doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.046

微波红外振动床协同干燥机设计与试验

宿佃斌[1]　曾诗雨[2]　吕为乔[2]　李　栋[2]　赵　丹[3]　赵东林[3]

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对农产品加工中微波干燥不均和红外干燥穿透能力有限等技术问题,研制了微波红外振动床协同干燥(MIVBD)设备。在结构设计上,通过 COMSOL 仿真分析谐振腔场强分布的均匀性,并优化了微波源馈波口布置。设备通过多孔面板将红外源与微波谐振腔隔离,在保证红外热量高效辐射的同时,确保微波、红外二者互不干扰。振动系统采用聚苯硫醚等谐振腔内部材料和钢结构外部材料制成,通过振动电机和橡胶弹簧带动物料振动。以高含水率生姜片为典型物料,对 MIVBD 设备的干燥效率、均匀性和色泽等相关品质进行试验研究,当物料温度超过上限温度时微波和红外停止工作,结果发现,微波红外振动干燥比微波红外干燥时间缩短了 14.29%,微波红外振动干燥时温度不均匀系数最小(2.28%),并且微波红外振动干燥显著降低了干燥能耗,改善了相关品质。

关键词: 微波; 红外; 振动床; 干燥; 生姜

中图分类号: S226.6; TQ028.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0423-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Microwave Infrared Vibrating-bed Dryer

SU Dianbin[1]　ZENG Shiyu[2]　LÜ Weiqiao[2]　LI Dong[2]　ZHAO Dan[3]　ZHAO Donglin[3]

(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255000, *China*
2. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of uneven drying during microwave drying and limited penetration during infrared drying for agricultural products, a microwave infrared vibrating-bed dryer (MIVBD) was developed. In the structure design, the uniformity of the microwave distribution in the resonator was analyzed by COMSOL, and the arrangement of the microwave source was optimized. The infrared source was isolated from the microwave resonator through the porous panel, which ensured the high efficiency of infrared heat radiation and the non-interference of microwave and infrared. The vibration system was made from polyphenylene sulfide (PPS) and other materials inside the resonant cavity, steel structure materials outside the resonant cavity, and agricultural products vibrate through vibration motor and rubber spring. Fresh ginger slices were selected as experimental materials. The drying efficiency, uniformity, and color of MIVBD were studied. When the material temperature exceeded 60℃, microwave and infrared stopped working. The results showed that the drying efficiency of MIVBD was improved by 14.29%. Infrared radiation and vibration can significantly improve the uniformity of material surface temperature distribution. The temperature uniformity of MIVBD was the best, and its temperature non-uniformity coefficient was 2.28%. The MIVBD significantly reduced the drying energy consumption and improved the related quality. The research result can provide theoretical basis and technical support for the application of microwave and infrared radiation in fruit and vegetable drying.

Key words: microwave; infrared; vibration bed; drying; ginger

收稿日期: 2021-09-03　修回日期: 2021-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901823)和中国农业大学基本科研业务费专项资金项目(2021TC041)

作者简介: 宿佃斌(1991—),男,讲师,博士,主要从事农产品干燥技术与装备研究,E-mail: sdb@sdut.edu.cn

0 引言

电磁波在特定的波段下,能刺激水分子等极性小分子、基团高频振荡,进而形成热效应,例如太阳能干燥、红外干燥、微波干燥、射频干燥等[1-5]。其中,微波干燥和红外干燥的能量较为集中,被大量应用在果蔬物料的加工中[6-7]。

微波干燥中物料被整体加热,具有精准高效和功率灵敏易控制等优点,被广泛应用在果蔬等干燥领域[8-12]。然而,基于干燥过程中物料内部生物组织结构、分割形态、叠放位置、微波场强分布和穿透深度等因素的差异,干燥不均是果蔬物料微波干燥的主要问题[13-14]。

相对于微波干燥,红外干燥在处理体积大、物料层较厚的块状果蔬物料上,穿透力不足,更多的热量依赖由外向内的能量传导[15-20]。

将振动的床体引入微波干燥设备,并通过电磁阀和可编程逻辑控制器(Programmable logic controller,PLC)控制振动的频率和强度,可有效避免物料冷点、热点的极限温度出现[21]。文献[14]通过HFSS 软件模拟仿真并优化设计,较早地研制了多馈源微波热风振动床干燥机。文献[21]以苦瓜为原料,跟踪了大量工艺试验,并从振动方式、送风系统等方面进行优化创新,研制了第二代微波热风振动床干燥机。二代机中,近乎 100% 的热风将通过物料层,有效提高了热风的能效,但物料表层的干燥均匀性仍有待提高。将红外发生器引入微波干燥设备,可以提高物料表层的受热均匀性,加快物料表层水汽的蒸发,促进微波均匀干燥,但目前,尚未有微波红外协同干燥的研究报道[22-23]。微波、红外和振动三者协同,研制微波红外振动床协同干燥(Microwave infrared vibrating-bed drying,MIVBD)设备,将有效改善微波干燥的传热传质效果,对提升果蔬干燥品质具有重要意义。

本文研究微波红外振动床协同干燥机。采用 2 支磁控微波管独立馈入微波能,4 支碳纤维中远波红外石英电热管提供红外辐射能,振动装置使物料处于流化状态,以保证物料干燥的均匀性,并利用该设备进行新鲜姜片干燥试验验证。

1 总体设计与工作原理

1.1 结构

为改善微波干燥农产品物料的均匀性,提高干燥效率和干燥品质,开发并试制了 MIVBD 设备,设备的结构如图 1 所示。整机由微波系统、红外系统、振动系统、排风系统、控制系统等主要工作系统组成。微波源采取 2 450 MHz 常见频率的磁控管,红外源采用以 2.5 ~25 μm 波段为主的中远波红外加热管。微波和红外作为农产品干燥的能量来源,协同布置于谐振腔的两侧和顶部。物料温度由预留的红外温度传感器采集,并通过 PLC 实时控制微波源、红外源的工作强度。设备外部设有保温层,确保红外辐射能源的高效利用。图 2 为整机和各工作系统的实物图。

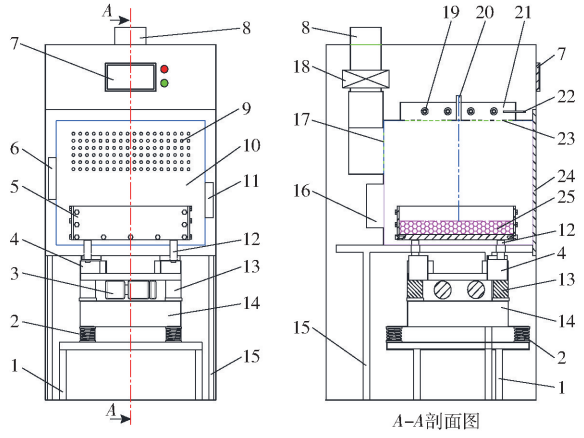


图 1 MIVBD 设备结构原理图

Fig. 1 Schematic of MIVBD structure

1. 振动床底座 2. 减振弹簧 3. 振动电机 4. 助振柔性折弯片 5. 物料托盘 6、11. 微波源 7. 显示屏 8. 排风管 9. 排湿孔 10. 谐振腔 12. 振动连接杆 13. 减振橡胶弹簧 14. 柔性减振箱体 15. 谐振腔支撑架 16. 控制系统 17. 排湿装置 18. 引风机 19. 红外加热管 20. 红外温度传感器 21. 红外加热仓 22. 红外仓温度传感器 23. 红外仓微波屏蔽装置 24. 谐振腔门 25. 物料

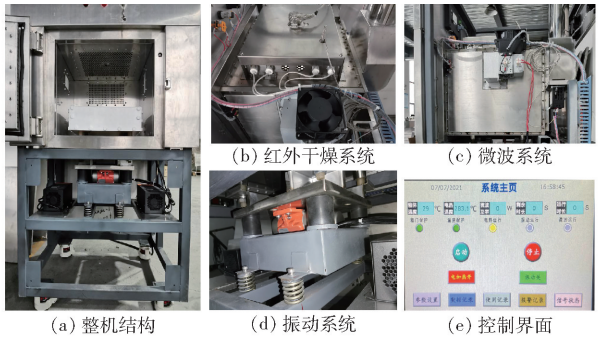


图 2 MIVBD 整机和各工作系统实物图

Fig. 2 Diagrams of MIVBD and its main working systems

1.2 工作原理

1.2.1 MIVBD 干燥原理

微波、红外与振动的床体组合干燥,能充分利用单纯微波干燥精准高效的优势,协同改进微波干燥的品质,其原理如图 3 所示。微波能以电磁辐射形式进入湿物料,由内到外产生大量水蒸气,从而形成有效的气压差,驱动水分以气体的形态向表面迁移,物料的传热方向、蒸汽迁移方向和温度梯度方向一

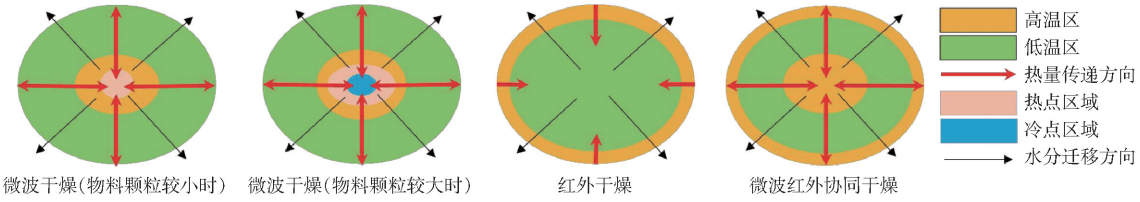


图 3　微波红外振动床协同干燥在干燥块状果蔬物料时的传热优势

Fig. 3　Heat transfer advantages of MIVBD in drying of bulk agricultural products

致,形成了微波组合干燥的优势。同时受多种因素的影响,微波能在传输过程中会逐渐衰减,若把被干燥的物料体系看成一个整体,微波的穿透行为将会对干燥过程产生显著的影响。但在物料堆放体积较小时,物料中心部位热量不易及时散出,不断积聚的热量导致物料中心部位温度较高,容易发生局部过热,形成温度的热点。在物料堆放体积较大时,物料中心部位超出了微波的渗透深度,微波能量在物料中心部位已经发生显著衰减,容易发生局部能量吸收不足,形成温度的冷点。

研制的新型 MIVBD 设备将振动的床体引入微波干燥设备,并通过变频器和 PLC 控制振动的频率和强度,可有效避免物料冷点、热点的极限温度出现。单纯的红外干燥难以穿透较厚的物料体系。将红外发生器引入微波干燥设备,并配合微波系统交替工作,可使物料内部在高强度的微波干燥中得到一定时间的缓苏,同时加快物料表层水蒸气的蒸发。在 MIVBD 设备中,微波、红外和振动三者协同有利于提升果蔬微波干燥品质。

1.2.2　MIVBD 设备运行原理

在 MIVBD 设备整机工作时,首先将待干燥果蔬物料铺满物料盘,物料温度由红外传感器在线监控。随后,微波、红外源以及振动系统同时工作,微波功率连续可调,红外源功率和启停时间连续可调,振动床工作启停时间连续可调。

基于微波的能量馈入精准易控,但红外能量馈入有一定的延迟性,设备设定物料温度上限、中限和下限。当监测到的物料温度低于温度下限时,微波红外同时工作;介于温度下限和中限时,红外源断开,微波以固有功率单独工作;介于温度中限和上限时,红外源断开,微波以低功率单独工作;高于温度上限时,微波红外全部停止工作。物料的振动和静止时间可根据物料的干燥状态实时调整。

1.3　主要技术指标

试验搭建的 MIVBD 设备集微波、红外和振动床功能为一体,主要用来干燥各种果蔬等农产品物料,特别是中高含水率农产品物料。设备装机功率 4 kW,物料装载量为 100 ~ 5 000 g,外形尺寸为 440 mm × 440 mm × 350 mm,微波谐振腔尺寸为 650 mm × 500 mm × 500 mm,物料盘尺寸为 440 mm × 440 mm × 350 mm,微波功率为 2 000 W,红外功率为2 000 W,振动电机功率为 30 W × 2,物料盘开孔率为 5%,测温范围为 0 ~ 300℃,微波泄漏量低于 1 mW/cm^2。

2　关键部件设计

2.1　微波谐振腔设计

谐振腔是微波系统的重要组成部分,在谐振腔内物料吸收微波能并将其转化为热能,物料温度升高促进自身水分扩散。如图 4(图中 a、b、d 分别表示谐振腔在 x、y、z 方向的长、宽、高)所示,谐振腔体上集成了微波源、排湿孔、红外温度传感器和红外仓微波屏蔽装置等重要部件,其形状尺寸对内部微波场的分布、振动装置的安装和排湿装置的工作状态具有较大的影响。按照谐振腔结构特点其主要可以分为矩形、圆柱形和同轴线控谐振腔等。在实际工业生产中矩形谐振腔具有多谐性,制造加工、安装等相对简单,且介电损耗较低等特点,应用较为广泛。同时,为方便本设备中振动系统、物料盘和微波源的安装,减小加工制造难度,设备选择多模矩形谐振腔。

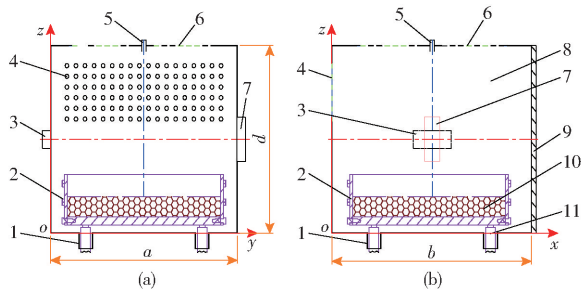


图 4　谐振腔结构示意图

Fig. 4　Schematic of resonator structure

1. 微波屏蔽套筒　2. 物料托盘　3、7. 微波源　4. 排湿孔　5. 红外温度传感器　6. 红外仓微波屏蔽装置　8. 谐振腔　9. 谐振腔门　10. 物料　11. 振动连接杆

谐振腔内的微波分布会因物料加载量、摆放位置和介电属性等因素发生改变[21],加之谐振腔内振荡模式及场强分布的复杂性,在实际尺寸计算过程中需要利用等效电路的相关理论通过测量得到该值,一般情况下首先要计算微波源的工作频率,然后

根据谐振频谱分布和谐振腔中场强分布均匀性确定谐振腔的结构参数。工作频率为 2 450 MHz 的磁控管技术较为成熟,且在微波加热设备中应用较为广泛[24]。基于此,本设备设计中选择 OM75P - 11 - ESDYF 型磁控管(SAMAUNG 公司,韩国)为微波源,额定输入电压 220 V,输出电压 2 500 V,额定功率 1 000 W。

图 4 所示的矩形谐振腔,在设计时常用近似计算公式对谐振腔工作模式所对应的谐振频率进行计算,即

$$f_0 - \Delta f \leqslant \frac{M_S c}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p_1}{d}\right)^2} \leqslant f_0 + \Delta f \tag{1}$$

其中

$$M_S = 1 + \frac{1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta}}{2\varepsilon_r(1 + \tan^2\delta) - 1}\frac{V_1}{V_r} \tag{2}$$

式中 f_0——谐振频率,Hz

Δf——工作频率附近频率宽度,取 50 MHz

M_S——修正系数

c——光速,m/s

m、n、p_1——矩形谐振腔中振荡模式在 x、y、z 方向的半驻波数目

ε_r——填充介质介电常数

δ——填充介质介电损耗正切角

V_1——谐振腔体积,m^3

V_r——填充介质体积,m^3

在设计过程中可以对符合设计条件的任意 a、b 和 d 组合进行验证,从计算结果中挑选工作模式多并且频率间隔较为均匀的组合,并通过修正系数计算公式进行结果修正,以改善微波场强在谐振腔内分布的均匀性。

品质因数 Q_0 表征谐振腔损耗,是品质指标,为了提高微波场分布的均匀性和减少能量损耗,一般需尽量提高谐振腔的品质因数,其计算公式为

$$Q_0 = \frac{V_1}{\delta' S} \tag{3}$$

其中

$$\delta' = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \tag{4}$$

式中 δ'——内壁集肤效应系数,m

S——谐振腔内部表面积,m^2

σ——电导率,H/m

f——微波频率,Hz

μ——磁导率,S/m

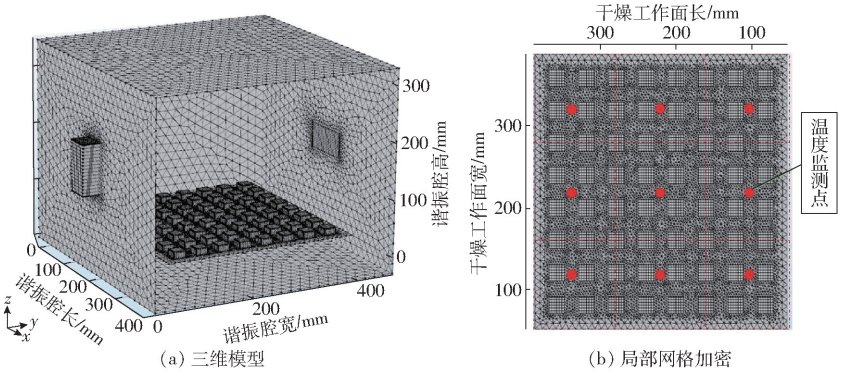
由式(3)可知,V_1/S 越大,Q_0 越大,但谐振腔体积过大会降低电场强度,影响加热效率,因此 Q_0 也不宜过大。一般情况下[25-26],当微波源中心频率为 2 450 MHz 时,谐振腔具有 5 个以上间隔大于 10 MHz 的模式频谱宽度,Q_0 不大于 1 000。通过分析市面上常用的微波谐振腔尺寸参数,并且参照最大单批次处理量、物料盘尺寸参数和安装需求等相关因素,当谐振腔的尺寸为 440 mm × 440 mm × 350 mm 时,谐振腔的品质因数为 932,符合设计要求。

2.2 不同馈波口位置微波场模拟分析与优化设计

谐振腔内的微波能量分布与内部微波场强的分布相关,微波场强在谐振腔内分布不均会使被干燥物料微波能吸收不均,造成被干燥物料局部温度过高(即“干燥热失控”)或者过低,这对物料加热均匀性的提高和干燥品质的调控造成了很大的阻碍[27]。研究显示,微波干燥的不均匀性仍然是目前微波干燥装备设计制造过程中亟需解决的问题[28]。基于此,本文基于多物理场耦合技术对谐振腔中微波源的相对位置和物料工作面的高度进行了优化设计。

2.2.1 三维模型构建与网格划分

利用 COMSOL 软件自带的几何模块对微波红外振动床干燥设备的谐振腔部分进行了三维模型重构。谐振腔的尺寸为 440 mm × 440 mm × 350 mm;选择 BJ - 26 型矩形波导作为微波的馈入端,两个波导分别布置于谐振腔左右两侧。为了充分考虑谐振腔内物料对微波场分布的影响,建模时将物料颗粒置于振动床干燥工作面上,仿真时设置干燥工作面的初始高度为 60 mm,如图 5 所示。



(a) 三维模型 (b) 局部网格加密

图 5 三维模型构建与网格划分

Fig. 5 3D model construction and mesh generation

物料为边长 20 mm 立方体，均匀地排布于工作平面上，共计 64 个（8 行 ×8 列）。仿真时考虑物料介电参数随温度变化，将物料块介电参数设置为

$$\begin{cases}\varepsilon' = 2\times10^{-5}T^3 - 0.0017T^2 - 0.1346T + \\ \quad 67.2401 \quad (R^2 = 0.9994) \\ \varepsilon'' = -2\times10^{-7}T^4 + 3\times10^{-5}T^3 - 0.0001T^2 - \\ \quad 0.0852T + 16.5171 \quad (R^2 = 0.9975)\end{cases} \tag{5}$$

式中　ε'——介电常数　　ε''——损耗因子

T——温度，取 20 ~ 100℃

网格划分尺寸对仿真结果的准确性具有重要的影响[29]，前期仿真综合研究了网格划分参数与模型收敛之间的耦合关系。基于此，使用 COMSOL 软件自带的网格模块对模型进行了网格划分，并且对物料干燥工作面、物料颗粒和微波源进行了网格加密。最后生成网格顶点数为 141 508，单元数为 714 485，平均单元质量为 0.660 1。

2.2.2　仿真控制方程及边界条件

仿真中假设：生姜是各向同性的物质，初始温度和含水率是相同的；湿空气是不可压缩的；仿真环境中存在热平衡。宏观层面上针对电磁问题的分析中，所有的分析都归结于求解具有一定边界条件的麦克斯韦方程组，一般情况下在仿真计算过程中习惯将麦克斯韦方程组写成微分形式。

微波在实际生产中，微波的传输与作用效果会受到谐振腔和波导的材料属性等的影响，因此微波能量在应用过程中存在一定的损耗，经过计算可得到微波能量损失表达式为

$$-\int_{V_2}\left(\boldsymbol{E}\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} + \boldsymbol{H}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\right)\mathrm{d}V_2 = \int_{V_2}\boldsymbol{J}\boldsymbol{E}\mathrm{d}V_2 + \oint_{S_1}(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})\boldsymbol{n}\mathrm{d}S_1 \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{E}$——电场强度，V/m

$\boldsymbol{D}$——电位移或电通量密度，C/m^2

$\boldsymbol{H}$——磁场强度，A/m

$\boldsymbol{B}$——磁通量密度，H/m

$\boldsymbol{J}$——电流密度，A/m^2

$\boldsymbol{n}$——对称面法向矢量

V_2——计算域

S_1——计算域 V_2 闭合边界

在仿真过程中还考虑了果蔬物料颗粒内部的传热，增加了固体传热模块，其方程可表示为

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p\boldsymbol{u}\nabla T + \nabla\cdot\boldsymbol{q} = Q \tag{7}$$

其中

$$\boldsymbol{q} = -k_2\nabla T \tag{8}$$

式中　ρ——被加热物料密度，kg/m^3

C_p——固体恒压热容，J/(kg·K)

k_2——固体热导率，W/(m·K)

$\boldsymbol{u}$——当模型的部分在材料框架中移动时由平移运动子节点定义的速度场，m/s

Q——媒质吸收能量，J/kg

$\partial T/\partial t$——媒质加热速率，K/s

在材料属性设置中将谐振腔、出风口的材料属性设置为不锈钢，在软件默认的理想边界条件下进行微波分布与固体传热仿真。在理想情况下，边界条件需要满足

$$\begin{cases}\boldsymbol{n}_2\times(\boldsymbol{E}_1 - \boldsymbol{E}_2) = \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{n}_2\times(\boldsymbol{H}_1 - \boldsymbol{H}_2) = \boldsymbol{O}\end{cases} \tag{9}$$

式中　$\boldsymbol{n}_2$——介质法向矢量

$\boldsymbol{E}_1$、$\boldsymbol{E}_2$——理想状态、有介质时电场强度，V/m

$\boldsymbol{H}_1$、$\boldsymbol{H}_2$——理想状态、有介质时磁场强度，A/m

$\boldsymbol{O}$——零向量

即在理想状态下，理想边界表达式为

$$\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{E} = \boldsymbol{O} \tag{10}$$

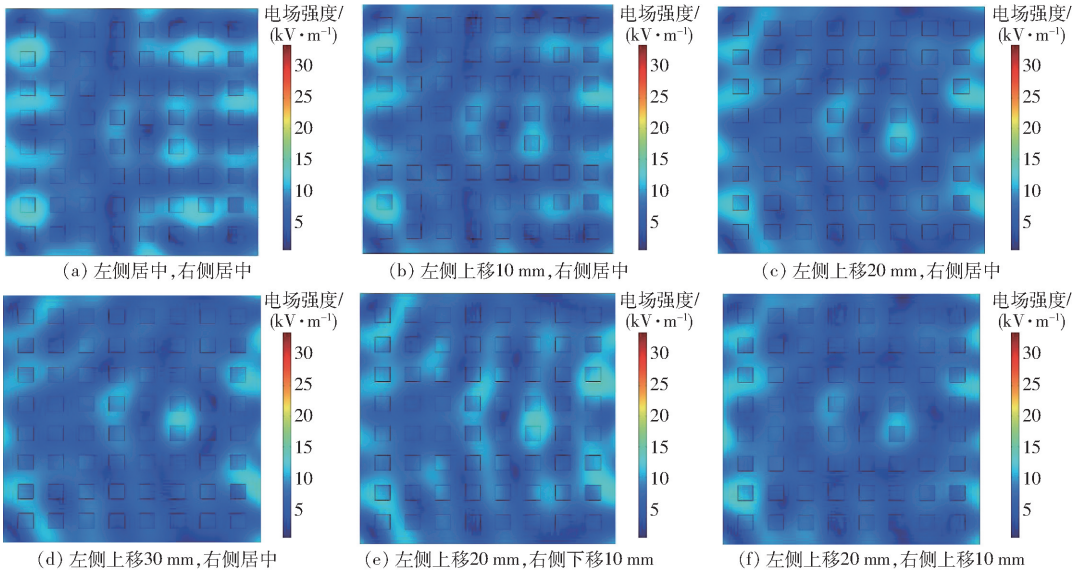
式(10)表示特殊情况下的一种边界条件，使电场的切向分量为零，已有研究表明边界条件为理想边界条件时，仿真结果与实际情况相差不大[30]。

2.2.3　优化结果分析

干燥工作面电场强度云图能直接反映微波在此表面的电场强度，因此研究干燥工作面的电场强度对提升物料的微波加热均匀性具有重要意义。如图 4b所示，微波源的起始位置位于谐振腔左右两侧的中心位置，此时谐振腔微波分布极为不均匀，在干燥工作面（高度为 60 mm）两侧有很多热点，中部有很多冷点。目前，在微波干燥过程中主要是通过改变微波源在谐振腔中的排布位置、调整工作面高度、调整被干燥物料的相对位置以及辅助其他干燥工艺来提高物料的干燥均匀性[31-32]。因此，对微波源的排布位置进行了调整，仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知，谐振腔左右两侧微波源的高度对干燥工作面的微波场分布具有明显的影响，分析发现，当左侧微波源上移 20 mm，右侧微波源居中时，干燥工作面没有明显的冷点和热点区域，微波分布较为均匀。此时，谐振腔 xz 面的微波场分布如图 7a 所示，可见在该切面上电场分布也存在不均匀的现象，在沿 z 轴方向上仍然存在热点和冷点区域交替的现象。因此需要对干燥工作面的高度进行调整，进一步提高干燥工作面的微波场分布均匀性。

当干燥作业面处于不同高度时，工作表面微波场分布如图 7b ~ 7d 所示。当干燥工作面高度为 80 mm 时，热点区域基本消失，但是干燥工作面出现了面积较小的冷点区域，但随着干燥工作面高度的

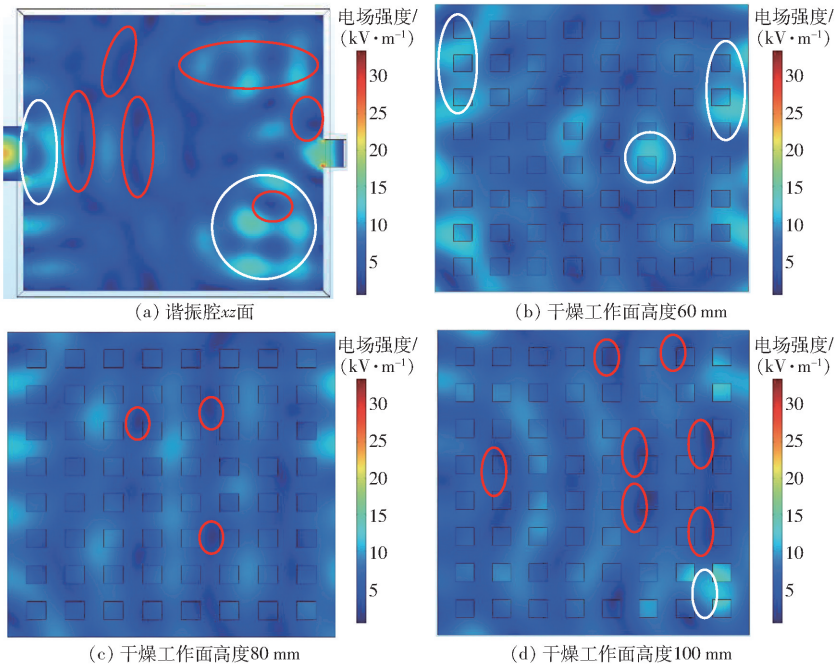


(a) 左侧居中,右侧居中 (b) 左侧上移10 mm,右侧居中 (c) 左侧上移20 mm,右侧居中

(d) 左侧上移30 mm,右侧居中 (e) 左侧上移20 mm,右侧下移10 mm (f) 左侧上移20 mm,右侧上移10 mm

图 6 不同微波源位置时物料干燥工作面(高度为 60 mm 时)微波场分布云图

Fig. 6 Microwave field distributions of material drying working face (at height of 60 mm) with different microwave source positions



(a) 谐振腔*xz*面 (b) 干燥工作面高度60 mm

(c) 干燥工作面高度80 mm (d) 干燥工作面高度100 mm

图 7 不同干燥作业面高度时其表面微波场分布

Fig. 7 Distributions of microwave field on surface of different drying heights

进一步升高,冷点区域面积明显增大,并且也出现了电场强度较大的热点区域。基于上述研究确定 MIVBD 设备左侧微波源位于以中心位置上移 10 mm,右侧微波源居中布置,干燥工作面高度为 80 mm。

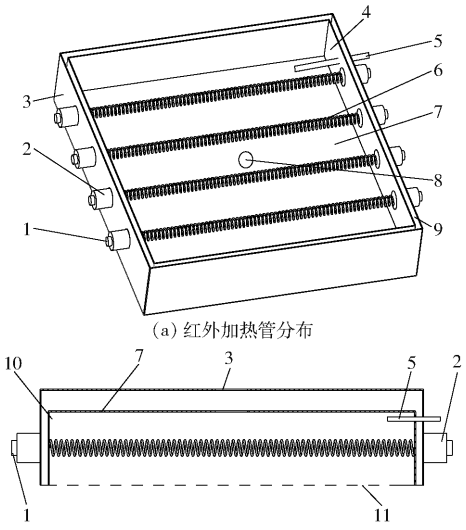
2.3 红外装置设计

红外部分选取碳纤维中远波红外石英电热管,额定电压 220 V,额定功率为 2 000 W(500 W/支×4 支),均衡布置在谐振腔顶部,红外仓体下部为不锈钢多孔面板结构,开孔率 80% 以上,在防止微波对红外系统发生影响的同时,提高红外辐射的效率。红外仓体的四周和顶部面板均设有隔热层,减少能量耗散,结构如图 8 所示。在农产品 MIVBD 过程中,通过温度传感器实时监测红外加热仓内部的温度,当达到红外加热管的安全温度上限(500℃)时,红外加热管在 PLC 控制下间歇式工作,并且红外加热管工作时间可通过 PLC 连续控制,确保对不同物料不同干燥阶段馈入合理的能量。

2.4 振动装置设计

2.4.1 结构设计

振动床装置包括物料盘、振动电机、橡胶弹簧和振动连接杆等,如图 9a 所示。在微波干燥中,谐振腔内的零部件使用聚四氟乙烯(Poly tetra fluoroethylene,PTFE)制作,MIVBD 设备的物料盘和



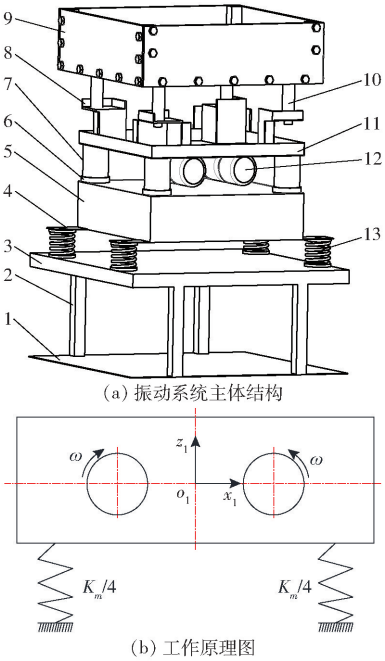
(a) 红外加热管分布

(b) 侧视图

图 8　红外加热系统结构示意图

Fig. 8　Structure diagrams of infrared heating system

1. 红外加热管接线柱　2. 绝缘端子　3. 红外加热仓外壁　4. 陶瓷绝缘板　5. 温度传感器　6. 红外加热管　7. 红外反射板　8. 红外温度传感器安装口　9. 隔热层　10. 红外加热仓　11. 微波屏蔽装置



(a) 振动系统主体结构

(b) 工作原理图

图 9　振动系统结构和工作原理图

Fig. 9　Structure and working principle diagrams of vibration system

1. 振动架固定底板　2. 振动床底部机架　3. 减振底座　4. 减振弹簧连接件　5. 柔性减振箱体　6. 减振橡胶弹簧底部钢垫　7. 减振橡胶弹簧　8. 助振柔性折弯片　9. 物料托盘　10. 振动连接杆　11. 助振柔性盘　12. 振动电机　13. 减振弹簧

振动连接杆使用聚苯硫醚(Polyphenylene sulfide, PPS)制作。物料盘置于微波谐振腔内,柔性助振机构和减振机构置于谐振腔外。振动电机与助振柔性盘通过螺栓固联,且在助振柔性盘上对称布置;助振柔性盘与助振柔性折弯片焊接成一体。振动连接杆通过螺栓与物料盘和助振柔性折弯片连接,可以通过调整螺栓位置对物料盘的高度进行调控。振动电机产生的振动传递到助振柔性盘和助振柔性折弯片后,经振动连接杆传递至物料盘,物料盘中的物料在双振动电机的激励下按照一定的规律混合运动,从而实现物料的充分混合,并且可以通过变频器调整振动电机的转速,以适应不同物料的混合需求。橡胶弹簧噪声小,在共振区时振幅更小,结构稳定性更好,且易于设计,因此设备选择橡胶弹簧来连接机架和振动装置,起到减振作用,保证设备的正常运行。

2.4.2　振动装置原理分析及关键部件选型

振动装置工作原理如图 9b 所示,振动装置的激振力由振动电机提供。为了控制物料盘只在竖直(z_1轴)方向振动,两个振动电机在 x_1 轴上相对于 z_1 轴对称布置,在水平方向上关于 x_1 轴对称安装,通过 PLC 控制两个振动电机同步反向转动,此时,两个振动电机在 x_1 轴方向产生的惯性力相互抵消[33],在 z_1 轴方向产生的惯性力相互叠加。振动电机中偏心块在电机的带动下匀速旋转,z_1 轴方向的惯性力在偏心块的带动下产生周期性变化,从而实现物料盘带动物料在竖直方向实现周期性的运动,物料群在上下运动过程中相互碰撞、挤压导致相对位置变化,从而实现了物料的流化状态。

对振动装置的总参振体进行受力分析,发现总参振体受到振动电机提供的激振力 F 和橡胶弹簧提供的恢复力 $\sum K_m z$,总参振体激振力方程为

$$F = M\frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}^2 t} + \sum K_m z \tag{11}$$

式中　M——总参振质量,kg

z——竖直方向位移,m

$\sum K_m$——橡胶弹簧提供的总刚度,N/m

由式(11)可得振动装置的激振力为

$$F = r\left(\left\| \sum K_m - M\omega^2 \right)\right. \tag{12}$$

式中　r——振动装置振幅,取 0.002 m

ω——振动频率,取 100.48 rad/s

当振动装置处于静止时,振动装置引起的橡胶弹簧的变形量应稍大于振动装置处于振动状态时的振幅(λ = 0.005 m),则单个橡胶弹簧刚度 K_m 为

$$K_m = \frac{Mg}{4\lambda} = \frac{25\times 9.8}{4\times 0.005} = 12\,250\ \mathrm{N/m} \tag{13}$$

系统固有频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4K_m}{M}} = 44.27\ \mathrm{rad/s} \tag{14}$$

通常情况下振动装置总体振动频率大于共振状态的频率时整个振动系统才能稳定工作,即频率比 ω/ω_0 一般取 2 ~ 6.5[33],该振动装置的频率比为 2.27,振动系统可以稳定运行,据此选择欣佳宏牌 TO-0.1A 型振动电机(激振力为 280 N/m)和鑫鼎诚牌 $\Phi80\times\Phi110\times\Phi40$ 型橡胶弹簧(弹簧刚度为 12 250 N/m),两台振动电机总激振力为 560 N/m(大于 406.8 N/m),均满足设计要求。

2.5 控制系统设计

2.5.1 总体设计

控制系统是 MIVBD 设备的核心装置之一,负责设备工作状态监测、振动床体驱动、微波和红外加热功率控制、引风机开关、内部关键参数显示和干燥参数设置等,实现果蔬干燥环境和干燥参数始终有序可控,保证 MIVBD 过程操作的稳定性和高效性。

设备选择 DVP30EX200R 型 PLC 作为控制器;并且,控制系统可以通过上位机(触控屏)实时显示干燥过程中各部件的工作状态和物料温度。操作时主要通过触控屏对物料温度、红外温度、微波功率等进行设定,干燥过程中的红外温度、物料温度等信息通过信号采集模块传递给中央控制器,然后由中央控制器根据设定的程序对振动电机变频器、红外加热模块、微波模块和排引风机的工作状态进行调控,控制系统流程如图 10 所示。

2.5.2 温度负反馈调控单元设计

物料温度作为重要的干燥参数,对物料干燥效率、干燥品质等具有重要影响,在干燥过程中需要对其进行实时监控和调控。为此,MIVBD 设备控制系统中内置了加热装置-物料温度负反馈调控单元,如图 10 所示。

干燥开始后,红外温度传感器将持续检测物料温度,并将物料温度传送至控制系统,控制系统将根据干燥温度对微波功率和红外加热功率进行动态调控。首先,微波和红外加热管将以设定功率对物料进行加热,随着干燥过程推进物料温度逐渐升高,当物料温度升高至 T_1 时,为了防止物料温度发生非可控飙升,微波功率将减小至初始功率的 70%,红外加热管停止工作;当物料温度升高至 T_2 时,微波功率将减小至初始功率的 40%;当物料温度升高至 T_3 时,微波源停止工作;微波源和红外加热管停止运行后,物料温度会逐渐降低,当红外温度传感器检测到物料温度低于 T_3 和 T_2 时,微波源将分别以设定功率的 40% 和 70% 进行工作;当物料温度降至 T_1 后,微波源和红外加热管将按照设置功率进行工作。由于红外加热具有一定的滞后性,且当物料温度低于 T_1 时,若红外加热管保持工作状态,极易产生红外加热管自身温度的非可控飙升;为此,控制红外加热管为"每隔 t_1 工作 t_2"间歇式工作状态,且在红外加热装置中设计了红外仓温度传感器,当红外加热仓温度大于 500℃时,红外加热管停止工作。加热装置-物料温度负反馈调控单元在整个干燥作业中保持工作状态,直至干燥结束。

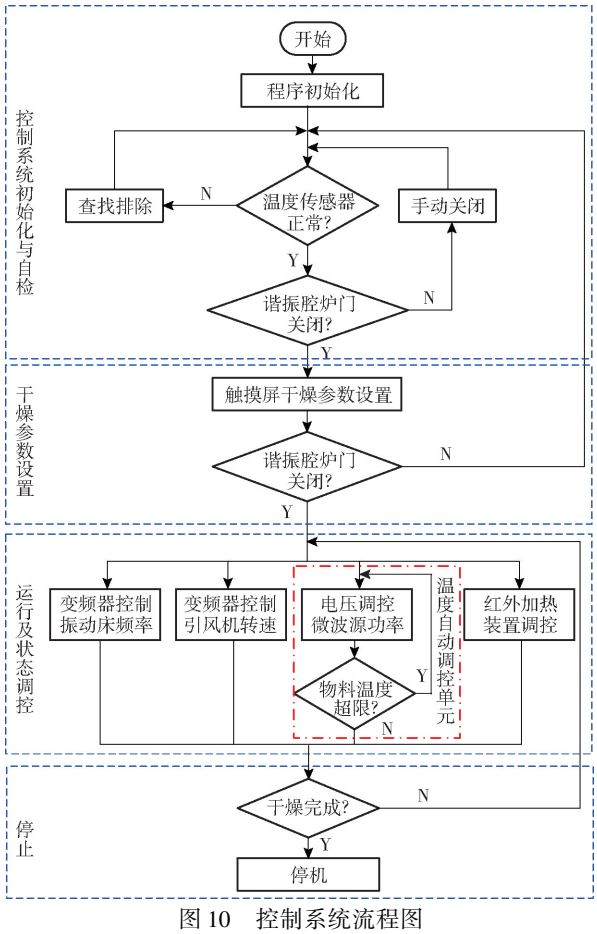


图 10 控制系统流程图

Fig. 10 Flow chart of control system

3 试验

3.1 试验材料

试验选取高含水率的生姜作为试验原料,对 MIVBD 设备的干燥性能进行试验验证。所选材料购于本地超市,为同一品种和批次,含水率 92.05%。将物料用固定的切分模具切成 5 mm 厚薄片,置于 4℃冰箱待用。

3.2 试验方法

在 MIVBD 试验中,每批次将 1.5 kg 姜片加入物料盘中,设定物料温度上限 65℃、中限 63℃和下限 60℃,微波上限功率为 1.5 W/g,红外功率为 1.0 kW。当温度传感器监测到的姜片温度低于温度下限 60℃时,微波红外同时工作;当监测到的物料温度介于下限 60℃和中限 63℃时,红外源断开,微

波以上限功率单独工作；介于温度中限 63℃和上限 65℃时，红外源断开，微波以低功率单独工作；当监测到的物料温度高于上限温度 65℃时，微波红外全部停止工作。MIVBD 前开启红外加热将谐振腔预热至 60℃。干燥过程中开启振动时，振动床的静止和工作时间设为 300 s 和 30 s，并可根据干燥状态调整。干燥过程中保持引风机开启，以及时排出谐振腔中的水蒸气。结合 MIVBD 设备特点和上述总体参数确定试验方案如表 1 所示。

表 1　试验方案和参数设置

Tab. 1　Experimental scheme and parameter setting

干燥工艺	参数设置		
	微波功率/(W·g^{-1})	红外功率/kW	振动频率/Hz
微波振动干燥	1.5	0	10
红外振动干燥	0	1.0	10
微波红外干燥	1.5	1.0	0
微波红外振动干燥	1.5	1.0	10

3.2.1　干燥动力学

在干燥过程中每隔一定时间称量生姜质量，并对干基含水率、水分比和干燥速率进行计算分析。

3.2.2　干燥均匀性

干燥过程中将谐振腔炉门打开，利用 Ti55FFT 型红外热像仪（福禄克仪器有限公司，美国）快速获得物料盘中样品的热像图，使用红外热像仪自带的分析软件 Smart View 4.3 对热像图进行数据分析。如图 5b 所示，将物料托盘底部均匀分成 9 个网格，并取每个网格的中心作为温度监测点，在热像图中对 9 个温度监测点的温度进行取值，温度不均匀系数计算公式为

$$T_u = \frac{\sigma_T}{\overline{T}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\dfrac{\sum (T_i - \overline{T})^2}{n}}}{\overline{T}} \times 100\% \tag{15}$$

式中　σ_T——监测点温度均方根偏差

$\overline{T}$——监测点温度平均值

T_i——监测点温度，℃

n——监测点数目

3.2.3　色泽测试

使用色差仪测定生姜样品的颜色，总色差计算公式为

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \tag{16}$$

式中　L^*、a^*、b^*——生姜干品亮度指数、红色指数、黄色指数

L_0^*、a_0^*、b_0^*——生姜新鲜样品亮度指数、红色指数、黄色指数[34]

3.2.4　能耗计量

干燥过程中使用 DTS4921 型电能表（浙江鼎硕电气有限公司）计量设备的总能耗。

3.2.5　数据分析方法

所有试验重复 3 次，使用 Origin 数据绘图分析软件对试验数据进行处理和绘图。使用 SPSS 20.0 进行 Duncan 检验（$P < 0.05$，差异显著）等统计学分析。

3.3　结果分析

3.3.1　干燥特性

按照表 1 所示的干燥方案和参数对新鲜的姜片进行干燥，得到了 4 种不同干燥工艺下干基含水率随干燥时间的变化曲线，如图 11 所示。

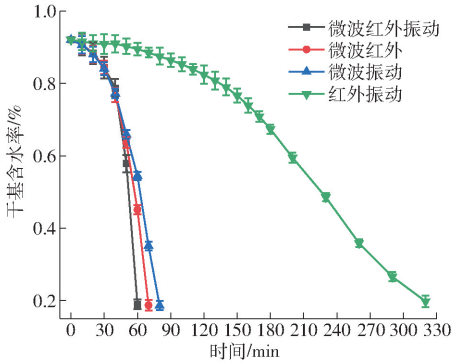


图 11　姜片干基含水率随干燥时间变化曲线

Fig. 11　Variation curves of moisture content of dry basis of ginger slices with drying time

红外振动干燥和微波振动干燥分别用时（320 ± 5）min和（80 ± 1.5）min，微波红外干燥和微波红外振动干燥分别用时（70 ± 1.3）min 和（60 ± 1.2）min；微波振动干燥比红外振动干燥时间缩短了 75%，微波红外振动干燥比微波红外干燥时间缩短了 14.29%，微波和红外联合提高了物料的干燥效率，并且振动对干燥效率的提高具有显著影响。

该设备干燥过程中的总能耗如表 2 所示，与红外干燥和微波振动干燥相比，微波红外振动干燥显著降低了干燥能耗。微波红外干燥和微波红外振动干燥的能耗没有显著性差异，但由 T_u 的变化可知，增加振动之后显著提升了物料的温度分布均匀性。

3.3.2　干燥均匀性分析

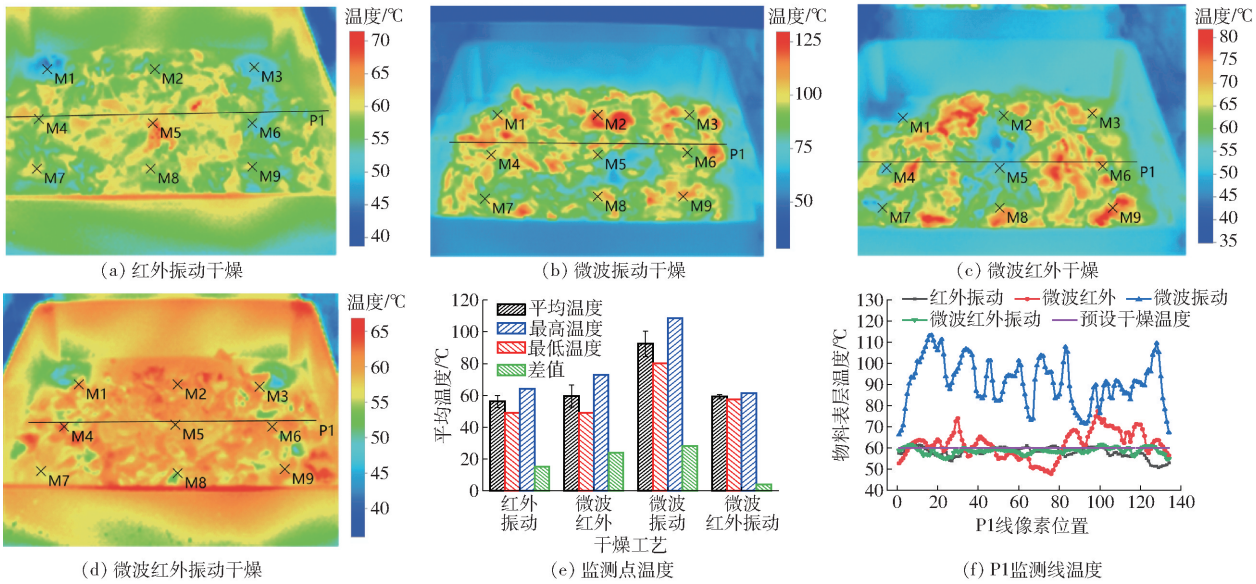
图 12（图中 M1 ~ M9 表示温度监测点位置）为姜片干燥后期的热像图和监测点温度。由图 12 可知，红外振动干燥均匀性较好，但物料平均温度偏低，微波振动干燥和微波红外干燥物料温度较高，但

表 2 物料温度不均匀系数和色差

Tab. 2 Temperature non-uniformity coefficient and color difference of materials

干燥工艺	能耗/(kW·h)	T_u/%	L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜			(61.56 ± 1.86)^{a}	(0.99 ± 0.29)^{a}	(32.32 ± 2.83)^{ac}	
微波红外干燥	(2.54 ± 0.09)^{bc}	7.10	(47.87 ± 5.33)^{b}	(8.75 ± 1.04)^{b}	(28.68 ± 2.66)^{b}	16.50 ± 4.77
微波振动干燥	(2.75 ± 0.12)^{b}	12.34	(45.27 ± 6.29)^{b}	(9.87 ± 1.94)^{b}	(29.76 ± 3.54)^{ab}	19.21 ± 5.82
红外振动干燥	(6.32 ± 0.21)^{a}	9.15	(70.05 ± 2.24)^{c}	(5.23 ± 0.66)^{c}	(29.08 ± 1.80)^{abc}	10.26 ± 1.76
微波红外振动干燥	(2.31 ± 0.11)^{c}	2.28	(62.14 ± 2.01)^{a}	(4.93 ± 0.72)^{c}	(32.93 ± 2.73)^{c}	5.07 ± 0.96

注:同列数据不同字母表示显著性差异($P<0.05$)。



(a) 红外振动干燥 (b) 微波振动干燥 (c) 微波红外干燥

(d) 微波红外振动干燥 (e) 监测点温度 (f) P1监测线温度

图 12 姜片干燥后期热像图及 P1 监测线温度

Fig. 12 Thermal image and temperature values at monitoring points of ginger slices during drying

物料盘表面出现了大量的热点,干燥均匀性较差;微波红外振动干燥时物料表面温度均匀性较好。

由图 12e 可知,红外振动干燥时物料的平均温度为(56.23 ± 3.79)℃,温度差值为 15.10℃,造成这一现象的原因是红外辐射的穿透性有限,物料受热水分蒸发带走了较多的热量,导致物料表面温度偏低;微波振动干燥时物料的平均温度为(92.46 ± 8.03)℃,温度差值较大,为 28.20℃,说明微波加热效率较高,虽然振动在一定程度上缓解了微波加热的不均匀性,但仍然难以克服微波场强分布不均导致的局部温度过高。

微波红外干燥时物料的平均温度为(59.37 ± 6.99)℃,温度差值为 24.00℃,与振动相比,红外的介入更大程度上缓解了微波干燥中物料表面温度不均匀的现象。振动仅改变了微波干燥过程中物料的相对位置,在一定程度上克服了微波空间分布不均造成的物料加热不均匀的现象。干燥过程中,微波和红外线对物料的渗透深度是不同的,当物料颗粒较小时,微波可以完全渗透到物料中心部位,导致物料中心部位温度高于表层部位温度,红外的介入进一步提高了物料表层的温度,增加了单颗物料的干燥均匀性;红外的介入给物料提供了新的热源,使微波强度较弱区域的物料也可以被加热,提升了物料整体的干燥均匀性。

图 12f 为物料托盘 P1 线位置物料表面的温度分布曲线,微波红外振动干燥时物料表面具有较好的温度分布均匀性,同时由表 2 可知微波红外振动干燥时监测点的温度不均匀系数最小(2.28%)。

3.3.3 干燥方式对生姜片干燥品质的影响

由表 2 可知,微波红外振动干燥对姜片的亮度指数 L^* 和黄色指数 b^* 影响较小,对红色指数 a^* 影响较大。相对于其他 3 种干燥工艺,微波红外振动干燥后姜片的色差值 ΔE 最小(5.07 ± 0.96),说明微波红外振动干燥工艺对姜片的色泽具有较好的保持作用。

综合分析图 11、12 和表 2 可知,微波红外振动干燥时物料表面温度分布均匀性较好,干燥效率较高,并且对姜片的色泽具有较好的保持作用。这主要是由于微波的加热方式极大地提升了物料温度,增大了物料的降水速率;振动和红外辐射的介入进一步缓解了由微波场强分布扰动造成的物料群表面温度分布不均匀现象,进一步提升了物料的干燥效

率，降低了物料于空气的接触时间，对物料的色泽起到了较好的保护作用。

4　结论

（1）提出了微波红外振动床协同干燥机的设计思路，通过理论计算和虚拟仿真对 MIVBD 设备的微波系统、振动系统和控制系统进行了设计，试验测试表明，该设备各系统运行平稳，干燥后的物料品质较高。

（2）不同的干燥工艺对姜片的干燥效率有明显的影响，红外辐射和振动对物料的干燥效率有较大影响，微波红外振动干燥能显著提高物料的干燥效率。

（3）MIVBD 过程中，红外辐射和振动能显著提高物料表面温度分布的均匀性，微波红外振动干燥时物料的干燥不均匀系数最小（2.28%），并且 MIVBD 对保持物料的色泽品质具有显著的作用。

参　考　文　献

[1] LV W, LI S, HAN Q, et al. Study of the drying process of ginger (*Zingiber officinale Roscoe*) slices in microwave fluidized bed dryer[J]. Drying Technology, 2016, 34(14): 1690 – 1699.

[2] 谢永康, 林雅文, 朱广飞, 等. 基于加热均匀性的射频干燥系统结构优化与试验简[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 248 – 255.
XIE Yongkang, LIN Yawen, ZHU Guangfei, et al. Structure optimization and experiment of radio frequency dryer based on heating uniformity[J]. Transaction of the CSAE, 2018, 34(5): 248 – 255. (in Chinese)

[3] 刘玉辉, 王相友, 魏忠彩. 红外辐射对胡萝卜切片脱水作用机制研究[J]. 农业机械学报, 2020, 52(1): 350 – 359.
LIU Yuhui, WANG Xiangyou, WEI Zhongcai. Mechanism of infrared radiation on dehydration of carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 52(1): 350 – 359. (in Chinese)

[4] 钱旺, 杨世昆, 刘贵林, 等. 太阳能牧草干燥成套设备干燥工艺参数优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 117 – 125.
QIAN Wang, YANG Shikun, LIU Guilin, et al. Optimization of drying process parameters of solar herbage dry equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 117 – 125. (in Chinese)

[5] 吴敏, 段豪, 王振文, 等. 基于温湿度控制的红外热风联合干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 490 – 499.
WU Min, DUAN Hao, WANG Zhenwen, et al. Design and experiment of infrared-hot air combined dryer based on temperature and humidity control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 490 – 499. (in Chinese)

[6] HUANG D, YANG P, TANG X, et al. Application of infrared radiation in the drying of food products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 765 – 777.

[7] ZHANG M, TANG J, MUJUMDAR A S, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(10): 524 – 534.

[8] LV W, LI D, LÜ H, et al. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 59 – 67.

[9] TANG J. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(8): E1776 – E1793.

[10] WANG D, ZHANG M, WANG Y, et al. Effect of pulsed-spouted bed microwave freeze drying on quality of apple cuboids[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(5): 941 – 952.

[11] HU X, KURIAN J, GARIEPY Y, et al. Optimization of microwave-assisted fluidized-bed drying of carrot slices[J]. Drying Technology, 2017, 35(10): 1234 – 1248.

[12] 刘伟东, 顾欣, 郭君钰, 等. 微波热风联合干燥工艺对枸杞品质和表面微生物的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 296 – 302.
LIU Weidong, GU Xin, GUO Junyu, et al. Effects of microwave-hot air drying process on quality and surface microorganism quantity of *Lycium barbarum*[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 296 – 302. (in Chinese)

[13] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Study of drying uniformity in pulsed spouted microwave-vacuum drying of stem lettuce slices with regard to product quality[J]. Drying Technology, 2013, 31(1): 91 – 101.

[14] 韩清华, 谢时军, 李树君, 等. 多馈源热风微波流态化干燥试验台[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 210 – 214.
HAN Qinghua, XIE Shijun, LI Shujun, et al. Multiple-sources microwave combining with hot-air fluidized drying test device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 210 – 214. (in Chinese)

[15] WU B, GUO Y, WANG J, et al. Effect of thickness on non-fried potato chips subjected to infrared radiation blanching and drying[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237(16): 249 – 255.

[16] 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 177 – 182.
WANG Xiangyou, CAO Ruibing, SUN Chuanzhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 177 – 182. (in Chinese)

[17] SALEHI F, SATORABI M. Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums[J]. International Journal of Fruit Science, 2021, 21(1): 519 - 527.
[18] 傅俊萍. 远红外辐射涂料传热机理研究[J]. 湖南科技大学学报, 1997, 12(3): 57 - 60.
FU Junping. Research on heat function of the heat transmission of paint in infrared radiation[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology, 1997, 12(3): 57 - 60. (in Chinese)
[19] 吕为乔, 李树君, 韩清华, 等. 微波流态化联合干燥技术在果蔬中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015(6): 130 - 133.
LÜ Weiqiao, LI Shujun, HAN Qinghua, et al. The research process of microwave fluidization combined drying technology in fruit and vegetables[J]. Food Research and Development, 2015(6): 130 - 133. (in Chinese)
[20] 吴本刚. 胡萝卜催化式红外干法杀青-红外热风顺序联合干燥技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
WU Ben'gang. Study on carrot dry-blanching and dehydration using sequential infrared heating and hot air drying[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
[21] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 344 - 351, 248. (in Chinese)
[22] LAO Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Effect of combined infrared freeze drying and microwave vacuum drying on quality of kale yoghurt melts[J]. Drying Technology, 2020, 38(5 - 6): 621 - 633.
[23] BOZKIR H. Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(10): e13485.
[24] SU D, LÜ W, WANG Y, et al. Drying characteristics and water dynamics during microwave hot-air flow rolling drying of *Pleurotus eryngii*[J]. Drying Technology, 2019, 38(11): 1493 - 1504.
[25] 代建武, 杨升霖, XIE Yuceng, 等. 旋转托盘式微波真空干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 370 - 376.
DAI Jianwu, YANG Shenglin, XIE Yuceng, et al. Design and experiments of rotating tray microwave vacuum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 370 - 376. (in Chinese)
[26] 陈家权, 廖子夙, 穆星宇. 箱形多模式微波加热器谐振腔的设计及电磁场分布研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 21 - 23.
CHEN Jiaquan, LIAO Zisu, MU Xingyu. Box shape multi-pattern microwave heater resonant cavity design and distribution of electromagnetic fields[J]. Machinery Design and Manufacture, 2009(10): 21 - 23. (in Chinese)
[27] 吕为乔, 谷远洋, 曾诗雨, 等. 载能微波在不同负压水平的干燥模式与应用[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(1): 177 - 181, 192.
LÜ Weiqiao, GU Yuanyang, ZENG Shiyu, et al. Drying processes and application of energy-carrying-microwave at different negative pressure levels[J]. Food Research and Development, 2021, 42(1): 177 - 181, 192. (in Chinese)
[28] PALAMANIT A, SUGIRA A M, SOPONRONNARIT S, et al. Study on quality attributes and drying kinetics of instant parboiled rice fortified with turmeric using hot air and microwave-assisted hot air drying[J]. Drying Technology, 2020, 38(4): 420 - 433.
[29] 黄智. 大豆射频加热过程有限元模拟及均匀性优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
HUANG Zhi. Finite element simulation and uniformity optimization for radio frequency heating process of soybean[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
[30] 钟汝能. 微波热加工农产品的腔体结构优化与物料介电特性研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
ZHONG Ru'neng. Research on optimization cavity structure for microwave heat processing of agricultural products and dielectric properties of materials[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2018. (in Chinese)
[31] 王瑞芳, 李占勇, 窦如彪, 等. 水平转筒内大豆颗粒随机运动与混合特性模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 93 - 99.
WANG Ruifang, LI Zhanyong, DOU Rubiao, et al. Simulation on random motion and mixing characteristic for soybean in rotary drum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 93 - 99. (in Chinese)
[32] 吕为乔, 宿佃斌, 王天行, 等. 热烫藕条微波滚动干燥热场分布及脱水品质[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(7): 105 - 111.
LÜ Weiqiao, SU Dianbin, WANG Tianxing, et al. Temperature-field distribution and dehydrated quality of lotus-root sticks during microwave rolling-bed drying[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(7): 105 - 111. (in Chinese)
[33] 王振乾. 超静定网梁体特大型振动筛动力学及筛分特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
WANG Zhenqian. Study on dynamics and screening characteristics of oversize vibrating screen with statically indeterminate mesh beam structure[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
[34] ZHU D, GUO R, LI W, et al. Improved postharvest preservation effects of pholiota nameko mushroom by sodium alginate-based edible composite coating[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(4): 587 - 598.