

# 曝气管数量对曝气效率影响的三维数值分析

周靖<sup>1</sup>, 谢庆举<sup>2</sup>

(1. 安徽工业大学 工商学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 安徽欣创节能环保科技股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000)

**摘要:** 水污染防治的工艺技术问题是水污染处理研究的重要研究课题之一。以污水处理工艺之一的曝气处理为例, 利用三维模拟的方法探讨了不同曝气管数目对曝气效率的影响, 得到了较合理的结论, 即在本文模拟的曝气池中, 采用3根四孔曝气管曝气效果最佳, 在理论与实践上都具有重要的研究意义。

**关键词:** 曝气池; 两相流; 三维数值模拟; FLUENT

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)03-0161-04

## 3D numerical analysis of influence of aeration pipe number on aeration efficiency

ZHOU Jing<sup>1</sup>, XIE Qingju<sup>2</sup>

(1. College of Industry and Commercial, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;

2. Anhui Xinchuang Energy Saving & Environmental Protection Science & Technology Co., Ltd, Ma'anshan 243000, China)

**Abstract:** The technology of prevention and control of water pollution is one of the important research topics of polluted water treatment. Taking the aeration treatment being one of sewage treatment process for example, the method of 3D computer simulation was used to inquire into the aeration efficiency in different aeration pipe number, and a more reasonable conclusion was got, the aeration of three four holes aeration pipe in the aeration tank had the best effect, the result has important significance in theory and practice.

**Key words:** aeration tank; two-phase flow; 3D numerical simulation; FLUENT

活性污泥法及其衍生改良工艺是处理城市污水最广泛使用的方法<sup>[1]</sup>。曝气池中空气扩散装置习称曝气装置, 是活性污泥系统至关重要的设备之一<sup>[2]</sup>。本文模拟的曝气池中的空气扩散装置为穿孔管, 并从气相体积分数, 气液两相速度流场及湍动能分布对不同工况下曝气效率进行对比分析。

迄今为止国内外已有不少学者将数值模拟技术应用于曝气池的研究, Karama 等<sup>[3]</sup>, Cockx 等<sup>[4]</sup>, 毛劲乔<sup>[5]</sup>, 张小可等<sup>[6]</sup>, 罗玮等<sup>[7]</sup>, 肖浩飞<sup>[8]</sup>等, 张从菊等<sup>[9]</sup>均从曝气效率的角度出发, 对优化曝气池的设计提供了理论依据, 但却未考虑曝气装置的优化设计。本文将从这一角度较全面科学地分析相同曝气量下不同数量的穿孔管曝气对曝气效率的影响。

## 1 数学模型

本文模拟的曝气池内气泡-液体两相湍流流动基本符合 FLUENT 提供的双欧拉模型及标准  $k-\varepsilon$

湍流模型<sup>[10]</sup>, 因此本文运用该模型对曝气池内两相流动进行数值模拟, 基本守恒方程如下。

### 1.1 体积分数

作为互相贯穿连续的多相流的描述组成了相位体积分数的概念, 这里表示为  $\alpha_q$ 。体积分数代表了每相所占据的空间, 并且每相独自地满足质量和动量守恒定律。因此  $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$ 。

### 1.2 动量守恒

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) \\ & = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_q + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) + \\ & \quad \alpha_q \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{Vm,q}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\overline{\overline{\tau}}_q$  是第  $q$  相的压力应变张量;  $\mu_q$  和  $\lambda_q$  是  $q$  相的剪切和体积粘度;  $\vec{F}_q$  是外部体积力;  $\vec{F}_{lift,q}$  是升力;  $\vec{F}_{Vm,q}$  是虚拟质量力;  $\vec{R}_{pq}$  是相之间的相互作用力。

收稿日期: 2013-01-05; 修回日期: 2013-03-01

作者简介: 周靖 (1986-), 女, 安徽池州市石台县人, 硕士, 助教, 研究方向: 数值模拟技术在水处理方面的应用。

1.3 标准  $k - \varepsilon$  方程中湍动能  $k$  方程<sup>[11]</sup>:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3)$$

式中: $G_k$  表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生; $G_b$  表示由于浮力影响引起的湍动能产生; $Y_M$  表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响。湍流粘性系数  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 。因此本文通过对比湍动能的大小来表征曝气池内气液混合的紊动强度即混合程度。

2 物理模型

本文模拟的曝气池长 1 m,宽 0.5 m,高 1 m,有效水深 0.7 m。根据实际工况,穿孔管均为四孔间隔均匀地横放在池底左侧,管距则根据曝气管数量而定,管径取 40 mm。曝气管上的孔眼在两侧 45° 方向间隔 80 mm 均匀分布,孔眼直径为 4 mm。由于孔口空气流速需大于 10 m/s,故设定曝气管的通气量为  $2.01 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 。本文模拟的 4 种工况如表 1。

表 1 工况条件说明表

工况	1	2	3	4
穿孔管数量	1	2	3	4
孔口流速	40	20	13.33	10

3 计算结果与分析

本文采用适应性较好的四面体网格,穿孔管附

近加密,随着穿孔管数量增多,网格密度增大。将空气设为主相,水设为次相,孔口处设为气相速度入口,池顶设为压力出口,并在初始时捕捉有效水深的位置至 700 mm 高度处。由于本节将对相同曝气量下,不同穿孔管数量下的曝气池内气液两相流进行数值模拟,因此随着穿孔管数量的增加,单根穿孔管的流量会减少,气液两相流动的差别不仅存在于横向上,在纵向也会有较大的差异,因此本文取水深中心处即  $z = 0.35 \text{ m}$  高度处的面作为气相体积分数及湍动能观测面,截面示意图如图 1。

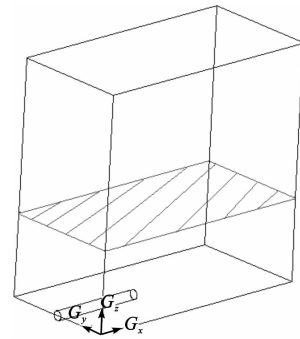


图 1  $z = 0.35$  截面示意图

单管截面处气相体积分数分布云图,气相速度矢量图,液相速度矢量图如图 2,3,4。双管截面处气相体积分数分布云图,气相速度矢量图,液相速度矢量图如图 5,6,7。三管截面处气相体积分数分布云图,气相速度矢量图,液相速度矢量图如图 8,9,10。四管截面处气相体积分数分布云图,气相速度矢量图,液相速度矢量图如图 11,12,13。

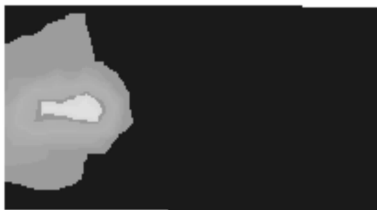


图 2 单管截面处气相分布云图

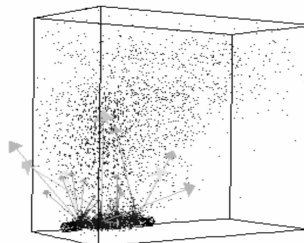


图 3 单管气相速度矢量图

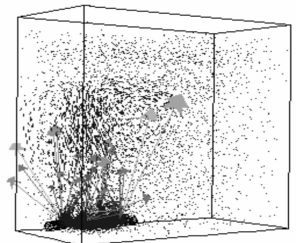


图 4 单管液相速度矢量图



图 5 双管截面处气相分布云图

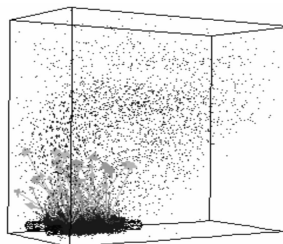


图 6 双管气相速度矢量图

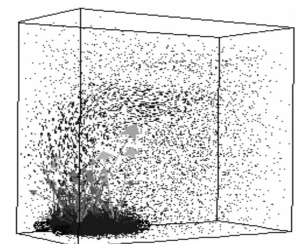


图 7 双管液相速度矢量图



图 8 三管截面处气相分布云图

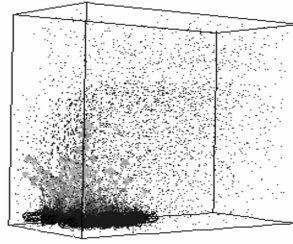


图 9 三管气相速度矢量图

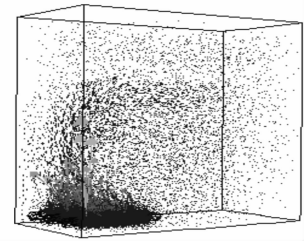


图 10 三管液相速度矢量图



图 11 四管截面处气相分布云图

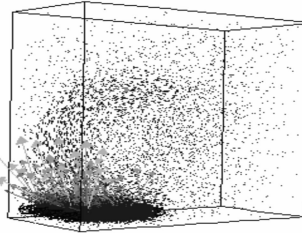


图 12 四管气相速度矢量图

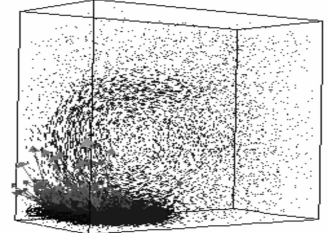


图 13 四管液相速度矢量图

从 0.35 m 高度截面处气相体积分数云图 2,5,8,11 可以看出,在本文模拟的曝气池中,相同的曝气量下,随着曝气管数量的增多,尽管曝气管附近局部区域气相体积分数减少,但气相分布区域逐渐增大。这是由于在曝气量一定的情况下,随着曝气管数量的增多,从一根曝气管来看,气体在孔口处的流量减少,因此,气体含量在孔口附近局部区域逐渐减少。从总体的曝气管来看,气体的初始分布区域扩大,因此气相的体积分数分布区域逐渐增大。

从气液两相速度矢量图 3,4,6,7,9,10,12,13 可以看出,气液两相在孔口处如边界条件所设定的一样流速明显减小,但在曝气池内大部分区域,气液两相流速在逐渐增大。由于气孔的开孔方向是斜 45° 向上,因此在曝气的过程中,随着气泡的上升,气液两相

在横向及纵向两个方向都形成环流,随着曝气管数量的增多环流也越来越明显。这是由于曝气池是有 0.5 m 的宽度的,因此如果仅仅在局部区域受力在池内大部分区域气液两相流速是不会增大的,环流也不会明显的,因此在一定的曝气量下,随着曝气管数量的增多,气体的初始分布区域扩大,气体对池内液体的作用力分布区域也随之扩大,池内大部分区域气液两相流速逐渐增大,环流也越来越明显。

在本文所模拟的 4 种工况即不同的曝气管数量下,0.35 m 高度截面处湍动能云图及不同宽度面上的湍动能垂向均值对比图如下:

由湍动能云图 14,15,16,17 可以看出,随着曝气管数量的增加,湍动能值及范围在逐渐增大,并且分布越来越均匀。这表明在曝气池内随着曝气管数量



图 14 单管截面处湍动能云图



图 15 双管截面处湍动能云图



图 16 三管截面处湍动能云图



图 17 四管截面处湍动能云图

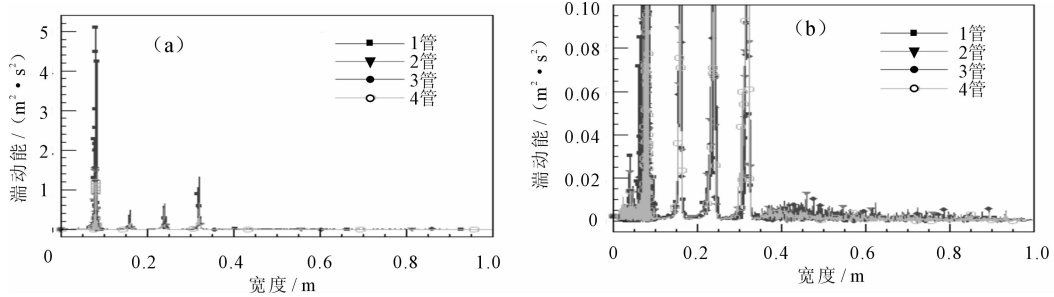


图 18 不同曝气管数量时气液两相垂面平均湍动能分布图

的增加,气液两相混合搅动强度逐渐增大,从图 18 亦可看出上述规律。这是由于,随着曝气管数量的增多,气相的初始体积在逐渐增大,气相动力的作用面积也在逐渐增大,因此,在整个曝气池内,气液混合越来越剧烈,同时池内环流也越来越明显,气液两相紊动强度在环流区域逐渐增大,因此湍动能在池内大部分区域均有所增加,其中图 16,17,即曝气管数量为 3,4 时,湍动能强度反而减弱,下面将对照具体的池内垂面湍动能数值对比图进行进一步比较分析。

从不同孔口数量时气液两相垂向平均湍动能分布图 18(a)中可以看出,在曝气管数量较少时,在孔口垂面上及周围局部区域湍动能数值较大,但衰减幅度也很大,大部分区域数值较小,随着孔口数量的增多分布越来越均匀,为了清晰地看到曝气池内大部分区域湍动能数值的变化,将湍动能变化范围缩小至  $0 \sim 0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,得到图 18(b),从该图可以看出,在曝气管数量为三管的工况下,湍动能数值普遍较高且分布较均匀,即在孔眼数量为 5 孔的工况下气液两相的混合程度最高,搅动最剧烈。一方面这是由于曝气管上的孔眼开口方向是  $45^\circ$  角朝上的,因此气体对液体的作用力不仅仅是垂直向上的,还有纵向的分力存在,这股动力可以促进曝气管之间气液两相混合,如果曝气管分布过密,反而会减弱曝气管之间环流的形成,导致气液两相混合强度减弱,湍动能值减少;另一方面,相同的曝气量下随着曝气管数量的增多,纵向的动力增大,垂直向上的动力反而减弱了,这就导致池内横向主环流的强度减弱,气液两相的混合强度减弱,湍动能值减少,因此从三根曝气管增至 4 根曝气管时,湍动能在大部分区域反而减弱了。当曝气管数量为 3 根时,曝气池内气液两相混合的最好,综合对比图 8,9,10 可以看出在此工况下,气相的分布也很广泛,气液两相的旋流也很明显。因此,在本文所模拟的曝气池中,采用孔眼数量为四孔的穿孔管的情况下,曝气量为  $2.01 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  时,采用 3 根穿孔管进行曝气,曝气效率最高。

## 4 结 语

本文模拟了 4 种工况下曝气池内的气液两相的湍流流动。并综合分析  $0.35 \text{ m}$  高度截面处气相分布图湍动能云图,曝气池气液两相速度矢量图,垂向各面湍动能均值分布图,得到达到最高曝气效率的工况,即在  $2.20 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  的曝气量下,采用四孔穿孔管进行曝气,当曝气管数量为 3 根时曝气效率最高,为曝气装置及曝气池的设计提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] Nicholas P Cheremisinoff. Biotechnology for waste and wastewater treatment[M]. Noyes Publications, 1996.
- [2] 张自杰. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000, 150.
- [3] Karama A B, Onyejekwe O O, Brouckaert C J, et al. Use of computational fluid dynamics(CFD). Technique for evaluating the efficiency of an activated sludge reactor[J]. Water Sci Technol, 1999, 39(10-11): 329-332.
- [4] Cockx A, DO Q, Uang Z, Audic J M, et al. Global and local mass transfer coefficients in waste water treatment process by computational fluid dynamics[J]. Chem Eng and Pro, 2001, 40(2): 187-194.
- [5] 毛劲乔. 曝气池气液两相数学模型的建立与应用[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [6] 张小可, 姚 彤. 海水脱硫曝气池流场的 CFD 分析[J]. 动力工程, 2004, 24(2): 276-279.
- [7] 罗 玮, 周 玮, 程 文, 等. 曝气池中气液两相流数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 28(2): 69-71.
- [8] 肖浩飞, 周美华. 曝气池内气液两相流 CFD 模拟[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1955-1957.
- [9] 张从菊, 王双凤, 王远成, 等. 曝气池内气液两相流 CFD 模拟及分析[J]. 山东建筑大学学报, 2011, 26(2): 110-114.
- [10] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.