



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201811187

中图分类号 X703

文献标识码 A

武魏魏, 叶家盛, 郑俊, 等. BAF 曝气管道布置方式的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2668-2674.

WU Weiwei, YE Jiasheng, ZHENG Jun, et al. Numerical simulation on the layout of BAF aeration pipeline[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(11): 2668-2674.

## BAF 曝气管道布置方式的数值模拟

武魏魏<sup>1</sup>, 叶家盛<sup>1</sup>, 郑俊<sup>2</sup>, 张德伟<sup>2</sup>, 黄河清<sup>1,\*</sup>

1. 安徽工业大学能源与环境学院, 马鞍山 243032

2. 安徽华骐环保科技股份有限公司, 马鞍山 243032

第一作者: 武魏魏(1993—), 男, 硕士研究生。研究方向: 水污染防治。E-mail: 1943960036@qq.com

\*通信作者: 黄河清(1964—), 男, 博士, 教授。研究方向: 环境流体力学。E-mail: heqing@ahut.edu.cn

**摘要** 针对曝气生物滤池(BAF)曝气不均导致的处理效率低下的问题, 基于 Fluent 软件, 采用标准  $k-\varepsilon$  模型对 BAF 多种曝气管道的布置方式进行了不同维度的数值模拟研究。利用二维数值模拟, 通过对单边枝状、中心枝状和环状 3 种曝气方式的流场分析, 结果表明, 单边枝状和中心枝状对应的曝气孔气量分布较均匀, 而环状的 4 个弯角处由于相对低压造成曝气量少或无曝气; 进一步就原型双边枝状曝气的三维数值模拟表明, 各曝气口的曝气量都接近理论均值, 标准偏差为  $7.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 可以取得较好的均匀曝气效果。本研究可以有效地助力曝气生物滤池的选型设计, 以较低的成本实现高效节能的目标。

**关键词** 曝气生物滤池; 曝气管道; 均匀曝气; 数值模拟

曝气生物滤池 (biological aerated filter, BAF) 是将生物氧化和截留吸附结合的新型好氧污水处理工艺, 具有流程简单、处理效率高等优点<sup>[1]</sup>。按照其进水方式可分为上向流和下向流<sup>[2]</sup>, 其中, 上向流滤池不仅布水和布气均匀、不易堵塞, 而且防止了滤料的流失<sup>[3]</sup>, 因而应用较广泛<sup>[4-6]</sup>。此外, BAF 池型一般为长方体, 这便于施工和曝气管道布置, 故很多设计研究中都选用该池型<sup>[7-8]</sup>。当污水流经滤料表面时, 水中的溶解氧也向生物膜内扩散, 污水中的有机物在滤料表面微生物的生化作用下得到有效降解, 最终转化成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  等代谢产物<sup>[9-11]</sup>。因此, 良好的曝气可有效地提高对污染物的去除效果。本研究旨在通过数值模拟探究出较好的曝气方式及曝气效果。

近年来, BAF 曝气方面的相关研究多以实验和数值模拟为主。在 BAF 反冲洗的研究方面, 张杰等<sup>[1]</sup>通过 BAF 反冲洗特性实验研究出脉冲气冲和连续水冲的组合比气水同时反洗要好; 李微等<sup>[12]</sup>采用间歇曝气/曝气生物滤池工艺探究脱氮除磷的效果, 通过定量控制一级及二级曝气量达到了较好的脱氮除磷效果; 杨春娣<sup>[13]</sup>采用模型实验和数值模拟结合的方法, 通过控制水深纵横比及曝气孔径, 使气液两相流场分布均匀、混合充分; 刘玉玲等<sup>[14]</sup>对推流式曝气池进行了数值模拟研究, 通过对流场结构的分析探索出提高氧气利用率、减少能耗的方法。

目前, 有关 BAF 曝气管道布置方式的直接研究较少, 采用数值模拟研究方法也很少。本研究以某污水处理厂采用前置反硝化曝气生物滤池的曝气管道系统为对象, 首先进行二维数值模拟,

探索中心枝状、单边枝状和环状曝气方式的优劣, 然后通过三维数值模拟对拟采用的基于二维数值模拟所确定的较好曝气方式的曝气均匀性及效率进行定量确认。本研究运用数值模拟方法, 将定性和定量地表达曝气系统的流场分布情况, 可快速、准确地找出较好的曝气方式, 从而为曝气生物滤池的选型设计提供参考。

## 1 数值模拟模型概述

### 1.1 守恒方程

守恒方程包括质量守恒方程和动量守恒方程<sup>[15]</sup>, 如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $t$  为流动时间,  $\text{s}$ ;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为直角坐标系的 3 个互相垂直方向的距离,  $\text{m}$ ;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\mu$  和  $\mu_t$  分别为流体分子动力黏度和涡动力黏度,  $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;  $p$  为雷诺平均压力,  $\text{Pa}$ 。

### 1.2 湍流模型

本研究采用适用范围广、计算经济且被广泛应用于工业流场模拟的湍流标准  $k$ - $\varepsilon$  模型, 通过求解湍流动能  $k$ <sup>[16]</sup> 和耗散率  $\varepsilon$ <sup>[16]</sup> 方程, 从而对涡黏度  $\mu_t$ <sup>[16]</sup> 进行求解。湍流动能  $k$  对应的输运方程见式 (3)。耗散率  $\varepsilon$  的输运方程见式 (4)。湍动黏度  $\mu_t$  的方程见式 (5)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中:  $G_k$  为平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项;  $Y_M$  为可压湍流中脉动扩张的贡献;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别为与湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的普朗特数, 取值为 1.0 和 1.3;  $S_k$  和  $S_\varepsilon$  分别为定义的湍动能源项和湍流耗散源项;  $C_\mu$  为经验常数, 取值为 0.09;  $C_{1\varepsilon}$  为经验常数, 取值为 1.44;  $C_{2\varepsilon}$  为经验常数, 取值为 1.92。

### 1.3 边界条件

在对连续性方程、动量方程求解时, 都必须先确定求解初始条件和边界条件, 而边界条件的设定对求解结果的影响十分关键<sup>[17-18]</sup>。本研究根据入口流量定义了曝气干管的速度入口, 出口则根据曝气孔的设置深度定义为压力出口, 管壁设定为给定粗糙度的固体界面。本研究采用专业模拟软件 Fluent 对曝气管道进行数值模拟求解。采用的数值求解方法为有限体积法, 其具有很好的守恒性, 可以克服泰勒公式展开出现离散的缺点且对网格的适应性很好。其中: 对时变项, 采用二阶精度的隐式格式的三时间段法; 对对流项, 采用二阶精度的迎风格式; 对扩散项, 采用二阶精度的中心差分格式。

研究对应的数值模拟过程中用到的基本参数如表 1 所示。

表1 数值模拟模型参数

Table 1 Model parameters of numerical simulation

| 重力加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) | 空气系数                                 |  | 湍流模型常数  |          |          | 时间步长/s |
|--|--------------------------------------|--|---------|----------|----------|--------|
|  | $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\mu/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $C_\mu$ | $C_{1e}$ | $C_{2e}$ |        |
| 9.8                                    | 1.225                                | $1.79\times 10^{-5}$                             | 0.09    | 1.44     | 1.92     | 0.5    |

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 二维模拟结果与分析

二维数值模拟研究了中心枝状、单边枝状和环状的3种曝气方式。中心枝状是指气体从中间干管位置进入，干管两侧支管对称分布(见图1(a))；单边枝状是指气体从干管进入，支管布置在干管一侧(见图1(b))；环状是指气体从干管进入，干管为环状，支管均匀分布在干管上(见图2(a))。这3种不同的曝气管道系统的干管、支管管径相同，分别为100 mm及20 mm；干管的入流速度根据所需曝气量取为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，出口根据水厂的水下管道设置深度定为50 000 Pa的压力出口；曝气管道上孔口按照等间距设置成圆形，孔口直径为2 mm。

模拟所得中心及单边枝状曝气方式的二维速度场分别如图1(a)和图1(b)所示。可见气体自干管的中间位置进入管道后，经支管到达曝气孔，几乎均匀地从各个曝气孔流出。

环状曝气方式的管道及局部流场模拟结果如图2所示。图2(a)为以水厂原型的管道系统气体流动的二维速度分布。气体由右侧中间的干管入口进入，图2(a)下面b、c处分别为环状干管的弯角处，图2(b)上部d为位于环状系统中间对称面的代表部分。图2(b)弯管处的曝气量和干管直管处的图2(d)相比较少；图2(c)的干管弯管处附近的曝气孔几乎无曝气。进一步观察干管弯管处的气体流动可见，其靠近连接支管处的气体流动较快，由伯努利方程<sup>[19]</sup>可知，该处的压力小，产生了相对的负压，致使环状管网角部出气量少或者没有检测到出气量。模拟结果表明，应该避免环状曝气管网的设计，以提高滤池角部的曝气均匀性。

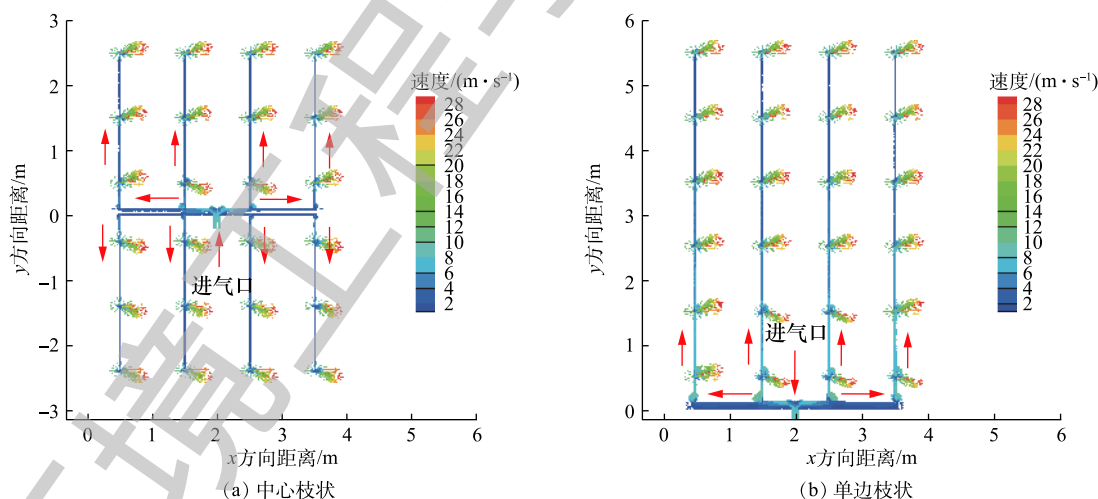


图1 中心枝状及单边枝状曝气方式的速度分布

Fig. 1 Velocity distribution of center dendritic and unilaterally dendritic pipe systems

### 2.2 三维模拟结果与分析

根据二维模拟的结果，水厂拟采用如图3(a)所示的类似中心枝状的曝气管道系统。与图1(a)模型中的中心支状相比：二者相同点在于均以进气干管为对称轴，以保证干管左右两侧进气量均分；不同点在于中心支状的结构分布更均匀些，但实际安装、运行费用等方面存在不足。三维数

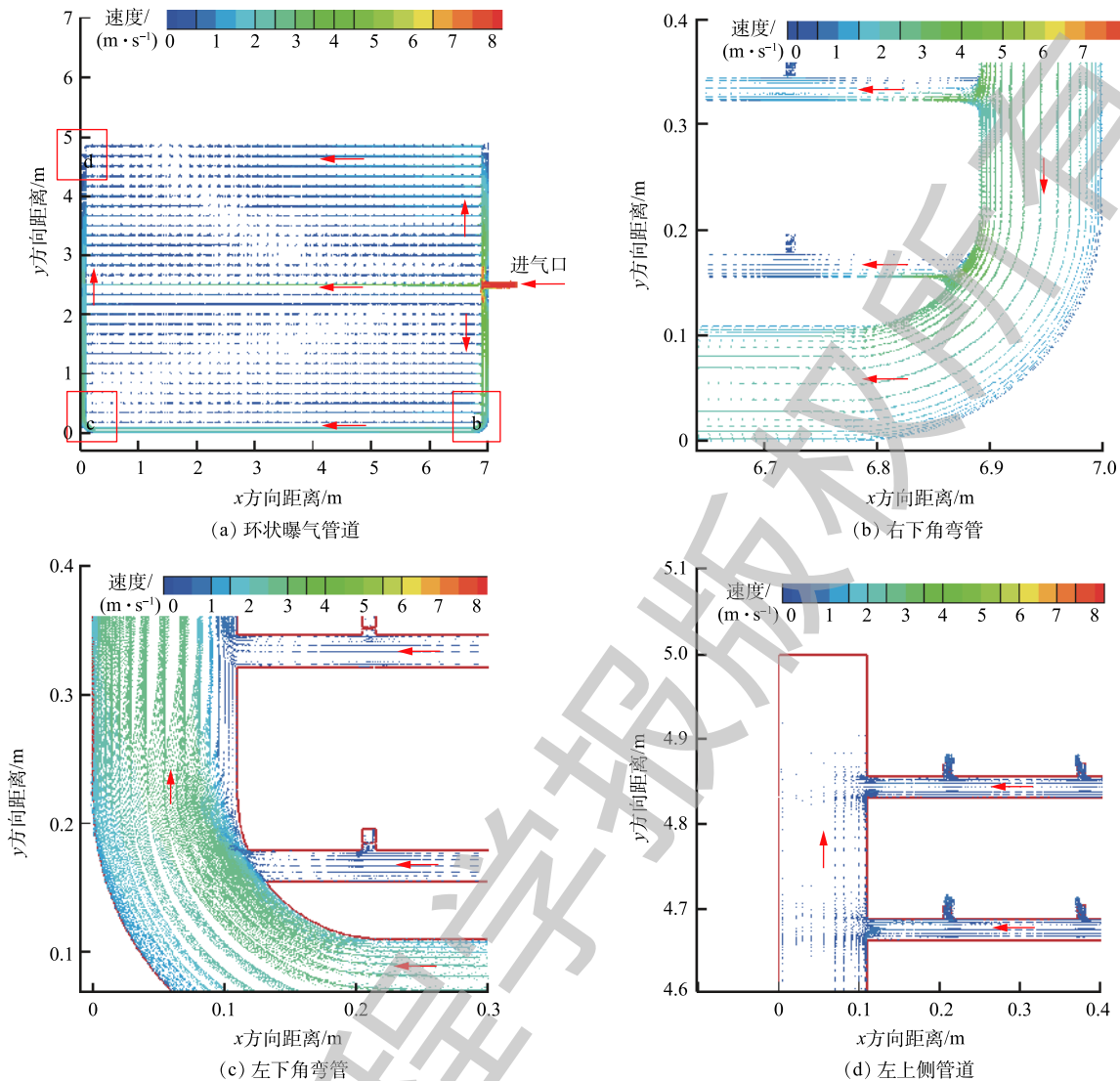


图 2 环状曝气方式的速度分布

Fig. 2 Velocity distribution of ring-shaped pipe system

值模拟对其曝气效果进行了模拟确认。根据其对称性，为提高模拟效益，取如图 3(b) 所示的一侧模拟即可。模拟的主要关注点是曝气量是否达到各个角落，其次是各个支管的曝气是否均匀。研究设计基本参数如下：水平干管、支管(立管)及下部水平曝气管的管径分别为 150、50 和 20 mm；立管长为 5.3 m，曝气管长为 3 m。总曝气量为  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ，根据对称性，模拟时半边取  $3 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ；曝气孔在水下 5 m，取 50 000 Pa 为模拟的气体出口压力。由图 3(b) 所示的整体压力分布可以看出，管道压力自左侧气体入口至曝气管压力逐级减小，这说明曝气过程是基本均匀且为压力驱动的。

研究分别选择离进气口最近的 1 号立管及最远的 2 号立管进行对比分析，若二者差别不大，那么基本可判定整体供气是均匀的。依次观察分析干管与立管交界处、立管与支管交界处以及曝气管的流场分布情况。

与干管进气口最近的 1 号立管、最远的 2 号立管与上部主供气干管(图 4(a) 和图 4(b)) 及下部曝气管(图 4(c) 和图 4(d)) 交界处的流场如图 4 所示。由图 4 可见，在接近主进气口的 1 号立管(图 4(a)) 和最远的 2 号立管(图 4(b)) 的流场是有很大不同的。1 号立管的进气口在主干管的下游侧进气较多，而上游侧较少；2 号立管的进气口则相对均匀对称，中间多，两侧较少。但在立管的下

部与曝气管交界处的流场(图4(c)和图4(d)),二者却非常近似,接近于稳定管道流中的流场分布,即中间大,四周小。这可能是因为立管足够长,在流至曝气管前,使管道内的气体的流动达到了理想的稳定分布。从速度云图上看,速度的大小也是基本相同的,流量应比较接近,研究对曝气

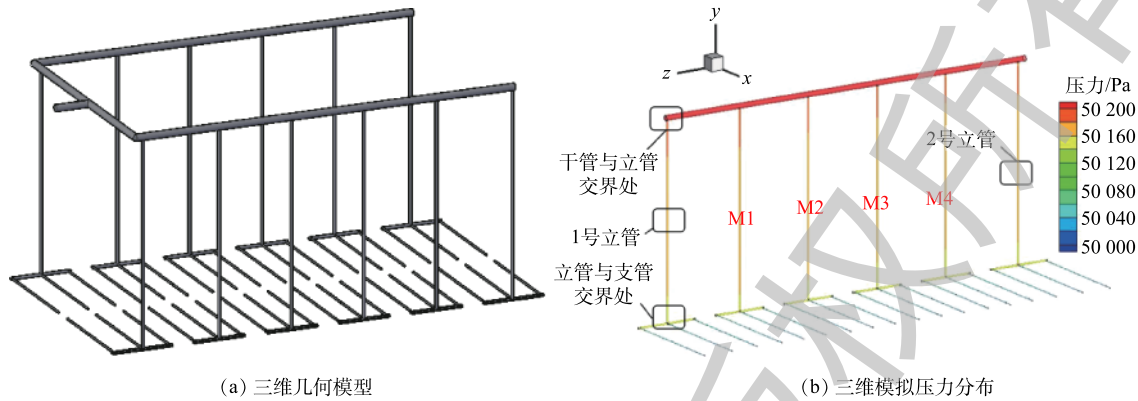


图3 原型曝气管道的三维数值模拟几何模型及模拟进气后的压力分布

Fig. 3 Geometric model and pressure distribution of the 3-D numerical simulation of prototype pipe system

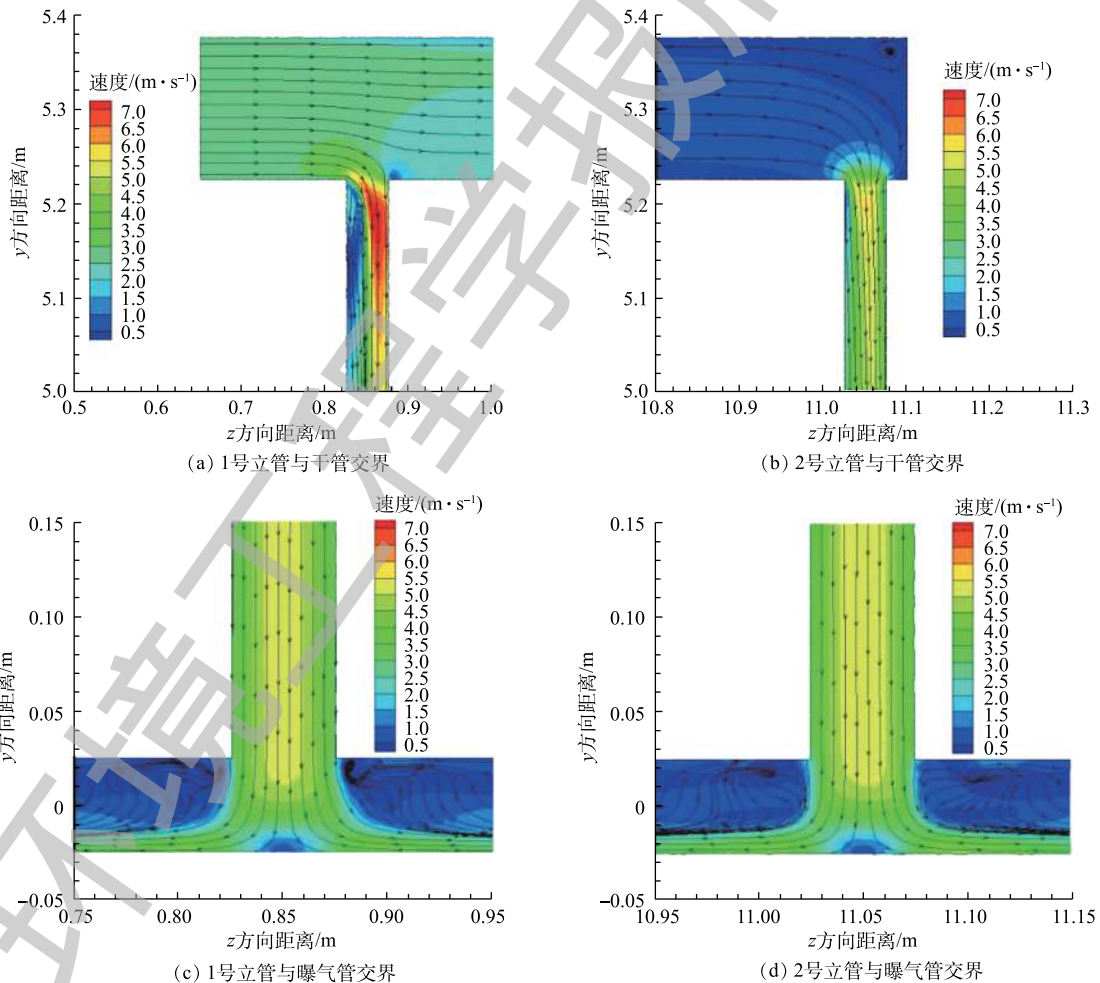


图4 最近、最远立管与上部主干管交界处及下部曝气管交界处的流场流线及速度云图

Fig. 4 Streamlines and velocity nephograms of the junctions between the closest and farthest stand pipes and main pipe or lower aeration pipes

管的流量作进一步的定量检验。

通过 Fluent 软件处理, 可以检查数值模拟的各管道的流量及曝气孔的曝气量, 定量地分析曝气均匀性。所有 6 根立管的进气量以及和它们相连接的中间曝气管的 3 个曝气孔的曝气量如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 各立管及曝气孔的曝气量分布基本均匀, 接近理论平均值。其中, 各立管流量随着离进气口越远而渐渐增加, 理论均值为  $0.00833 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 但标准偏差仅为  $4.72 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; 而曝气孔的曝气量则是离干管越远越小的趋势, 但总体差别不大, 理论均值为  $0.0093 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 标准偏差为  $7.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。各立管、曝气孔间的气量相对误差较小, 可认为曝气基本达到了均衡, 存在的较小差别可能为实际流动的沿途压损造成的, 也有可能与湍流模型、网格质量有关, 下一步可通过实测来检验各立管、曝气孔间的气量相对误差。

综合以上流场及流量结果分析, 可以认为该模型下的曝气达到了在各曝气管及曝气孔的流量的基本均衡。

表 2 立管及其对应的中间位置曝气管的 3 个曝气孔的曝气量  
Table 2 Flow rate of the three aeration holes located on the standing pipes and their corresponding center aeration pipes  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

| 序号  | 立管流量     | 曝气管曝气孔流量 |          |          |
|-----|----------|----------|----------|----------|
|     |          | 最近       | 居中       | 最远       |
| 1号  | 0.008 21 | 0.000 98 | 0.000 84 | 0.000 82 |
| M1号 | 0.008 24 | 0.001 00 | 0.000 85 | 0.000 80 |
| M2号 | 0.008 28 | 0.001 00 | 0.000 86 | 0.000 84 |
| M3号 | 0.008 29 | 0.001 00 | 0.000 83 | 0.000 81 |
| M4号 | 0.008 31 | 0.000 99 | 0.000 84 | 0.000 83 |
| 2号  | 0.008 34 | 0.000 98 | 0.000 85 | 0.000 83 |

### 3 结论

1) 数值模拟研究为某曝气生物滤池的曝气管道系统进行了科学的选型优化。通过二维数值模拟得出: 环状曝气的 4 个弯道处的曝气极少; 而单边枝状和中心枝状的曝气方式均匀性相对较好。

2) 对原型双边枝状曝气方式三维的数值模拟显示, 各曝气口的曝气量都接近均值, 标准偏差为  $7.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 故可以认为基本达到了均匀曝气。本研究可有效地助力曝气生物滤池的选型设计, 以较低的成本实现高效节能的目标。

### 参 考 文 献

- [1] 张杰, 陈秀荣. 曝气生物滤池反冲洗的特性[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 86-91.
- [2] 张玉平. 两段上向流曝气生物滤池(TUBAF)处理城市污水试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [3] 陈康. 曝气生物滤池在城市污水处理工程中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [4] 廖腾毅. 基于生物膜分层理论的曝气生物滤池Fluent模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [5] 王宏, 张林军, 宫秀学, 等. 上向流与下向流BAF串联处理生活污水的特性研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(7): 62-64.
- [6] 郑俊, 程寒飞, 王晓焱. 上流式曝气生物滤池工艺处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2001, 17(1): 31-33.

- [7] 黄宇萍. 曝气生物滤池设计与施工的若干问题[J]. 中国给水排水, 2005, 21(8): 62-65.
- [8] 张诗华, 郑俊. 曝气生物滤池(BAF)及其设计[J]. 市政技术, 2007, 25(4): 270-272.
- [9] 谢观体, 陆少鸣. 上向流曝气生物滤池新冲洗方式的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(19): 92-94.
- [10] 邱立平, 王广伟, 张守彬, 等. 上向流曝气生物滤池反冲洗实验研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1522-1526.
- [11] 杨婧雯, 江霜英, 刘昭丽. 上向流曝气生物滤池的低温启动试验[J]. 水处理技术, 2011, 37(1): 112-115.
- [12] 李微, 魏炜, 张传彬. 曝气量对间歇曝气/曝气生物滤池效能影响[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(s1): 104-106.
- [13] 杨春娣. 曝气生物滤池中曝气方式对污水处理效率的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [14] 刘玉玲, 白戈, 邵世鹏, 等. 曝气池曝气管布置方式对流速分布影响的数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 84-90.
- [15] 黄河清. 环境流体力学[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2013.
- [16] SAJJADI B. Solid-liquid mixing analysis in stirred vessels[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2015, 31(2): 119-147.
- [17] 段中喆. ANSYS FLUENT流体分析与工程实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [18] 唐家鹏. FLUENT 14.0超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [19] 张维佳. 水力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(本文编辑: 金曙光, 曲娜, 郑晓梅)

## Numerical simulation on the layout of BAF aeration pipeline

WU Weiwei<sup>1</sup>, YE Jiasheng<sup>1</sup>, ZHENG Jun<sup>2</sup>, ZHANG Dewei<sup>2</sup>, HUANG Heqing<sup>1,\*</sup>

1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma' anshan 243032, China

2. Anhui Huaqi Environmental Protection Technology Co. Ltd., Ma' anshan 243032, China

\*Corresponding author, E-mail: heqing@ahut.edu.cn

**Abstract** Aiming at the problem of low treatment efficiency caused by uneven aeration in biological aerated filter (BAF), based on the fluent software, the standard  $k-\varepsilon$  model was used to conduct the numerical simulation study on the layout of BAF aeration pipelines in different dimensions. The results showed that two-dimensional numerical simulation of the flow field of the three aeration modes such as unilaterally dendritic, center dendritic and ring-shaped modes indicated that aeration distribution in the former two modes were relatively uniform, while the four corners of the last mode had poor aeration due to relative low pressure. Further three-dimensional numerical simulation on prototype bilateral dendritic mode showed that the flow rate of each aeration hole was close to the theoretical average value with the standard deviation of  $7.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , which could achieve designed uniform aeration effect. The research can effectively assist the selection and design of biological aerated filter, and achieve the goal of high efficiency and energy saving at a lower cost.

**Keywords** biological aerated filter; aeration pipe; uniformity; numerical simulation