

胡萝卜薄层干燥动力学模型研究

种翠娟, 朱文学*, 刘云宏, 吴建业, 樊金玲, 罗磊
(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 为探索胡萝卜热风干燥过程中水分的变化规律, 本研究以胡萝卜为干燥对象, 进行薄层干燥特性及模型研究, 探讨不同温度、风速及物料厚度条件下胡萝卜水分比与干燥时间的关系, 建立动力学模型; 以Fick扩散定律为依据, 确定胡萝卜一维传热传质的有效水分扩散系数并建立其数学模型。结果表明: 胡萝卜薄层干燥动力学模型可用Page方程来描述, 并通过回归分析确定方程系数 m 、 k , 通过多元线性回归方法得到有效水分扩散系数(D_{eff})与温度、风速和厚度的表达式, 实验得到的 D_{eff} 值在 $0.84 \times 10^{-9} \sim 6.69 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内随着干燥温度、风速和物料厚度的升高而增大。

关键词: 胡萝卜; 干燥; 动力学模型; 水分扩散系数

Dynamic Modeling of Thin Layer Drying of Carrots

CHONG Cui-juan, ZHU Wen-xue*, LIU Yun-hong, WU Jian-ye, FAN Jin-ling, LUO Lei
(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The thin layer drying characteristics of carrot slices were investigated and moisture content (relative to dry matter) was modeled as a function of drying time under different conditions of temperature, air flow rate and sample thickness. Meanwhile, based on Fick's diffusion law, the effective diffusion coefficients of water (D_{eff}) in carrots were calculated and modeled as well. Results showed that the thin layer drying kinetics of carrots could be described by the Page equation, the coefficients of equation were obtained through regression analysis, and the equations of D_{eff} vs. air temperature, air flow rate and sample thickness were obtained by multiple linear regression. The experimentally observed D_{eff} values increased from 0.84×10^{-9} to $6.69 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ with increasing drying temperature, air flow rate and sample thickness.

Key words: carrot; drying; dynamic modeling; moisture diffusion coefficient

中图分类号: TS205.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2014) 09-0024-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201409006

胡萝卜含有丰富的营养成分、无机盐类及氨基酸等^[1-2], 具有很高的营养价值和多种保健功效, 被誉为“土人参”^[3-4], 深受消费者喜爱。胡萝卜的干燥方式多种多样, 但热风干燥仍是目前普遍使用的干燥技术^[4-6]。热风干燥作为传统的干燥方法, 是用加热后的空气作媒介, 将物料进行加热以促进水分的蒸发, 具有热效率高, 干燥速率快, 设备结构简单、投资少、适应性强、操作和控制简单, 卫生条件较好等优势。但由于物料长时间与高温空气接触, 容易导致干制品色泽褐变及营养成分损失^[7-8]。为有效提高干燥产品的品质, 优化干燥工艺, 有必要使用数学模型来模拟不同干燥条件下的干燥过程。目前, 常用半经验、经验模型描述干燥过程物料中平均含水率的变化情况^[9-13]。要进一步分析和体现物料内部水分的扩散过程, 需确定物料内部水分的有效扩散

系数^[14-16], 它反映物料在一定干燥条件下的脱水能力, 也是干燥工艺优化的重要指标之一。

本研究通过对数转化与线性回归, 求得Page模型^[17-20]的参数及相关系数, 并以Fick定律^[20-21]为依据, 得到胡萝卜沿轴向的水分扩散系数值。实验目标: 1) 分析风速、温度、切片厚度等参数对干燥特性的影响; 2) 利用回归分析得到动力学模型; 3) 利用DPS软件通过多元线性回归分析, 获得胡萝卜有效水分扩散系数模型。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

胡萝卜, 购于当地超市, 要求新鲜无损伤。

MP4000B型电子秤 (精度0.01 g) 上海第二天

收稿日期: 2013-04-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31171723)

作者简介: 种翠娟 (1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工。E-mail: 905497479@qq.com

*通信作者: 朱文学 (1967—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工。E-mail: zwx@mail.haust.edu.cn

平厂; BK150型游标卡尺 上海申工量具有限公司;
GIS-II型热风干燥机 黑龙江省农业仪器设备制造厂;
202型恒温干燥箱 北京永光明医疗仪器厂; QDF-30M/S
热球式风速仪 北京市检测仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 实验方案

实验中将胡萝卜洗净去皮后切片, 切片厚度为2~10 mm, 侧面用聚四氟乙烯密封带完全密封, 在物料盘上均匀平铺一层, 确保物料仅在上下表面进行传质。在干燥过程中, 由于物料厚度远小于其直径, 所以物料可被假定为大平板。忽略温度梯度导致的水分扩散, 物料中的水分扩散可被假设为沿物料内部厚度方向的一维扩散过程。具体实验方案如表1所示。干燥过程中, 每隔20 min将物料迅速取出并称质量, 记录不同时刻胡萝卜的质量后将物料放回继续干燥, 直至物料含水率小于0.05, 即认为已达到平衡含水率, 停止干燥。计算不同时刻的水分比(MR), 作图并将MR线性转换后用Origin软件进行线性回归, 以确定方程中有关参数。

表1 胡萝卜薄层干燥方案
Table 1 Scheme of thin layer drying for carrots

| 实验序号 | 风速/(m/s) | 温度/℃ | 切片厚度/mm |
|------|----------|------|---------|
| 1 | 0.6 | 60 | 2 |
| 2 | 0.6 | 60 | 4 |
| 3 | 0.6 | 60 | 6 |
| 4 | 0.6 | 60 | 8 |
| 5 | 0.6 | 60 | 10 |
| 6 | 0.6 | 40 | 4 |
| 7 | 0.6 | 50 | 4 |
| 8 | 0.6 | 70 | 4 |
| 9 | 0.4 | 60 | 4 |
| 10 | 0.8 | 60 | 4 |

1.2.2 热风干燥

实验所用干燥机为GIS-II型热风干燥机主要由风机、风量调节板、风筒、加热器、控制器、干燥筒及操作台等组成。在干燥过程中, 气流经过风筒加热后进入干燥筒, 穿过干燥筒内的物料层, 将物料加热干燥。风量大小由调节板调节。

1.2.3 含水率的测定

物料初始含水率采用常压干燥法计算。设定干燥箱温度为105℃, 将鲜胡萝卜切成薄片, 称取一定量的样品, 放入干燥箱除湿干燥, 待其质量不再发生变化后干燥结束, 根据干燥前后样品的质量变化, 计算得到胡萝卜初始含水率为8.73(以干基计)。本研究中物料含水率均以干基表示。按照式(1)计算干基含水率。

$$M = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中: M 为物料干基含水率; m 为物料质量/kg; m_d 为绝干物料的质量/kg。

1.2.4 动力学模型

目前干燥研究大多认为扩散是水分迁移的主要途径。物料内部水分扩散是一个复杂的传质过程, 涉及分子扩散、毛细流动、水力学流动和表面扩散等现象^[21]。在大多数情形下, Fick第二定律被广泛用于描述水分扩散过程^[18,22], 同时适用于本实验的计算。本实验的假设条件如下: 1) 物料内部的水分运动是在水分梯度作用下的液态扩散; 2) 忽略干燥过程中物料内部温度梯度对水分扩散的影响; 3) 忽略干燥过程中胡萝卜的收缩变形; 4) 干燥开始时, 物料内部水分和温度均匀分布^[9-10]。

Fick第二定律表达式为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数/(m²/s); x 为厚度/m; t 为干燥时间/s。

Fick定律的数值解为:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4H^2}\right) \quad (3)$$

式中: MR为水分比; H 为物料厚度/m。

其简化形式为:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{\text{eff}} t}{4H^2}\right) \quad (4)$$

该数值解可进一步简化为:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = A \exp(-zt) \quad (5)$$

式中: A 为常数; z 为干燥常数。

此式即为常用的Henderson和Pabis经验模型。

Page模型也广泛应用于薄层干燥模型^[23-26]。其模型方程为:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^m) \quad (6)$$

式中: k 为干燥常数; m 为常数。

由于平衡水分含量 M_e 相对于 M 和 M_0 很小, 可忽略不计, 所以 $(M - M_e) / (M_0 - M_e)$ 可近似认为 M/M_0 。

1.2.5 有效水分扩散系数计算

有效水分扩散系数是表示物料中水分扩散情况的重要指标, 反映物料在一定干燥条件下的脱水能力。作出一lnMR和 t 的关系图, 并进行线性回归, 其斜率为 F , 即可得到干燥过程的有效水分扩散系数的计算式为:

$$D_{\text{eff}} = \frac{4H^2 F}{\pi^2} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 工艺参数对干燥特性的影响

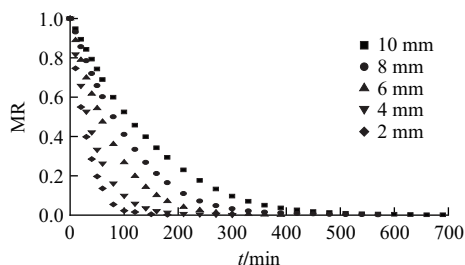


图1 不同切片厚度下的MR- t 关系曲线

Fig.1 Relationship between MR and t at different sample thickness

由图1可知,在温度60℃、风速0.6 m/s条件下,随着胡萝卜切片厚度的减少,胡萝卜水分下降速率加快,说明胡萝卜片越薄,单位体积的表面积增大,与热空气的对流换热面积增大,传热速率增加。此外,物料厚度降低,会导致内部的传递阻力减小,水分扩散速率增大,最终提高干燥速率。胡萝卜片厚度为10 mm时,干燥时间显著增加,而在切片厚度为2 mm时,会发生严重变形,品质严重下降。因此,物料切片厚度过厚或过薄均不利于干燥的最终结果,在研究中宜选用4~8 mm的胡萝卜片进行干燥。

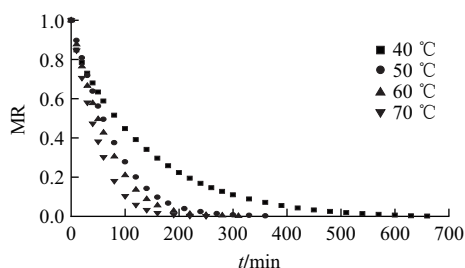


图2 不同干燥温度下的MR- t 关系曲线

Fig.2 Relationship between MR and t at different drying temperatures

由图2可知,对于4 mm的胡萝卜切片,在0.6 m/s的风速条件下,40℃需要干燥11.5 h,而70℃仅需4.5 h,说明干燥温度越高,传热速率越快,水分下降越快,水分扩散速率越大。但温度过高,胡萝卜干燥品质明显变差,而温度过低,干燥时间过长,降低干燥效率,所以干燥过程中采用50~70℃的干燥温度较好。从曲线的斜率可以看出,中前期干燥速率快,后期逐渐减少,这是由于随着干燥的进行,物料的水分不断减少,水分梯度的作用越来越小,干燥界面内移,干燥过程由表面传质控制转化为内部扩散控制,干燥曲线的斜率越来越平坦。

由图3可知,在温度60℃、切片厚度4 mm条件下,随着干燥风速的增大,胡萝卜片水分比下降速率增大,说明风速越大,传热传质边界层越薄,物料与干燥介质

的对流传质越快,气流带走的水分越多,有效水分扩散系数也越大。但当表面水分的汽化量与内部渗出的水量达到平衡后,干燥速率不再随着风速的增大而加快,所以增加干燥介质的风速,对物料的前期干燥速率影响极显著,但后期影响不显著。

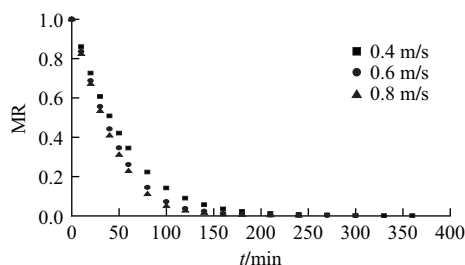


图3 不同风速下的MR- t 关系曲线

Fig.3 Relationship between MR and t at different air flow rates

2.2 动力学模型比较

由图1~3所示的MR- t 图可以看出,其变化呈曲线关系,将式(5)、(6)进行线性转换,可得到以下方程:

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

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

将实验数据进行分析和处理,分别作出 $\ln MR$ - t 和 $\ln(-\ln MR)$ - $\ln t$ 的关系曲线图如图4~6所示。

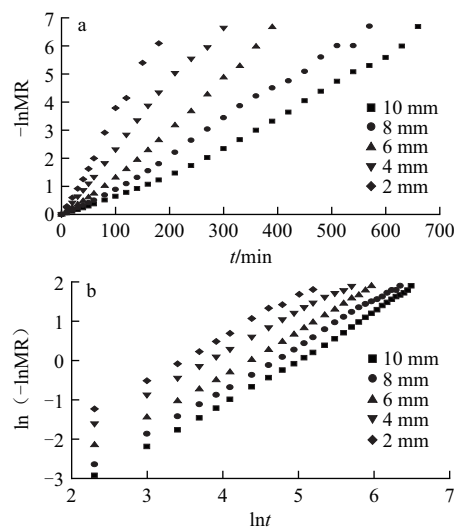
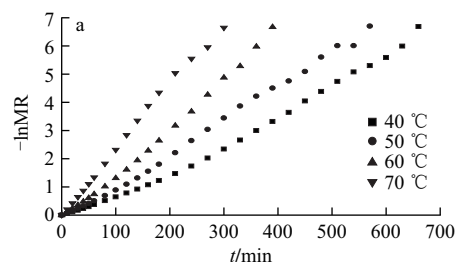


图4 不同切片厚度下 $\ln MR$ - t 和 $\ln(-\ln MR)$ - $\ln t$ 关系曲线

Fig.4 $\ln MR$ vs. t and $\ln(-\ln MR)$ vs. $\ln t$ at different sample thickness



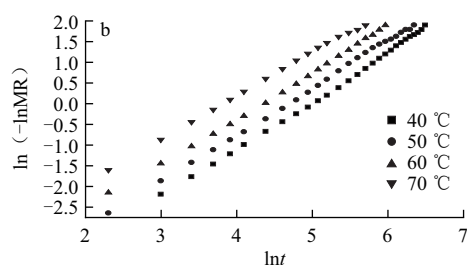
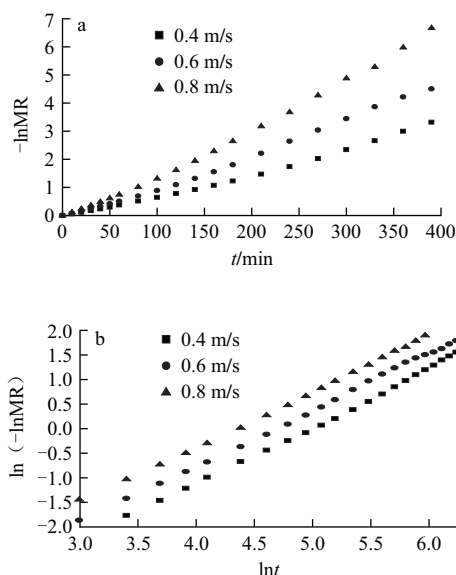
图5 不同干燥温度下 $\ln \text{MR}$ - t 和 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 关系曲线Fig.5 $\ln \text{MR}$ vs. t and $\ln(-\ln \text{MR})$ vs. $\ln t$ at different drying temperatures图6 不同风速下 $\ln \text{MR}$ - t 和 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 关系曲线Fig.6 $\ln \text{MR}$ vs. t and $\ln(-\ln \text{MR})$ vs. $\ln t$ at different air flow rates

表2 回归方程及相关系数

Table 2 regression equations and correlation coefficients

| 因素水平 | $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ | | $\ln \text{MR}$ - t | |
|----------|---------------------------------|----------|-----------------------|----------|
| | 回归方程 | 相关系数 r | 回归方程 | 相关系数 r |
| 切片厚度/mm | 2 $y=1.0807x-3.7327$ | 0.9989 | $y=0.0355x-0.0653$ | 0.9975 |
| | 4 $y=1.0427x-3.9827$ | 0.9994 | $y=0.0229x+0.0177$ | 0.9981 |
| | 6 $y=1.1158x-4.8183$ | 0.9993 | $y=0.0169x-0.2440$ | 0.9974 |
| | 8 $y=1.1374x-5.3031$ | 0.9996 | $y=0.0119x-0.1884$ | 0.9986 |
| 温度/°C | 10 $y=1.1591x-5.7277$ | 0.9990 | $y=0.0098x-0.3195$ | 0.9949 |
| | 40 $y=1.0887x-4.2048$ | 0.9979 | $y=0.0086x-0.1353$ | 0.9847 |
| | 50 $y=1.1458x-4.9845$ | 0.9993 | $y=0.0167x-0.2336$ | 0.9980 |
| | 60 $y=1.1451x-4.7730$ | 0.9990 | $y=0.0200x-0.2426$ | 0.9976 |
| 风速/(m/s) | 70 $y=1.1679x-4.5563$ | 0.9995 | $y=0.0273x-0.2895$ | 0.9975 |
| | 0.4 $y=1.0865x-4.3746$ | 0.9992 | $y=0.02050x-0.0653$ | 0.9991 |
| | 0.6 $y=1.1059x-4.2429$ | 0.9968 | $y=0.0239x+0.0513$ | 0.9915 |
| | 0.8 $y=1.1599x-4.3483$ | 0.9983 | $y=0.0296x-0.1392$ | 0.9971 |

将图4~6所示的 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 和 $\ln \text{MR}$ - t 关系曲线进行线性回归,得到回归方程及相关系数如表2所示。胡萝卜薄层干燥过程中,实验数据在 $\ln \text{MR}$ - t 坐标系内相

关系数在0.9847~0.9991之间变化,在 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 坐标系内相关系数在0.9968~0.9996之间变化。由相关系数可知,实验数据在 $\ln \text{MR}$ - t 和 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 坐标系内均具有较好的线性关系,但对比分析可得,实验数据在 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 坐标系内线性拟合精度更高,对 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 进行指数转换即得Page方程,说明Page方程更适合描述本实验胡萝卜薄层干燥过程。为了更精确的选择干燥模型,对几种不同实验条件下得到的 $\ln(-\ln \text{MR})$ - $\ln t$ 实验数据用Origin软件进行线性回归,得到模型参数 k 、 m 及决定系数 R^2 值,结果如表3所示。

表3 不同参数下的模型参数值及有效水分扩散系数值

Table 3 Model parameters and D_{eff} at different drying parameters

| 实验序号 | Page模型 | | | D_{eff} ($10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$) |
|------|---------|---------|--------|---|
| | k | m | R^2 | |
| 1 | 0.02393 | 1.08069 | 0.9978 | 0.93 |
| 2 | 0.01863 | 1.04275 | 0.9989 | 2.46 |
| 3 | 0.00808 | 1.11583 | 0.9987 | 4.16 |
| 4 | 0.00549 | 1.11406 | 0.9966 | 5.23 |
| 5 | 0.00325 | 1.15915 | 0.9980 | 6.69 |
| 6 | 0.01492 | 0.88889 | 0.9828 | 0.84 |
| 7 | 0.00684 | 1.14500 | 0.9986 | 1.62 |
| 8 | 0.01050 | 1.16787 | 0.9990 | 2.91 |
| 9 | 0.01212 | 1.09640 | 0.9989 | 2.09 |
| 10 | 0.01293 | 1.15995 | 0.9967 | 3.13 |

由表3不同参数下的模型参数值及有效水分扩散系数值可知,决定系数 R^2 值在0.9828~0.9990之间变化,说明线性回归得到的结果较好,即Page模型可以很好地描述胡萝卜薄层干燥过程。由表3可知,模型参数 k 和 m 的值均随实验条件的改变而变化,即在不同的干燥温度(T)、风速(v)及厚度(H)条件下,它们的值也随之发生变化,因此,干燥常数 k 和 m 是 T 、 v 及 H 的函数。根据实验数据,用DPS软件对 k 和 m 进行回归分析,得到参数的估计值及回归方程的显著性分析如表4、5所示。

表4 Page方程参数 k 和 m 回归参数估计Table 4 Regression parameter estimates (k and m) of Page equation

| 变量 | k | m |
|-----|----------|--------|
| 常量 | 0.01970 | 0.5258 |
| T | 0.00003 | 0.0076 |
| v | 0.00200 | 0.1589 |
| H | -0.00215 | 0.0072 |

由参数估计量可以获得 k 和 m 与 T 、 v 和 H 的关系模型:

$$m = 0.5258 + 0.1589v + 0.0076T + 0.0072H \quad (10)$$

$$k = 0.0197 + 0.002v + 0.000026T - 0.00215H \quad (11)$$

表5 方差分析表

Table 5 Analysis of variance

| 参数 | R^2 | 自由度 | F 值 | $F_{0.01}$ |
|-----|-------|-----|--------|------------|
| k | 0.989 | 3.6 | 18.352 | 9.78 |
| m | 0.982 | 3.6 | 13.455 | 9.78 |

由表5可知, Page模型参数 k 和 m 均有 $F > F_{0.01}$, 方程回归效果显著。为了验证模型的精确性, 将50℃、0.3 m/s、5 mm及60℃、0.5 m/s、4 mm条件下的实验数据与模拟值进行比较, 其结果如图7所示。在整个干燥过程中, Page模型预测值与实验值拟合较好, 任意时刻 MR 的预测值与实验值相对偏差(相对偏差=|实验值-预测值|/实验值)均小于6%, 说明胡萝卜薄层干燥特性曲线为典型的指数曲线, Page模型能较准确地描述胡萝卜在薄层干燥过程中的水分变化规律。

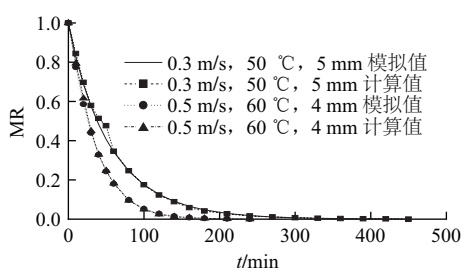


图7 不同条件下MR计算值与实验值的比较

Fig.7 Comparison between the experimental and calculated MR under different conditions

2.3 有效水分扩散系数模型

研究有效水分扩散系数对深入分析物料内部水分扩散过程及优化干燥工艺具有重要意义, 主要包括液相扩散、水蒸气扩散以及其他可能的质量传递现象, 与物料成分、结构、温度和含水率等因素有关。实验研究了 D_{eff} 和温度 T 、风速 v 和物料厚度 H 的关系, 结果如图8~10所示。 D_{eff} 和温度 T 、风速 v 和物料厚度 H 呈较好的线性关系。用Origin软件分别对曲线进行线性回归, 得到不同切片厚度、温度及风速条件下的回归方程及相关检验值如式(12)~(14)所示。

$$10^9 D_{\text{eff}} = 7.145H - 0.393 \quad (r=0.9977) \quad (12)$$

$$10^9 D_{\text{eff}} = 0.0676T - 1.833 \quad (r=0.9980) \quad (13)$$

$$10^9 D_{\text{eff}} = 2.6v - 1.0767 \quad (r=0.9961) \quad (14)$$

通过式(12)~(14)可知, 有效水分扩散系数与实验参数具有较好的线性关系, 不同实验参数对有效水分扩散系数的影响程度不同, 其中切片厚度对有效水分扩散系数的影响最显著。

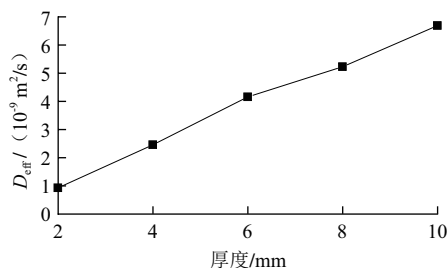


图8 不同厚度下的有效水分扩散系数

Fig.8 D_{eff} at different sample thickness

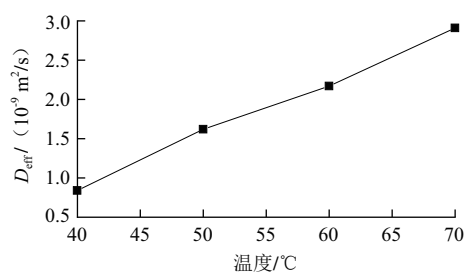


图9 不同温度下的有效水分扩散系数

Fig.9 D_{eff} at different drying temperatures

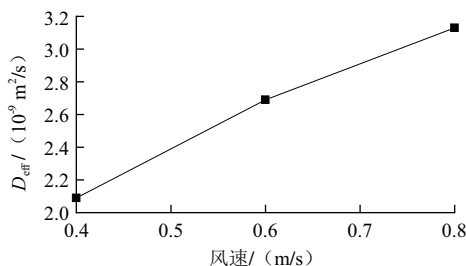


图10 不同风速下的有效水分扩散系数

Fig.10 D_{eff} at different air flow rates

将 D_{eff} 与 T 、 v 和 H 用DPS软件进行多元线性回归分析, 得到 D_{eff} 的回归方程为:

$$10^{-9} D_{\text{eff}} = -6.39829 + 2.6v + 718.53H + 0.07342T \quad (r=0.9969) \quad (15)$$

由回归方程可知, 方程的相关系数较高, 可用于简化的传质扩散系数方程。 D_{eff} 随着物料厚度、风速、温度的增大而增大。一定温度及风速下, 物料越厚, 水分梯度越大, 水分扩散系数越快; 一定物料厚度及温度下, 风速越大, 物料表面的空气流动速度越快, 蒸发面上的空气层越薄, 即传热传质边界层越薄, 物料与干燥介质的对流传质加强, 有效水分扩散系数越大; 一定物料厚度及风速下, 温度越高, 水分子运动越剧烈, 水分迁移越快, 有效水分扩散系数越大。实验计算得到的胡萝卜有效水分扩散系数在 $0.84 \times 10^{-9} \sim 6.69 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间变化, 与大多数文献中得到的胡萝卜有效水分扩散系数结果类似^[13,17-19]。

3 结论

3.1 物料的干燥速率与干燥介质的温度、速度及物料的切片厚度密切相关。提高干燥介质温度、减小物料厚度、增大干燥介质风速, 均有利于加快物料中的水分扩散, 提高干燥速率。在实际生产干燥过程中, 应根据实际情况采取合适的措施来提高干燥速率, 强化有效水分扩散系数。

3.2 胡萝卜薄层干燥曲线为典型的指数曲线。在实验条件范围内, Page模型预测值与实验值拟合精度较高,

能准确预测胡萝卜薄层干燥过程中的水分比变化规律。对不同温度、风速及物料厚度条件下的水分比数据进行回归分析,建立了描述干燥规律的Page数学模型如下: $MR = \exp(-kt^m)$, 其中, $m = 0.5258 + 0.1589v + 0.0076T + 0.0072H$; $k = 0.0197 + 0.002v + 0.000026T - 0.00215H$ 。

3.3 根据物料的干燥特性曲线,确定其有效水分扩散系数如式(15)所示,实验得到的胡萝卜有效水分扩散系数在 $0.84 \times 10^{-9} \sim 6.69 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间随着干燥温度、风速和物料厚度的升高而增大。

参考文献:

- [1] SUMNU G, TURABI E, OZTOP M. Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens[J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 38(5): 549-553.
- [2] LI Ruijie, ZHANG Min. Drying methods affect the quality and hygroscopic capacity of carrot chips[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(3): 342-349.
- [3] 郭宽, 胡云峰, 李喜宏, 等. 不同品种胡萝卜切分加工物理性能研究[J]. 食品科学, 2004, 25(11): 184-187.
- [4] 李伟荣, 任爱清, 陈国宝. 胡萝卜干燥技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2010(13): 388-390.
- [5] 徐小东, 崔政伟. 农产品和食品干燥技术及设备的现状和发展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 171-174.
- [6] 李瑞杰, 张慤. 不同干燥方式对胡萝卜片吸湿性及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(3): 342-349.
- [7] MASKAN M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(2): 177-182.
- [8] O'NEILL M B, RAHMAN M S, PERERA C O, et al. Colour and density of apple cubes dried in air and modified atmosphere[J]. International Journal of Food Properties, 1998, 1(3): 197-205.
- [9] 肖美添, 朱艳, 刘华信. 薄层介质干燥过程内部水分扩散[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2003, 24(2): 184-188.
- [10] 刘榴, 路倩倩, 刘相东. 基于干燥过程的生物材料有效水分扩散系数的模型与测定[C]//第十三届全国干燥会议论文集. 葫芦岛: 中国化工学会, 2011: 215-221.
- [11] SABAREZ H T, PRICE W E. A diffusion model for prune dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 42(3): 167-172.
- [12] AZZOUZ S, GUIZANI A, JOMAA W, et al. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes[J]. Journal Food Engineering, 2002, 55(4): 323-330.
- [13] DOYMAZ I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 359-364.
- [14] TONG C H, LUND D B. Effective moisture diffusivity in porous materials as a function of temperature and moisture content[J]. Biotechnology Progress, 1990, 6(1): 67-75.
- [15] 曾令彬, 赵思明, 熊善柏, 等. 风干白鲢的热风干燥模型及内部水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 280-283.
- [16] 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 151-158.
- [17] RUIZ-CABRERA M A, SALGADO-CERVANTES M A, WALISZEWSKI-KUBIAK K N, et al. Effect of path diffusion on the effective moisture diffusivity in carrot slabs[J]. Drying Technology, 1997, 15(1): 169-181.
- [18] ZIELINSKA M, MARKOWSKI M. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(2): 212-218.
- [19] MULET A. Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 1994, 22(1): 329-348.
- [20] 吉永奇. 金银花干燥特性及工艺参数研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2008.
- [21] 李阳春, 陈光明, 王剑锋, 等. 含湿多孔生物材料干燥过程的传热传质分析[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 82-85.
- [22] 杨彬彬. 多孔介质干燥分形孔道网络模拟及实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [23] 赵义. 热及湿敏性物料吸附式除湿干燥特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [24] MADAMBA P S, DRISCOLL R H, BUCKLE K A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75-97.
- [25] DIAMANTE L M, MUNRO P A. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices[J]. Solar Energy, 1993, 51(4): 271-276.
- [26] DOYMAZ I, PALA M. The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(4): 413-417.