

## 涂布干燥气悬浮烘箱腔体计算机模拟与仿真分析

宋建辉<sup>1</sup>, 丁俊健<sup>2</sup>, 涂志刚<sup>3</sup>

(1.中山开放大学, 广东 中山 528403; 2.中山火炬职业技术学院, 广东 中山 528436;

3.广东开放大学, 广州 510091)

**摘要:**目的 从5种不同的涂布气悬浮烘箱腔体中, 选出性能最佳的腔体结构方案。方法 通过对5种气悬浮烘箱腔体三维建模, 应用Ansys软件的Fluent模块, 设定5种模型实际使用时的边界条件, 模拟5种烘箱的工作情况。结果 借助设定的辅助平面、辅助线段, 得到了5种烘箱工作时的腔体内部热风轨迹图、烘箱不同位置的风速等高线图。结论 通过比较模拟结果, 确定了均风导流隔板型烘箱腔体的工作效果优于其他烘箱结构。

**关键词:**涂布; 气悬浮; 干燥; 仿真; 设计

中图分类号: TS735 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)19-0223-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.033

## Computer Modeling and Simulation of Flotation Dryer Cavity for Coated Web Drying

SONG Jian-hui<sup>1</sup>, DING Jun-jian<sup>2</sup>, TU Zhi-gang<sup>3</sup>

(1.Zhongshan Open University, Zhongshan 528403, China; 2.Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan 528436, China;

3.The Open University of Guangdong Guangzhou 510091, China)

**ABSTRACT:** The work aims to select the cavity structure scheme with the optimal performances from the five different cavities of flotation dryer with coated web drying. Five cavities of flotation dryer were modeled by 3D software, and the boundary conditions of five kinds of models were set with Fluent module of Ansys to simulate the working conditions of them. By means of the auxiliary planes and auxiliary lines, the hot air trajectory map inside the cavity and the wind speed contour map at different positions of the dryer when five dryers were working were obtained. By comparing the simulation results, flotation dryer with balanced wind diversion is better than other dryer structures.

**KEY WORDS:** coated web drying; flotation; drying; simulate; design

涂布工艺是凹版印刷、锂电池极片、铜版纸等覆膜产品生产过程中的重要工艺过程。涂布干燥设备不仅要具有除去水分的能力, 还要求不损伤涂布基体的品质, 涂布产品在干燥时不能产生卷曲、皱褶、永久变形、张力瞬变、蹭脏等现象。涂布基体双面涂布时, 为了提高干燥效率, 要求干燥设备能同时干燥两面。涂布干燥气悬浮烘箱能够实现涂布产品的双面干燥。

1970年Roy Downhawn提出了气悬浮式烘干技术, 该技术于20世纪80年代被迅速发展的美国印刷业推动发展。在涂布干燥行业, 国外发达国家的企业

多采用气悬浮烘箱取代传统滚筒烘箱, 气悬浮式烘箱成为现代涂覆行业干燥用的主流结构。国内针对单面冲击干燥研究较多, 针对气悬浮干燥研究较少。气悬浮干燥是涂布干燥的发展方向, 国内企业还没有能力生产制造气悬浮式干燥装置。借鉴国外气悬浮干燥装置, 研发具有我国自主知识产权、节能环保的悬浮式干燥装置势在必行<sup>[1-14]</sup>。

涂布干燥气悬浮烘箱腔体是其关键组成部分, 是热风从进风口到喷嘴排出的中间环节, 一般由进风腔道、均风板、导流板、隔板等零部件组成, 腔体结构及各零部件布置, 决定了热风喷出的稳

收稿日期: 2019-05-04

作者简介: 宋建辉(1968—), 女, 副教授, 主要研究方向为计算机及应用。

定性。

文中针对涂布干燥气悬浮烘箱腔体可能的5种不同结构形式进行建模、仿真,并比较热风在5种腔体中的均匀性、稳定性等因素,选出最佳结构形式的涂布干燥气悬浮烘箱腔体。

## 1 涂布干燥气悬浮烘箱概述

涂布干燥气悬浮烘箱的典型结构见图1。热风从热风入口鼓入干燥烘箱,在烘箱内部均风板、导流板、隔板等的引导作用下,希望热风均匀地流经烘箱底部的热风出口,吹入安装在底部的各个喷嘴,并确保各喷嘴吹出的热风风速稳定、温度均匀。

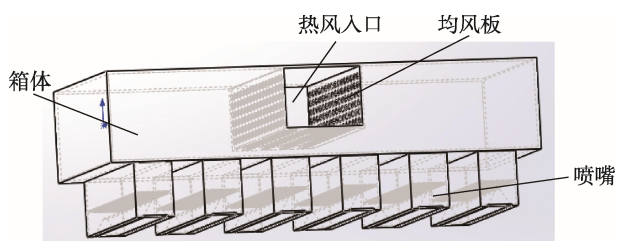


图1 涂布干燥气悬浮烘箱基本结构  
Fig.1 Basic structure of flotation dryer with coated web drying

设计时在热风入口风道壁上均匀布置多排圆孔,即风道均风板,均风板可改变热风流向、增大热风速度;将原本竖直的烘箱侧壁,设计成倾斜的侧壁,即导流板,对热风流向起到引导作用;考虑到烘箱尺寸较大,有必要将腔体用隔板隔开,减弱热风产生的涡流。以上均风板、导流板、隔板可以配置成5种不同

结构形式的涂布干燥气悬浮烘箱,见图2。

## 2 涂布干燥气悬浮烘箱模拟仿真测试<sup>[15-17]</sup>

### 2.1 建模及边界条件设定

应用 Ansys 软件的 Fluent 的模块,模拟涂布干燥气悬浮烘箱的工作环境,得到烘箱工作时有关的风速、风压等参数,从而确定烘箱的最佳结构。模拟仿真工作包括气悬浮烘箱流道模型建立、划分网格、设定边界条件、显示模拟结果等环节。

气悬浮烘箱流道建模:由于 Fluent 分析对象为热气体,建模时用 SolidWorks 软件绘制气悬浮烘箱中气体流经的通道作为数值模拟模型,将模型保存为 IGS 文件。打开 Ansys 软件,将模型 IGS 文件导入,Ansys 软件中导入的5种烘箱结构见图2。根据烘箱热气体流经的途径,将烘箱入口设置为“inlet”面,烘箱出口设置为“out”面,烘箱结构的其他面设置为“wall”。

划分网络:选定 Ansys 软件 Fluent 模块中“Method”,选择“Automatic”方式,“Relevance Center”选择“Fine”方式,其余参数不做选择,采用系统默认方式。网格化效果见图3。

设定边界条件:因5种烘箱的工作条件一致,所以5种烘箱的边界条件设置相同。

### 2.2 气悬浮烘箱模拟辅助平面及辅助直线设置

在气悬浮烘箱中的一些关键位置,能够体现烘箱

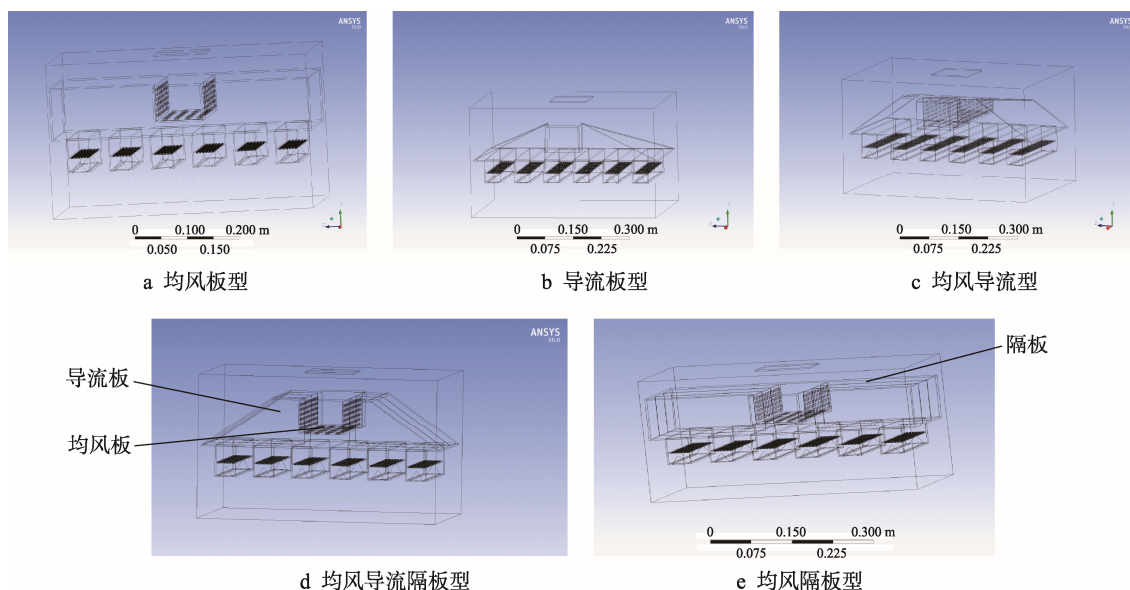


图2 各种类型的涂布干燥气悬浮烘箱结构  
Fig.2 Various types of flotation dryer structures with coated web drying

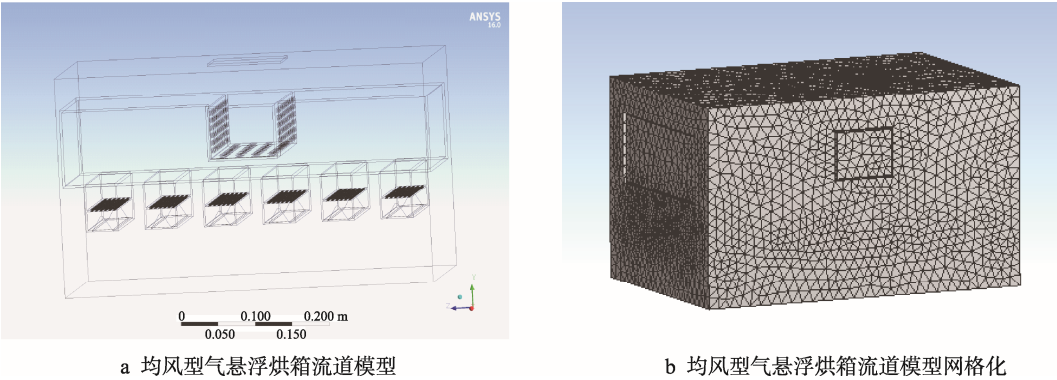


图 3 气悬浮烘箱网格化处理  
Fig.3 Meshing of flotation dryer

中热风气体的速度及压强分布情况，因此需要在此处设置一些辅助平面或辅助直线，通过比较辅助平面处压强和风速的模拟数值，即可判断烘箱中气流分布优劣。在各式气悬浮烘箱流道模型上设置了 3 个辅助平面：plane1 ( $y=0.005$  的  $zx$  平面)、plane2 ( $y=-0.07$  的  $zx$  平面)、plane3 ( $y=-0.13$  的  $zx$  平面)，见图 4。plane1 位于热风入口的切向方向，用于反映热风流入的状况，plane2 位于各个喷嘴入口附近，用于反映热风流入喷嘴的状况，plane3 位于喷嘴出口附近，用于反映热风流出各喷嘴的状况。

为了研究干燥箱内喷嘴喷出的热风速度的均匀性，在每个喷嘴的喷缝处设置了一条辅助直线，建模仿真的干燥烘箱有 6 个喷嘴，每个喷嘴有 2 条喷缝，

因此一共设置了 12 条辅助直线 line1—line12，见图 5（图 5 中从左至右依次为 line1—line12）。

### 3 不同气悬浮烘箱热风流线模拟

运用 2.1 章节中设定的模拟仿真边界条件，对各型结构烘箱进行了数值模拟仿真运算，得到了热风在烘箱中的流线轨迹，见图 6—10。

图 6—8，由于烘箱尺寸较大，热风在均风板或导流板的作用下，在烘箱中均发生涡流现象，图 9 和 10 在烘箱中设置了隔板，避免了涡流的发生，从而有利于热风比较稳定地进入烘箱底部所安装的喷嘴，使进入各喷嘴气流参数接近。

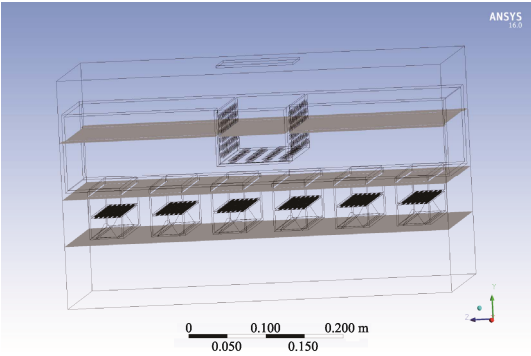


图 4 辅助平面位置分布  
Fig.4 Auxiliary plane position distribution

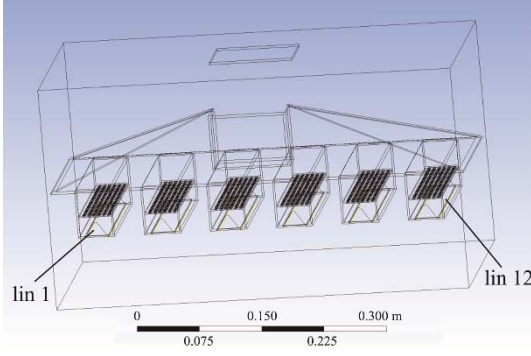


图 5 喷缝处辅助 line 线分布  
Fig.5 Distribution of auxiliary line at spray joint

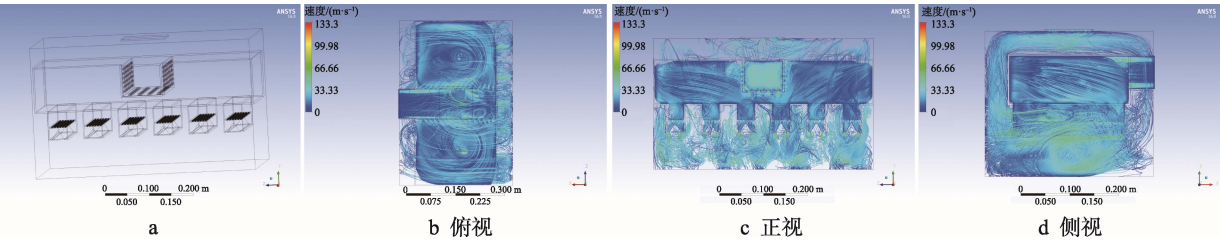


图 6 均风板型烘箱热风轨迹  
Fig.6 Hot air trajectory of plate dryer with balanced wind

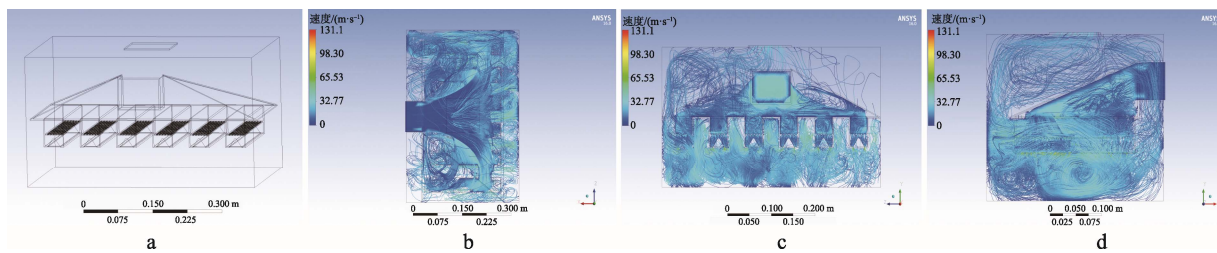


图7 导流板型烘箱热风轨迹

Fig.7 Hot air trajectory of plate dryer with diversion

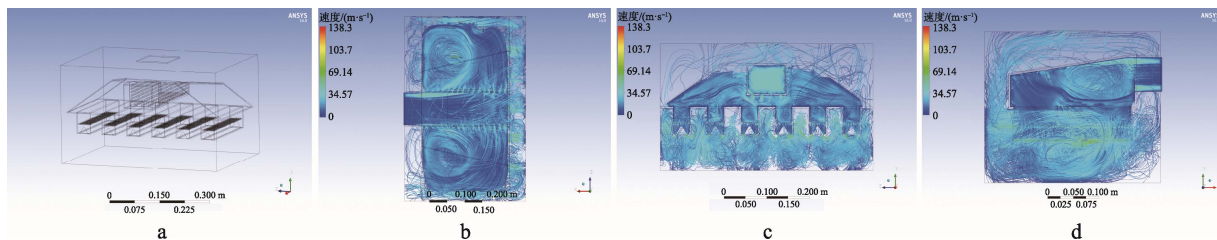


图8 导流均风板型烘箱热风轨迹

Fig.8 Hot air trajectory of plate dryer with balanced wind diversion

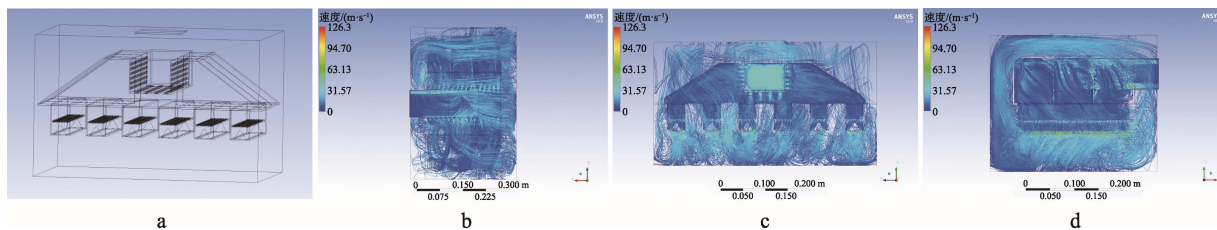


图9 导流均风隔板型烘箱热风轨迹

Fig.9 Hot air trajectory of baffle dryer with balanced wind diversion

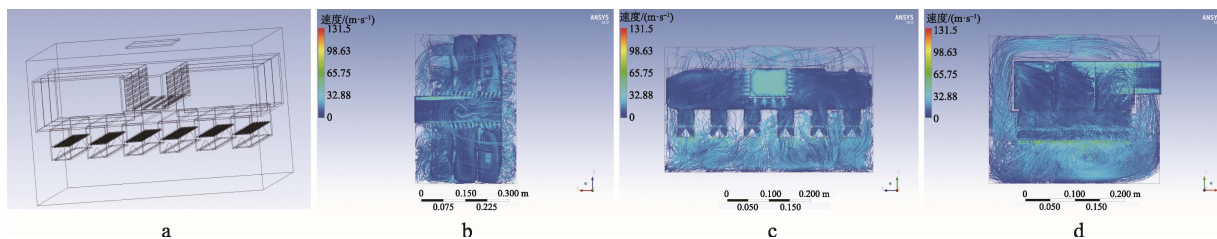


图10 均风隔板型烘箱热风轨迹

Fig.10 Hot air trajectory of baffle dryer with balanced wind

#### 4 不同位置气悬浮烘箱热风速度均匀性分析

根据5种形式的气悬浮干燥烘箱的仿真结果,分别提取它们在2.2章节中设置的辅助平面 plane1, plane2, plane3 处的风速等高线,见图11。

图11中左图风速等高图反映了烘箱进口风速分布情况,中间图反映热风进入喷嘴风速等高图,右图反映喷嘴出口处热风风速图。喷嘴热风喷出后将作用于涂布薄膜,风速的稳定性将影响到涂布薄膜运行的

稳定性。比较图11中各型烘箱右图可知,在喷嘴出口处,图11a—c速度等高线存在很严重的不均匀现象,图11d中各喷嘴的速度等高线较接近,图11e速度等高线稍均匀一些。由此可知,图11d导流均风隔板型烘箱的结构优于其他类型的结构,各风嘴处的风速比较均匀。

#### 5 不同类型气悬浮烘箱喷缝处热风速度分析

在不同高度辅助平面处气悬浮烘箱内部的热风



风速是不同的，对气悬浮烘箱喷缝处 line1—line12 辅助直线处的热风速度进行提取，提取结果见图 12。

利用 Ansys 软件中数据分析功能，找出各直线上

风速的最大值和最小值，求出其差值，对不同类型烘箱 12 条直线风速差值取平均值，数据见表 1。可知均风导流隔板型烘箱的平均值为 35 m/s，是最小值，因此均风导流隔板型烘箱喷嘴喷出热风风速最均匀。

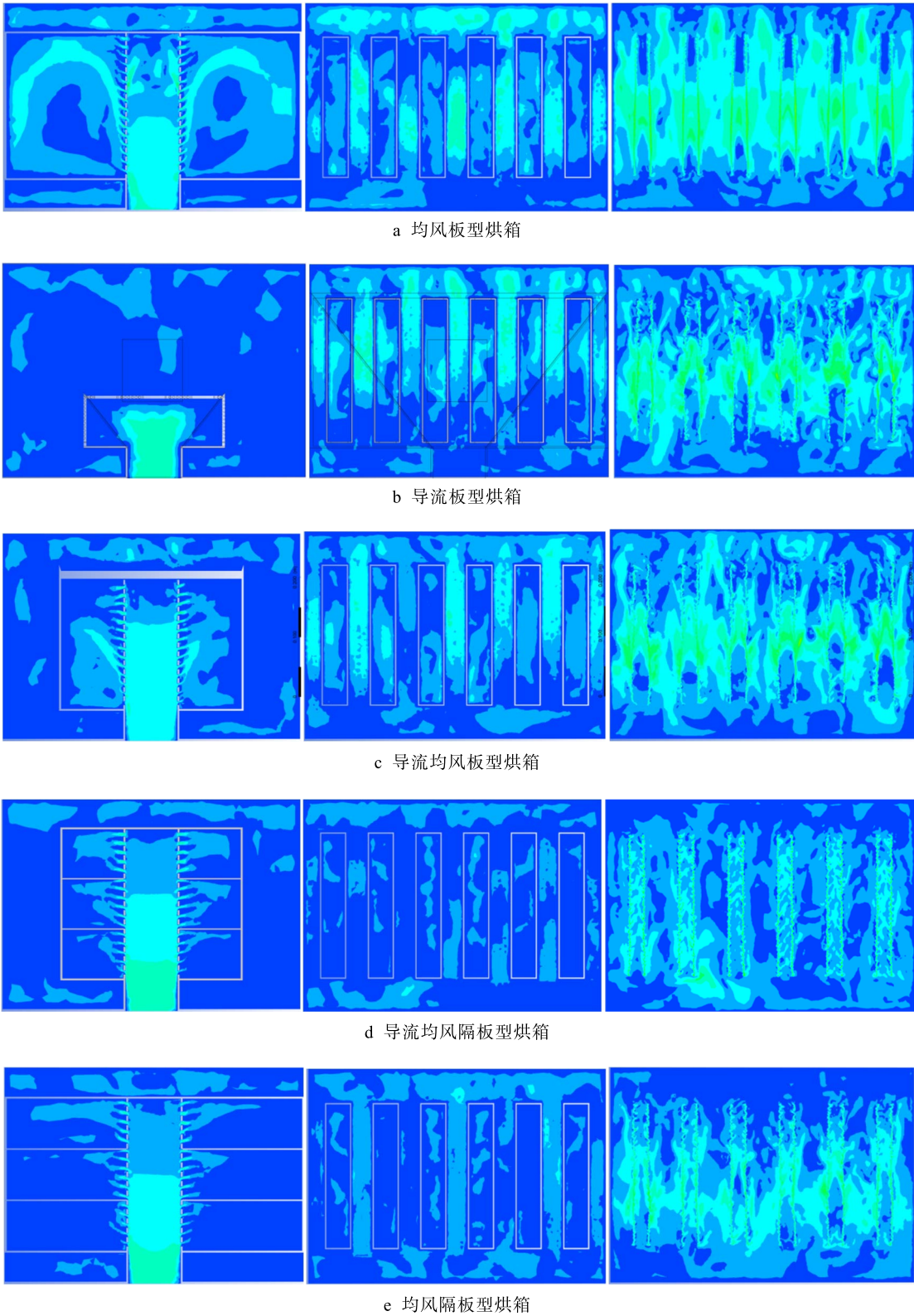
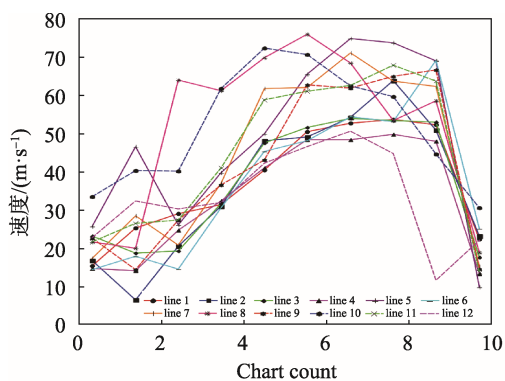


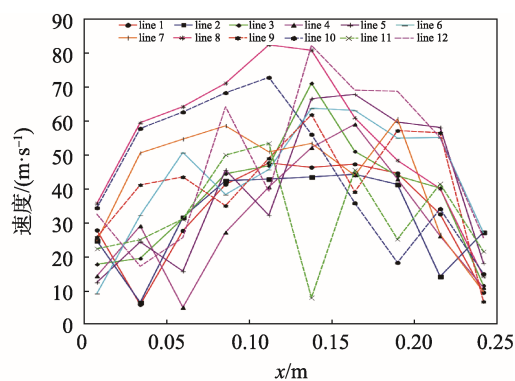
图 11 plane1—plane3 辅助平面处风速等高线  
Fig.11 Wind velocity contour at auxiliary plane1-plane3

表 1 各种类型烘箱喷嘴处热风风速数据  
Tab.1 Data of hot air velocity at nozzles of various types of dryers

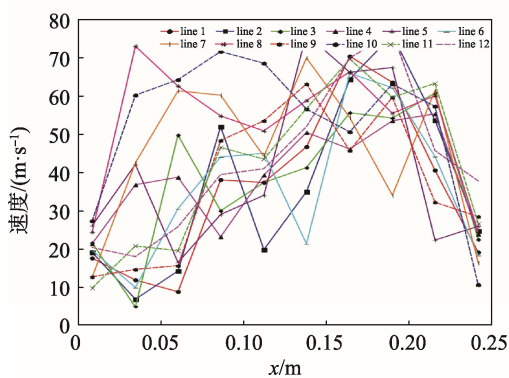
|        | 导流均风板 |    |    |    | 均风板   |    |    |    | 导流板   |    |    |    | 导流均风隔板 |    |    |    | 均风隔板  |    |    |    |
|--------|-------|----|----|----|-------|----|----|----|-------|----|----|----|--------|----|----|----|-------|----|----|----|
|        | 平均    | 最大 | 最小 | 差值 | 平均    | 最大 | 最小 | 差值 | 平均    | 最大 | 最小 | 差值 | 平均     | 最大 | 最小 | 差值 | 平均    | 最大 | 最小 | 差值 |
| line1  | 35.18 | 70 | 9  | 61 | 37.48 | 54 | 16 | 38 | 33.08 | 47 | 6  | 41 | 18.38  | 27 | 7  | 20 | 26.45 | 43 | 9  | 34 |
| line2  | 36.37 | 74 | 8  | 66 | 36.60 | 64 | 6  | 58 | 31.90 | 49 | 3  | 46 | 18.69  | 34 | 14 | 20 | 26.44 | 56 | 5  | 51 |
| line3  | 37.55 | 61 | 5  | 56 | 37.17 | 54 | 18 | 26 | 37.77 | 70 | 12 | 48 | 30.05  | 40 | 7  | 33 | 31.09 | 52 | 8  | 44 |
| line4  | 38.65 | 55 | 21 | 34 | 33.67 | 50 | 14 | 36 | 30.76 | 58 | 6  | 52 | 22.37  | 44 | 16 | 28 | 27.00 | 37 | 18 | 19 |
| line5  | 40.32 | 75 | 8  | 67 | 48.26 | 74 | 10 | 64 | 40.08 | 68 | 2  | 66 | 28.10  | 45 | 10 | 35 | 36.98 | 59 | 19 | 40 |
| line6  | 35.89 | 64 | 10 | 54 | 37.43 | 69 | 14 | 55 | 43.98 | 64 | 10 | 54 | 32.48  | 46 | 11 | 35 | 37.94 | 62 | 12 | 50 |
| line7  | 45.46 | 70 | 12 | 58 | 44.15 | 71 | 16 | 55 | 43.38 | 60 | 10 | 50 | 36.37  | 56 | 8  | 48 | 35.02 | 55 | 16 | 39 |
| line8  | 52.84 | 72 | 24 | 48 | 51.36 | 76 | 20 | 56 | 55.68 | 82 | 14 | 68 | 46.10  | 66 | 8  | 58 | 43.69 | 62 | 8  | 54 |
| line9  | 37.18 | 64 | 12 | 52 | 41.67 | 66 | 14 | 52 | 41.62 | 62 | 8  | 54 | 36.38  | 59 | 14 | 45 | 40.63 | 60 | 19 | 41 |
| line10 | 52.76 | 71 | 10 | 61 | 51.78 | 72 | 30 | 42 | 45.49 | 72 | 14 | 58 | 41.37  | 58 | 14 | 44 | 47.74 | 78 | 18 | 60 |
| line11 | 41.39 | 70 | 10 | 60 | 44.62 | 68 | 14 | 54 | 32.36 | 53 | 8  | 45 | 30.63  | 59 | 16 | 43 | 35.55 | 56 | 6  | 50 |
| line12 | 42.44 | 76 | 19 | 57 | 38.16 | 62 | 12 | 50 | 47.98 | 82 | 16 | 66 | 20.80  | 32 | 14 | 18 | 31.40 | 54 | 19 | 35 |
| 均值     |       |    |    | 56 |       |    |    | 48 |       |    |    | 54 |        |    |    | 35 |       |    |    | 43 |



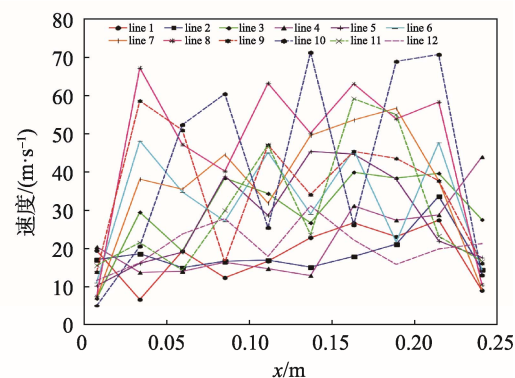
a 均风板型烘箱



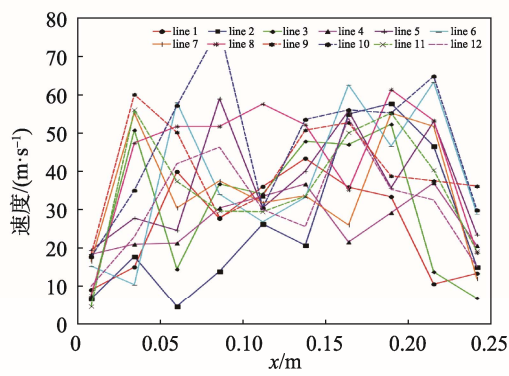
b 导流板型烘箱



c 导流均风板型烘箱



d 导流均风隔板型烘箱



e 均风隔板型烘箱

图 12 line1—line12 辅助直线处风速分布

Fig.12 Distribution of wind velocity at auxiliary line 1—line 12

## 6 结语

气悬浮烘箱腔体是气悬浮烘箱的关键组成部分, 是热风从进风口到喷嘴排出的中间环节, 一般由进风腔道、均风板、导流板、隔板等零部件组成, 上述零部件在气悬浮烘箱腔体中的结构及布置, 决定了最终从喷嘴喷出热风的稳定性。

通过模拟分析可知, 烘箱中隔板的设置, 能够避免烘箱中干燥气体产生涡流。通过对气悬浮烘箱热风速度均匀性的模拟和分析, 可知导流均风隔板型烘箱的结构优于其他类型的结构, 各风嘴处的风速比较均匀。不同类型气悬浮烘箱喷嘴处热风速度的模拟和分析结果, 说明均风导流隔板型烘箱的平均值为 35 m/s, 是最小值, 因此均风导流隔板型烘箱喷嘴喷出的热风风速最均匀。

综合以上所述能够得出, 均风导流隔板型烘箱腔体中干燥热气体发生的涡流现象不明显, 并能保证热风在其腔体内部以及各喷嘴喷出的热风风速的均匀稳定。

### 参考文献:

- [1] 谷志平. 强热风干燥设备在涂布机上的应用[J]. 天津造纸, 2013(3): 14—16.  
GU Zhi-ping. Application of Strong Hot Air Drying Equipment in Coating Machine[J]. Tianjin Paper Making, 2013(3): 14—16.
- [2] ABBOTT S J. Industrial Film Drying[J]. Leeds Drying, 2011, 10: 47—51.
- [3] HENRY W R. Flotation Dryer: Expanding Applications of Air Foils[C]. TAPPI PLACE Conference, 2010.
- [4] 霍金龙. 浅谈非接触干燥及其节能方式[J]. 中国造纸, 2010, 12: 71—73.  
HUO Jin-long. Talking about Non-contact Drying and Energy-saving Ways[J]. China Pulp & Paper, 2010, 12: 71—73.
- [5] 厉胜. 悬浮式烘箱的数值模拟分析[D]. 西安: 陕西理工大学, 2012.  
LI Sheng. Numerical Simulation Analysis of the Floating Drying Oven[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [6] 贾春江. 水性油墨热风干燥机理及数学模型研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 3(3): 47—56.  
JIA Chun-jiang. Study on Mechanism and Mathematical Model of Hot Air Drying of Water-borne Ink[J]. China Printing and Packaging Study, 2010.
- [7] 孔令波. 纸页干燥过程传热传质数学模型的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
KONG Ling-bo. Study on Mathematical Model of Heat and Mass Transfer in Paper Drying Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [8] 向晨. 凹印机烘干系统的热力系统的热力学分析与优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.  
XIANG Chen. The Thermodynamic Analysis And Optimization of the Gravure Press Drying System[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [9] 武吉梅. 高速凹印机节能干燥系统的优化[J]. 印刷技术, 2014, 10: 24—26.  
WU Ji-mei. Optimization of Energy-saving Drying System for High-speed Gravure Printing Machine[J]. Printing Technology, 2014, 10: 24—26.
- [10] 白文华. 凹版印刷烘箱干燥过程分析与节能优化设计[J]. 包装工程, 2010, 31(12): 28—31.  
BAI Wen-hua. Drying Process Analysis and Energy-saving Optimum Design of Gravure Printing Oven[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(12): 28—31.
- [11] 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.
- [12] 马海山. 高速凹版印刷机干燥箱流场特性分析及结构优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.  
MA Hai-shan. Flow-field Dynamic Analysis and Configuration Optimization of the Dryer for the High-speed Gravure Printing Machines[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [13] 梁桂转. 悬浮烘干系统中烘箱体结构的分析与优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2013.  
LIANG Gui-zhuan. Oven Structure Analysis and Optimization of the Floating Drying Oven[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [14] 苑亚, 杨鲁伟, 张振涛, 等. 新型热泵干燥系统的研究及试验验证[J]. 流体机械, 2018, 46(1): 62—68.  
YUAN Ya, YANG Lu-wei, ZHANG Zhen-tao, et al. Study of a Novel Heat Pump Dryer and Drying Experiment[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(1): 62—68.
- [15] 吴光中. FLUENT 基础入门与案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.  
WU Guang-zhong. FLUENT Basic Introduction and Case Proficiency[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [16] 于勇. Fluent 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.  
YU Yong. Fluent Introduction and Advanced Tutorials[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2008.
- [17] 李鹏飞. 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. Familiar with CFD Engineering Simulation and Case Practice[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011.