

基于静电纺丝技术的单向导湿微纳米纤维非织造材料研究进展

周文¹, 蒋鑫¹, 朱豆豆¹, 孙静怡¹, 缪东洋^{2,3}, 张继超¹, 付少海^{*1}

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 南京林业大学 化学工程学院, 江苏 南京 210037; 3. 南京林业大学 江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要:微纳米纤维非织造材料具有孔径、厚度、润湿性可调控等特点, 在单向导湿领域具有广阔的应用前景。从差动毛细效应和不对称润湿性等方面简述微纳米纤维非织造材料的单向导湿机制, 归纳了采用静电纺丝技术制备不对称结构微纳米纤维非织造材料的方法, 分析了单向导湿微纳米纤维非织造材料在功能服装、医用敷料等领域的应用潜力。研究认为, 需进一步拓宽微纳米纤维非织造材料在多功能集成设计方面的研究领域, 推动单向导湿非织造材料向高效环保、耐用及多功能集成方向发展, 以符合其在特定温湿度或大量排汗环境中的应用要求, 提升人体舒适性。

关键词: 单向导湿; 微纳米纤维; 非织造材料; 差动毛细效应; 不对称润湿性

中图分类号: TS 174.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2025)04-0289-08

Research Progress of Micro-Nano Fibrous Nonwoven Materials with Unidirectional Water Transport Based on Electrospinning Technology

ZHOU Wen¹, JIANG Xin¹, ZHU Doudou¹, SUN Jingyi¹,
MIAO Dongyang^{2,3}, ZHANG Jichao¹, FU Shaohai^{*1}

(1. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. College of Chemical Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Jiangsu Co-Innovation Center of Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Micro-nano fibrous nonwoven materials have characteristics such as customizable pore size, thickness, and wettability, showing extensive application prospects in the field of unidirectional water transport. This study briefly described the unidirectional water transport mechanism of micro-nano fibrous nonwoven materials from the aspects of the differential capillary effect and asymmetric wettability. It summarized methods for preparing micro-nano fibrous nonwoven materials with asymmetric structures using electrospinning technology. Furthermore, the study analyzed the application potential of unidirectional water transport micro-nano fibrous nonwoven materials in functional clothing, medical dressings, and other fields. The research concludes that it is necessary to further expand the research scope on micro-nano fibrous nonwoven materials in multi-functional integrated design. This will promote the development of unidirectional water transport nonwoven materials towards high-efficiency and environmentally friendly, durable, and multi-functional integrated directions. This advancement aims to meet application requirements in specific temperature and humidity conditions or profuse sweating environments, thereby enhancing human comfort.

Key words: unidirectional water transport, micro-nano fibrous, nonwoven materials, differential capillary effect, asymmetric wettability

收稿日期: 2024-11-11; 修订日期: 2025-04-05。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52403039)。

作者简介: 周文(1992—), 男, 助理研究员, 硕士生导师。主要研究方向为功能性防护纺织材料的设计、制备及应用。

* 通信作者: 付少海(1972—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为数字喷墨印花技术、生物质纤维功能化改性技术和迷彩隐身面料的设计与开发。Email: shaohaifu@hotmail.com

特定温湿度的人体-服装微环境对人体生理健康至关重要。当人体剧烈运动时,皮肤中的汗腺会分泌大量汗液进行自我体温调节。传统织物的吸湿性虽好,但干燥速率慢,易造成织物吸湿饱和,从而使人体产生闷热感。此外,在医用包扎时若伤口创面处渗出液过多,常规敷料无法及时吸收,则伤口处堆积的大量积液会引发再次感染。单向导湿材料因其具有液体定向传输的特性,近年来在功能服装^[1-2]、医疗卫生^[3-4]、资源利用^[5-6]等领域取得了重要进展。

单向导湿材料主要利用其孔径结构、孔隙形状或润湿性差异所产生的毛细力作用,驱动水滴从材料一侧定向运输至另一侧。导湿性能可通过单向传输指数、液体蒸发速率及耐静水压等方面进行评价。微纳米纤维的制备方法主要有静电纺丝法、熔融纺丝法或熔喷法^[7],其中静电纺丝法是一种利用高压静电场将聚合物前驱体溶液拉伸成微纳米纤维的先进非织造技术^[8-11],采用该技术所制备的材料厚度适宜,对微纳米纤维尺寸的可控性好^[12],对材料进行后续改性整理的操作可行性高^[13],易达到预期的制备效果^[14]。基于此,研究者利用静电纺丝技术,制备了多种应用于不同领域的单向导湿微纳米纤维非织造材料^[15]。

文中介绍了微纳米纤维材料的单向导湿机制,重点归纳梳理了静电纺单向导湿微纳米纤维非织造材料的制备方法和应用领域,并对其未来的发展趋势进行展望。

1 单向导湿机制

1.1 差动毛细效应

差动毛细效应取决于材料中的孔隙结构,通常情况下,孔隙越小,毛细作用力越大,差动毛细效应越显著^[16]。当材料内部结构在特定方向上形成孔隙差异时,会自发引导液体由孔隙大的一侧向孔隙小的一侧定向运输。在多层纳米纤维非织造材料中,由于各层纳米纤维的直径、孔径尺寸不同,会产生孔径不对称现象,液体可由孔径较大的纳米纤维层向孔径较小的纳米纤维层定向运输。基于拉普拉斯方程,毛细作用力可以随着孔隙变窄和润湿性提高而增强,从而驱动水在毛细孔隙中定向运动^[17]。

在单向导湿纳米纤维非织造材料中,水的传输方向受自身重力与毛细管驱动力共同作用的影响。重力垂直于水平面向下,阻碍水滴反重力向上运

输;毛细管驱动力由纤维间孔隙通道提供,在孔径差异下可引导液体向孔径更小的顶层运输。液体的反重力水运输过程分为两个阶段:①水滴接触材料底部,当毛细管驱动力大于重力时,水滴在材料底部进行反重力向上运输。毛细管驱动力由拉普拉斯压力(P_L)产生,杨-拉普拉斯方程为

$$P_L = \frac{4\gamma \cdot \cos\theta}{D_{\text{pore}}} \quad (1)$$

式中: θ 为纤维表面的水接触角; γ 为空气中水的表面张力; D_{pore} 为毛细管通道的直径。

由式(1)可知,毛细管驱动力与材料的孔径大小成反比,不同孔径的纤维层间会产生毛细管压差(ΔP),其计算公式为

$$\Delta P = P_{L2} - P_{L1} = \frac{4\gamma \cdot \cos\theta}{D_{\text{micron}}} - \frac{4\gamma \cdot \cos\theta}{D_{\text{macro}}} \quad (2)$$

式中: D_{micron} 和 D_{macro} 分别为微米尺寸孔隙层和宏观尺寸孔隙层的孔直径。由于 D_{micron} 远小于 D_{macro} ,因此微米尺寸孔隙层毛细管压力(P_{L2})大于宏观尺寸孔隙层毛细管压力(P_{L1})。在 ΔP 的作用下,液体从较大孔径微纳米纤维层定向运输至较小孔径微纳米纤维层,具体如图 1^[18] 所示。

②纤维间产生的水平方向毛细管压力(P_L)使液滴在纤维表面快速铺展。铺展面积越大,水分越容易蒸发,干燥速率越快^[19]。

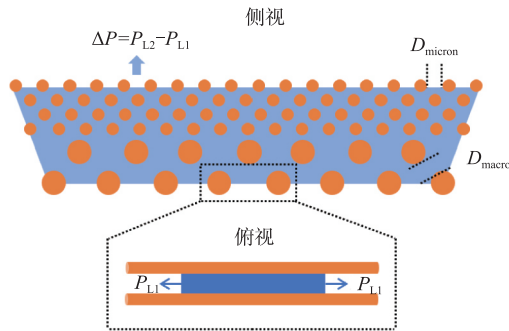


图 1 具有孔径差异的微纳米纤维复合材料

Fig. 1 Micro-nano fibrous composite materials with varying pore sizes

1.2 不对称润湿效应

不对称润湿性是指微纳米纤维非织造材料中沿厚度方向存在亲/疏水的润湿性差异^[20]。具有该特性的 Janus 材料一侧为亲水性微纳米纤维,另一侧为疏水性微纳米纤维^[21]。具有不对称润湿性的微纳米纤维材料的单向导湿机理如图 2 所示。由图 2 可见,不对称润湿性微纳米纤维材料的水传输行为分为以下两种情况:①疏水层在上,亲水层在下。当水滴接触疏水层时,会受到疏水层产生的向上疏水力(hydrophobic force, F_{H0})、重力产生的向下

静水压力 (hydrostatic pressure, P_{HP})、亲水层产生的平面各向及沿厚度方向的毛细管力 (capillary force, F_C) 作用。 P_{HP} 取决于液滴大小, F_C 则取决于材料结构 (孔隙率、孔径) 和表面化学成分。当向下的 P_{HP} 与 F_C 的合力大于向上的 F_{HO} 时, 液滴可突破疏水层向亲水层渗透, 并在亲水层中快速扩散铺展。当水滴接触到亲水层底层时, 会立即被亲水层吸收, 在 F_C 的作用下持续渗透。当亲水层吸水饱和, 水分接触到疏水层边缘时, 会受到 P_{HP} 以及 F_{HO} 的共同作用, 阻碍水分向疏水层渗透, 从而完成液滴从疏水层到亲水层的单向传输。②疏水层在下, 亲水层在上。当水滴接触亲水层后迅速铺展并渗透, 此时因液滴重力而产生的 P_{HP} 由于液滴铺展而被分散弱化, 无法克服底层疏水层产生的 F_{HO} , 因此水滴无法渗透至疏水层; 当水滴接触到底部疏水层时, 会受到疏水层产生的向下 F_{HO} 、自身重力产生的向下 P_{HP} 、顶层亲水层产生的平面各向及沿厚度方向的 F_C 作用, 当向上的合力 F_C 大于向下的 F_{HO} 和 P_{HP} 时, 液滴可以突破疏水层到达亲水层, 并迅速铺展渗透, 从而实现液滴从疏水层到亲水层的反重力单向运输。

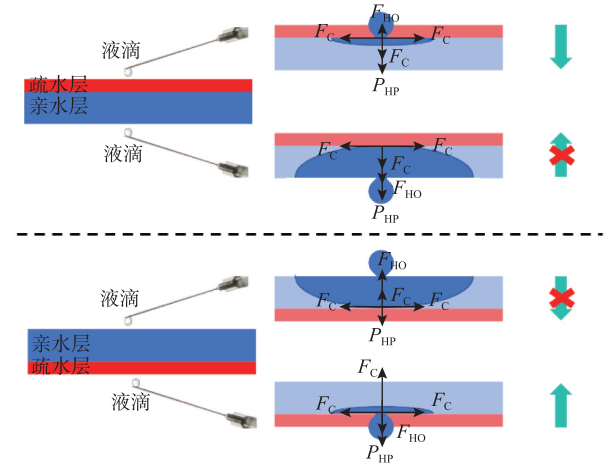


图 2 具有不对称润湿性的微纳米纤维材料单向导湿机理
Fig. 2 Unidirectional moisture conduction mechanism of micro-nano fibrous materials with asymmetric wettability

根据 Janus 材料沿厚度方向的润湿性变化情况, 可将其分为突变型和渐变型两类, 具体如图 3 所示。对于突变型 Janus 材料, 当水接触到润湿性均匀的亲水层时, 横向铺展的各向毛细力 (F_{HC}) 远大于纵向渗透的毛细力 (F_{ZC}); 根据式 (1), P_L 与 θ 成正比, 突变型 Janus 材料由于其亲/疏水层的 θ 一定, 产生的润湿性差异恒定, 进而产生的拉普拉斯压力差恒定, 随着水分的持续输送, 水传输速率保持恒定。持续供应的液滴被运输至亲水层后迅速

铺展, 直至吸湿饱和。此外, 织物厚度决定了液体的运输路径, 为保证材料具有优异的单向导湿性能, 需调整其亲/疏水层厚度, 如果疏水层较厚, 疏水层产生的 F_{HO} 大于较薄亲水层产生的 F_C , 则会导致液体向上运输的合力无法克服 P_{HP} 与 F_{HO} , 即液体无法从疏水侧运输至亲水侧^[22]。渐变型 Janus 材料在厚度方向上具有润湿性由底层至顶层连续增强的特性^[23]。水分在进行反重力运输的过程中, 会受到相邻渐变亲水层所产生的“连续拉力”作用。根据式 (1) 杨-拉普拉斯方程可知, 渐变型 Janus 材料的润湿性差异逐渐改变, 因此水滴受到的拉普拉斯压力呈曲线分布, 曲线斜率不断增大, 表明驱水分单向运动的“推动力”不断增强, 即水分在运输过程中所受到的纵向渗透的毛细力 (F_{ZC}) 远大于横向铺展的各向毛细力 (F_{HC})。其斜率由小变大的趋势体现出水分在传输过程中存在一定的加速度, 该加速度可促进液体的定向运输, 加快水分从疏水侧至亲水侧的定向水传输效率^[24]。因此, 该结构可以通过控制纺丝液配比或后续进行单侧亲/疏水改性来获得具有渐变润湿性梯度的微纳米纤维非织造材料^[25]。

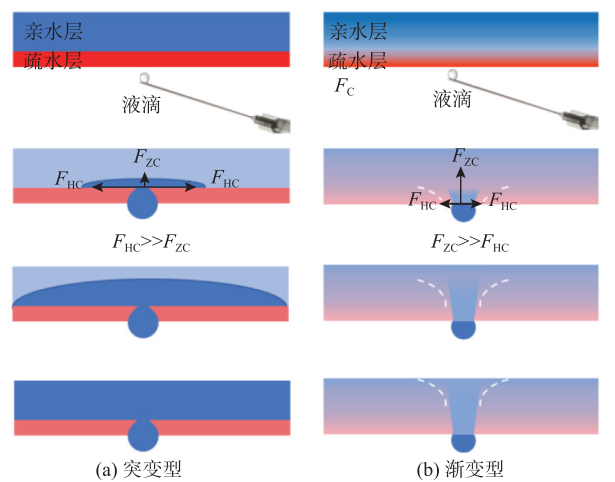


图 3 Janus 微纳米纤维材料的单向水传输机理
Fig. 3 Unidirectional water transport mechanism of Janus micro-nano fibrous materials

突变型 Janus 材料一般采用双层或多层结构进行复合 (每层内的润湿性均匀, 层与层之间存在润湿性差异), 会出现层与层之间结合牢度不足、易剥离等问题。渐变型 Janus 材料多为单层结构, 可通过单面润湿性改性或在静电纺丝过程中调控亲/疏水聚合物比例进行制备, 从而获得沿厚度方向润湿性连续渐变的 Janus 微纳米纤维非织造材料。该类材料的单向导湿性能更高, 且不存在突变型 Janus 多层材料的层间易剥离问题。

2 单向导湿纳米纤维非织造材料的制备

2.1 孔径不对称纳米纤维非织造材料的制备

MIAO D Y 等^[26]制备了由4层静电纺丝纤维(纤维直径 $D_1 \sim D_4$ 由约 2 500 nm 递减至约 300 nm)组成的多层单向导湿材料(见图4)。该材料因孔隙差异引起的差动毛细效应而具有单向导湿性能,其单向水传输指数为 1 072%,水蒸发速率为 0.36 g/h。多层单向导湿材料因定向水传输和无阻散热协同作用,可产生干燥和凉爽的微气候环境,为人体带来较好的生理舒适感。

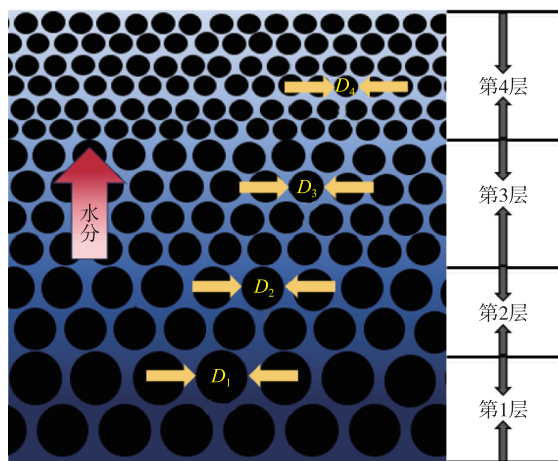


图4 孔径不对称的纳米纤维材料各层示意

Fig. 4 Schematic diagram of each layer of micro-nano fibrous material with asymmetric pore sizes

DAI B 等^[27]制备了一种具有锥形微孔阵列的 Janus 聚酯 (polyester, PE)/硝化纤维 (nitrocellulose fiber, NC) 复合材料(见图5), PE 层水接触角为 $80.0^\circ \pm 1.6^\circ$, NC 层水接触角为 0° , 当孔隙较宽的一侧与液体接触时, PE/NC 织物在毛细管力的驱动下可以将液体泵送至孔隙较小一侧的超亲水性 NC 层, 其单向水传输指数为 1 246%。这种 Janus PE/NC 织物因其孔隙形状不对称, 汗液可由锥形微孔的疏水层(孔隙较大的一侧)单向泵送至超亲水层(孔隙较小的一侧), 实现液体的反重力单向运输。

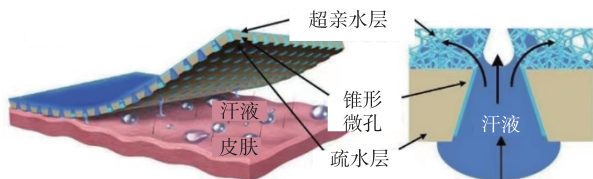


图5 具有锥形微孔阵列的孔径不对称微纳米纤维材料

Fig. 5 Micro-nano fibrous material with asymmetric pore sizes and conical microporous arrays

2.2 Janus 纳米纤维材料的制备

利用静电纺丝技术可制备双层、多层纳米纤维非织造材料^[28]。WU J 等^[29]基于静电纺丝技术制备了具有非对称润湿性的疏水性聚氨酯 (polyurethane, PU)/亲水性聚乙烯醇 (hydrophilic polyvinyl alcohol, c-PVA) 纳米纤维复合材料, 其中, c-PVA 纤维材料的水接触角为 $22.1^\circ \pm 1.3^\circ$, 静电纺 PU 材料的水接触角为 $142.2^\circ \pm 1.5^\circ$ 。由于该纳米纤维复合材料存在润湿性差异, 可使液体自发地从复合材料疏水侧渗透至亲水侧, 因此其反向运输过程中的耐静水压较高, 达到 (39.2 ± 5.9) Pa。QIAN S T 等^[30]开发了一种具有 Janus 双层结构的支架, 该支架由亲水性含姜黄素的二维静电纺丝纤维和疏水性三维短纤维组成。三维短纤维经支链聚乙烯亚胺 (branch polyethylenimine, BPEI) 改性后表面带正电荷, 再通过静电作用与带负电荷的二维静电纺丝纤维层结合。该三维短纤维层的水接触角为 146° , 二维静电纺丝纤维层的水接触角为 0° 。该材料成功实现了伤口渗出液从疏水层到亲水层的自发“泵送”。

MIAO D Y 等^[31]采用静电纺丝技术制备了由 PU 作为疏水内层, 水解聚丙烯腈 (hydrolyzed polyacrylonitrile, HPAN) 作为亲水外层, PU-HPAN 作为转移层的 Janus 多层吸湿排汗材料。该材料通过复合膜的厚度构建润湿性差异, 使液体纵向渗透而不沿着表面扩散、铺展。其中, PU-HPAN 作为转移层, 为复合膜提供了渐进的润湿性, 有效引导水从内层渗透至外层, 同时阻止了水分的反向渗透。该材料 3 层(疏水层、转移层、超亲水层)纤维膜界面上的协同驱动力提升了水的运输能力和防反方向渗透能力, 其单向传输指数为 1 021%, 反向突破压力为 1 578.87 Pa。该 Janus 多层吸湿排汗材料能够自发地将身体产生的水分从皮肤运输至织物表层, 从而为穿着者提供干燥且舒适的微气候。

渐变型 Janus 纳米纤维材料的制备方法主要有: 一步静电纺丝法、单侧紫外光处理法^[32]和等离子处理法^[33]等。SHEN Q 等^[34]通过控制双通道静电纺丝速度, 采用一步静电纺丝法制造具有渐变润湿性的纳米纤维材料。该材料可使水滴由疏水侧泵送至亲水侧, 并在亲水面铺展; 还可使油滴从亲水侧传输到疏水侧, 并在疏水面铺展。该渐变润湿性纳米纤维材料的水通量为 $2\,487\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 油通量为 $5\,268\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 其在定向浮油收集和油/水混合物的节能定向分离方面显示出巨大潜力。

PENG Y C 等^[35]提出了一种三维亲水性/疏水

性设计用于制备人工出汗皮肤(见图6)。该设计利用图案化构建法在织物待处理一侧覆盖具有镂空阵列的模板,利用聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane,PDMS)进行选择表面改性,以形成润湿性梯度,而模板覆盖处(织物未暴露区域)无法参与改性,最后在织物基材中实现离散分布的三维“汗孔”。此时底部非汗孔区的水接触角为 135° ,顶部非汗孔区水接触角为 120° ,显示出明显的疏水性;随后将静电纺丝制备的亲水性尼龙6纳米纤维层(水接触角为 60°)覆盖至具有汗孔织物的底部,该亲水性尼龙6纳米纤维材料能迅速吸收皮肤侧的汗液,并将其运输至三维“汗孔”处进行纵向反重力运输。由于尼龙6纳米纤维材料的厚度薄(约 $1\text{ }\mu\text{m}$),面密度低(0.55 g/m^2),在水运输过程中不会导致皮肤侧汗液堆积。经实验对比,传统芯吸层吸湿饱和后的含水率为 275.2% ,该材料的含水率仅为 55.25% ,表明该人工出汗皮肤可以很好地模拟皮肤出汗状态,且基于该“皮肤”进行的测试不存在吸湿饱和的问题。

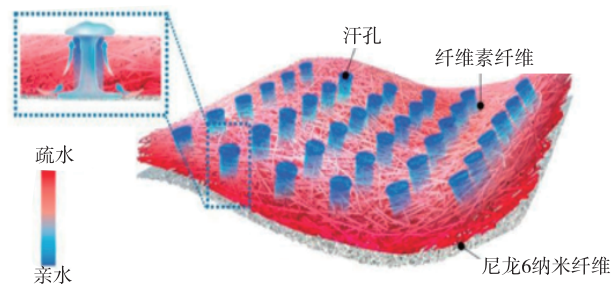


图 6 具有“汗孔”的人工皮肤

Fig.6 Artificial skin with "sweat pores"

3 单向导湿微纳米纤维非织造材料的应用

3.1 功能服装

具有单向导湿性能的微纳米纤维纺织品可将皮肤表面产生的汗液快速导出至衣物外侧,并通过蒸发方式快速脱离织物表面,从而使皮肤侧及贴近皮肤侧的衣物保持干爽,提高人体在高温高湿或大量流汗环境下的着装舒适性^[36]。DONG Y L 等^[37]为改善运动服装的水分管理和低摩擦性能,通过单喷丝头静电纺丝法制备了以聚丙烯腈(polyacrylonitrile,PAN)为核、聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride,PVDF)为壳的核-壳纳米纤维材料。单层PAN/PVDF纳米纤维的水分管理结果显示,底层的相对含水量最大约为 300% ;醋酸纤维素(cellulose acetate,CA)和PAN/PVDF纳米纤维结合的CA-PAN/PVDF双层材料,其底层(亲水侧)相对含水量

最大约为 700% ,由此可知,具有疏水性的PAN/PVDF纳米纤维内层和具有高度亲水性的CA纳米纤维外层协同作用产生了强大的水分推拉效应,有效提升了水分由内至外的传输效率。且PVDF的壳层纤维在接触人体皮肤时,可提供爽滑效果,以增加舒适性。该设计为开发吸湿性良好、摩擦系数低的运动服装材料提供了新途径。

3.2 医用敷料

当人体存在创伤时,创面会分泌出大量组织液,相对舒适的微环境可促使创面愈合,但传统敷料易吸湿饱和,导致伤口处形成大量积液,不仅影响创面的愈合,甚至存在感染风险^[38-39]。具有单向导湿功能的创伤敷料,可排出伤口处过量的渗液,并防止外界液体感染伤口,帮助促进创面快速愈合。基于静电纺丝技术的微纳米纤维材料具有纤维直径小、比表面积大、孔隙率高、易功能化改性、质量轻等优点,且其内部的纤维结构形态与生物体组织细胞外基质相类似,将其用于创伤敷料时,具有其他材料无可比拟的优势^[40]。欧康康等^[41]利用静电纺丝技术制备了具有纤维尺寸差异、亲/疏水润湿性差异的PAN/PU-聚丙烯酸钠(sodium polyacrylate,SPA)纳米纤维材料和PU-聚六亚甲基胍盐酸盐(polyhexamethylene guanidine hydrochloride,PHGC)纳米纤维材料,并将这两种材料分别作为双层敷料的吸液外层和防黏内层。制得的双层敷料可在 3.9 s 内由内侧向外侧单向传输液体,此时敷料的吸水率高达 $1\,230\%$,透气率约为 6.7 mm/s ,透湿率约为 $1\,350\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,断裂强度为 6.5 MPa ,断裂伸长率为 45% ;同时,该敷料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率达到 95% 以上,无细胞毒性,且具备较低的细胞黏附性能。

3.3 废水处理

静电纺微纳米纤维材料具有孔隙率高、比表面积大等特点^[42],其纤维间随机分布并重叠形成的纤维间孔隙可产生较强的毛细作用力,故将其与太阳能界面蒸发技术相结合,可构建高界面蒸发效率的体系。例如,欧康康等^[43]以PAN、PU为基材,以活性特深黑M染料为吸光剂,利用静电纺丝技术制备得到自上而下依次为PU疏水层、PU/PAN导流层和PAN亲水性吸光层的材料。其将该材料与气凝胶隔热材料复合,构建了太阳能界面蒸发体系。在 1 kW/m^2 光照强度下,复合膜表面温度可快速升至 $34.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,水蒸发速率达 $1.42\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;光热膜对 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 等重金属离子废液的蒸发速率为 $1.38\sim 1.61\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,对印染废水的蒸

发速率为 1.78 kg/(m²·h);此光热复合膜经 10 次循环使用后依然可保持良好的稳定性。李坤^[44]采用静电纺丝技术,通过改变 PDMS 的添加量,制备了 PVDF-PDMS 纳米纤维材料。该材料的渗透通量高达 1 827 L/(m²·h),分离效率为 99.6%。纳米纤维材料添加 PDMS 后,其疏水性、分离效率和渗透量均有显著提高。

3.4 空气过滤

当前环境污染日益严重,空气中的有害污染物也引起了人们的重视。单向导湿微纳米纤维材料可以在呼吸过程中有效隔离大气中的 PM_{2.5} 颗粒,并实现湿气的单向输送,起到高效拦截空气中污染物颗粒和提升人体热湿舒适性的双重功能。杨玉艳^[45]以 PAN 和聚醚酰亚胺 (polyetherimide, PEI) 为基材,采用静电纺丝法和静电喷雾法制备了不对称超润湿复合纳米纤维材料。该材料的面密度为 3 g/m²,对 PM_{2.5} 的捕获效率为 99.3%,过滤阻力为 64 Pa,透气率为 278 mm/s,材料两侧的相对水蒸气透过率为 3.61 kg/(m²·d),表现出较好的单向透湿性,且其散热冷却性能出色,红外透射率为 99.2%,能有效提升人体热舒适性。CHEN J W 等^[46]通过静电纺丝法构建了 PVDF/PAN-十六烷基三甲基溴化铵 (hexadecyl trimethyl ammonium bromide, CTAB) 纳米纤维复合材料。当水滴落在其疏水侧表面时,水滴自发地渗透到亲水侧,且在渗透过程中始终保持较小的润湿面积。复合膜亲水侧朝上时,液滴沿水平方向扩散,无垂直方向的渗透。将 CTAB 掺入亲水性 PAN,不仅可使复合材料具有抗菌功能,而且由于纤维的亲水性和偶极矩得到改善,材料的水分管理和颗粒物捕获能力均会增强。PVDF/PAN-CTAB 膜的水蒸气传输速率大于 13 kg/(m²·d),PM_{0.3} 去除效率≥99%,低压降为约 84 Pa,大肠杆菌抑制率为 99.99%。该材料为研发具有强抗菌性和高效空气净化能力的膜材料,以及开展定向水运输研究提供了新思路。

4 展 望

尽管现阶段关于微纳米纤维非织造单向导湿材料的研究取得了一定进展,但主要集中于纤维基础材料孔道结构与润湿性调控方面,而在耐用性、高效环保成型加工、多功能特性等方面还存在明显的不足,因此,未来微纳米纤维非织造单向导湿材料研究可从以下 3 个方面展开:

1) 研究开发微纳米纤维非织造材料与传统织

物结合的复合型织物,提升复合织物的界面结合牢度等力学性能,开发具有良好耐用性能的高性能单向导湿纺织品。

2) 开发高效、环境友好的微纳米纤维成型技术,并对其加工参数进行调控优化,加快推动环境友好型微纳米纤维非织造材料的快速宏量制备及其在单向导湿领域的实际应用。

3) 结合特定应用环境和场景需求,开发兼具温度调节、抗菌、生理健康监测等特殊功能的微纳米纤维非织造单向导湿材料,进一步拓宽其应用领域。

5 结 语

非织造材料具有制备工艺简单、化学稳定性好、孔隙率高、比表面积大、成本低廉等特点。静电纺丝技术因其制造装置简单、成本低廉、可纺原料种类多、工艺可控性高等优势,在制备具有更优异水分管理性能、更高单向运输指数和更快水分蒸发速率的微纳米纤维非织造材料领域成为研究热点之一。此外,通过调控微纳米纤维材料的孔隙结构或进行润湿性后整理,可进一步提升其单向导湿性能,以满足人体在特定温湿度环境或大量排汗场景下的穿着舒适性需求。

当前,微纳米纤维非织造材料在单向导湿领域展现出广阔的应用前景。基于其单向导湿机制,未来应着重通过优化织物孔径结构调控润湿性差异,协同提升材料的导湿性能。此外,后续研究可以优化生产工艺,以实现规模化量产;开发更精准的性能调控方法;进行抗菌、热管理、汗液监测等多功能集成设计,从而进一步开发微纳米纤维非织造材料的潜力,拓展其应用领域。

参考文献:

[1] FAN Z Z, WANG Y, ZHAO W N, et al. Unidirectional water transport fabric with nanoscale hydrophilic/hydrophobic pattern for personal moisture and thermal management[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480: 148204.

[2] ZHENG R Q, WANG M J, JIANG M M, et al. Dynamic spectral metafabric with unidirectional moisture transport property for personal thermal management[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2024, 16(28): 36973-36982.

[3] LUO H, YANG J Y, XIANG Z, et al. Functional electrospinning Janus dressings with asymmetric surface wettability[J]. Applied Materials Today, 2024, 41: 102445.

[4] LIU J Z, CHENG H J, YUAN X N, et al. Amphipathic medical composite cotton gauze with unidirectional drainage and anti-adhesion properties for wound healing[J]. Cellulose, 2024, 31

(12): 7613-7627.

[5] 李亚萍. 多层仿生机织物的结构与导湿机理及太阳能界面蒸发应用[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.

[6] 熊路, 石磊, 王闻宇, 等. 基于润湿性梯度设计的单向导水/油多孔材料研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2526-2536.

XIONG Lu, SHI Lei, WANG Wenyu, et al. Progress in unidirectional water/oil transport porous materials based on design of wettability gradient[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(5): 2526-2536. (in Chinese)

[7] 吴万桦, 钱晓明, 唐孝颜, 等. 熔体纺丝异形化纤维及其非织造材料的应用研究进展[J]. 现代纺织技术, 2025, 33(2): 10-22.

WU Wanhua, QIAN Xiaoming, TANG Xiaoyan, et al. Research progress on the application of melt spinning profiled fibers and nonwoven materials[J]. Advanced Textile Technology, 2025, 33(2): 10-22. (in Chinese)

[8] 王洪杰, 胡忠文, 王赫, 等. 单向导湿纺织品及其应用的研究进展[J]. 纺织学报, 2022, 43(11): 195-202.

WANG Hongjie, HU Zhongwen, WANG He, et al. Research progress in one-way water transport textiles and their applications[J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(11): 195-202. (in Chinese)

[9] AGARWAL S, GREINER A, WENDORFF J H. Functional materials by electrospinning of polymers[J]. Progress in Polymer Science, 2013, 38(6): 963-991.

[10] 于丹妮, 杨雪. 单向导湿纺织品的研究现状与应用[J]. 毛纺科技, 2024, 52(11): 133-138.

YU Danni, YANG Xue. Research status and application of unidirectional water-transport textiles[J]. Wool Textile Journal, 2024, 52(11): 133-138. (in Chinese)

[11] 朱豆豆, 付少海, 张继超. 基于静电纺丝技术的防水透湿微纳米纤维膜研究进展[J]. 服装学报, 2023, 8(2): 95-101.

ZHU Doudou, FU Shaohai, ZHANG Jichao. Research progress on waterproof and moisture permeable micro-nanofibrous membranes based on electrospinning technology[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(2): 95-101. (in Chinese)

[12] 张赛, 董硕, 董东东, 等. 单向导湿抗菌敷料的制备及性能研究[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(9): 34-40.

ZHANG Sai, DONG Shuo, DONG Dongdong, et al. Preparation and property study of antibacterial dressings with unidirectional moisture transmissibility[J]. Cotton Textile Technology, 2024, 52(9): 34-40. (in Chinese)

[13] LI Z J, REN J L, SUN H L, et al. Achieving the dual regulation of microstructure and microdefects in lithium rich materials by electrospinning technology[J]. Applied Surface Science, 2024, 678: 161063.

[14] DONG Y L, KONG J H, MU C Z, et al. Materials design towards sport textiles with low-friction and moisture-wicking dual functions[J]. Materials and Design, 2015, 88: 82-87.

[15] KAMIREDDI D, STREET R M, SCHAUER C L. Electrospun nanoyarns: a comprehensive review of manufacturing methods and applications[J]. Polymer Engineering and Science, 2023, 63(3): 677-690.

[16] 张月萱, 刘亚, 庄旭品, 等. 吸湿速干材料的研究进展[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(4): 114-124.

ZHANG Yuexuan, LIU Ya, ZHUANG Xupin, et al. Research progress in moisture-absorbing and quick-drying materials[J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(4): 114-124. (in Chinese)

[17] 李振, 鄢友娟, 吴爽, 等. 单向导湿面料的研究现状与进展[J]. 山东纺织科技, 2021, 62(3): 53-56.

LI Zhen, YAN Youjuan, WU Shuang, et al. Research status and development of unidirectional water-transfer fabrics[J]. Shandong Textile Science and Technology, 2021, 62(3): 53-56. (in Chinese)

[18] WANG X F, HUANG Z P, MIAO D Y, et al. Biomimetic fibrous murray membranes with ultrafast water transport and evaporation for smart moisture-wicking fabrics[J]. ACS Nano, 2019, 13(2): 1060-1070.

[19] ZHAO Y, WANG H X, ZHOU H, et al. Porous materials: directional fluid transport in thin porous materials and its functional applications[J]. Small, 2017, 13(4): 201770020.

[20] CHEN F J, LIU X, HUANG S. Asymmetric wettability Janus mesh via electrostatic printing for selective oil-water and emulsion separation[J]. Langmuir, 2024, 40(20): 10676-10684.

[21] GHALAVAND B, KOOHMAREH G A, HOMAYOONFAL M. Achieving superior Laplace pressure in electrospun PVDF/PAN Janus membranes: a morphological approach[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354: 129116.

[22] SONG Y, LEE S. Trilayered textile systems with asymmetric wettability and pore structure for directional water transport. Part I: fabrication and characterization of bilayered nanofibrous membrane systems[J]. Fibers and Polymers, 2023, 24(11): 4061-4071.

[23] HAN H N, SHEN Q, WU W L, et al. A wettability and structure gradient electrospun membrane for highly efficient emulsion separation[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 342: 127047.

[24] DONG Y L, KONG J H, PHUA S L, et al. Tailoring surface hydrophilicity of porous electrospun nanofibers to enhance capillary and push-pull effects for moisture wicking[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2014, 6(16): 14087-14095.

[25] 徐海南. 静电纺纳米纤维膜制备与防水透湿性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2023.

[26] MIAO D Y, WANG X F, YU J Y, et al. A biomimetic transpiration textile for highly efficient personal drying and cooling[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(14): 2008705.

[27] DAI B, LI K, SHI L X, et al. Bioinspired Janus textile with conical micropores for human body moisture and thermal management[J]. Advanced Materials, 2019, 31(41): 1904113.

[28] 周鉴澄, 林骏, 赵小敏, 等. 静电纺丝法制备定向导液复合纤维材料的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(16): 276-282.

ZHOU Jiancheng, LIN Jun, ZHAO Xiaomin, et al. Research progress on directional moisture penetration composites prepared via electrospinning[J]. Materials Reports, 2023, 37(16): 276-282. (in Chinese)

[29] WU J, WANG N, WANG L, et al. Unidirectional water-penetration composite fibrous film via electrospinning[J]. Soft Matter, 2012, 8(22): 5996-5999.

[30] QIAN S T, WANG J, LIU Z M, et al. Secretory fluid-aggregated Janus electrospun short fiber scaffold for wound healing[J]. Small, 2022, 18(36): 2200799.

[31] MIAO D Y, HUANG Z, WANG X F, et al. Continuous, spontaneous, and directional water transport in the trilayered fibrous membranes for functional moisture wicking textiles [J]. *Small*, 2018, 14(32): 1801527.

[32] LI F R, WANG S, WANG Z R, et al. Fouling-proof cooling (FP-cool) fabric hybrid with enhanced sweat-elimination and heat-dissipation for personal thermal regulation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(4): 2210769.

[33] LAO L, SHOU D, WU Y S, et al. "Skin-like" fabric for personal moisture management [J]. *Science Advances*, 2020, 6(14): eaaz0013.

[34] SHEN Q, JIANG Y, GUO S Z, et al. One-step electrospinning membranes with gradual-transition wettability gradient for directional fluid transport [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 644: 120091.

[35] PENG Y C, ZHOU J W, YANG Y F, et al. An integrated 3D hydrophilicity/hydrophobicity design for artificial sweating skin (i-TRANS) mimicking human body perspiration [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(44): 2204168.

[36] 王洪杰, 胡忠文, 王赫, 等. 单向导湿纺织品及其应用的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2022, 43(11): 195-202.

WANG Hongjie, HU Zhongwen, WANG He, et al. Research progress in one-way water transport textiles and their applications [J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(11): 195-202. (in Chinese)

[37] DONG Y L, KONG J H, MU C Z, et al. Materials design towards sport textiles with low-friction and moisture-wicking dual functions [J]. *Materials and Design*, 2015, 88: 82-87.

[38] PEREIRA R F, Bártolo P J. Traditional therapies for skin wound healing [J]. *Advances in Wound Care*, 2016, 5(5): 208-229.

[39] 管彤, 张锋. 生物活性丝素蛋白敷料在创面修复中的研究进展 [J]. *丝绸*, 2023, 60(2): 35-41.

GUAN Tong, ZHANG Feng. Bioactive silk protein dressings in wound repair [J]. *Journal of Silk*, 2023, 60(2): 35-41. (in Chinese)

[40] 耿欢. 用于伤口敷料的纳米纤维膜的设计制备及应用研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2017.

[41] 欧康康, 祁琳雅, 侯怡君, 等. 纳米纤维基单向导湿抗菌敷料的制备及其性能 [J]. *纺织学报*, 2022, 43(6): 49-56.

OU Kangkang, QI Linya, HOU Yijun, et al. Preparation and properties of nanofiber-based unidirectional water-transport antibacterial wound dressings [J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(6): 49-56. (in Chinese)

[42] 李晓强, 孙倩, 秦晓雨, 等. 基于聚苯胺/聚丙烯腈纳米纤维膜的柔性空气电池阴极 [J]. *服装学报*, 2020, 5(2): 95-100.

LI Xiaoqiang, SUN Qian, QIN Xiaoyu, et al. Polyaniline/polyacrylonitrile nanofibrous membrane based flexible air-battery cathode [J]. *Journal of Clothing Research*, 2020, 5(2): 95-100. (in Chinese)

[43] 欧康康, 侯怡君, 吴俊妍, 等. 单向导湿纳米纤维光热膜的制备及废水处理 [J]. *印染*, 2021, 47(9): 15-18, 54.

OU Kangkang, HOU Yijun, WU Junyan, et al. Preparation of one-way transport nano fiber photothermal membrane and its wastewater treatment [J]. *China Dyeing and Finishing*, 2021, 47(9): 15-18, 54. (in Chinese)

[44] 李坤. 静电纺丝法制备 PVDF-PDMS 纳米纤维复合膜及其油水分离性能 [D]. 长春: 长春工业大学, 2022.

[45] 杨玉艳. 具有单向导湿和热传导功能的多层结构空气过滤纤维膜的制备与性能研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2020.

[46] CHEN J W, RAO Y Y, ZHU X, et al. Electrospun nanofibrous membranes with asymmetric wettability for unidirectional moisture transport, efficient PM capture and bacteria inhibition [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 662: 121006.

(责任编辑: 沈天琦)