

基于温湿度控制的箱式果蔬热风干燥机设计

Design and experiment of box type hot air drier for fruits and vegetables based on temperature and humidity control

巨浩羽¹ 赵海燕² 于贤龙³ 张卫鹏⁴

JU Hao-yu¹ ZHAO Hai-yan² YU Xian-long³ ZHANG Wei-peng⁴

王 辉³ 高振江³ 肖红伟³

WANG Hui³ GAO Zhen-jiang³ XIAO Hong-wei³

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061; 2. 河北经贸大学工商管理学院, 河北 石家庄 050061; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 4. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048)

(1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. College of Business Administration, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing, 100048, China)

摘要:设计了一种基于温湿度控制的箱式热风干燥机,该干燥机主要由内循环风机、加热管、加湿装置、称量装置和控制系统等部分组成。胡萝卜干燥(干燥温度 60 ℃,热风相对湿度 20%)试验表明,干燥室内部温湿度和风速流场均匀,不同位置干燥时间一致,均为 6 h;相同焓值下,不同温度的干燥介质物料升温曲线一致;干燥前期较高相对湿度,后期较低相对湿度有利于缩短干燥时间。

关键词:机械化;干燥;热风干燥机;温湿度控制

Abstract: The box type hot air dryer with controlled temperature and humidity was designed. The drying machine mainly consists of internal recycle fan, heating system, humidifying equipment, weighing unit, and automatic control system. The experiment result showed that under 60 ℃ and 20% relative humidity, internal temperature and relative humidity were uniform and drying time was consistent in different positions with no significant differences. The material temperature changing curves seemed to be consistent under the same enthalpy value drying condition. Additionally, step-down relative humidity drying method improve dr-

ying efficient a lot.

Keywords: mechanization; drying; box type hot air dryer; temperature and humidity control

热风干燥技术是利用热源加热干燥室内空气,依靠热空气和物料之间的温度梯度和水分梯度使物料内部水分蒸发,并由流动的热风将物料表面蒸发的水蒸气带走的干燥方式。目前,热风干燥仍普遍应用于果蔬的干燥加工^[1-4]。

箱式热风干燥机干燥效率低、均匀性差主要由干燥室内风速分布不均匀所致^[5-6]。Scaar 等^[7]提出在通风风道和干燥室间增加导向挡板可改善气流的均匀性;代建武等^[8]通过在进风口处安装多块扰流平板的方式提高了气体射流冲击干燥机风速的均匀性;陆锐等^[5]在侧面风道设置不同匀风板可明显改善立式干燥介质空气速度均匀性。安蕾等^[9]指出达到干燥室风速均匀的效果需多次模拟和试验。高振江等^[10]发明了一种基于湿度控制的风机内置式烘房,内置风机对进口热风产生扰流作用;烘房内部各点温湿度分布均匀,干燥能耗降低。因此,将风机内置于干燥室的内部,对干燥室内热空气形成扰流作用,有利于提高温度和风速的均匀性。干燥温度相同时,相对湿度越高,湿空气焓值越高,则物料升温越快^[11-12]。采用低温高焓值的干燥介质对湿物料预热,使物料迅速升温,再降低空气湿度,可以避免干燥初期高温使物料表面干燥过快而引起的结壳现象,提高干燥效

基金项目:农业部现代农业产业体系项目(编号:CARS-21);北京市青年自然科学基金(编号:6204035);北京市优秀人才培养资助(青年骨干个人)项目(编号:2018000020124G034);河北经贸大学科研基金国家课题培育项目(编号:2018PY15)

作者简介:巨浩羽,男,河北经贸大学讲师,博士。

通信作者:肖红伟(1982—),男,中国农业大学副教授,博士生导师,博士。E-mail: xhwcaugxy@163.com

收稿日期:2020-02-25

率^[13-15]。王庆惠等^[16]研究表明,阶段降低相对湿度的干燥方式可提高干燥品质并缩短干燥时间,而采用干燥室内放置蒸馏水培养皿的方式来加湿,不利于湿度的自动化控制。

针对现有箱式热风干燥机温度、风速不均匀,不能对湿度进行自动控制的问题,试验拟设计一种基于温湿度控制的箱式热风干燥机,并以胡萝卜为试验原料进行试验验证,以为现有箱式热风干燥机的改进提供设计参考。

1 整机布局及工作过程

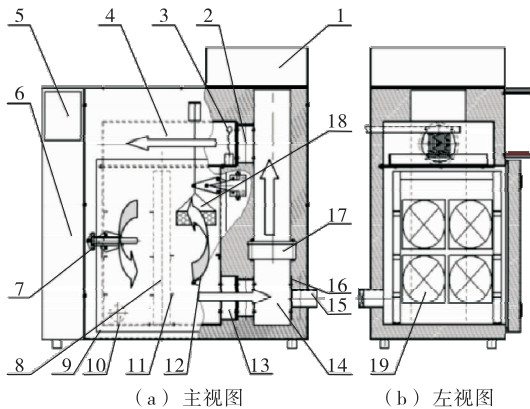
1.1 整机结构

基于温湿度控制的箱式热风干燥机主要由加热系统、干燥室、加湿系统、风道、内部送风风机、自动控制系统、称量装置、料架、机架等部分组成(见图 1)。

干燥室、进风道、回风道、干燥机箱体均使用 2 mm 厚 304 不锈钢制作,采用保温处理,并且干燥室回风道 13 与风机 17 进风口相连,可实现余热回收,降低能耗。内循环风机使内部热风循环流动,增强了流场的均匀性。控制系统主机通过控制加热管,加湿电磁阀和排湿风机对干燥室内温度和湿度进行控制,并实现多阶段变温变湿干燥工艺。该热风干燥机性能参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

干燥机启动后,空气由进风口 15 进入风机 17 加速后送入电加热管被加热,热空气经干燥室上风道 4 流入



1. 加湿水箱 2. 干燥室进风道 3. 加湿湿帘 4. 干燥室上风道
5. 触摸屏控制器 6. 配电箱 7. 干燥室门把手 8. 内循环风机
支架 9. 干燥室门 10. 排湿风机 11. 料盘支架 12. 干燥室
门合页 13. 干燥室回风道 14. 电加热管 15. 进风口 16. 铁
纱网 17. 风机 18. 称量模块 19. 内循环风机 箭头表示热
风循环方向

图 1 基于温湿度控制的箱式果蔬热风干燥机
Figure 1 Schematic diagram of fruit and vegetable box type hot air dryer based on being controlled temperature and humidity

表 1 干燥机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the drier

特征技术参数	单位	数值
外形尺寸(长×宽×高)	mm ³	700×400×600
温度控制范围及精度	℃	30~80(±0.5)
相对湿度控制范围及精度	%	10~60(±3)
料盘尺寸	mm ³	120×170×50
内部热风风速	m/s	3~4
总功率	W	1 200
干燥室容积	m ³	0.01

干燥室中,对物料进行干燥。热空气与湿物料发生热质传递后,部分热空气流入风机进风处,实现余热回收利用。

相对湿度设定为某个范围,加湿水箱中水温控制在 40~60 ℃。当干燥室中当前相对湿度值小于设定范围时,加湿水箱 1 的水润湿风道中的无菌棉条形成湿帘,水分被蒸发形成水蒸气,含有一定量水蒸气的湿空气进入干燥室中,提高了干燥室内相对湿度。当干燥室中当前相对湿度大于设定范围上限时,排湿风机 10 开启,对干燥室进行排湿以降低干燥室相对湿度^[15]。

1.3 内循环风机设计及 Fluent 模拟

为保证内部流场的均匀性,需对内循环风机的转向进行模拟优化。假设干燥室内流场为稳态黏性流动,模型为标准的 $k-\epsilon$ 模型,干燥室内流场的不可压缩流动的连续性方程、动量方程以及能量方程均由式(1)表示^[17]。

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S, \quad (1)$$

式中:

φ ——广义变量;

Γ ——扩散系数;

S ——源项;

ρ ——密度, kg/m³;

t ——时间, s;

u —— x 方向速度, m/s;

v —— y 方向速度, m/s;

w —— z 方向速度, m/s。

选取速度入口为边界条件,进口方向垂直于边界且分布均匀,风速测定为 4.2 m/s,湍流取值由经验公式估算为 3.8%。进口温度为 70 ℃;内循环风机压力阶跃为 12 Pa。出口条件设置为自由出流,出口处热空气完全由出口流出。固体壁面使用无滑移条件,壁面温度 20 ℃,采用标准壁面函数法进行修正。坐标轴设定如图 2、3 所示,干燥室底面中心为原点。由 Fluent 计算位于 $z=0$ 、

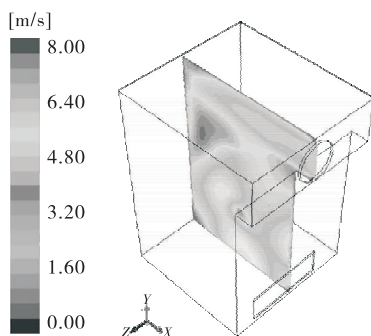


图2 干燥室内部流场分布

Figure 2 Flow field distribution in drying chamber

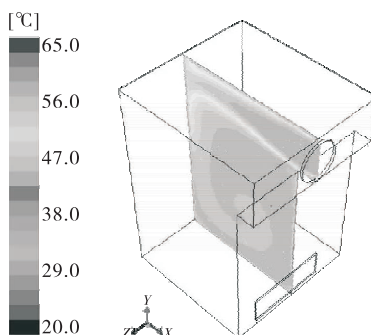


图3 干燥室内部温度分布

Figure 3 Temperature distribution in drying chamber

xoy 面上风速和温度分布。

当上侧两个风机风向沿 x 轴负向,下侧两个风机沿 x 轴正向时,在干燥室范围内,进入干燥室内部的热风由于遇到壁面后速度减小,而后流入下侧风扇,形成自上而下的逆时针流动,两侧风速基本一致,左侧风速可能因为入口热风的影响而减小。进口的热空气遇到壁面后温度降低,由于内循环风机的作用,风机支架两侧温度基本一致,保证了干燥的均匀性。

选取风机左右两侧上、中、下 3 层料盘中,沿 z 轴方向选取前、中、后 3 个位置,从左至右,自上而下,由外而内依次编号为 1~18,测量点位置如图 4 所示。各测量点温度、风速的仿真值和实测值如图 5 所示,其中温度采用温度传感器 Pt100(北京昆仑工控公司,精度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$) 进行测量;风速值使用 RHAT-301 型风速仪测定(精度 0.1 m/s ,清华同方);仿真值由上述 Fluent 模拟得出的干燥室内部温度和速度分布场中获取。结果表明,计算值和模拟值基本吻合,速度和温度的最大相对误差分别为 9.3% , 2.0% ,干燥室内速度为 $3.2\sim 4.2\text{ m/s}$,温度为 $43\sim 45^\circ\text{C}$,速度和温度不均匀系数分别为 9.9% , 0.8% 。干燥室内风速比较均匀,温度分布基本一致,满足了干燥机均匀性的要求。

1.4 控制系统设计

1.4.1 总体设计 控制系统总体设计框图(图 6)主要包

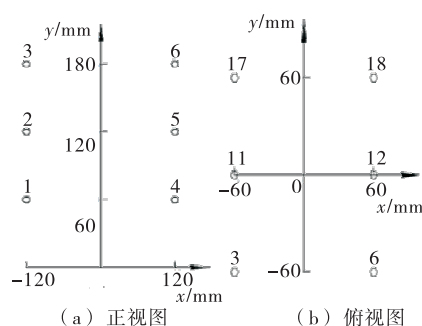
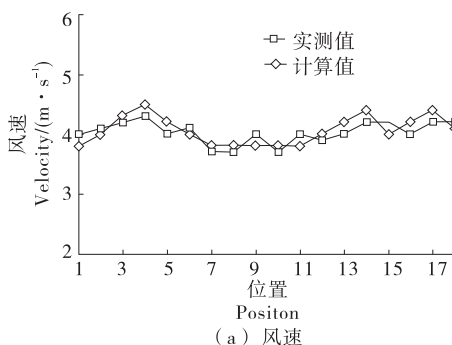
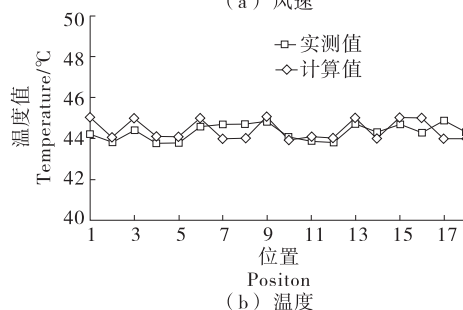


图4 风速温度测量点

Figure 4 Air velocity and temperature detecting points



(a) 风速



(b) 温度

图5 不同位置风速和温度的计算值与实测值

Figure 5 Compare between calculate and experimental temperate values of different position

含环境温湿度监控、物料温度监测和自动称量的功能。控制系统主机使用工业触摸屏控制器 MT6070iH(深圳威纶通科技有限公司),其中一个 RS232 串口基于 Modbus 通讯协议与单片机连接,用于读取干燥介质温湿度、物料温度等;另一个 RS485 串口与称量仪表相连,用于读取物料质量数据。单片机为 Microchip 公司的 PIC16F877A 芯片,其程序模块设计^[18]包括干燥介质温湿度监控、物料内部温度监测,以及与主机的通讯模块。3 路 Pt100 温度传感器(北京昆仑工控公司,精度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$)经温度变送器后将温度值线性对应为 $0\sim 5\text{ V}$ 电压信号,再接入单片机引脚,用于测量物料内部温度。干燥介质的温湿度采用 SHT15(瑞士盛世瑞恩传感器公司,温度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$,相对湿度 $\pm 2.0\%$)温湿度传感器测量,其中传感器的数据线和时钟线分别与单片机的 RB6 和 RB7 引脚相连^[15,19]。

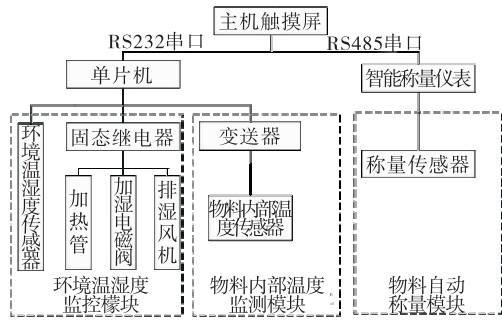


图 6 控制系统总体设计框图

Figure 6 Total principle schematic of control system

1.4.2 相对湿度精确控制

(1) 加湿装置结构设计:该装置主要由进水管、出水管、水槽、固定孔和无菌棉条构成(见图 7)。其装配在风道中,通过风道进风口上的固定孔与进风管道相固定,进风管道通过螺栓与加热管装配体中的出风口相固定。进水管连接有手动球阀和电磁阀。当需要加湿时,加湿电磁阀开启,加湿水箱中的水由于重力作用,一定温度(70~80℃)的水经水管流入到无菌棉条,受热蒸发为水蒸气,随热风进入干燥室内,实现对干燥空气的加湿。多余的水流经水槽从出水管排出,流入干燥机外的蓄水槽中。停止加湿时,由控制系统关闭电磁阀。

(2) 相对湿度控制程序:由于采用湿帘加湿的控制湿度方法具有很大的加湿惯性,采用开关量控制可能会导致超调量较大,而积分分离式数字 PID 控温策略,既能保持积分作用,又能减小超调量^[20],因此控制系统中采用积分分离式 PID 控制程序调控相对湿度,其流程图如图 8 所示。

1.4.3 定时自动称量控制

(1) 称量装置设计:为减小干燥室内温度和风速对称量的影响,称量传感器安装在干燥室上方的风道(见图 9)。称量传感器选用 3 kg 的 YL516D 型电阻应变式称量传感器,称量仪表为 XSB-IC(北京康森特科技公司,精度 0.02%)。

(2) 称量控制程序:选取 25,35,45,55,65℃下所测

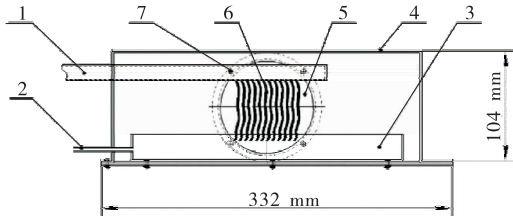
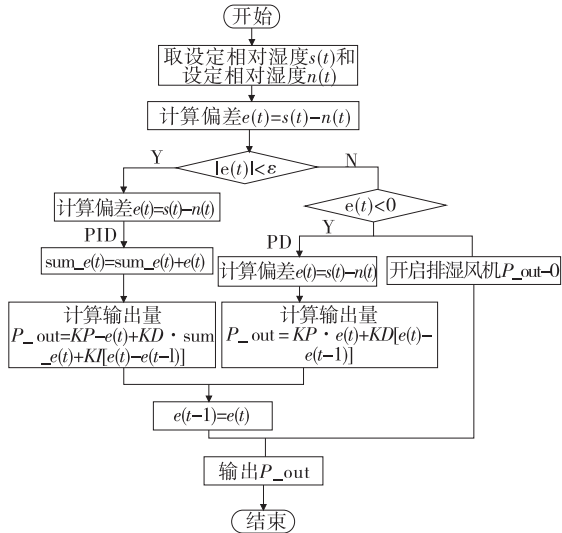


图 7 加湿装置示意图

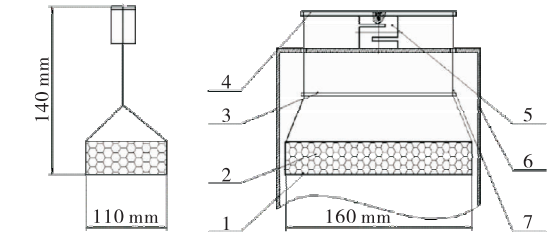
Figure 7 Schematic diagram of humidification device



KP 、 KI 、 KD 分别为比例、常数和微分常数; $e(t)$ 、 $e(t-1)$ 、 $sum_e(t)$ 分别为当前时刻相对湿度偏差、上一时刻相对湿度偏差和相对湿度偏差累积和; P_{out} 为 PID 控制输出值

图 8 积分分离式数字 PID 控湿程序流程图

Figure 8 Relative humidity control program procedure with integral separated digital PID



1. 料盘 2. 物料 3. 平衡板 4. 支撑板 5. 传感器 6. 风道外壁 7. 连接线

图 9 称量模块结构示意图

Figure 9 Schematic diagram of weighing structure

质量作为温度段 20~30,30~40,40~50,50~60,60~70℃校正的基准,试验结果如表 2、3 所示。

称量采用“停机—稳定—称量—启动”流程^[21]。称量时先关闭内循环风机,静置 25 s,然后进行称量。主机读

表 2 称量传感器不同温度不同载荷下的测试质量

Table 2 Measurement value of weighing sensor at different temperature and load g

载荷	25℃	35℃	45℃	55℃	65℃
25	24.9	24.9	25.2	25.8	27.6
50	50.1	50.1	50.4	51.3	52.8
100	100.2	100.2	100.5	101.4	103.2
150	150.0	150.0	150.6	151.8	153.3
200	200.1	200.1	200.7	201.9	203.7
250	249.6	249.9	250.5	251.7	253.5
300	300.1	300.6	301.2	302.4	303.9

表3 各温度段线性校正方程

Table 3 Linear calibration equations at different temperature sections

温度/℃	斜率 k	截距 b	相关系数 R^2	最大偏差/g
20~30	1.000 4	-0.066 5	0.999 9	0.2
30~40	0.998 8	0.068 1	0.999 9	0.3
40~50	0.997 5	-0.194 1	0.999 9	0.1
50~60	0.995 5	-0.916 0	0.999 9	0.3
60~70	0.995 7	-2.609 4	0.999 9	0.3

取智能仪表中测得的质量值 m_0 , 然后判断所处的温度范围, 对测量质量进行修正, 计算得出实际质量 m 。干燥过程中可人工称量或设定称重间隔自动称量, 自动称量控制程序流程图如图 10 所示。

1.4.4 触摸屏界面设计 基于 Easybuilder8000 开发环境绘制触摸屏界面如图 11 所示。监控界面显示物料的温度、干燥介质温湿度和物料质量; 具有设定称量间隔, 去皮, 人工称量以及手动开闭内循环风机, 排湿离心风机、加湿电磁阀等功能。设定界面可设定干燥工艺为恒定相对湿度或分阶段变温变湿干燥方式。脚本宏程序包含干燥计时、积分分离式 PID 控湿程序和“停机—稳定—称量—启动”自动称量等程序^[15]。

2 干燥机性能验证

2.1 试验原料及干燥条件

选用胡萝卜为试验原料, 直径 (3.0 ± 0.5) cm, 长度 (15 ± 1) cm, 初始湿基含水率为 $(92.8 \pm 0.5)\%$ 。将胡萝卜

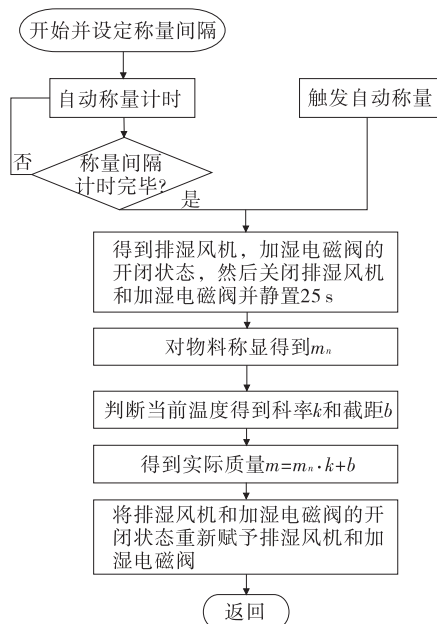


图10 自动或手动称量程序流程图

Figure 10 Automatic or manual weighing program procedure



图11 触摸屏界面

Figure 11 Main interface of touch screen

卜清洗, 使用切片机(SQC-1型, 哈尔滨瑞华厨房设备厂)切分为长 (2.0 ± 0.1) cm, 宽 (2.0 ± 0.1) cm, 厚 (1.0 ± 0.1) cm 的薄片, 试验前于 (4 ± 1) °C 冰箱中保存。

试验1: 取胡萝卜片放置于箱式干燥机, 左、右侧各3个料盘中, 从上到下, 从左到右依次标记为A~F, 设定干燥温度60 °C, 相对湿度 $(20 \pm 2)\%$, 开启内循环风机和关闭内循环风机两种条件下, 分别测定胡萝卜片干燥至湿基含水率为15%所需时间, 以验证不同位置风速和温度的均匀性。

试验2: 温度和相对湿度分别为60 °C和 $(20 \pm 2)\%$ 、56.3 °C和 $(25 \pm 2)\%$ 、53.4 °C和 $(30 \pm 2)\%$, 焓值为127.1 kJ/kg^[22], 将温度传感器插入胡萝卜片内部观测温度变化, 分别使用开关量和积分分离式PID方式控制相对湿度, 验证湿帘控湿精度和相同焓值下低温高相对湿度物料快速升温的假设。

试验3: 设置干燥温度60 °C, 相对湿度40%保持20 min, 后期相对湿度 $(20 \pm 2)\%$, 验证湿度控制有利于加快干燥速率。

2.2 试验分析

由图12可知, 不同位置干燥时间为6.0~7.5 h, 靠近内风道的A和D处干燥时间较短。由图13可知, 内循环风机开启后, 不同位置处干燥曲线基本重合, 所需的干燥时间一致, 为6 h。由方差分析可知, 不同位置处的干燥时间无显著性差异。故增加扰流后的内循环风机保证了干燥的均匀性。

由图13可知, 相对湿度在20%上下波动, 最大偏差为0.5%, 说明湿帘控湿方式保持相对湿度稳定; 而在开关量控制相对控湿方式下, 由于存在加湿惯性, 相对湿度超调量较大。由图14可知, 焓值相同, 温湿度不同的干燥介质下, 物料预热阶段温升曲线一致, 10 min后达该焓值和湿含量下的湿球温度34.6 °C。因此, 低温高湿的干燥介质可使物料迅速升温。

由图15可知, 两种干燥条件下的胡萝卜片水分比MR随干燥时间的延长均呈下降趋势。阶段降湿条件下干燥时间为4.5 h, 比恒定湿度条件下缩短了1.5 h; 前期

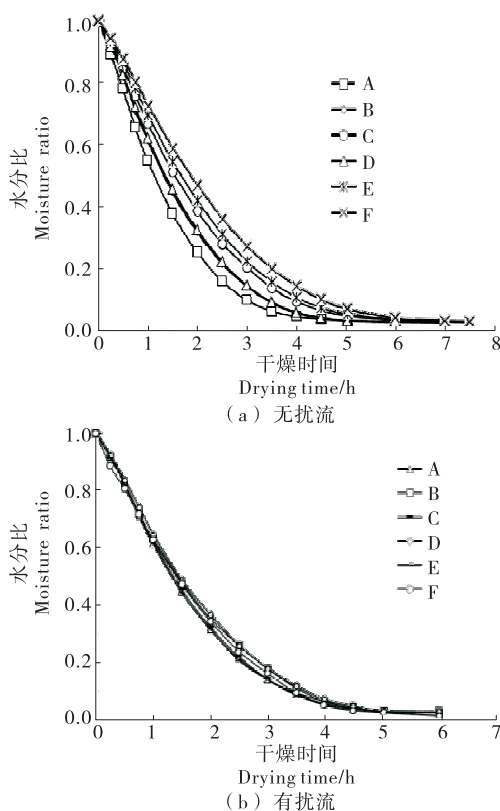


图 12 60 °C 恒定相对湿度 20% 下胡萝卜片的干燥曲线
Figure 12 Drying curve of carrot slices at different positions under drying temperature of 60 °C and relative humidity of 20%

预热阶段,由于物料表面和环境中的水蒸气分压差较小,干燥速率较慢^[23],但此阶段物料内部升至较高温度,增加了物料内部水分迁移扩散的动力^[24-25]。然后随着相对湿度的降低,水蒸气分压差增大,干燥速率加快。因此,阶段降温有利于加快物料的干燥速率,与王庆惠等^[16]的结论相一致。

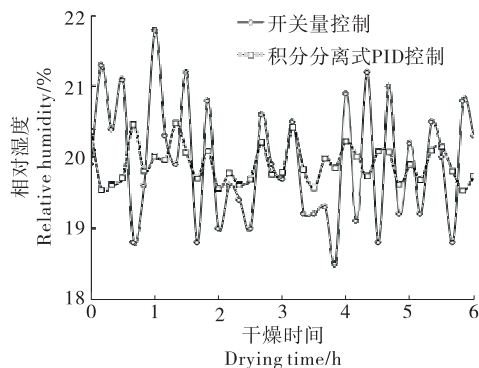


图 13 60 °C, 20% RH 下不同控湿方法干燥介质相对湿度曲线
Figure 13 Relative humidity curves at 60 °C drying temperature and 20% relative humidity under different relative humidity control way

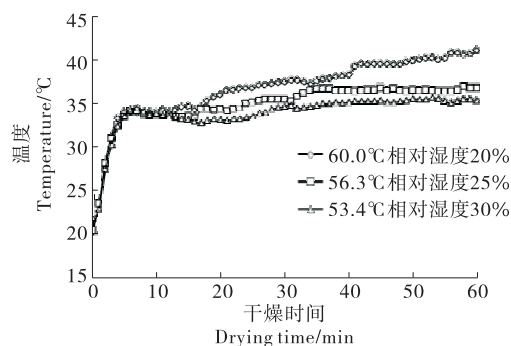


图 14 等焓值下物料温度曲线
Figure 14 Temperature curves at the same enthalpy value

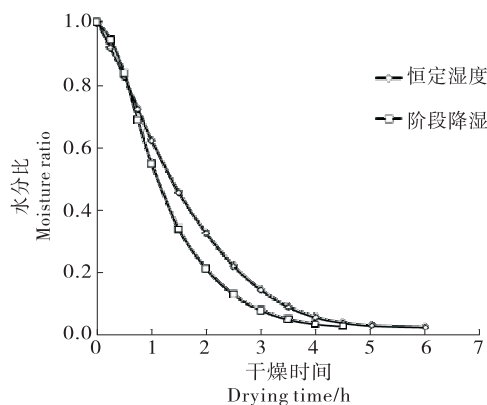


图 15 阶段降温和恒定湿度下胡萝卜的干燥曲线
Figure 15 Drying curves of carrot slices at constant humidity and step down humidity conditions

3 结论

针对现有热风干燥机温度和风速不均匀以及湿度调控不精确的问题,设计了一种基于温湿度控制的箱式热风干燥机,其主要由内循环轴流风机、加热管、控制系统等部分组成。结果表明:① 在干燥室内增加内循环风机,提高了干燥机温湿度和风速流场的均匀性,60 °C, 20% 相对湿度下,不同位置胡萝卜干燥时间一致,均为 6 h;② 设计了湿帘加湿装置,并将积分分离式 PID 控制算法应用于相对湿度控制中,相比于开关量控制相对湿度的方法,该方法控制精度较高,最大偏差为 0.5%;③ 设计了称量装置,不同温度下校核结果表明,温度为 20~70 °C,载荷为 25~300 g,最大偏差为 0.3 g;④ 相同焓值,不同温度的干燥介质物料升温曲线一致;干燥前期较高相对湿度,后期较低相对湿度有利于缩短干燥时间。综上,试验设计的箱式热风干燥机,提高了内部风速和湿度的均匀性;将积分分离式 PID 控制算法应用到相对湿度的控制中,实现了相对湿度的准确控制;实现了物料湿度的实时监控以及自动和手工称量等功能,对现有箱式热风干燥机的设计改进提供设计参考。然而在胡萝卜干燥过程中,前期高湿后期低湿能够提高干燥效率的机理

仍需进一步明确,研究在不同相对湿度干燥条件下,胡萝卜物料内部水分的迁移扩散规律、温度空间分布及物料微观孔隙结构的演化过程,明确相对湿度对果蔬热风干燥的影响机理,可为优化调控相对湿度以提高干燥效率和品质提供理论依据。

参考文献

- [1] 效碧亮,孙静,刘晓风,等.百合热风薄层干燥特性及干燥品质[J].食品与机械,2020,36(2):48-55,218.
- [2] 张萌,段续,任广跃,等.预处理方式对热风干燥玫瑰花瓣品质特性的影响[J].食品与机械,2020,36(1):204-209,216.
- [3] JU Hao-yu, ZHAO Shi-hao, ZHAO Hai-yan, et al. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models[J]. Food and Bioproducts Processing, 2018, 111: 20-29.
- [4] XIAO Hong-wei, BAI Jun-wen, XIE Long, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94(2): 581-591.
- [5] 陆锐,谭鹤群,黄正明.立式干燥机干燥单元风速场均匀性的研究[J].湖北农业科学,2013,52(2):435-439.
- [6] SUHAIMI M, SOHIF M, MOHD H R, et al. The prediction of drying uniformity in tray dryer system using CFD simulation [J]. International Journal of Machine Learning & Computing, 2013, 3(5): 419-423.
- [7] SCAAR H, TEODOROV T. Computational fluid dynamics (CFD) analysis of air flow uniformity in a fixed-bed dryer for medicinal plants[J]. Ist International Symposium on CFD Applications in Agriculture, 2013, 1 008(4): 119-126.
- [8] 代建武,肖红伟,白竣文,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.
- [9] 安蕾,樊啟洲,张乘畅.小型油菜籽分层床式干燥设备的数值模拟及其优化[J].华中农业大学学报,2015,34(6): 125-129.
- [10] 高振江,代建武,林海,等.一种基于湿度控制的风机内置烘房:中国,102914138[P].2013-02-06.
- [11] CURCIO S, AVERSA M, CALABRÒ V, et al. Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(4): 541-553.
- [12] JU Hao-yu, ZHAO Shi-hao, MUJUMDAR A S, et al. Step-down relative humidity convective air drying strategy to enhance drying kinetics, efficiency, and quality of American ginseng root (*Panax quinquefolium*) [J]. Drying Technology, 2019, DOI: 10.1080/07373937.2019.1597373.
- [13] JU Hao-yu, EL-MASHAD H M, FANG Xiao-ming, et al. Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions[J]. Drying Technology, 2016, 34(3): 296-306.
- [14] 陆学中,刘亚男,张德榜,等.高湿预处理对怀山药热风干燥特性及复水性的影响[J].食品与机械,2017,33(11): 147-151,183.
- [15] 巨浩羽,张茜,郭秀良,等.基于监测物料温度的胡萝卜热风干燥相对湿度控制方式[J].农业工程学报,2016,32(4): 269-276.
- [16] 王庆惠,李忠新,杨劲松,等.圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J].农业工程学报,2014,30(3): 271-276.
- [17] 李赫,张志,仁源,等.基于Fluent的菊花热风干燥流场特性仿真分析[J].食品与机械,2018,34(10): 133-138.
- [18] 李继成,高振江,肖红伟,等.基于单片机的奶牛精确饲喂装备设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(1): 101-105.
- [19] 张卫鹏,肖红伟,郑志安,等.基于碳纤维红外板加热的干燥装备设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(17): 242-251.
- [20] 王栋,林海,姚雪东,等.基于MODBUS协议的干燥控制系统设计[J].石河子大学学报(自然科学版),2012(1): 110-115.
- [21] 王栋,林海,肖红伟,等.气体射流冲击干燥含水率在线监控系统设计[J].农业工程学报,2014,30(19): 316-324.
- [22] 李长友.粮食热风干燥系统火用评价理论研究[J].农业工程学报,2012,28(12): 1-6.
- [23] JU Hao-yu, LAW C L, FANG Xiao-ming, et al. Drying kinetics and evolution of the sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying [J]. Drying Technology, 2016, 34(11): 1 297-1 306.
- [24] 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等.干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(16): 296-304.
- [25] 席慧涵,刘云宏,王琦,等.马铃薯超声强化远红外辐射干燥特性及神经网络模型研究[J].食品与机械,2019,35(2): 123-128,152.