

片状食品微波干燥热质传递模型及其干燥特性

冉旭, 吕联通, 刘学文, 王文贤

(四川大学食品科学与工程系, 成都 610065)

摘要: 为了探索片状食品微波干燥规律, 以土豆片为试验模型, 对片状食品进行了微波干燥试验和数值模拟研究, 获得了土豆片温度变化规律和相应的干燥特征曲线; 探讨了微波能水平和切片厚度对干燥过程的影响; 根据热平衡和扩散方程建立相应的模型并采用有限差分法求解, 试验值与模型计算值基本吻合。土豆片微波干燥经历预热、恒温、快速升温 3 个阶段: 在预热阶段物料干燥脱水少; 在恒温阶段物料干燥失去大部分水分; 在快速升温阶段物料干燥速率减小, 其温度快速上升。恒温阶段物料温度随切片厚度和微波能水平增加而增高; 干燥速率不受物料切片厚度变化影响, 但随微波能水平增加而增大。

关键词: 微波干燥; 片状食品; 热质传递; 建模

中图分类号: O532⁺ 23; S377

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)03-0145-04

0 引言

不同于传统热风干燥方法, 微波干燥具有干燥速度快、能量效率高、提高产品质量、易于自动控制等优点, 因而利用微波加热技术对农产品进行干燥前景广阔^[1-3]。微波干燥过程是一个复杂的热量和质量传递过程, 研究微波干燥过程热质传递机理, 建立微波干燥基础理论模型, 对掌握微波干燥过程变化规律, 优化和控制干燥过程参数具有重要作用^[4,5]。近年来, 国内外学者针对片状食品物料微波干燥特性进行了研究。Bouraoui^[6]等对土豆片在微波、微波对流联用和单一对流 3 种干燥方式下的干燥动力学进行了研究, 并用 Fick 扩散模型模拟干燥曲线, 其结果与试验结果相近; Khaishen^[7]等采用半经验方法建立了数学模型来预测不同干燥条件下的片状食品干燥速率, 并指出微波能水平和物料尺寸是影响干燥速率的主要参数。Monzó Cabrera^[8]等人提出了三阶段微波辅助干燥模型用于模拟薄层材料微波干燥过程, 研究表明: 模型能够较好地模拟含水率变化, 但温度变化模拟值与实验结果偏差较大。吕联通^[10]等对板状物料的二维尺寸对物料对干燥速率的影响进行了实验研究, 发现二维尺寸对物料微波干燥速率有显著影响, 并观察到物料厚度对物料温度变化也存在显著影响。这些研究大多着眼于微波功率、物料形状、尺寸、物料参数以及放热给湿条件等对物料干燥速率的影响, 但对微波干燥过程中片状物料温度变化及其影响因素的研究涉及较少, 且微波干燥特性尚不十分清楚。为此, 本文针对片状食品物料, 以土豆片为试验模型, 考察片状食品微波干燥特性并建立计算机模拟微波干燥过程中物料温度和含水率变化的数学模型, 为更好地掌握片状食品物料微波干燥规律以及生产应用提供参考。

1 数学模型

1.1 能量平衡方程

干燥过程中片状食品物料吸收微波能量用于水分蒸发、物料升温和对周围空气的放热三部分。考虑到被干燥的片状食品大多较薄, 其内部液相水分浓度和温度梯度很小^[6,9,11]。因此, 假设薄物料在微波干燥过程中断面上的温度与水分分布是均匀的, 那么可用物料平均温度代替表面温度; 此外假设内部水分直接蒸发且以蒸汽扩散为主, 以平均饱和水蒸气浓度代替表面饱和水蒸气浓度。据此, 从片状物料的整体来看, 简化后的能量平衡方程为

$$\rho C_P L \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = P_L - (P_v + P_h) \quad (1)$$

式中 \bar{T} ——沿物料厚度方向的平均温度, K; P_L ——单位表面吸收的微波功率, W/m²; P_v ——单位面积上的汽化潜热部分热损失, W/m²; P_h ——单位面积上对空气放热部分热损失, W/m²; ρ ——物料密度, kg/m³; C_P ——物料比热, kJ/(kg·K); L ——物料半厚, m。

公式(1)经变换后为:

$$\rho C_P L \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = P_L - [K \gamma (\bar{M}_v - M_v) + h(\bar{T} - T)] \quad (2)$$

式中 K ——物料与空气之间的给湿系数, m/s; γ ——水的汽化潜热, kJ/kg; \bar{M}_v ——沿厚度方向平均饱和水蒸气浓度, kg/m³; M_v ——远离物料表面饱和水蒸气浓度, kg H₂O/m³; h ——对流传热系数, W/(m²K); T ——远离物料表面的空气温度, K。

1.2 质量传递方程

片状物料吸收微波能后, 产生的饱和水蒸气通过扩散达到物料表面, 经表面边界层向周围介质扩散。从物料整体来看, 水蒸气通过物料表面与周围空气进行质量传递的过程, 可用下面质量传递方程表达

$$m_d \frac{\partial M}{\partial t} = -KA(\bar{M}_v - M_v) \quad (3)$$

收稿日期: 2003-11-03

作者简介: 冉旭(1968-), 男, 讲师, 主要从事食品加工与保藏, 成都市一环路南一段24号 四川大学轻纺与食品学院食品科学与工程系, 610065, Email: Ranxu6811@163.com

式中 A —— 片状物料总表面积, m^2 ; m_d —— 干物质质量, kg 。

1.3 饱和水蒸气的温度和浓度关联式

为了求解上述方程, 引入食品物料中饱和水蒸气浓度和温度的关联式^[11]:

$$\frac{M_v}{M_{v0}} = a \left(\frac{T}{T_0} \right)^b \quad (4)$$

根据饱和蒸汽表(1个大气压), 在 275.2 ~ 373.2 K 温度之间通过最小二乘拟合求得: $a = 1.09758$, $b = 14.71089$, $R^2 = 0.999$ 。

1.4 质热参数的计算式

质热参数随干燥过程中温度和水分的而变化, 各时刻参数值按下面所列公式计算。

物料比热:

$$C_p = C_w M + C_d (1 - M) \quad (5)$$

式中 C_w —— 水的比热, $kJ/(kg \cdot K)$; C_d —— 干物质的比热, $kJ/(kg \cdot K)$; M —— 湿基含水率, %。

物料密度(假设干燥过程中物料无收缩):

$$\rho = \frac{m}{m_0} \rho_0 \quad (6)$$

式中 m —— 某时刻物料质量, kg ; m_0 —— 初始时刻物料质量, kg ; ρ_0 —— 初始时刻物料密度, kg/m^3 。

在微波腔中, 物料吸收微波能量难于准确预测。笔者研究发现土豆片吸收微波能量随水分含量降低呈指数减小。物料吸收微波功率采用下面经验式表达^[11]:

$$P_L = P_{L0} \eta^{(1 - \frac{M_d}{M_{d0}})} \quad (7)$$

式中 P_{L0} —— 初始时刻物料吸收微波功率, kW/m^2 ; η —— 试验决定的参数; M_d —— 在时刻 t 时干基含水率, %; M_{d0} —— 初始时刻干基含水率, %。

表面给湿系数 K 随含水率变化按下面经验式表达^[11]:

$$K = K_0 \left(\frac{M_d}{M_{d0}} \right)^\xi \quad (8)$$

式中 K_0 —— 初始时刻表面给湿系数, m/s ; ξ —— 试验决定的参数。

干基含水率 M_d :

$$M_d = \frac{M}{1 - M} \quad (9)$$

式中 M —— 某时刻物料湿基含水率, %。

表面给湿系数 K 按下式估算^[11]:

$$K = \frac{D_v b h^{b-1} (T_s - T_v)}{k (T_s^b - T_v^b)} \quad (10)$$

2 计算机模拟和确定 η, ξ

2.1 计算机模拟

对每一时间间隔 $t_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$, 由公式(2)、(3)可推出片状物料微波干燥过程中平均温度和含水率计算机模拟计算式

$$\begin{aligned} \bar{T}_{i+1} = \bar{T}_i + \frac{1}{\rho_i C_p L} \{ P_{Li} - [K_i Y (\bar{M}_{vi} - M_v)] + \\ h(\bar{T}_i - T_v) \} \Delta t \quad (11) \end{aligned}$$

$$M_{d(i+1)} m_d = M_d m_d - K_i (\bar{M}_{vi} - M_v) A \Delta t \quad (12)$$

式中 m_d —— 干物质质量, kg ; A —— 片状食品物料的总表面积, m^2 ; Δt —— 时间增量, s ; $t = 0$ 时, $\bar{T} = T_0$, $P_L = P_{L0}$, $K = K_0$, $M = M_0$, $M_d = M_{d0}$, $P_{L0} = 650 W$ 。

2.2 确定 η, ξ

为了描述微波干燥中温度和含水率变化, 公式(7)和(8)中参数 η, ξ 值被调整至温度和含水率实测值与按公式(11)、(12)计算的温度和含水率值之间的均方差 ($\Delta S_{\bar{T}}$ 和 $\Delta S_{\bar{M}_d}$) 最小。 $\Delta S_{\bar{T}}$ 和 $\Delta S_{\bar{M}_d}$ 分别定义为

$$\Delta S_{\bar{T}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{T}_i - \bar{T}_i)^2}{n-1}} \quad (13)$$

$$\Delta S_{\bar{M}_d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{M}_{di} - \bar{T}_{di})^2}{n-1}} \quad (14)$$

式中 $\bar{T}_i (K)$ —— t_i 时刻对于选取的 η 按公式(11)计算的平均温度; $\bar{M}_{di} (%)$ —— t_i 时刻对于选取的 ξ 按公式(12)计算的平均含水率; $\bar{T}_i (K)$ —— t_i 时刻试验测定的平均温度; $\bar{M}_{di} (%)$ —— t_i 时刻试验测定的平均含水率。

3 试验材料与方法

3.1 试验材料及主要仪器

市售土豆; 改造的 WBG650 微波炉: 南京三乐电器厂(工作频率 2450 hz, 输出功率 650 W); 光纤温度计及温度记录仪: 中国电子科技大学(精度 0.1); DT-500 型电子天平: 常熟市衡器厂(精度 0.1 g); 101-III 型电热鼓风干燥箱: 上海实验仪器厂。

3.2 试验方法

首先将土豆削皮后, 切成 2、4 和 6 mm 的外径 65 mm、内径 25 mm 的圆环薄片, 试验前, 微波炉用 400 mL 水在功率 650 W 下预热 30 min, 土豆片分三层均匀放置在搁物架上置于已预热的微波腔体内。将光纤温度计插入土豆片测量温度(测温点通过预备试验和误差分析确定, 测定的温度基本能代表每批试样平均温度), 电子天平测定试样质量变化求得试样含水率。当试样含水率达到 7% ~ 10% (干基) 时终止微波加热。每批试验重复 3 次, 取 3 次的算术平均值。微波干燥试验条件见表 1。

表 1 试验方案和数据

Table 1 Experimental scheme and data

试验号	试样质量 /g	微波能水平 /W · g ⁻¹	试样厚度 /cm	η	ξ
1	180	3.7	0.2	1.83	0.64
2	180	3.7	0.4	2.01	0.60
3	180	3.7	0.6	2.12	0.56
4	240	2.7	0.2	1.72	0.66
5	240	2.7	0.4	1.98	0.59
6	240	2.7	0.6	2.03	0.54
7	300	2.2	0.2	1.62	0.65
8	300	2.2	0.4	1.79	0.62
9	300	2.2	0.6	1.86	0.57

4 结果与讨论

4.1 参数 η ξ

根据试验测定的温度和含水率值, 经计算确定不同试验条件下对应的 η ξ 值见表 1。由表 1 可以看出, 参数 η 随试样切片厚度和单位质量试样吸收微波功率的增加而增加。参数 ξ 随样品厚度的增加而减小, 但几乎不受微波功率/质量比的影响。

4.2 模拟计算与实测比较

按公式(19)、(20)进行计算机模拟数值计算, 其中参数取值: $C_p = 3.56 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})^{[11]}$, $C_w = 4.18$

$\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})^{[11]}$, $C_d = 1.67 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})^{[11]}$, $D_v = 0.2 \text{ cm}^2/\text{s}^{[11]}$, $\rho_0 = 1.06 \text{ g}/\text{cm}^3^{[11]}$, $h = 2.4 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})^{[11]}$, $k = 5.54 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})^{[11]}$, $M_v = 1.54 \times 10^{-4}^{[11]}$, $T_0 = 291 \text{ K}$, $T = 335 \text{ K}$, $Y = 2250 \text{ kJ}/\text{kg}$, $\Delta t = 1 \text{ s}$ 。图 1~ 6 显示, 干燥后期快速升温阶段温度实测值与计算结果出现较大偏差外, 其它阶段温度和含水率实测值与模拟计算值吻合较好。后期温度偏差可能是由于忽略了温升对物料微波加热介电性质的影响。

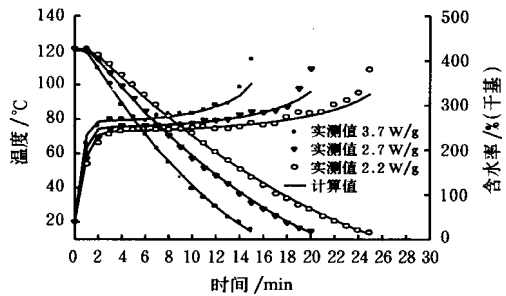


图 1 不同微波功率/质量下土豆片温度和含水率的变化(切片厚度 2 mm)

Fig. 1 Temperature and moisture content changes of samples with the same thickness of 2 mm at different microwave power/mass ratios

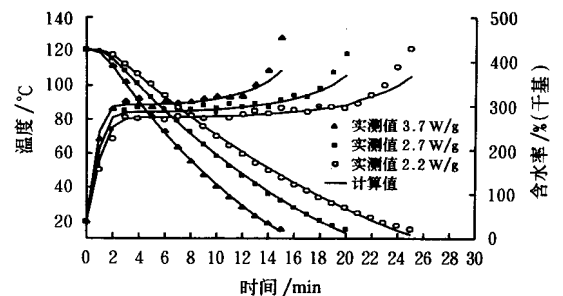


图 2 不同微波功率/质量下土豆片温度和含水率的变化(切片厚度 4 mm)

Fig. 2 Temperature and moisture content changes of samples with the same thickness of 4 mm at different microwave power/mass ratios

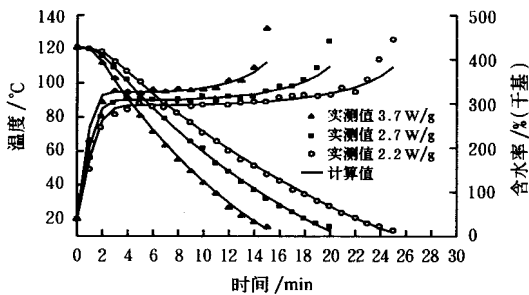


图 3 不同微波功率/质量下土豆片温度和含水率的变化(切片厚度 6 mm)

Fig. 3 Temperature and moisture content changes of samples with the same thickness of 6 mm at different microwave power/mass ratios

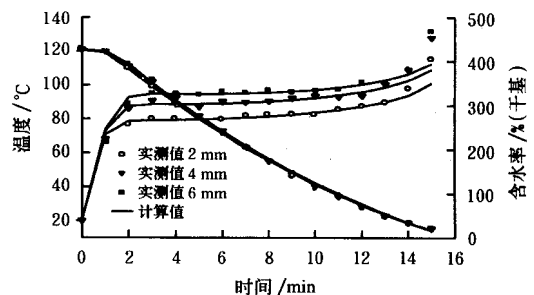


图 4 不同切片厚度的土豆片温度和含水率的变化(微波功率/质量 3.7 W/g)

Fig. 4 Temperature and moisture content changes of samples with the different thicknesses at microwave power level of 3.7 W/g

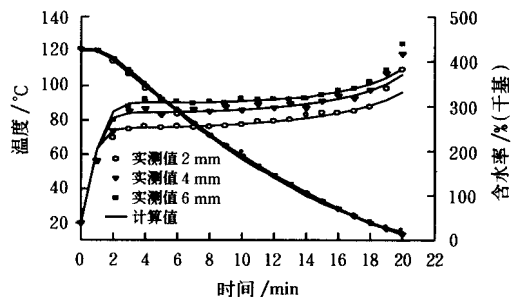


图 5 不同切片厚度土豆片温度和含水率的变化(微波功率/质量 2.7 W/g)

Fig. 5 Temperature and moisture content changes of samples with the different thicknesses at microwave power level of 2.7 W/g

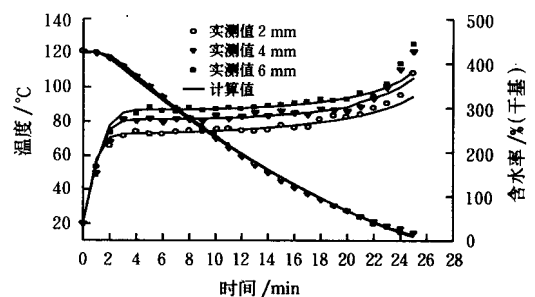


图 6 不同切片厚度土豆片温度和含水率的变化(微波功率/质量 2.2 W/g)

Fig. 6 Temperature and moisture content changes of samples with the different thicknesses at microwave power level of 2.2 W/g

4.3 土豆片微波干燥特性

从图 1~6 可知,微波干燥土豆片温度变化经历 3 个明显阶段:预热升温、恒温和快速升温。在恒速升温阶段土豆含水率变化很小,物料干燥脱水少,物料吸收的微波功率绝大部分用于物料预热升温;物料干燥脱水大部分发生在恒温阶段,干燥速率最大,物料吸收的微波功率主要用于水分蒸发;快速升温阶段试样干燥速率逐渐减小,物料吸收的微波功率主要用于物料快速升温。

4.3.1 不同微波功率/质量比对干燥特性的影响

图 1~3 显示,对于相同切片厚度试样,微波功率/质量比越大,达到恒温期的起始温度越高,而恒温持续时间越短;达到同样含水率值,所需干燥时间越短。此结果表明单位质量物料吸收微波能量是控制产品温度和干燥速度的主要因素。此外当含水率降低大约 80% (干基)时,试样温度开始加速升温,特别是在较高的功率/质量比情况下,常出现试样局部碳化。因此,建议在此阶段降低微波功率水平来避免高温造成的产品质量恶化。

4.3.2 不同物料切片厚度对干燥特性的影响

由图 4~6 可以看出,在相同微波功率/质量比下,不同切片厚度试样含水率变化曲线基本无差异,表明试样微波干燥速率不受试样切片厚度影响,干燥脱水主要是由吸收的微波能所控制。然而试样切片厚度愈厚,其温度愈高,不同试样切片厚度对温度变化曲线有显著的影响。这可能是由于同等质量物料切片厚度愈厚,物料对流冷却表面积愈小,因而在较厚的样品中,传递同样的热量(吸收的微波功率),需要较高的温度梯度。试验还观察到 6 mm 试样褐变程度大于 2 mm 和 4 mm 试样。因此降低干燥物料厚度有利于提高产品品质。

5 结论

1) 所建数学模型能较好地模拟片状物料在微波干燥过程中温度和含水率变化。

2) 微波干燥过程中片状物料温度变化经历预热、恒温和快速升温 3 个阶段。在预热升温阶段试样温度迅速上升,物料干燥脱水少;试样干燥脱水大部分发生在

恒温阶段,干燥速率最大;快速升温段,干燥速度逐渐降低而温度快速上升甚至造成局部碳化。

3) 在 2~6 mm 厚度范围内,干燥速率不受切片厚度影响,但随微波功率/装载量增加而增大,产品温度随切片厚度和微波功率增加而增大。

[参 考 文 献]

- [1] Schiffmann R F. Microwave processing in the U. S. food industry[J]. Food Technology, 1992, 46: 50- 56
- [2] Deiese J. Advances in microwave food processing [J]. Food Technology, 1992, 46: 118- 123
- [3] Rosenberg U, Bogl W. Microwave thawing, drying and baking in the food industry[J]. Food Technology, 1987, 41: 85- 91
- [4] Ashim K D. Heat and mass transfer in the microwave processing of food [J]. Chemical Engineering Progress, 1990, 36: 47- 53
- [5] Mudgett R. Electromagnetic energy and food processing [J]. Microwave Power Electromagnetic Energy, 1988, 23: 225- 300
- [6] Bouraoui M, Richard P, Durance T. Microwave and convective drying of potato slices [J]. Food Process Engineering, 1994, 17: 353- 363
- [7] Khraisheh M A M, McMinn W A M, Magee T R A. A multiple regression approach to the combined microwave and air drying process [J]. Food Engineering, 2000, 43: 243- 250
- [8] Monzó Cabrera J, Catalá Civera J M, Díez Morcillo A, et al. A three-stage microwave-assisted drying model based on the dielectric properties of laminar materials: Theoretical development and validation [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 32: 465- 469
- [9] Lyons D W, Hatcher J D. Drying of a porous media internal heat generation [J]. Heat & Mass Transfer, 1992, 15: 897- 905
- [10] 范小梅, 吕联通. 物料二维尺寸对微波干燥速率影响研究 [J]. 成都科技大学学报, 1992 (增刊): 138- 142
- [11] 冉旭. 片状食品微波干燥温度和速度的研究 [D]. 成都: 四川大学, 1997.

Modeling of heat and mass transfer and drying characteristics of sliced food with microwave drying

Ran Xu, L Ü Liantong, Liu Xuewen, Wang Wenxian

(Department of Food Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract In order to understand the behavior of sliced food during microwave drying, the microwave drying characteristics of sliced food were investigated experimentally and numerically using potatoes as test samples. The temperature variations and drying characteristic curves during the drying process were obtained. The effects of sample thickness and microwave power level on the drying process were discussed. Using heat balance and diffusion theory, the modeling equations for temperature and moisture changes were developed and solved, which gave the results in good agreement with the experimental ones. It indicates that sliced food experienced three periods during microwave drying: a pre-heating period with little removal of moisture, a constant temperature period in which most moisture loses and food temperature depends on microwave power level and sample thickness, and a quick heating period with drying rate dropping off and sample temperature rising rapidly. It is also found that drying rate increases with the microwave power levels, but is not affected by sample thickness.

Key words: microwave drying; sliced food; heat and mass transfer; modeling