

苹果片太阳能低温吸附干燥工艺优化与模型研究

张芳^{1,2}, 黄玉龙^{1,2}, 汤莹^{1,2}, 李明泽^{1,2}, 庞中存^{1,2}, 康三江^{1,2}

(1. 甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 甘肃兰州 730070)

(2. 甘肃省果蔬贮藏加工技术创新中心, 甘肃兰州 730070)

摘要:以新鲜苹果片为研究对象,采用本单位研制的太阳能低温吸附干燥(LSAD)系统为实验设施,探讨干燥温度、相对湿度、干燥介质流速、载样量、切片厚度对苹果片太阳能低温吸附干燥特性的影响。结果表明,苹果片太阳能低温吸附干燥过程可以分为三个阶段:即调整、恒速、降速干燥阶段;其中干燥温度对苹果片干燥的速率影响最显著,如50℃比10℃节时达65.9%,各因素对苹果片干燥的影响的主次顺序为干燥温度>相对湿度>干燥介质流速>切片厚度>载样量,苹果片太阳能低温吸附干燥优化的工艺条件为:干燥温度50℃、相对湿度20%、干燥介质流速0.9 m/s、载样量7.5 kg/m²、切片厚度3 mm;采用数学软件选用3种模型对实验数据进行计算拟合,苹果片干燥数学模型与Page模型拟合程度最高,苹果片太阳能低温吸附干燥数学表达式为 $MR = \exp(-0.00557 \cdot t^{1.76669})$;此模型的建立为应用太阳能低温吸附干燥生产脱水苹果片提供理论支撑。

关键词:苹果;太阳能低温吸附干燥;干燥特性;干燥模型

文章编号: 1673-9078(2019)08-160-167

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.8.024

Studies on Characteristics and Model of Solar Low-temperature Adsorption Drying for Fresh Apple Slices

ZHANG Fang^{1,2}, HUANG Yu-long^{1,2}, TANG Ying^{1,2}, LI Ming-ze^{1,2}, PANG Zhong-cun^{1,2}, KANG San-jiang^{1,2}

(1. Agricultural product storage and processing research institute, Gansu academy of agricultural sciences, Lanzhou 730070, China)(2. Innovation Center of Fruit and Vegetable Storage and Processing of Gansu, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Using fresh apple slices as the research object and the low-temperature solar adsorption drying (LSAD) system developed in our company as the experimental facility, the effects of drying temperature, relative humidity, drying medium flow rate, sample loading amount and slice thickness on the LSAD characteristics of apple slices were investigated. The results showed that the LSAD process could be divided into three stages: Adjustment, constant speed, and decelerating drying stages. The drying temperature had the most significant effect on the drying rate of fresh apple slices e.g. drying at 50℃ reduced the drying time by 65.9% than at 10℃. The primary and secondary influences of the variables on the drying of apple slices were drying temperature > relative humidity > flow rate of drying medium > slice thickness > sample loading amount. The optimum process conditions for LSAD of apple slices were: drying temperature 50℃, relative humidity 20%, flow rate of drying medium 0.9 m/s, sample loading amount 7.5 kg/m², slice thickness 3 mm. The mathematical software was used to select and fit the experimental data by three models, and the mathematical model of apple slice drying had the highest fitting degree with Page model. The mathematical equation for LSAD of fresh apple slices was $MR = \exp(-0.00557 \cdot t^{1.76669})$. The establishment of such a model provides the theoretical support for the application of LSAD to the production of dehydrated apple slices.

Key words: fresh apple slices; solar low-temperature adsorption drying; drying characteristics; drying model

苹果是我国第一大水果,占水果总量的30%,是最具竞争力的农产品之一。每年除上市销售的鲜苹果及苹果浓缩汁、苹果罐头、苹果果酱外,仍有一大部分苹果因运输、贮存等多种原因屯仓积压腐烂,造成

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目(31460399);现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-27)

作者简介: 张芳(1977-),女,副研究员,研究方向:果蔬干燥机理与果蔬精深加工技术

极大的浪费^[1]。苹果加工产品的多元化开发势必是未来发展趋势,而苹果干燥产品也将是苹果加工产业的发展方向;苹果干燥制品能较好地保持苹果中碳水化合物、维生素及矿物质等营养成分,延长贮藏期;干制品还可应用到食品加工的许多领域,有利于改变产品品质构,丰富果蔬产品类型。食品干燥是一项重要的加工技术,脱水干燥能降低食品的水分含量,延长保存期^[2,3]。目前,红外辐射干燥^[4]、热风-脉动干燥^[5]、冷冻干燥^[6]、压差干燥^[7]和真空组合干燥^[8]等干燥技术

都可以用来延长脱水果蔬的保质期。干燥是高能耗行业,能源是人类赖以生存的五大要素之一^[9],而太阳辐射能是取之不竭用之不尽的洁净自然能源^[10],利用太阳能进行的干燥技术,已成现今发展“低碳”、环保的一项重要内容^[11]。太阳能干燥是指利用太阳辐射能及太阳能相关干燥装置所进行的干燥工业^[12,13],太阳能干燥主要应用于工业干燥、农产品干燥和其他物料的干燥^[14],具有能节省能源、缩短干燥时间等优点,能满足大多数农副产品中、低温干燥的要求^[15,16]。果蔬太阳能低温吸附式干燥^[17,18]是指采用太阳能作为热能来源以干燥空气为吸附剂在低温下 0~50 ℃(相对热风干燥的 70~80 ℃)进行的果蔬干燥作业,本实验以新鲜苹果为原料,在本单位建成的太阳能低温吸附式干燥系统内对苹果片太阳能低温吸附式干燥特性及模型进行研究,探索太阳能低温吸附干燥温度、干燥介质流速、载样量、切片厚度等因素对水分比的影响,并优化出最佳干燥工艺技术参数;对实验数据进行相关性拟合,建立鲜苹果片太阳能低温吸附干燥的数学模型,为脱水苹果片太阳能低温吸附干燥的生产应用提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 实验设施及结构组成

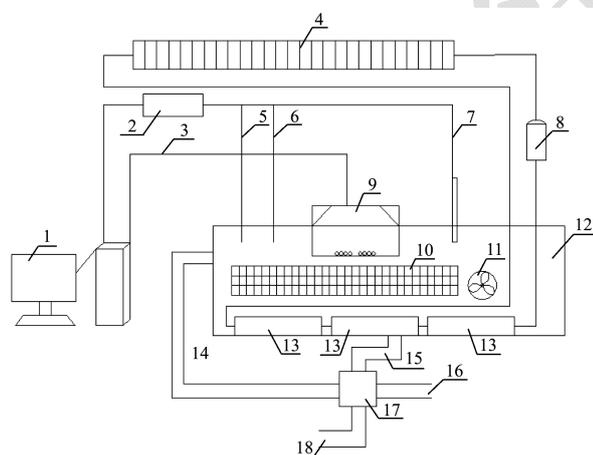


图1 太阳能低温吸附式干燥系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of solar low-temperature adsorption drying system

注: 1.计算机; 2.数据采集器; 3.电子天平连线; 4.太阳能集热器; 5.温度传感器; 6.湿度传感器; 7.风速计; 8.太阳能蓄热水箱; 9.电子天平; 10.物料架; 11.轴流风机; 12.太阳能低温吸附干燥室; 13.暖气片; 14.处理风出口; 15.处理风入口; 16.再生风进口; 17.转轮除湿机主机; 18.再生风出口

太阳能低温吸附式果蔬脱水干燥系统由太阳能接收部分、通风除湿及控制系统、干燥室等部分组成。

1.2 材料与试剂

新鲜苹果采购于甘肃省静宁县威戎镇,新鲜、无腐烂,外形大小一致,用保鲜袋装好,运回放入实验冷库备用。

1.3 仪器与设备

BT224S 型精密电子天平,德国 Sartorius 股份公司;ANEMOMASTER 6036-BC 型风速仪,Designed by Kanomax in Japan; JWSK-6AC01A 型温湿度传感器,北京昆仑海岸公司;除湿机 BA-600E, 26 kg/h、轴流式风机(型号 RYJS-5, 转速 1400 r/min, 功率 250 W, 风量 5700 m³/h),上海锐友机械有限公司;物料称重采用自制食品级塑料网盘。

1.4 实验步骤

1.4.1 实验工艺流程

苹果鲜样清洗→切片(先横切再 1/4 扇形片)→护色浸泡(30 min)→沥水→称质量→在网盘上铺料→进行太阳能低温吸附式干燥→监测温度、取样(实验数据)→绘制曲线→数学计算→数学建模

实验步骤:观测不同干燥条件等情况下苹果片太阳能吸附干燥的水分比及干燥速率的变化。实验中,每隔 1 h 取出网盘在干燥室内电子天平上称重(将图 1 电子天平的连接方式自动称重调整为手动称重),记录数值,当苹果片干燥至含水率约 14%(国标要求含水率)时,实验停止。

1.4.2 苹果的太阳能吸附干燥特性试验及工艺优化试验设计

试验干燥条件为:干燥温度 50 ℃、相对湿度 20%、载样量 7.5 kg/m²,干燥介质流速为 0.5 m/s,切片厚度为 3 mm,单因素实验时只变化其中一个条件,数学建模的实验数据也采用此条件下的实验数据;单因素实验设计水平如下:对相对湿度设定为 20%、30%、40%、50%时苹果片太阳能吸附干燥的水分比的影响;对干燥温度为 10 ℃、20 ℃、30 ℃、40 ℃、50 ℃时苹果片太阳能吸附干燥的水分比的影响;干燥介质流速为 0.1 m/s、0.3 m/s、0.5 m/s、0.7 m/s、0.9 m/s 时苹果片太阳能吸附干燥的水分比的影响;对载样量为 2.5 kg/m²、5.0 kg/m²、7.5 kg/m²、10.0 kg/m²、12.5 kg/m² 时苹果片太阳能吸附干燥的水分比的影响;对切片厚度为 1 mm、3 mm、5 mm、7 mm、9 mm 时太阳能吸附干燥对苹果片的水分比的影响。

在上述单因素实验的基础上调整部分实验因素水平,确定正交实验因素与水平见表 1。

表1 正交因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

因素	水平				
	A 干燥温度/°C	B 相对湿度/%	C 风速/m/s	D 载样量/kg/m ²	E 切片厚度/mm
1	20	20	0.3	5.0	3
2	30	30	0.5	7.5	6
3	40	40	0.7	10.0	9
4	50	50	0.9	12.5	12

1.4.3 原料初始含水率测定

原料原始含水率采用 GB/T 5009.3-2010 《食品中水分的测定方法》^[19]进行测定计算。

1.4.4 水分比的测定

水分比(MR)采用下式进行计算,含水率以湿基质量计算。

$$MR = \frac{W_t}{W_0}$$

式中:本实验水分比采用简化后的水分比^[20-24]进行计算;W_t为干燥t时刻苹果片含水率/%;W₀为苹果鲜样含水率/%。

1.5 模型拟合

干燥模型拟合采用 1STOPT 数学软件及 EXCEL 7.0 进行计算拟合分析。

1.6 数据处理

实验数据用 EXCEL 7.0 和 1STOPT 数学软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 干燥特性及干燥试验结果

2.1.1 相对湿度对干燥特性的影响

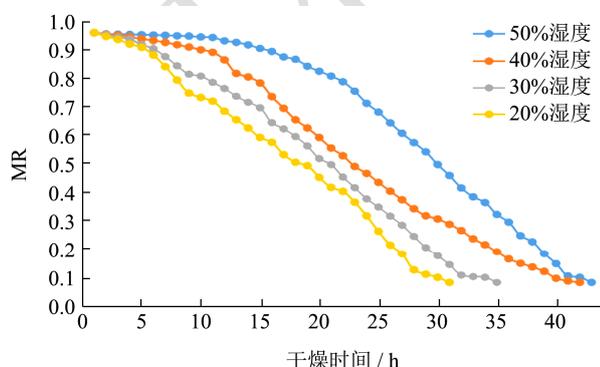


图2 不同湿度下苹果片太阳能吸附干燥水分比曲线

Fig.2 Moisture ratio curve of apple SLAD under different humidity

由图2可知,苹果片干燥过程可以分为三个阶段:即调整干燥阶段(1~6h),当湿物料与干燥介质相接

触时,因物料温度低于干燥介质的温度,表面的水分开始气化,干燥速率不断增大,此阶段的干燥速率低于恒速段干燥速率;第二个阶段为恒速干燥阶段(7~25h),在此阶段,由于物料水分含量较大,内部水分能迅速达到物料表面,干燥速率为物料表面水分的气化速率所控制,干燥介质传给物料的热量全部用于水分的气化,物料表面的温度维持恒定,一定条件下物料表面的水蒸汽分压也维持恒定,故干燥速率恒定不变;第三个阶段为降速干燥阶段(25h以后),当物料被干燥达到临界水分含量后,便进入降速干燥阶段,物料中所含水分较少,随着物料水分含量逐渐减少,物料内部水分的迁移速率也逐渐减小,故干燥速率不断下降;在不同相对湿度的条件下,相对湿度越大水分比变化越小,所需要的干燥时长越长,太阳能吸附干燥速率就越低,相对湿度分别为20%、30%、40%、50%时干燥分别需要31h、35h、42h、43h才能达到平衡含水率,苹果片太阳能吸附干燥水分比随着干燥时间的延长而逐渐降低,相对湿度越低,干燥速率越快,水分比曲线下降速度也越快,相对湿度与干燥速率成反比,此干燥过程特性为苹果片太阳能低温吸附式干燥设备的设计及改进提供基础参数。

2.1.2 干燥温度对干燥特性的影响

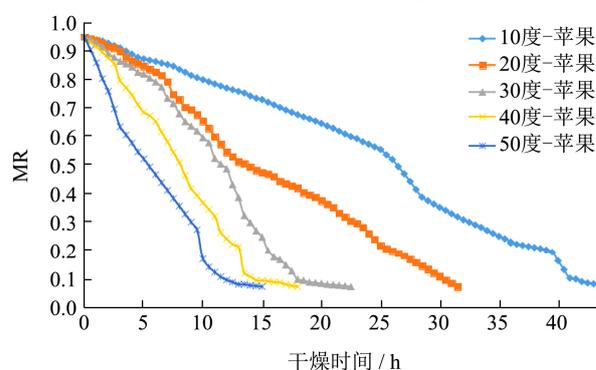


图3 不同温度下苹果片太阳能吸附干燥水分比曲线

Fig.3 Moisture ratio curve of apple SLAD at different temperatures

由图3可知,干燥调整阶段,物料内部湿度梯度较大,湿度梯度变化轻微,干燥速率也较小,干燥介质从物料表面带走的水分也较少;随着时间的推移和

干燥过程的进行进入恒速干燥阶段,湿度梯度变化剧烈,干燥速率也较大,干燥介质从物料表面带走的水分也较多;外层细胞向内部收缩,内部水分传递逐渐成为控制因素,物料内部湿度梯度变小,从物料表面蒸发掉的水分逐渐减少,干燥速率逐渐变慢。这说明苹果片内部的水分变化是逐渐深入的,水分扩散是一个非稳态过程。苹果片水分比受温度的影响最大,温度越高,水分比曲线越陡,达到苹果片平衡含水率所需的时间越短,干燥效率越高;当干燥温度分别为 50℃、40℃、30℃、20℃、10℃时,苹果片分别需要 30 h、37 h、43 h、48 h、88 h 才能达到平衡含水率,50℃比 10℃节时幅度达 65.9%;在实验温度范围内,水分比曲线随温度的降低而逐渐缓慢降低,苹果片太阳能吸附干燥速率随着温度的增大而逐渐增大;太阳能低温吸附式干燥温度越高,热空气的相对湿度就越低,一定时间内能够带走的水蒸气也越多,样品与热空气的湿度差也越大,干燥速度也越大;太阳能低温吸附式干燥温度越高,样品温度也越高,苹果片表面水分蒸发速度和内部水分迁移速度都会增加,干燥速率也增大,脱水时间越短。

2.1.3 载样量对干燥特性的影响

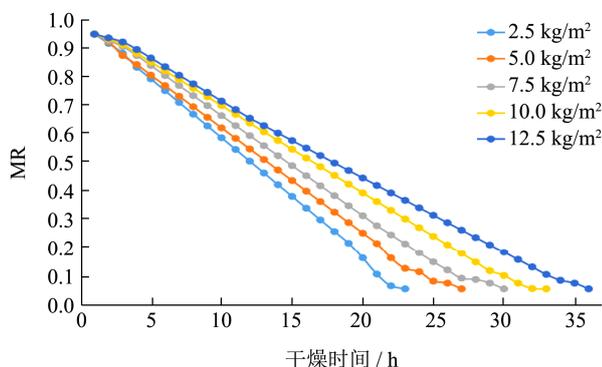


图4 不同载样量对苹果太阳能低温吸附干燥水分比曲线
Fig.4 Moisture ratio curve of apple SLAD at different loading amount

由图4可知,随着载样量的增加,水分比呈现下降的趋势,在载样量较小时,单位时间内蒸发水分少,干燥速度慢,样品表面的热空气远离饱和状态;当载样量增加时,因为切片厚度相同,样品表面积也随之增大,单位时间内蒸发水分也会增加;单位时间内蒸发水分与载样量之间并不是线性关系,载样量太小,经济性变差,载样量较大时,样品表面的热空气逐渐趋于饱和,前者的增加速度小于后者的增加速度,所以水分比逐渐下降;随着载样量的增加,苹果片的干燥时间也随之延长。当载样量分别为 2.5 kg/m²、5.0 kg/m²、7.5 kg/m²、10.0 kg/m²、12.5 kg/m²时,苹果片分别需要 24 h、27 h、30 h、33 h、36 h 达

到平衡含水率,2.5 kg/m²载样量的干燥时间比载样量为 12.5 kg/m²时缩短了 50%,但经济性比 12.5 kg/m²的差,生产上应该综合考量;在本实验范围内,水分比曲线随载样量的增加而逐渐变缓慢,苹果片太阳能吸附干燥速率随着载样量的增大而逐渐增大,这可能是由于单位面积载样量增大,样品表面积也随之增大,单位时间内蒸发的水分也会增加,这一研究结果也可以为实际生产中太阳能干燥设备最佳载样量的确定提供参考。载样量固定,温度湿度如何控制,最好有说明。

2.1.4 干燥介质流速对干燥特性的影响

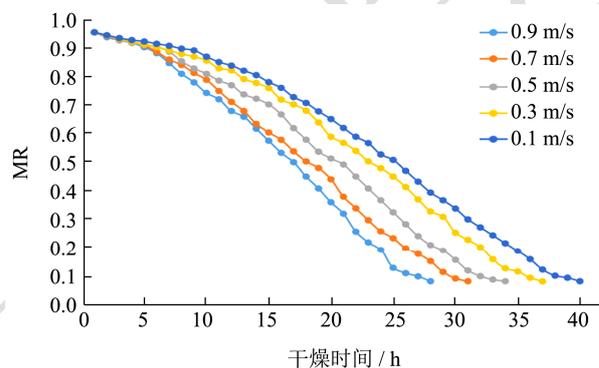


图5 不同干燥介质流速下太阳能吸附干燥苹果水分比曲线
Fig.5 Moisture ratio curve of the apple by SLAD at different velocity of drying medium

由图5可知,在不同干燥介质流速条件下,MR随干燥时间延长不断下降,当干燥介质流速为 0.9 m/s 时,它的干燥速率最快,水分比下降的曲线最陡。

随干燥介质流速的增加,苹果片的干燥时间也随之减少。当干燥介质流速分别为 0.9 m/s、0.7 m/s、0.5 m/s、0.3 m/s、0.1 m/s 时,苹果片分别需要 28 h、31 h、35 h、37 h、40 h 达到平衡含水率;在实验干燥介质流速范围内,水分比曲线随干燥介质流速的增加而迅速降低,苹果片太阳能吸附干燥速率随着干燥介质流速的增大而逐渐增大。这可能是因为干燥介质流速越大,太阳能吸附干燥的空气通透性越好,热交换效率增加从而使湿苹果片与热空气的热交换速度增大,干燥介质流速越大,干燥动力越大,干燥的速率越快,到达平衡含水率所需时间越少,干燥介质流速的改变对干燥过程的影响不是十分显著,在实际生产中,干燥介质流量选取还要兼顾经济指标,在本文实验条件下,0.5 m/s~0.7 m/s 的气体流速是比较经济合理的。

2.1.5 不同切片厚度对干燥特性的影响

由图6可知,切片厚度越大,干燥得越慢,因为厚度越大,苹果片的比表面积越小,同一时间内的含水量就越高,达到相对平衡含水量时所需的时间就越长;随着切片厚度的增加苹果的脱水速度越慢,水分比呈

缓慢下降趋势，切片厚度越大苹果片内部水分越不容易蒸发出来，苹果切片的厚度对水分比有一定的影响。随着切片厚度的增加，苹果片的干燥时间也随之延长。

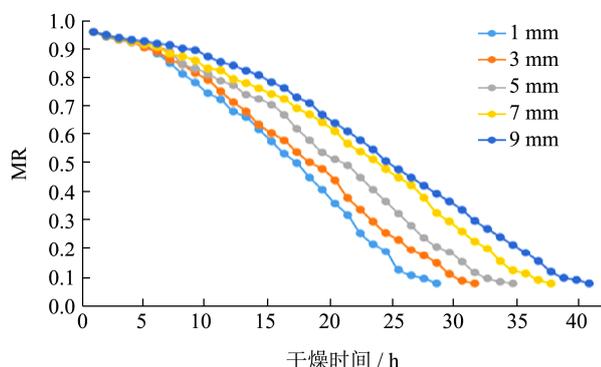


图6 不同切片厚度时苹果太阳能吸附干燥水分比的曲线

Fig.6 Moisture ration curve of apple SLAD in different slice thickness

当切片厚度分别为1、3、5、7、9 mm时，苹果片分别需28、31、35、38、40 h达到平衡含水率，9 mm的苹果片的干燥时长是切片厚度为1 mm时的干燥时长的1.42倍；在实验温度范围内，水分比曲线随切片

的厚度的降低而迅速降低，苹果片太阳能吸附干燥速率随着切片的厚度的降低而逐渐增大。这可能是因为切片厚度增大，太阳能吸附干燥的空气通透性变差，热交换效率降低从而影响了湿苹果片与热空气的热交换速度。

2.2 干燥工艺优化

按照上述工艺流程和正交试验安排表，进行苹果太阳能低温吸附干燥正交试验，结果如表2。从表2可知，干燥环境因素对苹果片干燥速率有着重要的影响，干燥温度和相对湿度显著影响苹果片的干燥速率，其次是干燥介质流速、载样量、切片厚度，各因素影响的主次顺序是干燥温度>相对湿度>干燥介质流速>载样量>切片厚度，综合考虑苹果片最优干燥工艺为A₄B₁C₄D₂E₁即干燥温度50℃+相对湿度20%+干燥介质流速0.9 m/s+载样量7.5 kg/m²+切片厚度3 mm，为苹果片最佳干燥工艺参数，即采用此工艺干燥条件制成的苹果片脱水速率最大。

表2 正交实验安排及结果表

Table 2 Orthogonal experiment arrangement and results

试验号	A 干燥温度/℃	B 相对湿度/%	C 风速/(m/s)	D 载样量/(kg/m ²)	E 切片厚度/mm	干燥速率/(g/min)
1	1(20℃)	1(20%)	1(0.3)	1(5.0)	1(3)	0.1710
2	1(20℃)	2(30%)	2(0.5)	2(7.5)	2(6)	0.0184
3	1(20℃)	3(40%)	3(0.7)	3(10.0)	3(9)	0.0109
4	1(20℃)	4(50%)	4(0.9)	4(12.5)	4(12)	0.0121
5	2(30℃)	1(20%)	2(0.5)	3(10.0)	4(12)	0.3227
6	2(30℃)	2(30%)	1(0.3)	4(12.5)	3(9)	0.3730
7	2(30℃)	3(40%)	4(0.9)	1(5.0)	2(6)	0.1427
8	2(30℃)	4(50%)	3(0.7)	2(7.5)	1(3)	0.3126
9	3(40℃)	1(20%)	3(0.7)	4(12.5)	2(6)	0.5580
10	3(40℃)	2(30%)	4(0.9)	3(10.0)	1(3)	0.5590
11	3(40℃)	3(40%)	1(0.3)	2(7.5)	4(12)	0.2290
12	3(40℃)	4(50%)	2(0.5)	1(5.0)	3(9)	0.1076
13	4(50℃)	1(20%)	4(0.9)	2(7.5)	3(9)	1.3643
14	4(50℃)	2(30%)	3(0.7)	1(5.0)	4(9)	0.9887
15	4(50℃)	3(40%)	1(0.3)	4(12.5)	1(12)	0.5832
16	4(50℃)	4(50%)	2(0.5)	3(10.0)	2(6)	0.4759
k1	0.053	0.604	0.308	0.353	0.406	
k2	0.288	0.485	0.258	0.481	0.294	
k3	0.363	0.241	0.468	0.338	0.464	
k4	0.849	0.223	0.520	0.382	0.388	
R	0.796	0.381	0.262	0.143	0.170	
最优水平	A4	B1	C4	D2	E1	

2.3 验证试验

采用本试验条件下苹果片最佳干燥工艺,即采用干燥温度 50 ℃+相对湿度 20%+干燥介质流速 0.9 m/s+载样量 7.5 kg/m²+切片厚度 3 mm,进行了 3 次验证实验。验证实验干燥速率分别为 1.651 g/min、1.642 g/min、1.647 g/min,平均值为 1.646 g/min,结果较均一,高于上述正交表中的结果,说明此结果可信度较高,说明此干燥工艺能使太阳能低温吸附干燥的干燥速率达到 1.646 g/min。

2.4 实验干燥模型拟合

2.4.1 干燥模型选择与确定

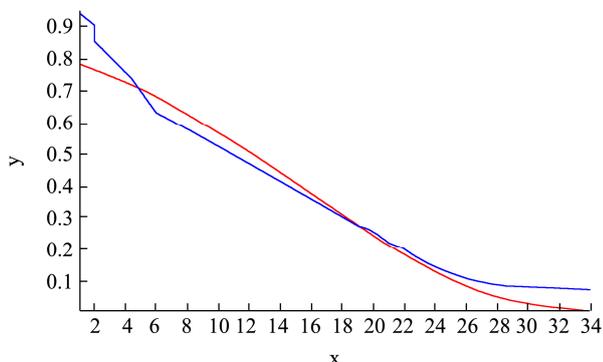


图7 太阳能低温吸附式干燥干燥模型拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of SLAD

高含水多孔介质物料的干燥涉及液相流动、毛细流动、蒸汽流动等诸多现象,是一个非常复杂的传热传质过程^[25]。国内外许多学者通过对不同农产品的干

燥过程进行研究,本研究筛选了 3 种较常用的基础薄层干燥数学模型来描述苹果片的干燥过程^[26-28]。如表 3。由上述正交实验结果可知第 13 号正交实验的干燥速率最大,所以取太阳能吸附式干燥第 13 号正交实验条件下的实验数据采用非线性回归程序分别对这三种干燥模型进行拟合,每次试验进行三个平行实验,结果采用 3 次试验平均值,结果如表 4、图 7 所示。

利用 EXCEL 7.0 和 1STOPT 统计软件进行处理,常用非线性回归法对上述正交第 13 号实验的实验数据进行拟合计算^[26-29],通过 3 种基础干燥模型对第 13 号实验的的苹果片的干燥过程水分比随干燥时间的实验数据进行拟合计算,结果见表 4、图 7。通过比较 3 种模型的 RMSE、SSE、R²、DC 和 χ^2 可以发现,Page 模型拟合的 RMSE、SSE、 χ^2 最小。其中 R²=0.9959、DC=0.9905,都趋近于 1,表明 Page 模型最能反映实际观测值,更适合描述苹果片太阳能干燥规律。因此,Page 模型更适合描述苹果片太阳能低温吸附式干燥降水规律。

表 3 三种基础干燥模型

Table 3 Three basic drying models

序号	模型类型	模型名称	模型方程
1	半经验方程	指数模型	MR=exp(-Kt)
2	半理论方程	单项扩散模型	MR=Aexp(-Kt)
3	半理论方程	Page 方程模型	MR=exp(-Kt ⁿ)

注:MR 为苹果片干燥过程水分比,t 为太阳能干燥时间/h;K 为干燥速率常数;A 为待定速率系数;n 为幂指数,均是太阳能干燥条件有关的常数。

表 4 三种基础干燥模型计算结果

Table 4 Calculation result of three basic drying models

模型名称	模型方程	均方差	残差平方和	相关系数	确定系数	卡方系数
指数模型	MR=exp(-0.0497*t)	0.10819	0.3395	0.9423	0.8696	0.5657
单项扩散模型	MR=1.1895*exp(-0.0613*t)	0.08584	0.2137	0.9604	0.9179	0.3758
Page 方程模型*	MR=exp(-0.0033*t ^{1.95199})	0.02908	0.0245	0.9959	0.9905	0.0426

注: *表示该模型为最适模型。

2.4.2 干燥模型的验证

对正交优化实验结果的干燥工艺条件(干燥温度 50 ℃、相对湿度 20%、载样量 7.5 kg/m²,干燥介质流速为 0.9 m/s,切片厚度 3 mm)下取得的实验数据进行验证,验证实验方程为 MR=exp(-0.005571*t^{1.766695}),效果如图 8 所示,各实验点由 MR 预测值与实测值确定位置,均分布在曲线 y=x 附近,实测值(图中蓝色线)与计算值(图中红色线)的吻合情况较好,结果表明 Page 模型能够较好地描述苹果片样品利用该系统进行太阳能低温吸附式干燥的干燥过程。

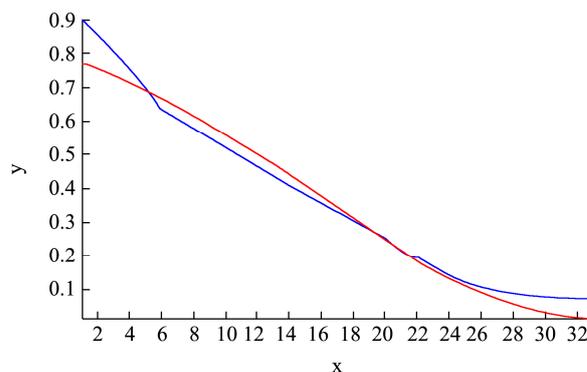


图8 太阳能低温吸附干燥数学模型检验曲线

Fig.8 Test curve of SLAD mathematical model

3 结论

3.1 苹果片太阳能低温吸附干燥过程可以分为三个阶段:调整阶段、恒速阶段、降速阶段。各因素对苹果片太阳能低温吸附干燥的影响的主次顺序为干燥温度>相对湿度>干燥介质流速>切片厚度>载样量,其中干燥温度对苹果片太阳能低温吸附干燥的速率影响最显著,相对湿度、干燥介质流速、载样量、苹果切片厚度对其影响相对较小。随着干燥温度等参数向干燥有利条件变化,干燥速率升高,水分比下降速度也加快,更有利于干燥进行。通过正交试验优化后的苹果片太阳能低温吸附干燥最佳工艺参数为:干燥温度 50 ℃、相对湿度 20%、干燥介质流速 0.9 m/s、载样量 7.5 kg/m²、切片厚度 3 mm;验证试验结果表明该工艺条件下脱水速率可达 1.646 g/min。

3.2 对实验数据进行非线性回归拟合,太阳能低温吸附式干燥数学模型与 Page 模型拟合程度最高,其数学表达式为 $MR=\exp(-0.005571*t^{1.766695})$,该公式能够预测苹果片太阳能低温吸附式干燥过程;通过最优干燥工艺参数实验值进行验证,各实验点的 MR 模型预测值与实验值吻合性好,表明 Page 模型适合对苹果片太阳能低温吸附干燥过程进行模拟。

参考文献

- [1] 唐凤梅.苹果加工现状问题及措施的探讨[J].中外食品工业,2014,11:58-59
TANG Feng-mei. Discussion on the present situation and measures of apple processing [J]. Chinese and Foreign Food Industry, 2014, 11: 58-59
- [2] 吕豪,吕为乔,崔政伟,等.不同微波环境下苹果片干燥特性分析[J].农业机械学报,2018,49(11):433-439
LYU Hao, LYU Wei-qiao, CUI Zheng-wei, et al. Analysis on drying characteristics of apple slices under different microwave conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 433-439
- [3] ZHANG M, TANG J, Mujumdar A S, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(10): 524-534
- [4] 林喜娜,王相友.苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价[J].农业机械学报,2010,41(6):128-132
LIN Xi-na, WANG Xiang-you. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 128-132
- [5] 王雪媛,陈芹芹,毕金峰,等.热风-脉动压差闪蒸干燥对苹果片水分及微观结构的影响[J].农业工程学报,2015,31(20): 287-293
WANG Xue-yuan, CHEN Qin-qin, BI Jin-feng, et al. Effect of hot air-pulsed sudden decompression flashing drying on moisture and microstructure in apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 287-293
- [6] Tatemoto Y, Mibu T, Yokoi Y, et al. Effect of freezing pretreatment on the drying characteristics and volume change of carrots immersed in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 173: 150-157
- [7] 何新益,程莉莉,刘金福,等.苹果片变温压差膨化干燥特性与动力学研究[J].农业机械学报,2012,43(5):130-135
HE Xin-yi, CHENG Li-li, LIU Jin-fu et al. Drying characteristics and dynamics of apple slices by explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 130-135
- [8] CHEN Z G, GUO X Y, WU T A. Novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 30: 28-34
- [9] 李洪斌,李志民,张跃,等.农副产品太阳能干燥技术的研究和发展[J].云南师范大学学报(自然科学版),2004,24(1): 37-40
LI Hong-bin, LI Zhi-ming, ZHANG Yue, et al. The technology of solar drying for agricultural by products: the study and development [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2004, 24(1): 37-40
- [10] 刘鉴民.太阳能利用原理技术工程[M].北京:电子工业出版社,2010,6:193-405
- [11] 潘学飏,高建民,伊松林,等.杨木太阳能干燥工艺特性[J].木材工业,2011,25(1):41-43
PAN Xue-biao, GAO Jian-min, YIN Song-lin, et al. Characteristics of poplar solar drying process [J]. Wood Industry, 2011, 25(1): 41-43
- [12] 谢建.太阳能利用技术[M].北京:中国农业大学出版社,1999
XIE Jian. Solar Energy Utilization Technology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1999
- [13] 张谦,过利敏.太阳能干燥技术在我国果蔬干制中的应用[J].新疆农业科学,2011,48(12):2331-2336
ZHANG Qian, GUO Li-min. Application of solar drying in fruit and vegetable dehydration [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2011, 48(12): 2331-2336

- [14] 明廷玉,李保国.太阳能干燥技术的研究及其应用[J].中外能源,2015,20(8):34-40
MING Ting-yu, LI Bao-guo. Research and application of solar drying technology [J]. Chinese and Foreign Energy, 2015, 20(8): 34-40
- [15] Koukoucha, Idrimam A, Asbikm, et al. Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste [J]. Renewable Energy, 2017, 101: 565-574
- [16] 张壁光.木材科学与技术研究进展[M].北京:中国环境科学出版社,2004
ZHANG Bi-guang. Advances in Research on Wood Science and Technology [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 2004
- [17] 张芳,康三江,张海燕,等.一种果蔬制品太阳能低温吸附干燥系统:中国,申请号:[P].201711091138.7 公开号:CN107927854A 公开/公告日:2018-04-20. <http://pss-system.cnipa.gov.cn/sipublicsearch/portal/uiIndex.shtml>
ZHANG Fang, KANG San-jiang, ZHANG Hai-yan, et al. A solar low-temperature adsorption drying system for fruit and vegetable products [P]. application number: 201711091138.7 Publication number CN 107927854 A Public/Announcement Day: 2018-04-20. <http://pss-system.cnipa.gov.cn/sipublicsearch/portal/uiIndex.shtml>
- [18] 孙庆梅,果蔬吸附式低温干燥特性及其测试平台方案[D].南京:南京工业大学,2005
SUN Qing-mei. Low-temperature absorption drying characteristics of fruit-vegetables and testing platform scheme [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005
- [19] 国家卫生和计划生育委员会.食品中水分的测定:GB 5009.3-2016[S].北京:中国标准出版社,2017
National Health and Family Planning Commission. Determination of Moisture in Foods: GB 5009.3-2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2017
- [20] Pangavhane D R, Sawhney R L, Sarsavadia P N. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer [J]. Energy, 2002, 27(6): 579-590
- [21] 赵超,陈建,邱兵,等.花椒微波干燥特性试验[J].农业机械学报,2007,38(3):407-410
ZHAO Chao, CHEN Jian, QIU Bing, et al. Experimental study on microwave drying characteristics of pepper [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 407-410
- [22] 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
GUAN Zhi-qiang, WANG Xiu-zhi, LI Min, et al. Mathematical modeling of hot-air of thin layer litchi flesh [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151-158.
- [23] 侯燕杰,刘冬,杨曦,等.红肉苹果片穿流式热风薄层干燥特性及数学模型[J].食品与发酵工业,2018,44(8):141-148
HOU Yan-jie, LIU Dong, YANG Xi, et al. Mathematical model of thin-layer drying process for red-fleshed apple slices [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(8): 141-148
- [24] 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):997-101
JIANG Yu-ping, WANG Jun. Characteristics and model of microwave drying sweet potato [J]. Zhejiang Agricultural Journal, 2009, 21(4): 997-101
- [25] 刘相东.干燥过程原理研究概况[J].干燥技术与设备,2004,(2)3:3-9
LIU Xiang-dong. General situation of drying mechanism research [J]. Drying Technology and Equipment, 2004, (2)3: 3-9
- [26] 赵静,但琦.数学建模与数学实验[M].北京:高等教育出版社,2008:83-112
ZHAO Jing, DAN Qi. Mathematical Modeling and Mathematical Experiment [M]. Beijing: Beijing Higher Education Press, 2008: 83-112
- [27] 夏珂,罗惠波,周平,等.大曲的热风干燥特性及其动力学模型[J].现代食品科技,2018,34(4):206-214
XIA Yu, LUO Hui-bo, ZHOU Ping, et al. Study on hot-air drying characteristics and dynamic model of Daqu [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(4): 206-214
- [28] 赵兴,吴本刚,马海乐,等.香葱催化式红外干燥特性及品质研究[J].现代食品科技 2018,34(9):182-189
ZHAO Xing, WU Ben-gang, MA Hai-le, et al. Drying characteristics and quality attributes of Chinese chives by catalyzed infrared drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(9): 182-189
- [29] 张绪坤,王高敏,姚斌,等.单粒莲子热风干燥特性及其干燥动力学[J].现代食品科技,2017,33(4):141-148
ZHANG Xu-kun, WANG Gao-min, YAO Bin, et al. Drying characteristics and kinetics of individual lotus seeds under hot air drying process [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(4): 141-148

(下转第 235 页)