

怀山药微波真空干燥模型的建立

任广跃, 段续, 李晖, 朱文学

(河南科技大学 食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 采用微波真空干燥设备对鲜切怀山药进行了微波真空组合干燥试验研究。通过试验值的水分比和时间的关系建立了怀山药的薄层微波真空干燥模型。结果表明:在干燥处理开始至物料含水率达到 50% 的范围之内,水分比与时间呈线性关系,即:水分比的预测模型为: $M_R = (0.103\ 225\ 3P - 1.628\ 6 \times 10^{-5} W - 0.009\ 729\ 556) (1 / (0.089\ 295\ 9P - 1.566\ 473 \times 10^{-5} W - 0.010\ 239\ 25) + t)$ 。通过试验值与模型预测值的比较,验证了该模型能很好的描述和预测怀山药微波真空干燥的水分比变化规律。

关键词: 怀山药;微波真空干燥;数学模型

中图分类号: S 226.6

文献标志码: A

文章编号: 1673—1689(2012)10—1069—05

Modeling of Microwave Vacuum Drying of Chinese Yam

REN Guang-yue, DUAN Xu, LI Hui, ZHU Wen-xue

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Research on microwave vacuum drying of Chinese yam was carried out by using a microwave vacuum drying equipment. The thin layer microwave vacuum drying model of Chinese yam was established by analyzing the relationship between moisture ratio and time of experimental data. The results indicate that moisture ratio was linear before the moisture content of materials was 50% in the microwave vacuum drying. The prediction model of moisture ratio was $M_R = (0.103\ 225\ 3P - 1.628\ 6 \times 10^{-5} W - 0.009\ 729\ 556) (1 / (0.089\ 295\ 9P - 1.566\ 473 \times 10^{-5} W - 0.010\ 239\ 25) + t)$. The model could describe and predict change regulation of moisture ratio very well according to the comparison of experimental values and calculated values.

Keywords: Chinese yam, microwave vacuum drying, mathematical modeling

怀山药为传统药食同源植物,营养成分丰富,药用其根茎^[1],是著名的四大怀药之一。对怀山药营

养成分的研究已有报道^[2-3],但对怀山药加工保鲜的研究报道较少。

收稿日期: 2011-10-07

基金项目: 河南省重点科技攻关计划项目(092102110023);河南科技大学科学研究基金项目(2008ZY040)。

作者简介: 任广跃(1971—),男,河北张北人,工学博士,副教授,主要从事农产品干燥技术方面的研究。E-mail:rgy@mail.haust.edu.cn

微波真空组合干燥技术代表了食品干燥技术的最新发展,该技术有效集成了微波干燥和真空干燥的优点,既降低了干燥温度又加快了干燥速度,能很好的保留物料原有的色香味及热敏性物质,近年来微波干燥技术倍受国内外学者的关注^[4-6],也已有成功的范例。Fathima A^[7]等研究了微波干燥对蔬菜感官品质的影响;Clary C D^[8]等研究了微波真空干燥对葡萄酒质量的改善效果;KANESUP W^[9]等研究了辣椒的微波真空干燥特性;胡光华^[10]对胡萝卜的微波真空干燥特性进行了研究;邓宇^[11]等比较了微波真空干燥、热风干燥和冷冻干燥对蕨菜干燥特性和干燥品质的影响;李志远^[12]等比较了微波真空干燥和热风干燥对速溶香蕉粉干燥效果,并得出了速溶香蕉粉的最佳微波真空干燥工艺;韩清华^[13]等研究了微波真空干燥膨化苹果脆片的加工方法;朱德泉^[14]等研究优化了猕猴桃切片的微波真空干燥工艺。但未见怀山药微波真空干燥的研究报道以及通过建立数学模型来表示和描述微波真空干燥过程中水分变化规律的相关报道。

作者将对新鲜怀山药进行微波真空组合干燥处理。拟建立与微波功率和真空度相关的薄层干燥模型,并与试验值进行拟合验证,以期得到能够较好描述怀山药微波真空干燥过程中水分比变化规律的数学模型。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜怀山药:购于河南温县当地市场,选择个体完整、粗细均匀、表皮无霉、无病虫害、无机械损伤、肉质洁白的光皮长柱形新鲜怀山药。新鲜怀山药的含水率在 86%~88%。

1.2 试验仪器及设备

微波真空组合干燥设备 HWZ-2B 型:广州兴兴微波能设备有限公司制造;电子天平 BS223S 型:北京赛多利有限公司制造;恒温干燥箱 202 型:北京永光明医疗仪器厂制造。

1.3 试验方法

怀山药清洗,削皮,切片(厚度 6 mm)处理后,称取 300 g 放入微波真空干燥箱中,设定微波功率,抽真空,当真空度降到试验值时,开启微波,每 5 min 称重 1 次。分别研究微波功率和真空度对怀山药微波真空干燥特性的影响。

在真空度为 -0.08 MPa 的条件下,分别设定微波功率为 800、1 200、1 600、2 000、2 400 W。

在微波功率为 1 600 W 的条件下,分别设定真空度为: -0.02、-0.04、-0.06、-0.08 MPa。

微波干燥后期物料易出现局部高温焦化现象,为此,将微波真空干燥试验分两步进行:

1) 采用不同干燥方式连续干燥物料,干燥终点为含水率 50%(干基含水率为 1),停止干燥;

2) 之后,将干燥参数调节为:微波功率 800 W,真空度 -0.08 MPa,进行间歇干燥,实际操作为加热 1 min 停 1 min,干燥至物料安全贮存水分(根据国家医药管理局(82)药储字第 17 号文件规定,怀山药的安全贮存水分为 12%~17%)。

由实验可知,经此方法干燥的物料不会出现焦化现象。

利用这 8 组干燥曲线建立怀山药的薄层干燥模型。采用 DPS 数据处理系统进行分析 and 回归。

水分比 M_R 用于表示一定干燥条件下物料还有多少水分未被干燥除去,可以用来反应物料干燥速率的快慢。计算公式为^[15]:

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中: M_t 为物料在 t 时刻的含水率(干基, %), M_0 为物料的初始含水率(干基, %), M_e 为物料的平衡含水率(干基, %)。

2 结果与分析

2.1 干燥模型的建立

首先对 8 组干燥曲线处理,以 t 为横坐标, M_R 为纵坐标,在坐标系作图。由于试验过程分两步进行,而第二步属于间歇干燥,干燥时间与水分比的关系无法确立,因此,建立的模型主要用于反映物料从干燥处理开始到水分降到 50% 之间的连续干燥阶段的水分比与时间的关系。图 1,图 2 分别为不同干燥条件下,物料水分降到 50% 时的 M_R-t 关系图。

由图 1,2 可知,怀山药微波真空干燥过程中在水分降至 50% 以前,水分比与时间的线性非常明显。对曲线进行线性回归,得到 8 个线性回归方程,其相关系数 R^2 见表 1。 R^2 在 0.999~0.999 6 之间,平均值为 0.998 55,表明 M_R 与 t 呈良好的线性关系,不需要套用经验模型(分别对 M_R 和 t 进行求对数,

使 $\ln(-\ln M_R)$ 与 $\ln t$ 成线性关系),因此 M_R 与 t 的关系式为:

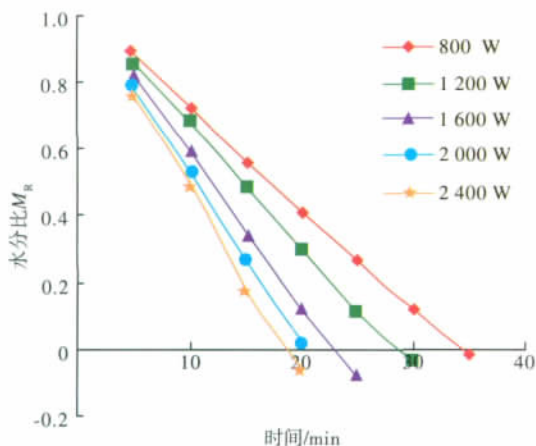


图1 不同微波功率下的 M_R - t 分布

Fig.1 Distribution diagram of M_R - t at different microwave power

$$M_R = k + Nt \quad (2)$$

式中 k, N 为系数。

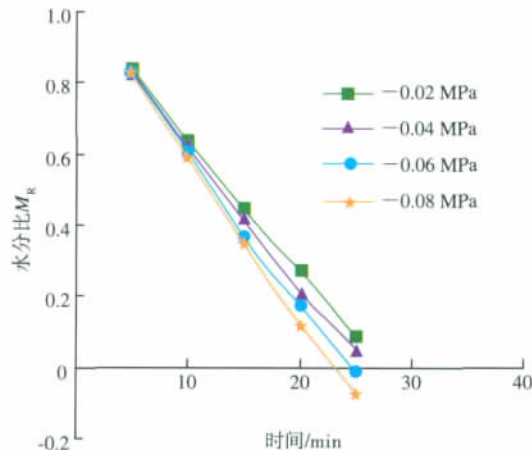


图2 不同真空度下的 M_R - t 分布

Fig.2 Distribution diagram of M_R - t at different vacuum

表1 干燥曲线的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients of drying curve

	微波功率/W (真空度-0.08 MPa)					真空度/MPa (功率 1 600 W)		
	800	1 200	1 600	2 000	2 400	-0.02	-0.04	-0.06
R^2	0.999 0	0.998 8	0.998 6	0.999 6	0.997 2	0.999 2	0.997 7	0.998 3

将图1拟合的5条直线斜率 N 对功率 W 作图, 见图3。对 N 和 W 进行线性回归, R^2 为 0.987 142, 所以 N 与 W 也呈线性关系,其线性关系式为:

$$N = a_1 + a_2 W \quad (3)$$

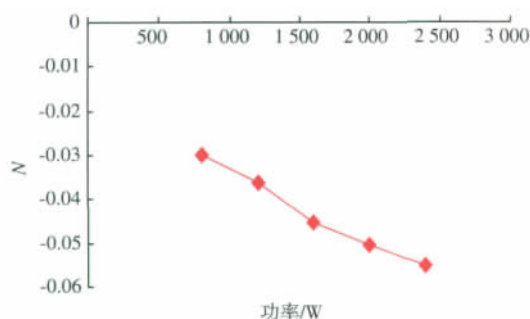


图3 N - W 关系曲线

Fig.3 Relationship of N vs W

将图1中5条直线方程中的系数 K 对 W 作图,结果为一曲线。若将 N 除以 K 再对 W 作图,结果见图4。可以看出, $\frac{N}{K}$ 和 W 呈较好的线性关系,进行线性回归, R^2 为 0.989 43。因此可得方程式:

$$\frac{N}{K} = b_1 + b_2 W \quad (4)$$

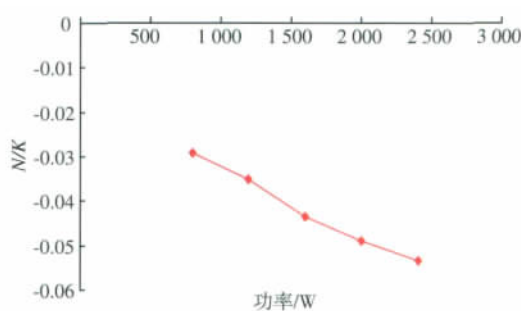


图4 N/K - W 的关系曲线

Fig.4 Relationship of N/K vs W

如果用 $\frac{N}{K}$ 来代替 K ,可得方程式:

$$K = b_1 + b_2 W \quad (5)$$

式(2)可变为:

$$M_R = \frac{N}{K} + Nt \quad (6)$$

$$\text{进而得} \quad M_R = N \left(\frac{1}{K} + t \right) \quad (7)$$

将图2中拟合的4条直线斜率 N 对真空度 P

作图, 结果见图 5。对 N 和 P 线性回归, 得 R^2 为 0.981 736, N 与 P 也呈线性关系, 其线性关系式为:

$$N=c_1+c_2P \quad (8)$$

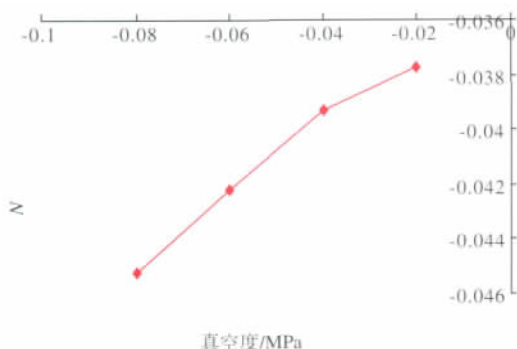


图 5 N - P 的关系曲线

Fig.5 Relationship of N vs P

将利用图 2 中求得的 K 对 P 作图, 结果见图 6。发现两者呈良好的线性关系, 线性回归的 R^2 为 0.993 062, 可得线性方程:

$$K=d_1+d_2P \quad (9)$$

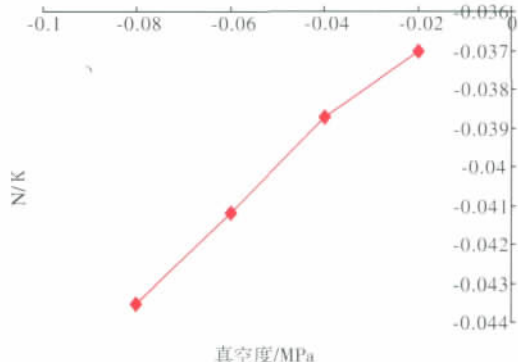


图 6 K - P 的关系曲线

Fig.6 Relationship of K vs P

综上, 斜率 N 分别与 W 和 P 呈线性关系, K 与 W 和 P 也呈线性关系, 因此, 综合式(3)和式(8)可得:

$$N=d_1+d_2W+d_3P \quad (10)$$

综合式(5)和式(9)可得:

$$K=d_4+d_5W+d_6P \quad (11)$$

将式(10)和式(11)带入式(7), 可得 M_R 的薄层模型方程为:

$$M_R=(d_1+d_2W+d_3P)\left(\frac{1}{d_4+d_5W+d_6P}+t\right) \quad (12)$$

2.2 模型参数的确定

将图 3 和图 5 回归所得的 N 与 W 和 P 进行多元线性回归, 可得:

$$N=0.103\ 225\ 3P-1.628\ 6\times 10^{-5}W-0.009\ 729\ 556 \quad (R^2=0.981\ 989) \quad (13)$$

将图 4 和图 6 回归所得的 K 与 W 和 P 进行多元线性回归, 可得:

$$K=0.089\ 295\ 9P-1.566\ 473\times 10^{-5}W-0.010\ 239\ 25 \quad (R^2=0.985\ 625) \quad (14)$$

即水分比预测模型为:

$$M_R=(0.103\ 225\ 3P-1.628\ 6\times 10^{-5}W-0.009\ 729\ 556)\left(\frac{1}{0.089\ 295\ 9P-1.566\ 473\times 10^{-5}W-0.010\ 239\ 25}+t\right)$$

2.3 模型的验证

在真空度 -0.08 MPa 下, 不同微波功率条件下的干燥曲线试验结果和模型值见图 7。在微波功率为 $1\ 600$ W 下, 不同真空度条件下的干燥曲线试验结果和模型值见图 8。由图 7 和图 8 可知, 两图中的模型值和实测值拟合的较好, 说明该模型具备较好的预测性, 能很好的描述和表达怀山药微波真空干燥规律。

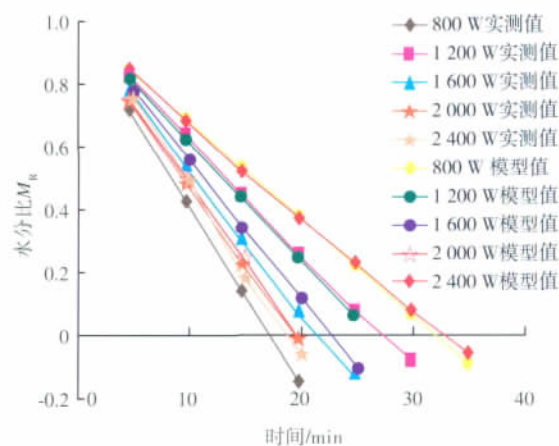


图 7 不同微波功率下的干燥曲线

Fig.7 Drying curves of different microwave power

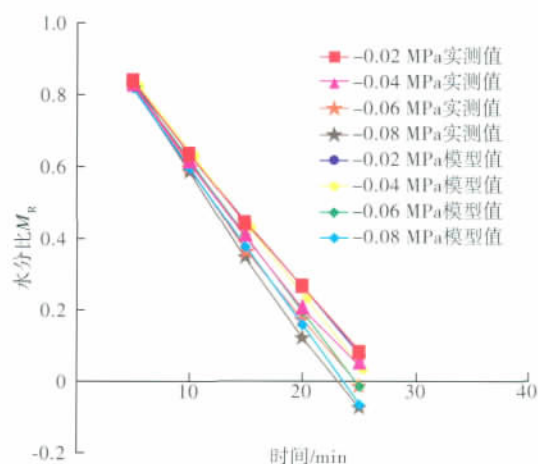


图 8 不同真空度下的干燥曲线

Fig.8 Drying curves of different vacuum

3 结 语

怀山药的微波真空干燥处理操作分两个步骤进行,基于第一步的实验数据建立了怀山药微波真空干燥 M_R-t 数学模型,即当物料含水率在达到 50%之前,水分比与时间呈线性关系。需要说明的是由于微波真空干燥过程中升速阶段极短,建立 M_R-t 模型时发现水分比与干燥时间就已直接成线性关

系,不再需要套用经验模型。经模型值与试验值的拟合比较,该模型能较好的描述和表达怀山药微波真空干燥过程中水分比的变化规律。

此外,当物料含水率达到 50%之后,若继续采用连续的微波真空干燥处理,物料品质难以保质,建议在干燥后期采用间歇干燥处理或单一的真空干燥处理。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 袁书林. 山药的化学成分和生物活性作用研究进展[J]. 食品研究与开发,2008,29(3):176-179
YUAN Shu-lin. Research advances on chemical compositions and bioactivities of *Dioscorea opposita thumb.* (Chinese yam)[J]. **Food Research and Development**,2008,29(3):176-179. (in Chinese)
- [3] 白冰,李明静,王勇,等. 怀山药成分研究[J]. 中国中药杂志,2008,33(11):1271-1274.
BAI Bing,LI Ming-jing,WANG Yong, et al. Studies on chemical constituents of *Dioscorea opposita*[J]. **China Journal of Chinese Material Medica**,2008,33(11):1271-1274. (in Chinese)
- [4] Nidhal M,Mohammed F. Microwave vacuum drying of banana slices[J]. **Drying Technology**,2002,20:2055-2066.
- [5] Sham P W Y,Scaman C H,Durance T D. Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment,vacuum level,and apple variety[J]. **Journal of Food Science**,2001,66:1341-1347.
- [6] Erle U,Schubert H. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries[J]. **Journal of Food Engineering**,2001,49:193-199.
- [7] Fathima A,Begum K,Rajalakshimi D. Microwave drying of selected greens and their sensory characteristics[J]. **Plant Fields for Human Nutrition**,2001,56:303-311.
- [8] Clary C D,Mejia-Meza,Wang S,et al. Improving grape quality using microwave vacuum drying associated with temperature control[J]. **Journal of Food Science**,2007,72(1):23-28.
- [9] Kanesup W,Chutima S,Wongwises S. Experimental study on drying of chilli in a combined microwave-vacuum-rotary drum dryer[J]. **Drying Technology**,2002,20(10):2067-2079.
- [10] 胡光华,张进疆,王喜鹏,等. 胡萝卜微波真空干燥试验研究[J]. 干燥技术与设备,2005,3(4):176-178.
HU Guang-hua,ZHANG Jin-jiang,WANG Xi-peng, et al. Experimental study on carrot by microwave-vacuum drying[J]. **Drying Technology & Equipment**,2005,3(4):176-178. (in Chinese)
- [11] 邓宇,郑先哲. 蕨菜微波真空干燥特性和品质试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(5):253-257.
DENG Yu,ZHENG Xian-zhe. Experiment and research on the techniques for microwave vacuum drying of *Pteridium aquilinum* [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2008,24(5):253-257. (in Chinese)
- [12] 李远志,王娟,陈人人,等. 微波真空干燥速溶香蕉粉的工艺研究[J]. 食品科学,2005,26:31-34.
LI Zhi-yuan,WANG Juan,CHEN Ren-ren, et al. Study on the process of drying resolvable banana powder by using microwave vacuum equipment[J]. **Food Science**,2005,26:31-34. (in Chinese)
- [13] 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,2006,37:156-158.
HAN Qing-hua,LI Shu-jun,MA Ji-wei, et al. Microwave vacuum drying and puffing characteristics of apple chips [J]. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**,2006,37:156-158. (in Chinese)
- [14] 朱德泉,王继先,钱良存,等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J]. 农业工程学报,2009,25(3):248-252.
ZHU De-quan,WANG Ji-xian,QIAN Liang-cun, et al. Optimization of technical parameters of microwave-vacuum drying of Chinese gooseberry slices [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2009,25 (3):248-252. (in Chinese)
- [15] Midilli A. Detemination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system[J]. **Intemational Journal of Energy Research**,2001,25(8):715-725.