凹印机热风干燥箱射流场数值计算与分析

刘琳琳，由磊，孙正成，武吉梅
（西安理工大学，西安 710048）

摘要：目的 研究凹版印刷机热风干燥系统的工作特性，确定最佳干燥工艺参数。**方法** 以FR400凹印机干燥装置为研究对象，从油墨溶剂阶段性挥发的干燥机理出发，建立多束气体冲击平面射流干燥模型；通过Fluent完成干燥箱的流体场数值计算，基于干燥箱几何结构研究热风的复杂流动状态，分析湍流产生原因及对干燥效果的影响；通过数值切片技术，提取印刷品表面热风速度和温度值，研究干燥参量波动的范围和特征，讨论不同位置处热风不均匀特征和产生机理，以及不同区域干燥过程中风速和温度的变化特征。**结果** 干燥箱左腔体导流板两侧及右腔体上端产生湍流，风嘴之间形成了间隔分布的涡流区域；干燥箱中间区域风嘴的热风速度较为均匀，上、下两侧较差，中后部风嘴处热风温度较高，左侧区域效果较差。**结论** 热风干燥系统的几何结构对干燥效果的影响显著，合理的干燥箱结构设计和印刷图文布置有利于印品的干燥，为干燥系统优化改进与创新设计提供了依据。

关键词： 干燥机理；热风干燥；数值仿真；多物理场分析
中图分类号： TB486+.03　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3563(2015)17-0087-08

Jet Flow Field Numerical Calculation and Analysis on Hot-air Drying Oven of Gravure Press

LIU Lin-lin, YOU Lei, SUN Zheng-cheng, WU Ji-mei
(Xi′ an University of Technology, Xi′ an 710048, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to master characteristics of hot-air drying system, and obtain optimal drying technological parameters. Taking drying device of FR400 gravure press as the research subject, the paper researched drying and volatilizing mechanism of solvent in different stages, and established the multi-beam air impacting drying model for suspended hot-air drying device. The paper completed hot-air flow numerical simulation for drying cabinet through fluent, researched hot-air flow state based on structure of drying cabinet, and analyzed generation reasons of turbulence and the influence on drying effect. Air velocity and temperature on surface of presswork were extracted through numerical section technology, fluctuation range and features were analyzed, unevenness in different locations and the causes were discussed, and features of changes in velocity and temperature during the drying process were analyzed. Turbulence was generated on two sides of deflector in the left chamber and the upper right chamber of drying cabinet, and vortex region was formed between tuyeres in interval. The hot-air velocity was more even in the middle but worse at upper and lower sides; the temperature in tuyeres was higher in the middle and at the back, and the drying process was worse in left region. The geometric structure of hot-air drying system has a great influence on drying effect, and the reasonable design on drying cabinet and layout of the graphic area is conducive to drying of printing.

KEY WORDS: drying mechanism; hot-air drying; numerical simulation; multiphysics field analysis

收稿日期： 2014-12-21
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(11272253)；陕西省科技计划(2014JM8334)；陕西省教育厅科学研究计划自然科学项目(2013JK0996)；西安理工大学校科学研究计划(104-211106)
作者简介： 刘琳琳(1978—)，男，山东潍坊人，博士，西安理工大学讲师，主要研究方向为印刷包装设备现代设计方法。

在凹版印刷之后，热风干燥系统在极短时间内完成对印刷品的强迫干燥，使油墨中的溶剂彻底挥发，使印刷品表面的溶剂残留量得到有效控制[1]。干燥箱是凹版印刷机最主要的耗能单元，干燥箱的热风动力学性能及结构参数，直接影响印刷品的干燥效果和干燥箱的能耗[2]。目前，凹印机普遍采用的热风干燥箱内部结构复杂，导致热风流动状态复杂，影响了溶剂的挥发干燥效能。

针对提高凹印机的热风干燥效果，改进干燥箱结构，很多专家学者做了大量的研究。冯培勇[3]和王阿妮[4]等人对热风干燥印品机理进行了研究，建立了热风对流干燥参数与溶剂残留量之间的数学关系模型；刘建[5]对烘箱不同类型的风嘴进行了对比分析和结构改进；徐宗磊[6]建立了传统干燥箱热风输出与输入参数的关系；申宪文[7]得出烘箱内部热风流动状态，确定了热风的输入与输出关系，并根据分析结果对烘箱进行优化。在这些研究中，主要阐述了溶剂的挥发干燥过程和干燥箱内部热风流动的状态，并没有系统研究流场产生的机理及对干燥过程的影响。这里将从溶剂干燥机理入手，应用多束气体冲击射流模型对干燥箱进行数值仿真计算，研究复杂几何结构下内部热风流场，分析热风干燥速度和温度的分布特征，重点解决干燥不均匀导致的干燥效果不佳，以及简单结构设计造成的干燥能耗分布不合理问题，为高性能干燥系统的设计与开发提供理论依据。

1 凹印油墨热风干燥机理

1.1 溶剂挥发干燥阶段

凹印油墨由颜料、树脂和溶剂等成分组成，其溶剂的挥发需要消耗大量的热量，属于传热传质的物理化学过程[2]。目前，高速凹印机的干燥多采用热风对流模式，见图1。高速热风直接冲击油墨表面，将热量传递到油墨中，促使溶剂部分挥发。热风将挥发物带走，最终使油墨完全干燥。油墨中溶剂的干燥过程需要耗用的能量，表征为热风速度及承印材料表面的温度，热风干燥速度占主导位置[8]。根据能量和干燥速率变化情况，将油墨干燥的过程分为3个阶段[9—10]，见图2。

1）恒速干燥阶段。干燥箱中热风的热量到达承印材料表面，油墨中的液体溶剂以蒸汽形式从物料表面汽化排除，这个过程属于干燥的初始阶段，由外部条件控制，称为为恒速干燥阶段。此阶段油墨中的颜料粒子均匀分布在载体中，对挥发的阻隔作用可基本忽略，溶剂在热量和气流的作用下自由挥发干燥，溶剂由印品内部移动到表面的速度与印品表面的溶剂蒸发速度一致，干燥速度较快。

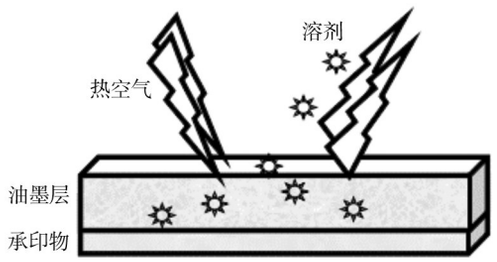


图1 凹印油墨干燥模型

Fig.1 Ink drying model of gravure printing

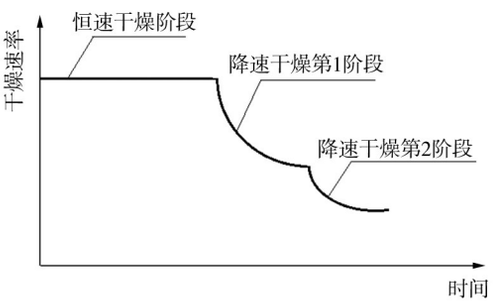


图2 印品干燥速率阶段

Fig.2 Phase diagram of drying rate in different stages

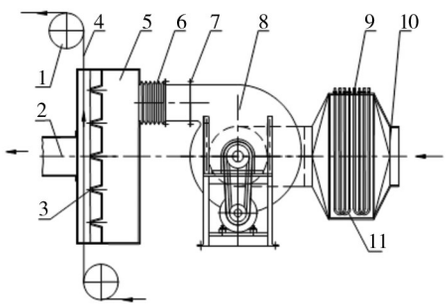
2）降速干燥第1阶段。恒速干燥油墨中的液体溶剂不断蒸发，油墨内部的湿分由内部条件控制不断迁移传递到物料表面，称之为降速干燥阶段。在这个过程中，由于物料表面没有足够的自由溶剂，热量传至湿物料后，物料开始升温并在其内部形成温度梯度，使热量从外部传递到内部，并且湿分从物料内部向表面迁移，颜料颗粒沉积到印刷品表面，剩余的溶剂需要穿过颗粒间的缝隙才能从印刷品表面挥发出来，挥发干燥速度较慢，干燥速度下降。

3）降速干燥第2阶段。当达到临界湿含量时，内部湿分的迁移成为控制因素，外部控制条件不再重要，承印材料能够在较高的温度下停留一定的时间，有利于油墨的干燥，属于补充干燥过程，该过程促使油墨干燥更彻底。在这个过程中热风速度对油墨干燥的作用不明显。

1.2 热风射流干燥模型

高速凹版印刷机通常采用悬挂式干燥装置对承印材料进行单面干燥，见图3。首先由加热管将空气加热，通过风机将加热的空气吹到烘箱中，再由风嘴

吹到承印材料表面,最后由排风道排出,一部分进入二次循环回路进行热能的二次利用[2]。



1.导纸辊 2.排风道 3.风嘴 4. 承印材料 5.烘箱 6.连接软管 7.卡口 8.风机 9.加热箱 10进风口 11.加热管

图3　悬挂式热风干燥装置

Fig.3 Suspended hot air drying device

在凹印机干燥系统中,被加热的空气在压差的作用下通过狭长的窄缝型风嘴向外射出,经过自由射流区形成高速气流,垂直(或成一定倾角)冲击到距离风嘴缝隙一定距离的印刷料膜上,作平面扩散运动形成贴壁射流区,中间形成热风滞留。由于采用多排风嘴结构形式,风嘴之间射流交互扰动,属于多束气体冲击平面射流干燥,见图4。热风在形成稳定的流动形态后,由风嘴出口开始向内、外扩展的掺混区域,在紧靠喷嘴的很小过渡区内(其长短与雷诺系数有关)高速射流造成剪切层,剪切层自然不稳定地迅速增长,卷席周围流体形成涡流。涡流与热风能量损失和溶剂蒸汽流动速度有很大关系,进而影响干燥速率[5,11]。

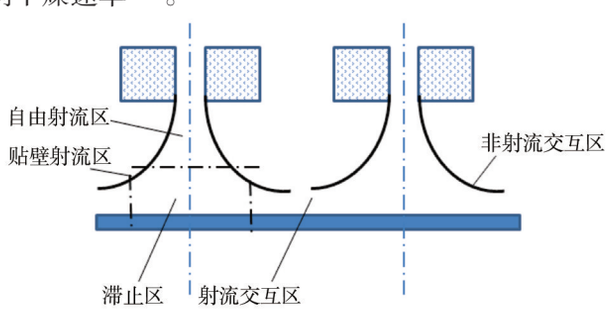


图4　多束气体冲击平面射流干燥模型

Fig.4 Multi-beam air impacting jet drying model

2　热风干燥系统流体计算模型

2.1　流体计算几何模型

计算流体动力学(CFD)应用数学离散方法,由质量、动量和能量守恒定律分别导出连续性方程、动量方程和能量方程,施加反映流体流动特殊性质的数学模型和边界条件、初始条件,构成封闭的方程组,可以描述特定流场、流体的流动规律,以便对流场问题进行精确研究,从而解决各种实际问题[12]。

根据FR400凹版印刷机干燥箱建立的研究模型见图5。图5中的导流板将进口热风导流至上、下腔体。其中,定义最下部风嘴为风嘴1,由下向上依次定义13排风嘴。

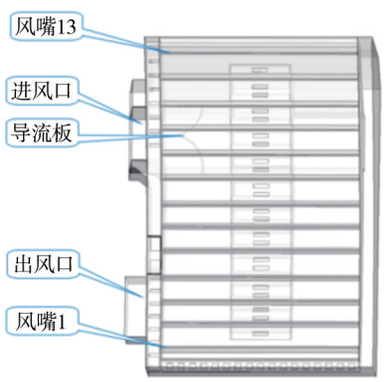


图5　干燥箱三维模型

Fig.5 3D model of drying cabinet

采用FLUENT前处理软件Gambit对模型进行网格离散化。采用非结构化网格,面的网格划分中主要采用四边形网格,指定区域采用三角形网格单元;主体采用四面体网格,局部位置采用六面体、楔形体和椎体网格进行混合网格划分。在热风风嘴及导流板处对网格进行局部加密,精确捕捉热风流动状态[13]。共划分网格4 869 484个。

2.2　流体计算边界条件

2.2.1　壁面边界条件及物理性质

设定干燥箱壁面绝热、无滑移,采用标准壁面函数,根据干燥箱的壁面质量,给定表面粗糙度为0.005 m,空气密度 ρ =1.205 kg/m^3,粘性系数 μ =1.7894 × 10^{-5} Pa·s,比热 C_p=1006.43 J/(kg·K),热传导率 ε = 0.0242 W/(m·K)^2。

2.2.2　热风进出口边界条件

通过计算,确定其湍流强度 k 及湍流耗散率分别为0.39 t和1.86,风机转速为2232 r/min,进口压力为3929 Pa,进口温度为360 K。设定参考压强为0,生产工艺需要保证干燥箱内腔外部压力在-10 ~ -20 Pa之间,根据要求调整出口压力。

2.2.3　求解方法及求解控制参数

根据干燥箱中热风的流动特性,针对三维的定常

流动，选用三维单精度分离式求解器，采用隐式方法将离散的非线性控制方程线性化。选择SIMPLE作为控制方程求解方法及二阶离散格式，压力欠松弛因子系数取0.3，能量欠松弛因子系数取0.8，其他采用默认值。监测参数中收敛标准，使运动控制方程及动力学控制方程的迭代残余量逼近10^{-3}，能量控制方程的迭代残余量逼近10^{-6}。

3 干燥箱热风流动状态分析

经过Fluent分析后，提取干燥箱内腔单个质点在连续时间内的流动轨迹线图（见图6），分析热风在干燥箱内的流动状态。

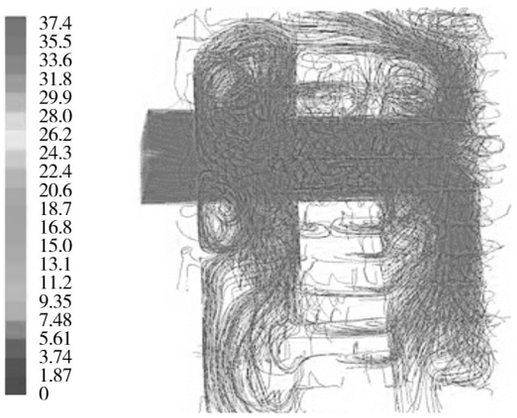


图6 干燥箱迹线

Fig.6 Trace map of drying cabinet

热风进入干燥箱后，由于流道截面变化及热风与干燥箱内壁的相互作用，在左半部腔体导流板两侧及右半部腔体上端产生湍流。热风进入干燥箱内部后截面突然变大，由于前后压差分布不对称，产生较大的压差阻力，并产生边界层分离现象；前进的热风碰到导流板后方向发生改变，并与附近壁面相互作用形成左半部腔体湍流；热风由进风通道进入干燥箱右部腔体，少部分热风向右运动，大部分热风由干燥箱后部向前部运动，2个方向的热风相互作用，并与壁面相互碰撞，又由于进风处靠近腔体右部上端，其空间相对较小，故右部腔体仅在此处产生湍流。受到左右腔体进风方式不同的影响，进风口正对处连接圆管热风流量较多，连接圆管热风主要由内腔体右部内腔流入，流量较少。

此外，干燥箱在2个风嘴之间形成涡流，以涡旋式向右运动，主要靠右侧回风，在风嘴9—13的热风由上排风口排出，其余风嘴的热风由下排风口排出。大部分热风从下排风口抽出，有效增加了承印材料与热风的接触时间，干燥效果更好。

与风嘴长度垂直方向，对应内腔腔体提取流线切面见图7。图7显示了内腔热风瞬间气流的运行状态，箭头表示气流的流向，流线的指向与相应点风向相切。左腔热风由进风口进入后，受导流板作用，到达不同风嘴的热风出现少量紊流特性，主要仍为层流；右腔热风主要由干燥箱背侧导入，流经风道结构规则，呈现良好的平面层流特性。

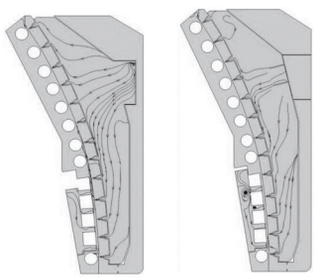


图7 流线切面

Fig.7 Streamline section

与风嘴长度垂直方向提取迹线切面见图8。图8显示了从风嘴吹出后的热风，在2个风嘴之间与承印材料及壁面构成的空间内的流动状态。

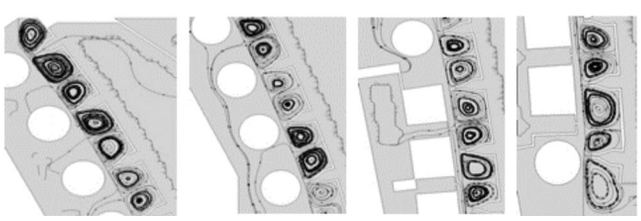


图8 风嘴位置迹线切面

Fig.8 Trace section of tuyere

风嘴喷出的热风到达印刷品后向两侧回流，相邻风嘴之间2回流区相遇形成涡流区域，涡流区大小和形状受风嘴位置、排布间距、风嘴结构尺寸等的影响，呈对的间隔分布。涡流区域的产生能够扩大油墨干燥区域，加速纸张表面的能量交换，有利于油墨的干燥。

4 干燥箱热风速度分析

为了直观地分析干燥箱内热风的流动状态，定量分析承印材料表面热风的工作特性，沿垂直风嘴长度方向切7个距离相等的切片（切片1至切片7）来表征承印材料上不同的位置区域。提取垂直风嘴出口平面12 mm处的热风速度、温度作为承印材料的表面干燥参数。

承印材料不同切片位置处的热风速度见表1。由表1可见,风嘴出风速度在20.743～28.511 m/s之间变化,不同位置的最大速度差为7.768 m/s,各风嘴处平均速度最大相差1.207 m/s,平均速度为24.158 m/s。分析承印材料不同切片位置的风速,切片3方差最小为1.277,切片6方差最大为3.358,说明在承印材料干燥切片3处的波动最小、切片6处最大。以平均风速表征不同区域的干燥能力或干燥效果,印刷品最左侧位置(切片1)、中间偏右位置(切片5)处的干燥效果较差,最右侧干燥效果最好。

表1　承印材料不同位置处的热风速度

Tab.1 Hot air velocity in different locations of substrate　　m/s

切片位置	1	2	3	4	5	6	7	平均速度	横向方差
风嘴1	23.643	24.145	26.543	21.649	25.51	20.743	24.853	23.869	4.273
风嘴2	22.109	24.455	27.498	25.517	24.745	26.823	24.406	25.079	3.144
风嘴3	25.85	21.975	24.687	26.251	24.348	24.261	27.575	24.992	3.189
风嘴4	25.586	25.257	25.395	26.206	25.539	25.996	26.654	25.805	0.251
风嘴5	24.528	26.331	24.72	25.759	23.991	26.255	26.123	25.387	0.909
风嘴6	28.511	27.115	26.255	25.834	22.416	27.459	27.846	26.491	4.056
风嘴7	25.078	25.128	24.074	22.115	24.088	23.394	25.414	24.184	1.355
风嘴8	22.904	26.413	24.393	25.362	23.855	26.141	25.979	25.006	1.744
风嘴9	25.884	27.629	25.693	26.371	25.596	27.215	24.405	26.113	1.165
风嘴10	25.743	23.88	24.889	25.912	24.78	25.494	22.842	24.791	1.216
风嘴11	24.12	25.147	23.246	23.727	25.495	25.538	27.233	24.929	1.829
风嘴12	24.462	24.229	25.668	24.636	26.796	25.293	25.413	25.214	0.771
风嘴13	24.278	24.435	24.654	27.631	23.497	26.879	24.939	25.188	2.238
平均速度	24.823	25.087	25.209	25.151	24.666	25.499	25.668		
纵向方差	2.561	2.292	1.277	2.944	1.297	3.358	2.05		

4.1　热风速度均匀性分析

风嘴沿横向位置的速度变化曲线见图9,横向位置1—7对应切片1—7处。图9表明了每排风嘴出风速度的变化及均匀程度。根据干燥箱体的几何结构,分析干燥系统几何结构与热风速度之间的关系。

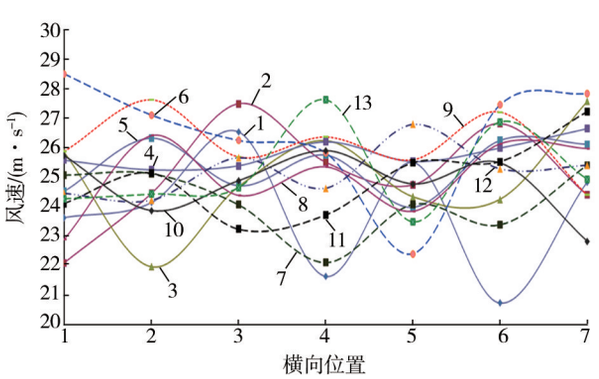


图9　风嘴沿横向位置的速度变化曲线

Fig.9 Velocity change curve of tuyere along horizontal positions

1) 左右腔体向下的热风遇到壁面碰撞后回旋进入风嘴1、2,相互扰动,呈正弦波状波动,风速均匀性差。

2) 进入风嘴3,4的热风来自左右腔内湍流两侧的热风,左右对称,在整个风嘴长度上呈现"W"形风速分布。受位置影响,风嘴3风速均匀性较差,风嘴4风速均匀性好。

3) 风嘴6位于2个湍流交汇中心位置,扰动明显,圆管右侧风速较低,波动明显;风嘴5,7位于两侧,风速均匀性好。

4) 风嘴8到风嘴12的左腔进风受导流板影响,风速均匀性良好。其中,风嘴10位于2导流板的中间。

5) 风嘴13位于干燥箱顶部,左右腔内均受顶部湍流影响,呈现正弦状波动,均匀性较差。

4.2　热风速度动态分析

印刷品依次经过风嘴1—13,将风嘴的位置等效为印刷品在干燥箱内干燥的类时间历程,绘制热风速度随时间变化曲线,定义风嘴1—3为预干燥阶段,风嘴4—10为恒速干燥阶段,风嘴11—13为降速干燥阶段。印刷品不同区域在不同干燥阶段的风速变化见图10。在图10中,区域1—7对应切片1—7处,左右腔

体对称，风速变化趋势相似。

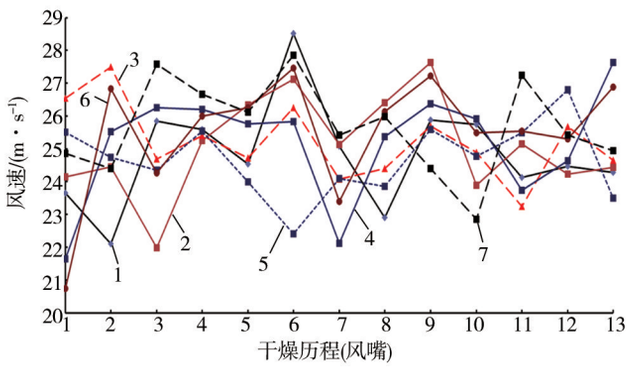


图10 热风速度随时间变化曲线

Fig.10 Changing curve of hot air velocity along time

1）切片1，7的印刷品左右两侧区域受侧壁影响，进入干燥箱后在预干燥阶段风速呈"V"形波动，在恒速干燥阶段呈锯齿状较大波动，中间阶段（风嘴6处）风速较高，在降速干燥阶段风速较为平稳。

2）在切片2，6区域，热风进入烘箱后在预干燥阶段风速波动较大，在恒速干燥阶段风速呈"M"形较大波动，在中间阶段（风嘴7处）风速较低，降速干燥阶段风速平稳。

3）在切片3，4，5处承印材料的中间区域，受中间圆管的作用，热风进入烘箱后在预干燥阶段风速波动较大，在恒速干燥阶段风速呈平缓"V"形状波动，在恒速干燥中间阶段（风嘴6，7处）风速较低，而在降速干燥阶段风速波动较大。

5 干燥箱热风温度分析

在油墨溶剂的挥发过程中，热风温度也是重要干燥指标，需掌握热风干燥箱热风温度的分布特征。该研究设定进口热风温度为360 K，采用绝热外壁面（即不考虑空气与烘箱之间的对流换热过程），提取承印材料表面温度分布云图，按照速度场分析方法进行切片并提取数据，获得承印材料上对应风嘴不同位置处的温度，结果见表2。

热风温度随时间变化曲线见图11。图11表明了印刷品不同区域干燥阶段经历的风温变化。干燥箱内温度变化在338.281~341.775 K之间，最大温差为3.494 K，平均温度为340.561 K。相对风速变化，温度

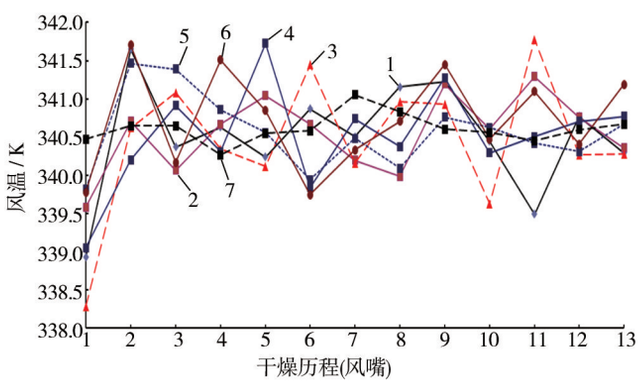


图11 热风温度随时间变化曲线

Fig.11 Changing curve of hot air temperature along time

表2 承印材料不同位置处的温度

Tab. 2 Temperatures of substrate in different locations K

切片位置	0	1	2	3	4	5	6	平均温度	横向方差
风嘴1	338.93	339.586	338.281	339.055	339.826	339.777	340.473	339.418 285 7	0.516 545 905
风嘴2	341.648	340.707	340.62	340.202	341.467	341.704	340.65	340.999 714 3	0.353 860 238
风嘴3	340.371	340.066	341.08	340.914	341.391	340.172	340.648	340.663 142 9	0.241 642 143
风嘴4	340.632	340.67	340.345	340.311	340.857	341.511	340.266	340.656	0.190 007 333
风嘴5	340.239	341.042	340.119	341.724	340.561	340.849	340.55	340.726 285 7	0.295 801 238
风嘴6	340.867	340.668	341.445	339.841	339.94	339.746	340.585	340.441 714 3	0.392 629 905
风嘴7	340.505	340.196	340.159	340.739	340.487	340.335	341.052	340.496 142 9	0.099 639 476
风嘴8	341.159	339.987	340.959	340.378	340.097	340.707	340.83	340.588 142 9	0.197 131 476
风嘴9	341.22	341.194	340.929	341.273	340.762	341.447	340.601	341.060 857 1	0.092 555 81
风嘴10	340.447	340.603	339.628	340.297	340.626	340.474	340.559	340.376 285 7	0.121 317 905
风嘴11	339.492	341.291	341.775	340.508	340.421	341.097	340.455	340.719 857 1	0.548 958 143
风嘴12	340.771	340.76	340.267	340.706	340.309	340.408	340.598	340.545 571 4	0.046 296 286
风嘴13	340.295	340.361	340.276	340.771	340.671	341.188	340.668	340.604 285 7	0.106 607 238
平均温度	340.506	340.549	340.453	340.517	340.57	340.724	340.61	340.561 285 7	0.007 636 571
纵向方差	0.509	0.246	0.776	0.428	0.24	0.412	0.035	0.378	

波动并不明显。

不同区域的温度变化相似,刚进入干燥箱时(风嘴1处)热风温度最低,之后风温升高,呈现平缓的锯齿状波动,在恒速干燥过程中(风嘴9,10,11处)热风温度较高,印刷品左侧区域热风温度波动比右侧区域明显。以平均温度表征不同局域的干燥能力或干燥效果,对应右腔体中间位置(切片6处)干燥效果最好。

6 结语

基于油墨干燥方式和干燥机理,分析建立热风干燥系统模型;对热风在干燥箱中流动过程进行流场数值计算,结合干燥箱的几何结构对比分析热风迹线,得到干燥箱内热风流动状态;研究关键位置处热风速度场和温度场,获得速度、温度分布与变化。研究结果表明:热风冲击承印材料符合多束气体冲击平面射流干燥模型,热风干燥系统符合湍流模型,可由此建立CFD热风仿真模型;干燥箱左腔体导流板两侧及右腔体上端产生湍流,风嘴之间形成间隔分布的涡流区域,有利于油墨干燥。干燥箱主要靠右侧回风,应采取上下排风口设计,考虑溶剂聚集,上回风应设置在涡流区域下方;印刷品表面的热风速度在20.743~28.511 m/s之间振荡波动,中间风嘴处较为均匀,上下两侧较差。印刷品不同区域的干燥历程不同,左侧区域效果较差,应尽量减少印刷图文布置;印刷品表面热风平均温度为340.561 K,中后部风嘴处热风温度较高,温度波动不明显,对应右腔体中间位置干燥效果最好。

参考文献:

[1] 汪维力,陈文革. 凹版印刷机干燥系统探析[J]. 包装工程,2008,29(6):98—100.
WANG Wei-li, CHEN Wen-ge. The Analysis on Drying System of Gravure Press[J]. Journal of Packaging Engineering, 2008,29(6):98—100.

[2] 卑江艳. 凹版印刷[M]. 北京:化工工业出版社,2002.
BEI Jiang-yan. Gravure Printing[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2002.

[3] 冯培勇. 塑料凹印机干燥系统参数的优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.
FENG Pei-yong. Parmeter Optimization of Dry System of Plastic Gravure Printing Machine[D]. Xi′an: Xi′an University of Technology,2006.

[4] 王阿妮. 塑料凹印热风干燥参数优化设计[D]. 西安:西安理工大学,2008.
WANG A-ni. Parmeter Optimization of Plastic Gravure Printing Machine Hot Air Drying [D]. Xi′an: Xi′an University of Technology,2008.

[5] 刘建. 凹印机热风干燥装置分析与结构优化[D]. 西安:西安理工大学,2011.
LIU Jian. Analysis and Structure Optimization of Hot Air Drying Device in a Gravure Printing Machine[D]. Xi′an: Xi′an University of Technology,2011.

[6] 徐宗磊. 凹印机干燥箱流体动态特性分析及参数优化[D]. 西安:西安理工大学,2011.
XU Zong-lei. Analysis of Fluid Dynamic Characteristic Analysis and Parameter Optimization of Drying Mechanism in a Gravure Printing Machine[D]. Xi′ an: Xi′ an University of Technology,2011.

[7] 申宪文. YF93凹印机热风烘箱流体分析及结构优化[D]. 西安:西安理工大学,2013.
SHEN Xian-wen. The Hot-air Fluid Dynamic Analysis and Structure Optimization of the YF93 Oven for the Gravure Printing Machines[D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 2013.

[8] 范治新. 工程传热原理[M]. 北京:化学工业出版社,1982.
FAN Zhi-xin. Principle of Heat Transfer in Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press,1982.

[9] 赵新. 浅谈油墨干燥类型及干燥机理[J]. 广东印刷,2001(1):29—30.
ZHAO Xin. Introduction OnInk Drying Types and Drying Mechanism[J]. Guangdong Printing,2001(1):29—30.

[10] 伍钦. 传质与分离过程[D]. 广州:华南理工大学,2005.
WU Qin. Mass Transfer and Separation Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2005.

[11] 黄清明. 凹版印刷机干燥箱温度优化控制系统研究与设计[J]. 制造业信息化,2008(11):72—75.
HUANG Qing-ming. Research and Design for Temperature Optimized Control System of Drying Oven to Gravure Press [J]. Journal of Manufacturing Informatization,2008(11):72—75.

[12] 王经. 传热学与流体力学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007.
WANG Jing. Basis of Heat Transfer and Fluid Dynamics[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press,2007.

[13] 刘宏丽,孟涛. 流体力学:泵与风机[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
LIU Hong-li, MENG Tao. Fluid Dynamics: Pump and Air Blower[M]. Beijing: China Electric Power Press,2008.

[14] 武吉梅,徐宗磊. 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(6):52—57.
WU Ji-mei, XU Zong-lei. Fluid Dynamic Analysis and Parametric Optimization for Drying-oven of a Gravure Printing Machine[J]. Journal of Vibration and Shock.2012(6):52—57.

[15] 武吉梅,申宪文. 凹版印刷机YF93烘箱流体分析及参数优

化[J]. 振动与冲击,2013(22):63—67.
WU Ji-mei, SHEN Xian-wen. Oven Fluid Analysis and Parameter Optimization for Gravure Printing Machine YF93 [J]. Journal of Vibration and Shock.2013(22):63—67.

[16] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method [M]. England:Longman Group Ltd,1995.

[17] Ma C F, ZHENG Q, SUN H, et al. Local Convective Heat Transfer from a Vertical Flat Surface to Oblique Submerged Impinging Jets of Large Prandtl Number Liquid[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,1998,17:238—247.

[18] PICH A L. Optimization of a UV Curable Acrylate-based Protective Coating by Experimental Design[J]. Progress in Organic Coatings,2008,63(1):55—62.

[19] CHOW P, CROSS M, PERICLEOUS K. A Natural Extension of the Conventional Finite Volume Method into Polygonal Unstructured Meshes for CFD Application.App[J]. Math Modelling,1996,20:170—183.

[20] VANDOORMAL J P, RAITHBY G G. Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows [J]. Numerical Heat Transfer,1984(7):147—163.

(上接第55页)

参考文献:

[1] 阳培翔,谢亚,牟信妮. 节约型社会纸包装结构设计应用[J]. 包装工程,2013,34(7):126—129.
YANG Pei-xiang, XIE Ya, MOU Xin-ni. Applications of Paper Packaging Structural Design in Conservation-oriented Society[J]. Packaging Engineering,2013,34(7):126—129.

[2] 詹伟锋. 低碳理念下的包装设计[J]. 莆田学院学报,2012,19(3):65—70.
ZHAN Wei-feng. On the Package Design with the Guidance of the Concept of Low-carbon Design[J]. Journal of Putian University,2012,19(3):65—70.

[3] 孙诚,黄利强,王涛,等. 包装结构设计[M]. 第四版.北京:中国轻工业出版社,2014.
SUN Cheng, HUANG Li-qiang, WANG Tao, et al. Packaging Structure Design[M]. 4th Edition.Beijing: China Light Industry Press,2014.

[4] 孙诚,牟信妮,魏娜,等. 包装结构与模切版设计[M]. 第二版.北京:中国轻工业出版社,2014.
SUN Cheng, MOU Xin-ni, WEI Na, et al. Package Structure & Die-cutting Plate Design[M]. 2nd Edition.Beijing: China Light Industry Press,2014.

[5] 王俊艳. 合理拼版为纸盒后道加工提供保障[J]. 印刷技术,2013(7):29—31.
WANG Jun-yan. The Reasonable Layout of Carton Provide Guarantee for the Post-press Finishing[J]. Printing Technology,2013(7):29—31.

[6] 刘超. 套拼纸盒时需考虑的几个工艺问题[J]. 印刷世界,2010(10):35.
LIU Chao. Several Technological Problems to Carton Layou[J]. Print World,2010(10):35.

[7] 杨文杰,刘浩学. 包装盒形拼版的实现[J]. 包装工程,2005,26(4):82—83.
YANG Wen-jie, LIU Hao-xue. Implement of Packaging Carton Layout[J]. Packaging Engineering,2005,26(4):82—83.

[8] 姜帅. 优化排样技术在包装印刷中的应用[J]. 包装工程,2007,28(12):68—70.
JIANG Shuai. Application of Optimum Layout Technology in Package Printing[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(12): 68—70.

[9] 李云霄,和克智. 纸盒拼版方法研究[J]. 包装工程,2010,31(7):126—128.
LI Yun-xiao, HE Ke-zhi. Discussion on Methods for Carton Imposition[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 126—128.

[10] 王月圆,刘美聪,戴俊萍. 印刷企业如何提高纸张利用率[J]. 印刷杂志,2012(11):35—37.
WANG Yue-yuan, LIU Mei-cong, DAI Jun-ping. How to Improve the Utilization Rate of Paper to Printing Enterprises[J]. Printing,2012(11):35—37.

[11] Pepin van Roojen. Special Packaging[M]. Amsterdam:The Pepin Press BV,2011.

[12] Pepin van Roojen. Advanced Packaging[M]. Amsterdam: The Pepin Press,2010.

[13] Pepin van Roojen. Complex Packaging[M]. Amsterdam: The Pepin Press,2010.

[14] CHEN Jin-ming. 1000 Packaging Structure[M]. Hong Kong: Design Media Publishing Limted,2011.

[15] Pepin van Roojen. Fancy Packaging[M]. Amsterdam: The Pepin Press,2010.