

织物射流冲击干燥下温度变化数值模拟

李俊, 钱淼, 马成章

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年12月13日; 录用日期: 2023年1月22日; 发布日期: 2023年1月29日

摘要

本文针对织物射流冲击干燥特性建模中对流换热系数与主流温度设定困难的问题, 采用UDF程序对ANSYS FLUENT进行二次开发, 耦合了射流冲击外流场供热与织物内水分蒸发过程, 建立了射流冲击下织物干燥特性模型, 探索了热风速度、热风温度、织物密度、织物厚度等参数对冲击干燥下织物温度的影响, 研究了5种不同织物干燥过程的温度变化曲线差异, 并开展相关实验验证。结果表明: 针对不同织物材料参数, 织物克重对织物干燥特性影响最大, 比热容影响最小, 孔隙率和材料密度的影响类似; 对不同种类织物, 棉织物表观密度最大, 所需干燥时间最长约56 s, 聚脂纤维表观密度最小, 所需干燥时间为最短约33 s; 该研究可为印染热定型设备设计与生产工艺参数优化提供理论参考, 具有较好的社会效益与经济效益。

关键词

织物干燥, 射流冲击, UDF, FLUENT

Numerical Simulation of Temperature Change of Fabric under Jet Impingement Drying

Jun Li, Miao Qian, Chengzhang Ma

Faculty of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Dec. 13th, 2022; accepted: Jan. 22nd, 2023; published: Jan. 29th, 2023

Abstract

In order to solve the problem that it is difficult to set the convective heat transfer coefficient and the mainstream temperature in the modeling of the jet impact drying characteristics of porous fa-

brics, the software ANSYS FLUENT was secondary developed by using the UDF program. The external supply of heat and the water evaporation process in the porous fabric under the jet impact were coupled, and the drying characteristics model of the fabric under the jet impact without convective heat transfer coefficient was established. The effect of hot wind velocity, hot wind temperature, fabric density, fabric thickness and other parameters on the temperature of the porous fabric under impact drying was explored. The differences in the temperature variation curves of five different fabrics during the drying process were studied. And build related experiments to verify the simulation model. The results show that: for different fabric material parameters, the fabric weight has the greatest influence on the drying characteristics of the fabric, and the specific heat capacity has the least influence. The influence of porosity and material density is similar. For different types of fabrics, cotton fabric has the highest apparent density and the longest drying time is about 56 s, while polyester fiber has the lowest apparent density and the shortest drying time is about 33 s. This study can provide theoretical reference for the design of printing and dyeing heat setting equipment and the optimization of process parameters, and has good social and economic benefits.

Keywords

Fabric Drying, Jet Impingement, UDF, FLUENT

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前,控制碳排放已成为国际社会的共识[1]。作为高排放、高能耗的印染行业,亟需加快设备升级,进一步降低印染热定型设备能耗。在印染行业中,热风干燥被广泛使用[2] [3]。目前,在热定型设备制造上我国已具备较强的能力,但与国际先进水平相比在能耗、高端织物热定型性能等方面仍有较大的差距[4] [5]。因此,有必要开展织物干燥过程传热传质机理研究,为印染热定型装备的结构设计和热定型工艺参数优化提供理论依据[6]。

国内外研究者已对织物干燥过程的水分传热传质特性开展了相关的研究。Etemoglu 等[7]建立了热风冲击下织物传热传质模型,研究了热风温度、热风速度等工艺参数对织物干燥特性的影响。Akyol 等[8]采用神经网络算法对织物的干燥特性进行了建模,预测了织物的干燥过程,得到了较佳的温度、压力等工艺参数。Khan 等[9]研究了湿度和热风速度对多孔介质干燥的影响规律,利用非热平衡传热传质理论建立了其干燥特性模型,并通过实验对计算模型进行了验证。Elhalwagy 等[10]运用计算流体动力学(CFD)建立了多孔材料的干燥特性模型,发现多孔材料干燥阻力与材料自身特性直接相关。Defraeye 等[11] [12]利用 FLUENT 软件和自编写 HAM 程序,对多孔介质干燥过程的气体流动区域和干燥特性进行了分析,与利用热平衡的计算结果进行了对比分析,对传热传质类比关系进行了验证。钱淼等[13] [14] [15]研究了织物在冲击干燥下的传热传质特性,建立了二维织物干燥传热传质模型,对织物的温度变化进行了预测。热风冲击干燥多孔织物时,主要通过流向织物传递热量。上述的常用干燥模型中的对流换热系数往往设定为恒定值。可是热空气冲击干燥过程中对流换热系数会随时间发生变化,这使得前期已建立的基于集总参数法干燥特性模型在分析冲击干燥织物传热传质过程存在一定的不足[16]。

本文通过 UDF (User Defined Function)和 FLUENT 联合仿真,耦合了热空气流场和织物内水分蒸发的

织物热风冲击干燥过程[17]。通过编写 UDF 将织物干燥数学模型添加到 FLUENT 中, 首先通过 FLUENT 计算出热流密度 q , 在通过 UDF 计算得到织物干燥过程的温度/水分变化情况。通过联合仿真, FLUENT 自动得到热风传递给织物的瞬时热流密度, 无需输入对流换热系数和主流温度, 避免了随时间变化对流换热系数确定困难的问题。基于该模型, 本文研究了热风速度、温度等外部物理特性和织物密度、厚度、初始含水率等织物自身特性对冲击干燥过程的温度变化的影响, 并对棉、丝绸、羊毛、聚酰胺纤维、聚酯纤维织物的干燥特性进行了研究。本文的研究结果可为纺织印染热定型过程中的装备设计与工艺参数优化提供一定的参考价值。

2. 多孔织物热风冲击干燥建模

首先对多孔织物热风冲击干燥物理问题进行合理简化, 将其简化为二维圆周对称的物理模型, 然后分别对外流场和多孔织物进行建模, 最后通过 FLUENT 二次开发将外流场和多孔织物的数值模型耦合, 用于计算得到多孔织物热风冲击干燥整体的温度变化分布。

2.1. 物理模型建立

织物在进行热定型干燥时, 由风道喷嘴吹出的热风直接冲击在织物上, 单个喷嘴在织物上的冲击作用区域为一圆形区域。为减少计算量, 在本文中将实际冲击干燥的三维流场简化为只有长 L 和高 H 的二维圆周对称的物理模型, 忽略织物厚度影响, 利用冲击作用区域圆周对称特性, 将织物的计算区域简化为一条直线[18][19]。

2.2. 射流冲击外流场建模

图 1 所示为简化后的织物计算域示意图, 其中将单喷嘴织物冲击干燥的外流场简化为长 27 mm、高 150 mm 的二维计算区域。外流场假设如下: 热风工质为空气; 热风流动状态为湍流; 由于热风温度变化不大, 因此热风物性参数设置为常数。边界条件设定如下: 喷嘴出口为速度进口, 冲击表面(织物表面)设置为壁面, 将每个壁面设为绝热边界条件。

本文采用计算流体动力学软件 FLUENT 对外流场进行数值模拟。在求解过程中, 连续性、动量、能量和湍流方程采用 SIMPLE 算法求解。

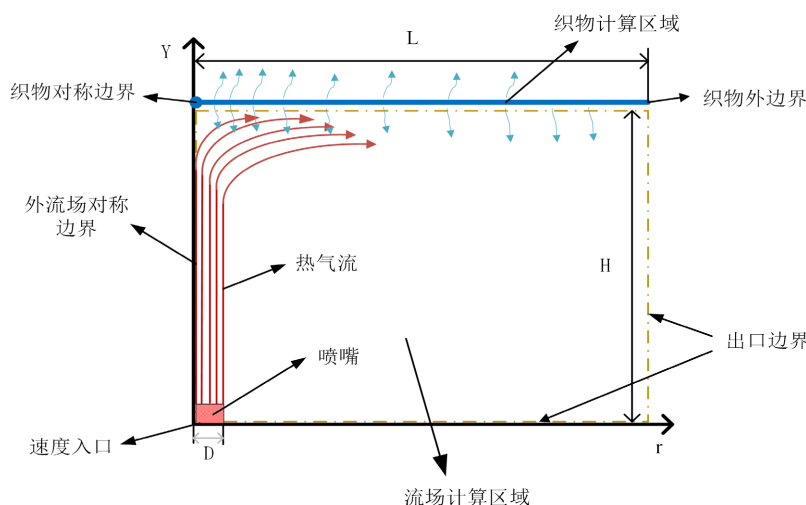


Figure 1. Simplified diagram of fabric calculation area

图 1. 织物计算区域简化示意图

2.3. 多孔织物干燥建模

织物内部水分蒸发模型采用集总参数模型。由于简化的织物模型计算域为圆对称，因此将多孔织物在干燥过程中的控制方程建立在极坐标下。

能量守恒方程[20] [21] [22]:

$$\rho c_p \times H \times \frac{\partial T}{\partial \tau} = q - h_a (T - T_{a,e}) + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \times r \times k \right) \times H - m_s \times \alpha \quad (1)$$

式中, ρc_p 项可用式(2)表示:

$$\rho c_p = \rho_{ros} \times c_{ros} + \rho_{ros} \times c_L \times U \quad (2)$$

其中: ρ 为多孔织物的绝干密度, kg/m^3 ; c_p 为多孔织物的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; H 为织物厚度, m ; T 为织物温度, K ; τ 为干燥时间, s ; h_a 为自然对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; $T_{a,e}$ 为环境温度, K ; k 为多孔织物的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; α 为水的汽化潜热, J/kg ; ρ_{ros} 为多孔织物的固相纤维密度, kg/m^3 ; c_{ros} 为多孔织物固相纤维比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; c_L 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; U 为干基含水率, %; m_s 为织物蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。织物蒸发速率可用式(3)表示:

$$m_s = h_m (\rho_v - \rho_{ve}) \quad (3)$$

其中: h_m 为织物表面传质系数, m/s ; ρ_v 为水蒸气密度, kg/m^3 ; 水蒸气密度可用式(5)表示:

$$\rho_v = \frac{P \times M}{R \times T} \quad (4)$$

质量守恒方程:

$$\rho_{ros} \times H \times \frac{\partial U}{\partial \tau} = \rho_{ros} \times H \times \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} \times r \times D_L \right) - m_s \quad (5)$$

其中, 水分在织物中的扩散系数 D_L 可用式(6)表示[23]:

$$D_L = D_0 \left(\frac{U_0 - U_{eq}}{U_{ms} - U_{eq}} \right) \times e^{-\frac{E_d}{RT}} \quad (6)$$

在 $r = 0$ 处设置为对称边界条件; 在 $r = L$ 处, 设置为与外界无热量和水分传递的边界条件, 数学方程可用式(7)~(8)表示:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \text{ 或 } r = L \quad (7)$$

$$\frac{\partial U}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \text{ 或 } r = L \quad (8)$$

本文使用有限差分法求解上述多孔织物干燥数学模型, 将上述微分方程改写为差分方程, 表达式如下:

$$\rho c_{pi}^{n-1} \times H \times \frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\Delta \tau} = h_c \times (T_{hot} - T_i^n) - h_a \times (T_i^n - T_{a,e}) - m_{si}^n \times \Delta h_w + \frac{k_i^n r_i T_{i+1}^n - (k_i^n r_i + k_{i-1}^n r_{i-1}) T_i^n + k_{i-1}^n r_{i-1} T_{i-1}^n}{\Delta r^2} \times H \times \frac{1}{r_i} \quad (9)$$

$$\rho_d \times H \times \frac{U_i^n - U_i^{n-1}}{\Delta \tau} = \frac{D_{Li}^n r_i U_{i+1}^n}{\Delta r^2} + \frac{D_{Li-1}^n r_{i-1} U_{i-1}^n}{\Delta r^2} \times \rho_d \times H \times \frac{1}{r_i} - m_{si}^n - \frac{(D_{Li}^n r_i + D_{Li-1}^n r_{i-1}) U_i^n}{\Delta r^2} \quad (10)$$

$$\frac{U_i^n - U_i^{n-1}}{\Delta\tau} = 0, \quad r = 0 \text{ 或 } r = L \quad (11)$$

$$\frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\Delta\tau} = 0, \quad r = 0 \text{ 或 } r = L \quad (12)$$

2.4. 外流场与织物干燥耦合方法与流程

图 2 所示为多孔织物冲击干燥过程的热风与织物界面的传热传质过程。热风射流与织物表面发生碰撞，在界面处通过对流换热干燥织物，并蒸发水分带走织物吸收热风带来的能量 E [24]。

通过二次开发 FLUENT，编写 UDF 将上述织物干燥数学模型添加到 FLUENT 计算中，实现外流场供热与织物内水分蒸发的耦合计算。外流场冲击下多孔织物干燥过程的计算流程如图 3 所示。由 FLUENT 软件仿真得到外流场与织物界面处的瞬时热流密度 q 的分布，并将界面单元的热流密度 q 和 ID 储存到 UDM (User Defined Memory) 中。UDF 将 UDM 中的热流密度 q 匹配到多孔织物计算单元 ID 上，将其代入到多孔织物干燥数学模型中得到多孔织物的温度变化情况，计算完成后将结果保存到 UDM 中，为下一时间步长 FLUENT 流场计算提供数据。为提高计算效率、减少计算时间，FLUENT 采用并行计算同时编写并行多核心 UDF 程序。

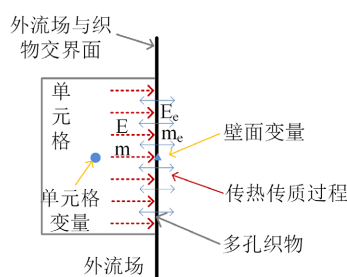


Figure 2. Fabric drying process under the impact of hot air flow

图 2. 织物在热气流冲击下干燥过程

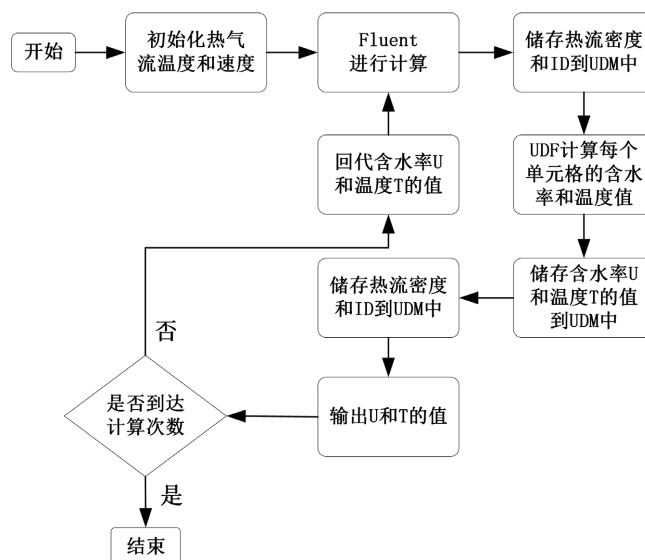


Figure 3. Drying mathematical model overall calculation flow chart

图 3. 干燥数学模型整体计算流程图

3. 多孔织物热风冲击干燥实验

为验证计算模型的可行性, 本文以棉织物为实验对象, 开展相关实验研究。实验系统主要由干燥炉、轧车系统、热风机、红外热成像仪组成, 实验系统如图 4 所示。具体实验过程如下:

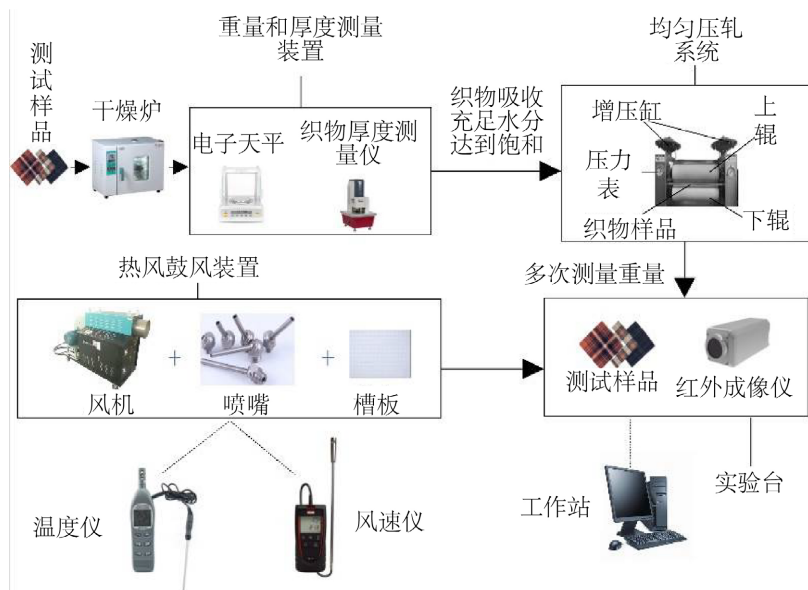


Figure 4. Experimental system
图 4. 实验系统

首先将织物放到恒温干燥箱至完全干燥, 对织物进行多次称重, 取平均值, 并测量织物的尺寸, 计算得到织物的体积平均密度。根据式(13)计算得到织物的孔隙率[25]:

$$\theta = \frac{V_d}{V_d + V_s} = \frac{\rho}{\rho_p} \times 100\% \quad (13)$$

其中, V_d 为织物的孔隙体积, m^3 ; V_s 为织物固体基材所占体积, m^3 ; ρ_p 为多孔织物的本征固体密度, kg/m^3 ; ρ 为多孔织物的体积平均密度, kg/m^3 。

对于织物干燥, 含水率是影响织物干燥过程的一个重要初始条件, 本文选用干基含水率来描述织物干燥过程中水分变化, 实验中首先将干布放入水中静置一段时间, 利用轧车对含湿织物进行湿度均匀化处理, 并对处理后的湿织物进行称重处理, 计算其干基含水率。干基含水率[26]可用式(14)表示:

$$X = \frac{m_l}{m_l + m_d} \times 100\% \quad (14)$$

其中, m_l 为织物内液态水的质量, kg ; m_d 为干燥织物的质量, kg , 可近似为织物干质固体的质量。

接下来调节好风机风速和温度, 预运行风机 20 分钟, 保证喷嘴出口风速和温度达到稳定。当温度仪测试的喷嘴出口温度稳定后, 热风开始垂直吹向织物表面使其升温, 红外摄像机开始记录织物的温度变化。热风温度和风速由温度仪和风速仪测量得到。每个实验进行三次, 当织物的温度分布没有变化时, 红外摄像机停止记录。

4. 仿真结果与分析

首先对棉织物干燥特性在不同喷嘴热风速度和温度条件下进行模拟, 将模拟结果和实验结果进行比

较, 验证数值模型的可靠性。然后对织物在不同的干燥条件进行模拟分析, 得出不同织物材料参数对织物干燥特性的影响规律, 最后, 对织物材料参数在不同种类织物的影响规律做进一步的模拟分析, 得出织物自身物理参数对织物干燥特性的影响差异。

4.1. 理论与实验对比

通过实验和模型计算, 织物中心点温度随时间变化曲线如图 5 所示。在喷嘴出口 $V = 8.6\text{m/s}$, $T = 125^\circ\text{C}$, $V = 4.6\text{ m/s}$ $T = 125^\circ\text{C}$, $V = 8.6\text{ m/s}$, $T = 110^\circ\text{C}$ 三种条件下, 通过对模拟与实验的中心点温度随时间变化曲线进行对比发现: 模型的计算结果与实验结果一致, 最大误差小于 5%, 表明了理论模型的可行性。

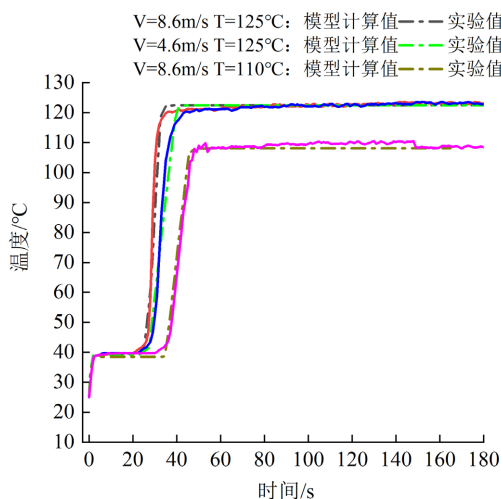


Figure 5. The time-dependent curve between the model calculated value and the experimental measured value of the central point temperature of the fabric drying process is obtained

图 5. 织物干燥过程中心温度的模型计算值与实验测量值随时间变化曲线

通过对图 5 中干燥特性曲线的对比, 可以发现: 织物外部热气流的变化对织物干燥过程有显著的影响, 提高热风出口的 V 和 T , 能够加快织物干燥过程, 提高织物干燥完成后温度。当 $T = 125^\circ\text{C}$ 和 $V = 8.6\text{ m/s}$ 时, 织物从开始干燥到干燥完成所需时间 $t = 41\text{ s}$, 降低温度后 $T = 110^\circ\text{C}$ 时织物完成干燥 $t = 56\text{ s}$, 降低出口风速后 $V = 4.6\text{ m/s}$ 织物完成干燥 $t = 46\text{ s}$ 。通过对比发现 T 比 V 对织物干燥特性影响更大, 降低 T 织物所需干燥时间 t 增加 36%, 而降低 V 织物干燥所需时间 t 增加 12%。具体表现为, 织物恒速干燥段时间缩减, 降速干燥段和干燥完成段曲线斜率增大, 干燥完成段织物最终平衡温度增加。在实际印染热定形工艺参数设定时, 可在适当提高温度的同时增加风速, 来提高织物干燥性能。

4.2. 不同干燥条件织物干燥特性曲线研究

本文研究织物比热容 c_{ros} 、材料密度 ρ_{ros} 、孔隙率 θ 、克重 ω 4 个材料参数对冲击干燥特性的影响规律, 计算模型设置为 $T = 125^\circ\text{C}$, $V = 8.6\text{ m/s}$, 改变干燥模型中相应的物理参数值, 得到了不同参数下织物中心点温度随时间变化特性曲线, 如图 6(a)~(d) 所示。由图中温度变化曲线的对比可见: 比热容 c_{ros} 对织物干燥特性的影响较小, 克重 ω 对织物干燥特性的影响最大, 孔隙率 θ 和材料密度 ρ_{ros} 对织物干燥特性的影响较为接近。

由图 6(a) 还可见, c_{ros} 分别为 670 J/kg/K 、 1210 J/kg/K 和 1360 J/kg/K 时, 织物各个干燥阶段所需时间差距小于 5%, 并且各个干燥阶段的平衡温度差距同样小于 5%。由于 c_{ros} 表示物质提高温度所需热量的能量, 而不是吸收或者散热能力, 热风冲击干燥过程提供的能量完全超过织物提高温度所需能量, 从而导致 c_{ros} 对织物干燥特性的影响较小。图 6(b) 和图 6(c) 反映了 θ 和 ρ_{ros} 对干燥特性的影响, θ 和 ρ_{ros} 两者的影响类似, 这是由于 θ 和 ρ_{ros} 的改变会直接导致织物结构特性的改变, 随着 θ 和 ρ_{ros} 的增大, 热风穿透织物更加困难, 织物背风侧传热传质能力下降导致降速干燥段和干燥完成段温度上升速度有所放缓, 但恒速干燥段时间增加, 织物干燥最终温度无变化。图 6(d) 反映了 ω 对织物干燥特性的影响, 这里“克重”是指一平方米织物的重量克数。 ω 增加会直接导致织物含水率、密度、孔隙率等的增加, 致使冲击热风对织物穿透能力和织物背风侧传热传质能力均下降, 水分蒸发所需能量增加。当 ω 为 75 g/m^2 时总用时 32 s, 当 ω 增加到 200 g/m^2 时总用时 76 s, 总时间增加超过 137%, 由此可见织物 ω 增加会使织物干燥时间快速增加。但织物各个干燥阶段的平衡温度变化极小, 织物 ω 对干燥的平衡温度影响不大。因此在设定热定型的工艺参数时, 可对不同材料的织物进行对比分析, 根据不同织物物理特性之间的差异, 对已有的工艺进行一定的改进。

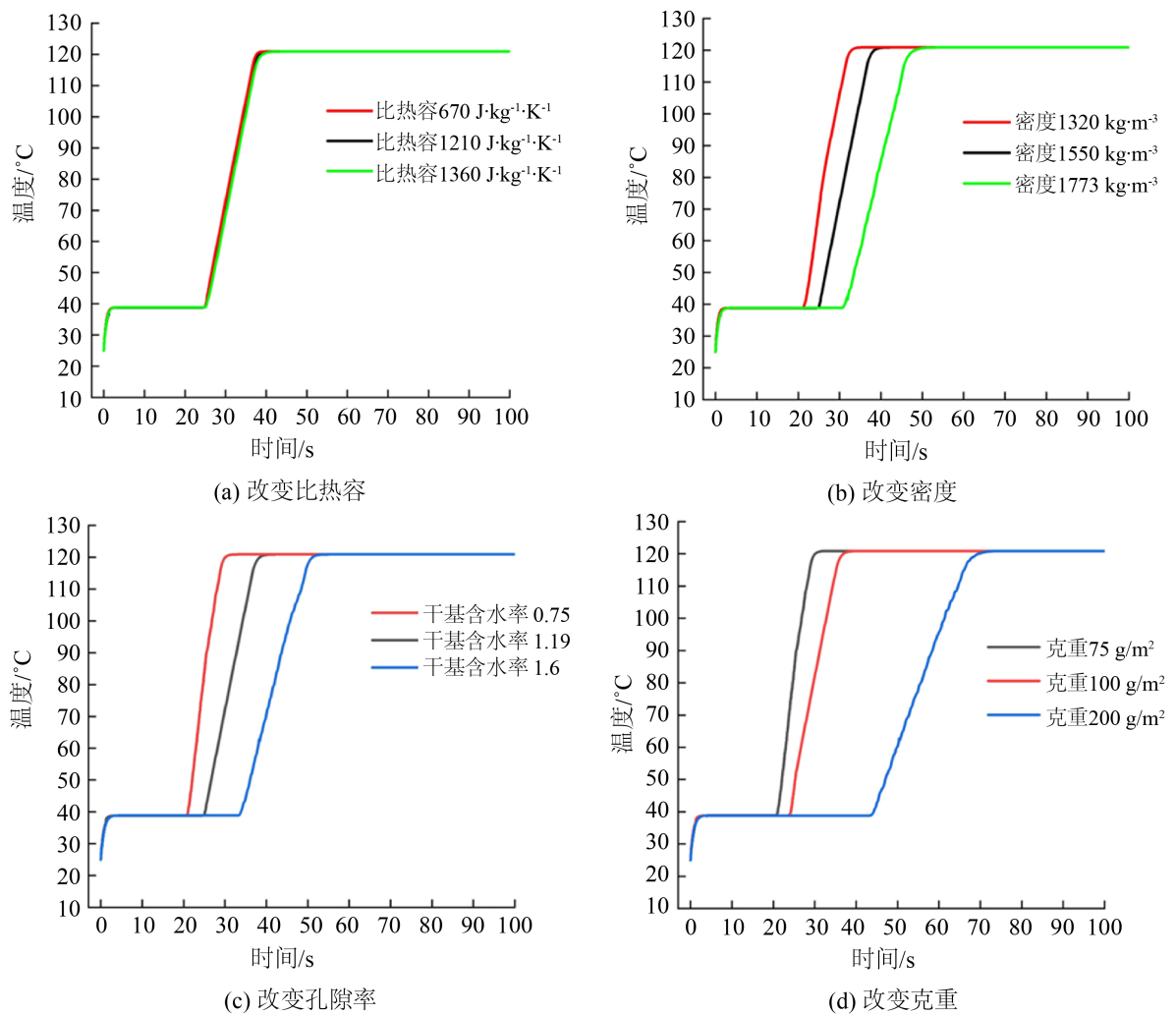


Figure 6. Change curve of fabric center temperature with time under different material parameters

图 6. 不同材料参数下织物中心温度随时间变化曲线

4.3. 不同种类织物对比

为了研究不同种类织物在相同冲击干燥条件下的干燥特性,以 5 种厚度均为 2 mm 的常见纺织材料作为研究对象,其部分物理特性见表 1 所示[27]。

Table 1. Physical properties of fabric

表 1. 织物物理特性

织物种类	材料密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	孔隙率/%
棉	1550	520.8	1210	0.16	0.336
丝绸	1340	483.74	1380	0.2	0.361
羊毛	1300	495.3	1360	0.2	0.381
聚酰胺纤维	1140	410.4	1430	0.25	0.36
聚脂纤维	1390	407.27	1340	0.14	0.293

其中织物的表观密度是指材料密度和孔隙率的乘积。通过 UDF 与 FLUENT 联合仿真得到不同种类织物对应的中心点温度随时间变化特性曲线,如图 7 所示。

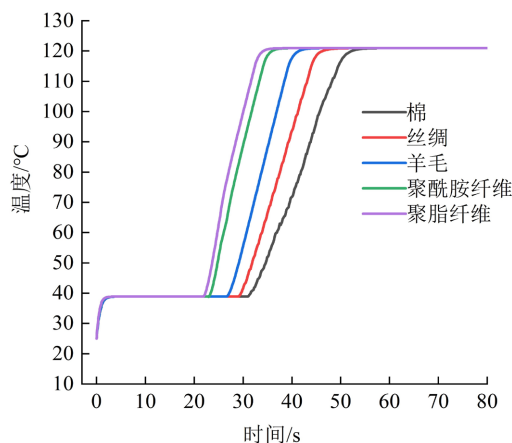


Figure 7. Change curve of center temperature of different kinds of fabric with time

图 7. 不同种类织物中心温度随时间变化曲线

由图 7 可见: 5 种织物在干燥时间上各不相同,但在恒速干燥段和干燥完成后的温度相同,可见织物自身物理参数对 2 个平衡段的温度影响不大,改变织物种类主要会导致冲击干燥时间发生变化。在上文中发现 c_{ros} 对干燥特性影响较小, ω 影响最大,增大 θ 和 ρ_{ros} 会明显增加干燥时间,其中 θ 和 ρ_{ros} 的乘积为表观密度 ρ_{θ} 。通过对 5 种织物参数的对比发现,棉织物 ρ_{θ} 最大,所需干燥时间也最长约 56s,聚脂纤维 ρ_{θ} 最小,所需干燥时间为最短约 33 s。另外聚脂纤维与聚酰胺纤维 ρ_{ros} 不同, θ 也不同,但它们的乘积表观密度 ρ_{θ} ,较为接近,所需干燥时间也较为接近,这就解释了图中 5 种织物干燥特性曲线为何会各不相同。由此可以发现 θ 和 ρ_{ros} 的乘积表观密度 ρ_{θ} 可以为织物干燥特性提供一定的预判价值。

5. 结论

本文采用 FLUENT 软件并通过编写 UDF 程序对单喷嘴情况下织物的冲击干燥特性进行了分析研究,

并通过实验对数学模型的可靠性进行了验证, 得到以下主要结论:

1) 研究发现 V 、 T 、 ρ_{ros} 、 θ 、 ω 发生改变对织物冲击干燥特性产生较为明显的影响, c_{ros} 发生改变对织物冲击干燥特性影响较小。增大 T 会提高织物最终干燥完成时的温度。增加 ρ_{ros} 、 θ 均会降低织物的干燥速率, 延长干燥时间 t , 但不改变织物最终干燥完成时的温度。

2) 通过对棉、丝绸、羊毛、聚酰胺纤维、聚脂纤维 5 种不同织物干燥特性曲线的计算, 得到了 5 种织物的干燥特性, 结果表明 5 种织物在干燥时间上各不相同, 但恒速干燥段和干燥完成后的温度相同。另外 θ 和 ρ_{ros} 的乘积表观密度 ρ_{θ} , 可以为织物干燥特性提供一定的预判价值。

本文基于 ANSYS FLUENT, 采用 UDF 程序对其进行二次开发, 设计了考虑外流场传热及织物内传热传质的耦合织物单喷嘴冲击干燥特性算法, 相较传统织物干燥模拟精确度进一步提高, 可为印染热定型机设计和热定型工艺参数优化提供理论参考。

基金项目

浙江省重点研发计划(2023C01158)。

参考文献

- [1] 王永中. 碳达峰、碳中和目标与中国的新能源革命[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021(14): 88-96.
- [2] Yadav, V. and Moon, C.G. (2007) Fabric-Drying Process in Domestic Dryers. *Applied Energy*, **85**, 143-158. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.06.007>
- [3] 向忠, 蒋连彪, 游照林, 等. 染整智能制造研究进展[J]. 现代纺织技术, 2020, 28(4): 89-96.
- [4] 吴成成. 印染热定型机风道结构对织物热定型的影响研究[J]. 轻纺工业与技术, 2020, 49(1): 1-2.
- [5] Wei, Y.H., Hua, J.L. and Ding, X.M. (2017) A Mathematical Model for Simulating Heat and Moisture Transfer within Porous Cotton Fabric Drying inside the Domestic Air-Vented Drum Dryer. *The Journal of the Textile Institute*, **108**, 1074-1084. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1219450>
- [6] 任佳, 张益波, 高金凤, 等. 热定型过程能耗建模及 PSO 参数优化[J]. 化工学报, 2011, 62(8): 2206-2211.
- [7] Etemoglu, A.B., Ulcay, Y., Can, M., et al. (2009) Mathematical Modelling of Combined Diffusion of Heat and Mass Transfer through Fabrics. *Fibers and Polymers*, **10**, 252-259. <https://doi.org/10.1007/s12221-009-0252-0>
- [8] Akyol, U., Akan, A.E. and Durak, A. (2015) Simulation and Thermodynamic Analysis of a Hot-Air Textile drying Process. *The Journal of the Textile Institute*, **106**, 260-274. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.916062>
- [9] Khan, F.A., Fischer, C. and Straatman, A.G. (2015) Numerical Model for Non-Equilibrium Heat and Mass Exchange in Conjugate Fluid/Solid/Porous Domains with Application to Evaporative Cooling and Drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **80**, 260-274. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.051>
- [10] Elhalwagy, M.M. and Straatman, A.G. (2017) Dynamic Coupling of Phase-Heat and Mass Transfer in Porous Media and Conjugate Fluid/Porous Domains. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **106**, 1270-1286. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.108>
- [11] Defraeye, D. (2014) Advanced Computational Modelling for Drying Processes—A Review. *Applied Energy*, **131**, 323-344. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>
- [12] Defraeye, T., Blocken, B. and Carmeliet, J. (2012) Analysis of Convective Heat and Mass Transfer Coefficients for Convective Drying of a Porous Flat Plate by Conjugate Modelling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.047>
- [13] 钱淼, 王景汉, 向忠, 等. 带方形喷嘴风道结构对热定型机性能影响[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(12): 2670-2676.
- [14] 马成章, 钱淼, 丁伯军, 等. 棉织物干燥过程热湿传递特性软件计算与分析[J]. 针织工业, 2020(4): 50-53.
- [15] Xiang, Z., Huang, Y.F., Hu, X.D., et al. (2019) Fabric Moisture Uniform Control to Study the Influence of Air Impingement Parameters on Fabric Drying Characteristics. *Journal of Visualized Experiments*, **150**, e59522. <https://doi.org/10.3791/59522>
- [16] Chandramohan, V.P. (2016) Numerical Prediction and Analysis of Surface Transfer Coefficients on Moist Object during Heat and Mass Transfer Application. *Heat Transfer Engineering*, **37**, 53-63.

- <https://doi.org/10.1080/01457632.2015.1042341>
- [17] Belleghem, M.V., Steeman, M., Janssen, H., *et al.* (2014) Validation of a Coupled Heat, Vapour and Liquid Moisture Transport Model for Porous Materials Implemented in CFD. *Building and Environment*, **81**, 340-353. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.024>
- [18] 王景汉. 印染热定型织物干燥机理建模及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2019: 9-23.
- [19] Pinheiro, J.M., Salústio, S., Rocha, J., *et al.* (2016) Analysis of Equilibrium and Kinetic Parameters of Water Adsorption Heating Systems for Different Porous Metal/Metalloid Oxide Adsorbents. *Applied Thermal Engineering*, **100**, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.142>
- [20] Ginalski, M.K., Nowak, A.J. and Wrobel, L.C. (2008) Modelling of Heat and Mass Transfer Processes in Neonatology. *Biomedical Materials*, **3**, Article ID: 034113. <https://doi.org/10.1088/1748-6041/3/3/034113>
- [21] Stasiak, M., Musielak, G. and Mierzwa, D. (2020) Optimization Method for the Evaluation of Convective Heat and Mass Transfer Effective Coefficients and Energy Sources in Drying Processes. *Energies*, **13**, 6557. <https://doi.org/10.3390/en13246577>
- [22] 俞昌铭. 多孔材料传热传质及其数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 250-251.
- [23] 弗兰克 P.英克鲁佩勒, 大卫 P.德维特, 狄奥多尔 L.伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 543-545.
- [24] Peng, C. and Moghaddam, S. (2020) Experimental Evaluation and Kinetic Analysis of Direct-Contact Ultrasonic Fabric Drying Process. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, **13**, 1-24. <https://doi.org/10.1115/1.4047566>
- [25] Gibson, P. and Charmchi, M. (1997) The Use of Volume-Averaging Techniques to Predict Temperature Transients Due to Water Vapor Sorption in Hygroscopic Porous Polymer Materials. *Applied Polymer Science*, **64**, 493-505. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970418\)64:3<493::AID-APP6>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970418)64:3<493::AID-APP6>3.0.CO;2-F)
- [26] Qian, M., Wang, J.H., Xiang, Z., *et al.* (2019) Heat and Moisture Transfer Performance of Thin Cotton Fabric under Impingement Drying. *Textile Research Journal*, **89**, 3089-3097. <https://doi.org/10.1177/0040517518807446>
- [27] Neves, S.F., Campos, J.B.L.M. and Mayor, T.S. (2015) On the Determination of Parameters Required for Numerical Studies of Heat and Mass Transfer through Textiles—Methodologies and Experimental Procedures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **81**, 272-282. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.038>