

# 浸没式中空纤维膜通量分布特性分析

关欢欢<sup>1</sup>, 王丽<sup>1</sup>, 魏来<sup>1</sup>, 仲崇方<sup>1</sup>, 张颖<sup>1</sup>,  
车淑娟<sup>1</sup>, 俞开昌<sup>1\*</sup>, 黄霞<sup>2</sup>

(1. 北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 通量分布特性是膜材料从理论走向应用的核心支撑, 本研究综合运用理论建模、计算流体力学(CFD)和实验测试三种方法研究浸没式中空纤维膜的通量分布特性, 以为膜产品的设计、开发和运行等提供理论依据。首先依据流体力学理论建立膜丝内部通量分布的简化计算模型; 然后采用 CFD 方法, 获得膜丝内部压力场分布; 最后通过实验方法, 从抽吸方式、平均通量及渗透阻力三个方面, 对膜丝内部通量分布进行实测。结果表明, 简化计算模型与 CFD 流场模拟和实验测试结果相互印证, 规律及结论具有统一性, 验证了计算模型的有效性。主要得出以下结论: 膜丝沿长度方向抽吸存在通量分布的不均匀性, 且随距离增大, 局部通量逐渐降低; 双端抽吸方式优于单端抽吸, 首次通过 CFD 及实验测试方法验证双端抽吸下存在“突跃区域”; 在相同条件下, 以 PVDF 材质为代表的大渗透阻力超滤膜通量分布均匀性优于小渗透阻力微滤膜, 但其阻力损失也更大。

**关键词:** 流体力学; 计算模型; CFD; 通量分布; 渗透阻力

**中图分类号:** TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2026)01-0048-08

**doi:** 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2026.01.005

中空纤维超/微滤膜因其高装填密度、高运行通量、可自支撑等优势<sup>[1]</sup>, 广泛应用于给水处理、污水处理、海水淡化预处理及膜蒸馏等领域<sup>[2-3]</sup>。但中空纤维膜本身具有一定特性, 如在长度方向上通量分布不均, 而影响通量不均的因素包括膜丝内外径、膜层阻力、通量大小、膜丝内部光滑度等。因此, 国内外众多学者采用理论建模、实验研究等方法开展了中空纤维膜通量分布的研究。

Chang 和 Fane 等<sup>[4-6]</sup>是最早研究浸没式中空纤维膜内流体流动和通量分布的学者, 通过理论模型建立了通量分布与纤维长度、内径、膜固有阻力的关系, 具有重要的研究意义。Yoon 等<sup>[7-8]</sup>在以上研究

的基础上, 综合考虑膜丝内部流体流动、外部曝气条件等的影响, 提出了通量分布不均匀系数的概念, 并对膜丝直径、长度等提出了一定的可参考参数。李贤辉、李建新等<sup>[9-12]</sup>以纯粹的理论分析为依据建立理论模型, 将纤维长度、内径与平均通量关联, 并提出了实验验证方法, 结果表明模型预测结果与实验数据非常吻合。Liu 等<sup>[13-14]</sup>以 Fluent 为工具, 建立模拟模型, 得到了一些传统实验和理论分析不容易了解的参数的影响规律, 如冗余度、纤维振动轨迹、曝气气泡大小等。杨丹<sup>[15]</sup>以计算流体力学(CFD)方法研究了单根中空纤维膜丝及膜组件的水力学特征, 为膜生物反应器(MBR)优化设计提供了

收稿日期: 2025-08-29; 修改稿收到日期: 2025-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目“城市污水高品质再生关键技术及装备”(2022YFC3203101)

第一作者简介: 关欢欢(1991-), 女, 河北石家庄人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为膜产品开发及污水处理。\* 通讯作者, E-mail: yukaichang@126.com

引用本文: 关欢欢, 王丽, 魏来, 等. 浸没式中空纤维膜通量分布特性分析[J]. 膜科学与技术, 2026, 46(1): 48-55.

Citation: Guan H H, Wang L, Wei L, et al. Analysis of flux distribution characteristics in submerged hollow fiber membranes[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2026, 46(1): 48-55.

一定的理论参考。

本研究基于上述研究,综合理论建模、CFD 和实验测试三种方法对浸没式中空纤维膜通量分布特性进行分析讨论。首先依据流体力学基本理论建立中空纤维膜丝内部通量分布的简化计算模型,然后采用 CFD 方法验证模型的准确性,最后通过实验手段,验证简化计算模型及流场模拟的准确性。实验从抽吸方式、平均通量及渗透阻力三个方面进行分析并获得相关结论。

## 1 实验与方法

中空纤维超/微滤膜孔径范围一般在  $0.03 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ,所以从微观流动的角度对参数进行分析,膜孔中的流动方式接近于渗流,或者说是层流流动。简化来说,可以通过三种研究方法进行研究:1) 理论建模,即通过力学分析、流动分析和动量分析等,给定合适的模型假设,列出描述过程的物理和数学方程,然后通过输入参数、求解方程,最终得到一定适用范围的普适性结论和方程;2) 计算流体力学方法,即通过流场分析软件进行实体建模,并模拟计算,得到流场分布;3) 实验方法。本研究综合三种研究方法,将理论计算模型简化,并辅以 CFD 和实验方法验证模型的准确性。

### 1.1 计算模型

在浸没式膜装置系统如 MBR 技术中,中空纤维膜丝全部浸入水中,且在膜丝进行规则排丝条件下,每根膜丝周边水环境基本相同,所以可假设每根中空纤维为一独立的个体,其周边均被水包围;在膜池液位不变的条件下,中空纤维膜外表面压力则基本不变,可视为恒定值。

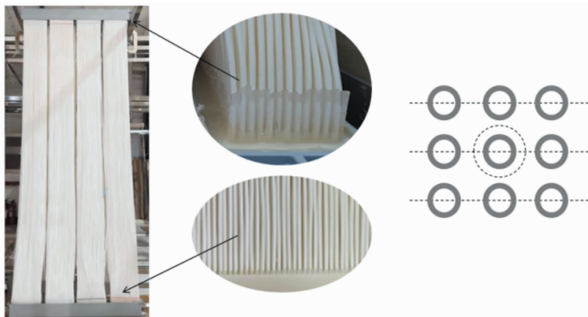


图 1 浸没式中空纤维膜排布方式

Fig. 1 Submerged hollow-fiber membrane fibers arrangement

建立浸没式单根中空纤维膜通量分布计算模

型;模型基于流体力学基本理论建立,联立达西定律,将膜过程和流动过程结合在一起,得到膜丝沿长度方向上的压力及通量分布趋势。总体建模思路为:采用微积分的思想,将一段膜丝均匀划分成  $n$  段,利用泊肃叶定律来计算膜丝沿长度方向上各段的压力损失,如下:

$$\Delta p_f = \rho \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

$$\lambda = f(Re) \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu} \quad (3)$$

式中: $\Delta p_f$  为压力损失,Pa;  $\lambda$  为摩擦系数;  $Re$  为雷诺数;  $l$  为膜丝长度,m;  $d$  为膜丝直径,m;  $v$  为流速,m/s;  $\rho$  为水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mu$  为水动力学黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。此压力损失计算公式对层流和紊流均适用,但需注意  $\lambda$  的求解:当  $Re < 2300$  时,处于层流状态,则  $\lambda = 64/Re$ ;当  $Re$  处于紊流区时,则需要根据  $Re$  的计算范围,采用布拉休斯或穆迪图法求解  $\lambda$ 。

首先设定膜丝进口压力  $p_0$  (膜丝外表面压力恒定),膜丝总产水量  $Q_{\text{设定}}$  (首次计算  $Q_{\text{设定}} = \text{平均通量} \times \text{膜面积}$ ),则根据式(4)~式(6)即可得到膜丝沿长度方向上各段的压力分布:

$$p_1 = p_0 \quad (4)$$

$$p_2 = p_1 - \rho \lambda \frac{l}{d} \frac{v_1^2}{2} \quad (5)$$

$$p_n = p_{n-1} - \rho \lambda \frac{l}{d} \frac{v_{n-1}^2}{2} \quad (6)$$

得到膜丝沿长度方向上各段的压力分布后,利用达西方程计算膜丝各段的通量分布:

$$J = \frac{\Delta p}{\mu R_m} \quad (7)$$

式中: $J$  为通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\Delta p$  为膜丝各段压力,Pa;  $\mu$  为水动力学黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $R_m$  为膜固有阻力, $1/\text{m}$ 。

得到膜丝各段的通量分布后,利用式(8)和式(9)计算得到各段的产水量并求和,将求和值  $Q_{\text{计算}}$  与膜丝设定产水量初始值  $Q_{\text{设定}}$  进行比较。

当  $Q_{\text{计算}}$  与  $Q_{\text{设定}}$  差值大于等于 0.001 时,采用  $Q_{\text{计算}}$  作为下一次计算的膜丝设定产水量初始值,进行迭代计算。

直到迭代计算到差值小于 0.001 时,认为计算结果符合要求,可停止迭代计算并输出计算结果。

$$Q = J \times S \quad (8)$$

$$Q_{\text{计算}} = \sum_{i=1}^n J \times S \quad (9)$$

式中： $Q_{\text{计算}}$  为模型计算产水量，L/h； $J$  为通量，L/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )； $S$  为各段膜丝面积， $\text{m}^2$ 。

模型具体计算过程如下：

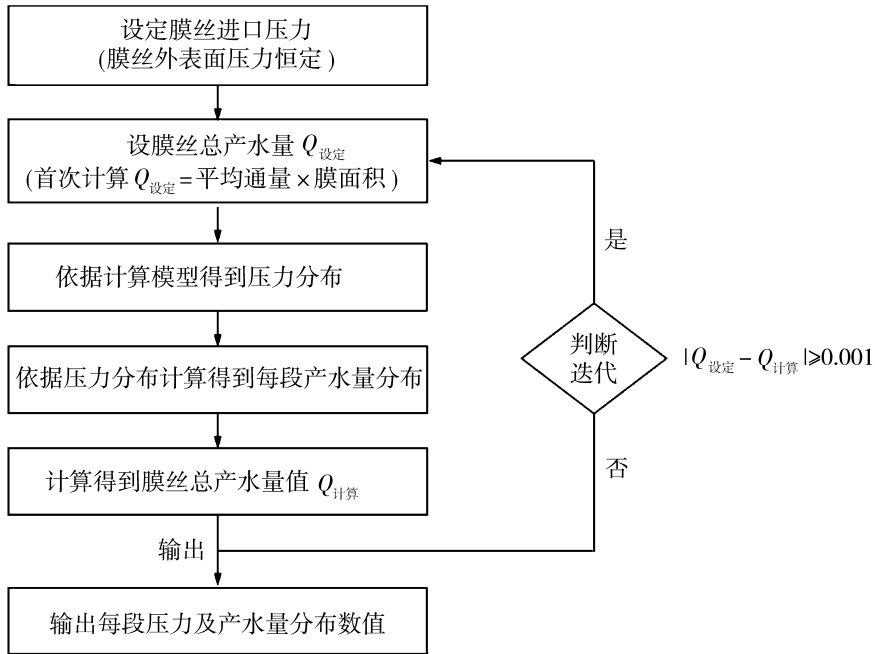


图 2 简化计算模型迭代计算过程示意图

Fig. 2 Iterative calculation process of the simplified model

### 1.2 CFD 模型

由 1.1 部分可知，浸没式中空纤维膜通量分布简化计算模型的核心在于膜内腔的压力场分布，使用 Fluent 软件对膜丝内部流动场及压力场分布特性进行模拟分析。由于中空纤维膜为多孔结构，在 Fluent 中采用多孔介质模型来模拟膜过滤层。图 3 展示了该模型的几何结构，其中进口处为多孔介质区域，出口处为流体流动区域。

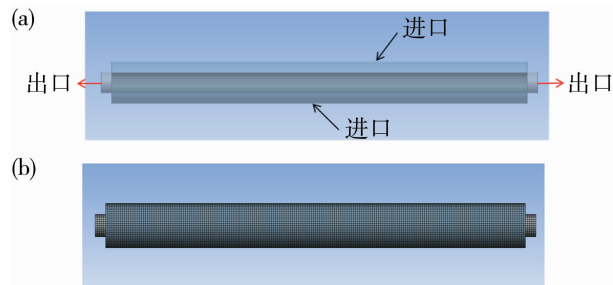


图 3 CFD 模型几何结构示意图：  
三维模型(a)；结构化网格(b)

Fig. 3 Schematic diagram of the CFD model geometry: three-dimensional model (a); structured grid (b)

为深入对比计算模型的有效性，分别在两个膜丝长度(200 mm、1 600 mm)下开展了流动场、压力

场模拟。CFD 建模的具体参数为：

1) 膜丝内/外径为 1.0 / 2.0 mm。

2) 多孔介质孔隙率为 0.8。

3) 黏性阻力系数根据膜丝固有阻力和膜层厚度计算得到：

$$D = R_m / \Delta n \quad (10)$$

式中： $D$  为黏性阻力系数， $1/\text{m}^2$ ； $R_m$  为膜丝固有阻力， $1/\text{m}$ ； $\Delta n$  为膜层厚度， $\text{m}$ 。

4) 由于膜孔内流动属于层流或渗流，流体流动主要受到黏性阻力作用，而惯性阻力作用非常小，因此在本模型中惯性阻力系数可忽略不计，设定为 0。

两个膜丝长度条件下的网格划分均采用结构化网格方法，网格数量分别为 94 800、200 800 个，平均单元质量均  $\geq 0.85$ 。模型选用标准  $K-\epsilon$ ，标准壁面函数；进口、出口均为压力边界条件，其中，进口表压为 0 kPa，出口表压为负压抽吸值；体积分数离散：Compressive；收敛判断条件为各项参数的残差小于  $10^{-3}$ 。基于以上设置，在双端抽吸、平均通量为  $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的条件下，分别对大渗透阻力超滤膜和小渗透阻力微滤膜进行膜丝内部流动场与压力场特性模拟。

### 1.3 实验装置

采用分割实验法,将中空纤维膜丝水平放置,分段抽吸,每段膜丝采用量杯封口,以此测试单根膜丝上的通量分布情况,实验装置如图 4 所示。采用两种抽吸方式进行:一种为单端抽吸,即一端设为死端,另一端以一定压力抽吸;另一种为双端抽吸,即两端均以一定的压力抽吸。实验以纯水为进水,所用膜丝由北京碧水源科技股份有限公司提供,膜材料为聚偏氟乙烯(PVDF),总长度为 1 640 mm,有

效过滤长度为 1 600 mm。准备两种渗透阻力的膜丝,一种为大渗透阻力的超滤膜丝,一种为小渗透阻力的微滤膜丝。配置蠕动泵作为抽吸泵,可任意调节恒定的出水流量值,以分析天平计量各段的产水流量,由此得到膜丝各段通量。

实验分别从抽吸方式、平均通量和渗透阻力三个方面开展,具体参数设置见表 1。所用不同渗透阻力的膜材料基本情况见表 2。表 1 和表 2 中渗透阻力值为纯水实验测得。

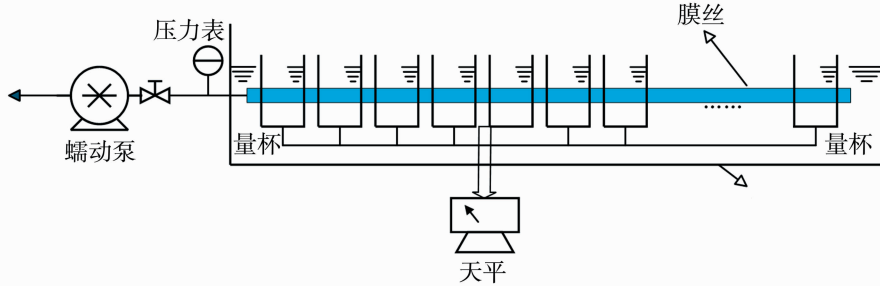


图 4 分割实验法实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup schematic for split-test method

表 1 膜丝通量分布实验测试参数

Table 1 Experimental parameters for membrane fibers flux distribution

序号	抽吸方式	平均通量/(L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	渗透阻力/m <sup>-1</sup>	序号	抽吸方式	平均通量/(L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	渗透阻力/m <sup>-1</sup>
1	单端	35	2.30×10 <sup>11</sup>	5	双端	25	2.30×10 <sup>11</sup>
2	单端	60	2.30×10 <sup>11</sup>	6	双端	50	2.30×10 <sup>11</sup>
3	双端	35	2.30×10 <sup>11</sup>	7	双端	35	1.28×10 <sup>11</sup>
4	双端	60	2.30×10 <sup>11</sup>	8	双端	60	1.28×10 <sup>11</sup>

表 2 不同渗透阻力膜丝基础参数

Table 2 Fundamental parameters of membrane fibers with varying filtration resistance

渗透阻力/m <sup>-1</sup>	种类	材料	内/外径/mm	孔径/μm	泡点/MPa	纯水通量/(L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
2.30×10 <sup>11</sup>	超滤膜	PVDF	1.0/2.0	0.03~0.08	0.25	1 800
1.28×10 <sup>11</sup>	微滤膜	PVDF	1.0/2.0	0.10~0.12	0.20	3 220

### 1.4 研究方法

本研究首先依据流体力学基本理论建立浸没式中空纤维膜丝内部通量分布简化计算模型;然后采用 CFD 模拟膜丝内部压力场分布特性并与简化计算模型进行对比,初步验证模型的有效性;最后开展实验研究,在不同抽吸方式、平均通量及渗透阻力下进行膜丝局部通量分布测试,通过对比实验与模型计算结果来最终确认简化计算模型的准确性。

透阻力微滤膜的膜丝内部流动特性 CFD 模拟结果见图 5。无论是超滤膜还是微滤膜,沿膜丝长度方向,均存在流速分布不均现象,且越靠近抽吸端,流速越大,膜丝中部位置出现局部流速为零值的现象,这是因为双端抽吸时一定会在膜丝中部出现对向压力拖拽的情况。此外,从 CFD 模拟结果来看,膜丝局部流速为零值的区域范围较小,约占整根膜丝的 1%~2%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 计算模型与 CFD 模拟结果对比

在双端抽吸且平均通量为 35 L/(m<sup>2</sup>·h)的条件下,长度为 200 mm 的大渗透阻力超滤膜和小渗

两种不同渗透阻力膜丝轴向流速分布如图 6 所示。进一步分析膜丝中部流速为零值的原因:考虑在双端抽吸条件下,膜丝区域两端存在大小相等且方向相反的两股抽吸力,随着远离抽吸端,两股抽吸力逐步减小,但其相互作用逐步加强,最终在膜丝中

间位置,两股方向相反的抽吸力相互抵消,致使膜丝局部流速为零。

为验证简化计算模型的有效性,在膜丝长度为 1 600 mm 下,CFD 模拟不同渗透阻力的超滤/微滤膜丝内部压力变化特性与计算模型值对比情况见

图 7。可以看出,计算模型值与 CFD 模拟的压力场非常接近且趋势完全相同,证明了简化计算模型的有效性。另外从图中结果还可以看出,在操作条件完全相同时,微滤膜的渗透阻力损失要小于超滤膜。

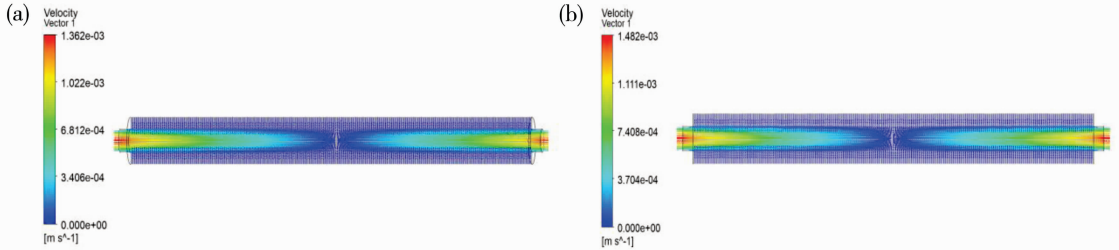


图 5 CDF 模拟超滤(a)和微滤(b)膜丝内部流动特性

Fig. 5 CFD simulation of internal flow characteristics in UF (a) and MF (b) membrane fibers

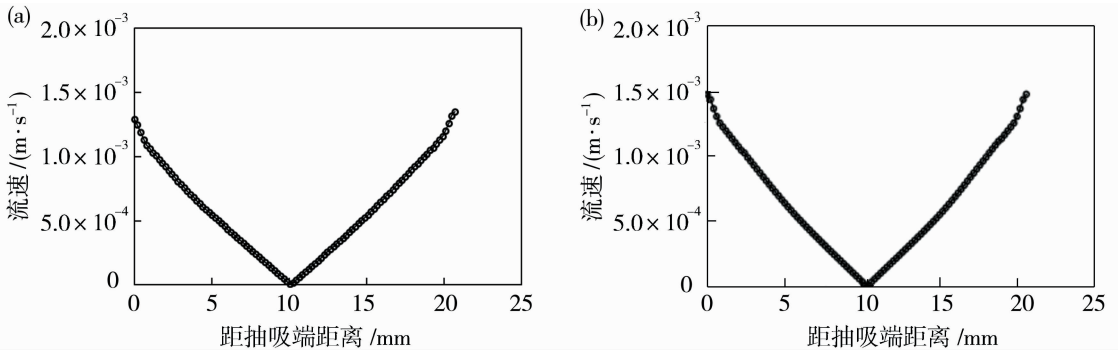


图 6 超滤(a)和微滤(b)膜丝轴向流速分布

Fig. 6 Axial flow velocity distribution in UF (a) and MF (b) membrane fibers

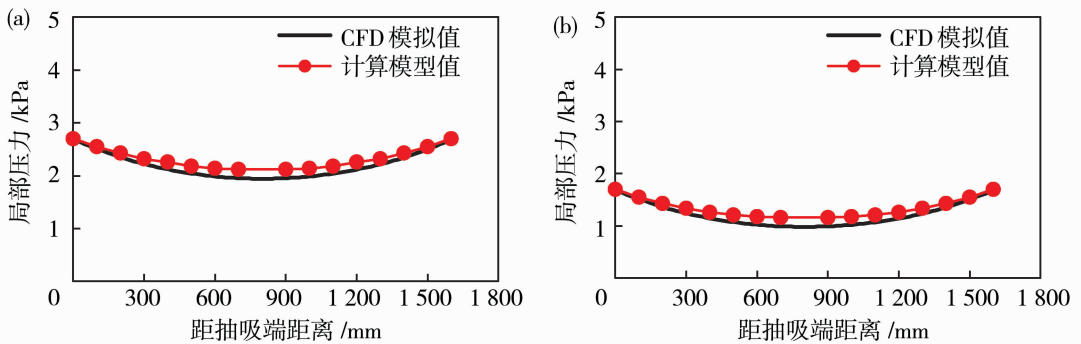


图 7 CFD 模拟超滤(a)和微滤(b)膜丝内部压力分布特性结果

Fig. 7 CFD-simulated internal pressure distribution in UF (a) and MF (b) membrane fibers

## 2.2 计算模型与实验测试结果对比

### 2.2.1 抽吸方式对通量分布的影响

分别在平均通量为 35 L/(m<sup>2</sup>·h)和 60 L/(m<sup>2</sup>·h)下,对大渗透阻力的超滤膜进行单端抽吸和双端抽吸实验,获得的通量分布情况如图 8 所示。

从以上结果可以看出,计算模型值与实验测

试值具有良好的匹配性,计算模型值与实验值的误差均在 10% 以内,验证了计算模型的准确性。同时,实验结果还表明,沿膜丝长度方向存在通量分布不均匀的现象,且随着距抽吸端距离的增大,局部通量逐渐降低,这也与 2.1 节中 CFD 的模拟结果一致。

进一步分析,图 8(a)中,在平均通量为  $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  条件下,单端抽吸时,局部通量从抽吸端附近的  $66 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  急剧下降至死端附近的  $19 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,局部最大与最小通量的差值为  $47 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,这主要是因为单端抽吸时膜丝纤维腔内的驱动压力从抽吸端到死端逐渐下降。双端抽吸时,局部通量从抽吸端的  $52 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $46 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  逐步下降至中间部分的  $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,局

部最大与最小通量的差值为  $22 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。双端抽吸下的局部通量差值显著低于单端抽吸,这意味着沿膜丝长度方向的通量分布在相同操作条件下,双端抽吸要比单端抽吸更为均匀。

图 8(b)中,在平均通量为  $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,单端抽吸时局部最大与最小通量差值为  $74 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,双端抽吸时则为  $25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,亦表明了双端抽吸下膜丝通量分布更为均匀。

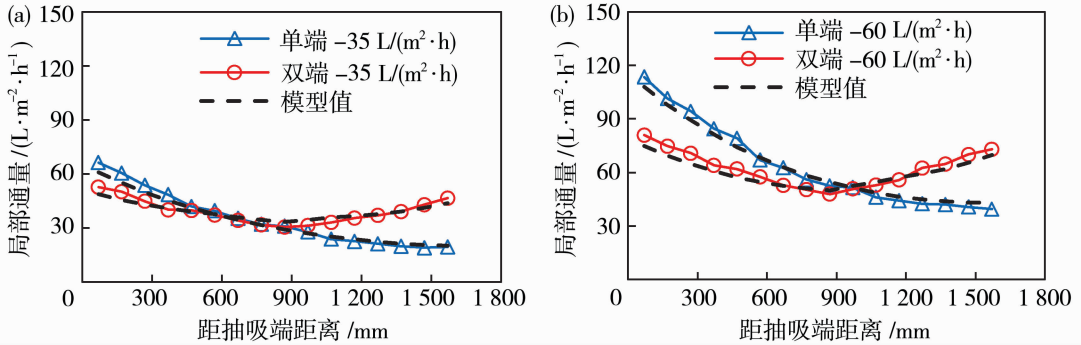


图 8 不同抽吸方式下膜丝通量分布情况

Fig. 8 Membrane flux distribution characteristics under different suction modes

### 2.2.2 平均通量对通量分布的影响

为进一步验证计算模型的准确性,同时更好地了解双端抽吸下膜丝通量分布情况,探讨了平均通量对膜丝局部通量分布的影响,不同平均通量下的大渗透阻力超滤膜丝通量分布曲线见图 9。

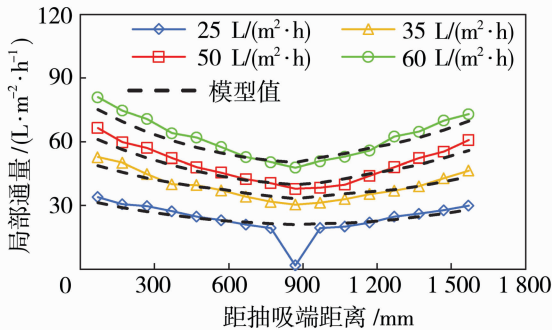


图 9 不同平均通量下膜丝局部通量分布情况

Fig. 9 Membrane flux distribution characteristics under different average fluxes

由图 9 可知,计算模型值与实验测试值基本规律相同,具有较好的一致性。同时随着平均通量从  $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  降至  $25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,膜丝内所有局部通量均有所降低,且局部最大和最小通量的差值从  $25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  降至  $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,表明了随着平均通量的减小,沿膜丝长度方向的局部通量分布趋于均匀。

当平均通量为  $25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,局部通量出现“突跃区域”。在其他平均通量下虽未观察到此现象,但分析其主要原因是实验设计点位未能恰好落在“突跃区域”导致的。实际上,通过 2.1 节 CFD 模拟结果可以看出,双端抽吸时一定会在膜丝中部出现对向压力拖拽的情况,也一定会出现局部流速为零的情况,即实验的“突跃区域”,但因“突跃区域”的范围较小,所以在简化计算模型中忽略了该部分。

### 2.2.3 渗透阻力对通量分布的影响

采用不同渗透阻力的膜丝进行通量分布实验测试,结果表明计算模型与实验测试结果匹配性良好,对比规律具有一致性。在双端抽吸,平均通量为  $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的条件下,所测大渗透阻力超滤膜与小渗透阻力微滤膜的局部通量分布情况如图 10 所示。

图 10(a)中,当平均通量为  $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,虽然两种膜丝基本参数存在差异,但局部通量分布非常相近;在图 10(b)中,当平均通量为  $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,超微膜表现出局部通量更均匀的趋势,但从 2.1 节结果来看,虽然在平均通量  $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时超滤膜表现出更均匀的趋势,但同样地其阻力损失也更大。

也就是说,在相同条件下,以 PVDF 材质为代

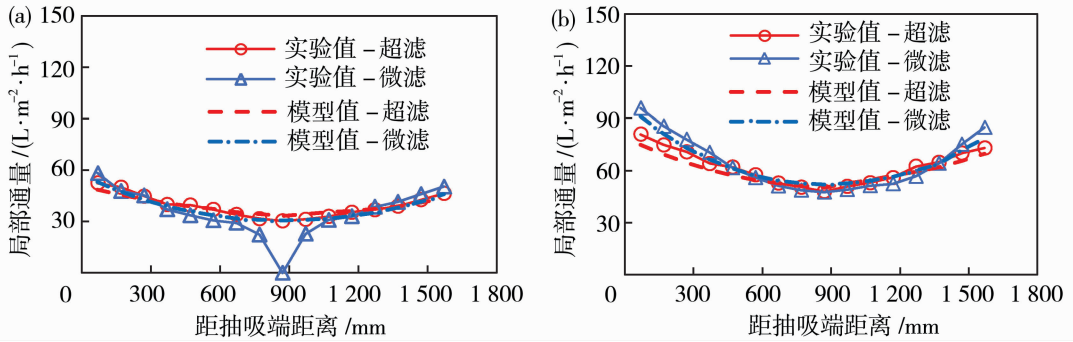


图 10 超滤膜与微滤膜通量分布情况对比: 35 L/(m<sup>2</sup>·h)(a); 60 L/(m<sup>2</sup>·h)(b)

Fig. 10 Comparison of flux distribution between UF and MF membranes; 35 L/(m<sup>2</sup>·h) (a); 60 L/(m<sup>2</sup>·h) (b)

表的大渗透阻力膜通量分布均匀性要优于小渗透阻力膜,但大渗透阻力膜的阻力损失也要大于小渗透阻力膜。当两种膜获得相同产水量时,大渗透阻力膜需要付出更高的抽吸压力,所以在应用过程中,并不是膜渗透阻力越大越好,而是要根据过滤水质和应用场景选择合适的膜材料,以平衡过滤和压损之间的关系。

### 2.3 计算模型的应用

计算模型建立的目的是要服务于实际应用,本研究建立的浸没式中空纤维膜通量分布简化计算模型可应用于浸没式中空纤维膜通量分布特性分析。

中空纤维膜通量分布特性分析是中空纤维膜材料应用的起点,以简化计算模型为基础,可获得不同压力下的膜纤维产水量,膜纤维长度/内外径的影响规律,再结合装填密度、膜纤维松弛度及排布方式、进水方式和曝气结构、元件型式、水质等影响因素,即可快速计算并预测膜纤维、膜元件、膜组器、膜系统性能,为膜产品的设计、开发,甚至运行等提供基础计算参数和依据。

## 3 结论

1) 综合理论建模、CFD 和实验测试三种手段建立了浸没式中空纤维膜通量分布特性研究方法,依据流体力学基本理论建立了膜丝通量分布的简化计算模型,并进行 CFD 模拟和实验测试,简化计算模型与 CFD 流场模拟和实验测试结果相互印证,规律及结论具有统一性,可依据简化计算模型对中空纤维膜进行相关计算和特性分析。

2) 膜丝沿长度方向抽吸存在通量分布的不均匀性,且随着距离的增大,局部通量逐渐降低;双端抽吸的方式优于单端抽吸,并首次通过 CFD 及实验测试方法验证双端抽吸下存在“突跃区域”。

3) 在相同条件下,以 PVDF 材质为代表的大渗透阻力膜通量分布均匀性要优于小渗透阻力膜,但其阻力损失也要更大,因此在应用过程中,应根据过滤水质和应用场景选择合适的膜材料以平衡过滤和压损之间的关系。

### 参考文献:

- [1] Yang X, Wang R, Fane A G, *et al.* Membrane module design and dynamic shear-induced techniques to enhance liquid separation by hollow fiber modules: A review[J]. *Desalin Water Treat*, 2013, 51(16/17/18): 3604-3627.
- [2] Mo J, Xiao L, Yang Y, *et al.* Hydrophobicity recovery in membrane distillation through water flushing: Effect of uneven wetting distribution phenomenon along hollow fiber membrane[J]. *J Membr Sci*, 2025, 718: 123659.
- [3] Liu X, Xiao C, Deng H, *et al.* An experimental and modeling investigation of the behaviors of solution in fluoropolymers hollow fiber membranes (HFMs)[J]. *J Membr Sci*, 2023, 671:121421.
- [4] Chang S, Fane A G. The effect of fibre diameter on filtration and flux distribution-relevance to submerged hollow fibre modules[J]. *J Membr Sci*, 2001, 184(2): 221-231.
- [5] Fane A G, Chang S, Chardon E. Submerged hollow fibre membrane module — Design options and operational considerations[J]. *Desalination*, 2002, 146 (146): 231-236.
- [6] Chang S, Fane A G, Vigneswaran S. Modeling and optimizing submerged hollow fiber membrane modules [J]. *AIChE J*, 2002, 48(10):2203-2212.
- [7] Yoon S H, Kim H S, Yeom I T. Optimization model of submerged hollow fiber membrane modules [J]. *J Membr Sci*, 2004, 234(1/2): 147-156.

- [8] Yoon S H, Lee S, Yeom I T. Experimental verification of pressure drop models in hollow fiber membrane[J]. *J Membr Sci*, 2008, 310(1/2):7-12.
- [9] Li X, Li J, Wang J, *et al.* Experimental investigation of local flux distribution and fouling behavior in double-end and dead-end submerged hollow fiber membrane modules[J]. *J Membr Sci*, 2014, 453:18-26.
- [10] Li X, Li J, Wang J, *et al.* A filtration model for prediction of local flux distribution and optimization of submerged hollow fiber membrane module[J]. *AIChE J*, 2015, 61(12):4377-4386.
- [11] 李建新, 李贤辉, 王 虹, 等. 浸没式中空纤维膜过滤点通量分布数学模拟[J]. *膜科学与技术*, 2015, 35(5):1-5.
- [12] Li X, Mo Y, Li J, *et al.* In-situ monitoring techniques for membrane fouling and local filtration characteristics in hollow fiber membrane processes: A critical review [J]. *J Membr Sci*, 2017, 528: 187-200.
- [13] Liu X, Wang Y, Waite T D, *et al.* Fluid Structure Interaction analysis of lateral fibre movement in submerged membrane reactors [J]. *J Membr Sci*, 2016, 504: 240-250.
- [14] Liu X, Wang Y, Waite T D, *et al.* Numerical simulations of impact of membrane module design variables on aeration patterns in membrane bioreactors [J]. *J Membr Sci*, 2016: 201-213.
- [15] 杨 丹. 基于 CFD 的 PVDF 中空纤维膜性能研究及机理分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.

## Analysis of flux distribution characteristics in submerged hollow fiber membranes

GUAN Huanhuan<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, WEI Lai<sup>1</sup>, ZHONG Chongfang<sup>1</sup>,  
ZHANG Ying<sup>1</sup>, CHE Shujuan<sup>1</sup>, YU Kaichang<sup>1</sup>, HUANG Xia<sup>2</sup>

(1. Beijing Bishuiyuan Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China;  
2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The flux distribution characteristics are the core support for the transition of membrane materials from theory to application. By comprehensively applying three approaches — theoretical modeling, computational fluid dynamics (CFD) and experimental testing, this study investigated the flux distribution characteristics of submerged hollow fiber membranes, with the aim of providing a theoretical basis for the design, development and operation of membrane products. First, a simplified calculation model for the flux distribution inside membrane fibers was established based on fluid mechanics theory. Then, CFD was employed to obtain the pressure field distribution inside the fibers. Finally, experimental methods were used to measure the flux distribution within the fibers from three aspects: suction mode, average flux and permeation resistance. The results showed that the simplified calculation model was consistent with both CFD flow field simulations and experimental test results, confirming the model's validity and demonstrating unified patterns and conclusions. The main findings include: Along the length of the membrane fiber, flux distribution was non-uniform during suction, and the local flux gradually decreased with increasing distance. Double-end suction was superior to single-end suction, and for the first time, CFD and experimental tests confirmed the existence of a “jump region” under double-end suction. Under identical conditions, ultrafiltration membranes with high permeation resistance (represented by PVDF material) exhibited better flux distribution uniformity compared to microfiltration membranes with low permeation resistance, though they also suffered from greater resistance loss.

**Key words:** fluid mechanics; calculation model; CFD; flux distribution; permeation resistance