

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.040

微波-热风振动流化床干燥机设计与试验

吕豪¹ 吕黄珍² 王雷³ 吕为乔¹ 万丽娜² 赵丹²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 湖北省农业机械工程研究设计院, 武汉 430070)

摘要: 针对微波干燥中场强分布不均、物料微波能吸收能力不同导致的微波加热不均匀现象, 结合微波干燥的高效性、流态化干燥的均匀性以及热风干燥辅助去除水汽的功能, 设计了一种实现干燥均匀性的微波-热风振动流化床干燥机, 主要由振动流化床系统、热风系统、微波加热系统、测温系统和控制系统等组成。采用 Ansoft HFSS 软件对微波加热仓磁控管不同开口位置进行仿真分析, 得到多馈口激励最佳方案。结果显示, 物料高度距离箱底不变的情况下, 4 个微波馈入端口的位置相对于原始端口位置外移 30 mm, 物料表面场强分布更加均匀。以新鲜毛豆仁为例, 对该机的性能和加热均匀性进行试验验证, 结果表明: 设计方案和控制系统方案可靠, 微波-热风振动流化床干燥下毛豆仁的干燥时间为 54 min, 比单独微波流化床干燥的干燥时间缩短 34.1%, 比微波-热风组合干燥的干燥时间缩短 12.9% 且产品均匀性显著提高。

关键词: 振动流化床; 微波干燥; 热风; 均匀性; 仿真

中图分类号: S375; TQ028.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0344-08

Design and Experiment of Microwave – Hot-airflow Vibrating Dryer

LÜ Hao¹ LÜ Huangzhen² WANG Lei³ LÜ Weiqiao¹ WAN Lina² ZHAO Dan²

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

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. Hubei Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: The non-uniform distribution of microwave field and the non-uniform absorption in fresh food during microwave drying lead to the uneven quality. Combining the advantages of the high efficiency of microwave drying with the uniformity of fluidized drying, water vapor was removed by hot airflow. A microwave – hot-airflow vibrating dryer (MAVD) was developed based on drying uniformity. The MAVD device mainly included a fluidized bed system, a hot air heating system, a microwave heating system, a temperature measurement system and a control system. The positions of magnetron in drying chamber were simulated and optimized with the software of Ansoft HFSS. The results showed that when the height of the tray was constant from the bottom of the box, the positions of the four microwave feed ports were 30 mm away from the original port position, thus the surface electromagnetic field distribution of the material was more uniform. The performance of the device was tested with green soybean. The results showed that the design and control system of the drying test platform were reliable. The drying time of MAVD was 54 min, which was 34.1% shorter than that of microwave fluidized bed drying alone, and the uniformity of products was significantly improved. The research results provided reference for microwave drying equipment to improve the uniformity of microwave heating.

Key words: vibrated bed; microwave drying; hot airflow; uniformity; simulation

0 引言

传统的热风干燥过程中, 热量以对流和传导方

式由外到内传递到物料内部, 干燥时间过长且效率低^[1-2]。微波干燥具有干燥速度快、干燥持续进行等特点, 可以在温升较低的条件下进行, 常用于热敏

收稿日期: 2018-12-03 修回日期: 2019-01-20

基金项目: 广东省科技计划项目(2018B020241003-10)和中国农业大学基本科研业务费专项资金项目(2018QC013)

作者简介: 吕豪(1989—), 男, 博士生, 主要从事农产品干燥技术与装备研究, E-mail: 13146035826@163.com

通信作者: 吕为乔(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农产品干燥技术与装备研究, E-mail: lvweiqiao@cau.edu.cn

性强、附加值高的物料干燥,是农产品干燥领域研究的热点^[3]。由于微波场强和物料特性在干燥过程中表现出明显的不均性,微波干燥的品质难以控制^[4-5]。微波与其他干燥手段的结合,有助于提高干燥效率、改善产品品质^[6-8]。目前,微波组合干燥仍存在干燥不均的问题,温度和水分分布难以控制等缺陷导致干燥物料品质难以保障。因此改善微波干燥的干燥不均匀问题十分必要。

微波干燥的均匀性受诸多因素的影响,如腔体形状、物料类型及存放位置、微波源的布置等^[9]。国内外学者对微波加热的不均匀性进行了广泛研究,目前微波加热均匀性研究主要是在微波组合其他干燥方式、改善微波加热仓电磁场均匀性、改变物料在微波加热仓内位置状态和微波加热仓形状等方面。一些学者将微波组合其他干燥形式与单一微波干燥进行对比,发现其能在一定程度上改善微波加热不均的问题^[10-11]。文献[12]通过对干燥室不同微波馈口进行微波场模拟仿真,得出单面开口电场均匀性更好。文献[13]对微波仓电场分布进行了有限元模拟,结果表明,谐振腔半径 0.25 m、长度 0.8 m 电场均匀性较好。文献[14-15]通过气流喷动使物料充分混合,并对苹果等物料进行了研究,结果表明,这种方法的干燥效率高,比固定态下的微波干燥时间节省约 80%,与单一微波或者热风干燥相比显著改善了干燥物料品质。

本文针对微波干燥存在的干燥不均匀、色差大和单独热风干燥效率低、能耗大等问题,基于机械振动流态化技术,设计一种微波-热风振动流化床干燥机(Microwave-hot-airflow vibrating drying, MAVD),并以新鲜毛豆为例,试验验证 MAVD 的干燥效果。

1 总体结构与工作原理

1.1 结构

为改善果蔬等农产品物料微波干燥过程的温度均匀性和水分均匀性,实现高效高品质干燥,课题组独立设计了 MAVD。按照实现干燥过程的主要功能,整机包括热风加热系统、微波加热系统、振动流化床系统、测温系统以及控制系统,结构如图 1 所示。

热风加热系统由高压风机、电加热箱、热风输送管、热风布风板、温度传感器等部件组成。热风温度连续可调,在进风口设计可调节风门。微波加热系统由磁控管、驱动电源、加热腔体、物料盘等部件组成。其中,微波源采用较成熟的频率为 2 450 MHz 的磁控管,功率连续可调,安装在干燥室顶部,采用旋转天线馈能方式,通过独立的微波馈入波导,磁控

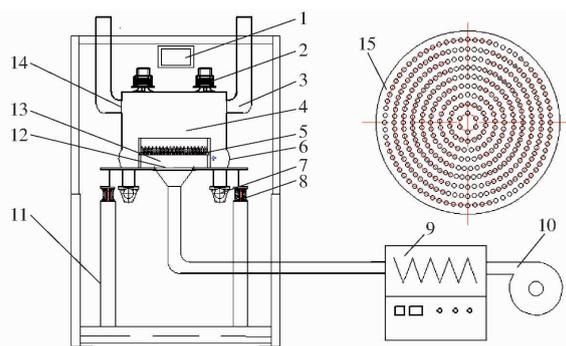


图 1 干燥机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of MAVD

1. 控制面板 2. 磁控管 3. 蒸汽排风口 4. 微波加热仓 5. 物料盘 6. 柔性钢丝网 7. 振动电机 8. 橡胶弹簧 9. 电加热箱 10. 高压风机 11. 振动床机架 12. 热风布风板 13. 缓压仓 14. 微波隔离网 15. 热风布风板

管驱动电源固定于机架两侧分别单独驱动 4 支磁控管工作,干燥室采用多模箱式结构,采用不锈钢材料。振动流化床系统由振动电机、橡胶弹簧、振动床机架、物料盘托盘等部件组成。其中,振动器采用变频软启动,可有效防止振动床失谐、颤动、移位等现象,振动床机架与地面固定,流化床设计成刚性结构,物料盘采用聚四氟乙醚材料,该材料比传统聚四氟乙烯材料强度更高、更耐高温,可有效防止热风温度过热和振动导致的物料盘变形。控制系统采用可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)和人机控制界面(Human machine interface, HMI)控制,分别与磁控管驱动电源、温度传感器、振动电机变频器、电加热箱、高压风机连接,实时调控工作状态。

1.2 工作原理

干燥机由 PLC 和 HMI 统一控制热风干燥系统、微波加热系统和振动流化床系统。工作时首先开启热风加热装置,热风经过电加热箱加热后通过高压风机和布风板进入微波干燥仓体内的缓压仓内,热风经过缓压仓的缓压作用能均匀穿透物料床层,调节热风温度,风速达到预定值时,根据不同物料调节振动电机变频器来调节振动频率,使物料在微波场中处于均匀流态化状态,设定微波工作功率、干燥时间,开启微波源,以实现物料的微波-热风组合流化床干燥。也可在不开启热风系统的情况下实现单独微波流态化干燥工艺,温度设为 4 个挡位,当超过第 1 挡温度时,微波功率衰减 25%,当超过第 2 挡温度时,微波功率衰减 50%,当超过第 3 挡温度时,微波功率衰减 75%,当超过最高设定温度时,磁控管停止工作,当达到设定干燥时间后取出物料,顶部引风机带走物料加热产生的水蒸气,提高干燥效率和均匀性。

1.3 主要技术指标

干燥机集微波和热风干燥为一体,能实现单批次干燥新鲜果蔬 3~5 kg 的生产能力,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 干燥机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of MAVD

参数	数值
外形尺寸/(mm × mm × mm)	950 × 1 280 × 1 800
物料盘尺寸/(mm × mm × mm)	380 × 380 × 120
床槽底部开孔率/%	5
微波功率/W	100~4 000(连续可调)
微波谐振腔尺寸/(mm × mm × mm)	560 × 560 × 400
热风温度/℃	20(室温)~180
热风风量/(m ³ ·h ⁻¹)	145
测温范围/℃	0~500
微波泄漏量/(nW·cm ⁻²)	<1

2 关键部件设计

2.1 微波干燥室设计

微波谐振腔具有多谐性,设计原则是谐振腔应具有尽可能多的振荡模式,以取得较为均匀的能量分布状态^[16]。矩形谐振腔结构简单,谐振腔内电磁波在腔体内传播模式数越多,腔体内电场分布越均匀,干燥均匀性越好,谐振腔内模式数与腔体体积有关,腔体尺寸越大,腔内模式越多,干燥均匀性越好。矩形谐振腔如图 2 所示。矩形谐振腔沿 x 、 y 、 z 轴方向上的长分别为 a 、 b 、 d ,分别代表矩形谐振腔的长、宽、高。

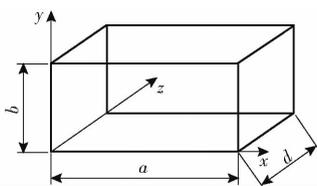


图 2 矩形谐振腔

Fig.2 Rectangular resonator

振荡模式谐振波长和共振频率的计算公式为

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}} \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (2)$$

式中 λ_0 ——谐振波长, m

f_0 ——谐振频率, Hz

m 、 n 、 p ——沿 a 、 b 、 d 边分布的半驻波数目

v ——光速, m/s

Q_0 是衡量谐振腔品质的一种质量指标,为了保证微波场分布的均匀性,应减少能量损耗和尽可能

提高谐振腔品质因数 Q_0 ^[17],其可表示为

$$Q_0 = \frac{V}{\delta S} \quad (3)$$

式中 V ——干燥室体积, m³

S ——干燥室内表面积, m²

δ ——内壁集肤效应系数, m

一般而言, V/S 值与 Q_0 成正比关系, V/S 值越大, Q_0 越大, 体积过大会影响微波工作频率, 一般认为对于中心频率为 2 450 MHz 的多谐振腔体, 具有 5 个以上、间隔大致为 10 MHz 的模式频谱密度, Q_0 不大于 1 000, 内壁集肤效应系数计算公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

式中 f ——谐振频率, MHz

μ ——磁导率, H/m

σ ——电导率, S/m

δ 越小, Q_0 越大。若 δ 取小值, μ 、 σ 应取大值, 谐振腔材质应选用电导率大的材质, 还需考虑食品安全因素, 干燥腔材料选用不锈钢材质。工业上一般要求 V/S 为 70~250 mm。

根据矩形谐振腔尺寸, 不同的 m 、 n 、 p 可确定不同的模式。一个模式下, 只有当该模式所对应的频率处于中心工作频率 f_0 附近频谱范围, 才是有效的工作模式, 超出范围的模式不能生成, 即

$$f_0 - \Delta f \leq \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \leq f_0 + \Delta f \quad (5)$$

式中 Δf ——频带宽度, Hz

m 、 n 、 p 的各种组合分别代表室内的一种电磁场分布结构。确定腔体尺寸 a 、 b 、 d 及微波工作频率后, 由式(5)可计算出符合计算要求的模式数目及对应的谐振频率, 选择模式多、频率间隔较均匀的有利于改善加热均匀性的组合, 通过比较以及参考国内外设备参数选择微波谐振腔尺寸为 560 mm × 560 mm × 400 mm, 此时品质因数相对较高。确定腔体尺寸 a 、 b 、 d 以及微波工作频率和频带宽度后, 选取微波磁控管工作频率 2.45 GHz, 频带宽度 50 MHz。

2.2 不同馈波口位置微波场模拟分析与优化设计

目前改善微波干燥不均匀的方式主要通过改善干燥腔内磁场分布的均匀性和使物料在干燥仓内做不规则运动来达到微波加热均匀的目的^[18]。微波馈口结构设计主要通过改善干燥腔体内电磁场分布均匀性来达到微波加热均匀性的目的。因此, 以多馈能系统改善电磁场的均匀性理论, 根据已经确定的微波干燥腔大小, 通过 CATIA 建立三维模型, 设

置激励端口,设定边界条件、仿真参数,对不同馈入口位置的谐振腔体进行仿真优化。选取场强分布最均匀的排布形式,优化微波馈入口位置排布。

2.2.1 模型建立

根据腔体尺寸优化结果,确定干燥腔尺寸为 $560\text{ mm} \times 560\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,物料放置在 $380\text{ mm} \times 380\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的物料盘里,物料盘距微波干燥腔体底部 80 mm ,如图 3a 所示,起始微波磁控管开口位置如图 3b 所示,端口位于距物料盘对称轴 $1/4$ 边长处,4 个端口同时激励,相位相同。

2.2.2 结果与分析

微波馈入口位置和数量对干燥腔体内和物料盘

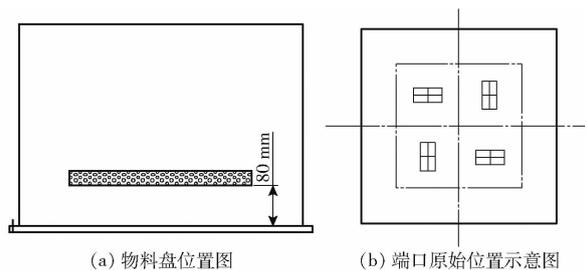


图 3 原始端口位置图和物料盘位置图

Fig. 3 Locations of original port and material tray

电磁场的分布影响较大。结合现有设备和前期研究,使用 Ansoft HFSS 软件对微波馈入口 6 种馈入口位置进行了仿真分析,干燥腔内电磁场分布情况和物料盘周围电磁场强分布情况如图 4、5 所示。

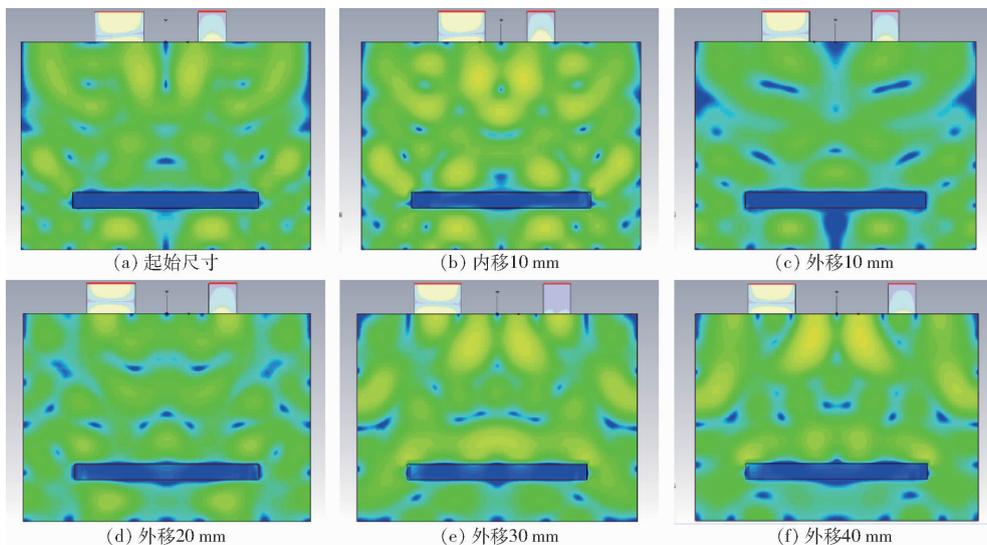


图 4 不同馈波口位置干燥腔磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distribution maps of drying cavity in different excitation

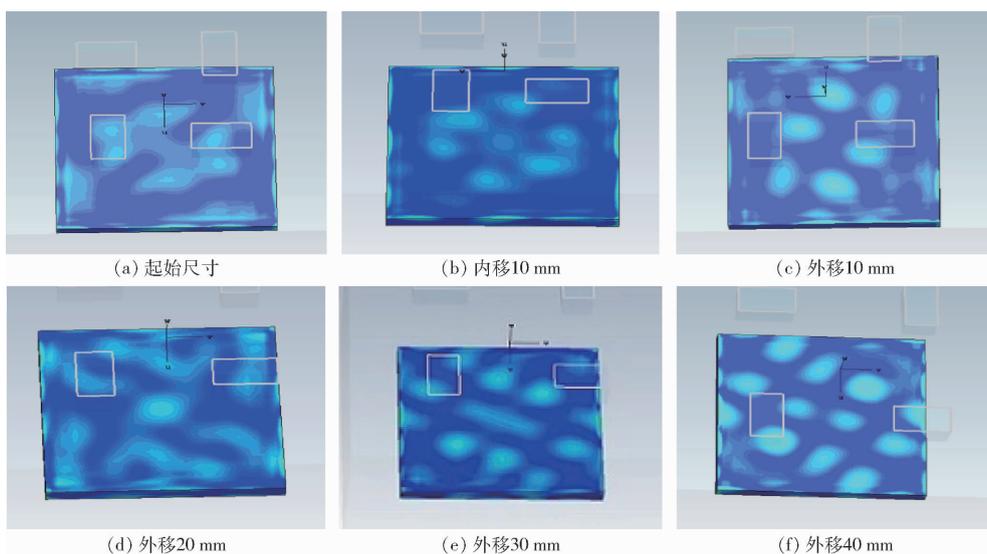


图 5 不同馈波口位置物料盘表面磁场分布

Fig. 5 Magnetic field distribution maps on surface of material tray in different excitation

图 4 为 4 个馈波口排布在干燥腔体顶部、不同排列馈波端口方式下仿真得到的微波干燥腔内磁场分布图,图 5 为不同馈波端口对应物料

盘的表面电场分布情况。从图中可以看出,在物料盘高度距离箱底不变的情况下,从电场在干燥腔体中的分布情况来看,把 4 个馈波端口

的位置相对于原始的馈波端口位置外移30 mm,电场强的地方在物料的周围分布较广,并且在物料的表面电场分布相比于其他位置的电场分布更加均匀,电场差较小,能够使物料的受热更加均匀。

2.3 振动流化床装置设计

2.3.1 结构设计

振动流化床使物料在干燥腔体内处于流态化状态,使物料在干燥时能更均匀地吸收微波能,从而保证被干燥物料的均匀性。振动流化床装置结构如图6所示,主要功能部件包括:物料盘、振动电机、橡胶弹簧、机架等。

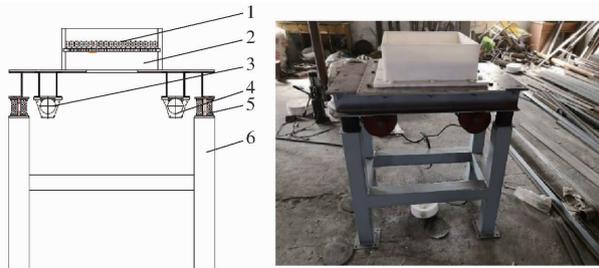


图6 振动流化床装置

Fig. 6 Vibro-fluidized bed dryer

1. 物料盘 2. 物料盘支撑板 3. 4. 振动电机 5. 橡胶弹簧 6. 机架

传统微波干燥物料盘的材料使用聚四氟乙烯,聚四氟乙烯材料受高温、振动易变形,本装置物料盘采用聚四氟乙醚材料,聚四氟乙醚是应用到微波干燥中的新一代替代材料,该材料强度更大,可防止振动装置振幅过大以及热风温度过高而导致的物料盘变形。振动电机通过放松螺母安装在机架上,使两个振动电机与机架成为一个刚性结构,振动电机产生激振力,带动物料盘振动,物料在双振动电机的激振力作用下形成特定轨迹振动,跳跃翻滚处于流化床状态,这样的设计使物料盘内物料在振动状态下流态化状态更加均匀,并且振动电机通过变频器调节振动频率,以适应不同物料的流化床需求,橡胶支撑具有非线性、变刚度等特性,橡胶弹簧用来连接物料盘和机架,起到减振作用,保证设备振动时的稳定性。

2.3.2 振动工作原理及运动分析

图7是两个振动电机振动流化床的工作原理图,振动流化床的激振力由振动电机提供,电机做同步反向运动。在水平 $x-x$ 轴上,两个振动电机关于 $y-y$ 轴对称,偏心块产生的惯性力在 $x-x$ 方向上相互抵消,在 $y-y$ 方向上惯性力互相叠加,在 $y-y$ 轴上产生激振力,激振力随着偏心块的转动呈周期性变化,从而实现物料在激振力作用下沿 $y-y$ 轴方向上下往复跳动以实现物料在干燥仓内的流态化状

态,物料盘在振动电机带动下振动,运转到 t 时,激振力计算式^[19]为

$$F_y = Gr\omega^2 \sin(\omega t) = F \sin(\omega t) \quad (6)$$

式中 F_y ——沿 y 方向激振力,kN

F ——最大激振力,kN

G ——偏心块总质量,kg

r ——偏心块回转半径,mm

ω ——回转角速度,rad/s

t ——时间,min

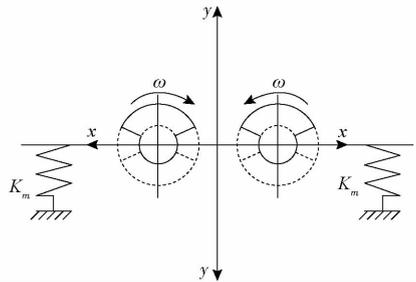


图7 振动流化床工作原理图

Fig. 7 Principle diagram of vibrating fluidized bed

2.4 控制系统

2.4.1 控制系统硬件设计

控制系统用于干燥机的工作状态监测、物料温度采集、微波功率与振动频率控制、数据显示与参数设置等。主要包含以下模块:

(1) 主控模块:本系统采用CPU型号为DVP20EX200R的台达PLC进行数字输入量(温度开关、门开关)以及模拟输入量(温度)的信号采集,红外测温传感器型号为S20-MW。对数据进行实时处理,同时通过DOP-B07S411型触摸屏实现人机交互,完成数据显示与参数设置。

(2) 微波控制模块:通过PLC电压控制分别对两组微波工作的功率进行调控。根据每组微波功率与电压对应关系(2~3.7V对应200~2000W)进行标定,多次测试确定功率曲线,利用调压准确控制微波功率。

(3) 振动流化控制模块:通过型号为VFD2A7MS43ANSAA的变频器来控制2个380V、120W的振动电机。变频器通过modbus协议与PLC通讯,可以通过触摸屏设置变频器频率来改变参数。

2.4.2 控制系统软件设计

利用PLC编程具有实时性高、控制稳定精确的特点,同时利用触控屏实现所有操作、工作数据集中显示和处理。由于设备内温度缓慢稳定变化,对温度传感器数据进行中值滤波与低频滤波,消除各种偶然因素带来的信号噪声。控制系统程序流如图8所示。

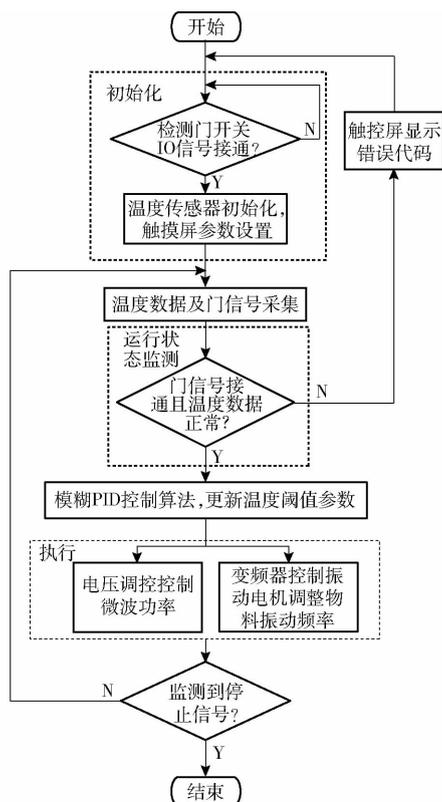


图8 控制系统程序流程图

Fig. 8 Systematic program flow charts

3 试验与分析

3.1 试验材料

干燥机调试完成后,进行干燥工艺试验和物料品质分析。基于当前果蔬物料微波干燥品质难以控制、产业化有待提高的现状,试验采用含水率低、糖分含量低的新鲜毛豆仁作为研究对象,确保干燥品质均匀稳定。试验所用材料为同一批次,初始含水率为 $(71.08 \pm 0.26)\%$,清洗后放入温度 4°C 、相对湿度为 95% 的环境中冷藏备用。

3.2 试验方法

根据前期预试验结果以及参考相关干燥的分析^[20],结合本干燥机的特点确定试验方案和参数如表2所示。

试验前取出物料放在室温下回温2 h,将物料均匀单层平铺在物料盘上,每组试验使用新鲜毛豆仁800 g,按照表2试验方案和参数进行试验,3种干燥方式下每隔5 min称量1次,称量之后样品放回干燥仓继续干燥,直到含水率小于 7% 。为了表征试验误差,每组试验重复3次,取平均值。为了对比振动流化床对物料微波干燥均匀性的效果,进行物料

表2 试验方案和参数

Tab. 2 Design and parameters for experiments

干燥方式	试验参数	测量指标
微波-热风组合干燥	热风温度 70°C ,振动床通风孔风速 6 m/s , 微波功率 1.2 W/g	干燥曲线、干燥均匀度 (表面温度、含水率)
微波流化床干燥	微波功率 1.2 W/g ,振动频率 50 kHz	干燥曲线
微波-热风振动流化床干燥	热风温度 70°C ,振动床通风孔风速 6 m/s , 微波功率 1.2 W/g ,振动频率 50 kHz	干燥曲线、干燥均匀度 (表面温度、含水率)

表面温度和水分均匀度的两组对比试验,在微波-热风组合干燥和MAVD干燥过程中,每隔一段时间,利用FLIR E40型红外热像仪(前视红外热像系统贸易有限公司)测量毛豆仁表面温度分布。重复以上试验,每个时间段取16粒毛豆仁计算一个均匀度。分别计算微波-热风组合干燥和MAVD干燥的水分均匀度,所有测量重复3次,取平均值。

3.3 干燥参数计算

干燥参数采用水分比,计算公式为^[21-22]

$$M_r = \frac{M_t}{M_0} \quad (7)$$

其中

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (8)$$

式中 M_t ——干燥 t 时刻物料干基含水率, g/g

M_0 ——物料初始干基含水率, g/g

m_t ——干燥时间 t 时总质量

m_d ——干物质质量, g

水分均匀度定义为相对标准差(Relative standard deviation, RSD),公式为^[23]

$$R = \frac{S}{X} \times 100\% \quad (9)$$

式中 R ——样本含水率的相对标准差

S ——样本含水率的标准差

X ——样本含水率的平均值

3.4 结果与分析

3.4.1 干燥特性

按照表2的干燥参数及方案,得到新鲜毛豆仁在3种不同干燥条件下水分比随干燥时间变化的干燥曲线如图9所示。

单独的微波流化床干燥,整个干燥过程需要82 min,MAVD干燥整个过程需要54 min,微波-热风组合干燥整个干燥过程62 min,MAVD干燥比单独微波流化床干燥时间缩短34.1%,MAVD干燥比

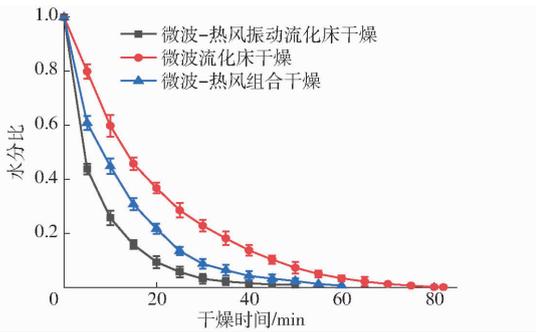


图9 毛豆仁在不同干燥条件下的干燥特性曲线
Fig.9 Drying characteristic curves of soybean under different drying conditions

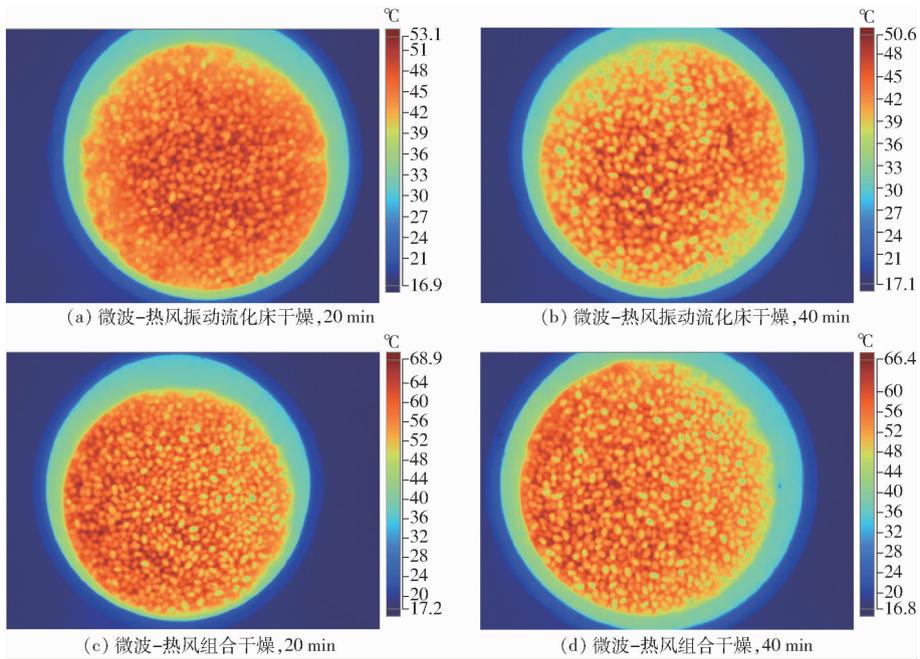


图10 毛豆仁在微波-热风流化床干燥和微波-热风组合干燥过程热像图

Fig.10 Thermal imagery of soybean dried using microwave-hot air fluidized bed drying and microwave-hot air combined drying

程,这可能是物料随着干燥时间的进行,含水率到后期比较低,样品损耗因子降低导致。

表3和表4显示新鲜毛豆仁在MAVD干燥和微波-热风组合干燥中平均含水率和水分均匀度。从表3、4可以看出,振动流化床和无振动流化床两种干燥方法水分均匀度变化趋势相同,随着干燥时间增加,RSD先增加后下降,在达到最大值后逐步下降。这可能是由于干燥到后期样本温度升

表3 毛豆仁在MAVD干燥过程中的平均含水率和水分均匀度

Tab.3 Mean moisture content and uniformity of soybean taken from microwave-hot air fluidized bed drying

干燥时间/min	含水率平均值/%	标准差/%	水分均匀度/%
0	71.08	0.150	0.21
15	38.99	0.220	0.56
30	19.25	0.490	2.56
45	8.13	0.380	4.76
54	3.33	0.064	1.93

微波-热风组合干燥效率提高12.9%,这说明热风温度有利于提高微波流化床干燥效率,加快微波干燥速率,同时流化床也对提高微波-热风组合干燥速率有显著影响。

3.4.2 振动流化床对毛豆仁干燥均匀性的影响

从图10可以看出,与微波-热风组合干燥相比,MAVD干燥过程物料温度总是低于微波-热风组合干燥的物料表面温度,这可能是由于振动使物料在干燥仓内翻滚转动,不停改变物料在干燥仓内位置,使物料蒸发出的水蒸气更快被排除,物料散热效果更好,到干燥后期,物料表面温度会有一个降低的过

表4 毛豆仁在微波-热风组合干燥过程中的平均含水率和水分均匀度

Tab.4 Mean moisture content and uniformity of soybean taken from microwave-hot air combined drying

干燥时间/min	含水率平均值/%	标准差/%	水分均匀度/%
0	71.08	0.15	0.21
15	43.24	1.87	5.26
30	18.12	2.52	18.95
45	8.11	3.22	27.37
62	2.40	0.22	9.30

高,高温可能导致物料内部间隙减小,从而改变内部水分迁移速率^[24]。在MAVD干燥过程中物料之间含水率差异与无流化床的单独微波热风干燥过程相比较低。MAVD干燥的RSD最大为4.76%,微波-热风组合干燥的RSD最大为27.37%,干燥结束时微波-热风振动流化床干燥RSD为1.93%,微波-热风组合干燥RSD为9.30%,这说明振动流化床对提

高微波干燥均匀性有显著作用。

4 结论

(1) 提出通过机械振动的方式实现物料流态化形式,从而提高微波干燥的均匀性,并通过仿真优化和理论计算,进行该装置总体结构设计和关键部件参数的确定,试验测试表明,该装置各个系统运行稳定,能得到品质较好物料。

(2) 3种微波方式对毛豆仁干燥特性具有显著影响,热风温度有利于提高微波流化床干燥效率,加快微波干燥速率,同时振动流化床也对提高微波热风组合干燥速率有显著影响。

(3) 在MAVD干燥过程中,物料表面的温度均匀性明显优于微波-热风组合干燥过程温度的均匀性,MAVD干燥新鲜毛豆仁样品的水分均匀度远高于微波热风干燥的水分均匀度。

参 考 文 献

- [1] KROKIDA M K, MAROULIS Z B, SARAVACOS G D. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 36(1): 53-59.
- [2] ZHENG X, LIU C, CHEN Z, et al. Effect of drying conditions on the texture and taste characteristics of rough rice [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(11): 1297-1305.
- [3] TANG J. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality [J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(8): 1776-1793.
- [4] ZHANG M, JIANG H, LIM R X. Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits and aquatic products—drying kinetics and quality considerations [J]. *Drying Technology*, 2010, 28(11): 1307-1316.
- [5] VADIVAMBAL R, TAYAS D S. Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—a review [J]. *Food and Bio-process Technology*, 2010, 13(6): 161-171.
- [6] 韩清华, 李树君, 马季威, 等. 微波真空干燥膨化苹果脆片的研究 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(8): 155-158.
HAN Qinghua, LI Shujun, MA Jiwei, et al. Microwave vacuum drying and puffing characteristics of apple chips [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(8): 155-158. (in Chinese)
- [7] 曹有福, 韩清华, 李树君, 等. 微波真空冷冻干燥装置设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 105-108.
CAO Youfu, HAN Qinghua, LI Shujun, et al. Design and experiment on microwave vacuum freeze drying equipment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 105-108. (in Chinese)
- [8] KOWALSKI S J, MIERZWA D. Hybrid drying of red bell pepper: energy and quality issues [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(10): 1195-1203.
- [9] 王海鸥, 胡志超, 屠康, 等. 微波施加方式对微波冷冻干燥均匀性的影响试验 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(5): 131-135, 170.
WANG Haiou, HU Zhichao, TU Kang, et al. Effects on microwave vacuum freeze drying uniformity contributed by microwave loading methods [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(5): 131-135, 170. (in Chinese)
- [10] DURANCE T D, WANG J H. Energy consumption, density and rehydration on rate of vacuum microwave and hot-air convection dehydrated tomatoes [J]. *Journal of Food Science*, 2002, 8(67): 2212-2216.
- [11] CUI Z W, XU S Y, SUN D W. Temperature changes during microwave-vacuum drying of sliced carrots [J]. *Drying Technology*, 2005, 10(23): 1057-1074.
- [12] 韩清华, 谢时军, 李树君, 等. 多热源热风微波流态化干燥试验台设计 [J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 210-214.
HAN Qinghua, XIE Shijun, LI Shujun, et al. Design of multiple-sources microwave combining with hot-air fluidized drying test device [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 210-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140235&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.035. (in Chinese)
- [13] DUAN X, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Studies on the microwave freeze drying technique and sterilization characteristics of cabbage [J]. *Drying Technology*, 2007, 10(25): 1725-1731.
- [14] FENG H, TANG J. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed [J]. *Journal of Food Science Food*, 1998, 63(4): 679-683.
- [15] FENG H, TANG J, CAVALIERI R. Combined microwave and spouted bed drying of diced apples: effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature [J]. *Drying Technology*, 1999, 17(10): 1981-1998.
- [16] 王绍林. 微波加热技术的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 9-18.
- [17] 韩清华, 李树君, 马季威, 等. 连续式微波真空干燥设备的研究 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(8): 136-139.
HAN Qinghua, LI Shujun, MA Jiwei, et al. Study on continuous microwave vacuum drying equipment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(8): 136-139. (in Chinese)
- [18] LI Z Y, WANG R F, KUDRA T. Uniformity issue in microwave drying [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(6): 652-660.
- [19] 李长欢, 孟彩茹, 姚运仕. 沥青搅拌设备振动筛振幅均匀性的仿真分析 [J]. *工程机械*, 2010, 41(11): 29-34.
- [20] 李冰, 尹青, 殷丽君, 等. 香菇热风微波流态化的干燥特性与机理分析 [J]. *中国食品学报* 2015, 15(5): 134-139.
LI Bing, YIN Qing, YIN Lijun, et al. Studies on characteristics and mechanism of hot air-microwave fluidized drying of lentin usedodes [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(5): 134-139. (in Chinese)

- on CNN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 160-165, 110. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170920&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.020. (in Chinese)
- [19] 何小飞, 邹峥嵘, 陶超, 等. 联合显著性和多层卷积神经网络的高分影像场景分类[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1073-1080.
HE Xiaofei, ZOU Zhengrong, TAO Chao, et al. Combined saliency with multi-convolutional neural network for high resolution remote sensing scene classification[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1073-1080. (in Chinese)
- [20] HE H, QIAN H, XIE L, et al. Applying CNN classifier to road interchange classification[C]//2018 26th International Conference on Geoinformatics. IEEE, 2018.
- [21] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2014, 39(4): 640-651.
- [22] 周云成, 许童羽, 郑伟, 等. 基于深度卷积神经网络的番茄主要器官分类识别方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 219-226.
ZHOU Yuncheng, XU Tongyu, ZHENG Wei, et al. Classification and recognition approaches of tomato main organs based on DCNN[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 219-226. (in Chinese)
- [23] PATHAK D, KRAHENBUHL P, DARRELL T. Constrained convolutional neural networks for weakly supervised segmentation[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE Computer Society, 2015.
- [24] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE Computer Society, 2014.
- [25] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKIONS I, et al. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected CRFs[J]. Computer Science, 2014(4): 357-361.
- [26] LIU M Y, ONCEL T, SRIKUMAR R, et al. Entropy-rate clustering: cluster analysis via maximizing a submodular function subject to a matroid constraint[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 36(1): 99-112.
- [27] 刘云鹏, 蔡文立, 洪国斌, 等. 应用图像块和全卷积神经网络的肩关节 MRI 自动分割[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(10): 1558-1570.
LIU Yunpeng, CAI Wenli, HONG Guobin, et al. Automatic segmentation of shoulder joint in MRI by using patch-wise and full-image fully convolutional networks[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(10): 1558-1570. (in Chinese)
- [28] 段凌凤, 熊雄, 刘谦, 等. 基于深度全卷积神经网络的大田稻穗分割[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 202-209.
DUAN Lingfeng, XIONG Xiong, LIU Qian, et al. Field rice panicles segmentation based on deep full convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 202-209. (in Chinese)
- [29] 张永宏, 夏广浩, 阚希, 等. 基于全卷积神经网络的多源高分辨率遥感道路提取[J]. 计算机应用, 2018, 38(7): 2070-2075.
ZHANG Yonghong, XIA Guanghao, KAN Xi, et al. Road extraction from multi-source high resolution remote sensing image based on fully convolutional neural network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(7): 2070-2075. (in Chinese)
- [30] BARRETTE J, AUGUST P, GOLET F. Accuracy assessment of wetland boundary delineation using aerial photography and digital orthophotography[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2000, 66(4): 409-416.

(上接第 351 页)

- [21] 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 276-281.
ZHANG Qian, XIAO Hongwei, YANG Xuhai, et al. Effects of pretreatment on air impingement drying characteristics and product color for line pepper[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 276-281. (in Chinese)
- [22] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 269-276.
ZHANG Weipeng, XIAO Hongwei, GAO Zhenjiang, et al. Improving quality of poria cocos using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 269-276. (in Chinese)
- [23] WANG Y C, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Study of drying uniformity in pulse-spouted microwave-vacuum drying of stem lettuce slices with regard to product quality[J]. Drying Technology, 2013, 31(1): 91-101.
- [24] FENG H, TANG J M, MATTINSON D S, et al. Microwave and spouted bed drying of frozen blueberries: the effect of drying and pretreatment methods on physical properties and retention of flavor volatiles[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1999, 23(6): 463-479.