

微波真空干燥对香蕉片干燥特性及品质的影响

代建武 杨升霖 王杰 温梦达 付琪其 黄欢

(四川农业大学机电学院, 雅安 625014)

摘要: 为研究香蕉片微波真空干燥特性及品质,探讨了不同干燥因素对香蕉片干燥速率及品质的影响,在不同干燥温度(45、50、55、60℃)、微波功率密度(28、53、82 W/g)、真空度(75、80、85、90 kPa)及切片厚度(4、6、8、10 mm)条件下对香蕉片进行微波真空干燥试验,并运用 Weibull 模型拟合了香蕉片微波真空干燥特性曲线。试验结果表明:随着干燥温度、微波功率密度及切片厚度的增加,干燥时间缩短;Weibull 分布函数能够较好地模拟香蕉片微波真空干燥过程,尺度参数 α 随干燥温度、微波功率密度和切片厚度的增加而降低,而干燥条件的变化对形状参数 β 影响甚微;色泽与干燥温度、微波功率密度、真空度及切片厚度均有关,干燥温度与真空度越高,色差越小,且随微波功率密度的上升而增大及切片厚度的增加呈先减小后增大的趋势;微波功率密度和切片厚度是影响复水比的主要因素,微波功率密度为 28 W/g、切片厚度为 4~8 mm 时,干燥后的香蕉脆片复水性能较好。香蕉脆片的最佳干燥参数为干燥温度 60℃、微波功率密度 28 W/g、真空度 90 kPa、切片厚度 6 mm,此条件下香蕉脆片酥脆度最佳,孔隙分布均匀一致。该研究探索了真空微波干燥技术下香蕉片的干燥特性和品质,为香蕉片微波真空干燥技术的应用提供了理论指导。

关键词: 香蕉片;微波真空干燥;品质;动力学

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0493-08

Effect of Microwave Vacuum Drying Conditions on Drying Characteristics and Texture Structure of Banana Chips

DAI Jianwu YANG Shenglin WANG Jie WEN Mengda FU Qiqi HUANG Huan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Bananas are the most widely planted tropical fruit in the world by far. They are rich in nutrients and have the effects of promoting gastrointestinal peristalsis, clearing heat and moistening lungs and protecting cardiovascular and cerebrovascular. Bananas are soft and hard to store, which lead to huge waste. Microwave vacuum drying technology is a new drying technology combining vacuum drying and microwave drying. In order to study the microwave vacuum drying characteristics and quality of banana chips, the effects of different drying factors on the drying rate and quality of banana chips were discussed, at different drying temperatures (45℃, 50℃, 55℃ and 60℃), microwave power density (28 W/g, 53 W/g and 82 W/g), vacuum degree (75 kPa, 80 kPa, 85 kPa and 90 kPa) and thickness of banana slices (4 mm, 6 mm, 8 mm and 10 mm), microwave vacuum drying experiments were carried out, and Weibull model was used to fit the drying characteristic curve of banana slices under microwave vacuum drying. The results showed that with the increase of drying temperature, power density and material thickness, the drying time was shortened. Weibull model can simulate the microwave vacuum drying process of banana slices accurately. The scale parameters were decreased with the increase of drying temperature, power density and thickness, while the drying conditions had little effect on the shape parameters. Meanwhile, drying temperature, microwave power density, vacuum degree and banana slice thickness all had significant influence on color. ΔE^* value was decreased with the increase of temperature and vacuum degree, while increased with the rise of microwave power density and material thickness. Microwave power density and material thickness had significant influence on the rehydration ratio. When the microwave power density was chosen as 28 W/g and the thickness of banana slices was

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 四川省科技创新人才计划项目(2020JDR0066)

作者简介: 代建武(1987—),男,讲师,博士,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: daijianwu@126.com

4~8 mm, the dried banana slices had higher rehydration and better rehydration performance. The best drying parameters of banana chips were 60°C of drying temperature, 28 W/g of power density, 90 kPa of vacuum degree, and 6 mm of material thickness. Under such conditions, banana chips had the best crispness, can form a certain pore structure, and the pore distribution was uniform and consistent, and the quality was the best. This research explored the drying kinetics and quality of banana chips under microwave vacuum drying, which provided theoretical basis for the application of microwave vacuum drying technology of banana slices.

Key words: banana chips; microwave vacuum drying; quality; dynamics

0 引言

香蕉营养丰富,富含蛋白质、碳水化合物、膳食纤维、多种维生素及生物活性成分^[1-3]。我国香蕉产量丰富,位列世界第二^[4],但主要以鲜食为主,深加工产业较滞后,且香蕉易损伤变质,不易存贮,采后损失严重^[5]。干燥技术通过降低农产品含水率以达到延长货架期、改变物理组织结构及保证产品质量等作用而得到广泛应用^[6]。因此,发展香蕉片干燥技术对于改善产品风味、提升其产业附加值具有一定意义。

目前,国内外学者针对香蕉片干燥已有大量研究,常用干燥方法有热风干燥^[7]、油炸干燥^[8]、真空干燥^[9]及冷冻干燥^[10]等。在已有香蕉片干燥技术中,热风干燥效率低且加工后营养流失严重;传统油炸干燥含油量高,干燥过程易产生丙烯酰胺等有害物质^[11];真空干燥产品酥脆度较低^[12]且对物料要求较高;真空冷冻干燥存在干燥时间长、耗能多,成本高等^[11]问题。

微波真空干燥技术是一种将真空干燥与微波干燥相结合的新型干燥技术,是将物料置于真空环境,由微波提供热量实现快速去除物料水分的一种干燥方法^[13],目前已成功应用于脱毒海星^[14]、荔枝^[15]、银耳^[16]等多种产品加工,且在香蕉干燥领域也有涉及。文献[3]对香蕉片微波真空干燥工艺进行了探究,结果发现微波真空干燥技术能显著提高香蕉片干燥后的品质。文献[17]研究发现,以微波作为热源,可显著减少香蕉干燥时间,且干燥均匀性更佳。文献[18]研究了不同干燥工艺对香蕉片微观结构及组织性能的影响,结果表明微波真空干燥能得到脆度更好的香蕉片。综合以上研究,微波真空干燥技术应用广泛,且在降低能耗、保证加工品质方面有显著效果,但在香蕉片脱水过程中的品质特征研究还比较欠缺,无法为非油炸香蕉脆片的加工提供理论支持。

本文以香蕉片为研究对象,利用微波真空干燥技术,探讨干燥温度、真空度、微波功率密度及切片厚度对香蕉片干燥特性及品质的影响,并对其数据

进行模型拟合,同时探究干燥过程中香蕉片微观结构变化。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为矮脚顿地雷香蕉,采摘于广东省高州市等地,依据文献[6]测定香蕉片的初始湿基含水率为77.3%~78.3%。试验前贮存于(5±1)°C的冷藏室中。

1.2 试验仪器

所用仪器包括:南京澳润 ORW2S-3Z 型微波真空干燥设备(南京澳润微波科技有限公司);数显恒温水浴锅(上海博讯实业有限公司);Foss Infratec1241 Grain Analyser 型近红外谷物品质分析仪(福斯公司,丹麦);OHAUS-AR522CN 型电子精密天平(奥豪斯仪器有限公司);HCJYET HT-866 型红外线测温计(宏诚科技有限公司)。

1.3 单因素试验方法

香蕉剥皮沿径向切片,均匀平铺于水平料盘中,每个料盘均匀置于相对称的旋转托架上。根据前期预试验,当干燥温度超过60°C时,香蕉片表面呈现明显焦褐状,低于45°C时,香蕉片加工时间超过160 min;同时根据相关研究^[2],香蕉切片厚度在4~10 mm 范围内品质最佳。因此结合微波真空干燥设备的技术参数限制,本研究确定单因素试验的因素水平分别选用不同干燥温度(45、50、55、60°C)、微波功率密度(28、53、82 W/g)、真空度(75、80、85、90 kPa)及切片厚度(4、6、8、10 mm)进行干燥试验,每隔20~30 min 取出香蕉片测定其质量,干燥至干基含水率5%以下,干燥结束后取出冷却至室温(20°C)放入保鲜袋中贮存,以备后续测量相关指标。每组试验设3个平行,取平均值。具体试验设计如表1所示。

1.4 干燥参数的计算

1.4.1 水分比的计算方法

香蕉片干燥过程的干燥曲线采用水分比随时间变化曲线。不同干燥时间香蕉片的水分比计算^[19-20]公式可简化为

表 1 试验设计和试验参数

Tab.1 Design for experiments and experimental parameters

序号	干燥温度/微波功率密度/真空度/			切片厚度/mm
	℃	(W·g ⁻¹)	kPa	
1	45	28	90	4、6、8、10
2	50	28	90	4、6、8、10
3	55	28	90	4、6、8、10
4	60	28	90	4、6、8、10
5	60	53	90	4、6、8、10
6	60	82	90	4、6、8、10
7	60	28	85	4、6、8、10
8	60	28	80	4、6、8、10
9	60	28	75	4、6、8、10

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g} \quad (2)$$

其中 M_0 ——物料初始干基含水率, g/g
 M_t ——物料在 t 时刻的干基含水率, g/g
 m_t —— t 时刻试样质量, g
 m_g ——试样绝干时质量, g

干燥速率的计算^[21]公式为

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中 D_R ——干燥过程中时间在 t_1 和 t_2 之间的物料的干燥速率, g/(g·min)

M_{t_1} ——物料在 t_1 时刻的干基含水率, g/g

M_{t_2} ——物料在 t_2 时刻的干基含水率, g/g

1.4.2 利用 Weibull 函数拟合干燥曲线

Weibull 分布函数表达式为^[22]

$$M_R = \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (4)$$

式中 α ——尺度参数, min β ——形状参数
 t ——干燥时间, min

函数拟合程度通过决定系数 R^2 , 均方根误差、离差平方和 χ^2 来衡量^[23]。

1.5 干燥品质测定方法

1.5.1 色泽

采用 YS3060 型高精度分光测色仪测出香蕉片的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每组测 3 次, 取平均值。根据相关研究^[13]采用色泽差异值 ΔE^* 进行综合评价^[24], 公式为

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (5)$$

式中 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——鲜香蕉片明亮度、红绿值、蓝黄值控制值

L^* ——明亮度 a^* ——红绿值

b^* ——蓝黄值

1.5.2 复水比

将香蕉脆片 (5 ± 0.06) g 置于 40℃ 恒温水浴锅中, 每隔 30 min 取出, 吸干香蕉片表面水分, 称量, 记录各组数据, 直至质量数据无明显变化。香蕉片的复水性主要采用复水比表示, 其计算公式为^[25]

$$R_R = \frac{W_r}{W_d} \quad (6)$$

式中 W_d ——复水前香蕉脆片质量, g

W_r ——复水后香蕉脆片质量, g

1.5.3 脆度及硬度

将香蕉脆片平铺于测试载物台中心, 测试前速度为 3 mm/s, 不同组别的测试速度分别选择 1、2、3 mm/s, 测试后速度同测试前速度, 两次压缩停顿时间为 5 s, 压缩距离为 4 mm, 触发力为 5 g^[26], 每组测 3 次, 取其平均值。

1.6 微观结构分析

参照相关研究^[22], 将香蕉脆片固定在双面胶上, 抽真空喷金, 采用扫描电子显微镜以 3 kV 的加速电压对干燥后的香蕉脆片进行观察, 在不同的放大倍数下重复观察样本, 保存代表性区域图像以供进一步分析。

1.7 数据处理方法

干燥试验、脆硬度测定、色泽及复水比分析试验每组均设置 3 个平行, 作图及数据分析均采用平均值。

2 结果与分析

2.1 香蕉片微波真空干燥特性

2.1.1 干燥温度

不同干燥温度条件下香蕉片的干燥曲线如图 1 所示。由图 1a 可得, 在切片厚度为 6 mm、微波功率密度为 28 W/g、真空度为 90 kPa、干燥温度为 45、50、55、60℃ 的条件下, 香蕉片的干燥时间随干燥温度增加而减少, 达到目标干基含水率时间依次为 160、140、120、100 min, 其中 60℃ 时的干燥时间比 45℃ 时缩短了 38%。经过方差分析可得, 干燥温度对香蕉片干燥时间有显著影响 ($P < 0.05$)。由图 1b 可知, 不同干燥温度条件下香蕉片的干燥速率相差较大, 特别在干燥初期尤其明显。这可能是由于物料初期含水率较高, 随着干燥温度的上升物料处于快速脱水阶段, 干燥温度的变化对香蕉片干燥速率有显著影响。干燥中后期由于香蕉片内部水分减少, 干燥速率明显下降。

2.1.2 微波功率密度

在切片厚度为 6 mm、干燥温度为 60℃、真空度

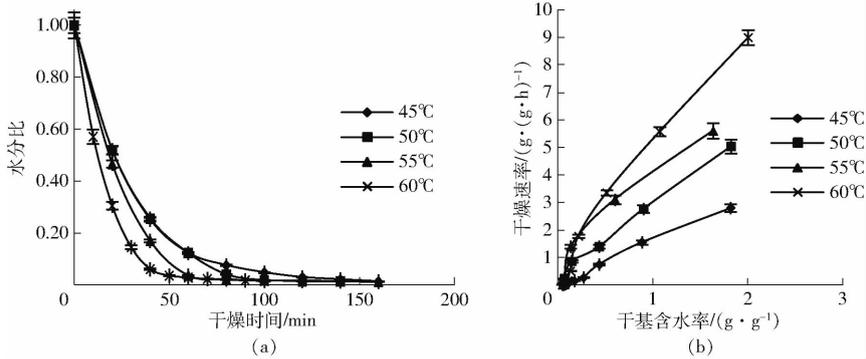


图1 不同干燥温度下香蕉片的干燥水分比和干燥速率曲线

Fig.1 Drying and drying rate curves of banana slices at different drying temperatures

为 90 kPa 的条件下,不同微波功率密度下香蕉片的微波真空干燥动力学曲线如图 2 所示。由图 2a 可知,随着微波功率密度(28、53、82 W/g)的增加,香蕉片干燥时间(100、80、60 min)呈现不断减少的趋势;微波功率密度 82 W/g 时比 28 W/g 所需干燥时间缩短了 40%。方差分析表明,微波功率密度对香蕉片干燥时间有显著影响($P < 0.05$)。由图 2b 可

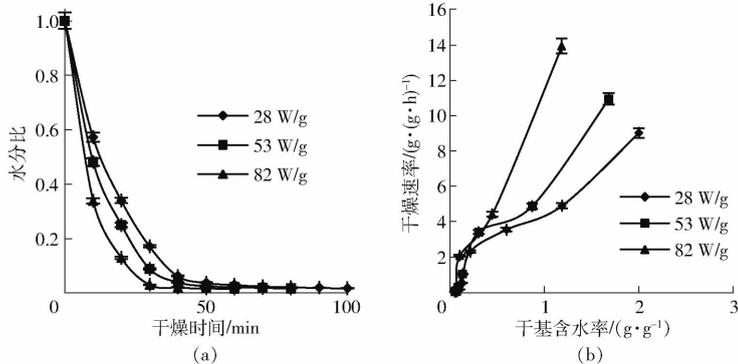


图2 不同微波功率密度下香蕉片的干燥水分比和干燥速率曲线

Fig.2 Drying and drying rate curves of banana slices under different microwave power densities

2.1.3 真空度

不同真空度条件下,香蕉片的干燥动力学曲线如图 3 所示。由图 3a 可得,在干燥前、中、后期,不同真空度条件下干燥曲线较为接近,真空度分别为

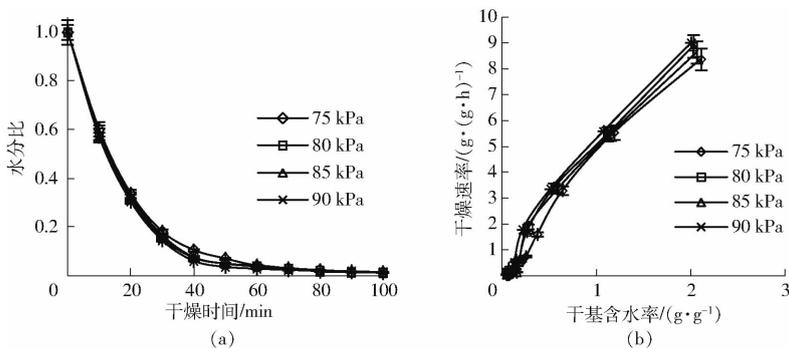


图3 不同真空度下香蕉片的干燥水分比和干燥速率曲线

Fig.3 Drying and drying rate curves of banana slices under different vacuum degrees

2.1.4 切片厚度

由图 4a 可得,在真空度为 90 kPa,微波功率密

知,香蕉片的干燥速率随微波功率密度的增加而升高,这可能是由于微波功率密度增大,物料表面单位面积水分吸收更多的微波能,从而加速了香蕉片表面的水分迁移。干燥中期,各干燥速率曲线均呈现短暂的恒速干燥现象,分析原因可能是干燥持续一段时间后,物料表面水分持续减少,使得香蕉片表面水分的蒸发脱除速率和内部水分迁移量达到平衡。

75、80、85、90 kPa 时,香蕉片的干燥时间趋于 100 min,这说明真空度对香蕉片干燥过程影响不明显。由图 3b 可以得出,不同真空度条件下,香蕉片干燥速率均呈现降速干燥阶段。

度为 28 W/g,干燥温度为 60°C,切片厚度为 4、6、8、10 mm 的条件下,香蕉片的干燥时间随切片厚度增

加而减少,切片厚度为 10 mm 的条件下干燥时间相对于 4 mm 时减少了 25%。通过对重复试验结果的方差分析,切片厚度对香蕉片干燥时间有显著影响 ($P < 0.05$)。由图 4b 可知,切片厚度对干燥速率有

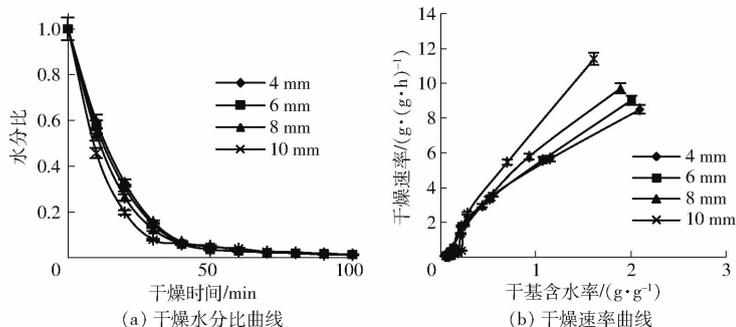


图 4 不同切片厚度下香蕉片的干燥水分比和干燥速率曲线

Fig. 4 Drying and drying rate curves of banana slices under different thicknesses

干燥速率随之增加。

2.2 干燥曲线的 Weibull 分布函数模拟

不同干燥条件下香蕉片干燥曲线由 Weibull 分布函数模拟结果如表 2 所示。由表 2 可得,决定系

较为显著影响,随着切片厚度增加,干燥速率显著增加。这可能是因为香蕉片微波真空干燥时,切片厚度增加,其含有的极性分子随之增多,物料单位时间内所吸收的微波能远超过迁移路径的影响,导致干

数 R^2 在 0.992 ~ 0.999 之间,离差平方和 χ^2 在 6.67×10^{-5} ~ 3.81×10^{-4} 之间,均方根误差在 7.07×10^{-3} ~ 1.76×10^{-2} 之间,表明 Weibull 分布函数能够很好模拟香蕉片在不同干燥条件下的干燥曲线。

表 2 不同干燥条件下 Weibull 模拟结果

Tab. 2 Weibull model simulation result under different drying conditions

干燥温度/°C	微波功率密度/(W·g ⁻¹)	真空度/kPa	切片厚度/mm	尺度参数 α /min	形状参数 β	决定系数 R^2	离差平方和 χ^2	均方根误差
45	28	90	6	29.82	0.981 8	0.998	1.27×10^{-4}	9.94×10^{-3}
50	28	90	6	29.81	1.084 5	0.999	6.67×10^{-5}	7.07×10^{-3}
55	28	90	6	24.94	1.033 0	0.998	1.63×10^{-4}	1.13×10^{-2}
60	28	90	6	16.91	1.102 0	0.998	1.62×10^{-4}	1.15×10^{-2}
60	28	90	6	17.64	1.080 8	0.999	2.51×10^{-4}	1.43×10^{-2}
60	53	90	6	13.73	1.034 9	0.998	1.99×10^{-4}	1.25×10^{-2}
60	82	90	6	9.21	0.959 9	0.992	1.13×10^{-4}	8.99×10^{-3}
60	28	75	6	18.37	1.034 1	0.999	1.01×10^{-4}	9.11×10^{-3}
60	28	80	6	17.89	1.073 4	0.998	1.37×10^{-4}	1.06×10^{-2}
60	28	85	6	17.39	0.980 7	0.998	1.64×10^{-4}	1.16×10^{-2}
60	28	90	6	16.91	0.981 9	0.998	1.62×10^{-4}	1.15×10^{-2}
60	28	90	4	17.89	1.112 0	0.998	2.03×10^{-4}	1.29×10^{-2}
60	28	90	6	16.91	1.101 9	0.998	1.62×10^{-4}	1.15×10^{-2}
60	28	90	8	15.44	1.056 4	0.998	1.85×10^{-4}	1.23×10^{-2}
60	28	90	10	12.50	0.916 1	0.996	3.81×10^{-4}	1.76×10^{-2}

2.2.1 尺度参数 α 的物理意义和影响因素

尺度参数 α 表示香蕉片在干燥过程的速率常数,其值约等于干燥过程完成 63% 所需要的时间。由表 2 可知,不同干燥条件下尺度参数 α 不同, α 随干燥温度及微波功率密度的增加而减小,尤其干燥温度变化对其影响显著 ($P < 0.05$)。当干燥温度从 45°C 上升至 60°C 时, α 从 29.82 min 降至 16.91 min;而微波功率密度由 28 W/g 增加至 82 W/g,会导致对应 α 值自 17.64 min 持续减小至 9.21 min;切片厚度增加,尺度参数 α 减小,可见提高干燥温度、增加微波功率密度

及切片厚度可以缩短干燥时间,提升干燥速率,这一结果与 2.1 节中的干燥曲线图表述一致。

2.2.2 形状参数 β 的物理意义和变化趋势

形状参数 β 与干燥过程中水分迁移机理相关^[27-28];形状参数 β 在 0.3 ~ 1 之间时,表明物料的干燥过程由内部水分扩散控制,即始终表现降速干燥的特点;形状参数 β 大于 1 时,表示物料在干燥前期存在延滞阶段,即干燥速率出现先升高后降低的形态,干燥前期存在升速段。文中 β 范围在 0.916 1 ~ 1.112 0 之间,均在 1 附近波动,说明干燥过程不全

是降速干燥。但由于干燥升速阶段短暂以及受称量时间的影响,干燥速率曲线主要呈降速干燥状态。不同干燥条件下 β 差别较小且无明显规律,说明不同干燥条件对形状参数 β 影响较小,这与文献[29]研究结论一致。

表3 不同单因素试验条件对香蕉片色泽和复水比的影响

Tab.3 Effects of different single factor experiments on color parameters and rehydration ratio of banana slices

干燥温度/℃	微波功率密度/(W·g ⁻¹)	真空度/kPa	切片厚度/mm	色泽参数				复水比
				<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	ΔE^*	
45	28	90	6	(45.21 ± 0.63) ^c	(15.32 ± 0.13) ^c	(14.89 ± 0.19) ^d	16.33	(2.48 ± 0.06) ^a
50	28	90	6	(46.78 ± 0.25) ^b	(15.46 ± 0.11) ^c	(15.38 ± 0.23) ^c	14.72	(2.31 ± 0.03) ^a
55	28	90	6	(47.26 ± 0.38) ^b	(17.35 ± 0.06) ^b	(16.26 ± 0.18) ^b	13.54	(2.34 ± 0.11) ^a
60	28	90	6	(48.32 ± 0.52) ^a	(18.31 ± 0.23) ^a	(17.45 ± 0.09) ^a	12.05	(2.35 ± 0.08) ^a
60	28	90	6	(48.32 ± 0.52) ^a	(18.31 ± 0.23) ^a	(17.45 ± 0.09) ^a	12.05	(2.35 ± 0.08) ^a
60	53	90	6	(45.56 ± 0.26) ^b	(15.56 ± 0.09) ^b	(14.63 ± 0.39) ^b	16.03	(2.30 ± 0.06) ^a
60	82	90	6	(38.26 ± 0.31) ^c	(8.66 ± 0.14) ^c	(9.23 ± 0.21) ^c	26.78	(2.16 ± 0.04) ^b
60	28	75	6	(45.65 ± 0.09) ^d	(15.94 ± 0.21) ^c	(16.86 ± 0.26) ^c	15.24	(2.32 ± 0.07) ^a
60	28	80	6	(46.87 ± 0.23) ^c	(17.69 ± 0.05) ^b	(16.54 ± 0.17) ^c	13.77	(2.28 ± 0.12) ^a
60	28	85	6	(47.56 ± 0.12) ^b	(18.26 ± 0.16) ^a	(18.68 ± 0.21) ^a	12.63	(2.25 ± 0.11) ^a
60	28	90	6	(48.32 ± 0.52) ^a	(18.31 ± 0.23) ^a	(17.45 ± 0.09) ^b	12.05	(2.35 ± 0.08) ^a
60	28	90	4	(47.56 ± 0.36) ^a	(16.23 ± 0.07) ^b	(15.24 ± 0.51) ^b	13.84	(2.31 ± 0.05) ^{ab}
60	28	90	6	(48.32 ± 0.52) ^a	(18.31 ± 0.23) ^a	(17.45 ± 0.09) ^a	12.05	(2.35 ± 0.08) ^a
60	28	90	8	(46.57 ± 0.49) ^b	(15.64 ± 0.26) ^c	(14.89 ± 0.18) ^b	15.02	(2.36 ± 0.02) ^a
60	28	90	10	(43.45 ± 0.15) ^c	(13.94 ± 0.18) ^d	(12.51 ± 0.32) ^c	19.15	(2.21 ± 0.06) ^b

注:相同单因素试验条件下同一列不同小写字母表示有显著差异($P < 0.05$)。

作为判断香蕉片色泽变化的综合指标, ΔE^* 越小,干燥后香蕉片越接近新鲜香蕉色泽,其品质越优。

由表3可知, ΔE^* 随温度及真空度的增加而减小,60℃时的 ΔE^* 相比于45℃时更小,这可能是由于香蕉片干燥速率随温度升高而增大,其干燥时长相对减少,对香蕉片色泽褐变的影响降低,此时明亮度 L^* 也达到最大。真空度为75 kPa时 ΔE^* 最大,为15.24,随其增加至90 kPa时, ΔE^* 不断减少至12.05,说明适当增加真空度有利于香蕉片干制品的色泽品质。而微波功率密度对 ΔE^* 的影响与上述因素截然不同,微波功率密度越大, ΔE^* 越大,明亮度 L^* 越小,微波功率密度为82 W/g的 ΔE^* 明显高于28 W/g时的值,这是由于较高的微波功率密度增加了干燥过程中香蕉片色泽褐变的程度。在切片厚度单因素试验条件下,随切片厚度增加, ΔE^* 呈现先减小后增大的趋势,切片厚度在4~6 mm时较小,当增至8 mm时, ΔE^* 显著增大,这说明适当增加香蕉片厚度有利于干燥后色泽品质;而当厚度继续增加至10 mm时, ΔE^* 继续上升至19.15,香蕉片褐变程度进一步大幅提升。

综合不同干燥条件对色差的影响,干燥温度60℃、微波功率密度28 W/g、真空度90 kPa及切片厚度6 mm时其色差最小,干燥后色泽品质最佳。

2.3 微波真空干燥对香蕉片品质的影响

2.3.1 色泽

不同单因素试验条件下对香蕉片色泽的影响如表3所示,干燥温度、微波功率密度、真空度及切片厚度对色泽均有显著影响($P < 0.05$),以色差 ΔE^*

2.3.2 复水比

复水比是衡量物料在干燥过程中组织结构破坏程度的重要参数,其值越高,说明物料组织结构受破坏程度越小^[30]。

不同单因素试验条件下香蕉片的复水比如表3所示,对重复试验结果的方差分析可知,温度和真空度对香蕉片复水比影响不显著($P > 0.05$),微波功率密度和切片厚度对复水比有显著影响($P < 0.05$)。温度在45℃时,香蕉片复水比较高,但整体相差不明显;随微波功率密度的增加,香蕉片复水比降低,这可能是由于较高的微波功率密度在加速物料水分脱除的同时也增大了组织结构应力,从而破坏了物料内部孔道结构,降低了干燥后的复水性。在切片厚度为4~8 mm时,干燥后的香蕉片复水比较高,复水性能较好,说明适当增加香蕉片厚度有利于保证干燥后内部组织结构的完整程度。

2.3.3 脆度及硬度

在真空度为90 kPa、切片厚度为6 mm的条件下,不同干燥温度与微波功率密度对香蕉片脆、硬度的影响如图5所示。

由图5可得,香蕉片脆度与硬度随干燥温度增加均呈现先上升后下降的趋势,到达峰值的干燥温度有所差异。其中脆度在50℃时最大,为2 268 g,

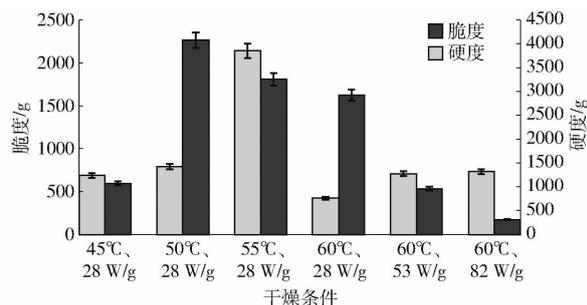


图5 不同单因素试验条件对干燥香蕉片脆度和硬度的影响

Fig.5 Effects of different single factor experiments on fragility and hardness of banana slices

较干燥温度为 45℃ 下的最小值 597 g 增加了 2.8 倍;硬度则在 55℃ 时达到最大值 3 856 g,而随干燥温度增加至 60℃ 时,硬度显著减小,这可能是由于干燥温度升高破坏了香蕉片内部的细胞壁及细胞间的胶质大分子,导致物料内部支撑骨架崩塌使硬度下降。随微波功率密度增加,香蕉片脆度及硬度呈现截然不同的趋势,微波功率密度越大,硬度越高,脆度越低。微波功率密度为 82 W/g 时的脆度相对于 28 W/g 时降低了 89%,而硬度却上升了 73%。综合干燥温度与微波功率密度对香蕉片脆硬度的影响,在干燥温度为 60℃、微波功率密度为 28 W/g 时,香蕉片的口感酥脆度最佳。

2.4 微波真空干燥对香蕉片微观结构的影响

不同干燥条件下香蕉片的微观结构如图 6 所示。在微波功率密度为 28 W/g,真空度为 90 kPa、切片厚度为 6 mm 的同等放大倍数条件下,干燥温度为 50℃ 时的香蕉片呈现局部的疏松多孔现象,干燥温度升至 60℃ 时,其微观组织结构略有塌陷,但内部孔隙分布整体均匀,这可能是由于干燥温度升高,物料内部水分迁移速率与物料表面水分扩散至外界速率均增加,物料内部组织结构因水分减少而产生较大的应力,香蕉片干燥后形成更多、更均匀的孔隙结构,说明干燥温度升高对香蕉片内部结构有较大影响。这与文献[31]中研究远红外辐射板温度对南瓜片微观组织结构影响的结论一致。微观结构的变化直接反映干燥速率的快慢,随干燥温度升高,香蕉片形成明显的孔隙结构,有利于水分迁移,增加

干燥速率。

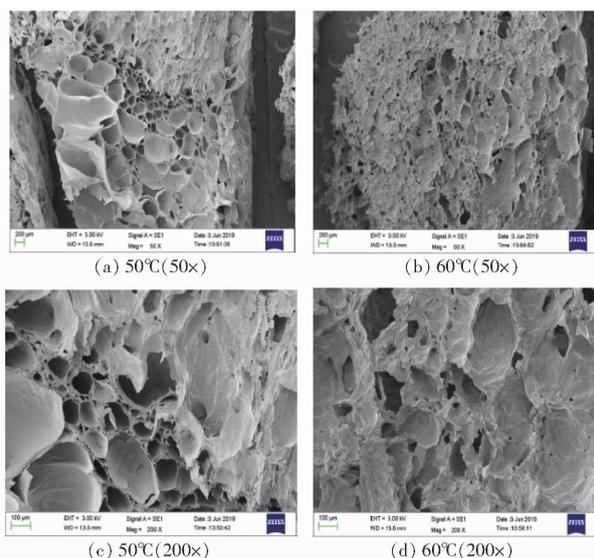


图6 香蕉片微观结构图

Fig.6 Microstructural diagrams of banana slices

3 结论

(1)单因素试验条件下,干燥温度、微波功率密度及切片厚度对干燥时间均有显著影响($P < 0.05$)。香蕉片干燥时间随干燥温度、微波功率密度及切片厚度的增加均呈现不断减小的趋势。

(2)Weibull 模型能够较好地模拟香蕉片微波真空干燥过程,尺度参数 α 随干燥温度、微波功率密度和切片厚度的增加而降低;而干燥条件的变化对形状参数 β 影响甚微。

(3)香蕉片色泽在不同干燥温度、微波功率密度、真空度及切片厚度条件下均存在显著差异($P < 0.05$)。其中, ΔE^* 随干燥温度升高而减小,随微波功率密度增加而增加;当切片厚度增大时, ΔE^* 呈现先减小后增加的趋势。同时发现微波功率密度和切片厚度对复水比有显著影响($P < 0.05$),微波功率密度为 28 W/g、切片厚度为 4 ~ 8 mm 时,干燥后的香蕉片复水比较高,复水性能较好。综合上述试验结果,香蕉脆片的最佳干燥参数为干燥温度 60℃、微波功率密度 28 W/g、真空度 90 kPa、切片厚度 6 mm,在此条件下,香蕉片酥脆度最佳,孔隙分布均匀一致,品质最好。

参 考 文 献

- [1] 李宝玉. 不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J]. 食品科学, 2016,37(15):100-106. LI Baoyu. Effects of different drying methods on quality of banana products[J]. Food Science, 2016,37(15):100-106. (in Chinese)
- [2] 王玉婷, 陈奕, 李雨波. 干燥方式对香蕉片总多酚含量及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2013,34(23):113-117. WANG Yuting, CHEN Yi, LI Yubo. Effects of different drying methods on the content and antioxidant activity of total polyphenol from banana slices[J]. Food Science, 2013,34(23):113-117. (in Chinese)
- [3] 黄美香, 林毅雄, 林河通, 等. 香蕉片微波真空干燥的工艺参数优化[J]. 真空科学与技术学报, 2014,34(3):204-209. HUANG Meixiang, LIN Yixiong, LIN Hetong, et al. Optimization of microwave-vacuum drying conditions of banana slices[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014,34(3):204-209. (in Chinese)

- [4] 徐贞贞, 孙洁, 赵靓, 等. 香蕉产地初加工技术分类及集成[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 332-336.
XU Zhenzhen, SUN Jie, ZHAO Liang, et al. Classification, integration of preliminary processing technology in banana producing areas of China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 332-336. (in Chinese)
- [5] 赵国建, 杨公明. 香蕉的加工现状及发展对策[J]. 食品与机械, 2005(2): 81-82.
ZHAO Guojian, YANG Gongming. The situation and developing countermeasure of processing banana[J]. Food & Machinery, 2005(2): 81-82. (in Chinese)
- [6] 乔宏柱, 高振江, 王军, 等. 大蒜真空脉动干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 256-263.
QIAO Hongzhu, GAO Zhenjiang, WANG Jun, et al. Optimization of vacuum pulsed drying process of garlic[J]. Transactions of the CASE, 2018, 34(5): 256-263. (in Chinese)
- [7] FEMANDES F A N, RODEIGUES S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: dehydration of banana[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(2): 261-267.
- [8] YAMSAENGUNG R, ARIYAPUCHAI T, PRASERTSIT K. Effects of vacuum frying on structural changes of bananas[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 298-305.
- [9] 王娟, 李远志, 杨公明, 等. 带式连续真空干燥加工香蕉粉的工艺研究[J]. 食品科学, 2006, 27(9): 163-167.
WANG Juan, LI Yuanzhi, YANG Gongming, et al. Study on process of banana powder with using continuous vacuum belt dryer[J]. Food Science, 2006, 27(9): 163-167. (in Chinese)
- [10] WANG J, LI Y Z, CHEN R R, et al. Comparison of volatiles of banana powder dehydrated by vacuum belt drying, freeze-drying and air-drying[J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1516-1521.
- [11] 李宝玉, 毕金峰, 钟耕. 香蕉干燥技术研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(23): 539-543.
LI Baoyu, BI Jinfeng, ZHONG Geng. Research advances in drying technology of banana[J]. Food Science, 2009, 30(23): 539-543. (in Chinese)
- [12] SHYU S L, WANG H, LUCY S. Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips[J]. Food Research International, 2001, 34(2): 133-142.
- [13] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277-284.
CHEN Jiankai, LIN Hetong, LIN Yifen, et al. Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the CASE, 2014, 30(3): 277-284. (in Chinese)
- [14] 张国琛, 李莎, 张倩, 等. 脱毒海星微波真空干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 289-295.
ZHANG Guochen, LI Sha, ZHANG Qian, et al. Optimization of microwave-vacuum drying for detoxified starfish[J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(16): 289-295. (in Chinese)
- [15] 李辉, 林河通, 袁芳, 等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 107-112.
LI Hui, LIN Hetong, YUAN Fang, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of litchi pulp[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 107-112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120620&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.020. (in Chinese)
- [16] 黄建立, 黄艳, 郑宝东, 等. 不同干燥方式对银耳品质的影响[J]. 中国食品学报, 2010, 10(2): 167-173.
HUANG Jianli, HUANG Yan, ZHENG Baodong, et al. The effect of different drying methods on the quality of tremella fuciformis[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(2): 167-173. (in Chinese)
- [17] JIANG H, ZHANG M, 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): 1827-1834.
- [18] MONTEIRO R L, CARCIOFI B A. M, LAURINDO J B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 178: 1-11.
- [19] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317-324.
ZHANG Weipeng, GAO Zhenjiang, XIAO Hongwei, et al. Drying characteristics of poria cocos with different drying methods based on Weibull distribution[J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(5): 317-324. (in Chinese)
- [20] 王雪媛, 高琨, 陈芹芹, 等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 275-281.
WANG Xueyuan, GAO Kun, CHEN Qinlin, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying[J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(12): 275-281. (in Chinese)
- [21] 钱婧雅, 张茜, 王军, 等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 259-265.
QIAN Jingya, ZHANG Qian, WANG Jun, et al. Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps[J]. Transactions of the CASE, 2016, 32(17): 259-265. (in Chinese)
- [22] DAI J W, RAO J Q, WANG Dong, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. Drying Technology, 2015, 33(3): 365-376.
- [23] HASHEMI G, MOWLA D, KAZEMEINI M. Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk drying in an inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(3): 331-338.
- [24] XIAO H W, LAW C L, SUN D W, et al. Color change kinetics of american ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418-427.
- [25] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 295-302.
DUAN Xu, LIU Wenchao, REN Guangyue, et al. Drying characteristics and quality of button mushrooms during microwave freeze drying[J]. Transactions of the CASE, 2016, 32(12): 295-302. (in Chinese)
- [26] 张志军. 玉米真空干燥特性的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [27] 巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296-304.
JU Haoyu, XIAO Hongwei, ZHENG Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(16): 296-304. (in Chinese)
- [28] 白竣文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 278-285.
BAI Junwen, WANG Jiliang, XIAO Hongwei, et al. Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application[J]. Transactions of the CASE, 2013, 29(16): 278-285. (in Chinese)
- [29] CORZO O, BRACHO N, PEREIRA A, et al. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices[J]. LWT—Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2023-2028.
- [30] XIAO H W, BAI J W, XIE Long, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 581-591.
- [31] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 277-286.
LIU Yunhong, LI Xiaofang, MIAO Shuai, et al. Drying characteristics and microstructures of pumpkin slices with ultrasound combined far-infrared radiation[J]. Transactions of the CASE, 2016, 32(10): 277-286. (in Chinese)