

文章编号:1000-582X(2007)05-0011-04

# 螺旋升流式反应器流态特性的数值模拟

罗固源,张明轩,季铁军

(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:**为了分析螺旋升流式反应器去除 COD 及 N、P 效果好的原因,利用计算流体力学(CFD)商用软件 PHOENICS 对螺旋升流式反应器厌氧段的流态特征进行了模拟研究。研究表明:螺旋升流式反应器内流体流态为以螺旋方式上升的推流流态和完全混合流态,其中推流流态约占 65%。反应器兼有 PFR 和 CSTR 反应器的特点,使其具有较好的处理能力。

**关键词:**螺旋升流式反应器;数值模拟;流态;CFD

**中图分类号:**X703.1

**文献标志码:**A

螺旋升流式反应器(Spiral Up-flow Reactor, SUFR)是在 UCT(University of Cape Town)工艺的基础上对反应技术进行研究,开发出来的具有自主知识产权的新型污水处理立式反应系统<sup>[1]</sup>。该系统中的厌氧、缺氧、好氧反应器均为长径比较大的立式反应器,反应器内的混合液在具有一定倾角的多层叶片导流推动下上升。该反应器在最近两年的连续运行中,对 COD、TN 和 TP 去除率保持在 94%, 86% 和 96% 以上,处理效果非常好,试验分析认为这和反应器的流态有关。罗固源、阙添进<sup>[2]</sup>的研究表明,螺旋升流式反应器具有明显的活塞流特性,螺旋升流式反应器相当于 3 个完全混合式反应格串联在组成的阶式 CSTR 反应器,它很好的结合了 PFR 和 CSTR 反应器的特点,具有较好的处理效果。笔者在此研究的基础上运用计算流体力学(CFD)软件 PHOENICS( PHOENICS 是模拟传热、流动、反应、燃烧过程的通用 CFD 软件。网格系统包括:直角、圆柱、曲面、多重网格、精密网格。可以对三维稳态或非稳态的可压缩流或不可压缩流进行模拟,包括非牛顿流、多孔介质中的流动,并且可以考虑粘度、密度、温度变化的影响。在流体模型上面,PHOENICS 内置了 22 种适合于各种  $Re$  数场合的湍流模型,包括雷诺应力模型、多流体湍流模型和通量模型及  $k-\epsilon$  模型的各种变异,共计 21 个湍流模型,8 个多相流模型,10 多个差分格式),对 SUFR 的厌氧段的流态特性进行模拟研究,并结合反应器理论来揭示其流态

特征对反应器处理效果的影响。

## 1 数学模拟方法

在螺旋升流式反应器(SUFR)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  $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,混合液与水的比重在 1.07 ~ 1.09 之间。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 SUFR 的流态时,固相的影响可以忽略不计,将其简化为单相液体流动来处理。

### 1.1 湍流模型

根据对实验装置的观察与分析,反应器内流体发生的是湍流流动,因此采用湍流模型进行模拟。文中采用标准  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[3]</sup>,流体为不可压缩流体。其控制方程组由连续性方程、动量方程、湍动能方程、湍动能耗散方程组成。

在壁面附近采用壁面函数法,PHOENICS 提供了 4 种壁面函数:布拉休斯公式(Blasius)、对数律(Log-law)、通用对数律(General-Log-law)、完全粗糙对数律(Fully-rough)。通过分析发现,对数律函数(Log-law)可以很好的描述反应器内壁面附近的流动,因此采用此壁面函数。其公式如下

$$U_i/U_\tau = \ln(E * Y)/\kappa, \quad (1)$$

式中:  $U_i$  为第一个网格节点处平行于壁面的合速度;  $U_\tau$  为切应力速度;  $E$  为粗糙度;  $Y$  为第一个网格节点与壁面间的距离;  $\kappa$  为卡门常数( $\kappa = 0.42$ )。

收稿日期:2007-01-12。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50378095)。

作者简介:罗固源(1944-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事水污染控制的研究(E-mail) gyluo@cqu.edu.cn。

壁面函数与前述的  $k-\varepsilon$  模型控制方程组组成封闭方程组。

## 1.2 计算区域

SUFR 的计算尺寸: 取螺旋升流式反应器的厌氧段, 如图 1 所示, 反应器高  $H=1.2$  m, 内径  $D=13$  cm, 有效水深  $h=1.1$  m, 有效容积  $V=16$  L, 进水流量  $Q=14.5$  L/h, 进水口直径为 10 mm。反应器从下部进水, 在调速电机的驱动下, 导流叶片(共 3 组)推动混合液以螺旋方式上升, 从上部出水。调速电机转速设为  $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

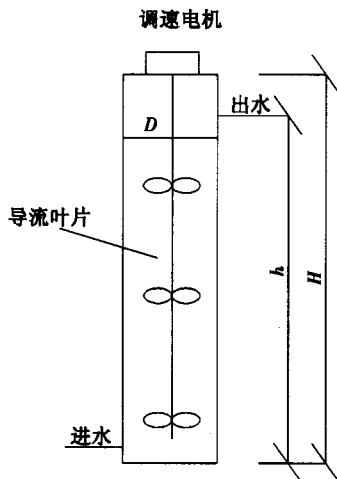


图1 螺旋升流式反应器示意图

## 1.3 网格划分及边界条件

1) 计算区域的网格划分。笔者利用 PHOENICS 提供的直角型网格(笛卡尔网格)进行划分, 并结合 PARSOL 法对局部进行加密(如叶片区)。为了提高计算机的计算速度和效率, 网格数量划分为  $15 \times 60 \times 20$ , 并且适当的改变松弛因子, 以期在较短的时间内达到收敛。

2) 进水口边界条件。采用进水流速均匀的假定, 进水口断面的湍动能  $k$  及耗散系数  $\varepsilon$  假设为均匀分布, 进水流量为  $14.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ , 湍流强度为 5%。

3) 出水口边界条件。出口压力设为一个大气压, 可以近似设计为 OUTLET 形式。

4) 固定壁面。采用壁面函数, 满足壁面质量通量为零。

## 2 数值模拟结果与分析

由 PHOENICS 的模拟结果如图 2~4 所示。图 2 为流体流线图, 图 3 为纵截面速度分布云图。图 4 横截面速度矢量图。由图 2 可见流体的流线呈螺旋升流运动形式, 由于定常运动的流线与迹线是重合的<sup>[4]</sup>, 因此反应器内的流体主要是以螺旋方式行进。

图 4(a) 为某一横截面( $x=0.7 \text{ m}$ )的速度分布图。由图 4(a) 可以清楚的看到流体的旋流运动形式。图

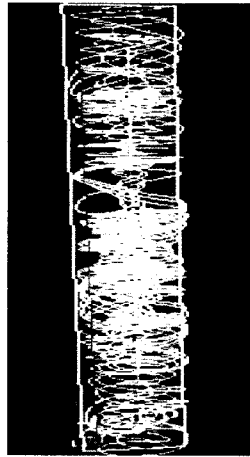


图2 SUFR 内部流线图

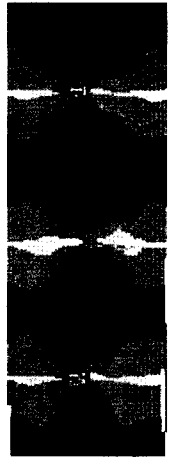
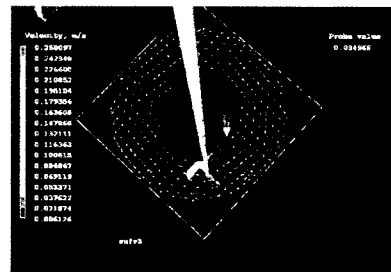


图3 纵截面速度云图

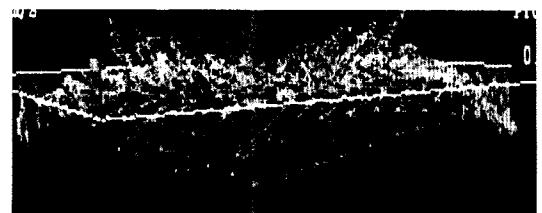
4(b) 显示, 叶片区主要为向上的流速。由图 4(c) 可以看出, 流体在两叶片之间的区域, 同时具有向上和向下的流速。



(a) 叶片区速度矢量(俯视图)



(b) 叶片区速度矢量(主视图)



(c) 两叶片间速度矢量(主视图)

图4 横截面速度矢量图

## 3 螺旋升流式反应器的动态特征

### 3.1 螺旋升流式反应器的流态特征

从对螺旋升流式反应器流态的分析可知, 进水及活性污泥混合液在导流叶片的推动下螺旋上升, 可以把反应器内流体近似的视为“股流”, 图 2 的流线图可

以说明这一点。由图 5 可以看出,“股流”的直径  $d$  非常小,而长度  $L$  非常大,即“股流”的长径比( $L/d$ )远远大于反应器的长径比( $H/D$ ),那么在较小反应器长径比的条件下就可以获得非常大的“股流”长径比。大的“股流”长径比较好地反映了螺旋升流式反应器具有活塞流反应器(PFR)的特征。

图 4(c)显示,在螺旋升流式反应器中由于叶片的作用,有部分流体具有向下的速度矢量,说明反应器内存在一定的返混现象,因此,螺旋升流式反应器又表现出一定的 CSTR 反应器的特征,有利于基质与活性污泥的接触。由此可见,螺旋升流式反应器将 CSTR 和 PFR 很好的结合起来,既有利于泥水的良好接触,又有利于提高容积利用率,使反应器的处理能力的得到提高。

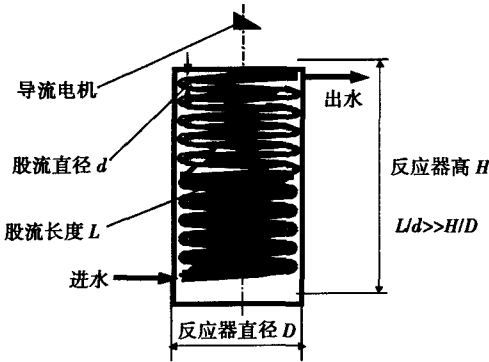
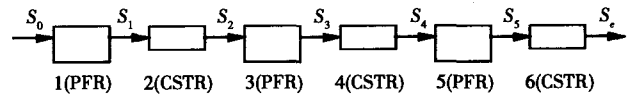


图 5 螺旋升流式反应器模式示意图

### 3.2 螺旋升流式反应器中 PFR 流态与 CSTR 流态的容积占有率

通过对螺旋升流式反应器的流态特征的分析知,该反应器是由 CSTR 流态和 PFR 流态联合起来组成的反应器。由图 3 可知,在 SUFR 反应器的叶片区附近流速场非常相似,而相邻叶片之间区域的流场也几乎一致。由图 4(b)可以看出在叶片区的流速矢量方向与反应器内主要的螺旋上升行进方式几乎吻合,这表明叶片区附近的流态主要是推流流态。图 4(c)表

明在叶片之间区域存在着与主流上升方向相反的速度矢量,这说明该区域存在着较为明显的返混现象。综上所述,根据流场数值模拟的结果,试验中的 SUFR 反应器厌氧段的流动模型可视为以下 6 个单元反应器的串联模式:



图中  $S_0, S_1, \dots, S_5$  表示进入各个单元反应器的基质浓度,  $S_6$  表示反应器出水基质浓度

图 6 螺旋升流式反应器的流动模型示意图

通过分别建立流动模型中 PFR 和 CSTR 单元反应器的物料平衡方程组,结合对反应器内流场的模拟分析,可以近似认为图 6 所表示流动模型中的每个推流反应器(PFR)和完全混合反应器的(CSTR)体积分别相同,将 PFR 单元反应器的体积表示为  $V_p$ ,相应的 CSTR 单元反应器体积为  $V_c$ 。

在上述定性分析的基础上以反应器在厌氧时对 COD 的降解为例,结合动力学方程定量的估算出试验中的 SUFR 反应器的推流流态容积占有率。

SUFR 反应器在厌氧时对 COD 的降解可以遵循 Eckenfelder 模式<sup>[5]</sup>,即底物代谢速率遵循一级动力学方程。有

$$\ln \frac{S_e}{S_0} = -kt, \quad (2)$$

式中: $S_0$  为进水有机物浓度(以 COD 计),  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $S_e$  为出水有机物浓度(以 COD 计),  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $K$  为反应器厌氧时 COD 去除速度常数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $t$  为反应器的水力停留时间,  $\text{h}$ 。

根据 SUFR 反应器在厌氧时对 COD 的降解的试验结果并结合式 2 可以求出  $k$ 。试验及计算结果如表 1 所示。

表 1 反应器厌氧时段 COD 去除速度常数计算表

参数	样 本										样本均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$S_e/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	123	108	118	97	111	99	106	104	110	106	108
$S_0/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	371	343	362	373	353	346	372	349	358	347	357
$t/h$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
$k/h^{-1}$	1.00	1.04	1.01	1.22	1.05	1.14	1.14	1.1	1.07	1.07	1.08

根据推流反应器和完全混合反应器的不同特点<sup>[6]</sup>,对图 8 中所示的各个反应器列出物料衡算方程。

简化后得到下列方程组:

$$\left. \begin{aligned} V_{1p} &= \frac{Q}{k} \ln \frac{S_0}{S_1} \\ V_{2c} &= \frac{Q}{k} \cdot \frac{(S_1 - S_2)}{S_1} \\ &\dots \\ V_{5p} &= \frac{Q}{k} \ln \frac{S_4}{S_5} \\ V_{6c} &= \frac{Q}{k} \cdot \frac{(S_5 - S_e)}{S_5} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

式中  $V_{1p}$ 、 $V_{2c}$ ... $V_{6c}$  表示图 8 中各个单元反应器有效容积,其中推流单元反应器的体积和全混流单元反应器体积分别相等, $V$  为整个反应器有效容积, $Q$  为进水量, $S_0$ 、 $S_1$ ... $S_5$  表示进入各个单元反应器的基质浓度, $S_e$  表示反应器出水基质浓度, $k$  表示反应器厌氧时 COD 平均去除速度常数。

根据表 1 计算结果,可确定方程组(3)中的如下参数值: $Q=14.5 \text{ L/h}$ 、 $k=1.08 \text{ h}^{-1}$ 、 $V=16 \text{ L}$ 、 $S_0=357 \text{ mg/L}$ 、 $S_e=108 \text{ mg/L}$ 。为此,由数值分析方法可以求出

$$V_{1p} = V_{3p} = V_{5p} \approx 3.5 \text{ L}, V_p \approx 10.5 \text{ L}, \quad (4)$$

$$V_{2c} = V_{4c} = V_{6c} \approx 1.8 \text{ L}, V_c \approx 5.5 \text{ L}. \quad (5)$$

可以得出推流流态容积占有率为 65%、完全混合流态容积占有率为 35%。同时可求得推流单元反应器的高径比约为 2:1。这说明反应器内流体的螺旋式流动有利于推流流态的形成。通过对传统反应器的部分构造进行改进使得水流行进方式形成或者接近成螺旋流,反应器的处理效率就有可能相应提高。

## 4 结 论

1) 螺旋升流式反应器的流态特性可以用计算流体力学模拟软件 PHOENICS 进行模拟研究。

2) 螺旋升流式反应器厌氧段流体流态为以螺旋方式上升的推流流态和完全混合流态,其容积占有率分别为 65% 和 35%。

3) 螺旋升流式反应器厌氧段可以看成是由 6 个单元反应器串联组成,其中 PFR 单元反应器和 CSTR 单元反应器间隔排列。这使得螺旋升流式反应器兼有 PFR 反应器 CSTR 反应器的特点,使反应器具有较好的处理能力。

### 参考文献:

- [1] 罗固源,季铁军. 较长泥龄时 SUFR 系统运行效果的试验分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2005,28(8):126-128.
- [2] 罗固源,阙添进.  $d/D$  值及导流转速对螺旋升流反应器流态的影响[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(6):75-78.
- [3] 罗麟,李伟民,邓荣森,等. 一体化氧化沟的三维流场模拟与分析[J]. 中国给水排水,2003,19(12):15-16.
- [4] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社,2004:100-103.
- [5] 顾夏声. 废水生物处理数学模式[M]. 北京:清华大学出版社,1993:45-47.
- [6] 罗固源. 水污染物化控制原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003:46-50.

## Simulation on the Characteristics of Flow Pattern in Spirial uP-flow Reactor

LUO Gu-yuan, ZHANG Ming-xuan, JI Tie-jun

(Key Laboratory of Eco-environment in Three Gorge Reservoir Region Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400030, China)

**Abstract:** In order to analyze the reason why the Spiral Up-flow Reactor system has excellent removal effect of COD, N and P, the authors use PHOENICS, a computational fluid dynamics program, to investigate the hydraulic characteristics and flow model of the anaerobic part of Spirial uP-flow reactor. The result shows that the fluid in the reactor unit flowed upward by the spiral way, and that flow pattern was combined by plug flow and complete-mix flow, and that the percentage of plug flow was about sixty-five percent. Spirial Up-flow Reactor units the Characteristics of PFR and CSTR, which makes it work well.

**Key words:** spirial up-flow reactor; numerical simulation; flow pattern; CFD

(编辑 陈移峰)