

## 城镇水系统研究与应用

田伶, 李斌, 林春儿, 等. 反渗透膜流道设计的性能优化与结垢机理分析[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 138-147.

TIAN L, LI B, LIN C E, et al. Performance optimization and fouling mechanism analysis of RO membrane flow channel design [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 138-147.

## 反渗透膜流道设计的性能优化与结垢机理分析

田伶<sup>1</sup>, 李斌<sup>1,2</sup>, 林春儿<sup>1</sup>, 闫嘉超<sup>1</sup>, 刘红星<sup>1,2,\*</sup>, 褚雯霄<sup>3</sup>

(1. 宁波方太厨具有限公司, 浙江宁波 315336; 2. 健康智慧厨房浙江省工程研究中心, 浙江宁波 315336; 3. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西西安 710049)

**摘要** 【目的】 在传统反渗透(RO)膜系统中, 结垢问题一直是限制其性能和经济效益的主要挑战。研究旨在优化反渗透膜的流道设计, 并深入分析结垢机理, 以提高膜组件的性能, 减少结垢。【方法】 通过建立三维反渗透膜流道计算模型, 对比单层流道与新型阶梯流道在水力学性能上的差异, 并分析阶梯膜的进口方式对膜渗透性能的影响。同时, 进行长期过滤试验和结垢称重, 验证仿真模型的准确性。研究结果表明, 阶梯单侧流方案具有更好的流动均匀性, 并有效减小了浓差极化效应。阶梯侧流膜在阶梯后段流道高度减小, 流速升高, 对后段的冲刷作用增强, 可降低此区域的结垢量。【结果】 阶梯单侧流方案相比于常规侧流膜实测单位面积结垢量减少 25%, 极大地提高了膜的使用寿命。进口总流量为 3.2 L/min, 膜前压为 0.62 MPa 条件下, 阶梯流道与单层流道相比, 总产水量提升 18%, 脱盐率提升 2%。【结论】 阶梯单侧进口方案平均流速显著提高, 降低膜污染速率, 单位面积结垢量低, 进出口压差相对较低, 综合评估产水率和经济性, 阶梯单侧膜流道性能最优。

**关键词** 反渗透膜 流道设计 性能优化 结垢机理 回收率

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)06-0138-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.017

## Performance Optimization and Fouling Mechanism Analysis of RO Membrane Flow Channel Design

TIAN Ling<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1,2</sup>, LIN Chuner<sup>1</sup>, YAN Jiachao<sup>1</sup>, LIU Hongxing<sup>1,2,\*</sup>, CHU Wenxiao<sup>3</sup>

(1. Ningbo Fotile Kitchen Appliances Co., Ltd., Ningbo 315336, China;

2. Zhejiang Engineering Research Center for Health Smart Kitchen, Ningbo 315336, China;

3. Key Laboratory of Thermal-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** [Objective] In traditional reverse osmosis (RO) membrane systems, scaling has always been a major challenge limiting their performance and economic efficiency. The aim of this study is to optimize the flow channel design of RO membranes and analyze fouling mechanisms, in order to improve the performance of membrane module and reduce fouling. [Methods] By establishing a three-dimensional computational model of RO membrane flow channels, the differences in hydraulic performance between single-layer channels and the new step-side flow channels are compared, and the influence of the inlet method of step-side membranes on membrane permeability was analyzed. Simultaneously, long-term filtration tests and fouling weighing are conducted to validate the accuracy of the simulation model. [Results] The step-side flow scheme exhibits better flow uniformity and effectively reduced concentration polarization effects. The stair-step flow channel of the membrane reduced in height and increases in velocity in the post-segment,

[收稿日期] 2023-12-13

[基金项目] 国家自然科学基金(52206113)

[作者简介] 田伶(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为膜科学技术, E-mail: tianlinga@fotile.com。

[通信作者] 刘红星, E-mail: liuhxa@fotile.com。

leading to enhanced the flushing effect and reducing fouling in this region. Compared to conventional side flow membranes, the step-side flow scheme in the experimental setup reduced fouling mass per unit area by 25%, greatly improving the membrane's lifespan. Compared to the single-layer flow channel, the step-side flow channel achieved an 18% increase in total water production and a 2% increase in desalination rate under the conditions of a total inlet flow rate of 3.2 L/min and a membrane feed pressure of 0.62 MPa.

[ **Conclusion** ] The single-side inlet scheme in the stepped channel yields a higher recovery rate, significantly improved uniformity and average flow velocity, reducing the rate of membrane contamination. With a lower scaling per unit area and relatively lower inlet and outlet pressure differences, the stepped single-side membrane channel offers optimal performance in terms of water production rate and cost-effectiveness.

**Keywords** RO membrane flow channel design performance optimization fouling mechanism recovery rate

反渗透技术是现代水处理领域的核心技术之一,通过半透膜实现高效率的水质净化,能够去除水中的微粒、重金属离子、有机物质和微生物等。这项技术因其显著的脱盐率和广泛的应用范围,如家用净水、工业废水处理和海水淡化,已成为水处理技术的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。在家用净水器中,反渗透膜通常采用螺旋卷绕式设计,以实现高效的利用空间和紧凑的结构。这种设计不仅增大了单位空间内的膜面积,还大幅减少了整体机器体积,使其更适合家庭使用。螺旋卷绕式膜组件的主要组成部分包括导流网、反渗透膜片、导流布和中心管,这些设计优化了膜组件的结构,提高了过滤效率。随着科技的发展,反渗透膜组件的内部结构优化成为研究的热点。优化的目标是减少膜面积上的污染,延长膜的使用寿命,从而提高整体的水处理效率<sup>[4-7]</sup>。特别是对进水流道的改进,已被证明能显著影响膜的水力学行为,如流速和压降,以及减少边界层浓差极化和膜污染<sup>[8-10]</sup>。《净水机水效限定值及水效等级》(GB 34914—2021)为净水机的性能设定了具体的要求。例如,1级水效标准要求净水产水率达到或超过65%,并且额定的总净水量不低于4 000 L。这一标准为家用净水器的设计和性能提供了明确的指导,

促进了技术的优化和升级<sup>[11]</sup>。

反渗透膜在各种水处理和分离过程中起着关键作用。然而,结垢问题一直是限制其性能的一个重要因素。为了提高过滤膜的使用寿命和效率,流道设计起着至关重要的作用<sup>[12]</sup>。计算流体力学(CFD)作为一种强大的模拟工具,因其高度的灵活性和准确性,已被广泛应用于研究反渗透膜流道的流体力学行为。CFD模拟不受试验条件的限制,能够提供详细的流体流动和传质过程的信息<sup>[13-18]</sup>。本研究旨在通过数值模拟和试验研究,对比分析传统膜流道与阶梯侧流膜流道在水力学性能上的差异,并探讨了这些差异对膜组件性能的影响,并深入分析结垢机理,以提高膜组件的性能。这项研究将有助于改善反渗透膜在水处理领域的应用,提高其水处理效率和可持续性。

## 1 模型与方法

### 1.1 物理模型

为减少滤芯体积,反渗透膜一般按照螺旋线形式卷制,为了便于性能分析,将流道展开,并按照实际模型建立膜流道分析的物理模型,如图1所示。传统膜流道的空间高度为0.43 mm,流道上下底面均为可渗透膜。阶梯膜由短页和长页部分组成,短

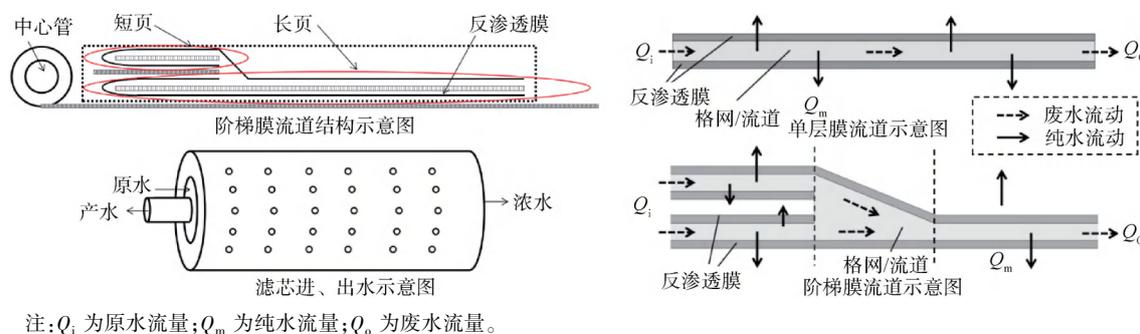


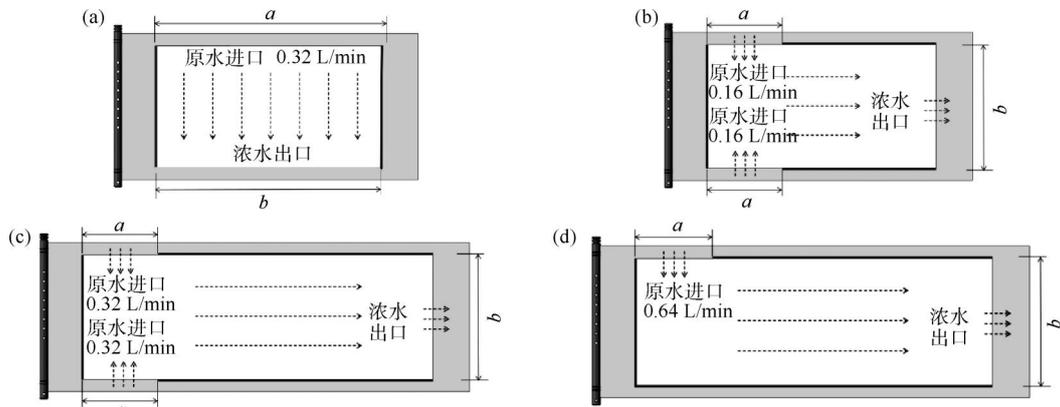
图1 传统侧流膜与阶梯侧流膜结构

Fig. 1 Traditional Flow Metering Membrane and Step-Flow Metering Membrane Structure

页部分为 2 个膜组件(流道空间均为 0.43 mm)组成一体,长短页膜片在过渡段流道高度由 1.26 mm 减小至 0.43 mm,长、短页膜流道上下底面均为可渗透膜。

比较单层流道与新型阶梯流道在膜过滤性能上的差异,并对端流、双侧流和单侧流 3 种进口方式进行讨论,确定最优的膜流道组合形式。总进口流量一致,试验和模拟中使用的单层反渗透滤芯有 10 个膜组件,阶梯反渗透滤芯由 5 个膜组件组成。对单层端流、单层双侧流、阶梯双侧流以及阶梯单侧流 4

种流道方案进行仿真分析。沿中心管展开的流道如图 2 所示,单层、阶梯反渗透膜的有效尺寸分别为 460 mm×300 mm 和 700 mm×300 mm。单层端流为一端进水,一端出水,流道进出口长度较长,均为 460 mm。单层双侧流、阶梯双侧流、阶梯单侧流方案的流道进口  $a$  为 150 mm,出口  $b$  为 300 mm。流道高度在所有设计方案中保持一致,为 0.43 mm。为确保出口边界条件的一致性,所有设计方案试验时的初始回收率均由废水阀调控至 75%。不同膜组件性能参数汇总如表 1 所示。



注:  $a$ —进口长度;  $b$ —主出口长度,下同。

图 2 长效滤芯结构膜流道

Fig. 2 Membrane Flow Channels in Long-Lasting Filter Cartridge Structure

表 1 不同膜组件性能参数汇总

Tab. 1 Summary of Performance Parameters of Different Membrane Components

指标	A 方案:单层端流	B 方案:单层双侧流	C 方案:阶梯双侧流	D 方案:阶梯单侧流
膜页数/页	10	10	5	5
有效过滤面积/ $m^2$	2.208	2.208	2.280	2.280
额定总净水量/L	8 000	9 000	12 000	12 000
回收率	75%	75%	75%	75%

## 1.2 控制方程

膜表面结垢是在速度场、压力场、浓度场共同作用下形成,已有研究<sup>[12]</sup>表明,仿真得到的盐浓度分布与罗丹明染色试验得到的结垢区域吻合。因此,本文从流体力学的角度讨论膜流道形式对膜性能的影响。流体流动应遵循质量守恒方程(连续性方程)、动量守恒方程(N-S 方程)以及能量守恒方程 3 个基本的物理守恒定律。本研究不涉及能量转换问题,只考虑连续性方程以及 N-S 方程,流动介质为纯水(温度为 25 °C,密度为 997 kg/ $m^3$ ,动力黏度为  $8.899 \times 10^{-4}$  Pa·s),流体的密度和动力黏度不随时间

变化,设置多孔介质域的阻力源项,来考虑导流网对流动的影响,忽略重力等体积力的作用,膜的渗透遵循 Darcy 定律。流体流动的控制方程如式(1)~式(4)。

$$\nabla \rho \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \Delta \vec{V} \right) = - \nabla P - \mu \nabla^2 \vec{V} - F_r \quad (2)$$

$$J = \Delta p / (\mu R_m) \quad (3)$$

$$F_r = \left( \frac{\mu}{\alpha} \vec{V} + \frac{1}{2} C_2 \rho \vec{V} \vec{V} \right) \quad (4)$$

其中:  $\vec{V}$  ——速度矢量, m/s;

- $\rho$ ——流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- $P$ ——流体压强,  $\text{Pa}$ ;
- $\mu$ ——流体的动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;
- $J$ ——膜通量,  $\text{m}/\text{s}$ ;
- $\Delta p$ ——跨膜压力差,  $\text{Pa}$ ;
- $R_m$ ——膜的固有阻力系数,  $\text{m}^{-1}$ ;
- $\alpha$ ——渗透系数,  $\text{m}^2$ ;
- $C_2$ ——惯性阻力系数,  $\text{m}^{-1}$ ;
- $F_r$ ——阻力源项,  $\text{N}/\text{m}^3$ ;
- $t$ ——时间,  $\text{s}$ 。

相同的边界条件下(进口总流量均为 3.2 L/min),对 A、B、C、D 4 种方案的膜流道形式进行仿真计算,得到不同方案的平均流速、均匀性、进出口压降差和回收率其中,均匀性( $M$ )的计算如式(5)。

$$M = \left[ 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \left( \frac{U_i - \bar{U}}{\bar{U}} \right)^2} \right] \times 100\% \quad (5)$$

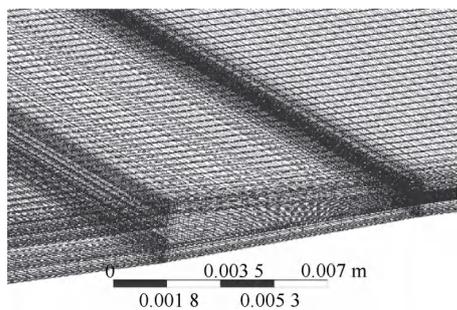
其中: $U_i$ ——流道内各网格计算节点的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  
 $\bar{U}$ ——平均速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

为消除进口流速的影响,取速度小于 0.04  $\text{m}/\text{s}$  的区域计算平均速度和均匀性分别作为参考平均速度、参考均匀性。

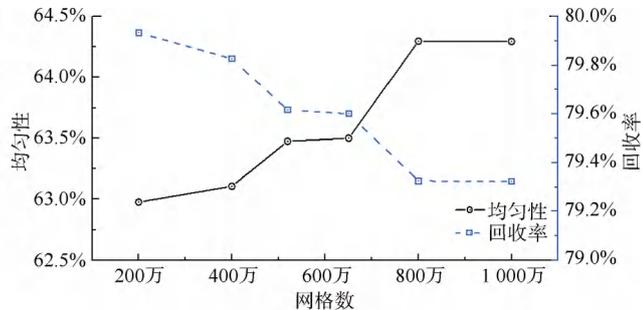
为评价滤芯纯水产水量的大小,定义回收率计算如式(6)。

$$N = \frac{Q_m}{Q_i} \times 100\% \quad (6)$$

其中: $N$ ——定义回收率;  
 $Q_m$ ——纯水流量,  $\text{L}/\text{min}$ ;  
 $Q_i$ ——原水流量,  $\text{L}/\text{min}$ 。



(a) 网格划分示意图



### 1.3 网格划分与边界条件

使用 ANSYS-Mesh 对计算模型进行网格划分,采用结构化网格(六面体网格),如图 3 所示。六面体网格数为 800 万。流体流动为层流 ( $Re < 400$ ),传统侧流膜原水进口流量为 3.2 L/min,阶梯侧流膜原水进口总流量为 6.4 L/min,出口压力为 0.62 MPa,下表面为可渗透面,  $R_m = 3.49 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ,其他面为不可渗透壁面。导流网简化为多孔介质域,通过设置阻力源项来考虑导流网的阻碍作用。数据拟合的函数表达式及参数间的函数关系如式(5)~式(8)<sup>[7]</sup>。

$$F_{CP} = av^2 + bv + c \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} C_2 \rho \Delta n \quad (6)$$

$$b = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n \quad (7)$$

$$D = 1/\alpha \quad (8)$$

其中: $F_{CP}$ ——进出口压差,  $\text{Pa}$ ;  
 $v$ ——流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  
 $D$ ——黏性阻力系数,  $\text{m}^{-2}$ ;  
 $\Delta n$ ——多孔介质域的厚度,  $\text{m}$ ;  
 $a, b, c$ ——拟合常数,单位分别为  $\text{Pa}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$ 、 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\text{Pa}$ 。

试验测得流量随压降的变化,进行二次多项式拟合,最终得到  $C_2 = 5 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ,  $D = 9.2 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ 。

### 1.4 网格无关性验证

为了减少网格节点数据传递产生的数值误差,采用 ANSYS-Mesh 软件进行六面体网格划分[图 3(a)]。在近壁面区域对网格进行了加密处理,以满足高精度计算的要求。对体网格数量 200 万、400 万、520 万、650 万、800 万和 1 000 万[图 3(b)]的流

图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid Independence Verification

道模型进行仿真计算。选取仿真均匀性和回收率指标讨论网格数的影响,截取流道中心平面提取速度值,根据式(5)计算均匀性,评估网格过渡的影响。提取进口及膜面的流量数据根据式(6)计算回收率,评估进口及可渗透膜表面网格的加密情况。由图3(b)可知,随着体网格数量的增加,均匀性指标逐渐提高,回收率指标逐渐减少,网格数从800万加密至1000万时,仿真计算的均匀性和回收率指标均趋于稳定。总体变化保持在1%以内,根据验证结果,最终选择了800万个体网格数进行计算。

### 1.5 反渗透膜结垢试验

结垢是膜科学领域中一个重要且亟待解决的问题,它直接影响着滤芯的性能和使用寿命。反渗透膜结垢试验的主要是为了验证仿真模型的准确性,总结不同膜流道形式的结垢规律,从而了解不同膜流道形式在水力学性能和结垢特性上的差异。对4个方案的结垢试验结果进行分析,膜片裁剪及编号如图4所示,其中短页区域尺寸为220 mm×300 mm,长页区域尺寸为700 mm×300 mm。膜片沿水平面对称裁剪,并在试验中分为2组进行编号和称重,以确保试验的可靠性和准确性。

试验步骤如下。(1) 组装膜组件: 首先,将

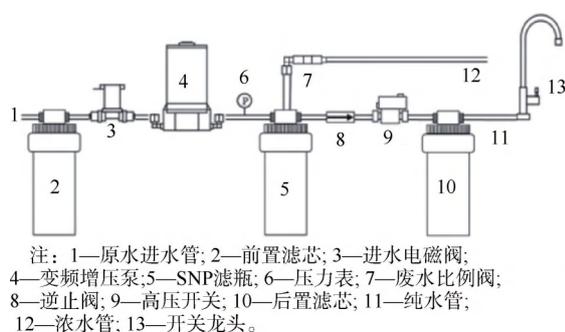


图5 结垢试验仪器及试验步骤

Fig. 5 Equipment and Procedure of Fouling Experiment

## 2 结果与讨论

### 2.1 传统膜流道与阶梯侧流膜流道对比

由表2及图6可知,单层端流方案的流动是直进直出的,流速分布均匀,压降小,但回收率低,无法满足当前高流量的需求,因此,需要对流道进行优化设计,以提高回收率和膜片的利用率。当进口总流量为3.2 L/min时,阶梯双侧流与单层双侧流相比,平均速度提高了26%,壁面剪切力增加了18%,流场均匀性提高20%。这一改善可以归因于阶梯双

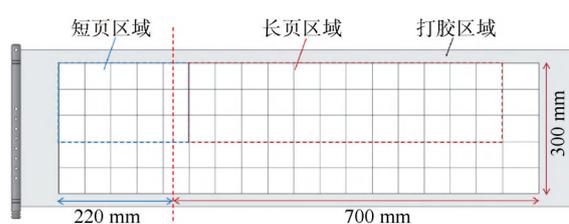


图4 结垢试验的膜片裁剪及编号

Fig. 4 Fouling Experiment of Membrane Cutting and Numbering

10片阶梯侧流膜组件组装到净水机整机中,模拟真实的用户使用场景。(2) 配制水效水: 按比例配制水效水,将355 mg/L CaCl<sub>2</sub>和344 mg/L NaHCO<sub>3</sub>分别溶解在去离子水中制备出合成液,这使得水更容易形成结垢。然后,进行为期10 d的长寿命试验,模拟了大量的净水流量(总净水量为8.0~9.5 t),以观察膜的结垢行为。(3) 取出膜组件并晾干: 在试验结束后,取出一组膜组件,将其通风晾干,确保表面没有残留水分。(4) 裁剪膜片: 裁掉膜组件上的打胶区域,将剩余的膜片裁剪成50 mm×50 mm的方块,并根据水流方向对它们进行编号,以便后续的质量测量和结垢分析。(5) 质量测量: 使用电子天平精确地称量每块膜片的质量,以确定结垢的质量和分布情况。试验仪器及样品如图5所示。

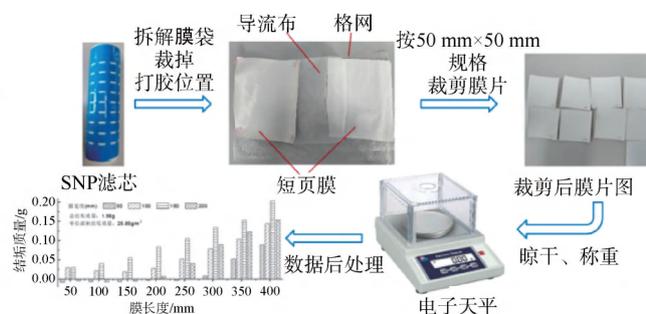


图5 结垢试验仪器及试验步骤

Fig. 5 Equipment and Procedure of Fouling Experiment

侧流膜在流道的后半段将两股流体汇集成一股,同时保持流道高度不变,从而增加了后半段的流速,显著提升了膜组件的水力学性能。

在出口压力和进口流量保持不变的情况下,后半段的流速增加有利于回收率的提升。进一步比较方案A和B不同流道长度的情况,较长的进水口长度相对于较短的流程长度,会导致更小的压降,这表明在膜流道的设计中,需要权衡流道长度和压降之间的关系,以满足降本等特定应用的需求。

表2 各方案性能汇总

Tab. 2 Summary of Performance for Each Scheme

性能指标	A 方案	B 方案	C 方案	D 方案
进口流量/(L·min <sup>-1</sup> )	0.32	0.32	0.64	0.64
压差/Pa	1 314	3 912	9 214	6 234
参考平均速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.014	0.020	0.027	0.024
参考均匀性	72.2%	63.8%	79.5%	68.5%
壁面剪切应力/s	173	295	360	460
膜通量/(L·min <sup>-1</sup> )	0.24	0.24	0.48	0.48
回收率	53.44%	57.89%	79.32%	79.40%

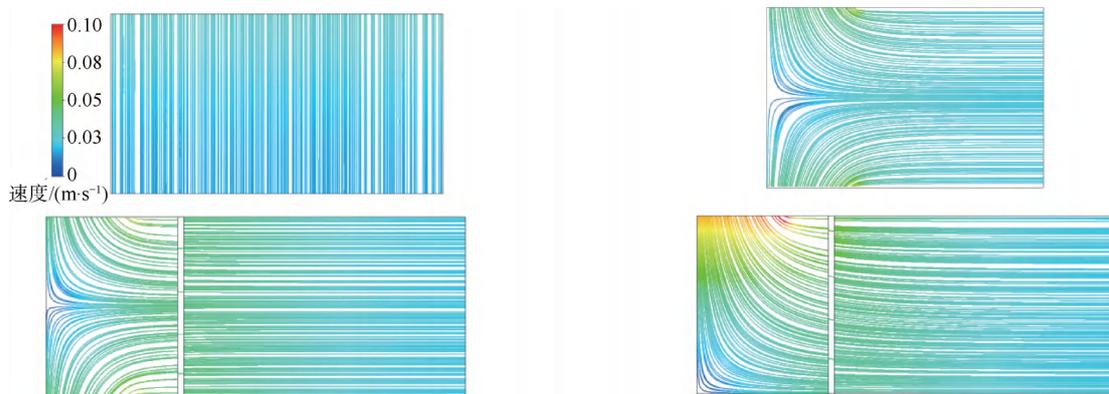


图6 流道中心截面流线

Fig. 6 Cross-Section at the Center of the Flow Channel

对比3种形式的侧流流道(B、C、D),可以明显看出阶梯双侧流方案在跨越阶梯后出现明显的流速提升。这一提速现象增强了后半段流体对膜表面沉积物的冲刷作用,有助于减小浓差极化效应和膜污染,进而延长膜的使用寿命。然而,在流道的后段,由于膜的渗透,流量逐渐减小,流速也逐渐降低。

阶梯双侧流方案在平均流速和流场均匀性方面明显优于阶梯单侧流方案。需要注意的是,双侧进口的位置沿水平对称放置,导致进出口之间的压差明显增加,这可能会导致相对较高的能耗。因此,在综合评估滤芯的产水率和经济性时,更倾向于选择阶梯单侧流方案。

## 2.2 单层膜流道与阶梯侧膜流道流速分布

为了将仿真的流速分布与试验的结垢分布联系起来,将流速范围划分为低速、中速和高速区域,具体划分如表3所示。由图7(a)的观察结果可知,单层端流膜的流速分布相对均匀,约有98%的流速位于中速区域,仅在出口处存在少量的低速区域。这表明单层端流膜在整个流程中保持了较为稳定的流

速特性。对比图7(b)和图7(c),由于进口两股对称气流的相互对冲作用,单层双侧流膜和阶梯双侧流膜在靠近进口的中心位置存在一些低速区域,阶梯双侧流膜的低速区域面积相较于单层双侧流膜减少了3%,而高速区域的面积增加了17%。这一现象表明阶梯双侧流膜通过过渡段的水流混合和截面积减小导致水流加速,从而对后段膜片产生了显著的冲刷效果。此外,阶梯单侧膜和阶梯双侧膜在速度分区面积占比上基本相同,但阶梯单侧膜在高速区域的平均速度明显高于阶梯双侧膜。这与阶梯单侧膜的流道设计有关,该设计在高速区域提供了更高的速度。这些分析结果表明,阶梯膜流道在跨越阶梯后表现出明显的提速效应,有利于减小浓差极化效应和膜污染,从而提高膜的使用寿命。由于双侧阶梯膜的进口位置水平对称放置,进出口压差明显高于单侧阶梯膜,可能会伴随能耗的相对增加。

综合考虑不同方案的性能表现,综合性能排序如下:D>C>B>A,这一排序反映了阶梯流道相对于

表 3 流速分区汇总  
Tab. 3 Summary of Flow Velocity Zones

速度划分		平均速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )				面积占比			
速度分区	速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	A	B	C	D	A	B	C	D
■ 低速	< 0.015	0.015	0.013	0.010	0.010	1.94%	4.54%	1.71%	1.46%
	0.015~0.040	0.020	0.027	0.028	0.080	98.06%	90.86%	76.63%	76.89%
■ 高速	> 0.040	/	0.045	0.043	0.054	/	4.60%	21.65%	21.65%

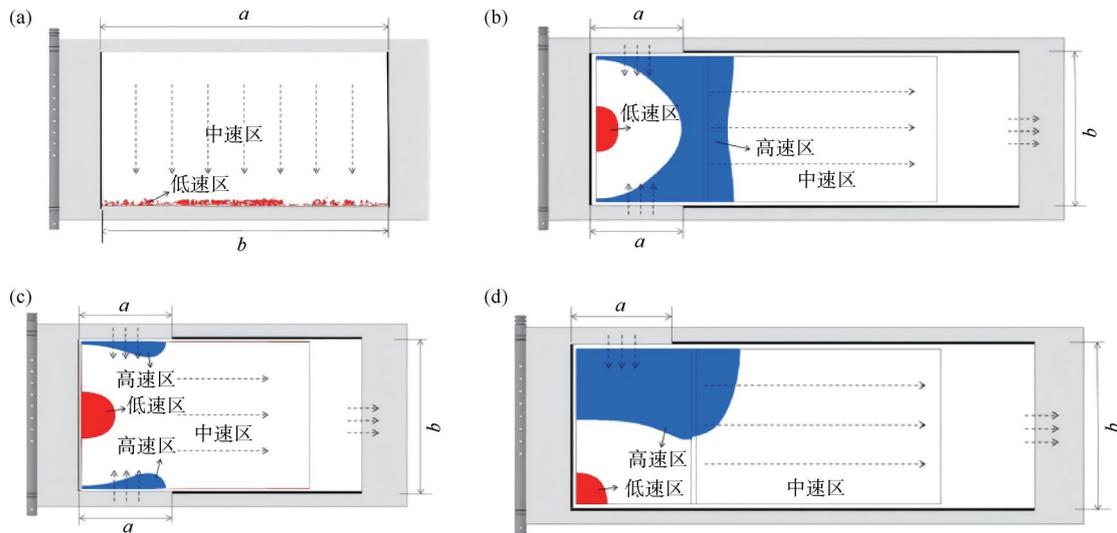


图 7 流道中心截面流速分区

Fig. 7 Flow Velocity Zoning of Cross-Section at the Central Flow Channel

单层流道的性能优势。阶梯双侧流在均匀性方面表现出色,但回收率相对较低,即产水率较低,试验测试结垢区域呈现出明显的阶梯状分布,这可能导致结垢的重量差异较大,进而容易引发膜污染问题,降低滤芯的使用寿命。在阶梯侧流道中,单侧进口方案表现出较高的回收率、良好的均匀性以及相对较低的进出口压差,因此,在综合性能上表现最优。这意味着在考虑滤芯的经济性时,阶梯单侧流方案为最佳选择。此外,阶梯单侧流方案在高速区的平均速度明显高于阶梯双侧流方案,这有助于提高膜组件的性能,尤其在高通量应用中。需要强调的是,膜的渗透特性对性能产生了重要影响。纯水不断产生,导致单层双侧流膜方案在后半段流速较低,浓差极化现象明显。在这方面,阶梯流道通过在阶梯后段减小流道高度并提高流速,增强了对后段的冲刷效应,减弱了浓差极化现象,进一步延长了滤芯的使用寿命。

### 2.3 反渗透过滤膜性能试验

对 4 个膜组件进行长期过滤测试,在相同时间

间隔下记录各方案的产水率、产水流量,计算脱盐率。由图 8(a)可知,单层膜原件与阶梯膜原件的初始产水量相差 0.1 L/min,主要是因为阶梯流道相比于单层流道平均流速升高,产水量增加。随着总产水量的增加,单层膜原件沉积更多的难溶物,总产水量为 7 t 后,单层膜原件的产水流量相比于阶梯膜元件低 0.26 L/min。在相同时间内,总产水量排序为  $D > C > B = A$ ,阶梯单侧流道总产水量相比于单层端流,提升 18%。阶梯流道的产水流量下降速率比单层流道的慢,表明在相同的产水量下,阶梯流道有助于减少结垢的产生。

由图 8(b)可知,随着总产水量的增加,各方案的脱盐率逐渐降低。在总产水量小于 4 t 时,各方案脱盐率的下降速率较慢,总产水量大于 4 t 时,脱盐率急剧下降。阶梯单侧膜与单层端流相比,平均流速增大,有利于沉积盐分的扩散,壁面剪切应力增大,有利于减少浓差极化效应,初始盐截留率从约 90% 提高到约 93%。因为它增加了平均浓度梯度和剪切应力,促进了积累盐分的背扩散并减少了浓

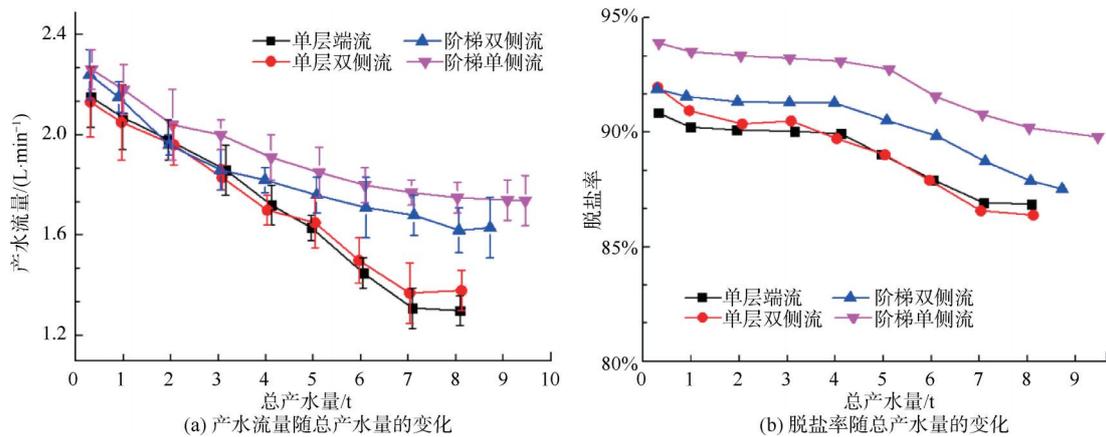


图8 长期过滤试验结果

Fig. 8 Experiment of Long-Term Filtration

缩极化效应。在以浓缩极化效应占主导的膜流道中,盐截留率会随着总产水量的增加而下降。

对4个膜流道方案进行结垢称重,剔除计算值为负值的试验数据,得到实测单位面积结垢质量排序为D<C<B<A。由图9可知,单层端流结垢分布均匀,从进口到出口结垢质量逐渐增加,离总进口越远,结垢量越大,这主要是由流动路径决定,流动路径长流速略低,结垢增加,总体而言结垢量差异不大。单层双侧流方案单位面积结垢质量大于阶梯双侧流膜,其中单层双侧流膜单元最大结垢质量相对较高(0.2 g),这表明在出口处容易产生浓差极化,导致膜污染加速。单层双侧流膜单位面积结垢质量为28.59 g,而阶梯双侧流膜的单位面积结垢质量为27.25 g,阶梯双侧流膜相较于单层双侧流膜,单位面积结垢质量减少了4.6%。这说明阶梯双侧流方案具有更好的流动均匀性,从而提高了膜的利用效率。深入分析结垢的机理和行为,进一步了解不同膜流道形式之间的差异。以下是对这一观察更详细的解释:阶梯双侧流膜沿流动路径,结垢质量逐渐增加。特别是在短页和长页膜片沿水流路径,结垢质量逐渐增加。这表明在流动的过程中,水中的溶解物质逐渐在膜表面沉积,导致结垢的积累。值得注意的是,靠近入口一侧的膜片质量明显小于膜片中间区域,这可能是因为流体在进入膜组件时对流动速度和溶质输送产生了影响。阶梯段在短页末端的水流中发挥均流作用,导致流速有所降低。在这一位置,膜片结垢明显增加,这可能是因为流速减小导致了水中的溶解物质更容易沉积在膜表面。

阶梯单侧膜单位面积结垢质量为24.55 g,与

单层断流相比,单位面积结垢量降低25%。对比图9(c)和图9(d),双侧与单侧进口均是沿流动路径结垢量逐渐增加,其中在混合段由于流速增加,结垢量明显降低。单、双侧阶梯膜均存在2个高结垢点,即混合段前与出口段,后续可对进口长度的影响进行分析,来平衡混合段前后的结垢量,提升膜的利用率。双侧膜流道在流道中间位置结垢量大于进口位置,与仿真计算得到的流速分布规律一致,即以流动分布去预测结垢分布是可行的。在阶梯后段,由于流道截面减少,流速增加,对膜片起到了冲刷作用。这个区域的结垢量相对较低,因为高速流动有助于清除膜表面的溶解物质,减少了结垢的发生。在长页的后段,由于膜的渗透,结垢逐渐增多。此外,在出口附近结垢量达到最大值,这可能是因为膜末端的流速较低,使得结垢更容易发生。膜的渗透作用也可能导致结垢在这一区域的积累。总的来说,膜片结垢量分布受到流动速度和膜渗透性质的影响。这些观察结果与仿真速度分布规律基本一致,验证了仿真模型的准确性。通过深入了解结垢机理,可以更好地优化膜组件的设计,以减少结垢问题,提高膜的使用寿命和性能。

### 3 结论

本研究通过仿真与试验相结合的方式,对反渗透膜流道设计进行了深入探讨,并进行了结垢机理分析,得出以下结论。

(1) 阶梯流道相比于单层流道,总产水量提升18%,脱盐率提升2%。

(2) 同进口流量及压力下,阶梯双侧流与单层双侧流相比,仿真平均速度提高了26%,壁面剪切

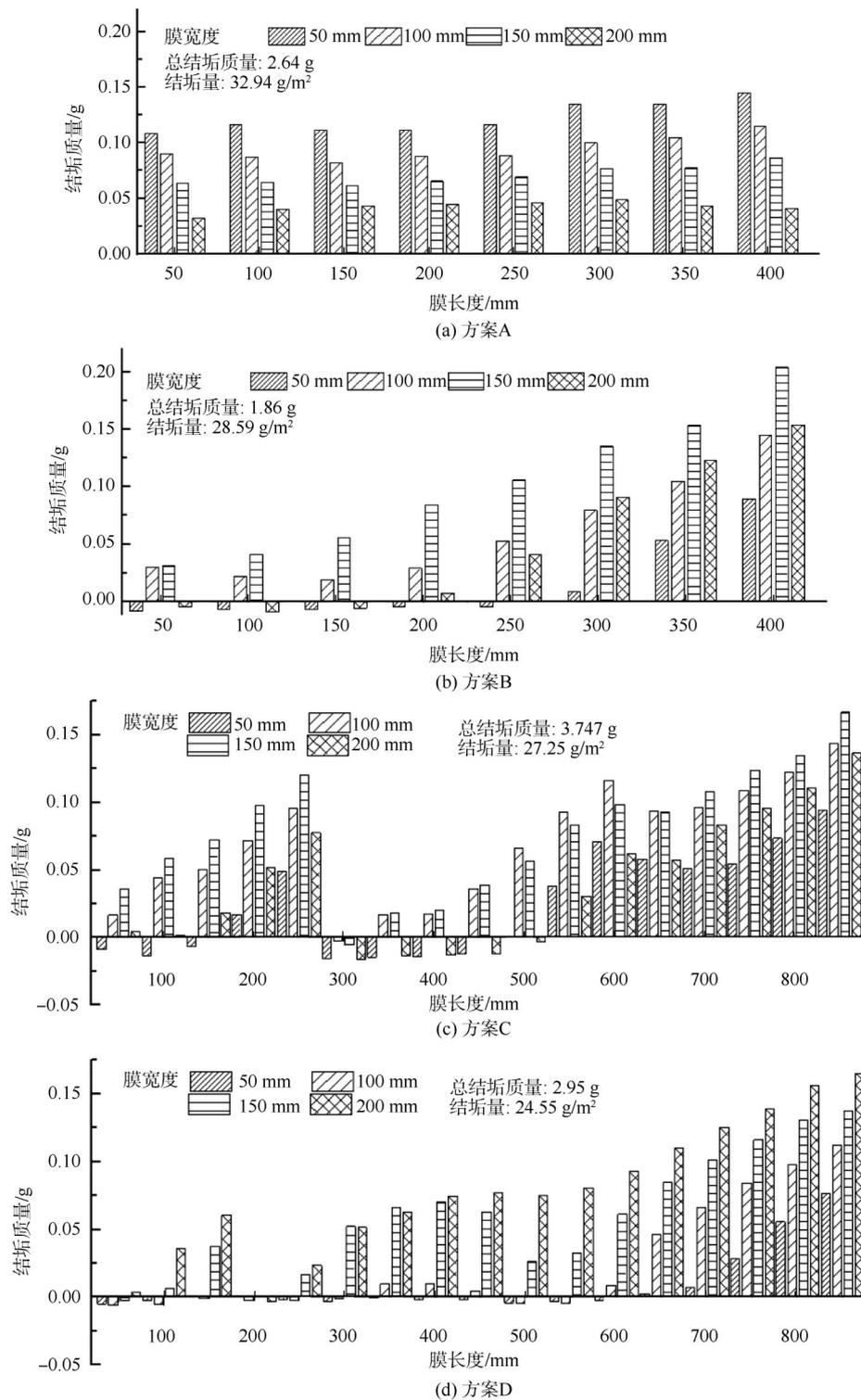


图 9 结垢试验结果图

Fig. 9 Results of Fouling and Scaling Experiment

力增加了 18%, 流场均匀性提高 20%, 这有助于盐分的扩散, 促进质量传递, 减少浓缩极化, 减轻膜结垢的问题。

(3) CFD 模拟速度分布与试验结垢分布基本吻

合, 表明用仿真指导膜流道设计是可行的, 最终的结垢减少量需试验得到。

(4) 阶梯单侧膜单位面积结垢质量为 24.55 g, 与单层端流相比, 单位面积结垢量降低 25%。

(5)对于高水通量的膜应用,采用阶梯单侧流道可以更好地控制结垢,平均速度和质量传递将显著增强。

### 参考文献

- [ 1 ] ASADOLLAHI M, BASTANI D, MUSAVI S A. Enhancement of surface properties and performance of reverse osmosis membranes after surface modification: A review [ J ]. *Desalination*, 2017, 420: 330–383. DOI: 10.1016/j.desal.2017.05.027.
- [ 2 ] KAVIANIPOUR O, INGRAM G D, VUTHALURU H B. Investigation into the effectiveness of feed spacer configurations for reverse osmosis membrane modules using Computational Fluid Dynamics [ J ]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 526: 156–171. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.12.034.
- [ 3 ] 张雅琴, 张林, 侯立安. 计算流体力学在水处理膜过程中的应用 [ J ]. *中国工程科学*, 2003, 23(4): 110–115. ZHANG Y Q, ZHANG L, HOU L A. Computational fluid dynamics applied to membrane processes for water treatment [ J ]. *Strategic Study of CAE*, 2003, 23(4): 110–115.
- [ 4 ] 谭永文, 张维润, 沈炎章. 反渗透工程的应用及发展趋势 [ J ]. *膜科学与技术*, 2019(4): 1446–1454. TAN Y W, ZHANG W R, SHEN Y Z. Current application and future prospects of reverse osmosis technology [ J ]. *Membrane Science and Technology*, 2019(4): 1446–1454.
- [ 5 ] TAHERINEJAD M, DERAKHSHAN S, YAVARINASAB A. Hydrodynamic analysis of spiral wound reverse osmosis membrane recovery fraction and permeate water flow rate [ J ]. *Desalination*, 2017, 411: 59–68. DOI: 10.1016/j.desal.2017.02.009.
- [ 6 ] GU B, ADJIMAN C S, XU X Y. The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations [ J ]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 527: 78–91. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.12.058.
- [ 7 ] 樊海枫, 马佳莹, 周雪飞, 等. CFD 模拟在卷式反渗透膜性能优化中的研究进展 [ J ]. *净水技术*, 2021, 40(7): 21–28, 125. FAN H F, MA J Y, ZHOU X F, et al. Research progress of CFD simulation on performance optimization of spiral-wound RO membrane module [ J ]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(7): 21–28, 125.
- [ 8 ] 吴降麟, 张朝晖, 王亮, 等. 宽流道反渗透膜元件抗污染性能分析 [ J ]. *化工学报*, 2019(4): 1446–1454. WU J L, ZHANG Z H, WANG L, et al. Analysis of anti-fouling performance of wider spacer RO membrane module [ J ]. *CIESC Journal*, 2019(4): 1446–1454.
- [ 9 ] BUCS S S, LINARES R V, MARSTON J O, et al. Experimental and numerical characterization of the water flow in spacer-filled channels of spiral-wound membranes [ J ]. *Water Research*, 2015, 87: 299–310. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.036.
- [ 10 ] 刘忠洲, 张国俊, 纪树兰, 等. 研究浓差极化和膜污染过程的方法与策略 [ J ]. *膜科学与技术*, 2006, 26(5): 1–15. LIU Z Z, ZHANG G J, JI S L, et al. Methods and strategies of study on concentration polarization and membrane fouling [ J ]. *Membrane Science and Technology*, 2006, 26(5): 1–15.
- [ 11 ] 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 中华人民共和国国家标准化管理委员会净水机水效限定值及水效等级: GB 34914—2021 [ S ]. 北京: 中国标准出版社, 2021. State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China, Minimum allowable value of water efficiency and water efficiency grades for water purifier: GB 34914—2021 [ S ]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [ 12 ] LIN W C, LEI J, WANG Q, et al. Performance enhancement of spiral-wound reverse osmosis membrane elements with novel diagonal-flow feed channels [ J ]. *Desalination*, 2022, 523: 115447. DOI: 10.1016/j.desal.2021.115447.
- [ 13 ] KAVIANIPOUR O, INGRAM G D, VUTHALURU H B J. Studies into the mass transfer and energy consumption of commercial feed spacers for RO membrane modules using CFD: Effectiveness of performance measures [ J ]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 141: 328–338. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.10.041.
- [ 14 ] 于燕, 樊耀波, 徐国良, 等. 计算流体力学在膜技术及膜生物反应器研究中的应用 [ J ]. *膜科学与技术*, 2011, 31(1): 105–112. YU Y, FAN Y B, XU G L, et al. Computational fluid dynamics applied to membrane processes and MBR [ J ]. *Membrane Science and Technology*, 2011, 31(1): 105–112.
- [ 15 ] SAEED A, VUTHALURU R, VUTHALURU H B J. Investigations into the effects of mass transport and flow dynamics of spacer filled membrane modules using CFD [ J ]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 93: 79–99. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.07.002.
- [ 16 ] 林炜琛, 邵瑞朋, 王乔, 等. 基于 CFD 和 RSM 的全效膜元件进水流道优化研究 [ J ]. *膜科学与技术*, 2020, 40(6): 88–95. LIN W C, SHAO R P, WANG Q, et al. Optimization of feed channel of full-effective membrane modules based on CFD simulation and RSM analysis [ J ]. *Membrane Science and Technology*, 2020, 40(6): 88–95.
- [ 17 ] 李桂芳, 高玉婷, 糜自栋, 等. 超低压反渗透膜性能影响因素的显著性分析 [ J ]. *净水技术*, 2022, 41(7): 36–40, 54. LI G F, GAO Y T, MI Z D, et al. Significance analysis of influencing factors on the performance of ultra-low pressure RO membranes [ J ]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(7): 36–40, 54.
- [ 18 ] TOH K Y, LIANG Y Y, LAU W J, et al. CFD study of the effect of perforated spacer on pressure loss and mass transfer in spacer-filled channels [ J ]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 222: 115704. DOI: 10.1016/j.ces.2020.115704.