

非对称润湿性 Janus 织物的制备及应用进展

彭新月¹ 侯科如¹ 计雅婷¹ 张金萍¹ 陈寅杰¹ 曾川¹ 陈国华²
董伟伟³ 蔡再生¹

1. 东华大学 化学与化工学院, 上海 201620;
2. 三立人(深圳)科技有限公司, 广东 深圳 518000;
3. 中国针织工业协会, 北京 100020

摘要: 非对称润湿性 Janus 织物因其液体选择性和定向输送性能而备受关注。系统梳理润湿性理论及其传输机制, 全面综述近年来非对称润湿性 Janus 织物的主要制备方法 & 研究进展, 重点从雾水收集、单向导湿、油水分离、医疗卫生和海水淡化 5 个应用领域进行归纳与总结, 并在此基础上进一步探讨当前研究的挑战与局限性, 并对未来发展方向进行展望。研究旨在为 Janus 织物的深入研究 & 创新应用提供理论参考 & 实践指导。

关键词: Janus 织物; 非对称润湿性; 单向传输; 雾水收集; 油水分离; 医疗卫生; 海水淡化

中图分类号: TS1; TQ34

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)08-0044-10

Progress in preparation and application of asymmetric wettability Janus fabrics

Peng Xinyue¹, Hou Keru¹, Ji Yating¹, Zhang Jinping¹, Chen Yinjie¹, Zeng Chuan¹, Chen Guohua²,
Dong Weiwei³, Cai Zaisheng¹

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Sanliren (Shenzhen) Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;
3. China Knitting Industrial Association, Beijing 100020, China

Abstract: Asymmetric wettability Janus fabrics have garnered widespread attention for their liquid selectivity and directional transport properties. The theories of wettability and their transport mechanisms has been systematically sorted out, the main preparation methods and research progress of asymmetric wettability Janus fabrics in recent years have been comprehensively summarized, and their applications in five key fields have been highlighted: fog collection, unidirectional moisture conduction, oil-water separation, medical and healthcare and seawater desalination. Building upon this foundation, the challenges and limitations existing of the current research are discussed, and the future development directions are prospected. The study aims to offer theoretical references and practical guidance for the in-depth study and innovative applications of Janus fabrics.

Keywords: Janus fabric; asymmetric wettability; unidirectional transportation; fog harvesting; oil-

收稿日期: 2025-04-11

作者简介: 彭新月, 女, 2003 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雾水收集用织物的开发及应用, 17383208150@163.com

通信作者: 蔡再生, 教授, 主要研究方向为纺织品功能整理、纺织品印染工艺与控制, 以及新型助剂, zshcai@dhu.edu.cn

water separation; medical and healthcare; seawater desalination

Janus 材料得名于古罗马神话中的两面神—Janus, 它象征着回顾过去和展望未来的能力。1989 年, Casagrande 等^[1]首次采用“Janus beads”一词描述具有非对称润湿性的玻璃微球。De Gennes^[2]于 1991 年在诺贝尔奖演讲中提及该词, 此后 Janus 材料被广泛关注。在材料科学中, Janus 材料通常指 2 个表面性质不同或相反的材料, 体现为在化学组成、物理性质(如润湿性、孔隙率、表面电荷等)或功能性等方面具有差异性。Janus 材料的不对称性使其在多种应用中展现出独特的性能^[3]。Janus 材料根据物理形态主要分为 Janus 粒子、Janus 膜以及 Janus 织物等^[4]。其中, 非对称润湿性 Janus 织物是指一面为疏水性(接触角大于 90°)、另一面为亲水性(接触角小于 90°)的织物, 该特性可使织物实现液体定向传输, 并具备快速导水、收集雾气等功能^[5]。Janus 织物可以是单层、双层或多层结构, 其制备方法大致分为不对称制备和不对称改性 2 种^[6]。目前, 常见的非对称润湿性 Janus 织物的制备方法包括机织法^[7-8]、静电纺丝法^[9]、涂层法^[10]及丝网印刷法^[11]等。非对称润湿性 Janus 织物因其特性在服装、雾水收集、油水分离、医疗卫生以及海水淡化等领域具有广阔的应用前景^[12]。

本文首先介绍经典的润湿性理论, 具有非对称

润湿性 Janus 结构实现液体单向传输的机制; 然后, 综述非对称润湿性 Janus 织物的主要制备方法, 以及该织物在各个领域的最新应用进展; 最后, 讨论非对称润湿性 Janus 织物在制备和应用过程中面临的挑战和限制, 并对未来发展方向进行展望。

1 润湿性理论及传输机制

润湿性理论用于解释非对称润湿性 Janus 材料的表面润湿行为, 主要包括描述固体表面的静态润湿性模型和动态润湿性模型。非对称润湿性 Janus 材料基于材料内外侧亲疏水性的差异, 利用润湿梯度的驱动, 促使液体自发地从疏水侧向亲水侧传递, 进而实现液体的单向传输^[13-15]。

1.1 润湿性理论

润湿性是指固体表面被液体润湿的能力或程度, 通常用接触角来表征。理想状态下, 如果将液滴置于光滑的固体表面, 则表面的润湿性符合 Young 模型[图 1a)], 其数学表达式^[16]:

$$\cos \theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LV} \quad (1)$$

式中: θ 为液滴与固体表面形成的接触角; γ_{SV} 为固/气界面张力; γ_{SL} 为固/液界面张力; γ_{LV} 为液/气界面张力。

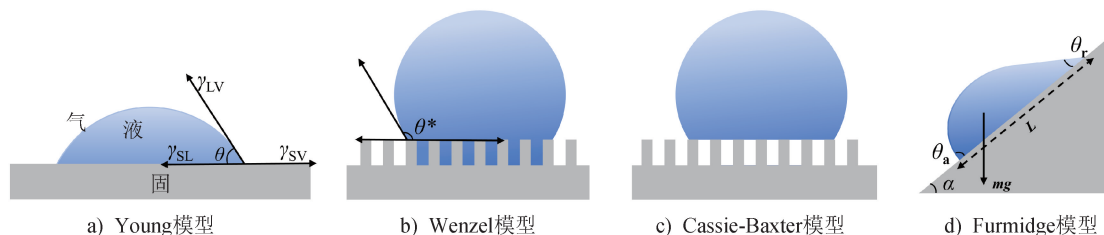


图 1 润湿性模型示意

Fig. 1 Wettability model schematic

Young 模型仅适用于理想的光滑固体表面, 而实际的固体表面具有一定的粗糙度。Wenzel 认为粗糙表面的实际面积比表观面积大, 其提出了适用于描述粗糙表面润湿性的 Wenzel 模型[图 1b)]^[17-18]。由 Wenzel 模型可推导出接触角与表面粗糙度相关。若表面粗糙度增加, 则亲水性表面的亲水性能、疏水性表面的疏水性能都将有所提升。

Wenzel 模型假设液体完全填充固体的粗糙表面, 形成连续的液固界面。而在某些粗糙度较大的固体表面, 液体无法完全浸润, 只能与固体表面的顶端相接触, 并与空气形成复合界面, 此时固/液/气三相共存。该状态下接触角可用 Cassie-Baxter 模型[图 1c)]^[19]表征。根据 Cassie-Baxter 模型, 若表面粗糙度增加, 则亲水性表面可转变为疏水性表面, 疏

水性表面的疏水性能会进一步增强^[20]。以上3种模型主要用于描述固体表面的静态润湿性,而对于液体在固体表面的动态行为(如液滴的滚动、滑动等),可用 Fumridge 模型[图 1d)]^[21] 表征。

1.2 传输机制

受沙漠甲虫背部交替的疏水/亲水性凸起和仙人掌刺的不对称几何形状等自然现象的启发,进一

步分析在没有任何外力作用下,液体在非对称润湿性 Janus 织物厚度方向上实现单向传输的机制。自然界动植物在无外力作用下完成液滴的定向传输,主要依赖于润湿性梯度和拉普拉斯压力梯度,Janus 织物传输机制与其相似。如图 2a) 所示,水滴可以从疏水层渗透到亲水层,但从亲水层到疏水层的过程则受到阻碍。

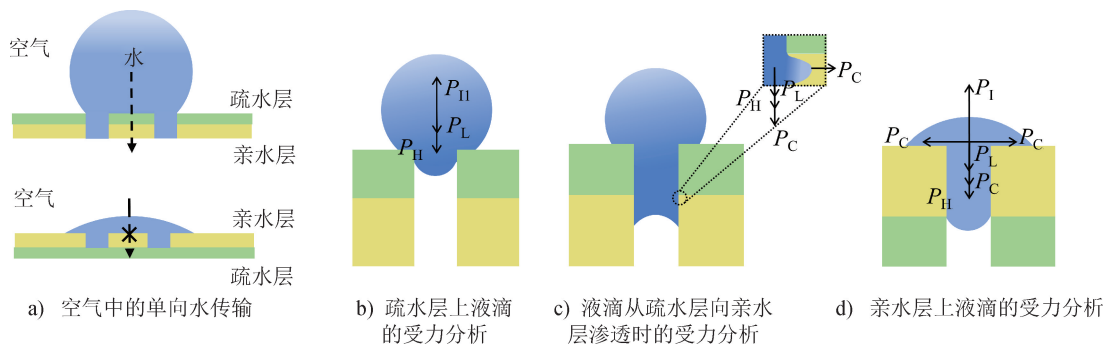


图 2 液体单向传输机制

Fig. 2 Liquid unidirectional transportation mechanism

水滴在材料表面的表面能可以表示为:

$$E = \gamma_{LV}(9\pi V^2)^{1/3}(\cos^3\theta - 3\cos\theta + 2)^{1/3} - X_0\gamma_{LV} \quad (2)$$

式中: E 为表面能; V 为水滴体积; X_0 为初始状态时液/气接触面积。

表面能与接触角呈正相关。由于水滴在疏水层的接触角大于亲水层的接触角,因此水滴在疏水层的表面能大于亲水层的表面能,故而水滴在材料表面可自发定向输送。然而,只有当水滴克服疏水层造成的能量阻碍,并从疏水层向亲水层移动而不是呈相反方向移动时,水滴才能实现单向传输。如图 2b) 所示,疏水层的水滴会受到静压力(P_H)、曲面拉普拉斯压力(P_L)以及侵入压力(P_I)的作用,其中 P_I 为阻力。只有当水滴在这三种力的共同作用下,与亲水层底层接触时,水滴才会从疏水层向亲水层渗透,此时亲水层的毛细力(P_C)生效, P_I 消失[图 2c)]。亲水层内部的毛细力(P_C)还会促进水滴在亲水层内沿所有可能的方向扩散,亲水层的水滴会同时受到 P_I 、 P_C 、 P_H 和 P_L 的作用[图 2d)]。由于其亲水性,水滴在亲水层铺展, P_H 和 P_L 值降低,水滴克服能垒的难度加大,阻碍水滴反向输送。因此,Janus 织物具有单向传输特性,该特性主要取决于织物两侧的润湿性、孔隙半径和疏水层的厚度。疏水层越厚,能垒越高,越不利于水滴的传输^[22-24]。

2 非对称润湿性 Janus 织物的制备

2.1 机织法

机织法是指通过织机将经纱和纬纱以一定的规律交织,形成织物的一种加工方法。机织法制备非对称润湿性 Janus 织物的关键在于,通过纱线选择、织物组织结构设计以及织造工艺优化,使织物两面或多面呈现不同的性能^[20,25]。Zeng 等^[26]以莱赛尔纱线作为表经表纬,疏水改性聚酯纱线作为里纬、镀银涤纶复合纱线作为里经,通过织造方法制得具有高导热界面和润湿梯度的双层 Janus 织物,集水率可达 $2\,573.3\text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。Liu 等^[27]采用编织工艺和机织工艺相结合的方法,制备出一种亲水/疏水 Janus 织物(HHJF)。HHJF 的亲水层为天丝编织纱,疏水层为聚四氟乙烯(PTFE)编织纱(PBY)。织造技术具备高成熟度和高生产效率的特点,可有效提高织物的力学性能,适用于连续化、大规模生产标准化产品^[7]。但采用机织法制备的 Janus 织物效能相对较低,织物两侧润湿性的差异主要依赖于纤维本身的润湿性。

2.2 静电纺丝法

除了采用织造技术直接制备 Janus 织物外,还

可以先制造一层膜的一面,然后基于膜制备另一面。目前,制造 Janus 膜的技术包括静电纺丝法、真空过滤法、相分离法等。其中,静电纺丝法因制品具有优异的各向异性、润湿性能以及微结构精确可控性,被广泛应用于 Janus 织物的制备^[28]。Cheng 等^[29]采用静电纺丝技术制备高取向性的聚对二氧环己酮(PPDO)纳米纱线,并通过 Stöber 方法在 PPDO 纳米纱线表面原位生长二氧化硅(SiO₂)纳米颗粒,得到 PPDO/SiO₂ 纳米纱线。随后,采用编织工艺成功制备了一种具有不对称润湿性和双重个人热管理性能的 Janus PPDO 织物。Du 等^[30]采用静电纺丝法制备了一种具有 Janus 润湿性和高导热性的新型辐射冷却超织物,该织物由疏水性聚乳酸无纺布内层与亲水性醋酸纤维素/单宁酸@3-巯丙基三乙氧基硅烷改性氮化硅复合外层构成。

静电纺丝法制备 Janus 织物兼备高效率、高精度可控以及易于操作等优点,可实现单一织物的多功能性。但静电纺丝法对纺丝液的浓度、黏度和溶解性要求严格,制备的 Janus 织物也存在结构稳定性不足、双层结构间的界面结合力弱及难以规模化生产等问题^[5]。

2.3 涂层法

涂层法是一种材料表面功能化改性的技术,可以通过选择合适的涂层材料和涂覆工艺实现材料性能的不对称,进而在非对称润湿性 Janus 织物的制备中展现出独特的优势。常见的涂层法包括喷涂法、浸涂法、化学沉积法、物理沉积法以及热熔涂层法等。

其中,喷涂法可通过调节喷涂压力、距离和速度等工艺参数,精确控制涂层的厚度和均匀性,从而实现织物表面改性的目的,高效构建 Janus 织物的不对称结构。Zhang 等^[31]采用电喷涂技术将二氧化钛-十六烷基三甲氧基硅烷/酞菁蓝/环烯烃共聚物复合涂层溶液均匀喷涂于织物正面,成功制备了 Janus 棉织物。Cheng 等^[32]结合静电纺丝和电喷雾技术制备了一种全纳米纤维 Janus 织物,其由水解聚丙烯腈/六方氮化硼纳米纤维亲水层、黏附层、导电银纳米线层以及具有大孔隙疏水性的聚氨酯纳米纤维疏水层组成。

浸涂法也是制备非对称润湿性 Janus 织物的常用涂层技术,与喷涂法相比较,该技术的材料利用率

较低。Zhou 等^[33]通过浸涂法在织物表面涂覆丙氧基甘油-三甘油三酯-甘油三酯醚和十八胺,然后在织物的一面采用电喷涂技术涂覆含有疏油和亲水基团的含氟共聚物,成功制备了一种在空气(干燥)和水下环境中都具有定向输油性能的新型 Janus 织物。

此外,物理沉积法和化学沉积法通过在织物表面沉积功能材料,从而赋予织物不对称性能,进而实现 Janus 织物的设计与制备。王敬明等^[34]以棉织物为基底,利用正十八烷基三乙氧基硅烷进行疏水改性,并结合高锰酸钾氧化及化学浴沉积处理,成功制备了一种不对称润湿性 Janus 复合织物。

在制备 Janus 织物的涂层法中,喷涂法应用最为广泛,其具有操作简单、通量高、可应用于多种基材、技术成熟且可产业化应用等优点,但制备的织物耐久性不足,涂层在反复洗涤处理、机械磨损、长期紫外线照射及化学腐蚀等条件下性能有所下降,且湿法改性过程中容易出现膜孔大面积堵塞和渗透等问题^[5,31]。

2.4 丝网印刷技术

丝网印刷技术通过选择性涂覆功能材料,实现材料表面性能的不对称性设计。其制备非对称润湿性 Janus 织物的原理是利用网状模板,将功能涂料通过刮板挤压至织物表面,从而形成具有功能性的图案或涂层^[35]。Du 等^[36]将丝网印刷技术、化学沉积技术与泡沫整理技术相结合,制备了一种新型多能源耦合辐射保暖 Janus 纺织品。Guan 等^[11]通过丝网印刷技术,用黏性淀粉溶液对棉织物的一面进行处理,然后在处理后的棉织物表面负载氧化石墨烯涂层和还原氧化石墨烯涂层,成功制备出一种具有 Janus 润湿功能和吸湿排汗功能的智能纺织品。

丝网印刷技术可实现织物局部高精度功能化,具有印刷速度快、可批量加工等优点,适用于小规模批量生产。

非对称润湿性 Janus 织物制备方法复杂多样,除了上述制备方法外,还包括等离子体处理^[37]、飞秒激光直写技术^[38]、热转印^[39]、化学改性^[40]等。

3 非对称润湿性 Janus 织物的应用

非对称润湿性 Janus 织物凭借其性能优势,在雾水收集、单向导湿、油水分离、医疗卫生以及海水

淡化等领域被广泛研究。本章将介绍非对称润湿性 Janus 织物在这些领域的创新性研究成果。

3.1 雾水收集

雾水收集技术可有效缓解全球水资源短缺危机,应用前景广阔。然而,如何高效实现雾气沉积、水滴的及时传输及储存,仍是当下亟需解决的难题。雾水收集包含 2 个主要部分——雾滴捕获和液体输送^[41],因此,宏观亲水/疏水区域分布的表面(传统的 Janus 模式)通常被认为是雾水收集的理想结构^[42]。基于 Janus 织物的不对称润湿性,空气中的雾水可在织物疏水面凝结成液滴,并借助重力作用和织物的毛

细作用力,使雾水实现由疏水面向亲水面的单向传输,从而达到集雾的目的^[41]。Chen 等^[43]成功开发了一种具有快速定向输水和高效率集雾的双动力集雾 Janus 机织物(Ly/Csp-3),其采用 $\frac{7}{3}$ 缎纹组织作为纬二重机织物的基本组织,同时设计有孔隙可调节结构。在润湿性梯度和孔径梯度的共同作用下,双向驱动力能够更精准地调节水分的运输方向,显著提高运输速率[图 3a)]。Ly/Csp-3 的单向输运指数为 390.7%,集水率为 1 170.5 mg/(cm²·h),同时兼备抗酸雨和抗日照的特性。

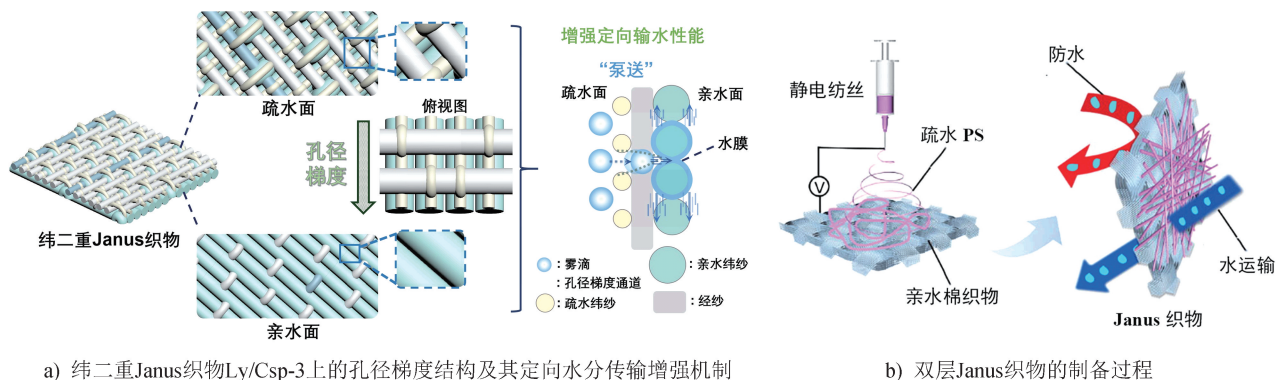


图 3 非对称润湿性 Janus 织物应用于雾水收集

Fig. 3 Asymmetric wettability Janus fabrics are applied to fog harvesting

Huang 等^[44]采用静电纺丝技术,在亲水性棉织物表面沉积不同厚度的聚苯乙烯(PS)层,成功制备了双层 Janus 织物[图 3b)]。研究表明,Janus 织物的集水率随 PS 层厚度的增加呈现先上升后下降的趋势。与亲水性棉织物相比,其集水率提高了 147%。李红艳等^[45]以铜丝、涤纶长丝和丙纶长丝为原料,制备出具有高力学强度的铜基 Janus 双层织物。该织物卷成圆筒状后可用于集雾,其雾水收集效率可达 193.81 mg/(cm²·min)。此外,该织物未经任何化学改性,兼备环境友好、制备工艺简单、集雾效率高特点,在雾水收集领域展现出广阔的应用前景。

3.2 单向导湿

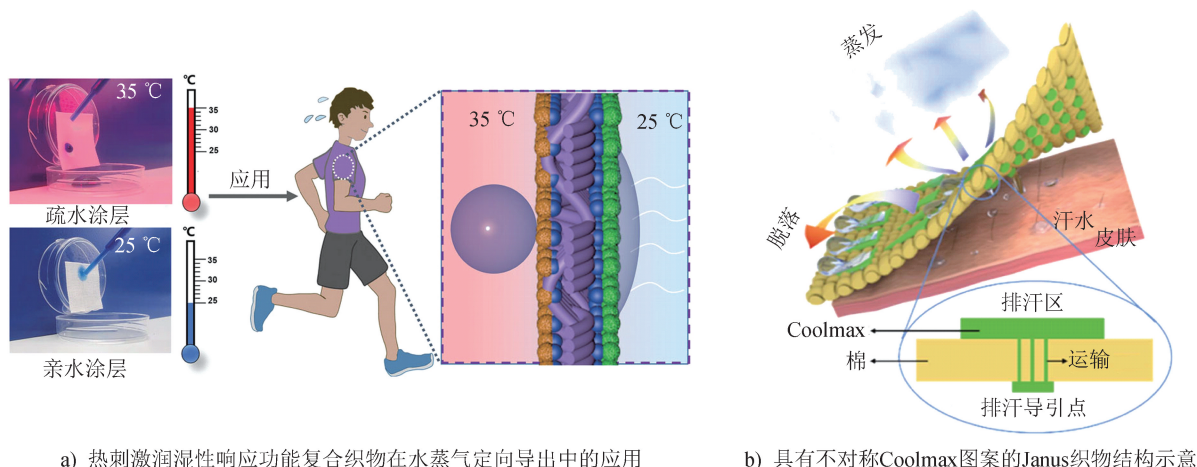
在服装领域,非对称润湿性 Janus 织物因独特的定向水传输能力,可将人体皮肤表面(即织物内表面)的汗水传输至织物外表面,同时防止汗水回流至织物内表面,故其在开发持久高效排汗功能性纺织品方面具有巨大的应用潜力,未来有望实现大规模生产与应用^[46]。Yang 等^[47]通过在棉织物两侧

涂覆热敏性 Janus 颗粒,成功实现了 Janus 织物的热响应动态疏水-亲水特性[图 4a)]。该 Janus 织物的排汗率是普通棉织物的 5 倍,可作为吸汗服装和伤口敷料的理想功能材料。Min 等^[48]通过在改性超疏水棉织物一面缝制大型三角形 Coolmax 图案,另一面缝制小型圆形 Coolmax 图案,并用 Coolmax 纱线连接两面图案,制备了一种具有不对称 Coolmax 图案的 Janus 织物[图 4b)]。该 Janus 织物具有优异的单向液体传输能力,正向传输比约为 32,可实现由内向外的有效水分传输,而反向传输比仅约为 0.036,能有效阻隔水分回渗。

Tang 等^[49]开发了一种环保、低成本、可大规模生产的非对称润湿性 Janus 纤维素织物(JCF),该织物可加速汗液从人体皮肤表面向织物外表面的扩散,具有持久、有效的排汗性能和相应的冷却能力。Li 等^[50]通过在棉织物表面沉积聚多巴胺,随后在织物单面喷涂疏水性聚二甲基硅氧烷,成功开发了一种光热 Janus 织物。阳光下,该光热

Janus 织物的蒸发率大约是传统 Janus 织物的 2 倍 [约 $1.143 \pm 0.027 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], 有望将皮肤温度

维持在正常范围内, 防止因大量出汗而引起体温过低的现象。



a) 热刺激润湿性响应功能复合织物在水蒸气定向导出中的应用

b) 具有不对称Coolmax图案的Janus织物结构示意图

图 4 非对称润湿性 Janus 织物应用于单向传输

Fig. 4 Asymmetric wettability Janus fabrics are applied to unidirectional transportation

3.3 油水分离

在油水分离领域, 非对称润湿性 Janus 织物发挥着关键作用。其两侧表面润湿性可根据分离需求精准调控, 设计并构建具有可切换润湿性的表面, 从而实现对各种油水混合物和乳液按需分离的目的。与传统油水分离材料相比, Janus 材料在分离油水混合物和乳液方面具有更灵活的选择性, 对大多数类型的油水混合物和乳液的分离效率超过 99%^[51]。Zhao 等^[52] 将具有超亲水性的氧化铜纳米颗粒作为底层, 超疏水性的 1-十八烷硫醇 (ODT) 作为顶层接枝, 构建了一种具有大孔径的 Janus 超润湿纺织品, 用于油水乳液分离。研究表明, Janus 超润湿纺织品分离石油醚包水、正己烷包水及二甲苯包水乳液的通量分别达到 $1\ 294.0$ 、 $1\ 253.7$ 和 $1\ 370.3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 所有滤液的化学需氧量均稳定在 $30 \sim 110 \text{ mg/L}$ 。

Li 等^[53] 通过单侧紫外线照射法, 对超双疏性聚电解质多层涂层棉织物进行处理, 开发了一种新型超疏油 Janus 织物, 该织物的分离通量比均相超疏油/超亲水织物高出近 4 倍。Gao 等^[54] 采用亲水性黏胶纤维纱和疏水性聚丙烯纤维纱, 织造出具有非对称润湿性的织物。发现, 该织物在重力驱动下可有效分离重油/水混合物和轻油/水混合物, 分离效率超过 95%, 且循环次数与以往相比可提高至 15。

3.4 医疗卫生

非对称润湿性 Janus 织物凭借其独特的非对称

结构以及单向传输性质, 在医疗卫生领域展现出巨大的应用潜力, 可用于开发高效伤口敷料、医用防护服、卫生用品以及智能医疗监护织物等产品。止血织物属于常用的基础急救治疗材料, 但传统超亲水织物会因吸收过多血液导致不必要的失血。Zhu 等^[55] 提出了一种超疏水/超亲水 Janus 织物, 其中超亲水部分吸收血液中的水分以加速凝血, 而超疏水部分可有效阻止血液进一步渗透。与普通织物相比, 使用 Janus 织物可以有效控制出血, 减少 50% 以上的失血, 同时保持较高的透气性。Wang 等^[56] 提出了一种凹凸状的 Janus 医用防护服 (BPC) (图 5)。该防护服兼具优异的防护性和排汗能力, 排汗率可达 $5.9 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。其外部的聚二甲基硅氧烷涂层可以有效地阻止水、血液和乙醇向皮肤渗透, 从而确保了防护服卓越的防护性能。这项研究攻克了大量排汗管理和抗液体渗透的双重难题, 可有效提高医用防护服的热湿舒适性。

3.5 海水淡化

近年, 太阳能驱动的表面蒸发材料在海水淡化领域备受关注, 尤其是采用亲疏水 Janus 结构的表面蒸发器, 其能有效避免海水中盐分的累积, 显著提高蒸发效率和长期稳定性^[57]。

Hu 等^[58] 制备了一种新型的三维 (3D) 水通道蒸发器 [图 6a], 并配备了 Janus CNT@ 聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯 (PBAT) 织物。该织物具有宽带光吸收

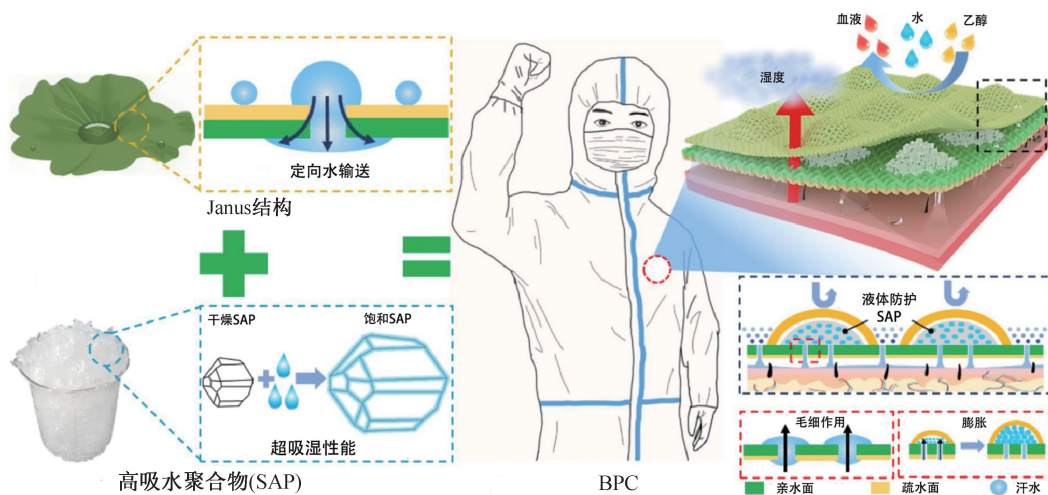


图5 BPC的设计
Fig. 5 Design of BPC

能力(约 97.8%)、优异的超疏水性(水接触角约 162°)和光热性能。对于质量分数为 3.5% 的盐水,该蒸发器在 1 个太阳光照强度照射下的蒸发速率为 $1.576 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,能量效率超过 92.7%。与传统的二维(2D)水通道蒸发器相比,该蒸发器在高含盐水中仍能表现出良好的排盐性能,能够在 8 h 的长期蒸发过程中保持稳定的蒸发速率,在由太阳能驱动的海水淡化中展现出巨大潜力。Gao 等^[59]提出了一种通用、环保且易于操作的水蒸气辅助单向涂层策略,用于制备具有不对称润湿性的 Janus 光热棉织物(WJCF)[图 6b]。通过完全润湿织物内的自发水蒸气扩散,在棉织物上形成独特的多孔结构羟基化碳纳米管(H-CNTs)@聚二甲基硅氧烷(PDMS)光热涂层,赋予 Janus 织物优异的光热性能,且能抑制盐的聚集。将 Janus 织物引入双面蒸发模式,在真实海水连续蒸发过程中,蒸发速率稳定,达 $1.36 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,能量效率大于 90%,这为界面太阳能水蒸发技术在海水淡化中的大规模应用奠定了基础。

4 结束语

本文总结了非对称润湿性 Janus 织物的最新研究进展。通过简要介绍材料表面润湿性理论以及 Janus 结构实现液体单向传输的机理,重点阐述了目前常用的制备非对称润湿性 Janus 织物的方法及其应用。然而,非对称润湿性 Janus 织物的制备及实际应用仍面临着一些挑战:

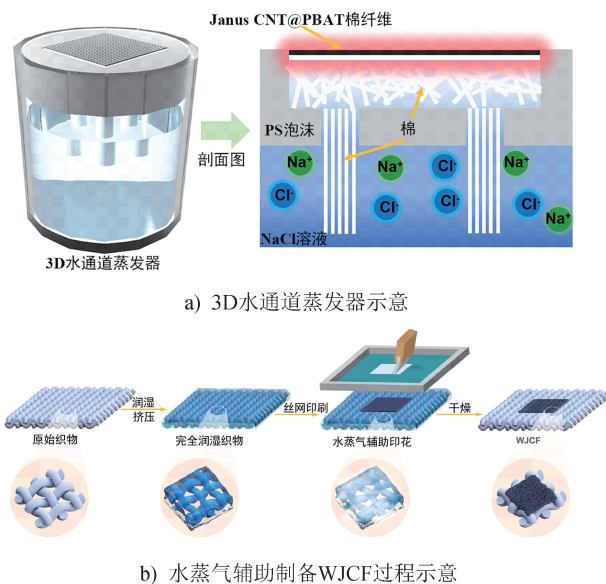


图6 非对称润湿性 Janus 织物应用于海水淡化
Fig. 6 Asymmetric wettability Janus fabrics are applied to seawater desalination

(1) 非对称润湿性 Janus 织物的性能及稳定性仍需进一步提高。因此,需要深入研究 Janus 织物结构与性能之间的关系,优化结构设计,从而进一步提升并拓展其性能。

(2) 非对称润湿性 Janus 织物要实现广泛应用仍存在一定的局限性。后续的研究工作中,可以通过优化制备工艺,开发具有成本效益的生产方法,实现 Janus 织物的大规模生产。此外,将 Janus 织物与其他新技术、新材料相结合,开发新型后整理技术,可赋予 Janus 织物更多性能,以满足多样化的应用

需求,从而进一步拓展其应用领域^[5]。

总之,随着研究的不断深入,非对称润湿性 Janus 织物凭借其独特的结构和性能优势,有望在更多领域发挥重要作用。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] CASAGRANDE C, FABRE P, RAPHAËL E, et al. “Janus beads”: realization and behaviour at water/oil interfaces [J]. *Europhysics Letters*, 1989, 9 (3): 251-255.
- [2] DE GENNES P G. Soft matter (Nobel lecture) [J]. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1992, 31(7): 842-845.
- [3] 任宝娜, 皮浩弘, 谷英姝, 等. Janus 膜的制备及其应用研究进展 [J]. *材料工程*, 2020, 48(7): 72-80.
- [4] 齐枫枫. Janus 碳纳米管涂层织物的制备及其光热水蒸发性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [5] LI D, LIU W Y, PENG T H, et al. Janus textile: advancing wearable technology for autonomous sweat management and beyond [J]. *Small*, 2025, 21 (13): 2409730.
- [6] QIU H L, YANG Q, TAO S X, et al. Asymmetrical surface-modified polyester/cotton fabrics for temperature-adaptive moisture and thermal management of human body [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 701: 134934.
- [7] DAI X, DU P B, YU B Y, et al. Superior mechanically orthogonal woven fabric membrane with tunable wettability for on-demand oil-water separation [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 708: 136005.
- [8] YAO C J, LUO M Y, WANG H L, et al. Asymmetric wetting Janus fabrics with double-woven structure for oil/water separation [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(7): 5942-5951.
- [9] HUANG G, LIANG Y C, WANG J H, et al. Effect of asymmetric wettability on directional transport of water through Janus fabrics prepared by an electrospinning technique [J]. *Materials Letters*, 2019, 246: 76-79.
- [10] 吴伟兵, 奚建锋, 楼燕铃, 等. 一种可控液体传输速率的全纤维素基 Janus 织物的制备方法: CN118773915A [P]. 2024-10-15.
- [11] GUAN X Y, WANG X, HUANG Y H, et al. Smart textiles with Janus wetting and wicking properties fabricated by graphene oxide coatings [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(2): 2001427.
- [12] 熊路. 织物的疏水疏油改性及材料的定向液体传输性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- [13] 张兴振, 靳健, 朱玉长. 非对称浸润性 Janus 膜的制备及应用进展 [J]. *膜科学与技术*, 2023, 43 (3): 148-157.
- [14] 蔡瑞芸, 焦芮, 孙寒雪, 等. 不对称浸润性 Janus 有机多孔膜的设计、制备及应用 [J]. *化工进展*, 2025, 44(4): 2057-2067.
- [15] 安春耕. Janus 织物结构设计及单向输水性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- [16] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95: 65-87.
- [17] WENZEL R N. Surface roughness and contact angle [J]. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 1949, 53(9): 1466-1467.
- [18] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.
- [19] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40: 546-551.
- [20] 刘其保. 基于纬二重组织的油水分离织物的设计及制备 [D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [21] FURMIDGE C G L. Studies at phase interfaces. I. The sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention [J]. *Journal of Colloid Science*, 1962, 17(4): 309-324.
- [22] YAN L L, YANG X B, ZHANG Y Q, et al. Porous Janus materials with unique asymmetries and functionality [J]. *Materials Today*, 2021, 51: 626-647.
- [23] ZHAO Y, WANG H X, ZHOU H, et al. Directional fluid transport in thin porous materials and its functional applications [J]. *Small*, 2017, 13(4): 1601070.
- [24] WU J, WANG N, WANG L, et al. Unidirectional water-penetration composite fibrous film via electrospinning [J]. *Soft Matter*, 2012, 8(22): 5996-5999.
- [25] 罗致因. 混合特殊浸润性双层织物的制备及其油水

- 分离和单向导湿性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [26] ZENG C, JI Y T, LI X Y, et al. Dual-wettability gradient fabric with grooved high-thermal-conductivity surface for textile-based fog harvesting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 519: 165498.
- [27] LIU Y C, LI J, XU D, et al. Facile and scalable fabrication of hydrophilic/hydrophobic Janus fabric for personal sweat monitoring and perspiration management [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(18): 2300543.
- [28] LI X N, WANG Q Y, ZHENG L X, et al. Smart Janus textiles for biofluid management in wearable applications [J]. *iScience*, 2024, 27(3): 109318.
- [29] CHENG J X, BAI J L, GUO J Y, et al. Yarn-based degradable Janus PPDO fabric for multifunctional applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(41): 56448-56458.
- [30] DU P B, ZHAO X S, ZHAN X W, et al. A high-performance passive radiative cooling metafabric with Janus wettability and thermal conduction [J]. *Small*, 2024, 20(43): 2403751.
- [31] ZHANG Z, MENG Y X, NIU H T, et al. One-step clean production of robust, superhydrophobic colored Janus fabrics [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 468: 129773.
- [32] CHENG Y, WANG J, LU X F, et al. An all-nanofibrous Janus textile with directional perspiration for triboelectric nanogenerator and self-powered e-skin sensor [J]. *Nano Energy*, 2023, 117: 108852.
- [33] ZHOU H, WANG H X, LIN T, et al. A novel Janus fabric with stable amphibious directional oil transport function [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131936.
- [34] 王敬明. Janus 复合织物制备及其含油废水净化性能研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [35] 陈帆, 金万慧, 王駒. 定向导水 Janus 复合棉织物制备及其凉感性能 [J]. *现代纺织技术*, 2023, 31(5): 190-197.
- [36] DU P B, WANG J, ZHAN X W, et al. Asymmetric multienergy-coupled radiative warming textiles for personal thermal-moisture management [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(34): 41180-41192.
- [37] LI D K, XU C G, HUANG J X, et al. Janus fabric with asymmetric wettability for switchable emulsion separation and controllable droplets with low friction [J]. *Langmuir*, 2023, 39(3): 1320-1329.
- [38] YANG S, ZHU Z, WU Z P, et al. Femtosecond laser rapid fabrication of Janus sweat-permeable fabric for personal cooling [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(21): 213701.
- [39] ZHOU W, MIN S Q, ZHAN T H, et al. Highly durable Janus fabrics based on transfer prints for personal moisture management [J]. *Small*, 2023, 19(36): 2302512.
- [40] WANG H H, HAO C, SHU T, et al. Flame-retardant Janus ramie fabric with unidirectional liquid transportation, moisture-wicking, and oil/water separation properties [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 474: 145518.
- [41] 张玲. 非对称润湿织物的制备及其液体定向运输性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [42] JI Y T, YANG W F, LI X Y, et al. Nanoscale drag reduction effect enables efficient fog harvesting [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(52): 2411083.
- [43] CHEN Y J, JI Y T, LI X Y, et al. Diatoms inspired green Janus fabric for efficient fog harvesting [J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2025, 9(1): 2400664.
- [44] HUANG G, XU H D, JIN Y K, et al. Electrospun Janus fabrics with directional water transport property for efficient water collection [J]. *Materials Letters*, 2021, 289: 129424.
- [45] 李红艳. 仿生铜基纤维复合材料的制备及其雾水收集性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- [46] 陈帆. 具有 Janus 结构的热湿管理复合棉织物制备及其性能研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [47] YANG T T, WANG S, YANG H R, et al. Temperature-triggered dynamic Janus fabrics for smart directional water transport [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(18): 2214183.
- [48] MIN S Q, ZHAN T H, NIU F Z, et al. Multi-inspired Janus fabrics with asymmetric coolmax patterns for rapid sweat diffusion and effective sweat-shedding [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 686: 133300.
- [49] TANG F J, BI Y H, PAN P Y, et al. Engineering Janus cellulose fabric with unidirectional water transport capability toward perspiration-induced cooling human body [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023,

- 205: 117397.
- [50] LI K, LI H N, XUE Y R, et al. Photothermal Janus fabrics enabling persistent directional sweat-wicking in personal wet-thermal management[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 651: 841-848.
- [51] GONG J L, XIANG B, SUN Y Q, et al. Janus smart materials with asymmetrical wettability for on-demand oil/water separation: a comprehensive review [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11 (46): 25093-25114.
- [52] ZHAO S Y, XU C G, ZENG Q H, et al. Robust Janus superwetting textile with large pore sizes for oil-in-water emulsion separation [J]. *Langmuir*, 2023, 39 (17): 6249-6257.
- [53] LI F R, WANG S, ZHAO X Z, et al. Durable superoleophobic Janus fabric with oil repellence and anisotropic water-transport integration toward energetic-efficient oil-water separation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(32): 37170-37181.
- [54] GAO Y, WANG J, MOU X F, et al. Textile-inspired methodology toward asymmetric fabric based on weft-backed weave for oil/water separation [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(6): 4683-4692.
- [55] ZHU T, WU J R, ZHAO N, et al. Superhydrophobic/superhydrophilic Janus fabrics reducing blood loss [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2018, 7(7): 1701086.
- [56] WANG H, ZHU Y J, MIN S Q, et al. Multi-inspired bump-liked medical protective clothing for effectively profuse perspiration management [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156448.
- [57] TIAN Y K, LI Y J, ZHANG X Y, et al. Breath-figure self-assembled low-cost Janus fabrics for highly efficient and stable solar desalination [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(33): 2113258.
- [58] HU N N, ZHAO S L, CHEN T C, et al. Janus carbon nanotube @ poly (butylene adipate-co-terephthalate) fabric for stable and efficient solar-driven interfacial evaporation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(40): 46010-46022.
- [59] GAO C, WANG Q, ZHOU B G, et al. Water vapor assisted fabrication of Janus fabric with asymmetric wettability for salt-free and efficient solar desalination [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 51: 104803.

(上接第 34 页)

- [15] ZHANG Z J, WEI X, WU K, et al. Failure analysis of brazed sandwich structures with square honeycomb-corrugation hybrid cores under three-point bending [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 170: 108591.
- [16] RUSSELL B P, LIU T, FLECK N A, et al. Quasi-static three-point bending of carbon fiber sandwich beams with square honeycomb cores [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(3): 031008.
- [17] ANANDAN S, DHALIWAL G, GANGULY S, et al. Investigation of sandwich composite failure under three-point bending: simulation and experimental validation [J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2020, 22(6): 1838-1858.
- [18] BABA M N. A recursive trapezoid-based algorithm designed to compute the strength - and stiffness-related geometric properties of beams with polygonal cross-sections [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2024, 52(12): 10073-10097.
- [19] WANG S L, GE L, XUE W L, et al. Design and development of multi-layer honeycomb-filled woven fabric with enhanced impact resistance [J]. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2024, 41(1): 37-45.
- [20] 陈振中, 刘志伟, 李晓科, 等. 复合材料天线罩多尺度可靠性优化设计 [J]. *东华大学学报 (自然科学版)*, 2024, 50(6): 75-85.
- [21] NIU W J, YAN X P, HE Q, et al. Experimental study on compression properties of composite aluminum honeycomb sandwich structures [J]. *Polymer Composites*, 2024, 45 (16): 14706-14714.

欢迎投稿《产业用纺织品》