

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.02.006

Janus 织物的结构设计及其单向导湿性能

单明景, 安春耕

(天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对传统单向导湿 Janus 织物制备方法生产效率低、稳定性差等问题, 利用存在润湿性差异的莫代尔和涤纶 2 种纤维构建 Janus 织物, 探究接结点数量、织物组织等结构参数对 Janus 织物基础性能和单向导湿性能的影响规律。结果表明: 莫代尔纤维和涤纶纤维通过机织法可以制备 Janus 织物; 随着接结点数量的增加, 织物的单向导湿性能降低; 平纹组织的单向导湿效果优于 2/2 纬重平、2/2 斜纹组织; 接结点数量为 1, 两侧均为平纹组织时 Janus 织物的单向传递指数可达 382.72, 单向导湿性能相对最优。

关键词: Janus 织物; 结构设计; 单向导湿; 接结点数量; 织物组织

中图分类号: TS105.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)02-0036-07

Structural design of Janus fabric and its unidirectional moisture conductivity

SHAN Mingjing, AN Chungeng

(School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To solve the problems of low production efficiency and poor stability of preparation methods for traditional unidirectional moisture conductive Janus fabric, Janus fabric was constructed using modal and polyester fibers with differences in wettability. The influences of structural parameters such as number of junction points and fabric weave on the basic and unidirectional moisture conductive properties of Janus fabrics were investigated. The results showed that Janus fabrics could be made of modal and polyester fibers by weaving. Unidirectional moisture conductivity of fabric got worse with the increase of the number of junction points. Unidirectional moisture conductivity of plain fabric was better than those of 2/2 weft-backed plain and 2/2 twills fabric. When the number of junction points is 1 and both sides are plain weave, unidirectional transfer index of Janus fabric has reached 382.72, and unidirectional moisture conductivity is relatively optimal.

Key words: Janus fabrics; structural design; unidirectional moisture conductivity; number of junction points; fabric weave

自然界中存在很多有趣的单向导湿现象。蜘蛛丝由周期性出现的纺锤节和关节构成, 纺锤节由杂乱的纳米纤维组成, 而关节则是由整齐排列的纳米纤维组成。潮湿环境中, 水滴在纺锤节处凝结, 然后微小的水滴向关节方向流动, 实现水分的定向传输^[1]。仙人掌^[2]、蝴蝶翅膀^[3]这种两侧具有不对称结构^[4-6]和属性的二维材料可称为 Janus 材料^[7-10]。受这些自然现象的启发, 将具有亲水/疏水不对称性的多孔 Janus 结构用于织物设计, 可开发单向导湿织物^[11-14]。Janus 织物实现单向导湿的核心机理是通过两侧润湿性差异形成附加压力差^[15-17], 水分在疏水层时, 可以沿厚度方向的毛细

管渗透到亲水层; 而水分在亲水层时, 会沿水平方向的毛细管扩散, 不会渗透到疏水层, 从而实现织物的单向导湿。

现有的几种制备 Janus 单向导湿织物的策略, 其核心都是构建亲水/疏水结构。Wang 等^[18]和 Zeng 等^[19]通过静电喷涂法在亲水棉织物上喷涂疏水涂层。Tian 等^[20]利用等离子体对疏水织物的一侧进行亲水改性处理。Wang 等^[21]利用浸渍涂布技术将光响应材料 TiO₂ 涂覆于涤纶织物表面, 再对该侧进行紫外线照射, 使该侧具备超亲水特性。但这些方法普遍存在生产效率低、操作繁琐、稳定性差等问题, 不利于大规模生产。

收稿日期: 2023-03-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(12102300)

通信作者: 单明景(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为产业用纺织品开发。E-mail: 1947848455@qq.com

本文利用莫代尔纤维和涤纶纤维的润湿性差异构建具有单向导湿功能的 Janus 织物,在此基础上,研究织物结构对 Janus 织物基础性能和单向导湿性能的影响规律,以期高效、稳定地制备单向导湿 Janus 织物提供参考。

1 实验部分

1.1 实验原料与仪器

原料:涤纶单纱、莫代尔单纱,线密度均为 15 tex,山东华纺股份有限公司产品。

仪器: DSTW-01 型并捻联合试验机,天津市嘉诚机电设备公司产品; SGA598 型全自动剑杆织机,江阴市通源纺机有限公司产品; JA5003A 型电子天平,巩义市予华仪器有限责任公司产品; DL-101-1BS 型电热鼓风干燥箱,天津市中环实验电炉有限公司产品; YG(B)141D 型数字式织物厚度仪,温州大荣纺织标准仪器厂产品; YG461G 型全自动透气仪,宁波纺织仪器厂产品; Porolux 1000 型孔径分析仪,比利时普罗美特有限公司产品; DSA30S 型接触角分析仪,德国 Kruss 公司产品; M290 型液态水分测试仪,美国 SDL Atlas 公司产品。

1.2 Janus 织物设计实验

Janus 织物单向导湿机理如图 1 所示。



图 1 Janus 润湿性结构的水分传输机制

Fig.1 Mechanism of water transporting for Janus wettability structure

Janus 润湿性结构两侧存在润湿性差异,即一侧疏水,另一侧亲水。因此,在几种双层组织中选择接结双层组织,表经和表纬选择疏水性涤纶纤维,里经和里纬选择亲水性莫代尔纤维。并且选择“上接下”接结法进行织造。

实验分为两组,分别研究接结点数量和织物组织对 Janus 织物基础性能和单向导湿性能的影响。选用 15 tex 涤纶单纱和 15 tex 莫代尔单纱,通过并捻联合试验机并线加捻,捻向为 S 捻,捻度为 50 捻/(10 cm),制成涤纶 15 tex × 2 股线和莫代尔 15 tex × 2 股线。表经和表纬选择 15 tex × 2 涤纶股线,里经和里纬选择 15 tex × 2 莫代尔股线;经纱密度为 600 根/(10 cm),纬纱密度为 240 根/(10 cm),表里经纬纱排列比为 1:1;公制箱号 150,每箱 4 入。本文所制备的 5 组织物其规格

设计如表 1 所示。

表 1 Janus 双层织物规格设计

Tab.1 Design for Janus double-layered fabric

试样编号	织物组织		接结点数量	织物组织图
	表组织	里组织		
M1	平纹	平纹	1	
M2	平纹	平纹	2	
M3	平纹	平纹	4	
M4	2/2 纬重平	2/2 纬重平	1	
M5	2/2 斜纹	2/2 斜纹	1	

注: 织物组织图中, x 代表表组织经组织点; ■ 代表里组织经组织点; ○ 代表投入里纬时表经纱都要提起的组织点; 在“上接下”接结法中接结组织点表示表经的取消点, 故组织图中没有填绘此种组织点。

表 1 中 M1、M2、M3 试样用于研究接结点数量的影响, 在本文中表经下降和里纬交织构成接结点, 接结点均表现在亲水面上, 其数量会影响织物两侧的润湿性差异, 以此来研究两侧润湿性差异大小对单向导湿性能的影响; M1、M4、M5 试样用于研究织物组织结构的影响, 不同织物组织结构构成的孔隙大小不同, 以此来研究在接结点数量相同的条件下, 不同毛细管半径对织物单向导湿性能的影响。

1.3 测试与表征

(1) 织物平方米克重测试: 依据 GB/T4669—2008《纺织品 机织物单位长度质量和单位面积质量的测定》进行测试。

(2) 织物厚度测试: 依据 GB/T3820—1997《纺织品和纺织制品厚度的测定》进行测试。

(3) 织物透气率测试: 依据 GB/T 5453—1997《纺织品织物透气性的测定》进行测试。

(4) 水分的蒸发率和蒸发速率测试：依据 GB/T 21655.1—2008《纺织品吸湿速干性的评定》进行测试。织物在润湿后某一时刻的水分蒸发率是指到这一时刻为止水分蒸发量占织物未润湿之前原始质量的百分比：

$$E_i = (m - m_i) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中： E_i 为在 i 时刻织物的水分蒸发率(%)； m_0 为织物未润湿之前的原始质量(g)； m 为织物被滴水润湿后的质量(g)； m_i 为织物被润湿后在 i 时刻的质量(g)； $m - m_i$ 为织物在 i 时刻的水分蒸发量(g)。在蒸发量 - 时间变化曲线中，蒸发量通常会在某点后变化趋缓，在该点之前的曲线上最接近直线的部分做切线，该切线的斜率即为水分蒸发速率。

(5) 织物平均孔径测试：采用 Porolux 1000 型孔径分析仪，根据泡点法进行测试。

(6) 接触角测试：采用 DSA30S 型接触角分析仪对双层织物的涤纶面和莫代尔面的水接触角进行测试。

(7) 织物单向导湿性能测试：采用 M290 型液态水分测试仪，依据《GB/T 21655.2—2019 纺织品吸湿速干性的评定第 2 部分：动态水分传递法》进行测试。单向传递指数指的是水分从上表面传递到下表面的能力，计算公式为：

$$O = \frac{\int U_B - \int U_T}{t} \quad (2)$$

式中： O 为单向传递指数； t 为测试时间(s)； $\int U_B$ 为下表面的吸水量； $\int U_T$ 为上表面的吸水量。单向传递指数是衡量织物单向输水性能的重要指标。国标要求单向输水织物的单向传递指数至少应达到 100.1。

2 结果与讨论

2.1 织物平方米克重与厚度

不同织物的平方米克重和厚度如图 2 所示。

由图 2(a)可知，由 M1、M2 到 M3，同一组织条件下随着接结点数量增加，织物平方米克重在增大。本文选择的是“上接下”接结法，随着接结点数量的增加，表经下降和里纬交织频繁，纱线曲屈波高，因此，织物平方米克重增大。接结点数量相同的 M1、M4 和 M5 平方米克重依次减小，是因为三者中织物组织依次是平纹、2/2 纬重平、2/2 斜纹，浮长线长度依次增长，纱线屈曲程度减小，因此，织物单位面积内质量相应减小。由图 2(b)可以看出，M1、M2 和 M3 厚度依次

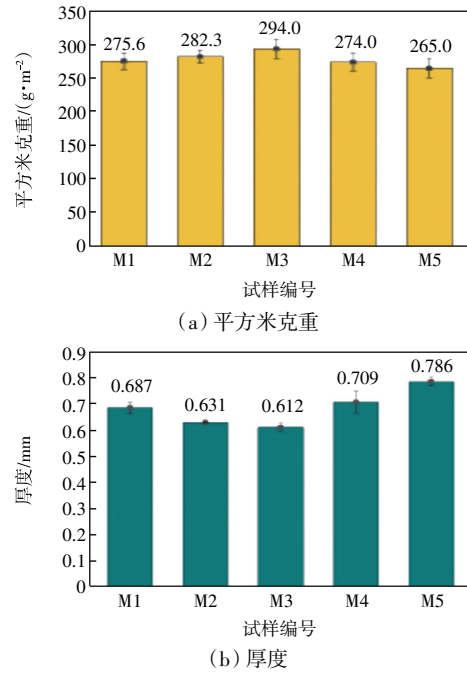


图 2 不同织物的平方米克重和厚度

Fig.2 Weight per square meter and thickness of different fabrics

减小，说明随着接结点数量增加，织物上下两层交互紧密，织物厚度减小。M1、M4 和 M5 厚度依次增大，这是由于纬重平织物表面会呈现纵凸条纹，斜纹织物表面会呈现斜向凸条纹，表面凸条纹增加了纬重平织物和斜纹织物的厚度。

2.2 织物平均孔径

不同织物的孔径如图 3 所示。

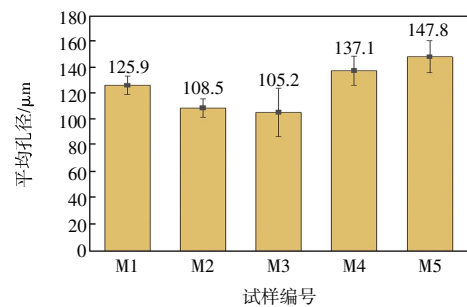


图 3 不同织物的平均孔径

Fig.3 Average pore size of different fabrics

由图 3 可以看出，M1、M2 和 M3 平均孔径依次减小，说明随着接结点增加，织物上下两层交互更频繁，使织物变得更加紧密，平均孔径相应减小。M1、M4 和 M5 平均孔径依次增大，说明在纱线捻度、线密度、经纬纱密度相同的条件下，平纹组织、2/2 纬重平组织、2/2 斜纹组织形成的孔隙依次增大，形成的织物逐渐疏松。

2.3 织物透气率

不同织物的透气率如图 4 所示。

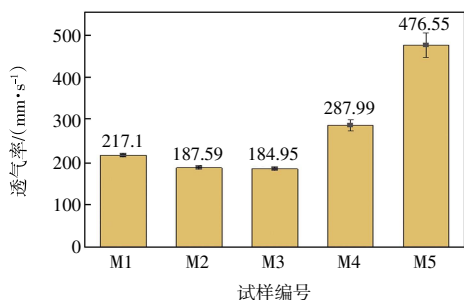


图 4 不同织物的透气率
Fig.4 Air permeability of different fabrics

织物透气性受经纬纱线密度、纱线捻度、经纬纱密度以及织物组织结构等因素影响,即取决于纱线之间、纤维之间形成的孔隙数量和大小。本文 5 组织物的纱线捻度、线密度以及经纬纱密度相同,因此,织物透气性产生差异的原因在于织物结构的不同。由图 4 可以看出,M1、M2 和 M3 透气率依次降低,说明随着接结点数量的增加,表经频繁下降与里纬交织,一定程度上降低了空气的流通能力。M1、M4 和 M5 透气率依次增加,结合图 3 可知,平纹组织、2/2 纬重平以及 2/2 斜纹组织形成的平均孔隙依次增大,经纬纱交织次数越少,平均孔隙越大,织物越疏松,对空气阻碍程度越小,织物透气性越好。

2.4 织物水分蒸发率和蒸发速率

不同织物的水分蒸发性能如图 5 和表 2 所示。

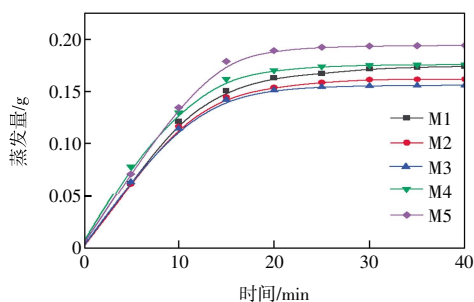


图 5 不同织物蒸发量-时间变化曲线
Fig.5 Curves of evaporation-time of different fabrics

表 2 不同织物水分蒸发率和蒸发速率

Tab.2 Moisture evaporation ratios and evaporation rates of different fabrics

试样编号	蒸发率/%	蒸发速率/(g·h ⁻¹)
M1	10.57	0.353
M2	9.67	0.341
M3	9.19	0.335
M4	10.67	0.387
M5	11.34	0.532

单向导湿织物水分蒸发速率越高,意味着沿厚度方向传递的水分蒸发到大气中的速度越快,有利于提

高织物的单向输水效果。国家标准规定,机织速干织物的水分蒸发速率至少要达到 0.18 g/h。由图 5 可以看出:在 10 min 之前,M1、M2 和 M3 蒸发量基本相同,M4 和 M5 蒸发量相差不大,但两者蒸发量均高于 M1、M2 和 M3,10 min 之后 5 组织物蒸发量出现明显的差异,M5 > M4 > M1 > M2 > M3,到 40 min 时曲线趋于水平。由表 2 可知,5 组织物均达到了速干织物的国标要求。M1、M2 和 M3 的水分蒸发率和蒸发速率依次降低,织物速干性变差;而 M1、M4 和 M5 的水分蒸发率和蒸发速率依次增大。M4 和 M5 的水分蒸发率和蒸发速率比较高的原因主要有 3 点:①2/2 纬重平和 2/2 斜纹浮长线较长,水分容易水平扩散;②M4 和 M5 表面均有凸条纹,增大了水分与空气的接触面积;③二者内部疏松,孔隙较大,在空气可以流通的通道中,增大了水分与空气的接触面积。因此,与 M1、M2 和 M3 相比,M4 和 M5 蒸发率和蒸发速率好,速干性更好,有利于长时间保持单向导湿效果。

2.5 织物表面水接触角

2.5.1 静态水接触角

图 6 分别展示了 M1—M5 织物涤纶层和莫代尔层的静态水接触角。

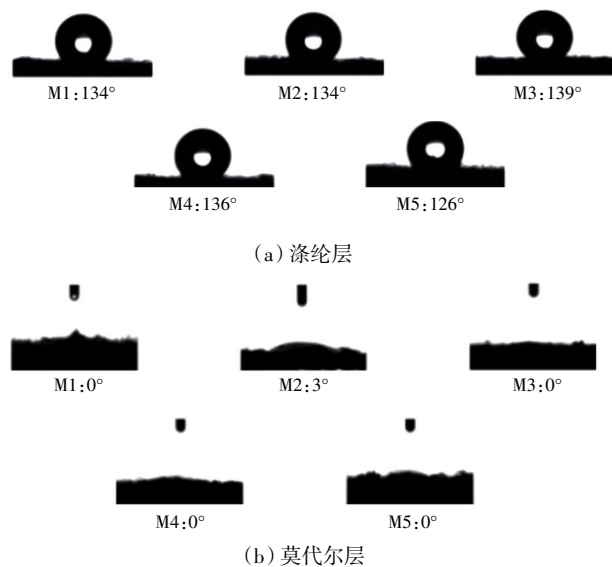


图 6 不同织物的静态水接触角

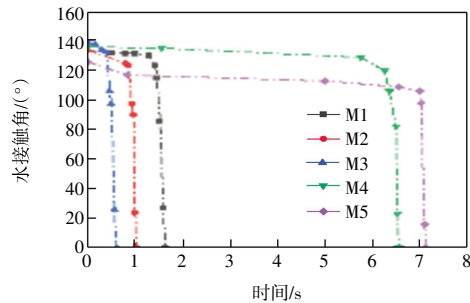
Fig.6 Static water contact angle of different fabrics

由图 6 可以看出,涤纶层的水接触角均大于 90°,小于 150°,说明该层表现疏水性。莫代尔层水接触角均小于 5°,说明该层均表现超亲水性。5 组织物一面疏水,一面超亲水,形成了 Janus 润湿性结构,由此说明,本文成功制备了 5 组 Janus 织物。

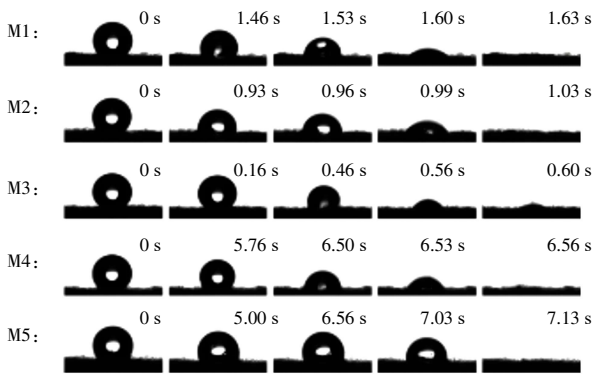
2.5.2 动态水接触角变化

5 组织物的莫代尔层静态水接触角约为 0°,无法

分析动态水接触角,因此,仅分析涤纶层的动态水接触角。本文将液滴从 0 s 到水接触角变为 0°的时间统称为水接触角保持时间。图 7 分别展示了 5 组 Janus 织物表层水接触角随时间变化的曲线和表观图像。



(a) 水接触角-时间变化



(b) 表观现象变化

图 7 不同织物的涤纶层水接触角-时间变化曲线及表观图像

Fig.7 Curve of contact angle-time of polyester layer for M1-M5 and graphs for change of exterior

由图 7 可以看出, M1、M2、M3 的接触角保持时间远小于 M4、M5, 因为与 2/2 纬重平和 2/2 斜纹相比, 平纹组织紧密, 形成的孔隙最小, 在一定范围内毛细管力随着毛细管半径的减小而增大, 因此, M1、M2、M3 产生的毛细管力大于 M4、M5, 液滴在较大的毛细管力作用下迅速打破平衡状态, 沿着水平和垂直于厚度方向的毛细管传递到织物各处。从 M1、M2、M3 的接触角-时间变化曲线可知, 随着接结点数量的增加, 接触角保持时间变短, 曲线斜率增大, 接触角变化速率加快。这是由于随着接结点数量的增加, 织物表里层交互增加, 润湿性差异减小, 导致了接触角保持时间变短, 变化速率加快。

2.6 织物单向导湿性能

2.6.1 含水量变化

图 8 为分别在涤纶侧和莫代尔侧喷水时织物的最终含水量情况。

由图 8 最终状态下含水量环形图可以看出: 5 组 Janus 织物从涤纶侧喷水时, 莫代尔面的含水量均大于

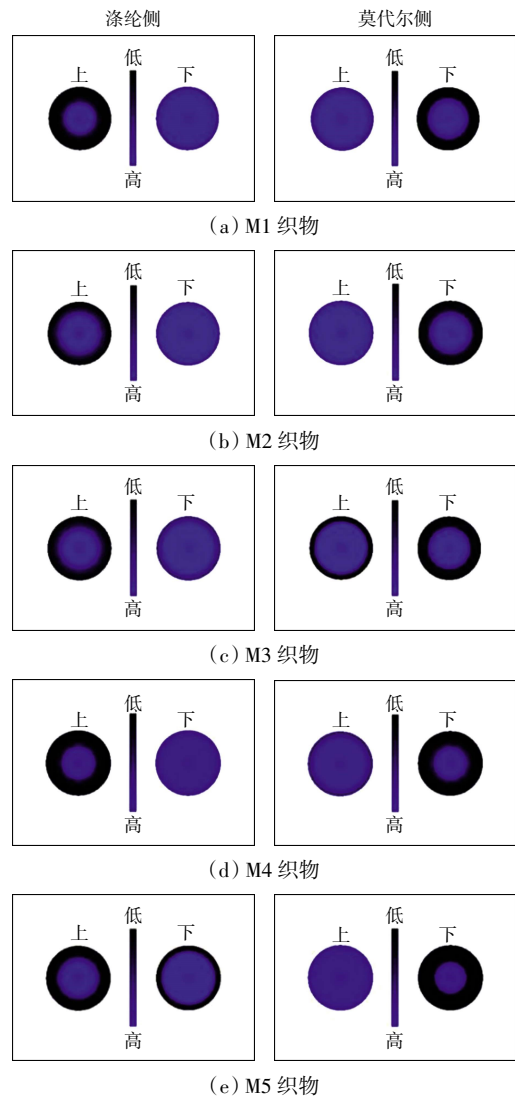


图 8 M1-M5 最终状态含水量环形图

Fig.8 Annular graph of moisture content of M1-M5 under final condition

上涤纶面, 从莫代尔侧喷水时则莫代尔面含水量均大于涤纶面, 说明水分更倾向于从润湿性差的涤纶面向润湿性好的莫代尔面传递, 而在相反方向上水分的传递会受到一定的阻碍, 表现出水分传输的单向性。

为了研究接结点数量和织物组织对 Janus 织物含水量-时间变化的影响, 本文将 M1、M2、M3 试样组和 M1、M4、M5 试样组的含水量-时间变化曲线分别进行比较, 如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 均为平纹组织的 3 种织物 M1、M2、M3 中, M1 织物在不同方向的水分传输过程中的上下表面含水量差值均为最大, M2 次之, M3 最小, 说明 M1 的单向输水性能优于 M2、M3, M1 的涤纶面更容易将水分渗透到莫代尔面, 而在反方向上能让水分更好地在莫代尔面扩散, 阻碍其渗透到涤纶面。由此

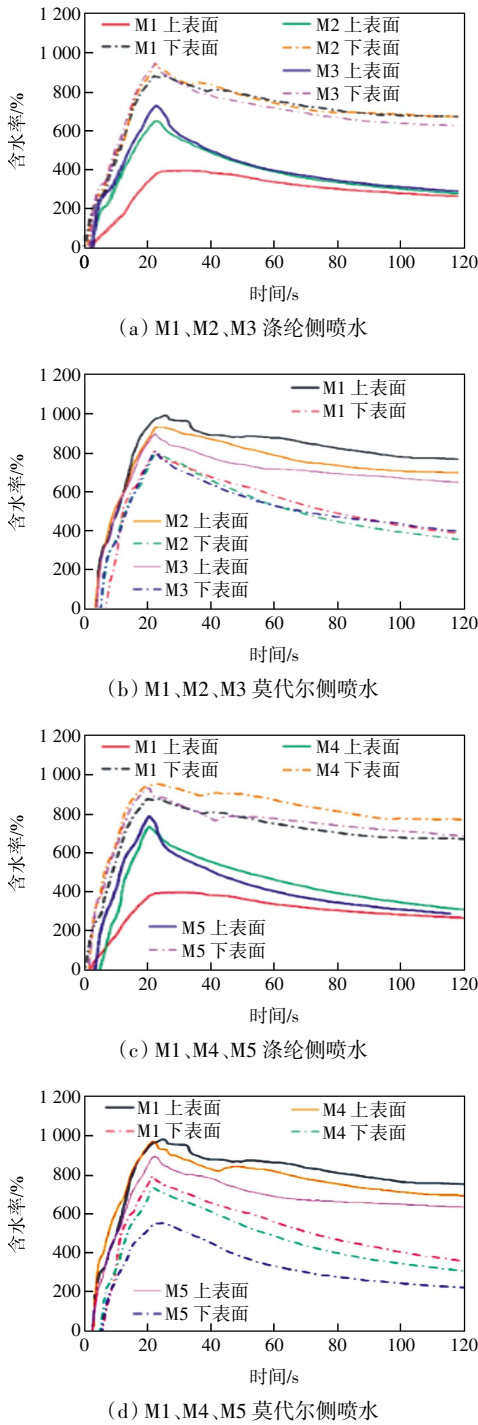


图 9 不同织物的含水量-时间变化曲线

Fig.9 Curve of water content-time of different fabrics

说明,随着接结点数量的增多,虽然增加了水分的传输通道,但是降低了织物上下两层的润湿性差异,导致织物单向输水性能变差。比较接结点数量相同而织物组织不同的 M1、M4、M5,在水分从涤纶面向莫代尔面传输过程中,M1 织物的上下表面含水量差异略大于 M4,M5 最小。这是由于在一定范围内毛细管力随着毛细管半径的减小而增大,3 种织物中平纹织物 M1

结构最紧密,2/2 纬重平织物 M4 次之,2/2 斜纹织物 M5 结构最疏松,因此,M1 毛细管力最大,更容易将水分从涤纶面传递到莫代尔面。而在水分从莫代尔面向涤纶面传输的过程中,20 s 之后,M1 上、下表面的含水量在三者中最高,含水量差值 M5 最大,M4 次之,M1 最小。这是由于织物上下两面织物组织相同,织物两表面形成的毛细管半径大小一致。在水分反方向传输时,M1 的毛细管力依然是三者中最大的,液滴在莫代尔面扩散的同时,还要受到毛细管力的作用向涤纶面传递,因此,M1 两表面的含水量均最高,说明平纹组织由于两侧毛细管半径小,提高了水分的双向传输能力。M5 由于毛细管半径大,产生的毛细管力小,对液滴向涤纶面传递的作用力不足,水分可以在莫代尔面更好地扩散。

2.6.2 单向传递指数

不同织物的单向传递指数如图 10 所示。

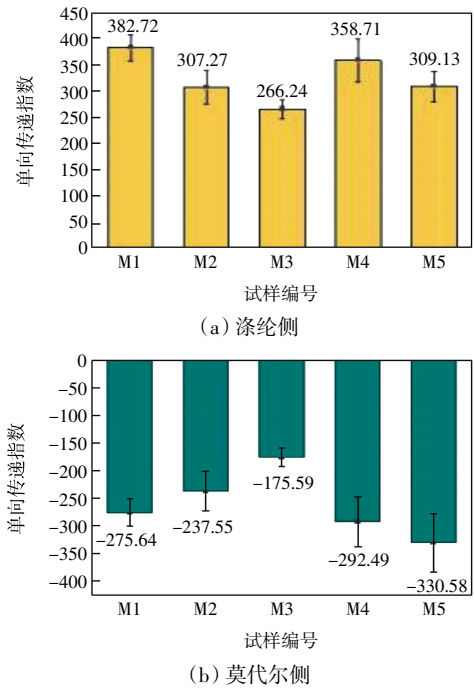


图 10 不同织物的单向传递指数

Fig.10 Unidirectional transfer index of different fabrics

由图 10 可以看出,5 组织物涤纶侧单向传递指数均为正值,说明液态水可以轻松地从涤纶侧传递到莫代尔侧;莫代尔侧的单向传递指数均为负值,说明液态水由莫代尔侧向涤纶侧的传递受到阻碍,在莫代尔侧进行水平扩散。由此说明,本文所制备的 5 组织物均具有单向导湿能力。M1、M2 和 M3 涤纶侧的单向传递指数依次降低,而莫代尔侧的单向传递指数则依次增大。这是由于随着接结点数量的增加,织物两侧交互增加,润湿性差异减小,织物单向导湿能力下降。

M1、M4 和 M5 两侧的单向传递指数均依次降低,因为三者分别是平纹组织、2/2 纬重平组织、2/2 斜纹组织,所形成的孔隙增大,毛细管力减小,液态水向下层渗透的速率降低,单向导湿性能降低。

在涤纶侧,M1、M2、M4 和 M5 的单向传递指数均大于 300,达到了单向导湿织物国标中的最高标准,M3 的单向传递指数满足国标基本要求。为了提升 Janus 织物单向导湿性能,涤纶侧的单向传递指数应大,莫代尔侧的单向传递指数应小,因此,接结点数量不宜为 4。

3 结 论

为探索机织方法构建单向导湿 Janus 织物的可行性,研究其结构参数对单向导湿性能的影响,本文利用涤纶双股线和莫代尔双股线织造了双层织物,设计了 5 组样品,测试了织物的基础性能、静态水接触角、动态水接触角、单向传递指数等指标,结果表明:

(1) 5 组织物两侧具有明显的润湿性差异,均为 Janus 织物。

(2) 随着接结点数量的增加,Janus 织物上下层交织更加频繁,两侧润湿性差异减小,织物单向导湿性能降低,织物速干性变差,不利于较长时间的单向导湿过程。当接结点数量为 1 时,单向导湿指数可达 382.72,单向导湿性能最好。

(3) 平纹、2/2 纬重平、2/2 斜纹织物纱线交织的次数依次减小,形成的孔隙依次增大,毛细管力依次减小,单向导湿效果降低,但都高于国标五级标准。

参考文献:

- [1] ZHENG Y M, BAI H, HUANG Z B, et al. Directional water collection on wetted spider silk[J]. *Nature*, 2010, 463(7281): 640–643.
- [2] JU J, BAI H, ZHENG Y M, et al. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1247.
- [3] FENG S L, WANG Q Q, XING Y, et al. Continuous directional water transport on integrating tapered surfaces[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(9): 2000081.
- [4] YANG H C, XIE Y S, HOU J W, et al. Janus membranes: Creating asymmetry for energy efficiency[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(43): 1801495.
- [5] 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): e1801527.
- [6] JI H L, GU M Q, ZHANG G W, et al. Janus membrane prepared via one step depositing coatings onto PVDF/PDMS membrane for simultaneous antiwetting and antifouling in DCMD[J]. *Desalination*, 2022, 539: 115964.
- [7] 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.
REN B N, PI H H, GU Y S, et al. Research progress in preparation and application of Janus membranes[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(7): 72–80 (in Chinese).
- [8] WANG H J, WANG W Y, WANG H, et al. Pore size effect on one-way water-transport cotton fabrics[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 455: 924–930.
- [9] WANG H J, WANG W Y, WANG H, et al. One-way water transport fabrics based on roughness gradient structure with No low surface energy substances[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(38): 32792–32800.
- [10] KONG Y, LIU Y Y, XIN J H. Fabrics with self-adaptive wettability controlled by “light-and-dark”[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(44): 17978–17987.
- [11] 马晨, 金肖克, 唐纱丽, 等. 涤纶机织物单向导湿性能评价方法[J]. *现代纺织技术*, 2022, 30(5): 131–138.
MA C, JIN X K, TANG S L, et al. Evaluation method of unidirectional moisture conductivity of polyester woven fabrics[J]. *Advanced Textile Technology*, 2022, 30(5): 131–138 (in Chinese).
- [12] 贺建国, 章为敬. 一种新型单向导湿面料的开发[J]. *现代纺织技术*, 2019, 27(4): 24–27.
HE J G, ZHANG W J. Development of a novel fabric with the function of unidirectional water conductivity[J]. *Advanced Textile Technology*, 2019, 27(4): 24–27 (in Chinese).
- [13] 徐伟杰, 张玉高. 导湿快干与单向导湿织物[J]. *印染*, 2011, 37(2): 46–51.
XU W J, ZHANG Y G. Review of moisture management fabrics[J]. *Dyeing & Finishing*, 2011, 37(2): 46–51 (in Chinese).
- [14] 陶凤仪, 乔明伟, 王姗姗, 等. 单向导湿机织物的设计及其性能研究[J]. *丝绸*, 2021, 58(7): 110–116.
TAO F Y, QIAO M W, WANG S S, et al. Study on design and performance of unidirectional woven fabric with moisture conduction function[J]. *Journal of Silk*, 2021, 58(7): 110–116 (in Chinese).
- [15] YANG H C, HOU J W, CHEN V, et al. Janus membranes: Exploring duality for advanced separation[J]. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2016, 55(43): 13398–13407.
- [16] 陆毅. 不对称润湿性 Janus 膜的研究进展[J]. *安徽化工*, 2021, 47(4): 4–7, 14.
LU Y. Research progress of asymmetric wettability Janus membrane[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2021, 47(4): 4–7, 14 (in Chinese).

- [11] HOLOPAINEN J, PENTTINEN T, SANTALA E, et al. Needleless electrospinning with twisted wire spinneret[J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(2): 025301.
- [12] MOLNAR K, NAGY Z K. Corona-electrospinning: Needleless method for high-throughput continuous nanofiber production [J]. *European Polymer Journal*, 2016, 74: 279–286.
- [13] LIU Z, ANG K K J, HE J H. Needle-disk electrospinning inspired by natural point discharge[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(4): 1823–1830.
- [14] ALI U, NIU H T, KHURSHID M F, et al. Electrospinning behavior of needleless spinneret with a popular mace shape[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2019, 110(3): 349–357.
- [15] ALI U, ABBASS A, KHURSHID F, et al. Needleless electrospinning using a flat wheel spinneret[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2017, 12(3): 155892501701200.
- [16] AHMAD A, ALI U, NAZIR A, et al. Toothed wheel needleless electrospinning: A versatile way to fabricate uniform and finer nanomembrane[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(21): 13834–13847.
- [17] THERON S A, YARIN A L, ZUSSMAN E, et al. Multiple jets in electrospinning: Experiment and modeling[J]. *Polymer*, 2005, 46(9): 2889–2899.
- [18] VARESANO A, CARLETTO R A, MAZZUCHETTI G. Experimental investigations on the multi-jet electrospinning process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(11): 5178–5185.
- [19] YANG Y, JIA Z D, LI Q, et al. Multiple jets in electrospinning[C]//2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia: IEEE, 2007: 940–943.
- [20] 刘延波, 曹红, 张立改, 等. 多针头静电纺丝过程中场强的改善[J]. *成都纺织高等专科学校学报*, 2017, 34(2): 30–36.
- LIU Y B, CAO H, ZHANG L G, et al. Improvement of field strength in multi-needle electrostatic spinning process[J]. *Journal of Chengdu Textile College*, 2017, 34(2): 30–36 (in Chinese).
- [21] 张艳萍, 张莉彦, 马小路, 等. 无针静电纺丝技术工业化进展[J]. *塑料*, 2017, 46(2): 1–4, 12.
- ZHANG Y P, ZHANG L Y, MA X L, et al. Recent development of industrialized needleless electrospinning technology[J]. *Plastics*, 2017, 46(2): 1–4, 12 (in Chinese).
- [22] NIU H T, ZHOU H A, YAN G L, et al. Enhancement of coil electrospinning using two-level coil structure[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(45): 15473–15478.
- [23] YANG W X, LIU Y B, ZHANG L G, et al. Optimal spinneret layout in Von Koch curves of fractal theory based needleless electrospinning process[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(6): 065223.
- [24] 杨文秀. 基于分形原理的静电纺丝技术研究和锂电池隔膜研发[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- YANG W X. Research on electrostatic spinning technology based on fractal principle and development of lithium battery separator[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016 (in Chinese).
- [25] 熊健. 曲率液面静电纺丝机理及在净化领域的应用[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- XIONG J. Curvature-surface electrospinning and its applications in purification[D]. Shanghai: Donghua University, 2022 (in Chinese).
- [26] MANDELBROT B B. Stochastic models for the Earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1975, 72(10): 3825–3828.

本文引文格式:

刘延波, 胡楷, 郝铭, 等. 基于分形原理的球形静电纺丝头建模及其电场仿真[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(2): 43–48.

LIU Y B, HU K, HAO M, et al. Design of spherical spinneret based on fractal principle and its electric field simulation[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(2): 43–48 (in Chinese).

(上接第 42 页)

- [17] 王其, 冯勋伟. 形成差动毛细效应的条件研究[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2002, 28(3): 34–36, 39.
- WANG Q, FENG X W. Study on conditions for producing differential capillary effect[J]. *Journal of Donghua University, Natural Science*, 2002, 28(3): 34–36, 39 (in Chinese).
- [18] WANG H J, WANG W Y, WANG H, et al. One-way water transport fabrics with hydrophobic rough surface formed in one-step electrospray[J]. *Materials Letters*, 2018, 215: 110–113.
- [19] ZENG C, WANG H X, ZHOU H A, et al. Directional water transport fabrics with durable ultra-high one-way transport capacity[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2016, 3(14): 1600036.
- [20] TIAN X L, JIN H A, SAINIO J, et al. Droplet and fluid gating by biomimetic Janus membranes[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(38): 6023–6028.
- [21] WANG H X, DING J, DAI L M, et al. Directional water-transfer through fabrics induced by asymmetric wettability[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(37): 7938–7940.

本文引文格式:

单明景, 安春耕. Janus 织物的结构设计及其单向导湿性能[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(2): 36–42, 48.

SHAN M J, AN C G. Structural design of Janus fabric and its unidirectional moisture conductivity [J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(2): 36–42, 48 (in Chinese).