

山药热泵干燥特性及数学模型的研究

李丽^{1,2}, 孙健^{1,2}, 盛金凤¹, 李杰民¹, 李昌宝¹, 郑凤锦¹, 冯道宁³, 游向荣¹

(1. 广西农业科学院农产品加工研究所, 广西南宁 530007) (2. 广西作物遗传改良重点开放实验室, 广西南宁 530007) (3. 广西机电职业技术学院电气工程系, 广西南宁 530007)

摘要: 本文以新鲜山药为原料, 研究其热泵干燥特性及数学模型。以干燥温度、切片厚度为因素, 研究其对山药热泵干燥特性的影响, 并通过 SAS8.0 软件对实验数据进行拟合得出山药热泵干燥模型, 得到了山药热泵干燥的干燥特性曲线和干燥速率曲线。干燥温度越高、切片厚度越薄, 山药的干燥速率越快, 干燥时间越短。干燥温度对山药热泵干燥的速率有较大影响, 而切片厚度对干燥速率的影响较小; 山药热泵干燥符合 Page 模型, 模型拟合效果很好, 经验证, 模型预测值与实验值比较吻合, 能正确反应山药干燥规律, 该模型可以用来描述山药热泵干燥过程变化过程。对热泵干燥山药产品的品质进行分析表明, 与热风干燥相比, 采用热泵干燥方式山药具有较好的复水性, 色泽呈乳白色, 感官品质良好。

关键词: 山药; 热泵干燥; 干燥特性; 干燥模型

文章编号: 1673-9078(2014)10-212-217

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.10.036

Heat Pump Drying Characteristics and Mathematical Modeling of Chinese Yam

LI Li^{1,2}, SUN Jian^{1,2}, SHENG Jin-feng¹, LI Jie-ming¹, LI Chang-bao¹, ZHENG Feng-jin^{1,2}, FENG Dao-ning³, YOU Xiang-rong¹

(1. Institute of Agro-food Science & Technology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China) (2. Guangxi Crop Genetic Improvement and Biotechnology Lab, Nanning 530007, China) (3. Department of Electrical Engineering, Guangxi Vocational College of Mechanical & Electrical Technology, Nanning 530007, China)

Abstract: The heat pump drying characteristics and mathematical modeling of fresh Chinese yam were studied. The effects of different factors such as the temperature and thickness of yam on heat pump drying characteristics were investigated. Moreover, the obtained experimental data were processed using the SAS 8.0 software for mathematical modeling, and a heat pump drying curve and a drying rate curve were obtained. When the temperature was higher and the slice thickness was smaller, the drying speed was faster, and the drying time of Chinese yam was shorter. The drying rate was significantly affected by the temperature, but less affected by the slice thickness. The heat pump drying model for Chinese yam was in good agreement with the Page model. There was a good agreement between the predicted and experimental values, indicating that this model can describe and predict the moisture dynamics of Chinese yam during heat pump drying process. The quality of heat pump drying products was compared with that of hot air drying products. Chinese yam dried by the heat pump showed good rehydration behavior, with a milky white color and a good sensory quality.

Key words: Chinese yam; heat pump drying; drying characteristics; drying mode

山药为薯蓣科多年生宿根蔓草植物薯蓣属的块茎, 又叫山薯, 山蕷, 土薯, 玉芋, 甘薯等, 是我国

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303073-06); 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2013JQ04、桂农科 2013YM23、桂农科 2014JQ04)

作者简介: 李丽(1983-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事食品加工技术研究

通讯作者: 孙健(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事农产品加工技术研究

传统的药食同源食物之一^[1]。山药营养丰富, 含有皂甙、粘液质、胆碱、糖蛋白和自由氨基酸、多酚氧化酶、烟酸、抗坏血酸, 且有较多的防病保健功能, 可预防心血管疾病及肥胖, 提高机体免疫力, 增强机体消化吸收功能, 抗肿瘤, 延缓衰老和抗氧化, 降血压等^[2-3]。但山药不易保存, 容易发霉褐变, 因此, 可将山药进行脱水干燥处理来延长它的保质期。

热泵干燥是通过特制干燥系统从低温热源吸取热量, 在较高温度下作为有用热能进行干燥的一种干燥方法。与微波干燥、真空冷冻干燥、红外线辐射干燥、

微波干燥和热风-微波联合干燥等干燥技术相比,热泵干燥技术会克服了规模和能耗问题,它能够有效地利用环境热源,高效、节能,同时还适合于热敏性物料的干燥,目前广泛应用于木材工业、纺织、制药、食品和农产品加工等行业^[4-5]。我国热泵干制新技术起步较晚,用于食品加工方面的研究较少。目前,国内外对荔枝、龙眼、可可、胡萝卜、黄花菜等果蔬的热泵干燥工艺进行了研究^[6-9]。国内外对山药干燥的研究大多采用热风干燥、微波真空干燥或是冷冻干燥,但多数是研究它的活性物质、功能特性、药用机理等^[10],关于山药热泵干燥工艺方面的报道却很少。本文将对新鲜山药进行热泵干燥处理,拟建立与温度相关的干燥模型,并与试验值进行拟合验证,进一步对热泵干燥山药的品质进行分析,以期得到能够较好描述山药热泵干燥过程中水分比变化规律的数学模型,为山药热泵干制规模化生产和过程控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

新鲜山药,2014年3月购于南宁市坛洛镇山药种植基地。选择个体完整,粗细均匀,表皮无霉,无病虫害,无机械损伤,肉质洁白的长柱形新鲜山药。新鲜山药的含水率在76%~78%。

1.2 主要仪器设备

热泵干燥设备,自主研发;BS223S型电子天平,北京赛多利有限公司制造;202型恒温干燥箱,北京永光明医疗仪器厂制造;热风干燥箱:天津市泰斯特仪器有限公司;HP200精密色差仪:上海汉谱光电科学有限公司。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 干基含水率的测定

进行干燥实验时,样品平铺均匀放置,每隔1h称重,并计算干基含水率。山药的干基含水率计算公式为:

$$M_t(\%) = (G_t - G_g) / G_g \times 100\% \quad (1)$$

式中, M_t 为t时刻的干基含水率; G_t 为干燥至t时刻山药的质量,g; G_g 为山药干重,g。实验结果为三次平行测定的平均值。

1.3.2 干燥速率测定

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

式中:DR为干燥速率,%/h; M 为干基含水率,%; dt 为失去水分所需的时间,h。

1.3.3 水分比的测定

MR用于表示一定干燥条件下物料还有多少水分未被干燥除去,可以用来反应物料干燥速率的快慢,计算公式为:

$$MR = (G_t - G_g) / G_0 - G_g \quad (3)$$

式中: G_t 为干燥t时刻山药的重量,g; G_g 为山药干重,g; G_0 为山药干燥初始时刻重量,g。

1.3.4 山药品质的分析

(1)感官评定:分别从组织状态、色泽、气味3个方面进行评定。

(2)复水性:将10g样品置于烧杯中,加入150mL蒸馏水,每隔30min称样品的重量。

$$\text{复水率} = W_t / W_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_t 为复水沥干后的山药质量,g; W_0 为复水前的山药质量,g。

(3)色泽:使用精密色差仪测定样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值;每组样品平行测定6次。

1.3.5 数据处理

试验数据用SAS 8.0软件处理。

2 结果与讨论

2.1 山药的热泵干燥特性

2.1.1 温度对山药热泵干燥特性的影响

在山药切片厚度为5mm的条件下,考查不同干燥温度55、65和75℃对山药干燥特性的影响,结果见图1和图2。

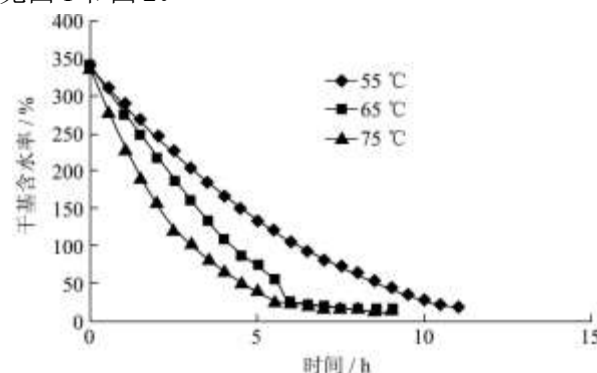


图1 不同温度下山药热泵干燥曲线

Fig.1 Drying curves of Chinese yam dried by the heat pump at different temperatures

由图1可以看出,干燥曲线光滑,呈逐渐下降趋势,说明山药热泵干燥过程连续进行,样品水分逐渐减少。山药干燥特性受温度的影响较大,温度越高,干燥曲线越陡,达到相同含水率时的时间越短。这是因为温度升高不仅加速了山药表面的水分蒸发速度,而且降低了气体的相对湿度,使山药表层水分向干燥

气体的扩散动力增加,进而缩短物料的干燥时间。在初始干基含水率相同的情况下,山药在不同温度下水分变化存在差异^[1]。在温度为75℃下,4.5h之后,干燥速率明显减慢,表明热泵干燥后期干燥的速率较慢。55℃干燥的时间最长,需要10.5h。

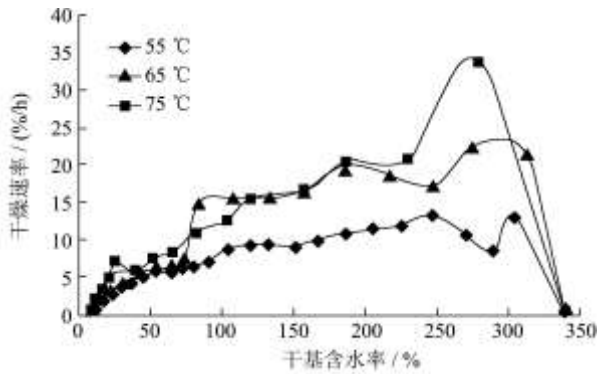


图2 不同温度下山药热泵干燥速率的变化

Fig.2 Changes in the drying rate of Chinese yam dried by the heat pump at different temperatures

图2可知,3条曲线均表现出明显的增速过程,然后急速下降,无明显的恒速干燥过程。高温与低温的影响差别明显。各曲线均存在明显的降速干燥阶段转折点,但在不同干燥条件下,转折点处山药水分含量有所不同。干燥速率随着水分的降低而逐渐下降,这是因为随着山药中的含水率越来越少,水分从内部迁移到表面的速率和从表面蒸发到周围空气中的速率都随之降低,导致干燥变缓慢。温度越高,干燥速率越快,75℃时山药干燥速率最快,而此时山药表面结壳比较严重,且营养成分破坏较大,因此,本试验选择65℃作为干燥温度。

2.1.2 切片厚度对山药热泵干燥特性的影响

在干燥温度65℃的条件下,研究不同的物料厚度对山药的干燥的影响,分别设定切片厚度为3mm、5mm和7mm,对山药片进行热泵干燥试验,从而考查切片厚度对山药干燥的影响,结果见图3和图4。

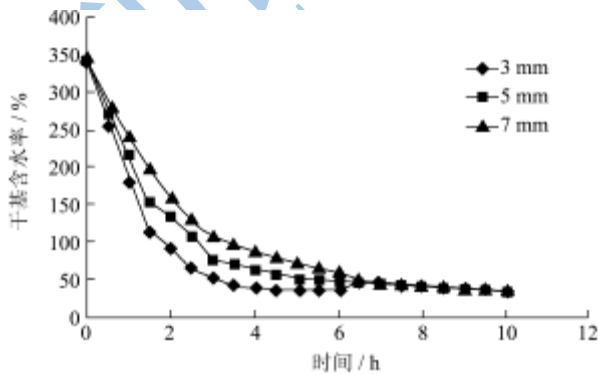


图3 不同切片厚度山药热泵干燥热泵干燥曲线

Fig.3 Drying curves of Chinese yam dried by the heat pump for different slice thicknesses

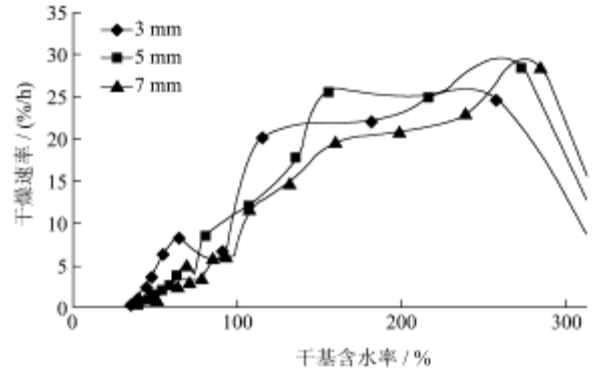


图4 不同切片厚度山药热泵干燥速率的变化

Fig.4 Changes in the drying rate of Chinese yam dried by the heat pump for different slice thicknesses

由图3可知,干燥温度相同,山药厚度对失水率也有一定影响,随着切片厚度的增加,脱水速率有所下降,热泵干燥至安全含水率的干燥时间有所增加。厚度为3mm时干燥安全含水率所需时间约为6h,而厚度为7mm时干燥时间为10h。这是由于物料越薄,内部水分迁移的距离就越小,对于一定体积的物料来说,厚度越大,与干燥空气接触的相对表面积越小,内部传热传质阻力越大,影响了热质传递,因此干燥速率就越缓慢^[6]。由图4可知,山药的厚度对干燥速率有一定影响,但影响不大,曲线相距较近,山药厚度对干燥速率的影响不如温度显著。

2.2 干燥模型的建立

2.2.1 干燥模型的确定

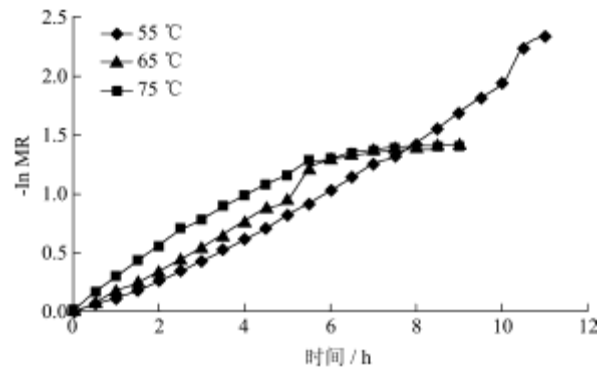


图5 切片厚度5mm时不同温度下-lnMR-t曲线

Fig.5 Curves of -ln MR vs. t at different temperatures with a slice thickness of 5mm

物料干燥是一个复杂的非稳态的传热传质过程。通过对大量农产品的实验研究,总结出了3种经验、半经验数学模型来描述其干燥过程。即:

指数模型: $MR = \exp(-Kt)$

单项扩散模型: $MR = A \exp(-Kt)$

Page 方程模型: $MR = \exp(-Kt^n)$

式中: t 为干燥持续时间; K 为干燥速率常数; A 为待定

速率系数; n 为幂指数, 均是与干燥条件有关的常数。

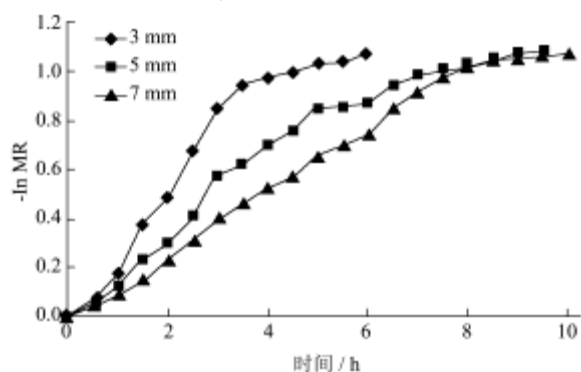


图 6 温度 65 °C 时不同切片厚度 -lnMR-t 曲线

Fig.6 Curves of -ln MR vs. t for different slice thicknesses at 65 °C

为确定山药热泵干燥的数学模型, 计算不同干燥温度、不同切片厚度条件下各时刻的 MR、lnMR、ln(-lnMR)值, 绘制 -lnMR-t 曲线图 (图 5 和图 6) 和 ln(-lnMR)-lnt 曲线图 (图 7 和图 8)。

将 ln(-lnMR)-lnt 和 -lnMR-t 关系曲线进行线性回归, 得到回归方程及相关系数如表 1 所示。

由表 1 可知, 山药干燥过程中, 试验数据在 lnMR-t 坐标系内相关系数在 0.9147~0.9841 之间变化, 在 ln(-lnMR)-lnt 坐标系内相关系数在 0.9487~0.9948 之间变化。由相关系数可知, 试验数据在 lnMR-t 和 ln(-lnMR)-lnt 坐标系内均具有较好的线性关系, 但对比分析可得, 试验数据在 ln(-lnMR)-lnt 坐标系内线性拟合精度更高, 对 ln(-lnMR)-lnt 进行指数转换即得

Page 方程, 说明 Page 方程更适合描述本试验山药热泵干燥过程。

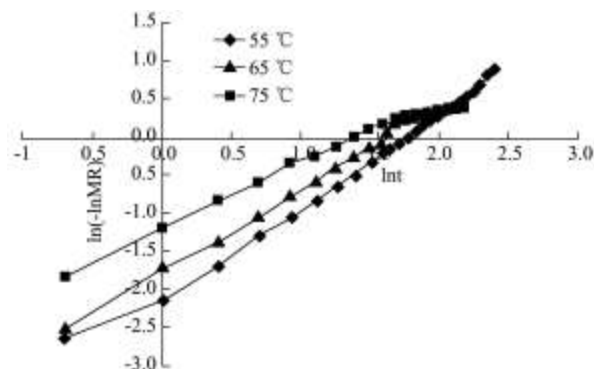


图 7 切片厚度 5 mm 不同温度下的 ln(-ln MR)-lnt 曲线

Fig.7 Curves of ln(-ln MR) vs. lnt at different temperatures with a slice thickness of 5 mm

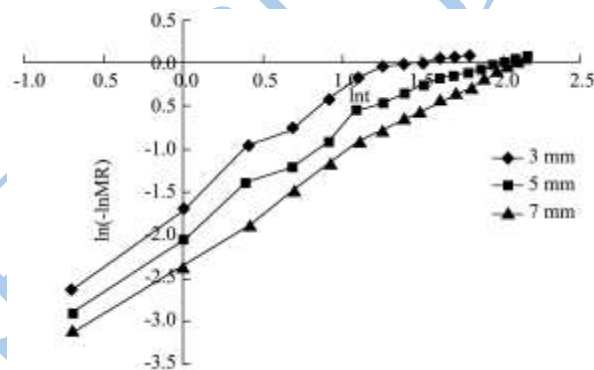


图 8 温度 65 °C 时不同切片厚度 ln(-ln MR)-lnt 曲线

Fig.8 Curves of ln(-ln MR) vs. lnt for different slice thicknesses at 65 °C

表 1 回归方程及相关系数

Table 1 Regression equations and correlation coefficients

因素水平	ln(-lnMR)-lnt		lnMR-t		
	回归方程	相关系数 R	回归方程	相关系数 R	
温度/°C	55	y=1.1819x-2.0824	0.9946	y=0.1655x+0.2116	0.9275
	65	y=1.053x-1.7639	0.9891	y=0.1804x+0.0294	0.9603
	75	y=0.7703x-1.1526	0.9805	y=0.208x-0.1531	0.9841
切片厚度/mm	3	y=1.0958x-1.6142	0.9487	y=0.1954x+0.081	0.9147
	5	y=1.0308x-1.9486	0.9715	y=0.1184x+0.1114	0.9329
	7	y=1.1402x-2.2948	0.9948	y=0.1182x+0.0209	0.9799

由图 5~图 8 可以判断模型中系数 K 和 n 随风温 (T, °C) 和切片厚度 (P, mm) 变化而发生变化, 即 K 和 n 是上述参数的函数。所以考虑 T、P 对 K 和 n 的影响, 将 K 和 n 与 T、P 的函数关系表示成一次方程:

$$K=b+b_1T+b_2P$$

$$n=c+c_1T+c_2P$$

利用 SAS8.0 统计软件进行处理, 对实验数据拟合 [12-14], 可求得山药热泵干燥拟合方程的各待定系

数。由此得出山药热泵干燥拟合方程为:

$$\ln(-\ln MR) = \ln(-0.009604 + 0.004674T - 0.024567P) + (1.28535 - 0.00289T + 0.0111P)lnt$$

2.2.2 拟合方程的模型验证

为检验回归模型与实验数据的拟合准确度, 选取实验中的一组数据进行检验, 实验条件为: 干燥温度 55 °C、切片厚度 5 mm。由 Page 方程在上述条件下进行预测, 预测值与实际值见图 9。Page 方程曲线与实验值基本拟合, 任意时刻 MR 的预测值与试验值相

对偏差(相对偏差 = |试验值-预测值|/试验值)均小于5%,说明 Page 方程较正确反应了山药热泵干燥规律,可以起到预测作用。

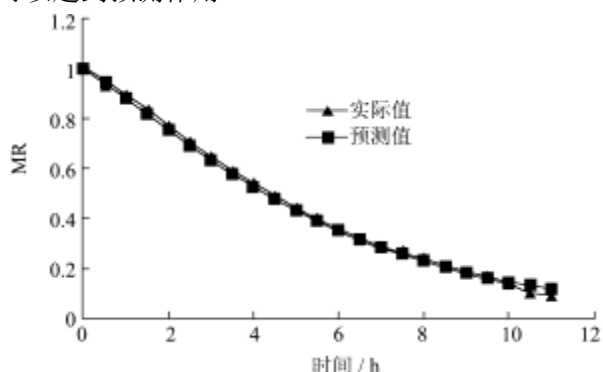


图9 干燥数学模型检验曲线

Fig.9 Test curve for a mathematical model of drying

表2 不同干燥方式下山药感官品质分析

Table 2 Analysis of sensory quality of Chinese yam with different drying methods

干燥方式	色泽	气味	组织状态
热泵干燥	乳白色, 无褐变, 颜色均匀	具有浓郁山药香气, 无异味	表面光滑, 形状平整, 无断裂现象
热风干燥	有褐变现象, 边缘黄褐色, 颜色不均匀	山药香气较淡, 略有异味	表面粗糙, 微卷, 少量断裂

表3 不同干燥方式山药色泽对比

Table 3 Comparison of the colors of Chinese yam with different drying methods

干燥方式	L*	a*	b*
热泵干燥	86.94±4.54 ^a	0.75±0.49 ^a	6.48±0.53 ^a
热风干燥	84.62±4.29 ^b	1.95±1.15 ^b	8.01±2.20 ^b

2.3 热泵干燥山药品质的影响

2.3.1 热泵干燥工艺对山药感官品质的影响

采用热泵干燥和热风干燥两种方式,按组织状态、色泽、气味3个方面对山药感官品质进行比较,如表2所示。

由表3可知,采用热泵干燥的山药片色泽呈乳白色,比较接近新鲜的山药的色泽,形状平整,无断裂现象,无异味。采用热风干燥的山药色泽变黄甚至变褐,形状严重卷曲,有少量断裂。说明热泵干燥能得到较好品质的产品。

2.3.2 热泵干燥对山药复水率的影响

干制品一般复水后食用,复水后恢复到原来状态的程度是衡量干制品的重要指标常用复水率来衡量。

色泽。其中L*值表示样品的亮度;a值,正值表示偏红,负值表示偏绿;b值,正值表示偏黄,负值表示偏蓝。L*越大,表明样品表面越亮;正a*表示红色,a*值越大,样品表面越红,正b*值表示黄色;b*值越大,黄色越深。从表3可以看出,热泵干燥的山药L*值较大,颜色较白,采用热风干燥的山药颜色较深,褐变严重。

3 结论

3.1 干燥温度和切片厚度影响山药热泵干燥特性。温度越高,切片厚度越薄,山药的干燥速率越快,干燥时间越短。干燥温度对山药的干燥速率有较大影响,而切片厚度对山药干燥速率影响较小。

3.2 山药的热泵干燥特性符合 Page 方程,通过 SAS8.0 对实验数据进行处理,得到山药热泵干燥的数学模型为 $\ln(-\ln MR) = \ln(-0.009604 + 0.004674T - 0.024567P) + (1.28535 - 0.00289T + 0.0111P)\ln t$ (MR 为水分比; T 为干燥温度/°C; P 为物料切片厚度/mm)。模型拟合效果很好,经验证,能正确反应山药干燥规律,可较好地预测山药热泵干燥过程失水率的变化过程。

3.3 对热风干燥山药产品的品质进行分析表明,与热风干燥相比,采用热泵干燥方式山药具有较好的复水性,色泽呈乳白色,感官品质良好。

参考文献

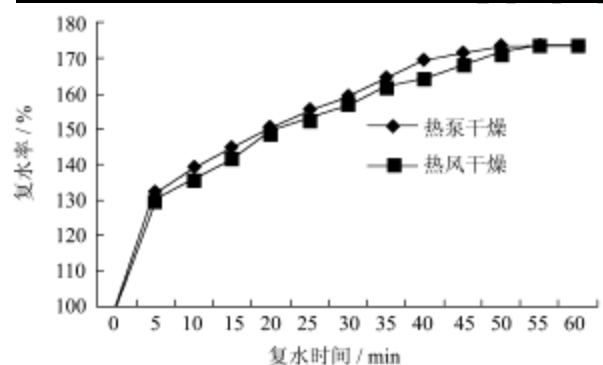


图10 山药复水性测定曲线图

Fig.10 Plot for determining rehydration behavior of Chinese yam

由图10可见,随着时间的增加,山药的复水率不断的上升,采用热泵干燥技术烘干的山药复水性较好,在40min时水分已到增重极限,达到饱和,采用热风干燥的山药片在55min时,水分才达到饱和。

2.3.3 热泵干燥山药色泽的影响

食品在干燥过程中常常伴随着褐变反应,从而造成产品色泽的显著变化,山药的干燥也不例外。如表3所示,实验采用L*值、a*值和b*值来表征山药的

- [1] 刘丽旋,林毅雄,段起,等.淮山的功能特性与加工技术研究进展[J].生物技术进展,2013,3(6):443-447
LIU Li-xuan, LIN Yi-xiong, DUAN Qi, et al. Research advances of functional characteristic and processing technology of yam. [J]. Current Biotechnology, 2013, 3(6): 443-447
- [2] 陈佳希,李多伟.山药的功能及有效成分研究进展[J].西北药学杂志,2010,25(5):398-400
CHEN Jia-xi, LI Duo-wei. Research progress of function and the effective components of yam [J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2010, 25(5): 398-400
- [3] Han CH, Liu J C, Fang S U, et al. Antioxidant activities of the synthesized thiol-contained peptides derived from computeraided pepsin hydrolysis of yam tuber storage protein, dioscorin [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3): 923-930
- [4] Hii C L, Lawa C L, Suannah S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108: 276-282
- [5] 任广跃,陈艳珍,张仲欣,等.怀山药热风、微波及真空干燥的实验研究[J].食品科技,2010,35(7):111-115
REN Guang-yue, CHEN Yan-zhen, ZHANG Zhong-xin, et al. Experimental study on hot-air, microwave and vacuum drying of Chinese yam [J]. Food Science & Technology, 2010,35(7): 111-115
- [6] 杨韦杰,唐道邦,徐玉娟,等.荔枝热泵干燥特性及干燥数学模型[J].食品科学,2013,34(11):104-108
YANG Wei-jie, TANG Dao-bang, XU Yu-juan, et al. Drying characteristics and mathematical modeling for heat pump drying of litchi [J]. Food Science, 2013, 34(11): 104-108
- [7] Chua K J, Chou S K, Yang W M. Advances in heat pump systems: A review [J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 3611-3624
- [8] Colak N, Hepbasli A. A review of heat pump drying: Part 1-systems, models and studies [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2180-2186
- [9] Hii C L, Law C L, Suzannah S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108 (2): 276-282
- [10] FANG Zhongxiang, WU Dan, YV Dong, et al. Phenolic compounds in Chinese purple yam and changes during vacuum frying [J]. Food Chemistry, 2011, 128(4): 943-948
- [11] 李晖,任广跃,段续,等.热泵干燥怀山药片的工艺研究[J].干燥技术与设备,2013,11(6):36-41
LI Hui, REN Guang-yue, DUAN Xu, et al. Study on heat pump drying process of dioscorea opposite slice [J]. Drying Technology & Equipment, 2013, 11(6): 36-41
- [12] Duygu Evin. Thin layer drying kinetics of Gundelia tournefortii [J]. Food and Bioproducts Processing, 2012 ,90: 323-332
- [13] 赵思明.食品科学与工程中的计算机应用[M].北京,化学工业出版社,2005
ZHAO Si-ming. Food science and engineering application [M]. Beijing, chemical industry press, 2005
- [14] 李菁,萧夏,蒲晓璐,等.紫薯热风干燥特性及数学模型[J].食品科学,2012,33(5):90-94
LI Jing, XIAO Xia, PU Xiao-lu, et al. Characteristics and mathematical model of hot-air drying for purple sweet potato [J]. Food Science, 2012, 33(5): 90-94