



# 棉织物热定形气流干燥性能影响因素分析及试验

向 忠, 赵哲炜, 钱 淼, 胡旭东

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 为研究热定形机的产品适应性, 搭建了织物热风射流干燥试验系统, 模拟了织物热定形气流干燥试验, 分析了气流方向、织物厚度和织物表面组织与材料对棉织物干燥性能的影响, 为提升热定形干燥速率和能耗利用率提供理论指导。结果表明: 随着气流喷射角度从  $90^\circ$  减小到  $65^\circ$ , 干燥速率逐渐降低而能源利用率先增后降; 在  $75^\circ \sim 80^\circ$  范围内进行气流干燥, 对棉织物热定形具有较优的干燥速率与能源利用率; 随着织物厚度增加, 热风干燥速率与能源利用率均降低, 可通过增加风嘴个数、减小热定形机各喷嘴之间的间距来提高较厚棉织物的热定形效率; 通过两面分别进行干燥时, 织物正反面组织与材料改变, 将造成同等条件下干燥速率上的差异, 在热定形时, 在上下风道可采用不同的气流参数来进行干燥, 以提升热定形效率。

**关键词:** 热定形; 织物干燥; 干燥速率; 能源利用率

**中图分类号:** TS103

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2019) 09-0560-06

## Analysis and experimental research on influencing factors of heat-setting airflow drying performance of cotton fabric

XIANG Zhong, ZHAO Zhewei, QIAN Miao, HU Xudong

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to study the product adaptability of heat-setting machine, a hot airflow drying test system of fabrics was built and then fabric drying tests were implemented for fabrics heat-setting. The effects of airflow direction, fabric thickness, fabric surface texture and material on drying performance of cotton fabric were studied to provide theoretical guidance for improving heat-setting drying rate and energy utilization rate. Results showed that by adjusting the airflow injection angle from  $90^\circ$  to  $65^\circ$ , the drying rate gradually reduced, but energy efficiency increased firstly and then decreased. When airflow direction was within the range from  $75^\circ$  to  $80^\circ$ , better drying rate and energy utilization rate would be achieved for heat-setting of cotton fabrics. With the increases of fabric thickness, both the hot air drying rate and energy utilization rate decreased. It is recommended to improve the heat-setting efficiency of thick cotton fabric by increasing the number of nozzles and reducing the spacing between nozzles of heat-setting machine. However, when the fabric consists of different texture and material on its both sides, it will cause the difference in drying rate during drying both sides under the same conditions. It is recommended that different airflow parameters may be used for the upper and lower air ducts for drying to improve heat-setting efficiency.

**Key words:** heat-setting; fabric drying; drying rate; energy utilization rate

收稿日期: 2019-01-21 网络出版日期: 2019-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1609205, 51605443); 浙江省重点研发计划项目(2018C01027)

作者简介: 向 忠(1982-), 男, 湖南岳阳人, 副教授, 博士, 主要从事纺织装备智能化、信息化、绿色化方面的研究。

## 0 引言

织物干燥贯穿于整个染整工艺链,是染整生产过程中能源消耗最大的环节。以印染热定形为例,在定形过程中用于织物干燥所消耗的能量占染整所需全部能量的30%以上<sup>[1]</sup>。定形干燥采用气体射流冲击实现,气流喷射参数与织物属性等共同影响和决定着织物干燥的效率<sup>[2]</sup>。然而在实际生产应用中,热定形工艺参数往往据人工经验来设定,无法满足干燥能量最优化的需求<sup>[3]</sup>。开展气流喷射参数和织物属性对热定形能耗影响规律的研究,为低功耗热定形工艺及设备的设计与开发提供可靠依据。

在已有研究中,对织物气流干燥的理论研究主要有两方面:一是从系统最优控制角度出发来实现干燥过程中的能耗最优化。如 Li<sup>[4]</sup>、任佳等<sup>[5]</sup>、周丽春等<sup>[6]</sup>,建立了适用于印染热定形过程的多参数数学模型,并以能量最优为目标进行了分析与计算;二是采用数值建模方法分析定形机局部机构对定形能耗和质量的影响,继而实现节能。如 Lee 等<sup>[7]</sup>、Nazir 等<sup>[8]</sup>、Etemoglu 等<sup>[9]</sup>分别分析了气体流速、温度、织物湿度等参数对织物干燥效率的影响,Yadav 等<sup>[10]</sup>提出了定形机结构优化方案与节能策略。

近年来,随着染整加工产品日趋小批量、多品种化,往往需要采用同一定形机加工同类材质、不同厚度和克重的织物,因此还需对热定形机产品适应性展开研究。针对气流流速、气流温度以及喷嘴直径形状等参数对织物干燥过程的影响已有大量研究<sup>[11-13]</sup>,但在织物厚度、定形机风道气流喷射方向等对织物干燥过程影响的研究尚未见报道。由于织物干燥所涉及参数变量较多,通过理论分析来建立织物干燥过程的数学模型非常困难,因此有必要先开展热定形产品适应性有关的试验研究。据此,本文以棉织物为对象,搭建织物干燥试验平台,分析气流喷射方向、织物厚度、织物组织等对其干燥过程的影响规律,为提升热定形能源利用效率及热定形机的设计提供理论指导。

## 1 试验系统

### 1.1 织物干燥试验系统建立

为了研究气流喷射参数、织物厚度等对织物干燥性能的影响,本文建立了如图1所示织物干燥试验平台,其主要由工业热风机(航林机电设备有限公司)、风道、角度可调式气流喷嘴和温度采集系统等组成。气流温度设定范围为0~130℃;气流速度调

定范围为0~20 m/s,采用法国 KIMO 公司型号为 MP210 的便携式风速测量仪测定。织物表面温度则采用杭州美盛科技公司 R60 面阵式红外热像仪测得。为保证试验过程中气流温度稳定,在风道外壁缠绕多层石棉保温材料来减少能量耗散。

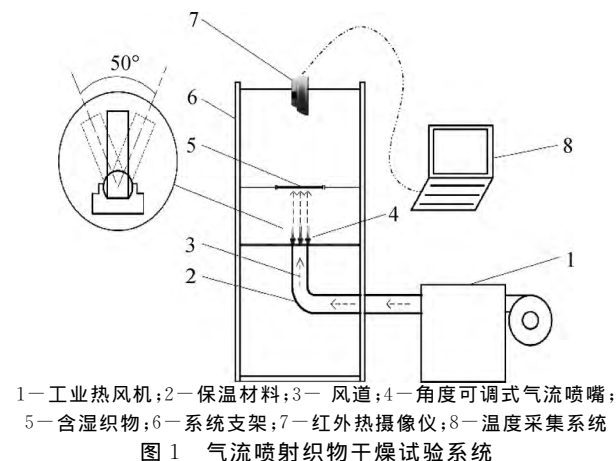


图1 气流喷射织物干燥试验系统

织物初始湿度的均匀性和稳定性是确保织物气流干燥特性结果准确性的必要条件。本试验采用如图2所示立式小轧车(亚博纺织机械有限公司)对织物进行处理,得到初始湿度分布均匀的织物。试验时,通过调节上轧辊两端调压阀的压力大小,即可获得初始湿度不一样的织物,而确保轧辊两侧压力的一致性,即可得到含水量均匀的样品。实际操作过程中,每个样品均3次通过轧车,确保得到初始湿度分布均匀且含水量一致的试验样品。



1—下轧辊;2—湿织物入口;3—上轧辊;4—压力表;5—加压气缸  
图2 立式小轧车照片

织物的初始干基含水率 $\omega$ 的计算公式如式(1)所示:

$$\omega/\% = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: $M_0$ 表示湿织物中绝对干料的质量,g; $M$ 表示湿织物的质量,g;各质量采用电子天平(精度为 $\pm 0.01$  g)测定。

### 1.2 试验材料与方案

#### 1.2.1 试验材料

本文所用试验材料如表1所示。

表1 织物规格参数表

试样编号	试样种类	克重/(g·m <sup>-2</sup> )	织物厚度/mm	层数	混纺比/%
1	梭织纯棉	420	1.00	单层	C100
2	梭织纯棉	170	0.40	单层	C100
3	梭织纯棉	110	0.25	单层	C100
4	梭织纯棉	80	0.20	单层	C100
5	粘棉	360	0.70	双层	R60/C40
6	棉地毯	1500	4.00	双层	—

注:本试验所用的织物面积均为20 cm×20 cm,混纺比中C为棉,R为黏胶纤维。

### 1.2.2 试验方案

为了研究气流喷射方向、织物厚度与组织对其干燥特性的影响,本文主要从以下三方面展开试验:

a) 气流方向对干燥速率及能源利用率的影响研究:以2号纯棉织物为对象,研究气流温度在110℃,气流流速为20 m/s,织物干基含水率为70%,环境温度为25℃时,气流方向与织物布面间夹角 $\theta$ 分别为65°、70°、75°、80°、85°和90°时的织物干燥速率与能源利用率。

b) 厚度对相同材质棉织物干燥能源利用率的影响研究:研究气流温度为110℃,气流流速为20 m/s,气流方向与布面垂直,环境温度为25℃时,相同单位面积含水质量情况下,织物厚度分别为0.20、0.25、0.40 mm和1.00 mm时的纯棉织物干燥能源利用率。

c) 表面组织及材料对织物干燥能源利用率的影响研究:研究气流温度为110℃不变,气流流速为20 m/s不变,织物干基含水率为70%,环境温度为25℃,气流方向垂直于布面时,织物正反面组织结构、材料存有差异时的干燥特性。

为提高实验结构的可靠性,上述各试验均重复3次后取平均值进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 气流方向对织物干燥的影响

#### 2.1.1 气流方向对织物干燥时间的影响

根据试验数据得到了织物中心点在不同气流方向下的干燥时间与温度关系曲线,如图3所示,气流温度选定为110℃,气流流速为20 m/s,织物干基含水率为70%。由图3可得出,随着 $\theta$ 的增大,织物干燥所用的时间减小。当 $\theta$ 为65°时,干燥时间为40 s;当 $\theta$ 为90°时,干燥时间为25 s。当 $\theta$ 从75°增加到90°时,干燥时间变化较小,不同 $\theta$ 的干燥时间相差在5秒之内;而当 $\theta$ 从65°增加到75°时,干燥时

间明显变长,稳态温度也明显变低。由此试验可得出织物干燥的气流喷射角度应在75°到90°之间较为适合。

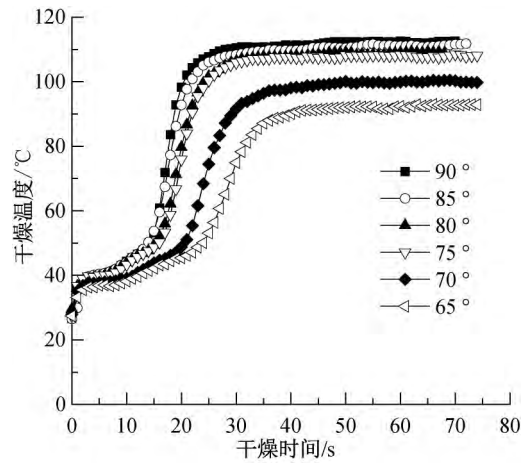


图3 不同气流方向下织物干燥的曲线

#### 2.1.2 气流方向对织物干燥面积的影响

为了进一步分析气流方向对织物干燥特性的影响,本文根据试验的结果得到织物在不同气流方向和一定干燥时间下的干燥面积。干燥面积越大,表明织物利用热风的能量越多。本试验选取的干燥进入稳定阶段后的织物表面温度云图,将温度云图导入至图像处理软件进行图像灰度化。由于织物在进入降速干燥阶段时已基本干燥完全,所以在图像处理时根据温度云图上颜色变化进行温度场分析,选取一定的阈值(根据进入降速干燥阶段点的温度值来区分是否完全干燥,根据温度颜色与分析大量实验数据,选取灰度阈值为119),从而导出图片中已干燥完成的区域,再进行不同气流方向干燥面积的大小对比。处理前后的图像如图4所示。通过使用图像处理软件计算出图中干燥面积的像素点数,从而得出了六种方向角度的干燥面积之比 $S_{65^\circ} : S_{70^\circ} : S_{75^\circ} : S_{80^\circ} : S_{85^\circ} : S_{90^\circ} = 0.61 : 0.81 : 1.07 : 1.02 : 1.01 : 1.00$ 。

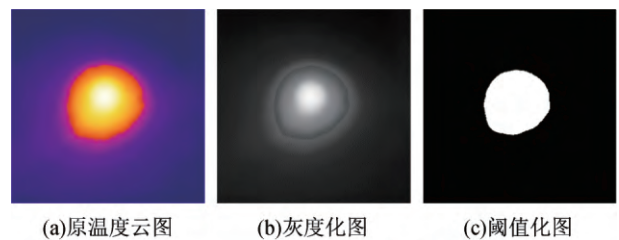


图4 气流角度为75°下织物干燥的面积图

由此可得,随着气流喷射角度 $\theta$ 的变小,织物表面的干燥面积在一定范围内会先增大后减小。当气流喷射角度为90°时,气流垂直于布面。根据射流

传热特点,布面中心干燥较快,而布中心以外区域干燥就较慢,使得布面干燥面积较小。随着气流喷射角度的减小,横向的气流热量慢慢增加,与布面的传热增加,干燥面积不断增大。当气流喷射角度为 $75^\circ$ 左右时,干燥面积处于最大。当气流喷射角度小于 $75^\circ$ 时,由于角度过于偏小,垂直方向的热量不足,导致干燥时间明显变长,而水平方向的热量也损耗太多,导致干燥面积明显变小。为了提高干燥效率,改变气流喷射角度是一个有效的措施。由上述试验可得出气流喷射方向角度范围为 $75^\circ \sim 80^\circ$ 时,棉织物干燥效率更高。

## 2.2 厚度对织物干燥性能影响

根据试验数据得到织物中心点在同种织物不同厚度条件下的干燥温度曲线,如图5所示。从图5中可以看出,随着织物厚度的增加,干燥时间随之增长。该结果表明在相等的织物含水质量和干燥环境条件下,织物厚度越厚,干燥时间就越长。

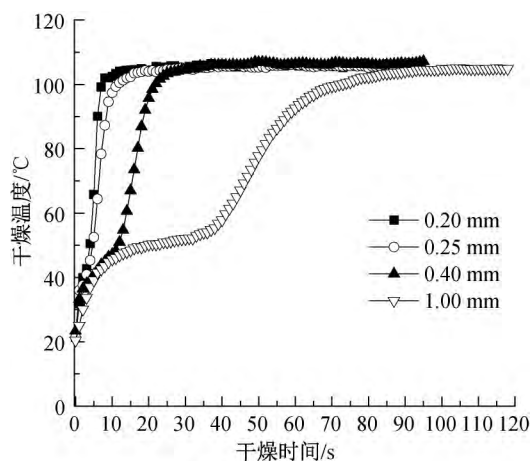


图5 不同厚度织物的干燥曲线

对以上四种不同厚度的棉织物干燥过程的能量消耗进行计算与分析,根据能量守恒定律,可得方程如式(2)所示:

$$Q_s = Q_w + Q_f + Q_l \quad (2)$$

其中: $Q_s$ 为外界所提供的总热量,kJ; $Q_w$ 为液态水蒸发所需要的热量,kJ; $Q_f$ 为织物本身吸收的热量,kJ; $Q_l$ 为损耗的热量,kJ。

外界所提供的总热量,可以根据气流喷嘴直径,气流温度、气流速度以及干燥总时间进行计算,方程如式(3)所示:

$$\begin{cases} Q_s = C_a * M_a * \Delta T \\ M_a = S_a * V_a * \rho_a \\ \Delta T = T_1 - T_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $C_a$ 为空气比热容: $1 \times 10^3$  kJ/(kg·°C); $M_a$ 为

气体总质量,kg; $\Delta T$ 为温度差,°C; $T_1$ 为气流温度, $110^\circ\text{C}$ ; $T_0$ 为环境温度, $25^\circ\text{C}$ ; $S_a$ 为喷嘴口面积, $\text{m}^2$ ; $V_a$ 为气流速度,m/s; $\rho_a$ 为空气密度,kg/ $\text{m}^3$ 。

蒸发的液态水所需要的热量,可以根据织物干燥前与干燥稳态时的质量变化进行计算,方程如式(4)所示:

$$\begin{cases} Q_w = \Delta M * H_w \\ \Delta M = M_1 - M_2 \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\Delta M$ 为织物干燥前后所蒸发水分的质量,kg; $M_1$ 为织物干燥前的质量,kg; $M_2$ 为织物干燥稳态时的质量,kg; $H_w$ 为水在0.1 MPa大气压 $100^\circ\text{C}$ 下的汽化潜热:2260 kJ/kg。

对织物温度表面云图进行温度区间划分,根据织物表面最高和最低温度,从 $25^\circ\text{C}$ 到 $110^\circ\text{C}$ 之间划分20个区间,并且根据温度区间占整个被测织物的百分比,可计算出织物内部的热量,方程如式(5)所示:

$$\begin{cases} Q_f = \sum_{i=1}^{20} Q_{fi} \\ Q_{fi} = C_f * M_{fi} * \Delta T_i \\ \Delta T_i = T_g - T_0 \\ M_{fi} = M_f * P_i \end{cases} \quad (5)$$

其中: $Q_{fi}$ 为*i*区间温度内的总热量,kJ; $C_f$ 为棉织物比热容:1.275 kJ/(kg·°C), $\Delta T_i$ 为*i*区间的温度差,°C; $T_g$ 为*i*区间内的平均温度,°C; $M_{fi}$ 为*i*区间内的织物质量,kg; $P_i$ 为*i*区间占织物总面积的比例。

表2为试验过程中不同厚度织物的水分参数,平均蒸发水分三次实验取平均值得到的蒸发水分,平均干燥时间为三次实验取平均值得到的干燥时间。根据表2数据与式(2)~式(5)可计算出织物的干燥热量的数据,如表3所示,其中能源利用率为(提供的总热量-损耗的热量)/提供的总热量。根据表3可得出不同厚度织物在达到干燥稳态的过程中能源利用率各不相同,棉织物越厚,其干燥能源利用率越低。此外,分析表2、表3还可知,四种棉织物的干燥时间比为8.750:3.125:2.500:1.000,而损耗热量比为18.280:5.920:4.300:1.000。这表明,同等试验环境下,热量损耗率与干燥时间不成正比,且越厚的织物干燥时所损耗的热量越多。这是由于随着织物变厚,织物内水分扩散阻力变小,而横向热阻变大所造成的。从热定形的干燥效率与能源优化考虑,在不改变风道的喷嘴总出风口面积的前提下,减小风道每个喷嘴出风口的间距,增加喷嘴出风口

的数量,提高热风与厚织物的对流传热效率,可有效提高厚织物干燥的能量利用率。

表2 织物试验平均数据

试样编号	织物干重/g	平均蒸发水分/g	平均干燥时间/s	总含水量/g
1	16.83	1.8	70	3
2	6.13	0.7	25	3
3	4.03	0.6	20	3
4	3.02	0.3	8	3

表3 织物干燥的热量分析数据

试样编号	提供的总热量/kJ	织物吸收的热量/kJ	水分蒸发所需热量/kJ	损耗的热量/kJ	能源利用率/%
1	7.70	0.085	4.068	3.547	53.9
2	2.75	0.019	1.582	1.149	58.2
3	2.20	0.013	1.356	0.831	62.2
4	0.88	0.008	0.678	0.194	77.9

### 2.3 表面组织及材料对织物干燥性能影响

对织物正反面具有不同表面组织及材料的织物进行干燥试验后得到的干燥温度曲线如图6和图7所示。图6所示为双面织物材料相同但组织不同的双层粘棉织物干燥曲线,图7所示为双面组织与材料均不同的双层地毯织物干燥曲线。

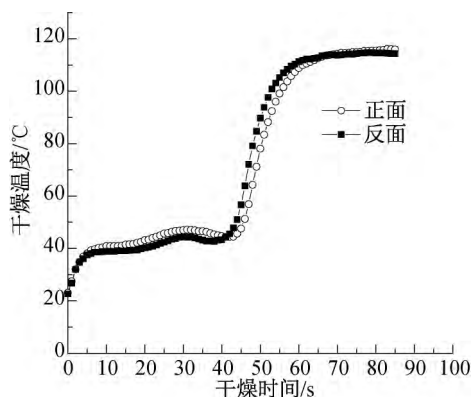


图6 双层粘棉织物正反面干燥曲线

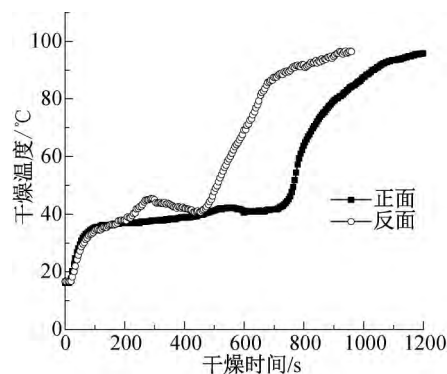


图7 双层地毯织物正、反面干燥曲线

由图6可得,双层粘棉织物的两条干燥曲线干燥完成的时间相同,由图7可得出,双层地毯织物两条干燥曲线干燥完成的时间不同,且两种织物在同一条曲线中都出现了两个恒速干燥阶段,并且在第二个恒速干燥阶段会有一个小幅度的降温阶段。这是由于该双层地毯织物由两种织物构成,两层织物之间存在一个不同于两层织物的液相扩散系数,导致织物的蒸发面蒸发到第二层织物表面时,织物内部的水分仍大于临界含水率,以至于表面温度有小幅度的降低,且干燥曲线进入第二个恒温干燥阶段。由图7还可以看出,双层地毯织物正、反面干燥时间明显不同。正面干燥完成时,反面早已完成干燥,这就导致了能量的浪费,因此,在热定形机上下风道采用不同的气流参数进行干燥,可提高双层地毯织物的干燥效率,降低能耗。

### 3 结 论

本文为了研究气流方向、织物厚度以及织物组织对织物干燥性能的影响规律,搭建了织物干燥试验系统,并且分析了对织物干燥速率与能源利用效率的影响规律,结果表明:

a) 气流方向对织物的干燥性能有着显著影响。随着气流喷射角度 $\theta$ 从 $90^\circ$ 减小到 $65^\circ$ ,干燥速率逐渐降低,而表面干燥面积在一定范围内会先增大后减小。且当气流喷射角度为 $75^\circ$ 时,同时具有较高的干燥速率与干燥效率。据此建议棉织物热定形机喷嘴出风口设计成 $75^\circ\sim 80^\circ$ 的喷射角度范围内,以此提高织物干燥速率与效率。

b) 由于织物横向热阻大于纵向热阻,在织物表面含水质量一致的情形下,随织物厚度增加,织物内水分横向扩散系数降低,造成热风干燥速率与干燥过程能源利用效率降低。据此,建议通过增加风嘴个数、减小热定形机各喷嘴之间的间距来提高较厚棉织物的干燥速率和能源利用率。

c) 对具有不同正反面组织结构的织物而言,其干燥曲线存有两个恒速干燥段,且当织物双面的材质不同时,同等条件下通过两面分别进行干燥时所需的时间存有较大差异。因此,热定形机上下风道宜采用不同的气流参数进行干燥,使织物双面保持一致的干燥时间,来提高该类织物的干燥效率,降低能耗。

#### 参考文献:

- [1] 李瑞萍. 中国印染行业发展现状及未来趋势[J]. 染料与染色, 2015, 52(2): 52-62.

- [2] 凌群民, 谭磊. 织物干燥机理及干燥速率的探讨[J]. 纺织学报, 2006, 27(8): 22-24.
- [3] 曾林泉. 纺织品热定型整理原理及实践: 1[J]. 染整技术, 2011, 33(12): 1-6.
- [4] Li X. Process Optimization of Dryers/Tenters in the Textile Industry [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2004: 32-68.
- [5] 任佳, 苏宏业. 印染热定型机煤、电能耗建模及优化求解研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 582-587.
- [6] 周丽春, 郜琳琳, 金福江. 基于多目标遗传算法的热定型工艺参数优化设计[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2012, 11(4): 453-457.
- [7] Lee H S, Carr W W, Beckham H W, et al. A model of through-air drying of tufted textile materials [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(2): 357-366.
- [8] Nazir A, Hussain T, Rehman A, et al. Modelling heat-setting of cotton/ elastane knitted fabrics for optimum dimensional stability [J]. Journal of Textile and Apparel Technology and Management, 2015, 9(2): 1-12.
- [9] Etemoglu A B, Ulcay Y, Can M, et al. Mathematical modelling of combined diffusion of heat and mass transfer through fabrics [J]. Fibers and Polymers, 2009, 10(2): 252-259.
- [10] Yadav V, Moon C G. Modelling and experimentation for the fabric-drying process in domestic dryers [J]. Applied Energy, 2008, 85(5): 404-419.
- [11] 朱冬林, 王磊. 合成纤维织物和棉织物热风干燥特性的实验研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2003, 29(1): 81-84.
- [12] 朱冬林, 王磊, 汪永辉. 合成纤维和棉织物表面接触干燥特性的实验研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2003, 29(5): 5-9.
- [13] Koseoglu M F, Baskaya S. The role of jet inlet geometry in impinging jet heat transfer, modeling and experiments [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(8): 1417-1426.

(责任编辑:唐志荣)