

# OGO 反应器内流态的模拟及其对处理效果的影响分析

罗固源, 赵 杰

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要:** 同心圆活动导流墙式反应器(简称 OGO)内流体流动的动力主要来自水下推进器的推进作用。通过利用计算流体力学软件 FLUENT 对反应器在稳定运行时的三维流场模拟, 结合实测数据对反应器内的流动状态进行验证和分析, 得到反应器内的真实流动状态。结果表明应用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型(可实现  $k-\epsilon$  湍流模型)模拟所得流速值与实测值吻合良好, 反应器内的流动状态有利于系统的稳定运行及良好脱氮除磷效果的实现。

**关键词:** OGO 反应器; 数值模拟; Realizable  $k-\epsilon$  紊流模型; 流态分析

中图分类号: X 703.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-2842(2010)06-0001-04

## Simulation and Analysis on Flow Pattern of OGO Reactor and the Infection on Treatment Effect

LUO Gu yuan, ZHAO Jie

(Chongqing University, Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Ecological Environment, Ministry of Education, Chongqing 400030)

**Abstract:** The fluid flow in Concentric Circles Reactor with Movable Partition Wall(OGO) is driven by the underwater propulsion. Computational fluid dynamics software FLUENT was used to simulate the three dimensional flow field of OGO reactor when it works stably. Then the simulation was verified and analyzed by the actual flow velocity. The result shows that the flow velocity simulated by Realizable  $k-\epsilon$  turbulence model is consistent with the actual data, and the flow pattern in OGO reactor is conducive to the stable operation and good effect of nitrogen and phosphorus removal.

**Key words:** OGO reactor; numerical simulation; Realizable  $k-\epsilon$  turbulence model; flow pattern analysis

在污水生物处理连续流反应器中, 混合液的流态特性及水力混合特征与反应过程中的物质传输、生化反应性能、反应效率、反应器容积利用率以及运行稳定性等密切相关<sup>[1]</sup>。在环流循环反应器中, 氮、磷的去除效能很大程度上取决于混合液流动状态及水力特性<sup>[2]</sup>。OGO 反应器是课题组自主研发的一种在 OCO 基础上改进形成的新型环流循环污水处理技术。课题组前期研究结果表明,OGO 技术在确保有效去除有机物的前提下, 还具有良好的生物脱氮除磷能力, 长期运行稳定可靠。系统对 COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>3</sub>-N, TN, TP 的平均去除率分别为 92%, 81%, 73%, 83%, 出水水质能够总体满足 GB18918-2002

《城镇污水厂污染物排放标准》一级 B 标准的相关要求<sup>[3]</sup>。本文利用计算流体力学软件模拟 OGO 反应器内的流速分布及流态特征, 分析混合液在该反应器内的流体行为与其良好处理效果的关系, 以期为进一步改善反应器的处理效果提供技术支持。

### 1 数学模型

在 OGO 反应器中, 活性污泥混合液中的固相主要是组成活性污泥的菌胶团, MLSS 约为 2.7 g/L, 混合液与水的比重相近。这种固相相对于液相流动来说, 其产生的影响很小, 因此在研究反应器内流体的流态时将其简化为单相液体流动来处理。

#### 1.1 湍流模型

OGO 反应器内是一个复杂的三维湍流循环流动过程, 其流体为不可压缩流体, 采用三维 Realizable  $k-\epsilon$  紊流数学模型进行模拟。流动控制微分方程

收稿日期: 2010-04-19

基金项目: 中德国际合作项目 CSTC(2007DFA90660), 重庆市自然科学基金(2008BB7305)

作者简介: 赵 杰(1983-), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制理论与技术研究。Tel: 13594167083, E-mail: zjx7@126.com.

由相应的连续性方程、动量方程、湍动能方程、湍动能耗散方程组成<sup>[4]</sup>。

### 1.2 计算区域与工况

OGO 反应器容积为 154 L,外环 126 L,厌氧区 28 L,有效水深为 40 cm,厌氧区相对独立。因反应器进出口的流量与池容相比要小得多,故为简化计算,不计反应器的入流及出流,仅对反应器外环即好氧区、缺氧区及混合区内的流体进行模拟。推进器设置在 G 隔墙区域距池底约 10 cm 处,好氧区及缺氧区各设置 1 台,功率 30 W,流量 2 100 L/h。推进器位置见图 1。

### 1.3 边界条件

(1) 计算区域的网格划分: 为了提高计算效率,针对该反应器计算区域的特点,只在推进器区域采用网格数较多的体网格进行划分,其余区域采用六面体进行划分,不同类型网格的直接接触面上采用内部面设置。

(2) 自由水面: 不考虑水面波动,采用刚盖假定,压力为大气压力值。

(3) 底面和固壁面: 使用标准的壁面函数,满足壁面质量通量为零的条件。

(4) 水下推进器: 本反应器中水下推进器的主要功耗在于形成轴向速度,在模拟时将其作为理想推进器处理<sup>[5]</sup>。

(5) 好氧区由置于底部的环型曝气软管充气,在这段区域,会产生向上的速度,但并没有横向的速度,因此曝气对反应器的流速的影响考虑不计<sup>[6]</sup>。

## 2 模型验证

### 2.1 试验方法

流速测定方法: 分别对反应器好氧区、缺氧区及混合区的流速进行测定。测点分别在水深 5 cm, 20 cm, 35 cm 处选取,避开推进器区域及曝气区域,按图 1 所示划分出流速测定断面。每个断面设一个测点,位于断面中间,如此共得到 18 个测点。通过这种划分将同一深度不同位置、同一位置不同深度的流速进行验证与分析。

实验仪器为 LS45A 型流速测定仪,测定下限为 0.015 m/s,当流速低于下限而无法取得有效数据时,取所测数据中最大值记录。模拟流速见图 2。

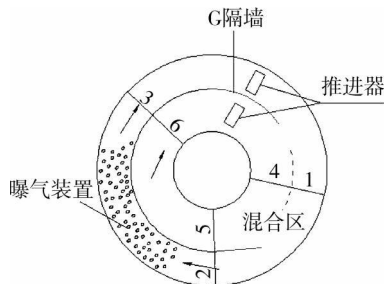


图 1 流速测定断面示意图

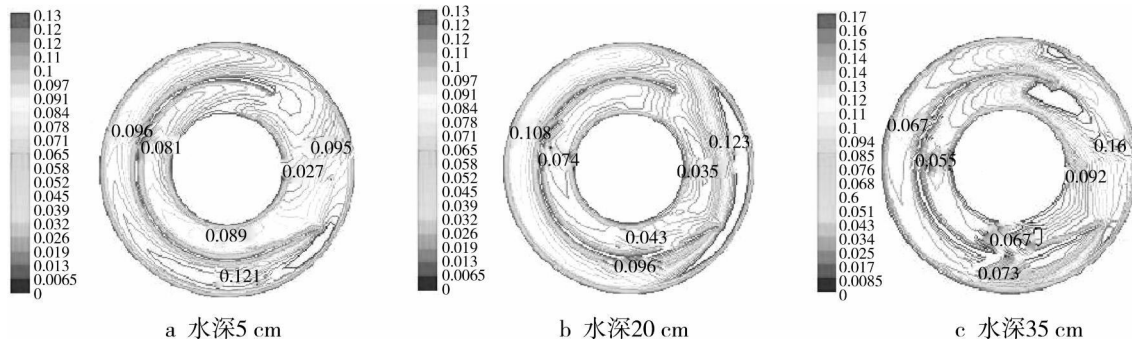


图 2 不同水深处流速模拟值

### 2.2 OGO 反应器流速模拟与实测结果对比及误差分析

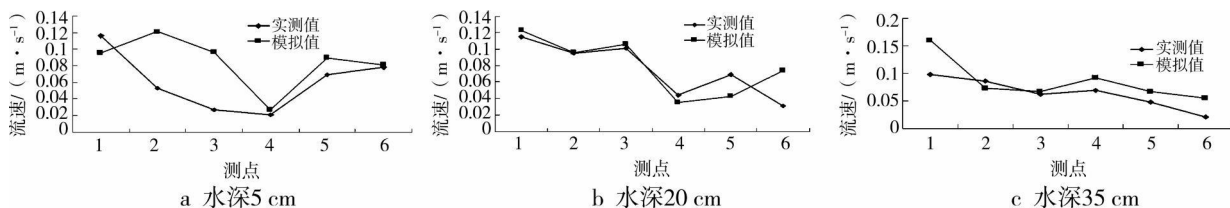


图 3 不同水深处流速实测值与模拟值比较

图3中,除水深5 cm处测点3和4因流速过小无法取得有效值外各测点误差均在可以接受的范围内。测点2和3实测值明显小于模拟值,是由于此处较多的曝气软管对流动起到了阻碍的作用,甚至累计泡沫,使上层流体克服阻力消耗一部分动能,流速降低,而模拟时并未考虑此曝气装置,从而造成较大误差。

图3中其余各测点流速吻合较好,其偏差主要由OGO模型系统误差、曝气装置产生的扰动误差、数学模型的计算误差以及测量操作的局限性造成。从下文所示速度等值线图可以看出,某些区域速度等值线分布很密,测点位置的细微变化可能导致所测速度值有很大不同。而在实际测量时流速仪不可

能完全按照流速方向进行测量,因而测量误差是不可避免的,在小试反应器中这种影响更加明显;模拟时用清水作为模拟流体,而实际运行中流体为混合液,虽然比重取相同值,但水质上的差异也会引起模拟误差。综合考虑上述因素,认为该模拟结果与实测数据之间的吻合程度是可以接受的,数学模型所作的假设是合理的,可以利用该模型对此反应器进行计算模拟。

### 3 反应器内的三维流动分析

#### 3.1 各断面流体纵向流速分布

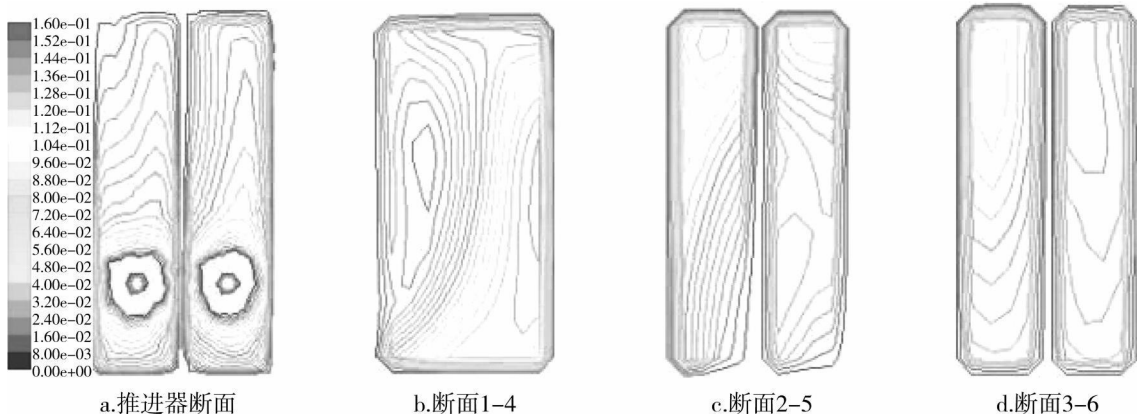


图4 各断面流速分布

由断面流速图可以看出断面流速呈现出外高内低,上高下低的规律,好氧区流速大于缺氧区。缺氧区速度等值线稀疏,梯度不明显,说明其流速较稳定,有利于减少充氧,保证缺氧反硝化脱氮作用。而推进器出口断面及混合区断面的速度等值线密集,说明这些地方流速梯度大,流动复杂,有利于动力的传递及物质的混合与交换。

由混合区断面1~4的流速矢量图(图5)可以看出,流体在此处形成从水流方向上看呈逆时针的环形流动。根据紊流基础理论<sup>[7]</sup>,混合液在推进器作用下以较高速度在环形流道内向前流动,在离推进器出口不远处碰到弯道壁后,流向改变,大部分高速流在离心力、惯性和弯道壁的作用下沿弯道外侧向表面扩散,而表面流沿弯道内侧向池底扩散,在流道内形成了一个表面流流向内侧底部、底部流流向外侧表面,沿水流方向上的逆时针环形流动。在反应器整体流态上,断面环流与水流纵向运动综合,因此认为流体在反应器内形成了近似螺旋流(2次流)。

反应器好氧区的流速大于缺氧区,分析认为由

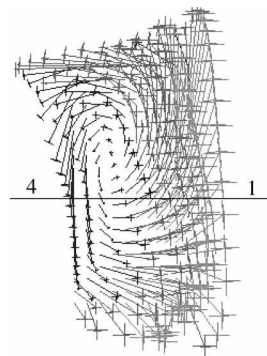


图5 混合区(1-4断面)流速矢量图

于高速液流存在惯性及离心力,因此主要集中在外侧,使得进入好氧区的高速液流明显多于缺氧区。

实测数据中好氧区水深20 cm处测点3流速要大于测点2,是因为流速随流体距推进器的距离增加而降低,但测点3由于靠近推进器后方,而推进器前后存在压力差,此处流体在负压作用下流速反而加快。

水深5 cm处即上层流体存在1个低速区,位于推进器上前方。分析认为由于混合液不同层面上存

在粘滞力作用, 流体由位于中下部的推进器加速, 上部流体是在中部高速流体的粘滞力带动下前进, 本身流速较小, 而中下部的高速流体在向前向上扩散过程中对这一部分流体也有一定的阻碍作用造成。

上层流体的高速区位于混合区及环区入口段, 而中部流体高速区在断面 3 和 6 附近, 反应器底部流速整体偏低, 分析认为由于反应器内水深较大而环区流道较窄, 由推进器出口开始形成的螺旋流在进入环区后受流道限制, 未能向下充分发展即流经整个环区, 因此造成流体中上部螺旋流明显而下部流速偏低, 在实际运行中, 应密切注意缺氧区底部是否发生污泥沉积, 为保证避免出现这种情况, 建议优化推进器配置, 如适当加大功率, 调整安放位置等。

### 3.2 反应器内流体行进方式分析

因二维图片难以清晰展现所有流线的流动路径, 本文选取好氧区及缺氧区各 10 条流线进行观察(图 6), 以便较清晰地表现流体在反应器内的行进方式。

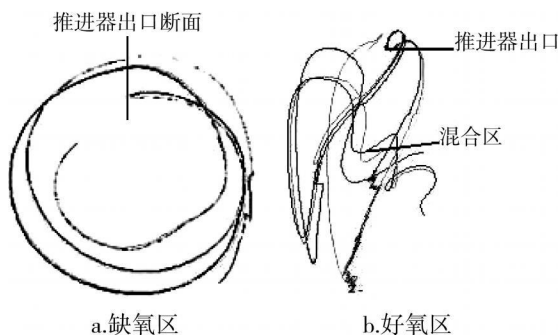


图 6 流线图

流线起点为推进器出口, 在反应器内流动 1 周。缺氧区(图 6a)的 10 条流线分成了两部分, 一部分进入好氧区参与好氧区流线循环(外圈蓝色流线), 一部分仍然进入缺氧区, 并在循环 1 周后进入好氧区(内圈黄色流线)。好氧区流线(图 6b)从推进器出口开始上下扩散, 多数沿弯道壁进入好氧区, 流动进入混合区(见上层蓝色流线)后与其他流体发生碰撞与混合, 从而实现彼此间的物质交换, 并经过再次流量分配进入下一次循环。上述为选取的部分流线的流动路径, 从反应器整个运行过程来看, 流体不停的在缺氧区及好氧区之间循环, 重复上述过程。图 6(b)中可以看到混合区内侧存在 1 个向下的螺旋流动区域, 这是由于反应器上层流体在循环 1 周后未经推进器直接加速而继续向前流动, 速度降低, 并在重力作用下下沉, 而中下部流体在推进器作用下高速向前向上运动, 二者相互碰撞出现回旋紊动; 隔墙的突然终止, 也使分别来自好氧区与缺氧区的液流发生碰

撞, 两股螺旋流交汇引起流线变型, 形成急变流<sup>[8]</sup>。

### 3.3 反应器内流动状态对处理效果的影响分析

流体在 OGO 反应器内形成一种复杂的三维螺旋流, 这种流型使流体的行进路径增加, 从而延长了整个反应器的水力停留时间, 使反应器空间得到充分利用。同时, 反应器环区内流体呈现出推流特性, 有一定的溶解浓度梯度和污泥负荷, 可以增加反应器的容积利用率和传质推动力, 有利于难降解有机物的去除。混合区流动复杂, 存在较强的搅动和混合, 利于溶解氧及基质的扩散传递。从整个反应器的角度, 活性污泥混合液在各区内进行首尾相接的循环流动, 具有时间上推流式的特点和空间上的混合流特征, 能够确保系统良好的污染物去除效果以及较强的抗冲击负荷能力。

课题组前期研究表明, OGO 技术在有效去除有机物的同时, 还具有良好的生物脱氮能力。研究认为 OGO 系统的生物脱氮不均匀地分布于环区, 主要以同时硝化反硝化生物脱氮(SND)的途径实现。根据 SND 的宏观分区理论<sup>[9]</sup>, 在 OGO 反应器中具有宏观好氧与缺氧环境, 反应器内 DO 浓度梯度显著, 混合液在好、缺氧环境中循环流动, 实现类似于传统途径的氮的生物去除。而根据微环境理论<sup>[9]</sup>, 微环境的形成与活性污泥菌胶团尺寸以及絮体结构等有关。流体在反应器环区内流动较稳定, 无明显液流翻滚、紊动现象, 有利于减小紊流剪切, 为相对较大尺寸的污泥絮体的形成和维持提供了有利条件, 在活性污泥菌胶团内部可以形成微观缺氧环境, 从而在絮体内部缺氧微环境中发生生物脱氮现象。

## 4 结论

(1) 试验结果表明模拟的流态规律与实测数据的流速分布特征基本吻合, 模拟和实测数值的差异程度是可以接受的, 应用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型(可实现  $k-\epsilon$  湍流模型)对 OGO 反应器中流态进行数值模拟的可行性良好。

(2) OGO 反应器内流体呈螺旋环流方式行进。环区内流动较稳定, 呈现出一定的推流特性, 有利于提高反应器的容积利用率。混合区流动存在较强的搅动和混合, 有利于溶解氧及基质的扩散传递。

(3) 反应器中具备宏观好氧与缺氧环境, DO 浓度梯度显著; 环区的推流特征增强了微生物生存环境的稳定性, 有利于形成相对较大尺寸的污泥絮体, 使活性污泥菌胶团内部可以形成微观缺氧环境, 能够确保系统稳定的脱氮效果。

(下转第 14 页)

每测定 10 次样品,用中间浓度标准溶液校正一次仪器,读取吸光度值,绘制标准曲线,相同条件下,分别对样品含量进行测定。在设定的原子吸收条件测得标准溶液的吸光值如下(相关系数  $r$  为 0.9996):

标样	1	2	3	4	5
浓度 $C/\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
吸光值 A	0.0460	0.0908	0.1386	0.1806	0.2230

## 2 结果与讨论

### 2.1 采样方法选择

本方法主要针对玻璃纤维滤膜来进行前处理的,玻璃纤维滤膜适用范围广、阻力小、耐酸碱、重量轻,使采样结果更准确、更合理,结果较满意。但普

遍的玻璃纤维滤膜铅含量较高,在使用前应用热硝酸浸泡,再用水浸泡烘干后使用。

### 2.2 微波消解试剂的选择

将采过样的滤膜进行微波消解并试验不同消解试剂的效果,本法采用硝酸-氢氟酸混合体系,具有消解效果好,空白值低,重现性好等优点。硝酸-过氧化氢混合体系也能达到满意的消解效果,但滤膜不能完全溶解,残留比较大,而硝酸-高氯酸混合体系高温高压条件下易爆,所以本法采用硝酸—氢氟酸消解体系。

### 2.3 方法精密度验证

在某电池公司厂界同一采样点不同时段分别采得样品 15 个(每时段 5 个样品),测得结果见表 1。

样品	1	2	3	4	5	测定均值	RSD/%
1	3.46	3.72	3.63	3.38	3.65	3.57	3.98
2	5.38	5.92	5.50	5.65	5.74	5.64	3.72
3	2.32	2.48	2.27	2.54	2.38	2.40	4.65

### 2.4 方法准确度回收试验

用空白滤膜作加标回收试验,其中 1 个做本底

测定,另外 3 个加低、中、高 3 种浓度标准溶液,测得结果见表 2。

样品编号	本底值/ $\mu\text{g}$	加标值/ $\mu\text{g}$	测得值/ $\mu\text{g}$	回收率/%
1	4.33	5	9.19	97.2
2	4.33	10	14.24	99.1
3	4.33	20	24.26	99.6

## 3 结论

硝酸-氢氟酸微波消解方法简便、易操作,耗酸量少,减少对环境的酸雾污染,能完全溶解玻璃纤维滤膜,具有较好的准确度和精密度。

### 参考文献:

[1] 王淑清,吕蓓华,金伟,等.车间空气中金属锰、锌、铅的微波消

解原子吸收测定法[J].职业与健康,2005,21(9):1324-1325.

[2] 胡寅瑞,张宏辉,张丹.火焰原子吸收法测定空气中铅的研究[J].河南预防医学杂志,2004,15(2):78-79.

[3] 金安宝,郑黎明,顾玉芳.空气中的铅尘铅烟的微波消解-火焰原子吸收测定法[J].职业与健康,2007,23(24):2278-2279.

[4] 王志杰,张俊玲.用 ICP-AES 测定废气中铅的前处理方法探讨[J].山东化工,2009,38(8):44-47.

[5] 王金生.原子吸收法测定空气中的铅含量[J].光谱仪器与分析,2004(3):14-15.

(上接第 4 页)

### 参考文献:

[1] R.Cooper and G. V. Jeffreys. Chemical Kinetics and Reactor Design [M]. Chap.7 New Jersey:PRENTICE HALL, INC.1971:36

[2] Letting G. Advanced Anaerobic Wastewater Treatment in Near Future [J]. Water Sci. Tech., 1997, 35(10):5~12

[3] 许晓毅.同心圆活动导流墙式反应器处理生活污水的实验研究[D].中国博士学位论文全文数据库,2008,(04)

[4] 王福军.计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004

[5] 王标.基于 CFD 的新型一体化氧化沟流态模拟研究及能量

配置优化,硕士学位论文[D].重庆大学,2009-5

[6] Bob De Clerca. Calibrating Simple Model for Mixing And Flow Propagation in Waster Treatment Plants[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(4).

[7] 闻德荪.工程流体力学(水力学)[M].北京:高等教育出版社,1994:134

[8] 邓荣森,张贤彬,潘江俊,等.一体化氧化沟混合液循环流动情况试验研究[J].给排水,1998,24(2):15

[9] 吕锡武.同时硝化和反硝化的理论和实践[J].环境化学,2002,21(6):564-570