

Research on Hollow Fiber Membrane Wastewater Treatment Characteristics Based on CFD Method and Fluent Software

Fan Xu, Chunqing Li*

School of Computer Science and Software Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin
Email: *yangguangboy2435@sina.com

Received: Mar. 5th, 2019; accepted: Mar. 14th, 2019; published: Mar. 21st, 2019

Abstract

In the field of sewage treatment, membrane fouling has always been an important factor restricting MBR treatment efficiency and application effect. Therefore, it is of great practical significance to conduct in-depth research on the optimization of MBR wastewater treatment characteristics by using CFD and Fluent software to slow down the membrane pollution phenomenon. Based on computational fluid dynamics (CFD) method and Fluent software, this paper established simulation models for the single hollow fiber membrane filament and set boundary conditions. The CFD model of single hollow fiber membrane filament was axially simulated and the characteristics of membrane flux distribution were analyzed. Simulation results confirm that when the flux of some part of the membrane increases, the high permeability index will increase, the membrane assembly produces transmembrane differential pressure across the whole body. This pressure difference leads to an uneven distribution of flux in the membrane assembly. Therefore, the energy efficiency of membrane modules will be affected.

Keywords

Membrane Bioreactor (MBR), Membrane Fouling, CFD, Hollow Fiber Membrane, Fluent

基于CFD的单根中空纤维膜丝管通量分布特性研究

徐帆, 李春青*

天津工业大学计算机科学与软件学院, 天津
Email: *yangguangboy2435@sina.com

*通讯作者。

收稿日期: 2019年3月5日; 录用日期: 2019年3月14日; 发布日期: 2019年3月21日

摘要

膜污染制约了MBR处理效率和应用效果, 因此利用CFD和Fluent软件深入开展MBR污水处理特性优化研究对于减缓膜污染现象具有重要的实际意义。本文基于计算流体力学(CFD)方法并使用Fluent软件建立了单根中空纤维膜丝管的仿真模型, 划分了仿真模型的网格, 设置了模型的边界条件, 轴向仿真了单根中空纤维膜丝管CFD模型, 分析研究了膜丝管的膜通量分布特性, 仿真结果证实, 当加大膜丝管内某一部分的膜通量时, 该部位膜丝的高通透指数会增加, 从而使单根中空纤维膜丝管产生贯穿整体的跨膜压差, 这一压强差会导致膜丝管通量的不均匀分布, 从而影响单根中空纤维膜丝管的能源使用效率。

关键词

膜生物反应器(MBR), 膜污染, CFD, 中空纤维膜, Fluent

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中空纤维膜组件是膜生物反应器的基本组成结构之一[1]。本文使用 Fluent 软件建立了单根中空纤维式渗透汽化膜丝管的 CFD 模型, 并对建立的单根中空纤维膜 CFD 模型进行轴向仿真, 分析研究膜通量分布特性并研究影响单根中空纤维膜丝管能源使用效率的因素。由于膜组件的压降较大, 因此采用气液两相混合进料进行模拟, 气液两相进料模拟能够高效地减少中空纤维式渗透汽化膜内部压强, 促进管流湍动, 削弱壁面处所形成的浓度差和温度差极化层, 增大传质效果。膜内的流体发生渗透汽化时, 有一部分会在组分溶解扩散透过膜时耗热, 另外有一部分, 在透过层时会蒸发, 从而有一定的耗热, 大多数流体会在经过这两种情况后造成自身温度的损耗, 但是如果采用气液两相混合进料进行模拟, 因为有气体可以产生这部分所必须的热量, 所以不需要液体损耗自身热量。本文研究的膜生物反应器以天津某公司的产品为研究对象, 首先附上某种 8 英寸膜的性能参数, 如表 1 所示。

Table 1. UOF-4 type membrane module performance parameters table

表 1. UOF-4 型膜组件性能参数表

	指标	参数
1	纯水初始通量(25℃ 0.1 MPa)	6000 L/h~7000 L/h
2	产水浊度	≤0.2 NTU
3	悬浮物(SS)	≤1 mg/L
4	膜材质	PVDF (聚偏氟乙烯)
5	中空纤维内径	0.6 mm
6	中空纤维外径	1.1 mm
7	纤维粘接材料	环氧树脂

Continued

8	外壳材料	UPVC
9	膜表面积	40 m ²
10	切割分子量/截留孔径	0.03 μm
11	最大进水压力	0.3 MPa
12	最大跨膜压差	0.15 MPa
13	使用温度范围	5℃~45℃
14	酸碱度范围	pH 2~10
15	运行方式	全量过滤或错流过滤
16	最大反洗水流量	3000 L/h
17	八吋膜直径	203 mm

2. 基于 CFD 方法和 Fluent 软件的单根中空纤维膜丝管模型

2.1. 单根中空纤维膜丝管的模型建立、网格划分和边界条件设置

如图 1 表示使用 ICEM CFD 前处理器所建立的单根中空纤维式渗透汽化膜丝管的几何模型, 由于本文中膜丝管的运行方式是外压式的, 所以当 MBR 系统运行时, 污水从管壁侧面的微孔流入, 而污水中的杂质从膜丝管的两端流出, 这样就达到了过滤污水的效果了。

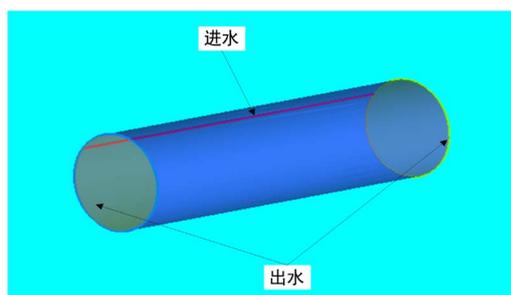


Figure 1. Geometric model of single hollow fiber membrane filament
图 1. 单根中空纤维膜丝几何模型

因为在 FLUENT 求解器计算网格文件时是以网格为单位元进行计算的, 所以接下来对该几何模型进行网格划分, 在 ICEM CFD 中网格划分有结构化网格划分和非结构化网格划分两种[2], 这里因为中空纤维管的质量分布均匀, 所以我们采用结构化网格划分方法[3], 其中对圆形部分采用 O 型切分。如图 2 所示的网格文件是我们最终的划分结果, 如图 3 所示为网格质量图, 网格质量的高低会影响求解器的计算, 如果网格质量太低的话, 那么在求解器中会出现不收敛的情况, 一般来说网格质量越接近于 1 说明网格质量越好, 从图 3 中我们能观察到最小网格质量是 0.733, 所以该模型的网格质量基本符合要求。

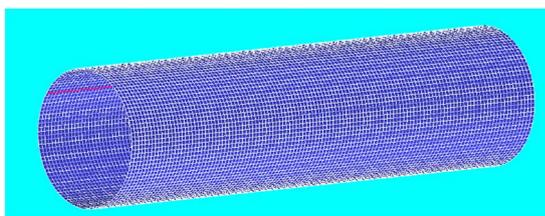


Figure 2. Single filamentous mesh file
图 2. 单根膜丝的网格文件

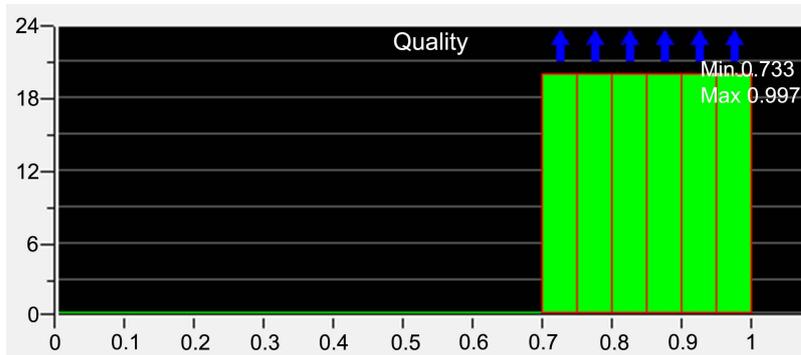


Figure 3. Grid quality diagram

图 3. 网格质量图

2.2. FLUENT 求解器对单根中空纤维膜丝管模型网格文件的计算

将网格文件导入 FLUENT 求解器, 首先检查网格质量, 保证最小体积不为负数, 然后开始准备设置初始条件等预处理操作。这里我们选择基于压力稳态的求解器[4], 并设置重力加速度 -9.8 。因为这里水的流速较低, 所以我们选择层流模型[5]。然后我们导入流体材料, 由于这里讨论的是中空纤维膜纯水过滤研究, 所以我们只导入水这种材料即可, 之后设置流体区域并打开多空介质模型。最后设置进出口边界条件, 这里我们设置速度为入口边界条件, 出口边界条件为压力出口, 到这里为止设置初始条件等预处理操作基本完成, 下面选择求解算法进行求解计算。

这里算法我们选择压力-速度耦合算法模型[6], 其中梯度我们选择基于单元体的最小二乘法, 压力选择迭代法, 动量方程选择一阶迎风格式的。然后设置残差阈值并初始化, 最后设置最大迭代次数 500 次, 开始计算。图 4 所示为求解器计算的残差曲线图, 残差在数理统计中是指实际观察值与估计值(拟合值)之间的差, 其中红色、绿色和黄色的残差曲线分别代表三维空间中 x、y、z 三个方向的速度残差情况, 白色残差曲线代表求解器连续性情况, 随着它们的残差减小, 则求解器的计算结果就越精确, 我们可以将残差看作误差的观测值。从图中我们不难发现当迭代到 32 次时求解器达到收敛自动停计算, 即求解结束。

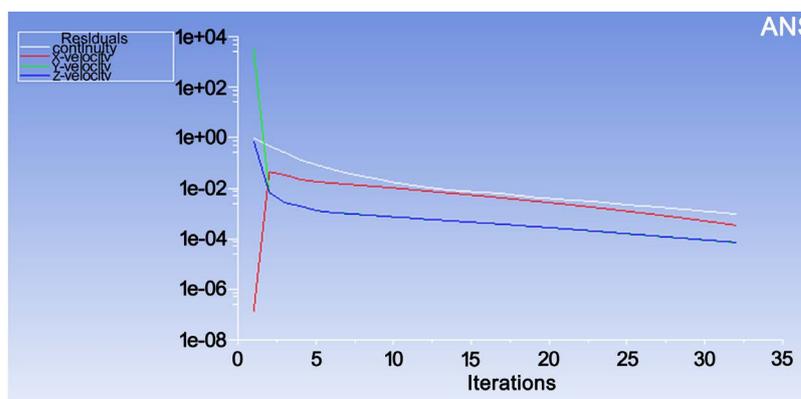


Figure 4. Residual curve

图 4. 残差曲线

3. 仿真结果及分析

我们假设当二维管道的管壁流动时, 膜通量在中空纤维反渗透膜组件中的扩散是整体均匀的。由于要考虑到壳侧的空隙率, 因此管与壳侧之间 0.356 mm 厚的多孔膜面积不可忽略。同时, 利用微扰法研究

管壁雷诺数较小的二维通道内的流体流动[7], 我们知道如果管壁雷诺数比较小, 流体的活动基本不受渗透的干扰, 通道内的流动特性接近 HaGe-Poisson 流。本文中, 管壁雷诺数总是 0.08 的量级中心, 所以可以保证所求轴向速度分布曲线的正确性。但是, 管壁雷诺数不能完全决定管壳轴向速度分布, 依此来判断的速度分布会出现一定的误差, 影响轴向速度的另一个重要因素是渗透率[8], 所以, 如果要完全获取截面的上游和下游的轴向分布, 就必须匹配上液面和管壁上相对应的渗透率。

考虑到 H 型壳侧空隙的 CFD 模拟和分析模型获得的沿膜丝长度的流量分布不均匀性, 图 5 所示为局部通量仿真图, 任何局部通量的相对偏差应在 $\pm 12\%$ 之内, 并且壳侧的空隙率为 0.35。通量分布在 0.7 和 0.9 的平均偏差分别为 1.67%和 1.25%。

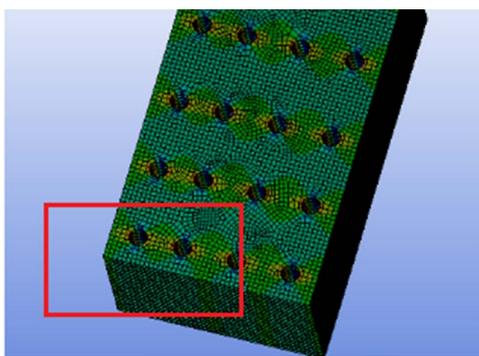


Figure 5. Local simulation

图 5. 局部仿真

图 6 和图 7 所示为单根纤维膜丝管内部的轴向仿真示意图, 从左至右, 当膜丝的渗透系数从 $4.00 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 增加至 $4.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 时, 能量利用率由 87.0%下降到 52.0%, 膜阻力加大时, 膜渗透系数会降低, 膜丝渗透分布的不均匀性会影响到膜丝管的通量分布特性, 即膜分布越均匀, 通量分布越均匀, 通量分布越均匀, 则单根中空纤维膜丝管的能源使用效率越高。

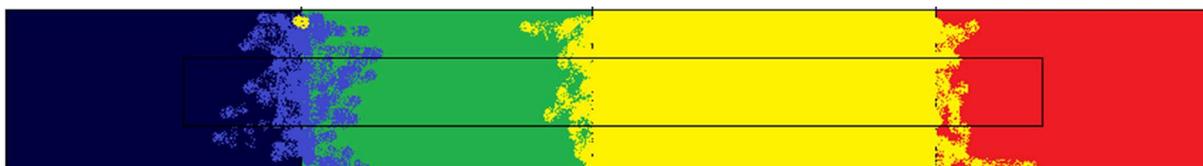


Figure 6. Internal axial simulation

图 6. 内部轴向仿真

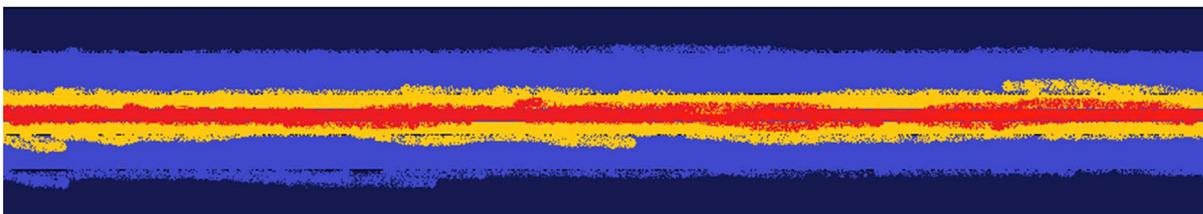


Figure 7. Internal axial simulation

图 7. 内部轴向仿真

4. 结论

本文利用 Fluent 软件建立了单根中空纤维膜丝管的仿真模型, 划分了仿真模型的网格, 设置了模型

的边界条件。轴向仿真了单根中空纤维膜丝管 CFD 模型, 分析研究了膜丝管的膜通量分布特性, 仿真结果证实, 当加大膜丝管内某一部分的膜通量时, 该部位膜丝的高通透指数也会增加, 从而使单根中空纤维膜丝管产生贯穿整体的跨膜压差, 这一压强差会导致膜丝管通量的不均匀分布, 膜通量的不均匀分布会导致膜丝管的通透性降低, 从而影响单根中空纤维膜丝管的能源使用效率。

基金项目

国家自然科学基金(51378350); 国家青年科学基金(50808130)。

参考文献

- [1] 胡小佳. 污水处理厂 MBR 工艺的应用分析[J]. 中国设备工程, 2018(14): 131-133.
- [2] Vergine, P., Salerno, C., Berardi, G. and Pollice, A. (2018) Sludge Cake and Biofilm Formation as Valuable Tools in Wastewater Treatment by Coupling Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) with Self Forming Dynamic Membrane BioReactors (SFD-MBR). *Bioresource Technology*, **268**, 121-127.
- [3] Wang, F. and Lin, F. (2018) Monitoring System for MBR Sewage Disposal Equipment Based on Image Recognition.
- [4] 白鹏伟. 改进的空间索引算法在海量遥感数据存储平台上的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2018: 23-26.
- [5] 王莉娜, 王春辉, 种法国. 低渗透油田采出水 OD-MBR 生物膜处理技术研究[J]. 石油和化工设备, 2018, 21(8): 103-105.
- [6] 刘丰源, 辛嘉英. 膜生物反应器在污水处理中的应用研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2018, 34(4): 412-417.
- [7] 毋海燕. 膜生物反应器中膜污染问题的研究新进展[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 169-172 + 19-20.
- [8] 李云, 蒋进元, 白璐, 戴建坤. 大理某 MBR 城镇污水处理厂技术诊断及优化分析[J]. 给水排水, 2018, 54(8): 59-62.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: csa@hanspub.org