

远红外真空干燥胡萝卜片过程中温度变化和模型

蒋焕新, 胡洁, 崔政伟

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 优化设计了果蔬远红外真空干燥设备, 建立了胡萝卜片在远红外真空干燥过程中温度变化的数学模型, 在自制设备上对模型进行了验证, 反映了胡萝卜片远红外真空干燥的温度变化规律。

关键词: 远红外真空干燥; 温度; 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—1100—05

Temperature Changes during the Process of Far Infrared Vacuum Drying of Carrots Slices

JIANG Huan-xin, HU Jie, CUI Zheng-wei

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A lab Far-infrared vacuum dryer was designed and fabricated. The temperature changes during the process of far infrared vacuum drying were investigated taking carrot slices as test material. The mathematics model of temperature change for drying of carrot slices was established and validated.

Keywords: far infrared vacuum drying, temperature, mathematical model

果蔬是人民生活的必需品, 脱水果蔬比新鲜果蔬更方便贮存。随着人们生活节奏加快、生活质量的提高, 以脱水果蔬为代表的绿色食品越来越被人们所认识和喜爱^[1-4]。果蔬干燥处理要尽可能地保证产品不被污染, 营养成分不损失, 最大限度的保留果蔬的色、香、味和维生素等热敏性成分或生理活性成分, 力求保持鲜嫩、营养、方便、可口。目前, 在脱水干燥果蔬的加工中应用的技术主要有常压热风技术、微波干燥技术、真空脱水干燥技术、真空冷冻干燥技术及远红外真空干燥技术等^[5-7]。

远红外干燥是利用远红外辐射元件发出的远红外线被物料吸收直接转变成热能而达到的加热干燥目的的一种干燥方法。其主要优点是干燥时间短、热效率高、热损失小、加热引起食物材料的变化损失小, 最终产品品质较好^[8-12]。远红外真空干燥是在真空室内进行的一种远红外干燥, 干燥室内处于负压状态, 此时果蔬内部水分的沸点降低, 更易蒸发, 并在压差和湿度梯度作用下加速了扩散。作者介绍了优化设计的果蔬远红外真空干燥设备, 以胡萝卜片为材料, 研究了切片果蔬远红外真空干燥过

收稿日期: 2011-12-01

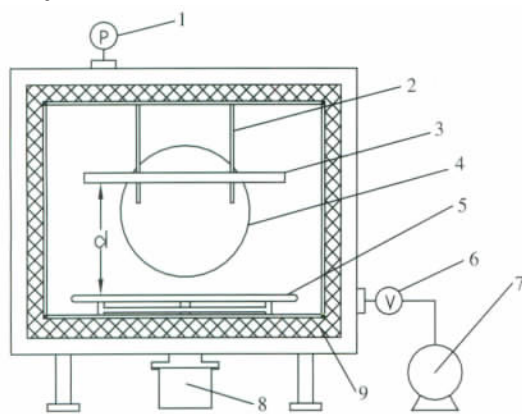
基金项目: 江南大学创新团队发展计划项目(2009CXTD01)。

作者简介: 蒋焕新(1966-), 男, 江苏无锡人, 工学硕士, 讲师, 主要从事食品加工与包装装备技术方面的研究。E-mail: jhx05@263.net

程中温度分布和变化的规律,并建立了相应的数学模型。

1 果蔬远红外真空干燥设备的设计

为了研究远红外真空干燥技术在果蔬干燥方面的应用,并对其过程进行数学模拟,研究得出最佳的干燥工艺参数组合,设计制造了实验室用远红外真空干燥实验箱,箱体结构和实体图见图1。该设备主要由圆形的远红外加热板、真空系统及控制系统3个部分组成。试验箱长360 mm,宽340 mm,高260 mm。



1-真空表, 2-调距杆, 3-远红外发射板, 4-视镜, 5-转盘, 6-球阀, 7-真空泵, 8-电机, 9-保温材料

图1 远红外真空干燥实验设备

Fig.1 Lab-scale far-infrared-vacuum dryer

该设备物料盘可以带动物料在实验箱内随转盘一起转动,使得干燥过程中辐射较均匀;干燥箱内能达到较高的真空度并且真空度大小可调;设备有视镜可实时观察物料的干燥情况,且视窗的视镜能承受箱内的高温;另外辐照距离和远红外辐射板的功率可根据需要进行调解,有利于对远红外真空干燥工艺参数进行研究。

2 远红外真空干燥温度变化数学模型的建立

远红外真空干燥过程中食品所受的温度大小对干燥产品的品质具有重要的影响,一般温度在60℃以上时,食品中的维生素、胡萝卜素、叶绿素以及其它一些生物活性物质均会发生破坏或降解,因而干燥食品的品质与干燥温度紧密相关。

远红外真空干燥是通过辐射的方式进行的加热,干燥过程中热源与被加热物体没有直接的接触,所以干燥过程中的温度分布和变化不能直接由

远红外板的温度来确定,所以需要对远红外真空干燥过程中温度的分布和变化趋势进行研究以预示其干燥过程中物料温度的分布和变化。

远红外真空干燥过程中物料的热量平衡方程可以写成:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - m r_p + W(X_w, z, t) \quad (1)$$

式中 ρ 为加热物料的密度, kg/m^3 ; c_p 为加热物料的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为加热物料的温度, $^{\circ}\text{C}$; x 为物料的厚度, m ; r_p 为水的汽化潜热, J/kg ; m 水的蒸发速率, kg/s ; k 为加热物料的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; W 为微波功率密度, W/m^3 。

实验发现,物料干燥过程均可分为3个阶段。第一个阶段为物料的预热阶段,含水率大于90%,在该阶段主要是使物料升温,没有相变,时间非常短,直到物料中的水分温度升高到其饱和温度,之后水分便开始以气态形式转移到空气中去。即输入远红外真空干燥系统的有效热量 Q 全部用来使物料的温度升高,于是

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{\rho c_p} \quad (2)$$

其中输入远红外真空干燥系统的有效热量 Q 可以表示为输入功率和时间的乘积,于是在干燥过程中的第一个阶段有

$$T = \frac{Wt}{\rho c_p} + T_0 \quad (3)$$

第二个阶段为等速干燥阶段,在该段时间内温度基本保持不变,且物料表明的温度就等于空气的温度。物料的中心温度高于物料的表面温度,物料内部存在着恒定的温差。在同一干燥过程中,干燥条件恒定时等速阶段的推动力 ΔT 也是一个定值,则有

$$\frac{dT}{dt} = 0 \text{ 或 } T = T_e \text{ 常数} \quad (4)$$

T_e 为水的饱和蒸汽温度,即在等速干燥阶段,温度不随时间变化。

第三个阶段降速阶段,此时含水率在40%以下。在降速阶段开始后,由于干燥速率逐渐减小,空气传给物料的热量,除作为汽化水分用之外,还有一部分将使物料的温度升高,直至最后接近于空气的温度。在这期间,物料表面与中心温度差也逐渐减小,直至最后消失。在降速阶段初期,物料内部水分仍然扩散至表面,并且在表面汽化。随着物料湿

含量的不断减少,内部水分扩散至表面的速度也逐渐减小,直到它小于表面汽化速度时,物料的汽化区即开始从表面深入物料内部。这时,水分在物料内部先行汽化,然后以蒸汽的形式扩散至表面。对于降速阶段的情况比等速段复杂,采用近似计算,认为

$$T=a_1+a_2W+a_3P+a_4t+a_5t^2+a_6t^3 \quad (5)$$

其中 W 为远红外真空干燥功率密度, P 为真空度, t 为时间。

于是在远红外真空状态下,胡萝卜片在干燥过程中的温度可以表示为:

$$T = \begin{cases} T = \frac{Wt}{\rho c_p} + T_0 & (M_R > 90\%) \\ T = T_e & (40\% < M_R < 90\%) \\ T = a_1 + a_2W + a_3P + a_4t + a_5t^2 + a_6t^3 & (M_R < 40\%) \end{cases} \quad (6)$$

3 远红外真空干燥温度变化数学模型的验证

3.1 实验材料与仪器

3.1.1 材料 市售胡萝卜。

3.1.2 仪器 自制实验室用远红外真空干燥实验箱;16通道热电偶温度测量仪,型号 XMD-16,精度 $\pm 0.25\% \cdot ^\circ\text{C}$;电子天平,型号 ARB120,精度 $\pm 0.01 \text{ g}$ 。

3.2 实验方法

将胡萝卜清洗干净后,晾干至表面没有自由水,切成厚度约为 4 mm 的薄片,取一定质量的物料,平铺于物料盘上,放入远红外真空干燥箱进行干燥。干燥过程中每隔 15 min 称重一次(扣除称重和抽放真空时间),根据物料重量换算成物料的含水率,直至湿基含水率 $\leq 10\%$ 左右为止。每隔 15 min 将物料取出迅速测量胡萝卜片的中心温度和表面温度,每次测试 5 个点,然后用电子天平称质量,整个测试过程在 1 min 内完成,显热的损失与 15 min 内吸收的红外辐射能相比很小。物料中心温度、表面温度采用热电偶测量。样品取出的时间内热量的损失不计。采用的远红外功率为 400 W 和 600 W,真空度为 0.07、0.075、0.079 MPa。每次实验重复 3 次,含水量及温度取平均值。

3.3 实验结果

由图 2、图 3 可以看出,在含水率为 40%~90% 之间时,物料的温度基本保持不变。且随着真空度的增大,等速阶段样品的温度越低。这是因为真空度越高时,对应的真空压力值越小,水的汽化温度越低。查得水在真空度为 0.07、0.075 和 0.079 MPa

时(对应于真空压力值为 0.03、0.025、0.021 MPa)水的饱和蒸汽温度 T_e 为 69.13、65.01、60.1 $^\circ\text{C}$,可以看出,在相同的真空条件下,样品温度与该温度值基本相同,可以认为在等速干燥阶段被干燥物料的温度等于该压力条件下水的饱和蒸汽温度 T_e 。

由图 2、图 3 还可以看出,在相同的真空度下,干燥的功率密度 W 越大,干燥速度越快,在降速干燥阶段温度上升的速度也越快,干燥的温度曲线比 W 小时更陡峭。这是因为在降速干燥期,物料的含水量减小,相同的干燥功率下,被干燥物料的质量变少,温度升高速度加快。

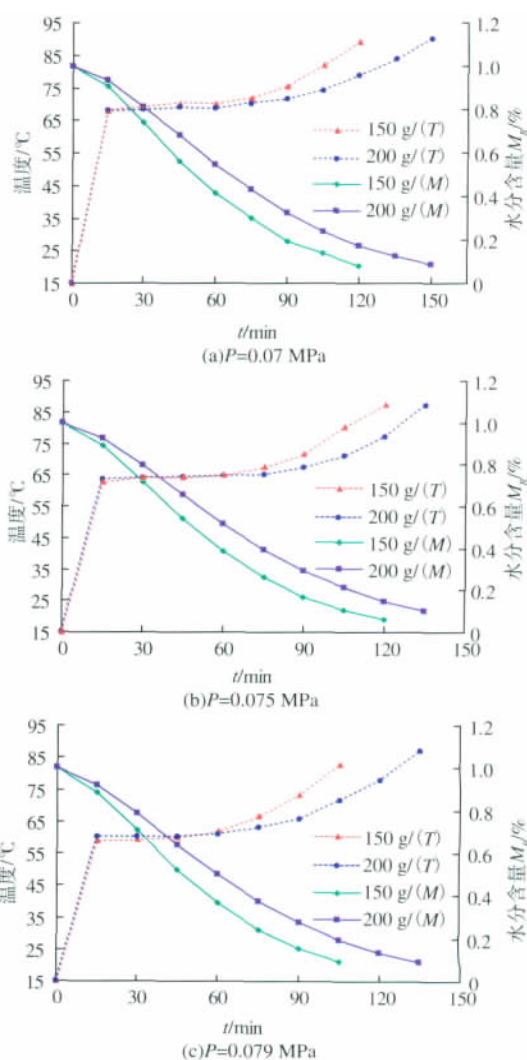


图 2 在不同的初始质量和真空度下,4 mm 胡萝卜片干燥过程中温度和水分含量的变化(远红外功率为 400 W,辐照距离为 155 mm)

Fig.2 Temperature and moisture content changes during drying of 4 mm carrot slices having different initial weights at different vacuum pressure

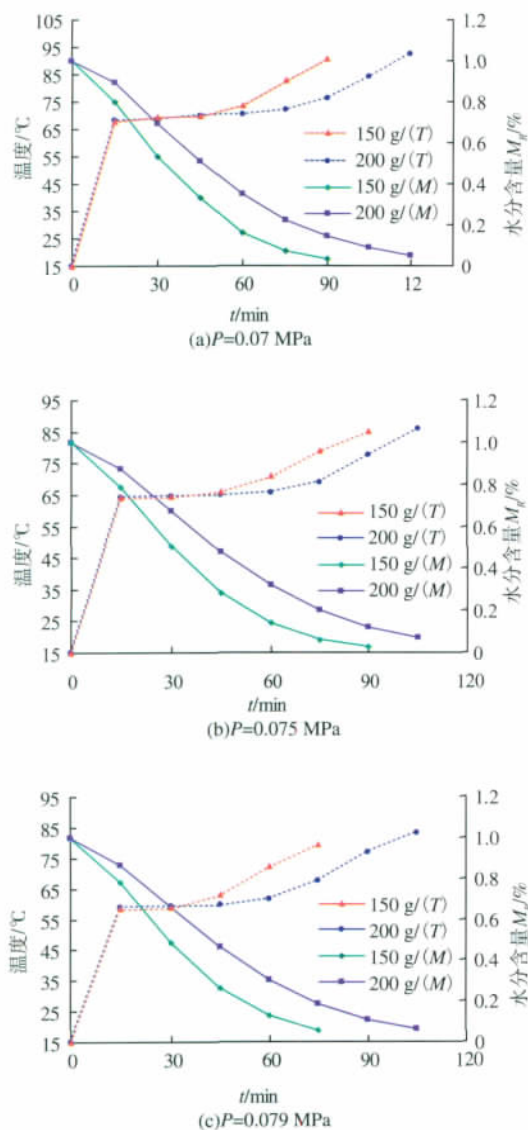


图3 在不同的初始质量和真空度下,4 mm 胡萝卜片干燥过程中温度和水分含量的变化 (远红外功率为 600 W,辐照距离为 155 mm)

Fig.3 Temperature and moisture content changes during drying of 4 mm carrot slices having different initial weights at different vacuum pressure

通过对式(5)进行多元线性回归,可得到参数 $a_1=62.941\ 03$, $a_2=7.425\ 59$, $a_3=-459.273\ 06$, $a_4=0.166\ 94$, $a_5=0.002\ 04$, $a_6=-0.000\ 007\ 33$,

由方差分析可得: $S_r=4\ 445.286\ 51$, $S_e=434.237\ 23$, 其 F 值为 116.70, $p<0.000\ 1$, 说明方程高度显著。参数 a_1, a_2, a_3 的 p 值均小于 0.000 1, 说明干燥功率密度 W 、真空度 P 对温度影响显著。 a_3 为负值, 说明真空度 P 与温度负相关, 即真空度越大, 对应的温度越小, 均与实验分析相符合。即式(5)为

$$T=62.941\ 03+7.425\ 59W-459.273\ 06P+0.166\ 94t+0.002\ 04t_2-0.000\ 007\ 33t^3 \quad (7)$$

由图4可以看出,理论曲线和实验曲线能较好的贴合在一起,说明得到的数学模型能较好的描述远红外真空干燥温度的变化规律。

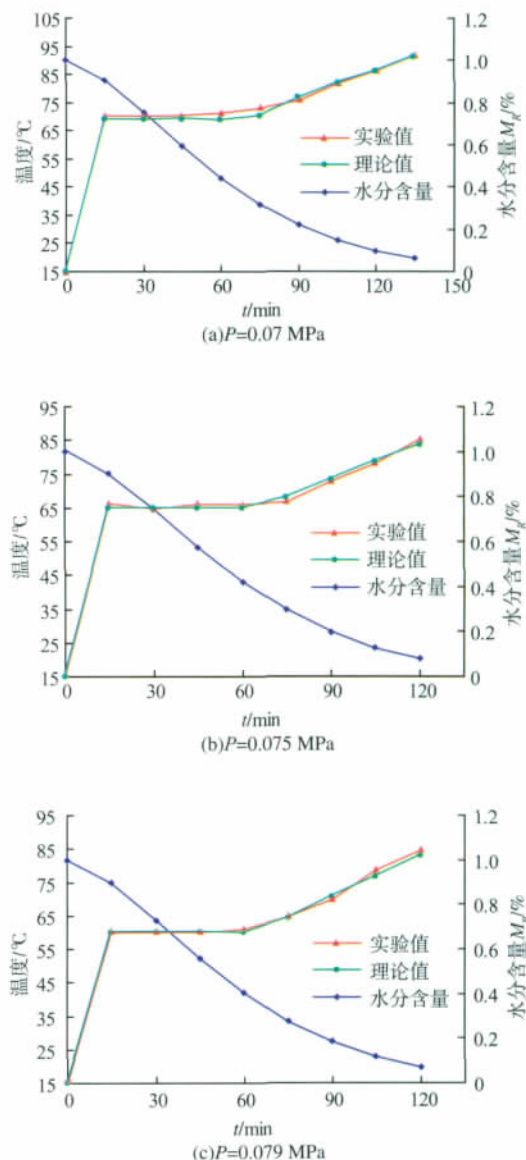


图4 远红外干燥功率密度为 2.5 W/g 时,不同真空压力下胡萝卜片的理论和实验干燥温度曲线 (远红外干燥功率为 400 W,辐照距离为 155 mm,物料初始质量为 160 g)

Fig.4 Temperature curves of carrot slices at examined vacuum pressure having its far infrared drying power density at 2.5 W/g

综上所述,远红外真空干燥胡萝卜片的干燥过程中温度 T 可以用下面的数学模型预测:

$$T = \begin{cases} T = \frac{pt}{cm} + T_0 & (M_R > 90\%) \\ T = T_e & (40\% < M_R < 90\%) \\ T = 62.941\ 03 + 7.425\ 59W - 459.273\ 06P + \\ \quad 0.166\ 94t + 0.002\ 04t^2 - 0.000\ 007\ 33t^3 & (M_R < 40\%) \end{cases} \quad (8)$$

4 结 语

作者通过设计制造实验室用远红外真空干燥实验箱,对远红外真空干燥过程中温度的变化进行了理论分析,并建立了相应的数学模型,且对模型

进行了验证,能较好的反映远红外真空干燥的温度变化规律。远红外真空干燥的理论分析和实验验证都表明,干燥过程中温度变化主要可以分为3个阶段,即物料的预热阶段、等速干燥阶段和降速干燥阶段。在第一阶段物料吸收的热量使物料温度快速升高,其变化规律取决于干燥的功率密度和干燥时间;在第二阶段中,温度基本保持不变且主要决定于相应的真空压力下的水的饱和蒸汽温度,其变化规律为真空度越大,温度越低;第三阶段中物料温度快速升高,其变化规律取决于外部的干燥条件,即远红外真空干燥功率密度和真空度等。远红外真空干燥温度的数学模型基本适用于其它切片水果和蔬菜的薄层干燥。

参考文献:

- [1] 张慙. 我国果蔬速冻及干燥加工的现状与发展[J]. 食品与机械, 2000(6):4-5.
ZHANG Min. Status and development of fast freezing and drying processing of fruits and vegetables in China [J]. **Food & Machinery**, 2000(6):4-5. (in Chinese)
- [2] 葛毅强, 陈颖, 张振华. 国内外果蔬加工业发展趋势[J]. 保鲜与加工, 2005, 5(2):1-3.
GE Yi-qiang, CHEN Ying, ZHANG Zhen-hua. Development of fruit, vegetable and characteristic resources processing industry of China[J]. **Storage and Process**, 2005, 5(2):1-3. (in Chinese)
- [3] 黄劲松. 脱水蔬菜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2006(4):203-206.
HUANG Jin-shong. Progress of dehydration vegetables [J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2006 (4):203-206. (in Chinese)
- [4] 王俊. 远红外与热风混合干燥香菇的质热特性研究[J]. 农业工程学报, 1998(4):257-258.
WANG Jun. Study on the character of heat and mass transfer of combined for infrared and hot air drying of mushroom[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 1998(4):257-258. (in Chinese)
- [5] 张慙, 张鹏. 食品干燥新技术的研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(2):115-119.
ZHANG Min, ZHANG Peng. Progress of new food drying technology [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2006, 25(2):115-119. (in Chinese)
- [6] T M Afzal, T Abe. Diffusion in potato during far infrared radiation drying[J]. **Journal of Food Engineering**, 1998(37):353-365.
- [7] T M Afzal, T Abe. Simulation of moisture changes in barely during far infrared radiation drying [J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2000(26):137-145.
- [8] Naret Meeso, Adisak Nathakarakule, Thanid Madhiyanon, et al. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying[J]. **Journal of Food Engineering**, 2004(65):293-301.
- [9] Naret Meeso, Adisak Nathakarakule, Thanid Madhiyanon. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process[J]. **Journal of Food Engineering**, 2007(78):1248-1258.
- [10] N Shilton, P Mallikarjunan, P Sheridan. Modeling of heat transfer and evaporative mass losses during the cooking of beef patties using far-infrared radiation[J]. **Journal of Food Engineering**, 2002(55):217-222.
- [11] F Tanaka, P Verboven, N Scheerlinck. Investigation of far infrared radiation heating as an alternative technique for surface decontamination of strawberry[J]. **Journal of Food Engineering**, 2007(79):445-452.
- [12] Chatchai Nimmol, Sakamon Devahastin, Thanit Swasdisevi. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying[J]. **Applied thermal Engineering**, 2007(27):2483-2494.