

糖渍甘薯热风干燥特性及数学模型研究

王 君, 房 升, 陈 杰, 孟岳成*
(浙江工商大学食品与生物工程学院, 浙江 杭州 310035)

摘 要: 研究不同糖渍质量分数(10%、15%、20%、30%、40%、50%、70%)浸渍条件下熟化甘薯的热风干燥特性及对有效水分扩散系数(D_{eff})的影响。比较 Newton、Page 和 Henderson and Pabis 3 种模型在糖渍甘薯热风干燥中的适用性, 结果表明: Page 模型($MR = \exp(-kt^n)$, 其中, MR 为水分比; k 、 n 为模型参数; t 为时间)显示最佳的拟合效果, 其中 Page 模型参数 k 与糖度 c 成线性关系, 指数 n 与 c 基本无关, 此时模型的判定系数 R^2 为 0.982。通过对不同糖度(c)条件下甘薯的(D_{eff})计算, 表明 D_{eff} 与 c 呈立方关系, 拟合度为 0.984。利用 Arrhenius 关系得到糖渍甘薯片和未糖渍甘薯片的指前因子(D_0)和活化能(E_a), 结果表明, 糖渍甘薯片的 D_0 ($6.66 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$)和 E_a (12.423 kJ/mol)均低于未经糖渍预处理的甘薯片的 D_0 ($9.69 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$)和 E_a (40.103 kJ/mol)。

关键词: 糖渍; 甘薯; 热风干燥; 模型

Hot Air Drying Characteristics and Mathematical Modeling of Sugar Infused Sweet Potato Slices

WANG Jun, FANG Sheng, CHEN Jie, MENG Yue-cheng*
(College of Food and Biological Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China)

Abstract: After 10 h of infusion in different concentration of sugar solution (10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50% or 70%), sweet potato slices were subjected to hot air drying and then examined for hot air drying characteristics and effective moisture diffusivity. The drying data were fitted to Newton, Page, and Henderson and Pabis models. The results showed that Page model fitted best with R^2 value of 0.982. The sugar content c had a linear relationship with the parameter k , but no relationship with the parameter n . The effective moisture diffusivity D_{eff} under various levels of c were calculated and compared. It was found that D_{eff} had a significant cubic relationship with the initial sugar content value c , with R^2 value of 0.984. The pre-exponential factor D_0 and activation energy E_a were calculated based on the Arrhenius relationship. Both D_0 and E_a value of sugar infused sweet potato slices were larger than those of slices without sugar infusion treatment.

Key words: sugar infusion; sweet potato; hot-air drying; mathematical model

中图分类号: TS531

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)07-0105-05

甘薯(*Ipomoea batatas* LAM.)广泛种植于我国各地, 种植面积达 733.26 亿 m^2 [1-2]。经干燥脱水后, 甘薯可加工成保健休闲食品, 营养美味, 具有很大的市场开发潜力[3-4]。在热风干燥过程中由于甘薯表面水分的不断散失, 导致皱缩现象比较严重, 影响了产品的可接受度[5]。对熟化甘薯进行糖渍预处理, 可以改善甘薯在热风干燥过程中的皱缩度, 提升产品品质, 同时, 干制品中糖度的提高可以保障甘薯干在贮存过程不易吸湿, 抑制霉菌等腐败菌的滋长, 从而延长产品的货架期[6]。

对糖渍甘薯进行热风干燥特性及模型化研究, 有助于加深对干燥过程的理解, 并为糖渍甘薯热风干燥设备

设计和工艺优化提供参考。对于不同糖渍农产品的干燥研究已有较多文献报道, 如李汴生等[7]研究了糖渍加应子在不同温度下的热风干燥特性, 并且用相应的数学模型对热风干燥数据进行了关联; Shi Junling 等[8]比较了糖渍蓝莓与未糖渍蓝莓在干燥特性及品质特性方面的差异。目前, 国内外尚未见糖渍预处理甘薯的干燥特性及相应数学模型的研究报道。

本实验比较不同糖渍质量分数预处理对熟化甘薯热风干燥特性的影响, 对 Newton 模型、Page 模型以及 Henderson and Pabis 模型在糖渍甘薯热风干燥中的适用性进行考察, 计算不同初始糖度条件下甘薯片的有效水

收稿日期: 2011-04-29

基金项目: 浙江工商大学研究生科技创新项目(1110XJ1510103)

作者简介: 王君(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为现代食品制造。E-mail: wjunjun2009@163.com

* 通信作者: 孟岳成(1963—), 男, 教授级高工, 博士, 研究方向为食品科学。E-mail: mengyc@zjgsu.edu.cn

分扩散系数(D_{eff}), 并系统比较在 Arrhenius 公式中糖渍甘薯和未糖渍甘薯的指前因子(D_0)和活化能(E_a), 从理论上对糖渍预处理对甘薯热风干燥的影响进行探讨分析。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜甘薯产于浙江杭州千岛湖, 纺锤形, 肉淡橘红。

1.2 仪器与设备

GZ-1 型热风干燥试验设备 上海大华仪表厂; H-1 α 型手持糖度计 日本 Atago 公司; DGG-9140BD 型电热鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司。

1.3 干燥方法

用水洗净甘薯, 蒸煮约 30min, 切成厚度为(9.0 $\pm$ 0.5)mm 薄片, 将甘薯片分别放在 10%、15%、20%、30%、40%、50%、70% 的糖液中浸渍 10h, 取出沥干水分, 在干燥温度为 70℃、干燥风速为 1.2m/s 的条件下进行热风干燥实验。

固定糖液质量分数为 10%, 同样将甘薯片浸渍 10h, 取出沥干水分, 在干燥温度分别为 50、60、70、80℃ 的条件下进行热风干燥实验, 与未糖渍甘薯片热风干燥所得的 D_0 和 E_a 进行比较。

1.4 含水率测定

按 GB/T 5009.3—2001《食品中水分的测定》测定不同糖度熟化甘薯的含水率, 并将甘薯进行热风干燥实验, 每隔 15min 计量 1 次, 当干燥产品质量变化率不超过 0.02% 时, 认为达到此干燥条件下的平衡含水率^[9-10]。

水分比是用来表示一定干燥条件下物料的剩余水分率, 其计算方法如下式:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中: MR 为水分比; M 为干燥过程中某一时刻样品的含水率/%; M_e 为甘薯样品的平衡含水率, 即在一定的干燥条件下, 将熟化甘薯片干燥至恒质量时的含水率/%; M_0 为甘薯样品的初始含水率/%。

1.5 糖度测定

用打浆机对糖渍样品进行匀浆处理, 通过手持糖度计测定匀浆的糖度^[11], 每一种糖渍质量分数的样品进行 3 次糖度的测定, 最后取平均值。

1.6 干燥模型

表 1 所示的是目前国内描述薄层农产品热风干燥特性常用的 3 种模型^[12-14], 表 2 所示的是表 1 中各模型的参数与甘薯片 c 之间的关系式, 将表 1 和表 2 联立, 得到如表 3 所示的 9 种数学模型, 根据所得的 9 种数学模

型将所得的实验数据进行拟合分析, 用 R^2 和 $RMSE$ 来评价模型拟合结果的好坏, 从而选择出能够描述糖渍甘薯热风干燥的最佳模型, 它们的计算方法分别如式(2)、(3)所示。

表 1 3 种常用薄层干燥数学模型

Table 1 Three commonly used thin-layer drying models

模型名称	Newton	Page	Henderson and Pabis
模型表达式	$MR = \exp(-kt)$	$MR = \exp(-kt^n)$	$MR = a \exp(-kt)$

注: k 、 a 、 n 为模型参数; t 为时间。

表 2 糖度(c)与干燥模型参数(k)的关系式

Table 2 Relationship between sugar content c and parameter k in the mathematical models listed in table 1

关系式名称	模型表达式
线性关系式	$k = b + ac$
倒数关系式	$k = b + a/c$
对数关系式	$k = b + \lg c$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{\text{exp}} - MR_{\text{pre},i})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N}} \quad (3)$$

式中: $MR_{\text{exp},i}$ 和 $MR_{\text{pre},i}$ 分别为第 i 个数据点的实验所得水分比和模型预测水分比; N 为实验数据点的数目。

1.7 有效水分扩散系数的计算

菲克扩散方程可以用来描述生物制品降速干燥阶段的干燥特性, 方程的解法由 Crank 在 1975 年提出, 它适用于长方形、圆柱形和球形等形状的物料^[15-17]。假设所有的样品都有相同的起始水分分布, 那么式(4)适用于本实验所用的甘薯样品。

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L_0^2}\right) \quad (4)$$

对于较长时间的干燥实验而言, 上述等式也可以进一步简化成如下形式:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L_0^2} \quad (5)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数/(m^2/s); L_0 为样品厚度的一半/m。绘制等式(3)中 $\ln MR$ 相对于干燥时间 t 的曲线, 将曲线进行线性拟合得到一条直线, 此直线的斜率(k')可用式(6)表示。

$$k' = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L_0^2} \quad (6)$$

通过式(6)便可以计算出不同糖渍条件下熟化甘薯片的 D_{eff} 。

1.8 指前因子和活化能的计算

式(7)所示为 Arrhenius 关系式, 公式两边取对数, 将 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/T$ 的曲线进行线性拟合, 通过所得到的直线的斜率和截距, 便可计算出 E_a 和 D_0 ^[17-19]。

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

式中: D_0 为 Arrhenius 方程的指前因子 $/(m^2/s)$; E_a 为活化能 $/(kJ/mol)$ 。 R 为气体常数 $/(kJ/(mol \cdot K))$; T 为绝对温度 $/K$ 。

2 结果与分析

2.1 不同糖度对甘薯热风干燥特性的影响

在干燥温度为 70°C 、干燥风速为 1.2m/s 的条件下, 分别考察糖度为 15.43 、 21.36 、 23.11 、 24.32 、 32.09 、 37.17 、 43.89°Brix 对熟化甘薯热风干燥特性的影响。图1显示的是在不同糖度条件下的甘薯水分比曲线。

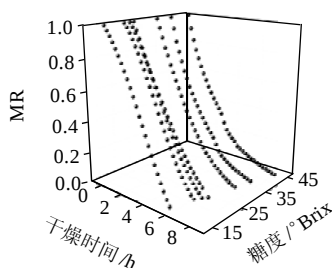


图1 不同糖度条件下熟化甘薯的热风干燥曲线

Fig.1 Drying curves of sweet potato slices infused in different concentrations of sugar solution

由图1可知, 尽管熟化甘薯初始糖度不同, 但随着干燥时间的延长, 其 MR 都呈下降趋势; 熟化甘薯到达平衡含水率所需的时间与其初始糖度成正比, 初始糖度越高, 到达平衡含水率所需的干燥时间也就越长。当初始糖度从 15.43°Brix 升高至 43.89°Brix 时, 所需的干燥时间也相应的从 5.5h 延长到 8h 。这是因为在热风干燥过程中, 样品糖度越高, 越易在甘薯片表面形成糖结晶, 阻碍了热量的传递和内部水分的向外迁移, 从而导致干燥速率变慢, 使得甘薯到达平衡含水率所需要的时间增加。

2.2 糖渍甘薯热风干燥的数学模型

运用表3所示的9种数学模型对干燥温度为 70°C 、风速为 1.2m/s 的不同初始糖度的甘薯片干燥实验数据进行拟合, 拟合度见表3。模型 $MR = \exp(-(b + ac)t^n)$ 有最大的 R^2 值(0.982)和最小的 $RMSE$ 值(0.043), 若将指数 n 也换为 c 的线性关系式, 即 $MR = \exp(-(b + ac)t^{(e + dc)})$, 则 R^2 值为 0.988 , $RMSE$ 值为 0.130 , 与模型 $MR = \exp(-(b + ac)t^n)$ 的 R^2 值相差不大, 但是模型参数变成了4个, 因此, 选择模型 $MR = \exp(-(b + ac)t^n)$ 作为糖渍甘薯热风干燥的数学模型, 模型表达式如下, 其拟合度 $R^2 = 0.982$ 。

$$MR = \exp(-(0.111 + 0.277c)t^{1.474})$$

2.3 不同糖度对甘薯热风干燥有效水分扩散系数的影响

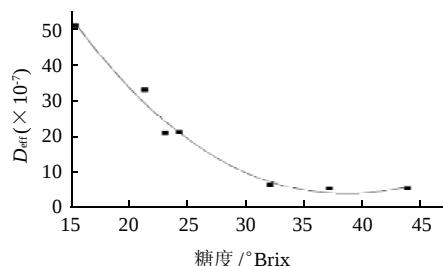


图2 糖度对甘薯热风干燥有效水分扩散系数的影响

Fig.2 Effect of sugar content on the effective moisture diffusivity of sweet potato slices

表3 干燥数学模型及其拟合结果

Table 3 Fitting test results of experimental data to mathematical models

模型表达式	参数值	R^2	$RMSE$
$MR = \exp(-(b + ac)t)$	$a = 0.453, b = 0.201$	0.944	0.075
$MR = \exp(-(b + a/c)t)$	$a = -0.027, b = 0.436$	0.942	0.077
$MR = \exp(-(b + algc)t)$	$a = 0.274, b = 0.485$	0.943	0.076
$MR = \exp(-(b + ac)t^n)$	$a = 0.277, b = 0.111, n = 1.474$	0.982	0.043
$MR = \exp(-(b + a/c)t^n)$	$a = -0.016, b = 0.252, n = 1.469$	0.979	0.045
$MR = \exp(-(b + algc)t^n)$	$a = 0.162, b = 0.282, n = 1.471$	0.981	0.044
$MR = (b + ac)\exp(-(e + dc)t)$	$a = -0.451, b = 1.225, d = 0.316, e = 0.272$	0.958	0.065
$MR = (b + a/c)\exp(-(e + d/c)t)$	$a = 0.031, b = 0.975, d = -0.018, e = 0.433$	0.956	0.066
$MR = (b + algc)\exp(-(e + d\lg c)t)$	$a = -0.291, b = 0.931, d = 0.186, e = 0.468$	0.958	0.065

根据实验所得的不同糖度条件下甘薯片的水分比MR数据,由菲克扩散方程推算出熟化甘薯热风干燥的 D_{eff} ,所得结果如图2所示。 D_{eff} 与甘薯片的初始糖度成反比,初始糖度越大, D_{eff} 就越小,原因可能是,糖度越大,使甘薯片的固形物含量越高,在热风干燥实验时,内部水分迁移速率也就明显降低。

将所得实验数据进行拟合,结果发现,糖渍甘薯片的热风干燥 D_{eff} 与其初始糖度 c 呈立方关系,其拟合度 R^2 值为0.984。

$$D_{\text{eff}} = 1.498 \times 10^{-5} - 8.481c + 1.458 \times 10^{-8}c^2 - 6.222 \times 10^{-11}c^3$$

2.4 糖渍甘薯和未糖渍甘薯 D_0 和 E_a 的比较

2.4.1 干燥温度对糖渍甘薯热风干燥特性的影响

笔者曾研究过干燥温度对未糖渍甘薯热风干燥特性的影响^[20],为了比较糖渍甘薯和未糖渍甘薯的 D_0 和 E_a ,固定浸糖液质量分数为10%,在不同的干燥温度(50、60、70、80℃)条件下进行甘薯热风干燥实验,结果见图3。

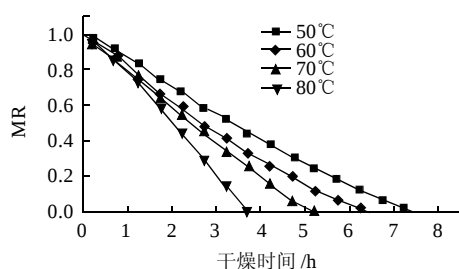


图3 不同干燥温度条件下糖渍甘薯的热风干燥曲线

Fig.3 Drying curves of sugar infused sweet potato slices under different drying temperatures

由图3可知,在糖渍甘薯热风干燥过程中,随着干燥温度的升高,到达平衡含水率所需要的时间也越小,这与未糖渍甘薯的热风干燥特性相似,原因是,热风干燥温度越高,甘薯片与外界热空气的温度差和湿度差越大,就越有利水分的迁移,使到达平衡含水率所需的时间缩短。

2.4.2 糖渍甘薯和未糖渍甘薯的 D_0 和 E_a

表4 糖渍甘薯和未糖渍甘薯的 D_0 和 E_a

Table 4 D_0 and E_a values of sweet potato slices with and without sugar infusion treatment

指标	糖渍甘薯	未糖渍甘薯
E_a /(kJ/mol)	12.423	40.103
D_0 /(m ² /s)	6.66×10^{-8}	9.69×10^{-4}

由表4可知,经糖渍预处理的甘薯的 D_0 (6.66×10^{-8} m²/s)远远低于未经糖渍预处理的甘薯的 D_0 (9.69×10^{-4} m²/s)值,原因可能是,经糖渍预处理后,甘薯中的固形物含量增加,不利于干燥过程中物料的水分的扩散。

Doymaz^[21]对胡萝卜在50~70℃范围内进行了热风干燥实验,得出胡萝卜的 E_a 为28.36kJ/mol。本实验经计算得到经糖渍预处理和未经糖渍预处理的甘薯的 E_a 分别为12.423kJ/mol和40.103kJ/mol,与Doymaz得到的数值较为接近,在合理的范围之内。经糖渍预处理的甘薯的 E_a 值要小于未经糖渍预处理的甘薯的 E_a 值,原因可能是由于甘薯中大量糖的存在使得细胞外糖的浓度梯度增高,渗透压变大,糖渍甘薯的细胞的失水能力大于未糖渍甘薯的失水能力,因此干燥过程中脱除单位物质的量水分所需的启动能量也较小,即 E_a 也越小。

3 结 论

3.1 对不同初始糖度的甘薯片进行热风干燥实验,结果表明,熟化甘薯初始糖度越高,干燥到达平衡含水量所需的时间就越长。

3.2 运用9种数学模型对热风干燥实验所得数据进行拟合分析,结果发现Page模型和线性关系式关联的模型($MR = \exp(-(b + ac)t^n)$)的拟合度最高, R^2 值为0.982, RMSE值为0.043,因此选择此模型为描述糖渍甘薯热风干燥的最佳模型。

3.3 计算不同初始糖度条件下甘薯片的 D_{eff} ,结果发现,随着甘薯片初始糖度的增大,其 D_{eff} 也逐渐减少, D_{eff} 与甘薯片初始糖度呈立方关系,方程拟合度为0.984。

3.4 计算经过糖渍预处理和未经糖渍处理的甘薯片的指 D_0 和 E_a ,并对二者进行比较,结果表明,糖渍甘薯片的 D_0 和 E_a 值明显低于未经糖渍预处理的甘薯片的 D_0 和 E_a 。

参考文献:

- [1] 李珂,王蒙蒙,沈晓萍,等.熟化甘薯热风干燥工艺参数优化及数学模型研究[J].食品科学,2008,29(8):363-368.
- [2] 方毅,印培民,黄筱萍.红薯干原料同步糖化发酵生产燃料乙醇的研究[J].江西科学,2008,26(5):719-723.
- [3] 许克勇,冯卫华.薯类制品加工工艺与配方[M].北京:科学技术文献出版社,2001:71-72.
- [4] 蒋玉萍,王俊.番薯片微波干燥特性及干燥模型[J].浙江农业学报,2009,21(4):407-410.
- [5] 刘春泉,江宁,李大婧,等.微波联合热风干制苏渝303甘薯干工艺研究[J].核农学报,2009,23(6):1008-1013.
- [6] 汪志君,韩永斌,姚晓玲.食品工艺学[M].北京:中国计量出版社,2009:56-57.
- [7] 李汴生,刘伟涛,李丹丹,等.糖渍加应子的热风干燥特性及其表达模型[J].农业工程学报,2009,25(11):330-335.
- [8] SHI Junling, PAN Zhongli, TARA H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating[J]. Food Science and Technology, 2008, 41: 1962-1972.
- [9] 闻陶,朱跃钊,孙庆梅,等.马铃薯吸附干燥特性及模型拟合[J].生物加工过程,2006,4(3):56-61.
- [10] 牛智有,赵思明,姜开明.苹果渣干燥特性与模型的试验研究[J].农机化研究,2008,6(2):134-137.
- [11] ORIKASA T, WU Long, ANDO Y, et al. Hot air drying characteristics

- of sweet potato using moisture sorption isotherm analysis and its quality changes during drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 6: 1748-1750.
- [12] 石启龙, 赵亚, 李兆杰, 等. 竹荚鱼热泵干燥数学模型研究[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(5): 110-114.
- [13] TORUL T, PEHLIVAN D. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(6): 209-216.
- [14] SACILIK K, ELICIN A K. The thin layer drying characteristics of organic apple slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 73(3): 281-289.
- [15] WANG Zhengfu, SUN Junhong, LIAO Xiaojun, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace[J]. *Food Research International*, 2007, 40(4): 39-46.
- [16] 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.
- [17] KOLAWOLE O, OLUWAKEMI J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices[J]. *Food Science and Technology*, 2010, 45(7): 278-288.
- [18] PANCHARIYA P, POPOVIC D, SHARMA A. Thin-layer modelling of black tea drying process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(6): 349-357.
- [19] TAKAHIRO O, WU Long, TAKEO S, et al. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(5): 303-308.
- [20] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 387-392.
- [21] DOYMA Z I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(4): 359-364.