

多馈源热风微波流态化干燥试验台*

韩清华 谢时军 李树君 马季威 尹青 王也

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 阐述了多馈源热风微波流态化干燥试验台的总体结构和工作原理,分析了微波干燥室、微波管开口位置和振动流态化装置的设计,确定了具体结构和相关参数。微波干燥室的总模式数为 106,品质因素达到 1 398,6 管单面开口磁控管配置方式的微波场更为均匀,调节振动电动机频率可使物料处于流态化状态,保证物料更均匀地吸收热能和微波能。利用试验台对鲜胡萝卜的分段组合干燥工艺进行了试验,脱水胡萝卜颗粒之间的含水率差异在 1.22% 之内,保持胡萝卜原有色泽、气味和滋味的干制品合格率达到 88.63%。

关键词: 微波 热风 多馈源 场均匀性 振动流化 分段干燥

中图分类号: TQ028.6⁺77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0210-05

引言

微波加热均匀性受到物料的形状、位置、介电特性、微波腔和微波功率等多种因素的影响,其中微波腔内电磁场的分布对微波加热均匀性的影响至关重要。目前,微波干燥设备解决微波加热不均匀性的方法主要通过提高微波腔中电磁场的均匀性以及改变物料的特性来改善微波加热的不均匀性^[1-5]。

本文设计一套多馈源热风微波流态化干燥试验台。采用 6 只磁控微波管独立馈入微波能,4 根电加热管提供热能,机械振动使物料处于流态化状态,以保证物料所吸收的热能和微波能更为均匀,并利用该试验台进行新鲜胡萝卜的分段组合干燥工艺试验验证^[6-10]。

1 主要结构与工作原理

1.1 主要结构

多馈源热风微波流态化干燥试验台由微波干燥室、微波馈能传输系统、振动流态化系统、热风系统、排潮系统和控制系统等组成。热风微波流态化干燥试验台结构示意图如图 1 所示。

微波干燥室为多模箱式结构,6 只微波磁控管设置在微波干燥室顶部,通过独立的微波馈入波导与微波干燥室连接。振动流态化系统采用振动电动机带动振动机架和物料盘进行振动,通过减振弹簧与设备机架连接。4 根电加热管连接组成热源,布

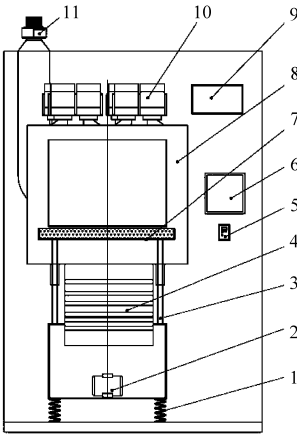


图 1 热风微波流态化干燥试验台结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of multiple-sources microwave combining with hot-air uniform drying test device

1. 减振弹簧 2. 振动电动机 3. 振动机架 4. 电加热管 5. 变频器 6. 触摸屏 7. 物料盘 8. 微波干燥室 9. 监视器 10. 磁控微波管 11. 引风机

置在微波干燥室的底部,引风机放置在设备机架上部,引入热风到微波干燥室,排出物料干燥过程中蒸发的水分。控制系统利用触摸屏监控微波功率、干燥温度等干燥参数,变频器调节振动电动机频率,监视器观测物料的干燥运行状态。

1.2 工作原理

热风微波流态化干燥试验台通过变频器调节物料盘振动的频率和振幅,以适应不同物料的振动流态化工艺要求,从而保证物料盘上的物料呈均匀流

收稿日期: 2013-03-13 修回日期: 2013-04-22

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100802)和科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2012EG119149)

作者简介: 韩清华,研究员,主要从事果蔬深加工及过程优化研究,E-mail: hanqinghua1971@sina.com

通讯作者: 李树君,研究员,博士生导师,主要从事农业物料特性与加工机理研究,E-mail: lisj@caams.org.cn

化状态。6只微波磁控管的微波功率由PLC程序控制,每只微波磁控管可单独连续控制,也可进行6只微波磁控管的不同组合控制,实现微波功率0~6kW的连续可调。4根电加热管分为2根一组,根据干燥温度进行2kW和4kW的分挡开关控制。该试验台能进行热风干燥和微波干燥的不同串/并联组合,以满足多种物料的干燥要求^[9]。触摸屏运行主界面如图2所示。



图2 触摸屏运行主界面

Fig.2 Main running picture of touch screen

2 主要部件设计

2.1 微波干燥室

微波干燥室采用多模箱式加热器结构,多模箱式微波加热器由于功率易于控制、价格便宜等优点,在微波加热、微波干燥、微波烧结等微波能应用场合中被广泛采用^[6,11]。干燥室尺寸设计首先要依据被干燥物料的体积,同时着重考虑使干燥室内的电场分布均匀及其干燥效率。结构合理的加热器可以提高微波干燥均匀性,避免介质一部分由于场强很强而过热,另一部分由于弱电场而受热不足。箱式加热器从电磁场性质来看,实际上是一个矩形微波谐振腔,其谐振波长和谐振频率分别为^[11-12]

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

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

式中 λ_0 ——谐振波长,m
 $a、b、d$ ——谐振腔长度、宽度、高度,m
 $m、n、p$ ——模式编号
 f_0 ——谐振频率,Hz
 v ——光速,m/s

加热器能生成的模式频率在中心工作频率附近的频谱范围内。对应于箱式加热器的频谱可表示为

$$f_0 - \Delta f \leq \frac{c}{2} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/d)^2} \leq f_0 + \Delta f \quad (3)$$

式中 Δf ——频带宽度,Hz

微波磁控管选用韩国三星 OM75P,工作频率

2450MHz,频带宽度50MHz,考虑微波干燥室尺寸设计的依据以及参考国内外同类设备参数值,确定 $a=800\text{mm}$, $b=690\text{mm}$, $d=600\text{mm}$ 。通过计算符合要求的总模式数为106,满足谐振腔模式较多的要求,为物料获得均匀加热提供了较有利的条件。微波干燥室模式谱线分布图如图3所示。

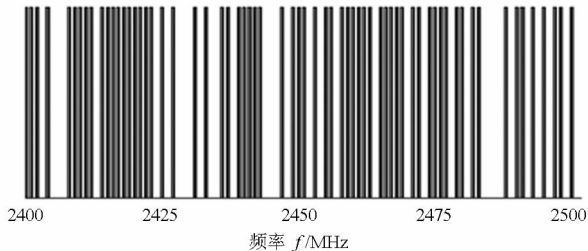


图3 微波干燥室模式谱线分布图

Fig.3 Mode spectrum distribution map of microwave drying chamber

干燥室的另一个重要参数是品质因数,品质因数表示谐振腔的质量,其值越高,微波效率利用率越高^[13],计算式为

$$Q = \frac{V}{\delta S} \quad (4)$$

式中 Q ——品质因素
 V ——干燥室体积, m^3
 S ——干燥室内表面积, m^2
 δ ——内壁集肤效应,m

从式中可看出, V/S 比值越大, δ 值越小时, Q 值越大,故应选择 δ 值较小的材料,另外考虑食品生产条件的需要,干燥腔材料选用不锈钢 1Cr18Ni9Ti。工业上一般 V/S 比值为 70~250 mm,该干燥腔 V/S 比值为 115 mm, Q 值为 1398,符合设计要求。

2.2 微波多管馈入结构

根据确定的微波干燥室尺寸,优化设计多个微波磁控管馈入口的位置,使磁控微波管发射的微波反射叠加后,微波源能够相互耦合减至最小,从而提高微波场的均匀性^[5-6]。采用 HFSS 软件对微波干燥室的不同微波管开口位置进行了干燥室的微波场模拟仿真,2种磁控微波管开口位置的微波干燥室腔体和波导内部空间模型如图4所示,对应的微波场平面分布图如图5所示。

图4b微波磁控管配置方式在微波场均匀性方面较为理想,说明单面开口时电场均匀性更好,微波场更为均匀^[14-15]。选取该配置方式为设备微波磁控管配置方式,微波多管馈入结构如图6所示。

2.3 振动流态化装置

振动流态化装置由振动电动机产生激振力,带动振动机架和物料托盘进行振动,物料在给定方向激振力作用下跳跃,替代目前通过带式或平面旋转

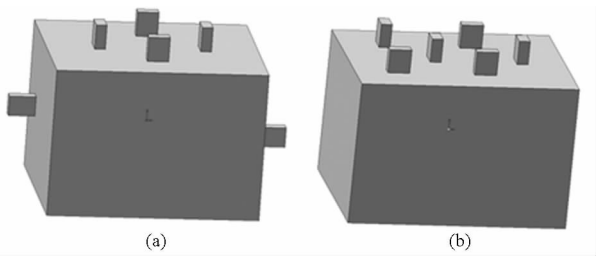


图 4 微波干燥室及馈入口三维模型图
Fig. 4 Schematic drawing of microwave drying chamber and coupling transmission position
(a) 三面开口布置 (b) 顶部开口布置

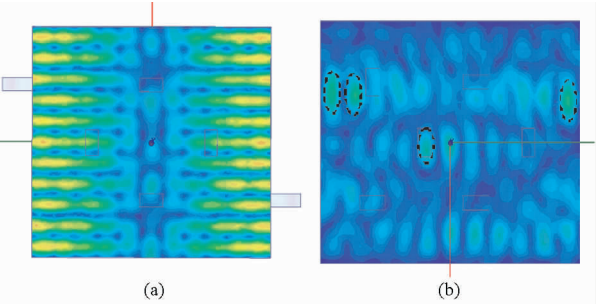


图 5 不同激励口位置的微波场平面分布图
Fig. 5 Microwave field distribution map of different coupling transmission position
(a) 三面开口布置 (b) 顶部开口布置

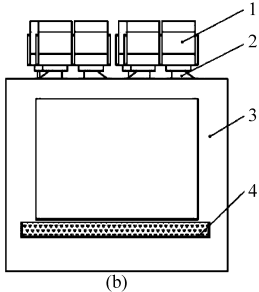
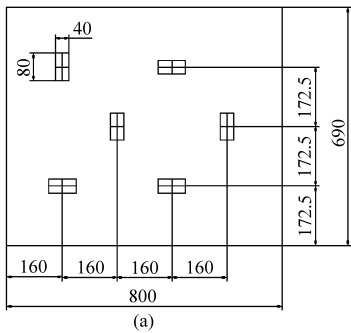


图 6 微波多管馈入结构示意图
Fig. 6 Schematic drawing of multiple microwave magnetron coupling transmission system
(a) 俯视图 (b) 主视图

1. 磁控微波管 2. 微波馈入波导 3. 微波干燥室 4. 物料盘

使物料在微波场中的二维运动方式,保证物料在微波场内处于流态化状态。减振弹簧连接振动机架和设备机架上的弹簧固定座,起到减振作用,保证设备机架的稳固性。振动方程为^[7-8]

$$m\ddot{x} + kx = F\sin(\omega t + \varphi)$$

(5)

式中 m ——物料盘质量,kg
 k ——弹簧刚度,N/mm
 F ——振动力,N
 ω ——系统角频率,rad/s
 φ ——初始角,(°)

振动流态化装置结构示意图如图 7 所示。物料盘设计承载最大质量为 11 kg,振幅 1.5 mm,振动台的工作频率为 18.5 Hz 时,弹簧刚度为 215.28 N/mm。因此,选择振动电动机型号为 MVE60/3,功率 30 W,振动力 700 N,转速 2 800 r/min,减振弹簧中径 48 mm,直径 6 mm,有效圈数 5 圈,高度 80 mm。振动电动机频率可以通过变频器进行调节,其频率决定了物料的振动状态,以适应不同形状和大小的物料振动流态化工艺要求。

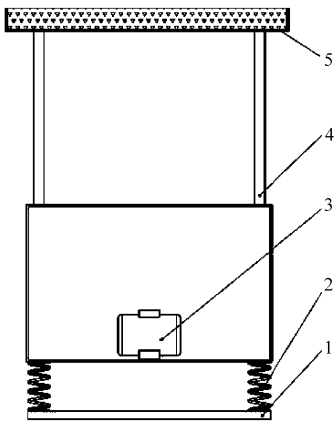


图 7 振动流态化装置结构示意图
Fig. 7 Schematic drawing of vibrating fluidized system
1. 弹簧固定座 2. 减振弹簧 3. 振动电动机 4. 振动机架
5. 物料盘

3 试验验证

选用新鲜胡萝卜进行试验台的性能验证试验。将胡萝卜清洗去皮切成 10 mm × 10 mm × 10 mm 的块状,漂烫温度 95 ~ 100℃,漂烫时间 5 ~ 6 min,以烫透为准,再快速冷却,沥去胡萝卜丁的表面水分,再进行热风微波流态化分段组合干燥。

胡萝卜整个干燥时间为 100 min,物料干燥温度保持在 60 ~ 70℃ 范围内,干燥参数如表 1 所示,微波功率随干燥时间变化曲线如图 8 所示。干燥后的胡萝卜颗粒之间的含水率差异在 1.22% 之内,未产生焦糊、变色等缺陷,能保持胡萝卜原有色泽、气味和滋味的干燥制品合格率达到 88.63%。

4 结论

(1) 设计了一套多馈源热风微波流态化干燥试验台。采用 6 只磁控微波管独立馈入微波能,4 根电加热管提供热能,机械振动使物料处于流态化状

表 1 胡萝卜热风微波流态化分段组合干燥参数

Tab.1 Carrot test drying parameters of microwave & hot-air fluidized stage combining drying

干燥阶段	干燥时间 /min	微波功率 /kW	电加热功率 /kW	振动频率 /Hz
1	5	6.0	4	45.5
2	3	5.5	0	45.5
3	2	5.0	0	45.5
4	3	4.5	0	43.5
5	2	4.0	0	43.5
6	3	3.5	0	43.5
7	2	3.0	0	43.5
8	3	2.5	0	43.5
9	2	2.0	2	41.5
10	5	1.5	2	41.5
11	10	1.0	2	41.5
12	20	0.8	2	41.5
13	40	0.6	2	41.5

态,保证物料所吸收的热能和微波能更为均匀。

(2) 微波干燥室采用多模箱式加热器结构,确定了微波干燥室的结构尺寸,其总模式数为 106, V/S 比值为 115 mm, Q 值达到 1 398,符合设计要求。

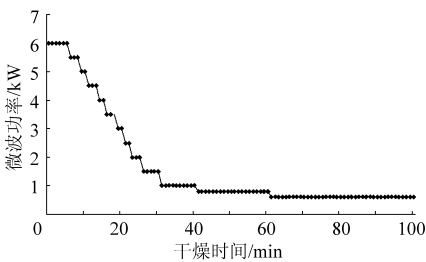


图 8 胡萝卜分段组合干燥微波功率曲线

Fig.8 Microwave power curve of carrot stage combining drying

(3) 采用 HFSS 软件对微波干燥室的 2 种微波磁控管开口位置进行了微波场模拟仿真,得出 6 管单面开口的磁控管配置方式,其微波场更为均匀。

(4) 确定了振动流态化装置的结构、振动电动机和减振弹簧的规格型号。调节振动电动机频率以适应不同形状大小的物料要求,保证物料获得均匀的流化状态。

(5) 利用试验台进行了胡萝卜的分段组合干燥工艺试验,脱水胡萝卜颗粒之间的含水率差异在 1.22% 之内,能保持胡萝卜原有色泽、气味和滋味的干燥制品合格率达到 88.63%。

参 考 文 献

1 王瑞芳,李占勇. 水平转盘与转鼓微波干燥均匀性的实验研究[J]. 天津科技大学学报, 2009, 24(4):58-61.
Wang Ruifang, Li Zhanyong. Experimental study on microwave drying uniformity in rotating turntable and rotary drum [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2009, 24(4):58-61. (in Chinese)

2 安风平,黄建立,宋洪波,等. 微波真空干燥机干燥系统的设计及干燥均匀性的改善[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2011, 40(1):85-90.
An Fengping, Huang Jianli, Song Hongbo, et al. Design of drying system of microwave vacuum dryer and the improvement of drying uniformity [J]. Journal of Fujian Agriculture and Frosty University: Natural Science Edition, 2011, 40(1):85-90. (in Chinese)

3 Manickavasagan A, Jayas D S, White N D G. Nonuniformity of surface temperatures of grain after microwave treatment in an industrial microwave dryer [J]. Dry Technology, 2006, 24(12):1 559-1 567.

4 刘超,陈海峰,易福磊,等. 一种连续式瞬间微波膨化设备的研究[J]. 包装与食品机械,2009,27(3): 15-17, 39.
Liu Chao, Chen Haifeng, Yi Fulei, et al. Study on a continuous type of transient microwave-explosion-puffing equipments [J]. Packaging and Food Machinery, 2009,27(3): 15-17, 39. (in Chinese)

5 Dominguez-Tortajada E, Plaza-Gonzalez P, Diaz-Morcillo A, et al. Optimisation of electric field uniformity in microwave heating systems by means of multi-feeding and genetic algorithms [J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2007, 29(1-4):149-162.

6 斯丹燕,徐耀鑫,朱守正. 不同开口情况下微波腔体加热分析[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版, 2011, 36(增刊): 1-4.
Si Danyan, Xu Yaixin, Zhu Shouzheng. Analysis of microwave heating in multi-mode cavities with different excitation aperture arrangement [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 36(Supp.): 1-4. (in Chinese)

7 陈进,李耀明. 气吸振动式播种试验台内种子运动规律的研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 47-50.
Chen Jin, Li Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 47-50. (in Chinese)

8 Janusz S. Drying of diced carrot in a combined microwave-fluidized bed dryer [J]. Drying Technology, 2005, 23(8):1 711-1 721.

9 钱革兰,崔政伟. 响应面分析热风微波耦合干燥胡萝卜片的形变[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 38-41.
Qian Gelan, Cui Zhengwei. Analysis on shrinkage of carrots slices dried by coupling hot air and microwave by response surface methodology [J]. Food & Machinery, 2011, 27(3): 38-41. (in Chinese)

10 仰振球, 宋宝珍, 樊红雷, 等. 微波流态化法制备几丁聚糖新工艺[J]. 化工进展, 2003, 22(6): 618 – 621.
Yang Zhenqiu, Song Baozhen, Fan Honglei, et al. Novel process of chitin deacetylation by microwave fluidization technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2003, 22(6): 618 – 621. (in Chinese)

11 熊兆贤, 肖芬, 郑建森, 等. 微波陶瓷应用于微波炉加热均匀性改善研究[J]. 材料导报, 2009, 23(11A): 58 – 60.
Xiong Zhaoxian, Xiao Fen, Zheng Jiansen, et al. Performance improvement of microwave oven with microwave ceramics [J]. Materials Review, 2009, 23(11A): 58 – 60. (in Chinese)

12 李爽, 王建国, 谢海燕, 等. 利用多馈源激励改善混响室的场均匀性[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 3 019 – 3 023.
Li Shuang, Wang Jianguo, Xie Haiyan, et al. Improving field uniformity in reverberation chamber with multiple sources [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 3 019 – 3 023. (in Chinese)

13 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)

14 姚斌, 郑勤红, 彭金辉, 等. 馈口位置及负载对微波加热效率的影响及其优化[J]. 材料导报, 2012, 26(8): 161 – 163.
Yao Bin, Zheng Qinhong, Peng Jinhui, et al. Influence of feeds and loads to microwave heating efficiency [J]. Materials Review, 2012, 26(8): 161 – 163. (in Chinese)

15 韩清华, 李仪凡, 赵东林, 等. 多馈源箱式加热器的微波场均匀性仿真分析[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(6): 6 – 9.
Han Qinghua, Li Yifan, Zhao Donglin, et al. Analysis of microwave field uniformity simulation on the multiple sources cavity heater[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(6): 6 – 9. (in Chinese)

Multiple-sources Microwave Combining with
Hot-air Fluidized Drying Test Device

Han Qinghua Xie Shijun Li Shujun Ma Jiwei Yin Qing Wang Ye
(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The overall structure and working principle of multiple-sources microwave combining with hot-air fluidized drying test device were described. The design of microwave drying chamber, the coupling transmission position of six magnetrons, and the vibrating fluidized device system were analyzed in detail, and their specific structure and main parameters were confirmed. The total mode number and quality factor of the microwave drying chamber were 106 and 1 398 respectively. The microwave field of six magnetrons single-side radiating microwave energy was more uniform, and the frequency of vibration motor could be adjusted to led materials uniform fluidized for different shapes and sizes of materials, so that the materials more uniformly absorbed the hot-air and microwave energy. The results of carrots performance experiment proved that the moisture contents difference of dried carrots was within 1.22% , and the dried product rate of maintaining carrot original color, smell and taste reached 88.63% .

Key words: Microwave Hot-air Multiple sources Field uniformity Vibrating fluidized Stage drying