

针/机织复合织物定向导湿性的等离子 改性构建及其舒适性评价

肖彩勤¹, 胡霄睿¹, 孙丰鑫^{*1,2}, 高卫东¹, 陈志强²

(1. 江南大学 生态纺织教育部重点实验室,江苏 无锡 214122;2. 迪肯大学 先进材料研究中心,澳大利亚 维多利亚 3216)

摘要:为开发具有优良导湿性能的高舒适性服装面料,采用针织物与机织物复合的双面结构设计,对其机织面进行等离子体聚合沉积改性,构建非对称浸润性织物,探讨双面结构织物和等离子体改性对织物导湿性的协同影响机制;通过主客观评价法对比等离子体处理前后织物的热湿舒适性和硬挺手感。结果表明:采用针织与机织复合结构,借助3步等离子体处理方法,可实现具有厚度方向定向导湿与平面内差异性液态水传导性能的双面结构织物的纺织;经过等离子体处理后织物可保持原有硬挺的触觉,且热湿舒适性明显提升。

关键词: 定向导湿;等离子体改性;双面结构织物;热湿舒适性;触觉舒适性

中图分类号: TS 101.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2020)05-0387-06

Construction and Comfort Evaluation on Directional Liquid Transport of Knitted/Woven Composite Fabrics Modified by Plasma

XIAO Caiqin¹, HU Xiaorui¹, SUN Fengxin^{*1,2}, GAO Weidong¹, CHEN Zhiqiang²

(1. Key Laboratory of Eco-Textile, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;2. Institute for Frontier Materials, Deakin University, Victoria 3216, Australia)

Abstract: In order to develop high comfort clothing fabrics with excellent moisture permeability, the com-structured fabrics by combining the woven and knitted fabrics were designed. The woven surface was modified by plasma polymerization and the asymmetric wetting fabric was constructed. The synergistic effect mechanism of com-structured fabric and plasma modification on the moisture permeability of fabric was discussed. The thermal-wet comfort and stiff handle of the fabric before and after plasma treatment were compared by subjective and objective evaluation method. The results show that the com-structured fabrics with three-step plasma treatment can achieve one-way water transport along the thickness direction of fabrics and realize the spinning of com-structured fabric with different liquid water conductivity in-plane. After plasma treatment, the fabric can keep the original stiff touch, and the thermal-wet comfort is significantly improved.

Key words: directional water transport, plasma modification, com-structured fabric, thermal-wet comfort, tactile comfort

织物作为服装的基础材料,其穿着舒适性一直是纺织领域关注的热点问题^[1]。多维度定向导湿性能织物的开发,对推进吸湿快干纺织品和智能服装的研究具有重要价值^[2-4]。制备定向导湿织物的

收稿日期:2020-03-02; 修订日期:2020-06-18。

基金项目:国家自然科学基金项目(11802104);“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFB0309200);江苏省自然科学基金项目(BK20180589);中国博士后基金面上项目(2019M651697);中央高校基本科研业务费专项资金项目(JUSRP11915)。

作者简介:肖彩勤(1996—),女,硕士研究生。

* 通信作者:孙丰鑫(1989—),男,副教授,硕士生导师。主要研究方向为纤维体软材料力学与介质传递行为。

Email:fxsun@jiangnan.edu.cn

基本原理是:通过构造织物厚度方向的材料表面能梯度差,实现汗液在织物内外层的定向传导;主要方法为:形成织物厚度方向纤维层的亲疏水差异或通过织物梯度结构设计实现织物定向导湿^[5-6]。例如,WANG H 等^[7]采用聚合沉积技术开发一种在厚度方向具有浸湿梯度差的织物,实现了单向导水;ZHOU H 等^[8]通过组合织物双面亲水性膜材料与疏水性膜材料,研发具有逆重力的自发定向导水织物,且织物的导水性可以通过紫外线照射进行调控;肖雅倩等^[9]综述泡沫技术、溶胶凝胶法、静电纺丝、聚合沉积等构造织物单面疏水性的方法,分析使用亲水整理剂等对织物单面进行亲水整理的方法,阐述以纺织品结构设计实现织物定向导湿性能的方式。然而,目前大部分研究主要关注纺织品厚度方向的导湿性能,对织物厚度方向与织物平面内液体传导性能的实现与控制研究较少。

因此,文中以针织物与机织物复合一次成型的双面结构织物为基材,采用3步等离子体法对双面结构织物的机织面进行单面疏水改性,实现织物针织面与机织面的非对称浸润,并借助液态水分管理测试系统定量表征织物在厚度方向和平面内的导湿性能,进而分析织物的热湿舒适性与触觉舒适性。

1 材料与方法

1.1 原料与设备

1.1.1 原料 以针织物与机织物复合的双面结构织物为基材,通过将针织横机与剑杆织机进行组合设计,实现一次织造完成针织与机织结构的复合,其结构如图1所示。双面结构织物的机织面经纱为56 tex 涤纶纯纺纱,纬纱为65 tex 的35%腈纶和65%羊毛混纺纱,机织面的经纬密均为220根/dm;双面结构织物的针织面也采用65 tex 的35%腈纶和65%羊毛混纺纱,针织线圈横密为32根/dm,线圈长度为11 mm^[10],采用搭建的针织横机和剑杆织机组合织机自织而成。等离子体处理的前驱气体有氩气(纯度99.9%)、氧气(纯度99.9%)以及六甲基二硅醚(HMDSO,纯度99.5%)蒸汽,药品均购于西格玛奥德里奇有限公司。

1.1.2 设备 KSV CAM 200 接触角测试仪,芬兰KSV公司制造;MMT 液态水分管理测试系统,美国阿特拉斯仪器公司制造;Quanta-250 型扫描电子显微镜,FEI(捷克)公司制造;CHES-FY 纺织品风格测试系统,东华大学和南通宏大实验仪器有限公司联合开发。等离子体处理装置主要由等离子体处

理腔体、静电屏蔽罩、天线、真空泵和射频发生器等部分组成。

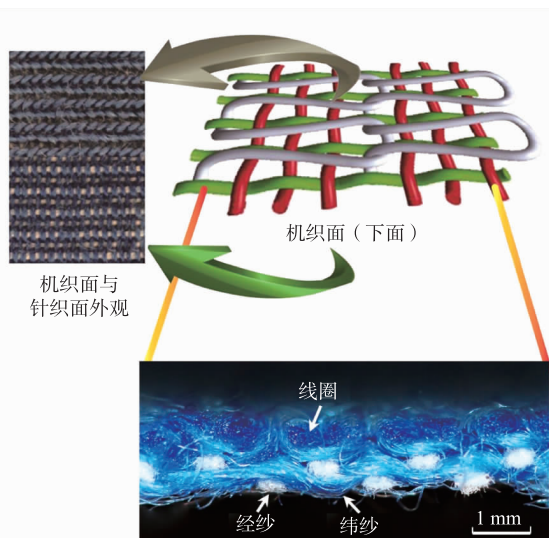


图1 针织物与机织物复合的双面结构织物结构及织物横截面

Fig. 1 Fabric structure and cross section of knitted and woven com-structured fabrics

1.2 等离子体处理方法

织物试样采用3步等离子体法进行表面改性。文献[11-12]详细介绍了其工作原理。等离子体处理实验中,织物试样的处理面朝上放置于试样台上,通过射频发生器产生等离子体,采用真空泵抽真空至低于0.1 Pa。具体步骤为:①通入氩气至气压为2.8 Pa,并在100 W功率下采用连续放电状态下的氩等离子体对机织面进行2 min的刻蚀处理,实现机织面的清洁与活化;②在功率100 W、气压3.5 Pa条件下,以20%工作周期的间断式氧等离子体处理机织面,持续时间为2 min,在活化的机织面引入含氧官能团;③通入HMDSO蒸汽作为前驱体,工作条件为功率100 W、10%工作周期的间断式HMDSO等离子体处理,在10 Pa压力下对织物进行等离子体聚合沉积处理。间断式等离子体的工作周期为

$$t = t_{\text{on}} / (t_{\text{on}} + t_{\text{off}}) \quad (1)$$

其中: t 为间断式等离子体工作周期; t_{on} 和 t_{off} 分别为等离子体工作和停止工作两个状态的持续时间。

1.3 测试方法

1.3.1 接触角测试 等离子体处理后的织物均在标准条件[温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(65 \pm 2)\%$]下平衡24 h以上。接触角(CA)和液态水分吸收时间使用接触角测试仪进行测量。

1.3.2 导水性测试 通过液态水分管理测试系统,并参照AATCC 195—2011标准对织物液态水分

传导性能进行测量。

1.3.3 表面形貌观察 织物试样经干燥和喷金处理后,使用扫描电子显微镜对经3步等离子体法处理前后的织物形貌进行观察。

1.3.4 织物触觉舒适性评价 采用纺织品风格测试系统进行织物触觉舒适性评价^[13]。该测试系统通过一条抽拔力-位移曲线,实现织物弯曲、摩擦、拉伸等多项性能的综合评价,并表征织物硬挺程度,进行织物硬挺触觉舒适性评价。

1.3.5 织物热湿舒适性评价 采用主观评级法对织物热湿舒适性进行评价。选取6位纺织专业研究生分别对等离子体处理前后由双面结构织物缝制的手套进行穿戴评价。评价者在温度(25±2)℃、相对湿度(65±3)%的环境下,对穿戴0.5 h后的手套热湿舒适性进行独立评级。热湿舒适性分为5个等级,其中1~5级分别代表不舒适、较差、中等、良好、极好。取6位评价者的平均评级结果作为最终的热湿舒适性等级。

2 结果与讨论

2.1 织物非对称浸润性与微观形貌分析

图2为5 μL液态水在织物表面浸润铺展的时间曲线和HMDSO等离子体在织物表面不同聚合沉积处理时间下的接触角。

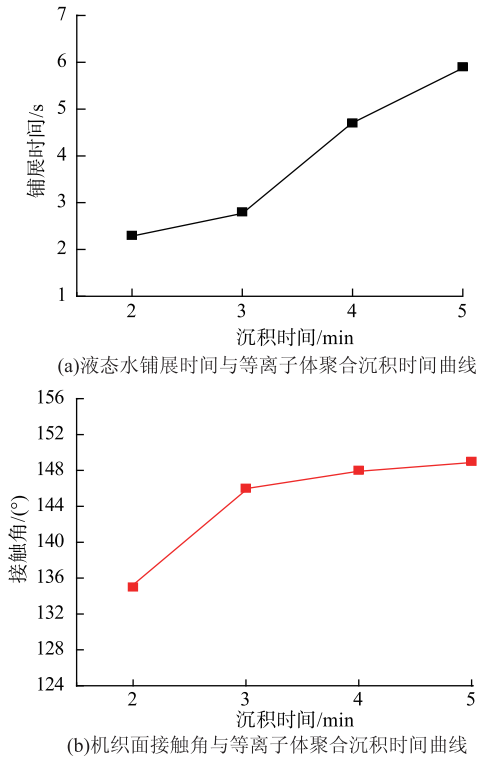


图2 双面结构织物亲水面与疏水面的浸润性能
Fig.2 Wettability of the hydrophilic and hydrophobic surfaces of com-structured fabrics

由图2可知,当聚合沉积处理时间超过3 min时,接触角变化很小,而水滴的浸润铺展时间却显著增长,这可能是由于处理时间过长后,HMDSO等离子体过多地渗透织物,并附着于背面的针织层表面。因此最优聚合沉积处理时间为3 min。

图3为双面结构织物的非对称浸润性表面及其微观形貌。图3(a)为经3 min HMDSO等离子体聚合沉积处理后,织物非对称的吸湿浸润性示意,可知在经3步等离子体法处理后,织物的处理面(机织面)显示较好的疏水性,而针织面展现较好的亲水性。图3(b)和图3(c)分别展示未经等离子体聚合沉积表面与经等离子体聚合沉积表面的纤维外观形貌。可以清楚地看到,等离子聚合沉积面的织物纤维上附着了HMDSO颗粒,而另一面的纤维表面光洁。因此采用3步等离子体法处理时,通过合理控制处理参数,可实现非对称浸润性织物的表面改性。

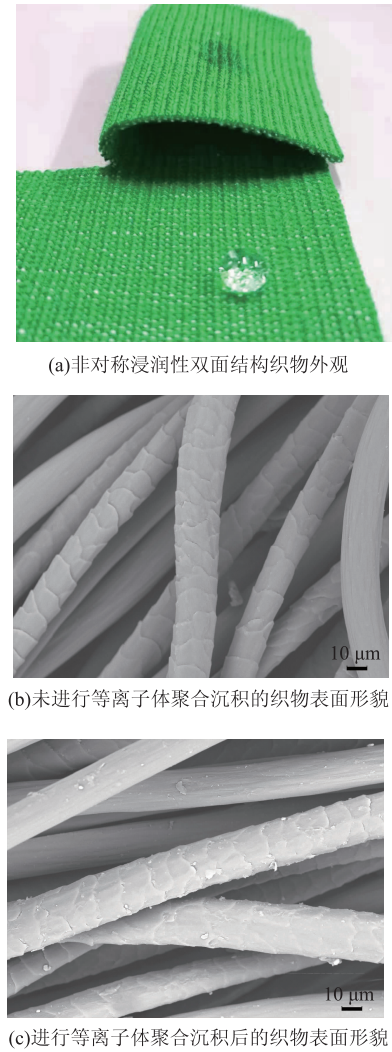


图3 双面结构织物的非对称浸润性表面及其微观形貌
Fig.3 Asymmetrical wetting surfaces and its micro-morphology of the com-structured fabrics

2.2 处理后的双面结构织物导湿性能解析

2.2.1 织物含水量测试曲线分析 图 4 为液态水分管理测试系统给出的典型织物含水量曲线。

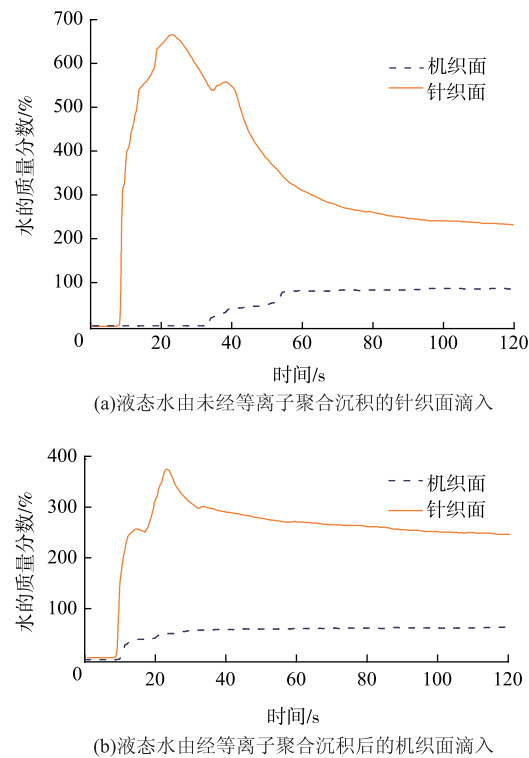


图 4 液态水分管理测试系统所测的双面结构织物典型含水量与时间关系曲线

Fig. 4 Typical water content and time curves of com-structured fabrics measured by liquid water management test system

由图 4(a)可知,水滴在针织面迅速被吸收,针

织面含水量在0~10 s内增长至接近 700%,而机织面的含水量变化缓慢,直到 30 s 后才开始缓慢上升至接近 100%并保持相对稳定。由图 4(b)可知,当水滴从表面经过等离子聚合沉积的机织面滴入时,水透过机织面并优先被针织面吸收,针织面含水量迅速升高至接近 400%,然后缓慢降低到 300%左右;而机织面含水量仍缓慢上升,最终维持在小于 100%的位置。总体来看,未经等离子体聚合沉积处理的针织面更容易吸水,无论水滴是从机织面还是针织面滴到织物上;而经等离子体聚合沉积处理的机织面含水量相对较低,且增加缓慢,最高含水量均低于 100%。这一方面是由于针织物的线圈结构有更多的空间容纳液态水,另一方面等离子体的单面聚合沉积造成织物非对称的亲疏水性,使得液态水由疏水的机织面向亲水的针织面扩散更加容易,而拉普拉斯力的作用导致由亲水面向疏水面扩散变得困难。因此,经 3 步等离子体法处理后的双面结构织物展现出明显的定向导水性能。

2.2.2 导水性测试指标对比分析 为了定量分析织物的定向导水性能,在液态水分管理测试系统引入了系列指标,包括浸润时间(WT)、最大吸湿速率(MAR)、铺展速度(SS)和液态水传导综合指数(OWTC)等,指标的具体含义见文献[14]。为了对比分析双面结构织物厚度方向与平面内在液态水传递时的典型特征,分别测试了双面结构织物以及

与双面结构织物的针织面和机织面同结构参数的传统机织物和针织物的液态水传导性能指标,测试结果见表 1。

表 1 织物经等离子体处理后的液态水传递指标测试结果

Tab. 1 Test results of liquid water transfer indices of fabrics after plasma treatment

织 物	测试方式	表 面	浸润时间/s	最大吸湿速率/ (%/s)	铺展速度/(mm/s)	液态水传导 综合指数
双面结构织物	机织面朝上	机织面	12	7	0.7	115
		针织面	8	32	1.3	
	针织面朝上	机织面	33	8	0.2	-289
		针织面	7	42	0.8	
机织物	处理面朝上	处理面	8	11	2.8	103
		未处理面	3	22	5.1	
	处理面朝下	处理面	6	13	4.2	-101
		未处理面	3	25	4.7	
针织物	处理面朝上	处理面	8	4	2.0	95
		未处理面	3	17	3.9	
	处理面朝下	处理面	7	3	0.7	-106
		未处理面	3	18	4.0	

由表 1 可以看出,经等离子体处理后的双面结构织物机织面的浸润时间显著高于针织面,也高于

经过等离子体单面处理的传统机织物和针织物,且当从双面结构织物的针织面滴入液态水时,机织面

的浸润时间高达 33 s,这是处理后的双面结构织物非对称浸润性和针织面线圈结构优异储水能力的综合效果。

对比传统针织物和机织物可以看出,无论处理面还是未处理面,机织物都体现了更快的最大吸湿速率和铺展速度,即机织物具有更强的液态水传导能力。这是因为机织物的经纬纱交织结构有利于液态水沿着经纱和纬纱方向进行纵向和横向传导,而针织物的线圈结构使得液态水更容易被吸收和容纳。因此,双面结构织物同时具有针织与机织结构,可使机织面和针织面实现水传导和水吸收的差异性,保证亲水针织面织物可以最大程度吸收水分,不会反渗透到疏水机织面;而机织面良好的水分传导能力又能促进液态水平面内的快速铺展和传导,保证表面干燥,也有利于水分在亲水面被吸收。这进一步验证了双面结构织物采用针织面作为亲水面进行液态水吸收,同时以机织面作为疏水面进行液态水传导的可行性。

由表 1 可知,传统机织物和针织物的液态水传导综合指数相对较低;而当液态水从机织面滴入到双面结构织物时,其液态水传导综合指数为 115,从针织面滴入时,其液态水传导综合指数为 -289。这表明液态水倾向于从机织面传递到针织面,而反向传导比较困难。处理后的双面结构织物中的厚度方向定向传导性与平面内铺展传导性机制如图 5 所示。由图 5 可知,液态水从针织面滴入时难以透过针织面进入机织面,而是在针织面和针-机织界面铺展开,但从机织面滴入时会透过机织面被针织面吸收。因此,将机织面作为服装的贴肤面穿着,有利于汗液沿着机织面铺展并迅速向针织面传递,从而快速排出;反之若是将针织面贴肤穿着,容易造成水分的集聚,带给穿着者潮湿闷热的的不舒适感。

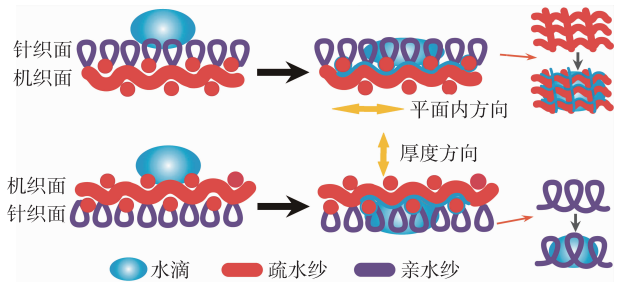


图 5 液体水在 3 步等离子体处理后的双面结构织物中厚度方向与织物平面内的传导机理

Fig. 5 Transmission mechanism of liquid water in thickness direction and in-plane conduction of com-structured fabrics after the three-step plasma treatment

2.3 织物触觉舒适性与热湿舒适性分析

图 6 为采用纺织品风格测试系统对织物进行触感测试形成的曲线。曲线中可以提取包括最大弯曲力、弯曲功、弯曲斜率、平均摩擦力、拉伸斜率等曲线参数,并通过公式计算织物的硬挺触感值,从而评价织物触觉舒适性^[15]。织物的硬挺触感值以及 6 位主观评价者所给出的平均热湿舒适性等级见表 2。

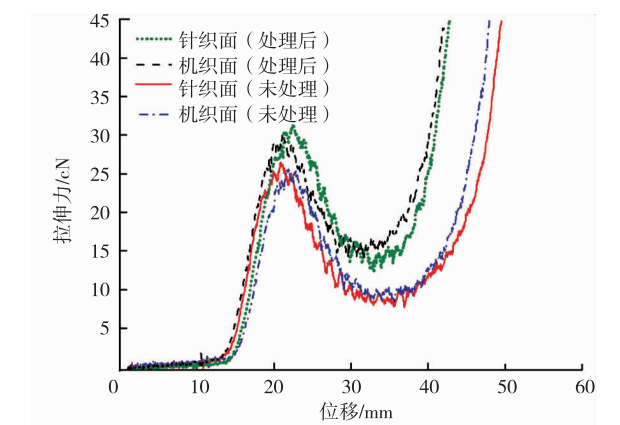


图 6 纺织品风格测试系统所测双面结构织物处理前后的抽拔力-位移曲线

Fig. 6 Pulling-out force-displacement curves of com-structured fabrics before and after treatment by the comprehensive handle evaluation system for fabrics and yarns

表 2 等离子体处理前后的织物触感值与热湿舒适性平均评级结果

Tab. 2 Tactile values and average evaluation results of thermal-wet comfort of the fabrics before and after plasma treatment

织 物	硬挺触感值		热湿舒适性		处理后舒适性提升率/%	
	处理前	处理后	处理前	处理后	硬挺触感值	热湿舒适性
针织面	1.90	2.20	3.70	1.80	16	-51
机织面	1.80	2.00	3.50	4.70	11	34

对比等离子体处理前后织物的触感值可知,3 步等离子体法对织物的触感影响较小,原因可能是经 3 步等离子体法处理时,虽然氩等离子对织物表面纤维产生刻蚀作用,但 HMDSO 的聚合沉积可能部分修复了纤维表面因刻蚀产生的缺陷,因此,织物总体硬挺触感略有增加,针织面的硬挺手感值增加约 16%,机织面增加约 11%。当将机织面作为贴肤面穿戴时,经等离子体处理后的织物手套热湿舒适性有了明显提升,等级从 3.50 变为 4.70,评级提高 34%;当将针织面贴肤穿着时,织物的热湿舒适

性评价结果明显降低。这主要是因为当针织面贴肤时,由于汗液无法从针织面传导到机织面,使得汗液积聚在手套内,引起闷热潮湿感。总体来看,经3步等离子体法处理后的织物触感值变化不明显,而热湿舒适性有了明显提升。因此,该方法在研发吸湿快干、高舒适性等功能面料和智能化控温面料方面具有潜在的应用价值。

3 结 语

区别于常规的针织或机织纺织品,文中开发了具有厚度方向的定向导湿与平面内差异性液态水分传导性能的双面结构织物。实验证明,通过控制等离子体聚合沉积厚度,可以实现织物的非对称浸润性改性。双面结构织物的液态水分传导性能测试及其与传统机织物和针织物的导水性能对比结果,说明了双面结构织物的针织面具有优异的吸湿性和储水性,机织面沿着经纬纱方向具有较好的平面内水传导性能,这显示织物结构特征对其平面内差异性水传导性能的重要作用。采用纺织品风格测试系统结合主观评级法分别评价织物的触感值和热湿舒适性,表明经3步等离子体法处理后的织物触觉舒适性变化不大,硬挺触感值变化率控制在15%以内,但可以明显提升织物的热湿舒适性。因此,经等离子体处理的双面结构织物可实现具有厚度方向定向导湿与平面内差异性导水性能,在吸湿排汗、凉爽快干等功能化和智能化纺织服装领域具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨恩惠,沈海生,邱华. 机织物透气性研究进展[J]. 服装学报,2020,5(1):6-11.
YANG Enhui, SHEN Haisheng, QIU Hua. Research progress on air permeability of woven fabrics[J]. Journal of Clothing Research,2020,5(1):6-11. (in Chinese)
- [2] DAI X Q, IMAMURA R, LIU G L, et al. Effect of moisture transport on microclimate under T-shirts [J]. European Journal of Applied Physiology, 2008,104(2): 337-340.
- [3] 龙晶,沈兰萍,凌子超. 功能性吸湿导湿机织物的开发及性能研究[J]. 合成纤维, 2018, 47(11):32-34.
LONG Jing, SHEN Lanping, LING Zichao. Development and performance study of functional moisture absorption and moisture permeability woven fabrics[J]. Synthetic Fiber in China, 2018, 47(11): 32-34. (in Chinese)
- [4] 王韧,王科林,李腊梅. 吸湿速干毛纺机织面料的开发[J]. 毛纺科技, 2019, 47(1): 22-25.
WANG Ren, WANG Kelin, LI Lamei. Development of

worsted woven fabrics with moisture absorption and quick-drying properties [J]. Wool Textile Journal, 2019, 47 (1): 22-25. (in Chinese)

- [5] 陈晓艳,吴济宏. 梯级导湿针织面料的试制及导湿性能评价[J]. 针织工业, 2010(3): 55-57.
CHEN Xiaoyan, WU Jihong. The trial-manufacture of moisture transferring knitted fabric and the evaluation of its moisture transferring property[J]. Knitting Industries, 2010 (3): 55-57. (in Chinese)
- [6] UMAIR M, HUSSAIN T, SHAKER K, et al. Effect of woven fabric structure on the air permeability and moisture management properties [J]. Journal of the Textile Institute,2016,107 (5):596- 605.
- [7] WANG H, DING J, DAI L, et al. Directional water-transfer through fabrics induced by asymmetric wettability [J]. Journal of Materials Chemistry, 2010 (20): 7938-7940.
- [8] ZHOU H, WANG H, NIU H, et al. Superphobicity/philicity Janus fabrics with switchable, spontaneous, directional transport ability to water and oil fluids [J]. Scientific Reports, 2013(3):2964.
- [9] 肖雅倩,辛斌杰,陈卓明,等. 单向导湿纤维及织物的研究进展[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(4): 395- 402.
XIAO Yaqian, XIN Binjie, CHEN Zhuoming, et al. Review on the development of unidirectional water-transport fibers and fabrics[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017,38(4): 395- 402. (in Chinese)
- [10] ZHU L, NAEBE M, BLANCHONETTE I, et al. Moisture transfer properties of bifacial fabrics[J]. Textile Research Journal,2017,87(9):1096-1106.
- [11] DAI X J, CHEN Y, CHEN Z Q, et al. Controlled surface modification of boron nitride nanotubes[J]. Nanotechnology, 2011,22(24): 245301.
- [12] SUN F X, CHEN Z Q, ZHU L C, et al. Directional transplanar and different in-plane water transfer properties of composite structured bifacial fabrics modified by a facile three-step plasma treatment [J]. Coatings, 2017, 7 (8):132.
- [13] 孙丰鑫. 基于纺织品风格仪的机织物多重性能及硬挺度的建模与表征[D]. 上海:东华大学, 2017.
- [14] HU J Y, LI Y, YEUNG K W, et al. Moisture management tester: a method to characterize fabric liquid moisture management properties [J]. Textile Research Journal,2005,75(1):57- 62.
- [15] SUN F X, DU Z Q, ZHENG D M, et al. In-situ characterization of handle characteristics of suiting woven fabrics by a simultaneous measurement method [J]. Textile Research Journal,2019, 89(13): 2522-2531.

(责任编辑:沈天琦)