

等离子体辅助构筑非对称润湿性 Janus 纤维膜的液滴输运行为数值模拟*

王涛^{1)†} 盛杰¹⁾ 邓宗晖¹⁾ 李蒙¹⁾ 时礼平¹⁾ 陈兆权²⁾ 饶思贤¹⁾

1) (安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山 243032)

2) (安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山 243032)

(2025 年 7 月 10 日收到; 2025 年 8 月 3 日收到修改稿)

非对称润湿性 Janus 纤维膜凭借其两侧显著的润湿性差异, 在与液体相互作用时展现出诸多独特性能, 因此在微流控和生物医学等领域具有广阔的应用前景. 液滴定向输运作为 Janus 纤维膜的关键功能之一, 其输运机制与调控规律对于实际应用至关重要. 然而, 目前对于润湿性梯度及孔隙结构如何调控液滴定向输运行为的研究尚不充分. 本文建立了两相流-相场模型, 结合等离子体辅助构筑的 Janus 纤维膜液滴输运实验, 验证了模型的可靠性; 在此基础上, 系统研究了液滴在膜内的定向输运行为. 研究表明, 液滴从疏水侧向亲水侧的自发输运由表面自由能梯度、Laplace 压差及毛细力协同驱动; 疏水层厚度、亲水层厚度、润湿性梯度和孔隙结构是调控输运效率的关键因素. 相较于传统非对称润湿性结构, 具有润湿性梯度的 Janus 纤维膜可显著提升液滴定向输运速度, 且亲水侧润湿性与输运速度呈显著正相关; 增大孔隙虽能加速液滴输运, 却会导致其在亲水侧的稳态铺展面积减小. 本研究为优化 Janus 纤维膜结构、实现液滴的高效与精准操控提供了重要理论依据.

关键词: Janus 膜, 等离子体改性, 两相流-相场模型, 非对称润湿性, 液滴输运

PACS: 68.37.-d, 52.77.-j, 47.61.Jd, 47.27.ek

DOI: 10.7498/aps.74.20250908

CSTR: 32037.14.aps.74.20250908

1 引言

非对称润湿性 Janus 纤维膜 (简称“Janus 纤维膜”) 是一种两侧具有不同润湿特性 (如一侧疏水, 另一侧亲水) 的功能纤维膜材料^[1,2]. 这种独特的非对称润湿性赋予了 Janus 纤维膜在与液体相互作用时呈现诸多特异性能, 包括润湿选择性、液滴操控能力以及导湿散热效应等^[3-5]. 通过精确调控膜表面不同区域的表面能, Janus 纤维膜能够驱动液滴实现定向运动、可控合并与分裂, 为液滴的定向输运、高效分离与精准混合提供了新途径^[6,7].

此外, 该结构还可有效将液滴分离和过滤, 通过调节膜表面润湿性实现液滴与其他物质的选择性分离^[8]. 因此, Janus 纤维膜在微流控^[9]、生物医学^[10]和能源化工^[11]等领域展现出巨大的应用潜力.

目前, Janus 纤维膜的制备策略总体上可归纳为静电纺丝、表面改性以及异质材料组装三类^[2,12]. 其中, 表面改性法因不受基底材料限制且能在膜两侧形成无缝、高强度的界面而备受青睐. 而在众多表面改性法中, 低温等离子体材料改性方法因具有操作简单、绿色无污染、气体温度低、放电形式灵活等优势^[13], 近几年越来越多的研究聚焦于采用等离子体技术对基底进行选区处理 (选择

* 国家自然科学基金 (批准号: 51905002, 12475253) 和安徽省中青年培养行动优秀青年教师培育项目 (批准号: YQYB2024015) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: taowang89@163.com

性表面活化与功能化修饰), 结合化学接枝或物理沉积工艺, 在单侧或双侧精准构建超疏水或超亲水表面, 从而高效构筑具有显著润湿性差异的非对称 Janus 膜^[14,15].

然而, 尽管等离子体辅助构筑非对称润湿性 Janus 纤维膜已取得一定进展, 但实验制备方法不仅成本高、周期长, 且传统实验手段往往只能制备出一侧亲水、另一侧疏水的简单 Janus 纤维膜, 难以精准构筑出润湿性呈现梯度变化或遵循特定规律变化的特殊 Janus 纤维膜结构. 从而对深入理解液滴在膜上的定向输运行为及其调控机制构成了障碍. 在此背景下, 数值模拟技术凭借其低成本、高灵活性及可重复性强的优势, 成为研究 Janus 纤维膜中液滴输运行为的理想选择. 如王伟等^[16]基于 Janus 膜膜蒸馏传热传质的理论研究建立了二维的计算流体动力学 (CFD) 物理计算模型, 模拟计算了不同操作条件下的温度极化系数和浓度极化系数, 揭示了影响膜蒸馏传热传质过程的内在因素. 模拟结果表明增大液体进口流速和温度, 可以使得膜蒸馏过程的传质通量增加. 周宝凯等^[17]采用分子动力学模拟软件研究了 Janus 膜中水的正向和反向渗透过程, 并对单向渗透机理进行了分析. 研究发现同时满足利于液滴正向渗透而不利于液滴反向渗透时, 更容易实现液滴在 Janus 膜中的单向渗透. Li 等^[18]利用有限元法构建了 Janus 膜的双层模型, 阐明了 Janus 膜中液体侵入机制, 发现液体渗透深度超过疏水层的厚度时, 液体就会克服疏水层渗透至亲水层, 驱动液体运输的力主要包括液滴在表面和孔隙内的拉普拉斯压力.

然而, 目前针对 Janus 纤维膜中液滴输运行为与调控机制的相关仿真研究还十分有限, 尤其是针对润湿性呈现特定规律变化的 Janus 纤维膜的研究还鲜有报道. 本文针对非对称润湿性 Janus 纤维膜, 构建两相流-相场模型, 深入探究液滴在 Janus 纤维膜内的定向输运行为. 为确保模拟结果的可靠性, 将模拟结果与大气压等离子体辅助构筑的 Janus 纤维膜实验结果进行对比, 验证模型的准确性. 在此基础上, 系统分析液滴在非对称润湿性界面中的迁移轨迹及其动态演变过程, 揭示润湿性梯度与孔隙对液滴自发定向输运行为的调控机制, 确定 Janus 纤维膜中影响液滴输运行为的关键影响因素, 进而为优化 Janus 纤维膜结构、实现液滴输运的精准操控提供重要的理论支撑.

2 Janus 纤维膜等离子体辅助构筑与数学模型

2.1 等离子体辅助构筑 Janus 纤维膜实验

图 1 为等离子体辅助构筑非对称润湿性 Janus 纤维膜示意图, 主要过程如下: 采用涤纶纤维膜作为基材, 并在涤纶一侧表面喷涂聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 和二氧化钛 (TiO₂) 混合乳液构筑疏水涂层; 随后采用大气压氩 (Ar)/氧 (O₂) 等离子体射流对另一侧实施亲水化改性. 其中, PDMS 和 TiO₂ 浓度分别设置为 6.5 g/L 和 0.65 g/L. 等离子体射流 Ar 和 O₂ 流量分别设置为 600 mL/min (标准状况下) 和 20 mL/min (标准状况下), 并采用放电频率为 8.2 kHz, 施加电压为 14 kV 的正弦交流电源作为激励源.

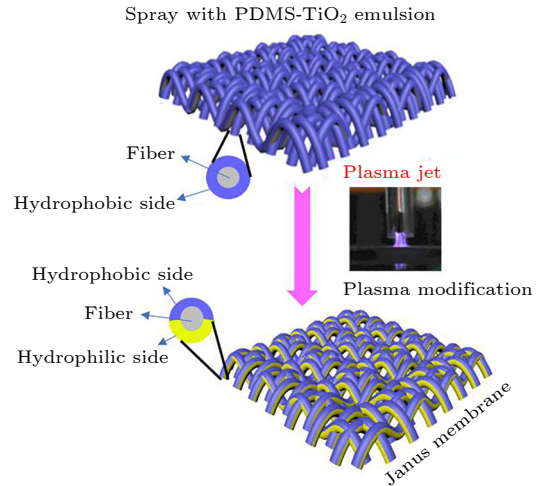


图 1 等离子体辅助构筑非对称润湿性 Janus 纤维膜流程图示意图

Fig. 1. Schematic diagram of plasma assisted construction of asymmetric wetting Janus fiber membrane process.

2.2 两相流-相场模型

本研究所涉及的流动介质为空气和水, 故采用 COMSOL Multiphysics 软件中两相流-相场模型对液滴在 Janus 纤维膜中定向输运过程进行模拟研究. 基于两相流-相场模型, 建立控制方程, 主要包括 Navier-Stokes 方程、连续性方程和 Cahn-Hilliard 方程.

Navier-Stokes 方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot (-p \cdot \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}) + F_{st} + \rho g, \quad (1)$$

式中, \mathbf{u} 为流体速度, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; p 为压力, Pa; \mathbf{F}_{st} 为作用在两相流界面上的表面张力, N; $\boldsymbol{\tau}$ 代表黏性应力张量, Pa; \mathbf{I} 是单位张量; g 为重力加速度, m/s².

连续性方程:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

采用相场法跟踪界面, 添加 Cahn-Hilliard 方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon_{pf}^2} \nabla \psi, \quad (3)$$

式中, λ 为混合能量密度, N; ε_{pf} 为界面厚度控制参数, m; γ 为迁移率, m³s/kg; ψ 为相场辅助变量; φ 为相场变量. 通过求解 (1) 式、(2) 式得到速度场 \mathbf{u} , 然后代入 (3) 式求解相场模型, 最终得到两相流体的体积分数分布.

在模拟计算中, 定义气相为空气, 液相为水, 相关参数均按常压条件设置. 其中, 空气密度为 1.225 kg/m³, 黏度为 1.789×10^{-5} Pa·s; 液滴的密度设为 998.2 kg/m³, 黏度为 1.003×10^{-3} Pa·s, 表面张力为 72 mN/m. 此模型不忽略两相流重力的影响, 重力加速度为 9.8 m/s², Janus 纤维膜中的壁条件为无滑移, 润湿壁接触角分别设置亲疏水层固定润湿性、线性润湿梯度.

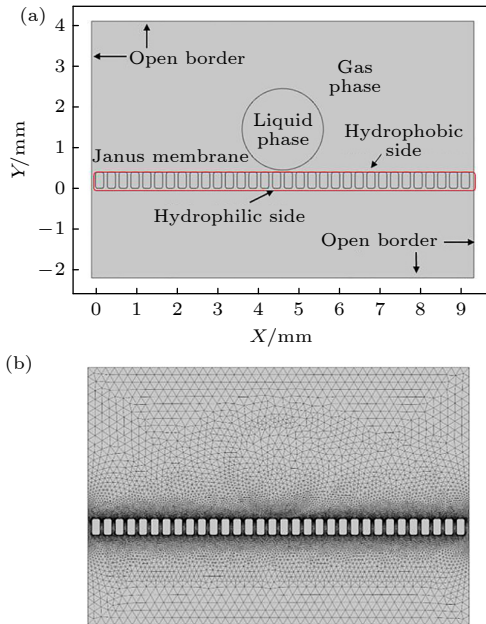


图 2 液滴在 Janus 纤维膜中定向运输的仿真模型 (a) 与网格划分 (b)

Fig. 2. Simulation model (a) and grid division (b) for directional transport of droplet in Janus fiber membrane.

液滴在 Janus 纤维膜中定向运输的仿真模型如图 2 所示, 设置直径为 2 mm 的液滴从 Janus 纤维膜疏水侧上方 0.1 mm 位置静止滴落, Janus 纤维膜的厚度设为 0.4 mm, 纤维宽度为 0.12 mm, 孔间隙为 0.03 mm. 液滴初始形状为球形, 为不可压缩牛顿流体, 整个渗透过程为瞬态, 全过程考虑重力影响.

3 结果与讨论

3.1 实验结果与模型验证

采用 SDC-350 型接触角测量仪对实验制备的 Janus 纤维膜两侧接触角进行测量, 结果如图 3 所示. Janus 纤维膜疏水侧呈现超疏水状态, 水接触角为 150.2°; 亲水侧水接触角为 50.4°.

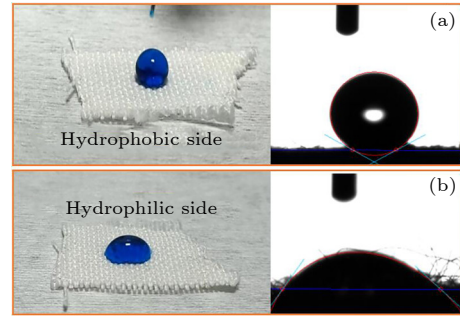


图 3 等离子体辅助构筑的 Janus 纤维膜疏水侧 (a) 和亲水侧 (b) 润湿状态和水接触角

Fig. 3. Wetting state and water contact angle on hydrophobic side (a) and hydrophilic side (b) of plasma assisted construction of Janus fiber membrane.

为验证仿真模型的准确性, 将模拟结果与液滴在 Janus 纤维膜定向运输实验结果进行对比验证. 如图 4 所示, 液滴在 Janus 纤维膜疏水侧的初始状态呈球形, 随后逐渐收缩并穿透至亲水侧, 直至液滴完全渗透至亲水侧. 该输运行为与实验观测的液滴跨膜迁移动态过程吻合.

通过模型参数重置, 使 Janus 纤维膜亲水侧朝上, 并将液滴置于亲水侧. 可以观察到液滴在亲水侧的铺展现象, 如图 5 所示, 液滴不会穿透至疏水侧, 该结果也与实验结果一致.

为验证 Janus 纤维膜逆向润湿过程中的定向输运特性, 本研究构建了疏水侧朝下/亲水侧朝上的 Janus 纤维膜, 探究了液滴自下而上的逆向迁移过程, 如图 6 所示. 结果表明液滴可以克服重力实现跨膜输运, 且在液滴定向输运完成后, 疏水侧无

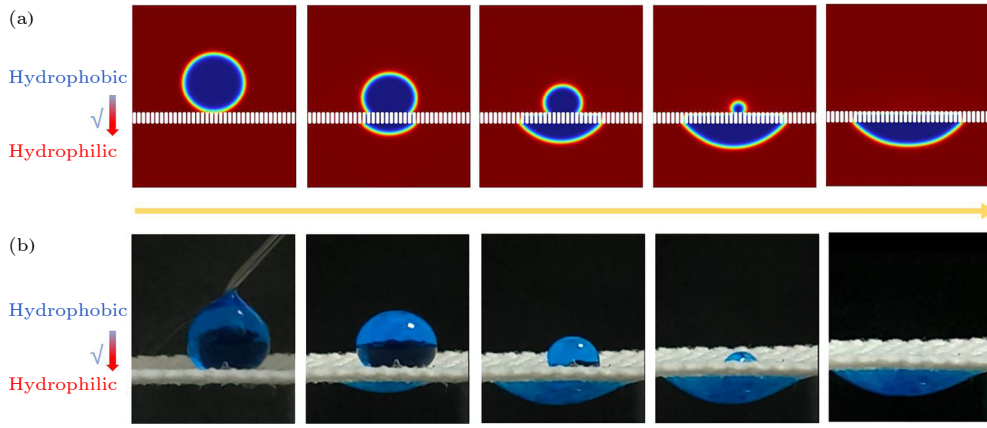


图 4 液滴从疏水侧到亲水侧自输运过程的仿真演化过程 (a) 及实验监测结果 (b)

Fig. 4. Simulation evolution process (a) and experimental monitoring results (b) of droplet self-transport from hydrophobic side to hydrophilic side.

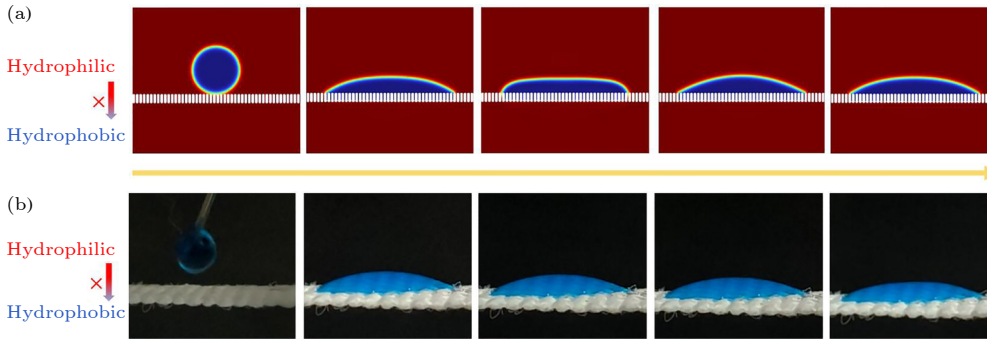


图 5 液滴滴于亲水侧的仿真演化过程 (a) 及实验监测结果 (b)

Fig. 5. Simulation evolution process (a) and experimental monitoring result (b) of droplet spreading on the hydrophilic side.

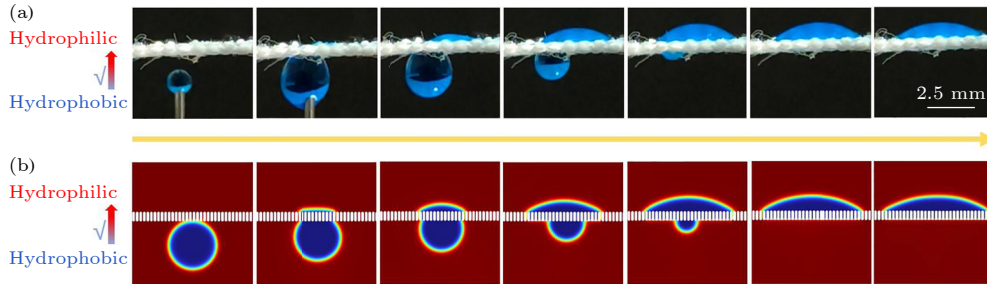


图 6 液滴克服重力输运的实验监测结果 (a) 及仿真演化过程 (b)

Fig. 6. Experimental monitoring result (a) and simulation evolution process (b) of droplet overcoming gravity transport from hydrophobic side to hydrophilic side.

液膜残留. 该逆向输运过程, 液滴迁移轨迹在数值模拟与实验中呈现一致性.

通过实验观测与数值模拟对比研究, 验证了两相流-相场模型的可靠性. 对比结果表明, 数值模拟复现了液滴形变动力学行为与三相接触线迁移路径, 其相变特征与实验中液滴输运行为高度吻合, 因此该模型可为后续润湿性呈现特定规律变化的 Janus 纤维膜的数值模拟奠定基础.

3.2 Janus 纤维膜定向输运机理

Janus 纤维膜凭借其非对称润湿特性, 实现了液滴自发定向输运, 即液滴可以沿着膜疏水侧渗透到亲水侧, 但反相输送则被阻挡. 该现象主要源于表面自由能梯度驱动、Laplace 压差与毛细效应的共同作用^[19]. 如图 7(a) 所示, 当液滴滴落到 Janus 纤维膜的疏水侧时, 会受到静压力 (F_G) 和在纤维上液滴曲面产生的拉普拉斯压力 (F_L) 的作用, 其

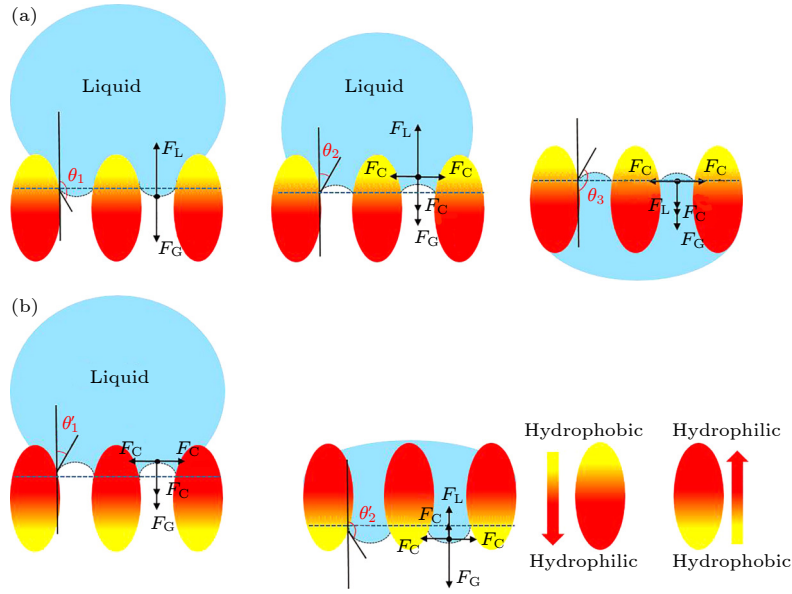


图 7 液滴定向输运过程中受力分析 (a) 液滴从 Janus 纤维膜疏水层到亲水层的受力情况; (b) 液滴滴于 Janus 纤维膜亲水层受力情况

Fig. 7. Force analysis during droplet directional transport: (a) Force distribution of droplet movement from the hydrophobic layer to the hydrophilic layer of Janus fiber membrane; (b) force distribution of droplet movement on the hydrophilic layer of Janus fiber membrane.

表达式如 (4) 式和 (5) 式所示:

$$F_G = (\rho V g) / S, \quad (4)$$

$$F_L = (2\gamma_{\text{water}}) / R, \quad (5)$$

式中, ρ 是水的密度, V 是水的体积, g 是重力加速度, S 是液滴与膜表面的接触面积; γ_{water} 是水的表面张力, θ_1 是疏水侧的接触角; R 是液滴在纤维表面的局部半径. F_G 和 F_L 是内部驱动力. 当 $F_G > F_L$ 时, 液滴会透过疏水层到达膜底部的亲水层, 此时受到亲水层液滴的作用, F_L 方向转变为向下, 亲水层的毛细力 (F_C) 生效并作为驱动力使水滴加速透过, 从而完成输送过程^[19]. F_C 的表达式如下:

$$F_C = (2\gamma_{\text{water}} \cos \theta) / r, \quad (6)$$

式中, θ 是亲水层的接触角, r 是膜材料的平均孔径. 此外, 液滴在从疏水侧向亲水侧输运时, 如果液滴受到的毛细力 F_C 与拉普拉斯力 F_L 共同作用的合力大于液滴重力时, 甚至可克服重力实现跨膜输运.

当液滴滴到 Janus 纤维膜的亲水侧时, 会受到 F_G 和 F_C 的共同作用, 如图 8(b) 所示. 由于膜的亲水性, 在 F_C 作用下液滴会在膜表面扩散. 当液滴接触到 Janus 纤维膜的疏水层时, 液滴受到向上的 F_L 和 F_C , 使得液滴无法透过疏水层.

3.3 润湿梯度对液滴定向输运行为的影响

为探究纤维膜两侧润湿性梯度对液滴输运行为的影响, 本文建立了不同润湿性梯度的 Janus 纤维膜模型, 追踪液滴输运轨迹的位移演变过程, 并解析稳态铺展面积与润湿梯度的关系. 将 Janus 纤维膜两侧分别定义为 A 侧 (疏水侧) 和 B 侧 (亲水侧), A 侧和 B 侧存在着显著的润湿梯度差异. 这种梯度可被分类为 A-on-B 型, 其中 A 或 B 侧的润湿性为固定值; 或 A-to-B 型, 其中从 A 侧到 B 侧存在润湿梯度. 在具体的模型设定中, 将 Janus 纤维膜的总厚度设为 0.4 mm, 纤维宽度设为 0.12 mm, 孔间隙设为 0.03 mm. 在 Janus 纤维膜上方 0.01 mm 位置放置直径为 2 mm 的液滴.

3.3.1 A-on-B 型

在 A-on-B 型的模型中, 通过调整 Janus 纤维膜的亲水层厚度 (hydrophilic layer thickness, HiLT) 和疏水层厚度 (hydrophobic layer thickness, HoLT) 以及液滴直径 (droplet diameter, DD), 探讨非对称润湿性 Janus 织物对液滴单向输运行为的影响. 将 HoLT 设定为 0.05—0.10 mm, 水接触角设置为 150° ; HiLT 设定为 0.30—0.35 mm, 水接触角设置为 50° .

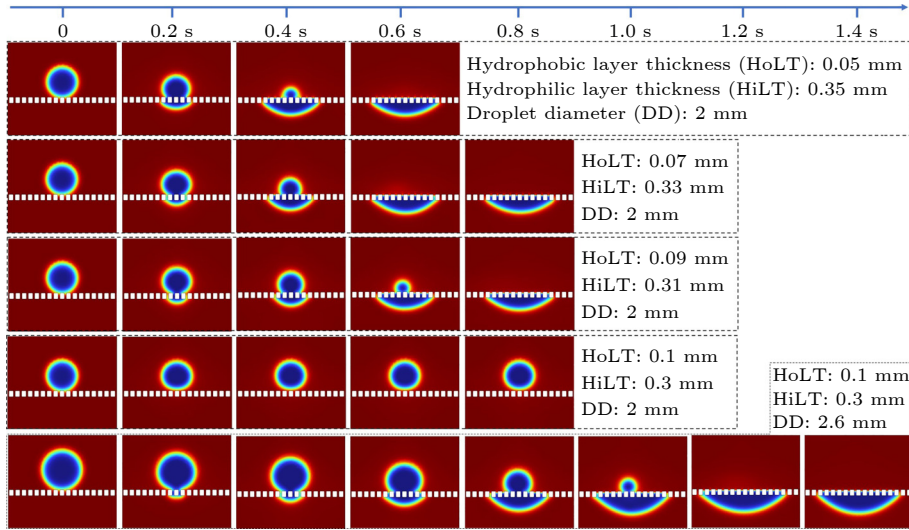


图 8 液滴在不同 HoLT, HiLT 和 DD 的 Janus 纤维膜中单向运输的数值仿真结果

Fig. 8. Numerical simulation results of unidirectional transport of droplets in Janus fiber membranes with different HoLT, HiLT, and DD.

如图 8 所示, 当 HiLT 设置为 0.35 mm, HoLT 设置为 0.05 mm 时, 模拟直径为 2 mm 的液滴滴落于 Janus 纤维膜的疏水侧. 此时, HoLT 较薄, 液滴在受到水静压力 F_G 和液滴曲面的拉普拉斯压力 F_L 的作用下接触到亲水层, 之后在静压力 F_G 、拉普拉斯压力 F_L 和毛细力 F_C 的作用下, 经过约 0.58 s 后输运至亲水侧. 当继续增加 HoLT 至 0.07 mm, 减小 HiLT 至 0.33 mm, 同样大小的液滴需要经过约 0.74 s 实现从疏水侧单向输运至亲水侧. 继续增大 HoLT 至 0.09 mm, 减小 HiLT 至 0.31 mm, 同样大小的液滴需要经过约 0.92 s 实现从疏水侧单向输运至亲水侧. 若继续增加 HoLT 至 0.1 mm, 减小 HiLT 至 0.3 mm, 此时由于 HoLT 过大, 导致无法驱动液滴透过疏水层接触到亲水层. 此时, 增大液滴直径至 2.6 mm, 液滴受静压力 F_G 增大, 使液滴可以透过疏水层输运至亲水层, 但是需要的输运时间更长, 增至 1.4 s.

因此, 在 A-on-B 型的模型中, 疏水层厚度、亲水层厚度以及液滴尺寸会直接影响液滴的单向输运过程. 在疏水层较薄的情况下, 液滴能更加快速地从疏水层输运至亲水层; 而当疏水层较厚时, 液滴更容易在疏水区域形成稳定的形状, 很难渗透至亲水侧, 此时需要增加液滴尺寸才可以使液滴恢复单向输运能力.

3.3.2 A-to-B 型

在 A-to-B 型模型中, 将非对称润湿性 Janus

纤维膜 0.4 mm 处的水接触角设为 150° , 0.35 mm 处接触角设为 90° , 0 mm 处接触角设为 50° , 且疏水侧至亲水侧润湿性呈线性梯度变化, 将其定义为 A-to-B₁; 将 0.4 mm 处接触角设为 150° , 0.35 mm 处接触角设为 90° , 0 mm 处接触角设为 40° , 且疏水侧至亲水侧润湿性呈线性梯度变化, 将其定义为 A-to-B₂. 此外, 同时选择 A-on-B 型进行对比研究, 具体参数见表 1.

表 1 不同润湿性梯度下 Janus 纤维膜的水接触角及孔间隙参数

Table 1. Water contact angle and pore gap parameters of Janus fiber membrane under different wettability gradients.

类型	y (mm)方向	y (mm)方向	孔间隙 /mm
	0—0.35 mm处 WCA/ $^\circ$	0.35—0.4 mm处 WCA/ $^\circ$	
A-on-B	50	150	
A-to-B ₁	$114.3y + 50$	$1200y - 330$	0.03
A-to-B ₂	$142.9y + 40$	$1200y - 330$	

对比不同润湿性梯度的 Janus 纤维膜中液滴在亲水侧的位移演化特征, 由图 9(a), (b) 可观察到, 液滴顶点与最低点的位移轨迹均呈现非单调变化, 且在定向输运过程中伴随明显波动. 这一现象源于多尺度界面效应的耦合作用: 流体黏滞力与表面张力引起的界面失稳 [20]; 接触线动态钉扎效应 [21,22], 润湿梯度界面处存在的能量势垒使接触线经历“锚定-滑移”跃迁过程; 接触角滞后, 由于前进接触角和后退接触角之间的差异, 液滴在表面上的

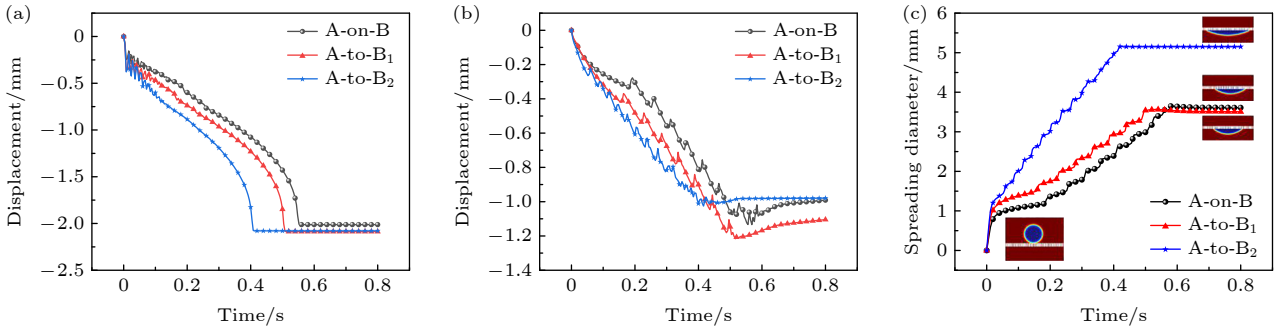


图9 液滴在不同润湿梯度的 Janus 膜中运动特性仿真结果 (a) 液滴顶端位移变化; (b) 液滴底端位移变化; (c) 液滴铺展直径变化
 Fig. 9. Simulation results of droplet kinetic characteristics on Janus fiber membranes with different wetting gradients: (a) Variation in upper contact point displacement of droplet; (b) variation in lower contact point displacement of droplet; (c) variation in spreading diameter of droplet.

行为会表现出周期性的不稳定性, 形成位移回弹现象^[23]. 随着时间演化, 液滴通过内部流场与界面能再分布逐渐达到稳态^[24,25].

对于液滴最高点和最低点位移的变化, 由于 A-to-B 型 Janus 纤维膜存在润湿性梯度, 从而提供了表面张力, 有效降低液滴在亲水侧的黏附和停滞^[26,27], 从而可提高液滴流速和输运效率. 相比 A-to-B₁ 型 Janus 纤维膜, A-to-B₂ 型 Janus 纤维膜有更大的润湿性梯度, 可提供更大的驱动力, 使其率先达到稳态. 另一方面, A-to-B₂ 型的末端亲水性更强, 通过降低接触线钉扎势垒^[22], 从而减小亲水侧的黏附滞后效应.

在 A-on-B 型 Janus 纤维膜中, 如图 9(b) 所示, 疏水-亲水界面处的润湿性梯度突变引发表面张力不平衡, 导致液滴迁移速度呈现先缓后加速的非线性动态特征. 此时, 液滴在迁移初始阶段可能受疏水区 Cassie-Baxter 钉扎效应约束^[28], 需维持高接触角状态并逐步积累能量以突破亲水-疏水界面处的接触线钉扎能垒 F_{pinning} ^[29]:

$$F_{\text{pinning}} \propto \gamma_l V (\cos \theta_{\text{rec}} - \cos \theta_{\text{adv}}), \quad (7)$$

其中, θ_{rec} 为后退角, θ_{adv} 为前进角, γ_l 是液滴界面张力, V 是液滴体积. 液滴在润湿性不连续的表面需积累足够能量才能脱离钉扎, 导致迁移速度较低. 而当液滴主体进入亲水区时, Wenzel 态浸润主导的固-液界面能释放, 黏滞耗散随之减小, 从而驱动液滴迁移速度提升^[30].

当液滴停止运动并达到稳态时, 其在亲水层上的铺展面积可以通过考虑液滴的平衡形态来预测. 使用 Cassie-Baxter 或 Wenzel 状态方程来描述液滴的接触角, 可以推导出铺展面积, 液滴铺展面积

A 由几何形状确定:

$$A = \pi R^2, \quad (8)$$

其中, R 为液滴接触线半径, 与体积 V 和接触角 θ_{end} 的关系为

$$V = \frac{\pi R^3}{3} (2 - 3 \cos \theta_{\text{end}} + \cos^3 \theta_{\text{end}}). \quad (9)$$

可推得:

$$R = \left[\frac{3V}{\pi(2 - 3 \cos \theta_{\text{end}} + \cos^3 \theta_{\text{end}})} \right]^{1/3}. \quad (10)$$

最终铺展面积:

$$A = \pi \left[\frac{3V}{\pi(2 - 3 \cos \theta_{\text{end}} + \cos^3 \theta_{\text{end}})} \right]^{2/3}. \quad (11)$$

如图 9(c) 所示, 进一步分析表明, A-on-B 型 Janus 纤维膜稳态下铺展直径和 A-to-B₁ 型 Janus 纤维膜接近, 而 A-to-B₂ 型 Janus 纤维膜的铺展直径较大, 这是由润湿性不同所致. A-on-B 型和 A-to-B₁ 型 Janus 纤维膜在底端接触角均为 50° , 从而使得铺展面积接近; 而 A-to-B₂ 型 Janus 纤维膜在底端接触角为 40° , 通过 (8) 式可知, 减小稳态下接触角 θ_{end} , 会增大铺展面积 A , 从而导致其铺展面积会大于 A-to-B₁ 型 Janus 纤维膜的铺展面积. 此外, 由图 9(c) 可得, A-to-B₂ 型 Janus 纤维膜稳态下液滴铺展面积较 A-to-B₁ 型 Janus 纤维膜增大了 46%. 由图 9(b) 可得 A-to-B₂ 型 Janus 纤维膜位移回弹幅度降低 80%, 表明末端润湿性的提升可有效抑制界面失稳.

3.4 孔间隙对液滴定向输运行为的影响

孔间隙作为材料表面润湿特性的关键因素之一, 其对液滴的定向输运行为具有调控作用. 为探

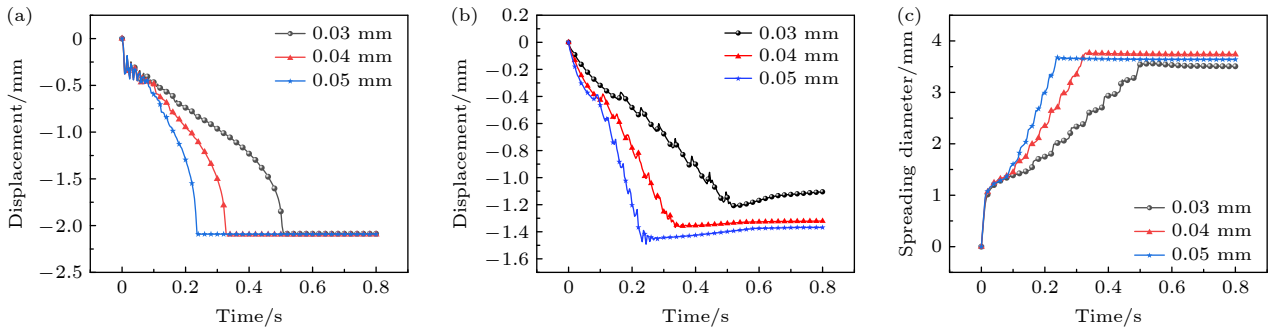


图 10 液滴在不同孔间隙的 Janus 膜中运动特性仿真结果 (a) 液滴顶端位移变化; (b) 液滴底端位移变化; (c) 液滴铺展直径变化
 Fig. 10. Simulation results of droplet kinetic characteristics on Janus fiber membranes with different pore gaps: (a) Variation in upper contact point displacement of droplet; (b) variation in lower contact point displacement of droplet; (c) variation in spreading diameter of droplet.

究孔间隙对液滴在非对称润湿 Janus 纤维膜中输运性行为的影响, 将纤维宽度和润湿性保持不变, 孔间隙分别设置为 0.03 mm, 0.04 mm, 0.05 mm, 如表 2 所示.

表 2 不同孔间隙下 Janus 膜的接触角参数

Table 2. Water contact angle parameters of Janus fiber membrane under different pore gaps.

孔间隙 /mm	$y(\text{mm})$ 方向 0—0.35 mm处WCA/(°)	$y(\text{mm})$ 方向 0.35—0.40 mm处WCA/(°)
0.03	$114.3y+50$	$1200y-330$
0.04	$114.3y+50$	$1200y-330$
0.05	$114.3y+50$	$1200y-330$

如图 10(a), (b) 所示, 液滴在孔隙结构内随孔间隙的增大, 扩散速度随之提高. 实际上, 孔隙尺寸的增大可通过双重机制优化输运效率, 其一是扩展液-固接触界面的面积以增强表面能梯度驱动效应, 其二是构建贯通性渗流通道以降低流动阻力 [31].

Janus 纤维膜的非对称润湿性结构中, 孔隙密度梯度分布对液滴稳态浸润行为的铺展面积呈现出显著调控效应, 如图 10(c) 所示. 密集孔隙增大了毛细作用的有效接触面积, 形成连续的液膜扩展路径, 孔隙密度升高使表面张力主导的毛细力更高效地转化为液膜横向扩展的动能 [32], 使得液滴在较高孔隙密度的 Janus 纤维膜稳态下铺展直径更大.

4 结 论

本研究针对等离子体辅助构筑的非对称润湿性 Janus 纤维膜内的液滴输运过程, 通过数值模拟与液滴输运实验, 采用两相流-相场模型求解 Navier-

Stokes 方程、连续性方程和 Cahn-Hilliard 方程对不同润湿特性 Janus 纤维膜内的液滴开展数值模拟, 系统地探究了非对称润湿性 Janus 纤维膜的液滴定向输运行为及其关键影响因素.

通过数值模拟与实验对比分析了液滴从疏水侧自发输运至亲水侧、逆向输运受阻及克服重力迁移的动态过程, 发现模拟结果与实验观测结果吻合, 验证了模型的计算可靠性. 液滴在疏水侧向亲水侧的自发输运由表面自由能梯度、Laplace 压差及毛细力协同驱动. 其中, 疏水层厚度、亲水层厚度以及液滴尺寸会直接影响液滴的单向输运过程. 此外, 润湿性梯度和孔间隙也是调控输运效率的关键因素. 相较于固定润湿性的 A-on-B 型结构, 具有线性润湿梯度的 A-to-B 型 Janus 膜可显著提升液滴迁移速率, 且亲水侧润湿性与定向输运速度和亲水侧稳态铺展面积呈显著正相关; 而纤维孔间隙的增大能加速液滴输运过程, 但会导致亲水侧稳态铺展面积减小.

相比于前人对固定润湿性 Janus 纤维膜结构的研究, 本文重点探索了膜内润湿性梯度变化、纤维孔隙结构对液滴输运行为的影响, 揭示了液滴自发定向输运行为的调控机制, 为构筑高性能 Janus 纤维膜提供了理论依据.

参考文献

- [1] Liang Y, Kim M, Yang E, Septiyanti M, Kim S, Kim H, Byun J, Mamani K C, Choi H 2024 *Chem. Eng. J.* **496** 154087
- [2] Li H N, Yang J, Xu Z K 2020 *Adv. Mater. Interf.* **7** 1902064
- [3] Yang S, Zhao P J, Cheng C Z, Li C Y, Cheng B W 2024 *J. Text. Res.* **45** 10 (in Chinese) [杨硕, 赵朋举, 程春祖, 李晨暘, 程博闻 2024 *纺织学报* **45** 10]
- [4] Li C X, Zhong F Y, Guo C Y, Zhang Q J, Chen J P, Zhong L

- B, Zheng Y M 2025 *Sep. Purif. Technol.* **361** 131378
- [5] Zhou H, Guo Z G 2019 *J. Mater. Chem. A* **7** 12921
- [6] Li K, Yang H C, Xu Z K 2024 *ACS Appl. Polym. Mater.* **6** 14190
- [7] Yang P, Ju Y S, He J J, Xia Z C, Chen L, Tang S C 2024 *Adv. Fiber Mater.* **6** 1765
- [8] Zhou H, Wang H X, Lin T, Niu H T 2022 *Chem. Eng. J.* **427** 131936
- [9] Xu B, Zhang J, Pan D, Ni J C, Yin K, Zhang Q L, Ding Y L, Li A, Wu D, Shen Z J 2022 *Lab Chip* **22** 4382
- [10] Wang F, Ren J, Peng Q, Sun H, Zeng Q, Zhang Y, Shi G, Zhang M 2024 *Anal. Chem.* **96** 15394
- [11] Dong Y C, Violet C, Sun C Y, Li X H, Sun Y X, Zheng Q B, Tang C Y, Elimelech M 2025 *Nat. Commu.* **16** 2659
- [12] Lü Y Y, Meng J G, Yu L J, Zhi C 2024 *J. Adv. Text. Eng.* **2** 79 (in Chinese) [吕媛媛, 孟家光, 余灵婕, 支超 2024 纺织工程学报 **2** 79]
- [13] Zhang H B, Chen Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 22 (in Chinese) [张海宝, 陈强 2021 物理学报 **70** 22]
- [14] Yang H C, Xie Y, Hou J, Cheetham A K, Chen V, Darling S B 2018 *Adv. Mater.* **30** 1801495
- [15] Xing Y J, Jiang W W, Zhang H J, Zhou K, Yu X T, Li Y Q 2022 *J. Zhejiang Sci-Tech Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **47** 467 (in Chinese) [邢亚杰, 蒋吾伟, 张洪晶, 周克, 虞啸天, 李永强 2022 浙江理工大学学报 (自然科学版) **47** 467]
- [16] Wang W 2021 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [王伟 2021 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [17] Zhou B K 2023 *M. S. Thesis* (Zhengzhou: Zhengzhou University) (in Chinese) [周宝凯 2023 硕士学位论文 (郑州: 郑州大学)]
- [18] Li K, Yang H C, Li H N, Zhang C, Liang H Q, Xu Z K 2025 *Small Struct.* **6** 2400470
- [19] Zhang X Z, Jin J, Zhu Y C 2021 *Membrane Sci. Technol.* **43** 148 (in Chinese) [张兴振, 靳健, 朱玉长 2021 膜科学与技术 **43** 148]
- [20] Lipowsky R 2018 *J. Phys. Chem. B* **122** 3572
- [21] Ceyhan U, Tiktaş A, Özdoğan M 2020 *Colloid Interf. Sci. Commu.* **35** 100238
- [22] Varnavides G, Mortensen A, Carter W C 2021 *Acta Mater.* **210** 116831
- [23] Chowdhury I U, Mahapatra P S, Sen A K 2021 *Chem. Eng. Sci.* **229** 116136
- [24] Goel S, Ramachandran A 2017 *J. Colloid Interf. Sci.* **492** 199
- [25] Izri Z, Van Der Linden M N, Michelin S, Dauchot O 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 248302
- [26] Blank M, Nair P, Pöschel T 2023 *Comput. Method Appl. Mech. Eng.* **406** 115907
- [27] Li C, Kim B, Yoon J, Sett S, Oh J 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2308265
- [28] Cassie A B D, Baxter S 1944 *Trans. Faraday Society* **40** 546
- [29] Ody T, Panth M, Sommers A D, Eid K F 2016 *Langmuir* **32** 6967
- [30] Wenzel R N 1936 *Ind. Eng. Chem.* **28** 988
- [31] Du Q J, Zhou P, Pan Y P, Qu X, Liu L, Yu H, Hou J 2022 *Chem. Eng. Sci.* **249** 117327
- [32] Chai G L, Hu Y X, Liu H F, Li J B, Yu J B, Liu L J, Su J W 2024 *Int. J. Multiphase Flow* **172** 104695

Numerical simulation of droplet transport behavior in plasma-assisted fabricated asymmetric wettability Janus fiber membranes*

WANG Tao^{1)†} SHENG Jie¹⁾ DENG Zonghui¹⁾ LI Meng¹⁾ SHI Liping¹⁾
CHEN Zhaoquan²⁾ RAO Sixian¹⁾

¹⁾ (School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

²⁾ (School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

(Received 10 July 2025; revised manuscript received 3 August 2025)

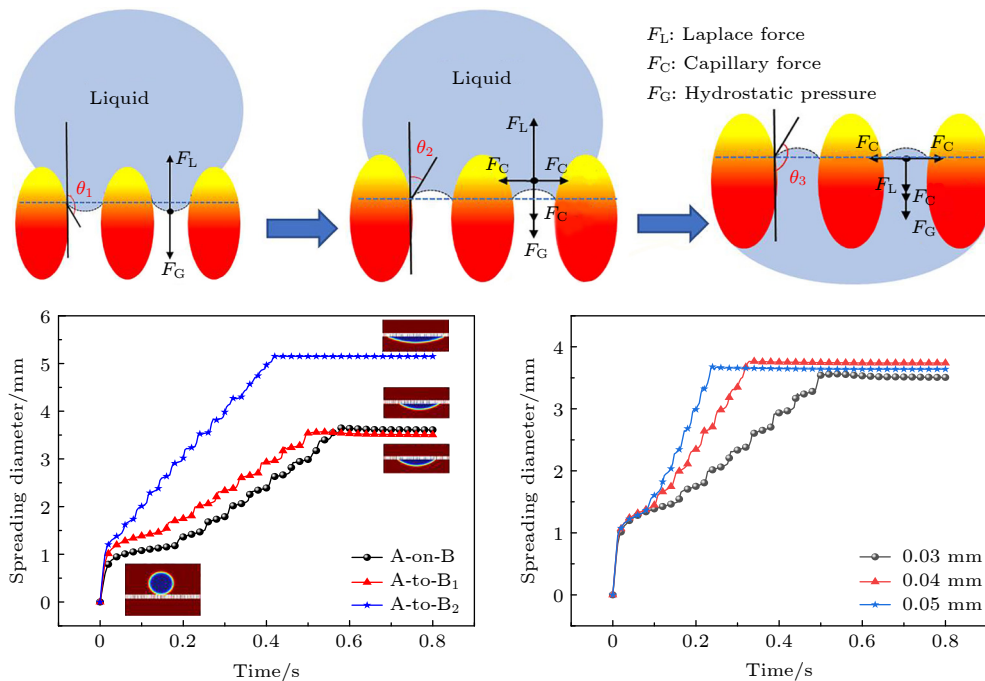
Abstract

The asymmetric wetting Janus fiber membrane exhibits many unique properties when interacting with liquids due to its significant difference in wetting properties on both sides. Therefore, it has broad application prospects in fields such as microfluidics and biomedicine. The directional transport of droplets is one of the key functions of Janus fiber membranes, and its transport mechanism and regulation rules are crucial for practical applications. However, there is currently insufficient research on how wettability gradient and pore structure regulate the directional transport behavior of droplets. In this study, a two-phase flow phase-field model is

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51905002, 12475253) and the Anhui Province Excellent Young Teacher Cultivation Project, China (Grant No. YQYB2024015).

† Corresponding author. E-mail: taowang89@163.com

established, and the reliability of the model is validated through droplet transport experiments conducted on plasma-assisted fabricated Janus fiber membranes. Building on this foundation, the directional transport behavior of droplets within the membrane is systematically investigated. The results show that the spontaneous transport of droplets from hydrophobic side to hydrophilic side is driven by a synergistic effect of surface free energy gradient, Laplace pressure difference, and capillary force. It is found that hydrophobic layer thickness, hydrophilic layer thickness, wettability gradient, and pore structure are key factors in regulating transport efficiency. Compared with traditional structures, Janus fiber membranes with wettability gradients can significantly improve the directional transport speed of droplets, and the wettability of the hydrophilic side shows a significant positive correlation with transport velocity. Although increasing pores can accelerate droplet transport, it simultaneously reduces the steady-state spreading area on the hydrophilic side. This study provides an important theoretical basis for optimizing the Janus fiber membrane structure and achieving efficient and precise fabrication of droplets.



Keywords: Janus membrane, plasma modification, two-phase flow phase field model, asymmetric wettability, droplet transport

PACS: 68.37.-d, 52.77.-j, 47.61.Jd, 47.27.ek

DOI: 10.7498/aps.74.20250908

CSTR: 32037.14.aps.74.20250908



等离子体辅助构筑非对称润湿性Janus纤维膜的液滴输运行为数值模拟

王涛 盛杰 邓宗晖 李蒙 时礼平 陈兆权 饶思贤

Numerical simulation of droplet transport behavior in plasma-assisted fabricated asymmetric wettability Janus fiber membranes

WANG Tao SHENG Jie DENG Zonghui LI Meng SHI Liping CHEN Zhaoquan RAO Sixian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 196801 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250908

CSTR: 32037.14.aps.74.20250908

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250908>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

对称和非对称十字微通道内液滴生成过程的数值模拟

Numerical investigation of droplet generation process in symmetric and asymmetric cross-junction microchannels

物理学报. 2025, 74(13): 134701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250474>

液滴碰撞Janus颗粒球表面的行为特征

Behavioral characteristics of droplet collision on Janus particle spheres

物理学报. 2021, 70(4): 044701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201358>

薄液滴在润湿性受限轨道上的热毛细迁移特性

Thermocapillary migration of thin droplet on wettability-confined track

物理学报. 2023, 72(2): 024702 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221562>

纳米结构及浸润性对液滴润湿行为的影响

Effects of base angle and wettability of nanostructures on droplet wetting behaviors

物理学报. 2021, 70(12): 126101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201584>

非对称银膜多孔硅-氟化钙等离子体波导及其波导灵敏度特性

Porous silicon - calcium fluoride plasma waveguide with asymmetric Ag film and its sensitivity characteristics

物理学报. 2021, 70(22): 224201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210704>

直通道内两相流动的格子玻尔兹曼方法模拟

Lattice Boltzmann method simulation of two-phase flow in horizontal channel

物理学报. 2023, 72(8): 084701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222421>