

猕猴桃片冻干—真空微波联合干燥过程中品质变化及收缩模型

Quality change and shrinkage model of kiwi during freeze drying and vacuum microwave combined drying

廉苗苗¹ 段续¹ 黄略略² 林惠燕²

LIAN Miao-miao¹ DUAN Xu¹ HUANG Lue-lue² LIN Hui-yan²

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;
2. School of Applied Chemistry and Biological Technology, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

摘要:以猕猴桃为原材料,利用冻干—真空微波联合干燥的方式,选取不同的微波功率(0.25,0.30,0.39 W/g),结合猕猴桃在干燥过程中的收缩比、感官品质、色差、复水比、孔隙率等,分析猕猴桃片在干燥过程中的干燥特性、孔隙结构和收缩特性,建立猕猴桃片冻干—真空微波干燥过程中的收缩模型。研究结果表明,不同微波功率下,猕猴桃片的干燥特性有很大差异,微波功率越大,猕猴桃片的感官评分越高,色差越小,复水比越大,收缩比也越大,即达到干燥终点的体积越大,且猕猴桃片的孔隙率也越大。随着干燥的进行,猕猴桃片的水分含量越低,收缩比越小。猕猴桃片的最佳收缩模型为 $SR = k_1 + k_2 MR + k_3 (MR)^2$, $R^2 > 0.99$, $RSS < 0.001$,能很好地反映猕猴桃片在冻干—真空微波联合干燥过程中体积收缩的变化。
关键词:猕猴桃;真空冷冻干燥;真空微波干燥;收缩比;孔隙率;收缩模型

Abstract: Kiwifruits were respectively dried by freeze-drying and vacuum-microwave combined drying, with different microwave power (0.25, 0.30 and 0.39 W/g). In combination with the shrinkage ratio, sensory quality, color difference, rehydration ratio and porosity of kiwifruit in the drying process, the drying characteristics, pore structure and shrinkage characteristics of kiwifruit pieces in the drying process were analyzed, and the shrinkage model of kiwifruit pieces in the process of FD pretreatment vacuum microwave drying was established. The results

showed that the drying characteristics of kiwifruit slices changed with the different power of microwave, and the higher the microwave power could cause higher sensory score of kiwifruit slices, less color difference, larger the rehydration ratio, and larger the shrinkage ratio. It was found that the larger volume could made the greater porosity of kiwifruit slices. However, during the drying process progresses, the lower moisture content of kiwi slices resulted in smaller shrinkage ratio. The optimal shrinkage model of kiwi slices was $SR = k_1 + k_2 MR + k_3 (MR)^2$, $R^2 > 0.99$, $RSS < 0.001$, which could well reflect the changes of volume shrinkage of kiwi slices in the process of freeze-drying and vacuum-microwave combined drying.

Keywords: kiwi slices; freeze drying; vacuum-microwave combined drying; shrinkage ratio; porosity; shrinkage model

由于新鲜猕猴桃片中水分含量高,极易腐败变质,将其加工成干制品可减少采后损失并增加附加值^[1]。目前较为常见的猕猴桃干燥方法有热风干燥(Hot Air Drying, AD)^[2]、真空微波干燥(Vacuum Microwave Drying, VMD)^[3]和真空冷冻干燥(Freeze Drying, FD)^[4]。热风干燥成本较低,但操作温度较高易导致产品品质降低^[4]。微波干燥热效率高,但干燥过程很难控制,容易因过热导致产品质量下降,产品容易出现焦糊和表面硬化等现象^[5-6]。真空冷冻干燥技术可最大限度地保留猕猴桃原有的营养成分和形状^[7-8],但干燥效率低,运行成本太高^[9-10]。事实上,冷冻干燥的大部分水分会在升华阶段去除,解析段耗时虽长,只去掉少部分水分。因此在原料大部分水分经冻干去除后,半干产品的“骨架”已形成时,再采用真空微波方式去除剩余水分,则可利用快速高效的真空微波干燥段替代冗长的冻干解析干燥段,从而

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31671907, 31972207)

作者简介:廉苗苗,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:段续(1973—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail:duanxu_dx@163.com

收稿日期:2020-03-10

缩短干燥时间。相关报道^[11-13]已证实,冻干—真空微波联合干燥(FD-VMD)可比常规的冻干工艺节约将近 50% 的时间,能耗也大幅度下降,且产品品质接近 FD,明显优于真空微波干燥产品。

食品物料在干燥过程中会因水分的减少收缩变形,引起表面硬化和复水性变差等物理现象,从而影响干制品的外观品质,还会影响干燥过程的质热传递规律,增加干燥时间和能耗^[14]。而果蔬干制品的外观品质是对其商品价值影响最大的品质指标,Jangam 等^[15]在提出的食品干燥品质评价理论中,将外观品质列为权重最高的指标。猕猴桃具有疏松的内部结构和较高的初始含水量,随着干燥过程中含水量的降低,常常伴随着明显的收缩变形现象。

已有学者研究了其他果蔬原料在干燥过程中的收缩特性。Aprajeeta 等^[16]研究了对流干燥过程中马铃薯片收缩率和孔隙率随模拟传热传质过程的变化规律和收缩率对传热传质性能的影响并建立了模型。Witrowarajchert 等^[17]采用对流干燥法、微波对流干燥法和红外对流干燥法对苹果切片进行干燥。微波和红外干燥后的苹果切片与单纯对流干燥相比,收缩率降低了 11%~12%,体积降低了 30%~34%,密度降低了 18%~23%,孔隙率提高了 25%~28%。Aral 等^[18]采用对流干燥机对山楂果实在 50,60,70 °C 和 0.5,0.9,1.3 m/s 风速下的薄层干燥特性及理化特性进行了研究,发现随着温度增大,收缩率减小。在马铃薯^[19]、石榴^[20]的研究中也得到了类似的结果。在干燥过程中物料收缩与其热质传递机制密切相关^[21],由此可见,果蔬干燥过程中的收缩特性是干燥过程中需要控制的重要指标,引入收缩模型能更好地预测干燥结果。

探索猕猴桃片在冻干—真空微波联合干燥过程中的收缩变形情况,可以有针对性地对于干燥过程进行优化和改进,得到高品质、低能耗的干制品。而对猕猴桃片在干燥过程中的收缩变形研究迄今尚未见于报道。研究拟将采用真空冷冻预干燥的猕猴桃片进行真空微波干燥,研究真空微波干燥阶段不同微波功率对猕猴桃片干燥特性的影响,并建立相应的收缩模型,以期对猕猴桃片的优质干燥技术提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

徐香猕猴桃:深圳市麦德龙超市;

真空冷冻干燥机:1-4 型,德国 Christ 公司;

微波真空干燥机:YHW2S 型,南京亚泰微波能技术研究所;

电热恒温热风干燥箱:DHG-9123A 型,上海精宏实验设备有限公司;

精密分析电子天平:MS-204S 型,瑞士 Mettler

Toledo 公司;

色差计:400 型,美国 Datacolor 公司;

扫描电子显微镜:S4800 型,日本日立公司。

1.2 方法

1.2.1 原料预处理 将新鲜的猕猴桃清洗、去皮、再均匀切成厚度为 5 mm、直径为 4.6 cm 的薄片。

1.2.2 试验设计

(1) 试验组:先进行联合干燥的第一阶段试验,将冻结的样品放入真空冷冻干燥机,设置加热板温度为 40 °C、干燥压力 50 Pa、冷阱温度为 -50 °C,冻干阶段为 8 h。将样品从 FD 干燥机中取出后,放入微波真空干燥机中。设置微波真空干燥机真空度为 3 kPa,冷阱温度为 -35 °C,微波功率分别为 0.25,0.30,0.39 W/g,干燥至湿基含水率为 10% 以下。每组试验重复 3 次。

(2) 对照组:将冻结的样品放入真空冷冻干燥机,设置加热板温度为 40 °C、干燥压力 50 Pa、冷阱温度为 -50 °C,干燥至湿基含水率为 10% 以下。每组试验重复 3 次。

1.2.3 干基含水率和水分比的计算 干基含水率 X 按式(1)计算,水分比 MR 按式(2)计算。

$$X = \frac{m_t - m}{m}, \quad (1)$$

$$MR = \frac{X_t - X_g}{X_0 - X_g}, \quad (2)$$

式中:

X ——猕猴桃片的干基含水率,g/g;

m_t —— t 时刻猕猴桃片的质量,g;

m ——猕猴桃片干燥至恒重时的质量,g;

MR ——猕猴桃片的水分比;

X_0 ——猕猴桃片的初始干基含水率,g/g;

X_t ——猕猴桃片在 t 时刻的干基含水率,g/g;

X_g ——猕猴桃片在平衡时刻的干基含水率,g/g。

1.2.4 感官评定 评分小组由 10 名成员组成,都具有感官评价经验,对猕猴桃片的外观、质地、色泽、气味进行评价(表 1)。

1.2.5 色差的测定 采用色差计对猕猴桃样品进行色差的测定,每个样品重复 5 次。按式(3)计算颜色的总差^[22]。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}, \quad (3)$$

式中:

ΔE ——总色差;

L, L_0 ——分别为 FD-MVD 和 FD 样品的亮度/暗度;

a, a_0 ——分别为 FD-MVD 和 FD 样品的红度/绿度;

b, b_0 ——分别为 FD-MVD 和 FD 样品的黄度/蓝度。

1.2.6 复水比的测定 将样品浸泡在 35 °C 蒸馏水中,每

表 1 感官评分表

Table 1 Sensory evaluation of kiwifruit slices

分数	外观	质地	色泽	气味
0~3	表面塌陷严重、边缘卷曲严重、收缩明显	不蓬松、酥脆、硬度过大或过小	橙红色	无果香味、有异味
4~7	表面较规整、略有收缩	较蓬松、酥脆、局部较硬	黄色偏白	无果香味、有异味
8~10	表面规整、边缘稍微卷曲外形饱满、基本不收缩	蓬松、酥脆、硬度适中	黄色偏绿	浓郁的果香味

间隔 5 min,将样品取出用滤纸吸干表面水分并称重,直到猕猴桃片吸收水分后的质量达到恒重时,结束复水操作,平行测量 3 次,按式(4)计算复水比。

$$RR = \frac{W_t}{W_0}, \tag{4}$$

式中:

RR——猕猴桃片的复水比;

W_t ——猕猴桃片复水沥干后的质量,g;

W_0 ——猕猴桃片复水前的质量,g。

1.2.7 微观结构的测定及孔隙率分析 用刀片切取干燥后的猕猴桃样品,对样品进行喷金处理后,用扫描电子显微镜观察猕猴桃片横截面的孔隙状态,设置工作电压为 4.0 kV,放大倍数 100 倍。用 Image J 软件将拍摄的图片进行处理,将其设置为 8 级灰度图^[23],并进行黑白二值化处理和孔隙率分析。

1.2.8 收缩比的计算 采用小米置换法^[24]测体积。按式(5)计算体积相对收缩比。

$$SR = \frac{V_t}{V_0}, \tag{5}$$

式中:

SR——猕猴桃片收缩比;

V_t ——猕猴桃片在任意 t 时刻的体积, m^3 ;

V_0 ——猕猴桃片的初始体积, m^3 。

1.3 数据处理

采用 Origin 2017 对试验结果进行数据处理、图形绘制、线性或非线性拟合,并分析其拟合度;利用 DPS7.5 对试验数据进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 微波功率对猕猴桃片感官品质的影响

由图 1 可知:微波功率对猕猴桃片感官评分影响很大,微波功率越大,猕猴桃片的感官评分越高,其中微波

功率为 0.30,0.39 W/g 时,猕猴桃的感官评分差异不大,其中外观和气味评分一致,经 0.30 W/g 处理的猕猴桃片的质地和色泽评分均略低于经 0.39 W/g 处理的。

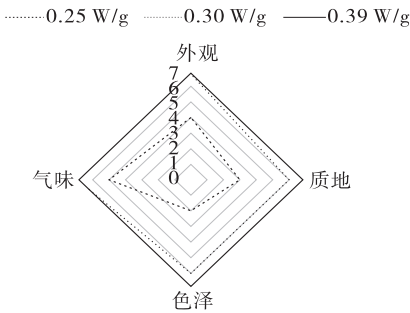


图 1 微波功率对猕猴桃片感官的影响

Figure 1 Sensory effects of different microwave power on kiwifruit slices

2.2 微波功率对猕猴桃片色差的影响

由表 2 可知:不同的微波功率对猕猴桃片的色差影响显著($P>0.05$),不同微波功率下 FD 前处理后真空微波猕猴桃片的亮度低于冻干猕猴桃片的亮度,而经 0.30, 0.39 W/g 处理的猕猴桃片的绿度较接近纯 FD 猕猴桃片的,3 种微波功率下的猕猴桃片的黄蓝度值均大于纯 FD 猕猴桃的黄蓝度。Cui 等^[25]研究表明,当水分含量非常低时,随着微波干燥时间的延长和干燥材料温度的升高,表面形成的硬壳会逐渐变色。颜色的变化可能是因为猕猴桃片中的糖分被高温焦糖化。

2.3 微波功率对猕猴桃片复水特性的影响

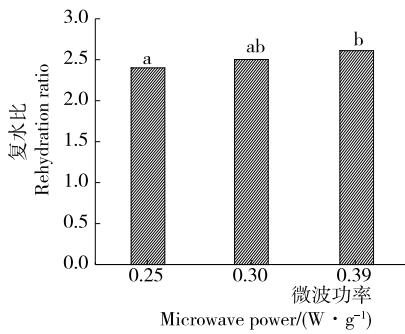
由图 2 可知:微波功率越高,物料的复水比越大,其中经 0.39 W/g 处理的猕猴桃片的复水比显著高于经 0.25 W/g 处理的($P<0.05$)。冻干阶段结束后,猕猴桃片内部形成了大量孔隙,猕猴桃片的复水特性受其孔隙结构影响较大,孔隙率数值越大,猕猴桃片的复水比就越大^[26]。

表 2 微波功率对猕猴桃片色差的影响[†]

Table 2 Effect of different microwave power on the color difference of kiwi fruit slices

微波功率/(W·g ⁻¹)	L	a	b	ΔE
对照组	81.13±0.02 ^a	-7.82±0.01 ^a	25.60±0.03 ^a	0
0.25	54.15±0.03 ^c	-1.42±0.03 ^c	28.55±0.04 ^{ab}	27.89±0.02 ^a
0.30	64.36±0.02 ^b	-5.51±0.01 ^b	29.94±0.02 ^{bc}	18.38±0.04 ^b
0.39	64.77±0.02 ^b	-6.97±0.03 ^{ab}	30.86±0.01 ^c	17.21±0.03 ^{bc}

[†] 同列小写字母不同表示有显著差异($P<0.05$)。



字母不同表示在 $P < 0.05$ 区间存在显著性差异

图2 微波功率对猕猴桃片复水特性的影响

Figure 2 Influence of different power on rehydration characteristics of kiwi fruit slices

真空微波阶段,微波功率越低,水分蒸发越慢,冻干阶段的猕猴桃骨架经过水分再分布后发生变形,导致了孔隙率降低,复水比变小。

2.4 微波功率对猕猴桃片干燥收缩特性的影响

如图3所示,微波功率越大,猕猴桃片的收缩比越大。当微波功率为0.25,0.30,0.39 W/g时,猕猴桃片干燥至平衡时刻的收缩比分别为0.302,0.323,0.361。微波功率提高0.05 W/g,收缩比提高0.021,微波功率提高0.014 W/g,收缩比提高0.059。这可能是因为经冻干处理后形成了良好的细胞骨架,微波功率越高,水分蒸发速率越快,保存了相对较好的细胞结构;而在微波功率较低时,水分蒸发速率较慢,水分蒸发过程中,物料经历了水分再分布的过程,使得原本坚硬的细胞骨架坍塌,发生严重形变,物料表面可能形成了一层坚硬的外壳^[27],阻挡了水分的迁移,因此收缩速率减小。

2.5 微波功率对猕猴桃片微观结构的影响

图4为不同功率条件下猕猴桃片的SEM图像经Image J软件转化为8级灰度图再经黑白二值化处理后的图像。表3为采用Image J软件对猕猴桃片的微观结构图片进行黑白二值化处理得到的结果。由图4、表3可知:微波功率越大,物料的孔隙率越大。当干基含水率为

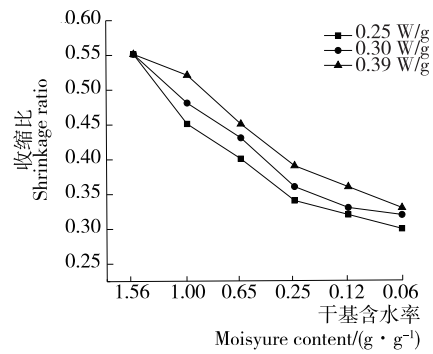


图3 不同功率下猕猴桃片的收缩曲线

Figure 3 Contraction curve of kiwifruit slices under different powers

1 g/g,微波功率为0.39 W/g时物料的孔隙率比0.25 W/g时物料的多10.01%;当到达干燥终点时,即干基含水率为0.06 g/g,微波功率为0.39 W/g时物料的孔隙率比0.25 W/g时的多32.11%。在FD过程中,干燥水果内部的冰晶被升华,原本含有升华冰的空间结构被保留下来,形成了一个高度多孔结构^[27],在物料进行真空微波干燥时,这些结构持续存在。当微波温度较低时,达到真空微波干燥终点时,物料的孔隙率有所降低,可能是由于当微波功率较小时,水分汽化慢,气体体积膨胀也慢,膨胀速度超过扩散速率不多,对孔洞网络的支撑力略小,孔洞体积变化不大。微波功率高,水蒸气被快速汽化,空间结构内的水分受到阻碍,无法及时扩散,水分变为蒸汽,体积迅速膨胀,膨胀速度大大超过扩散速率,将不稳定的空间网络向四周撑开,孔洞变大,孔隙率变大,但干燥后期,物料水分含量较低,物料结构骨架变硬定形,同时汽化水减少,体积膨胀不大,对物料孔洞结构的支撑力也变小,因此干燥后期孔隙变化不大。但当微波功率较大时,物料内部的细胞结构吸收微波能过多,细胞结构发生断裂,形成了较大的空气带^[28],在电镜下观察到断裂的细胞壁,而在软件处理后则直观地显示为较大的孔隙。因此,当微波功率为0.39 W/g时,干燥后期孔隙率的增大,可能是

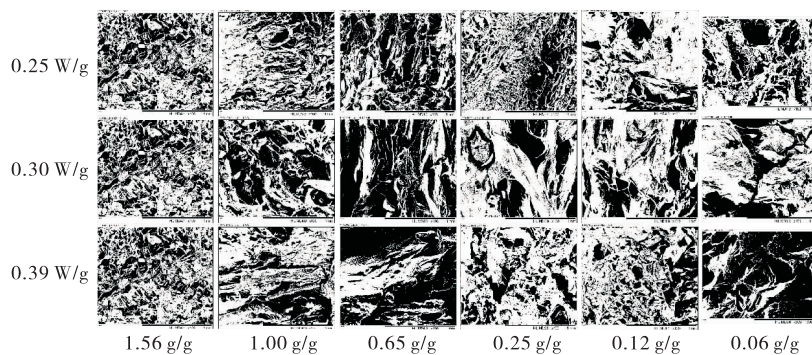


图4 不同功率下的猕猴桃片SEM原始图像经二值化处理后的图像

Figure 4 SEM original images of kiwi slices under different powers after binarization processing

由于微波功率过大,使得内部结构发生断裂引起的。

2.6 冻干—真空微波干燥猕猴桃片体积收缩模型的建立

2.6.1 猕猴桃片收缩模型的建立 基于卢映洁等^[29]对带壳鲜花生热风干燥收缩模型研究,在不同的微波功率下,选用了 4 种常用的收缩模型对猕猴桃冻干—真空微波干燥下的体积收缩比进行拟合,以 R^2 (相关系数)和

RSS(残差平方和)为评价模型拟合度的指标, R^2 (相关系数)数值越大, R^2 (相关系数)数值越小,说明模型拟合结果越好。结果如表 4 所示,不同的收缩模型,拟合的结果大不相同,相同的收缩模型,不同微波功率下的拟合结果也有差异。除了 Exponential 模型以外,其他收缩模型的 R^2 结果均在 0.90 以上, RSS 值均在 0.001 以下, R^2 越大,

表 3 不同功率下猕猴桃片的孔隙率分析[†]

Table 3 Porosity analysis of kiwifruit slices at different power

微波功率/(W·g ⁻¹)	1.56 g/g	1.00 g/g	0.65 g/g	0.25 g/g	0.12 g/g	0.06 g/g
0.25	40.68 ^a	37.29 ^a	40.19 ^a	32.72 ^a	28.74 ^a	35.80 ^a
0.30	40.68 ^a	39.94 ^b	52.86 ^b	37.13 ^b	38.53 ^b	36.76 ^{ab}
0.39	40.68 ^a	47.34 ^c	61.24 ^c	43.45 ^c	59.96 ^c	67.91 ^b

[†] 同列小写字母不同表示有显著差异(P<0.05)。

表 4 不同微波功率下 4 种收缩模型的分析结果[†]

Table 4 Analysis results of four shrinkage models under different microwave power

模型	模型方程	微波功率/ (W·g ⁻¹)	R ²	X ²	RSS	模型系数
Hatamipour ^[30]	$SR=k_1+k_2MR$	0.25	0.994 5	0.000 05	0.000 20	$k_1=0.298\ 82, k_2=0.886\ 02$
		0.30	0.984 0	0.000 13	0.000 54	$k_1=0.320\ 61, k_2=0.853\ 70$
		0.39	0.928 4	0.000 56	0.002 25	$k_1=0.347\ 10, k_2=0.808\ 46$
Quadratic ^[30]	$SR=k_1+k_2MR+k_3(MR)^2$	0.25	0.992 8	0.000 06	0.000 19	$k_1=0.299\ 63, k_2=0.860\ 97, k_3=0.089\ 64$
		0.30	0.997 0	0.000 02	0.000 07	$k_1=0.309\ 67, k_2=1.194\ 29, k_3=-1.218\ 74$
		0.39	0.991 4	0.000 11	0.000 34	$k_1=0.324\ 83, k_2=1.501\ 84, k_3=-2.481\ 16$
Vazquez ^[31]	$SR=k_1+k_2MR+k_3(MR)^{3/2}+k_4\exp(k_5MR)$	0.25	0.999 0	0.000 01	0.000 02	$k_1=1.000\ 00, k_2=5.539\ 15, k_3=103.070\ 41, k_4=-0.715\ 06, k_5=5.275\ 40$
		0.30	0.985 3	0.000 12	0.000 12	$k_1=0.060\ 42, k_2=1.049\ 34, k_3=-5.246\ 07, k_4=0.252\ 07, k_5=0.000\ 10$
		0.39	0.953 3	0.000 37	0.000 37	$k_1=0.069\ 15, k_2=1.226\ 64, k_3=-11.209\ 23, k_4=0.260\ 62, k_5=-0.000\ 39$
Exponential ^[32]	$SR=k_1\exp(k_2MR)$	0.25	0.988 8	0.000 10	0.000 40	$k_1=0.307\ 70, k_2=2.100\ 14$
		0.30	0.959 4	0.000 34	0.001 36	$k_1=0.329\ 81, k_2=1.914\ 06$
		0.39	0.889 6	0.000 87	0.003 47	$K_1=0.356\ 17, k_2=1.709\ 54$

[†] $k_1\sim k_5$ 分别表示拟合方程的校正系数。

RSS 值越小,数据拟合结果越好。其中 Quadratic 模型在不同微波下的 R^2 结果均在 0.99 以上, RSS 也相对较小,且表达式较为简单,从简便性和实用性上考虑,选择 Quadratic 模型为冻干—真空微波猕猴桃片的最优收缩模型。

2.6.2 猕猴桃片收缩模型的验证 为了验证所选收缩模型的准确性,选取了不同微波功率下的猕猴桃片收缩的试验值与模型预测值进行比较。如图 5 所示,在 0.25, 0.30, 0.39 W/g 微波功率下,猕猴桃片的收缩试验值与预测值基本吻合,结果表明,Quadratic 模型能够很好地预测猕猴桃在冻干—真空微波干燥过程中的水分比与收缩比的变化规律。

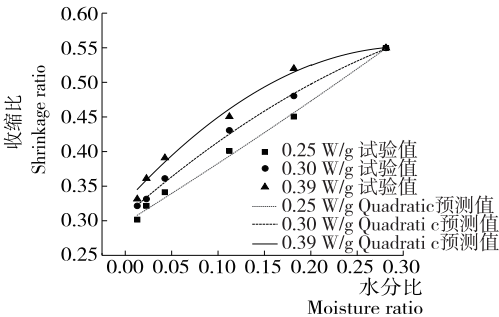


图 5 不同微波功率下猕猴桃片收缩的试验值与预测值
Figure 5 Experimental and predicted values of kiwifruit slice shrinkage under different microwave powers

3 结论

在冻干—真空微波干燥过程中,微波功率(0.25, 0.30, 0.39 W/g)对猕猴桃片的干燥特性有很大影响,3种不同微波功率下,猕猴桃片的干燥特性有很大差异,微波功率越大猕猴桃片的感官评分越高,色差越小,复水比越大,收缩比也越大,即达到干燥终点的体积越大,且猕猴桃片的孔隙率也越大。随着干燥的进行,猕猴桃片的水分含量越低,收缩比越小,可能猕猴桃片的体积收缩与物料在干燥过程中的传热传质有关,后期将进一步研究。

选取4种常见的收缩模型的数据分析结果表明,Quadratic模型在不同微波下的 R^2 结果均在0.99以上,RSS也相对较小,且表达式较为简单,能够很好地预测猕猴桃在冻干—真空微波干燥过程中的水分比与收缩比的变化规律。因此选择Quadratic模型为冻干—真空微波猕猴桃片的最优收缩模型。

参考文献

- [1] CONCHA-MEYER A A, D'IGNOTI V, SAEZ B, et al. Effect of storage on the physico-chemical and antioxidant properties of strawberry and kiwi leathers[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(3): C569-C577.
- [2] ORIKASA T, WU Long, SHIINA T, et al. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2): 303-308.
- [3] MASKAN M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(2): 169-175.
- [4] TIAN Yu-ting, WU Shu-zheng, ZHAO Ying-ting, et al. Drying characteristics and processing parameters for microwave-vacuum drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2015, 39(6): 2 620-2 629.
- [5] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing: A review[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 243-261.
- [6] KONE K Y, DRUON C, GNIMPIEBA E Z, et al. Power density control in microwave assisted air drying to improve quality of food[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(4): 750-757.
- [7] ZHU Chun-hua, GONG Qi, LI Jie-xue, et al. Research progresses on comprehensive processing and utilization of kiwifruit [J]. Preservation and Processing, 2013, 13(1): 57-62.
- [8] JIANG Hao, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Comparison of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spouted microwave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(9): 1 827-1 834.
- [9] ANTAL T. Comparative study of three drying methods: Freeze, hot air-assisted freeze and infrared-assisted freeze modes[J]. Agronomy Research 2015, 13(4): 863-878.
- [10] ORAK H, AKTAS T, YAGAR H, et al. Effects of hot air and freeze drying methods on antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruit[J]. Food Science and Technology International, 2012, 18(4): 391-402.
- [11] CUI Zheng-wei, LI Chun-yang, SONG Chun-fang, et al. Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips[J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1 517-1 523.
- [12] ZHOU Bing, ZHANG Min, FANG Zhong-xiang, et al. A combination of freeze drying and microwave vacuum drying of duck egg white protein powders[J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1 840-1 847.
- [13] 叶晓梦. 铁棍山药冻干—微波真空联合干燥工艺研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014: 6.
- [14] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 156.
- [15] JANGAM S V, MUJUMDAR A S. Heat pump assisted drying technology-overview with focus on energy, environment and product quality[M]// Modern Drying Technology. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2012: DOI 10.1002/9783527631728.ch24.
- [16] APRAJEETA J, GOPIRAJAH R, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 119-128.
- [17] WITROWARAJCHERT D, RZACA M. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples [J]. Drying Technology, 2009, 27(7/8): 903-909.
- [18] ARAL S, BEŞE A V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity[J]. Food Chemistry, 2016, 210: 577-584.
- [19] ABBASI S, MOUSAVI S M, MOHEBBI M. Investigation of changes in physical properties and microstructure and mathematical modeling of shrinkage of onion during hot air drying[J]. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 2011, 7(1): 92-98.
- [20] HORUZ E, MASKAN M. Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(1): 285-293.
- [21] 谭礼斌. 果蔬多孔介质干燥热质传递及应力应变研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 16-17.
- [22] MASKAN M. Microwave/air and microwave finish drying of banana[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 44: 71-78.

(下转第210页)

析。结果表明:4 种工艺制备的烟草材料的纤维含量不同、结构致密度也不尽相同。不同烟草材料间的化学成分差异不大,但保润剂(甘油、丙二醇)含量远远高于传统卷烟。烟草材料的热分析研究表明烟草材料的香气释放量在 270 ℃时达到峰值,可作为加热不燃烧卷烟器械温度设计的参考。

试验发现,适当增加加热不燃烧卷烟烟草材料的紧密度,优化赋香形式,可以提高烟草原料的负载量,减缓加热不燃烧卷烟在抽吸过程中的香气衰减,后续将对此进行深入研究。

参考文献

- [1] SIMONAVICIUS E, MCNEILL A, SHAHAB L, et al. Heat-not-burn tobacco products: A systematic literature review[J]. Tob Control, 2018, DOI: 10.1136/tobaccocontrol-2018-054419.
- [2] BROSE L S, SIMONAVICIUS E, CHEESEMAM H. Awareness and use of 'heat-not-burn' tobacco products in great britain[J]. Tob Regul Sci, 2018, 4(2): 44-50.
- [3] 朱浩, 席辉, 柴国壁, 等. 温度对加热非燃烧卷烟烟熏香成分释放的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(11): 33-38.
- [4] HUGHES J R, KEELY J P. The effect of a novel smoking system-accord-on ongoing smoking and toxin exposure[J]. Nicotine & Tobacco Research, 2004, 6: 1 021-1 027.
- [5] 艾思. 非传统烟草制品初探[J]. 中国烟草, 2013(5): 59.
- [6] WERLEY M S, FREELIN S A, WRENN S E, et al. Smoke chemistry, invitro and in vivo toxicology evaluations of the electrically heated cigarette smoking system series[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, 52: 122-139.
- [7] 刘珊, 崔凯, 曾世通, 等. 加热非燃烧型烟草制品剖析[J]. 烟草科技, 2016, 49(11): 56-65.
- [8] 杨继, 杨帅, 段沉杏, 等. 加热不燃烧卷烟烟草材料的热分析研究[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(6): 7-13.
- [9] 戴路, 陶丰, 袁凯龙, 等. 造纸法再造烟叶的研究进展[J]. 中国造纸学报, 2013, 28(1): 65-69.
- [10] 马鹏飞, 李巧灵, 林凯, 等. 加热非燃烧烟草薄片的热解特征研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 71-74.
- [11] 况志敏, 刘建平, 王茜茜. 造纸法再造烟叶发展综述[J]. 纸和造纸, 2018, 37(6): 26-31.
- [12] 唐培培. 烟叶原料加热非燃烧状态下释放烟气特征研究[D]. 郑州: 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 2015: 79-84.
- [13] 杨继, 汤建国, 尚善斋, 等. 利用顶空-GC/MS 法对比新型卷烟和传统卷烟的挥发性成分[J]. 烟草科技, 2015, 48(11): 33-39.
- [14] 李巧灵, 刘江生, 邓小华, 等. 烟草热解燃烧过程香味成分的释放变化[J]. 烟草科技, 2014(11): 62-66.
- [15] 孔浩辉, 郭璇华, 沈光林. 卷烟烟丝热裂解产物香味成分分析[J]. 烟草科技, 2009(5): 38-43.
- [16] 戴路, 史春云, 卢昕博, 等. 加热不燃烧制品与传统卷烟再造烟叶物理特性及化学成分差异分析[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(1): 20-26.
- [17] 霍现宽, 刘珊, 崔凯, 等. 加热状态下烟草烟气香味成分释放特征[J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 37-45.
- [18] 谢剑平. 烟草香原料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 262, 290.
- [19] MAGA J A. Contribution of phenolic compounds to smoke flavor[C]// Phenolic compounds in food and their effects on health I ACS Symposium Series. Washington DC: American Chemical Society, 1992: 170-179.
- [20] 杨继, 赵伟, 杨柳, 等. "Eclipse"卷烟的热重/差热分析[J]. 化学研究与应用, 2015(5): 560-565.
- [21] 唐培培, 曾世通, 刘珊, 等. 甘油对烟叶热性能及加热状态下烟气释放的影响[J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 61-65.
- [22] 麦润萍, 冯银杏, 李汴生. 基于分形理论的预冻温度对冻干猕猴桃片干燥特性及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(12): 159-164, 169.
- [23] HUANG Lue-lue, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 279-284.
- [24] CUI Zheng-wei, XU Shi-ying, SUN Da-wen. Microwave vacuum drying kinetics of carrot slices[J]. J Food Eng, 2004, 65: 157-164.
- [25] 肖鑫, 陶乐仁, 顾茜皎. 冻干草莓内部孔隙率的分布及其影响的实验研究[J]. 食品与机械, 2007, 23(2): 66-69.
- [26] JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jiang, et al. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 216-226.
- [27] WITROWA-RAJCHERT D, RZA M. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples[J]. Drying Technology, 2009, 27(7): 903-909.
- [28] 卢映洁, 任广跃, 段续, 等. 基于温度梯度的带壳鲜花生热风干燥收缩模型研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 148-154.
- [29] 许冰洋, 朱文魁, 潘广乐, 等. 基于收缩特性分析的叶丝快速对流干燥动力学模型[J]. 烟草科技, 2015, 48(9): 69-74.
- [30] 陈良元, 韩李锋, 李旭, 等. 茄子片热风干燥收缩特性及其修正的湿分扩散动力学模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 275-281.
- [31] 韦玉龙, 于宁, 陈恺, 等. 热风干制对红枣收缩特性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(22): 114-118, 123.

(上接第 145 页)