

粒径对生物滞留池流场及生物膜形态的影响

王进喜¹, 王亚军², 周玉青¹

(1. 兰州文理学院 化工学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: [目的] 分析填料粒径对生物滞留池(BRC)渗透性能及微生物膜形态的作用机理,以期优选出适合生物滞留池填料层的颗粒粒径及相应填充的孔隙率。[方法] 采用数值模拟和试验实测相结合的方法,利用Fluent软件对BRC小尺度计算区域内的流场形态进行模拟,对6种粒径(0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 mm)下的流线图、压力分布及变化图进行综合对比分析。为验证模拟结果的正确性,对不同颗粒粒径进行生物膜培养和运行,测定颗粒表面生物膜厚度。[结果] 平均粒径为0.5~1.0 mm时流场形态最好,可形成结构合理数量较多的小涡流,有利于水流渗透及物质传递的进行,实测生物膜也表明粒径为1.0 mm时,微生物膜生长最为均匀且生物量最大。[结论] 填料的粒径会影响BRC的运行效果,数值模拟可为实际粒径的选取提供参考。

关键词: 生物滞留池; 小尺度流场模拟; 试验验证; 生物膜形态

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)05-0134-07

中图分类号: X502, X703

文献参数: 王进喜, 王亚军, 周玉青. 粒径对生物滞留池流场及生物膜形态的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 134-140. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 20200927. 002; Wang Jinxi, Wang Yajun, Zhou Yuqin. Effect of particle sizes on flow fields and biofilm morphological structures in bioretention cells [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 134-140.

Effect of Particle Sizes on Flow Fields and Biofilm Morphological Structures in Bioretention Cells

Wang Jinxi¹, Wang Yajun², Zhou Yuqin¹

(1. School of Chemical Engineering, Lanzhou University of Arts and Science, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: [Objective] The effect mechanism of packing particle sizes on the permeability of bioretention cells (BRC) and biofilm patterns was analyzed in order to optimize the particle size and corresponding filling porosity of the BRC packing layer. [Methods] By numerical simulation and experimental measurement methods, fluent software was employed to simulate and analyze the flow field pattern of BRC in the small-scale calculation zone. The streamline diagram, pressure distribution, and change diagram for six different sizes of granule particles (0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, and 8.0 mm) were comprehensively compared. In order to verify the correctness of the simulation results, biofilms with different particle sizes were cultured and operated. The thickness of the biofilm on the particle surface was measured. [Results] When the average particle sizes were 0.5—1.0 mm, the flow field pattern was the best and a smaller eddy current with reasonable structure could be formed. This flow field was the most conducive to water infiltration and material transfer. The measured thickness of the biofilm also showed that when the particle size was 1.0 mm, the growth of the biofilm was the most uniform and the biomass was the largest. [Conclusion] The packing particle size will affect the operation effects of the BRC, and the numerical simulation can provide a reference selection of

收稿日期: 2020-05-25

修回日期: 2020-07-03

资助项目: 甘肃省陇原青年创新创业人才项目(2020RCXM205); 国家自然科学基金项目“生物滞留系统对城市污水厂尾水中典型抗生素的去除及其强化机制”(41967043); 兰州文理学院2020年度省级“大学生创新创业训练计划”项目(S202011562033)

第一作者: 王进喜(1981—), 女(汉族), 甘肃省会宁县人, 硕士, 副教授, 主要从事水处理药剂的研发和生物滞留池的改进。Email: wjxwjx1999@163.com.

actual particle sizes in the BRC.

Keywords: bioretention cells; flow field simulation; experimental verification; biofilm morphological structure

近 20 a 来,生物滞留池(bioretention cell, BRC)的相关理论和研究一直是国内外科研人员关注的热点,而研究内容主要集中在技术改进和影响 BRC 工作运行的各种因素上^[1-4]。填料作为 BRC 的核心,能够影响 BRC 的处理效能,但针对 BRC 的填料粒径和孔隙率的相应研究较少。在实际工程应用中,孔隙率的分布受到各种因素的综合影响(如流速、壁面效应、粒径大小、颗粒堆积方式等)。生物滞留池^[5-6]的填料层装填过程中填料粒径的选取和孔隙率分布非常重要,填料层孔隙率分布关系到整个填料层液体渗透性能和气(氧气)—固(颗粒表层微生物)之间传质和传热的效果。

计算流体动力学可用来模拟多孔介质空间流场^[7-8],可利用其对 BRC 运行时的流场形态进行数值模拟,再结合试验实测进行验证。鉴于以往的研究多是对 BRC 整体流场的宏观模拟^[9],实际并不利于机理分析,本研究采用 Fluent 软件对小尺度计算区域进行模拟,研究粒径和孔隙率对 BRC 流场形态产生影响的原因,以期更准确掌握 BRC 的流态规律,结合生物膜形态实测,最终优选出适合生物滞留池填料层的颗粒粒径及相应填充的孔隙率,同时也为生物滞留池中填料粒径级配的优选提供一种新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 流场模拟方法

将 Fluent 软件中的多孔介质模型用于 BRC 内部流场的模拟分析。公式(1)是动量方程式,添加 S_i 是附加动量损失源项,以此为基础构建多孔介质模型^[10]。 S_i 由两部分组成:一部分为黏性阻力损失源项,另一部分为内部阻力损失源项(惯性损失项),分别为式(2)中等号右边第一项和第二项。

$$\rho_v \cdot \nabla v = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu \nabla v + (\nabla v)^T] + S_i \quad (1)$$

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^{\xi} D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^{\xi} C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_j\right) \quad (2)$$

式中: ρ 为液体密度(kg/m^3); v 为速度矢量(m/s); p 为静压(Pa); μ 为动力黏性系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

假设填料为直径和孔隙率均匀的各向同性多孔介质,则可以简单的把 D 和 C 分别取代为对角阵 $1/\alpha$ 和 C_2 ,则动量损失源项 S_i 转变为:

$$S_i = -\left(\sum_{i=1}^{\xi} \frac{\mu}{\alpha} v_i + \sum_{i=1}^{\xi} C_2 \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_i\right) \quad (3)$$

式中: $1/\alpha$ 为黏性阻力系数(m^{-2}); C_2 为惯性阻力系数(m^{-1})。

对于在很大范围的 Reynolds 数和多种填充物, $1/\alpha$ 和 C_2 可以表示成:

$$1/\alpha = \frac{150}{d_p^2} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{d_p} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (5)$$

式中: d_p 为填料基质的平均粒径(mm); ϵ 为基质的孔隙率(无量纲)。

小尺度计算区域从 BRC 均质填料基质中任意选取一个区域,此区域由 5 个粒径相同的颗粒构建出结构空间。该二维模型的计算网格文件由 Gambit 2.2.30 生成,由于结构相对复杂,网格划分采用三角形,并指定进出口、内部单元区域和内部表面边界的类型。其中:进口采用速度进口边界条件;出口采用压力出口边界条件;四周采用壁面边界条件^[11]。

在建模时,假设多孔介质可以视为一种均匀弥散结构,各向同性,进口速度均匀分布且水流作定常流动;假设整个流动过程为等温过程;采用绝热壁面,不考虑热传递的影响。选用基于压力的二维定常解算器(Fluent, Version 6.3.26),采用二阶精度的迎风格式进行离散插值。当连续性方程、动量方程中变量的残差均在 10^{-4} 以下,且不随计算发生改变时,认为计算收敛。模型几何参数为:,计算域的宽度 L (等于高度 H , mm)由公式(6)得出,孔隙率 ϵ (mm)由公式(7)得出,Fluent 模拟参数见表 1。

$$\frac{(2r+d)}{\sqrt{2}} + r < \frac{L}{2} \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{L \times L \times d_p - \frac{4}{3} \pi r^3 \times 5}{L \times L \times d_p} \quad (7)$$

式中: r 为填料基质的平均半径(mm); L 为计算域的宽度(mm)。

1.2 试验验证

通过试验测定上、中、下层不同粒径填料表层的生物膜形态和厚度变化,进行对比分析,以验证数值模拟是否准确。

1.2.1 试验时间 利用 Fluent 软件模拟出颗粒粒径对流场的影响结果后,2018 年 8 月至 2019 年 1 月生物滞留池稳定运行后进行生物膜实测试验。

表 1 颗粒模型模拟相关参数

项目	BRC-1	BRC-2	BRC-3	BRC-4	BRC-5	BRC-6
颗粒数	5	5	5	5	5	5
颗粒直径(d_p)/mm	0.5	1	2	4	6	8
孔隙率(ϵ)/%	61.30	61.29	62.74	62.03	62.27	62.38
颗粒间距离(孔喉 d)/mm	0.0775	0.155	0.31	0.62	0.93	1.24
计算域(高度 $H \times$ 宽度 L)/mm \times mm	1.3 \times 1.3	2.6 \times 2.6	5.3 \times 5.3	10.5 \times 10.5	15.8 \times 15.8	21.1 \times 21.1
进水流速(v)/(m \cdot s $^{-1}$)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

1.2.2 试验装置 生物滞留池反应器由有机玻璃制成,反应器总高度 800 mm,内径 80 mm。上部均匀进水,底部出水,装置内填料由河砂和砾石组成,装填比例按照澳大利亚 FAWB 标准指导方法^[12],分别为上部的过滤层(清洗后砂粒,粒径 0.15~1.00 mm,高度 300 mm)、中部的过渡层(清洗后砂粒,粒径 0.50~1.00 mm,高度 100 mm)、中下部的淹没层(清洗后砂粒,粒径 0.25~0.50 mm,高度 200 mm)和下部的排水层(清洗砾石,粒径 3~5 mm,高度 100 mm),填充高度为 700 mm。反应器在各层设一个取样口,共 4 个取样口。采用恒流泵(Longer Pump BT100-2 J)保持装置进水。

1.2.3 运行方式 本研究采用下流式生物滞留池反应器(BRC 反应器),模拟典型生活污水排放规律,人工配水分 3 个时间段(8:00,16:00,20:00)间歇从 BRC 反应器上部均匀布水供给。水力负荷 1.0 m³/(m²·d)和 1/8 进水/反应时间运行周期,第 180 d 分别观察不同层颗粒表层生物膜变化。

1.2.4 试验水质 本试验采用人工配水模拟实际生活污水,自来水放置 1 d 以去除余氯,配水组成(g/100 L):C₆H₁₂O₆(22.49);NH₄Cl(22.24);K₂HPO₄(2.18);NaHCO₃(8.73);FeCl₂·H₂O(4.82);CoCl₂·6H₂O(0.39);NiCl₂·6H₂O(0.19);MnCl₂·4H₂O(0.01);CuSO₄(0.01);ZnCl₂(0.01);CaCl₂(0.04);腐殖酸(0.12)。所有化学药剂均为分析纯级别。人工配水每星期更换一次。

1.2.5 生物膜厚度测定 试验反应柱中颗粒表面生物膜厚度分布通过共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)直接观测。

2 结果与分析

2.1 模拟结果与分析

2.1.1 流场形态及分布变化 模拟流场中水相的速度分布,一般可反映流场整体形态及水相与生物膜间

的接触时间长短。一般来说,流速较慢,水相与生物膜间的接触时间就越长,物质(氧和营养物)的传质时间就会越长,根据对流传质理论,在传质动态平衡之前,传质总量就会随之增大,从而有利于生物膜的生长,但是超长的水力接触时间势必造成微生物膜脱落物的堆积,加之结合水的共同作用约束了孔隙流通性。对 BRC 流场形态的速度分析见图 1。从图 1 可看出,不同粒径颗粒间区域的流场形态也不同。

如图 1 所示,6 种不同颗粒粒径,计算区域内的局部都形成了不同程度的涡流,只是速度分布有所不同。根据速度值以及速度高值占比可以得出涡流程度依次为:颗粒粒径 8.0 mm>6.0 mm>2.0 mm>1.0 mm>0.5 mm>4.0 mm。当粒径为 4.0 mm 时,仅在颗粒孔隙间和底部形成较小的涡流结构,其他区域的流线相对平缓且流速相近,说明流体的涡流扩散较弱,物质传递程度较低。粒径为 8.0 mm 和 6.0 mm 时,涡流发生区域相似,相比之下 8.0 mm 计算区域中的涡流扩散程度更强,几乎涉及到整个流场,同时表现出涡流区与非涡流区之间的流速差极大,在微区域形成的速度梯度(水动力作用)容易引起局部生物膜被卷扫脱落;再者由于颗粒间具有较大孔隙率(62.38%)和较高流速(约 0.12 m/s)导致前端流体携带的悬浮物质(污水中原有颗粒物和脱落的生物膜)无法通过惯性碰撞、涡流扩散被有效拦截,传质效率也极大降低。而当粒径为 1.0 mm(孔隙率 61.29%,颗粒间距离 0.155 mm)时,在计算区域形成了数量多尺寸小的涡流结构,这类涡流结构相对合理,有利于水相与生物膜间的相互作用,同时有利于生物膜的更新(详见生物膜厚度测定内容)。综合以上分析可知,不同颗粒粒径会形成不同的流场形态。同时选取计算区域水平中线($H=0$ mm)上的流体速度进行对比,结果见图 2。由此,可进一步证明粒径对流场形态的影响。

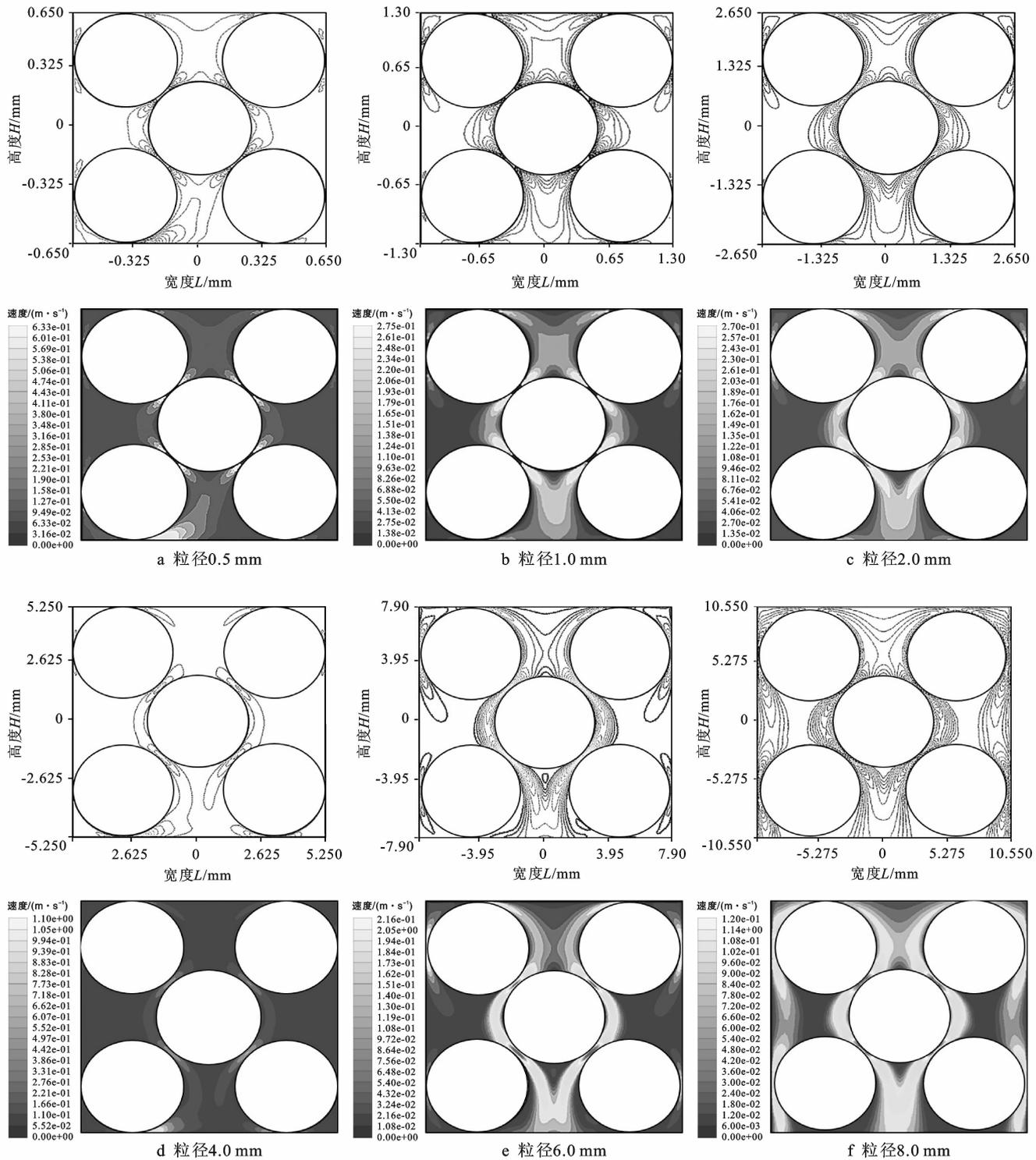


图 1 不同颗粒粒径的流线图

由图 2 可以看出, 粒径为 4.00 mm 时, 87% 点群速度趋于 0, 且变化不明显; 当粒径为 6.00 mm 和 8.00 mm 时, 轴线速度变化加大, 说明产生涡流并与流场中的涡流结构一致。粒径为 6.00 mm 时, 轴线速度有一个极大跳跃, 从 0 m/s 直接加大到 0.119 m/s, 说明存在很明显的湍流流动; 粒径为 8.00 mm 时, 轴线的每个点位都有较大速度且整体波动很大, 这

与图 1 流场表现出的结果一致。粒径为 0.5 mm 和 1.00 mm 时, 轴线速度在颗粒表面处有明显波动, 但波动相对较小, 该流态既可以确保水相与生物膜之间充分接触, 又可以保证水流的渗透能力, 从流线图和速度两个方面分析, 粒径大小为 1.00 mm 时 (颗粒间空隙为 0.155 mm, 孔隙率为 61.29%), 流场的形态较为合理。

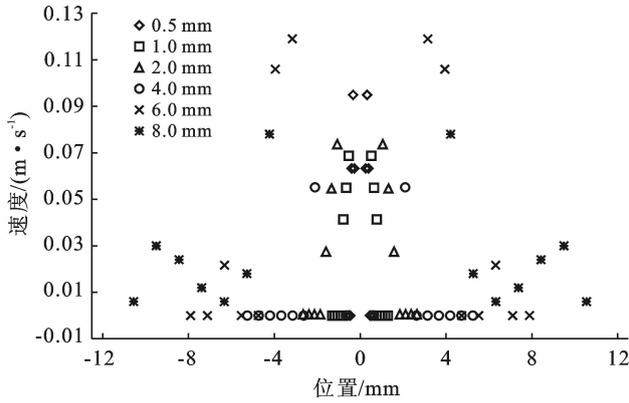


图 2 计算区域水平中线速度

2.1.2 压力分布变化 生物滞留池内的水流从高向低流动,水相流经不同粒级级配填料层在高度方向发生水头损失。压力分布图可以反映生物滞留池中相对静压力 P 在反应器运行中的变化趋势。

通过压力变化的均匀程度可大致反映水流在填料中混合的均匀度,压力梯度的变化可反映湍流运动的强弱及湍流强度的大小,而压降体现流动阻力的大小。不同颗粒粒径流场的压力分布如图 3 所示。由图 3 可看出,粒径不同颗粒间区域的压力分布亦有所不同。

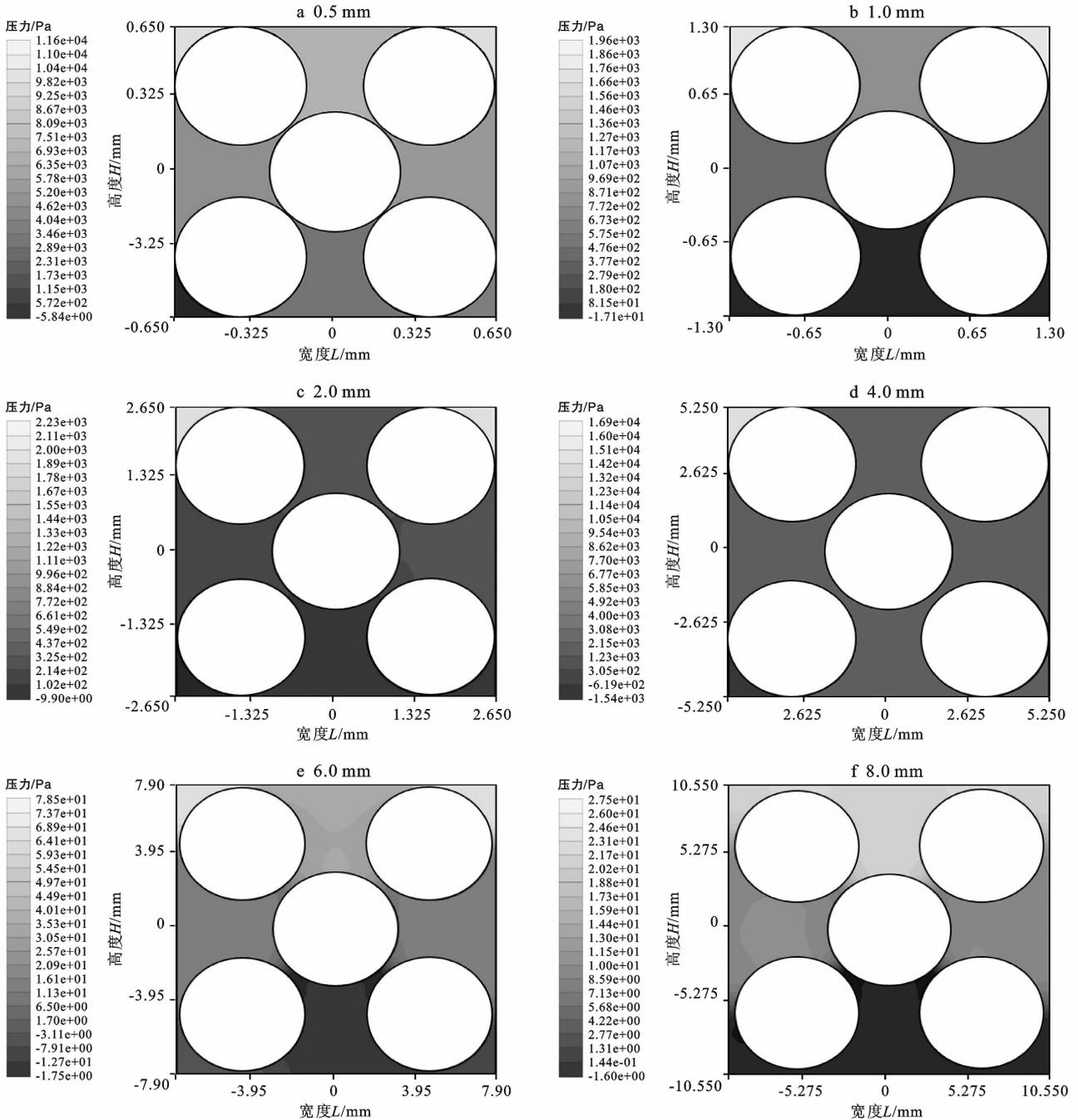


图 3 不同颗粒粒径的压力分布

如图 3 所示,当粒径为 2.0 mm 和 4.0 mm 时,压力变化较为均匀,在一定程度上不利于营养物和氧传质的进行;但水流平稳有利于水相中颗粒物的沉淀,分析原因:孔隙率 ϵ 由 61.30%(0.5 mm 粒径)增大到 62.03%(4.0 mm 粒径)后,进出口间的压降减少(见图 1),同时毛细压力也会随孔隙率的增大而减小,当毛细压力小于重力时,水相向底部汇集,由于增大 ϵ 有利于气体扩散和水流汇集,含水饱和度 S 也大大增加。当 ϵ 的变化引起有效扩散系数 D_{eff} 变化时,就会对水流扩散产生重要影响。由菲克定律描述的有效扩散系数公式^[13]和质量守恒方程^[14]可以得到 $\epsilon S \propto D_{eff} \propto \epsilon^{1.5}$,最终 $S \propto \epsilon^{1/2}$ 。所以由以上的分析和公式推导都表明增大孔隙率能增加含水饱和度。

但是,孔隙率增大到一定程度后,效果也不理想。当粒径较大时,即 6.0 mm(ϵ 为 62.27%)和 8.0 mm(ϵ 为 62.38%),由于进口处的最高压力值到出口处的最低值之间的压力梯度变化过大,出口处就会出现压力负值,致使流场变化不均匀,与图 1 显示的流线分布一致,即不利于物质传递也不利于物质沉淀。当粒径为 0.5 mm 和 1.0 mm 时,有压力变化但梯度不大,在一定程度上有利于营养物和氧传质的进行。再选取计算区域垂直中线($L=0$ mm)上的流体相对静压力从进口处到出口处沿程进行对比,结果见图 4。

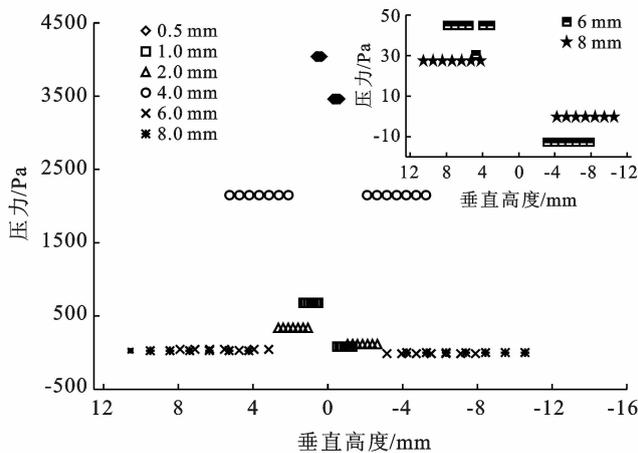


图 4 不同颗粒粒径的相对静压力与高度的关系

图 4 是相对静压力沿水流方向的变化曲线。除粒径为 4.0 mm 以外,其余 5 种颗粒粒径的计算区域都呈现出相对静压力前端高于后端的现象,变化轨迹呈 Z 形轨迹线。根据流体力学伯努利原理,流体的总水头是由位置水头、压强水头和流速水头组成,对于本文所研究的计算区域而言,在相同位置水头情况下,综合分析图 2 的速度和图 4 的相对静压力,可以得出不同粒径的颗粒作为填料时的总水头变化。假

设以粒径 2.0 mm 和 4.0 mm 为填料层时,从上到下的总水头基本没有大的变化,不利于营养物和氧传质的进行;假设以 6.0 mm 和 8.0 mm 为填料层时,在轴向和径向总水头都发生连续的过大的变化,也不利于物质传递的进行;假设以 0.5 mm 和 1.0 mm 作为填料层主体时,在前后端有足够的总水头梯度差推动水流向下渗流,虽然从图 4 可以看出 0.5 mm 和 1.0 mm 的进出口端都有较大的压降值,但两者相对孔隙率较小(61.30% 和 61.29%),在渗流过程中形成较为强烈的湍流,产生较大的流动阻力,延长接触时间,这样能确保水相与生物膜充分进行物质传递,获得较好的处理效果。因此,作为生物滞留池填料层以粒级 0.5 mm 和 1.0 mm 为主相对合理。

2.2 试验结果与分析

为了直观验证以上模拟结果,通过 3 阶段间歇供水方式对生物滞留池(BRC)反应器运行,第 180 d 后观察不同层颗粒表层生物膜变化。生物膜的分析样品是在试验结束打开采样口后,在 BRC 反应器中 3 个位置即过滤层、淹没层和排水层采集的。生物膜的最大厚度为 500 μm ,所扫描砂粒的周长为 5 952.63 μm ,所扫描砂粒的截面面积为 1 831 250.66 μm^2 。

由表 2 可以看出,相比粒径 4.0 mm,粒径 0.5 mm 和 1.0 mm 的颗粒表层形成的生物膜更为均匀,且生物膜量较大。这与流场和压力分布模拟得出的结果一致,进一步验证了以平均粒径 0.5 mm 和 1.0 mm 为主的填料层能确保水相与生物膜充分接触促进生物膜生长,同时,平均粒径 4.0 mm 环境下能形成较为平稳的流场形态和较低的压力波动,将其作为排水层有利于颗粒物的沉淀和水流的排出。

表 2 第 180 d 后砂样表面生物膜厚度

采样位置	生物膜厚度范围/ μm	生物膜均值/ μm	生物膜比表面积占比/%
过滤层 (平均粒径 0.5 mm)	0~80	38.0	85
淹没层 (平均粒径 1.0 mm)	0~90	57.2	95
排水层 (平均粒径 4.0 mm)	0~65	31.0	75

3 结论

(1) 填料粒径是影响生物滞留池(BRC)渗透性能和运行效果的重要因素,本文主要用数值模拟的方法对粒径的影响程度进行机理分析。通过 Fluent 软件模拟小尺度计算区域流场形态及速度分布变化,分

析结果表明,相比其他 5 种粒径,粒径为 0.5 mm 和 1.0 mm 的流场,可形成结构适中且量多的涡流,既确保了水相与生物膜充分接触达到较好的处理效果,又保证了水流渗透能力。

(2) 压力分布变化分析结果表明,以 0.5 mm 和 1.0 mm 作为填料层主体时,在前后端有足够的总水头梯度差推动水流向下渗流,能确保充足接触时间使得水相与生物膜进行物质传递。

(3) 生物膜厚度试验检测分析结果表明,粒径 0.5 mm 和 1.0 mm 的颗粒表层可形成较为均匀的生物膜,且生物膜量较大。这与流场和压力分布模拟得出的结果一致,进一步验证了以平均粒径 0.5 mm 和 1.0 mm 为主的填料层能确保水相与生物膜充分接触促进生物膜生长。

(4) 数值模拟可为生物滞留池填料粒径的选取和装填孔隙率提供参考。本研究提出了一种适合生物滞留池填料层颗粒级配的优选方法,通过模拟可缩短反应器粒径选择的试验过程和时间。

[参 考 文 献]

- [1] Le Coustumer S, Fletcher T D, Deletic A, et al. The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study [J]. *Water Research*, 2012,46(20):6743-6752.
- [2] Read J, Wevill T, Fletcher T, et al. Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. *Water Research*, 2008, 42(4/5):893-902.
- [3] Kandra H S, Deletic A, Mc Carthy D. Assessment of impact of filter design variables on clogging in stormwater filters [J]. *Water Resources Management*, 2014,28(7):1873-1885.
- [4] Blecken G T, Zinger Y, Deletic A, et al. Laboratory study on stormwater biofiltration; Nutrient and sediment removal in cold temperatures [J]. *Journal of Hydrology*, 2010,394(3/4):507-514.
- [5] Kandra H, Mc Carthy D, Deletic A. Assessment of the impact of stormwater characteristics on clogging in stormwater filters [J]. *Water Resources Management*, 2015,29(4):1031-1048.
- [6] Yong C, Mc Carthy D T, Deletic A. Predicting physical clogging of porous and permeable pavements [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,481:48-55.
- [7] Gresch M, Armbruster M, Braun D, et al. Effects of aeration patterns on the flow field in wastewater aeration tanks [J]. *Water Research*, 2011,45(2):810-818.
- [8] 孔德川,丁爱中,郑蕾,等. 分层式潜流人工湿地水力学特性数值模拟与分析[J]. *环境工程学报*, 2011,5(4):741-744.
- [9] 王丽,王丽杰,王琳,等. 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*, 2015,35(5):1426-1434.
- [10] De Boer R, Didwania A K. Two-phase flow and the capillarity phenomenon in porous solids: A continuum thermomechanical approach [J]. *Transport in Porous Media*, 2004,56(2):137-170.
- [11] 张凯,王瑞金,吴立军. *Fluent 技术基础与应用实例(第 2 版)*[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [12] Payne E G I, Hatt B E, Deletic A, et al. *Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems* [M]. Melbourne, Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, 2015.
- [13] Nam J H, Kaviany M. Effective diffusivity and water-saturation distribution in single- and two-layer PEMFC diffusion medium [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003,46(24):4595-4611.
- [14] Zhang Yuwen, Peng X, Conte I. Heat and mass transfer with condensation in non-saturated porous media [J]. *Numerical Heat Transfer Part A-applications*, 2007,52(12):1081-1100.