

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0912

王丽, 王丽杰, 王琳, 等. 2015. 滤料粒径对 BAF 小尺度下流场形态及挂膜速度的影响[J]. 环境科学学报, 35(5): 1426-1434

Wang L, Wang L J, Wang L, et al. 2015. Effects of media size on flow pattern and biofilm growth speed of BAF[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(5): 1426-1434

滤料粒径对 BAF 小尺度下流场形态及挂膜速度的影响

王丽^{1,*}, 王丽杰¹, 王琳², 霍玉鑫¹, 李浩然¹

1. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001

2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100

收稿日期: 2014-06-10 修回日期: 2014-08-29 录用日期: 2014-09-11

摘要: 为探讨颗粒粒径对曝气生物滤池 (BAF) 运行效果的影响, 采用数值模拟和实验研究方法分析了滤料粒径对曝气生物滤池流场形态及挂膜速度的作用机理. 选用 5 个颗粒尺寸结构空间作为计算区域, 利用 Fluent 软件对相同颗粒间隙、不同颗粒粒径下 BAF 小尺度下的流场形态进行模拟分析, 并通过对 3 种粒径下流线图、速度矢量图、压力分布及湍流强度变化的对比分析, 发现颗粒粒径为 3 mm 时流场形态最好, 最有利于气水混合及氧传质的进行. 同时, 为验证模拟结果的正确性, 对同种材质、相同运行条件下 3 种不同颗粒粒径进行挂膜速度对比, 通过考察挂膜启动 28 d 的 COD 去除率变化及污泥生物量的对比分析, 发现颗粒粒径为 3 mm 时, 运行最为稳定, 系统运行第 16 d 时就达到了 80% 的 COD 去除效率.

关键词: 滤料粒径; 曝气生物滤池; 小尺度数值模拟; 流场形态; 挂膜速度

文章编号: 0253-2468(2015)05-1426-09 中图分类号: X502, X703 文献标识码: A

Effects of media size on flow pattern and biofilm growth speed of BAF

WANG Li^{1,*}, WANG Lijie¹, WANG Lin², HUO Yuxin¹, LI Haoran¹

1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

2. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100

Received 10 June 2014; received in revised form 29 August 2014; accepted 11 September 2014

Abstract: A numerical method was used to simulate the flow pattern of BAF with three different sizes of granule media, 2 mm, 3 mm, and 4 mm. A small flow field of 5 granules was designated as the calculation zone, and the Fluent software was employed to analyze the flow pattern of the small scale field at the same granule space and different media sizes. The streamline chart, velocity vector, stress distribution, and turbulence strength were obtained. By comparing the output of simulation of flow patterns of three different sizes of media, 3 mm is the favor size for the mix of gas and water, and oxygen transportation. Three parallel small-scale BAFs were packaged by three different size media separately, with the same materials and at the same operation condition employed. After 28 days operation, the BAF with 3 mm of media showed better characteristics on stabilization, biofilm growth speed, biomass and COD removal. The COD removal of BAF with 3mm of media was 80%.

Keywords: filter media size; biological aeration filtration (BAF); numerical simulation; flow pattern; biofilm growth speed

1 引言 (Introduction)

曝气生物滤池 (BAF) 是一种气液固三相生物膜反应器, 其基本原理是在一级强化的基础上, 以颗粒状填料及其附着生长的生物膜为主要处理介质, 充分发挥生物代谢作用、物理过滤作用、生物膜和填料的物理吸附作用及反应器内食物链的分级捕食作用, 实现污染物在同一单元反应器内去除.

近 30 年来, 国内外学者对 BAF 进行了大量的实验研究, 研究方向主要集中在技术改进及影响曝气生物滤池运行的因素上, 包括运行方式、水力负荷 (韦彦斐等, 2011)、气水比 (Leung *et al.*, 2006)、温度 (李迎全, 2012)、DO (Puznava *et al.*, 2000) 及滤料参数 (Moore *et al.*, 2001; 邱珊, 2010; Feng *et al.*, 2010) 的影响. 滤料作为曝气生物滤池的核心, 对 BAF 处理效能起着重要作用. 有研究表明, 粒径小的

基金项目: 国家留学基金管理委员会资助项目 (No.20120370391)

Supported by the Program Funded by the China Scholarship Council (No.20120370391)

作者简介: 王丽 (1966—), 女, 副教授 (博士), E-mail: liwanghit@126.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: WANG Li (1966—), female, associate professor (Ph.D.), E-mail: liwanghit@126.com; * Corresponding author

滤料相对比表面积大,有利于微生物的附着,但不宜高的水力负荷,否则容易堵塞;粒径大的滤料纳污能力强,能承受较高的水力负荷,可减少反冲洗的频率。Moore 等(2001)采用不同粒径的填料进行了 BAF 氨氮去除实验,发现填料粒径为 2~4 mm 时,其硝化效能比填料粒径为 4~8 mm 和 5.6~11.2 mm 时要好得多。邱珊(2010)研究了 10 种现有的滤料的多种特性参数,结合这几种滤料的优势开发出了新型滤料并在实际运行中取得了良好的效果。虽然滤料粒径对 BAF 的影响显而易见,但其作用机理目前还不清楚。

计算流体力学(CFD)的迅速发展使得模拟高复杂度的多相流已成为可能,目前对 BAF 数值模拟的研究多针对气液两相流宏观的整体流场形态,并取得了一定的成果。例如, Fayolle 等(2001)基于数值模拟预测了曝气池内的流场形态和氧传递特征,得到氧传递系数在 5% 左右时运行效果最好。西安理工大学程文课题组(程文等,2001;杨春娣等,2010)在对曝气池实验研究的基础上,建立了数值模拟模型,对曝气池中的气液两相流的理论进行了一些初步研究,并最终建立了气液两相紊流的 $k-\varepsilon$ 模型。采用数值模拟与实验分析的方法研究 BAF 中气液两相流的相关规律,有利于揭示流场形态与溶解氧的关系,并可分析其对反应器处理效能的影响。高杨(2011)研究发现,曝气管间距对流场影响最大,池体深度对流场影响最小。Gresch 等(2009)将生物动力学模型用于 CFD 中,模拟结果表明,扩散器内小的变化能引起整个流场的全面改变。综上,利用 CFD 对曝气生物滤池流场形态进行研究,有利于运行参数的选择,从而能进一步优化曝气生物滤池工艺设计。但以往的研究多局限于对 BAF 整体流场的宏观模拟,不利于机理分析。

本文为探究滤料粒径对 BAF 运行效果的作用机理,借助数值模拟手段,选择小尺度的计算区域,分析滤料粒径对 BAF 流场形态的影响,研究其与气水混合及挂膜效果的耦合关系,并进行挂膜实验验证分析。

2 研究方法(Methods)

2.1 模拟部分

为探究滤料粒径对 BAF 反应器内流场形态的影响,采用 Fluent 软件,选择小尺度下流场形态进行模拟分析。具体模型假设及网格划分如下所述。

2.1.1 模型假设 曝气生物滤池中包括水、空气和滤料三相,流动情况比较复杂,因此,有必要对其进行简化,为此做如下假设:①填料为多孔介质的固定床,可以设置不同的填料颗粒大小及空隙尺寸;②系统不考虑温度的影响,即在等温条件下运行;③气相、液相都视为不可压缩理想流体,不考虑压力、湿度等外界环境对整个系统的影响。

实验装置中颗粒相没有明显的运动、迁移,可看作固定床层,因此,在模拟研究中将颗粒相直接做壁面处理。同时,由于系统在稳定运行时分布均匀,所选取的数值模拟计算区域只是其中的一个局部。因此,研究滤料粒径对 BAF 小尺度下流场形态的影响既有利于机理分析,也便于模型建立。本文选择 5 个颗粒尺结构空间作为计算区域。

2.1.2 控制方程 采用欧拉-拉格朗日法计算曝气生物内气液两相流,采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型来表征湍流运动。其中,质量守恒方程和动量守恒方程分别如式(1)和(2)所示,湍流方程中的 k 方程和 ε 方程分别如式(6)和(7)所示。

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (a_i \vec{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_i \rho_i u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (a_i \rho_i u_i u_i) = \\ - a_i \nabla p_i + \nabla \cdot (a_i \tau_i) + F_i + a_i \rho_i g \end{aligned} \quad (2)$$

式中,下标 i 表示液相或气相,下标 j 表示 x, y 两个方向, t 表示是时间(s), a 表示体积分, u 表示流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ 表示密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), p 表示压强(Pa), τ 表示粘性应力张量(Pa), F_i 表示微元体内相间作用($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$), g 表示重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。对于相互作用力,文中只考虑曳力的影响,即 $F_i = F$,其表达式为:

$$F = -0.75 a_g (1 - a_g) \rho_l \frac{C_D}{d_g} |\mu_g - \mu_l| (\mu_g - \mu_l) \quad (3)$$

式中,下标 g 表示气相, l 表示液相, d_g 表示气泡直径(m), μ_g 表示气相的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), μ_l 表示液相的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), C_D 表示曳力系数。根据 Schiller-Naumann 曳力模型表示为:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 Re^{0.687}) / Re & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho_g |\mu_l - \mu_g| d_g}{\mu_g} \quad (5)$$

式中, Re 为相对雷诺数.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_t) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \mu_t) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

式中, G_k 表示平均速度梯度所产生的湍动能 ($m^2 \cdot s^{-2}$), G_b 表示浮力所产生的湍动能 ($m^2 \cdot s^{-2}$), σ_k 和 σ_ε 表示 k 和 ε 的普朗特准数, μ 表示粘性系数, ρ 表示两相密度的算术平均值 ($kg \cdot m^{-3}$), $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 和 C_μ 为常数, μ_t 表示湍流粘度 ($Pa \cdot s^{-1}$).

2.1.3 网格划分及边界条件设置 对所研究局部小尺度的模型结构、网格划分及边界条件的设置如图 1 所示.对于颗粒粒径为 3 mm、颗粒间空隙为 0.5 mm 的模型,其计算高度为 9 mm,宽度为 9 mm.由于结构相对复杂,采用三角形网格进行划分,网格结构如图 1 所示,共划分为 1116 个网格.在此模拟中,污水的参数采用固定值:密度为 $1000.78 kg \cdot m^{-3}$,动力粘度为 $1.007 \times 10^{-3} Pa \cdot s$.

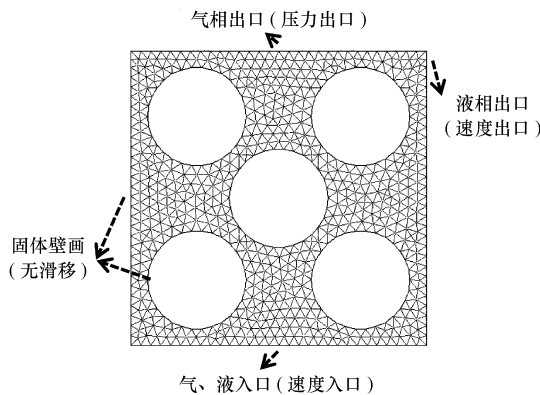


图 1 模型结构、网格划分及边界设置示意图

Fig.1 Model structure, mesh and boundary setting

采用非稳态求解器进行模型求解,采用 SIMPLE 方法对速度、压力耦合求解.为了提高计算精度,除体积分数采用一阶迎风格式离散外,对于动能、湍动能及湍流耗散率,都采用二阶迎风格式进行离散.

为验证模型的准确性,进行网格无关性验证.对比分析计算区域边长节点数为 30 (图 1) 和 45 两种网格尺寸下气相出口处湍动能,结果如图 2 所示.由图 2 可知,两种网格尺寸下气相出口湍动能整体变化趋势一致,许多数据近乎重合,说明网格细化后对模拟结果影响不大.因此,本文选取边长节点数为 30 的稀疏网格进行模拟分析,以减少计算量.

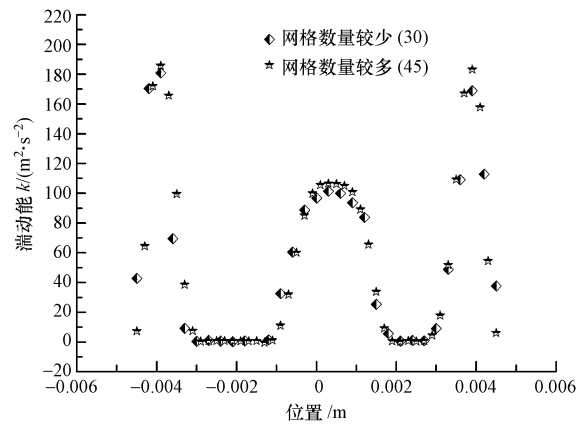


图 2 两种网格尺寸下气相出口处湍动能

Fig.2 Gas phase turbulent kinetic energy at the exit of two different mesh scales

2.1.4 模拟工况设置 研究颗粒粒径影响时的工况和变量设置如表 1 所示.滤料的粒径分别为 2、3 和 4 mm,颗粒间空隙为 0.5 mm,进水、进气速度分别为 $0.0128 m \cdot s^{-1}$ 和 $0.708 m \cdot s^{-1}$.

表 1 不同颗粒粒径工况设置

Table 1 Operating condition of different particle sizes

工况	颗粒粒径/mm	颗粒间空隙/mm	进水速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	进气速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
1	2			
2	3	0.5	0.0128	0.708
3	4			

2.2 实验部分

为验证模拟的正确性,对比不同粒径滤料的 BAF 在挂膜启动实验过程中的挂膜速度,设计实验对 2、3、4 mm 粒径滤料的挂膜情况进行对比.

2.2.1 实验装置及材料 图 3 为本实验的结构及流程图.曝气生物滤池高为 1 m,下部填充高度为 0.6 m 的滤料,采用同一厂家生产的同种材质的 3 种不同粒径的球形陶粒作为滤料.本实验所用污水为人工配制污水,含有许多城镇生活污水所含的无机物、有机物及微量元素,其物质与含量如表 2 所示.

表 2 人工污水配置指标

Table 2 Configuration index of artificial sewage

常见元素	含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	微量元素	含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
工业葡萄糖(碳源)	300~900	FeCl_3	3.75
NH_4Cl (氮源)	30~90	CuSO_4	0.075
NaHCO_3	50~160	ZnS	0.3
MgSO_4	21~35	KI	0.45
FeCl_3	0.7~1.0	MnSO_4	0.3
CaCl_2	20~35	CoCl_2	0.375

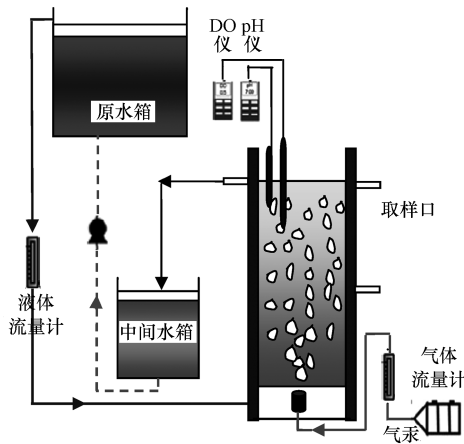


图 3 实验流程及结构图

Fig.3 Experimental procedure and structure

本实验主要是考察不同颗粒粒径对挂膜启动速度的影响,主要对比挂膜期间不同粒径下的去除

表 3 实验仪器及设备

Table 3 Experimental apparatus and equipment

仪器及设备	型号	生产商
COD 消解仪	5B-1	兰州连华科技
COD 快速测定仪	5B-3(C)	兰州连华科技
可见分光光度计	721 型	上海元析
紫外可见分光光度计	TU-1810	北京普斯
便携式 DO 测定仪	JPB1607	上海雷磁
台式电热恒温干燥箱	WHL-25	天津泰斯特
电热恒温培养箱	DH2500	天津泰斯特
电子分析天平	JA2003	上海越平
便携式 PH 计	PHB-1	上海宇龙
生物显微镜	XSP-203	梧州市光学仪器厂
气泵	ACO-00	广东海力基团
水泵	AP120FC	中山市振华电器
玻璃转子流量计(液)	LZB 6	哈尔滨景田电子仪表设备厂
玻璃转子流量计(气)	LZB-6	余姚市奇泉流量仪表有限公司

效率和污泥形态的变化.根据《水和废水监测分析方法》的相关执行标准,运用相应的仪器(表 3)和测试方法(表 4)进行测试,涉及到的指标有 COD、镜检下污泥变化及生物量.

表 4 分析方法

Table 4 Analytical method

检测项目	分析方法	执行标准
COD	重铬酸钾氧化法	GB 11914-89
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	纳氏试剂比色法(420 nm)	HJ 535—2009
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	紫外分光光度法(220~275 nm)	HJ/T346—2007
TN	过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(220~275 nm)	GB 11894-89
DO	便携式 DO 测定仪	
pH	便携式 PH 计	
生物相	生物显微镜	
污泥干重/有机质含量	电子分析天平	

2.2.2 挂膜启动实验方法 曝气生物滤池挂膜启动方法一般有 3 种:连续进水自然挂膜法、接种活性污泥法及接种优势菌种挂膜法.本实验采用先间歇培养后连续培养的自然挂膜法,为尽快形成生物膜,增加挂膜速度,缩短反应器启动时间,在间歇培养阶段加入一些生化性较好、有机浓度较大的豆浆和葡萄糖废液.反应器启动的具体安排如表 5 所示.

表 5 反应器挂膜启动时间安排

Table 5 Time arrangement of Star-up experiment in BAF

步骤	时间/d
间歇进水阶段	5
较高浓度污水连续进水阶段	12
较低浓度污水连续进水阶段	8

根据挂膜启动时间安排,按照滤速为 $0.0128 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, SRT 为 1.5 h,平均水力负荷为 $0.9 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$,调节气水比为 8:1~10:1 的运行条件进行实验.

2.2.3 污泥内生物量的研究方法 为分析不同粒径下污泥内生物含量的变化,对以上两种污泥进行干重及灼烧实验.具体实验过程为:分别在反应器底部选取 100 mL 含生物膜的反应液,对污泥进行过滤处理,分离出固相的污泥颗粒,置于坩埚(已称重)中;调节干燥箱温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$,将坩埚置于其中干燥 30 min,取出坩埚进行称量,直到称重无变化后,结束干燥过程,记录此刻坩埚及干燥污泥的总质量;调节马沸炉温度为 $350\text{ }^\circ\text{C}$,等温度升到设定温度后,将坩埚置于其中灼烧 15 min,结束后,再次进行称重(认为灼烧量为生物量).

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 模拟结果分析

3.1.1 流场形态及液相速度矢量分布、变化 流场中气相或液相的速度分布及垂向速度可在一定程度上反应流场整体形态和水力停留时间长短.一般来说,水力停留时间越长,氧传质时间就越长,从而有利于氧的传质.因此,本文对流场形态进行速度分析.

从图 4 可以看出,在颗粒间空隙为 0.5 mm、不同颗粒粒径的情况下,颗粒间区域的流场形态不同.在 3 种不同粒径下,计算区域内都形成了漩涡,只是

漩涡的尺寸和数量有所不同.当粒为 2 mm 时,容易在周边 4 个颗粒上端形成较小的漩涡结构,其他区域的流线相对平缓,说明流动波动较小.粒径为 3 mm 和 4 mm 时,漩涡区域相似,但在尺寸上有所不同.当粒径为 4 mm 时,形成了较大的漩涡,这种较大的漩涡结构容易引起局部生物膜的过度脱落.而当粒径为 3 mm 时,在计算区域形成了尺寸较小、数量较多的漩涡结构,这种漩涡结构相对合理,有利于气、液及生物膜的相互作用,同时有利于生物膜的更新.综合对流线图和速度矢量图的分析可知,在颗粒间空隙一定时,不同颗粒粒径会造成不同的流场形态.

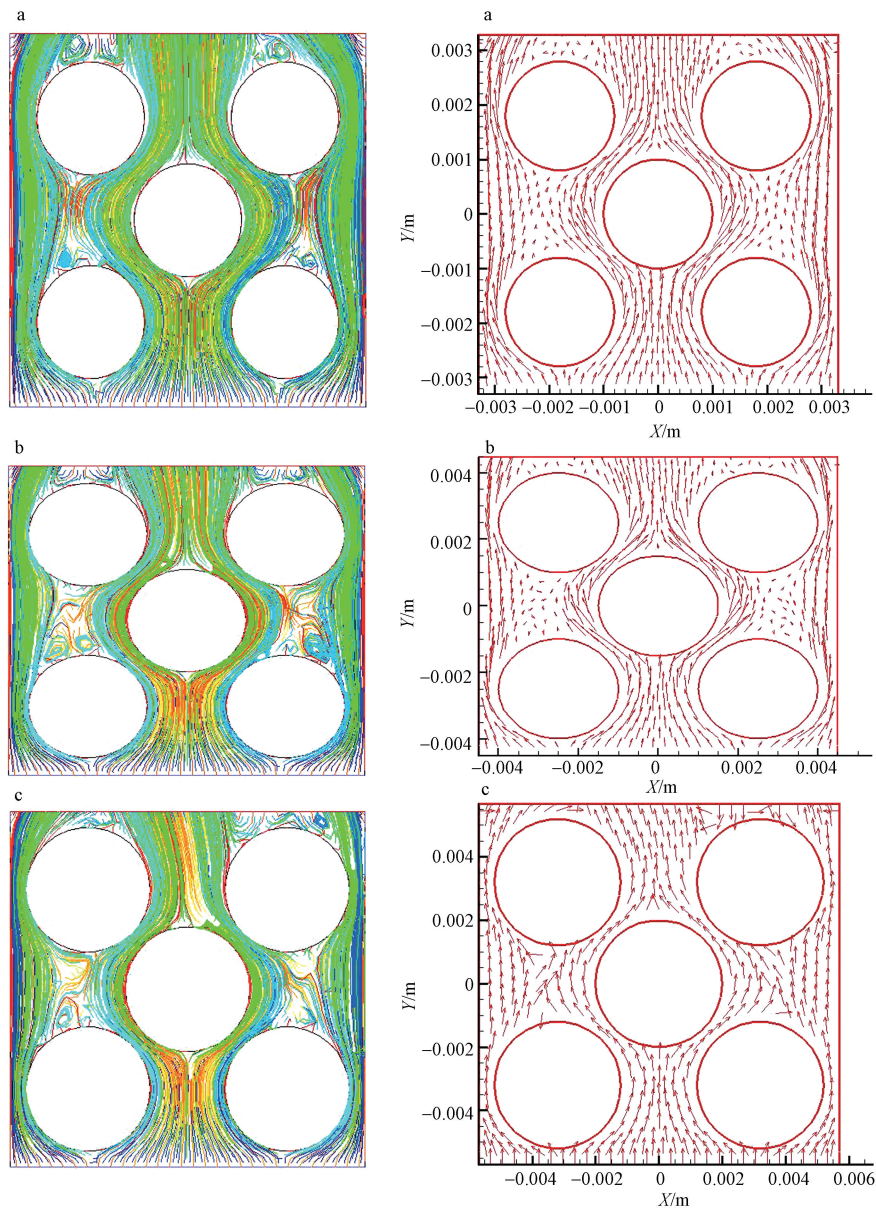


图 4 不同颗粒粒径的流线图及液相速度矢量图(a.2 mm,b.3 mm,c.4 mm)

Fig.4 Pathlines and liquid phase velocity vector of different particle sizes(a.2 mm,b.3 mm,c.4 mm)

对比速度矢量图可以看出,相对于粒径为 2、3 mm 的工况,粒径为 4 mm 时,箭头指向杂乱,颗粒间有明显的碰撞.为了进一步说明 3 种粒径下流场的差异性,选取 $Y=0$ (即计算区域的水平中线) 上的液相速度进行对比,结果如图 5 所示.由散点图可以看出,对于 $Y=0$ 的轴向液相时均速度,粒径为 2 mm 时的时均速度趋于 0,且几乎没有明显的变化.当粒径为 3、4 mm 时,轴向时均速度变化加大,与流场中的漩涡结构一致.粒径为 4 mm 时,轴线时均速度从 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化到 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明存在很明显的湍流流

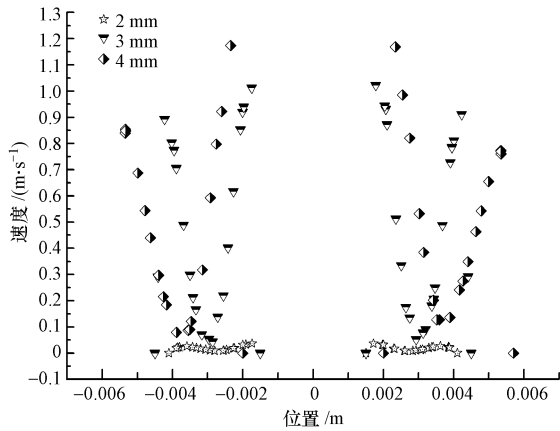


图 5 $Y=0$ 轴向液相时均速度
Fig.5 Axial liquid velocity of $Y=0$

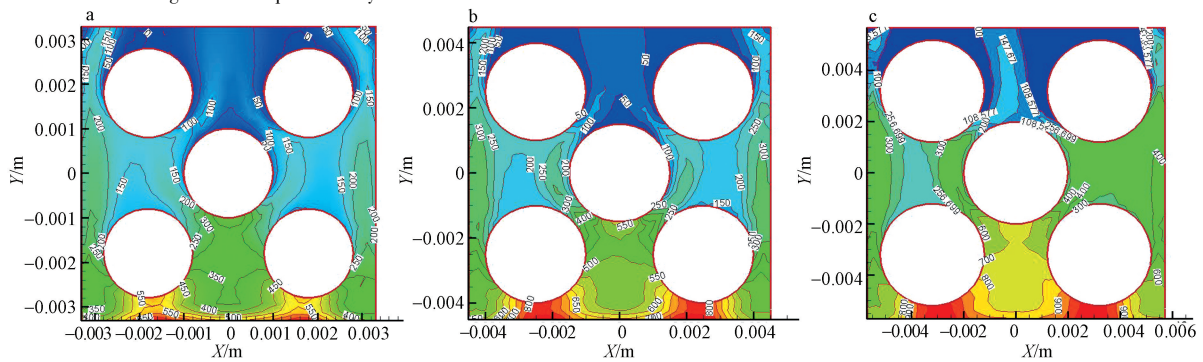


图 6 不同颗粒粒径的压力分布云图 (a.2 mm, b.3 mm, c.4 mm)
Fig.6 Stress distribution of different particle sizes (a.2 mm, b.3 mm, c.4 mm)

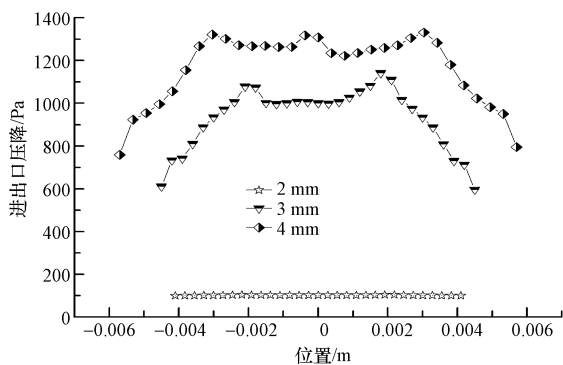


图 7 不同颗粒粒径的进出口压降曲线
Fig.7 Import and export pressure drop of different particle sizes

动.对于曝气生物滤池来说,虽然颗粒间湍流流动能够加快氧传质过程,但过于剧烈的湍流运动会影响生物膜的附着生长.而对于粒径为 3 mm 的轴向时均速度,虽有明显波动,但相对较小,既确保了气水充分混合,又保证了停留时间达到较好的处理效果.从流线和速度两方面分析,当颗粒间空隙为 0.5 mm 时,粒径 3 mm 较为合理.

3.1.2 压力分布变化 压力变化的均匀程度在一定程度上反映了气水混合的均匀度,压力梯度的大小反映了湍流运动的强弱及湍流强度的大小,特别是压降是流动阻力的直观体现.因此,本文对流场进行了压力分析.

图 6 给出了同一颗粒间空隙(0.5 mm)、不同颗粒粒径下的压力分布云图,与流线分布一致.当粒径较小时,其相对空隙较大,压力变化较为均匀,在一定程度上不利于氧传质的进行.当粒径较大时,压力变化从进口处的最高压力值到出口处的最低值其压力梯度变化过大,说明流场变化的不均匀性.当粒径为 3 mm 时,压力变化比较均匀,在一定程度上有利于气水混合.为进一步说明同一颗粒间空隙、不同颗粒粒径压降的流动阻力不同,本文进行了压降对比分析.由图 7 可以看出,当粒径为 2 mm 时,压降较

小,数值上几乎没有明显波动,在 100 Pa 左右.粒径为 3 mm 和 4 mm 时的压降值变化趋势一致,但粒径为 4 mm 时的压降值明显大于粒径为 3 mm 时的压降值.可能是因为固定颗粒间空隙为 0.5 mm 时,粒径为 4 mm 时相对空隙较小,形成较为强烈的湍流,造成较大的流动阻力,需要更大的能量消耗.从压力分布和压降曲线可知,粒径 3 mm 相对合理.

3.1.3 湍流强度变化 由流体动力学可知,液体湍流越强烈,越有利于氧分子在液相中的扩散.因此,本文在处理数值模拟结果时,通过对湍流强度分析

来评价氧传质效果.图8为同一颗粒间空隙、不同颗粒粒径下的湍流分布云图.由图可知,3种粒径下的湍流强度分布大致一致,但局部有所不同.当粒径较小时,颗粒间的湍流强度变化不明显;粒径为4 mm时,湍流强度变化较大,但存在明显的局部分布不均现象.粒径为3 mm时,湍流强度梯度变化相对均匀,这种均匀的湍流变化在一定程度上有利于气、液及生物膜的接触,同时有利于生物膜的更新.

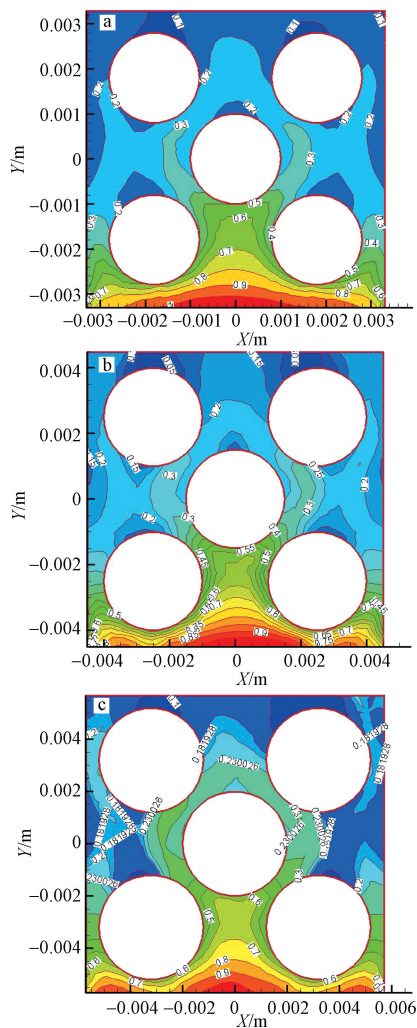


图8 不同颗粒粒径湍流强度分布云图(a.2 mm, b.3 mm, c.4 mm)

Fig.8 Turbulence intensity distribution of different particle sizes(a. 2 mm, b.3 mm, c.4 mm)

通过对同一颗粒间空隙、不同颗粒粒径下3种不同流场形态的速度、压力及湍流强度三方面的分析,得出在颗粒间空隙为0.5 mm时,粒径较大时,由于相对空隙较小,湍流运动剧烈,存在较大的阻力压降;粒径较小时,流线平缓,压力分布均匀,阻力压降较小,流动波动较小.当颗粒粒径为3 mm时形

成了湍流流动,而且压力变化和湍流变化相对均匀,这种流场形态更有利于系统的气水混合、氧传质的进行及生物膜的脱落更新.

3.2 实验结果分析

曝气生物滤池挂膜启动是否成功的判定标准为能否对COD进行有效、稳定的去除,利用生物显微镜能否观察到液相主体中丰富的微生物群落.

3.2.1 不同粒径下挂膜速度对比 图9为3种不同粒径滤料下COD去除率的变化曲线.由图9可以看出,相同条件下3种滤料在挂膜过程中COD的去除率总体上都呈现先逐渐增大,最终达到动态稳定的趋势.虽然不同粒径下3种滤料的COD去除率趋势一致,但局部存在一些差异.滤料粒径为3 mm时,反应最为稳定,在反应器运行16 d时,就达到了80%的COD去除率,并保持相对较高的运行效率稳定运行.相对而言,滤料粒径为4 mm时,运行稳定性较差,COD去除率变化较大,特别是在高浓度连续进水阶段,波动较大,在挂膜启动19 d后,才达到较高的去除效率.粒径为2 mm的滤料在间歇进水阶段COD去除效率明显好于粒径为3、4 mm的情况,但进入连续进水阶段后,COD去除效率逐渐低于滤料粒径为3 mm时.究其原因,当滤料粒径为2 mm时,相对于较大粒径的滤料,由于其粒径较小,比表面积较大,在间歇进水时存在较大的停留时间,通过机械截留使得COD去除效果相对较好;当进入连续进水阶段,由于粒径较小,氧传质相对较差,COD去除效果虽不断变好,但逐渐失去优势,COD去除效率稍低于粒径为3 mm时的值.粒径为4 mm时,COD去除率存在明显的波动,运行不稳定,可能是

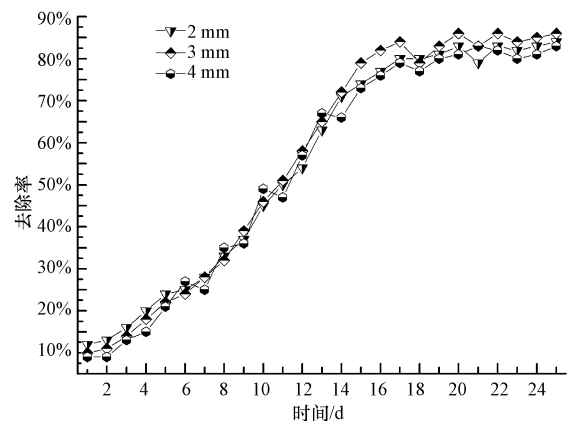


图9 3种不同滤料的COD去除效率对比

Fig.9 Comparison of COD removal efficiency in three different particle sizes

因为粒径较大,反应器内的湍流强度相对较大,容易引起生物膜脱落.通过对实验数据对比分析可以看出,当滤料粒径为 3 mm 时,反应器运行稳定,挂膜速度最快,颗粒间填充的生物絮体具有较强的吸附能力,COD 去除效果比较好.

3.2.2 不同粒径下的污泥生物量 挂膜结束后,按照 2.2.3 节污泥生物量的研究方法,得到了 3 种不同粒径下污泥的生物量,结果如图 10 所示.可以看出,当粒径为 3 mm 时,污泥干重及生物量最高.相对而

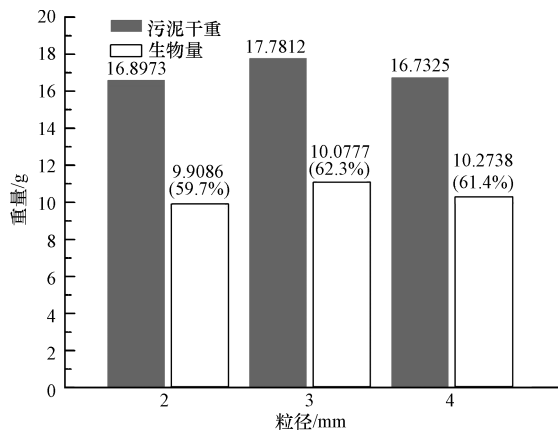


图 10 不同粒径下的污泥干重及生物量

Fig.10 Sludge dry weight and biomass under different particle sizes

言,粒径为 2 mm 和 4 mm 时的污泥量及生物量都有所偏低,特别是粒径为 4 mm 时,污泥干重最低,这与图 9 中 3 种不同滤料 COD 的去除效率变化一致.但值得注意的是,对比 3 种滤料中生物量所占的比重可知,颗粒粒径为 4 mm 时,虽然污泥干重较低,但相对于 2 mm 粒径的颗粒,生物量所占的比重相对较大.分析原因是当粒径为 4 mm 时,气水混合较为充分,反应器内溶解氧含量较高,有利于微生物的生长.当粒径为 2 mm 时,氧传质较差,微生物的生长相对较差.通过污泥灼烧及干燥实验分析可知,对于尺寸差距较小的 3 种滤料,当粒径为 3 mm 时,反应器内污泥内生物量相对较多.

3.2.3 挂膜启动过程中污泥微观结构的变化 当挂膜成功后,出水水质达标,去除效率维持稳定.图 11 为在挂膜启动 3 个不同阶段生物显微镜下观察到的微生物,分别对应系统运行第 5 d、第 15 d 和第 22 d 的生物膜微观形态.可以看出,在挂膜启动初期,主要是大量的细小细菌,这些细小细菌参与氨化反应、硝化反应和反硝化反应等.起初看不到原生动物,随着挂膜实验的不断进行,出水水质逐渐达标,会出现大型的带有纤毛的微生物,包括草履虫、太阳虫在内的原生动物等,同时也能看到一定的污泥结构.

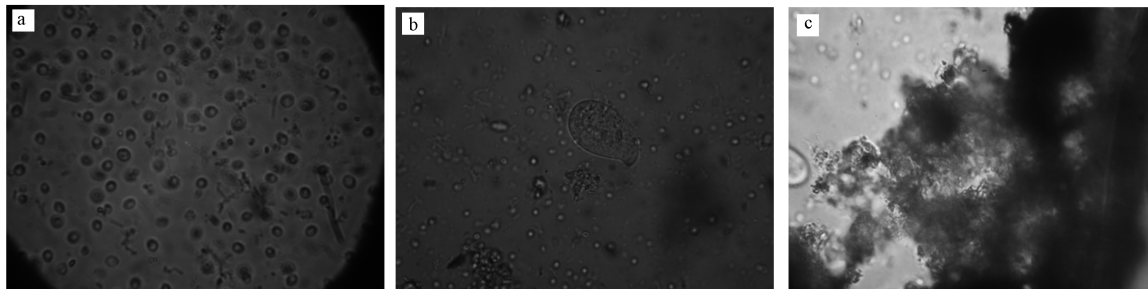


图 11 生物显微镜下微生物变化(a.第 5 天,b.第 15 天,c.第 22 天)

Fig.11 Changes of microbes under biological microscope(a.5th day,b.15th day,c.22nd day)

4 结论 (Conclusions)

1) 滤料粒径是影响曝气生物滤池 (BAF) 去除效果的重要因素,本文分别从数值模拟和实验两方面探究粒径的影响机理.通过模拟和实验研究的耦合分析发现,当滤料粒径为 3 mm 时,BAF 小尺度下流场形态最有利于氧传质的进行和生物膜的生长,挂膜启动实验也验证了该粒径下挂膜速度最快.

2) 对不同粒径下 BAF 小尺度下流场形态进行数值模拟的结果显示,当滤料粒径为 2 mm 时,流线

平缓,进出口压降较小,湍流运动不剧烈,不利于气水混合;粒径为 4 mm 时,流场内形成了较大的漩涡结构,湍流强度较大,容易引起生物膜的脱落,进出口压降较大,存在较大的能量损失;粒径为 3 mm 时,流场内出现了数量较多、尺寸均匀的漩涡,这些结构适中的漩涡既有利于气水混合、加快氧传质的进行,又能保证生物膜的稳定附着.

3) 对不同粒径在相同运行条件下挂膜启动实验研究验证了数值模拟的正确性,当粒径为 3 mm 时,系统运行最为稳定,挂膜速度最快,在系统运行

16 d时就达到了较好的 COD 去除效率,特别是在连续进水阶段,相对于其他粒径的滤料,具有较好的 COD 去除效果.当粒径为 2 mm 时,在间歇进水阶段 COD 去除效果最好,可能是较小的粒径具有较大的比表面积,在水里停留时间较大时,能进行有效的机械截流作用.当粒径为 4 mm 时,系统运行稳定性较差.同时,对 3 种粒径挂膜启动后的生物量进行对比分析,结果发现,与挂膜启动过程中 COD 去除效率的变化相一致,粒径为 3 mm 时污泥内生物量最高,且所占比例最高,与曝气生物滤池小尺度下流场形态的数值模拟分析结果相一致.

责任作者简介:王丽(1966—),女,副教授,主要从事污水深度处理与资源化回用,雨水回收,微生物燃料电池,放射性污染控制,环境与能源风险管理与评价. E-mail: Liwanghit@126.com.

参考文献(References):

- 程文,宋策,周孝德. 2001.曝气池中气液两相流的数值模拟与实验研究[J].水利学报,(12): 32-35
- Fayolle Y, Cockx A, Gillot S, *et al.* 2007. Oxygen transfer prediction in aeration tanks using CFD [J]. *Chemical Engineering Science*, 62 (24): 7163-7171
- Feng Y, Yu Y Z, Duan Q N, *et al.* 2010. The characteristic research of ammonium removal in grain-slag biological aerated filter (BAF) [J]. *Desalination*, 263(1/3): 146-150
- 高杨. 2011. 基于数值计算的曝气池运行工况研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学
- Gresch M, Armbruster M, Braun D, *et al.* 2011. Effects of aeration patterns on the flow field in wastewater aeration tanks [J]. *Water Research*, 45 (2): 810-818
- Leung S M, Little J C, Holst T, *et al.* 2006. Air/water oxygen transfer in a biological aerated filter [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 132(2): 181-189
- 李迎全. 2012. 曝气生物滤池运行过程中影响因素的研究[D]. 长春: 吉林大学
- Moore R, Quarmby J, Stephenson T. 2001. The effects of media size on the performance of biological aerated filters [J]. *Water Research*, 35 (10): 2514-2522
- Puznava N, Payraudeau M, Thornberg D. 2000. Simultaneous nitrification and denitrification in biofilters with real time aeration control [J]. *Water Science & Technology*, 43(1): 269-276
- 邱珊. 2010. 曝气生物滤池处理城市生活污水的特性研究及工艺改良 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学
- 韦彦斐, 张刚, 周童, 等. 2011. 水力负荷和 HRT 对前置反硝化 BAF 工艺的影响 [J]. *中国给水排水*, 27(3): 94-97
- 杨春娣, 马腾, 程文. 2010. BAF 中多相流运动与处理效能关系的研究 [J]. *环境科学与技术*, 33(1): 27-30