

鲜切高山野山药片微波间歇干燥特性研究
Drying Characteristics of intermittent microwave heated
fresh-cut high mountain yam slice

张黎骅 武莉峰 党鑫凯 代建武

ZHANG Li-hua WU Li-feng DANG Xin-kai DAI Jian-wu

(四川农业大学机电学院, 四川 雅安 625014)

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

摘要:为深入研究高山野山药的干燥特性,自制微波间歇干燥试验装置,采用四因素四水平(微波功率、切片厚度、加热时间、间歇时间)对鲜切高山野山药片进行微波间歇干燥试验,得出鲜切高山野山药片微波间歇干燥的干燥变化规律,并对结果进行分析。结果表明:高山野山药片微波间歇干燥过程大致包括加速、恒速和降速阶段;并且加热时间为 7 s 时干燥色泽最好,此时切片厚度对收缩特性产生显著影响,提高切片厚度有利于保持高山野山药片的干后体积。该研究结果对于了解干燥高山野山药乃至相关农产品的过程具有一定的指导意义。

关键词:高山野山药;微波间歇干燥;特性;品质

Abstract: In order to analyze the drying characteristics of the yam, a homemade batch microwave drying test system was designed, and the drying tests undertaken by using four factors and four levels, including microwave power, thickness of yam, heating and intermittent time. The changes and the characteristics of drying the fresh-cut yam slice heated intermittently by using microwave were analyzed. The results showed that microwave drying process generally included acceleration, constant speed and deceleration phases, and the drying color was the brightest heated for 7 s. Moreover, under this condition, the thickness of slice could impact the contractility seriously, therefore increasing the thickness of slice appropriately could help the yam slices keep good volume after being dried. These results provided a theoretical basis and guidance significance for realizing the process of drying high mountain yam or related products.

Keywords: high mountain yam; microwave drying; characteristic; quality

与普通山药相比,野山药同样营养成分全面,含有丰富的碳水化合物和蛋白质,是重要粮食作物^[1]。但高山野山药成熟后,不能像同类山药产品挖出窖藏,否则会腐烂变质,对其进行适当的干燥处理后,既可延长其保存期,又有利于高山野山药的深加工。

目前,干燥农产品的方法有远红外干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、真空干燥和热风干燥等^[2]。微波干燥具有快速均匀、节能、高效、卫生、方便等优点,有利于提高产品质量^[3]。目前,针对山药的微波干燥研究较多,主要有:任广跃等^[4]通过微波辅助真空冷冻干燥技术对怀山药进行干燥处理,对耗能功效、干燥速率、多糖率这 3 个因素进行试验,从而确定了最优的工艺条件;李丽等^[5]通过热泵干燥技术,以干燥温度、切片厚度为因素,研究山药热泵干燥特性,得到山药热泵干燥的干燥速率曲线和干燥特性曲线;黄琪琳等^[6]通过对 3 个不同品种山药的营养成分比较,发现先微波干燥(1 200 W, 8 min),后热风干燥(60 ℃, 5 min)的混合干燥方法对佛手山药的干燥效果较好;叶晓梦^[7]采用真空微波与冷冻干燥串联结合的干燥方法来代替单一的冷冻干燥,研究其对铁棍山药的物理性质、感官评价以及超微结构的影响,揭示在干燥过程中水分的迁移特性。

试验^[8]结果表明,单纯使用微波对农产品进行干燥,很容易因温度过高而使食品产生硬化、结壳和焦化甚至烧伤等现象。采用微波间歇干燥方法对于提高山药的干燥品质和干燥效率是非常有效的^[9],胡庆国等^[10]进行微波间歇干燥的研究,认为间歇干燥模式可改善物料的水分分布情况,并且间歇时间越长,水分分布的均匀性越好,但干燥速率会有所下降。为深入研究高山野山药的干燥特性,综合前述,采取微波间歇干燥的方式进行本次试验,旨在探索鲜切高山野山药片的微波间歇干燥特性。

1 材料与方

1.1 材料

高山野山药:四川省雅安市羌江南路市场禾林店新鲜上

作者简介:张黎骅(1959—),男,四川农业大学教授,博士。

E-mail:357148948@qq.com

收稿日期:2016-11-15

市山药,产于雅安市禾林村。

1.2 仪器

- 水分仪:MA150 Starorius 型,上海右一仪器有限公司;
- 微波炉:MZ-2070EGZ 型,青岛海尔集团;
- 红外线测温计:HCJYET HT-866 型,基睿电子科技(上海)有限公司;
- 电子精密天平:AR522CN-OHAUS 型,分度值 0.01 g,奥豪斯仪器(上海)有限公司;
- 切片机:JX139632GR-300 推杆式,河北润联机械设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

物料挑选→高山野山药→清洗→切片(2,4,6,8 mm 厚度)→称重→均匀铺放料盘挂钩在微波炉中→微波间歇干燥→指标测定→包装→贮藏

1.3.2 研究方法 将高山野山药片分组进行单因素试验,每组试验包含 4 个水平,为四因素四水平。高山野山药片干燥试验的影响因素为微波功率、切片厚度、加热时间和间歇时间。对取得的试验数据进行单因素方差分析并选择最小显著性差异法(LSD 法),确定不同水平对干燥时间的影响程度。

1.3.3 试验设计

(1) 微波功率:根据文献[11]¹⁷⁻¹⁹以及预试验,本次将微波功率确定为 250,450,600,700 W 4 个水平进行试验,其他影响因素水平固定为切片厚度 4 mm,加热时间 15 s,间歇时间 60 s。通过测定干燥水分比、干燥速率、干燥水分比自然对数和水分有效扩散系数的变化探索微波功率对干燥动力学的影响。

(2) 切片厚度:根据相关文献[12],将高山野山药切片厚度定为 2,4,6,8 mm 4 个水平进行试验,其他影响因素水平固定为微波功率 700 W,加热时间 7 s,间歇时间 240 s。通过测定干燥水分比、干燥速率、干燥水分比自然对数和水分有效扩散系数的变化探索切片厚度对干燥动力学的影响。

(3) 加热时间:根据文献[11]¹⁵以及预试验,本次将加热时间确定为 3,5,6,7 s 4 个水平进行试验,其他影响因素水平固定为微波功率 700 W,切片厚度 2 mm,间歇时间 30 s。通过测定干燥水分比、干燥速率、干燥水分比自然对数和水分有效扩散系数的变化来探索加热时间对干燥动力学的影响。

(4) 间歇时间:根据文献[11]¹⁶以及预试验,将最厚山药片(8 mm)从 45 ℃加热至 65 ℃后间歇,最终确定加热时间为 30 s,间歇时间为 240 s,间歇比为 9,以此类推确定其它间歇比分别为 7,8,10,间歇时间分别为 180,210,240,270 s 4 个水平,其他影响因素水平固定为微波功率 700 W,切片厚度 8 mm,加热时间 30 s。通过测定干燥水分比、干燥速率、干燥水分比自然对数和水分有效扩散系数的变化探索间歇时间对干燥动力学的影响。

1.3.4 微波间歇干燥试验台功率强度 本试验中微波功率为其中一个试验因素,其功率强度按式(1)、(2)计算。用装

有一定量度水的烧杯放进微波炉里,根据干燥过程中能量随时间的变化求得改装过后的微波炉的实际功率。

$$Q = cm(t_2 - t_1) ,$$

(1)

$$P = \frac{Q}{t_2 - t_1} ,$$

(2)

- 式中:
- c ——水的比热容,kJ/(kg·℃);
 - m ——烧杯中水的质量,g;
 - t_1 ——水的初始温度,℃;
 - t_2 ——水的加热温度,℃;
 - P ——微波间歇试验台的功率强度,W;
 - Q ——规定的时间内吸收的热量,kJ。

1.3.5 干燥动力学曲线 不同功率、切片厚度、加热时间、间歇时间下干燥水分比、干燥速率的动态变化曲线通过等间隔取样称重的方法来计算。

高山野山药干基含水率 M_t 按式(3)计算:

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \times 100\% ,$$

(3)

- 式中:
- M_t ——干基含水率,%;
 - W_t ——在干燥时间 t 时刻的总质量,g;
 - G ——干物质质量,g。

任意 t 时刻高山野山药的干燥水分比 MR (Moisture ratio)由式(4)计算:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \times 100\% ,$$

(4)

- 式中:
- MR ——干燥水分比,%;
 - M_0 ——初始干基含水率,%;
 - M_t ——在任意的干燥 t 时刻的干基含水率,%。

高山野山药的干燥速率 DR (Drying rate)按式(5)计算:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} ,$$

(5)

- 式中:
- DR ——干燥速率,%/h;
 - M_{t1} —— t_1 时刻下的干基含水率,%;
 - M_{t2} —— t_2 时刻下的干基含水率,%。

1.3.6 干燥过程中的相关参数

(1) 水分有效扩散系数:它指是干燥过程中的水分迁移速度,按式(6)与(7)计算:

$$D_{eff} = - \frac{H^2}{\pi^2} k ,$$

(6)

- 式中:
- D_{eff} ——水分有效扩散系数,m²/s;
 - H ——高山野山药的厚度,mm ;
 - k ——斜率。

(2) 间歇比:参照文献[7]³⁴⁻³⁵。

2 结果与分析

2.1 微波功率对干燥动力学的影响

2.1.1 微波功率对干燥时间的影响 由表 1 可知,对于高山

表 1 不同微波功率下高山野山药干燥时间的多重比较[†]

Table 1 The multiple comparison of drying time with different microwave power						
微波功率/W	微波功率/W	均值差	标准误差	显著性检验值	95%置信区间	
					下限	上限
700	600	-0.333	0.167	0.081	-0.718	0.051
	450	-4.667 *	0.167	<0.001	-5.051	-4.282
	250	-40.500 *	0.167	<0.001	-40.884	-40.116
600	700	0.333	0.167	0.081	-0.051	0.718
	450	-4.333 *	0.167	<0.001	-4.718	-3.949
	250	-40.167 *	0.167	<0.001	-40.551	-39.782
450	700	4.667 *	0.167	<0.001	4.282	5.051
	600	4.333 *	0.167	<0.001	3.949	4.718
	250	-35.833 *	0.167	<0.001	-36.218	-35.449
250	700	40.500 *	0.167	<0.001	40.116	40.884
	600	40.167 *	0.167	<0.001	39.782	40.551
	450	35.833 *	0.167	<0.001	35.449	36.218

[†] * 表示通过显著性水平为 0.05 的检验。

野山药微波间歇干燥,微波功率对干燥时间的影响是显著的,适当地提高微波功率可以缩短干燥时间。原因在于其他条件相同的情况下,微波功率越大,山药内水分子的振荡情况越激烈,干燥速度越快,用时越短。

2.1.2 微波功率对干燥水分比的影响 由图 1 可知,微波功率越大,高山野山药片的干燥速率越快,用时越短。在干燥后半阶段,干燥速率减慢,脱水难度增加。故可知,干燥速率与微波功率大致呈正相关,但当功率处于 250 W 时,干燥时间增大幅度较大,速率减小较明显,试验结果表明测得功率过低时温度上升非常缓慢。

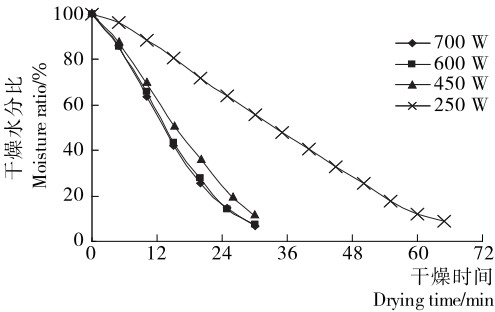


图 1 不同微波功率下干燥水分比与干燥时间的关系曲线
Figure 1 The relationship between MR and DR with different microwave power

2.1.3 微波功率对干燥速率的影响 由图 2 可知,高山野山药片干燥过程一般包括加速、恒速及降速三方面。功率越大,达到恒速阶段时的含水率就越低,干燥速度也越大,故恒速阶段不明显,或不存在,从而直接由升速和降速两个阶段组合而成,造成上述现象的原因是当采用较大微波功率处理时,山药中的绝大部分水在刚开始的升温阶段就已经被脱去,因此在干燥速率最大时,高山野山药片所含的水分已经不能维持其干燥速度,因此恒速阶段或者恒速阶段不明显的现象没有出现。

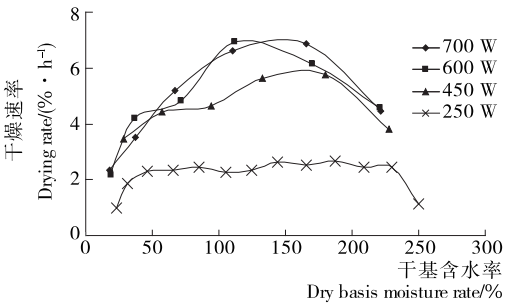


图 2 不同微波功率下干燥速率与干基含水率的关系曲线
Figure 2 The relationship between DR and Mt with different microwave power

2.1.4 不同微波功率下水分有效扩散系数的变化 不同微波功率下高山野山药片干燥水分比自然对数 lnMR 随干燥时间的变化曲线见图 3。对应水分有效扩散系数的线性拟合结果见表 2。

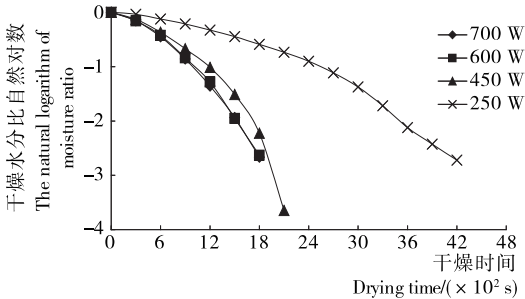


图 3 不同微波功率下干燥水分比自然对数随干燥时间变化曲线
Figure 3 The lnMR which with the change of the drying time with different microwave power

表 2 不同微波功率下高山野山药的水分有效扩散系数

Table 2 The D_{eff} with the change of microwave power				
微波功率/W	线性回归拟合公式	R^2	$D_{eff} / (\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
700	$\ln MR = -0.1484t + 0.2757$	0.9586	2.41	
600	$\ln MR = -0.1468t + 0.2808$	0.9539	2.18	
450	$\ln MR = -0.1578t + 0.4614$	0.8782	2.23	
250	$\ln MR = -0.0645t + 0.3647$	0.9325	1.05	

由表 2 可知,高山野山药微波间歇干燥过程中,微波功率为 700 W 时高山野山药水分有效扩散系数是 250 W 时的 2.2 倍,说明提高微波功率能够提高水分有效扩散的速度。微波功率为 700 W 和 600 W 高山野山药水分有效扩散系数相近,进一步论证表 2 结果,即对于高山野山药,微波功率为 700 W 和 600 W 时干燥时间没有显著差异。

2.2 切片厚度对干燥动力学的影响

2.2.1 切片厚度对干燥时间的影响 由表 3 可知,对于高山野山药微波间歇干燥,切片厚度对干燥时间产生了显著影响 ($P < 0.05$)。并且可以看出切片厚度的 4 个水平两两之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。说明对于高山野山药微波间歇干

表 3 不同切片厚度下高山野山药干燥时间的多重比较[†]

Table 3 The multiple comparison of drying time with different thickness of the high mountains yam slice

切片厚度/mm	切片厚度/mm	均值差	标准误差	显著性检验值	95%置信区间	
					下限	上限
2	4	-110.333 *	0.204	<0.001	-110.804	-109.863
	6	-250.167 *	0.204	<0.001	-250.637	-249.696
	8	-350.000 *	0.204	<0.001	-350.471	-349.529
4	2	110.333 *	0.204	<0.001	109.863	110.804
	6	-139.833 *	0.204	<0.001	-140.304	-139.363
	8	-239.667 *	0.204	<0.001	-240.137	-239.196
6	2	250.167 *	0.204	<0.001	249.696	250.637
	4	139.833 *	0.204	<0.001	139.363	140.304
	8	-99.833 *	0.204	<0.001	-100.304	-99.363
8	2	350.000 *	0.204	<0.001	349.529	350.471
	4	239.667 *	0.204	<0.001	239.196	240.137
	6	99.833 *	0.204	<0.001	99.363	100.304

[†] * 表示通过显著性水平为 0.05 的检验。

燥,切片厚度对干燥时间影响显著,可以通过减小切片厚度来缩短干燥时间。

2.2.2 切片厚度对干燥水分比的影响 由图 4 可知,切片厚度越小,高山野山药片的干燥曲线就越陡峭,干燥速率将越大。

2.2.3 切片厚度对干燥速率的影响 由图 5 可知,切片厚度

有差异的情况下,其干燥速率是有差异的。其它条件不变,切片厚度越大,干燥速率越慢。这是因为物料越薄,内部水分迁移的距离就越短,对于一定体积的物料来说,厚度越大,其与空气接触的相对表面积就越小,内部传热的传质阻力越大,影响了热质传递,因此干燥速率就越缓慢^[13]。2 mm 和 4 mm 的干燥过程没有恒速阶段;6 mm 的干燥过程 3 个阶段均存在,刚开始的升速、恒速阶段,到最后的减速阶段,且恒速阶段存在时间比较长;8 mm 的整个干燥过程基本处于恒速阶段。

2.2.4 不同切片厚度下水分有效扩散系数的变化 不同切片厚度下高山野山药片干燥水分比自然对数 $\ln MR$ 随干燥时间的变化曲线见图 6。对应水分有效扩散系数的线性拟合结果见表 4。

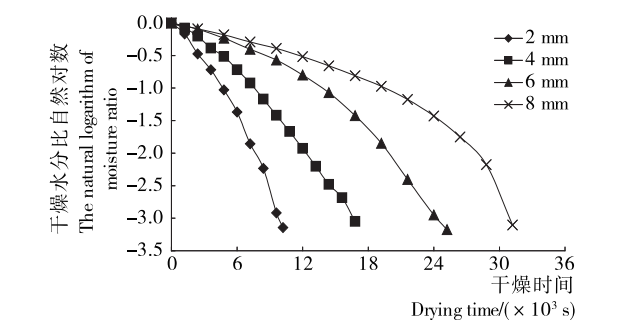


图 6 不同切片厚度下干燥水分比自然对数随干燥时间变化曲线

Figure 6 The relationship between $\ln MR$ and drying time with different thickness of the high mountains yam slice

表 4 不同切片厚度下高山野山药的水分有效扩散数

Table 4 The D_{eff} with different thickness of the high mountains yam slice

切片厚度/mm	线性回归拟合公式	R^2	$D_{eff} / (\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
2	$\ln MR = -0.3108t + 0.2686$	0.9724	1.26
4	$\ln MR = -0.1854t + 0.2625$	0.9846	3.00
6	$\ln MR = -0.1270t + 0.4164$	0.9363	4.63
8	$\ln MR = -0.0832t + 0.3308$	0.8774	5.40

由表 4 可知,高山野山药微波间歇干燥过程中,切片厚度为 8 mm 时高山野山药水分有效扩散系数是 2 mm 时的 4.29 倍,提高切片厚度一定程度上能够提高水分有效扩散的速度。这刚好与一般规律相反,原因可能是厚度较高的情况下对于其物料内部升温的效果有利于保持,厚度越薄在间歇时越容易降温,不利于温度的保持。

2.3 加热时间对干燥动力学的影响

2.3.1 加热时间对干燥时间的影响 由表 5 可知,对于高山野山药微波间歇干燥,加热时间对干燥时间产生显著影响 ($P < 0.05$)。且加热时间分别为 3 s 和 5 s 时的干燥时间与其他加热时间的干燥时间有显著差异 ($P < 0.05$);加热时间为 6 s 和 7 s 时的干燥时间与其他部分加热时间的干燥时间有显著差异 ($P < 0.05$)。

图 4 不同切片厚度下干燥水分比与干燥时间的关系曲线

Figure 4 The relationship between MR and drying time with different thickness of the high mountains yam slice

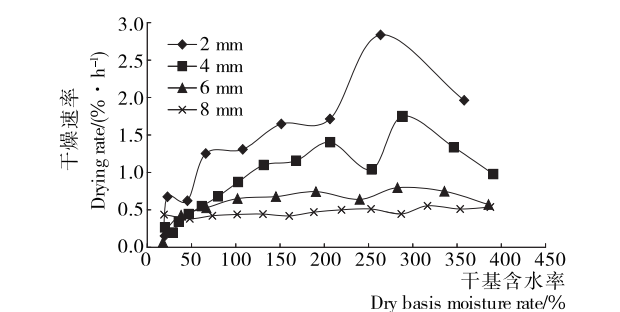


图 5 不同切片厚度下干燥速率与干基含水率的关系曲线

Figure 5 The relationship between DR and Mt with different thickness of the high mountains yam slice

表 5 不同加热时间下高山野山药干燥时间的多重比较[†]

Table 5 The multiple comparison of drying time with different heating time						
加热时间/s	加热时间/s	均值差	标准误	显著性检验值	95%置信区间	
					下限	上限
3	5	25.500 *	0.289	<0.001	24.834	26.166
	6	45.000 *	0.289	<0.001	44.334	45.666
	7	45.500 *	0.289	<0.001	44.834	46.166
5	3	-25.500 *	0.289	<0.001	-26.166	-24.834
	6	19.500 *	0.289	<0.001	18.834	20.166
	7	20.000 *	0.289	<0.001	19.334	20.666
6	3	-45.000 *	0.289	<0.001	-45.666	-44.334
	5	-19.500 *	0.289	<0.001	-20.166	-18.834
	7	0.500	0.289	0.122	-0.166	1.166
7	3	-45.500 *	0.289	<0.001	-46.166	-44.834
	5	-20.000 *	0.289	<0.001	-20.666	-19.334
	6	-0.500	0.289	0.122	-1.166	0.166

[†] * 表示通过显著性水平为 0.05 的检验。

综上所述,对于高山野山药的微波间歇干燥,加热时间对干燥时间的影响是显著的,适当地提高加热时间可以缩短干燥时间。原因可能是在其他条件相同的情况下,加热时间越大,物料内水分子的振荡时间越长,干燥速度越大,干燥时间越短。

2.3.2 加热时间对干燥水分比的影响 由图 7 可知,加热时间越长,高山野山药片的干燥曲线就越有垂直水平轴的趋势,干燥速率越快,用时越短。在干燥后半段,曲线接近水平,脱水难度增加。故可知,干燥速率与加热时间大致呈正相关。

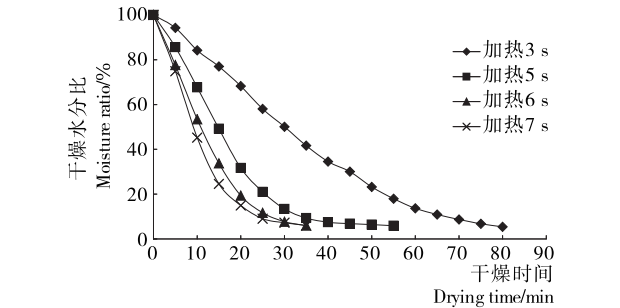


图 7 不同加热时间下干燥水分比与干燥时间的关系曲线
Figure 7 The relationship between MR and drying time with different heating time

2.3.3 加热时间对干燥速率的影响 由图 8 可知,高山野山药片干燥过程一般包括加速、恒速及降速 3 个阶段。功率越大,达到恒速阶段时的含水率就越低,干燥速度越大,所以恒速阶段不明显,或不存在,直接由升速和降速两个阶段组合而成,造成上述现象的原因是当采用较大加热时间处理时,山药中的绝大部分水在刚开始的升温阶段就已经被脱去,从而在干燥速率最大时,高山野山药片所含的水分已经不能维持其干燥速度,因此恒速阶段或者恒速阶段不明显的现象没有出现。

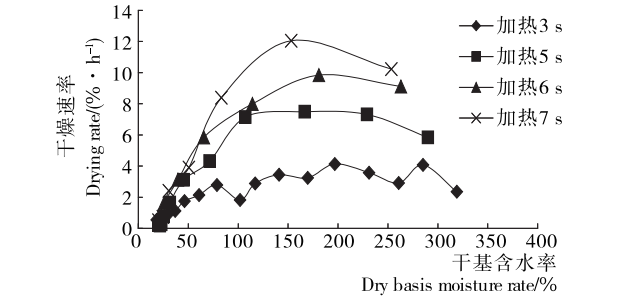


图 8 不同加热时间下干燥速率与干基含水率的关系曲线
Figure 8 The relationship between DR and Mt with different heating time

2.3.4 不同加热时间下水分有效扩散系数的变化 不同加热时间下高山野山药片干燥水分比自然对数 lnMR 随干燥时间的变化曲线见图 9。对应水分有效扩散系数的线性拟合结果见表 6。

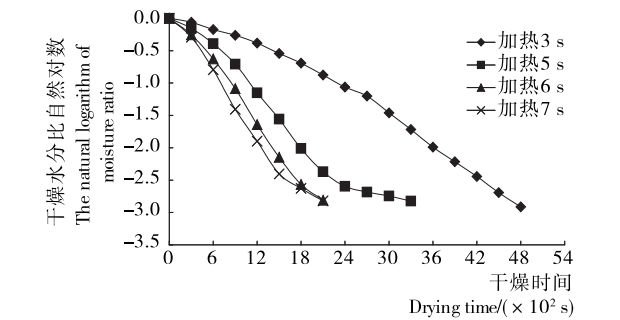


图 9 不同加热时间下干燥水分比自然对数随干燥时间的变化曲线
Figure 9 The relationship between lnMR and drying time with different heating time

表 6 不同加热时间下高山野山药的水分有效扩散系数
Table 6 The D_{eff} with different heating time

加热时间/s	线性回归拟合公式	R^2	$D_{eff} / (\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
3	$\ln MR = -0.0629t + 0.2921$	0.9770	2.54
5	$\ln MR = -0.0979t + 0.0156$	0.9597	3.96
6	$\ln MR = -0.1443t + 0.1233$	0.9912	5.85
7	$\ln MR = -0.1459t + 0.0017$	0.9800	5.91

由表 6 可知,高山野山药微波间歇干燥过程中,加热时间为 7 s 时水分有效扩散系数是 3 s 时的 2.33 倍,说明增长加热时间能够提高高山野山药水分有效扩散的速度。

2.4 间歇时间对干燥动力学的影响

2.4.1 间歇时间对干燥时间的影响 由表 7 可知,对于高山野山药微波间歇干燥,间歇时间对干燥时间产生了显著影响 ($P < 0.05$)。并且可以看出间歇时间的 4 个水平两两之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。说明对于高山野山药微波间歇干燥,微波干燥间歇时间对干燥时间影响显著,可以通过缩短微波干燥间歇时间来缩短干燥时间。

2.4.2 间歇时间对干燥水分比的影响 由图 10 可知,间歇

表 7 不同间歇时间下高山野山药干燥时间的多重比较[†]
Table 7 The multiple comparison of drying time with different drying intermittent time

间歇时 间/s	间歇时 间/s	均值差	标准误	显著性 检验值	95%置信区间	
					下限	上限
180	210	-20.333 *	0.264	<0.001	-20.941	-19.726
	240	-25.167 *	0.264	<0.001	-25.774	-24.559
	270	-30.500 *	0.264	<0.001	-31.108	-29.892
210	180	20.333 *	0.264	<0.001	19.726	20.941
	240	-4.833 *	0.264	<0.001	-5.441	-4.226
	270	-10.167 *	0.264	<0.001	-10.774	-9.559
240	180	25.167 *	0.264	<0.001	24.559	25.774
	210	4.833 *	0.264	<0.001	4.226	5.441
	270	-5.333 *	0.264	<0.001	-5.941	-4.726
270	180	30.500 *	0.264	<0.001	29.892	31.108
	210	10.167 *	0.264	<0.001	9.559	10.774
	240	5.333 *	0.264	<0.001	4.726	5.941

[†] * 表示通过显著性水平为 0.05 的检验。
时间越短,高山野山药片的干燥曲线就越陡峭,即间歇时间越短,干燥速率越快,干燥至安全含水率所需的时间也越短;干燥速率与间歇时间大致呈正相关。

2.4.3 间歇时间对干燥速率的影响 由图 11 可知,间歇时间对干燥速率仍有较大的影响,间歇时间越短,干燥速率持续快速上升的时间越短,达到最大的干燥速率越快。但间歇

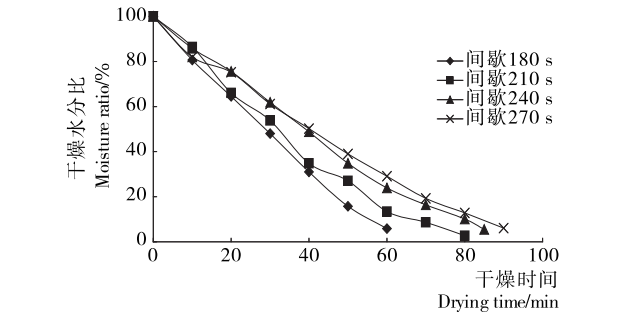


图 10 不同间歇时间下干燥水分比与自然对数的关系曲线
Figure 10 The relationship between MR and drying time with different drying intermittent time

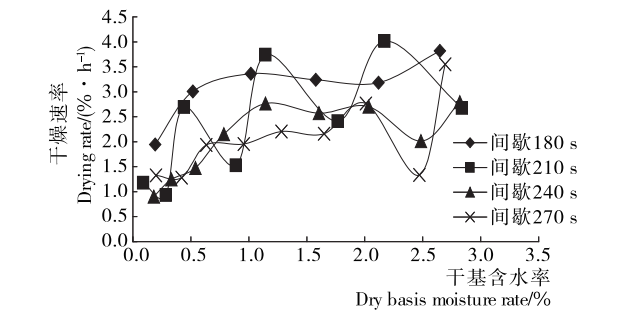


图 11 不同间歇时间下干燥速率与干基含水率的关系曲线
Figure 11 The relationship between DR and Mt with different drying intermittent time

时间为 210 s 时,干燥速率曲线出现强烈波动,可能是在干燥的过程中,以间歇 240 s 为基准设置的其它 3 个水平,而当间歇 210 s 时,当从 45 ℃ 加热至 65 ℃ 时,间歇时间变短,每次降到的温度高于 45 ℃,故升到的温度高于 65 ℃,且山药片的干燥是从山药片的两边由外至内干燥,当外面干燥之后,阻止了水分子的迁移,故在这种交替的状态下出现了干燥速率的波动交替状态。

2.4.4 不同间歇时间下水分有效扩散系数的变化 不同间歇时间下高山野山药片干燥水分比自然对数 $\ln MR$ 随干燥时间的变化曲线见图 12。对应水分有效扩散系数的线性拟合结果见表 8。

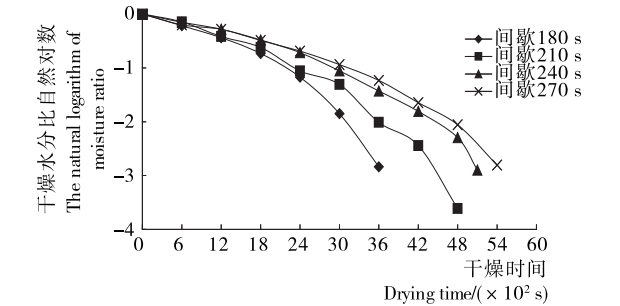


图 12 不同间歇时间下干燥水分比自然对数随干燥时间的变化曲线
Figure 12 The relationship between $\ln MR$ and drying time with different drying intermittent time

表 8 不同间歇时间下高山野山药的水分有效扩散系数
Table 8 The D_{eff} with different drying intermittent time

加热时 间/s	线性回归拟合公式	R^2	$D_{eff} /$ ($\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
180	$\ln MR = -0.0745t + 0.3057$	0.9137	4.83
210	$\ln MR = -0.0701t + 0.3918$	0.9228	4.55
240	$\ln MR = -0.0534t + 0.3140$	0.9354	3.46
270	$\ln MR = -0.0480t + 0.2616$	0.9321	3.11

由表 8 可知,高山野山药微波间歇干燥过程中,间歇时间为 180 s 时水分有效扩散系数是 270 s 时的 1.55 倍,说明缩短间歇时间能够提高高山野山药水分有效扩散的速度。

3 结论

本试验将微波间歇干燥应用于高山野山药,研究了不同微波功率、不同切片厚度、不同加热时间和不同间歇时间下高山野山药的干燥动力学曲线、水分有效扩散系数,主要结论如下:

(1) 在高山野山药微波间歇干燥中,微波功率、切片厚度、加热时间和间歇时间均对干燥时间有显著影响;干燥时间随微波功率的提高、切片厚度的减小、加热时间的增长和间歇时间的缩短而减少。当微波功率为 700 W 和 600 W、加热时间为 6 s 和 7 s 时的干燥时间差异并不显著。

(2) 4 个因素的干燥速率曲线表明:高山野山药微波间歇干燥过程中,干燥速率大致呈加速、恒速和降速 3 个阶段。
(下转第 92 页)

头机去头效果的影响,得到了各因素的变化规律以及最佳参数值,并通过正交试验验证了各因素的最优参数组合。结论如下:

(1) 不同结构刀具对鱼体去头加工过程中的采肉率、去头率和切断面评分都有显著的影响;采用经鱼头鳃盖骨外沿仿形设计的弧刃 U 型刀的平均采肉率为 75.6%,平均去头率为 91.0%,鱼头切断面评分最高;

(2) 不同的工作气压对鱼体去头加工过程中的采肉率、去头率影响不显著;但对鱼体鱼头切断面评分具有显著影响。

(3) 随着鱼体头部定位距离的增加,鱼体平均采肉率逐步下降,去头率显著减小,且存在鱼头切割不完整的现象,并导致平均切断面评分的显著变化。

(4) 随着鱼体背部定位距离的变化,鱼体的平均采肉率没有明显变化;平均去头率呈现先增加后减小的变化趋势,但变化不显著;鱼体的平均切断面评分则呈现显著先增加后减小的变化趋势。

(5) 通过正交试验确定了气动式淡水鱼去头机样机工作的最优方案为鱼体头部定位距离为 107 mm,鱼体背部定位距离为 55 mm,去头刀具为弧刃 U 型刀,在此基础上进行实验验证,鱼体去头加工的采肉率为 76.8%,去头率为 90.6%。

参考文献

[1] 王锡昌. 中国水产加工业概况剖析[J]. 中国食品与市场, 2005 (7): 28-29.

[2] 贾公树. 我国水产品加工技术与装备综述[J]. 渔业现代化, 2000

(2): 12-14.

[3] 戴新明, 熊善伯. 湖北省淡水鱼加工与综合利用[J]. 渔业现代化, 2004(2): 42-43.

[4] 张金诚, 邸刚. 海南水产品加工业的现状和发展方向[J]. 中国渔业经济, 2006(6): 60-62.

[5] 陈诗波, 李崇光. 关于湖北省淡水产业发展的思考[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(2): 177-180.

[6] 岑剑伟, 李来好, 杨贤庆, 等. 我国水产品加工业发展现状分析[J]. 现代渔业信息, 2008, 23(7): 6-9.

[7] 徐中伟. 鱼类前处理设备的发展方向和前景[J]. 现代渔业信息, 2007, 22(12): 32-34.

[8] ANDRZEJ Dowgiallo, DANIEL Dutkiewicz. Possibilities of utilizing the differences of fish tissues stiffness in the mechanization of cyprinid deheading[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83 (1): 111-115.

[9] ANDRZEJ Dowgiallo. The effect of cutting and fish-orientation systems on the deheading yield of carp[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2008, 43(9): 1 688-1 692.

[10] 徐皓, 张建华, 丁建乐, 等. 国内外渔业装备与工程技术研究进展综述[J]. 渔业现代化, 2010, 37(3): 1-5.

[11] 李玲, 宗力, 王玖玖, 等. 大宗淡水鱼加工前处理技术和装备的研究现状及方向[J]. 渔业现代化, 2010, 37(5): 43-46.

[12] 刘锐, 陈洁. 我国水产品加工业发展现状及潜力分析[J]. 农业展望, 2010, 6(4): 33-35.

[13] 陈庆宇, 沈建, 付润泽. 典型海产小杂鱼机械去头方法研究[J]. 渔业现代化, 2012, 39(5): 38-42.

[14] 陈福礼, 牟鹏顺. 鲜鱼加工装置: 中国, 200820015512.5[P]. 2009-06-10.

(上接第 44 页)

但也可能出现不显著的恒速阶段,或不存在恒速阶段,直接由升速和降速阶段组合而成。

(3) 其它条件不变时,高山野山药的水分有效扩散系数在 $1.05\times10^{-7}\sim2.41\times10^{-7}$ m²/s 时内随着微波功率(250~700 W)的升高而增大;在 $1.26\times10^{-7}\sim5.40\times10^{-7}$ m²/s 时随切片厚度(2~8 mm)的增加而增大;在 $2.54\times10^{-8}\sim5.91\times10^{-8}$ m²/s 时随加热时间(3~7 s)的增长而增大;在 $3.11\times10^{-7}\sim4.83\times10^{-7}$ m²/s 时随间歇时间(180~270 s)的增长而减小。

本试验在实验室内完成,如需进行工业化较大规模的试验时应继续优化其工艺参数,使研究成果能在生产中推广应用。

参考文献

[1] 陈红兵, 高金燕. 食用山药片的冻干工艺探讨[J]. 食品与机械, 2001, 17(6): 32-33.

[2] 陈艳珍. 微波真空联合干燥怀山药的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2009: 4-5.

[3] 吕爽爽. 微波干燥技术在食品中的应用[J]. 食品与机械, 2006, 22(5): 119-122.

[4] 任广跃, 任丽影, 张伟, 等. 正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 12-16.

[5] 李丽, 孙健, 盛金凤, 等. 山药热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10): 212-217.

[6] 黄琪琳, 张小波, 赵思明. 干燥方法对山药片的质量影响[J]. 食品科技, 2009, 34(5): 82-83.

[7] 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.

[8] 曹崇文. 微波真空干燥技术现状[J]. 干燥技术与设备, 2004, 2 (3): 5-9.

[9] 张黎骅, 张文, 吕珍珍, 等. 响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 369- 374.

[10] 胡庆国, 张懋. 间歇操作方式在厚层真空微波干燥中的应用[J]. 食品与机械, 2007, 23(6): 62-64.

[11] 赵超. 花椒间歇式微波干燥理论及工艺优化的试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.

[12] 陈媛媛, 符云鹏, 陈亮亮, 等. 微波真空干燥处理对铁棍山药多糖得率和干燥特性影响[J]. 农产品加工: 学刊, 2012, 11(4): 99-102.

[13] 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.