

山楂气体射流冲击干燥特性及干燥模型

李文峰, 金欢欢, 肖旭霖*

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 研究不同干燥温度、风速、物料盒宽度和喷嘴高度对山楂气体射流冲击干燥特性及有效水分扩散系数的影响, 采用7种数学模型拟合实验数据, 得到了用于描述山楂气体射流冲击干燥的最适数学模型。结果表明: 山楂的气体射流冲击干燥主要属于降率干燥。干燥温度对山楂的干燥曲线和干燥速率曲线均具有显著影响, 而风速、物料盒宽度以及喷嘴高度对山楂的干燥曲线和干燥速率曲线的影响均不显著。山楂的气体射流冲击干燥有效水分扩散系数随着风温和风速的增加而增加, 随着物料盒宽度和喷嘴高度的增加而降低, 且最高有效水分扩散系数为 $9.271 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。在实验范围内最适宜于描述山楂在气体射流冲击干燥过程中含水率变化规律的数学模型是Page和Modified Page模型。

关键词: 山楂; 气体射流冲击干燥; 干燥特性; 干燥模型

Drying Characteristics and Model of Hawthorn in Air-Impingement Jet Dryer

LI Wen-feng, JIN Huan-huan, XIAO Xu-lin*

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Hawthorn was dried with an air-impingement jet dryer, and the effects of drying temperature, air velocity, drying box width and distance from nozzle to material box on the drying characteristics and effective diffusion coefficient were studied. In addition, the drying data were fitted to 7 drying mathematical models and the best drying model was screened out. The results showed that air-impingement jet drying of hawthorn was a rate-falling drying process. The drying curve and drying rate curve were significantly affected by air temperature but not significantly by air velocity, drying box width or distance from nozzle to material box. The effective diffusion coefficient was increased with increasing air temperature and air velocity, but decreased with increasing drying box width and distance from nozzle to material box. The maximum effective moisture diffusion coefficient was $9.271 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. The Page model and Modified Page model were the most suitable for describing air-impingement jet drying behavior of hawthorn in the experimental conditions used in this study.

Key words: hawthorn; air-impingement jet drying; drying characteristics; drying model

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2014)09-0069-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201409015

山楂 (*Crataegus pinnatifida* Bge.), 蔷薇科落叶小乔木的成熟果实, 主要分布于中国、欧洲和北美地区^[1]。山楂的多个品种在我国及欧洲均被广泛地用于医药及食品原料^[2]。山楂富含VC、有机酸、膳食纤维、黄酮类化合物及多种矿物质元素^[3]。目前山楂的功能特性逐步被人们认可, 但山楂的精深加工还存在着一系列的问题, 导致大量的山楂腐坏, 造成了宝贵资源的严重浪费^[4]。山楂干片是一种深受消费者喜爱的山楂加工产品中的一种, 可广泛用于药品和进一步精深加工的原辅料^[5]。目前, 在我国的山楂干制生产中主要采用自然干燥和热风干燥。虽然该两种干燥方式生产成本低于推广, 但自然干制

受外在因素影响较大, 不易控制, 卫生条件较差, 干燥时间多在2d以上, 营养损失严重。虽然山楂的热风干燥与自然干燥相比生产卫生条件较好, 干燥时间缩短, 但干燥能耗较高。气体射流冲击干燥相比传统的热风干燥不仅具有更高的对流换热系数、干燥速率以及更低的能耗而且具有较高的干制品品质^[6]。目前, 气体射流冲击干燥已经成功的用于无核紫葡萄、鲮鱼鱼籽、玉米、哈密瓜、杏及紫薯的干燥研究^[6-7]。当前还未见山楂的气体射流冲击干燥特性及干燥数学模型的相关研究。本实验探讨不同气体射流冲击干燥条件对山楂干燥的影响并通过干燥数学模型的拟合进行了模型的筛选, 为山楂的气体

收稿日期: 2013-04-28

基金项目: 陕西师范大学研究生培养创新基金项目(2013CXS006); 科技部农业科技成果转化资金项目(2011GB23600017)

作者简介: 李文峰(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工工程。E-mail: shanxiliwenfeng@163.com

*通信作者: 肖旭霖(1955—), 男, 副教授, 本科, 研究方向为食品加工工程。E-mail: xliao@snnu.edu.cn

射流冲击干燥研究及气体射流冲击干燥用于山楂的干燥生产提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

山楂原料购买于西安朱雀批发市场。挑选新鲜、饱满、无腐坏及机械损伤、大小适中的山楂,实验前原料贮存于冰箱0~4℃保存。使用时将山楂用清水洗涤、沥干,除去果柄、果核,切成3 mm厚的薄片^[8]。山楂样品初始湿含量采用在105℃条件下烘至恒质量的方式进行测定^[9],样品的平均干基含水率为77.69%。

1.2 仪器与设备

BS224S型电子天平 北京赛多利斯系统有限公司;AVM-03风速计 泰仪电子工业股份有限公司;烘箱 常州远宇干燥设备有限公司;本实验中所采用的气体射流冲击干燥实验设备为实验室自行设计^[7],采用多排管、圆形喷嘴、喷嘴间距85 mm、喷嘴内直径15 mm。

1.3 方法

1.3.1 山楂干燥的单因素试验

1.3.1.1 风温

固定山楂片的厚度为3 mm,风速为13 m/s,喷嘴高度为110 mm且物料盒宽度为210 mm,分别测定山楂在介质温度40、60、80、100℃条件下的含水率在干燥过程中随着干燥时间的变化。

1.3.1.2 风速

固定山楂片的厚度为3 mm,风温为60℃、喷嘴高度为110 mm、物料盒宽度为210 mm,分别测定山楂在风速10、11、12、13 m/s条件下含水率在干燥过程中随着干燥时间的变化。

1.3.1.3 物料盒宽度

固定山楂片的厚度为3 mm,风速为11 m/s,风温为60℃且喷嘴距离为110 mm,分别测定山楂在物料盒宽度分别为90、130、170、210 mm条件下含水率在干燥过程中随着干燥时间的变化。

1.3.1.4 喷嘴高度

固定山楂片的厚度为3 mm,风速为11 m/s,风温为60℃且物料盒宽度为170 mm,分别测定山楂在喷嘴高度分别约为110、140、170、200 mm条件下含水率在干燥过程中随着干燥时间的变化。

1.3.2 水分比、干燥速率

干燥实验中的水分比(MR)表示一定干燥条件下物料的剩余水分率,由式(1)表示^[10]。

$$MR = \frac{M_t - M_c}{M_0 - M_c} \quad (1)$$

式中: M_t 为 t 时刻的干基湿含量; M_0 为初始时刻的干基湿含量; M_c 为终时刻的干基湿含量。

干燥速率(DR)采用式(2)计算。

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (2)$$

式中: M_{t+dt} 为样品在 $t+dt$ 时刻的干基湿含量; M_t 为样品在 t 时刻的干基湿含量; dt 为相邻2次测量的时间间隔/min。

1.3.3 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数(D_{eff})是一个重要的传质特性,表示了水分转移机理,对计算和模拟各种食品加工操作是必不可少的。菲克第二扩散方程已被证实可用于描述农产品降速干燥期的干燥特征^[11]。根据菲克方程,有效水分扩散系数通过实验样品干燥数据依据lnMR相对时间的直线方程(3)来描述,如式(3)所示。

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \right) \quad (3)$$

式中: t 为干燥时间/min; L 为物料厚度/mm。

有效扩散系数利用斜率法计算,通过干燥实验数据lnMR对时间绘图确定斜率后计算得到。由方程(3)得到lnMR对时间的图为直线,直线的斜率(K)方程如式(4)所示。

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} \quad (4)$$

1.3.4 数学模型

为了进一步对山楂在气体射流冲击干燥过程中的水分散失情况进行描述与预测,本研究采用表1中的7个常用干燥数学模型对已经获得的山楂干燥曲线进行拟合,并从中筛选出最适干燥数学模型^[12]。

表1 干燥曲线拟合的数学模型
Table 1 Drying mathematical models

序号	模型名称	模型方程
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
5	Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$
6	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Two term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$

注: t 为干燥时间/min, a 、 b 、 c 、 k 、 n 、 g 为模型常数。

据已有报道表明^[13],在筛选干燥数学模型时通常通过对比各模型的确定系数(R^2)、卡方值(χ^2)与均方根误差(RMSE)。确定系数是用来表示各变量之间的密切关系, R^2 越大且接近于1,则表示其回归关系越显著。除此以外,卡方值和均方根误差也常用于确定拟合程度的好坏,其反映的是实际值与期望值之间的变异程度,其

值越小说明回归方程的预测精度越高。因此适合的干燥模型的回归方程应具有较高 R^2 ，较低 χ^2 和 $RMSE$ 。这些统计量依据下列公式进行计算。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{pre,i})^2} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (7)$$

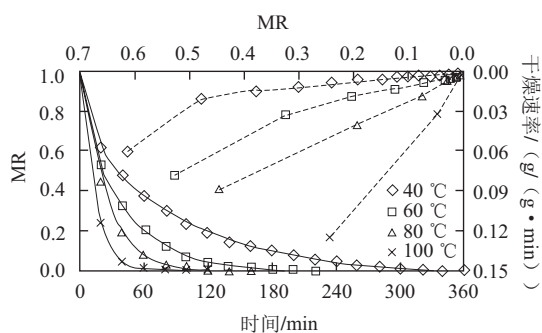
式中： $MR_{exp,i}$ 为第*i*个实验测得的湿含量； $MR_{pre,i}$ 为第*i*个预测的湿含量； N 为观察量个数； n 为模型参数个数。

1.4 统计与分析

所有实验数据录入采用Excel 2010进行简要计算及图表绘制。干燥数学模型的拟合利用“Data Processing System”（DPS，12.01高级版）软件进行，平均值显著水平为95%^[14]。

2 结果与分析

2.1 风温对山楂干燥特性的影响



细实线为干燥曲线，虚线为干燥速率曲线。下同。

图1 风温对山楂片气体射流冲击干燥曲线与干燥速率曲线的影响
Fig.1 Effect of air temperature on air-impingement jet drying curves and drying rate curves of hawthorn

干燥温度对物料在气体射流冲击干燥过程中的含水率变化规律有一定影响^[15-19]。由图1可知，随着干燥温度的增加，山楂干燥到所需含水率随着介质温度的增加而减少，在40、60、80、100 °C条件下的干燥时间分别为360、220、160、120 min。而采用热风干燥山楂，在75 °C条件下干燥220 min，物料的含水率约有10%^[8]，可见气体射流冲击干燥具有更快的干燥速率。从干燥速率曲线可以看出，随着风温的增加干燥速率增加，而且没有呈现出明显的恒率干燥阶段。这与大多数食品物料的

干燥具有相似的规律，即整个干燥过程主要属于降率干燥^[7,16,19]。在山楂的整个气体射流冲击干燥过程中，物料的湿含量在200 min内快速降低后缓慢下降，这可能是因为在干燥前期物料水分散失速率主要受物料表面水分汽化速率影响，干燥介质温度越高、传热越快，物料表面的水分蒸发越快从而使物料的湿含量更快地下降^[20]。而在干燥后期，干燥速率主要受物料内部水分扩散速率决定，但此时物料内部水分子与糖等大分子之间的作用力逐渐增强，从而导致物料内部水分散失速率处于一个较低水平，并随湿含量的降低而不断下降^[20]。虽然在100 °C的最高干燥风温下干燥时间仅120 min，但在更高的干燥风温下山楂的营养物质损失更为严重^[21]，所以在实际的生产加工中应综合干燥效率与干后品质等因素制定具体的干燥工艺参数。

2.2 风速对山楂干燥特性的影响

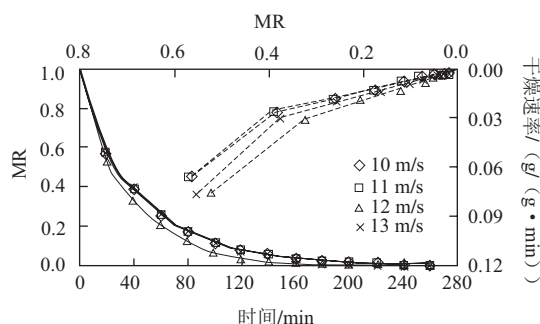


图2 风速对山楂气体射流冲击干燥曲线与干燥速率曲线的影响
Fig.2 Effect of air velocity on air-impingement jet drying curves and drying rate curves of hawthorn

风速亦对食品原料在气体射流冲击干燥过程中湿含量的散失具有影响^[7,16,19]。由图2可知，不同干燥风速下山楂的整个干燥用时大致相同，表明风速对干燥时间影响不明显。不同风速下的干燥曲线或干燥速率曲线几乎相互重叠，但依然可以分辨出在相同干燥时间内，更高的干燥风速具有更低的含水率。在已有关于气体射流冲击干燥紫薯的研究中也报道了相似的规律^[7]，这可能与实验所选取的干燥风速的梯度较小有关，因为在紫薯和山楂的气体射流冲击干燥实验中采用的风速梯度仅为1 m/s。但在哈密瓜的气体射流冲击干燥实验中风速梯度采用的是5 m/s，所以在哈密瓜的干燥实验结果显示随着风速增加干燥速率增加。不同风速下的干燥曲线也没有明显的恒率干燥阶段，这与紫薯的气体射流冲击干燥具有相似规律^[7]。

2.3 物料盒宽度对山楂干燥特性的影响

气体射流冲击过程中物料易被高速气流吹散造成物料的损失及设备的损坏，所以在干燥过程中需将物料置于一个大小适宜的矩形金属网盒内。由图3可知，山楂在不同物料盒宽度下采用气体射流冲击干燥山楂所需干燥

时长大致相同,表明物料盒宽度对干燥所需时长没有明显的影响。不同物料盒宽度下的干燥曲线或干燥速率曲线各自几乎相互重叠,所以物料盒宽度对山楂的水分散失没有较为明显的影响。但物料在气体射流冲击干燥过程中会被高速气流吹起并处于翻腾状态。所以,较大的物料盒可有效防止物料在干燥过程中发生黏连,但过大的物料盒不利于气体喷嘴分布而造成设备成本增加及能源的浪费。

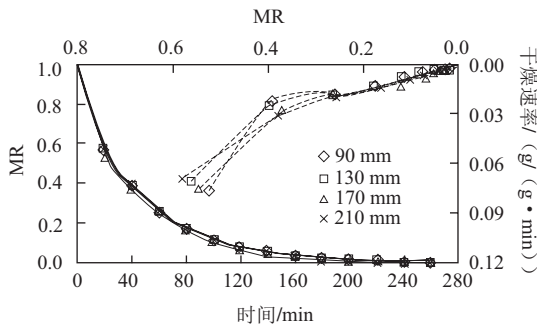


图3 物料盒宽度对山楂片气体射流冲击干燥曲线与干燥速率曲线的影响
Fig.3 Effect of drying box width on air-impingement jet drying curves and drying rate curves of hawthorn

2.4 喷嘴高度对山楂干燥特性的影响

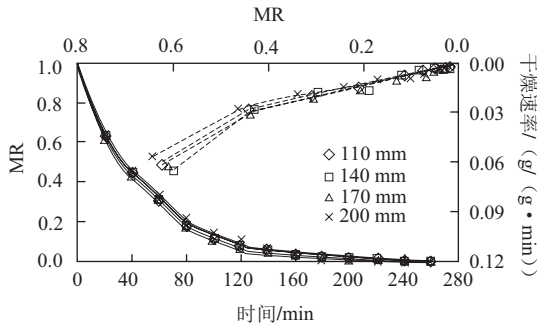


图4 喷嘴高度对山楂片气体射流冲击干燥曲线与干燥速率曲线的影响
Fig.4 Effect of distance from nozzle to material box on air-impingement jet drying curves and drying rate curves of hawthorn

喷嘴距离对物料的气体射流冲击干燥具有一定的影响^[22]。由图4可知,不同喷嘴高度对山楂的气体射流冲击干燥所用时间大致相同,且不同喷嘴高度的干燥曲线或干燥速率曲线几乎重合。但依然可以判断出喷嘴高度越低干燥速率越快。这可能是因为喷嘴距离物料越近,物料表面的实际风速越高,进而物料表面的边界层越薄^[20],所以在一定程度上提高了干燥效率,缩短了干燥时间。

2.5 不同条件对山楂有效水分扩散系数的影响

山楂在整个干燥过程中没有恒速阶段,整个干燥过程属于降速干燥。朱文学等^[20]研究表明,粗大的物料,特别是导湿性小的物料,当从物料表面散发水分较强烈

时,可能没有恒率干燥期。并且在已有的一些关于食品原料的干燥实验中也发现,大多数食品原料的干燥并不表现出明显的恒率干燥阶段^[7]。这表明山楂的干燥速率主要由物料内部水分扩散速率所决定,故可以用菲克第二扩散方程描述农产品降速干燥期的干燥特征^[11]。

表2 不同干燥条件下山楂气体射流冲击干燥水分有效扩散系数
Table 2 Effective diffusion coefficients of water in hawthorn during air-impingement jet drying process under different conditions

不同干燥条件				线性回归拟合公式	R^2	$D_{eff}/(10^{-8} m^2/s)$
X_1 温度/℃	X_2 风速/(m/s)	X_3 物料盒宽度/mm	X_4 喷嘴高度/mm			
40	13	210	110	$\ln MR = -0.0144t + 0.0404$	0.9707	2.189
60	13	210	110	$\ln MR = -0.0259t - 0.0366$	0.9982	3.936
80	13	210	110	$\ln MR = -0.0406t - 0.0343$	0.9990	6.170
100	13	210	110	$\ln MR = -0.0610t - 0.2748$	0.9829	9.271
60	10	210	110	$\ln MR = -0.0241t - 0.0471$	0.9916	3.663
60	11	210	110	$\ln MR = -0.0222t - 0.0265$	0.9904	3.374
60	12	210	110	$\ln MR = -0.0245t + 0.0448$	0.9946	3.724
60	11	90	110	$\ln MR = -0.0226t + 0.0074$	0.9953	3.435
60	11	130	110	$\ln MR = -0.0229t - 0.1550$	0.9926	3.480
60	11	170	110	$\ln MR = -0.0304t + 0.1351$	0.9908	4.620
60	11	130	140	$\ln MR = -0.0224t + 0.0577$	0.9961	3.404
60	11	130	170	$\ln MR = -0.0233t + 0.1744$	0.9905	3.541
60	11	130	200	$\ln MR = -0.0211t + 0.1863$	0.9791	3.207

由表2可知,水分有效扩散系数随着温度与风速升高而增加,随着物料盒宽度与喷嘴高度的增大而减小。这与山楂片在不同射流条件下的干燥速率具有相似的规律,即随着干燥速率的增加而 D_{eff} 增加,紫薯和哈密瓜的气体射流冲击干燥的有效水分扩散系数具有相似的规律^[7,19]。且山楂的 D_{eff} 比紫薯及哈密瓜的 D_{eff} 高出1~2个数量级,这可能是因为实验物料的差异而导致的。紫薯和哈密瓜的质地比山楂更为致密,这在一定程度上减缓了水分的散失从而其 D_{eff} 更低。

2.6 干燥数学模型的拟合及筛选

通常认为当一个干燥数学模型具有更高的 R^2 、较低的 χ^2 和RMSE时,此模型就更适合于对物料在干燥过程中的水分散失规律进行描述及预测^[7]。本研究利用7个常用干燥数学模型对所得数据进行了拟合,其分析统计结果如表3所示。

表3 山楂干燥模型 R^2 、 χ^2 和RMSE值
Table 3 R^2 , χ^2 and RMSE of 7 drying models for hawthorn

数学模型	R^2	χ^2	RMSE
Page	0.99490~1.00000	0.00001~0.00048	0.00180~0.02036
Modified Page	0.99490~1.00000	0.00001~0.00048	0.00180~0.02036
Two term	0.99490~0.99990	0.00001~0.00058	0.00252~0.02035
Logarithmic	0.98610~0.99990	0.00002~0.00106	0.00345~0.02987
Henderson and Pabis	0.98460~0.99990	0.00002~0.00111	0.00374~0.03151
Lewis	0.98115~0.99986	0.00002~0.00150	0.00380~0.03768
Wang and Singh	0.81660~0.92150	0.00740~0.02557	0.07965~0.13515

由表3可知, Page或Modified Page模型具有最高的 R^2 、最低 χ^2 和 $RMSE$, 故Page 与Modified Page模型为所选7个模型中的最适干燥数学模型。这与杏和哈密瓜的模型拟合结果相类似^[19]。Two term模型具有次高 R^2 和次低 χ^2 、 $RMSE$, Wang and Singh模型在所有模型中具有最低 R^2 和最高 χ^2 、 $RMSE$ 。此外, 其他3个模型的 R^2 也在可接受的0.980 00^[23]以上, 故所采用的7个干燥数学模型均能较好的用于描述山楂在气体射流冲击干燥过程中的水分散失规律。随着模型复杂度的增高, 拟合的精度也在逐步增高。如表4所示, 虽然Page模型与Modified Page模型具有相同的 R^2 、 χ^2 和 $RMSE$, 但这两个方程中的系数具有一定的差异。

表4 山楂干燥模型参数值 R^2 、 χ^2 和 $RMSE$
Table 4 R^2 , χ^2 and $RMSE$ parameters of Page and Modified Page models for hawthorn under different experimental conditions

模型	实验条件				数学模型常数		R^2	χ^2	$RMSE$
	X_1 温度/℃	X_2 风速/(m/s)	X_3 物料盒宽度/mm	X_4 喷嘴高度/mm	k	n			
Page	40	13	210	110	0.043 22	0.768 32	0.996 80	0.000 23	0.014 45
	60	13	210	110	0.045 29	0.875 71	0.999 60	0.000 04	0.005 84
	80	13	210	110	0.035 83	1.038 04	1.000 00	0.000 00	0.001 80
	100	13	210	110	0.055 17	1.081 38	1.000 00	0.000 01	0.002 32
	60	10	210	110	0.047 28	0.836 32	0.996 00	0.000 37	0.017 62
	60	11	210	110	0.041 21	0.857 32	0.998 30	0.000 15	0.011 42
	60	12	210	110	0.044 01	0.857 06	0.998 00	0.000 18	0.012 48
	60	11	90	110	0.040 90	0.863 32	0.998 90	0.000 10	0.009 40
	60	11	130	110	0.041 86	0.853 35	0.999 20	0.000 07	0.007 86
	60	11	170	110	0.041 85	0.899 48	0.998 90	0.000 10	0.009 16
	60	11	130	140	0.023 86	0.968 91	0.994 90	0.000 48	0.020 36
	60	11	130	170	0.025 20	0.952 62	0.998 90	0.000 10	0.009 44
	60	11	130	200	0.025 93	0.923 50	0.998 40	0.000 15	0.011 26
	40	13	210	110	0.016 76	0.768 32	0.996 80	0.000 23	0.014 45
Modified Page	60	13	210	110	0.029 19	0.875 71	0.999 60	0.000 04	0.005 84
	80	13	210	110	0.040 48	1.038 05	1.000 00	0.000 00	0.001 80
	100	13	210	110	0.068 61	1.081 38	1.000 00	0.000 01	0.002 32
	60	10	210	110	0.026 02	0.836 32	0.996 00	0.000 37	0.017 62
	60	11	210	110	0.024 24	0.857 32	0.998 30	0.000 15	0.011 42
	60	12	210	110	0.026 14	0.857 06	0.998 00	0.000 18	0.012 48
	60	11	90	110	0.024 66	0.863 32	0.998 90	0.000 10	0.009 40
	60	11	130	110	0.024 26	0.853 35	0.999 20	0.000 07	0.007 86
	60	11	170	110	0.029 35	0.899 48	0.998 90	0.000 10	0.009 16
	60	11	130	140	0.021 16	0.968 91	0.994 90	0.000 48	0.020 36
	60	11	130	170	0.020 99	0.952 62	0.998 90	0.000 10	0.009 44
	60	11	130	200	0.019 16	0.923 50	0.998 40	0.000 15	0.011 26

3 结 论

与传统热风干燥相比, 采用气体射流冲击干燥山楂具有更快的干燥速率。且干燥温度对山楂的气体射流冲击干燥具有较大的影响, 而风速、物料盒宽度以及喷嘴高度的影响较小。山楂的气体射流冲击干燥没有恒速干燥期, 主要表现为降率干燥。在实验范围内最适宜于描述及预测山楂气体射流冲击干燥的数学模型是Page和Modified Page模型。

参考文献:

- [1] LIU P, YANG B, KALLIO H. Characterization of phenolic compounds in Chinese hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bge. var. *major*) fruit by high performance liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2010, 121(4): 1188-1197.
- [2] FONG H H S, BAUMAN J L. Hawthorn[J]. The Journal of Cardiovascular Nursing, 2002, 16(4): 1-8.
- [3] 柏素花, 朱月英. 不同山楂品种的营养品质分析[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 144-145.
- [4] 赵二芳, 李满秀. 山楂的功能特性及其在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(9): 149-151.
- [5] 赵玉平. 山楂综合利用和研究开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2003.
- [6] 李文峰, 肖旭霖. 气体射流冲击技术在食品领域中的应用[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 349-352.
- [7] 李文峰, 肖旭霖, 王玮. 紫薯气体射流冲击干燥效率及干燥模型的建立[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 356-366.
- [8] 赵玉生, 王云霞. 山楂热风干燥工艺研究[J]. 食品科学, 2000, 21(2): 41-43.
- [9] DOYMAZ İ. Air-drying characteristics of tomatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1291-1297.
- [10] BAINI R, LANGRISH T A G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 330-343.
- [11] FALADE K O, SOLADEMI O J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(2): 278-288.
- [12] 雷广平, 王宝和. 薄层干燥技术的研究进展[J]. 干燥技术与设备, 2011, 9(2): 45-53.
- [13] DOYMAZ İ, İSMAIL O. Drying characteristics of sweet cherry[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 89(1): 31-38.
- [14] WHITE G M, ROSS I J, PONELE R. Fully exposed drying of popcorn[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1981, 24(2): 466-468.
- [15] XIAO Hongwei, PANG Cangle, WANG Lihong, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 233-240.
- [16] 肖红伟, 张世湘, 白竣文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 318-323.
- [17] BÓRQUEZ R, WOLF W, KOLLER W D, et al. Impinging jet drying of pressed fish cake[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(1/2): 113-120.
- [18] BÓRQUEZ R. Stability of *n*-3 fatty acids in fish particles during processing by impingement jet[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 56(2/3): 245-247.
- [19] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 382-388.
- [20] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 220-222.
- [21] 袁江兰, 康旭, 陈锦屏. 不同预处理方法对山楂干制过程中VC稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2003, 24(2): 48-50.
- [22] BONIS M V D, RUOCCO G. An experimental study of the local evolution of moist substrates under jet impingement drying[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(1): 81-87.
- [23] DOYMAZ İ. Effect of dipping treatment on air drying of plums[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(4): 465-470.