53 _

DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2023.17.009

3种微波干燥模式下板栗片的干燥特性

吴钊龙1,李欣慧2,蒙莉3,韦云伊2,李秉正1.2.4*,黄纪民1.4,黄志民1.4*

(1.广西科学院广西壮族自治区微波先进制造工程研究中心,广西南宁 530007;2.南宁学院食品与质量工程学院,广西南宁 530200;3.广西科学院广西生物炼制重点实验室,广西南宁 530007;4.广西中科微波先进制造产业技术研究院,广西南宁 530007)

摘 要:为确定更优的微波干燥模式以缩短干燥时间、降低干燥能耗,并获得外观无明显褐变的板栗片,研究固定功率连续干燥、固定功率间歇干燥和变功率连续干燥3种模式下,微波频率、微波功率和干燥时间对板栗片干燥特性和能耗的影响,并对较佳的微波干燥模式进行对比。结果表明,915 MHz 和 2 450 MHz 频率下,变功率连续干燥均为最好的板栗片微波干燥模式。其中,915 MHz 频率下变功率连续模式干燥用时 120 min,单位质量微波能耗为 7.6(kW·h)/kg,干燥效率为 2.22%,优于其他 2 种微波干燥模式;2 450 MHz 频率下变功率连续干燥模式用时和单位质量微波能耗分别 为 60 min 和 3.3 (kW·h)/kg,干燥效率为 4.40%,优于其他 2 种微波干燥模式;2 450 MHz 频率的干燥用时、单位质量 微波能耗、亮度 L* 值和干燥效率均明显优于采用 915 MHz 微波设备的情况。因此,2 450 MHz 变功率连续微波干燥 耗时短、能耗低且适应连续化生产要求,是一种具有应用前景的板栗片干燥方法。 关键词:微波;板栗片;干燥模式;变功率;干燥特性;能耗

Drying Characteristics of Chestnut Slices under Three Microwave Drying Modes

WU Zhaolong¹, LI Xinhui², MENG Li³, WEI Yunyi², LI Bingzheng^{1,2,4*}, HUANG Jimin^{1,4}, HUANG Zhimin^{1,4*}
(1. Guangxi Microwave Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Guangxi Academy of Science, Nanning 530007, Guangxi, China; 2. College of Food Science and Quality Engineering, Nanning University, Nanning 530200, Guangxi, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Biorefinery, Guangxi Academy of Science, Nanning 530007, Guangxi, China; 4. Guangxi Zhongke Microwave Institute of Advanced Manufacturing Industrial Technology, Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: In order to determine a better microwave drying mode to shorten drying time, reduce the energy consumption of drying, and obtain chestnut slices with no obvious browning in appearance, fixed power continuous (FPC-MD), fixed power intermittent (FPI-MD), and variable power continuous (VPC-MD) modes were studied. Effects of microwave frequency, microwave power, and drying time on drying characteristics and energy consumption of chestnut slices were analyzed under the above three modes, and better microwave drying modes were compared. The results showed that under the frequency of 915 MHz and 2 450 MHz, VPC-MD was the best microwave drying mode for chestnut slices. Specifically, the drying time of VPC-MD at 915 MHz was 120 min. The microwave energy consumption per unit mass was 7.6 ($kW \cdot h$)/kg, and the drying efficiency was 2.22%, which both were better than the other two microwave drying modes. The drying time and microwave energy consumption per unit mass of VPC-MD at 2 450 MHz were 60 min and 3.3 ($kW \cdot h$)/kg, and the drying efficiency was significantly better than that at 915 MHz in terms of drying time, microwave energy consumption per unit mass, luminance L^* , and drying efficiency. In conclusion, VPC-MD at 2 450 MHz showed a shorter drying time and lower energy consumption, and it was suitable for continuous production requirements, which made it a promising method for drying chestnut slices.

作者简介:吴钊龙(1995—),男(汉),研究实习员,硕士,研究方向:农产品加工。

基金项目:广西科技计划项目(桂科 AB18294028);贺州市创新驱动发展专项项目(贺科创 CX2009009);贺州市科学研究与技术开发计划创新 驱动发展专项项目(贺科创 ZX0710001);广西科学院科研发展基金项目(2018YFJ401)

^{*}通信作者:李秉正(1982—),男,研究员,博士,研究方向:农产品加工;黄志民(1965—),男,研究员,博士,研究方向:生物物理和微波应用技术。

Key words: microwave; chestnut slices; drying mode; variable power; drying characteristics; energy consumption

引文格式:

- 54

吴钊龙,李欣慧,蒙莉,等.3 种微波干燥模式下板栗片的干燥特性[J].食品研究与开发,2023,44(17):53-60,177. WU Zhaolong, LI Xinhui, MENG Li, et al. Drying Characteristics of Chestnut Slices under Three Microwave Drying Modes[J]. Food Research and Development,2023,44(17):53-60,177.

板栗又名栗子、栗果,是一种壳斗科属植物,是重要的食用坚果和经济作物资源¹¹。板栗营养价值较高, 富含淀粉、蛋白质、维生素和人体所需的8种必需氨基酸,有"干果之王"、"铁杆庄稼"的美誉¹²⁻⁴¹。但新鲜板栗 水分含量较高,新陈代谢旺盛,不耐贮藏,且被致密内 皮和外壳紧密包裹,在贮藏和运输过程中易出现发 芽、霉变生虫等现象¹⁵⁻⁶¹。因此需对新鲜板栗进行适度 干燥加工处理以保持其较好的品质特性。

微波是利用波长在 1~1 000 mm, 频率在 0.3~ 300 GHz 的电磁波,工业微波工作频率为 915 MHz 和 2450 MHz,属于非电离辐射四。微波干燥具有快速、反 应灵敏、易于控制等特点,已被广泛应用于蔬菜、水果 和中药材的加工。袁源等阿通过研究风干、晒干、烘 干、微波干燥和冻干等干燥方式对槟榔理化性质和抗 氧化能力的影响,发现微波干燥耗时最短,黄酮、多酚 和槟榔碱等活性物质的得率最高。唐毓玮等响通过研 究热风干燥、真空冷冻干燥和微波干燥对睡莲花茶总 酚、黄酮含量及抗氧化活性的影响,发现微波干燥效 率高,能较好地保留睡莲花茶中酚类物质,使其具有 较强的抗氧化活性。王红利等四发现甘蓝采用微波干 燥方式优于热风干燥和热风-微波联合干燥。王振帅 等四发现微波干燥对朝鲜蓟粉酚类物质的保护效果最 好,其干燥后的物料抗氧化能力最强,香气物质也较 丰富。但只使用微波技术进行干燥,微波功率密度过 大易导致物料内部局部过热而烧焦等品质问题,微波 功率密度过低不能发挥微波干燥的优越性。

本试验以板栗为主要研究对象,分别在 915 MHz 和 2 450 MHz 下探究板栗在不同微波干燥模式下的干 燥特性,分析干燥过程中温度、水分变化规律和能耗, 并确定恰当的微波干燥模式和工艺参数,为板栗的加 工生产提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

板栗:市售,平均单粒质量 8g,初始湿基含水量为 50.7%,去壳、去红衣后,用旋转切片机切成厚度约为 4 mm 薄片,切片后 2 h 内进行干燥处理。

1.2 试验设备

915 MHz 微波设备:自主设计制造(结构如图 1 所示);2 450 MHz 微波设备(Webox-A6 型):株洲市微朗 科技有限公司;手持红外热像仪(TiS10 型):美国Fluke 公司;色彩色差计(CR-10plus 型):日本 KONICA MI-NOLTA 公司;快速水分测定仪(DHS-20A 型):力辰科 技宁波有限公司。



1.进料区;2.传送系统;3.微波腔体;4.腔体门;5.微波抑制器;6.出料区。

图 1 915 MHz 微波干燥装置 Fig.1 915 MHz microwave drying device

1.3 试验方法

1.3.1 微波干燥试验

1)板栗片固定功率密度微波连续干燥

分别在 915 MHz 和 2 450 MHz 下,考察微波功率 密度(1.0、2.0、3.0 W/g)对板栗片微波连续干燥特性的 影响。干燥过程中,当观察到板栗片开始出现褐变现 象时,记录出现褐变现象的时间及对应的物料温度和 湿基含水率。当湿基含水率小于 9.0%时,停止微波干 燥试验并记录能耗。

2)板栗片固定功率密度微波间歇干燥

分别在 915 MHz 和 2 450 MHz 下,固定加热时间 为 2 min、间歇时间为 1 min,考察微波功率密度(1、2、 3 W/g)对板栗片微波间歇干燥特性的影响。当观察到 板栗片开始出现褐变现象时,记录出现褐变现象的时 间及对应的物料温度和湿基含水率,湿基含水率小于 9.0%时,停止微波干燥试验并记录能耗。

3)板栗片变功率密度微波连续干燥

将干燥过程分为3个阶段,选取微波功率密度为

2023 年 9 月 第 44 卷第 17 期

55 _

1、2 W/g 或 3 W/g,按微波功率密度先高后低的原则对 不同阶段的微波功率密度和处理时间进行组合。结合 固定功率密度连续模式和固定功率密度间歇模式的 干燥曲线、干燥速率曲线、板栗片外观变化,兼顾效率 和品质寻求较优的干燥参数组合。通过预试验,得到 的干燥参数组合见表 1。

表1 板栗片变功率密度微波连续干燥

 Table 1
 Chestnut slice variable power density microwave continuous drying

微波频率/MHz	第1阶段	第2阶段	第3阶段
915	3.0 W/g,40 min	2.0 W/g, 10 min	1.0 W/g,直至
			含水率<9.0%
2 450	3.0 W/g, 10 min	2.0 W/g, 30 min	1.0 W/g,直至
			含水率<9.0%

1.3.2 干基含水率的测定

利用 DHS-20A 型快速水分测定仪测定板栗片的 含水量,得到板栗片平均初始湿基含水率为 50.7%。板 栗片干基含水率的计算公式如下^[13]。

$M = \frac{m_t - m_t}{m}$

式中:M 为板栗片干燥至t 时刻的干基含水 率,%;m_t为板栗片干燥至t 时刻的质量,g;m 为绝干 板栗片的质量,g。

1.3.3 干燥速率的测定

干燥速率的计算公式如下[14]。

$$D = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}$$

式中:D为干燥速率, $g/(g \cdot min)$; Δt 为相邻 2 次测 定板栗片的时间间隔,min; $M_{t+\Delta t}$ 为干燥至 $t+\Delta t$ 时刻板 栗片的干基含水量,g/g; M_t 为干燥至 t时刻板栗片的 干基含水量,g/g。

1.3.4 色泽的测定

利用色彩色差计测定不同干燥模式制备的板栗 干片亮度值(*L** 值)。*L** 值表示明暗,其值越大,产品 的亮度越好,可以间接反映产品色泽的好坏^[15-16]。每个 样品测定 3 片板栗干片的 *L** 值,并计算平均值。

1.3.5 单位质量微波能耗的计算

单位质量微波能耗计算公式如下四。

$e = \frac{P \times t}{m}$

式中:e 为单位质量微波能耗,(kW·h)/kg;P 为微 波功率,kW;t 为微波加热时间,h;m 为除去的水分质 量,kg。

1.3.6 干燥效率的计算

干燥效率指微波干燥过程中,板栗片中的水分吸 收的能量与微波源所发出的能量之比¹¹⁸。干燥效率的 计算公式如下。

$$\eta = \frac{m \times \lambda}{P \times t \times 10^3} \times 100$$

式中: η 为干燥效率,%;P为微波源输出功率,W; λ 为水的汽化潜热,2257 kJ/kg;t为干燥时间,s;m为 干燥过程中物料所失去的水的质量,kg。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 整理试验数据,采用 Origin 2018.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 板栗片固定功率密度微波连续干燥分析

2.1.1 915 MHz 微波设备连续干燥结果分析

图 2 为板栗片在 915 MHz 下,固定功率密度微波 连续干燥过程中的温度变化曲线。



图 2 915 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥过程中的温 度变化曲线

Fig.2 Temperature variation profiles during continuous microwave drying of chestnut slices at a fixed power density at 915 MHz

由图 2 可以看出,在不同微波功率密度下,板栗片 温度均呈现先迅速升高后接近匀速升温的规律。在干 燥终点,1.0、2.0、3.0 W/g 微波功率密度下物料的最高 温度分别达到 103、122、132 ℃。表明微波功率密度越 大,干燥过程中温度越高。

表 2 为利用 915 MHz 微波设备进行固定功率密 度连续微波干燥,板栗片开始出现褐变的时间、温度 和湿基含水率。

表 2 915 MHz 下板栗片固定功率微波连续干燥的褐变时间、温度 和湿基含水率

 Table 2
 Browning time, temperature and moisture content of

 wet base for continuous drying of chestnut slices at 915 MHz with

 fixed power microwaves

微波功率密度/(W/g)	褐变时间/min	温度/℃	湿基含水率/%
1.0	-	-	-
2.0	75	104	19.12
3.0	43	105	24.03

注:-表示未褐变。

— 56

由表 2 可以看出, 微波功率密度为 1.0 W/g 时, 板 栗片在整个干燥过程中均未出现褐变现象; 微波功率 密度为 2.0 W/g 时, 板栗片在 75 min 开始出现褐变现 象, 此时物料的温度为 104 ℃, 湿基含水率为 19.12%; 微波功率密度为 3.0 W/g 时, 板栗片出现褐变现象的时 间为 43 min, 此时物料的温度为 105 ℃, 湿基含水率为 24.03%。微波功率密度越大, 板栗片出现褐变的时间 越短, 褐变发生时物料湿基含水率越高。

图 3 为 915 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥曲线和干燥速率曲线。







从图 3(a)可以看出,微波功率密度分别为 1.0、 2.0、3.0 W/g时,板栗片湿基含水率从 50.7%降至 9.0% 以下所用时间分别为 240、120、80 min,微波功率密度 越高,干燥至安全储存水分含量所需时间越短。虽然 采用较高微波功率密度(3.0 W/g)可明显缩短干燥时 间,但当湿基含水率降低到一定程度时,物料温度过 高会出现褐变现象,严重损害干制品品质。相反,采用 较低微波功率密度(1.0 W/g)可避免干燥过程出现褐 变现象,但整个干燥过程耗时为 3.0 W/g 时的 3 倍。 从图 3(b)可以看出,微波功率密度为 1.0 W/g 时 有明显的加速、恒速、降速 3 个阶段,微波功率密度为 2.0 W/g 和 3.0 W/g 时有明显的加速、降速两个阶段, 说明微波功率密度越大,干燥速率越快,恒速阶段不 明显。主要是由于微波功率密度越大,板栗片内部的 水分子吸收能量越多,水分汽化速度越快,因此物料 水分降低速度也越快,当采用较大微波功率密度处理 时,板栗片中的绝大部分水在初始的加速阶段就已经 被脱去,所含的水分已经不能维持其干燥速度,因此 恒速阶段不明显^{19]}。

图 4 为利用 915 MHz 微波设备进行固定功率密 度连续干燥时的板栗片的单位质量微波能耗。



图 4 915 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥的单位质量 微波能耗

Fig.4 Microwave energy consumption per unit mass for continuous microwave drying of chestnut slices at a fixed power density at 915 MHz

由图 4 可知, 微波功率密度为 1.0、2.0、3.0 W/g 时 的单位质量微波能耗均为 8.7 (kW·h)/kg。结果表明, 采用较低微波功率密度(1.0 W/g)进行连续微波干燥, 虽然能获得较优的板栗片外观品质(无褐变),但所需 时间较长。

综上,用固定功率密度对板栗片进行微波连续干燥时,微波功率密度越小,干燥时间长;微波功率密度 越大时,物料未干燥充分就出现褐变现象。原因是在 干燥过程中,随着湿基含水率的降低,物料吸收微波 的能力越来越小,而微波提供的能量不变,因此导致 干燥后期温度难以控制和品质恶化,同时还造成能量 浪费^[20]。因此,915 MHz下,固定功率密度连续干燥难 以满足板栗片高效、高品质的干燥需求。

2.1.2 2 450 MHz 微波设备连续干燥结果分析

图 5 为 2 450 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥过程中的温度变化曲线。

从图 5 可以看出,在不同微波功率密度下,板栗片 温度均先迅速升高后接近匀速升温。在干燥终点,1.0、 2.0、3.0 W/g 微波功率密度下物料的最高温度分别达



图 5 2 450 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥过程中的 温度变化曲线

Fig.5 Temperature variation profiles during continuous microwave drying of chestnut slices at a fixed power density at 2 450 MHz

到 93、113、128 ℃。

表 3 为设置固定微波功率密度,利用 2 450 MHz 微波设备对板栗片进行连续微波干燥,开始出现褐变 时间及所对应的温度和湿基含水率的结果。

表 3 2 450 MHz 下板栗片固定功率微波连续干燥的褐变时间、温 度和湿基含水率

Table 3Browning time, temperature and moisture content ofwet base for continuous drying of chestnut slices at 2 450 MHzwith fixed power microwaves

微波功率密度/(W/g)	褐变时间/min	温度/℃	湿基含水率/%
1.0	-	-	-
2.0	50	104	24.30
3.0	12	106	27.64

注:-表示未褐变。

由表3可以看出,微波功率密度为1.0 W/g时,板 栗片在整个干燥过程中均未出现褐变现象;微波功率 密度为2.0 W/g时,板栗片在50min开始出现褐变现 象,此时物料的湿基含水率为24.30%;微波功率密度 为3.0 W/g时,板栗片出现褐变现象的时间为12min, 此时物料的湿基含水率为27.64%。微波功率密度越 大,板栗片出现褐变的时间越短,褐变发生时物料湿 基含水率越高,与915 MHz 微波设备进行干燥的规律 基本一致。

图 6 为 2 450 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥曲线和干燥速率曲线。

由图 6(a)可知, 微波功率密度分别为 1.0、2.0、 3.0 W/g时,板栗片湿基含水率由 50.7%降至 9.0%以下 所用时间分别为 80、50、22 min。由图 6(b)可知,3 条干 燥速率曲线只有加速和降速 2 个阶段, 微波功率密度 越大,干燥速率越快。



图 6 2 450 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.6 Continuous microwave drying curve and drying rate curve for chestnut slices at a fixed power density at 2 450 MHz

图 7 为利用 2 450 MHz 微波设备进行固定功率密 度进行连续干燥时板栗片的单位质量微波能耗。





Fig.7 Microwave energy consumption per unit mass for continuous microwave drying of chestnut slices at a fixed power density at 2 450 MHz

由图 7 可知,单位质量微波能耗随着微波功率密度 增大呈先上升后下降的趋势,其中微波功率密度2.0 W/g 时,单位质量微波能耗最高,为 3.9 (kW·h)/kg;微波功 **—** 58

率密度 1.0 W/g 时,单位质量微波能耗为 3.1 (kW·h)/kg; 微波功率密度为 3.0 W/g 时,单位质量微波能耗降至 2.6 (kW·h)/kg。

2.1.3 915 MHz 和 2 450 MHz 微波设备对比

在固定功率密度微波连续干燥方式下,且微波功 率密度分别为1.0、2.0、3.0 W/g时,采用2450 MHz 微 波设备将板栗片湿基含水率从50.7%干燥至9.0%以 下所需的干燥时间分别为80、50、22 min,单位质量微 波能耗分别为3.1、3.9、2.6 (kW·h)/kg,明显优于采用 915 MHz 微波设备的相同微波功率密度的干燥时间和 单位质量微波能耗。虽然固定功率微波连续干燥处理 的干燥时间短,但板栗片品质差。

2.2 固定功率密度微波间歇干燥分析

2.2.1 915 MHz 微波设备间歇干燥结果分析

当微波(915 MHz)功率密度为 1.0、2.0、3.0 W/g 进行间歇干燥时,从外观上看板栗片均未出现褐变现象。 图 8 为 915 MHz 下板栗片固定功率密度微波连续干燥曲线和干燥速率曲线。



(b)干燥速率曲线

图 8 915 MHz 下板栗片固定功率密度微波间歇干燥曲线和干燥 速率曲线

Fig.8 Intermittent microwave drying curve and drying rate curve for chestnut slices at a fixed power density at 915 MHz

由图 8(a)可知,板栗片干燥至湿基含水率小于 9.0%所需的干燥时间分别为 310、166、126 min,与同条

件下固定功率密度微波连续干燥相比,耗时更长。由 图 8(b)可知,微波功率密度为 1.0 W/g 时,干燥速率曲 线可分为加速、恒速和降速 3 个阶段;当微波功率密度 为 2.0 W/g 和 3.0 W/g 时,干燥速率曲线只有加速和降 速两个阶段,与唐小闲等^[21]对小黄姜真空微波干燥的 研究结果一致。

图 9 为利用 915 MHz 微波设备进行固定功率密 度进行连续干燥时板栗片的单位质量微波能耗。



图 9 915 MHz 下板栗片固定功率密度微波间歇干燥的单位质量 微波能耗

Fig.9 Microwave energy consumption per unit mass for intermittent microwave drying of chestnut slices at a fixed power density at 915 MHz

从图 9 可以看出,单位质量微波能耗呈先上升后 下降趋势,微波功率密度 2.0 W/g 时的单位质量微波 能耗最高,为 10.2 (kW·h)/kg。将图 4 与图 9 比较发 现,与固定功率密度微波连续干燥相比,固定功率密 度微波间歇干燥的单位质量微波能耗有所提高。 2.2.2 2 450 MHz 微波设备间歇干燥结果分析

当微波(2450 MHz)功率密度为 1.0、2.0、3.0 W/g 进行间歇干燥时,从外观上看板栗片均未出现褐变现 象。图 10为 2450 MHz 下板栗片固定功率密度微波间 歇干燥曲线和干燥速率曲线。

由图 10(a)可知,当微波(2450 MHz)功率密度为 1.0、2.0、3.0 W/g 进行间歇干燥时,板栗片干燥至湿基



59 _



图 10 2 450 MHz 下板栗片固定功率密度微波间歇干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.10 Intermittent microwave drying curve and drying rate curve for chestnut slices at a fixed power density at 2 450 MHz

含水率小于 9.0%所需的干燥时间分别为 104、72、 64 min,与同条件下固定功率密度微波连续干燥相比 耗时更长。由图 10(b)可知,3条不同微波功率密度的 干燥速率曲线均只有加速、降速两个阶段。

图 11 为利用 2 450 MHz 微波设备进行固定功率 密度进行间歇干燥时板栗片的单位质量微波能耗。



图 11 2 450 MHz 下板栗片固定功率密度微波间歇干燥单位质量 微波能耗



从图 11 可以看出,单位质量微波能耗随着微波 功率密度增大呈先上升后下降的趋势,微波功率密度 2.0 W/g时,单位质量微波能耗最高,为4.6 (kW·h)/kg; 微波功率密度为 3.0 W/g时,单位质量微波能耗降至 3.8 (kW·h)/kg,略高于同条件下固定功率密度微波连 续干燥的情况,但保证了干制品外观质量。

2.2.3 915 MHz 和 2 450 MHz 微波设备对比分析

在固定功率密度微波间歇干燥方式下,且微波功 率密度分别为 1.0、2.0、3.0 W/g 时,采用 2 450 MHz 微 波设备将板栗片湿基含水率从 50.7%干燥至 9.0%以下 所需的干燥时间分别为 104、72、64 min,单位质量微波 能耗为 3.5、4.6、3.8 (kW·h)/kg,明显优于采用 915 MHz 微波设备的相同微波功率密度的干燥时间和单位质 量微波能耗。虽然固定功率微波间歇干燥可避免板栗 片褐变,但这一干燥方式仅适用于批次式干燥设备,难 以应用于连续式微波干燥设备。

2.3 板栗片变功率密度微波连续干燥分析

2.3.1 915 MHz 微波设备连续干燥结果分析

图 12 为 915 MHz 下板栗片变功率密度微波连续 干燥曲线。



图 12 915 MHz 下板栗片变功率密度微波连续干燥曲线 Fig.12 Continuous microwave drying curve for chestnut slices at 915 MHz with variable power density

从图 12 可以看出,板栗片湿基含水率由 50.7%降 至 9.0%以下时,整个干燥过程用时 120 min。整个干燥 过程板栗片的温度在 70~90 ℃波动。此外,第 3 阶段将 微波功率密度降至 1.0 W/g,可有效控制物料温度,全 程均未出现由于热失控而导致的褐变现象。

2.3.2 2450 MHz 微波设备连续干燥结果分析

图 13 为 2 450 MHz 下板栗片变功率密度微波连续干燥曲线。





从图 13 可以看出,板栗片湿基含水率由 50.7%降

至 9.0%以下时,整个干燥过程用时 60 min。整个干燥 过程板栗片的温度控制在 100 ℃以下。此外,经过分段 干燥设计可有效控制物料温度,全程均未出现由于热 失控而导致的褐变现象。

2.4 不同干燥模式最优条件比较结果

-60

将3种干燥模式下板栗片不发生褐变的最优微波 干燥条件进行比较,结果见表4。

表 4 不同微波频率和干燥模式下较优干燥条件的干燥效率和 *L** 值

 Table 4
 Drying efficiency and L* values of better drying

conditions	in d	ifferent	microwav	e freque	ncies	and	drying	mode

干燥模式	微波频 率/MHz	微波功 率密度/ (W/g)	単位质量微 波能耗/ [(kW·h)/kg]	干燥效 率/%	<i>L</i> * 值
固定功率连 续干燥	915	1	8.7	0.72	83.6
固定功率间 歇干燥	915	3	9.8	0.46	83.8
变功率连续 干燥	915	3+2+1	7.6	2.22	84.3
固定功率连 续干燥	2 450	1	3.1	2.00	82.7
固定功率间 歇干燥	2 450	3	3.8	0.83	84.2
变功率连续 干燥	2 450	3+2+1	3.3	4.40	84.4

从表 4 中可以看出,变微波功率密度与最优固定 微波功率密度下的干燥产品相比,L*值和干燥效率较高,且不产生褐变;将两种微波频率进行对比发现,较 优条件的 2 450 MHz 固定微波功率密度连续干燥、固 定微波功率密度间歇干燥、变功率密度连续干燥模式的 干燥效率分别为 2.00%、0.83%、4.40%,与采用 915 MHz 微波设备相比,干燥效率分别提高了 178%、80%、98%。 综上所述,采用 2 450 MHz 变功率连续干燥更适合用 于板栗片干燥。

3 结论

在 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下,通过对比 3 种 干燥模式,得到最佳板栗片的干燥模式为变功率连续 干燥。其中,915 MHz 频率下变功率连续干燥模式用时 120 min,单位质量微波能耗为 7.6 (kW·h)/kg,干燥 效率为 2.22%,亮度 L* 值为 84.3,均优于固定功率的 两种微波干燥模式;2 450 MHz 频率下变功率连续干 燥模式用时和单位质量微波能耗分别为 60 min 和 3.3 (kW·h)/kg,干燥效率为 4.40%,亮度 L* 值为 84.4, 用时较两种固定功率的微波干燥模式短。结果表明, 2 450 MHz 频率从干燥用时、单位质量微波能耗、亮度 L* 值和干燥效率均明显优于采用 915 MHz 微波设备 的情况。因此,连续化板栗片干燥采用2450 MHz 变功 率连续干燥模式更佳。

参考文献:

 薛艾莲,夏晓霞,寇福兵,等.不同干燥方式联合熟化处理对板 栗粉品质特性及微观结构的影响[J].食品科学,2022,43(9):62-70.

XUE Ailian, XIA Xiaoxia, KOU Fubing, et al. Effect of cooking combined with different drying methods on the quality characteris– tics and microstructure of Chinese chestnut powder[J]. Food Science, 2022, 43(9): 62–70.

- [2] LIU C, WANG S J, CHANG X D, et al. Structural and functional properties of starches from Chinese chestnuts[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 568–576.
- [3] BORGES O P, SOEIRO CARVALHO J, REIS CORREIA P, et al. Lipid and fatty acid profiles of *Castanea sativa* Mill. Chestnuts of 17 native Portuguese cultivars[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2007, 20(2): 80–89.
- [4] YANG F, HUANG X J, ZHANG C L, et al. Amino acid composition and nutritional value evaluation of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume) and its protein subunit[J]. RSC Advances, 2018, 8(5): 2653–2659.
- [5] 李妍馥,梅小龙,骆安琪,等.板栗及其加工副产物的活性物质研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(24):9490-9498. LI Yanfu, MEI Xiaolong, LUO Anqi, et al. Research progress on active substances of Chinese chestnut and processing by-products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(24): 9490-9498.
- [6] 周葵,张雅媛,游向荣,等.板栗粉食品的开发利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 201–206. ZHOU Kui, ZHANG Yayuan, YOU Xiangrong, et al. Research progress in the utilization of chestnut flour[J]. Food Research and Development, 2021, 42(5): 201–206.
- [7] XU W X, ISLAM M N, CAO X H, et al. Effect of relative humidity on drying characteristics of microwave assisted hot air drying and qualities of dried finger citron slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110413.
- [8] SU D B, LV W Q, WANG Y, et al. Drying characteristics and water dynamics during microwave hot-air flow rolling drying of *Pleurotus eryngii*[J]. Drying Technology, 2020, 38(11): 1493-1504.
- [9] 袁源,刘洋洋,龚霄,等. 干燥方式对槟榔理化特性和抗氧化能力的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(8): 2369–2376.
 YUAN Yuan, LIU Yangyang, GONG Xiao, et al. Effects of drying methods on physicochemical properties and antioxidant capacity of *Areca catechu* L.[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(8): 2369–2376.
- [10] 唐毓玮, 龙凌云, 毛立彦, 等. 干燥方式对睡莲花茶多酚及其抗 氧化性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 59-65. TANG Yuwei, LONG Lingyun, MAO Liyan, et al. Effects of drying methods on polyphenol and antioxidant activities of waterlily tea[J]. Food Research and Development, 2020, 41(11): 59-65.
- [11] 王红利, 郁志芳. 不同干燥方式对甘蓝理化性质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 81-86.
 WANG Hongli, YU Zhifang. Effects of different drying methods on physicochemical properties and antioxidant activity of dried cab-bage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21): 81-86.
- [12] 王振帅,盛怀宇,陈善敏,等.不同干燥方法对朝鲜蓟粉多酚、抗

(下转第177页)

GOU Xiaoqing, FU Zhenyan, WANG Xiaojun, et al. Domestication and cultivation of *Agaricus gennadii*[J]. Acta Agriculturae Boreali– Occidentalis Sinica, 2014, 23(3): 177–179.

[13] 张金霞,黄晨阳.植物新品种保护与食用菌品种权[C]//首届全国 食用菌中青年专家学术交流会论文集.武汉:中国菌物学会, 2006.

ZHANG Jinxia, HUANG Chenyang. Protection of new plant varieties and edible mushroom variety rights[C]// Proceedings of the first National academic exchange conference for young and middle –aged experts on edible mushrooms. Wuhan: Mycological Society of China, 2006.

[14] 李玉. 野生食用菌菌种分离与鉴定[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.

LI Yu. The isolation and identification of wild edible fungi[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.

- [15] 李玉,图力古尔.中国真菌志:第四十五卷 侧耳——香菇型真菌[M].北京:科学出版社,2014.
 LI Yu, Tulikul. Chinese Fungi: Vol. 45 Side-Ear-A mushroom-type fungus[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [16] 刘晓婷, 郭九峰, 王淑妍, 等. 用 rDNA-ITS 方法鉴别内蒙古多种 野生食用菌[J]. 食药用菌, 2015, 23(5): 301-306. LIU Xiaoting, GUO Jiufeng, WANG Shuyan, et al. Identification of several edible mushrooms in Inner Mongolia by rDNA-ITS[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2015, 23(5): 301-306.
- [17] 张家晨, 贾福晨, 罗章, 等. 基于 ITS 序列对林芝市售七种野生大型食用真菌的鉴定[J]. 北方园艺, 2020(8): 122-129.
 ZHANG Jiachen, JIA Fuchen, LUO Zhang, et al. Identification research of seven wild macrofungus based on ITS sequences[J]. North-

م المكتر في المكتر ا

(上接第60页)

氧化性及香气成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 149-156.

WANG Zhenshuai, SHENG Huaiyu, CHEN Shanmin, et al. Effects of different drying methods on polyphenols, antioxidant activity and aroma composition of artichoke powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(23): 149–156.

- [13] HUANG X P, LI W Q, WANG Y M, et al. Drying characteristics and quality of *Stevia rebaudiana* leaves by far-infrared radiation[J]. Lebensmittel–Wissenschaft Und–Technologie, 2021, 140(10): 110638.
- [14] 吴钊龙,林芳,陈振林,等.不同干燥方式对蚕蛹干制品品质的 影响[J].保鲜与加工,2021,21(5):117-121.
 WU Zhaolong, LIN Fang, CHEN Zhenlin, et al. Effect of different drying methods on the quality of dried silkworm *Pupa* products[J].
- Storage and Process, 2021, 21(5): 117-121.
 [15] 吴钊龙,林芳,陈振林,等.蚕蛹变温压差膨化干燥工艺优化[J].

食品研究与开发, 2021, 42(5): 153-158. WU Zhaolong, LIN Fang, CHEN Zhenlin, et al. Optimization of explosion puffing drying process for silkworm *Pupa* at variable temperatures and pressure difference[J]. Food Research and Development, 2021, 42(5): 153-158.

- [16] WANG H C, ZHANG M, ADHIKARI B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 507–517.
- [17] 叶大鹏, 崔蕴涵, 翁海勇, 等. 莲子间歇式微波分段变功率真空
 干燥方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 288-295.
 YE Dapeng, CUI Yunhan, WENG Haiyong, et al. Lotus seed drying

ern Horticulture, 2020(8): 122-129.

[18] 高磊. 新疆南疆野生双孢蘑菇的鉴定、生物学特性及其驯化栽培的研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2012.
 GAO Lei. Studies on molecular identification, biological character-

istics and artificial domestication cultivation of ´wild Agaricus bis– porus´ strain in southern Xinjiang[D]. Ala´er: Tarim University, 2012.

- [19] LANDEWEERT R, LEEFLANG P, KUYPER T W, et al. Molecular identification of ectomycorrhizal mycelium in soil horizons[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(1): 327–333.
- [20] 李玉. 中国大型菌物资源图鉴[M]. 郑州: 中原农民出版社, 2015. LI Yu. Atlas of Chinese macrofungal resources[M]. Zhengzhou: Central Plains Peasant Press, 2015.
- [21] 易思华,张媱,孙燕飞,等. 新疆天山山脉地区野生羊肚菌 ITS 分析鉴定[J]. 中国食用菌, 2019, 38(11): 47-51, 56.
 YI Sihua, ZHANG Yao, SUN Yanfei, et al. ITS analysis and identification of wild *Morchella* in Tianshan Mountains areas in Xinjiang[J].
 Edible Fungi of China, 2019, 38(11): 47-51, 56.
- [22] 黄年来. 中国食用菌百科[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.
 HUANG Nianlai. Edible fungi cyclopedia[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993.
- [23] 梁倩倩,宋利茹,牛鑫,等. 絮缘蘑菇生物学特性及驯化栽培[J]. 菌物学报, 2020, 39(7): 1301–1311.
 LIANG Qianqian, SONG Liru, NIU Xin, et al. Biological characteristics and domestic cultivation of *A garicus subfloccosus*[J]. Mycosystema, 2020, 39(7): 1301–1311.

加工编辑:张楠 收稿日期:2022-05-16

by intermittent phased varying power microwave under vacuum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 288–295.

[18] 宋玲玲. 微波干燥过程中多阶段不同功率密度对黄豆品质的影响[J]. 机电信息, 2017(20): 20-27.

SONG Lingling. Effect of multi-stage and different power densities on soybean quality during microwave drying[J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(20): 20–27.

[19] 贺霞. 杨木高强度微波预处理特性与机理研究[D]. 长沙: 中南林 业科技大学, 2020.

HE Xia. Study on characteristics and mechanism of poplar pretreatment by high intensity microwave[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020.

 [20] 高亚平. 基于介电特性对微波干燥青萝卜品质调控研究[D]. 天 津: 天津科技大学, 2019.
 GAO Yaping. Study on quality control of microwave-dried radish

based on dielectric properties[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.

[21] 唐小闲, 刘艳, 咸兆坤, 等. 小黄姜真空微波干燥特性及其动力 学研究[J]. 食品科技, 2021, 46(10): 87-94.

TANG Xiaoxian, LIU Yan, XIAN Zhaokun, et al. Study on vacuum microwave drying characteristics and kinetic model of small yellow ginger[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(10): 87–94.

加工编辑:张昱 收稿日期:2022-05-19