可以提高反应器在冬季的产气效率。

现代沼气工程对发酵温度的控制要求越来越高,借助计算流体力学可更精确地描绘厌氧反应器内温度场,从而为厌氧反应器的设计优化与高效推广应用提供理论指导^[1-2]。陈志光^[3]等在进行螺旋管换热器加热沼气池研究中的试验结果与利用 Fluent 模拟计算结果基本吻合。毕峻玮^[4]等将底侧入式搅拌沼气发酵池的试验监测数据与利用 Fluent 模拟计算的流场和温度场结果进行分析后发现,该模型在一定程度上可以较好地反映实际情况。李超^[5]建立了沼气生产加热系统的数学物理模型并进行相关计算后得出:同种材料情况下厚度对散热量的影响较平缓,加热器布置在沼气发酵区域可基本达到反应要求温度。张君美^[6]等采用实验研究和数值模拟相结合的方法研究沼气罐内的温度场分布,发现中部加热较上部和下部可使罐内的温度分布更加均匀,温度梯度更小。杜越^[7]等采用 CFD 对厌氧发酵反应器内料液的温度场和速度场进行了研究,结果表明反应器内料液流动速度几乎为零,料液与反应器侧壁及地面之间的热量传递方式主要为导热,对流换热作用可忽略。目前,数值模拟研究主要集中在完全混合型厌氧反应器,针对仿生肠道式厌氧反应器的加热保温装置研究较少,最佳的加热保温装置设计还未可知。

本文采用 SolidWorks 软件对仿生肠道式厌氧反应器加热保温装置进行建模,利用现代 Fluent 技术对该反应器装置内部的温度场展开研究,重点考察加热温度和保温材料的选择对反应器加温保温效果的影响。最后基于温度场模拟结果计算整个装置的热负荷,并以此为依据分析不同加热方式的经济性,以期为仿生肠道式厌氧反应器的优化设计研究提供帮助。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

本文的研究对象为仿生肠道式厌氧反应器,其模型的建立参照永州市某科研项目现场已有的小试反应器。该反应器的沼气发酵工艺为推流式,主要结构形式为圆形断面构架。

1.1.1 仿生肠道式厌氧反应器结构

仿生肠道式厌氧反应器采用的材料主要为 PVC 红膜,小试装置是由直径为 600 mm,体积为 60 m³ 的 PVC 红膜材质管道盘旋而成,总共 3 层。设计流量为 1.5 t·d⁻¹,料液从顶层进料口加入,在反应器内停留约 40 d 后从底层出料口流出(见图 1)。

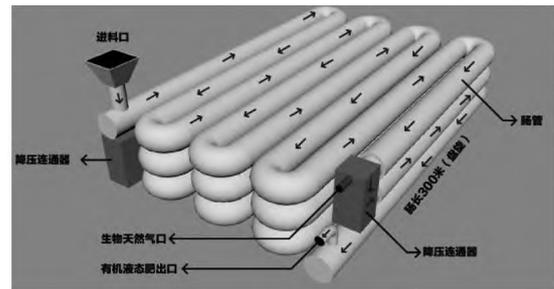


图1 仿生肠道式厌氧反应器小试装置设计概念图

1.1.2 流体介质

发酵原料的密度基本一致,且近似于水的密度,在研究中可用水的密度来代替。本研究的发酵原料为高浓度有机废水和含固量较低的(粒径小于5 mm)的混悬液,可近似为牛顿流体。另外,单相流动模型足以应用于实践工程的模拟中。因此,本文数值模拟设定为单相流,介质设定为水。

1.2 模拟方法

模拟计算采用商业计算流体力学软件 Fluent。该软件采用有限容积法对控制微分方程离散求解^[8]。模拟过程包括建立计算机网络模型,确定各个边界条件和初始条件,求解质量、动量和能量方程。

1.2.1 计算模型

1.2.1.1 数学模型

湍流模型采用 Fluent 中应用最多的 $\kappa-\epsilon$ 模型,该模型已成功应用于类似问题的分析。所有计算区域均采用静止坐标系。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; u 、 v 和 w 为速度矢量在 x 、 y 和 z 方向的分量。

动量方程、能量方程以及描述湍流的 κ - ε 两方程模型均可采用通用形式的控制方程表达。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (2)$$

式中: ϕ 为通用变量,在不同方程中可以分别代表 u 、 p 、 μ 以及温度 T 、湍流动能 κ 和湍流耗散率 ε 等变量; Γ 为扩散系数; S 为源项。

在能量方程中,物体内能 i 与温度 T 的关系可表示为 $i = c_p T$, 其中 c_p 为比热容。这样可以得到以温度 T 为变量的能量守恒方程^[9]。

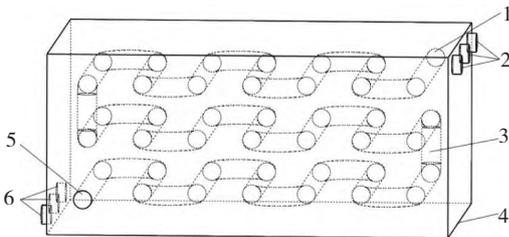
$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad}T\right) + S_T \quad (3)$$

式中: k 为流体的传热系数; S_T 为黏性耗散项,指流体在内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分。

联立上述方程进行求解可得温度场分布。

1.2.1.2 物理模型

反应器模拟环境为南方室外冬季环境,假定室外环境温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$,在反应器外部加设一个 0.30 m 厚的矩形保温罩,保温罩尺寸为 $11.45\text{ m} \times 13.20\text{ m} \times 6.00\text{ m}$ 。通过送热风的形式对厌氧反应器进行加热,送、回风方式为下送上回,热风与反应器内料液整体为逆流形式。在两侧分别设置 3 个直径为 0.6 m 的风口,等距布置(见图 2)。



1. 料液入口; 2. 热风回风口; 3. 仿生肠道式厌氧反应器; 4. 保温罩; 5. 料液出口; 6. 热风送风口。

图 2 仿生肠道式厌氧反应器加热保温装置物理模型

1.2.2 网格划分

本文计算模型采用 mesh 软件自动划分网格,模型中网格类型均选用非结构化的四面体网格,对于模型中不同的部位采用不同的网格尺寸进行划分。其中热风管、反应器管道的网格尺寸取 0.1 m ,体网格数为 2469613 个。

1.2.3 边界条件及求解

为了便于计算和模拟分析,对计算模型进行适

当的假设及边界条件简化:

(1) 忽略厌氧反应器内微生物发酵活动产生的反应热,模拟时反应器内发酵料液初始温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$;

(2) 因过程产气能及时导出,忽略厌氧反应器上部的储气空间,假定厌氧反应器内充满发酵料液变为单相流介质;

(3) 忽略外部环境温度随时间的变化,本研究主要分析冬季沼气工程的运行情况,故将外界环境温度设置为永州地区冬季外部平均温度 $5\text{ }^\circ\text{C}$;

(4) 忽略厌氧反应器在不同层之间设置的降压连通器,假定厌氧反应器管道可以承受料液在流动过程中的压力。

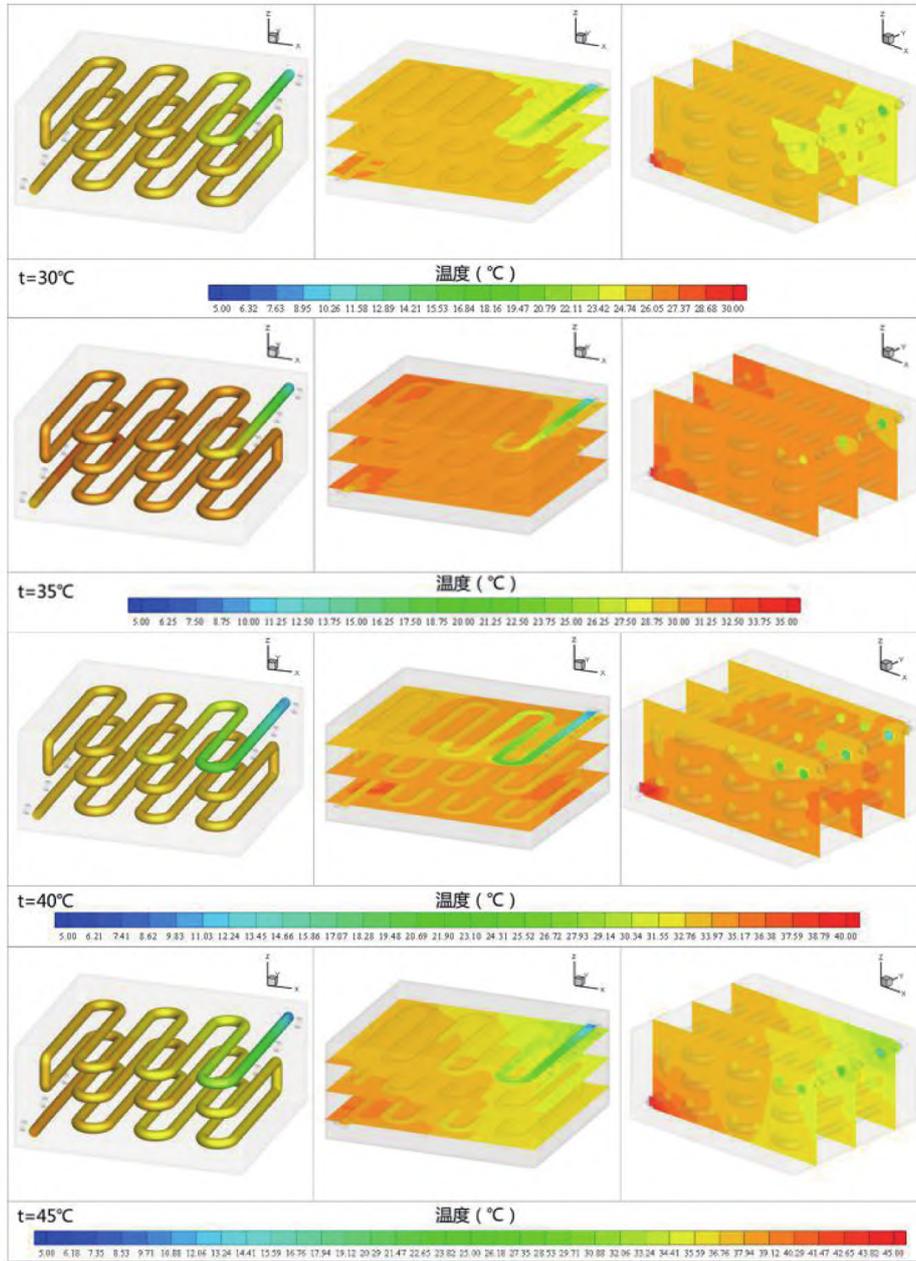
本文选用 Pressured-Based 算法^[10],结合本工程特点,模拟类型选用稳态模拟。厌氧反应器中料液入口设置为速度入口 velocity-inlet,按照每日进料 1.5 t ,停留时间 40 d 计,入口流速几乎为零(约 $6.14 \times 10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),忽略不计,入口温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$;热风入口流速为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;料液和热风出口均设置为自由出流 outflow。保温罩内反应器管道(PVC 红膜,壁厚 $1.2 \times 10^{-3}\text{ m}$)自动设置为耦合壁面 wall,传热类型设置为耦合 Coupled,与大气连接的保温罩(厚度 0.3 m)和热风管(镀锌钢管,壁厚 $2.5 \times 10^{-3}\text{ m}$)均设置为 wall,为第三类边界条件。模拟计算中压力和速度方程均采用更适合于稳态问题求解的 SIMPLEC 算法,离散采用一阶迎风格式,收敛条件中能量方程定为残差绝对值小于 1×10^{-6} ,其它方程定为残差绝对值小于 1×10^{-3} 。

2 温度场模拟结果与分析

2.1 不同热风送风温度

在保温罩材料设置成厚度为 300 mm 发泡水泥的条件下,选用不同的热风送风温度作为加热温度,根据沼气中温发酵的温度范围,对热风送风温度分别为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 时的仿生肠道式厌氧反应器加热保温装置进行了数值模拟,达到稳定状态时整个厌氧反应器内温度分布如图 3 所示。颜色的深浅表示厌氧反应器管内料液和管外空气的温度,红色表示温度较高,蓝色表示温度较低。

从图 3 可以看出,在以发泡水泥为保温材料进行保温时,厌氧反应器在经过不同温度的热风加热后,整体温度沿 x 轴负方向逐渐上升,加热效果明显。从图 3(a) 厌氧反应器内料液的温度分布来



(a)厌氧反应器 (b)厌氧反应器三层管道中心横切面 (c)3组热风管道中心纵切面

图3 热风送风温度在30℃~45℃时厌氧反应器不同部位的温度场分布

看,除了第一层管内料液受到料液入口(10℃)和热风回风侧的双重影响,从入口至第二个弯口处温度出现一定的梯度分布,大部分管内料液温度分布基本一致。由图3(b)厌氧反应器三层管道中心横切面和图3(c)3组热风管道中心纵切面可知,厌氧反应器管外空气的温度分布沿热风入口向出口方向逐渐降低,出现明显分层现象。在保温罩内中心区域,管内料液和管外空气温度趋于一致,说明两者之间换热效果较好。对比不同热风加热温度下不同部位

的温度场分布,不难发现,整体温度随着通入热风温度的增加而逐渐上升。从图4所示结果,当热风温度分别为30℃、35℃、40℃以及45℃时,管内料液的平均温度约为24.87、30.39、31.97以及36℃。沼气工程中温厌氧发酵技术温度范围一般在30℃~40℃^[11-12]。从图4还可知,除热风送风温度在30℃时料液平均温度不满足中温发酵条件外,其他热风送风条件均能满足。另外,从料液平均温度与热风送风温度之比即加热效率可以看出,热风送风

温度在 35 °C 时的加热效率最高, 可达到 86.84%, 加热效果最好。在高于 35 °C 时, 由于受到厌氧反应器本身结构和料液物性参数的影响反而有所降低。考虑到热风送风温度对厌氧发酵效果和能源消耗有重要影响, 确定最佳热风送风温度为 35 °C。

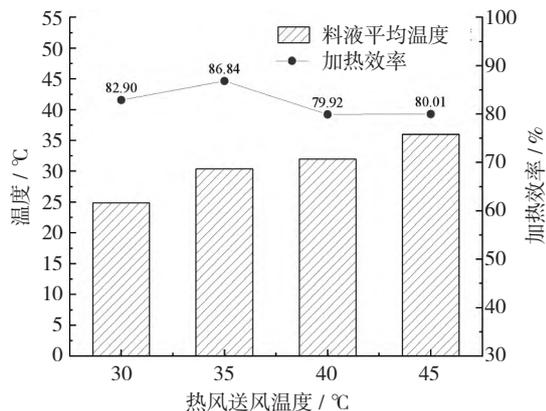


图4 热风送风温度在 30 °C ~45 °C 时料液的加热效果

2.2 不同保温材料

在热风加热温度设定为 35 °C 的条件下, 选用不同的保温材料进行保温, 根据目前工程上常用的几种保温材料, 将使用发泡水泥、挤塑聚苯板(挤塑式聚苯乙烯隔热保温板, XPS)、苯板(可发性聚苯乙烯板, EPS)和岩棉板这 4 种保温材料对仿生肠道式厌氧反应器保温, 与仅利用钢筋混凝土作为围护结构的反应器装置进行数值模拟计算比较, 分析以不同保温材料作为保温围护结构对反应器保温效果的影响程度。本模拟中所用材料的物性参数见表 1, 选用不同保温材料时保温罩的结构组成如表 2 所示, 模拟计算达到稳定状态时整个反应器内温度分布如图 5 所示。

从图 5 可见厌氧反应器在使用不同保温材料作为围护结构时的不同保温效果。通过 35 °C 的热风加热后, 装置内整体温度变化趋势与图 4 基本一致,

表 1 物性参数

材料名称	密度	比热	导热系数
	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
钢筋混凝土	2500	920	1.740
发泡水泥	300	1046	0.070
挤塑聚苯板	35	1380	0.033
苯板	20	1380	0.041
岩棉板	140	1220	0.049

加热效果良好。在保温罩内中心区域, 料液与热风换热效果较好。对比图 5 中选用不同保温材料时不同部位的温度场分布, 不难发现, 在外界环境温度仅为 5 °C 的条件下, 装置的整体温度得到了较大幅度的提升。但由于所采用保温罩围护结构材料不同, 其对保温罩内环境温度及反应器内料液温度产生了不同程度的影响。结合图 6 可知, 当仅采用钢筋混凝土作为保温罩围护结构时, 其向外部环境传出大量的热量, 致使保温罩内温度相较其他情况为最低, 经过加热处理后的料液平均温度仅为 23.61 °C, 加热保温效果欠佳。这是由于钢筋混凝土的导热系数较其他保温材料的大, 导致其向外部环境损失更多的热量, 反应器内料液温度难以满足高效产气率工艺中对应的温度要求。而当采用发泡水泥或在钢筋混凝土内加装挤塑聚苯板作为保温罩围护结构时, 料液平均温度较高, 可达 30.39 °C 和 30.24 °C, 处于中温发酵工艺要求的温度范围内。同时, 两者所对应的加热效率也均能达到 86% 以上。而在一定厚度的钢筋混凝土内加装苯板或者岩棉板时, 加热效果不如内加挤塑聚苯板。工程上可综合考虑材料的抗压强度、耐久性、施工工艺与工期、整体结构性与经济性等多项工艺参数, 优化选择发泡水泥或者挤塑聚苯板作为仿生肠道式厌氧反应器的保温材料。

表 2 选用不同保温材料时保温罩的结构组成

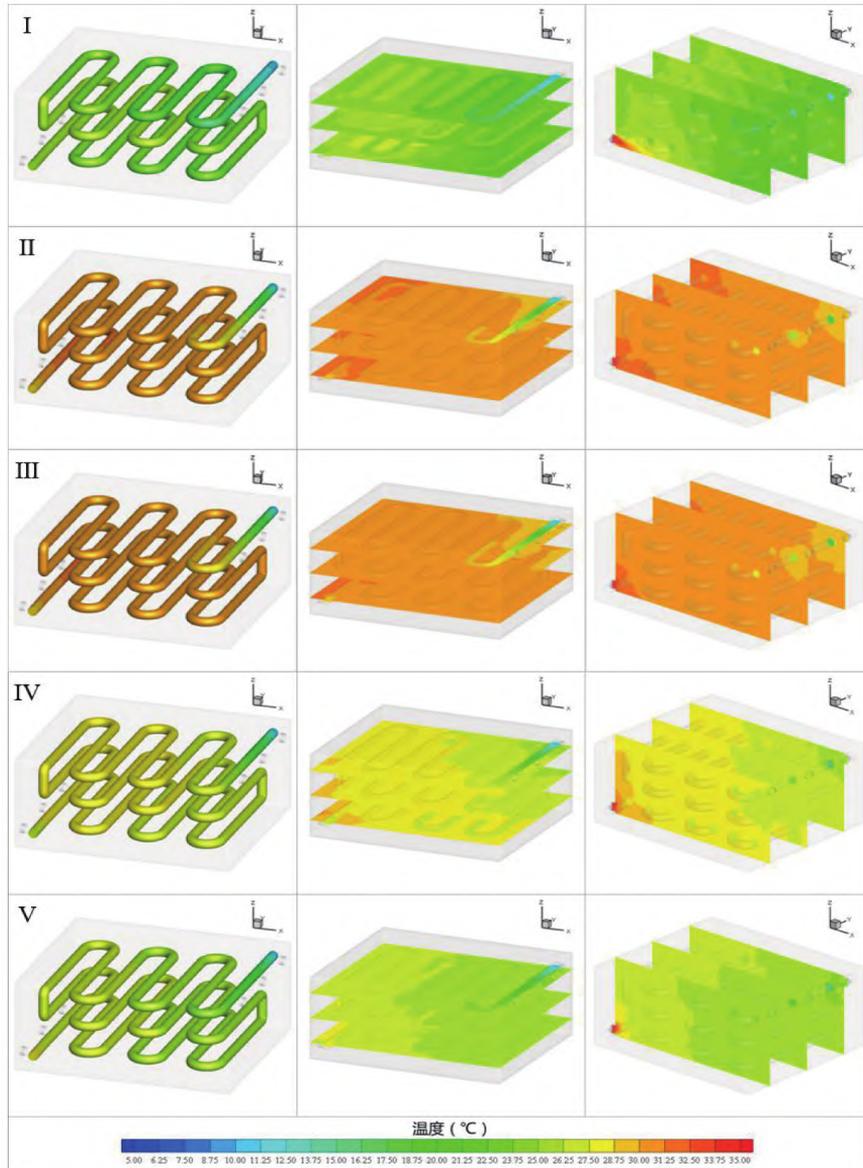
保温材料	钢筋混凝土	发泡水泥	挤塑聚苯板	苯板	岩棉板
保温罩结构	钢筋混凝土	发泡水泥	挤塑聚苯板 + 钢筋混凝土	苯板 + 钢筋混凝土	岩棉板 + 钢筋混凝土
厚度/mm	300	300	100 + 200	100 + 200	100 + 200

2.3 装置热能损耗计算分析

在厌氧反应器热风加热保温装置的运行过程中, 其耗能主要为料液加热所需耗热量和保温罩的传热耗热量。

$$Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为每日装置的总热能损耗量, $\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$; Q_1 为每日料液加热所需耗热量, $\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$; Q_2 为保温罩传热耗热量, $\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}$ 。



(a)厌氧反应器 (b)厌氧反应器三层管道中心横切面 (c)3组热风管道中心纵切面

注: I. 钢筋混凝土; II. 发泡水泥; III. 挤塑聚苯板+钢筋混凝土; IV. 苯板+钢筋混凝土; V. 岩棉板+钢筋混凝土。

图5 选用不同保温材料时厌氧反应器不同部位的温度场分布

2.3.1 料液加热所需耗热量

每日将料液加热至中温发酵温度所需热量的计算公式为:

$$Q_1 = G_L c_f (t_f - t_L) \times 1000 \quad (5)$$

式中: G_L 为厌氧反应器每日进料量, $1.5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$; c_f 为料液的比热容, 取 $4.182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}$; t_f 为厌氧反应器内料液温度, $°\text{C}$; t_L 为料液的初始温度, 10 °C ; 1000 为单位换算系数 ($1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$)。

2.3.2 保温罩传热耗热量

保温罩传热耗热量为由厌氧反应器热风加热保温装置内外温差引起的热损失, 其计算公式为:

$$Q_2 = KA(t_a - t_w) \times 86.4 \quad (6)$$

式中: A 为保温罩面积, 598.08 m^2 ; t_a 为保温罩内环境温度, $°\text{C}$; t_w 为冬季外部平均温度, 5 °C ; 86.4 为单位换算系数 ($1 \text{ W} \cdot \text{d} = 24 \times 3600 / 1000 = 86.4 \text{ kJ}$); K 为保温罩传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}$, 计算公式为:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (7)$$

式中: α_i 为内表面传热系数, 取 $8.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}$; α_e 为外表面传热系数, 取 $23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}$; δ 为反应器

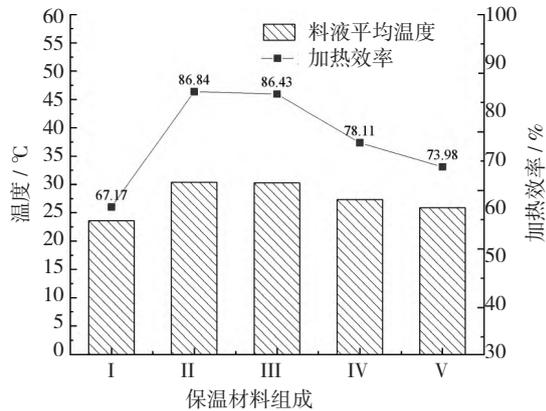


图6 使用不同保温材料时料液的加热效果

围护结构各部分结构层和保温层厚度, μ ; λ 为反应器围护结构各部分结构层和保温层导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C$ 。热能损耗计算中所涉及的部分模拟计算结果及最终计算结果见表3。

表3 装置热能损耗计算参数

项目	保温罩材料	
	发泡水泥	挤塑聚苯板
厌氧反应器内料液温度 $t_f / ^\circ C$	30.39	30.25
保温罩内环境温度 $t_a / ^\circ C$	30.83	30.68
保温罩传热系数 $K / (W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C)$	0.23	0.30
料液加热所需耗热量 $Q_1 / (MJ \cdot d^{-1})$	127.94	127.03
保温罩传热耗热量 $Q_2 / (MJ \cdot d^{-1})$	300.31	401.66
装置总热能损耗量 $Q_{总} / (MJ \cdot d^{-1})$	428.24	528.69

由表3可知,采用发泡水泥和挤塑聚苯板两种不同保温材料对料液加热所需耗热量影响较小。但由于将后者作为保温材料时围护结构为挤塑聚苯板+钢筋混凝土的组合式结构,并由表1可知,钢筋混凝土的导热系数远高于常规保温材料,导致挤塑聚苯板的保温罩传热系数相较于仅有发泡水泥时较大,最终使得前者的保温罩传热耗热量比后者高出 $101.36 MJ \cdot d^{-1}$ 。因此在料液加热效果相差不大的情况下,优化地选择能耗较低的发泡水泥作为装置的保温罩材料,此时装置总热能损耗量为 $428.24 MJ \cdot d^{-1}$ 。

2.4 加热方式的经济分析

目前沼气工程中大多采用沼气锅炉、太阳能和沼气发电余热作为厌氧反应器加热保温装置的加热系统,本文针对这3种加热方式进行增温措施的经济分析。

2.4.1 投资与收入计算

2.4.1.1 沼气锅炉加热

沼气锅炉提供热量的计算公式为

$$Q_0 = r_s \times q \times \eta \quad (8)$$

式中: Q_0 为沼气锅炉的日供热量, $kJ \cdot d^{-1}$; r_s 为沼气锅炉的沼气消耗量, $m^3 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$; q 为单位沼气的发热量, $22 MJ \cdot m^{-3}$; η 为沼气锅炉热效率,取为80%。

由上述内容可知,沼气锅炉的日供热量 $Q_0 \geq Q_{总} = 428.24 MJ \cdot d^{-1}$,则沼气锅炉每天至少需要的沼气体积为 $24.33 m^3 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ 。厌氧反应器的沼气日产量取小试装置中仿生肠道式厌氧反应器在常温发酵中的数据,约为 $52.25 m^3$ (中温发酵时沼气日产量将更大),沼气的市场价按 $1.2 元 \cdot m^{-3}$ 计,剩余沼气年收入约 $(52.25 - 24.33) \times 365 \times 1.2 = 12229.7$ 元。沼气锅炉分为热水锅炉和蒸汽锅炉,考虑到装置所用热媒温度无需太高,选用经济性更佳的 $0.5 t$ 热水锅炉,成本约为1万元(包含安装费在内,下同)。

2.4.1.2 太阳能加热

太阳能是一种清洁可再生能源,永州属于太阳能资源为资源丰富地带,可以使用太阳能作为加热热源。但太阳能易受天气状况影响的特性决定了其只能作为辅助热源。太阳能热管加热系统的日均集热量的计算公式为:

$$Q = AI\eta_j(1 - \eta_s) \quad (9)$$

式中: A 为集热器采光面积, m^2 ; I 为集热面上日平均辐射强度, $19.8 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; η_j 为集热器全日集热效率,取0.55; η_s 为太阳能制热系统热损失率,取0.1。经计算可得,集热器采光面积为 $43.69 m^2$ 。按市场价格 $1000 元 \cdot m^{-2}$ 计算,则太阳能集热器的投资成本约为43694元。厌氧反应器产生的沼气全部以市场价出售,年收入约 $52.25 \times 365 \times 1.2 = 22887.10$ 元。

2.4.1.3 沼气发电余热利用加热

将沼气发电余热回收系统中的热量用于发酵液液的加热可以提高能源的利用率,目前在沼气工程中的应用较为广泛。

日产沼气发电量 Q_e 、沼气发电装机容量 P 和余热回收热量 $Q_{余}$ 的计算公式为:

$$Q_e = \frac{Vq\eta_e}{3600} \quad (10)$$

$$P = \frac{Vq\eta_e k}{3600t} \quad (11)$$

$$Q_{\text{余}} = Vq\eta_{\text{余}} \quad (12)$$

式中: V 为沼气的日产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; k 为装机容量与发电机效率的综合比例系数, 取 1.2; t 为发电时间, $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$; η_e 为发电机组的发电效率, 30%; $\eta_{\text{余}}$ 为发电机组余热回收系统的回收效率, 40%。

经计算 $Q_e = 98.80 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$; $P = 7.18 \text{ kW}$, 取 8 kW , 因此选用 1 台单机容量为 8 kW 的沼气发电机组, 市场价约为 1.5 万元; $Q_{\text{余}} = 459.83 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1} > Q_{\text{总}} = 428.24 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$, 因此沼气发电余热加热方式可以满足厌氧反应器的中温发酵需求。厌氧反应器产生的沼气全部用于发电后再以电的形式售出, 电价按照 $0.58 \text{ 元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 计, 因此发电年收入约 $95.80 \times 365 \times 0.58 = 20280.51 \text{ 元}$ 。

2.4.2 运行费用

根据前文所述, 3 种加热方式虽然采用不同的热源, 但均采用热水循环泵与风机盘管经过换热后向保温罩内通入热风进行加热的方式。假设系统所用热介质管路系统和动力设备相同, 则 3 种加热方式的年运行费用相同。运行费主要包括电费和系统维护费。

2.4.2.1 电费

选用功率为 50 W 的热水循环泵 1 台, 功率为 43 W 的风机盘管 3 台。设定设备运行时间为 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$, 电价按照 $0.58 \text{ 元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 计, 则正常年耗电量约为 606 元。

2.4.2.2 系统维护费

沼气工程加热保温系统的年维护费按 1000 元计, 则 3 种加热方式的年运行费均为 1606 元。

2.4.3 经济效益分析

年值法是将项目在寿命周期内的各个时间点发生的净现值流量按照规定的基准折现率折算为与期等值的等额分期年内。年值法包括净年值法和费用年值法。本文采用费用年值法, 它更适合于将不同方案寿命周期内所发生的净现值流量按收益率折算与其等额的年值, 从而对 3 种加热方式进行排序。费用年值法的计算公式为

$$AC = PC \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] + \text{年运行费} \quad (13)$$

式中: AC 为费用年值, 元; PC 为费用现值, 元; n 为加热系统使用年限, 10 a; i 为年利率, 取 10%。根据前述内容对 3 种不同加热方式进行分析计算后的结果见表 4。

由表 4 可知, 受初始投资高的影响, 太阳能加热方式的费用年值明显高于沼气锅炉和沼气发电余热利用。此外, 太阳能加热受昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制, 无法保持稳定持久运行。再考虑能源(沼气或电能)出售所得收入, 沼气发电余热利用加热方式的经济性最高, 沼气锅炉的经济性最低。综合分析后选择沼气发电余热利用作为厌氧反应器加热保温装置的加热源。

表 4 不同加热方式的经济性评价

加热方式	初始投资 元	年运行费用 元	年收入 元	费用年值 元	运行状况	经济性
沼气锅炉	10000	1606	12230	3234	稳定持久	低
太阳能	43694	1606	22887	8717	不稳定	中
沼气发电余热利用	15000	1606	20281	4047	稳定持久	高

3 结论

(1) 在热风送风温度为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 选用发泡水泥或挤塑聚苯板作为保温材料时的热风加热保温工艺方案可满足中温厌氧发酵条件。

(2) 在料液加热效果基本一致的前提下, 选用发泡水泥作为装置保温罩材料时的传热耗热量比挤塑聚苯板低 19%, 使得其总热能损耗量更低, 为 $428.24 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(3) 相较于沼气锅炉和太阳能这两种加热方式, 采用沼气发电余热利用加热的经济性最佳, 其电能出售收入为 20281 元, 费用年值为 4047 元。

参考文献:

- [1] 曹秀芹, 徐国庆, 袁海光, 等. 污泥厌氧消化反应器 CFD 数值模拟研究进展[J]. 环境工程学报, 2018, 12(11): 3005-3019.
- [2] WU B, BIBEAU E L. Development of 3-D anaerobic di-

- gester heat transfer model for cold weather applications [J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(3): 749 - 757.
- [3] 陈志光, 秦朝葵. 螺旋管加热沼气池的实验研究和 Fluent 模拟 [J]. *中国沼气*, 2009, 27(3): 36 - 39.
- [4] 毕峻玮, 朱洪光, 石惠娴, 等. 沼气池搅拌的 CFD 模拟及温度场验证 [J]. *农业工程学报*, 2010(10): 283 - 289.
- [5] 李超. 严寒地区沼气池保温增温优化设计研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2015.
- [6] 张君美, 李方雪, 刘洋, 等. 加热位置对沼气罐温度场影响的实验和模拟 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(8): 4732 - 4736.
- [7] 杜越, 刘建禹, 王尚坤, 等. 厌氧发酵反应器内温度场的数值模拟 [J]. *农机化研究*, 2017(4): 252 - 255.
- [8] VESVIKAR M S, Al DAHHAN M. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD [J]. *Biotechnology and bioengineering*, 2005, 89(6): 719 - 732.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2004.
- [10] 揭涛, 张世程, 匡建平, 等. 大型管壳式换热器数值模拟分析 [J]. *能源工程*, 2015(2): 64 - 67.
- [11] 沙微. 寒区厌氧发酵反应器动态传热特性与能耗预测研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [12] 李文哲. 生物质能源工程 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.