

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.02.003

随机纤维膜过滤器捕集浮游生物颗粒的 DPM 数值模拟

邱显焱, 郑 静

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 目前常用的深海浮游生物取样方法, 是采用水泵抽取海水, 并通过过滤技术捕捉其中的浮游生物。因此, 以浮游生物过滤器为研究对象, 通过随机算法建立三维纤维膜微观模型, 并基于相似准则对纤维膜模型进行数值模拟研究, 同时, 采用拉格朗日离散相模型 (DPM) 追踪浮游生物颗粒在过滤器内的运动轨迹。研究表明: 入口速度的变化对流场的压力和速度分布有显著影响, 随着入口速度增加, 流场内部速度差增大, 流场中的压力分布出现明显的分层现象, 且压力损失随入口速度增大而增大。其孔隙较小的纤维模型具有更好的过滤性能, 对浮游生物颗粒的过滤效率基本稳定在 80%。

关键词: 浮游生物; 纤维滤膜; 数值模拟; DPM; 捕集效率

中图分类号: TQ051.8⁺5; Q93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2025)02-0015-07

引文格式: 邱显焱, 郑 静. 随机纤维膜过滤器捕集浮游生物颗粒的 DPM 数值模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(2): 15-21.

DPM Numerical Simulation for Capturing Plankton Particles by Random Fiber Membrane Filters

QIU Xianyan, ZHENG Jing

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to the fact that currently the commonly used deep-sea plankton sampling method is to use water pumps for extraction of the seawater to catch plankton through filtration, taking plankton filters as the research object, a three-dimensional fiber membrane microscopic model has thus been established through random algorithms, followed by a numerical simulation of the fiber membrane model based on similarity criteria. Meanwhile, the Lagrangian discrete phase model (DPM) is used to track the motion trajectory of plankton particles inside the filters. The research results indicate that changes in inlet velocity have a significant impact on the pressure and velocity distribution of the flow field. As the inlet velocity increases, the velocity difference inside the flow field increases, with a clear stratification in the pressure distribution in the flow field. Moreover, the pressure loss increases with the increase of inlet velocity. The fiber model with smaller pores is characterized with a better filtration performance, with the filtration efficiency of plankton particles being basically stable at 80%.

Keywords: plankton; fiber membrane; numerical simulation; DPM; capture efficiency

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设省级专项基金资助项目 (2023sfq52)

作者简介: 邱显焱, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂机械系统振动机理及控制,

E-mail: qiuxianyan@hut.edu.cn

0 引言

地球表面广阔的水域蕴藏着丰富的生物资源,其深海环境中存在着大量浮游生物,在工业、医疗、生命科学等领域中具有重要的研究价值^[1-3]。为了研究深海微型浮游生物,需通过压力驱动型滤膜技术收集大量有现场特性的样本,该技术利用静压差使得小于滤膜孔径的颗粒通过滤膜,而大于孔径的颗粒被截留,从而实现对深海浮游微生物的有效采样^[4-8]。近年来,许多研究者从理论模型的角度关注微生物过滤过程,并开发了浮游生物过滤采样器的数学模型,用于了解和提高过滤器的性能^[9-10]。Ruan D. R. 等^[11-12]对多级膜分离过程进行建模和计算,模拟了不同大小浮游生物颗粒通过多级膜区的截留现象。

纤维过滤介质的内部微观结构对其过滤性能会产生重要的影响。现有研究通常采用纤维均匀排列的简化二维或三维模型,但实际上纤维的大小不一且排列杂乱无章^[13]。A. M. Saleh 等^[14]提出了一种用于创建随机纤维过滤膜三维模型的方法,基于二维平面内随机生成纤维的形状,通过堆叠的方式构建出三维模型,将三维问题简化为二维问题进行处理,从而减少了模型建立的复杂度。S. A. Hosseini 等^[15]利用随机算法开发了一个三维纤维模型,通过拉格朗日离散相模型(deformable part model, DPM)跟踪颗粒轨迹,探讨了静电纺丝膜在颗粒滤除时的效率及压力变化。Zhang X. 等^[16]参照纤维过滤材料的基本结构参数,构建了三维几何模型,并采用流体颗粒耦合(CFD-DEM)的数值分析技术,研究了清洗参数和环境参数对纤维过滤材料水清洗再生过程的影响。Yue C. 等^[17]构建了一个三维随机结构的纤维过滤器,并通过 CFD-DEM 技术模拟了气流和颗粒的运动,以及它们与纤维和流体的相互作用过程。

为了研究纤维膜过滤器性能,本文通过模拟纤维滤膜微观形态,建立相应随机纤维三维模型,并基于流体力学中的相似准则,对纤维膜过滤介质的内部流体运动及浮游生物捕集过程进行数值模拟,分析随机纤维膜过滤器中浮游生物颗粒、纤维尺寸及过滤参数对过滤性能的影响,为改进膜过滤器设计和提升深海浮游生物颗粒捕集效率提供借鉴与参考。

1 数值模型建立

1.1 三维纤维膜微观模型创建

目前,研究者能方便地用计算机软件构建简化的纤维过滤介质模型,但构建准确反映真实纤维形态的三维模型仍较困难^[18-19]。图 1 为纤维素滤膜的微观

图,可发现纤维素滤膜的内部纤维层次交错且紧密,众多纤维的紧密粘结形成了密集的表面孔结构。

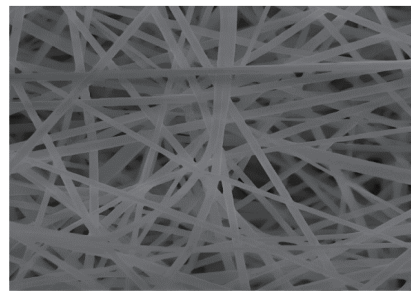


图 1 纤维素滤膜微观图

Fig. 1 Microscopic image of cellulose filter membranes

本研究采用 CAD 的 ActiveX 程序设计,基于随机算法建立了符合真实情况的纤维膜三维模型。建模完成后,将文件导入 SolidWorks 进行修改。在建模过程中,考虑到单一纤维长度对最终模拟效果影响不显著,因此未将纤维长度纳入考虑范围。模型中将纤维简化为一些长圆柱体,通过随机算法在指定空间范围内随机生成,其直径大小遵循正态分布。图 2 为通过随机算法生成的微观纤维体模型,其在模拟纤维特征方面与实际纤维膜具有相似性^[20]。

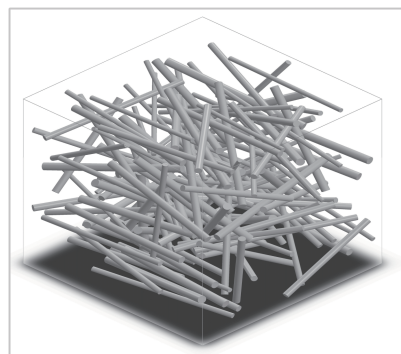


图 2 随机纤维滤膜微观模型

Fig. 2 Microscopic model of random fiber filter membranes

1.2 相似准则

基于流体力学的相似准则,两个流动相若满足相同的控制方程(如纳维-斯托克斯方程)和相似的单值条件(包括边界条件、几何特征和物理性质),且当雷诺数 Re 相等时,即为相似^[21]。

本文依据相似准则构建相似模型,综合考虑计算量,选取几何相似倍数 C_l 为 1/1 000。利用计算流体力学(CFD)软件对该模型进行数值模拟,深入研究纤维过滤介质内部的流体流动及浮游生物捕集过程。

2 DPM 数值计算

2.1 压力损失计算公式

评估纤维过滤器过滤效能时,压力损失是一个重

要的性能评价参数^[22]。在完成计算分析之后,需要在 CFD-Post 软件中提取各个工况的压力损失数值。纤维过滤器的压力损失 ΔP 由式 (1) 表示。

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}, \quad (1)$$

式中: P_{in} 、 P_{out} 分别为模型入口和出口处的静压值。

2.2 捕集效率计算公式

引入颗粒布朗运动、截留效应及沉积颗粒,对后续沉积的影响会显著增加模型的复杂性,进而需要更高的计算能力和更多的计算时间。因此,计算中未考虑这些因素,假设颗粒一旦与纤维材料表面接触即被捕获。基于此假设,可以通过捕获的颗粒数量与初始释放的总颗粒数量之比来计算微观纤维膜的捕集效率^[23],具体公式为

$$E = (N_{in} - N_{out}) / N_{in}, \quad (2)$$

式中: E 为捕集效率; N_{in} 为入射面生成的粒子总数; N_{out} 为离开过滤器的颗粒数。

通过在过滤器入口处引入一定数量的颗粒,并跟踪这些颗粒通过过滤器的轨迹,比较入射面生成的粒子总数 N_{in} 和离开过滤器的颗粒总数 N_{out} ,可以求得过滤效率。

2.3 边界条件与控制方程

图 3 所示为本研究的模型边界条件设置,模型进出口条件采用 velocity-inlet、pressure-outlet,流体域四周设置为 wall,流体不可直接穿过纤维介质,纤维介质属性设置为 trap 类型。

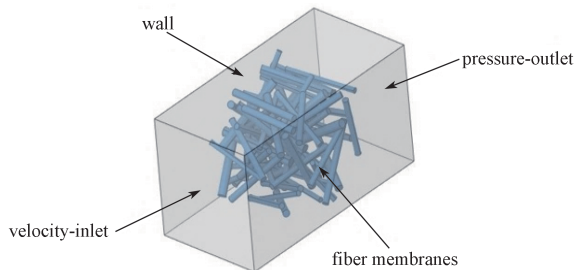


图 3 模型边界条件

Fig. 3 Model boundary conditions

采用稳定的层流不可压缩模型,其中密度保持恒定。流体连续性方程是描述一定质量流体在空间内的运动状态的重要方程之一,其物理表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0; \quad (3)$$

动量方程为

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v; \quad (4)$$

式 (3) (4) 中: p 为流体压力; ρ 为流体密度; v 为流体速度; t 为时间; μ 为流体动力黏度; ∇ 为梯

度运算符。

相似物理量 p' 、 ρ' 、 v' 、 μ' 、 t' 、 l' 与常数 p 、 ρ 、 v 、 μ 、 t 、 l 的关系可表示如下:

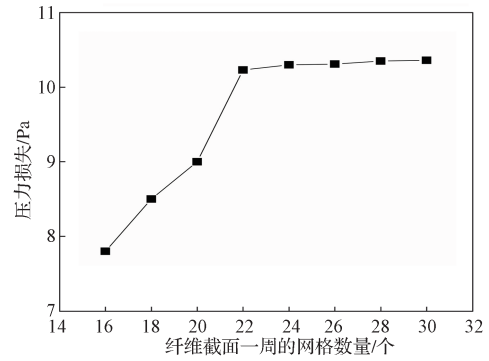
$$\frac{p'}{\rho'} = C_p, \quad \frac{p}{\rho'} = C_p, \quad \frac{v}{v'} = C_v, \quad \frac{\mu}{\mu'} = C_\mu, \quad \frac{t}{t'} = C_t, \quad \frac{l}{l'} = C_l, \quad (5)$$

式中: l 为纤维几何尺寸; C_v 、 C_p 、 C_μ 、 C_t 、 C_l 为各物理量的相似倍数,且均为常数。

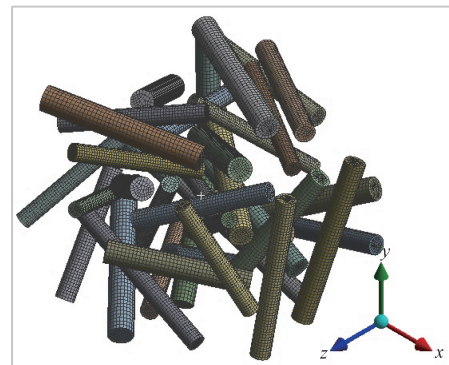
此外,设雷诺数 Re 为流动的相似准则,其相似指标为 $C_\mu / (C_p C_v C_l)$,取值 1^[21]。

2.4 网格无关性验证

当纤维直径为 3~5 mm,固体体积分数 (SVF) 为 11.15%,入口速度为 0.1 m/s 的工况时,纤维过滤器的内部压力损失与周边网格数量的关系检验结果如图 4 所示。



a) 不同网格数量的压力损失



b) 纤维膜有限元网格模型

图 4 网格无关性验证结果

Fig. 4 Grid independence verification results

由图 4 可知,在纤维横截面一周网格密度增加初期,压力损失急剧增加,但达到一定数量 (22 个网格以上) 后,压力损失趋于平稳,表明超过此网格密度,增加网格数量对压力损失的影响不大。对其他组别的网格验证同样进行了分析,结果显示单根纤维截面一周的网格节点数大于 22 时,压力损失的变化较为稳定。

3 仿真结果与分析

3.1 速度与压力分布

当纤维的直径为 2~4 mm, 固体物质体积分数为 10.17% 时, 在不同入口速度工况下, $X=55$ mm 处的 YZ 截面粒子速度云图见图 5, 压力云图见图 6。由图 5 可以得知, 入口速度显著决定了速度云图的整体分布。当流体碰到纤维障碍时, 在靠近入口的纤维面, 流体的速度快速降低, 而在纤维的背面, 速度几乎

为 0。这种现象源于纤维的阻挡效应, 形成了一个流速显著降低的滞流区。此外, 由于纤维以随机方式分散在过滤区域, 使得液相流场相对混乱。可观察到, 在纤维间距较大的区域, 由于缺乏纤维阻挡, 流速显著高于周边区域, 更容易形成快速流动和速度涡旋。在纤维背面, 进口速度变化会直接影响速度场的变化。随着进口流速增加, 流场内的平均速度提升, 背面的滞流区明显扩展, 同时高速流动区沿 Z 轴负向范围亦有所增加。

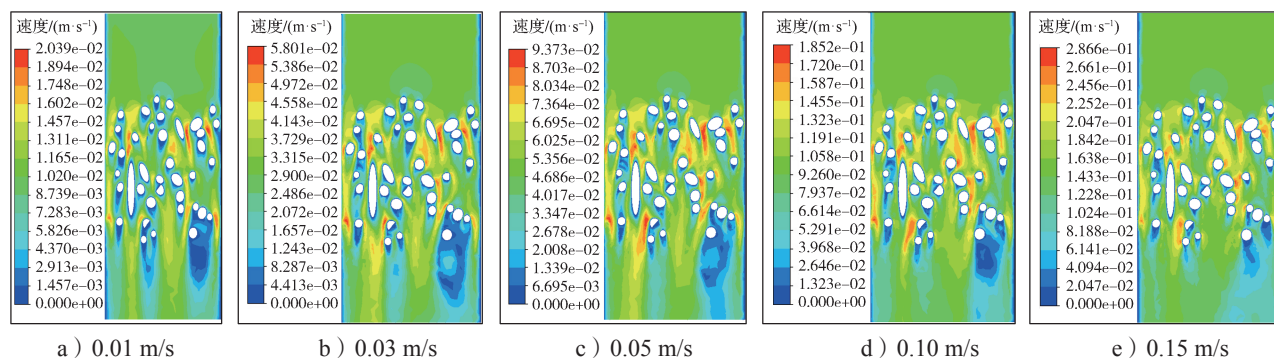


图 5 不同入口速度下的 YZ 截面速度云图

Fig. 5 Velocity nephogram of the YZ plane at different inlet velocities

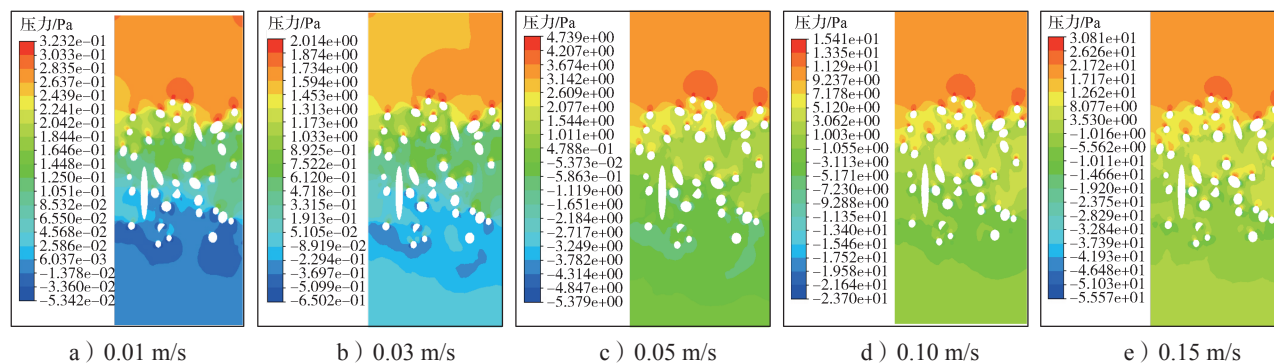


图 6 不同入口速度下的 YZ 截面压力云图

Fig. 6 Pressure nephogram of the YZ plane at different inlet velocities

由图 6 所示压力云图可知, 径流进出口的压力展现出鲜明的层次性, 这种压力层次现象很大程度上受纤维排列结构的调控。在流体尚未触及纤维结构之前, 其内部压力维持在相对较高的水平。随着流体开始与由纤维编织而成的区域相遇, 流场压力呈现出显著的波动性, 且在纤维密集区尤为剧烈。而随着流体顺利穿越纤维膜并朝出口端流动时, 区域压力明显降低。

图 7 为纤维模型在不同入口速度下的压力损失。可见, 随着入口速度增加, 压力损失逐步上升。这可能是由于流体穿过纤维时受到阻力, 流速减缓, 动能转化为静压, 形成压力差。此外, 当流体流过障碍物时, 由于不同方向上的速度不均匀, 会产生剪切力, 促使流体在局部区域产生旋转运动, 进而产生漩涡, 进一步加剧了压力损失。

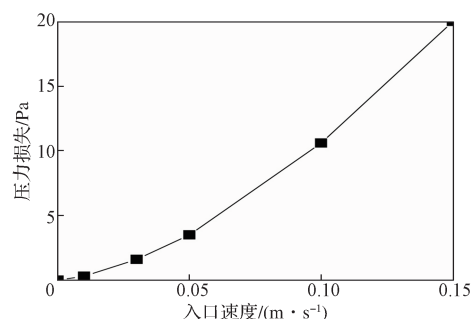


图 7 纤维模型在不同入口速度下的压力损失

Fig. 7 Pressure loss of the fiber model at different inlet velocities

3.2 不同粒径浮游生物的过滤效率

当纤维直径为 2~4 mm, 固体物体积分数为 10.17% 时, 纤维模型对不同粒径浮游生物颗粒的过

滤效率如图 8 所示。

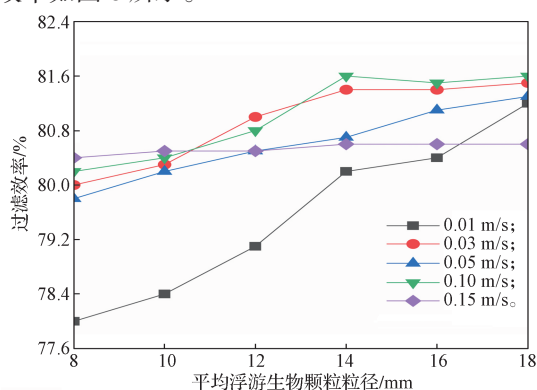


图 8 纤维模型对不同粒径浮游生物颗粒的过滤效率

Fig. 8 Filtration efficiency of the fiber model for plankton particles of different sizes

由图 8 可以得知,随着浮游生物颗粒粒径增加,过滤效率不同程度地提高,基本稳定在 80%;当流速为 0.01 m/s 时,对于小颗粒的过滤效率略下降,但对于颗粒粒径较大的浮游生物颗粒依旧达 80% 以上,满足过滤需求。考虑到计算量,采用的纤维模型在一定程度上与实际滤膜不同,具较小厚度及较少纤维根数,且因根据程序随机生成的模型与外流场边界存在空隙,导致部分浮游生物颗粒通过这些空隙逃逸,未经过纤维滤膜过滤,因此损失了部分过滤效率。

3.3 不同纤维参数对过滤效率的影响

图 9 显示了流速为 0.01 m/s 的条件下,直径分别为 2~4 mm、3~5 mm 和 5~7 mm 的纤维膜对不同粒径浮游生物颗粒的过滤效率。

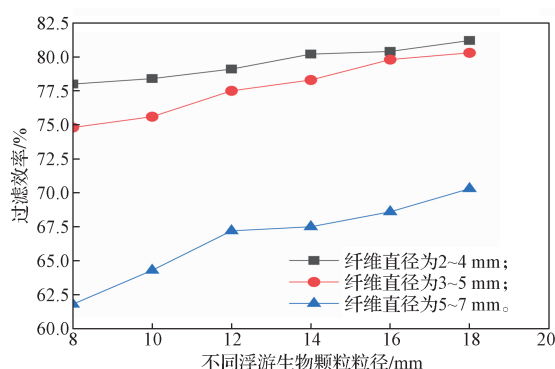


图 9 不同纤维直径对过滤效率的影响

Fig. 9 Impact of different fiber diameters on filtration efficiency

由图 9 可知,纤维直径为 2~4 mm 的模型过滤效率最高;相比之下,5~7 mm 纤维直径模型的过滤效率明显较低。这表明较小的纤维直径会导致纤维膜的孔径减小,从而能更有效地捕捉颗粒。当浮游生物颗粒随水流穿过纤维膜时,较小的孔径有助于提高捕捉率,过滤效率随着纤维直径的减小而提升。由于模型尚未考虑颗粒沉积和滤膜堵塞的影响,在实际应用

中,通过采用多级滤膜分级过滤系统,可以有效防止滤膜堵塞,并提高浮游生物的纯度。

图 10 为纤维模型直径为 2~4 mm,过滤流速为 0.01 m/s 时,不同纤维体积分数的模型对于浮游生物颗粒的过滤效率。

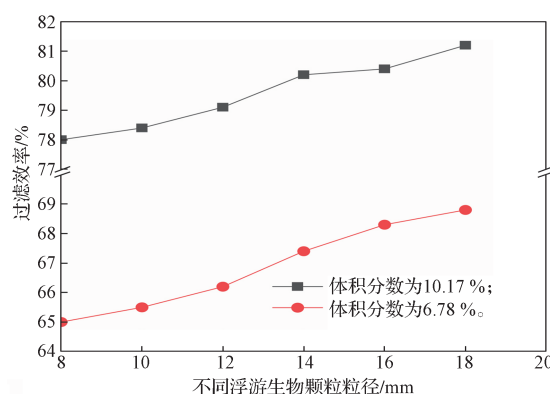


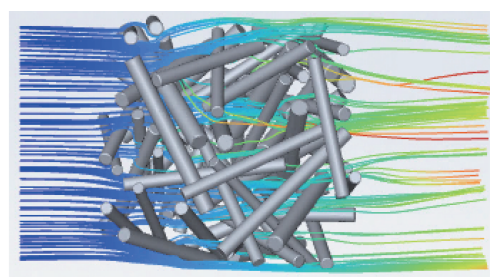
图 10 不同体积分数对过滤效率的影响

Fig. 10 Influence of different volume fractions on filtration efficiency

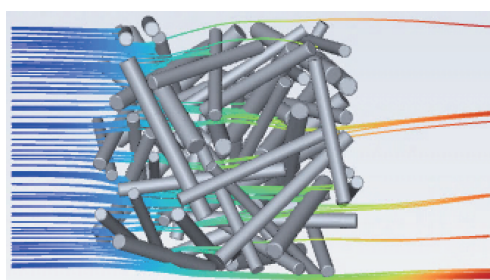
由图 10 可看出,随着纤维体积分数的增加,颗粒的过滤效率相应提高。这可能是因为随着体积分数的增加,纤维内部的填充密度提高,纤维在空间中的分布更为密集,形成的孔隙尺寸减小,孔隙率降低,因此,颗粒更容易被纤维体捕集,进而提高了过滤效率。此外,纤维体积分数的提高也增加了流体通过纤维体时的阻力,导致纤维进出口处的压差增大。

3.4 颗粒运动轨迹图

图 11 为浮游生物颗粒在过滤过程中的运动轨迹。



a) 颗粒平均粒径为 3 mm



b) 颗粒平均粒径为 5 mm

图 11 不同粒径浮游生物颗粒运动轨迹图

Fig. 11 Trajectory map of plankton particles with different particle diameters

观察图 11 可知,颗粒自入口进入,其在与纤维模型接触后出现运动路径消失的现象,且部分浮游生物颗粒从纤维膜内部孔隙穿过。这是因为这些颗粒随着水流经过纤维膜表面时被有效捕集,且纤维体模型的生成是随机的,并不均匀分布,一些区域的纤维密度较高,可以有效地拦截浮游生物颗粒,但在其他区域,纤维分布较为稀疏,颗粒更容易逃逸,由此导致了部分过滤效率的损失。

由图 11 还可得知,在相同条件下,不同粒径的浮游生物颗粒在过滤过程的现象也有所不同,纤维膜模型对小粒径的浮游生物颗粒过滤效率较低。因此,为了保证整个过滤装置在工作时能够有效地取样,对于这种现象应采取多级不同孔径滤膜,以提高对浮游生物颗粒的过滤效率。

4 结 论

本文通过分析浮游生物微孔过滤器滤膜的结构特征,利用随机算法构建了三维微观纤维滤膜模型,基于相似性准则进行液固两相流数值模拟,并采用拉格朗日离散相模型(DPM)模拟浮游生物颗粒被纤维膜捕集的过滤过程,得到如下结论:

1) 流场入口速度对速度和压力的整体分布具有显著的影响。入口速度增加时,流场内部平均速度提升,出入口速度差增大,高速流动区扩展;压力分布分级明显,且压力损失与入口速度呈正相关。

2) 随机纤维膜模型在对不同粒径浮游生物过滤时,过滤效率与粒径呈现出正比例关系。入口速度为 0.03~0.10 m/s 的工况对不同粒径颗粒具有较为稳定的过滤效率。

3) 在不同纤维参数条件下,纤维直径为 2~4 mm 的模型过滤效率最佳,且纤维体积分数越大,过滤性能越好。当过滤材料的孔隙细小且纤维布局紧凑时,其对颗粒的过滤效果会明显提升,但同时会减少孔隙之间的连通性,进而增加过滤时的压力损失。

参考文献:

- [1] 贺建武,刘祝祥,刘 荷,等.海洋沉积物原核微生物多样性研究进展[J].海洋科学,2013,37(9):103-113.
HE Jianwu, LIU Zhuxiang, LIU He, et al. The Progress of Studies on Marine Prokaryotic Microbe Diversity in Marine Sediments[J]. Marine Sciences, 2013, 37(9): 103-113.
- [2] 王 勇,郑鹏飞,贺丽生,等.深海生物原位实验与生态监测研究进展[J].应用海洋学学报,2022,41(3): 543-553.
- [3] 马丽丽,田新朋,李桂菊,等.海洋微生物来源天然产物研究现状与态势[J].热带海洋学报,2021,40(5): 134-146.
MA Lili, TIAN Xinpeng, LI Guiju, et al. Research Status and Development Trends of Natural Products from Marine Microorganisms[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(5): 134-146.
- [4] 胡军锋,宋文杰,蒋庆林,等.微生物滤膜试验装置设计及滤膜性能研究[J].制造业自动化,2018,40(2): 77-80.
HU Junfeng, SONG Wenjie, JIANG Qinglin, et al. Design and Experiment on Test Device of Microbial Membrane[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(2): 77-80.
- [5] 冯景春,梁健臻,张 偲,等.深海生物资源开发装备发展研究[J].中国工程科学,2020,22(6): 67-75.
FENG Jingchun, LIANG Jianzhen, ZHANG Si, et al. Development of Deep-Sea Biological Resources Exploitation Equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 67-75.
- [6] 李 玮,顾临怡,吴新然,等.一种新型深海微生物多级膜取样系统[J].机电工程,2011,28(6): 663-667.
LI Wei, GU Linyi, WU Xinran, et al. New Type of Deep-Sea Microorganism Sampler System with Multi-Layer Membranes[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(6): 663-667.
- [7] 陈永国,张 涛,刘之葵,等.海水悬浮物浓度原位测量技术进展[J].海洋科学,2023,47(8): 120-130.
CHEN Yongguo, ZHANG Tao, LIU Zhikui, et al. In-Situ Measurement Technology of Suspended Particle Concentration of Seawater[J]. Marine Sciences, 2023, 47(8): 120-130.
- [8] 陈秀兰,张玉忠,高培基.深海微生物研究进展[J].海洋科学,2004,28(1): 61-66.
CHEN Xiulan, ZHANG Yuzhong, GAO Peiji. Progress in Deep-Sea Microbiology[J]. Marine Sciences, 2004, 28(1): 61-66.
- [9] SAMI S, RAHIMI A. Non-Isothermal Modelling of H₂S Removal in a Biofilter[J]. Environmental Technology, 2011, 32(3/4): 373-381.
- [10] VIOTTI P, ERAMO B, BONI M R, et al. Development and Calibration of a Mathematical Model for the Simulation of the Biofiltration Process[J]. Advances in Environmental Research, 2002, 7(1): 11-33.

- [11] RUAN D R, CHEN J W, WANG H, et al. Development of a Hadal Microbial in Situ Multi-Stage Filtering and Preserving Device[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(12): 1424.
- [12] 陈家旺, 阮东瑞, 王 豪, 等. 深渊生物资源取样装备技术体系研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(4): 148-158.
CHEN Jiawang, RUAN Dongrui, WANG Hao, et al. Research on the Technical System of Abyss Biological Resources Sampling Equipment[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(4): 148-158.
- [13] 刘倩倩, 尤健明, 王 琰, 等. 不同纤维结构特性下纤维集合体过滤性能的DPM数值模拟[J]. 纺织工程学报, 2023, 1(5): 78-89.
LIU Qianqian, YOU Jianming, WANG Yan, et al. DPM Numerical Simulation on Filtration Performance of Fiber Assembly Under Different Fiber Structural Characteristics[J]. Journal of Advanced Textile Engineering, 2023, 1(5): 78-89.
- [14] SALEH A M, HOSSEINI S A, VAHEDI TAFRESHI H, et al. 3-D Microscale Simulation of Dust-Loading in Thin Flat-Sheet Filters: A Comparison with 1-D Macroscale Simulations[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 99: 284-291.
- [15] HOSSEINI S A, TAFRESHI H V. 3-D Simulation of Particle Filtration in Electrospun Nanofibrous Filters[J]. Powder Technology, 2010, 201(2): 153-160.
- [16] ZHANG X, FU Z M, ZHOU T Y, et al. Study of the Water Cleaning Process by Using CFD-DEM Method: A Case Study of Coarse Filter Material[J]. Thermal Science, 2024, 28(1 Part A): 65-75.
- [17] YUE C, ZHANG Q, ZHAI Z Q. Numerical Simulation of the Filtration Process in Fibrous Filters Using CFD-DEM Method[J]. Journal of Aerosol Science, 2016, 101: 174-187.
- [18] 徐芳芳, 付海明, 雷泽明, 等. 三维纤维过滤介质压力损失数值模拟[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2012, 38(6): 745-749, 780.
XU Fangfang, FU Haiming, LEI Zeming, et al. Numerical Simulation of Pressure Drop in 3D Fiber Filter Media[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2012, 38(6): 745-749, 780.
- [19] 李艳艳, 付海明, 胡玉乐. 纤维过滤介质内部三维流场模拟[J]. 纺织学报, 2011, 32(5): 16-21.
LI Yanyan, FU Haiming, HU Yule. Numerical Simulation of Three Dimensional Flow Fields of Fiber Filter Media[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(5): 16-21.
- [20] 徐 严, 程思敏, 孙 玮, 等. 基于 Voronoi-Random 算法微观结构褶型过滤介质过滤性能[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5488-5497.
XU Yan, CHENG Simin, SUN Yi, et al. Filtration Performance of Microstructure Pleated Filter Media Based on Voronoi-Random Algorithm[J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5488-5497.
- [21] 诸文旎, 徐润楠, 胡蝶飞, 等. 基于随机算法的纤维材料过滤特性仿真分析[J]. 纺织学报, 2022, 43(9): 76-81.
ZHU Wenni, XU Runnan, HU Diefei, et al. Simulation Analysis of Filtration Characteristics of Fiber Materials Based on Random Algorithm[J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(9): 76-81.
- [22] 钱付平, 王海刚. 随机排列纤维过滤器颗粒捕集特性的数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(6): 120-126.
QIAN Fuping, WANG Haigang. Numerical Analysis on Particle Capture Characteristics of Fibrous Filters with Random Structure[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(6): 120-126.
- [23] 郑高峰, 姜佳昕, 邓世卿, 等. 纳米纤维膜三维重构与过滤行为分析系统[J]. 光学精密工程, 2022, 30(9): 1071-1079.
ZHENG Gaofeng, JIANG Jiaxin, DENG Shiqing, et al. Three-Dimensional Reconstruction and Filtration Behavior Analysis System for Nanofiber Membrane[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(9): 1071-1079.

(责任编辑: 廖友媛)