

包装印刷设备的烘干风嘴分布参数规律研究

黄卿

(南充职业技术学院 艺术系, 四川 南充 637131)

摘要: **目的** 为了提升包装印刷设备烘干性能, 针对风嘴分布进行研究。**方法** 依据实际包装印刷设备风嘴为参考, 建立风嘴分布模型并进行非结构网格划分, 根据实际情况建立适用于其工况的边界条件和控制方程; 控制风嘴间距和承印物距离这2个关键参数, 建立风嘴分布参数与热风场性能之间的数学模型; 依据所建立数学模型估算不同参数模型的烘干效果。**结果** 根据多组仿真实验得到了风嘴间距和承印物距离等参数对热风场分布的影响, 相应经验公式为 $v = (-0.007 \times L + 2.568)x^{4.311/L+0.056}$ 。风嘴间距对于烘干风嘴影响效果明显, 增加风嘴间距可以提升烘干风嘴风速和热风场的均匀性; 同时发现随着承印物不断前进和风嘴作用效果的叠加, 其表面风速将持续呈现上升。**结论** 经过研究分析, 掌握了不同参数下的热风场分布规律, 这对指导实际生产对于烘干风嘴设计具有重要参考价值。

关键词: 热风烘干系统; 风嘴分布; 风嘴间距; 承印物距离; 包装印刷

中图分类号: TB486; TH122 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)11-0219-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.11.032

Rule for the Distribution Parameters of Air Nozzles in Packaging Printing Equipment

HUANG Qing

(Department of Fine Arts, Nanchong Vocational and Technical College, Nanchong 637131, China)

ABSTRACT: The work aims to study the distribution of air nozzles, in order to improve the drying performance of packaging printing equipment. The distribution model of air nozzles was established and the unstructured meshing was conducted with reference to the air nozzle of actual packaging printing equipment. The boundary conditions and governing equations suitable for the air nozzle were chosen based on the actual situation. The spacing between the air nozzles and the distance between the substrates were taken as the main parameters and controlled, and a mathematical model was established to describe the relationship between the air nozzle parameters and the performance of hot air fields. The drying effect of different parameter models was estimated based on the mathematical model established. The influence of such parameters as the spacing between the air nozzles and the distance between the substrates on the distribution of hot air field was obtained according to multiple simulation experiments. The corresponding empirical formula was described as $v = (-0.007 \times L + 2.568)x^{4.311/L+0.056}$. The spacing between the air nozzles had a remarkable influence on the air nozzle drying. The increased spacing between the air nozzles could improve the speed to dry the air nozzles and the uniformity of hot air field. Meanwhile, the speed of air on the substrate increased when the substrate continued moving forward and under the action of the air nozzles. Through research and analysis, the distribution law of hot air field under different parameters has been mastered, which provides important reference value for guiding the design of air nozzle drying in the actual production.

收稿日期: 2019-01-07

基金项目: 南充职业技术学院校级科研基金 (ZRB1707, ZRB1712)

作者简介: 黄卿 (1984—), 女, 南充职业技术学院讲师, 主要研究方向为印刷包装设备及工艺。

KEY WORDS: hot air drying system; air nozzle distribution; spacing between the air nozzles; distance between the substrates; packaging printing

包装印刷在诸多行业有着广泛应用,例如食品、药品、烟草、日化、塑料软包装等,都需要相应包装印刷工艺来实现运输、销售、存储、保护等目的。包装印刷往往需要实现丰富色彩和一定保护功能,因而其工艺种类繁多,通常包含凹印、柔印、覆膜、涂布、上光等环节,其中每个环节都涉及有机溶剂的使用,例如凹印油墨、柔印油墨、覆膜胶水、涂布溶剂、上光油等耗材^[1-2]。

由于包装印刷设备具有很高的生产速度(通常达到400~600 m/min),因此需要在短时间内迅速烘干上述各类有机溶剂,以保证生产的顺利进行,同时最大限度地降低有机物挥发,这一切则依赖于高效的热风烘干系统^[3-4]。包装印刷设备通过对空气进行加热,利用风机将其吸入烘干风道,通过管路、箱体等环节分散气流,最后从多个风嘴加速喷出,使其到达承印物基材表面,凭借热空气的速度和热量实现有机溶剂的烘干^[5]。

随着各类新型溶剂和印刷方式的不断出现和节能减排的需要,对于烘干系统性能要求也逐步提高。热风烘干系统在包装印刷设备中占据了约60%以上的能耗,其效率的提升对于降低能耗有着极为重要的作用;无法及时烘干就无法进行承印物的收卷,从而迫使设备降低速度,故可以认为烘干系统直接限制了包装印刷设备的生产速度^[5-8]。风嘴分布作为烘干系统热风的末端出口,直接决定了热风的分布和速度,对烘干效果有着决定性作用。刘健等^[9]发现风嘴出风不均匀且存在湍流,为风嘴的风场优化提供了基础;GAO Qiao-xia等^[10]对一种凹印机烘箱进行数值仿真分析计算,并在原有方案基础上进行了改进;张海燕^[11-12]等围绕涂布机风嘴结构进行了优化,并对烘箱体倾斜角度和出风口位置进行了研究,为相关设计提供了理论支撑;LIU Lin-lin^[13]等通过RNG $k-\epsilon$ 模型进行数值分析,获得较好分析效果。不难发现,当前研究多集中在风嘴结构的优化上,对于风嘴的分布不足,已有类似研究多对已有结构进行直接优化,对于参数规律性研究不足^[14-15]。

针对当前研究的不足,研究重点分析风嘴分布中关键参数对烘干效果的影响,包括风嘴间距和承印物距离。

1 计算理论及仿真实验方法

1.1 仿真计算理论

研究针对热风空气单一流体进行分析,热风场中存在湍流现象^[6],可看作不可压缩流体。热风在风嘴

处的运动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒,设定基本控制方程:质量守恒方程表示单位时间内流体微元增量等于同时流入该微元的净质量,见式(1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u 、 v 和 w 对应着热风在 x 、 y 和 z 方向上的速度。动量守恒方程见式(2)。

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F + \nabla P \quad (2)$$

式中: ρ 与 v 分别为流体密度及其速度; F 为质量力; ∇ 和 P 分别为哈密顿算子与应力张量。能量变化率等于单位时间内外力对微元做功和传给微元热量的总和,这一能量规律见式(3)。

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \rho q + k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

式中: k 为导热系数; q 为热源项; c_v 为定容热; Φ 为耗散函数; dT/dt 为温度随时间的变化率。

1.2 模型建立与网格划分

研究建立了具有不同分布参数的一系列风嘴分布模型,以对比参数变化对风场的影响规律,重点分析了风嘴间距和承印物距离。风嘴结构主要通过薄壁金属材料弯曲加工制成,其厚度通常在2~3 mm范围,具有加工成本低、成型工序简单等优势,风嘴大小主要由缝隙宽度和夹板角度决定,同类设备风嘴的形态和尺寸较为相近且基本结构类似^[5-6]。

包装印刷设备烘箱风嘴实物见图1,文中建立风嘴模型的流体域见图2,每个模型包括3个风嘴及其附近区域,可获取风嘴之间、边缘区域的流场分布情况。风嘴之间的风场分布规律基本相似,3个风嘴构成的分布模型同样适用于多个风嘴分布情况,实际中一个烘箱中往往会同时存多个风嘴。

研究中将风嘴间距设定范围为80~160 mm,承印物距离设定范围为10~30 mm。范围选定主要从两方面进行了考虑:根据企业实际产品尺寸设定参数范

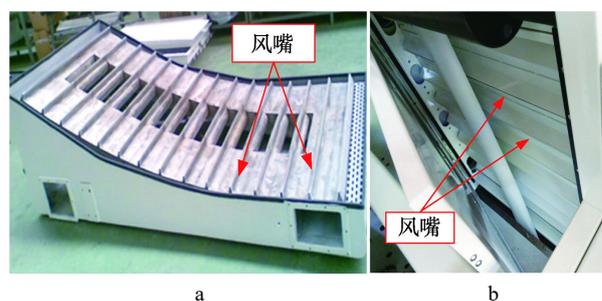


图1 包装印刷设备烘箱风嘴实物

Fig.1 Oven nozzles in kind of packaging printing equipment

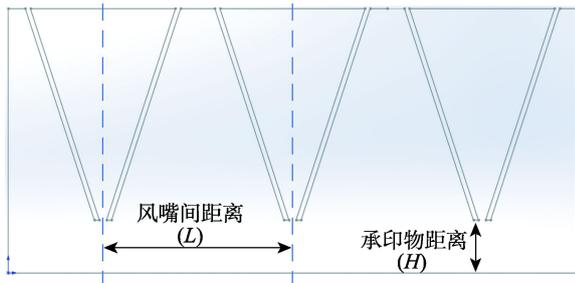


图 2 流体域模型
Fig.2 Fluid field model

围，重点参考了陕西某企业生产的凹印机烘箱（图 1a）、深圳某企业生产的柔印单元烘箱（图 1b）和江苏某企业的覆膜机烘箱；同时对对比了参考文献中的模型参数值^[5,11-12]，以确保研究参数范围对同类设备具有一定的适用性。

模型 A, B, C, D, E 分别具有 5 种不同的风嘴间距离，其承印物到风嘴间的距离都为 20 mm，用于对比不同风嘴间距对烘干性能的影响；建立模型 F, G, C, H, I 分别具有 5 种不同的距离，用于对比风嘴与承印物距离的变化对烘干性能的影响，10 组模型的参数见表 1。研究重点分析了风嘴间距、风嘴至承印物距离等参数对风场分布规律的影响，其主要规律适用于尺寸相近的各类包装印刷设备风嘴。考虑到实际中不同设备烘箱的风嘴参数尚未形成统一标准，文中在较大的参数数值范围内确定了多组模型，尽量覆盖已有常见的参数范围。

表 1 研究模型的参数尺寸
Tab.1 Parameter size of the study model

模型	L/mm	H/mm
A	80	20
B	100	20
C	120	20
D	140	20
E	160	20
F	120	10
H	120	15
I	120	25
G	120	30

完成二维实体建模后，在 ICEM CFD14.0 环境下完成网格建模，生成非结构二维网格。此外，在承印物表面设定了边界网格以提高关键区域计算精度，网格切分效果见图 3。最后对每组网格进行了检验，保证其中不存在负网格等异常现象后进行导出。

1.3 计算环境与边界条件

计算在 Ansys 14.0 的环境下进行，该次研究采用工作站进行计算，CPU 为 Inter Xeon E3-1231 v3，计

算内存为 16 G，采用 Windows 10 操作系统。

模型的壁面、进出口设定见图 3。以方案 A 为例，风嘴上方设定为速度入口，一共有 3 个区域，表示热风从其进入风嘴阵列流体区域，左右两侧为压力出口，表示热风耗散到其他区域，下方承印物设定为移动壁面，其余为固定壁面，这与承印物实际的工作情况相符合。目前大幅面包装印刷设备速度可达到 400~600 m/min，故研究将表示承印物的移动壁面速度设定为 10 m/s。设定流体为空气，电加热烘干工况通常将空气加热至 80 °C 左右，因此设定空气密度为 0.968 kg/m³，粘度为 20.99 MPa·s。根据实际近似工况，设定入口速度为 0.05 m/s，出口为压力出口。

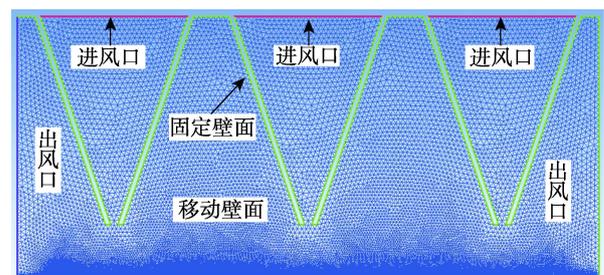


图 3 模型 A 的网格切分效果及边界条件设定
Fig.3 Mesh segmentation effect and boundary condition setting of model A

在包装印刷设备烘干系统中存在着明显的湍流现象，因此选择湍流模型为 RNG $k-\epsilon$ 模型，相对于标准 $k-\epsilon$ 模型其拥有更适用于中低雷诺数效应且拥有较高的精度，更适合该研究工况^[11-13]。其湍动能 k 和湍流耗散的运输方程分别见式（4—5）。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_\epsilon + G_b \quad (5)$$

选择 SIMPLEC 模型进行热风场压强和速度的关联计算，其相对于 SIMPLE 具有更好的稳定性，松弛因子设定为 1。计算结束后，在 TECPLOT360 2013R1 的环境下导出计算结果，并沿承印物表面提取其压力值和速度值，用于热风场性能评价^[16-17]。

2 数值计算结果分析

2.1 风嘴间距对烘干性能影响

模型 A, B, C, D, E 的速度场分布见图 4。图 4 中下边缘表示承印物表面的移动壁面，壁面自左向右水平运动，以每组移动壁面为对象等间距提取样本点，用于评价风场性能。表 1 中每个模型的总长设定

为风嘴间距离的3倍,即 $3L$ 。评价风场性能时,从承印物壁面处等间距提取100个点,起点和终点选取处为承印物表面两端,同时保证所有相邻点之间的距离为 $3L/99$,提取过程在TECPLOT环境下实现。

热风场的速度和稳定性最为重要:速度的大小直接决定了烘干效率,通常用均值评价;稳定性则对包装印刷产品质量的稳定性有较大影响,通常用方差评价^[5,8]。在图4和图5中,研究在每组模型的承印物表面提取了100个点用于评价风场的大小,计算提取点的均值和方差,并记录在表2中,对提取点的位置依次编号为0—100,其中0点是承印物进入烘干区域的位置,第100点处是承印物离开时的位置,承印物向右侧运动。

对比图4中的5组模型,可以发现:随着风嘴阵列间距的增加,整体的速度分布较为相似,随着基材的前进方向速度逐渐呈现出增大趋势;间距增大后承印物并没有出现速度降低区域,大部分仍处于 1.5 m/s 之上,说明增加风嘴间距可以增加承印物的有效烘干面积。

表2中随着风嘴间距的增加,方差呈现明显的下降趋势,均值则呈现出增加趋势。说明在该组模型参数范围内,风嘴间距增加会提升风场的稳定性并提高速度。每组模型承印物表面样本点的速度值见图5,其中横坐标代表取点编号,整体明显呈现出上升趋势,越靠近右侧速度值越高,左侧风速明显偏低。

模型A,B,C,D,E的速度迹线图见图6,在风嘴之间的流体区域,通常会形成体积较大的气旋,这种气旋可以延长气流与承印物的接触时间,保证热量有足够的时间进行交换,有机溶剂烘干依赖于稳定高速的气旋。图6中各组迹线的分布较为相似,但是最左侧风嘴附近的气旋逐渐变小、分散并趋于消失,这是由于间距的增加使得空间增大,导致气旋稳定性逐渐降低所致,在模型D,E中左侧已经无法形成稳定的气旋,其热风利用效率将下降。说明风嘴间距存在着一定的上界,超过这个范围则无法形成稳定气旋,致使无法进行有效热交换,设计中应当避免。

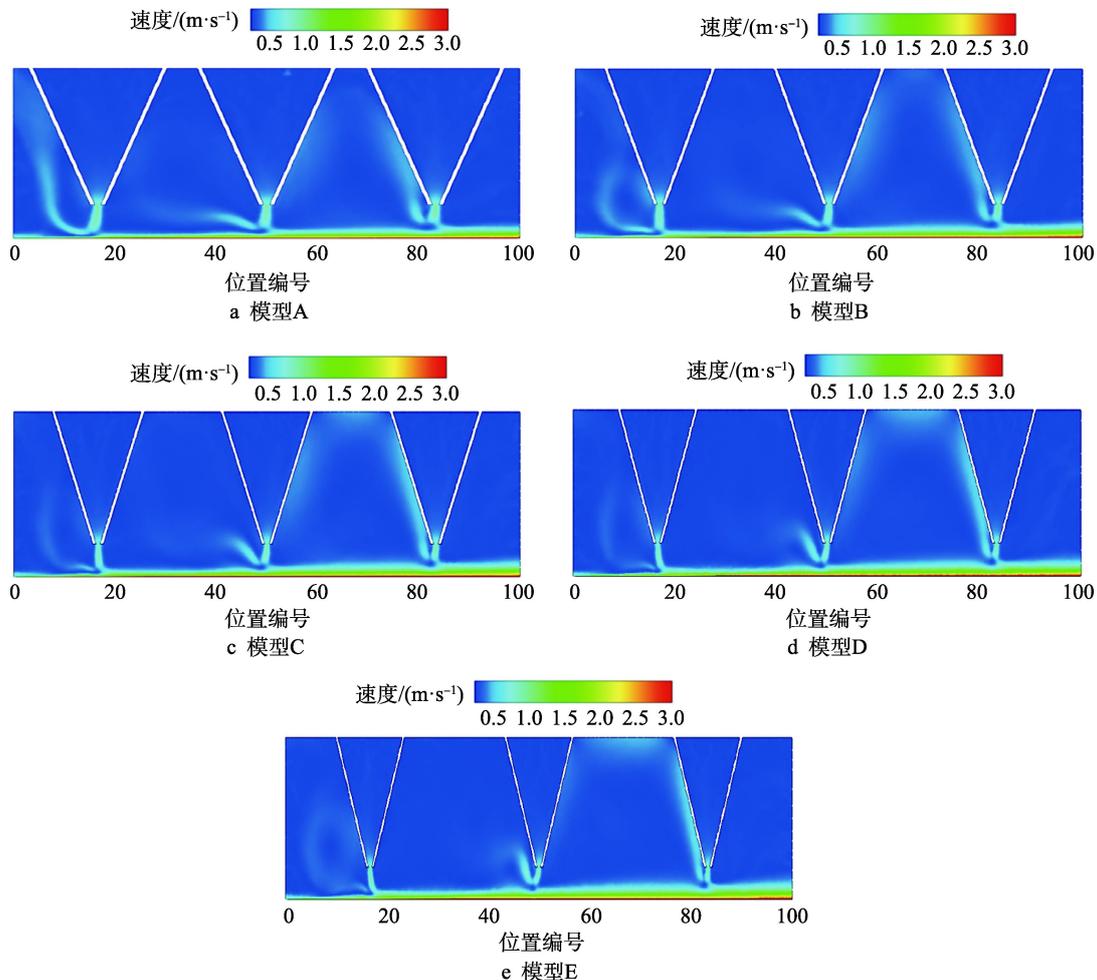


图4 速度场分布(A—E)
Fig.4 Distribution of velocity field (A-E)

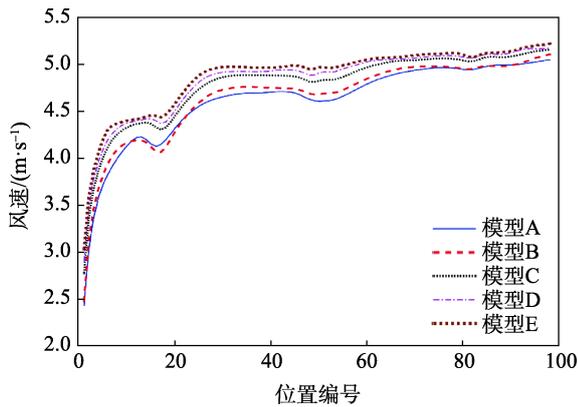


图 5 不同风嘴间距下的承印物表面速度分布
Fig.5 Velocity distribution of the surface of the substrate under different nozzle distances

2.2 承印物距离对烘干性能影响

模型 F, G, H, I 的速度场分布见图 7。在图 7 和图 8 中,研究在每组模型的承印物表面提取了 100 个点用于评价风场的大小,计算提取点的均值和方差并记录在表 3 中,对提取点的位置依次编号为 0—100,其中 0 点是承印物进入烘干区域的位置,第 100 点处是承印物离开时的位置,承印物向右侧运动。

表 2 不同风嘴间距下的承印物表面速度场特征值
Tab.2 Surface velocity field eigenvalues of the substrate under different nozzle distances m/s

模型	方差	均值
A	0.2008	4.6215
B	0.1968	4.6573
C	0.1612	4.7873
D	0.1490	4.8388
E	0.1359	4.8813

对比图 7 中的 5 组模型可见:随着风嘴与承印物之间距离的增加,仍然呈现出沿基材前进方向速度增大的趋势,说明承印物距离的增加没有改变承印物表面的速度分布。其速度分布见图 8,每组模型速度和均值见表 3。结合图 8 和表 3 可以发现,随着承印物距离的增加均值逐步降低,这次速度下降是承印物离出风口距离增加所致;方差则呈在一定范围内波动,相对于表 2 中的数据其变化很小。模型 F, G, H, I 的迹线图与图 6 近似,且呈现出明显变化规律,故在此不予赘述。

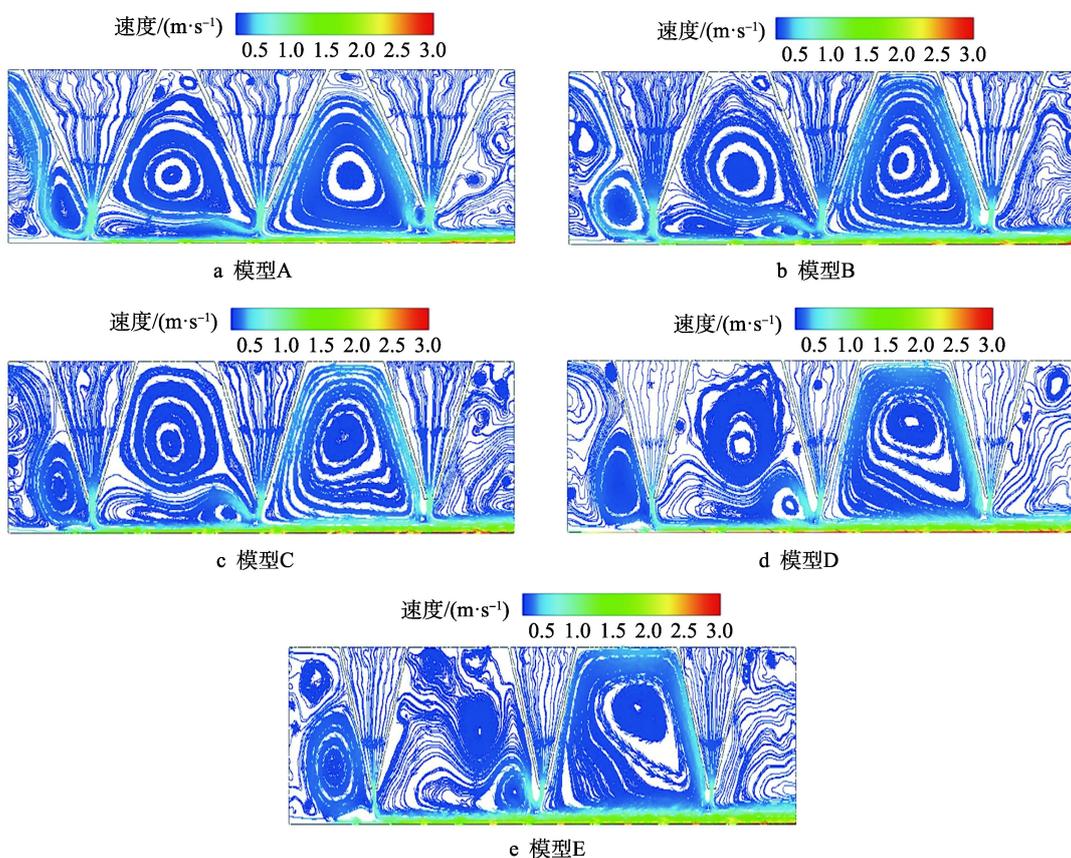


图 6 热风场迹线 (A—E)
Fig.6 Trace of hot wind field (A-E)

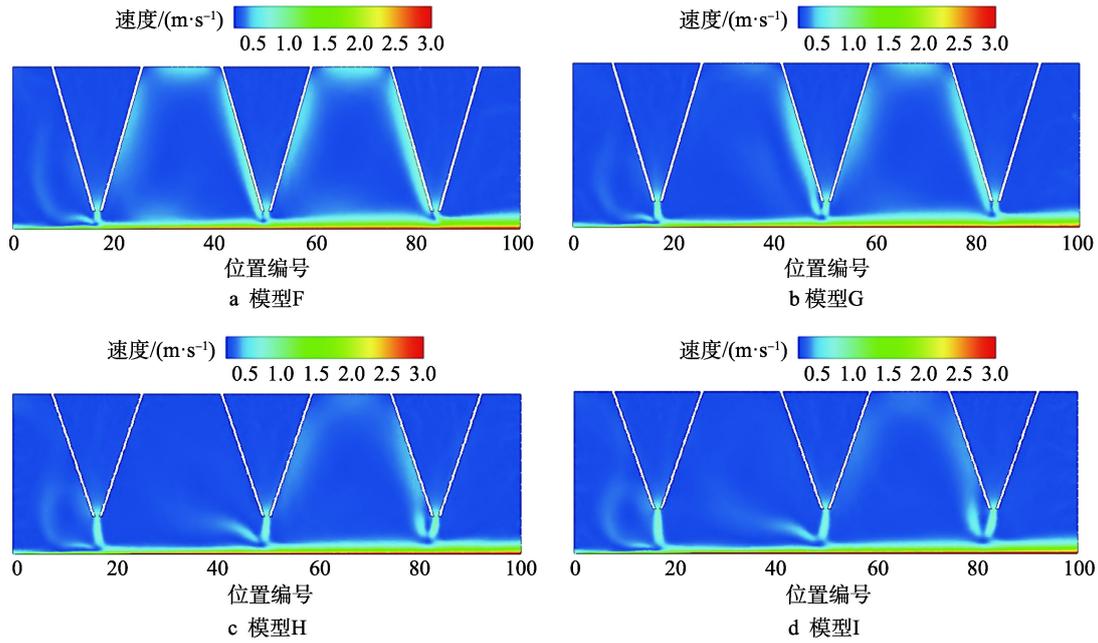


图7 速度场分布 (F—I)
Fig.7 The distribution of velocity field (F-I)

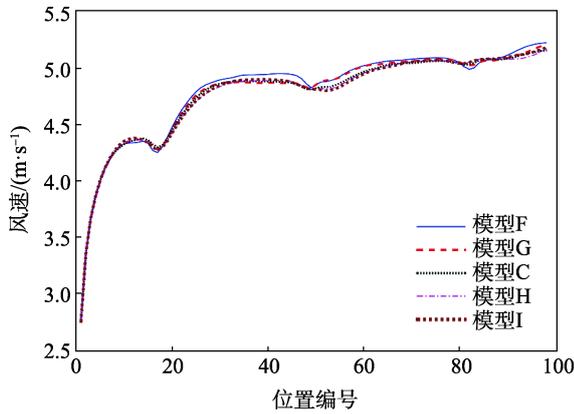


图8 不同承印物距离下的表面速度分布
Fig.8 Velocity distribution of the surface under different substrate distances

表3 不同承印物距离下的表面速度场特征值
Tab.3 Surface velocity field eigenvalues under different substrate distances

模型	方差	均值
F	0.1737	4.8170
G	0.1665	4.7977
H	0.1624	4.7816
I	0.1633	4.7843

3 参数回归分析

3.1 回归分析

对2组模型进行系统的定性分析,这里进一步对参数规律进行回归分析,形成有效经验模型,以便于

对企业实际生产发挥指导作用。从图5和图8可以看出,承印物上风速的大小除了跟 H, L 有关,还跟测量点自身位置有关(将每组模型的最左端定义为0,将其位置定义为变量 x ,单位为 mm)。研究进一步对承印物位置 x 、风嘴间距 L 、承印物距离 H 等参数与速度的关系进行回归分析。

通过常用函数拟合各组模型的风速和 x 的关系,发现多项式、指数逼近、幂函数逼近都可以得到较好的效果,但是由于多项式逼近和指数逼近参数较多,难以总结经验规律,故选择了待定参数最少的指数逼近函数,其基本形式见式(6),其中 v 为 x 处的速度。

$$v = ax^b \tag{6}$$

对模型A, B, C, D, E的数据进行拟合,得到参数见表4,可见随着 L 增大, a 增加而 b 减小,拟合的函数呈现明显的速度值递减趋势,符合仿真计算的结果。计算拟合方程的确定系数(R-square),确定系数在0~1之内,越接近1则拟合结果可靠。表4和表5中确定系数都在0.9以上,证明拟合结果较好。

表4 L 与 a, b 的关系
Tab.4 Relationship between L and a, b

模型	a	b	R-square
A	3.126	0.1068	0.9297
B	3.179	0.1044	0.9210
C	3.432	0.0911	0.9206
D	3.528	0.0865	0.9226
E	3.627	0.0813	0.9150

对模型 F, G, C, H, I 同样用式 (6) 进行回归分析, 得到参数见表 5, 可见随着 H 增大, 风速整体会有一定程度的降低, 但是 a 和 b 的数值几乎没有改变, 分别在 3.42 和 0.092 附近保持一定范围内波动, 可以近似用同一个拟合公式来表达。

表 5 H 与 a, b 的关系
Tab.5 Relationship between H and a, b

模型	a	b	R-square
F	3.422	0.0936	0.9109
G	3.419	0.0927	0.9245
C	3.432	0.0911	0.9206
H	3.419	0.0918	0.9227
I	3.422	0.0917	0.9180

综合上述分析不难发现, L 对风场规律的影响大于 H , 若采用幂函数逼近, 可得到较好的表征效果。通过建立与 L 相关的幂函数关系, 就可以用一个函数表征一组拥有同样 L 值的模型。

3.2 参数模型

L 跟 a 成正比, 与 b 成反比, 则将式 (6) 改写为式 (7) 的形式, 其中 m_1, m_2, n_1, n_2 为常数。

$$v = (m_1 L + m_2) x^{(n_1/L + n_2)} \quad (7)$$

式 (7) 表示 L, a 和 b 的近似关系, 根据表 4 结果进行拟合得到最终经验式, 见式 (8)。

$$v = (-0.007 \times L + 2.568) x^{4.311/L + 0.056} \quad (8)$$

3.3 模型验证

在一定范围内利用式 (8) 进行预测, 待检测模型参数记录在表 6 中, 仿真计算的结果记录在表 7 中, 对比二者可了解建立模型的正确性, 实际预测结果误差在 6% 以内, 考虑到回归分析误差在 5% 左右, 因此 L 值在讨论范围附近取值时, 用式 (8) 基本可以快速预测均值和方差, 从而判断设计方案的风场基本特性。仿真结果和计算结果的对比见图 9。

表 6 验证模型
Tab.6 Verification model

模型	L/mm	H/mm	$m_1 L + m_2$	$n_1 L + n_2$
T1	180	20	3.828	0.0799
T2	200	20	3.968	0.0775

表 7 结果对比
Tab.7 Comparison of results

模型	预测均值	预测方差	计算均值	计算方差
T1	5.125	0.129	4.907	0.121
T2	5.266	0.129	4.927	0.114

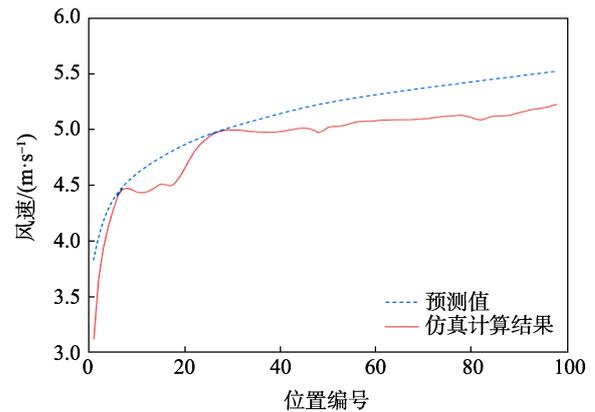


图 9 模型 T1 结果对比
Fig.9 Results comparison of model T1

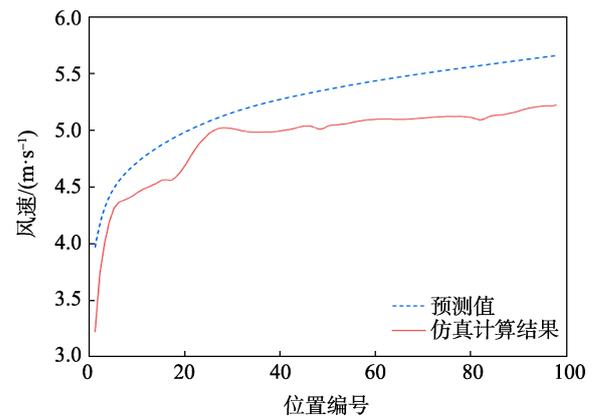


图 10 模型 T2 结果对比
Fig.10 Results comparison of model T2

在实际工程设计中, 烘箱整体尺寸是一个非常重要的因素, 若随意地增加 L , 会使设备体积成倍增大, 大幅提高制造成本, L 的增加还意味着空间的增大, 将无法形成稳定湍流导致烘干失败。参考图 1 中常见涂布、凹印、覆膜等设备, 其 L 范围大致为 100 ~ 200 mm, 式 (8) 基本适用。当进口风速等条件发生变化时, 数值虽有差异但是风场变化趋势基本相同, 仍可用式 (8) 进行初步烘干性能的判断。

4 结语

文中针对包装印刷设备的风嘴分布中关键参数进行了分析, 掌握了不同参数下的热风场分布规律, 对其进行了回归分析以用于指导实际生产, 主要结论如下所述。

1) 获取了不同风嘴间距和不同承印物距离下的热风场分布情况, 随 L 的增加速度值和稳定性有所上升, H 的改变则对整体风速影响不大。

2) 对于承印物而言, 其表面的速度沿着前进方向整体成逐渐上升趋势, 只在风嘴正下方区域存在局部的最小速度值区域, 这是由于湍流导致。

3) 在一定 L 取值区间范围内, 可以通过幂函数

$v=ax^b$ 的形式近似建立回归模型,其中 L 与 a 反比关系,与 b 成正比关系。当 L, H 在一定范围内时,可利用回归模型预测未知风场分布情况,省略数值仿真计算过程,提升设计效率。

此外,应当注意风嘴结构大小的变化会在一定程度上影响文中模型的准确性,但根据验证模型 T1 和 T2 计算分析,可知回归结果与数值仿真计算误差为 6%左右,在参数范围内文中获取风嘴分布参数规律仍基本适用。

参考文献:

- [1] LUNDSTRÖM J, VERIKAS A. Assessing Print Quality by Machine in Offset Color Printing[J]. Knowledge Based Systems, 2013, 37: 70—79.
- [2] 钟玲, 宗伦, 李江, 等. 论我国印刷行业的绿色转型[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(2): 46—49.
ZHONG Ling, ZONG Quan, LI Jiang, et al. On the Green Transformation of China's Printing Industry[J]. Environment and Sustainable Development, 2013, 38(2): 46—49.
- [3] 马利娥, 梅雪松, 李彦锋, 等. 薄膜传输系统导向辊的力学特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(11): 87—91.
MA Li-e, MEI Xue-song, LI Yan-feng, et al. Analysis of Mechanical Characteristics of Guide Rollers in Thin Film Transmission System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(11): 87—91.
- [4] INGRID A T, RAJENDRAKUMAR A, ASHA S P, et al. An Approach to Minimize Carbon Footprint for An Environmental Friendly Printing by Optimizing an Offset Machine in a Printing Facility[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 37: 514—527.
- [5] 武吉梅, 徐宗磊, 陈允春, 等. 凹版印刷机干燥箱流体动态分析及参数优化[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 53—57.
WU Ji-mei, XU Zong-lei, CHEN Yun-chun, et al. Fluid Dynamics Analysis and Parameter Optimization of Gravure Press Drying Oven[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 53—57.
- [6] HENRIK F D, THOMAS R A, MORTEN V M, et al. Roll and Roll-to-roll Process Scaling Through Development of a Compact Flexo Unit for Printing of Back Electrodes[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 140: 187—192.
- [7] 白文华, 包能胜, 许鹏, 等. 印刷涂布烘箱 V 型条缝喷嘴冲击射流流场的输纸模拟[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 28—32.
BAI Wen-hua, BAO Neng-sheng, XU Peng, et al. Numerical Simulation of V-shaped Slot Nozzle Impinging Jet of Printing and Coating Oven[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 28—32.
- [8] 王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 等. 包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2503—2506.
WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, et al. Evaluation and Screening of Volatile Organic Compound Control Technology in Packaging and Printing Industry[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2503—2506.
- [9] 刘健, 张海燕, 刘琳琳. 凹印机喷嘴风速损失问题的流体动力学分析[J]. 轻工机械, 2011, 29(3): 1—3.
LIU Jian, ZHANG Hai-yan, LIU Lin-lin. Fluid Dynamics Analysis about the Loss of the Velocity of the Air Nozzles of Gravure Press[J]. Light Industrial Machinery, 2011, 29(3): 1—3.
- [10] GAO Qiao-xia, SHEN Xian-wen. Oven Fluid Analysis and Parameter Optimization for Gravure Printing Machine YF93[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, Shenzhen, Peoples R China, 2015, 39: 1610—1614.
- [11] 张海燕, 刘金金, 薛志成, 等. 涂布机悬浮烘箱的结构参数优化[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 143—146.
ZHANG Hai-yan, LIU Jin-jin, XUE Zhi-cheng, et al. Optimization of Structural Parameters of Coating Machine Suspension Oven[J]. Mechanical Design and Research, 2015, 31(4): 143—146.
- [12] 张海燕, 刘金金, 徐卓飞, 等. 凹印机烘干装置风嘴横风板结构参数研究[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 94—99.
ZHANG Hai-yan, LIU Jin-jin, XU Zhuo-fei, et al. Study on Structural Parameters of Cross-winding Plate of Gravure Press Drying Device[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(23): 94—99.
- [13] LIU Lin-lin, LIU Jian, ZHANG Xiao-yan, et al. Analysis and Optimization of Hot Air-drying Device of a Gravure Printing Machine Based on Fluid Analysis[C]// 2nd International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science (ICFMD 2011), 2011: 121—126.
- [14] KIM S, NA Y. Study on the Web Deformation in Ink Transfer Process for R2R Printing Application[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(6): 945—954.
- [15] BASSAM A Y, LAURA M, NICHOLAS P. A Novel System for Water Disinfection with UV Radiation[J]. Water, 2018, 1275: 1—13.
- [16] 葛攀和, 郭键, 孙晓博, 等. 基于 SIMPLEC 算法的高温热管启动特性数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(11): 1974—1981.
GE Pan-he, GUO Jian, SUN Xiao-bo, et al. Numerical Simulation of Starting Characteristics of High Temperature Heat Pipe Based on SIMPLEC Algorithm[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(11): 1974—1981.
- [17] MOUKALLED F, DARWISH M. A Unified Formulation of the Segregated Class of Algorithms for Multi-fluid Flow at All Speeds[J]. Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals, 2010, 37(1): 103—139.