

文章编号:0254-0096(2018)11-3076-05

太阳能沼气池换热盘管布置的优化设计

姜 鑫¹, 崔建明¹, 田 瑞^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010051)

摘 要: 在太阳能辅助加热沼气发酵系统中,以换热器的布置方式为研究对象,通过数值模拟和实验验证的方法研究等换热面积不同布置方式的换热器对沼气池加热的效果及温度分布情况。应用 Fluent 软件对系统内的换热过程进行三维非定常数值模拟,优化出换热器最佳的布置安装方式,并在实际运行中进行实验验证。结果表明:在优化的加热方式下,瞬时换热量大,且池内温度分布更为均匀。模拟结果与实验结果吻合良好,证明此计算方法可行。

关键词: 太阳能; 换热器; 计算机模拟; 沼气

中文分类号: TB332; TK83 **文献标识码:** A

0 引 言

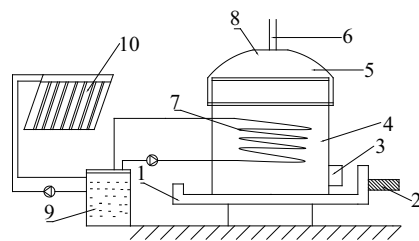
受寒冷气候影响,我国北方地区的沼气发酵温度低,甚至出现冬季池体冻裂的现象,影响沼气池的连续运行,降低了沼气池产气率。近年来不少国内外学者对太阳能辅助加热沼气池系统进行了研究。太阳能辅助加热沼气池的纽带是换热器^[1],一些学者研究了换热器布置在侧壁、底部、侧壁和底部以及池中央时的温度场分布,发现当换热器布置在池中央时,温度场分布较均匀,发酵区温度较高,但在无搅拌的情况下池内温度场仍存在分层现象,尤其是池底部与顶部的温差较大,分层明显^[2]。

本文针对该问题对布置在池中央的换热器进行优化设计,并利用 Fluent 软件进行模拟计算,分析沼气池内温度分布情况,并结合呼和浩特地区太阳能系统实际运行情况,计算沼气池系统达到中温发酵时与之匹配的太阳能集热面积。

1 太阳能沼气池系统简介

该系统组成主要包括太阳热水器、螺旋弯管换热器和沼气池,如图 1 所示。太阳集热器和热交换器联合给沼气池中的料液进行加热,使沼气发酵过

程维持在稳定的温度范围内^[3]。加热系统采用间接循环加热,通过水泵提供驱动力,使水在集热器和沼气池之间温差循环,把太阳热水器的热量经过螺旋换热器传给沼液。



1. 活动底盘 2. 手柄 3. 出料口 4. 沼气池主体
5. 沼气池上端盖部 6. 出气孔 7. 换热器 8. 进料口
9. 储热水箱 10. 真空管集热器

图 1 太阳能辅助加热沼气池系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of solar assisted heat digester system

2 数学物理模型

2.1 物理模型

本文以 1.5 m 的沼气池为研究对象,沼气池结构为圆柱形,半径 0.6 m,高 1.2 m。沼气池加热系统采用螺旋盘管换热器。螺旋盘管换热器材质为铜管,盘管圈数 8,管路总长 16 m。

收稿日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(51266007); 内蒙古自治区自然科学基金(2014MS0546; 2018MS05055)

通信作者: 田 瑞(1956—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事能源利用、流体机械方面的研究。1694032852@qq.com

为研究螺旋管换热器布置方式对沼气池内部温度场的影响情况,本文设计了3种螺旋盘管换热器安装方式。方案A将螺旋盘管安放在沼气池中央,螺旋圈直径为0.6 m,螺距为100 mm。方案B将螺旋盘管底部进行加密,螺旋圈直径为0.6 m,底部4圈的螺距为75 mm,其他圈的螺距为125 mm。方案C将盘管截成2段,第1段螺旋圈直径为0.8 m,圈数是4;第2段螺旋直径为0.4 m,圈数是4,2段相间且底部加密布置,如图2所示。

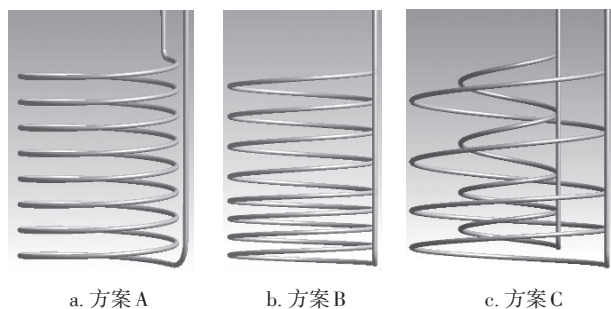


图2 螺旋管布置方案图

Fig. 2 Spiral pipe layout drawing

利用 Ansys 软件配套的网格划分软件 mesh 对3种换热器布置方式建模并进行网格划分^[4]。划分网格时采用非结构化网格,这种网格对节点没有结构性限制,几何灵活性好,能够适应螺旋盘管较复杂的几何结构,从而生成高质量的网格。

2.2 数学模型

为简化计算模型,作以下假设:

1) 沼液密度取水的密度,且池中压力变化较小,将水视为不可压缩流体,加热过程中水呈紊流流动;

2) 加热过程沼气池无料液进出;

3) 水的密度仅与温度有关。

基于以上假设,螺旋管换热器在沼气池中的换热过程可用以下连续性方程、雷诺 N-S 方程、能量守恒方程来描述^[5]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

雷诺 N-S 方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = \text{div}(\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho T U) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_u \quad (5)$$

式中, ρ ——密度; t ——时间; U ——速度矢量; u 、 v 、 w ——速度矢量在 x 、 y 、 z 方向的分量; μ ——粘性系数; p ——压力; T ——温度; k ——流体传热系数; c_p ——水的比热容; S_u 、 S_v 、 S_w ——守恒方程的广义源项。

2.3 边界条件的设置

合理的边界对数值模拟准确性极其重要,边界条件包括流动边界条件和热流边界,模拟时尽量获得真实数据。本文以呼和浩特地区的环境条件为依据,进行边界条件的设置^[6]。

螺旋盘管与沼液的换热边界为耦合边界条件,沼气池壁面为恒温壁面,加热盘管的进口为速度入口边界条件,速度为0.5 m/s,进口温度为50℃。出口温度为自由出流,沼液初始温度为15℃。水的密度随温度的变化而变化,其关系式为^[7]:

$$\rho = -0.0038T^2 + 2.0098T + 733.76 \quad (6)$$

3 模拟结果分析及处理

本文利用 Fluent 软件对螺旋管的3种布置方式的沼气池分别进行三维非稳态计算模拟,先对系统换热模拟40 min。

3.1 热管不同安装方案对沼气池加热效果的影响

实际的换热效果是由换热盘管传给沼气池的热量来评价。加热40 min后,方案A的瞬时传热量为9447.05 W;方案B的瞬时传热量为10080.89 W;方案C的瞬时总传热量为11310.49 W。螺旋盘管内水的温度分布如图3。由图3可知,方案C盘管表面的整体温度相对较高,且高温段面积比方案A、B的高温段面积大。盘管表面温度越高,与沼气池的换热量就越大,所以方案C的瞬时换热量最大,又因3种布置方式的换热总面积相同,因此方案C的换热效果最佳。

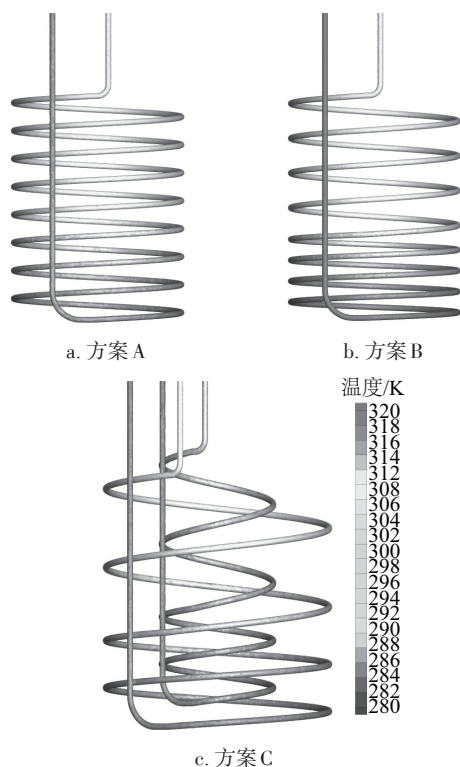


图3 螺旋管内水的温度变化图

Fig. 3 Variation of water temperature in spiral tube

3.2 热管在不同安装方案下加热沼气池的温度分布云图

加热 40 min 后沼气池内部纵向截面的温度分布如图 4。由图 4 可看出,料液温度随着加热的进行逐步升高,3 种布置方式下,池内横截面的温度分布方案 C 比方案 A、B 更均匀;纵截面的温度分布有分层现象,但方案 C 底部的低温区少于方案 A、B,且方案 C 的沼气池整体温度高于方案 A、B。

4 模拟结果的实验验证与分析

4.1 实验方案

根据模拟优化的结果设计了以方案 C 布置的盘管换热器加热沼气池的发酵系统,并进行了实验测试。利用太阳能恒温加热系统加热沼气池,其换热管两进口温度均为 50 ℃,速度均为 0.5 m/s。为精确地测定池内温度分布情况,池内分 3 层共布置 9 支热电偶传感器,每层 3 只均匀分布,分别位于距顶部 300、600、900 mm 处,每层 3 只热电偶分别距池壁面 300、600、1100 mm。运用温度记录仪记录运行 8 h 的数据,并与数值计算结果进行对比分析。

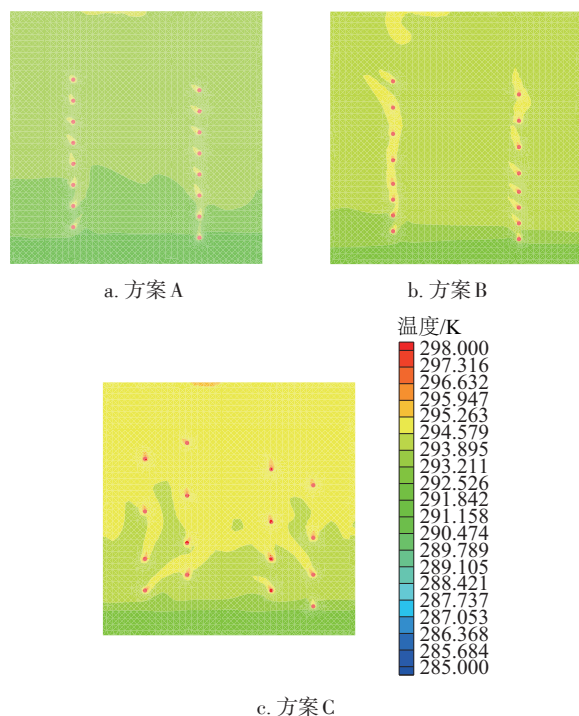


图4 沼气池温度分布

Fig. 4 Pool temperature distribution

4.2 料液配备

本实验设计发酵原料浓度 8%,碳氮质量比 25:1,接种物占发酵原料的 30%,加入水后的发酵液应占池体总容积的 80%,原料相关参数如表 1 所示。

表1 原料相关参数

Table 2 Relevant parameters of materials

原料	C:N	TS/%	[N]/%	[C]/%
鲜牛粪	25:1	18	0.29	7.3
沼气池污泥	25:1	8	—	—

4.3 实验仪器

沼气池外部为圆柱形水池,半径 0.6 m,高 1.2 m,保温层为 80 mm 厚 XPS(挤塑聚苯乙烯保温板)流量计最大量程为 1000 L/h,玻璃管公称直径为 40 mm。流量的调节采用管路中的阀门来手动控制。温度传感器为 K 型热电偶,测量范围为-40~100 ℃,测量精度为 0.1 K,用 TP700 多路数据记录仪采集实验数据。

4.4 模拟结果与实验结果的对比

如图 5 所示,对比 8 h 内池上、池中和池底温度,二者的结果基本吻合,变化趋势相近,因此模拟

计算值可信,可以利用软件模拟计算对换热盘管进一步优化。从图 5 可看出,模拟结果总体上比实验结果高,其原因是模拟计算时池壁是绝热的,而实际运行中池壁会散发部分热量。

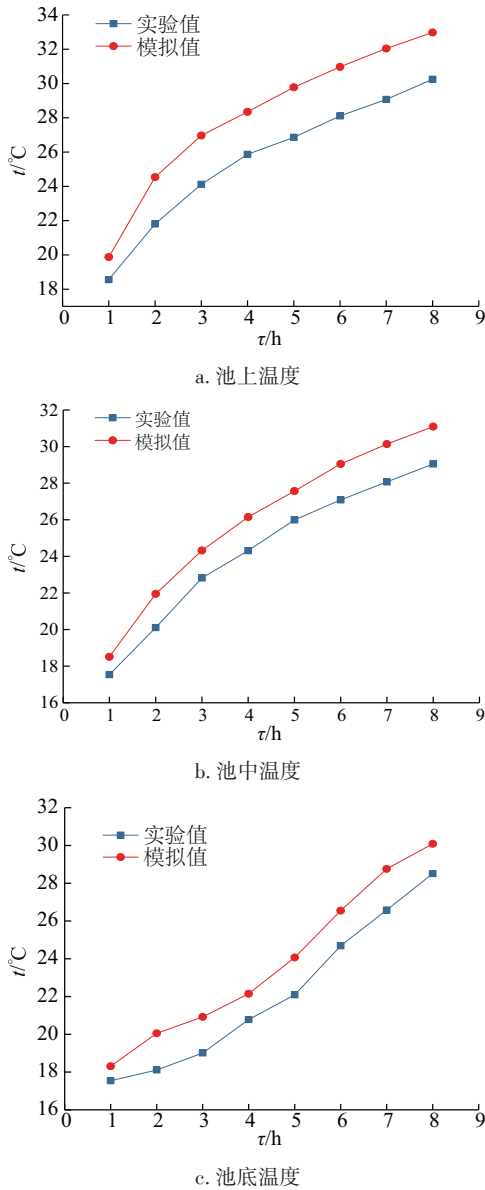


图5 池内温度对比

Fig. 5 Pool temperature contrast

4.5 温度场的分布

表 2 为实验测试出的池内温度分布结果。由表 2 可看出,竖直截面上温度分布有分层现象,底部温度较低,顶部温度较高,最大温差为 2.9 ℃,池上与池中最大温差为 1.7 ℃。同一高度截面上温度分布较均匀,最大温差为 0.4 ℃。

在沼气发酵系统中,当沼气发酵时,温度波动为 2~3 ℃,对沼气发酵影响不大。因此在无搅拌的情况下,应用上述优化后的方案是可行的。若能与上述优化后的方案再匹配搅拌装置,则池内的温度分布将更均匀,换热效果将更好。

表2 池内温度分布实测值

Table 2 Measured values of the pool temperature distribution

部位	参数	距池侧壁距离/mm		
		300	600	1100
池上	实验值	31.2	31.4	31.1
	模拟值	31.9	32.5	31.7
	误差/%	2.2	3.5	1.9
池中	实验值	29.5	29.7	29.1
	模拟值	30.2	30.4	30.6
	误差/%	2.4	2.3	5.2
池下	实验值	28.3	28.6	28.2
	模拟值	29.1	29.5	29.3
	误差/%	2.8	3.1	3.9

5 结 论

1)以方案 C 安装的螺旋管换热器对沼气池的加热速度较快,且池内温度分布较均匀,池温分层现象不明显,换热效果最佳。通过实验验证,发现模拟结果与实验结果吻合良好,且二者变化趋势相同,说明模拟计算的可行性与有效性。可为今后太阳能沼气系统换热器的优化提供新的参考方法。

2)以优化的换热盘管加热沼气池 8 h 后,池内温度分布均匀,同一高度截面最大温差为 0.4 ℃。竖直截面上温度分布有分层现象,最大温差为 2.9 ℃,若能再与之匹配搅拌装置,则池内的温度分布将更均匀,换热效果更佳。

[参考文献]

- [1] 沈德安. 寒区户用沼气池联合太阳能增温系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [1] Shen Dean. The research of cold household biogas combined with solar heating system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [2] 杨 萌. 严寒地区太阳能-土壤源热泵联合加热沼气池的模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

- [2] Yang Meng. Cold region of solar energy -the simulation of soil source heat pump combined heating biogas pool [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [3] 齐俊峰, 李 超, 熊小平. 基于 Fluent 多重参考系的沼气池搅拌流场模拟[J]. 建筑知识, 2014, (10): 447—448.
- [3] Qi Junfeng, Li Chao, Xiong Xiaoping. Simulation of the biogas mixing flow field based on Fluent multi reference system[J]. Building Knowledge, 2014, (10): 447—448.
- [4] Zhi Guangchen, Chao Kuiqin. Experiments and simulation of a solar-assisted household biogas system [J]. Energy Procedia, 2014, 61: 1760—1763.
- [5] 贾 玲, 邢世录, 田 瑞, 等. 户用太阳能中温沼气发酵系统的数值设计[J]. 热科学与技术, 2013, (3): 267—271.
- [5] Jia Ling, Xing Shilu, Tian Rui, et al. Numerical design of solar energy middle temperature biogas fermentation system[J]. Thermal Science and Technology, 2013, (3): 267—271.
- [6] Wu Binxin. CFD simulation of gas mixing in anaerobic digesters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 278—286.
- [7] 燕纪伦. 基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统的设计与分析[D]. 济南: 山东科技大学, 2011.
- [7] Yan Jilun. Design and analysis of solar heating efficient producing biogas system based on thermal management [D]. Ji'nan: Shandong University of Science and Technology, 2011.

OPTIMIZATION DESIGN OF POOL HEAT EXCHANGE COIL BY SOLAR ENERGY

Jiang Xin¹, Cui Jianming¹, Tian Rui^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy of the Ministry of Education, Hohhot 010051, China)

Abstract: In a solar assisted heat of biogas fermentation system, heat exchanger arrangement for the study, the numerical simulation and experimental validation of the method of heat transfer area different arrangement of heat exchangers for heating the digester and the effect of temperature distribution happening. Application Fluent software on the system of the heat transfer process in the three dimensional unsteady numerical simulation, optimization of the heat exchanger optimal arrangement of installation, and experimentally verified in actual operation. The results showed that in the optimization of heating, the instantaneous heat capacity, and can make the pool more uniform temperature distribution. The simulation results are in good agreement with the experimental results proved that this method is feasible.

Keywords: solar energy; heat exchanger; computer simulation; biogas