

# 低糖枇杷果脯的微波干燥动力学研究

王仕钰, 张立彦, 曾婷婷

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 研究了不同微波功率密度对低糖枇杷果脯干燥特性的影响, 并进行数学模型分析, 结果表明: 低糖枇杷果脯的微波干燥模型可用 Page 方程  $MR = \exp(-kt^n)$  来描述, 方程中的  $k$  和  $n$  受微波功率密度  $P$  的影响。经回归拟合得出的方程  $MR = \exp(-e^{(a+bP+cP^2)} \cdot t^{(d+eP+fP^2)})$  显著, 式中,  $a=-5.8931$ ,  $b=0.6776$ ,  $c=-0.0267$ ,  $d=1.3565$ ,  $e=-0.0498$ ,  $f=0.0144$ , 该模型的  $R^2$  值为 0.9455, 说明其拟合度好, 可用来对功率密度为 1~5W/g 之间微波干燥过程中低糖枇杷果脯含水量的变化进行预测。

**关键词:** 低糖枇杷果脯; 微波干燥; 动力学

文章篇号: 1673-9078(2012)12-1656-1658

## Microwave Drying Kinetics of Low-sugar Loquat Candy

WANG Shi-yu, ZHANG Li-yan, ZENG Ting-ting

(College of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The microwave drying model of low-sugar loquat candy could be described using Page equation,  $MR = \exp(-ktn)$ , where  $k$  and  $n$  were related to the microwave power density  $P$ . After regression fitting, the equation of  $MR = \exp(-e^{(a+bP+cP^2)} \cdot t^{(d+eP+fP^2)})$  ( $a=-5.8931$ ,  $b=0.6776$ ,  $c=-0.0267$ ,  $d=1.3565$ ,  $e=-0.0498$ ,  $f=0.0144$ ) was significant. The  $R^2$  of 0.9455 indicated a good degree of fitting and that the equation could be used to predict water content changes of low-sugar loquat candy when microwave power density was among 1~5 W/g.

**Key words:** low-sugar loquat candy; microwave drying; kinetics

果脯的干燥是为了降低水分含量、提高果脯口感及延长保藏期<sup>[1]</sup>, 低糖枇杷果脯的表皮结构致密, 不利于水分的散失, 采用热风干燥时易产生表皮硬化现象, 降低果脯的食用品质, 而微波干燥具有加热速度快、干燥时间短、干后微结构及外观品质保持较好等独特性, 不同于热风干燥、远红外干燥及其他的一些干燥方法, 因而在农产品加工及食品工业中越来越受到重视<sup>[2,3]</sup>。微波作用于物料时, 内外同时加热, 在物料内部迅速生成的蒸汽形成巨大的驱动力, 驱动水分以水蒸汽的状态移向表面, 由于蒸发作用使得物料表面温度低于内部, 故不必担心会造成物料表面过热、烧焦或内外干燥不均等现象<sup>[4,5]</sup>。本文主要研究微波干燥低糖枇杷果脯的动力学特性, 并对其进行数学建模, 为微波干燥技术在果脯干燥中的应用提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

低糖枇杷果脯 (湿基水分含量 50%), 糖含量约 40%, 实验室自制。

### 1.2 仪器设备

收稿日期: 2012-08-01

基金项目: 广东省科技计划农业公关项目 (2010B020312004)

微波反应器 MCR-3, 巩义市予华仪器有限公司; 电子天平 JJ500A, 常熟市双杰测试仪器厂; 水分分析仪 MB23, 奥豪斯仪器 (上海) 有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 不同微波功率密度对低糖枇杷果脯干燥特性的影响

采用微波功率密度 (微波炉内每 g 物料平均分配到的微波功率) 为 1 W/g、2 W/g、3 W/g、4 W/g、5 W/g 对低糖枇杷果脯进行干燥, 并绘制干燥曲线及干燥速率曲线, 分析不同微波功率密度对枇杷果脯干燥特性的影响。

物料  $t$  时刻的含水量和干燥速率计算方法如下:

$$X_t = X_0 - (G_0 - G_t) / G_0 \quad (1)$$

$$ut = \Delta W_t / \Delta t \quad (2)$$

式中,  $X_0$ 、 $X_t$ -样品初始含水量和  $t$  时刻含水量, %;  $G_0$ 、 $G_t$ -样品初始重量和  $t$  时刻的重量, g;  $ut$ -样品  $t$  时刻的干燥速率, g/(100g·min);  $\Delta W_t$ -样品  $t$  时刻前后两次测定水分含量差, %;  $\Delta t$ -样品  $t$  时刻前后两次时间差, min。

#### 1.3.2 低糖枇杷果脯干燥模型的研究

对低糖枇杷果脯干燥模型进行理论研究, 绘制低糖枇杷果脯在不同的微波功率密度下干燥的  $MR-t$  曲线, 进而作出  $\ln(MR)-t$  及  $\ln t[-\ln(MR)]-\ln t$  曲线, 由曲线确定干燥模型, 并求出干燥拟合方程。

### 1.3.3 数据处理

实验所得数据用 SPSS 13.0 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同微波功率密度下低糖枇杷果脯的干燥特性

低糖枇杷果脯的初始含水量为 50% 左右, 在微波干燥过程中的干燥特性分析见图 1 和图 2 所示。

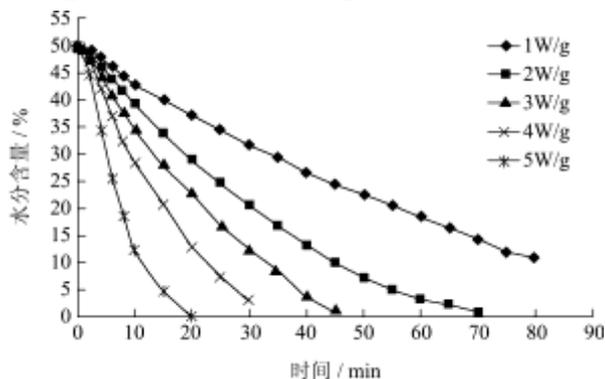


图 1 低糖枇杷果脯微波干燥曲线

Fig.1 Microwave drying curves of low-sugar loquat candy at various power density

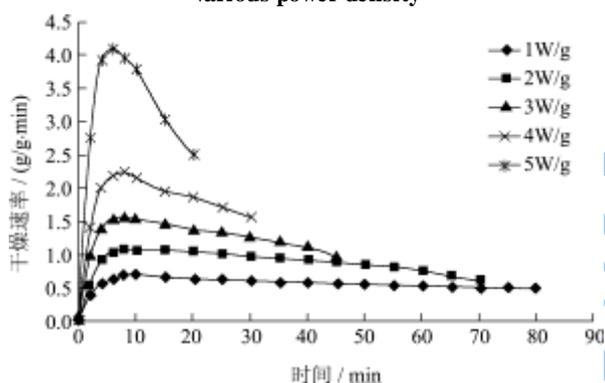


图 2 低糖枇杷果脯微波干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves of candied high-sugar loquat dehydrated at various microwave power density

由图 1 可知, 低糖枇杷果脯微波干燥曲线具有干燥曲线的普遍特性: 随微波功率密度的增加, 水分含量减小, 干燥速率增大。在其他条件相同, 微波功率密度分别为 1 W/g、2 W/g、3 W/g、4 W/g、5 W/g 的条件下, 低糖枇杷果脯的水分含量降至 20% 所需的时间分别约为 60 min、31 min、22 min、15 min、8 min。故微波功率密度对干燥时间的影响很显著。这主要是因为, 在微波干燥过程中, 物料内部的水分迁移与表面的水分蒸发同时进行, 微波从内而外加热, 微波功率越大, 在物料内部形成的蒸汽压越大, 其向外的驱动力也越大, 这就促使更多的水分被蒸发, 干燥时间也越短<sup>[6]</sup>。

由图 2 可知, 在低功率密度下 (1 W/g~3 W/g), 恒速干燥阶段占据微波干燥过程的大部分时间, 此阶

段物料能以较高且变化不大的干燥速率持续干燥, 物料表面水分蒸发较快, 内部水分也在不断的吸收微波能产生较大的蒸汽压, 推动更多的水分迁移至物料表面蒸发, 故此阶段吸收的微波能主要用于水分蒸发。而在高功率密度下 (4 W/g~5 W/g), 随着微波功率密度的增加, 恒速阶段时间会缩短, 但干燥速率仍较大, 这主要是由于在较高功率密度下, 枇杷果脯表面的水分蒸发量很大, 但物料内部水分的迁移速率小于蒸发速率, 就会导致干燥速率下降, 恒速阶段缩短, 而此时内部糖分吸收大量微波造成中心温度过高而出现焦化的现象<sup>[7]</sup>, 故微波干燥过程中不易采用较高功率密度进行干燥。恒速干燥阶段后即降速干燥阶段, 由图 2 看出, 从恒速干燥阶段到接近干燥末期, 微波功率密度为 5 W/g 时, 干燥速率从 4.1 g/g·min 降至 2.5 g/g·min; 在 4 W/g 下, 干燥速率从约 2.3 g/g·min 降至 1.5 g/g·min; 而微波功率为 3 W/g~1 W/g 时, 干燥速率下降较小, 说明在水分含量较低情况下易采用较低功率密度进行干燥, 这样既可以保证低糖枇杷果脯品质, 又可以节省干燥时间并减少能耗。

### 2.2 微波干燥动力学模型的建立

#### 2.2.1 微波干燥数学模型的选择

目前, 通用性较好的薄层微波干燥数学模型有以下 3 种<sup>[8]</sup>:

$$\text{指数模型: } MR = \exp(-kt) \quad (3)$$

$$\text{单项扩散模型: } MR = A \exp(-kt) \quad (4)$$

$$\text{Page 方程: } MR = \exp(-kt^n) \quad (5)$$

在干燥模型的表达式中:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

式中:  $t$ -干燥时间;  $A, k, n$ -待定系数;  $MR$ -水分比;  $M_t$ -物料在  $t$  时刻的含水量, kg/kg(干基);  $M_0$ -物料的初始含水量, kg/kg(干基);  $M_e$ -物料的平衡含水量, kg/kg(干基)。

由于微波干燥强度比较大, 可假定低糖枇杷果脯在微波干燥条件下的平衡含水量为零, 故将实验中不同时刻物料的干基含水量与初始干基含水量的比作为干燥过程中的水分比, 即:

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

#### 2.2.2 微波干燥数学模型的分析

图 3 为低糖枇杷果脯物料在各微波功率密度 (1 W/g、2 W/g、3 W/g、4 W/g、5 W/g) 下的  $MR-t$  曲线。由图 3 可见, 水分比与干燥时间之间呈现出指数关系。

为了求出与实验数据相吻合的干燥模型, 为此, 先分别对式 (4) 和 (5) 取对数, 得出如下公式

$$\ln(MR) = \ln A - kt \quad (8)$$

$$\ln[-\ln(MR)] = n\ln(t) + \ln k \quad (9)$$

然后, 对低糖枇杷果脯微波干燥数据作出  $\ln(MR)-t$  及  $\ln(t)-\ln(MR)-\ln t$  曲线, 如图 4、图 5 所示。

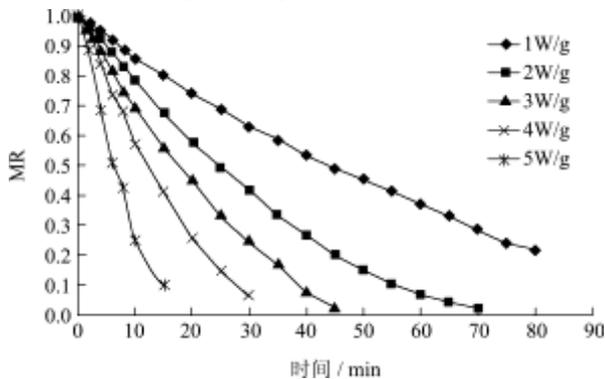


图 3 MR-t 曲线图

Fig.3 MR-t curves

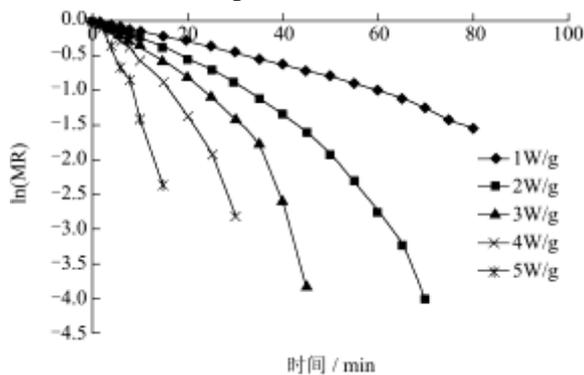


图 4 Ln(MR)-t 曲线图

Fig.4 Ln(MR)-t curves

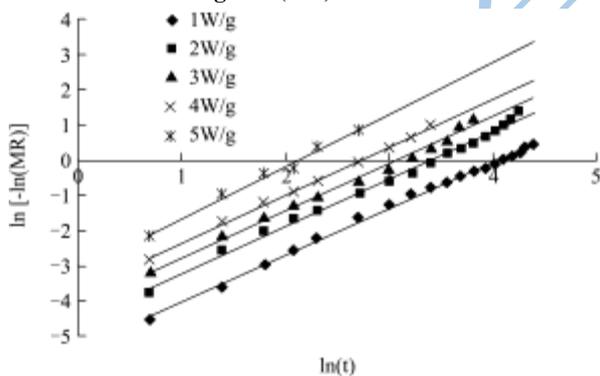


图 5  $\ln[-\ln(MR)]-\ln(t)$  曲线图

Fig.5  $\ln[-\ln(MR)]-\ln(t)$  curves

由图 5 可得出各曲线的回归方程及相关性见表 1。由图 5 可知, 各功率密度下得出的  $\ln[-\ln(MR)]-\ln(t)$  曲线几乎平行, 容易总结其规律, 且以上五组方程都满足方程 (9) 的形式, 说明低糖枇杷果脯的微波干燥过程可以使用模型 (9) 进行描述。

为简化方程, 采用微波功率密度的二次方程来求系数。因此, 令

$$\ln k = a + bP + cP^2 \quad (10)$$

$$n = d + eP + fP^2 \quad (11)$$

式中: P-微波功率密度, W/g; a, b, c, d, e, f-待定系数。

由上述方程组得出 n、k 与 P 的关系见表 2。

表 1 回归方程及相关检验

Table 1 Regression equation and correlation analysis

微波功率密度/(W/g)	回归方程	相关性检验
1	$\ln[-\ln(MR)] = 1.307\ln t - 5.2866$	$R^2 = 0.9975$
2	$\ln[-\ln(MR)] = 1.3474\ln t - 4.5711$	$R^2 = 0.9932$
3	$\ln[-\ln(MR)] = 1.3233\ln t - 4.0542$	$R^2 = 0.9931$
4	$\ln[-\ln(MR)] = 1.3733\ln t - 3.7445$	$R^2 = 0.9959$
5	$\ln[-\ln(MR)] = 1.4775\ln t - 3.1121$	$R^2 = 0.9942$

表 2 n, k 与 P 的关系

Table 2 Relations of n, k and P

P	P <sup>2</sup>	n	lnk	k
1	1	1.3070	-5.2866	0.0051
2	4	1.3474	-4.5711	0.0103
3	9	1.3233	-4.0542	0.0173
4	16	1.3733	-3.7445	0.0236
5	25	1.4775	-3.1121	0.0445

用 SPSS 13.0 for windows 软件进行拟合, 求得各待定系数, 得微波干燥低糖枇杷果脯的干燥失水模型, 结果见表 3。

表 3 低糖枇杷果脯微波干燥失水模型系数

Table 3 Coefficient of model of drying for low Sugared Loquat

模型	$MR = \exp(-e^{(a+bP+cP^2)} \cdot t^{(d+eP+fP^2)})$						
参数	a	b	c	d	e	f	R <sup>2</sup>
拟合值	-5.8931	0.6776	-0.0267	1.3565	-0.0498	0.0144	0.9455

由表 3 可知, 低糖枇杷果脯的微波干燥模型可用 Page 方程  $MR = \exp(-kt^n)$  来描述, 方程中的 k 和 n 受微波功率密度 P 的影响。经回归拟合得出的方程  $MR = \exp(-e^{(a+bP+cP^2)} \cdot t^{(d+eP+fP^2)})$  显著, 可用来对功率密度为 1~5 W/g 之间微波干燥过程中低糖枇杷果脯含水量的变化进行预测。

### 3 结论

通过研究不同微波功率密度对低糖枇杷果脯的干燥特性的影响, 并对微波干燥数学模型进行分析, 可知低糖枇杷果脯的微波干燥模型可用 Page 方程  $MR = \exp(-kt^n)$  来描述, 方程中的 k 和 n 受微波功率密度 P 的影响。经回归拟合得出的方程  $MR = \exp(-e^{(a+bP+cP^2)} \cdot t^{(d+eP+fP^2)})$  显著, 可用来对功率密度为 1~5 W/g 之间微波干燥过程中低糖枇杷果脯含水量的变化进行预测, 式中, a=-5.8931, b=0.6776, c=-0.0267, d=1.3565, e=-0.0498, f=0.0144。该模型的 R<sup>2</sup> 值为

0.9455, 说明其拟合度好。

### 参考文献

- [1] 邱志敏,芮汉明.低糖板栗果脯微波-热风结合干燥技术的研究[J].食品工业科技,2012,33(6):304-308
- [2] 张洁,秦俊哲.果蔬片微波干燥特性及最佳工艺研究[J].食品研究与开发,2005,26(2):60-62
- [3] 张丽影,范小平.数值模拟方法在食品微波干燥机理与过程研究中的应用[J].食品工业科技,2012,33(5):425-429
- [4] 江宁,刘春泉.果蔬微波干燥技术研究进展[J].江苏农业科学,2008,1:216-219
- [5] 张立彦,芮汉明.微波干燥食品技术[J].食品工业,1999,1:45-47
- [6] AE prouzas, et al. Microwave application in Vacuum Drying of fruits [J]. Food engineering, 1996, 128: 203-209
- [7] 罗树灿,李远志.热风和微波结合干燥荔枝加工工艺研究[J].现代食品科技,2006,22(3):10-13
- [8] 李升升,徐怀德.洋葱微波干燥特性研究[J].食品科学,2010,31(11):47-50