

Study on the Numeric Simulation and Optimization of Flow Condition in the Integrated Sludge Thickening and Digesting Reactor

Qiang He¹, Jiang Li¹, Xuebing Hu¹, Hainan Ai¹, Weiqing Zheng²

¹Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, China, 400045

²Hebei Branch, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Shijiazhuang, China, 050021
Email: hq0980@126.com, lijiaang0808@126.com

Abstract: The Fluent software was applied to study on the numeric simulation of flow condition in a integrated sludge thickening and digesting reactor. After some questions of flow condition existing in the reactor were revealed, adjusting the structure and changing its measurement were presented to optimize the flow condition by orthogonal test to obtain the best structure measurement. Assessing indexes were velocity variance mean weighted and total kinetic energy of isosurfaces. The results showed that: (1) a short-flow situation was formed in the lower part of the external reactor and a cycle was not formed in the lower part of the inner reactor. (2) ways of optimization of flow condition were adjusting the position of the inlet tubule and changing the gas tubule into a whole. (3) the key factor affecting the flow condition was the height of gas tubule, at last, the best structure measurement was gained, that was measurements of up and down communicating ports 70mm×60mm and 50mm×40mm or 60mm×50mm, respectively, the height of inlet tubule 250mm, the diameter of gas tubule 40mm, the height of gas tubule 450mm.

Keywords: numeric simulation; optimization of flow condition; Fluent software; the integrated sludge thickening and digesting reactor

污泥浓缩消化一体化反应器流态模拟及优化

何 强¹, 李 江¹, 胡学斌¹, 艾海男¹, 郑伟青²

¹重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆, 中国, 400045

²中国核电工程有限公司河北分公司, 石家庄, 中国, 050021

Email: hq0980@126.com, lijiaang0808@126.com

摘 要: 应用 Fluent 软件对泥浓缩消化一体化反应器的流场进行了模拟, 找出了反应器设计中存在的问题, 通过调整和改变反应器内部结构及尺寸, 借助正交试验来优化流态, 考核指标是预设等值面上的流速方差加权平均值和总动能两项, 最终获得反应器内部结构尺寸的最佳组合。结果表明: 反应器流态存在的问题主要表现在进泥管位置太低易造成短流和内反应室下部未形成循环, 优化途径是改变进泥管位置并将气管调整为一整体, 正交试验表明气管出口高度为关键因素, 并且反应器内结构尺寸的最佳组合为: 上、下连通口尺寸分别为 70mm×60mm 和 50 mm × 40mm 或 60 mm × 50 mm, 进泥管高度 250mm, 气管直径 40 mm, 气管出口高度 450mm。

关键词: 数值模拟; 流态优化; Fluent 软件; 污泥浓缩消化一体化反应器

1 引言

厌氧消化不仅能实现污泥减量化和稳定化, 还能消减病原菌^[1], 并且厌氧消化产生的沼气作为一种能源, 不仅能解决污泥处理中所需的能源, 还能供给整个污水处理厂所需的能耗^[2], 因此, 污泥厌氧消化技

资助项目: 水体污染控制与治理科技重大专项—三峡库区污水处理厂功能提升与污泥处理处置技术研究与综合示范(2009ZX07315-02)

术广泛用于污泥处理工程中^[3], 但传统的工艺是将污泥浓缩与厌氧消化分开, 造成了污泥处理占地大和能耗高等缺陷。课题组针对污泥厌氧处理的具体问题, 进行了污泥浓缩消化一体化反应器的开发研究。城市污水厂小试试验表明, 污泥浓缩消化一体化反应器的浓缩和消化效果优于普通重力浓缩池和消化池^[4]。由于流体在流经反应器时, 基于各种影响所造成的涡流、

短路、死区以及速度分布等产生返混，导致反应器的效率降低，因此有必要对反应器内的流态进行研究^[5]，以优化反应器的设计和操作。近年来，计算流体动力学在研究水处理构筑物的流态方面应用广泛，包括沉淀池^[6-7]、沉砂池^[8]、氧化沟^[9]等构筑物，数值模拟结果可为设计优化的水处理构筑物提供理论参考。

本文借助Fluent软件对污泥浓缩消化一体化反应器的流态进行了数值模拟，找出了反应器设计中存在的问题，针对这些问题提出了改进措施，并对影响反应器流态的因素进行正交试验来优化流态，最终得出反应器内部结构尺寸的最佳组合，为反应器的设计和放大提供理论基础。

2 计算模型

2.1 假设条件

(1) 由于剩余污泥含水率达99%以上，可认为污泥与水的属性一样，当成单相流来处理。循环气体为空气。

(2) 流体为稳态、不可压缩的粘性流体，忽略各相之间的相互作用及反应器内发生的生物化学作用，反应器内流体可视为气液两相流。

(3) 假设反应器中温度恒定，将温度场视为恒温场。

2.2 物理模型

根据假设条件，把流态模拟的问题简化为两相流的三维模型，模型如图 1 所示。其中反应器总高 $H=1550\text{mm}$ ，外反应室直径 400mm ，内反应室直径 200mm ，内循环管直径 30mm ，有效水深 $h=1370\text{mm}$ ，有效容积 $V=110\text{L}$ 。

2.3 求解过程

2.3.1 网格生成

通过前处理工具 GAMBIT 软件建模，对于三维模型，采用非结构性的三角形网格。网格图如图 2 所示。

2.3.2 计算模型

标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型是目前解决湍流流动问题使用最广泛的湍流模型^[10]。RNG (renormalization group) $k-\varepsilon$ 模型是基于紊动各向异性的基础上发展起来的在形式上类似于标准 $k-\varepsilon$ 模型，其计算结果更符合实际^[11]。本研究选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。

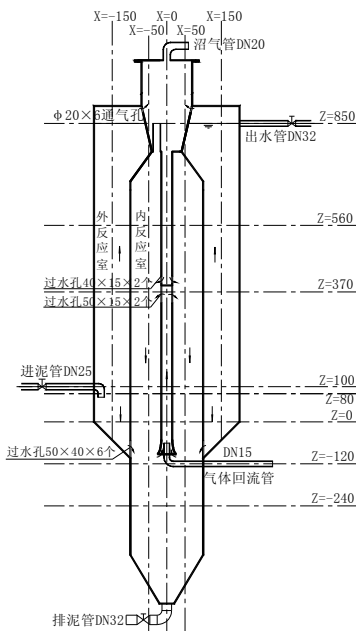


Figure.1 Schematic view of the reactor and isosurfaces
图 1 反应器及等值面设置示意图

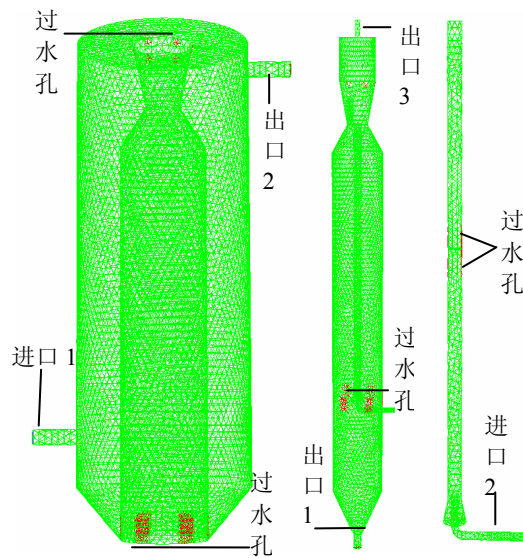


Figure.2 Schematic view of the gridding of the reactor
图 2. 反应器网格划分示意图

2.3.3 边界条件与初始条件的设定

根据 TISTD 反应器的实际测试数据，定义边界条件和初始条件如下：

入口 1：定义为速度入口。混合相：湍流强度为 5%，水力直径 32mm ；液相：速度 $v=0.4\text{m/s}$ ；气相：速度 0m/s ，体积分数 0。

入口 2: 定义为速度入口。混合相: 湍流强度为 5%, 水力直径 15mm; 液相: 速度 $v=0\text{m/s}$; 气相: 速度 0.2m/s , 体积分数 1。

出口: 采用压力出口 pressure outlet。混合相: 湍流强度为 5%, 水力直径 32mm (出口 1、2)、20mm (出口 3); 液相、气相: 回流分数 0。

根据反应器的实际情况内部过水孔定义为 interior (内部界面), 反应器隔板定义为 wall (固体壁面), 认为壁面静止, 且认为和周边没有物质和能量的交换。

3 结果与讨论

3.1 流态分析

3.1.1 y 方向上等值面流动矢量图及分析

反应器的物理模型是三维模型, 而计算结果只能用二维图形表示, 所以需要设置若干等值面, 通过对等值面上流场的分析, 达到对反应器三维流场的分析。各等值面设置情况如图 1 所示。

从等值面 $y=0$ 上的流态状况(图 3 所示, 不同颜色代表不同的流体流速)可以看出以下几个问题:

(1) 进泥管设计在外室下部, 理想的流态为: 进入反应器的污泥在外室相对平稳的流态中会形成上升流, 上清液由上部的出水口排出, 而经初步浓缩的污泥则由下连通口进入内室继续进行消化。

但从流态图中可看出, 由于进泥存在一个初速度, 而进泥管的位置离下连通口又太近, 致使外室的污泥大部分没有经过浓缩, 直接进入了内室。

(2) 内循环管被设计成上下两部分, 并在分割处留有水孔。理想的流态为: 在回流沼气的带动下, 内循环管下部首先实现了循环; 然后回流的沼气与内室产生的沼气一起上升, 同时把内室中上部的混合液经上升管提升至气液分离器, 被分离的沼气进入集气室排走, 分离出的泥水混合液将沿下降管(循环管)回到内室中部, 从而在内室中上部又实现了一个循环。在这两个循环的作用下, 使内室厌氧污泥处于“流化状态”, 从而保证了基质与微生物之间的充分接触。

但从模拟的流态图中(等值面 $y=0$)可看出, 在内反应室的上部形成循环, 而下部并没有形成循环。

3.1.2 x 方向上等值面流动矢量图及分析

(1) $x=-50$ 与 $x=50$ 两个等值面, 即与进泥方向垂直的内反应室对称位置上中间部位的两个面, 这两

个等值面的位置对称, 它们的流态也较为对称, 说明进泥管位置的设置对内反应室流态的影响并不是很大。从这两个等值面的流态中仍然可以看出存在进泥短流及内反应室内循环不均匀的问题。

(2) 从等值面 $x=0$ 上的流态图中可看出内室上部形成循环, 而下部没有形成循环。

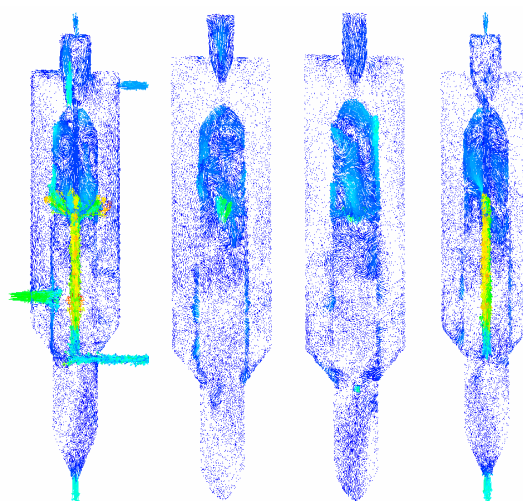


Figure.3 The flowing vector maps of the isosurfaces, $y=0, x=-50, x=50, x=0$

图 3 等值面 $y=0, x=-50, x=50, x=0$ 流动矢量图

3.2 优化流态的改进措施

从反应器流场的数值模拟结果, 可看出需改善的主要有外反应室进泥短流及内反应室内循环不均匀的问题。为了优化流态, 需调整反应器多个部位: ①改变进泥管的位置, 使进泥管与内外室连通口的距离增加; ②在内外室隔板上部开设连通孔(位于三相分离器下方), 使部分污泥可以通过上部的连通孔进入内室; ③通过调整上下连通孔的尺寸, 使进泥既不会形成短流, 又能在外室进行初步浓缩; ④将气管调整为一个整体, 通过调整气管出口的高度和气管的直径, 使内室形成更好的循环。单个部位取值的组合又影响结果, 所以需要进行正交试验, 找出最佳的组合方式。

选 5 因素 4 水平的 $L_{16}(4^5)$ 正交表, 表 1 所示。5 因素分别定为 1, 2, 3, 4, 5; 四个水平可分别定为水平 1, 2, 3, 4 (单位均为 mm), 即:

- 上连通口的尺寸: $40 \times 30, 50 \times 40, 60 \times 50, 70 \times 60$;
- 进泥管的高度(相对于坐标 $z=0$ 而言): 100, 250, 400, 500;
- 下连通口的尺寸: $40 \times 30, 50 \times 40, 60 \times 50$,

70×60; d. 气管直径: 20, 30, 40, 50; e. 气管出口高度 (相对于气管入口处): 450, 550, 650, 750。

Table 1. The test planning schedule
表 1 试验计划表

因素 试验	1	2	3	4	5
1	40×30	250	60×50	30	650
2	60×50	500	40×30	30	550
3	50×40	500	60×50	40	750
4	70×60	250	40×30	40	450
5	40×30	400	40×30	50	750
6	60×50	100	60×50	50	450
7	50×40	100	40×30	20	650
8	70×60	400	60×50	20	550
9	40×30	100	70×60	40	550
10	60×50	400	50×40	40	650
11	50×40	400	70×60	30	450
12	70×60	100	50×40	30	750
13	40×30	500	50×40	20	450
14	60×50	250	70×60	20	750
15	50×40	250	50×40	50	550
16	70×60	500	70×60	50	650

考核的指标包括等值面 $x=-150$, $x=150$, $x=-50$, $x=50$ 上的流速方差的加权平均值和等值面上的总动能^[12]。结果如下:

(1) 直观分析

正交试验中所有试验均采用相同的初始条件和边界条件,在相同条件下,反应器内流速方差均值越大,说明流场发展越完善,混合越均匀,有利于进泥与微生物的充分接触,提高处理效果。等值面流速方差加权均值及总动能见表 2 所示。可以发现,试验 4、6、11、13 的流速方差均值及总动能是最大的,说明这四种情况对应的流态是最好的。

(2) 极差分析

四个等值面流速方差及总动能总的极差分析见表 3、4 所示。可以得到,五个因素中,气管出口高度的流速方差及总动能总的极差最大,可以初步判断气管出口高度为关键因素。还可得知,对于上连通口尺寸采用水平 4 导致结果之和最大,说明取水平 4 是最理想的;对于进泥管的高度取水平 2 是最理想的;对于下连通口尺寸取水平 2 是最理想的;对于气管直径取水平 3 是最理想的;对于气管出口高度取水平 1 是最理想的。

Table 2 Velocity variance mean weighted and total kinetic energy of isosurface
表 2 等值面流速方差加权均值及总动能

试验	流速方差加权均值($\times 10^5$)					总动能($\times 10^3$)				
	$x=-150$	$x=150$	$x=-50$	$x=50$	总和	$x=-150$	$x=150$	$x=-50$	$x=50$	总和
1	44.34	8.8	43.87	41.87	138.88	2.32	1.02	6	5.27	14.61
2	33.89	4.23	20.08	15.34	73.54	4.58	3.09	7.51	6.03	21.2
3	42.63	5.6	52.86	50.84	151.93	1.73	0.93	8.22	7.7	18.58
4	62.05	103.08	83.02	108.05	356.21	6.4	10.43	14.56	19.86	51.25
5	38.03	6.1	15.57	11.33	71.02	1.76	1.05	2.38	1.95	7.15
6	77.6	25.93	84.67	69.19	257.39	10.11	2.66	17.89	13.36	44.03
7	48.27	6.07	33.8	29.06	117.2	2.03	0.34	4.43	3.49	10.29
8	50.56	20.9	53.81	53.5	178.76	3.53	2.1	9.09	8.83	23.55
9	62.9	25.87	54.82	60.49	204.08	4.39	1.73	8.33	8.16	22.61
10	42.07	8.73	64.53	61.87	177.2	1.74	1.16	9.9	8.57	21.37
11	74.63	38.45	41.92	77.18	232.18	5.54	2.88	10.39	14.79	33.59
12	49.76	8.55	57.69	46	161.99	2.12	0.58	7.01	6.42	16.14
13	44.69	36.08	80.46	66.76	227.99	2.86	2.23	15.01	12.23	32.33
14	39.76	8.5	25.06	18.84	92.16	1.53	0.74	3.02	2.09	7.39
15	36.06	5.1	85.85	92.1	219.12	1.46	0.6	12.19	14.3	28.55
16	61.67	22.45	62.88	53.52	200.52	4.38	2.01	9.52	8.3	24.2

Table3 Range analysis of velocity variance mean weighted of isosurfaces

表3 等值面流速方差($\times 10^5$)的极差分析

因素	1	2	3	4	5
K1	641.97	740.66	617.97	616.11	1073.77
K2	720.42	806.37	786.29	606.59	675.50
K3	600.30	659.16	726.97	889.42	633.79
K4	897.47	653.98	728.94	748.05	477.10
ΔK	297.18	152.39	168.32	282.83	596.67

注：表中 K 代表各水平导致结果之和。

Table4 Range analysis of total kinetic energy of isosurfaces

表4 等值面总动能($\times 10^3$)的极差分析

因素	1	2	3	4	5
K1	76.70	93.07	89.90	73.56	161.20
K2	91.01	101.80	98.39	85.54	95.91
K3	93.98	85.67	100.77	113.81	70.47
K4	115.14	96.31	87.79	103.93	49.25
ΔK	38.43	16.13	12.98	40.25	111.95

3.3 反应器细部结构的最佳组合

流速方差加权平均值和总动能能反映流态的好坏，将这两个指标分析的最佳取值组合到一起认为是反应器结构尺寸的最佳组合，即上连通口的尺寸为 70 mm $\times$ 60mm；进泥管的高度为 250mm；下连通口的尺寸为 50mm $\times$ 40mm 或 60 mm $\times$ 50mm；气管直径为 40mm；气管出口高度为 450mm。

4. 结论

(1) 应用 FLUENT 软件对污泥浓缩消化一体化反应器流场进行了模拟，找出了反应器设计中存在的问题，主要表现在进泥造成短流和内反应室下部未形成循环，这些问题的存在使反应器的流态不符合当初设计时的理想流态。

(2) 针对反应器流态中出现的问题对反应器的结构及尺寸做出调整，并通过正交试验进行优化。考核指标包括等值面 (x 方向) 上的流速方差的加权平均值和总动能。

(3) 正交试验表明气管出口高度为主要因素，并得到了反应器内部结构尺寸的最佳组合，即进泥管的高度为 250mm，气管直径为 40mm，气管出口高度为 450mm。

References (参考文献)

- [1] Puchajda,B., Oleszkiewicz,J. Extended acid digestion for inactivation of fecal coliforms[J]. *Water Environ. Res.*, 2006, 78(12), P2389-2396.
- [2] Pavel Jenicek, Jana Zabranska. Anaerobic digestion of sludge in municipal wastewater treatment plant-example of European co-lutions[C]. The international workshop on strategy for anaerobic biotechnology—anaerobic technology from the west to the east of the earth, Xi'an, 2009, P85-95.
- [3] Wang Yonghua, Xu Peng, Zhao Jinbao. Research developments of pre-treatments to anaerobic digestion of sludge. *Environmental Science Trends* [J], 2004, 4, P9-11(Ch).
王永华, 徐鹏, 赵金保. 污泥厌氧消化预处理的研究进展[J]. 环境科学动态, 2004.
- [4] He Qiang, Zheng Weiqing, Liu Hongxia, et al. Research on integrated reactor for sludge thickening and digestion[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(11), P2076-2081(Ch).
何强, 郑伟青, 刘鸿霞等. 污泥同时浓缩消化新型反应器的开发研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(11), P2076-2081.
- [5] Li Dehua, He Feng'e, Fu Xiaojun. Test of capability for the microreactor as the one used in industry and its digital feature[J]. *Journal of Central China Normal University(Nat.Sci.)*, 2000, 34(2), P200-204.
李德华, 何凤娥, 傅晓军. 微型工业反应器的性能检验及其数字特征[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2000, 34(2), P200-204.
- [6] H. S. Kim, M. S. Shin, D. S. Jang, et al. Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radio-isotope tracer technique[J]. *Applied Radiation Isotopes*, 2005, 63(4), P519-526.
- [7] Zeng Guangming, Ge Weihua, Qin Xiaosheng, et al. Numerical modeling on the movement of water and SS in two-dimensional sedimentation tanks of sewage factory[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(4), P338-341(Ch).
曾光明, 葛卫华, 秦肖生等. 污水厂二维沉淀池水流和悬浮物运动数值模拟[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4), P338-341.
- [8] Hua Genfu, Liu Huangfang, Tang Hua, et al. Numerical simulation of water flow pattern in sand basin. *Journal of Shihezi University(Natural Science)* [J], 2009, 27(4), P482-486(Ch).
华根福, 刘焕芳, 汤骅等. 沉砂池中水流流态的数值模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2009, 27(4), P482-486.
- [9] Xu Danyu. The kinetics for fluid and solid two-phase turbulent flow and biological reaction in Carrousel Oxidation Ditch[D]. Chongqing University, 2008, P72-83(Ch).
许丹宇. 卡鲁赛尔氧化沟液固两相湍流与生物反应动力学研究[D]. 重庆大学, 2008, P72-83.
- [10] V. Yakhot, S. A. Orzag. Renormalization Group Analysis of Trubulence: Basic Theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1), P5-11.
- [11] Qu Qiang, Ma Luming, Wang Hongwu. Solid-liquid two-phase flow simulation in a circular secondary clarifier[J]. *Journal of Tong Ji University(Natural Science)*, 2006, 34(9), P1212-1216(Ch).
屈强, 马鲁铭, 王红武. 辐流式二沉池固液两相流数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版) 2006, 34(9), P1212-1216.
- [12] Zheng Di. Research on improving the flow pattern and the sedimentation effect of the rectangular secondary sedimentation tank basedon FLUENT simulation and fluidization visualization experiments[D]. Chongqing University, 2007, P46-50(Ch).
郑迪. 基于 FLUENT 模拟及流态可视化实验验证的平流式二沉池流态及沉淀效果改善研究[D]. 重庆大学, 2007, P46-50.