

网带式花椒干燥机流场模拟与结构优化

董霖^{1,2} 王爽³ 欧阳锐凌³ 曾高升³ 谭果³ 何光赞⁴

(1. 西华大学现代农业装备研究院, 成都 610039; 2. 四川省现代农业装备工程技术研究中心, 成都 610039;
3. 西华大学机械工程学院, 成都 610039; 4. 四川洁能干燥设备有限责任公司, 成都 610095)

摘要: 花椒干燥过程中网带式花椒干燥机内气流强度和均匀性影响花椒干燥后品质,通过实验进行花椒参数测定和模型可靠性验证,采用多孔介质模型对结构优化前后网带式花椒干燥机流场进行数值模拟研究,根据网带式花椒干燥机气流分布特性提出了增加导流板的优化方案,考察了不同角度导流板气流分布特性。结果表明:导流板角度变化对干燥机气流强度与均匀性有一定影响,最优导流板角度为 2.5° ,较原始结构在干燥机 XY 、 XZ 、 YZ 面平均速度平均增加6.8%、10.8%、5.2%,不均匀系数平均减小8.7%、8.5%、2.7%。

关键词: 花椒; 干燥; 多孔介质; 网带式干燥机; 气流分布; 结构优化

中图分类号: TS255 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)S1-0373-08

Flow Field Simulation and Structural Optimization of Mesh-belt Pepper Drying Machine

DONG Lin^{1,2} WANG Shuang³ OUYANG Ruiling³ ZENG Gaosheng³ TAN Guo³ HE Guangzan⁴

(1. Institute of Modern Agricultural Equipment, Xihua University, Chengdu 610039, China

2. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Modern Agriculture Equipment, Chengdu 610039, China

3. School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China

4. Sichuan JieNeng Drying Equipment Company, Limited, Chengdu 610095, China)

Abstract: In the process of pepper drying, the airflow intensity and uniformity in the mesh-belt pepper dryer will affect the quality of pepper after drying. The results of pepper parameters were measured by experiments to set the parameters of porous media. The flow field model of the drying chamber was constructed by ANSYS Fluent and the reliability of the model was verified. The average velocity and non-uniformity coefficient M were used to characterize the airflow intensity and uniformity of the drying chamber. The porous media model was used to simulate the flow field of the mesh-belt pepper dryer before and after structural optimization. The results showed that the adjacent air inlets of the original structure of the mesh-belt dryer were arranged in opposite directions, which caused the airflow to disperse and converge to produce eddy current. The pressure at the airflow confluence was increased, the airflow flow was blocked, and the flow velocity was decreased. The flow velocity at the center of the eddy current was extremely low, resulting in the unevenness of the overall flow field. According to the airflow distribution characteristics of the mesh-belt dryer, a structural optimization scheme for increasing the deflector was proposed. The change of the deflector angle increased the average velocity of the airflow and reduced the non-uniformity coefficient. When the deflector angle was $0^{\circ} \sim 7.5^{\circ}$, the drying chamber had the best airflow intensity and uniformity, so the deflector deflection angles were set to be 0° , 2.5° , 5° , and 7.5° . The influence of four angles of the deflector on the airflow in the drying chamber was analyzed. When the angle of the deflector was 2.5° , the airflow distribution was optimal. Compared with the original structure, the average velocity increments on the XY , XZ , and YZ planes of the dryer were 6.8%, 10.8% and 5.2%, respectively, and the non-uniformity coefficient was reduced by 8.7%, 8.5% and 2.7% on average.

Key words: pepper; drying; porous media; mesh-belt dryer; gas flow distribution; structural optimization

收稿日期: 2023-06-02 修回日期: 2023-08-21

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2023YFG0049、2022YFG0065)和四川省现代农业装备工程技术研究中心项目(XDNY2021-003)

作者简介: 董霖(1973—),男,教授,主要从事农产品加工与贮藏研究,E-mail: donglin11723@163.com

0 引言

花椒成熟后,采摘的新鲜花椒含水率较高,需要及时干燥使其含水率降至 11% 才能够有效防止花椒的腐烂(颜色发褐发黑,气味变酸变臭)^[1]。传统干燥方式利用阳光的曝晒或自然风干等使花椒脱水,但易受天气影响,干燥产品质量差、效率低^[2]。为了提高花椒干燥效率,控制质量,防止霉变,实现规模化生产,引进网带式花椒干燥机进行干燥成为必然趋势^[3-9]。在多层网带式花椒干燥机中,通过热空气在网带间流动,将湿物料中的水分蒸发出来,若流场分布不均匀将会导致干燥效果不佳,保持干燥室流场分布均匀是提高干燥效果的关键。

国内外学者近年来在干燥室流场分布上做了许多研究,文献[10] 研究发现水平截面纵横比与干燥房性能呈负相关,热风出口布置于上部使得干燥性能呈现出更好的效果。文献[11] 基于 CFD 对 6 层网带式干燥机进行风速模拟与实验对比,得出模拟与实验值一致并提出 3 种结构优化方案提高流场均匀性。文献[12] 基于 Fluent 软件对设计的 7 种干燥机进行流场数值模拟,得出流场均匀性最优的一种并进行干燥机制造与实验。文献[13] 利用 CFD 对网带式干燥机内温度场进行数值模拟,出入口风速为 6 ~ 8 m/s 时腔内温度分布不均匀系数最小。文献[14] 利用多孔介质模型对结构优化设计前后的菊花热风干燥进行数值模拟,根据引风罩长度与角度提出 9 种优化方案。文献[15] 通过增设干燥房导流板和设置不同排风速度借助计算流体力学(CFD)仿真软件进行干燥房内气流分布的数值模拟研究。文献[16] 设计了满足干燥 1 t 枸杞鲜果的热泵干燥室,并对热泵干燥室进行实验,其结果均优于燃煤干燥。

当前研究大多停留在对干燥房、干燥箱内部流场改善,而对于能够大批量、连续性干燥的网带式花椒干燥机内部流场均匀性以及结构优化的相关研究较少。针对上述问题,文中以 4 层网带式花椒干燥机为研究对象,建立干燥机三维模型,以花椒为原材料测定多孔介质模型参数,使用 ANSYS Fluent 软件对干燥室进行数值模拟,并通过增设导流板及调整其角度,以达到优化干燥室结构、提高干燥质量的目的。

1 网带式干燥机流场模拟

1.1 干燥机工作原理

4 层网带式花椒干燥机(JNLJR-5GDC-IV80 型)为校企联合研发的新产品,总功率为 130 kW,干

燥机外形尺寸(长×宽×高)为 8 132 mm×5 000 mm×2 650 mm,图 1 为基于 UG 建立的 4 层网带式花椒干燥机模型,由图 1 可见每侧有 6 个进风口、2 个上回风口及 2 个下回风口,进风口尺寸:900 mm×180 mm,上回风口尺寸:600 mm×300 mm,下回风口尺寸:1 000 mm×550 mm。花椒经上料网带送至干燥室第 1 层网带上,花椒层被平料装置制成厚度 10 cm 的料层,干燥室内相邻层网带回转方向相反,花椒运行到端部落到第 2 层网带继续传送,以此往复在干燥室体内移动,直至第 4 层网带端部掉落到出料装置,此过程中热气流与花椒进行湿热交换实现物料的干燥,最后干燥完成的花椒由出料装置卸出,经传送带送至包装袋。

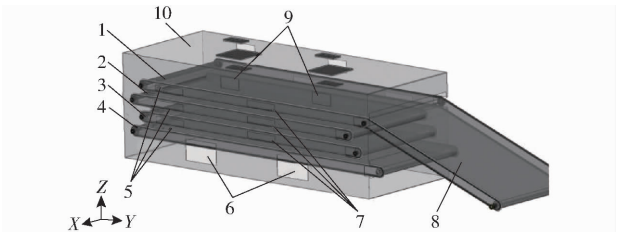


图 1 4 层网带式花椒干燥机模型
Fig. 1 Model of four-layer mesh-belt heat pump dryer
1. 第 1 层网带 2. 第 2 层网带 3. 第 3 层网带 4. 第 4 层网带
5. 左进风口 6. 下回风口 7. 右进风口 8. 上料网带 9. 上回风口 10. 机壁

1.2 干燥机网格划分

干燥机室内部区域即为流体计算域,采用 UG 软件建立流体计算域,忽略对流场模拟没有明显影响的细小复杂几何特征,简化后的计算域模型包括了干燥室壁面、进风口、回风口及多孔介质层,如图 2 所示。为了确定合适的网格数量,对不同网格数量下回风口面平均速度的变化情况进行监测,进行网格无关性验证,结果如图 3 所示。基于验证结果,综合计算精度等因素,最终选取单元格尺寸为 30 mm,总体网格数量为 8.04×10^6 ,网格划分情况如图 4 所示。

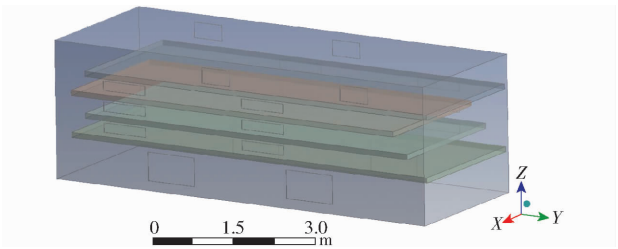


图 2 干燥机室计算域模型
Fig. 2 Computational domain model of drying chamber

1.3 数学模型

4 层网带式花椒干燥机内空气为稳态黏性流动,由于流速较低,密度变化小,气体近似为不可压

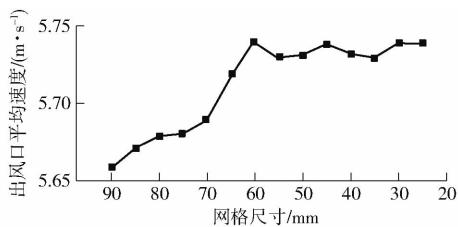


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

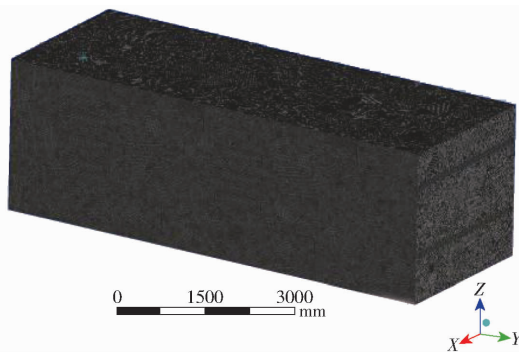


图4 30 mm 流场计算域网格划分

Fig. 4 Mesh division of 30 mm flow field calculation domain

缩的理想气体。流动状态满足质量守恒方程、动量守恒方程^[17]。

1.3.1 质量守恒方程

在单位时间内流入控制体的静质量等于单位时间内流体控制体中质量的增加量。由于干燥室内空气不可压缩,密度 ρ 变化可忽略不计,则连续性方程简化为

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

式中 u —— x 方向上的速度分量, m/s
 v —— y 方向上的速度分量, m/s
 w —— z 方向上的速度分量, m/s

1.3.2 动量守恒方程

动量守恒方程,简称 N-S 方程,是指在微元体中流体动量对时间的变化率等于外界作用于微元体上的合力,即在微元体中流体所受合力等于流体质量和流体加速度的乘积。对于不可压缩常粘度的流体, N-S 方程可简化为

$$\rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} u \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] = \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中 P ——作用于微元体上的压力, Pa

μ ——流体动力粘度, Pa·s

u_i, u_j ——各时均速度分量

x_i, x_j ——各坐标分量

当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$ 。

1.3.3 湍流模型

对网带式花椒干燥机内部流场进行模拟,热空

气通过进风口进入干燥室,并通过花椒多孔介质层。由于受到干燥室壁面回风口位置影响,干燥室内湍流状态较明显,进风口与回风口位置相近,且存在狭窄缝隙,使得流场中存在回流、旋转流等,因此兼顾计算与模拟准确性,选择 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对花椒网带式干燥机内部流场进行模拟。Realizable $k-\varepsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 的模型方程如下:

湍动能 k 方程

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad G_k = \mu_l \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

耗散率 ε 方程

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} (G_k + G_{\delta\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\text{其中} \quad \mu_l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式中 μ_l ——层流黏性系数

μ_t ——湍流黏性系数

t ——时间

G_k ——层流速度梯度产生的湍流动能

G_b ——浮力产生的湍流动能

C_μ ——湍流常数,取 0.09

σ_k ——湍动能湍流普朗特数,取 1.0

σ_ε ——耗散率湍流普朗特数,取 1.3

$G_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ ——经验常数,取 1.44、1.92

$G_{\delta\varepsilon}$ ——湍流扩散率

2 参数实验与计算

在花椒干燥过程中,花椒堆放在金属网带上,由于花椒颗粒之间存在间隙,热气流可通过间隙对花椒进行干燥,因此在 ANSYS Fluent 中需将花椒作为多孔介质进行设置。多孔介质设置需得到花椒的物性参数,包括花椒密度、孔隙率以及多孔介质层粘性阻力系数与惯性阻力系数,因此需要对花椒进行物性参数测定,实验仪器及材料如图 5 所示。

2.1 密度计算公式

花椒实际密度计算公式为

$$\rho_s = \frac{m_1}{V_2 - V_1} \quad (7)$$

式中 m_1 ——花椒质量, kg

V_1 ——初始水位刻度, m³

V_2 ——加入花椒水位刻度, m³

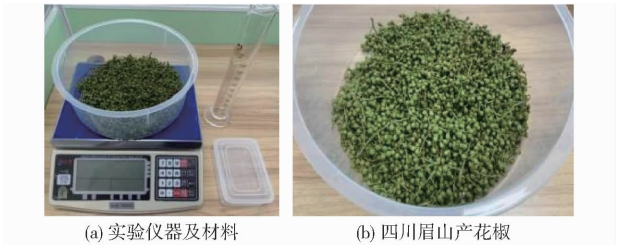


图 5 实验仪器及材料

Fig. 5 Test instruments and materials

花椒堆积密度计算公式为

$$\rho_b = \frac{m_3 - m_2}{V_3} \tag{8}$$

其中

$$V_3 = V_2 - V_1 \tag{9}$$

式中 m_2 ——塑料盒质量, kg
 m_3 ——花椒装满塑料盒总体质量, kg
 V_3 ——花椒实际体积, m^3

2.2 孔隙率计算

花椒孔隙率计算公式为

$$\varphi = \frac{V_0 - V_3}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \tag{10}$$

式中 V_0 ——花椒自然堆积总体积, m^3

花椒平均体积计算公式为

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \frac{m_3 - m_2}{\rho_s} \tag{11}$$

式中 $\bar{V}$ ——花椒平均体积, m^3

N ——花椒粒数

花椒平均直径计算公式为

$$D_\rho = \sqrt[3]{\frac{6\bar{V}}{\pi}} \tag{12}$$

2.3 多孔介质模型

在 4 层网带干燥机中新鲜花椒自然堆积于网带上, 热气流从进风口进入, 通过网带孔隙在花椒间隙中穿流。将网带与花椒层简化为多孔介质模型^[18-19], 多孔介质模型即是动量方程后添加动量方程阻力源项, 动量方程阻力源项由粘性损失项与惯性损失项组成^[20], 即

$$S_i = \sum_{j=1}^3 D_{ij}uv_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij}|v_j|v_j \tag{13}$$

其中

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha}v_j + \frac{1}{2}C_2\rho|v_j|v_j \tag{14}$$

式中 S_i —— i 、 j 方向动能源项

$|v_j|$ ——速度 α ——渗透率

D_{ij} 、 C_{ij} ——粘性阻力系数、惯性阻力系数

粘性阻力系数 α^{-1} 计算公式为

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\varphi)^2}{D_\rho^2\varphi^3} \tag{15}$$

惯性阻力系数计算公式为

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varphi)}{D_\rho\varphi^3} \tag{16}$$

2.4 边界条件

进风口边界设置为速度入口边界条件。实测网带式干燥机共 12 个进风口处风速为 6.8 ~ 7.1 m/s, 设定进风口速度为 7 m/s。入口温度为 70℃, 干燥室壁面为保温层, 边界条件设为无滑移绝热壁面。

雷诺数 Re 计算公式为

$$Re = \frac{\rho vd}{\mu} \tag{17}$$

式中 d ——特征长度, m

湍流强度计算公式为

$$I = 0.16Re^{-1/8} \times 100\% \tag{18}$$

式中 I ——湍流强度, %

通过计算得到 ANSYS Fluent 软件模拟过程中需要的边界条件, 参数设置如表 1 所示。

表 1 边界条件

Tab.1 Boundary conditions

项目	数值/类型
流体介质	空气
入口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7
入口湍流强度/%	3.3
入口温度/℃	70
出口边界类型	压力出口
出口压力/Pa	103 125
壁面设置	无滑移绝热壁面
粘性阻力系数	1 711 301.0
惯性阻力系数	669.6
花椒孔隙率/%	67.8
花椒层密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	331.7

2.5 模型可靠性验证实验

通过实验验证湍流模型、多孔介质模型及模拟方法的有效性。选取 $Z = 1.45\text{ m}$ 、 $Z = 1.85\text{ m}$ 为实验平面, 在实验面上均匀布置监测点, 因为受机械结构影响, 将监测点布置整个实验面并实测比较困难, 为了便于风速仪设置, 所以只布置一半的实验面, 图 6a、6b 所示为监测点位置及其编号。

实验测得 1 ~ 24 不同位置实际风速与 ANSYS Fluent 软件中模拟风速, 如图 7 所示, 模拟风速与实验风速变化趋势一致, 相对误差较小, 说明流场域模型具有可靠性。

3 导流板优化流场设计

3.1 流场均匀性评价

引入平均速度(数值表示其气流强度)和风速不均匀系数(其数值反映流场中气流速度变化的剧烈程度)作为气流组织分布均匀性评价指标。

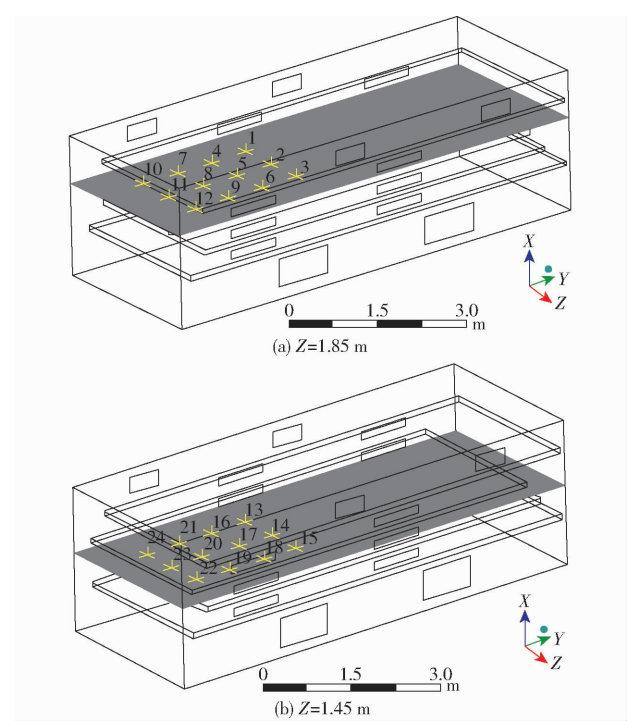


图 6 试验面监测点位置

Fig. 6 Position of monitoring points on test surface

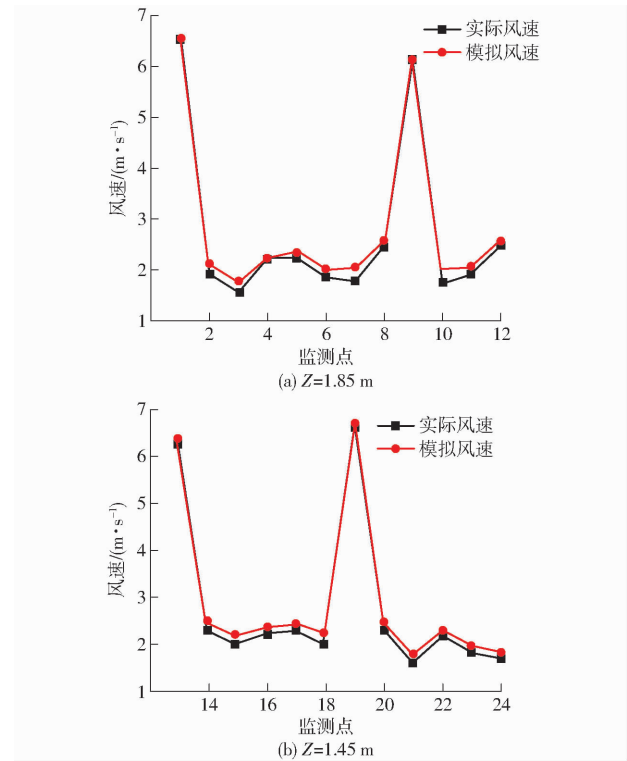


图 7 1 ~ 24 监测点模拟风速与实际风速

Fig. 7 Simulated wind speed and actual wind speed at monitoring points 1 ~ 24

平均速度计算式为

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{n}$$

(19)

式中 $\bar{v}$ ——平面内所有测点风速的平均值
 v_i ——特征平面中测点位置速度

n ——测点个数

风速不均匀系数计算公式为

$$M = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}$$

(20)

式中 σ_v ——平面内所有监测点风速的标准差

3.2 原始结构流场分析

干燥机室内整体气流速度流线如图 8 所示。从图 8 可知气流变化情况与流向,在进风口处气流流速最大,随着进风口方向在物料夹层中前进,气流受对侧壁面阻碍沿壁面向四周扩散。上层进风气流几乎都向干燥室上部流动并从上回风口流出,其中部分气流穿过物料层向上流动,部分气流在壁面与物料间隙中向上流动;中层与下层进风气流几乎都向干燥室下部流动并从下回风口流出,同样其中部分气流穿过物料层向下流动,部分气流在壁面与物料间隙中向下流动,其原因可能在干燥室下部空腔大于上部空腔,下回风口面积大于上回风口,下部空腔压较小。

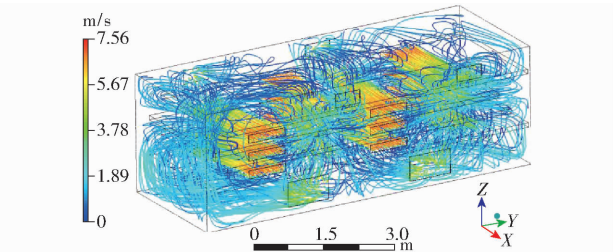


图 8 整体气流速度流线图

Fig. 8 Overall airflow velocity streamline diagram

在 CFD-Post 中,从 3 个方向平面 XY 截面 $Z = 1.1、1.5、1.9\text{ m}$ 对应第 1、第 2、第 3 层进风口平面; XZ 截面 $Y = 1.5\text{ m}$ 对应上回风口平面、 $Y = 2.5\text{ m}$ 对应下回风口平面、 $Y = 3.5\text{ m}$ 对应上回风口平面、 $Y = 3.9\text{ m}$ 对应干燥机中间平面; YZ 截面 $X = -1\text{ m}$ 选取平面、 $X = 0\text{ m}$ 干燥机沿 X 中间平面、 $X = 1\text{ m}$ 选取平面建立截面如图 9 所示,并在截面云图均匀设置 200 个监测点,导出各点云平均速度,计算出 XY 面、XZ 面、YZ 面平均速度和不均匀系数为原始值。

通过对干燥室内部气流流线以及 XY、XZ、YZ 面速压云图及气流均匀性评价进行分析,发现进风气流受到对侧壁面阻碍并发生扩散,并汇集形成涡流,涡流中心流速极低;XY、XZ、YZ 各面平均速度偏小,不均匀系数偏大;结果表明,原始结构的相邻进风口对向布置导致气流分散汇集产生涡流,气流汇集处压力增大,气流流通受阻,流速下降,在涡流中心处流速极低,导致整体流场不均匀。

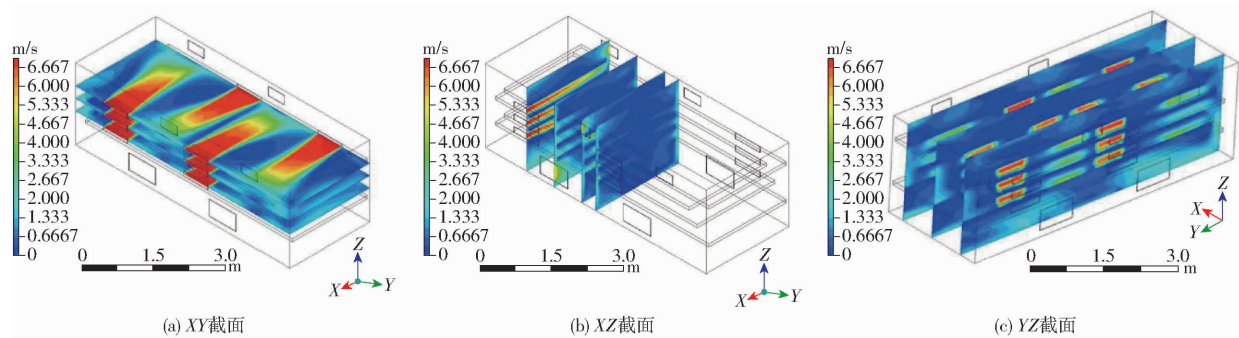


图 9 各截面速度云图

Fig. 9 Velocity cloud diagrams of each section

3.3 结构优化设计

针对原始干燥室流场缺陷问题设计了一种导流板结构。通过改变导流板角度达到气流均匀性优化,减小空间截面内的速度不均匀系数。在干燥室进风口尺寸与位置不变的情况下,共设置 12 个导流板,导流板厚度为 5 mm,每 3 块导流板竖直排成 1 列,每行间距 400 mm,各列导流板在干燥机中平行布置,每列导流板距离 1 955 mm,此排列方式使得导流板将干燥室独立划分为 4 个腔室,如图 10a 所示。将左右导流板旋转一定角度,角度设置如图 10b 所示,对增设不同角度导流板进行流场模拟,当导流板角度 α' 增至 7.5° ,导流板右侧气流受导流板阻碍影响基本消失,有较均匀完整的气流扩散现象,靠近导流板处即将出现气流低速区域,导流板左侧低速气流区域面积持续减小,推测当导流板角度在 $0^\circ \sim 7.5^\circ$ 时,干燥室内有较好的气流强度与均匀性。所以共设置 4 个角度导流板对干燥室气流影响进行研究,分别为 0° 、 2.5° 、 5° 、 7.5° 。

3.4 优化结构分析

对增设不同角度导流板进行流场模拟,计算出 XY 面、XZ 面、YZ 面平均速度和不均匀系数,处理模拟结果得到导流板角度变化与平均速度对比如图 11 所示;导流板角度变化与速度不均匀系数对比如图 12 所示。

平均速度越大表示其气流强度越大,气流受到

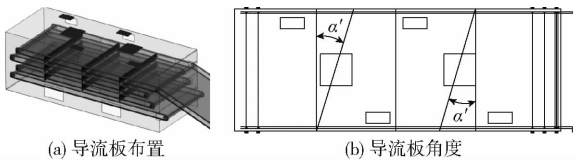


图 10 干燥室导流板设置及角度

Fig. 10 Setting and angle of deflector in drying chamber

阻碍程度越小,干燥室气流流通性越好,则干燥品质越好。由图 11 可知,与原始结构相比当导流板角度变化时干燥室气流平均速度增大且各点平均速度均不相同;导流板角度变化对 YZ 面(图 11c)的平均速度影响最大,其原因是导流板角度为 0° 时平行于进风方向,改变导流板角度使得进风方向改变;与原始结构相比随着导流板角度变化平均速度先增大后减小,当导流板 $\alpha' = 2.5^\circ$ 在各面平均速度最大,较原始结构在 XY、XZ、YZ 面平均速度平均增量分别为 6.8%、10.8%、5.2%。

速度不均匀系数反映流场中气流速度变化的剧烈程度。若流场中的气流组织分布均匀性越差时,速度不均匀系数的值偏大,空间内的气流速度差越大,则物料干燥效率与干燥质量越低。由图 12 可知,导流板角度改变对 XY 面(图 12a)速度不均匀系数影响最大,其原因是原始结构涡流主要分布于相邻进风口之间,增加导流板使得涡流降低;在 YZ 面(图 12c)由于两个相对的进风口进风后在 $X = 0$ m

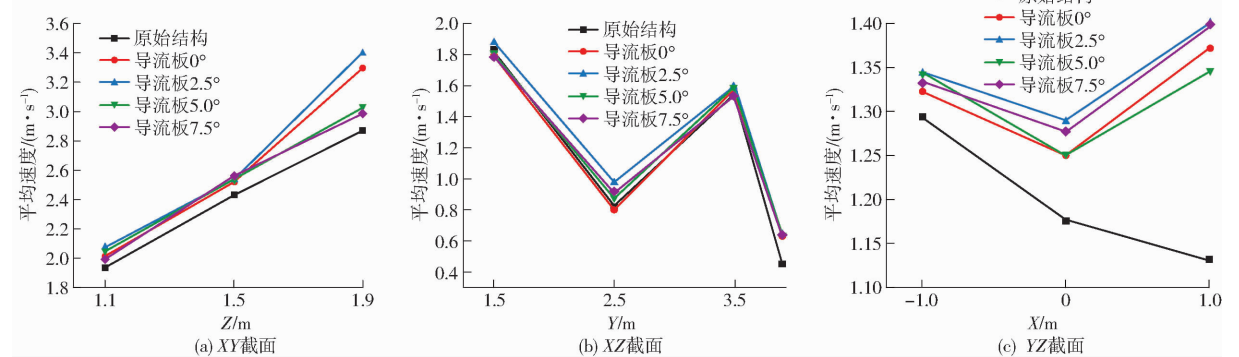


图 11 不同导流板角度的平均速度对比

Fig. 11 Comparison of angle change of deflector and average speed

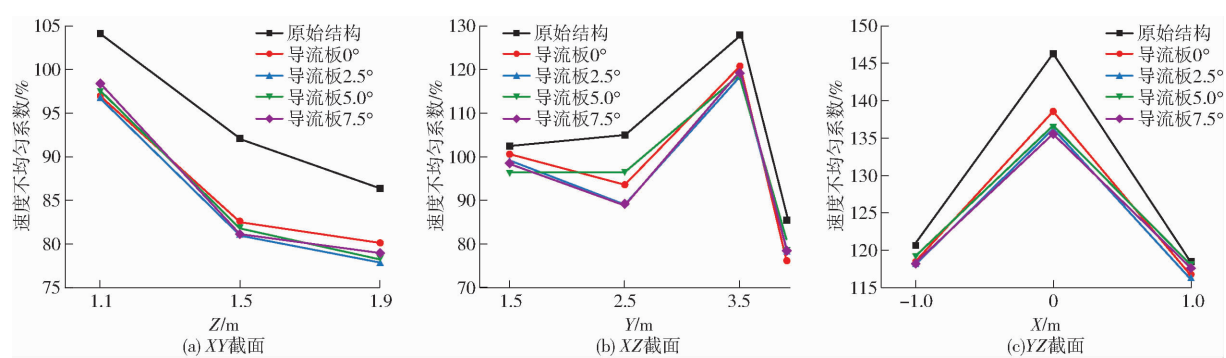


图 12 不同导流板角度的速度不均匀系数对比

Fig. 12 Comparison between angle change of deflector and velocity non-uniformity coefficient

处气流汇集,使得速度不均匀系数最大;设置导流板后的各截面速度不均匀系数均有一定程度的下降,当导流板 $\alpha' = 2.5^\circ$ 在各面速度不均匀系数降低幅度最大时,XY、XZ、YZ 面速度不均匀系数平均减小 8.7%、8.5%、2.7%。

综合考虑当导流板角度 $\alpha' = 2.5^\circ$ 时有最优的气流强度及均匀性,因此选择导流板角度 $\alpha' = 2.5^\circ$ 作为增加导流板的优化结果。

4 结论

(1)以花椒为研究对象,测得花椒堆积密度为 331.7 kg/m^3 、孔隙率 67.8%、花椒多孔介质层流动阻力系数为 1 711 301.0、惯性阻力系数为 669.6。

(2)利用 UG 进行干燥室计算域的模型简化建模,将模型导入 ANSYS Fluent,完成网格划分、建立干燥机流场数值模拟物理模型并进行求解器及边界条件设置,通过实验对模型可靠性进行验证,并进行原始干燥室气流仿真模拟。

(3)在进风口速度为 7 m/s 条件下,增设不同角度导流板结构进行数值模拟,结果表明:增设导流板可以优化干燥室内气流强度及均匀性,且当导流板角度为 2.5° 时优化程度最大,此时较原始结构在 XY、XZ、YZ 面平均速度平均增量分别为 6.8%、10.8%、5.2%,不均匀系数平均减小 8.7%、8.5%、2.7%。研究结果可为网带式干燥机的结构优化和改进设计提供技术方案和理论指导。

参 考 文 献

- [1] 吴渝东,谢英杰,王明明,等. 花椒干燥技术发展思考及其研究[J]. 食品工业, 2022, 43(7): 228–231.
WU Yudong, XIE Yingjie, WANG Mingming, et al. Thinking and research on development of pepper drying technology[J]. The Food Industry, 2022, 43(7): 228–231. (in Chinese)
- [2] 杨森,陈鸿平,刘友平,等. 花椒干燥技术研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 175–178, 184.
YANG Sen, CHEN Hongping, LIU Youping, et al. Research progress on the drying technology of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. China Condiment, 2021, 46(3): 175–178, 184. (in Chinese)
- [3] 刘瑞. 基于热场分析的新型烘房研究与设计[D]. 西安:陕西科技大学, 2021.
LIU Rui. Research and design of new type drying room based on velocity and temperature field analysis[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [4] 姚渠,尹君,李瑞敏,等. 我国粮食干燥技术发展现状与趋势[J]. 粮食加工, 2022, 47(3): 77–79.
YAO Qu, YIN Jun, LI Ruimin, et al. Development status and trend of grain drying technology in China[J]. Grain Processing, 2022, 47(3): 77–79. (in Chinese)
- [5] 王宝和,王喜忠. 中国干燥技术现状与展望[C]//第六届全国粉体工程学术大会暨 2000 年全国粉体设备技术-产品交流会会议文集. 北京, 2000.
- [6] 李菁. 农产品干燥技术装备发展现状[J]. 农机使用与维修, 2021(7): 137–138.
- [7] 曾宪国. 农产品和食品干燥技术及设备的现状与发展[J]. 现代食品, 2018(7): 172–174.
ZENG Xianguo. The current situation and development of agricultural products and food drying technology and equipment[J]. Modern Food, 2018(7): 172–174. (in Chinese)
- [8] 粮食烘干设备发展潜力巨大[J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53(3): 57.
- [9] 曹崇文. 国际粮食干燥设备[J]. 通用机械, 2005(8): 26–27.
- [10] 张明祥,张明勤. 英国大型烘干设备的结构及性能分析[J]. 粮食与饲料工业, 2004(6): 18–20.
ZHANG Mingxiang, ZHANG Mingqin. Analysis of the structure and performance of the big driers imported from UK[J]. Cereal & Feed Industry, 2004(6): 18–20. (in Chinese)
- [11] 王赫. 粮食干燥机智能系统应用前景展望及建议[J]. 粮食加工, 2022, 47(4): 72–73.

[12] LEE K S, CHOI S H. Effect of geometric parameters on ventilation performance in a dry room[J]. *Drying Technology*,2002, 20(7):1445 – 1461.

[13] YUE Xiaoyu, ZHAO Jinhong, SHI Ejuan, et al. Analysis of air velocity distribution in a multilayer conveyor dryer by computational fluid dynamics[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*,2007,2(2):108 – 117.

[14] AMANLOU Y, ZOMORODIAN A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010,101(1):5 – 8.

[15] 王振文,吴敏,徐新民,等. 热泵烘房结构及参数优化仿真设计[J]. *农业机械学报*,2020,51(增刊1):464 – 475.
WANG Zhenwen, WU Min, XU Xinmin, et al. Optimal simulation design of structure and parameter in heat pump drying room [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(Supp. 1):464 – 475. (in Chinese)

[16] 赵丹丹,彭郁,李莱,等. 枸杞热泵干燥室系统设计与应用[J]. *农业机械学报*,2016,47(增刊):359 – 365,373.
ZHAO Dandan,PENG Yu,LI Mo,et al. Design and application of wolfberry heat pump drying system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(Supp.):359 – 365,373. (in Chinese)

[17] 刘瑞,董继先,王栋,等. 菊花热风烘房的流场模拟及结构优化[J]. *机械设计*,2021,38(1):47 – 54.
LIU Rui, DONG Jixian, WANG Dong,et al. Flow-field simulation and structural optimization of the chrysanthemum hot air drying room[J]. *Journal of Machine Design*,2021,38(1):47 – 54. (in Chinese)

[18] 刘广文. 干燥设备设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009:5 – 6.

[19] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[20] 牟国良,张学军,史增录,等. 红枣干燥设备的流场仿真研究[J]. *甘肃农业大学学报*,2014,49(6):157 – 161,167.
MOU Guoliang, ZHANG Xuejun, SHI Zenglu,et al. A numerical simulation of drying equipment on jujube fruit[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*,2014,49(6):157 – 161,167. (in Chinese)

(上接第 349 页)

[28] 陈颜. 氨氮/硫酸根对高含固厨余垃圾厌氧产甲烷效能影响及机制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
CHEN Yan. Effects of sulfate and ammonia concentrations of food waste on methane production during high solid anaerobic digestion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)

[29] CAI Y, ZHENG Z, WANG X. Obstacles faced by methanogenic archaea originating from substrate-driven toxicants in anaerobic digestion[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020,403:123938.

[30] ZHOU X, DU Y, LIU D, et al. Enhanced bioproduction of volatile fatty acids from excess sludge by sodium alcohol ether sulphate[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022,450:138288.

[31] TIAN Z, ZHANG Y, LI Y, et al. Rapid establishment of thermophilic anaerobic microbial community during the one-step startup of thermophilic anaerobic digestion from a mesophilic digester[J]. *Water Research*, 2015,69:9 – 19.

[32] KURODA K, NARIHIRO T, NOBU M K, et al. Ecogenomics reveals microbial metabolic networks in a psychrophilic methanogenic bioreactor treating soy sauce production wastewater[J]. *Microbes and Environments*, 2021,36(4):ME21045.

[33] WANG Z, LU T, LIU J, et al. Response and mechanisms of the performance and fate of antibiotic resistance genes to nano-magnetite during anaerobic digestion of swine manure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,366:192 – 201.

[34] YANG G, WANG J, ZHANG H, et al. Applying bio-electric field of microbial fuel cell-upflow anaerobic sludge blanket reactor catalyzed blast furnace dusting ash for promoting anaerobic digestion[J]. *Water Research*, 2018,149:215 – 224.

[35] LYU Z, WHITMAN W B. Transplanting the pathway engineering toolbox to methanogens[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2019,59:46 – 54.

[36] WANG P, WANG H, QIU Y, et al. Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—a review[J]. *Bioresource Technology*, 2018,248:29 – 36.

[37] MAHDY A, BI S, SONG Y, et al. Overcome inhibition of anaerobic digestion of chicken manure under ammonia-stressed condition by lowering the organic loading rate[J]. *Bioresource Technology Reports*,2020,9:100359.