doi：10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023485

用有限元模拟方法研究阶层式多孔薄膜几何参数对水通量的影响

卢 婉[1]，杨永彪[2]，丁明明[1]
（1. 广东工业大学 轻工化工学院，广州 510006；2. 辽宁师范大学 化学化工学院，辽宁 大连 116029）

摘要： 通过系统改变阶层式多孔薄膜大孔和小孔的孔径及孔隙率等几何参数，用有限元模拟方法研究薄膜通量与相关几何参数之间线性或非线性的定量关系. 模拟结果表明，在弯曲孔道基体中添加球形空穴形成阶层式多孔结构后，可使薄膜水通量提升约为原来的 171%. 对于弯曲孔道，单纯增加其数量可使水通量线性提升，单纯增大其孔径可使水通量以指数函数形式提升. 对于球形空穴，单纯增加其数量或单纯增大其孔径，水通量均以指数函数形式提升. 此外，球形空穴的水通量提升作用还依赖于它与弯曲孔道基体网格的相对尺寸，通过调节制备条件可提升分离膜材料的性能.

关键词： 阶层式多孔膜；膜通量；有限元模拟
中图分类号： O484 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671-5489(2024)03-0721-07

Study of Influence of Geometric Parameters of Hierarchically Porous Membranes on Water Flux by Using Finite Element Simulation Method

LU Wan[1], YANG Yongbiao[2], DING Mingming[1]
(1. *School of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *China*; 2. *School of Chemistry and Chemical Engineering, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *Liaoning Province, China*)

Abstract: By systematically changing the geometric parameters such as pore size and porosity of large and small pores in hierarchically porous membranes, we used finite element simulation method to study the linear or nonlinear quantitative relationships between membrane flux and related geometric parameters. The simulation results show that after addition spherical cavities to the curved channel matrix to form a hierarchical porous structure, the water flux of the film can be increased by about 171% of the original. For the curved channels, simply increasing their number can lead to a linear increase in water flux, and simply increasing their pore size can lead to an exponential function increase in water flux. For spherical cavities, simply increasing their number or simply increasing their pore size results in an exponential function increase in water flux. In addition, the water flux enhancement effect of spherical cavities also depends on their relative size with the matrix grid of

收稿日期： 2023-11-13. **网络首发日期：** 2024-02-28.

第一作者简介： 卢 婉(1998—)，女，汉族，硕士研究生，从事理论计算化学的研究，E-mail：wannelu@163.com. **通信作者简介：** 杨永彪(1980—)，男，汉族，博士，讲师，从事理论计算化学的研究，E-mail：yongbiao@lnnu.edu.cn；丁明明(1986—)，男，汉族，博士，教授，从事理论计算化学的研究，E-mail：mmding@gdut.edu.cn.

基金项目： 国家自然科学基金(批准号：22373025).
网络首发地址： https://link.cnki.net/urlid/22.1340.O.20240228.0956.001.

curved channels. The performance of separation membrane materials can be improved by adjusting the preparation conditions.

Keywords: hierarchically porous membrane; membrane flux; finite element simulation

多孔膜具有尺寸筛分效应，即仅允许特定尺寸的物质穿透其孔隙，在废水处理和混合物分离等领域应用广泛[1-3]. 多孔膜的性能与孔径大小密切相关，孔径大小是决定多孔膜性能的关键因素. 高质量的多孔膜具有优异的渗透性和选择性，其属性可通过通量和截留率评估[4-11]. 通常增大孔径可提高通量，但同时会降低截留率；而缩小孔径则会导致相反结果，即分离膜“trade-off”效应[12-18]. 为克服该效应，人们提出了各种解决方案，包括化学表面改性、界面聚合、各向异性形状孔和阶层式多孔膜等[19-22]，其中阶层式多孔膜被认为是最有潜力的解决方案. 该多孔结构至少包括两个长度级别，其对应功能分别为提升渗透性(较大孔径)和控制选择性(较小孔径)[23-27]. 文献[28]利用聚偏二氟乙烯/聚甲基丙烯酸甲酯/聚左旋乳酸(即 PVDF/PMMA/PLLA)的三元共混物制备了阶层式多孔膜，在 PVDF 结晶过程中，由于组分之间的不相容性，因此 PMMA 和 PLLA 被排挤出晶区，二者被氯仿洗掉后分别形成了贯穿整个 PVDF 膜的弯曲孔道和孤岛状球形空穴. 由于在较窄的弯曲孔道基体中存在孔径较大的孤立球形空穴，因此薄膜渗透性因扩散路径的缩短和扩散能垒的降低而得到显著提升. 此外，不同于相分离和聚合物结晶方法，Guo 等[29]提出一种通过将热诱导相分离和氯化钠浸出相结合的方法，构建了具备可调控的双峰多孔结构的超高分子量聚乙烯膜；Luo 等[30]通过熔融纺丝和拉伸制备了基于聚丙烯的中空纤维膜. 这些膜具有双峰多孔结构，可提高薄膜通量并保持截留性能不变.

尽管阶层式多孔膜/双峰多孔膜已在实验中被证明可提升分离膜的性能，但仍存在较多问题可能会阻碍人们了解与可调孔径及其孔隙率相关的分离机制. 例如，通过熔融纺丝和拉伸，孔径不会一直随拉伸比例的增加而线性增加，而是随多孔形状的拉伸而呈先增加后减少的趋势，这将阻碍水分离效率的提高[30]，由于存在孔隙坍塌和膜收缩效应，因此孔隙率不会随混合成分的调节而一直增加[29]. 此外，膜表面的孔隙率通常与内部膜的孔隙率不同，这是由于制备过程中的退火时间和淬火温度不同所致[28].

为更好地设计高性能多孔膜，掌握分离性能与孔径大小以及孔隙率之间的依赖关系，本文在贯通的小孔(弯曲孔道)上嵌入孤立的大孔(球形空穴)制备阶层式多孔膜，若无特殊情况，其截留率保持不变. 基于 Navier-Stokes 方程和连续性方程，采用有限元模拟方法考察大孔和小孔的孔隙率和直径对阶层式多孔膜水通量的影响.

1 模型与方法

用文献[28]的模拟方法，建立 6 个模拟系统的模型如图 1 所示，其中灰色部分为允许水流经过的区域，图 1(A)～图 1(G)和图 1(I)膜的厚度(横向)为 10 μm、宽度(纵向)为 20 μm，图 1(H)膜的宽度为 30 μm，膜的宽度取决于孤立球的数量. 膜的左右两侧连接储液器：左侧为入口，右侧为出口；两侧储液器厚度均固定为 3 μm，其宽度与膜宽度相适应. 膜内部为彼此贯通直径为 d(即图 1 中网格线的宽度)的孔道结构，该结构的几何形状由正弦函数组成. 若包含孤立球形空穴，则球形空穴直径设置为 D，即图 1(E)～图 1(I)中包含的孤立圆形区域的直径. 弯曲孔道(小孔)和孤立球形空穴(大孔)的孔隙率分别用 k 和 K 表示，前者为图 1 中网格线的面积占薄膜区域面积的比例；后者为图 1 中孤立圆形区域的总面积占薄膜区域面积的比例.

为研究直径和孔隙率的影响，d,D,k,K 这 4 个参数的值将在模拟中按比例增减. 为便于比较，设定常用的参考值为 $d=0.12$ μm，$D=2$ μm，$k=K=30\%$(即在实验中仅改变一两个参数，其他参数固定不变). 在模拟中，k 值可能有偏差，这是由于模型中的孤立球形空穴是在孔道结构形成后构造所致，因此球形空穴导致的空隙会与孔道结构形成的空隙产生部分重叠(其影响可忽略).

此外，为实现水的流入和流出，用于两侧储液器的边界条件设置为左侧压强为 1 MPa，右侧压强为 0. 模型内部的水视为具有相同密度 $\rho=1\ 000$ kg/m^3 和黏度 $\mu=0.005$ Pa·s 的不可压缩牛顿流体.

流体力学方程为

$$\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=\nabla\cdot(-p\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\tau})+\boldsymbol{f}, \tag{1}$$

$$\rho\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\tau}=\mu(\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}), \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{f}$ 为重力，$\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵，p 为压强，∇ 为$(\partial/\partial x,\partial/\partial y)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{u}$ 为流体的速度矢量.

本文研究 6 种系统，模型如下. 首先，最基本的参考样本如图 1(A)所示，其中仅包含弯曲孔道，其直径 $d=0.12$ μm. 固定 d 不变，改变弯曲孔道的数量，其孔隙率 k 随之改变，得到系统 1(图 1(A)，(B)). 固定弯曲孔道的数量不变，改变弯曲孔道的孔径 d，其孔隙率 k 随之改变，得到系统 2(图 1(A)，(C)). 固定弯曲孔道的孔隙率 k 不变，改变孔径 d 和孔道数量，得到系统 3(图 1(A)，(D)). 其次，在弯曲孔道基体中嵌入孤立球形空穴的系统. 参考样本如图 1(E)所示，其中球形空穴的直径 $D=2$ μm，孔隙率 $K=30\%$. 通过调节球形空穴的数量成比例改变 K，得到系统 4(图 1(E)，(F)). 通过调节球形空穴的直径 D 成比例改变 K，得到系统 5(图 1(E)，(G)). 固定球形空穴的孔隙率 K 不变，改变孔径 D 和空穴数量，得到系统 6(图 1(E)，(H)).

采取不同的处理方式统计包含和不包含孤立球形空穴的计算结果. 若薄膜模型中仅有弯曲孔道基体，则其结构简单且确定. 若薄膜结构中包含球形空穴，则其排列方式将产生不同结果. 为尽可能覆盖所有排列方式，将在 x-y 平面中以六边形排列的球形空穴点阵以 5°的间隔围绕其几何中心旋转，最后取计算结果的平均值. 考虑到几何对称性，旋转角度从 0°变化到 30°即可，由此得到 7 个样本，相关结果为这 7 个样本的平均值. 图 1(I)展示了一个示例.

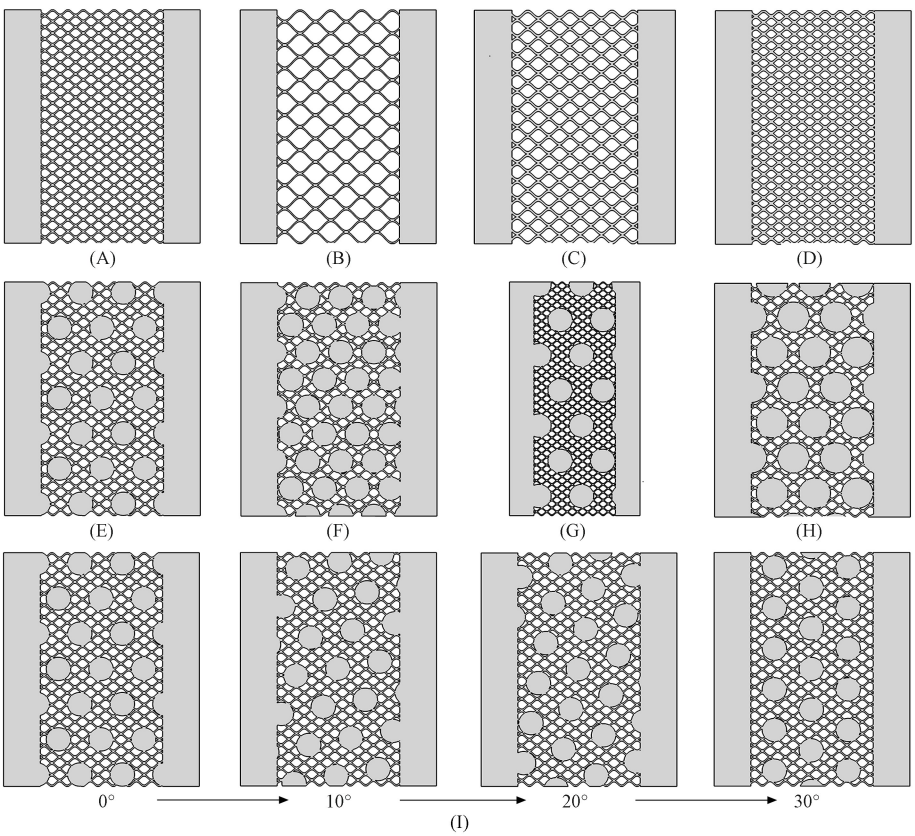


图 1　6 个模拟系统的模型

Fig. 1　Models of six simulation systems

2 结果与讨论

2.1 单纯弯曲孔道孔隙率 k 的影响

孔隙率是影响多孔膜水通量的基本参数之一，分别测试有球形空穴和无球形空穴的模型，结果如图2所示. 在该系列模型中，保持弯曲孔道的孔径不变，通过改变孔道数量调整其孔隙率. 由图2可见，若膜中只有弯曲孔道，则数据点可较好地拟合成直线，该结果与预期结果相符. 这是由于改变孔道的数量只会改变孔道的孔隙率，孔道越多，单位时间内穿过薄膜水的总量越大，因此水通量的增加与弯曲孔道的孔隙率或弯曲孔道数量成正比.

当薄膜中包含球形空穴时，水流速数据点也可较好地拟合成直线. 对于每个 k 值，空穴将水流速提高约为原来的171%(167%～174%). 即均匀分布在膜中的孤立球形空穴可成比例地增加水通量.

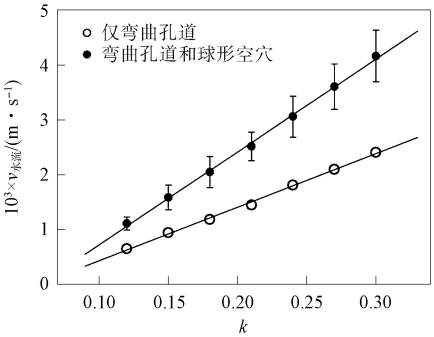


图2 膜中水流速度与弯曲孔道孔隙率 k 的关系

Fig. 2 Relationship between water flow velocity in membrane and porosity k of curved channel

2.2 弯曲孔道直径 d 的影响

若弯曲孔道的孔隙率随孔径发生变化，即通道的数量保持不变，但通道的直径增加，则水通量会得到非线性提升，结果如图3所示. 无论是否存在孤立球形空穴，所有数据点均可较好地拟合成一阶指数函数，函数形式为 $y=y_0+A_1\times\exp\{-x/t_1\}$，其中 A_1 和 t_1 为常数. 包含球形空穴会使水通量约增加到原来的168%(165%～173%).

2.3 弯曲孔道孔隙率不变的情况

若保持弯曲孔道的孔隙率不变，仅改变其直径和数量，则膜中水流速度与通道直径 d 的关系如图4所示. 对于只有弯曲孔道基体的膜，在固定 k 的条件下增大 d 会以非线性的方式大幅度提升水通量. 这是由于均匀层流的速度分布遵循抛物线函数形式，管道越宽则管壁的摩擦阻力相对越小所致.

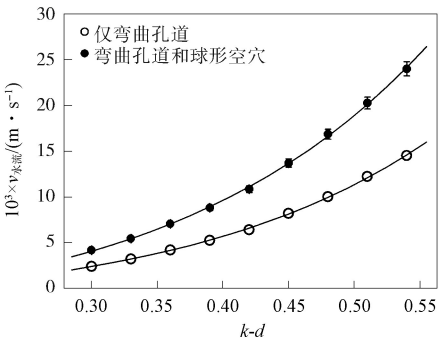


图3 膜中水流速度与 k-d 的关系

Fig. 3 Relationship between water flow velocity in membrane and k-d

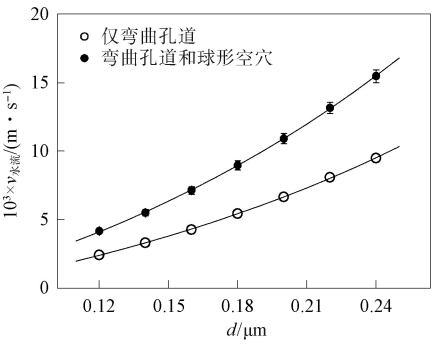


图4 膜中水流速度与通道直径 d 的关系

Fig. 4 Relationship between water flow velocity in membrane and channel diameter d

由图3和图4可见，在保持弯曲孔道孔隙率不变的条件下增大孔道直径(孔道数量减少)与保持弯曲孔道数量不变的条件下增大孔道直径(孔隙率增加)，两种情况下的水通量均得到了指数级提升，只是后者的提升幅度更大，且在弯曲孔道基体中嵌入孤立球形空穴均会导致水通量变大. 通过拟合图4中曲线可见，水通量相对于仅有弯曲孔道基体的情况增加约为166%(163%～175%). 因此对于弯曲孔道基体结构确定的薄膜体系，引入孤立球形空穴会将水通量提高至少163%. 此外，引入球形空穴不会改变水通量相关拟合函数的形式.

2.4 球形空穴单纯孔隙率 K 的影响

膜中水流速度与球形空穴孔隙率 K 的关系如图5所示，其中曲线a为球形空穴直径 $D=2$ μm 时

球形空穴孔隙率随数量的变化关系，曲线 b 为球形空穴数量不变时球形空穴孔隙率随直径 D 的变化关系. 弯曲孔道基体的孔隙率为 30%，孔径为 0.12 μm. 与图 2 中薄膜水通量的线性增加不同，其数据点可拟合成一阶指数衰减函数，两种情况下的孔隙率增加均为弯曲孔道或球形空穴的数量增加所致. 其球形空穴孔隙率的增加对应实验中 PLLA 组分的投料比增大.

2.5　球形空穴直径 *D* 的影响

若球形空穴孔隙率的增加是由其孔径增加(球形空穴的数量不变)所致，则其结果与球形空穴数量增加(孔径不变)导致的孔隙率增加对薄膜水通量的影响非常接近，但也有所不同. 如图 5 中曲线 b 的数据点及其拟合曲线所示，当球形空穴孔隙率小于 0.5 时，薄膜水通量并无显著不同. 随着孔隙率的增加，球形空穴直径增加导致孔隙率变大更利于薄膜水通量的增加. 这是由于 Poiseuille 流中不同流层速度的抛物线分布特征所致. 膜中水流速度与球形空穴直径 D 的关系如图 6 所示. 由图 6 可见：当 $D<1.5$ μm 时，水流速度随球形空穴直径的增大而迅速增大；当 $D>1.5$ μm 时，水流速度随空穴直径的增大而逐渐趋于渐近值. 即当球形空穴的直径大于临界值时，空穴直径的增大对水通量影响较小.

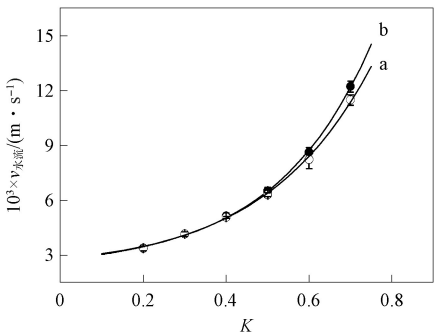


图 5　膜中水流速度与球形空穴孔隙率 *K* 的关系

Fig. 5　Relationship between water flow velocity in membrane and porosity *K* of spherical cavity

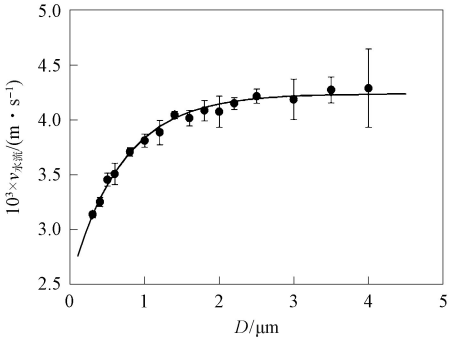


图 6　膜中水流速度与球形空穴直径 *D* 的关系

Fig. 6　Relationship between water flow velocity in membrane and diameter *D* of spherical cavity

2.6　球形空穴孔隙率固定不变的情况

球形空穴孔隙率固定不变时不同孔径 D 的薄膜局部结构如图 7 所示，其球形空穴是嵌入到弯曲孔道基体中分布的，其中颜色越浅越偏浅绿色表示水流越快，颜色越深越偏深蓝色表示水流越慢. 当球形空穴直径较小时(图 7(A))，其存在未使扩散路径缩短. 当球形空穴直径增大到接近弯曲孔道基体

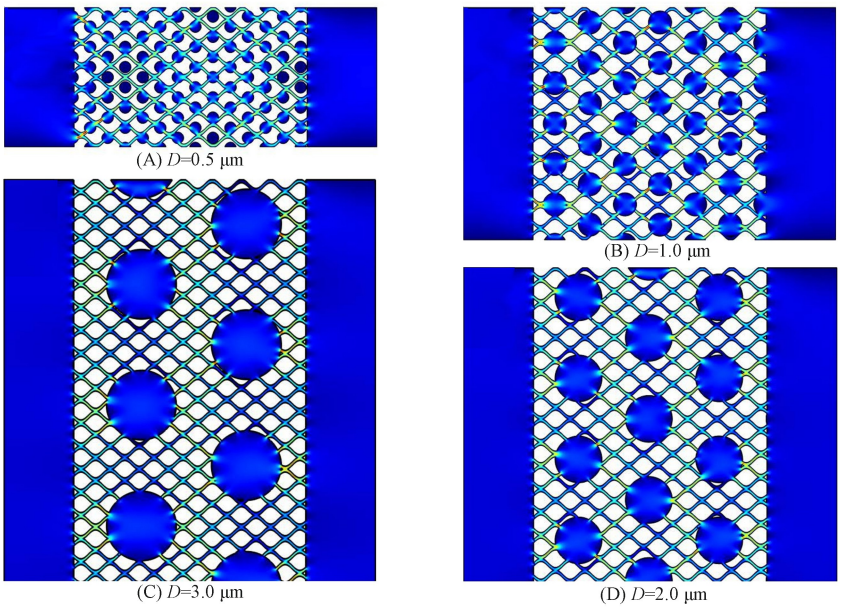


图 7　球形空穴孔隙率固定不变时不同孔径 *D* 的薄膜局部结构

Fig. 7　Local structure of membrane with fixed porosity of spherical cavity and different cavity diameters *D*

的网格尺度时(图7(B)),扩散路径缩短.当球形空穴直径大于网格尺度时(图7(D)),进一步缩短了扩散路径.继续增加球形空穴直径(图7(C)),其效果相当于足够大的球形空穴合并,已不能进一步缩短扩散路径.

综上,本文利用有限元模拟研究了两种情况下阶层式多孔膜的几何参数对其水通量的影响.一种是通过改变弯曲孔道或球形空穴的数量和孔径的方式改变孔隙率,另一种是保持孔隙率不变,改变弯曲孔道或球形空穴的数量和孔径.在实验制备中可通过改变投料比或添加表面活性剂实现改变.模拟结果表明:在弯曲孔道基体中添加球形空穴形成阶层式多孔结构后,可使薄膜水通量提升约为原来的171%;对于弯曲孔道,单纯增加其数量可使水通量线性提升,单纯增大其孔径可使水通量以指数函数形式提升;对于球形空穴,单纯增加其数量或单纯增大其孔径,水通量均以指数函数形式提升;在孔隙率固定不变的条件下,增大弯曲孔道直径的同时减少其数量仍会提升水通量,对于球形空穴,固定孔隙率不变的条件下改变孔径及其数量对水通量的影响则依赖于球径与弯曲孔道网络尺度的相对大小.这些结论有助于在实验制备中更好地调控多孔薄膜的分离性能.

参 考 文 献

[1] HU M Y, YANG S Q, LIU X W, et al. Selective Separation of Dye and Salt by PES/SPSF Tight Ultrafiltration Membrane: Roles of Size Sieving and Charge Effect [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 266: 118587-1-118587-9.

[2] SHENG F, LI X, LI Y, et al. Cationic Covalent Organic Framework Membranes for Efficient Dye/Salt Separation [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 644: 120118-1-120118-5.

[3] PENG S S, ZHANG L Y, ZHANG C K, et al. Gradient-Distributed Metal-Organic Framework-Based Porous Membranes for Nonaqueous Redox Flow Batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(33): 1802533-1-1802533-8.

[4] WANG J Y, CHEN B J, CHENG X, et al. Hierarchically Porous Membranes with Multiple Channels: Fabrications in PVDF/PMMA/PLLA Blend and Enhanced Separation Performance [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 643: 120065-1-120065-10.

[5] WEN Y, ZHANG X R, LI X S, et al. Metal-Organic Framework Nanosheets for Thin-Film Composite Membranes with Enhanced Permeability and Selectivity [J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(9): 9238-9248.

[6] LEE A, ELAM J W, DARLING S B. Membrane Materials for Water Purification: Design, Development, and Application [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2016, 2(1): 17-42.

[7] MA X H, GUO H, YANG Z, et al. Carbon Nanotubes Enhance Permeability of Ultrathin Polyamide Rejection Layers [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 570/571: 139-145.

[8] GU K F, WANG S H, LI Y H, et al. A Facile Preparation of Positively Charged Composite Nanofiltration Membrane with High Selectivity and Permeability [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 581: 214-223.

[9] XIAO H F, CHU C H, XU W T, et al. Amphibian-Inspired Amino Acid Ionic Liquid Functionalized Nanofiltration Membranes with High Water Permeability and Ion Selectivity for Pigment Wastewater Treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 586: 44-52.

[10] ZHAO J Q, WANG Q Q, YANG J, et al. Comb-Shaped Amphiphilic Triblock Copolymers Blend PVDF Membranes Overcome the Permeability-Selectivity Trade-Off for Protein Separation [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 239: 116596-1-116596-11.

[11] LI M P, ZHANG X, ZHANG H, et al. Hydrophilic Yolk-Shell ZIF-8 Modified Polyamide Thin-Film Nanocomposite Membrane with Improved Permeability and Selectivity [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 247: 116990-1-116990-9.

[12] MONSALVE-BRAVO G M, SMART S, BHATIA S K. Simulation of Multicomponent Gas Transport through Mixed-Matrix Membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 577: 219-234.

[13] HIKITA S, SHINTANI T, NAKAGAWA K, et al. Structure Control of Hydrophilized PVDF Hollow-Fiber Membranes Using Amphiphilic Copolymers: PMMA-co-P(HEMA-co-MEA) [J]. Journal of Membrane Science,

2020，612：118421-1-118421-9.

[14] PAL A，KAR S，DEBNATH A K，et al. Reinforcement of Nanostructured Reduced Graphene Oxide：A Facile Approach to Develop High-Performance Nanocomposite Ultrafiltration Membranes Minimizing the Trade-Off between Flux and Selectivity [J]. RSC Advances，2015，5：46801-46816.

[15] XU W L，FANG C，ZHOU F L，et al. Self-assembly：A Facile Way of Forming Ultrathin，High-Performance Graphene Oxide Membranes for Water Purification [J]. Nano Letters，2017，17(5)：2928-2933.

[16] KARIDURAGANAVAR M Y，VARGHESE J G，CHOUDHARI S K，et al. Organic-Inorganic Hybrid Membranes：Solving the Trade-Off Phenomenon between Permeation Flux and Selectivity in Pervaporation [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research，2009，48(8)：4002-4013.

[17] KIM C K，KIM J H，ROH I，et al. The Changes of Membrane Performance with Polyamide Molecular Structure in the Reverse Osmosis Process [J]. Journal of Membrane Science，2000，165(2)：189-199.

[18] GUO H，YAO Z K，WANG J Q，et al. Polydopamine Coating on a Thin Film Composite Forward Osmosis Membrane for Enhanced Mass Transport and Antifouling Performance [J]. Journal of Membrane Science，2018，551：234-242.

[19] SHENG F M，WU B，LI X Y，et al. Efficient Ion Sieving in Covalent Organic Framework Membranes with Sub-2-Nanometer Channels [J]. Advanced Materials，2021，33：2104404-1-2104404-9.

[20] ZHANG X Y，TIAN J Y，XU R Y，et al. In situ Chemical Modification with Zwitterionic Copolymers of Nanofiltration Membranes：Cure for the Trade-Off between Filtration and Antifouling Performance [J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2022，14(25)：28842-28853.

[21] WU H Q，TANG B B，WU P Y. MWNTs/Polyester Thin Film Nanocomposite Membrane：An Approach to Overcome the Trade-Off Effect between Permeability and Selectivity [J]. Journal of Physical Chemistry C，2010，114(39)：16395-16400.

[22] PANATDASIRISUK W，LIAO Z W，VONGSETSKUL T，et al. Separation of Oil-in-Water Emulsions Using Hydrophilic Electrospun Membranes with Anisotropic Pores [J]. Langmuir，2017，33(23)：5872-5878.

[23] LIN T，FAN D，WANG J，et al. Synergism Effect between Internal and Surface Cubic-Large-Pores in the Enhancement of Separation Performance in Hierarchically Porous Membranes [J]. Polymer，2023，265：125601-1-125601-5.

[24] SUN M H，HUANG S Z，CHEN L H，et al. Applications of Hierarchically Structured Porous Materials from Energy Storage and Conversion，Catalysis，Photocatalysis，Adsorption，Separation，and Sensing to Biomedicine [J]. Chemical Society Reviews，2016，45(12)：3479-3563.

[25] ZHANG J C，ZHANG F，SONG J，et al. Electrospun Flexible Nanofibrous Membranes for Oil/Water Separation [J]. Journal of Materials Chemistry A：Materials for Energy and Sustainability，2019，7：20075-20102.

[26] YANG X Y，CHEN L H，LI Y，et al. Hierarchically Porous Materials：Synthesis Strategies and Structure Design [J]. Chemical Society Reviews，2017，46(2)：481-558.

[27] ZHAO J X，WANG W，YE C C，et al. Gravity-Driven Ultrafast Separation of Water-in-Oil Emulsion by Hierarchically Porous Electrospun Poly(L-lactide) Fabrics [J]. Journal of Membrane Science，2018，563：762-767.

[28] WANG J Y，DING M M，CHENG X，et al. Hierarchically Porous Membranes with Isolated-Round-Pores Connected by Narrow-Nanopores：A Novel Solution for Trade-Off Effect in Separation [J]. Journal of Membrane Science，2020，604：118040-1-118040-7.

[29] GUO Y H，ZHANG T C，CHEN M H，et al. Constructing Tunable Bimodal Porous Structure in Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Membranes with Enhanced Water Permeance and Retained Rejection Performance [J]. Journal of Membrane Science，2021，619：118778-1-118778-10.

[30] LUO D J，WEI F J，SHAO H J，et al. Microstructure Construction of Polypropylene-Based Hollow Fiber Membranes with Bimodal Microporous Structure for Water Flux Enhancement and Rejection Performance Retention [J]. Separation and Purification Technology，2019，213：328-338.

（责任编辑：王　健）