

# 热水循环加热厌氧反应器稳态数值模拟分析

王雅君<sup>1</sup> 邱凌<sup>1</sup> 赵立欣<sup>2</sup> 葛一洪<sup>1</sup> 郭晓慧<sup>1</sup> 戴辰<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125)

**摘要:** 对于厌氧发酵系统, 温度分布是否均匀是影响产气效率的关键因素。通过在 10 L 厌氧反应器中分别对水和 TS 为 12.4% (质量分数) 的发酵料液进行加热的热平衡试验, 运用 Fluent 软件对厌氧污泥传热特性进行仿真模拟, 通过传感器监测温度变化, 得出水的温度分布与高 TS 料液有很大差异, 而且在没有搅拌装置的情况下进行高 TS 料液的传热仿真, 不能将其物性参数默认为水。在对水进行传热仿真时发现, 对于低 TS 料液进行仿真要考虑料液间的对流换热, 因此需调用 Boussinesq 假设, 调用该假设后, 模拟与试验最大误差仅为 4.2%。对换热管壁面厚度设置作出分析并得出: 在 Fluent 中设置虚拟壁面与在 Gambit 中直接绘制壁面模型具有相同效果, 而前者可以简化模型并减少计算时间。此外, 在进行高 TS 仿真时发现最适合这种热水循环加热系统的湍流模型为可实现  $k-\varepsilon$  模型 (Realizable  $k-\varepsilon$ )。

**关键词:** 厌氧发酵; 稳态模拟; 对流换热

中图分类号: S216.4; TK11<sup>+</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)10-0209-06

## Steady-state Numerical Analysis of Anaerobic Reactor by Hot Water Circulating Heating

Wang Yajun<sup>1</sup> Qiu Ling<sup>1</sup> Zhao Lixin<sup>2</sup> Ge Yihong<sup>1</sup> Guo Xiaohui<sup>1</sup> Dai Chen<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
2. Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Temperature distribution has a great influence on the efficiency of gas production for anaerobic fermentation system. Fluent is one of the most advanced software for fluid simulation. It is suitable to apply it in simulation analysis of the anaerobic reactor without stirring. Two kinds of raw materials which were water and digested slurry with TS of 12.4% were applied in two 10 L anaerobic reactors to conduct anaerobic fermentation experiments. Totally 16 temperature sensors were installed at each anaerobic reactor in order to detect temperature continuously. The temperature figures indicated that two types of materials were definitely different. Therefore, applying the Fluent heat transfer simulation to digested slurry anaerobic fermentation system cannot only utilize water as physical parameter. However, the error was only 4.2% between experiment with raw material of digested slurry with TS of 12.4% and Fluent simulation, when water and Boussinesq hypothesis were simultaneously defined as physical parameters. It was also explored that setting up a virtual wall in Fluent can dramatically simplify the model calculation time, and it had the same effect with defining real wall model in Gambit. In addition, it was found that realizable  $k-\varepsilon$  model was the most suited to the anaerobic fermentation system of digested slurry with high TS. The aims of the research were to explore suitable Fluent setting and optimization method for anaerobic fermentation and provide guidance for further work. Optimizing model and improving efficiency in unsteady-state numerical analysis will be the main body of the further work.

**Key words:** anaerobic fermentation; steady-state simulation; heat transfer

收稿日期: 2015-07-18 修回日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51576167)、公益性行业(农业)科研专项(201503135)和农业部农村能源科技专项(2014-30)

作者简介: 王雅君(1991—),男,博士生,主要从事生物质能源研究,E-mail: 815885504@qq.com

通信作者: 邱凌(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事生物能源与环境工程研究,E-mail: QL2871@126.com

## 引言

作为可再生能源中的重要组成部分,沼气的生产越来越受到重视<sup>[1]</sup>。而温度是沼气产量的关键影响因素,随着四季及昼夜的变化,料液产气受到影响,严重时甚至会停止产气,这给沼气生产和农村沼气推广利用带来阻力<sup>[2]</sup>。为解决这一问题,在冬、春、秋季,沼气发酵有必要采取加热和保温措施,保证正常产气<sup>[3]</sup>。

近年来已有不少学者做了关于沼气池内部传热的仿真研究。石惠娴等<sup>[4]</sup>通过费用年值法得出了沼气池年经济保温层厚度的数学模型。陈志光等<sup>[5]</sup>试验测定了螺旋管换热器的对流换热系数,并应用 Fluent 软件模拟了流场的实际情况,得出结论:换热系数与换热器面积、换热温差、管内外流体的运动情况等多种因素有关。毕峻玮等<sup>[6]</sup>对沼气池进行了搅拌后速度场和温度场的双重验证,通过秩和分析得到模型的温度变化规律与实际测试结果变化规律相同。朱洪光等<sup>[7]</sup>对全混式厌氧反应器的搅拌方式进行分析及优化,找到了最佳的搅拌设计方案。CRAIG 等<sup>[8]</sup>应用 CFD 研究了厌氧反应器内污泥的模型。WU<sup>[9-10]</sup>对气体混合模型进行仿真并研究了反应器内部的传热问题。贾玲等<sup>[11]</sup>采用数值方法解决了户用中温沼气发酵系统与太阳能系统的匹配问题,并通过非稳态模拟得到了达到最适温度的保温时间。罗涛等<sup>[12-13]</sup>研究了进料对发酵系统热量损失和罐内温度场分布的影响规律,得到连续进料的最适进料速度,还对反应器内部传热研究进展进行了综述。郭甲生等<sup>[14]</sup>对变化气候条件下沼气池的散热动态进行仿真,得出搅拌对螺旋盘管传热系数的影响。苏媛等<sup>[15]</sup>应用 Fluent 软件研究了非稳态计算中的定、变迭代效率问题。本文在前人研究的基础上对水和高 TS(总固体质量分数)发酵料液进行对比试验,并找出对应不同研究对象的软件设置,分析 10 L 厌氧发酵罐内的温度场情况,得到模型的最优设置,使仿真更趋于真实情况。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验所用污泥取自杨凌某污水处理厂的厌氧污泥,TS 为 12.4%。试验装置设计如图 1 所示,整体由恒温水箱、流量计、节流阀和 10 L 厌氧发酵罐组成。

厌氧发酵罐形状为圆柱形,内径 236 mm,高 510 mm。内部换热管材料为聚氯乙烯,管径 14 mm,壁厚 1 mm,对罐体内部 16 个点进行温度监测<sup>[16]</sup>,

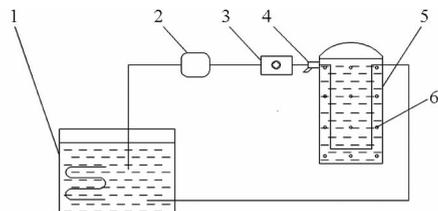


图 1 试验装置

Fig. 1 Experiment device

1. 恒温水箱 2. 循环泵 3. 流量计 4. 阀门 5. 厌氧反应器
6. 温度传感器

传感器位置及罐体具体尺寸如图 2 所示,图中 1~16 为温度传感器所在位置。试验测量参数及使用仪器如表 1 所示。试验采用温度传感器 Pt100 测量温度。在系统达到稳态之前,监测点温度监测时间间隔为 30 min。

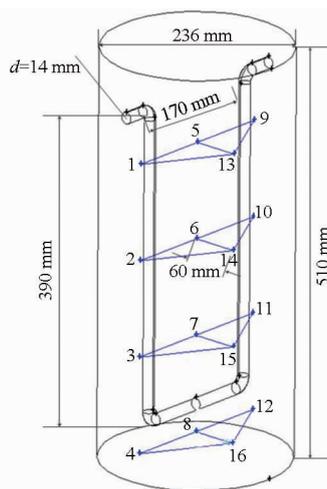


图 2 厌氧发酵罐尺寸与传感器位置

Fig. 2 Size of anaerobic reactor and sensor locations

表 1 测量参数及仪器

Tab. 1 Measuring parameters and instruments

参数	仪器	规格
热水流量	流量计	量程 0 ~ 50 L/min
环境温度	Pt100 温度传感器	量程 - 50 ~ 100℃
料液温度	Pt100 温度传感器	量程 - 50 ~ 100℃
进、出口温度	Pt100 温度传感器	量程 - 50 ~ 100℃
	厌氧发酵罐	容积 10 L
	水泵	额定功率 55 W

### 1.2 试验方法

建立厌氧发酵罐热平衡方程时,对整个系统做如下假设:热水管进口水温波动导致的误差忽略不计;对发酵罐内料液的物性参数进行测定,不用水代替;忽略料液发酵产热和产气带走的热量;假设罐体侧面与底面保温效果相同,顶部与外界绝热<sup>[17]</sup>。

由能量守恒方程可知,在罐内能量传递没有达到稳态时,换热管带入的能量  $Q_{in}$  等于料液的内能变量  $\Delta U$  和罐体向外界的散热量  $Q_{out}$  之和<sup>[18]</sup>,  $\Delta U$  计算

公式为

$$\Delta U = cm(T_{\text{liao, wen}} - T_{\text{liao, chu}})$$

式中  $c$ ——料液比热容  $m$ ——料液质量

$T_{\text{liao, wen}}$ ——到达稳态时料液平均温度

$T_{\text{liao, chu}}$ ——料液初始温度

系统达到稳态时,  $\Delta U = 0$ , 换热管带入的能量  $Q_{\text{in}}$  等于罐体向外界的散热量  $Q_{\text{out}}$ , 此时料液温度停止上升。

## 2 稳态模型仿真

### 2.1 几何模型的建立

数值模拟部分采用流体动力学软件 Fluent 和其前处理软件 Gambit, 整体的模拟过程分为建立模型、确定边界、划分网格和求解方程<sup>[19-20]</sup>。

数值分析要求模拟的条件与最终的仿真结果与真实情况趋近, 并且在误差允许的情况下尽量缩短计算时间, 提高效率<sup>[21]</sup>。为接近真实情况和缩短计算时间, 在建立模型的同时对其进行优化, 并将改变设置后的结果与真实的试验情况进行了对比, 得出最适于 10 L 厌氧消化器的仿真模型。

利用前处理软件 Gambit 建立几何模型, 如图 3 所示。三维建模中, 网格的选择可分为结构化、块结构化和非结构化网格<sup>[22]</sup>。由于换热管的结构并不规则, 非结构化网格最为适用, 这种网格对网格节点没有限制, 其节点和单元分布是任意的, 因此相对于其他 2 种网格来说具有几何灵活性, 能适应比较复杂的几何结构<sup>[23]</sup>。

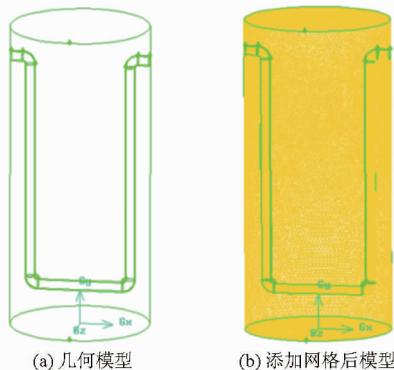


图 3 厌氧发酵罐几何模型

Fig. 3 Geometric model of anaerobic reactor

### 2.2 发酵料液传热特性

试验所用 TS 为 12.4% 的厌氧污泥, 为高 TS 料液, 为确定其传热特性, 在加热和保温相同的情况下, 对发酵料液和水同时加热进行对比试验。将 5、6、7、8、13、14、15 和 16 这 8 个点的平均温度定为发酵料液的平均温度, 平均温度随加热时间的变化如图 4 所示。

由图 4 可知, 水与 TS 为 12.4% 的发酵料液升

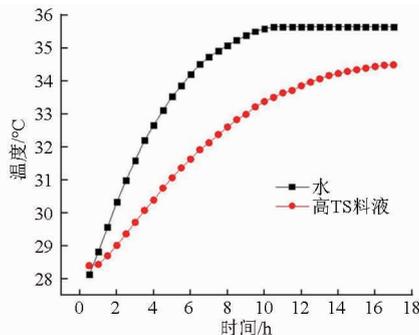


图 4 水与料液的温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curves of water and feed liquid

温曲线并不相同, 水的升温速率大于发酵料液。在试验开始 10 h 后趋于稳定, 而发酵料液达到稳态需要 16 h, 可以看出高 TS 严重影响了料液之间的流动与对流换热。表 2 是二者温度趋于稳定时 16 个点的温度分布, 也可看出水与料液在传热方面的区别。

表 2 稳态温度对比

Tab. 2 Comparison of steady-state temperature

传感器 序号	水温度/ ℃	料液温 度/℃	传感器 序号	水温度/ ℃	料液温 度/℃
1	36.7	36.4	9	36.7	35.2
2	36.4	37.5	10	36.3	36.2
3	36.1	38.2	11	35.9	37.8
4	33.7	33.9	12	34.0	36.5
5	36.8	35.3	13	36.5	33.9
6	36.4	35.5	14	36.5	33.6
7	36.0	36.2	15	36.0	34.0
8	33.0	35.4	16	33.9	33.5

由表 2 中 16 个点的温度分布可明显看出水的温度呈由下向上递增的趋势, 温度上下分层明显, 最大温差可达 3.8℃。而发酵料液的温度是沿着加热管纵向分布的, 近管料液温度高, 远管料液温度低, 上下分层并不明显。这说明对于高 TS 料液而言, 对其传热性能进行模拟时不能将其物性参数默认为与水相同, 这样会造成相当大的误差。而对接近于水的低 TS 料液而言, 其流动性好, 仿真分析时必须考虑料液之间的对流换热问题, 可以近似将其传热特性默认为与水相同。

### 2.3 低 TS 料液的仿真

根据试验所得结果, 认为在模拟低 TS 传热效果时, 有必要调用 Boussinesq 假设。由于罐体内温度分布不均, 必然会产生料液之间的自然对流。这一假设可以得到料液间对流换热形成的温度梯度<sup>[24]</sup>。

发酵罐内的料液为不可压缩流体, 运用这一假设可以简化流体的控制方程, 在自然对流中, 除了动量方程浮力项中的密度是温度的函数外, 其他所有求解方程中的密度 Boussinesq 假设均默认为常数,

一般认为,流体计算域内的温差大于  $30^{\circ}\text{C}$  时,这一假设不再适用。试验设计是使用  $45^{\circ}\text{C}$  的热水保温  $29^{\circ}\text{C}$  的料液,温差不大,符合这一假设的条件。假定料液的物性参数与水相同时,对使用这一假设的前后效果进行对比如图 5 所示,可以看出结果区别明显,这一假设使模拟结果与试验结果温度分布一致。

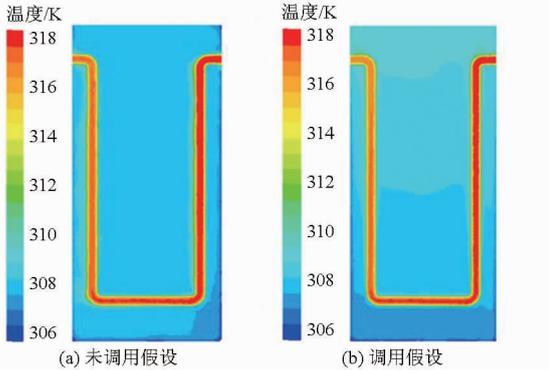


图 5 调用 Boussinesq 假设前后效果对比

Fig. 5 Effects comparison before and after calling Boussinesq hypothesis

由图 2 可知温度传感器的分布由上而下分为 4 层。图 6 为 16 个温度传感器的实际测温与每一层 4 个点模拟结果平均值的对比,最大误差为  $4.2\%$ ,发生在第 4 层。

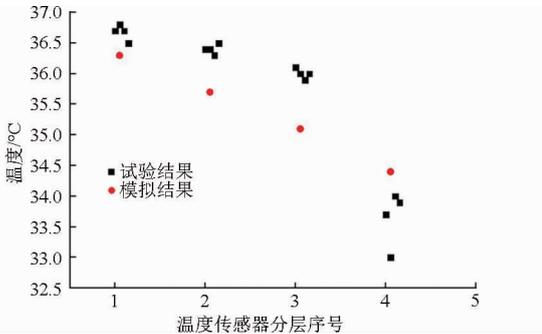


图 6 试验与模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of experiment and simulation results

## 2.4 换热管壁的设置

由于热水与料液是通过换热管壁交换热量的,因此在建立几何模型的过程中,换热管壁的设置是重要的步骤。对换热管壁的设置有两种方法:一是在 Gambit 中建立几何模型,与热水区和料液区相同,将其划分成  $1.5\text{ mm}$  厚的管壁区,得到的稳态结果如图 7a 所示;二是在 Gambit 中不考虑管壁,而在 Fluent 的边界条件选项中直接设置壁厚<sup>[25-26]</sup>,得到的稳态结果如图 7b 所示。对这 2 种处理管壁的方法得到的模拟结果进行对比,设置换热管热水进口流速为  $0.217\text{ m/s}$ ,其他初始设置均相同,可以看出,2 种管壁的设置方式在温度分布上基本一致。从简化模型的角度考虑,显然第 2 种方法不需要构建复杂的小区域网格,在建模与计算速度中具有优势。

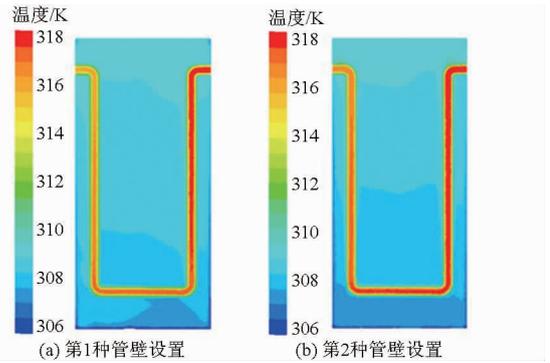


图 7 2 种管壁设置对应的模拟效果

Fig. 7 Effects of two kinds of tube wall setting

## 2.5 高 TS 料液的仿真

与低 TS 料液相比,高 TS 料液的模拟不仅不需调用 Boussinesq 假设,而且设置固定的散热壁面温度比设置散热系数更符合实际情况<sup>[27]</sup>。设置散热壁面温度为  $29^{\circ}\text{C}$ ,其他条件保持不变,得到图 8 所示  $x=0$  及  $z=0$  两个截面温度图。由图 8 可见,温度并没有形成明显的高低分层,而是围绕换热管壁分布。这与试验中得到的结果具有一致性,但依然说明搅拌装置在厌氧发酵中的必要<sup>[28]</sup>。

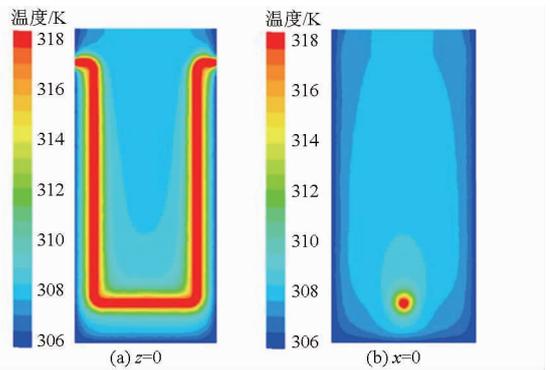


图 8 高 TS 料液仿真效果

Fig. 8 Simulation effects of feed liquid with high TS

## 2.6 湍流方程的选择

对于换热管内径  $14\text{ mm}$ 、进口流速  $0.2 \sim 1.0\text{ m/s}$  的工质水而言,可由计算得出其雷诺数范围,即:  $Re = 2\ 787 \sim 13\ 933$ ,雷诺数大于  $2\ 300$ ,属于湍流流动<sup>[29]</sup>。Fluent 软件提供多种湍流模型:标准  $k-\varepsilon$  (Standard  $k-\varepsilon$ ) 模型,是一个半经验公式,假定流场为完全湍流,忽略分子之间的粘性,其鲁棒性最好,适于初始迭代设计选型和参数研究;重组化群  $k-\varepsilon$  模型 (RNG  $k-\varepsilon$ ),适于涉及快速应变、中等涡等高雷诺数流动问题<sup>[30]</sup>;可实现  $k-\varepsilon$  模型 (Realizable  $k-\varepsilon$ ),对正应力进行了数学约束,使流动符合湍流的物理定律,其适应的流动类型较为广泛,包括有旋均匀剪切流、自由流、腔道流动等,计算精度优于重组化群  $k-\varepsilon$  模型<sup>[31-32]</sup>。在其他条件不变的情况下,对这 3 种模型进行稳态传热模拟,传热图为稳态

时  $x=0$  与  $z=0$  两截面叠加的综合效果,如图 9 所示。并将模拟结果与试验结果进行对比,对坐标  $x=0$  平面平均温度的计算进行追踪,如图 10 所示。

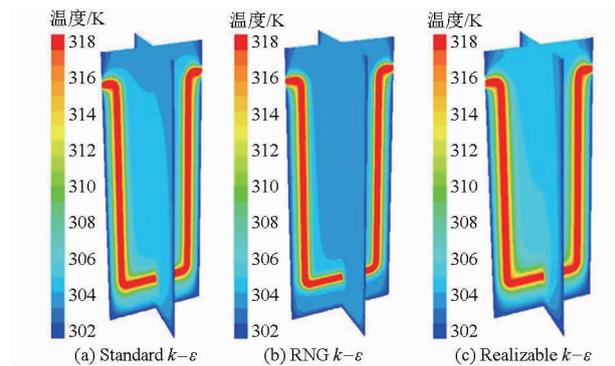


图 9 3 类湍流模型对应的传热效果

Fig. 9 Effects of three kinds of turbulence model setting

湍流方程的选择主要影响换热管内流体的流动特性及传热特性。由图 9 可以明确看出,不同的湍流方程对料液传热也有很大影响。Standard  $k-\varepsilon$  与 Realizable  $k-\varepsilon$  使罐体内有较为明显的温度分层。从图 10 得到,最大误差产生于第 7 个温度传感器所

测数据,与试验结果相差  $3.0^{\circ}\text{C}$ 。RNG 模型的最大误差为  $5.0^{\circ}\text{C}$ ,故选择 Standard  $k-\varepsilon$  与 Realizable  $k-\varepsilon$  更接近试验结果。

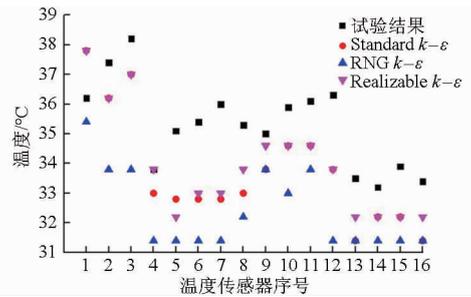


图 10 试验与 3 类湍流模型模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of experiment and simulation results of three kinds of turbulence model setting

计算设定迭代次数均为 120,从图 11 的计算追踪图上来看,可实现  $k-\varepsilon$  模型 (Realizable  $k-\varepsilon$ ) 计算波动较小,在计算结束前,已基本趋于平稳,较前两者具有优势。而在其他的厌氧消化装置中,应在基本的经验基础上对具体问题找出最合适的湍流方程。

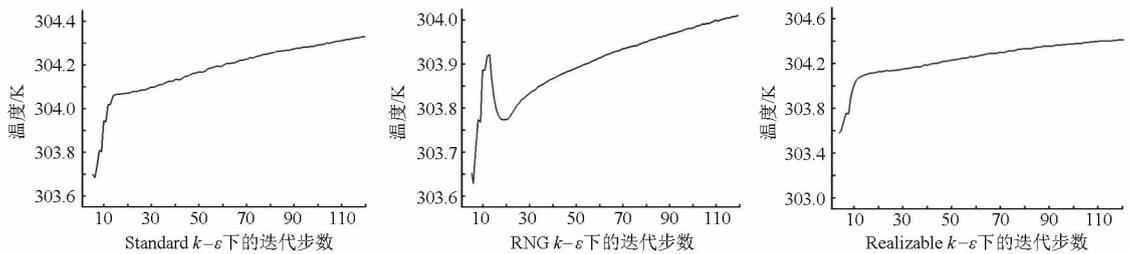


图 11  $x=0$  平面平均温度计算追踪图

Fig. 11 Calculate trace of average temperature by three kinds of turbulence model setting

### 3 结论

(1) 试验中,在缺少搅拌装置的情况下,水及低 TS 料液温度分层明显,最大温差可达  $3.8^{\circ}\text{C}$ 。对其进行仿真时,应考虑料液之间的对流换热问题,有必要调用 Boussinesq 假设。在监测范围内,试验与修正后的仿真结果误差在  $4.2\%$  以内。

(2) 对于高 TS 料液的仿真,不能将其默认为水

的物性参数,否则将造成极大误差。有必要进一步研究 TS 与粘度、传热效果之间的相关性。

(3) 对于换热管壁,在 Fluent 中直接设置虚拟壁厚与设置几何体效果相似,但前者可行性更高,更适用于简化模型。

(4) 湍流方程的选择对仿真效果影响很大,在模拟水循环加热的厌氧消化器内部传热问题时,可实现  $k-\varepsilon$  模型 (Realizable  $k-\varepsilon$ ) 具有一定优势。

### 参 考 文 献

- 1 石惠娴,朱洪光,李永明,等. 地源热泵式沼气池加热系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):268-273. SHI Huixian, ZHU Hongguang, LI Yongming, et al. Heating system of biogas digester by ground-source heat pump [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2):268-273. (in Chinese)
- 2 郭甲生,秦朝葵,戴万能. 变化气候条件下沼气池散热动态仿真[J]. 中国沼气, 2010, 28(3):8-10. GUO Jiasheng, QIN Chaokui, DAI Wanneng. Dynamic simulation of biogas digester heat loss under certain climate condition [J]. China Biogas, 2010, 28(3):8-10. (in Chinese)
- 3 刘广青. 生物质能源转化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009:109-111.
- 4 石惠娴,黄超,朱洪光,等. 基于热泵加热系统的沼气池经济保温层厚度确定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):215-221.
- 5 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. CHEN Zhiguang, QIN Chaokui. Experiment of biogas digester with spiral heating system and the simulation with Fluent model [J]. China Biogas, 2009, 27(3):36-39. (in Chinese)

- 6 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, 26(10):283-289.
- 7 朱洪光, 毕峻玮, 石惠娴. 全混式厌氧反应器搅拌方式分析与优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6):127-131.  
ZHU Hongguang, Bli Junwei, SHI Huixian. Analysis and optimization of diferent mixing method in completly mixed digesters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):127-131. (in Chinese)
- 8 CRAIG K J, NIEUWOUDT M N, NIEMAND L J. CFD simulation of anaerobic digester with variable sewage sludge rheology[J]. Water Research, 2013, 47(13):4485-4497.
- 9 WU Binxin. CFD simulation of gas mixing in anaerobic digesters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109:278-286.
- 10 WUI Binxin. Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93:195-208.
- 11 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, 12(3):267-271.  
JIA Ling, XING Shilu, TIAN Rui, et al. Household solar biogas system numerical design in cold area[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2013, 12(3):267-271. (in Chinese)
- 12 罗涛, 梅自力, 龙涛. 进料对沼气发酵温度场和产气的影响分析[J]. 中国沼气, 2015, 33(1):3-6.  
LUO Tao, MEI Zili, LONG Tao. Effect of feeding on temperature contour and biogas production[J]. China Biogas, 2015, 33(1):3-6. (in Chinese)
- 13 罗涛, 梅自力, 施国中, 等. 沼气池热传递过程研究进展[J]. 农机化研究, 2015, 37(1):246-249.
- 14 郭甲生, 秦朝葵, 魏晓峰, 等. 户用太阳能辅助加热沼气池动态传热仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1):360-364.  
GUO Jiasheng, QIN Chaokui, WEI Xiaofeng, et al. Numerical simulation of unsteady heat transfer insolar-assisted heating household biogas digester[J]. Computer Simulation, 2011, 28(1):360-364. (in Chinese)
- 15 苏媛, 田瑞, 杨晓宏, 等. 太阳能加热沼气发酵系统数值方法的研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(2):66-68.  
SU Yuan, TIAN Rui, YANG Xiaohong, et al. Research on the numerical methods of solar heating biogas fermentation system [J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(2):66-68. (in Chinese)
- 16 贾玲, 邢世录, 田瑞, 等. 电加热沼气池试验研究和 Fluent 数值模拟[J]. 可再生能源, 2013, 31(11):85-88.  
JIA Ling, XING Shilu, TIAN Rui, et al. Electric heating biogas digester experimental research and numerical simulation of Fluent [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(11):85-88. (in Chinese)
- 17 石惠娴, 荣凌, 朱洪光, 等. 搅拌强度对全混式沼气池加温过程及加温能耗的影响[J]. 可再生能源, 2011, 29(1):62-65.  
SHI Huixian, RONG Ling, ZHU Hongguang, et al. The influence on heating process and energy consumption under different stirring intensities in CSTR [J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(1):62-65. (in Chinese)
- 18 胡效雷, 刘启香. 整体式太阳能沼气池的传热分析[J]. 太阳能学报, 1991, 12(1):41-47.  
HU Xiaolei, LIU Qixiang. The heat transfer analysis of solar methane generation pit with integration construction[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1991, 12(1):41-47. (in Chinese)
- 19 郝飞麟, 沈明卫, 张雅. 单栋塑料温室内温度场 CFD 三维稳态模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12):222-228.  
HAO Feilin, SHEN Mingwei, ZHANG Ya. 3-D steady simulation of temperature pattern inside single plastic greenhouse using CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):222-228. (in Chinese)
- 20 周俊杰. FLUENT 工程技术与实力分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013:14-16.
- 21 唐家鹏. FLUENT14.0 学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社, 2014:71-76.
- 22 杨萌, 严寒地区太阳能-土壤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, 2010:26-27.  
YANG Meng. Simulation study on solar-ground source heat pump combined heating digester in cold regions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010:26-27. (in Chinese)
- 23 李鹏飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京:人民邮电出版社, 2011:57-65.
- 24 刘亚柯. 平板太阳能集热器空气夹层对流换热数值模拟与实测分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011:35-36.  
LIU Yake. Experiment and numerical simulation for convective heat transfer of air cavity in flat-plate solar collector[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011:35-36. (in Chinese)
- 25 陈家庆. ANSYS FLUENT 技术基础与工程应用[M]. 北京:中国石化出版社, 2014:209-214.
- 26 李进良. 精通 FLUENT6.3 流场分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2009:95-99.
- 27 MERONEY R N, SHEKER R E. CFD simulation of vertical linear motion mixing in anaerobic digester tanks [J]. Water Environment Research, 2014, 86(9):816-827.
- 28 SHEN F, TIAN L B, YUAN H R, et al. Improving the mixing performances of rice straw anaerobic digestion for higher biogas production by computational fluid dynamics (CFD) simulation[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2013, 171(3):626-642.
- 29 孔珑. 工程流体力学[M]. 北京:中国电力出版社, 2014:54-60.
- 30 王瑞金. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:121-129.
- 31 温正. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2013:78-79.
- 32 COUGHTRIE A R, BORMAN D J, SLEIGH P A. Effects of turbulence modelling on prediction of flow characteristics in a bench-scale anaerobic gas-lift digester[J]. Bioresource Technology, 2013, 138:297-306.
- 33 白晓凤, 李子富, 闫园园, 等. 吹脱与鸟粪石沉淀组合工艺处理中温厌氧发酵沼液研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12):218-225.  
BAI Xiaofeng, LI Zifu, YAN Yuanyuan, et al. Treatment of liquid digestate by stripping combined with struvite precipitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):218-225. (in Chinese)
- 34 张仙梅, 云斯宁, 杜玉凤, 等. 沼气厌氧发酵生物催化剂研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5):141-155.  
ZHANG Xianmei, YUN Sining, DU Yufeng, et al. Recent progress and outlook of biocatalysts for anaerobic fermentation in biogas production process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):141-155. (in Chinese)