

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180303206

毛织物孔隙特征与透湿性关系

张文娟¹, 纪峰¹, 张瑞云¹, 赵晓杰^{1,2}, 王妮¹, 王俊丽³, 张建祥²

(1. 东华大学 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620; 2. 鲁泰纺织股份有限公司, 山东 淄博 255100;
3. 上海嘉麟杰纺织品股份有限公司, 上海 201504)

摘要 为探索毛织物的孔隙特征对其透湿性的作用机制, 建立毛织物孔隙特征与其透湿性的经验关系模型, 采用体积孔隙率、表面孔隙率和平均孔径分别从不同角度对毛织物的孔隙特征进行表征, 用湿阻表征织物透湿性; 分别测试了24种毛织物试样的孔隙指标和湿阻; 最后分别建立各孔隙特征指标与湿阻的多项式回归模型。得到的经验关系曲线表明: 3个织物孔隙特征指标分别与湿阻呈一定程度的非线性相关性, 且都呈先正相关后负相关的特征, 即湿阻在一定区域存在最高值; 当体积孔隙率为60%时湿阻进入最高值区域; 当表面孔隙率超过1.5%时, 其对湿阻的影响关系开始明显, 表面孔隙率在3%附近湿阻呈最高值; 当平均孔径在45 μm左右时, 湿阻到达最高区域。

关键词 毛织物; 透湿性; 孔隙特征; 湿阻

中图分类号: TS 101.9234 文献标志码: A

Study on relationship between capillary characteristics and moisture permeability of wool fabrics

ZHANG Wenjuan¹, JI Feng¹, ZHANG Ruiyun¹, ZHAO Xiaojie^{1,2}, WANG Ni¹,
WANG Junli³, ZHANG Jianxiang²

(1. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Luthai Textile Co., Ltd., Zibo, Shandong 255100, China; 3. Shanghai Challenge Textile Co., Ltd., Shanghai 201504, China)

Abstract In order to investigate on the influence mechanism of the capillary structure on moisture permeability of wool fabrics, empirical models describing the relationship between capillary characteristics and moisture permeability of wool fabrics were built. Three indices of volume porosity, surface porosity and the average pore size were adopted to describe capillary characteristics of wool fabrics from different aspects. And the index of wet resistance was used to represent the moisture permeability of fabrics. For twenty-four types of wool fabric samples, the capillary characteristic indices were measured as well as wet resistance. Finally, polynomial regression analysis was conducted between each capillary characteristic index and the wet resistance index. The obtained empirical relationship curves present similar tendencies. The indices of volume porosity, surface porosity and the average pore size present nonlinear correlations with wet resistance to a certain extent respectively. Along with the growth of each capillary index, the wet resistance first shows positive correlation and then negative correlation. That is, the wet resistance reaches a maximum value in certain regions. For the volume porosity-wet resistance relation curve, the wet resistance reaches maximum when the volume porosity is about 60%. The surface porosity-wet resistance relationship gets clear when surface porosity rises beyond 1.5%, and at about 3% of surface porosity, the wet resistance reaches maximum. Similarly, the wet resistance stops increasing as the average pore size arises to about 45 μm.

Keywords wool fabric; moisture permeability; capillary characteristic; wet resistance

收稿日期: 2018-03-15 修回日期: 2018-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0309200, 2017YFB0309100); 纺织面料技术教育部重点实验室开放课题基金项目(KLTST201609)

第一作者: 张文娟(1993—), 女, 硕士生。主要研究方向为纺织面料舒适性。

通信作者: 纪峰(1976—), 女, 副教授, 博士。主要研究方向为纺织材料性能测试、分析与仿真。E-mail: jifeng@dhu.edu.cn。

羊毛是一种天然的纺织纤维 具有许多优良特性, 随着人们生活水平提高, 对毛织物的湿舒适性需求也在提高。织物对隐式汗的通透能力影响其着装舒适性, 而织物对隐式汗的传输取决于其孔隙结构^[1]。

透气性、透湿性、导液性分别用于表示织物对空气、水蒸气和液态水的通过能力, 其作用机制、表征指标和测试方法各不相同。对于透气性能: 徐广标等^[2]在 23 种精纺毛型织物实验数据基础上, 探讨了织物孔隙分布的特征及孔隙与织物结构和透气性能的关系; 吴海军等^[3]探讨了毛织物孔隙分布的特征, 测试并定量分析了毛织物的孔隙与织物结构对透气性的影响。织物孔隙结构的差动效应往往用于分析其导液现象。范菲等^[4-5]认为孔径尺寸和孔径分布都对织物的芯吸速率起决定性作用, 并根据毛细差动原理分析了毛细孔分布与双层组合织物的芯吸性能的关系; 姚穆等^[6]提出了织物湿传导通道的 3 种形式, 指出了织物中透湿孔洞有多种多层次结构, 在湿传导过程中的表现和作用各不相同。YANILMAZ M 等^[7-8]研究了孔隙率、孔径分布和孔径大小对其芯吸性能的影响。对透气性和导液性的研究都涉及织物内部孔隙结构对气、液态流体的作用机制, 这对研究孔隙结构对织物透湿性的作用机制有参考作用。

早在 1985 年李毅等^[9]探讨了 5 种毛呢织物的厚度、填充率与其热湿舒适性表征指标的关系; 姚穆等^[10]研究了织物的透湿过程, 涉及了水蒸气在湿空气中的扩散及毛细管中水蒸气的蒸发的过程及理论方程; FANGUEIRO R 等^[11]研究了羊毛与聚酯型纤维混合纱线的导液性与干燥蒸发性能。LI Yi 等^[12-13]建立了关于羊毛织物热湿扩散的数学模型, 用于预测羊毛织物热、湿扩散性能。可以看到, 用于分析和预测透湿性的 2 类模型, 纯理论模型因做了较多理想化假设其分析结果往往与实际情形有差距, 而经验模型只能在有限范围内根据经验数据做出相对准确的预测。

织物内部孔隙情况(尺寸、分布等)对湿汽传输有相当的决定作用, 直接影响了湿舒适性。本文拟建立孔隙结构参数与湿阻的关系模型。采用体积孔隙率、表面孔隙率和平均孔径 3 个指标各从不同角度描述织物中孔隙情况, 使用回归分析方法分别建立了 3 个孔隙指标与湿阻的多项式回归关系经验模型。

1 实验部分

1.1 试样选择

本文选用由嘉麟杰纺织品股份有限公司、江苏

阳光集团提供的 24 块羊毛织物试样, 包括 14 块机织面料, 10 块针织面料。织物基本结构参数如表 1 所示。

表 1 织物结构参数

Tab.1 Structural parameters of fabric samples

试样编号	试样组织	厚度/ mm	面密度/ (g·m ⁻²)	经纬密度/ (根·(10 cm) ⁻¹)	
				经密	纬密
1	$\frac{2}{2}$ 山形斜纹	0.69	233.21	267	197
2	双层接结	0.44	210.87	455	420
3	$\frac{2}{2}$ 右斜	0.31	167.87	383	366
4	$\frac{5}{4}$ 纬面缎纹	0.38	202.34	367	367
5	$\frac{2}{2}$ 左斜纹	0.35	177.49	363	379
6	平纹	0.43	216.63	467	368
7	$\frac{1}{2}$ 右斜纹	0.48	224.74	307	284
8	$\frac{2}{2}$ 左斜纹	0.35	181.24	189	200
9	37 tex $\frac{2}{2}$ 右斜	0.41	194.56	281	355
10	29 tex×2 纬平针	0.98	278.67	94	116
11	29 tex×2 纬平针	0.65	200.70	148	160
12	20 tex×2 纬平针	0.91	258.64	120	150
13	1+1 罗纹	0.82	182.52	114	148
14	14 tex×2 纬平针	0.67	184.58	132	182
15	小提花	0.77	217.07	146	132
16	28 tex 纬平针	0.64	187.03	148	158
17	17 tex 纬平针	0.54	145.19	184	194
18	17 tex×2 纬平针	0.68	207.77	132	131
19	绉组织	0.69	231.67	315	265
20	小提花组织	0.39	186.46	435	410
21	重组织	0.58	233.32	200	195
22	方格组织	0.37	172.38	370	390
23	斜纹	0.30	149.58	465	350
24	27 tex×2 纬平针	0.60	232.50	126	111

1.2 实验设计

1.2.1 孔隙率及平均孔径测试

本文采用体积孔隙率^[14-15]、表面孔隙率和平均孔径 3 个指标表征织物内部孔隙特征。

体积孔隙率是指织物中的孔隙体积对其总体积的比值, 是衡量织物内部孔隙量的指标。体积孔隙率计算公式如式(1)~(3)所示。

$$\varepsilon_v = \frac{V_f - V_y}{V_f} \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta_y = \frac{K_d^2 T_1}{1\ 000 d^2} = \frac{1.13^2 T_1}{1\ 000 d^2} \quad (2)$$

$$V_y = \frac{G}{\delta_y} \quad (3)$$

式中: ε_v 为织物的体积孔隙率, %; V_f 为织物的外观

体积,包括织物外轮廓全部体积, cm^3 ; V_y 为纱线体积, cm^3 ; δ_y 为纱线的体积密度, g/cm^3 ; K_d 为毛纱线直径系数,这里取 1.13; T_l 为纱线的线密度, tex ; d 为纱线的直径, mm ; G 为调湿后的质量,一般指公定回潮条件下的数值, g 。

表面孔隙率是指织物朝大气一侧孔隙的面积占总面积的百分比,采用计算机图形处理法计算得到表面孔隙率。本文用 MatLab 软件对织物表面图像进行二值化处理,如图 1 所示。在二值化图像中白色像素区表示织物中被纱线占据的区域,黑色像素区则表示孔隙区域。表面孔隙率计算公式见式(4) 表面孔隙率值越大,表示织物大气一侧孔面积所占比值越大。

$$\varepsilon_s = \frac{\Phi_u}{\Phi_a} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ε_s 为织物的表面积孔隙率,%; Φ_u 为织物表面黑色像素点个数; Φ_a 为织物表面像素点个数。

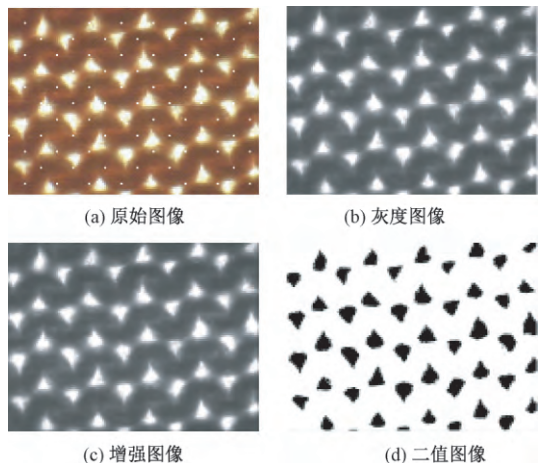


图 1 Matlab 图像处理

Fig.1 MatLab image processing. (a) Original image; (b) Grayscale image; (c) Enhanced image; (d) Binarized image

织物表面孔隙率侧重反映织物外表面的孔隙量。体积孔隙率则表征了织物结构体内部的孔隙体积百分含量。表面孔隙率提取时剔除了表面封闭假孔隙区域,而体积孔隙率计算中包含了由于纱线滑移等原因造成的封闭孔隙,因此采用的 2 种孔隙率分别反映了织物外侧和内部孔隙的含量。

平均孔径指织物内部所有孔隙当量直径的平均值,表示孔径的平均尺寸。采用 CFP-1100AI 型多功能孔径仪测量织物孔径。通过测量样品受到的瞬时压力和流经样品孔隙的气体或液体流量,可获得压力—流量的变化曲线。根据 ASTM 标准计算出平均孔径指标,主要依据公式见式(5) [3]。

$$D = 4\gamma \cos\theta / P \quad (5)$$

式中: D 为孔隙的当量直径, μm ; γ 为液体的表面张力, mN/m ; θ 为接触角, $^\circ$; P 为压差, Pa 。

1.2.2 透湿性测试

湿阻是纺织品处于稳定的水蒸气压力梯度的条件下通过一定面积的蒸发热流量,反映隐式汗透过织物的能力。湿阻值越小,表示湿汽透过能力越强,合适的湿阻值使人体感觉舒适。

实验选用 YG606 型热阻湿阻测试仪模拟人体皮肤散发出隐式汗从而测试服装面料对汽态(隐式汗)通过的阻力(湿阻)。实验按照 GB/T 11048—2008《纺织品 生理舒适性 稳态条件下热阻和湿阻的测定(蒸发热板法)》进行。采用式(6)计算湿阻。

$$R_{et} = \frac{(P_m - P_a)A}{H - \Delta H_e} - R_{eto} \quad (6)$$

式中: R_{et} 为织物的湿阻, $\text{m}^2 \cdot \text{Pa}/\text{W}$; P_m 为饱和水蒸气压力, Pa ; P_a 为指水蒸气压力, Pa ; A 为试验板的面积, m^2 ; H 为提供给测试面板的加热功率, W ; ΔH_e 为湿阻 R_{et} 测定中加热功率的修正量; R_{eto} 为测定湿阻而确定的仪器常数, $\text{m}^2 \cdot \text{Pa}/\text{W}$ 。

2 实验结果

24 份纯毛织物试样的孔隙率、平均孔径及湿阻结果见表 2。

表 2 织物试样测试数据

Tab.2 Test data of fabric samples

试样编号	表面孔隙率/%	体积孔隙率/%	平均孔径/ μm	湿阻/ $(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{W}^{-1})$
1	0.81	56.42	24.79	4.25
2	0.67	38.54	18.47	2.67
3	0.16	31.37	14.81	2.27
4	0.04	31.59	16.89	2.83
5	0.06	34.97	17.42	3.00
6	0.32	35.24	12.76	3.30
7	0.45	39.83	20.18	3.70
8	0.46	34.51	11.42	2.53
9	0.03	39.14	14.75	2.90
10	6.42	63.57	44.90	4.13
11	6.22	60.40	29.79	4.20
12	2.66	63.38	40.46	4.34
13	2.45	71.37	55.79	4.13
14	7.40	64.57	70.16	4.10
15	3.00	63.74	40.11	4.45
16	4.16	62.64	35.54	4.35
17	5.58	65.32	52.33	4.31
18	4.00	61.00	58.84	4.47
19	2.57	57.21	52.94	4.23
20	0.59	39.34	18.06	2.87
21	1.25	48.72	56.55	3.95
22	0.37	40.25	12.59	3.56
23	0.14	37.00	11.04	2.99
24	3.45	50.31	61.04	3.99

通过实验数据观察到,机织物的表面孔隙率—

般低于针织物。在机织物中,以试样 9、23 为代表的斜纹组织,其经纬组织密度较高,即使在纱线线密度较小的情况下,其外表面组织结构相对致密,使表面孔隙率显著较小。在针织物中,以试样 14 为代表的纬平针组织,因纵、横向组织结构疏松,使其表面孔隙率、体积孔隙率和平均孔径都显著较大。

表 2 中数据同时表明,表面孔隙率、体积孔隙率和平均孔径之间的相关性不明显,在上述试样中,表面孔隙率相对最小的试样,如试样 4、5、9,其体积孔隙率和平均孔径并不是显著小的。

3 织物孔隙透湿性回归模型的建立

本文采用一元多项式回归分析建立织物孔隙特征与其透湿性的经验相关模型,该方法是研究 1 个因变量与 1 个或多个自变量间多项式的回归分析方法,其显著特点是可通过增加自变量的高次项对实测点进行尽可能地逼近。

3.1 体积孔隙率与湿阻的回归模型

具体地,首先采用表 2 中的体积孔隙率与湿阻的实验数据,通过 SPSS 软件进行毛织物体积孔隙率与湿阻的一元高次函数的回归分析见式(7),并拟合出二者的关系曲线图,如图 2 所示。

$$y = -2.85 \times 10^{-5}x^3 + 2.61 \times 10^{-3}x^2 + 7.63 \times 10^{-3}x + 0.60 \quad (7)$$

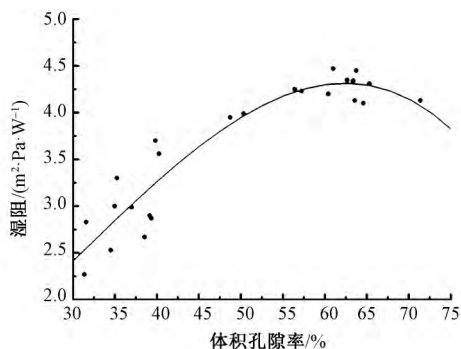


图 2 织物体积孔隙率与湿阻的关系曲线

Fig.2 Relationship between fabric volume porosity and wet resistance

该方程的判定系数 $R^2 = 0.87$, R^2 越接近 1 表示模型的拟合效果越好。

表 3 示出方差分析,对回归关系进行 F 检验。

表 3 方差分析表

Tab.3 Variance analysis

项目	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
回归	10.24	2	5.12	82.88	0.00
残差	1.30	21	0.06		
总计	11.54	23			

由自由度为 2 和 21,查 F 值得 $F = 82.88 > F_{0.05}(2, 21) = 3.47$,表明该回归关系显著。

根据图 2 所示数据变化趋势大致划分 2 个阶段:第 1 阶段,体积孔隙率增大湿阻随之明显增大;第 2 阶段,湿阻达到一定峰值区域,此后体积孔隙率增大湿阻不再随之明显增加。

第 1 阶段:体积孔隙率范围在 30%~60%之间时,随着体积孔隙率上升,湿阻呈现上升趋势。说明此范围织物内部的孔隙含量对湿气传输的影响作用不占主导,织物两侧湿气的传导在更高程度上受孔隙的形状和分布状态的影响。

第 2 阶段:当体积孔隙率超过 60%左右时,织物两侧的空气更容易通过显著增大的孔隙进出孔隙,两侧湿气能够在微孔区域内以对流的形式参与交换,令湿阻不再继续增大。

从体积孔隙率与湿阻的关系曲线中可以看出,在符合其他服用条件的情况下,可根据服用舒适性需求设计合适的体积孔隙率。若用于户外的运动服装则选择体积孔隙率为 $(40 \pm 10)\%$ 且厚度值在 0.30~0.48 mm 范围,此范围内湿阻在 4.0 以下且体积孔隙率对湿阻的影响较显著,在可设计的范围。

3.2 表面孔隙率与湿阻的回归模型

由 MatLab 图像处理测得的表面孔隙率为自变量,湿阻为因变量,采用 SPSS 软件分析得到图 3 所示的关系曲线。织物表面孔隙率与湿阻之间的回归方程为式(8),方程拟合度判定系数 $R^2 = 0.75$,模型拟合效果较好。

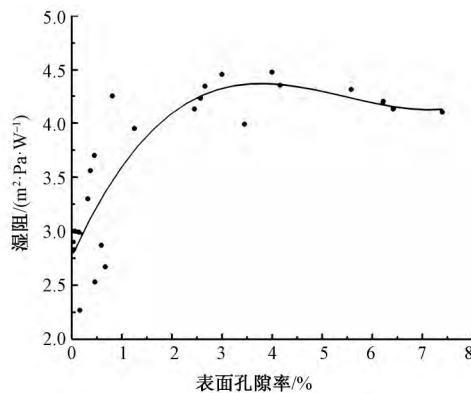


图 3 织物表面孔隙率与湿阻的关系曲线

Fig.3 Relation between fabric surface porosity and wet resistance

$$y = 1.3 \times 10^{-2}x^3 - 0.21x^2 + 1.03x + 2.77 \quad (8)$$

由自由度为 3 和 20,查 F 值得 $F = 19.52 > F_{0.05}(3, 20) = 3.10$,表明该回归关系显著。

从图 3 可知,当表面孔隙率在 0%~3% 范围内时,8 块机织物和 3 块针织物的湿阻随着表面孔隙率增加而增大。表面孔隙率在 0%~1.5% 范围内

时, 湿阻值比较离散, 一定程度上表明在这个范围内表面孔隙率对湿阻的预测失效, 说明应是其他因素起主要作用, 如毛织物紧密程度、织物表面或内部毛羽; 而当表面孔隙率大于 1.5% 时, 表面孔隙率对湿阻的预测能力显现, 当同样浓度的隐式汗接触织物表面时, 孔隙率相对小的织物在其表面液化会相对多一些, 传输到织物另一面的较少。

当表面孔隙率大于 3% 时, 随着表面孔隙率增加, 气体对流效应起主导作用, 湿气流通能力增大, 湿阻随表面孔隙率的增大呈缓慢下降趋势。

3.3 平均孔径与湿阻的回归模型

以 CFP-1100AI 型多功能孔径仪测量织物平均孔径值为自变量, 湿阻值为因变量建立的关系曲线如图 4 所示。织物平均孔径与湿阻的回归方程见式(9), 方程的判定系数 $R^2 = 0.74$, 模型的拟合效果较好。

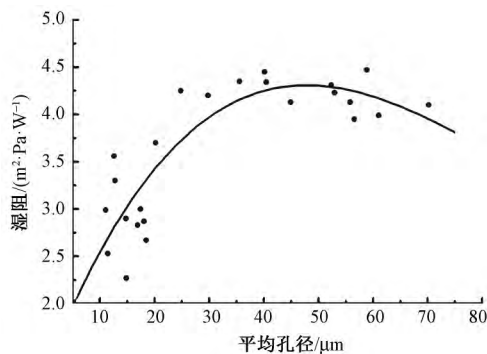


图 4 平均孔径与湿阻的关系曲线

Fig.4 Relation between average pore size and wet resistance

$$y = 8.59 \times 10^{-6} x^3 - 2 \times 10^{-3} x^2 + 0.15x + 1.30 \quad (9)$$

由自由度为 3 和 20, 查 F 值得 $F = 18.99 > F_{0.05}(3, 20) = 3.10$, 表明该回归关系显著。

从图 4 可知, 当平均孔径在 10~45 μm 之间时, 随着平均孔径增大, 湿阻呈现上升趋势, 这与隐式汗在织物内部可能发生液化有关, 液体传导依靠毛细孔径, 而织物孔径增大会导致毛细管减小。除此之外, 孔径较大的织物其内部发生液化的程度也大, 透过织物的湿气量减少。当平均孔径大于 45 μm 时, 这时对流现象开始变得明显, 接触阻碍等相对变弱, 表现为随着平均孔径增大, 湿阻降低。

4 结 论

1) 分别对体积孔隙率、表面孔隙率、平均孔径与湿阻的关系进行统计分析建立经验回归模型,

3 个多项式模型总体呈现先上升后下降的趋势。

2) 对于本文选用的试样, 在体积孔隙率与湿阻的回归模型中, 体积孔隙率在达到 60% 时出现拐点; 表面孔隙率与湿阻的回归模型中, 表面孔隙率在 3% 左右时出现拐点; 平均孔径与湿阻的回归模型中, 平均孔径在 45 μm 左右时出现拐点。

3) 当表面孔隙率在 0%~1.5% 范围内时, 湿阻值比较离散, 一定程度上表明在这个范围内表面孔隙率对湿阻的预测失效, 说明在该范围内表面孔隙率对湿阻的影响不是主导因素; 当表面孔隙率大于 1.5% 时, 通过表面孔隙率对湿阻的预测效果开始显现。

FZXB

参考文献:

- [1] DAS A, YADAW S S. Study on moisture vapor transmission characteristics of woven fabrics from cotton-acrylic bulked yarns [J]. Journal of the Textile Institute Proceedings & Abstracts 2013, 104(3): 322-329.
- [2] 徐广标, 邱茂伟, 王府梅. 精纺毛织物的孔隙与结构及透气性的关系 [J]. 毛纺科技, 2005, 33(4): 14-17.
XU Guangbiao, QIU Maowei, WANG Fumei. The relationship between porosity and structure and air permeability of worsted wool fabric [J]. Wool Textile Journal, 2005, 33(4): 14-17.
- [3] 吴海军, 钱坤. 毛织物的孔隙与结构对其透气性的影响 [C] // 2006 中国国际毛纺织会议暨 IWTO 羊毛论坛论文集 (上册). 西安: 中国毛纺织行业协会, 2016: 241-244.
WU Haijun, QIAN Kun. Effects of pore and structure of wool fabric on its permeability [C] // 2006 China International Wool Textile Conference and IWTO Wool BBS on (I). Xi'an: China Wool Textile Industry Association, 2006: 241-244.
- [4] 范菲, 齐宏进. 织物孔径特性与织物结构及芯吸性能的关系 [J]. 纺织学报, 2007, 28(7): 38-41.
FAN Fei, QI Hongjin. Relationship between capillary properties and configurations and wicking capability of fabric [J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(7): 38-41.
- [5] 范菲, 齐宏进. 差动毛细效应与织物孔径特性的关系 [J]. 纺织导报, 2008(8): 90-92.
FAN Fei, QI Hongjin. Relationship between differential capillary effect and fabric aperture characteristics [J]. Textile Guide, 2008(8): 90-92.
- [6] 姚穆, 施楣梧, 蒋素婵. 织物湿传导理论与实际的研究: 第一报: 织物的湿传导过程与结构的研究 [J]. 西北纺织工学院学报, 2001, 15(2): 1-8.
YAO Mu, SHI Meiwu, JIANG Suchan. Fabric moisture theory and practical research: first report: the study of

