

卷式膜元件内部结构设计及通量优化研究

戴启军*, 康 燕, 吴宗策, 金 焱, 韩前武, 张玲玲, 唐 伦

(沃顿科技股份有限公司, 贵阳 550000)

摘要: 为了研究卷式膜元件产水量与膜片性能不匹配的问题,采用计算流体力学(CFD)模拟卷式膜元件内浓网、淡网流道压力分布,通过建立卷式膜元件产水流量数学模型计算淡网流道的压力损失,评估不同构型膜元件产水流量的差异。结果表明,产水流道内的压降梯度沿涡旋线方向,且随汇聚的纯水增加压降梯度逐渐变大;在不同条件不同构型的八寸工业膜元件中,淡网流道总压力损失为60~170 kPa,当膜页长度减小、淡网流阻系数减小、淡网厚度增加时,淡网流道的总压力损失减小,膜元件产水量有所提升;对于低阻力膜,不同构型的膜元件的产水量差异最大达14%,而对于高阻力膜,不同构型的膜元件的产水量差异最大则只有4.8%,膜元件产水差异在低阻力膜中更显著。本文开发的数学模型可以用于定量计算不同构型、不同流阻淡网、不同运行条件下的膜元件产水量,并评估其与膜片性能的差异,确定产水流量提升空间。

关键词: 卷式膜元件; 组件构型; 淡网流阻; 压力损失; 数学模型

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)02-0173-11

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.02.020

卷式膜元件在卷制完后会测试其初始性能,通常膜元件的初始产水量由膜片平均通量与有效膜面积的乘积来估算,然而有些时候会出现膜元件产水量与膜片性能不匹配的情况,一方面可能是膜片的性能波动导致估算的膜片平均通量的偏差,另一方面研究人员^[1-5]将膜元件产水量与膜片通量之间的差异归因于淡网流阻产生的压力损失。

杨旅等^[2]研究家用反渗透膜单位面积膜片流量性能(理想值)和反渗透膜元件流量性能(实际值)的差异,发现不同运行条件下同一款膜元件实际值均小于理想值,且随产水量的提高差异越来越明显,最大差异可达25%,淡网编织密度、厚度、材质的差异会导致其流阻性能不同,研究人员认为不同淡网的

压力损失不一样造成膜元件产水量不一致,然而其研究的产生产水量差异的膜元件为同一款膜元件,产水量差异可能为运行条件造成的压力损失差异所致。

王双等^[3]通过采用不同膜片页数卷制同样37.2 m²膜面积的八寸工业膜元件测试其产水量,随着页数的增加膜元件表现更优异的产水性能,研究人员认为随着膜片页数的增加,单页膜片长度缩短,纯水流道变短,易于膜元件纯水收集。石月荣等^[4]对膜元件的膜页长度和膜页数等进行优化,不同型号膜元件随页数的增加产水量均增加,且增加页数对膜元件产水量的提升明显,由于其卷制的膜的超薄特性及运行过程中易变形的特点,此时淡

收稿日期: 2024-10-30; 修改稿收到日期: 2025-03-03

基金项目: 耐温型有机膜制备与应用关键技术研究(2023YFB3810500)

第一作者简介: 戴启军(1987-),男,贵州兴义人,硕士研究生,工程师,研究方向为膜组件设计及开发。* 通讯作者, E-mail: daiqijun@vonttron.com

引用本文: 戴启军, 康 燕, 吴宗策, 等. 卷式膜元件内部结构设计及通量优化研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(2): 173-183.

Citation: Dai Q J, Kang Y, Wu Z C, et al. Research on the internal structure design and flux optimization of rolled membrane[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(2): 173-183.

网流道的流阻可能较大,是造成产水量提升明显的原因。Karabelas 等^[5]对八寸膜元件构型进行参数化研究,研究表明淡网流道的压力损失会影响产水通量,且对于不同膜片,淡网对产水量的影响大小不同,如对于反渗透膜,在参数变化范围内优化产水量可有 20%的提升,而对于海水膜则只有 5%的提升,其解释这种差异为淡网的压力损失在膜元件总压力损失的占比不同所致。

膜元件产水流量与膜片性能的差异应与运行条件、淡网流阻性能、膜片流阻性能、膜元件构型有关,这些因素导致淡网流道内产生的压力损失不一样,且这部分压力损失又会造成膜元件产水量的减少,但这些因素会造成多大的压力损失,且这部分压力损失又会造成多大的产水量差异,需要定量研究。本文通过模拟卷式膜元件内流道的压力、流速分布得到压力梯度及水流路径,在浓网淡网压力梯度方向上建立坐标系得到压力损失及产水流量的解析模型,定量计算不同构型、不同流阻淡网、不同运行条件下的膜元件产水量,并评估其与膜片性能的差异,确定产水流量提升空间。

1 卷式膜元件流场模拟

1.1 模型方法

基于 CFD(计算流体力学)理论对膜元件的水流特性的计算研究^[6-11] 主要关注浓网局部的特征,而计算膜元件的总压力损失需要构建完整的膜元件模型,毛维东等^[12-13]构建了完全尺寸的进水隔网模型研究卷式膜元件整体区域范围内浓水流道流动及浓差极化的情况,其计算网格量已达上千万,由于膜元件尺寸跨度大(微米-米)、面密度大(一支八寸膜面积可达 40 m²),构建完整的包含浓网、淡网、膜片的模型给网格划分求解计算带来非常大的挑战。

为了得到卷式膜元件内压降梯度,本研究将膜片流阻特性简化为无厚度的多孔跳跃面^[14],浓网、淡网流阻特性用达西方程表示,建立简化的包含浓网、淡网、膜片的卷式膜元件模型。

1.1.1 膜片、浓网、淡网流阻性能设定

本研究基于已有的膜片测试平台、浓网压差测试平台(测试方法参照文献^[15])、淡网压差测试平台(测试方法参照文献^[16])测试了压降与流速的关系,在测试时测试的流速为实际八寸膜中各材料流体域中各自的流速范围。

各材料的流阻关系结果表明,膜片及淡网的流

速极小时,其流速与压降几乎呈现线性关系,当速度 v 较小时,二次项可以忽略,即将多孔介质的流动阻力表示为达西方程形式:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = -\frac{\mu}{\alpha} v = -f v \tag{1}$$

式中: p 为压力, Pa; μ 为黏度, Pa·s; α 为渗透系数, m²; f 为阻力系数, Pa·s/m²。

浓网的流阻关系接近线性,另一方面卷式膜元件标准测试条件在 15%回收率的情况下,浓网出水口的流量为进水口流量的 85%,即浓网流道流速变化范围小,通常为 0.14~0.2 m/s,因此只要得到该流速范围的压降即可表征卷式膜元件内浓网的流阻关系。

浓网、淡网、膜片的阻力系数 f 的计算,如表 1 所示。如某常规浓网 0.2 m/s 流速下单位压降为 25 kPa/m,则阻力系数为 1.25e+05 Pa·s/m²;如某淡网 0.06 m/s 流速对应 180 kPa/m 压降,则阻力系数为 3e+06 Pa·s/m²;如某标准溶液 100 psi (1 psi=6.89 kPa)测试压力下通量 45 L/(m²·h)的 0.1 mm 膜片对应阻力系数为 5.54e+14 Pa·s/m²。

表 1 浓网、淡网、膜片的阻力系数

Table 1 Resistance coefficient of retentate spacer, permeate-side spacer and membrane

项目	流速 v / (m·s ⁻¹)	压差($\Delta p/\Delta L$)/ (Pa·m ⁻¹)	阻力系数/ (Pa·s·m ⁻²)
浓网	0.2	2.5e+04	1.25e+05
淡网	0.06	1.8e+05	3e+06
膜片	1.25e-05	6.9e+09	5.54e+14

1.1.2 基于 FLUENT 求解卷式膜元件三维空间的标量方程

在卷式膜元件三维空间,对于不可压缩流体,满足质量守恒方程,即一定体积内的物质质量守恒,单位时间流进有限单元内物质与流出物质相等,得到关于压力的标量方程:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{f} \nabla p \right) = 0 \tag{2}$$

为了定性分析水流在浓淡网间流动的路径,由于计算网格有限,在此并没有建立完整的卷式膜元件尺寸,仅建立简化的膜元件几何模型,如图 1 所示,浓水隔网与淡网间以膜片隔开,膜片为两区域的中间面,淡网沿涡旋线与中心管连通。

通过 FLUENT 求解卷式膜元件三维空间压力的标量方程,浓水入口边界条件设置为 $p = 690$

kPa, 纯水中心管出口压力设置为 0 Pa, 浓水出口边界条件设置一压力值, 调节该值使浓网流速为 0.2 m/s。

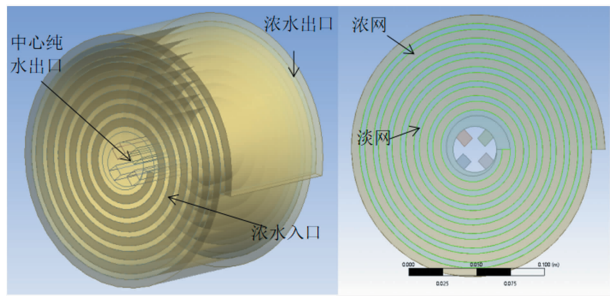


图 1 简化的膜元件几何模型

Fig. 1 Simplified geometric model of membrane element

1.2 卷式膜元件流动特征分析

图 2 分别为浓网与淡网的轴向及垂直轴向的压力云图, 从浓网、淡网的压力值可知, 浓网的压力远大于淡网的压力, 为了清晰地显示压力分布, 对各云图压力显示范围调整并对比分析。由浓网垂直于轴

向方向压力分布可知, 该截面的压力值均约为 688 kPa, 浓网垂直于轴向方向的压力分布均一, 无梯度, 而浓网在轴向方向上存在一定的压力梯度。对于淡网的压力分布, 从图中淡网垂直于轴向方向压力分布可知, 淡网沿涡旋线由外向内压力逐渐降低, 在外边缘处为 22 kPa, 至中心管处为 0 kPa, 从淡网沿轴向方向上压力分布可知, 同一涡旋线位置不同轴向位置的压力均一, 无梯度。

图 3 分别为浓网与淡网的轴向及垂直轴向的速度云图, 从图中淡网垂直于轴向方向速度分布可知, 淡网流速沿涡旋线方向由外向内逐渐增加, 在靠近外边缘处流速为 0, 在靠近中心管处为 0.013 m/s, 淡网靠近膜面处水跨膜渗透过来, 且一边渗透一边沿涡旋线从外向内汇聚至中心管, 水流逐渐增大。

从模拟结果可知淡网压力梯度为涡旋线方向, 在轴向方向几乎无梯度, 流动方向为涡旋线方向; 浓网在垂直轴向截面处无压力梯度, 压力梯度方向为轴向方向, 流动方向为轴向方向。

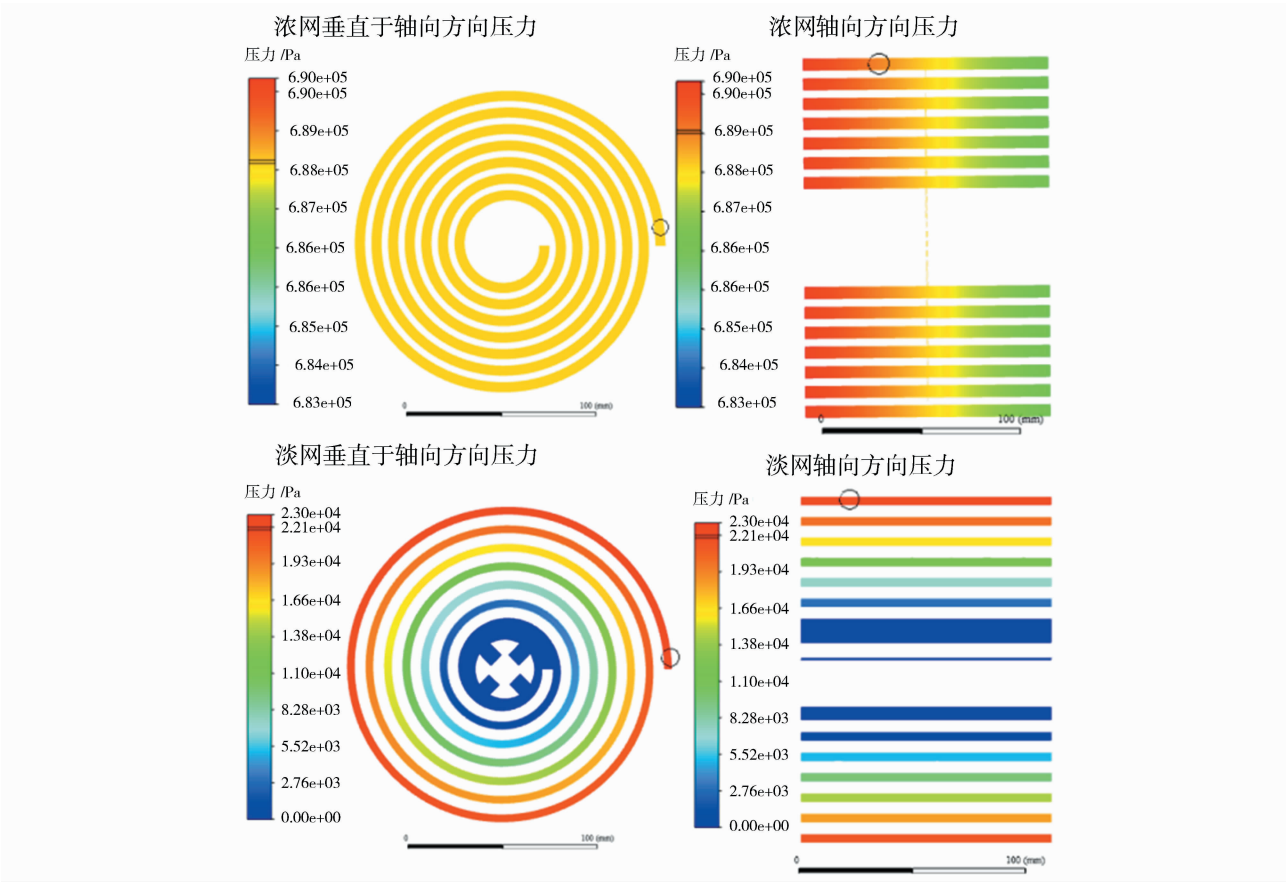


图 2 卷式膜元件内部浓网与淡网的轴向及垂直轴向的压力分布

Fig. 2 Axial and vertical pressure distribution of retentate spacer and permeate-side spacer in rolled membrane element

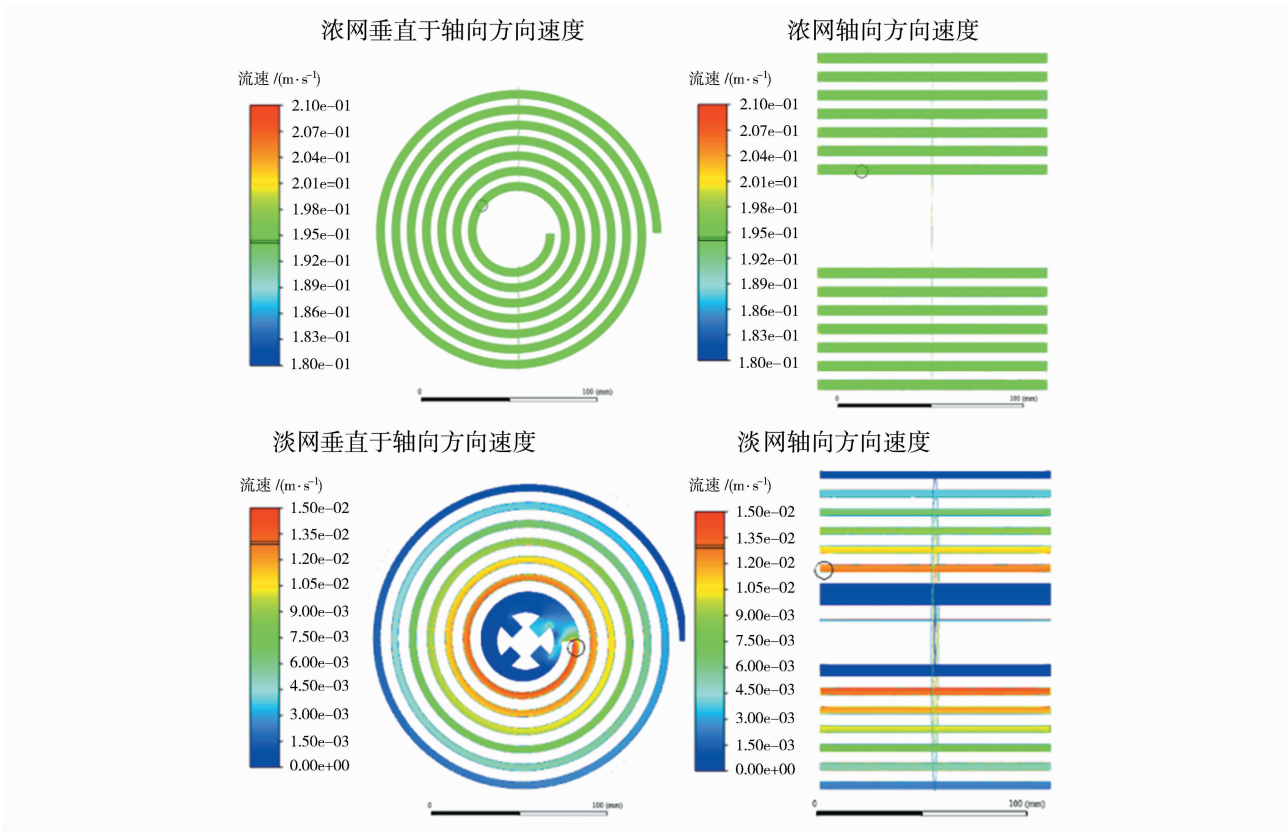


图 3 卷式膜元件内部浓网与淡网的轴向及垂直轴向的速度分布

Fig. 3 Axial and vertical flow velocity distribution of retentate spacer and permeate-side spacer in rolled membrane element

2 膜元件产水流量数学解析模型

2.1 数学模型求解基本思路

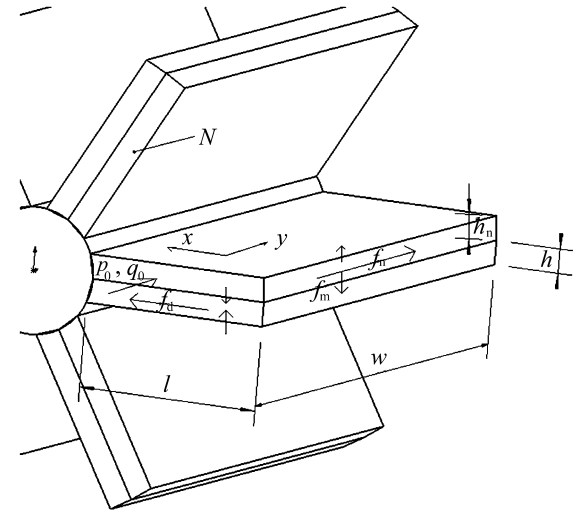
卷制的不同页浓网、膜片、淡网之间在空间、材料等因素上无差异,可认为是等效的,因此可认为中心管总产水量为每一页淡网汇聚的流量大小乘以页数。

由于浓网、膜片、淡网在厚度方向上尺寸相比其他两方向小得多,忽略其在厚度方向上的压力及速度分布,图 4 为卷式膜膜页单元展开示意图,在单页淡网-膜片-浓网基本单元区域建立二维坐标系, x 方向为淡网沿涡旋线方向由外向内, y 方向为轴线方向。

由于 1.2 节模拟结果表明淡网流动方向为涡旋线方向,压降为涡旋线方向,在轴向方向几乎无流动,因此淡网水流沿涡旋线方向 x 流动,单位长度 y 的淡网中心汇聚的流量为该单位长度 y 截面总的渗透的流量。

2.2 单位长度 y 截面淡网中心汇聚流量

图 5 为某一 y 截面淡网涡旋线 x 方向坐标系,



元件结构参数: l —膜页长度; w —膜元件有效长度;
 N —膜页数; h_n —浓网厚度; h —淡网厚度
流阻性能参数: f_n —浓网阻力系数; f_d —淡网阻力系数;
 f_m —膜片阻力
操作条件: p_0 —入口压力; q_0 —每页浓网入口处流量;
 $N \times q_0$ —总入水流量

图 4 卷式膜膜页单元展开示意图

Fig. 4 Schematic diagram of membrane page unit of unfolded membrane element

$x=0$ 为膜元件外壁, $x=l$ 为膜元件中心管位置。由于 1.2 节模拟表明浓网在垂直轴向截面处压力相等, 压力梯度为轴向方向, 浓水流动方向为轴向方向, 涡旋线方向几乎无流动和压降, 即浓网压力在同

y 截面位置相等, 只与 y 相关, 对于某一 y 截面为定值 $p(y)$ 。另外设浓网在涡旋线方向压力分布函数为 $p(x)$, 渗透通量在涡旋线方向分布函数 $v(x)$, 淡网流量在涡旋线方向分布函数为 $q(x)$ 。

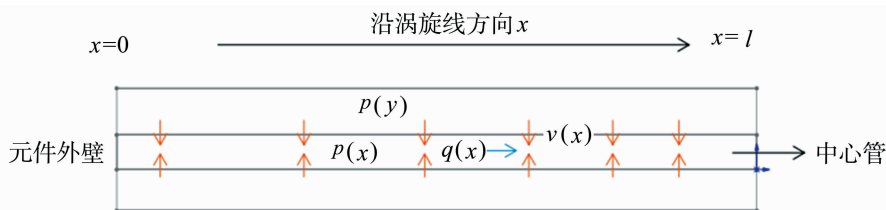


图5 y 截面淡网中心汇聚流量求解坐标系

Fig. 5 Coordinate system for solving the convergence flow at the center of the y -section permeate-side spacer

淡网流量 $q(x)$ 在涡旋线方向的增量为该微元区域的渗透通量 $v(x)$ 乘以膜面积:

$$\frac{dq(x)}{dx} = v(x) \quad (3)$$

渗透通量等于跨膜压差/跨膜阻力:

$$v(x) = 2 \frac{p(y) - p(x)}{f_m} \quad (4)$$

式中: f_m 为膜片阻力系数乘以膜厚, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。

淡网沿涡旋线方向的压力降梯度等于淡网流速 $v_2(x)$ 乘以淡网阻力系数:

$$-\frac{dp(x)}{dx} = f_d \cdot v_2(x) \quad (5)$$

式中: f_d 为淡网阻力系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

淡网流速 $v_2(x)$ 与流量关系 $q(x)$:

$$v_2(x) = \frac{q(x)}{h} \quad (6)$$

式中: h 为淡网流道厚度, m 。

边界条件有两个, 在淡网中心管处压力为 0, 在元件外壁淡网处流速为 $v_2(0)=0$:

$$p(l)=0 \quad (7)$$

$$p(0)'=0 \quad (8)$$

联立偏微分方程组[式(3)~式(6)]可得 $p(x)$ 关于 x 的二阶非齐次线性偏微分方程, 并结合边界条件求得 $p(x)$ 特解为:

$$p(x) = \frac{-p(y)}{e^{\sqrt{k}l} + e^{-\sqrt{k}l}} (e^{\sqrt{k}x} + e^{-\sqrt{k}x}) + p(y) \quad (9)$$

将 $p(x)$ 带入式(5)、式(6), 单位长度 y 截面每页淡网中心汇聚流量为:

$$q(l) = Q(y) = \frac{h \cdot p(y) \cdot \sqrt{k}}{f_d \cdot (e^{\sqrt{k}l} + e^{-\sqrt{k}l})} (e^{\sqrt{k}l} - e^{-\sqrt{k}l}) \quad (10)$$

$$\text{式中: } k = \frac{2f_d}{h \cdot f_m} \quad (11)$$

2.3 总产水量

图 6 为膜元件沿轴向 y 方向坐标系, $y=0$ 为浓水入口, $y=w$ 为浓水出口, 浓水沿膜元件轴线方向上压力分布为 $p(y)$, 浓水沿膜元件轴线方向上渗透通量分布为 $v(y)$, 浓水沿膜元件轴线方向上流量分布为 $q(y)$, 浓水沿膜元件轴线方向上流速分布为 $v_2(y)$ 。

2.2 节已经得到单位长度 y 截面处的产水量 $Q(y)$, 即公式(10)。现要得到浓水沿膜元件轴线方向上压力分布 $p(y)$, 求得不同 y 截面产水量 $Q(y)$, 并通过 $Q(y)$ 对 y 的积分求得膜元件产水量 Q 。

由 y 截面处单位长度产水量 = y 截面处渗透通量 = 单位长度 y 浓水流量的减少量:

$$\frac{dq(y)}{dy} = -Q(y) \quad (12)$$

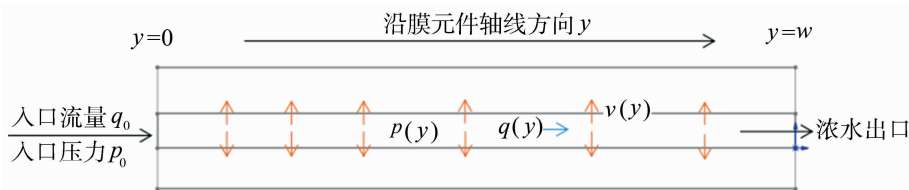


图6 轴向 y 方向求解坐标系

Fig. 6 Coordinate system for solving in the axial y -direction

浓水轴线方向上压力降梯度=浓网流速 $v_2(y)$ 乘以浓网阻力系数:

$$-\frac{dp(y)}{dy}=f_n \cdot v_2(y)$$

(13)

式中: f_n 为浓网阻力系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

浓网速度 $v_2(y)$ 与流量关系 $q(y)$:

$$v_2(y)=\frac{q(y)}{h_n \cdot l}$$

(14)

式中: h_n 为浓网厚度, m 。

联立偏微分方程组[式(10)~式(14)], 得到 $p(y)$ 关于 y 的二阶齐次线性偏微分方程, 结合边界条件:

$$p(0)=p_0$$

(15)

$$p(0)'=\frac{-f_n q_0}{h_n l}$$

(16)

得浓网轴向方向压力分布 $p(y)$:

$$p(y)=\frac{1}{2}\left(p_0-\frac{f_n q_0}{h_n l \sqrt{k_3}}\right) e^{\sqrt{k_3} y}+\frac{1}{2}\left(p_0+\frac{f_n q_0}{h_n l \sqrt{k_3}}\right) e^{-\sqrt{k_3} y}$$

(17)

式中:系数 $k_2=\frac{h \cdot \sqrt{k}}{f_d \cdot (e^{\sqrt{k} l}+e^{-\sqrt{k} l})}$ (18)

$$k_3=\frac{f_n}{h_n l} k_2$$

(19)

代入式(10), 得到 y 截面处的单位长度产水量 $Q(y)$:

$$Q(y)=k_2 \cdot \left[\frac{1}{2}\left(p_0-\frac{f_n q_0}{h_n l \sqrt{k_3}}\right) e^{\sqrt{k_3} y}+\frac{1}{2}\left(p_0+\frac{f_n q_0}{h_n l \sqrt{k_3}}\right) e^{-\sqrt{k_3} y}\right]$$

(20)

通过 $Q(y)$ 对 y 的积分 $Q=N \cdot \int_0^w Q(y) dy$, 求得膜元件产水量:

$$Q=k_2 \cdot N \cdot \left[\frac{1}{2}\left(\frac{p_0}{\sqrt{k_3}}-\frac{f_n q_0}{h_n l k_3}\right) e^{\sqrt{k_3} w}-\frac{1}{2}\left(\frac{p_0}{\sqrt{k_3}}+\frac{f_n q_0}{h_n l k_3}\right) e^{-\sqrt{k_3} w}+\frac{f_n q_0}{h_n l k_3}\right]$$

(21)

式中:系数 k 、 k_2 、 k_3 见式(11)、(18)、(19), 所有参数见图 4 说明。

3 产水流量的影响因素研究

根据第 2 章中推导的产水流量公式, 计算不同类型膜片、不同构型膜元件对产水量的影响。其中不同膜元件构型参数范围见表 2, 包含了不同规格浓、淡网的厚度及膜片下料尺寸范围, 表 3 为不同类型膜元件运行时的操作条件, 即在一定入水压力、回收率下运行, 回收率通过控制入水流量调节, 表 4 为不同浓网、淡网、膜片的流阻性能范围。

表 2 膜元件构型参数

Table 2 Configuration parameters of membrane element

膜页长度 l/m	淡网厚度 h/m	浓网厚度 h_n/m	膜元件有效长度 w/m	膜片页数 N	膜面积/ m^2
0.5~1.0	2.2e-04~4.5e-04	7.1e-04~8.6e-04	0.8~1.0	20~30	37

表 3 操作条件

Table 3 Operation condition

入水压力 p_0/Pa	每页浓网入口流量 $q_0/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	入口流速 $v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	回收率/%
4.8e+05、6.9e+05、1.03e+06、1.55e+06	1.0e-04~2.0e-04	0.15~0.25	15

表 4 材料流阻性能

Table 4 Material flow resistance performance

膜片阻力 $f_m/(\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	淡网阻力系数 $f_d/(\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	浓网阻力系数 $f_n/(\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$
3.39e+10、5.47e+10、8.16e+10、1.15e+11	2.0e+06~4.5e+06	1.0e+05~3.0e+05

3.1 高阻力膜片膜元件产水量

某型号反渗透膜元件 1 的产水量公式[式(21)]中各参数在表 2~表 4 所示范围内, 在膜元件其他参数不变的情况下, 分别改变膜页长度、淡网阻力系数、淡网厚度, 计算产水量的差异。

3.1.1 膜页长度 l 的影响

如图 7 所示, 膜页长度 l 在该基准情况下从 1.01 m 减小至 0.6 m 时, 产水流量由 39 848 L/d 增加至 41 763 L/d, 产水量差异为 4.8%, 淡网沿涡旋线由外向内存在一定压降, 膜页长度 1.01 m 的压

差为 166 kPa,膜页长度 0.6 m 的压差为 63 kPa,随膜页长度 l 减小,淡网压降降低,产水量增加。

3.1.2 淡网阻力系数 f_d 的影响

如图 8 所示,淡网阻力系数在该基准情况下从 $4.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ 降至 $2 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ 时,产水流量由 40 491 L/d 增加至 41 812 L/d,产水量差异为 3.2%,增加不明显,淡网沿涡旋线由外向内存在一定压降,淡网阻力系数从 $4.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ 降至 $2 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$,淡网压降从 132 kPa 降至 61 kPa,随淡

网阻力系数减小,淡网压降降低,产水量增加。

3.1.3 淡网厚度 h 的影响

如图 9 所示,淡网厚度在该基准情况下从 0.000 2 m 增加至 0.000 3 m 时,产水流量由 41 052 L/d 增加至 41 657 L/d,产水量差异为 1.5%,增加不明显,淡网沿涡旋线由外向内存在一定压降,淡网厚度从 0.000 2 m 增加至 0.000 3 m,淡网压降从 102 kPa 降低至 69 kPa,随淡网厚度增加,淡网压降降低,产水量增加。

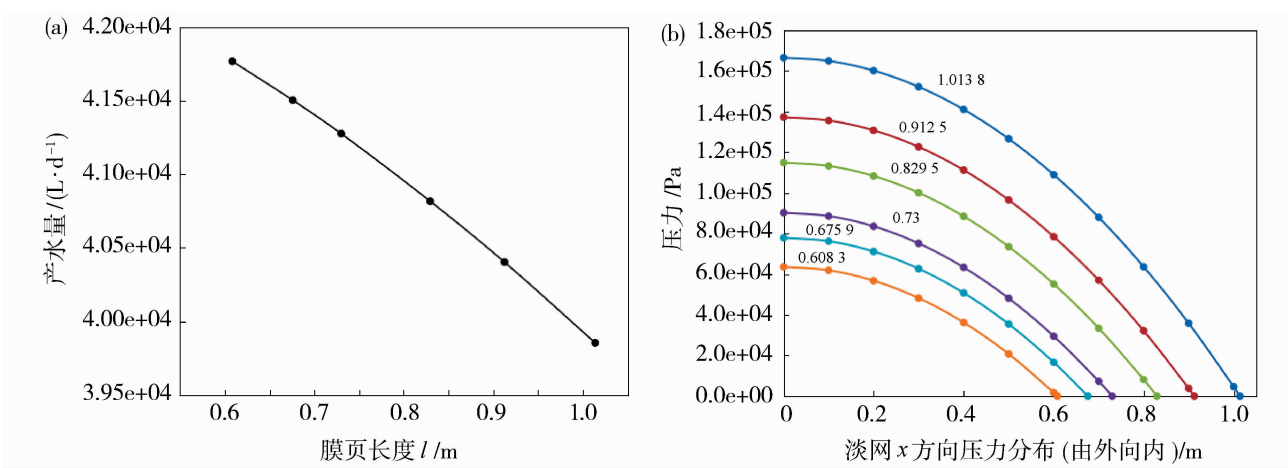


图 7 膜页长度 l 对产水量的影响(a)和对淡网压降分布的影响(b)

Fig. 7 Influence of membrane page length l on water production (a) and pressure drop distribution of permeate-side spacer (b)

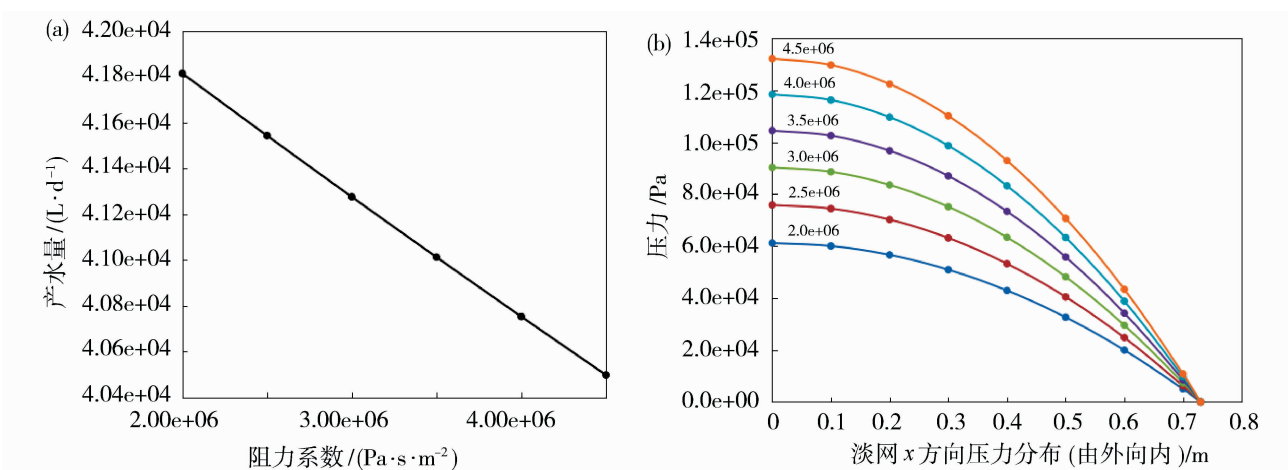


图 8 淡网阻力系数对产水量的影响(a)和对淡网压降分布的影响(b)

Fig. 8 Influence of drag coefficient of permeate-side spacer on water yield (a) and pressure drop distribution of permeate-side spacer (b)

3.2 低阻力膜片膜元件产水流量

某型号膜元件 2 产水量公式[式(21)]中各参数在表 2~表 4 所示范围内,与膜元件 1 不同的是,膜元件 2 运行时入水压力较低,膜片阻力较低,同样在膜元件其他参数不变的情况下,分别改变膜页长度

l 、淡网厚度、淡网阻力系数,计算产水量的差异。

3.2.1 膜页长度 l 的影响

如图 10 所示,膜页长度 l 在该基准情况下从 1.01 m 减小至 0.6 m 时,产水流量由 35 242 L/d 增加至 40 223 L/d,产水量差异为 14%,淡网沿涡旋

线由外向内存在一定压降,膜页长度 1.01 m 的压差为 143 kPa,膜页长度 0.6 m 的压差为 61 kPa,随膜页长度 l 减小,淡网压降降低,产水量增加明显。

3.2.2 淡网阻力系数 f_d 的影响

如图 11 所示,淡网阻力系数在该基准情况下从 $4.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ 降至 $2 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ 时,产水流量由 36 797 L/d 增加至 40 355 L/d,产水量差异为 9.6%,淡网沿涡旋线由外向内存在一定压降,淡网阻力系数从 $4.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ 降至 $2 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$,淡网压降从 118 kPa 降低至 59 kPa,随淡网阻力系数减小,淡网压降降低,产水量增加。

3.2.3 淡网厚度 h 的影响

如图 12 所示,淡网厚度在该基准情况下从 0.000 2 m 增加至 0.000 3 m 时,产水流量由 38 224

L/d 增加至 39 901 L/d,产水量差异为 4.3%,淡网沿涡旋线由外向内存在一定压降,淡网厚度从 0.000 2 m 增加至 0.000 3 m,淡网压降从 94 kPa 降低至 66 kPa,随淡网厚度增加,淡网压降降低,产水量增加。

3.3 结果分析

由以上结果可知,淡网对不同阻力的膜片的影响不一样,如在同样的膜页长度 l 变化范围内,低阻力膜片的膜元件产水量变化范围为 35 242~40 223 L/d,有 4 981 L/d 的变化,而相同的参数,高阻力膜片的膜元件产水量变化范围为 39 848~41 763 L/d,有 1 915 L/d 的变化,同样淡网阻力系数及淡网厚度对不同膜片的膜元件的影响如图 13 所示,可知低阻力的膜片膜元件产水量对淡网的影响较敏感。

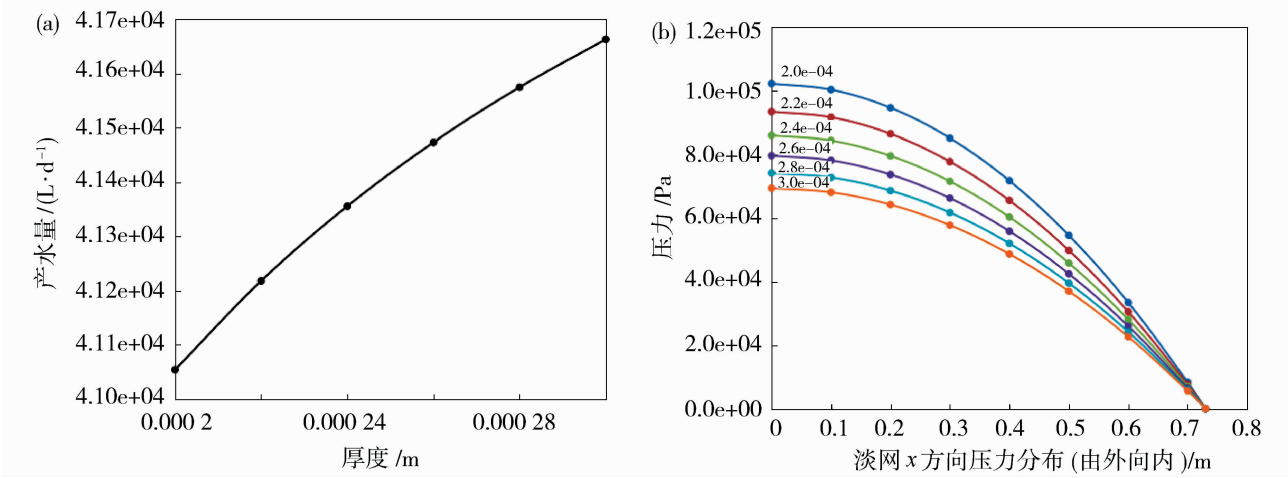


图 9 淡网厚度对产水量的影响(a)和对淡网压降分布的影响(b)

Fig. 9 Influence of permeate-side spacer thickness on water yield (a) and pressure drop distribution (b)

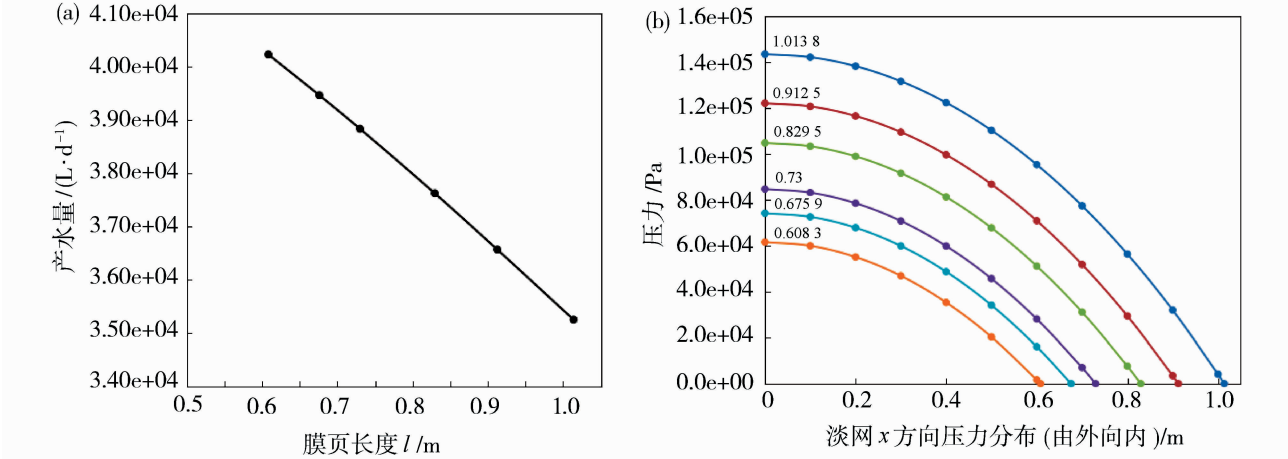


图 10 膜页长度 l 对产水量的影响(a)和对淡网压降分布的影响(b)

Fig. 10 Influence of membrane page length l on water production (a) and pressure drop distribution of permeate-side spacer (b)

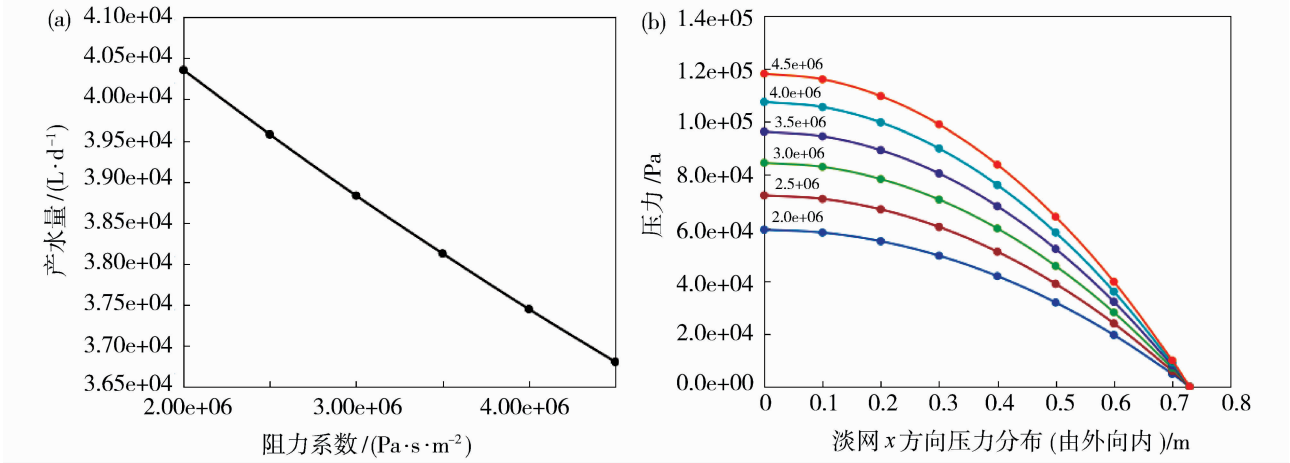


图 11 淡网阻力系数对产水量的影响(a)和对淡网压降分布的影响(b)
Fig. 11 Influence of drag coefficient of permeate-side spacer on water yield (a) and pressure drop distribution of permeate-side spacer (b)

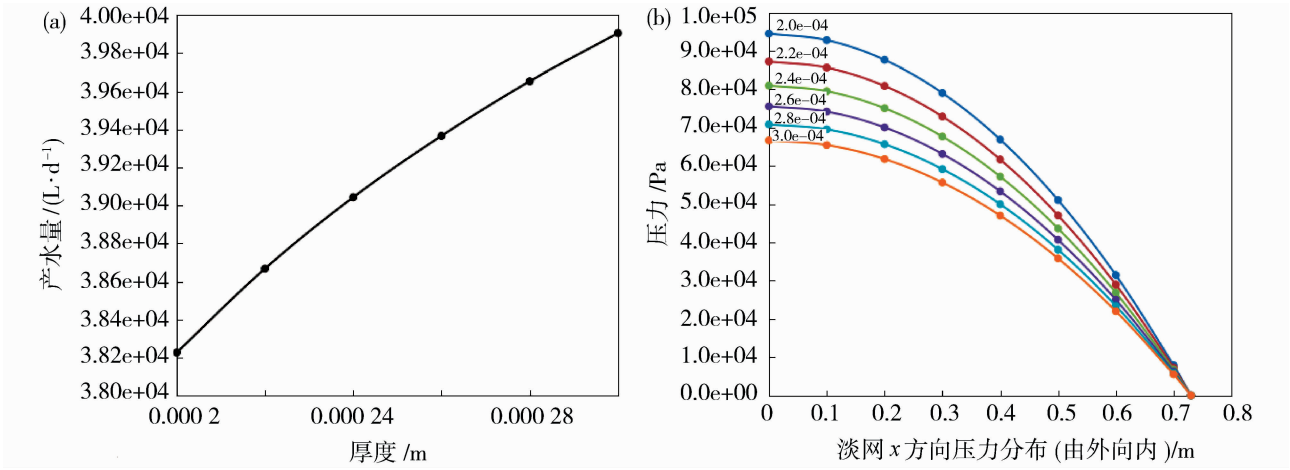


图 12 淡网厚度对产水量的影响(a)和对淡网压降分布的影响(b)
Fig. 12 Influence of permeate-side spacer thickness on water yield (a) and pressure drop distribution (b)

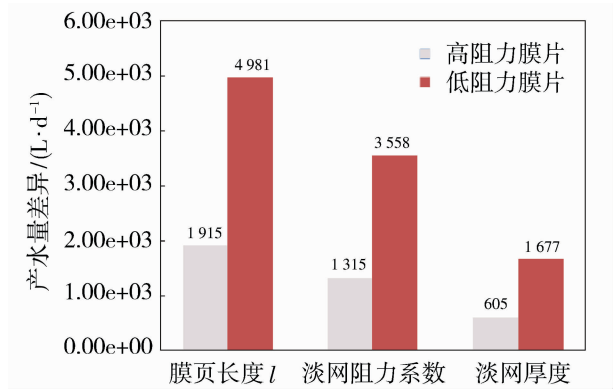


图 13 淡网对不同阻力膜片的膜元件的产水量影响
Fig. 13 Effect of permeate-side spacer on water yield of membrane elements with different resistance

浓水在进水口至浓水出口的方向流动时逐渐跨膜渗透,沿淡网涡旋线方向汇聚至纯水出口,除了

跨膜存在压降,浓网、淡网也存在一定压降,从图 7 ~图 12 可知,减小膜页长度、降低淡网阻力系数、增加淡网厚度,可以降低淡网水流的压力损失,从而提高产水量。而浓网、淡网的压降与跨膜压降的相对大小则取决于各自的流阻大小,对于高阻力的膜片淡网的压降占比较小时,对膜元件的产水量可以忽略,而对于低阻力的膜片,当淡网的压降占比不能忽略时,对膜元件的产水量则有明显的影响。

4 结论

本研究建立的数学模型用于定量计算膜元件内流道的压力损失及产水量,评估膜元件产水量的差异,压力损失的相对大小决定了膜元件产水量与膜片性能的差异,而膜元件产水量与膜片性能的差异大小确定了膜元件产水量的优化空间。

在八寸膜元件参数变化范围内,膜元件的内淡水网流道的压力损失变化范围为 60~170 kPa,减小膜页长度、降低淡水阻力系数、增加淡水厚度,可以降低淡水网水流的压力损失,对于压力损失越大的构型,优化后膜元件的产水量提升越多。

且对于不同阻力的膜片,膜片阻力系数越小,淡水的阻力带来的压力损失影响越大,使得膜元件的产水量低于膜元件理论产水量越明显,此时改进淡水网构型能够有效提升膜元件产水量,如对于某低阻力膜,不同构型的膜元件的产水量差异最大达 14%;相反膜片阻力系数较大时,膜元件的产水量接近膜元件理论产水量,此时产水量提升空间不大,如高阻力膜,不同构型的膜元件的产水量差异最大则只有 4.8%。

参考文献:

- [1] 侯立安,张雅琴. 海水淡化反渗透膜组件系统的研究现状[J]. 水处理技术,2015,41(10):21-25.
- [2] 杨 旅,文志华,张 鑫,等. 家用反渗透膜元件流量评估及导布对流量影响研究[C]//中国家用电器协会. 2020 年中国家用电器技术大会论文集. 美的集团中央研究院,2020:6.
- [3] 王 双,梁 剑,蔡相宇,等. 组件设计对卷式反渗透膜元件抗污染性及能耗影响[J]. 膜科学与技术,2012,32(4):87-91.
- [4] 石月荣,王中阳,王 力,等. 聚乙烯/聚酰胺复合纳滤膜的卷式膜元件结构优化及理论分析[J]. 膜科学与技术,2021,41(2):18-24.
- [5] Karabelas A J, Koutsou C P, Kostoglou M, *et al.* The effect of spiral wound membrane element design characteristics on its performance in steady state desalination — A parametric study[J]. Desalination, 2014, 332:76-90.
- [6] Siddiqui A, Farhat N, Bucs S S, *et al.* Development and characterization of 3D-printed feed spacers for spiral wound membrane systems[J]. Water Res, 2016,91:55-67.
- [7] Liang Y Y, Toh K Y, Fimbres W, *et al.* 3D CFD study of the effect of multi-layer spacers on membrane performance under steady flow[J]. J Membr Sci, 2019, 580:256-267.
- [8] Siddiqui A, Lehmann S, Haaksman T V, *et al.* Porosity of spacer-filled channels in spiral-wound membrane systems: Quantification methods and impact on hydraulic characterization[J]. Water Res, 2017, 119:304-311.
- [9] 方 健,张 峰,仲兆祥,等. CFD 用于反渗透膜组件隔网构型的优化研究[J]. 膜科学与技术,2018,38(1):74-80.
- [10] 杨明智,侯蒙杰,伍泓宇,等. 应用 CFD 优化螺旋卷式膜组件流道结构[J]. 膜科学与技术,2022,42(5):79-85.
- [11] 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.
- [12] 郭中权,邹 湘,毛维东,等. 矿井水脱盐过程中卷式反渗透膜性能的数值模拟研究[J]. 化工学报,2021, 72(9): 4808-4815.
- [13] 毛维东,孙 邃,马 赛,等. 基于 CFD 模拟的某煤矿矿井水膜浓缩单元工艺优化与分析[J]. 能源环境保护,2021,35(6):76-83.
- [14] 刘 洋,赵立新,周龙大,等. 基于多孔跃迁模型的流体阻力压降特性研究[J]. 机床与液压,2022,50(7):17-26.
- [15] 王 涛,展 侠,李继定. 平板膜组件内部流体流动状态的可视化[J]. 化工学报,2014,65(1):71-77.
- [16] Koutsou C P, Karabelas A J, Goudoulas T B, *et al.* Characteristics of permeate-side spacers of spiral wound membrane modules [J]. Desalination, 2013, 322:131-136.

Research on the internal structure design and flux optimization of rolled membrane

DAI Qijun, KANG Yan, WU Zongce, JIN Yan, HAN Qianwu,
ZHANG Lingling, TANG Lun

(Vontron Technology Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: In order to study the mismatch between the water yield of rolled membrane elements and the membrane performance, computational fluid dynamics (CFD) was used to simulate the pressure distribution of retentate spacer and permeate-side spacer flow channels in rolled membrane elements, and

the pressure loss of permeate-side spacer flow channels was calculated by establishing a mathematical model of water production flow of rolled membrane elements. The results showed that the pressure drop gradient in the flow channel was along the direction of the vortex line, and the pressure drop gradient became larger with the increase of accumulated pure water. In eight-inch industrial membrane elements with different configurations under different conditions, the total pressure loss of the permeate-side spacer flow channel was in the range of 60~170 kPa. When the membrane page length was shortened, the flow resistance coefficient of the permeate-side spacer flow channel was reduced, and the thickness of the permeate-side spacer flow channel was increased, the total pressure loss of the permeate-side spacer flow channel was reduced, and the water production of the membrane element was increased. For low-resistance membrane, the difference in water production of membrane elements with different configurations was up to 14%, while for high-resistance membrane, the difference in water production of membrane elements with different configurations was only 4.8%, and the difference in water production of membrane elements was more significant in low-resistance membrane. The mathematical model developed in this paper can be used to quantitatively calculate the water production of membrane elements under different configurations, different flow resistance networks and different operating conditions, and to evaluate the difference between its performance and that of the diaphragm, and to determine the space of water production flow improvement.

Key words: rolled membrane element; component configuration; permeate-side spacer flow resistance; pressure loss; mathematical model

山东理工大学与中科院大连化物所研究团队 Angew.: 动态短氢键网络强化仿生膜表面亲水性以提升抗污染性

纺织工业是废水污染的重要来源,其废水中含有染料和无机盐等污染物,对生态环境造成严重威胁。因此,高效的废水处理技术至关重要。目前,纳滤(NF)与反渗透(RO)技术的联合在废水处理中广泛应用,但多级工艺增加了系统复杂性和能耗。开发一种能在单一单元内同时去除染料和无机盐的新型集成膜技术,对于提高处理效率和可持续性具有重要意义。

近期,山东理工大学与中国科学院大连化学物理研究所合作,将咪唑四聚体(I-quartet)作为人工水通道嵌入磺酸改性聚酰胺(PA-SO₃H)基质中,成功开发了一种具有优异抗污染性能的新型仿生膜。该膜对染料和无机盐的同步去除表现出高效性。研究表明,膜表面的一SO₃H基团通过动态短氢键网络与水分子形成水化层,显著增强了抗污染性能。这一研究为氢键网络在仿生膜抗污染中的作用提供了新的科学视角和理论基础。

这种新型集成仿生膜在纺织废水处理中展现出独特的优势。首先,基于烷基脲基乙基咪唑(HC8)分子自组装形成的I-quartet人工水通道(孔径为2.68 Å),能够实现水分子的选择性传输,同步有效排斥染料和无机盐。其次,膜表面的磺酸基团(-SO₃H)通过吸附水分子形成动态短氢键网络(O-H...O)。这些氢键不仅为水分子传质提供了跳跃位点,降低了水在交替亲水-疏水基质中传输的能量壁垒,还通过形成稳定的水化层,显著增强了膜的抗污染性能。此外,通过DFT计算和分子动力学模拟技术,对水化层的形成机制及其厚度进行了理论计算。研究结果表明,HC8_{3.0}-PA-SO₃H膜通过动态短氢键网络有效减弱了与污染物的界面相互作用,从而显著减少了污染物分子的黏附。这些理论计算结果进一步验证了该膜在抗污染性能方面的优越性。

HC8_{3.0}-PA-SO₃H集成仿生膜在纺织废水处理中表现出高效的筛分性能、优异的稳定性以及显著的抗污染性能。该研究提出了一种能够同步去除染料和无机盐的简化且可持续的解决方案,为纺织行业的环境修复提供了新的技术策略。

该研究于2025年2月24日发表于Angew. Chem. Int. Ed.期刊,通讯作者为山东理工大学靳昀与杨乃涛教授,中科院大连化物所朱雪峰教授,第一作者为山东理工大学王文敏硕士研究生。该研究工作获得了国家自然科学基金、山东省自然科学基金、山东省重点研发计划及榆林清洁能源创新研究院能源革命科技计划的支持。

山东理工大学 孟秀霞