

多孔介质孔隙率对气液两相流场的影响

陈军强¹, 孙三祥^{1,2}, 张占东¹, 邵振宇¹

(1.兰州交通大学 环境与市政工程学院, 兰州 730070;

2.寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 兰州 730070)

摘要: 基于 Ansys/Fluent 软件对速分球曝气生物滤池内一组速分球的气液两相流动进行三维数值模拟, 模拟采用双流体的 Mixture 模型和多孔介质的渗流模型。模拟获得速分球生物滤池系统中速分球内基质的不同孔隙率对速分流场的影响, 以及渗流对基质内部流场的影响。根据模拟结果对比分析基于渗流理论的不同孔隙率的多孔介质对气液两相速分流场速度场的影响, 以确定最适合微生物生长的基质孔隙率。研究表明, 速分球基质孔隙率为 0.6 时, 最适合生物膜的生长。

关键词: 渗流理论; 多孔介质; 孔隙率; 气液两相流; 数值模拟

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-2455(2018)01-0049-06

Influence of porosity of porous media on gas-liquid two phase flow field

CHEN Jun-qiang¹, SUN San-xiang^{1,2}, ZHANG Zhan-dong¹, SHAO Zhen-yu¹

(1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.Engineering Research Center of Water Resource Utilization in Cold and Drought region of Ministry of Education, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on Ansys/Fluent software, three-dimensional numerical simulation of gas-liquid two phase flow in a group of velocity discrete spheres in biological aerated filter was carried out. The Mixture model of two-fluid and the seepage model of porous media were adopted. The influence of different porosity of the matrix in the velocity discrete biofilter on the velocity discrete flow field and the influence of seepage on the internal flow field of the matrix were determined through the simulation. According to the simulation results, the influence of porous media with different porosity based on seepage theory on the velocity field of the gas-liquid two phase velocity discrete flow field were compared and analyzed to determine the porosity of the matrix which is most suitable for microbial growth. The results of the study showed that, porosity of the velocity discrete sphere was selected to be 0.6, for it is the most suitable value for the biofilm growth.

Keywords: seepage theory; porous media; porosity; gas-liquid phase flow; numerical simulation

生物膜法是与活性污泥法平行发展的一种污水处理技术方法^[1-3], 生物膜法在处理工业废水中有着广泛应用。生物膜作为一种多孔介质, 结构复杂, 孔隙与通道互相交错^[4], 主流体在流经生物膜表面的同时也向膜内部不断渗透, 流体在多孔介质内的迁移过程相当于多孔介质内的渗流过程。基于渗流理论的影响因素, 其中孔隙率的大小对多孔介质渗流传质的影响较大, 并对外部水流有一定的影响。

实际流体在管道内流动时, 由于壁面摩擦阻力

不均和过流断面复杂多变等因素, 造成同一过流断面上速度分布的不均等现象, 而水中颗粒悬浮物总是存在着由速度大的流团向速度小的流团自发迁移聚集的过程, 这就是速分现象。将速分技术与曝气生物滤池结合的典型工艺就是速分球生物滤池。微生物在速分球包裹的火山岩填料表面附着生长, 当污水流经速分球时, 由于速分球内部阻力大, 流速慢, 围绕速分球形成低速流团; 而速分球外部流道相对开放, 阻力较小, 形成高速流团。原水中的悬

浮有机物和胶体便会由高速流团向速分球周围及内部迁移聚集,并最终通过物理吸附截留和微生物代谢实现去除^[5-7]。由于速分流场的均匀性和稳定性对生物膜的生长有较大的影响,且水流对填料表面的生物膜存在剪切力,对生物膜的生长也有一定的影响,故研究多孔介质不同孔隙率对速分流场的稳定性和均匀性的影响具有较大的意义。

随着计算流体力学的发展,越来越多的学者采用数值模拟的方法对生物滤池进行研究^[8-12]。本研究以工程实际应用的速分球模型为基础,利用 Ansys/Fluent 软件进行模拟。速分球流场采用双流体 Mixture 模型结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,基质内部流场采用双流体 Mixture 模型结合 Porous Media 模型。对速分球气、液两相流场进行三维数值模拟^[13-16],分析其流场特性及速度场的分布规律,确定最适合微生物生长的基质孔隙率,为速分球的设计提供参考。

1 数学模型的建立

在确定主控方程之前,先作如下假设:

(1) 生物膜与基质内部由连续统一的多孔介质组成,内部阻力各向同性,沿各个方向的阻力系数相等;

(2) 多孔介质的扩散满足 Fick 定律;

(3) 流体在多孔介质中的流动满足达西定律;

(4) 计算中的速度和压力均较低,两相都可以看作是不可压缩流体,且忽略表面张力作用;

(5) 将速分球基质外部流场视为湍流流动,多孔介质内部视为层流流动;外部流动与多孔介质中的流动均视为不可压缩流体的稳态流动;

(6) 假设生物膜结构是刚性稳定的,生物膜厚度维持恒定^[17-20]。

1.1 双流体 Mixture 模型

双流体 Mixture 模型控制方程可在单相流控制方程的基础上采用集平均方法推导^[21]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{q=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

式中: t 为时间; n 为相数; α_q 、 ρ_q 和 \vec{v}_q 分别为 q 相的体积分数、密度和速度; \dot{m}_{pq} 为 p 相到 q 相的质量传递。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \overline{\tau} +$$

$$\sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{um,q}) \quad (2)$$

式中: p 为所有相共享的压力; \vec{R}_{pq} 为相间相互作用力; \vec{F}_q 为外部体积力; $\vec{F}_{lift,q}$ 为升力; $\vec{F}_{um,q}$ 为虚拟质量力; \vec{v}_{pq} 为 p 相相对于 q 相的速度; $\overline{\tau}$ 为第 q 相的压力应变张量。

利用标准的 $k-\varepsilon$ 方程模拟流体的湍流, $k-\varepsilon$ 方程由湍流动能(k)输运方程和湍流扩散(ε)输运方程组成。

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: u_i 是速度在 i 方向上的分量; ρ 为流体密度; μ 为分子运动粘度; G_k 是因平均梯度影响湍动能 k 的产生相; G_b 为由浮力作用引起的紊动能产生相; Y_M 为可压缩的湍流脉动因膨胀而产生的对总耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的 Prandtl 数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$; μ_t 为湍动粘度, 它可表示为 k 和 ε 的函数: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, 经验常数 $C_\mu = 0.09$ 。

1.2 多孔介质渗流模型

流体在空隙中流动时,必然要有能量的损失,达西公式表述压力梯度与平均流速的关系:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu}{k} v \quad (5)$$

式中: dp/dx 为压力梯度; v 为通过多孔体的平均流速; μ 为流体粘度; k 为多孔介质的渗透率,可按下式计算^[22]:

$$k = f(\varepsilon) d_{ch}^2 / C \quad (6)$$

式中: $f(\varepsilon)$ 为孔隙率 ε 的函数; d_{ch} 为多孔材料的特征尺寸,视材料的结构类型确定,本研究特征尺寸为速分球基质的直径; C 为常数,也与材料类型有关。

多相流的多孔介质模型使用多孔制剂表面速度作为默认值, 在欧拉多相模型中多孔制剂表面速度通常提供通过多孔区域的体压力损失。然而, 由于多孔区域内的表观速度值保持与多孔区域外的表观速度值相同, 其不能预测多孔区域中的速度增加, 因此限制了模型的准确性。故多孔介质通过将动量源项添加到标准流体流动方程来建立数学模型, 源项由粘性损耗项和惯性损耗项两部分组成:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (7)$$

式中: S_i 为 i 轴(x , y 或 z)动量方程的源项; v 是速度的大小; v_i 是 x , y , z 方向上的速度分量; α 为磁导率, $1/\alpha$ 表示粘性阻力因子; C_2 为惯性阻力因子。

多相多孔介质使用物理速度多孔配方模拟多孔介质多相流, 以解决整个流场(包括多孔和无孔区域)的真实或物理速度场。在这种方法中, 假设 q 相中的一般标量为 ϕ_q , 在各向同性多孔介质中的控制方程采取以下形式:

$$\frac{\partial(\varepsilon \alpha_q \rho_q \phi_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \alpha_q \rho_q \vec{v}_q \phi_q) = \nabla \cdot (\varepsilon \Gamma_q \nabla \phi_q) + \varepsilon S_{\phi,q} \quad (8)$$

式中: ε 为多孔介质的孔隙率; ρ_q 为相密度; α_q 为体积分数; t 为时间; \vec{v}_q 为相位速度矢量; $S_{\phi,q}$ 为源项; Γ_q 为扩散系数。

2 数值模拟

2.1 计算物理模型

以实际尺寸建立速分球三维几何模型, 速分球为直径 20 mm 的火山岩滤料, 共计 36 个, 均匀装填到直径为 150 mm 的塑料球壳中, 塑料球壳表面有均匀分布的方孔。模型断面如图 1 所示, 速分球填充分布如图 2 所示。

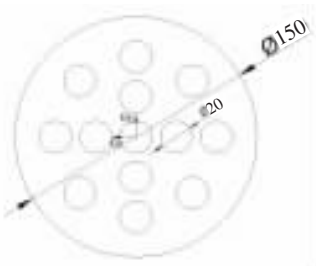


图 1 $x = 0$ 平面速分球分布截面

Fig. 1 $x = 0$ plane velocity discrete spheres distribution section diagram

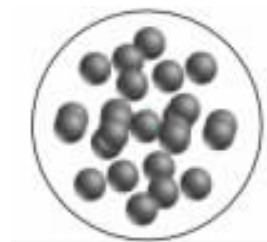


图 2 速分球三维分布

Fig. 2 Three dimensional distribution of velocity discrete spheres

2.2 网格划分

利用 Gambit 绘制计算网格, 采用非结构化网格, 网格由四面体网格元素组成。由于速分球内多孔介质部分流动复杂, 为保证计算的精度, 对其网格加密处理。计算模型的网格总数为 741 469 个, 由 2 个网格区域组成, 分别是速分球外部 fluid 区域和速分球内部 porous 区域。已进行了网格无关性检测, 确保模拟结果与网格数量无关。部分网格如图 3 所示。

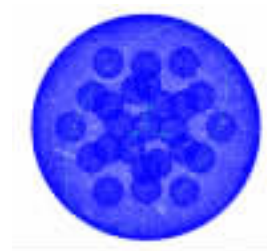


图 3 模型部分网格划分

Fig. 3 Partial meshing of the model

2.3 边界条件及求解方法

入口边界条件: 用平面 $x = 0$ 分割模型, 将 x 轴负方向的半球面设置为速度入口边界, 液相入口速度 $v_i = 0.1$ m/s, 气相入口速度 $v_j = 1$ m/s, 气相的体积分数为 0.3。

出口边界条件: 将 x 轴正方向的半球面设置为自由出流边界。

采用多相流混合 (Mixture) 模型结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Porous Media 模型, 多孔介质模型设置相应的粘性阻力 $1/\alpha$ 、惯性阻力 C_2 和孔隙率 ε , 孔隙率 ε 分别设置为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9。采用基于速度-压力耦合的稳态 SIMPLE 算法, 同时为提高计算精度, 离散格式采用二阶迎风格式。

3. 结果与讨论

3.1 速分球流场的流动特性分析

用平面 $x = -0.03$ 、 $x = 0$ 、 $x = 0.03$ 、 $x = 0.06$ 及

$z=0$ 截取速分球速度云图, 截面示意图 4 和图 5。

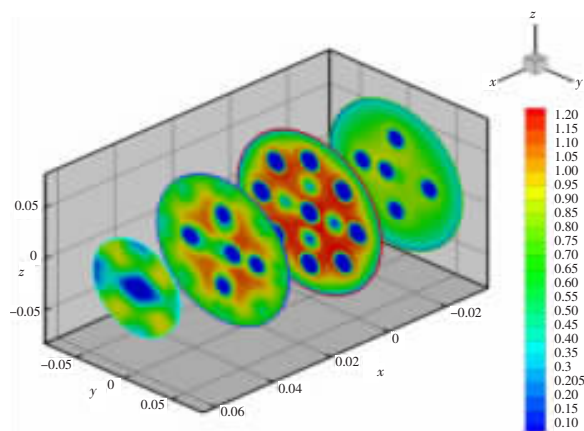


图 4 $x = -0.03$ 、 $x = 0$ 、 $x = 0.03$ 、 $x = 0.06$ 截面速度示意
Fig. 4 Velocity of section $x = -0.03$, $x = 0$, $x = 0.03$ and $x = 0.06$

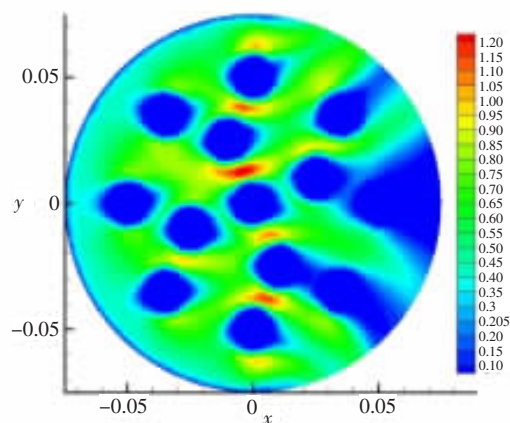


图 5 $z = 0$ 截面速度示意
Fig. 5 Velocity of section $z = 0$

由图 4、图 5 可知:

(1) 相邻基质之间的速度较其他位置的大, 且基质间距越小, 速度越大。这类似于“狭管效应”, 且空隙区域紊动剧烈。

(2) 由于 $x=0$ 截面的面积最大, 同时其填充的基质也最紧密, 基质间的间距也相对较小, 其截面速度相对于其他截面速度较大。

(3) 球场内速度场沿入口速度方向整体呈现先增加后衰减的趋势, 在 $x=0$ 截面速度场分布趋于最大。其总体呈现出外部速度小, 内部速度大的趋势, 特别是在基质间隙的位置, 速度最大。

(4) $x = -0.03$ 与 $x = 0.03$ 截面基质分布相似, 由于 $x = 0$ 截面的“狭管效应”明显, 导致流速迅速增加, 其后虽然有衰减, 但 $x = 0.03$ 截面的平均速度较 $x = -0.03$ 截面的平均速度依然大, 且基质间隙的速

度差距明显。

(5) 由于速分球基质和生物膜孔隙率的存在, 受渗流的影响, 流动方向上基质附近的速度有明显的变化。

(6) $z=0$ 截面为速度流动方向上的截面图, 基质沿流动方向上的速度变化较为明显。 $x < 0$ 的部分速度场在基质的周围分布均匀; $x = 0$ 左右相邻基质之间的速度场变化剧烈, 紊动达到最强; $x > 0$ 的部分, 速度分布在基质的反侧呈扇状形态, 基质阻碍了流动, 导致经过基质的流动呈扇状扩散。

用平面 $z = 0$ 截取速分球速度矢量图和某一基质内部的速度矢量图。截面示意图 6 和图 7。

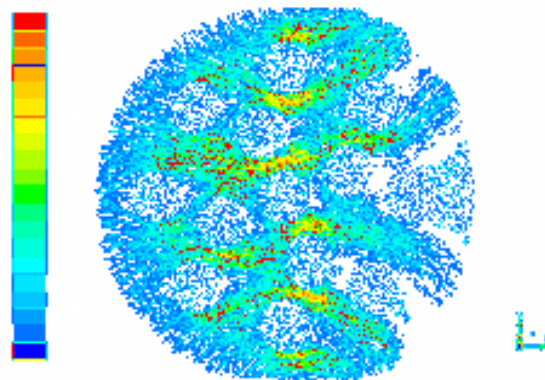


图 6 $z = 0$ 截面速度矢量示意
Fig. 6 Velocity vector of section $z = 0$

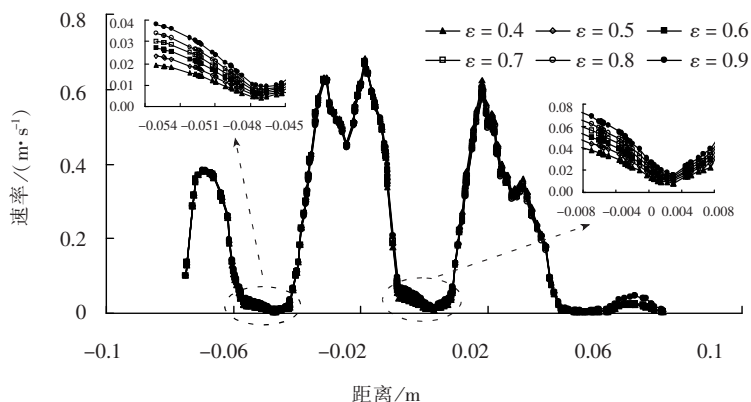


图 7 $z = 0$ 截面基质内部速度矢量示意
Fig. 7 Inside velocity vector of matrix in section $z = 0$

从图 6、图 7 可知: 基质内部速度场并不是一直沿外部总流动方向分布的, 而是由平行于外部流动方向的两侧流入, 从垂直于外部流动方向的两侧流出。且基质内部沿外部流动正方向的流速较大, 反方向的流速相对较小, 球心附近的速度趋于最小。

3.2 不同孔隙率条件下速分球流场的速度场分析

直线 $z = 0$, $y = 0$ 方向上流场的速度分布曲线如图 8 所示。

图 8 直线 $z = 0$, $y = 0$ 方向上流场的速度分布曲线Fig. 8 Velocity distribution curves of the flow field in the direction of straight line $z = 0$, $y = 0$

从图 8 可知:

(1) 流场在流经第一个基质之前, 速度分布几乎不受基质孔隙率大小的影响, 其分布规律大体一致。

(2) 流体进入流场后, 流速先迅速增大, 在 $x = -0.07$ 处达到第一个峰值。紧接着迅速减小, 直到碰到第一个基质。基质内部速度的变化呈现出先减小后增大的趋势, 且在圆心稍偏右处速度达到最小值, 比速度最大值小了约两个数量级。这是由基质内部的流场分布决定的, 基质内部流动是由平行于外部流动方向的两侧流入, 从垂直于外部流动方向的两侧流出, 所以圆心附近的流速较小。

(3) 基质内部的速度场分布受孔隙率的影响较大, 基质孔隙率越大, 其内部渗流速度也越大。

(4) 相邻两基质之间的速度分布总体呈现出先增大后减小的趋势, 在峰值处的速度值随基质孔隙率的增加而减小。基质孔隙率 $\varepsilon = 0.4 \sim 0.8$ 之间时速度峰值差较小, $\varepsilon = 0.8 \sim 0.9$ 时速度峰值差较 $\varepsilon = 0.4 \sim 0.8$ 之间时速度峰值差变化显著。

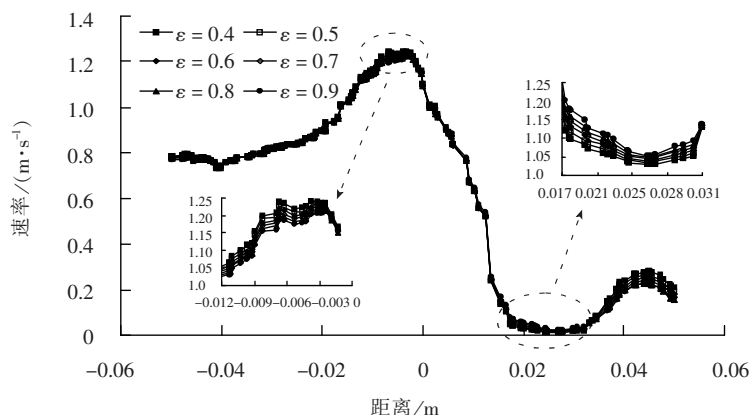
(5) $x = 0.02$ 处为相邻两基质间的中心位置, 紊动最剧烈, 速度达到峰值, 紧接着速度分布呈间断性衰减。 $\varepsilon = 0.4 \sim 0.8$ 之间的速度分布随着孔隙率的增加而减小, $\varepsilon = 0.9$ 处的速度为 $0.6 \sim 0.7$ m/s。

(6) 在速分球出口位置, 速度分布随着孔隙率的增加而减小, 且 $\varepsilon = 0.9$ 的速度较 $\varepsilon = 0.6 \sim 0.8$ 的速度有较明显的增加。可以看出, $\varepsilon = 0.9$ 时速度场变化不规律、不均匀, $\varepsilon = 0.4 \sim 0.5$ 时相邻基质之间的流场流速较大, 紊动剧烈, $\varepsilon = 0.7 \sim 0.8$ 时相邻基质之间的流场流速过小, 均不适宜生物膜的生长, 故基质孔隙率选 $\varepsilon = 0.6$ 时较为适宜。

直线 $z = 0$, $y = 0.0125$ 方向上流场的速度分布曲线见图 9。

由于直线经过的流场只有一个基质, 且直线经过的大多为相邻基质的中间位置, 故直线方向上的速度分布规律能很好反映不同基质孔隙率对流场的影响。由图 9 可以看出:

(1) 流体在速分球界面上受基质孔隙率的影响

图 9 直线 $z = 0$, $y = 0$ 方向上流场的速度分布曲线Fig. 9 Velocity distribution curves of the flow field in the direction of straight line $z = 0$, $y = 0.0125$

其速度分布有波动,孔隙率越大,速度相对较小。

(2) 流体进入流场之后,受到相邻两基质间“狭管效应”的影响,速度逐渐增加,在 $x = -0.02$ 之前速度分布几乎不随孔隙率的变化而变化。

(3) $x = -0.02$ 之后速度的分布受孔隙率的影响开始产生波动,孔隙率增加其速度反而减小,随着距离的推进,速度不断增加,不同孔隙率条件下的速度差距也越来越大。

(4) $x = -0.0025$ 附近速度达到最大值,此位置相邻两基质之间的紊动最为激烈,基质孔隙率越大,其速度峰值越小。速度过大时容易冲击附着在基质上的生物膜使其脱落,速度过小时营养物质供应不足导致生物膜生长过于缓慢,影响出水水质。故综合考虑孔隙率选 $\varepsilon = 0.6$ 时较为适宜。

(5) 达到峰值之后速度开始迅速减小,在流体流经基质之前流场的速度分布几乎不受孔隙率的影响。

(6) $x = 0.035$ 之后流体进入基质后方的扇状区域,在相邻基质之间速度先迅速增加,然后在扇状区域速度迅速减小。扇状区域的速度分布受基质孔隙率的影响,基质孔隙率越大,其速度越小。

4 结论

(1) 相邻基质间的区域速度较其他区域的大,且受基质孔隙率的影响,基质孔隙率越大,其速度峰值越小。速度过大、过小都不利于生物膜的生长,影响出水水质。综合考虑基质孔隙率选 0.6 时较为适宜。

(2) 基质内部受渗流影响,孔隙率越大,内部速度也越大。且内部的流动方向为平行于流场总流动方向两侧流入,垂直于流场总流动方向两侧流出。

(3) 速分球的速度场沿着总流动方向呈现出先增加后衰减的趋势,其总体呈现出外圈流场速度小,内圈速度大的趋势,由外向内逐渐增加。

(4) 基质不同孔隙率对相邻两基质间的流场、基质内部的流场和速分球出口处的流场均有一定的影响,对之外的流场影响不显著。

参考文献:

- [1] 张自杰,林荣忱,顾夏声.排水工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 冯晓西.精细化工废水处理技术[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [3] 魏文礼,李盼盼,白朝伟,等.曝气池内气液混合液两相流力学特性的数值模拟[J].水资源与水工程学报,2015,26(6):

127-131.

- [4] PEREIVAL LETAL. Biofilm development on stainless steel in mains[J]. Wat Wat Res, 1996, 32(1): 243-253.
- [5] 郭治东,王三反.速分技术在中水处理中的应用[J].给水排水,2001,26(10): 94-98.
- [6] 时玉龙,王三反,陈霞.速分球生物滤柱处理低 C/N 比废水脱氮除磷研究[J].环境科学与技术,2012,35(11): 131-134.
- [7] 王云飞.流离生物床法处理废水的无污泥特性试验与应用[J].上海环境科学,2001,20(5): 231-232+255.
- [8] ACHOURI R, MOKNI I, MHIRI H, et al. A 3D CFD simulation of a self-inducing Pitched Blade Turbine Downflow[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64(12): 633-641.
- [9] YANG N, WU Z Y, CHEN J H, et al. Multiscale analysis of gas-liquid interaction and CFD simulation of gas-liquid flow in bubble columns[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(14): 3212-3222.
- [10] 王树立,张敏卿,范敏英.鼓泡塔内气液两相流速度分布[J].抚顺石油学院学报,1997,17(3): 29-32.
- [11] 肖柏青,张法星,戎贵文.气泡尺寸对曝气池内气液两相流数值模拟的影响[J].中国环境科学,2012,32(11): 2006-2010.
- [12] 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.
- [13] 肖浩飞.曝气池内气液两相流 CFD 数值模拟[D].上海:东华大学,2010.
- [14] 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,2007,18(2): 69-71.
- [15] 程文,宋策,周孝德.曝气池中气液两相流的数值模拟与实验研究[J].水利学报,2001,45(12): 32-35.
- [16] 焦妍.基于渗流理论的生物膜传质模拟及实验研究[D].大连:大连理工大学,2011.
- [17] NOGUERA D R, OKABE S, PICIOREANU C. Biofilmmodeling: Present status and future directions[J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(7): 273-278.
- [18] WANNER O, REIEHERT P. Mathematical modeling of mixed-culture biofilms[J]. Biotechnol Bioeng, 1996, 49(2): 172-184.
- [19] 吴莹莹.氧化沟流场和溶解氧 CFD 模拟研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [20] 张土乔,尹则高,毛根海.弯曲圆形管道紊流的数值模拟[J].水力发电学报,2005,24(3): 61-65.
- [21] VAN BATEN J M, KRISHNA R. CFD simulation of a bubble column operating in homogeneous and heterogeneous flow regimes[J]. ChemEng Tech, 2002, 25(11): 1081-1086.
- [22] 吕兆华.泡沫型多孔介质中非达西流动特性的研究[J].工程力学,1998,15(2): 57-64.

作者简介:陈军强(1994-),男,甘肃兰州人,硕士研究生,研究方向为环境流体力学,(电子信箱)gentlemanchenjq@163.com.

收稿日期:2017-10-19(修回稿)