

# 基于 FLUENT 的菊花热风干燥流场特性仿真分析

## Simulation analysis of flow field characteristics of Chrysanthemum drying based on FLUENT

李赫 张志 任源 张开飞

LI He ZHANG Zhi REN Yuan ZHANG Kai-fei

(河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002)

(College of Mechanical & Electrical Engineering of Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**摘要:**在菊花干燥过程中,干燥机内部的流场分布特点是影响菊花干燥品质的主要因素。为进一步研究在菊花干燥过程中干燥机内部的流场分布及变化规律,针对负压式干燥机,建立了干燥机的物理模型。通过对模型进行网格划分、参数确定和求解计算,得到了菊花干燥过程中速度场、压强场、温度场在干燥机内部的分布情况,实现了对菊花干燥过程中流场分布的数值模拟。为验证模拟结果的准确性,着重将温度场的模拟结果和实测结果进行了对比分析,发现相对误差在8%以内,充分证实了模拟结果的可靠性。

**关键词:**菊花;热风干燥;温度场;CFD

**Abstract:** In the process of drying chrysanthemum, the flow field distribution in the dryer was the main factor affecting its quality. In order to further study the distribution and variation of flow field in the drying process of chrysanthemum, a physical model of the drier was established for the negative pressure dryer. The distribution of velocity field, pressure field and temperature field in the drying process of chrysanthemum were obtained by mesh division, parameter determination and calculation. The numerical simulation of flow field distribution in the drying process of chrysanthemum was realized. In order to verify the accuracy of the simulation results, the simulation results of the temperature field and the measured results were compared and analyzed, and the relative error was found to be within 8%, which fully confirmed the reliability of the simulation results.

**Keywords:** Chrysanthemum; Drying; Temperature field; CFD

菊花属于菊科多年生草本植物,具有丰富的药用价值<sup>[1-2]</sup>。鲜菊花水分含量很高,采收后需要及时干燥,否则极易引起霉败等变质。菊花的干燥方式可分为自然晾晒、硫磺熏蒸、真空干燥<sup>[3]</sup>、远红外干燥<sup>[4]</sup>、气流干燥<sup>[5]</sup>、微波干燥<sup>[6]</sup>等,研究<sup>[7]</sup>表明采用微波-气流组合干燥技术相比单一干燥方式可大大提高菊花干燥生产效益。在干燥过程中,结合干燥机的实际工作情况,干燥机内部的流场分布严重影响菊花的干燥品质<sup>[8]</sup>。目前,国内外对菊花干燥过程中干燥室内流场分析研究较少。霍二光<sup>[9]</sup>通过分析菊花的物性参数和烘干室的内部结构,应用 FLUENT 软件对菊花烘干室内气流组织进行模拟分析,通过改变烘干室的内部结构,提高了烘干室内气流组织的均匀性,但并未分析菊花干燥过程中干燥室内的流场特性及热质传递现象。本试验拟以 ZDG230 型负压式电加热干燥机为试验样机,运用 FLUENT 软件分析菊花烘干过程中干燥机内部的流场分布特性,为今后优化菊花干燥工艺、提高菊花干燥品质提供参考。

### 1 计算模型

鲜菊花:采摘于济源鸿润苗木有限公司,经测量得初始状态下鲜菊花的含水率为84%、密度为465.6 kg/m<sup>3</sup>、孔隙率为54.51%,在干燥机内每层菊花铺放厚度为5 cm。

#### 1.1 几何建模和网格划分

负压式电加热干燥机是利用电加热管将外界输送到加热室的干冷空气加热。干燥室内部风机叶片快速旋转使风机附近空气流速变大气压变小,使干燥室内气压小于外界气压形成负压,由于干燥室内外压差的作用使空气由室外补偿流入室内<sup>[10-12]</sup>。ZDG230 型负压式干燥机干燥室的内尺寸为125 cm(长)×93 cm(宽)×127 cm(高),建模时默认选用干燥机的中心为坐标系的原点。干燥室的菊花层数设计为10层,则菊花堆积区域(多孔介质区域)在Z坐标轴上的对应区间为(46.5 cm, 78.2 cm),干燥机的物理模型如图(1)所示。

**基金项目:**国家现代农业产业技术体系(编号:CARS-04-PS23);河南省科技攻关项目(编号:152102110051);河南省自然科学基金项目(编号:162300410155)

**作者简介:**李赫,男,河南农业大学副教授,硕士生导师,博士。

**通信作者:**张开飞(1978—),男,河南农业大学讲师,博士。

E-mail: kaifeizhang@163.com

**收稿日期:**2018-08-01

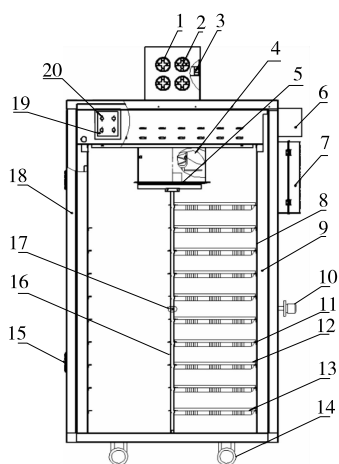


图 1 干燥机物理模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of drying model

通过前处理软件 GAMBIT 进行网格划分,为兼顾计算精度和运算效率,采用六面体网格单元分块划分网格的方案。在干燥机的菊花堆积区域(多孔介质区域)采用较密的网格划分格式,而在其它区域则采用相对稀疏的网格划分格式,共产生  $2.45 \times 10^6$  个网格单元。

### 1.2 基本假设

根据负压式电加热干燥机两侧送风的特点,认为菊花干燥区域为多孔介质区域,则湿菊花的热风干燥过程就是典型的多孔介质热质传递过程,对传热过程做以下假设:

(1) 干燥机的干燥室内分布有装料门,从简化数学模型的角度出发,认为其物性参数和聚氨酯的物性参数是一致的。

(2) 干燥机内空气为不可压缩的理想气体。

(3) 菊花与菊花之间的热传导忽略不计。

(4) 由于热空气温度不高,所以仅考虑对流换热,不计辐射换热。

(5) 干燥机的通风排湿顺畅。

(6) 干燥机的聚氨酯箱壁为绝热体,其热容量忽略不计。

### 1.3 计算模型建立

本试验主要研究在菊花烘干过程中干燥机内部流场分布及变化规律。质量守恒方程又叫做连续性方程,任何流动问题都必须满足连续性方程,式(1)为质量守恒方程的表达式<sup>[13]</sup>。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

引入矢量符号  $\text{div}(a) = \partial a_x / \partial x + \partial a_y / \partial y + \partial a_z / \partial z$ , 式(1)可写为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu) = 0, \quad (2)$$

式中:

$\rho$  —— 密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$t$  —— 时间,  $\text{s}$ ;

$\mu$  —— 速度矢量,  $\text{s/m}$ ;

$u, v, w$  —— 速度矢量  $\mu$  在  $x, y$  和  $z$  方向的分量,  $\text{s/m}$ 。

标准  $k-\epsilon$  两方程模型是近些年应用范围最广的湍流模型,它是由湍动能  $k$  方程和湍动耗散率  $\epsilon$  的方程共同构成的<sup>[14-15]</sup>。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon w_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (4)$$

式中:

$G_b$  —— 由于浮力引起的湍动能  $k$  产生项;

$G_k$  —— 由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项;

$Y_M$  —— 代表可压湍流中脉动扩张的贡献,  $Y_M = 0$ ;

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$  —— 与湍动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  对应的 Prandtl 数,

分别为 1.0, 1.3;

$S_\epsilon, S_k$  —— 用户自定义的源项;

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$  —— 经验常数,分别为 1.44, 1.92, 0.00。

### 1.4 边界条件

在涉及到湍流的计算中,需要给定入口边界上的湍流参数,通过给定湍流强度  $I$ 、水力直径  $D_H$ 、湍流动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  等来定义流场边界上的湍流。本试验选用的湍流参数为湍流强度  $I$  和水力直径  $D_H$ 。根据流体力学的经典理论,对于完全发展的管道中的流动,湍流强度  $I$  和水力直径  $D_H$ <sup>[16-17]</sup>,可由式(5)、(6)得到:

$$I = 0.16 (Re_{D_H})^{\frac{1}{8}}, \quad (5)$$

$$D_H = 4 \times \frac{A}{P_w}. \quad (6)$$

式中:

$Re_{D_H}$  —— 以水力直径  $D_H$  为特征长度求出的雷诺数;

$A$  —— 截面面积,  $\text{mm}^2$ ;

$P_w$  —— 湿周,  $\text{mm}$ ;

选用压力出口边界条件,出口气流的压力为 50 100 Pa,出口气流的温度为实测温度 40 °C 干燥机壁面为绝热壁面。

### 1.5 物理参数及相关参数

负压式干燥机的干燥模型需要用到的物理属性及相关参数如图 2 所示。其中空气的密度、比热容、导热系数、黏度是取其在常温下的热物性值,并且假设干燥过程中菊花和箱壁的热物性值为常数。

## 2 菊花干燥过程数值模拟结果及流场分析

### 2.1 速度场分析

图 3 为  $y = 0.6 \text{ m}$  平面上的速度场分布图。由图 3 可知,干燥室内热气流在分布上呈现一定的规律性,整体上越

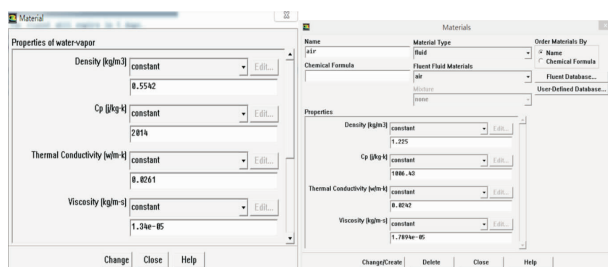


图 2 物理属性及相关参数

Figure 2 Physical properties and related parameters

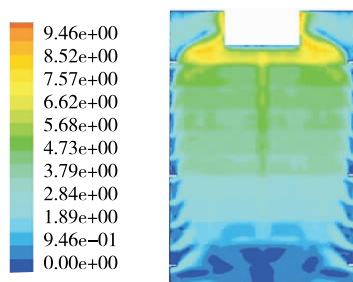


图 3 干燥机内部速度场分布图

Figure 3 Distribution of velocity field in dryer

接近上部风机位置风速越大。热空气从干燥机两侧进入干燥机内部,在风机的抽力作用下,热风沿干燥机  $Z$  轴方向运动,运动过程中受到上方堆积菊花的阻碍作用,热空气流速缓慢增加,分层现象显著,在出口处达到最大风速。干燥机内菊花放置区域物料间风速大致在  $0.47 \sim 8.04 \text{ m/s}$  呈梯度变化,层与层之间风速较为均匀,能满足排湿要求,且有利于同一层面上物料同步干燥。

图 4(a)、(b)、(c)分别为  $Z$  在  $0.11, 0.70, 1.38 \text{ m}$  平面上托盘内物料的速度场分布图。由图 4 可知,不同高度层上菊花的速度场有明显差别,且整体沿干燥机  $Z$  轴方面递增。据此可以得出,放置菊花时,可以根据烤箱高度安排放置菊花的重量及层厚。即干燥时下层应适当减少菊花的摊叶层厚,上层则应适当增加菊花的摊叶厚度,这样有利于物料的同步干燥,从而获得较好的菊花质量。

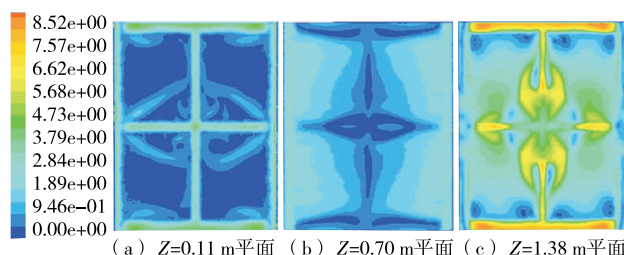
(a)  $Z=0.11 \text{ m}$ 平面 (b)  $Z=0.70 \text{ m}$ 平面 (c)  $Z=1.38 \text{ m}$ 平面

图 4 不同高度托盘内物料的速度云场

Figure 4 The velocity field of the material with different height

## 2.2 压力场分析

图 5 为  $y=0.6 \text{ m}$  平面上的压力分布图。由图 5 可知,在热气流上升的过程中,由于受物料的阻碍作用,气压会有一定的损耗,表现为压强沿干燥机  $Z$  轴方向不断减小,并且在出口处有最小值。风机的抽力以及干燥机内部形成的压

力梯度成为流体流动的驱动力,保证了湿热空气是沿着干燥机  $Z$  轴方向运动,直至从风机处流向干燥机外部,从而达到更有效的排湿效果。

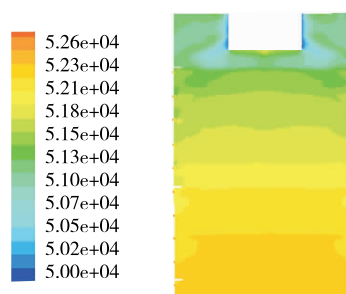


图 5 干燥机内部压力场分布图

Figure 5 Distribution of pressure field in dryer

图 6(a)、(b)、(c)分别为  $Z$  在  $0.11, 0.70, 1.38 \text{ m}$  平面上托盘内物料的压力场分布图。从图 6 中可以看出,同一高度平面上各托盘内物料压力场分布较为均匀,不同高度平面上则区别明显。热气流沿干燥机  $Z$  轴方向运动时,在干燥机底部接触第一层物料前,由于途中没有受到堆积菊花的阻碍作用,压强基本没有损失。当进入菊花堆积区后,受到物料的阻碍作用,压强减小。

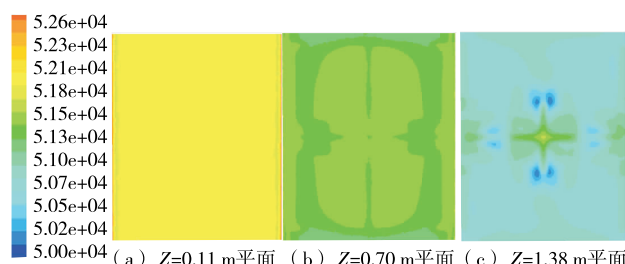
(a)  $Z=0.11 \text{ m}$ 平面 (b)  $Z=0.70 \text{ m}$ 平面 (c)  $Z=1.38 \text{ m}$ 平面

图 6 不同高度托盘内物料的压力云场

Figure 6 The pressure field of the material with different height

## 2.3 温度场分布

虽然影响菊花干燥质量的因素有很多,如干燥设备、物料装载量、风速、风压等情况,但其大部分因素是通过影响干燥机内的温度分布来影响菊花干燥质量的。因此研究干燥机内部的温度分布情况对指导实际生产有重要意义<sup>[18]</sup>。

图 7 为  $y=0.6 \text{ m}$  平面上的温度分布图。由图 7 可知,干燥过程中干燥机的垂直温差为  $5 \sim 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而菊花放置区域垂直温差为  $3 \sim 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。干燥过程中菊花要不断地从周围环境中获得热能,其中一部分热能用来提高菊花的温度,另一部分则用于菊花水分的蒸发,因此热气流在通过菊花放置区域后,温度有较为明显的降低。从图 7 中也可以发现,干燥机进风口两侧温度较高,沿  $X$  轴接近中心处,温度有所降低,但物料区整体温度分布较为均匀。这是因为菊花在干燥过程中从环境吸热,导致干燥机内环境温度低于初始进风口的热风温度,随后湿热空气在压力梯度和风机吸力的作用下向上运动,运动过程中不断地带走菊花水分,致使温度出现小幅下降。

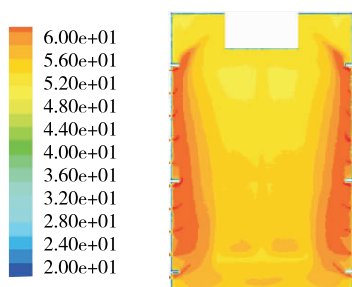


图 7 干燥机内部温度场分布图

Figure 7 Distribution of temperature field in dryer

图 8(a)、(b)、(c)分别为  $Z$  在 0.11, 0.70, 1.38 m 平面上的托盘内物料的温度场分布图。由图 8 可知,在同一高度层面上,不同托盘的温度场分布较为均匀,这有利于同一层面上菊花的同步干燥。此外,干燥机底部托盘温度较高,沿  $Z$  轴方向上呈减小趋势,不过减小幅度较小,底部至顶部温差大致在 4~6 °C,保证了不同层菊花在相近的温度下干燥,为菊花的干燥创造了良好的干燥环境。

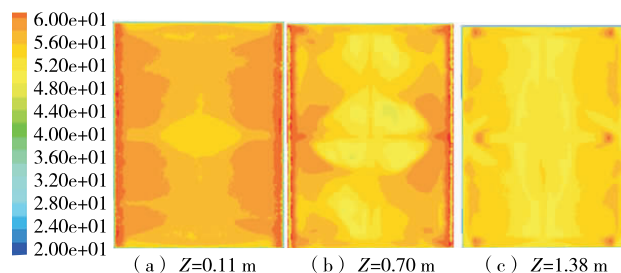


图 8 不同高度托盘内物料的温度云场

Figure 8 The temperature field of the material in different heights

2.3.1 X-Z 平面上干燥初期温度云场图 图 9 分别显示的是干燥时间为 1, 2, 3 h 时  $y=0.4$  m 平面上的温度场。由图 9 可知,在干燥初始阶段干燥机进风口两侧温度较高,接近 60 °C。而中间区域温度明显较低,且底部温度明显高于干燥机上半部分温度,干燥机内最大温差接近 10 °C。这是因为干燥初始阶段,热量在传递过程中,大部分热量用于加热物料,随着热空气向干燥机中心和高度方向运动的过程,热量不断被消耗,致使温度降低。随着干燥时间的推移,虽然干燥机上部 and 底部仍存在温差,但气流在整个高度上的分布趋于均匀。为菊花的均匀干燥提供了有利条件。干燥进行 3 h 时,此时整个干燥机内部温度接近均匀状态,此时菊花

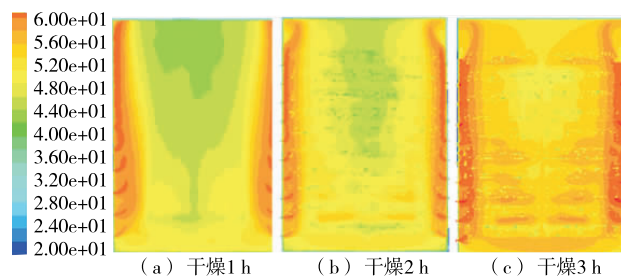


图 9  $y=0.4$  m 平面上温度云场图

Figure 9 Temperature cloud field in  $y=0.4$  m plane

的失水速度和失水量较大,而蒸发需要从周围环境中吸热,导致整体环境温度低于进风口温度。

2.3.2 X-Y 平面上干燥初期温度云场图 图 10(a)、(b)、(c)分别为干燥 1, 2, 3 h 时  $Z=1.38$  m 平面上温度云场图。由图 10 可以直观看出,随着干燥时间的延长,图中低温区域越来越小,温度整体分布越来越均匀。干燥 1 h 时,该层面上温度左右两侧高,中心处温度低。这是因为热风从左右两侧通风孔向中心运动时,受到物料的阻碍,热量不断地被消耗,再加上热风供应时间较短,致使中心区域同壁面温差较大。图 10(b)与图 10(a)相比提供的热量增多,中心处同进风孔处温差缩小。不过该层面上温度分布仍不够均匀。当干燥进行 3 h 时,整个层面温度分布已比较均匀,只有在图 10(c)右下方靠近壁面位置处,出现温度偏低情况,可能模拟物料干燥过程中,此处出现了涡流波动。但整体上干燥 3 h 时,该层面温度分布基本已达到均匀状态,整体温差相差在 5 °C 左右。

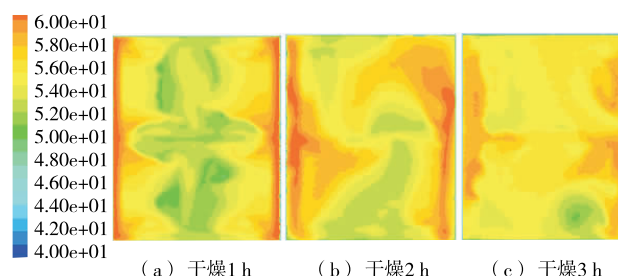


图 10  $Z=1.38$  m 平面上温度云场图

Figure 10 Temperature cloud field in  $Z=1.38$  m plane

图 11(a)、(b)、(c)分别为干燥 1, 2, 3 h 时  $Z=0.7$  m 平面上温度云场图。由图 11 可得,干燥 1 h 时,该层面上四周温差较小,低温区域主要集中在整个平面的中心处。这是因为物料在干燥时,热风从左右两侧向中心处运动的过程中,也在向上运动,造成该层平面上传递到中心处的热量较少,与此同时下层热风向上运动的过程中,由于蒸发吸热,致使温度较低,这也造成了中心处出现低温区。从图 11 还可以发现从两侧到中心处温度均有所升高,这是因为随干燥的进行,热量传递至中心处,使该处物料温度上升并出现水分蒸发。当干燥 3 h 时,该层最大温差大致在 4 °C 左右,基本达到了均匀状态,且均匀性要优于  $Z=1.38$  m 平面。

图 12(a)、(b)、(c)分别为干燥 1, 2, 3 h 时  $Z=0.11$  m 平面上温度云场图。由图 12 可以看出,干燥时  $Z=0.11$  m 平

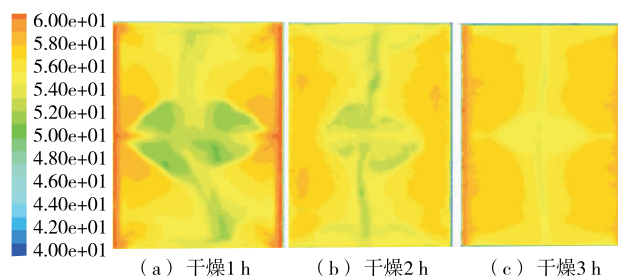


图 11  $Z=0.7$  m 平面上温度云场图

Figure 11 Temperature cloud field in  $Z=0.7$  m plane

面上达到均匀状态较早。图 12(a)中,该平面在干燥 1 h 后,绝大部分区域温差较小,基本达到了均匀状态,仅中心点和上下边框处相对周围区域存在较大温差。随着干燥的进行,温度在该平面的分布相对越来越均匀,当干燥进行 2~3 h 后,图中大部分区域温度已经达到 56 ℃,区域间温差在 3 ℃ 左右。

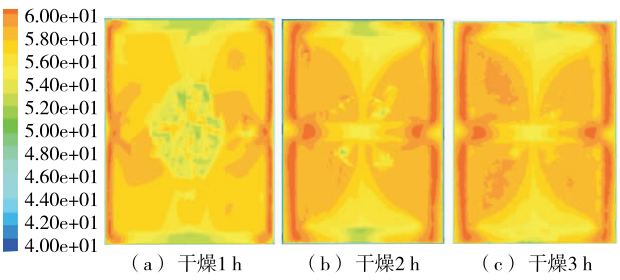


图 12 Z=0.11 m 平面上温度云场图

Figure 12 Temperature cloud field in Z=0.11 m plane

对图 10~12 进行纵向比较,发现整体上越靠近烤箱底部,温度达到均匀状态越快。当干燥时间一致时,从物料热量变化上来看,Z=0.11 m 平面>Z=0.70 m 平面>Z=1.38 m 平面,这是因为热气流在沿干燥机中心方向和高度方向运动时,热量不断用于加热物料和蒸发物料中的水分,因此越靠近顶部,物料温度越低。

表 1 不同层面的温度分布

Table 1 The temperature distribution at different levels

| 干燥时<br>间/h | 平面层/<br>m | 托盘 1 |      | 托盘 2 |      | 托盘 3 |      | 托盘 4 |      |
|------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            |           | 实测   | 模拟   | 实测   | 模拟   | 实测   | 模拟   | 实测   | 模拟   |
| 1          | 0.11      | 53.3 | 55.1 | 53.1 | 55.3 | 53.8 | 55.6 | 53.5 | 55.4 |
|            | 0.70      | 50.2 | 52.3 | 50.3 | 52.1 | 49.8 | 52.0 | 50.1 | 51.8 |
|            | 1.38      | 48.6 | 50.5 | 49.7 | 51.5 | 50.3 | 52.1 | 49.1 | 50.8 |
| 2          | 0.11      | 53.4 | 56.2 | 54.1 | 56.8 | 53.8 | 56.4 | 53.2 | 56.1 |
|            | 0.70      | 51.5 | 54.7 | 50.8 | 53.9 | 51.1 | 54.3 | 52.2 | 54.8 |
|            | 1.38      | 50.6 | 53.1 | 50.9 | 53.8 | 51.2 | 54.0 | 49.6 | 52.3 |
| 3          | 0.11      | 55.8 | 57.1 | 56.1 | 57.6 | 55.1 | 57.2 | 54.9 | 57.3 |
|            | 0.70      | 52.1 | 55.2 | 52.6 | 55.4 | 51.9 | 55.3 | 51.8 | 55.2 |
|            | 1.38      | 50.9 | 54.5 | 51.3 | 54.9 | 51.1 | 54.8 | 50.5 | 54.1 |

3.3 检测结果分析

分别对干燥 1,2,3 h 时,不同平面上各监测点温度的实测值和模拟值进行对比分析,并计算出相应的误差情况。

$$a_i = \left| \frac{E_i - S_i}{E_i} \right|, \tag{7}$$

式中:

$a_i$ ——第  $i$  个监测点实测值与模拟值之间的相对误差;

$E_i$ ——第  $i$  个监测点实测值;

$S_i$ ——第  $i$  个监测点模拟值, $i=1,2,3,4$ 。

因为每层的 4 个托盘均在同一平面上,故托盘均用 1~4 号来表示(见图 13),利用式(7)来计算检测结果的误差情况,

3 试验验证

3.1 监测点布置

为验证模拟结果的准确性,分别在干燥机内的 Z=0.11 m 平面、Z=0.70 m 平面、Z=1.38 m 平面布置温度传感器,每层平面布置 16 个,共计 48 个监测点,每层监测点布置如图 13 所示。待干燥机运行稳定后,测定各监测点的温度值,为方便列表分析,令每个托盘上 4 个监测点测得温度的平均值作为该托盘区域的平均温度。

3.2 试验及模拟结果统计

对试验测量与模拟数据,按照干燥时间的顺序进行了划分,如表 1 所示。

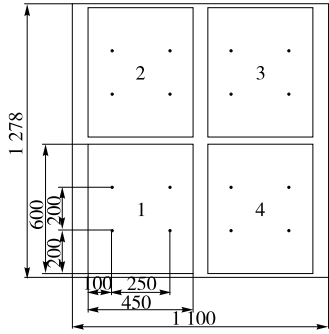


图 13 温度监测点布置图

Figure 13 Temperature monitoring site layout

相对误差如图 14 所示。

对比结果分析:

(1) 通过对实测值和模拟值的比较,发现实测值略低于模拟值,主要原因可能是实际干燥中干燥机箱壁会造成部分热量的散失,而模拟的模型为理想模型,因此会造成数据的误差。

(2) 据图(14)所示,各托盘监测点的误差值均<8%,所以可以认为模拟计算结果能够 and 实测结果较好吻合,证明通过 FLUENT 软件进行模拟计算是正确可行的。

4 结论

(1) 通过分析 ZDG230 型负压式电加热干燥机的基本结

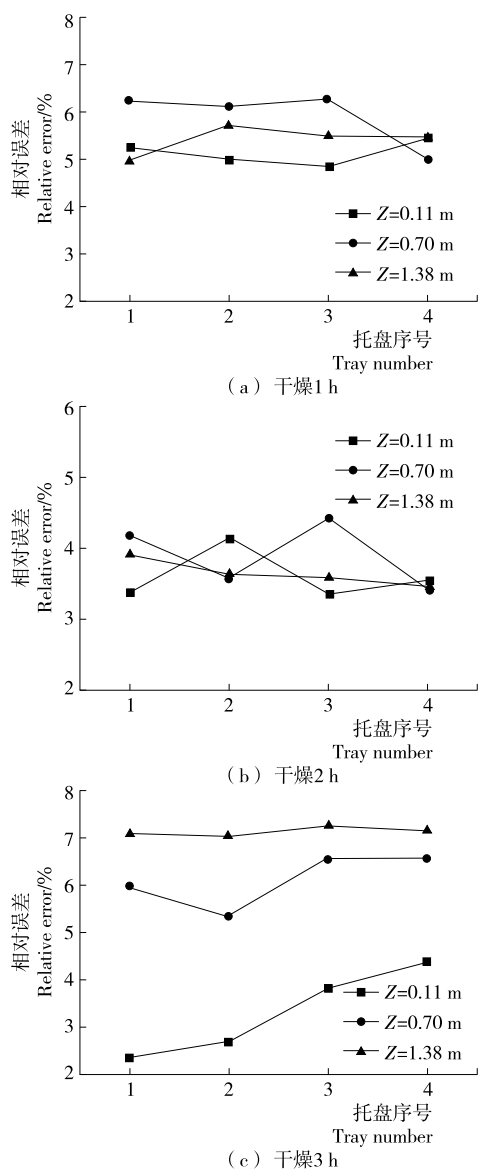


图 14 各托盘监测点误差图

Figure 14 The error map of the monitoring point

构和工作原理,构建了干燥机的几何模型。采用六面体网格单元分块划分网格的方案及前处理软件 GAMBIT 进行网格划分。根据负压式电加热干燥机两侧送风,以及菊花干燥区域为多孔介质区域的特点建立了 CFD 模型。

(2) 应用 FLUENT 软件对模型的求解计算实现了菊花热风干燥过程中流场分布的数值模拟,得到了菊花干燥过程中的速度场、压力场及温度场的分布规律。在菊花放置区域干燥机内流场速度随烤箱高度而增大,风速大致在  $0.47 \sim 8.04 \text{ m/s}$  时呈梯度变化;干燥室内压力沿干燥机 Z 轴方向不断减小,不同高度平面上差别明显,在同一高度上各托盘内物料压力场分布较为均匀;在干燥初始阶段菊花放置区域初期温度场分布最大温差接近  $10^\circ\text{C}$ ,且其温度场分布在垂直轴心方向温度较低,随着干燥时间的推移,其温度场分布逐渐趋于均匀。

(3) 为确保模拟结果的可信度,着重对干燥稳定前 1,2,3 h 干燥机内温度场的分布情况进行了模拟和验证,验证结

果为各监测点的误差均在 8% 以内,证明了模拟结果的可靠性。其结果表明利用 FLUENT 模拟分析方法对提高菊花干燥品质具有一定的参考价值,对 ZDG230 型负压式电加热干燥机的结构优化改造具有重要的指导意义。

## 参考文献

- [1] 张清华, 张玲. 菊花化学成分及药理作用的研究进展[J]. 食品与药品, 2007(2): 60-63.
- [2] 王婷婷, 王少康, 黄桂玲, 等. 菊花主要活性成分含量及其抗氧化活性测定[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 95-99.
- [3] 韩波. 菊花干燥工艺研究[D]. 保定: 河北大学, 2011: 1-2.
- [4] 李保国, 华泽钊, 刘占杰. 鲜花真空冷冻干燥实验研究[J]. 制冷学报, 2001(4): 54-58.
- [5] 李格萍, 黄卫萍, 李长友. 远红外真空组合干燥菊花脑特性研究[C]// 中国农业工程学会. 2007 年中国农业工程学会学术年会论文摘要集. 北京: 中国农业工程学会出版社, 2007: 43.
- [6] 苏慧, 郑明珠, 蔡丹, 等. 微波辅助技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 165-167.
- [7] 张晓辛, 肖宏儒, 曹曙明, 等. 利用微波—气流组合干燥技术干燥菊花的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000(4): 129-131.
- [8] 刘道奇, 范传辉, 董慧锋, 等. 基于 Fluent 的负压式电加热干燥机内部流场分析与机构参数优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 94-98, 191.
- [9] 霍二光. 菊花烘干室内气流组织模拟与优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 38-50.
- [10] 肖朋, 王军. 后置导叶式轴流风机内部流场数值模拟及性能预测[J]. 风机技术, 2005(4): 5-7.
- [11] WISSINK J G. DNS of separating, low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 626-635.
- [12] 陈怡群, 常春, 胡志超, 等. 循环式谷物干燥机干燥过程的模拟计算和分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 255-259.
- [13] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 7.
- [14] 牟国良, 张学军, 史增录. 结合 Fluent 仿真软件的循环式干燥机改进设计研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(4): 684-689.
- [15] 余波, 王强, 王霜. 基于 Fluent 的风筛式清选室气流场的仿真[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 358-361.
- [16] 李浩涌. 一种饲料烘干机的温度控制研究及其流场分布数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 42-43.
- [17] 汪火良. 多孔介质传热传质过程的数值模拟: 烟叶烘烤过程模拟技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010: 43-45.
- [18] 黄俭花. 组合干燥过程物料内部温度测试系统与温度分布研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012: 41.