

印刷机进风系统的结构分析与优化

赵庆海, 朱阁顺, 赵坤昊
(西安理工大学, 西安 710048)

摘要: **目的** 研究凹印机烘箱进风管道的结构, 以减少管道内的涡流, 提高热风流动均匀性。**方法** 建立烘箱结构的三维模型和进风管道的流体域, 确定进风系统管道结构数值模拟的可行性研究方案。设计制作烘箱管道结构的实验模型。验证理论研究和数值模拟结果的正确性。**结果** 实验结果表明, 流场的速度及压力特性与数值模拟的特征结果具有较好的一致性。**结论** 通过三维结构建模、仿真分析和实验验证, 提高了管道的热风效率, 节约能耗效果显著。

关键词: 凹印机; VOC; 烘箱; 管道

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0130-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.025

Structural Analysis and Optimization of Printing Machine Air Intake System

ZHAO Qing-hai, ZHU Ge-shun, ZHAO Kun-hao
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to study the structure of the air intake duct of the gravure machine oven to reduce the eddy current in the pipeline and improve the uniformity of the hot air flow. The 3D model of the oven structure and the fluid domain of the intake duct were established to determine the feasibility study plan of the pipe structure numerical simulation of the air intake system. The experimental model for oven pipeline structure was designed and fabricated. The correctness of theoretical research and numerical simulation results was verified. The experimental results showed that the velocity and pressure characteristics of the flow field were in good agreement with the characteristic results of the numerical simulation. Through the 3D structural modeling and simulation analysis and experimental verification, the hot air efficiency of the pipeline is improved, and the energy saving effect is remarkable.

KEY WORDS: gravure press; VOC; oven; pipeline

目前现有的烘箱进风系统质量和热交换的效率很低, 风压损失大, 其主要原因是烘箱进风管道系统结构不合理, 从而导致风速流场均匀性很低^[1-2]。对于管道结构的优化, Sudo^[3-4]等对圆形及方形弯管内的流场进行了实验研究, 对其内部紊流进行了研究与分析。Djunaedy^[5]等在微观层面上, 研究了对于空气流动预测精度, 散流器模型不同的描述方法。Sun^[6]等通过分析散流器的特性, 研究设计了散流器的排布, 改善了空调房的送风和回风结构。于 VOC 的治理问题已成为国内外学者及企业的研究热点。Liu 等

通过活性炭进行变压吸附, 在苯氮混合气中回收苯, 得到其回收率为 99%^[7]。Reichhold^[8]等建立了连续吸附/解吸的循环流化床, 实验分离的 VOC 达 60%。Chiang^[9]等探究活性炭对混合气体(苯、甲苯、二甲苯)各成分的吸附效率。文中通过三维软件 SolidWorks 对凹印机烘箱干燥装置整体进行三维建模。对烘箱进风系统的热风流场进行仿真及分析。对管道结构的弯管结构进行优化, 设计制作烘箱管道结构的实验模型, 结合实验对研究方法进行修正, 并且通过仿真与实体实验对比分析, 对理论研究和数值模拟结果的正

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 陕西省自然科学基金(2016JQ5038)

作者简介: 赵庆海(1964—), 男, 硕士, 西安理工大学教授, 主要研究方向为测控技术在印刷包装工程中的应用。

确性进行进一步的验证。

1 烘箱管道初始模型的建立与仿真分析

1.1 管道模型的建立

以凹印机烘箱的管道结构为研究对象, 通过对其进行数值模拟和分析, 实现对干燥结构的优化, 并降低 VOC 的排放。干燥装置管道的三维模型是通过三维软件 SolidWorks 按照企业设备实体建立的三维模型。在保证精度的前提下, 对干燥装置的部分相对复杂的结构进行了适当的简化, 见图 1。

烘干系统中热风的流动主要依靠风机完成, 在风机的作用下, 新进入的空气及回风管道的热风通过加热器加热到所需温度后, 经过风道、风挡以及曲折的管道, 经进风口被送入烘箱体内, 对基材进行干燥, 干燥完成的热风经风机从烘箱内抽出, 一部分由到排风机直接排出, 另一部分重新进入管道系统中, 经处理后进行二次利用^[10]。

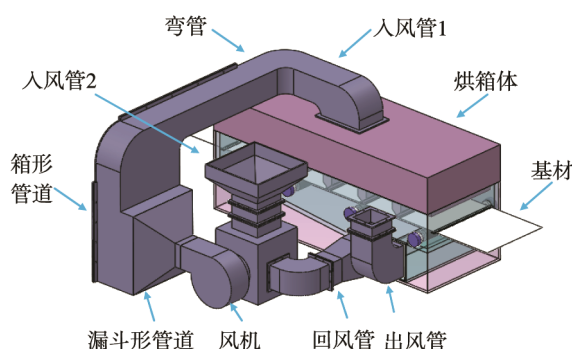


图 1 烘箱干燥装置的三维模型
Fig.1 The 3D model of oven's drying device

1.2 CFD 数值模拟

计算流体力学简称 CFD。通过 Fluent 软件分析, 模拟热风从回风口出风到入风口进风的速度场及压力场等情况, 结合仿真与计算的结果与原结构进行对比分析, 从而评价改进结构的优化效果。通过 SolidWorks 软件对要求解的问题进行三维模型的建立, 然后通过 Gambit 软件进行网格的划分, 并进行边界条件的设定^[11-12], 然后将网格文件输出为可用于 Fluent 模拟的格式。采用非结构化网格进行网格的划分。将流体模型导入 Gambit 中进行网格划分。其网格总数为 168 225 982, 烘箱管道结构的网格划分见图 2。

1.3 仿真结果分析

在 Fluent 软件中, 默认的收敛标准为: 除了能量残差值, 当所有变量的残差值均降低到 10^{-3} 时, 即可判定为计算收敛。文中是通过观测残差曲线, 并结

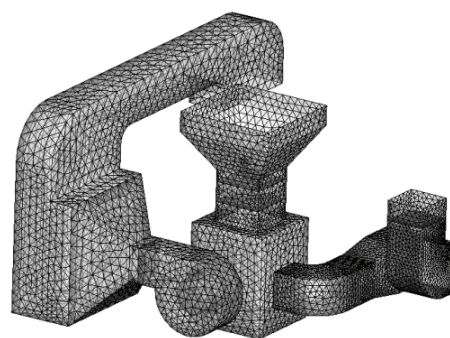


图 2 烘箱管道结构网格划分
Fig.2 Structural meshing of oven pipeline

合总体质量是否达到平衡来判定要模拟的流场是否收敛。由文献[13]可知, 动力学控制方程和运动控制方程的迭代残余量都收敛并接近 1×10^{-3} , 能量控制方程残差值接近 1×10^{-6} 。由此可知该次数值模拟的计算结果稳定并达到收敛, 与控制方程的精确解基本一致。

1.4 流动状态分析

由图 3 可知, 速度值越大, 曲线位置越低, 速度值越小, 速度迹线的疏密程度代表热风流动的均匀性; 热风在烘箱管道结构内的流动状态很不稳定, 其流动速度变化较明显且不均匀。在个别结构中存在明显涡流特征, 故要进行结构优化。

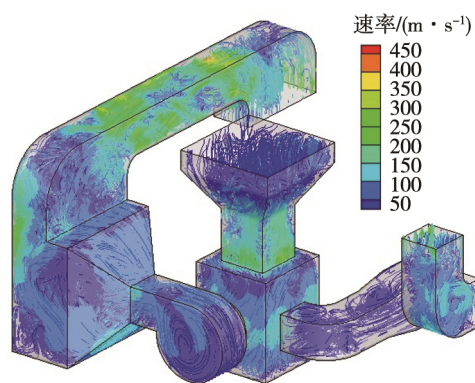


图 3 烘箱管道迹线
Fig.3 Traces of the oven piping

1.5 待优化结构的确定

给定入口以及回风口的初速度, 得到管道系统的速度迹线切片图。对管道部分结构做切片, 见图 4。由迹线图可以清楚地发现上述结构中存在明显的涡流, 即热风的运动状态不稳定, 尤其在空间较大以及结构突变的部分, 其对应的管道结构见图 5。矩形弯管是构成进风管道的基本结构, 见图 5a。漏斗形管道属于异性管道的一种, 见图 5b。箱形管道见图 5c, 由于内部存在较大空间, 故此命名, 针对该结构进行进一步的结构优化。

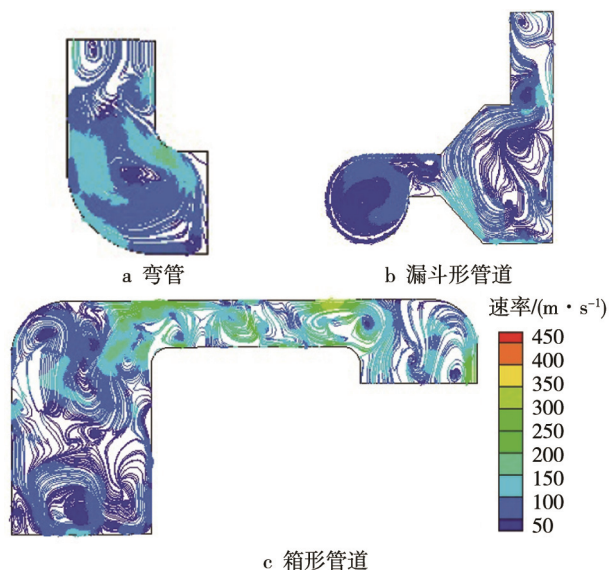


图4 管道部分结构切面迹线

Fig.4 Section traces of partial structure of the pipelines

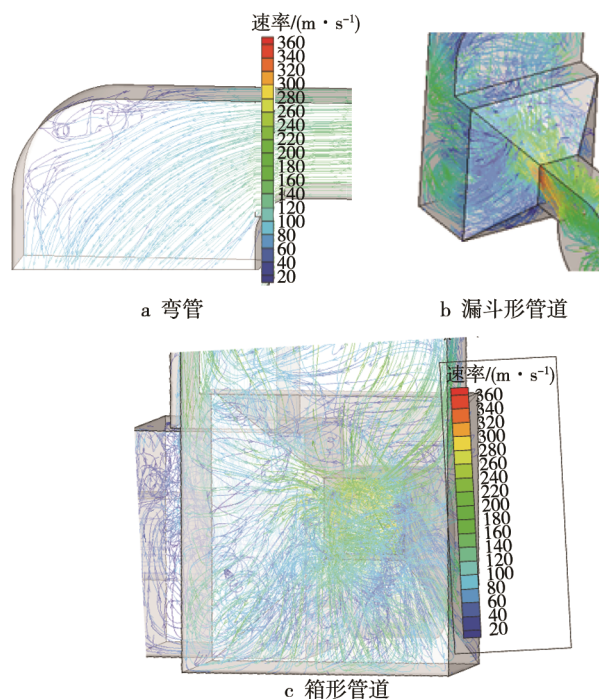


图5 待优化结构

Fig.5 The structure to be optimized

2 烘箱管道结构的改进与仿真分析

2.1 流动状态分析

以矩形弯管为研究对象,设定弯管入口流体的流速为 15 m/s。并设定弯管结构内部的片式导流板的厚度为 3 mm。通过对管道内流场的计算分析结果,对导流器的数量及位置进行设计。以流速和压强为评价指标,分析弯管的结构^[14-15]。将流体模型导入 Gambit 软件中进行网格划分。此结构主要采用四面体网格,其网格总数为 256 132 35。

2.2 导流板等比例分布方案

沿矩形弯管弯曲半径 R 方向分成 5 等份,并在相应的位置放置导流板,得到单个导流板的排布方案。根据放入单个导流板的矩形弯管的流动状态,加入第 2 个导流板,以此类推加入第 3 个导流板,从而分别得到 2 个及 3 个导流板的排布方案。其命名方式由内而外所标明的 1—5 为导流板的 5 个位置(1w—5w),导流板的个数命名为 1—5 导(1d—5d),弯管结构的切片位置放在弯道中间。

2.3 数据分析

将弯管的内腔均匀的分成 6 等份,故在结构流体分析时考虑靠近内侧的 3 组导流板,共得到包括原结构 9 组数值模拟数据。弯管截面压强切片云图见图 6,切片图由上到下为弯管内侧到外侧。由图 6 可看出,原弯管外侧压强高于内侧压强,从外到内依次递减,插入导流板后,色彩分布变得更加均匀,其中色彩最均匀的为 2 导 13 位和 2 导 23 位。

弯管截面速度切片云图见图 7,切片图中由上到下为弯管内侧到外侧。由图 7 可以看出,和压强切片的云图切片相反,原弯管结构中外侧速度低于内侧速度,从外到内依次递增。插入导流板后,色彩分布变得更加均匀,其中色彩最均匀的为 2 导 12 位和 2 导 13 位。

由表 1 可以发现矩形弯管加入导流板后,在某个位置出现了最大流速的显著降低,可得导流板的分布靠近内侧比较合理。通过在弯管内等距离加装导流板

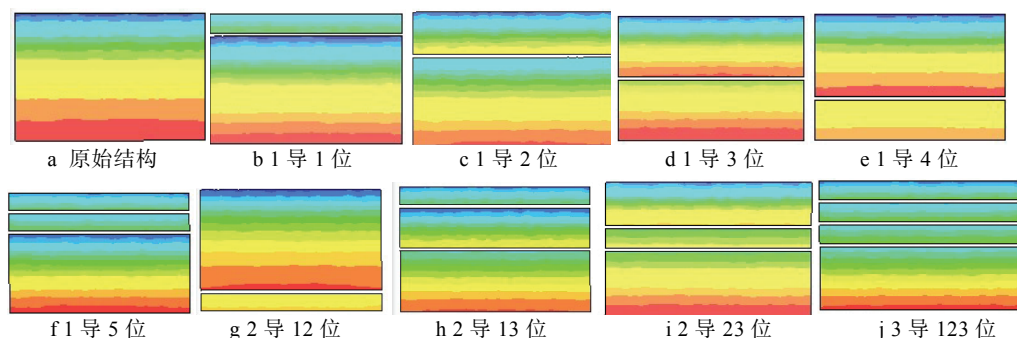


图6 弯管截面压强切片云图

Fig.6 Bend section pressure slicing contours

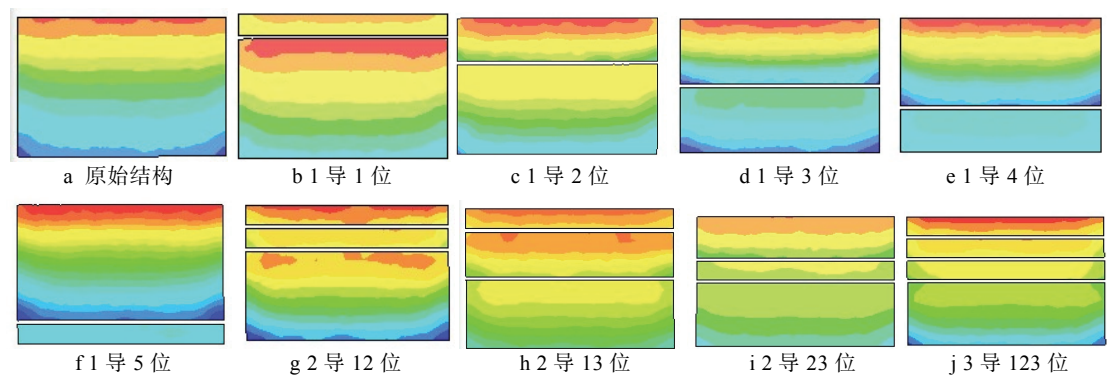


图 7 弯管截面速度切片云图
Fig.7 Bend section speed slicing contours

表 1 弯管出风口实验数据
Tab.1 The experimental data of the bend outlet

分类	最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	压差/Pa	速度均值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度标准差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
原结构	20.66	21.59	14.980 023	1.252 642 00
1d1w	18.41	17.05	14.992 709	0.810 978 29
1d2w	18.41	15.87	15.014 040	0.451 326 91
1d3w	19.47	14.26	14.986 876	0.717 786 43
1d4w	20.00	15.92	14.974 079	0.846 478 40
1d5w	20.40	16.60	15.006 463	0.981 237 83
2d12w	17.95	13.86	15.012 329	0.600 665 69
2d13w	17.99	12.32	14.999 896	0.294 807 20
2d23w	19.07	13.23	15.003 202	0.678 430 86
3d123	18.54	12.76	15.008 508	0.488 071 70

明显改善了弯管内流场分布状况，内部流场更加均匀，消除了弯管出口的低速流部分，其优化结果相对较好的方案为 2d13w。改进结构较原始结构，最大流速降低了 2.67 m/s（12.92%），压差降低了 7.7 Pa（35.66%）。

3 实验研究

3.1 目的与模型

为了验证理论研究和数值模拟结果的正确性，需要对烘箱干燥装置的管道结构进行实验验证，为了方便烘箱体上下的分离和加工的方便性，制作模型的设计采用了可拆卸替换的设计方案^[16]，方便结构的替换和风速风压的测量。连接方式主要采用螺栓螺母连接，并用固体胶进行密封，可拆卸位置设计见图 8。根据设计模型，采用亚克力板加工制作了烘箱管道结构实验模型，见图 9。

3.2 弯管实验结果及分析

通过在弯管进出口预留的测点，测量并采集多个位置，每个位置 30 组的试验数据，共 120 个数据，

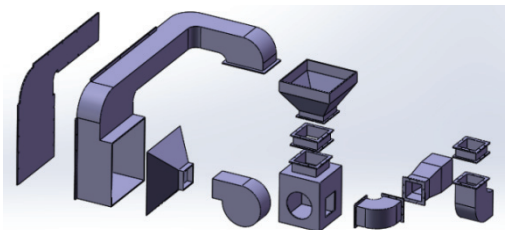


图 8 可拆卸位置
Fig.8 Detachable position



图 9 烘箱管道结构的实验模型
Fig.9 The experimental model of the pipe structure of the oven

经整理及计算，得到结构改进前后的实验数据。为了清晰地反应改进结构与原结构的流场变化状态，

以及数值模拟得到的仿真实验的数值与实验数值的相近程度,弯管相关实验和数值模拟的数值见表 2,由表 2 可知,不管是实验数值还是数值模拟得到的仿真数值,改进结构相对于原结构的速度均匀性都有了

明显的提高,压差上都有所降低,实体实验中压差降低 21.78%,仿真模拟中压差下降了 35.66%。总体来看,仿真模拟的结果与实验得到的数据结果的变化趋势相符,结构得到了优化。

表 2 弯管结构的模拟数据及实验数据
Tab.2 Analog data and experimental data of bend structure

参数	最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	压差/Pa	速度均值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度标准差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
实验改进前	16.92	28.23	14.83	1.02
实验改进后	14.05	22.08	14.93	0.31
仿真改进前	20.66	21.59	14.98	1.25
仿真改进后	17.99	13.89	15.00	0.29

4 结语

建立了烘箱管道结构的实验模型,符合相似原理,并设定了管道各结构的边界条件,搭建了实验系统。依据流体力学和热风干燥原理的相关知识,对整体烘箱管道结构进行数值模拟和结构优化,在关键位置设置了相应的测点,并制定了相应的测量方案。对速度和风压数值的提取中,样本数足够大,保证了实验的严谨性。将各结构的仿真实验数据与实体实验的数据结果进行对比分析可知,实体实验中的各个参数的特征与仿真实验得到的结果能够保持一致。通过在各结构内部加入导流板及匀风板,分析其形式、位置和数量,达到了改善出风速度,减少管道内涡流,提高管道流场均匀性和热量交换效率的目的。

参考文献:

- [1] 樊莉丽. 喷射器流场的计算与分析研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(2): 90—91.
FAN Li-li. Calculation and Analysis of Flow Field of Ejector[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(2): 90—91.
- [2] CHOW P, CROSS M, PERICLEOUS K. A Natural Extension of the Conventional Finite Volume Method Into Polygonal Unstructured Meshes for CFD Application[J]. Applied Mathematical Modeling, 1996, 20(2): 170—183.
- [3] SUDOK, SUMIDAM, HIBARAH. Experimental Investigation on Turbulent Flow in a Circular-Sectioned 90-Degree Bend[J]. Experiments in Fluids, 1998, 25: 42—49.
- [4] SUDOK, SUMIDAM, HIBARAH. Experimental Investigation on Turbulent Flow in a Square-Sectioned 90-Degree Bend[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30: 246—252.
- [5] DJUNAEDY E, CHEONG K W D. Development of a Simplified Technique of Modeling Four-way Ceiling Air Supply Diffuser[J]. Building and Environment, 2002, 37(4): 393—403.
- [6] SUN Y, SMITH T F. Air Flow Characteristics of a Room with Square Cone Diffusers[J]. Building and Environment, 2005, 40(5): 589—600.
- [7] LIU Y J, JAMIES A, RITTER, et al. Simulation of Gasoline Vapor Recovery by Pressure Swing Adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2000, 20(1): 111—127.
- [8] REICHHOLD A, HOFBAUER H. Internally Circulating Fluidized Bed for Continuous Adsorption and Desorption[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1995(6): 521—527.
- [9] CHIANG B C, YANG W Y, WEY M Y. Control of Incinerator Organics by Fluidized Bed Activated Carbon Adsorber[J]. Technical Papers, 2000, 126(11): 985—992.
- [10] 冯俊, 郑源. 基于 CFD 的轴流泵三维湍流数值模拟[J]. 流体机械, 2013, 40(11): 33—36.
FENG Jun, ZHENG Yuan. Numerical Simulation of Three-dimensional Turbulence of Axial Flow Pump Based on CFD[J]. Fluid Mechanics, 2013, 40(11): 33—36.
- [11] 李鹏飞, 徐敏义. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
LI Peng-fei, XU Min-yi. Proficient in CFD Engineering Simulation and Case Actual Combat[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2011.
- [12] 黄建明, 朱贤华, 宋宜梅, 等. 真空系统管道气体流场分析与仿真[J]. 机械工程师, 2011(4): 39—40.
HUANG Jian-ming, ZHU Xian-hua, SONG Yi-mei, et al. Analysis and Simulation of Gas Flow Field in Vac-

- uum System Pipeline[J]. Mechanical Engineer, 2011 (4): 39—40.
- [13] 赵坤昊. 凹印机烘箱进风系统的结构分析与优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- ZHAO Kui-hao. Structure Analysis and Optimization of Air Inlet System of Gravure Press Oven Structure Analysis and Optimization of Air Inlet System of Gravure Press Oven[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [14] 王勇, 苏凯, 戴希磊, 等. 方形散流器喉部对送风气流均匀性的影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 126—133.
- WANG Yong, SU Kai, DAI Xi-lei, et al. Influence of the Throat of Square Diffuser on the Uniformity of Airflow in Air Supply[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2015, 42(5): 126—133.
- [15] 肖益民, 杨文杰, 吴泽豪, 等. Y型喉管流场分析及结构优化[J]. 计算机仿真, 2015, 32(5): 270—274.
- XIAO Yi-min, YANG Wen-jie, WU Ze-hao, et al. Analysis and Structure Optimization of Y-type Throat[J]. Computer Simulation, 2015, 32(5): 270—274.
- [16] 高坡, 柳波, 范永超. 高风热炉管道结构的建模与优化设计研究[J]. 机械设计与制造, 2013, 32(7): 63—66.
- GAO Po, LIU Bo, FAN Yong-chao. Study on Modeling and Optimization Design of High-wind Furnace Pipe Structure[J]. Journal of Mechanical Design and Manufacture, 2013, 32(7): 63—66.