

太阳能干燥室内气流场分布 CFD 数值模拟*

任海伟¹ 李金平² 刘增光² 岳大灵² 张 飞¹ 李志忠¹

(1. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

【摘要】 为研究太阳能干燥室内气流场分布和构建气流运动模型,基于计算流体动力学(CFD)技术,运用标准 $k-\varepsilon$ 模型对给定的不同气流速度对干燥室内气流分布的影响进行数值模拟。结果表明,与气流速度 2 m/s 和 10 m/s 相比,气流速度为 6 m/s 时干燥室内的速度分布满足要求,且气流分布更为均匀。

关键词: 太阳能干燥室 气流场 计算流体力学 数值模拟

中图分类号: S214.4; V211.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0235-04

Numerical Simulation of Airflow Fields in Solar Drying Chamber by CFD

Ren Haiwei¹ Li Jinping² Liu Zengguang² Yue Daling² Zhang Fei¹ Li Zhizhong¹

(1. College of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract

In order to study the distribution of airflow and construct the movement model of airflow velocity in traditional solar drying chamber, the numerical simulation of three-dimensional steady-state model was carried out to analyze the effect of wind speeds on the airflow distribution in drying chamber by using CFD software Fluent and the $k-\varepsilon$ model. The results showed that compared with the airflow speed of 2 m/s and 10 m/s, the internal wind speed and airflow distribution were better when airflow velocity was 6 m/s.

Key words Solar drying chamber, Airflow field, Computational fluid dynamics, Numerical simulation

引言

甘肃省全年太阳日照时数为 1 631 ~ 3 319 h, 年太阳总辐射量在 4 700 ~ 6 350 MJ/m² 之间, 初步估算每年甘肃省太阳总辐射达 70.45 万亿 kW, 其开发利用价值很高。特别是河西地区, 年太阳总辐射在 6 000 MJ/m² 以上, 属于太阳能资源丰富区, 该地区降水稀少, 空气干燥, 晴天多, 光照充足, 具有得天独厚的气候资源优势^[1]。

计算流体动力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD) 是一种通过建立反映物理问题本质的物理和数学模型, 并用计算机技术求得数值解, 用计

算机可视化技术呈现流体的速度场、温度场、压力场等参数分布的研究方法。其中速度场的分布直接影响着其他各场的分布, 是室内空气气流组织研究的基础^[2~4]。近年来, 研究者已将 CFD 方法应用到木材、苜蓿、肉类干燥等工艺优化和喷雾干燥等设备的设计开发中^[5~10], 但 CFD 在中药材和粮食等干燥装置设计方面的应用尚未见报道。本文在太阳能干燥中药材和粮食装置的设计中引入 CFD 方法, 用计算机模拟干燥室内气流场分布情况, 构建室内循环风速的运动模型。通过对干燥室内气流场的 CFD 模拟, 以为合理制定干燥工艺和优化干燥装置设计提供理论依据。

收稿日期: 2012-07-13 修回日期: 2012-08-06

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B03)、国家科技部星火计划重点项目(2010GA860004)、陇原青年创新人才扶持计划资助项目(09-0165)和兰州理工大学“红柳杰出人才计划”资助项目(Q201101)

作者简介: 任海伟, 讲师, 主要从事农产品加工机械研究, E-mail: rhw52571119@163.com

通讯作者: 李金平, 教授, 博士生导师, 主要从事流体力学研究, E-mail: lijinpj77@163.com

1 太阳能干燥系统工作原理与构成

1.1 工作原理

室外冷空气经初效过滤器后,在风机作用下进入中效过滤器,然后通过太阳能集热器被加热,热空气经亚高效过滤系统净化后,由干燥室侧部的气流分配系统流向干燥室内。通过温度和压力继电器控制湿热空气出口阀门的开度,使热空气与被干燥物料间产生温度差与相对湿度差,从而加速物料水分扩散蒸发,达到干燥的目的。

1.2 构成

1.2.1 空气集热器

空气集热器结构从上到下依次布置为双层玻璃、多孔“V”形集热板、保温层和冷空气通道,集热器整体与分布两侧的空气过滤器组成密闭系统。双层玻璃间隔距离为 1 cm 且为真空。“V”形集热板上下表面均喷涂无光黑漆,小孔孔径为 0.3 cm,并呈正三角形排列分布,集热板最高点距玻璃盖板 3 cm,最低点距底部背板 2 cm。集热器四周及底板采用丁腈橡胶和聚苯乙烯保温层(3 cm 厚)保温,并用玻璃胶密封。集热器采光面与水平面呈 41°角朝正南方向倾斜安装,最大限度地接收太阳能辐照。

1.2.2 通风管道

干燥系统进风口设计成喇叭形,同时进风口安装有初效空气过滤器,目的是过滤空气中的浮尘颗粒,提高空气的洁净度,避免污染被干燥药材。净化空气经集热板的不同风道(根据干燥室内温湿度选择)进入干燥室,对中药材进行除湿加热,湿热空气经出风口排出。通风管道用 2 cm 厚的保温石棉包裹后再贴上锡箔纸,以减少管道热损失。

1.2.3 干燥室

长方体结构的干燥室(图 1)外壁用彩钢板夹 5 cm 厚的聚苯乙烯泡沫板制成,保证干燥室的机械强度。干燥室的长度为 2 m,宽度为 2 m,高度为 2.5 m,干燥室 4 个侧面的中央位置各分布一矩形进气口(0.2 m×0.4 m),顶部设一圆柱形出风口,直径为 0.4 m,高度为 0.2 m。被干燥的物料均匀平铺在干燥盘上,每层干燥盘上开有若干个通气孔,以使下部的热空气向上运动干燥上层物料。由于每层干燥盘上所开通气孔数量较多且孔径较大,可忽略热空

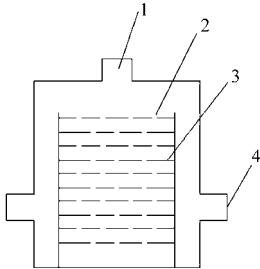


图 1 干燥室结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of solar drying chamber

1. 出风口 2. 通气孔 3. 干燥盘 4. 进气口

气向上运动的阻力,因而在进行干燥室内气流场分布的数值模拟时不考虑干燥盘对气流场分布的影响。出风口处安装的风阀(温度和压力继电器反馈控制)调节室内温度和湿度。室内设有间距和高度可调的物料架,可根据干燥物料的数量、堆放密度进行调整,控制干燥生产率,优化干燥过程。

2 干燥室内气流场的数值模拟

2.1 控制方程

本文研究中药材干燥初期,等温等湿条件下干燥室内空气的流动情况。假设太阳能光照充足和太阳能集热器工作状况良好,从集热器流出的干燥热空气的温度在干燥物料所允许的温度范围内,热空气的流量也能满足干燥物料所需。根据室内空气的流动特性,将室内空气的流动视为不可压缩的湍流,密度为常数。其控制方程^[5,11]表述如下:

连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

式中 $u、v、w$ ——流体的速度分量

动量方程为

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \tag{2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \rho \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \tag{3}$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g \tag{4}$$

式中 μ ——动力粘度 t ——时间

ρ ——流体密度

能量方程为

$$\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} + \frac{\partial (wT)}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \tag{5}$$
$$p = p(\rho, T) \tag{6}$$

式中 p ——流体微元上的压力

c_p ——比热容

k ——流体的传热系数

T ——温度

2.2 湍流模型

湍流模型采用标准的 $k-\varepsilon$ 两方程模型。

湍流动能 k 的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial u}{\partial x_j} \right] +$$
$$\mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \tag{7}$$

其中

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \varepsilon = C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L}$$

$i = 1, 2, 3; j$ 为求和下标。

湍流能耗散率 ε 的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\partial t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$
$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{8}$$

式中 k ——湍流动能 μ_t ——湍流粘性系数
 $C_D, C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ——湍流模型常数
 C_D 取 0.08 ~ 0.38, C_μ 取 0.09, $C_{1\varepsilon}$ 取 1.44, $C_{2\varepsilon}$ 取 1.92, σ_k 取 1.0, σ_ε 取 1.3^[12-13]。

2.3 网格划分

本文采用网格划分的工具是 GAMBIT 前处理软件,它是具有很强组合构建模型能力的前处理器,主要负责对所研究的流场模型进行建模和网格划分,并将导出的网格文件导入 Fluent 中进行后处理计算。划分采用六面体网格,其网格模型如图 2 所示。

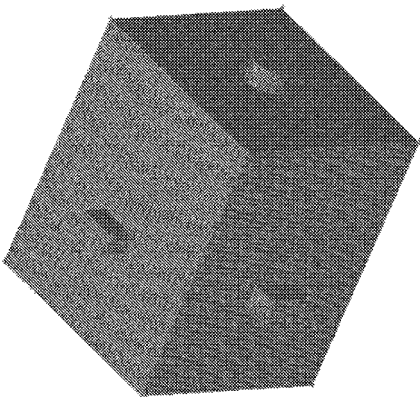


图2 干燥室网格模型

Fig.2 Mesh model of solar drying chamber

2.4 边界条件设置

进气口采用速度入口边界条件,需要输入风速大小,排气口采用压力出口边界条件,模拟干燥室外部环境为标准大气压,室内墙体采用无滑移绝热壁面边界条件,模拟时设定进、出气口为全开状态。

3 模拟结果及分析

不同风速时干燥室内部沿纵向剖面 yz 平面的气液分布云图如图 3 所示,风机给定风速分别为 2、6、10 m/s。

(1) 通过比较不同入口风速时干燥室内的气流

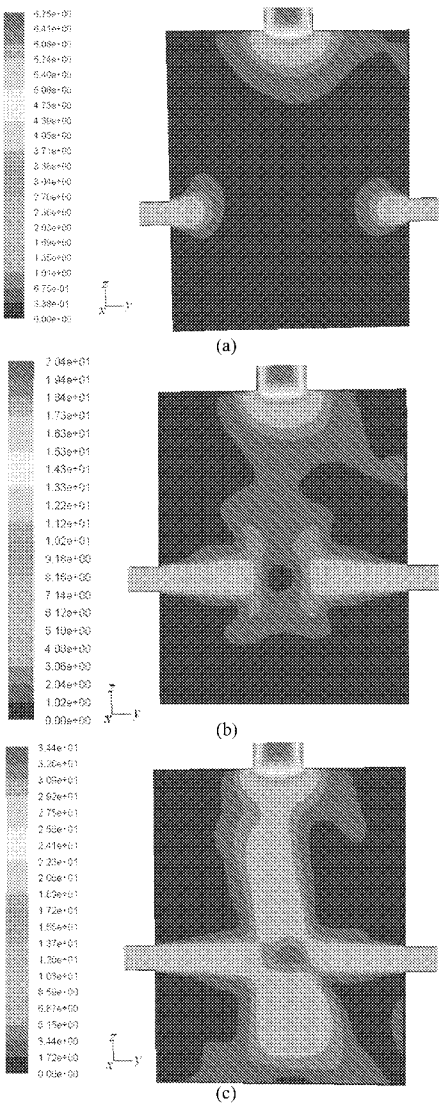


图3 干燥室内的气流速度分布云图

Fig.3 Airflow velocity distribution nephogram of drying chamber

(a) 入口速度 2 m/s (b) 入口速度 6 m/s (c) 入口速度 10 m/s

分布云图可以看出,在风速为 2 m/s 时,气流从侧面进入后由于气流速度很小,喷射距离较短,干燥室中间绝大部分部位没有热气流流过,这样使得靠近墙壁的药材干燥所需时间比中间部分的时间短;在风速为 6 m/s 时,随着气流速度增大,喷射距离增加,从两侧吹入的热气流都能以一定的速度流到干燥室中部,最后以较小的速度(1 m/s)通过出气口流出,使得干燥室内的药材能得到均匀的干燥;在入口风速为 10 m/s 时,由于气流流入速度较大,气流以比入口速度略小的速度流到干燥室中间部分后又迅速从顶部出口流出,大小约为 8 m/s,热量未得到有效利用即被排出,造成热量损失和热效率降低。因此,选用入口速度 6 m/s 为最佳。

(2) 从流线图中可以看出气体干燥室内的流动比较复杂(如图 4 所示),气流流动过程中会产生漩涡,这样可以使热空气在整个干燥室的分布趋于均

匀,加速物料的干燥过程。

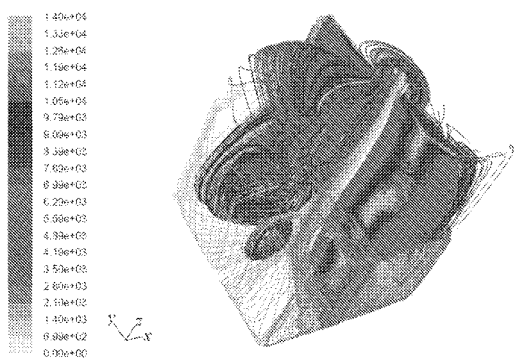


图4 干燥室内的气流流线图

Fig.4 Airflow streamline diagram of drying chamber

4 结束语

采用 CFD 软件 Fluent 对太阳能干燥室内气流场的分布进行数值模拟,通过模拟得到不同入口速度对干燥室内气流分布的影响。模拟仿真结果显示:流入速度为 2 m/s 时气流不能吹到干燥室中部,造成药材干燥过程不均匀和耗时长等缺点;流入速度为 6 m/s 时气流能吹到干燥室中部后以很小速度流出;流入速度为 10 m/s 时虽可使气流分布的面积更广,但容易造成热量利用效率低和资源浪费等现象。因此选用入口速度 6 m/s 为最佳。

参 考 文 献

- 朱 彪,李春华,方 锋. 甘肃省太阳能资源评估[J]. 干旱气象,2010,28(2):217~221.
Zhu Biao, Li Chunhua, Fang Feng. Solar energy resource assessment in Gansu province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(2):217~221. (in Chinese)
- 乔长晟,李雪,楼鹏,等. 基于 CFD 模拟的恒温振荡器内部流场分析[J]. 食品工业科技,2012,33(9):332~336.
Qiao Changsheng, Li Xue, Lou Peng, et al. Study on simulation internal flow field in constant temperature oscillator based on CFD[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(9):332~336. (in Chinese)
- 谢 晶,汤毅,王金锋,等. 三维流体力学预测风机不同布置形式对冷库气流的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 32(11): 349~352.
Xie Jing, Tang Yi, Wang Jinfeng, et al. Computational fluid dynamics simulation of influence of different arrangements of fans to the cold store[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 32(11):349~352. (in Chinese)
- 谢 晶,瞿晓华,徐世琼. 冷藏库内气体流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 11~16.
Xie Jing, Qu Xiaohua, Xu Shiqiong. Numerical simulation and verification of airflow in cold-store[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2):11~16. (in Chinese)
- 崔 寅,吴家鸣,黄文清. 改善肉类干燥窑热流场的一种计算方法[J]. 科学技术与工程,2009,9(23):7187~7193.
Cui Yin, Wu Jiaming, Huang Wenqing. Method of calculation and analysis to improve the heat flow field of meat dry kiln[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(23):7187~7193. (in Chinese)
- 张瑞雪,孙丽萍. 计算流体力学在干燥窑风速检测中的应用研究[J]. 机电产品开发与创新,2010,23(1):119~121
Zhang Ruixue, Sun Liping. Application on airflow detection of wood drying kiln based on computational fluid dynamics[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2010, 23(1):119~121. (in Chinese)
- Alessandro Gianfrancesco, Christelle Turchiuli, Denis Flick, et al. CFD Modeling and simulation of maltodextrin solutions spray drying to control stickiness[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(6): 946~955.
- 罗小燕,王德成,王光辉,等. 苜蓿转筒干燥时茎叶分离出口气流场模拟与优化[J]. 农业机械学报,2009,40(10):71~75.
Luo Xiaoyan, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Simulation and optimization of the wind field of the separation exit of alfalfa rotary drum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10):71~75. (in Chinese)
- 宁国鹏,王德成,王光辉,等. 苜蓿干燥与茎叶分离设备设计与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(1):84~90.
Ning Guopeng, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Design and CFD simulation of quad-pass rotary drum dryer-separator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):84~90. (in Chinese)
- 吴中华,刘相东. 脉动气流喷雾干燥的数值模拟[J]. 农业工程学报,2002,18(4):18~21.
Wu Zhonghua, Liu Xiangdong. Numerical simulation of spray drying of pulsating flow generated by a pulse combustor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4):18~21. (in Chinese)
- 韩占忠,王敏,兰小平,等. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.
- Li Xinhuang, Mujumdar A S. Numerical study of two-stage horizontal spray dryers using computational fluid dynamics [J]. Drying Technology, 2006, 24(6):727~733.
- 王 洋,刘洁琼. 超低比转数离心泵叶轮切割的三维流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2012, 43(5):79~83.
Wang Yang, Liu Jieqiong. Impeller trim of super-low specific speed centrifugal pump based on numerical simulation of 3D flow field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5):79~83. (in Chinese)