

基于温湿度控制的红外热风联合干燥机设计与试验

吴敏¹ 段豪¹ 王振文¹ 栗阳¹ 郑志安¹ 段乔²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 西安北方光电科技防务有限公司, 西安 710048)

摘要: 为提高热风干燥热效率和干燥均匀性,设计了一款基于温湿度控制的红外热风联合干燥机,分析了气流分配室作为干燥机的关键部件对腔室内部流场分布的影响规律。结构仿真中,以气流控制方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型为理论模型,利用 CFD 软件对气流分配室内腔进行数值模拟分析,得到气流在气流分配室内腔的流动特征,对原物理模型的腔体厚度 H 进行结构优化,进行了试验验证。结果表明,加入均风板可以显著提高气流分配室内气流速度偏差比和速度不均匀系数;优化后腔体厚度 $H=100\text{ mm}$ 的气流分配室能够很好解决出风口气流分布不均的现象,出风口速度偏差比和速度不均匀系数分别由 44.9% 和 30.2% 降低至 7.2%、7.0%。验证试验结果表明,平均速度相对误差为 4.21%,速度不均匀系数相对误差为 1.4%,速度偏差比的最大误差为 1.48%,说明结构设计合理,均化气流的效果明显。以鲜面条为研究对象,对该机性能进行试验,得到此红外热风联合干燥时间(50 min),比单一热风干燥的时间缩短了 16.7%。

关键词: 红外热风联合干燥机; 温湿度控制; 结构优化; 数值模拟

中图分类号: TS213.2; S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0483-10

Design and Experiment of Infrared-hot Air Combined Dryer Based on Temperature and Humidity Control

WU Min¹ DUAN Hao¹ WANG Zhenwen¹ LI Yang¹ ZHENG Zhian¹ DUAN Qiao²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Xi'an North Optoelectronic Technology Defense Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the problems of low drying efficiency and uneven drying in hot air drying technology, an infrared-hot air combined dryer was designed. The influence law of air distribution chamber on flow field distribution as the core component of dryer was analyzed. Based on the airflow control equation and the standard $k-\varepsilon$ turbulence model, the CFD software was used to conduct numerical simulation analysis on the air distribution chamber. The flow characteristics of the airflow in the airflow distribution chamber were obtained, and the cavity thickness H of the original physical model were optimized and tested. The calculation results showed that the speed deviation ratio (E) and the non-uniformity coefficient (M) can be significantly improved by the addition of the uniformly distributed air plate. The optimized model of airflow distribution chamber with the cavity thickness $H=100\text{ mm}$ can solve the phenomenon well that the airflow distribution was non-uniformity. The E and M values of the air outlet were decreased from 44.9% and 30.2% to 7.2% and 7.0%, respectively. The results showed that the average speed error was 4.21%, and the relative error of M and E values was 1.4% and 1.48%, respectively. This showed the design was reasonable and the effect of uniform airflow was obvious. The performance of the device was tested with noodles. The results showed that the drying time of infrared-hot air combined dryer was 50 min, which was 16.7% shorter than that of hot air drying alone.

Key words: infrared-hot air combined dryer; temperature and humidity control; structural optimization; numerical simulation

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目(6182022)、国家自然科学基金项目(31301593)和国家中药材产业技术体系项目(CARS-21)

作者简介: 吴敏(1982—),女,副教授,博士生导师,主要从事农产品干燥技术与装备研究,E-mail: minwu@cau.edu.cn

0 引言

热风干燥技术目前广泛应用于农产品干燥和加工各环节,其技术成熟度高、装备化程度高。与热风干燥相比,碳纤维红外板干燥技术具有热效率高、升温快、热均匀性好、减少品质损失等优势,物料在干燥过程中受热相对均匀,物料能耗小,近年来得到了一些应用^[1-2]。基于上述两种技术特点,本文针对条状果蔬和面条干燥设计一款小型箱式红外热风联合干燥机,加入湿度调节装置,进行整机设计及配套系统研发,从核心关键部件设计出发,开展干燥气流均匀性指标的分析。其中气流分配室是干燥机中最重要的工作部件,在干燥过程中起着优化流场结构、均分气流的作用。其结构参数设计直接影响气流的均匀性。文献[3-6]表明,均匀的气流分布能够有效提升物料的干燥特性。不均匀的气流不仅难以保证物料的品质,而且还会延长整个干燥时长。因此,掌握气流流体特征分布,对改善气流流速的均一性、提高物料产品质量、降低能耗,具有重要意义。

计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)模拟技术具有成本低,耗时短,可快速获得速度、温度、压力等参数在不同时间、不同空间上的分布等优势,现已在农产品干燥装备流场均匀性的优化上得到了广泛应用^[7-9]。文献[10]对分配歧管进行气流模拟仿真,研究发现,各分配歧管出口的压力、流量与进口端的距离有关。代建武等^[11]对气体射流干燥机的气流分配室进行数值模拟,通过平板扰流模型解决气流分布不均的问题。李海亮等^[12]研究发现气流分配室的腔体厚度是影响气流分布不均的关键。文献[13]只针对燃气壁挂炉的不同气流分配室出风口断面进行探究,缺乏数据支撑与试验对比。田松涛等^[14]采用数值模拟技术对烤箱的气流分配室优化研究表明,物理模型相对单一。于海明等^[15]对秧盘干燥机气流分配室进行模拟仿真发现,通过调整体腔前板高度、腔体上顶角和边壁倾斜角均对分配室出口流速的均匀性产生了积极的影响。针对果蔬干燥箱气流分配室进行的数值模拟与结构优化研究发现,对分配室划分等宽流道与安装扰流平板可以有效提高气流的均匀性,而更改分配室底板宽度未能产生好的均风效果^[16]。大量研究表明气流分配室是热风干燥设备的关键部件,也是设计新款干燥机首要考虑的关键因素,针对不同的干燥机结构都应采取不同的设计手段开展相关结构和技术参数研究。

本文基于数值计算模拟,开展核心工作部件的气流分配室结构优化;确定其他辅助部件和系统的

参数,设计一款红外热风联合干燥机,并验证干燥机的试验性能;选取鲜面条为对象,开展干燥工艺试验研究,表征该干燥机的干燥效率。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

以改善干燥品质和提升干燥效率为出发点,设计了一款红外热风联合干燥机,主要包括红外热风加热系统、湿度调节系统、动力传动系统和温湿度控制系统,其总体结构如图1所示。红外热风加热系统由电加热室、碳纤维红外板、气流分配室、轴流风机和温度传感器等组成,该系统中电加热室和碳纤维红外板为干燥机的热量来源,气流分配室作为关键部件和轴流风机共同调节热风流动。湿度调节系统主要包括离心风机、电磁泵、湿度传感器、喷头和水浴锅等。离心风机是排湿设备,用于降低干燥腔室的湿度;水浴锅、电磁泵和喷头等设备是加湿装置,负责提高干燥室的湿度。湿度调节系统通过开启关闭离心风机和电磁泵调节湿度至设定值。动力传动系统主要由异步电动机、支撑座和转动轴构成,可以通过调节电动机转速实现载料架在不同转速下的旋转,提高物料的干燥均匀性。该干燥机选择的控制器是以 PIC16F1947 芯片为核心的单片机,通过温湿度传感器反馈的实时信号,作用于控制继电器开关实现碳纤维红外板、加热管、控湿装置(排湿离心风机、排湿电磁阀和水泵)的通断。

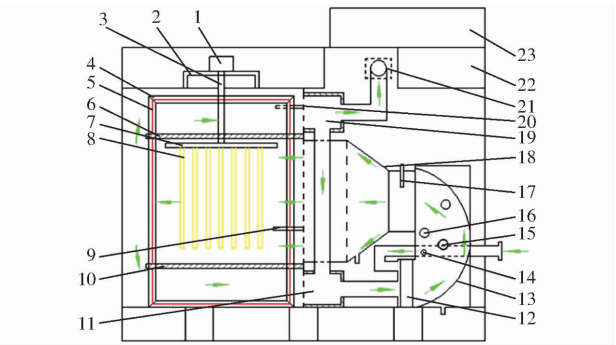


图1 红外热风联合干燥机结构示意图

Fig.1 Schematic of infrared combined hot air dryer

1. 异步电动机 2. 支撑座 3. 转动轴 4. 型材 5. 碳纤维红外板 6. 载料架 7. 上挡风板 8. 物料 9. 温湿度传感器 10. 下挡风板 11. 下回风道 12. 轴流风机 13. 导向板 14、20. 温度传感器 15. 喷头 16. 加热管 17. 风速传感器 18. 气流分配室 19. 上回风道 21. 排湿离心风机 22. 触摸屏 23. 水浴锅

1.2 工作原理

干燥作业时,通过人机交互界面设定干燥腔室的温度和相对湿度,载料架以一定转速开始旋转。在单片机的控制下碳纤维红外板与热风加热管同时开启,空气通过干燥机右侧的通风端口进入电加热室中,加

热管和空气实现对流传热,碳纤维红外板通过热辐射加热干燥腔室的物料,实现红外热风联合干燥。一次利用的热风可以通过下回风道返回电加热室中,实现剩余热量的二次循环利用,降低能耗。布置在干燥腔室的温湿度传感器可以实时检测腔室内的温湿度,反馈给控制系统,当干燥腔室的湿度不满足设定值时,从干燥腔室排出的部分热风通过上回风道,借助排湿离心风机排除热风中的湿气以实现降湿;水浴锅内的热水通过电磁阀喷洒到加热管上,提高热风的相对湿度以实现加湿。当干燥腔室的温度不满足设定值时,单片机控制继电器开关调节碳纤维红外板和加热管以实现干燥腔的升温或降温。

1.3 主要技术指标

红外热风联合干燥机集碳纤维红外板加热与热风干燥为一体,可实现温湿度的自动快速调节与反馈,能够单批次干燥条状及类条状农产品物料,其外形尺寸(长×宽×高)为 980 mm×400 mm×960 mm,温度调节范围及精度分别为 30~90℃及±0.5℃,相对湿度调节范围及精度分别为 10%~75%及±3%,载料盘直径为 180 mm,风速调节范围及精度分别为 0.5~4 m/s 及±0.1 m/s,总功率为 1.8 kW,干燥腔室容积为 0.1 m³,装载量为 1~3 kg。

2 气流分配室设计及优化

2.1 结构与网格划分

气流分配室结构示意图及网格划分如图 2 所示,该模型结构由进风口、稳压腔、一级均风板、二级均风板、出风口等部分组成,空气经过加热管后进入稳压腔,再通过两级均风板被分配到干燥室,用来对物料干燥和加热。进风口位于气流分配室的最左端,矩形进风口尺寸为 120 mm×120 mm;气流分配室的长、宽、高分别为 335、185、250 mm;文献[17]研究表明,孔的横向间距 x_n 和纵向间距 y_n 间距介于 $2d \sim 5d$ (d 为孔直径)范围时,顺序排列的传热效果

要好于交叉排列方式,尤其是沿着矩形方式排列的优势更为显著。因此,本文二级均风板上的出风口采用矩阵方式(11×5)排列,其孔径为 15 mm,上下中心距及左右中心距分别为 30 mm 和 40 mm;其中,命名左上角第 1 个出风口为 out1,从左向右、自上向下依次命名,最后一个出风口为 out55,该均风板上有 11 个排出口,自左向右依次标定,如图 3b 所示。为了避免二级均风板上沿着进风口中心轴线方向的出风口速度过大,一级均风板出风口设计排列方式如图 3a 所示。

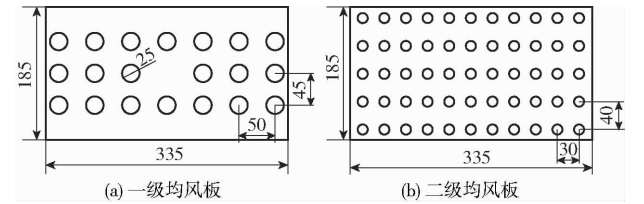


图 3 一级均风板和二级均风板

Fig. 3 The first and second uniformly distributed air plate

2.2 控制方程、边界条件及评价指标

2.2.1 气流控制方程

气流分配室内的热气流为稳态的黏性流动,由于分配室内压力差、温度差并没有太大的差别,且流速较小,则可假定气体是不可压缩的。控制方程采用有限容积法离散,对气流分配室内部的三维流场进行分离式隐式求解。离散格式为二阶迎风格式,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,残差精度设为 10^{-4} 。气流分配室内腔壁面形状比较复杂,流线变化较大,气体在腔体内的流动多表现为湍流特性,本文采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对气流分配室内腔进行数值模拟。气体的流动状态应满足连续性方程和动量守恒方程^[18-20]。

连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为

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

式中 ρ ——流体密度, kg/m³

u_i, u_j, u_k ——各时均速度分量, m/s

p ——流体的时均压力, N/m²

μ ——流体动力黏度, N·s/m²

x_i, x_j ——各坐标分量

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

2.2.2 边界条件设置

进口条件:采用速度进口边界条件,假定进口方向垂直于边界,并且均匀分布、无旋,入口速度为

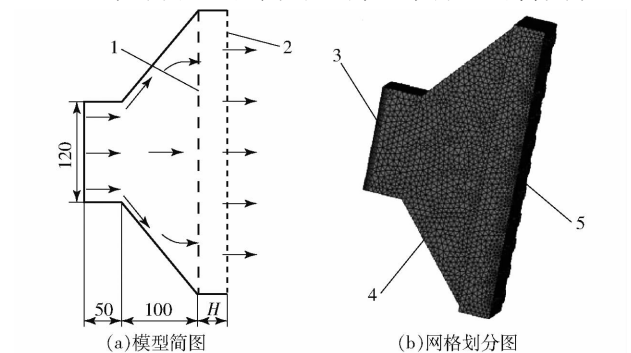


图 2 气流分配室模型简图及网格划分图

Fig. 2 Sketch map and grid graph of improved airflow distribution chamber

1. 一级均风板 2. 二级均风板 3. 进风口 4. 稳压腔 5. 出风口

2 m/s,入口湍流强度根据水力直径及经验公式^[19-20]可估算为 4.76%,进、出口流体温度均按 298.15 K(25℃)选取。

出口条件:采用压力出口边界条件,并结合实际工况给定大气条件作为压力边界值,出口湍流根据湍流强度及雷诺数的计算公式得出设计工况下湍流强度在 5% 左右,出口湍流强度 I 为 5%,该值在有回流通过边界时才会被使用。

壁面条件:采用无滑移壁面边界条件,靠近固体壁面区的流动模拟,由于壁面迫使流动产生剧烈的速度梯度,则选择采用标准壁面函数法进行修正^[21-23]。

2.2.3 评价指标

为了定量分析气流分配室出风口空气流速的均匀性,建立两个评价指标计算方程式^[24-25]:

(1)速度偏差比 E ,用来评价不同出风口速度的偏离程度,计算式为

$$E = \frac{\overline{V_L} - \overline{V_a}}{\overline{V_a}} \times 100\%$$
 (3)

式中 $\overline{V_L}$ ——各出风口速度总体均值,m/s

$\overline{V_a}$ ——速度分布的总体均值,m/s

(2)速度不均匀系数 M ,用来评价速度分布的均匀性,公式为

$$M = \frac{\sigma_v}{\overline{V_a}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \overline{V_a})^2}}{\overline{V_a}} \times 100\%$$
 (4)

式中 σ_v ——标准偏差 n ——节点数

V_i ——各点的速度,m/s

2.3 结果与分析

2.3.1 均风板的影响分析

均风板的设计如图 3 所示,分别考虑了设计一级均风板和二级均风板对气流均匀性的影响,并进行模拟仿真。

如图 4 所示,对比气流在不同模型内腔速度分布矢量图,此时腔体厚度 H 为 50 mm,腔体厚度是指

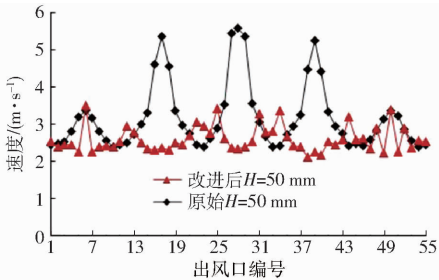


图 5 均风板优化前后模型速度

一级、二级均风板间的距离。可以看出,图 4a 气流由进风口进入稳压腔后在其中心轴线方向上形成高速射流,并在该方向上逐渐扩散,速度呈梯度逐渐减少,在中心轴线方向上出现峰值且此处出风口速度最大。这是由于该峰值位置的出风口正对进风口,两侧风速较小及速度梯度很大,因此在中心轴线方向两侧形成反向低速旋涡扰流区域,使得其对应的出风口速度较小。增加为两层均风板设计后,由图 4b 可以看出,速度矢量分布得到了进一步改善。在进风端中心轴线方向两侧中部区域的低速扰流区域明显减弱,改进后模型的出风口速度均匀性有了一定的改善。

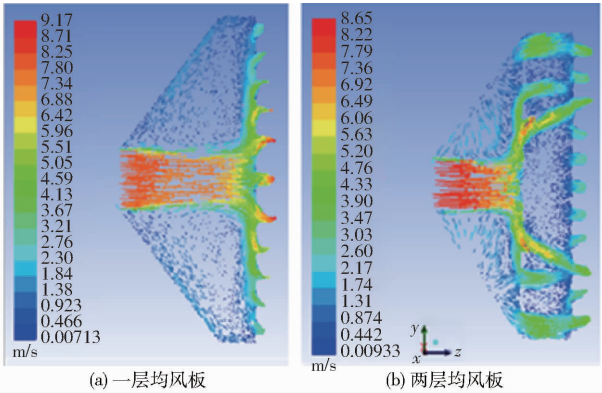


图 4 均风板模型内腔流场速度矢量图

Fig.4 Velocity vector distributions of internal chamber of uniformly distributed air plate

通过模拟数据绘制出风口速度分布曲线如图 5 所示,改进后整个速度主要分布在 2.3 ~ 3.1 m/s 区间范围内,各排速度偏差比最大为 17.3%,出风口速度不均匀系数为 17.7%,在原始模型中,出风口速度偏差比和速度不均匀系数分别为 44.9% 和 30.2%,与原始模型结果相比,速度偏差比与不均匀系数分别下降了 61.4%、41.4%,改进后模型的速度曲线分布优于原始模型的分布,整体速度曲线分布趋势平缓。可以看出出风口速度从第 5 排 2.24 m/s 上升至第 6 排 2.77 m/s,然后再次下降至第 7 排 2.27 m/s,这段速度曲线分布并不平缓,以及在第 23 ~ 33 点、第 34 ~ 44 点、第 47 ~ 52 点区间内的速度分布也不平缓,因此还需要考虑其他方案继

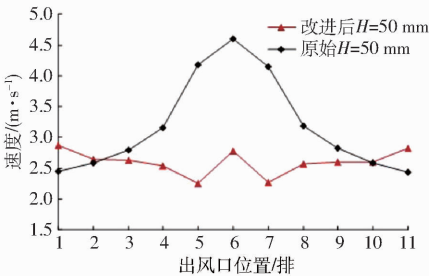


Fig.5 Velocity before and after improvement

续进一步优化。

2.3.2 风机的选型计算

风机作为红外热风联合干燥机的动力设备,其选型对其物料的干燥有着至关重要的影响,并影响最终的气流分配室结构。由于本文所要干燥物料处于高温高湿的环境,要求风量稳定,所以选择轴流风机。根据设计的出风口直径 $d = 15\text{ mm}$,预计所模拟的出风口的最大气流速度 $v = 3\text{ m/s}$ 以及均风板总的出风口数量 $N = 55$,则可计算风机选型所需要的流量^[17]

$$Q = Av = \frac{N\pi d^2 v}{4} \tag{5}$$

式中 A ——总出风口面积, m^2
 v ——气流速度,取 3 m/s
 Q ——气流流量, m^3/h

经计算得所需的气流流量约为 $105\text{ m}^3/\text{h}$,考虑到输风管道沿程流量及压力损失、安装尺寸以及耐湿耐高温特性,则选择风机型号为 4650N-465/A01 (EBMPAPST,德国),流量最大为 $150\text{ m}^3/\text{h}$,功率为 19 W ,转速为 $2\,600\text{ r/min}$,风量为 $150\text{ m}^3/\text{h}$,风扇直径为 120 mm 。

2.3.3 不同腔体厚度 H 的模拟分析及验证

在选定风机的情况下需对已优化模型进一步分

析,充分考虑不同腔体厚度对气流分布场分布均匀度的影响,从而气流分配室结构得到进一步优化。为保证风机的输风端到进风口的风量不损失,在理想情况下,气流流量计算公式为

$$Q_{60} = S_1 v_1 t = S_2 v_2 t = Q_{120 \times 120} \tag{6}$$

式中 Q_{60} 、 S_1 ——孔径 60 mm 的气流流量、面积
 $Q_{120 \times 120}$ 、 S_2 ——进风口为 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 尺寸时气流流量、面积

经计算及模型改进后进风口的速度约为 2 m/s 。改进后的气流分配室腔体厚度 H 的变化范围为 $50 \sim 120\text{ mm}$,其间隔为 10 mm 。以速度不均匀系数与局部最大偏差比作为评价指标,分析不同厚度 H 对出风口速度变化的影响,气体控制方程同上述已优化的模型一致,而在边界条件方面,进风口的速度已由原来的 8 m/s 变为 2 m/s 。进风口的湍流强度由原来的 4.36% 变为 4.76% 。

(1) 模拟分析

不同腔体厚度 H 下的速度矢量分布如图 6 所示。可以看出,随着气流分配室腔体厚度 H 的增加,经过二级均风板的各排出风口速度分布更趋向于平稳,并且在两层均风板之间形成了相互对称反向旋转的低速均匀涡流,分析认为随着厚度 H 增大,气流分配室腔体厚度 H 的纵截面面积增大,经

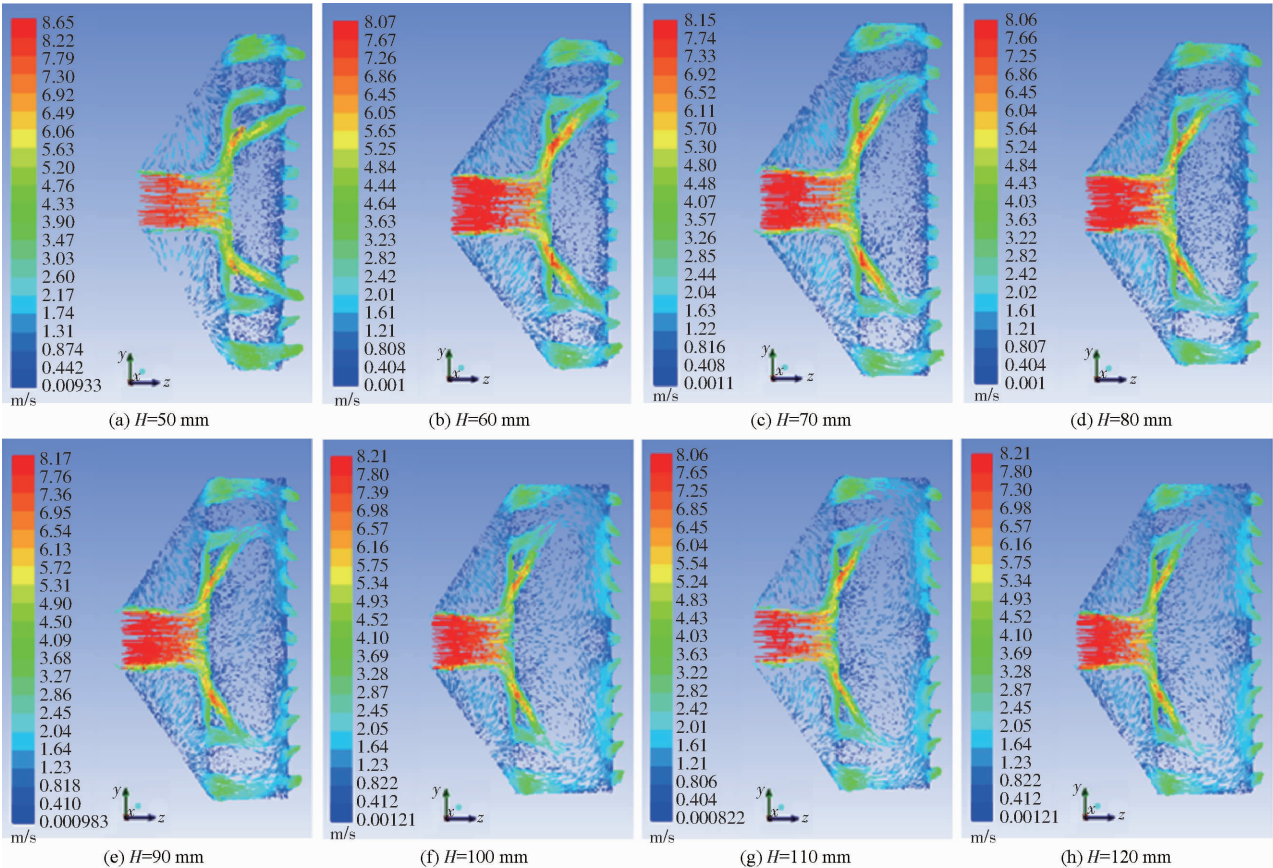


图 6 内腔速度矢量分布

Fig. 6 Velocity vector distributions of internal chamber

过一级均风板的气流在第 2~4 排、第 4~8 排、第 8~10 排这 3 个速度区间段内形成了面积相同的多个涡流组,使得该区域的涡流能够及时与周围气流发生交换,这在一定程度上对出风口速度的均一性产生积极的影响。

由图 7 可以看出,速度偏差比 E 随着气流分配室腔体厚度的增大呈现出先减小后又逐渐增大的趋势,而速度不均匀系数 M 随着腔体厚度 H 的增大呈现出减小并趋于平缓的趋势,在 $H = 100\text{ mm}$ 处产生最小的速度偏差比和速度不均匀系数分别为 7.2%、7.0%。因此,腔体厚度 $H = 100\text{ mm}$ 的结构模型能够很好地解决出风口速度分布不均一的问题。

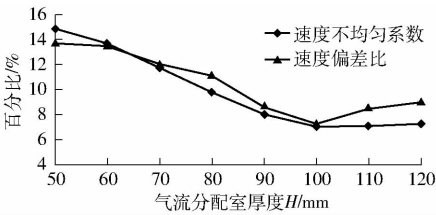


图 7 二级均分板结构的不同厚度 H 下的速度偏差比 E 与不均匀系数 M

Fig. 7 Velocity deviation ratio (E) and uneven coefficient (M) of different thicknesses (H) of the second uniformly distributed air plate

(2) 试验验证

为了进一步分析数值模拟的准确性,制造了气流分配室试验台和试验样机,并进行了气流分配室的试验验证,模型与实物如图 8 所示。优化后的气流分配室各出风口速度的模拟数值与试验数据进行对比分析,结果如图 9 所示。

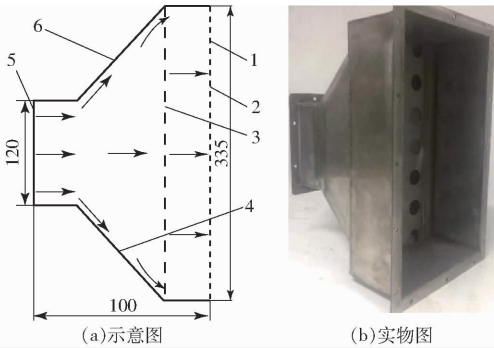


图 8 气流分配室装配体示意图及实物图

Fig. 8 Sketch map and picture of assembled air distribution chamber

1. 出风口 2. 二级均风板 3. 一级均风板 4. 稳压腔 5. 进风口 6. 外壁

由图 9 可以看出,由于个别出风口的瞬时气流速度不太稳定,造成了其相对应点的实测速度与仿真值存在一定的偏差,但整个气流分配室的出风口

速度分布趋势一致。通过数据分析可知,实测数据与仿真数据之间的平均速度相对误差为 4.21%,速度不均匀系数相对误差为 1.4%,速度偏差比的最大误差为 1.48%。仿真与实测数据基本吻合,验证了该模型的准确性。

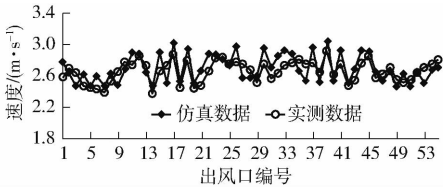


图 9 仿真与试验结果对比曲线

Fig. 9 Comparison between results of simulation and experiment

3 辅助部件及系统设计

3.1 加热管选型及箱体设计

加热管箱体作为干燥机加热系统中的重要供能部件,在运行过程中可以有效地减少能量的损耗。如图 10 所示,加热管采用散热性较好的 W 型翅片式加热管,其固定在装配箱体的侧板上,装配箱体外壁面采用 304 不锈钢材质,壁面采用高硅铝耐高温防火布材料作为保温层。加热管与箱体的侧板相连,拆卸方便,易于更换。

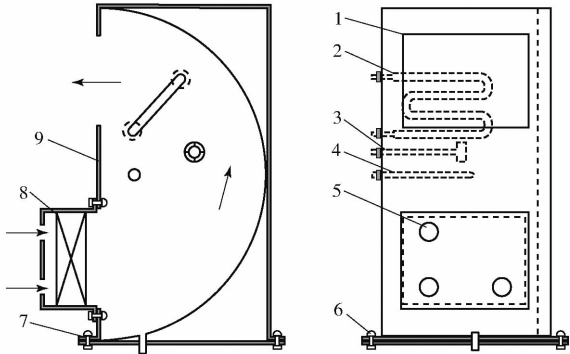


图 10 加热管装配体示意图

Fig. 10 Assembling diagram of heating tubes

1. 出风口 2. W 型加热管 3. 喷头 4. 温度传感器 5. 进风口 6. 螺栓 7. 排湿口 8. 轴流风机 9. 装配箱体外壁

加热管加热气流采用电加热管的方式,功率计算公式为^[26]

$$P = \frac{(T_2 - T_1)(C_g + C_y w) Q v}{3\,600} \quad (7)$$

式中 P ——加热管的功率, W

T_2 ——加热后的气流温度, $^{\circ}\text{C}$

T_1 ——加热前的气流温度, $^{\circ}\text{C}$

C_g ——干空气的比热容,取 $1.01\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

C_y ——水蒸气的比热容,取 $1.88\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

w ——空气 中含 水 率, 取 0.013 (空气 为 30°C , 相对湿度 为 50%)

Q 取 $150\text{ m}^3/\text{h}$, 假设将干空气从 30°C 加热至 80°C 的目标值, 将各个已知的参数代入式(7)计算, 可得其热功率为 1.2 kW 。由于干燥设备采用了内循环式热风回路通道、保温隔热处理, 所以加热管选用的功率为 1.0 kW 。

3.2 碳纤维红外板选型

红外辐射干燥技术的关键在于辐射源的选择, 由于大多数食品成分吸收辐射能量主要位于远红外线区段, 所以远红外线在食品加工行业应用广泛^[27]。本文选用的碳纤维红外板购自上海热丽科技集团有限公司, 外形尺寸(长×宽×高)为 $500\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 功率为 0.155 kW 。碳纤维红外板实物结构如图 11 所示, 可以看出, 通电后的碳纤维红外板上的温度分布比较均匀, 而且正反两面都能够辐射远红外线, 有助于改善热风干燥过程中温度分布不均匀的问题。

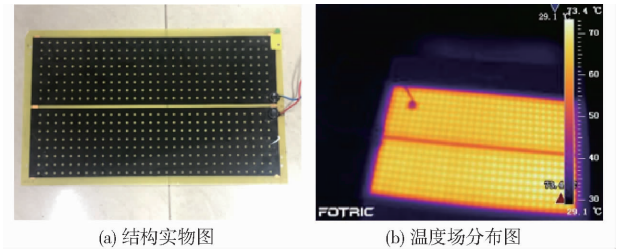


图 11 碳纤维红外板结构实物图及温度场分布图
Fig. 11 Picture of carbon fiber infrared plate and its distributions of temperature

3.3 加湿装置设计

干燥腔室内部的相对湿度调节是通过排湿离心风机与加热电磁阀共同协作完成的。干燥过程中可实现相对湿度的实时调节控制, 但需对雾化湿气的纯净水进行预热处理, 避免雾化水蒸气温度过低导致干燥室内温度骤降。本设计中选择成本较低的水浴锅作为雾化水预热装置, 可以有效缩短干燥物料所需时长, 进而提升整个干燥效率。当干燥腔室中的相对湿度小于所设定的目标值时, 水浴锅中的水在电磁泵吸力的作用下, 通过喷头直接作用到加热管的表面。通过热量交换, 热空气将蒸发水分带入到干燥腔室中, 实现对干燥空气的加湿, 多余的水流经水槽从出水管排出。当干燥腔室中相对湿度高于所设定的目标值时, 自动开启排湿离心风机, 对干燥腔室进行排湿处理。

3.4 控制系统设计

控制系统可以实现对干燥腔室内部温湿度、碳纤维红外板及加热管温度的监测, 从主控模块输出的数字信号控制固态或机械继电器, 进而再作用于加热管、排湿离心风机、红外板。控制系统的模块框架图如图 12 所示, 其中, 各模块主要功能如下:

(1) 主机输入与显示模块采用 Weinview 公司的 MT8102iE 触摸屏, 其触摸屏具有 32 bit RISC CPU, 该系统全都采用 RS485 串口, 并通过 Modbus 协议与单片机实现通讯功能, 可实现主控模块控制信息输入与实时数据显示。

(2) 主控模块的单片机以 PIC16F1947 芯片为核心, 同时也兼备了两个通用的同步收发器, 并能够实现两种 RS232、RS485 串口的通讯功能, 实现采集数据的快速响应。

(3) 温湿度监测模块包括温度传感器与相对湿度传感器, 其中采集加热管、碳纤维红外板与干燥腔室内部温度的监测都选用 PT100 型温度传感器(上海佳敏仪表有限公司), 其温度测量范围为 $-50 \sim 300^\circ\text{C}$; 相对湿度传感器以 SFTHS31 芯片为核心, 相对湿度范围为 $0 \sim 99\%$ 。

(4) 输出控制模块接收单片机反馈的数字信号, 进而作用于控制继电器开关实现碳纤维红外板、加热管、控湿装置(排湿离心风机、排湿电磁阀和水泵)的通断。

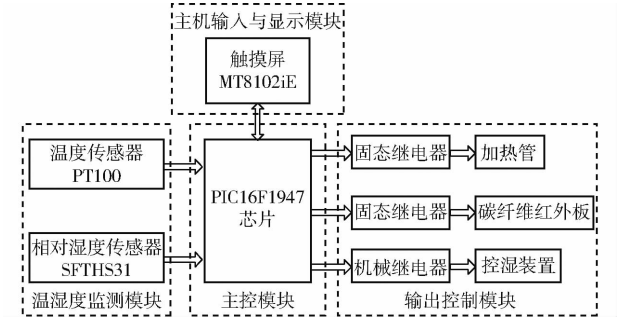


图 12 控制系统模块框架图
Fig. 12 Module framework of control system

4 试验研究与分析

4.1 试验材料

干燥机调试完成后, 进行干燥工艺及设备性能分析。试验干燥选择自制的鲜面条, 尺寸(长×宽×高)为 $400\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。鲜面条初始含水率为 $(30.00 \pm 0.80)\%$, 且保证为同一批次, 并放入温度 4°C 、相对湿度为 90% 环境密封保存。

4.2 试验方法

4.2.1 试验设计

试验设计温度、相对湿度作为干燥面条的两个单因素, 每个因素分别设计 5 个水平。首先, 固定干燥温度 60°C , 探究不同相对湿度 (40% 、 50% 、 60% 、 70% 、 80%) 对面条干燥时间的影响; 在确定最佳干燥相对湿度的基础上, 探究不同温度 (40°C 、 50°C 、 60°C 、 70°C 、 80°C) 对干燥面条干燥时间的影响, 得到面条干燥的最佳温湿度参数。对照试验采用单一热风干燥对

面条进行干燥,温湿度参数与红外联合热风干燥最佳工艺参数相同。设定好干燥温度、相对湿度参数值,将鲜面条整齐均匀地悬挂在载料盘上,称量后迅速放入干燥机中进行干燥,确保干燥后的面积含水率达到 $(12.00 \pm 0.60)\%$ 。

4.2.2 含水率的测定

在面条干燥过程中,其干燥机内部的整个环境应当保持在一个固定的温湿度条件下。从鲜面条放入干燥机内开始计时,每隔 10 min 随机从干燥机中

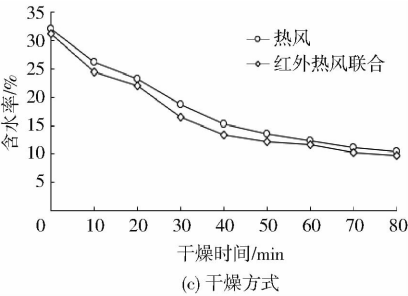
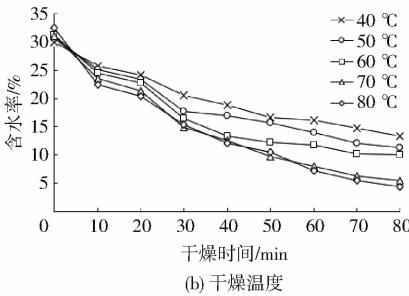
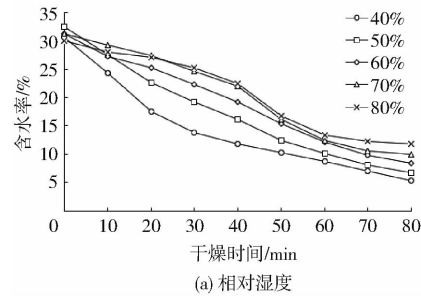


图 13 面条含水率随干燥时间的变化曲线

Fig. 13 Effect of water content of noodles as a function of drying time

由图 13a 可以看出,当面条达到目标含水率时,干燥时间随着相对湿度的降低而缩短,相对湿度从 80% 降低到 40% 所对应的干燥时间分别为 80、40 min。这是因为在高相对湿度环境下,面条内部水分向外迁出受到内外部湿度梯度差的阻碍,迫使面条内部水分难以向外界排出,因此大大降低了面条的干燥速率,最终延缓了整个干燥进程。为此,在能够确保面条品质的前提下,面条干燥可以采用较低的相对湿度,从而能够缩短面条干燥时间,提高干燥效率,减少成本投入。

由图 13b 可以看出,在干燥过程中,固定相对湿度 70% 不变,测定的不同温度对面条含水率随干燥时间变化的影响结果。面条的含水率随着干燥时间的增加而减少,且干燥温度越高,含水率下降得越快。在相同的干燥时间内,面条的含水率随着干燥温度的升高而降低,随着干燥时间的继续增加,面条含水率的变化逐渐趋向于平稳。

在相同的干燥工艺条件下:温度 60℃、相对湿度 70%,比较了红外热风干燥与单一热风干燥两种干燥方式对面条含水率变化的影响。由图 13c 可以看出,面条的含水率均随干燥时间的增加而降低。当干燥时间相同时,红外热风干燥面条的含水率低于单一热风干燥的含水率,说明红外热风联合干燥方式的干燥速率高于单一热风干燥方式;此外,当达到目标含水率时,红外热风联合干燥面条用时

取出少量面条进行含水率测定,其含水率的测定按照 GB 5497-1985 进行。

每次所要干燥的鲜面条的质量控制在 300 g 左右,并确保面条干燥后的含水率在 $(12.00 \pm 0.60)\%$ 范围内,通过多次试验统计分析,最终得出面条在不同温湿度条件下含水率随时间变化的曲线。

4.3 试验结果与分析

按照试验方案,得到鲜面条在不同条件下的含水率随干燥时间变化的干燥曲线如图 13 所示。

50 min,相比于单一热风干燥缩短了 10 min,时间缩短了大约 16.7%。试验证明,红外热风干燥方式较优于单一热风干燥。与传统热风干燥面条通常的 3~8 h 的时间相比,此款红外热风联合干燥机具有更为显著的高效干燥性能,大大降低干燥能耗^[28]。

5 结论

(1)设计了一款红外热风联合干燥机,并运用 CFD 数值模拟技术对气流分配室腔体进行了仿真模拟。通过对气流分配室模型的优化改进,确定了两层均风板结构以及最优的腔体厚度 H 为 100 mm,在此设计下出风口的速度不均匀系数为 7.0%,各排出口速度偏差比为 7.2%,气流分配室出风口的速度分布均匀。

(2)试验验证可得,实测数据与模拟数据吻合,两者之间的平均速度相对误差为 4.21%,速度不均匀系数相对误差为 1.4%,速度偏差比的最大误差为 1.48%,验证了该模型能够较好地模拟气流的分布情况。

(3)通过对面条干燥特性的试验研究,得到红外热风联合干燥在干燥温度 60℃、相对湿度 70% 下,面条达到目标含水率的干燥时间为 50 min,并且红外热风干燥方式可以有效弥补单一热风干燥效率低、速度慢的问题,为设备的进一步中试应用和红外热风联合干燥技术应用提供了借鉴和支撑。

参 考 文 献

- [1] 吕豪,吕黄珍,王雷,等.微波-热风振动流化床干燥机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):344-351,248. LÜ Hao, LÜ Huangzhen, WANG Lei, et al. Design and experiment of microwave-hot-airflow vibrating dryer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):344-351, 248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190640&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2019. 06. 040. (in Chinese)
- [2] 张卫鹏,郑志安,陈畅,等.茯苓真空脉动中试干燥装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):362-371. ZHANG Weipeng, ZHENG Zhian, CHEN Chang, et al. Design and test of pilot pulsed vacuum infrared drying equipment for poria cocos[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):362-371. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190740&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2019. 07. 040. (in Chinese)
- [3] 高振江. 气体射流冲击颗粒物料干燥机理与参数试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2000. GAO Zhenjiang. Experimental research on mechanism and parameters of air-impingement jet drying of particulate materials[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- [4] XIAO Hongwei, GAO Zhenjiang, LIN Hai, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes[J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33(5): 899-918.
- [5] 娄正,高振江,肖红伟,等.板栗气体射流冲击干燥特性和工艺优化[J].农业工程学报,2010,26(11):368-373. LOU Zheng, GAO Zhenjiang, XIAO Hongwei, et al. Air impingement drying characteristics and process optimization of chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 368-373. (in Chinese)
- [6] 王丽红,高振江,肖红伟,等.圣女果的气体射流冲击干燥动力学[J].江苏大学学报(自然科学版),2011,32(5):540-544. WANG Lihong, GAO Zhenjiang, XIAO Hongwei, et al. Air impingement drying kinetics of cherry tomato[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(5): 540-544. (in Chinese)
- [7] MASOUD I, HADI S A, MOHAMMAD S B J. CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 1192-1213.
- [8] SATYENDER S. Experimental and numerical investigations of a single and double pass porous serpentine wavy wiremesh packed bed solar air heater[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 1361-1387.
- [9] AMANLOU Y, ZOMORODIAN A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 101(1): 8-15.
- [10] CHEN A, SPARROW E M. Turbulence modeling for flow in a distribution manifold[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(5-6): 1573-1581.
- [11] 代建武,肖红伟,白峻文,等.气体射流冲击干燥机气流分配室流场模拟与结构优化[J].农业工程学报,2013,29(3):69-76. DAI Jianwu, XIAO Hongwei, BAI Junwen, et al. Numerical simulation and optimum design on airflow distribution chamber of air-impingement jet dryer[J]. Transaction of the CSAE, 2013, 29(3): 69-76. (in Chinese)
- [12] 李海亮,汪春,胡军,等.气力式水稻穴盘成型机气流分配室流场仿真与优化设计[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):94-101. LI Hailiang, WANG Chun, HU Jun, et al. Simulation and optimum design on airflow distribution chamber of pneumatic forming machine for rice seeding-growing tray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 94-101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180411&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2018. 04. 011. (in Chinese)
- [13] 徐鹏,史永征,傅忠诚.燃气壁挂炉气流分配室的优化设计[J].煤气与热力,2005,25(6):5-8. XU Peng, SHI Yongzheng, FU Zhongcheng. Optimization design of gas distribution chamber in wall-mounted gas boiler[J]. Gas and Heat, 2005, 25(6): 5-8. (in Chinese)
- [14] 田松涛,高振江.基于Fluent的气体射流冲击烤箱气流分配室改进设计[J].现代食品科技,2009,25(6):612-616. TIAN Songtao, GAO Zhenjiang. Improved design of airflow distribution chamber in air-impingement oven based on Fluent[J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(6): 612-616. (in Chinese)
- [15] 于海明,李海源,汪春,等.秧盘干燥机气流分配室流场均匀性仿真分析[J].农机化研究,2020,42(2):15-21. YU Haiming, LI Haiyuan, WANG Chun, et al. Simulation analysis of flow field uniformity in air distribution room of rice seedbed microwave hot air coupling dryer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 15-21. (in Chinese)
- [16] 王健,董继先,王栋,等.果蔬干燥箱气流分配室的数值模拟与结构优化[J].陕西科技大学学报,2019,37(1):128-134. WANG Jian, DONG Jixian, WANG Dong, et al. Numerical simulation and structure optimization of air distribution chamber in fruit and vegetable drying box[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2019, 37(1): 128-134. (in Chinese)

- [17] 代建武. 基于 PTHICD 的倾斜料盘式气流冲击干燥装置设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
DAI Jianwu. The design and experiment of tilted tray air-impingement drying equipment with process-based on temperature and humidity integration control drying (PTHICD)[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [18] 瞿丽霞, 王福军, 丛国辉, 等. 双吸离心泵叶片区压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 79–84.
QU Lixia, WANG Fujun, CONG Guohui, et al. Pressure fluctuations of the impeller in a double-suction centrifugal pump[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 79–84. (in Chinese)
- [19] 翟之平, 王春光. 叶片式抛送装置气流流场数值模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 84–87.
ZHAI Zhiping, WANG Chunguang. Numerical simulation and optimization for air flow in an impeller blower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 84–87. (in Chinese)
- [20] 黎耀军, 王福军. 双方程湍流模型在高雷诺数水翼绕流模拟中应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 45–48, 52.
LI Yaojun, WANG Fujun. Assessment of two-equation turbulence modeling for hydrofoil flows at high Reynolds number[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 45–48, 52. (in Chinese)
- [21] 丁欣硕, 焦楠. FLUENT14.5 流体仿真计算从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [22] 丁欣硕, 凌桂龙. ANSYS Workbench14.5 有限元分析案例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [23] 于勇, 张俊明, 姜连田, 等. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [24] 雷贤良, 李会雄, 张庆, 等. 锅炉转向室烟气调节屏的调节性能与优化设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 128–132.
LEI Xianliang, LI Huixiong, ZHANG Qing, et al. Regulation performance and optimal design of the gas adjust-screen in boiler steering rooms[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(10): 128–132. (in Chinese)
- [25] 韩文霆, 吴普特, 杨青, 等. 喷灌水量分布均匀性评价指标比较及研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 172–177.
HAN Wenting, WU Pute, YANG Qing, et al. Advances and comparisons of uniformity evaluation index of sprinkle irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 172–177. (in Chinese)
- [26] 高振江, 曹崇文, 王德成. 气体射流冲击下颗粒物料流态化参数的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(2): 82–86.
GAO Zhenjiang, CAO Chongwen, WANG Decheng. Experimental research on fluidization parameters of air impingement jet of particulate material[J]. Journal of China Agricultural University, 2001, 6(2): 82–86. (in Chinese)
- [27] SANDU C. Infrared radiative drying in food engineering—a process analysis[J]. Biotechnology Progress, 1986, 2(3): 109–119.
- [28] 维益民, 王振华, 于晓磊, 等. 挂面干燥工艺能耗分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(4): 1–5.
WEI Yimin, WANG Zhenhua, YU Xiaolei, et al. Analysis of energy consumption of drying process for Chinese dried noodles [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(4): 1–5. (in Chinese)

(上接第 463 页)

- [15] 曾平平, 李林升. 基于卷积神经网络的水果图像分类识别研究[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(1): 23–26, 34.
ZENG Pingping, LI Linsheng. Research on fruit image classification and recognition based on convolutional neural network [J]. Mechanical Design and Research, 2019, 35(1): 23–26, 34. (in Chinese)
- [16] 闫建伟, 赵源, 张乐伟, 等. 改进 Faster-RCNN 自然环境下识别刺梨果实[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 143–150.
YAN Jianwei, ZHAO Yuan, ZHANG Lewei, et al. Recognition of *Rosa roxbunghii* in natural environment based on improved Faster-RCNN[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 143–150. (in Chinese)
- [17] LI Xiaofeng, JIAO Hongshuang, WANG Yanwei. Edge detection algorithm of cancer image based on deep learning[J]. Bioengineered, 2020, 11(1): 693–707.
- [18] LEI Han, WANG Shuai, ZHENG Dezhi, et al. Improving active learning by data balance to reduce annotation efforts[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 8650–8653.
- [19] 李星辰, 柳晓鸣, 成晓男. 融合 YOLO 检测的多目标跟踪算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(4): 665–672.
LI Xingchen, LIU Xiaoming, CHENG Xiaonan. A multi-target tracking algorithm based on YOLO detection[J]. Computer Engineering and Science, 2020, 42(4): 665–672. (in Chinese)
- [20] REN Shaoqing, HE Kaiming, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137–1149.
- [21] 吕铄, 蔡烜, 冯瑞. 基于改进损失函数的 YOLOv3 网络[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(2): 1–7.
LÜ Shuo, CAI Xuan, FENG Rui. YOLOv3 network based on improved loss function[J]. Application of Computer System, 2019, 28(2): 1–7. (in Chinese)