

文章编号: 1674-5566(2013)03-0458-08

红枣浆粉体化微波干燥特性研究

刘娟娟, 程裕东, 金银哲

(上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

摘要: 在2 450 MHz 频率功率为500、700、900 W 的微波处理条件下, 分别对铺料厚度为2、4、6 mm 的红枣浆样品进行干燥处理, 考察了红枣浆粉体化过程中的微波干燥特性。并与100、110、120℃ 下各相同红枣浆样品的热风干燥结果进行了比较。采用指数模型(Lewis)、单项扩散模型(Hustrulid and Flikke, HF)和Page模型分别对红枣浆样品的水分比进行拟合。结果表明, 微波干燥的红枣浆样品升温快速, 可有效地提高干燥速率, 节约干燥时间和干燥能耗, 但是热风干燥较好地保持了物料的固有结构, 且干燥后的红枣粉吸湿性较好, 色差较小。Page模型对于红枣浆样品的热风、微波薄层干燥过程均可以进行较好地拟合。

研究亮点: 比较了红枣浆微波、热风干燥条件下的干燥特性, 考察了各干燥条件下的干燥速率、干燥能耗、吸湿性、色差等, 并确定了红枣浆干燥过程中适合的模型—Page模型, 利用该模型可以对热风、微波干燥条件下不同时间的红枣浆样品的水分含量等进行预测, 同时也可以对特定水分含量样品的干燥时间进行预测, 为微波、热风联合干燥红枣粉提供了依据。

关键词: 红枣浆; 微波干燥; 热风干燥; 干燥速率; 干燥模型

中图分类号: TS 205.9

文献标志码: A

红枣(*dates Zizyphus jujuba*), 又名中华大枣, 为鼠李科(Rhamnaceae)、枣属植物枣树(*Zizyphus jujuba* Mill)的果实。红枣原产我国, 早在远古时代, 就与桃、李、杏、栗并称为我国古代五果。目前, 我国红枣的产量约占世界总产量的90%以上, 枣树已成为我国第一大干果品种^[1]。

红枣^[2-3]含有8种人体不能合成的必需氨基酸, 以及幼儿体内不能合成的组氨酸和精氨酸^[1]。现代医学表明, 红枣中的多糖、芦丁、维生素C、五环三萜类物质、皂甙、环磷酸腺苷(cAMP)、环磷酸鸟苷(cGMP)等成分对提高机体免疫力和抗氧化作用有显著效果^[4]。

通常红枣的加工利用方法有鲜食、蜜饯食品、发酵型饮料、干制品和粉状制品等。而红枣粉状制品具有易保存、远距离运输、产品多样化的特点, 是一种良好的基础素材。粉状化干燥方法主要有滚筒、喷雾、远红外、真空冷冻、微波干燥等。其中微波干燥由于其干燥迅速、生产效率

高、干燥品质好、能量利用高等优点而被广泛使用^[5], 如周旺等^[6]干燥辣椒粉, 伊长文和王晶^[7]生产草莓粉, 王长青^[8]生产马铃薯颗粒全粉, 孔庆生和祝冬青^[9]生产南瓜粉等均使用了微波进行干燥。此外, 曹艳和程裕东^[10]研究了微波加热鲢、狭鳕鱼糜凝胶形成的动力学, 刘世雄等^[11]研究了2 450 MHz 频率微波加热条件下番茄汁杀菌的特性, 黄燕等^[12]比较了微波、热风干燥对橙皮的干燥特性及其品质影响, 王伊等^[13]研究了鲢鱼糜与淀粉复合系统的微波糊化特性。对于红枣而言, 国外的研究主要是红枣成熟^[14]、保藏^[15-16]、生长保鲜^[17]。国内对于红枣的研究主要是其种植技术、营养保健, 既有的红枣干燥主要有对红枣干燥特性的研究^[18]、微波干燥生产红枣粉助干剂的研究^[19-20], 而未有对微波干燥红枣浆粉体化过程的研究。因此, 本研究利用微波对红枣浆进行干燥, 研究微波功率、铺料厚度等因素对其粉体化过程的影响, 并与热风干燥进行

收稿日期: 2013-02-20 修回日期: 2013-03-13

基金项目: 上海市科学技术委员会部分院校能力建设项目(12290502200)

作者简介: 刘娟娟(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品热加工。E-mail: liu.shuijuanjuan@163.com

通信作者: 程裕东, E-mail: ydcheng@shou.edu.cn

对比,从理论上阐述其干燥机理,同时引用模型进行模拟,确定了红枣浆粉体化过程中的最佳干燥模型。利用该模型可以对热风、微波干燥条件下不同时间的红枣浆样品的水分含量等进行预测,同时也可以对特定水分含量下的干燥时间进行预测,在实际应用中具有重要的意义。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

主要材料与试剂包括红枣(沧州金丝小枣)、果胶复合酶(宁夏和氏璧生物技术有限公 司)、大豆分离蛋白(谷神集团)、麦芽糊精(山东西王集团有限公 司)、 β -环糊精(国药集团化学试剂有限公 司)、可溶性淀粉(中国医药集团上海化学试剂公 司)和卵磷脂(国药集团化学试剂有限公 司)。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备包括 FISO 微波工作站(加拿大 FISO 技术公司)、FOT-L-SD 光纤温度传感器(加拿大 FISO 技术公司)、TH7700 NEC 红外测温仪(美国 NEC San-ei 仪器有限公 司)、NN-GD568M 松下微波炉(上海松下微波炉有限公 司)、DHG-9245A 型鼓风干燥箱(上海慧泰仪器制造有限公 司)、8010S 华林商业实验室搅拌机(康涅狄格州 Torrington 公 司)、H-S-G-IC-2 电热恒温水浴锅(上海华琦科学仪器有限公 司)、高频数控超声波清洗器(昆山市超声波仪器有限公 司)和高压均质机(上海东华)。

1.3 样品制备

红枣粉制备^[21-22]:原料→挑选→洗涤→65℃烘干表面→去核→打浆(加水量为枣肉质量的 7 倍)→酶解提取(加果胶酶量 0.14%,酶解温度 40℃,时间 40 min)→用超声波提取(超声波提取功率 100 W,时间 10 min)→添加助干剂(麦芽糊精为主助干剂,与红枣质量比为 6:4,大豆分离蛋白 2.5%, β -环糊精 15%,可溶性淀粉 15%,卵磷脂 3%)→均质→铺料→干燥→粉碎→红枣粉。

将红枣浆填放于直径 8.8 cm 的平皿中,物料厚度分别为 2、4、6 mm,平皿样品采用聚乙烯塑料薄膜密封覆盖,并放置于 20℃恒温箱内备用。

1.4 微波干燥

将恒温后的平皿样品分别置于微波炉转盘的中心位置,在所定的功率下(500、700、900 W)进行干燥处理,干燥过程中每隔 15 s 取出样品称

重,并用红外测温仪迅速摄得样品的温度呈像,直至干燥速率为零。

1.5 热风干燥

将恒温后的平皿样品分别置于风速恒定的鼓风干燥箱内,在特定温度下(100、110、120℃)进行热风干燥处理,干燥过程中每 10 min 取出样品称重,并用红外测温仪迅速摄得样品表面的温度呈像,直至干燥速率为零。

上述干燥处理实验中,各样品均平行测定 3 次,取其平均值,并绘制干燥曲线。

干燥速率公式如下:

$$u = (X_1 - X_2) / (t_1 - t_2) \quad (1)$$

式中: u 为干燥速率,每千克无水物料每秒蒸发的水量(kg/s); X_1 为物料干燥至 t_1 的含水率(%); X_2 为物料干燥至 t_2 的含水率(%); t_1 、 t_2 分别为时间(s)。

干基含水量公式如下:

$$X = (G_t - G_g) / G_g \quad (2)$$

式中: G_t 为物料干燥至任意时刻的质量(kg); G_g 为物料绝干质量(kg)。

1.6 色度的测定

用 5 mL 小烧杯装满红枣粉样品,尺子刮平,上面平铺一块透明薄膜,用色差仪测定其色度 L^* 、 a^* 、 b^* ,每种样品平行测定 3 次。同时测定枣肉的 L 、 a 、 b 值^[23]。

红枣果肉及红枣粉间总的(ΔE_c)颜色差的计算:

$$\Delta E_c = \sqrt{(L_0 - L_p)^2 + (a_0 - a_p)^2 + (b_0 - b_p)^2} \quad (3)$$

式中: ΔE_c 为红枣果肉及红枣粉间总的颜色差; L 为亮度或暗度(黑, $L=0$;白, $L=100$); a — $+a$ 为红色度, $-a$ 为绿色度; b — $+b$ 为黄色度, $-b$ 为蓝色度; L_0 、 a_0 、 b_0 分别为枣肉的 L 、 a 、 b 平均值, L_p 、 a_p 、 b_p 为枣粉的 L 、 a 、 b 的平均值。

1.7 吸湿性的测定

取样品 0.5 g 于 10 mL 小烧杯中,放入恒温恒湿箱中(相对湿度 79.5% ± 2%,20℃),每 15 分钟取出称量一次,直至连续两次重量差不超过 0.5% (约为 2.5 mg)^[24]。

$$H_g = \frac{\Delta m / M + M_i}{1 + \Delta m / M} \quad (4)$$

式中: H_g 为吸湿度; Δm 为枣粉增加的质量(g); M 为测试所用粉的质量(g); M_i 为最初粉的水分含量(%)。

1.8 单位能耗的计算

单位能耗是指去掉 1 kg 水所需要的热量 (kJ/kg), 其计算公式如下^[25]:

$$Q_s = \frac{t \times P \times 10^3}{m_w} \quad (5)$$

式中: Q_s 为单位能耗 (kJ/kg); t 为总干燥时间 (s); P 为微波功率 (W); m_w 为蒸发水的质量 (kg)。

当使用热风干燥时, P 为功率 2 450 W。

其中微波实际功率的测定使用 IMPI 两公升水测试方法^[26]:

使用两个 1 000 mL 烧杯, 水重 (2 000 ± 5) g, 初温 (20 ± 2) °C, 微波全额加热 2 min, 测量前后加热温度, 精度至 0.1 °C。

$$P = 70 \times [(\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2] \quad (6)$$

式中: ΔT_1 与 ΔT_2 分别为两烧杯水升温的度数, 3 个重复每次变异应于平均值 ± 5% 之内。根据实验所测, 微波炉功率为 500、700、900 W 时所对应的实际功率为 429、578、693 W。

1.9 干燥模型拟合及统计分析

物料干燥是一个复杂的传热传质过程。一般用以下 3 种数学干燥模型方程对物料干燥加以描述^[27], 分别是指数模型 (Lewis)、单项扩散模型 (HF: Hustrulid and Flikke) 和 Page 模型, 其表达式分别为:

指数模型 (Lewis):

$$MR = \exp(-kt) \quad (7)$$

单项扩散模型 (HF: Hustrulid and Flikke):

$$MR = A \exp(-kt) \quad (8)$$

Page 模型:

$$MR = \exp(-kt^y) \quad (9)$$

上述 3 种模型中 A 和 y 为常数, k 为干燥速率常数 (s^{-1}); 水分比 $MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e)$, 式中 M_0 为初始水分, M_t 为 t 时的水分, M_e 为平衡含水量, t 为时间。

用软件 Origin 8.0 进行数值分析。调整后的相关系数 Adj. R^2 (Adjusted R-Square), 卡方 χ^2 (reduced chi-square) 和残基平方和 RSS (residual sum of squares) 用来衡量实验数据与模型的相关程度。

2 结果与讨论

2.1 微波薄层干燥特性分析

红枣浆铺料厚度为 2 mm 时, 在不同微波功

率 500、700、900 W 下的干燥曲线如图 1 所示。薄层厚度 2、4、6 mm 的物料在微波功率为 500 W 时的干燥速率曲线如图 2 所示。红枣浆的微波干燥前期是短暂的升速阶段, 之后微波干燥一直处于降速干燥阶段。整个干燥过程所需的时间分别为 675 s (500 W/2mm)、630 s (700 W/2mm)、585 s (900 W/2mm)、870 s (500 W/4mm)、1 140 s (500 W/6mm)。在干燥阶段开始, 不同微波干燥条件下, 干燥速率随着时间增加。这是因为当偶极子数量达到一定时, 会有较高的能量吸收。随着这些能量的吸收, 产生热量, 这些热量可以增加样品的温度进而使温度达到水的沸点。因此在这个阶段, 主要是通过蒸发传质^[28]。干燥速率的最大值是 2.022×10^{-2} kg/s (900 W/2mm), 随后是降速阶段。微波干燥其他材料时,

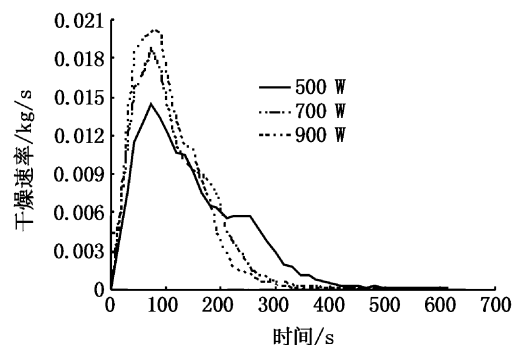


图 1 微波干燥条件下红枣浆的干燥速率曲线 ($h = 2$ mm)

Fig. 1 Drying rate of CDP during microwave drying ($h = 2$ mm)

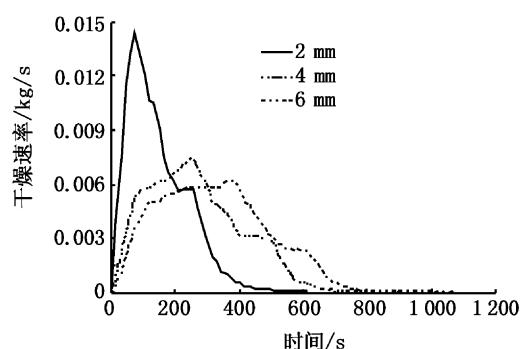


图 2 微波干燥条件下红枣浆的干燥速率曲线 ($P = 500$ W)

Fig. 2 Drying rate of CDP during microwave drying ($P = 500$ W)

也发现缺少恒速干燥阶段^[29]。在相同的升速时间内, 微波功率越大, 铺料厚度越小, 干燥速率越大, 干燥时间越短。这是由于在较高的微波功

率、较小的铺料厚度下,物料内部水分的传质速度较快。干燥后期,随着水分含量降低,样品的干燥速率降低,这是由于吸收的微波能量降低和介电损失率的下降。另一方面,虽然结合水的迁移需要比自由水更高的能量,然而吸收的能量仍然可使水分向外部迁移,使样品的温度继续升高,因此在最后的阶段,可能会有热点产生^[28]。

物料厚度为 2 mm 时不同微波功率下的红枣浆的升温曲线和微波功率为 500 W 时不同铺料厚度下红枣浆的温度随时间的变化分别如图 3、4 所示。红枣浆在微波干燥过程中的温度变化主要分 3 个阶段:加热初期升温、等温以及后期升温阶段。如图 3 所示,相同的铺料厚度下,微波干燥功率越大,升温越快。这是由于初期阶段的极性水分子含量比较高,较大的微波功率对物料进行干燥时,通过极化会产生更多的热量,导致温度升高速度更快^[30]。如图 4 所示,铺料厚度小的物料比铺料厚度大的物料温度上升略快。这主要是由于物料整体水分含量少,物料温度上升较快。当物料中的自由水分基本挥发,微波干燥进入减速阶段,此时的物料分子和水分子的结合力较强,必须提高温度才能使其分离,这时物料温度会有明显上升趋势,且水分越少,上升速度越快。如图 3 所示,物料的平均温度基本都是从 20 °C 上升到 105 °C,物料的温度不会无限制的随微波干燥的进行而增加,在其水分含量处于极低水平的条件下,其中的水分子吸收微波的能力下降,温度不会继续升高,并且微波干燥时间过长,温度过高,会产生变色、焦糊等现象,使产品的感官品质下降。

2.2 微波干燥模型

微波干燥的模型如式(7)~(9),把干燥试验的干基含水率转换成水分比 MR,用 Origin 8.0 软件对上述的 3 个模型进行非线性回归如表 1。在不同的微波功率和铺料厚度下,3 个模型的常数及其拟合检验指标 R^2 、 χ^2 和 RSS 分列于表 1。Adj. R^2 越高, χ^2 和 RSS 越低表明相关性越好。除了 Lewis 模型,所有条件下,Adj. R^2 均大于 0.964 3, χ^2 均小于 0.040 1,RSS 均小于 0.222 8。其中,Page 模型的 Adj. R^2 大于 0.999 5,相应的 χ^2 、RSS 分别小于 0.5×10^{-3} 、 2.7×10^{-3} ,与实验数据的拟合度最高。通过此方程可以较准确的预测在不同微波功率、铺料厚度下,干燥过程中

不同时刻的水分比和干燥速率。

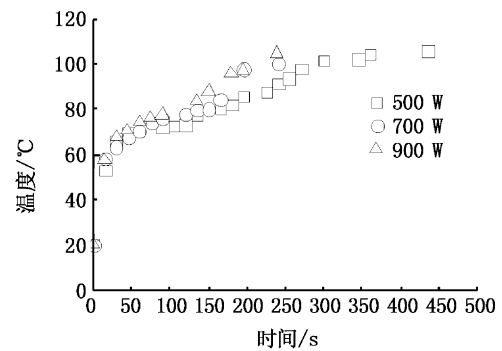


图 3 微波干燥条件红枣浆的温度变化曲线 (h = 2 mm)

Fig. 3 Temperature profiles of CDP during microwave drying (h = 2 mm)

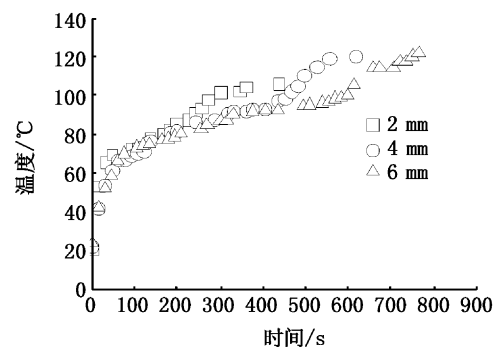


图 4 微波干燥条件下红枣浆的温度变化曲线 (P = 500 W)

Fig. 4 Temperature profiles of CDP during microwave drying (P = 500 W)

2.3 热风干燥与微波干燥特性对比

图 5 为铺料厚度为 4 mm 的红枣浆样品在热风温度最大为 120 °C 和微波功率最小为 500 W 干燥条件下的温度随时间的变化曲线。500 W 微波干燥所需时间仅需 600 s,120 °C 热风干燥所需时间为 21 600 s,前者所需时间仅为后者的 2.8%。如图 5 所示,在 3 000 s 内,120 °C 热风干燥红枣浆样品一直处于升温阶段,升温缓慢。红枣浆样品温度达到 90 °C 时,500 W 微波干燥条件下所需时间是 240 s,120 °C 热风干燥条件下所需时间是 2 400 s,所需时间为前者的 10 倍。热风干燥是通过热空气为传热媒介,加热物料,蒸发水分,同时去除物料表面水分的一种干燥方法^[31]。微波干燥样品的温度变化比热风的温度变化明显。这主要是由微波内外一起加热的干燥机理与热风干燥本身的传热与传质方向相反的特点共同决定的^[29]。

表 1 红枣浆样品的微波干燥模型拟合结果

Tab. 1 Model fitting results of CDP sample under microwave drying

模型	厚度/mm	功率/W	模型参数		R^2	$\chi^2 (10^{-1})$	RSS	
HF	2	500	$K(10^{-1})$		0.981 9	0.018 0	0.072 0	
			A					
			0.076 1	1.140 2				
	700	0.098 5		1.142 7	0.980 6	0.016 7	0.071 8	
		0.110 3		1.152 7	0.976 2	0.020 7	0.082 9	
		0.042 0		1.195 6	0.957 8	0.050 5	0.267 9	
	4	500	0.055 6		1.195 6	0.962 0	0.042 4	0.228 8
			0.068 4		1.206 3	0.960 5	0.043 9	0.210 9
			0.035 1		1.223 2	0.951 2	0.060 0	0.432 1
	6	700	0.044 5		1.220 9	0.954 3	0.054 3	0.347 8
			0.055 3		1.217 1	0.953 8	0.054 8	0.290 7
			$K(10^{-1})$		y	0.967 7	0.032 2	0.132 0
2	500	0.067 7						
		0.087 7		0.967 6				
		0.097 6		0.961 6	0.033 4	0.136 9		
Lewis	4	500	0.035 8		0.928 0	0.086 2	0.465 6	
			0.047 8		0.937 0	0.070 3	0.386 8	
			0.058 5		0.934 1	0.073 3	0.359 3	
	6	500	0.029 5		0.917 2	0.101 8	0.743 0	
			0.037 6		0.923 0	0.091 4	0.594 4	
			0.046 9		0.923 9	0.090 3	0.487 7	
Page	2	500	0.005 8		0.999 4	0.000 6	0.002 3	
			0.005 7		1.475 9	0.999 5	0.000 4	0.001 9
			0.004 1		1.665 3	0.999 2	0.000 7	0.002 8
	4	500	0.000 3		1.833 2	0.996 1	0.000 5	0.001 5
			0.000 6		1.809 1	0.999 7	0.000 4	0.001 9
			0.000 5		1.893 2	0.999 9	0.000 1	0.000 7
	6	500	0.000 1		1.914 9	0.999 4	0.000 8	0.005 4
			0.000 2		1.917 5	0.999 4	0.000 7	0.004 5
			0.000 3		1.940 2	0.999 5	0.000 6	0.003 3

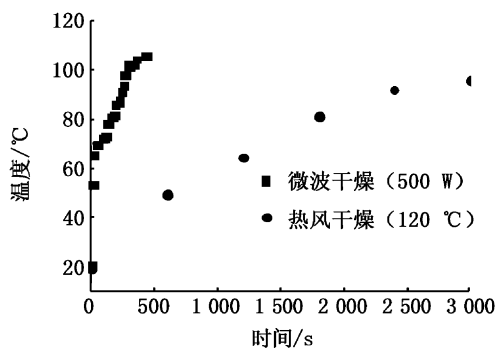


图 5 红枣浆的微波干燥(500 W)与热风干燥(120 °C)的温度曲线(h=4 mm)

Fig. 5 Temperature profiles of CDP (h=4 mm) during hot air (120 °C) and microwave drying (500 W)

红枣浆的热风干燥也分为升速、降速两个阶段。升速时间相对于整个干燥过程较短,物料吸收热量主要用于升温蒸发。随后,物料内部水分

逐渐减少,内部扩散速率降低,导致热风干燥速率随着物料湿度的不断减小而降低。当物料表面全部干皮后,汽化表面深入内层,干燥速率迅速下降,直至为零。

铺料厚度为 4 mm 样品的微波和热风干燥条件下的物理特性对比分析如表 2 所示。在两种干燥方式下,干燥速率有显著差异。热风干燥样品的最大干燥速率在 600 ~ 1 800 s 达到,分别为 0.63×10^{-3} (100 °C)、 0.82×10^{-3} (110 °C)、 0.85×10^{-3} (120 °C) kg/s,整个干燥过程持续时间为 420、390、360 min。微波干燥的最大干燥速率分别在 255 s (500 W)、180 s (700 W)、135 s (900 W) 达到,最大干燥速率分别为 7.46×10^{-3} 、 10.95×10^{-3} 、 14.34×10^{-3} kg/s,其最大干燥速率为热风干燥的 9 ~ 23 倍。整个干燥过程持续时间分别为 14.50、13.75、13.00 min。干燥时间仅为热风干燥样品的 3% ~ 4%。同热风干

燥相比,由微波能量的有效吸收,微波的穿透能力和水分的扩散能力等因素所致^[32],微波干燥红枣浆能够极大地缩短干燥时间。红枣粉的吸湿性随微波功率和热风温度的升高而降低。这是因为在较低的温度条件下,热通量较小,物料的界面温度和表面温度都较低,使内部水分缓慢逸出,较大的保持了物料固有的结构,使干制品的结构均匀,易于外界水分进入,这就增加了吸湿性。温度升高,传导热增加,物料界面温度上升,提高了传质推动力,水蒸气的逸出速度加快。过高的加热温度,使部分物料在升华阶段断裂崩塌,内部结构变化,吸湿率降低,吸湿性就差^[33]。微波干燥过程的平均干燥温度高于热风干燥,这是前者的吸湿性低于后者的原因。铺料厚度为4 mm时,两种干燥条件下制备的红枣粉吸湿性越

好,其色差越小。这是因为干制品的感官质量与吸湿性有一定的关系^[33],一般来说,感官质量越好,吸湿性越好。对于单位能耗,微波干燥条件下功率越大,单位能耗越大;热风干燥条件下,热风温度越大,单位能耗越小。如表2所示,微波干燥单位能耗远远小于热风干燥单位能耗,平均能耗仅约为后者的0.65%,即后者需要的干燥能耗高达前者的153倍。这是因为热风干燥有较长时间的排风和加热,所以能耗很高,操作成本大。可见使用微波干燥提高了干燥速率,节约了干燥时间和干燥能耗,但是热风干燥较好的保持了物料的固有结果,红枣粉吸湿性较好,色差较小,因此要综合考虑能耗和吸湿性等质量指标来决定干燥条件。

表2 微波和热风干燥枣粉的物理特性

干燥方式	厚度/mm	条件 (W/°C)	干燥时间 /min	最大干燥速率 /(10 ⁻³ kg/s)	颜色参数				吸湿性(10 ⁻²)	能耗(10 ⁴ kJ/kg)	
					L	a	b	ΔE			
微波干燥	2	500	11.25	14.41	45.5	8.51	18.97	4.24	8.86	3.50	
		700	10.50	18.75	43.46	8.80	18.37	6.21	8.68	4.40	
		900	9.75	20.22	47.83	7.13	18.51	3.75	6.84	4.90	
	4	500	14.50	7.46	49.67	8.35	19.37	2.09	8.80	2.30	
		700	13.75	10.95	47.85	7.97	19.98	2.45	8.52	3.00	
		900	13.00	14.34	46.57	9.32	19.82	2.76	7.33	3.40	
	6	500	19.00	5.95	33.97	9.22	15.00	16.18	10.13	2.20	
		700	16.75	8.25	33.52	9.47	14.9	16.63	9.99	2.60	
		900	13.75	11.15	45.34	8.96	18.44	4.48	7.82	2.60	
	热风干燥	2	100	340	1.27	41.49	9.89	17.98	8.08	12.28	600
			110	310	1.32	38.09	9.72	15.73	12.07	11.54	5 500
			120	280	1.61	41.41	10.55	19.17	7.88	10.24	4 900
4		100	420	0.63	51.08	9.04	22.61	2.95	12.43	6 500	
		110	390	0.82	45.7	10.54	21.18	3.54	10.58	3 500	
		120	360	0.85	40.62	10.21	18.77	8.72	10.40	3 300	
6		100	460	0.48	49.64	8.74	20.60	1.32	11.87	6 300	
		110	430	0.56	45.33	8.87	19.80	4.04	10.48	2 800	
		120	400	0.60	44.15	9.15	19.07	5.28	9.15	2 600	

3 结论

本研究考察了微波干燥红枣浆的干燥特性,并与传统热风干燥进行了对比分析。研究表明:微波干燥主要分为升速、降速阶段,没有明显的恒速阶段;微波功率、铺料厚度对红枣浆的干燥速率、升温特性影响明显。Page模型可以对红枣浆的微波薄层干燥过程进行较好的拟合,通过该模型可以对微波干燥条件下的不同时间的红枣浆样品的水分含量等进行预测,同时也可以对特

定水分含量下的干燥时间进行预测。同热风干燥相比,微波干燥升温快,加热初期干燥速率快,所需干燥时间远远少于热风干燥。尤其是所需干燥能耗远远低于热风干燥,但是热风干燥较好的保持了物料的固有结构,红枣粉吸湿性较好,色差一般也较小。因此综合考察时间、能耗及吸湿性等指标,考虑采用微波与热风联合干燥的方法制备红枣粉。本研究的结果为微波、热风联合干燥红枣粉提供了基础数据和理论依据。

参考文献:

- [1] 杨永祥,陈锦屏,吴曼. 红枣营养保健价值及其加工利用的研究进展[J]. 农产品加工,2009(1):52-56.
- [2] 黄碧光,刘思衡. 麦苗的营养保健价值及其开发利用[J]. 食品研究与开发,2001,22(5):40-42.
- [3] OSAWA T, KATSUZAKI H. A novel antioxidant isolated from young green barley leaves[J]. Agriculture Food Chemistry, 1992,40(7):1135-1138.
- [4] 孙灵霞,张秋会,陈锦屏. 红枣的营养保健及其综合利用[J]. 农产品加工,2008(4):55-61.
- [5] 吕丽爽. 微波干燥技术在食品中的应用[J]. 食品与机械, 2006,22(5):119-122.
- [6] 周旺,程裕东,张云蓉. 辣椒粉的微波干燥特性研究[J]. 食品科学,2009,30(19):65-69.
- [7] 伊长文,王晶. 热风干燥和微波干燥生产草莓粉工艺比较研究[J]. 安徽工程科技学院学报:自然科学版,2008(4):16-19.
- [8] 王常青. 马铃薯颗粒全粉的微波干燥工艺的研究[J]. 食品科学,2005,26(7):133-136.
- [9] 孔庆新,祝冬青. 微波干燥法生产南瓜粉的研究[J]. 食品工业科技,2006,27(9):150-152.
- [10] 曹艳,程裕东. 鲢、狭鳊鱼糜微波加热凝胶形成的动力学分析[J]. 水产学报,2005,29(4):547-551.
- [11] 刘世雄,李卓思,程裕东. 2450 MHz 频率微波加热条件下番茄汁杀菌特性的研究[J]. 食品科学,2008,29(9):249-253.
- [12] 黄燕,程裕东,梁凯. 微波、热风干燥对橙皮干燥特性及其品质影响的比较[J]. 食品科学,2009,30(21):16-20.
- [13] 王伊,程裕东,金银哲. 鲢鱼糜与淀粉复合系统的微波糊化特性[J]. 水产学报,2012,36(7):1140-1145.
- [14] ZHANG Z, TIAN S, ZHU Z, et al. Effects of 1-methylcyclopropene(1-MCP) on ripening and resistance of Jujube (*Zizyphus jujuba* cv. *Huping*) fruit against postharvest disease[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012,45:13-19.
- [15] LI H, LI F, WANG L, et al. Effect of nano-packing on preservation quality of Chinese Jujube (*Zizyphus Jujuba* Mill. Var. *inermis* (Bunge) Rehd)[J]. Food Chemistry, 2009, 114:547-552.
- [16] ZHU Z, ZHANG Z, QIN G, et al. Effects of Brassinosteroids on Postharvest Disease and Senescence of Jujube Fruit in Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010,56:50-55.
- [17] MA F, KANG S, LI F, et al. Effect of water deficit in different growth stages on stem sap flux of greenhouse grown pear-jujube tree[J]. Agricultural Water Management. 2007, 90:190-196.
- [18] 牛智有,谭鹤群,宗力. 红枣干燥特性的试验研究[J]. 食品与机械,1998(4):18-20.
- [19] 杨芙莲,聂小伟. 微波干燥红枣浆生产红枣粉助干剂的研究[J]. 食品科技,2011,36(1):59-63.
- [20] 杨芙莲,聂小伟. 微波干燥红枣粉助干剂的研究[J]. 食品科技,2010,35(12):116-120.
- [21] 杜双奎,于修焯,李志西,等. 红枣酶法提汁工艺条件响应面分析[J]. 农业机械学报,2007,38(3):191-193.
- [22] 张宝善,陈锦屏,李强,等. 红枣汁的提取方法[J]. 食品与发酵工业,2003,29(12):67-71.
- [23] SHYAM S S, ASHOK K S. A new method of producing date powder granules: physicochemical characteristics of powder[J]. Journal of Food Engineering,2008,87(3):416-421.
- [24] JAYA S, DAS H. Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties[J]. Journal of Food Engineering,2004,63(2):125-134.
- [25] SOYSAL Y, ÖZTEKIN S, EREN Ö. Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects [J]. Biosystems Engineering,2006,93(4):403-413.
- [26] 黄养元. 家用微波炉输出功率的测量过程[J]. 真空电子技术,1989,5(10):182,122.
- [27] 牛智有,赵思明,姜开明. 苹果渣干燥特性与模型的试验研究[J]. 农机化研究,2008(6):134-137.
- [28] THERDTHAI N, ZHOU W. Characterization of Microwave Vacuum Drying and Hot Air Drying of Mint Leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen) [J]. Journal of Food Engineering, 2009,91(3):482-489.
- [29] SANDER A. Thin-layer Drying of Porous Materials; Selection of The Appropriate Mathematical Model and Relationships between Thin-layer Models Parameters [J]. Chemical Engineering and Processing,2007,46:1324-1331.
- [30] ARIMI JM, DUGGAN E, O' RIORDAN E D, et al. Microwave expansion of imitation cheese containing resistant starch [J]. Journal of Food Engineering,2008,88(2):254-262.
- [31] 刘志军. 间歇和连续微波干燥对木材内蒸汽压力与温度变化的影响[J]. 林业科学,2008,44(7):68-72.
- [32] KLOPEZ A, IGUAZ A, ESNOZ A, et al. Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market [J]. Drying Technology,2000,18(4):995-1006.
- [33] 李瑞杰,张慧. 不同干燥方式对胡萝卜片吸湿性及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2010,29(3):342-349.

Study of microwave drying characteristics of China date paste powder

LIU Juan-juan, CHENG Yu-dong, JIN Yin-zhe

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The drying properties of China date paste (CDP) during its processing to powder under microwave were investigated. Microwaves of 500, 700, and 900 W at 2 450 MHz were used for drying CDP samples with spreading thickness of 2, 4, and 6 mm, respectively. Hot-air of 100, 110 and 120 °C were also conducted for drying the samples for comparison. Three kinds of drying models of exponential model (Lewis), Individual diffusion model (HF: Hustrulid and Flikke) and Page model were used in the fitting of MR of the CDP samples. The results indicated the temperature of CDP dried by microwave rose faster, which could increase drying rate and save drying time and energy. But the hot air drying had a better structure and hygroscopicity and smaller color difference. Page model shows the best fitting in drying process of CDP samples during hot-air and microwave drying.

Key words: China date paste; microwave drying; hot-air drying; drying rate; drying model