

# 基于数值模拟的烘房加热通风方案优选

黄思<sup>1</sup>, 丁田田<sup>1</sup>, 晏超<sup>2</sup>, 王子生<sup>2</sup>

1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640
2. 中集集团集装箱化研究院, 广东深圳 518068

**摘要** 使用 Airpak 软件, 对集装箱烘房内气体流动传热问题进行非稳态模拟计算。针对两种不同送风方案, 计算得到了烘房内气流的各种场分布(流速、压力、温度、空气龄等)。重点考查了箱体表面的温度场、温升和空气龄随加热时间的变化。所研究的两种烘房送风方案中, 方案 1 是从烘房底部送风, 方案 2 则是把送风口位置抬高到集装箱内部送风, 其他条件相同。计算结果表明, 与方案 1 相比, 方案 2 温度场分布更均匀, 温度升高更快且空气龄较小(尤其在死角位置)。可见采用方案 2 能较好地保证烘干质量, 提高烘干速度, 缩短箱体死角位置的加热时间, 降低烘干能耗。

**关键词** 烘房; 温度场; 空气龄; 节能

**中图分类号** TU833+3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.04.004

## Optimal Solution for the Heating and Ventilation of Drying Room Based on Numerical Simulation

HUANG Si<sup>1</sup>, DING Tiantian<sup>1</sup>, YAN Chao<sup>2</sup>, WANG Zisheng<sup>2</sup>

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China
2. Containerization Research Institute, CIMC, Shenzhen 518068, Guangdong Province, China

**Abstract** By using the software of Airpak, unsteady air flow and heat transfer in a drying room used for containers are simulated with two different schemes of air supply. The transient numerical solutions are obtained for air flow within the drying room, including flow speed, pressure, temperature, mean age of air, etc. The analysis focuses on temperature field distribution, temperature rise, and the mean age of air surrounding the container surface changing with heating time. Two air supply schemes are that scheme one with air inlets located on the ground under the container and scheme two with just air inlets raised into the container, the rest of factors remaining unchanged. Calculation results show that comparing with scheme one, in scheme two, the temperature field distribution is even, temperature raises more quickly, and the mean age of air is smaller, especially in critical places where it is difficult to dry. It could be concluded from the results that scheme two is the scheme that should be selected for better drying quality, shorter drying time, and less energy consumption.

**Keywords** drying room; temperature field; mean age of air; energy-saving

### 0 引言

涂装生产过程中, 烘干车间所消耗的电能占涂装线总能耗的 20%~25%。烘房的节能改造, 对涂装线整体能耗的削减起到了关键作用。可以通过改变烘房加热送风方式, 调整气流温度、湿度、流速和方向等, 提高烘房的热能利用率, 缩短加热烘干时间<sup>[1-4]</sup>。目前烘房节能方面的研究主要从以下 4 个方面入手: (1) 干燥方式, 如组合干燥<sup>[5]</sup>、热风换向<sup>[6]</sup>、分段干燥<sup>[7]</sup>、采用

新的干燥方式<sup>[8]</sup>; (2) 通过控制预处理等其他环节<sup>[9]</sup>, 如清洗、切片、热汤等; (3) 通过寻找最佳工艺参数<sup>[10]</sup>; (4) 通过设备的技术改进<sup>[11, 12]</sup>, 如余热回收再利用和增强设备本身的隔热性。

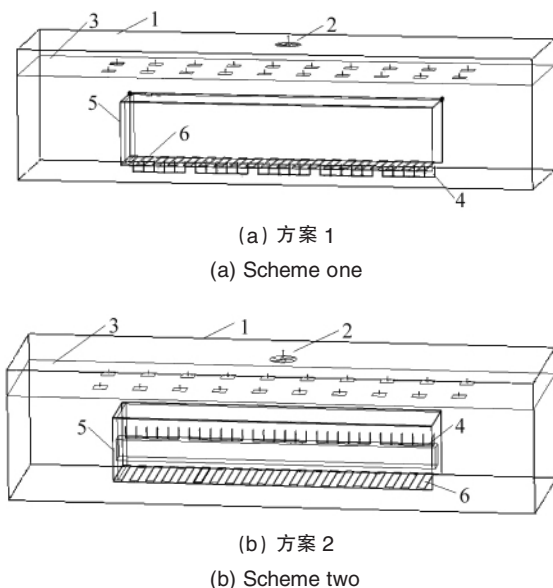
本文采用计算流动软件 Airpak, 仿真模拟两种送风设计方案中集装箱烘房内气体流场分布(流速、温度、压力、空气湿度、空气龄等), 对设计方案的排风加热效果做出评估对比及筛选, 达到优化设计的目的。

收稿日期: 2012-09-27; 修回日期: 2012-12-10

作者简介: 黄思, 教授, 研究方向为流体机械及工程, 电子信箱: huangsi@scut.edu.cn

### 1 加热送风设计方案

两种加热送风设计方案如图 1 所示,设计方案包括烘房、集装箱、风机、进气口、排气孔、壁面的尺寸、位置、方向及工艺参数等。集装箱为烘干对象,箱体纵向一侧开口,底部由若干条板材按一定间隔排列组成,其余部分为封闭壁面。加热时,高温气流从进气口源源不断进入烘房,对箱体起加热升温的作用,最后从排气孔排出。方案 1 采用常规的“下送上回式”热风循环方式:进气口布置在箱体下方,排气多孔隔板布置在烘房顶部,通过风机向外排风。方案 2 的排风方式与方案 1 相同,而送风方式则是通过伸缩机构将进气口抬高到集装箱内部进行作业。



1—烘房;2—风机;3—多孔隔板;4—进气口;  
5—集装箱体;6—箱底条形板块

图 1 加热送风设计方案

Fig. 1 Design solution of heating and air supply

### 2 数值计算

#### 2.1 计算控制方程

视空气为可压缩理想气体,流动与传热满足下列连续性方程、动量方程、能量方程及状态方程。该过程伴随有气相与水的质量交换,因此控制方程中还包括组分质量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + B_i \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \mu \phi \quad (3)$$

$$\rho = p/RT \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho C_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho C_s U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D_s \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho C_s) \right] \quad (5)$$

式中,  $B_i$  为体积力,  $c_p$  为气体比热,  $C_s$  为组分 S 的体积浓度,  $D_s$  为组分 S 的扩散系数,  $R$  为气体常数,  $\phi$  为气体的黏性耗散

项,  $\lambda$  为分子导热系数,  $\mu$  和  $\nu$  分别为气体的动力和运动黏性系数,  $\rho$  为气体密度,  $U$  为气体流速。

#### 2.2 计算方法及网格生成

模拟计算采用流体计算领域中广泛使用的有限体积法:把计算域划分成若干网格和控制体,将控制方程(式(1)~式(5))在控制体内积分,得到变量在各网格点的离散方程组,然后根据初始条件和边界条件求解离散方程组。采用六面体结构网格划分计算域,得到方案 1、方案 2 的网格单元分别为 152102 和 159623,如图 2 所示。本文重点研究箱体的加热速度,因此需要采用非稳态模拟计算,计算时间步长取  $\Delta t=0.1s$ 。

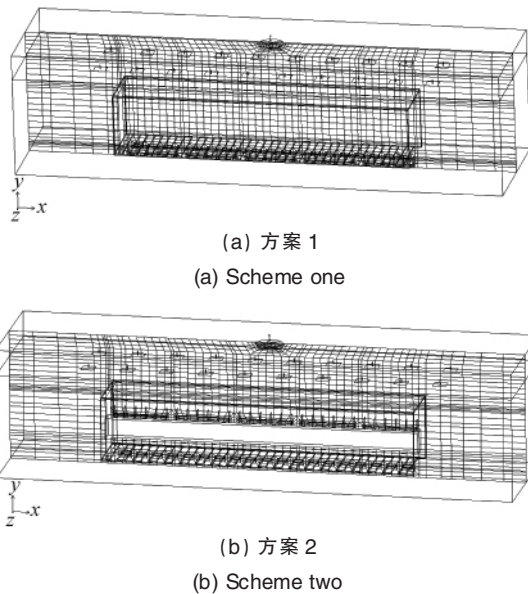


图 2 计算域中心截面网格示意图

Fig. 2 Grids of the center Profile for computational domain

#### 2.3 边界条件和初始条件

- (1) 进气口:按工艺条件,进气温度为  $60^\circ C$ 。
- (2) 排气口:风机流量为  $14.0m^3/s$ 。
- (3) 烘房内空气初始温度为  $20^\circ C$ ,初始湿度为 50%,集装箱体表面含水率为 1。

### 3 计算结果及对比分析

#### 3.1 箱体表面温度分布

图 3 和图 4 分别给出计算得到的两种送风方式下箱体表面加热 30s 和 100s 的温度分布云图。为能清楚地观测箱体内表面的温度分布,图 3 和图 4 隐去了箱体的前板块。从图中可以看出,在整个加热烘干过程中,与方案 1 相比,方案 2 的温度场总体上比较均匀。

为更清晰地考查箱体表面几个关键位置温度随时间的变化情况,计算中设置了 4 个监测点,其中,监测点 1 和 4 为箱体表面的外角点,监测点 2 和 3 为内角点;此外监测点 1 和 2 位于箱体封闭侧,监测点 3 和 4 位于箱体的开口侧,如图 5 所示。

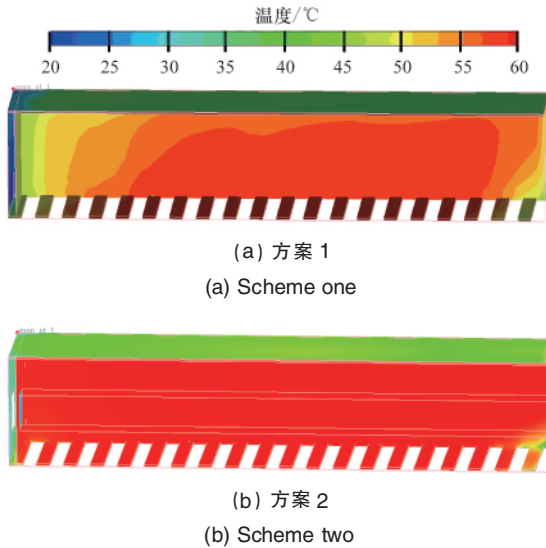


图 3 箱体内部表面温度分布 (加热 30s)  
Fig. 3 Temperature distribution on inner faces (after 30s heating)

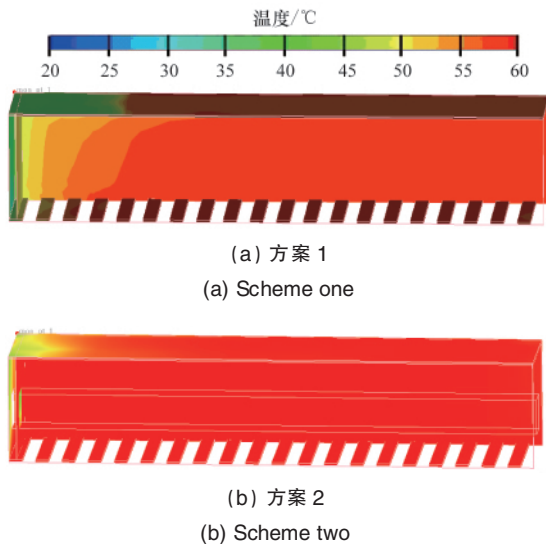


图 4 箱体内部表面温度分布 (加热 100s)  
Fig. 4 Temperature distribution on inner faces (after 100s heating)

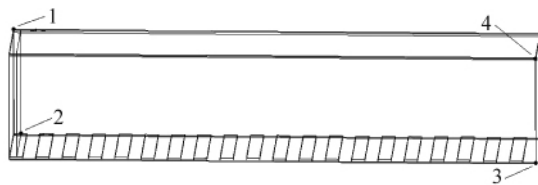
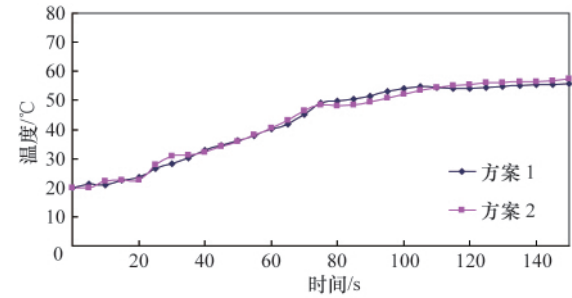
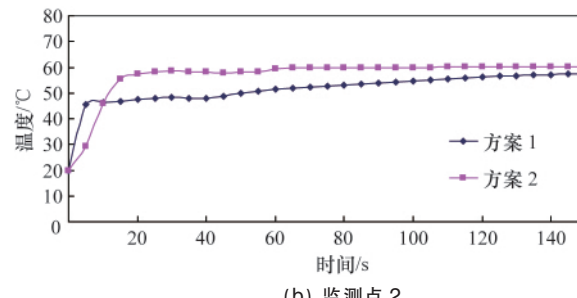


图 5 集装箱表面温度监测点  
Fig. 5 Monitor points of temperature on container surfaces

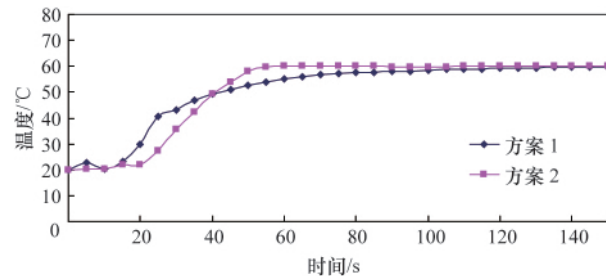
图 6 给出两个设计方案中各监测点温度随时间的变化情况。从图中可以看出,加热时间到 150s 时烘干房内温度已基本



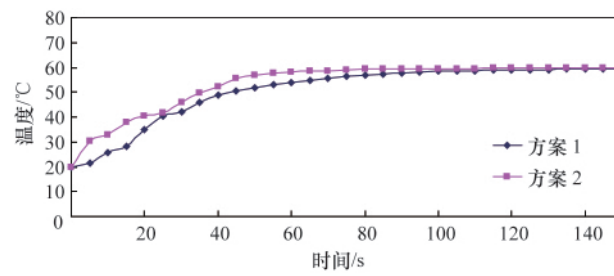
(a) 监测点 1  
(a) Point one



(b) 监测点 2  
(b) Point two



(c) 监测点 3  
(c) Point three



(d) 监测点 4  
(d) Point four

图 6 监测点温度随时间的变化

Fig. 6 Temperature changing with time at monitor points

本恒定。与方案 1 相比,方案 2 总体上在各个监测点位置的温升速度快,且温度值也较高。尤其对于较难烘干的箱体封闭侧内角点位置(监测点 2),方案 2 的优势比较显著。

### 3.2 空气龄

空气龄是指室内某处空气所滞留的时间,它是评价室内

空气品质与换气能力的重要指标。空气龄越小,表明该位置的空气越新鲜,空气质量越好。因此,本文采用空气龄指标考查两种加热送风方案的通风换气效果。

图7是计算得到的两种送风设计方案中各监测点的空气龄对比情况。由图7可见,方案2监测点的空气龄数值总体低于方案1。尤其对于较难烘干通风的箱体封闭侧内角点位置(监测点2),方案2的空气龄数值明显低于方案1,表明方案2有更好的通风效果。

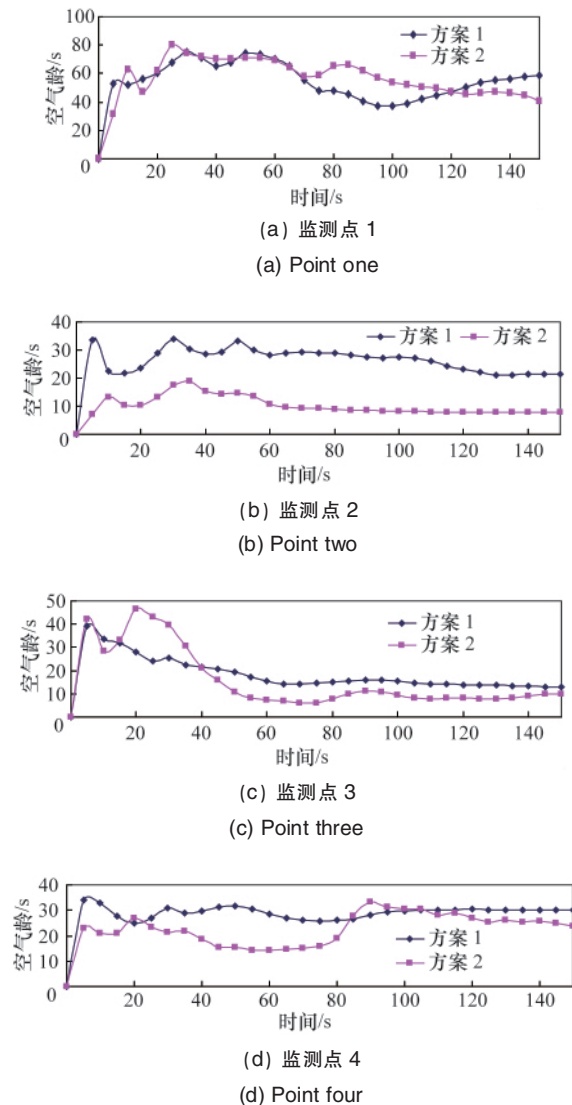


图7 监测点的空气龄对比

Fig. 7 Comparison of the mean ages of air at monitor points

#### 4 结论

(1) 本文通过对集装箱烘房内气体流动传热的非稳态模拟计算,得到了烘房内气体流动的各种场分布(流速、温度、压力、空气湿度、空气龄等);通过比较不同设计方案的升温速度、温度场均匀度及空气龄等参数,可以筛选得到加热及

换气效果较优的方案。

(2) 对于集装箱体的烘干问题,采取有效的工艺可显著缩短箱体死角位置的加热烘干时间,提高烘干效率,达到节能目的。

#### 参考文献 (References)

- [1] 王慧忠. 涂装生产线的设备及常见问题[J]. 轻工机械, 2008, 26(4): 99-102.  
Wang Huizhong. Light Industry Machinery, 2008, 26(4): 99-102.
- [2] 陈晓春, 朱颖心, 王元. 零方程模型用于空调通风房间气流组织数值模拟的研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(8): 19-24.  
Chen Xiaochun, Zhu Yingxin, Wang Yuan. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006, 36(8): 19-24.
- [3] 羌龙瑞. 拖拉机涂装烘干室的节能改造[J]. 材料保护, 2002, 35(5): 59-60.  
Qiang Longrui. Materials Protection, 2002, 35(5): 59-60.
- [4] 田文彪, 魏明, 尹娟, 等. 汽车制造企业能耗分析及节能新技术[J]. 节能, 2007, 26(11): 21-23.  
Tian Wenbiao, Wei Ming, Yin Juan, et al. Energy Conservation, 2007, 26(11): 21-23.
- [5] 李建国, 赵丽娟, 潘永康, 等. 组合干燥的应用及进展[J]. 化学工程, 2006, 34(1): 8-11.  
Li Jianguo, Zhao Lijuan, Pan Yongkang, et al. Chemical Engineering, China, 2006, 34(1): 8-11.
- [6] 刘相东, 于才渊, 周德仁. 常用工业干燥设备及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 126-131.  
Liu Xiangdong, Yu Caiyuan, Zhou Deren. Commonly used industrial drying equipment and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 125-131.
- [7] 胡万里, 李长友, 徐凤英. 稻谷薄层快速干燥工艺的试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 103-106.  
Hu Wanli, Li Changyou, Xu Fengying. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 103-106.
- [8] 陆必远, 刘大义. 烤烟远红外烘烤研究[J]. 中国烟草科学, 1998(3): 44-47.  
Lu Biyuan, Liu Dayi. Chinese Tobacco Science, 1998(3): 44-47.
- [9] 任迪峰, 毛志怀. 我国中草药干燥的现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 5-8.  
Ren Difeng, Mao Zhihui. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(2): 5-8.
- [10] 牛兴和. 谷物干燥节能技术[J]. 农业工程学报, 1991, 6(3): 87-90.  
Niu Xinghe. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1991, 6(3): 87-90.
- [11] 张晓和, 戴斌. 脱水菜专用混流式隧道干燥机改进设计[J]. 农业机械学报, 2003, 34(3): 69-71.  
Zhang Xiaohu, Dai Bin. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(3): 69-71.
- [12] 和进娜, 叶京生, 徐庆, 等. 饲料生产过程中干燥装置节能技术的探讨[J]. 饲料工业, 2007, 28(19): 4-6.  
He Jinna, Ye Jingsheng, Xu Qing, et al. Feed Industry Magazine, 2007, 28(19): 4-6.

(责任编辑 刘志远)