研究论文

土豆片脉冲喷动微波负压干燥特性及品质

范乐明[1]，张丽萍[*1]，张 憨[2]，王玉川[2]
（1. 江南大学 化工学院，江苏 无锡 214122；2. 食品科学与技术国家重点实验室，江南大学，江苏 无锡 214122）

摘要：在干燥腔内真空压力范围为 11.8~15.0 kPa 的条件下，研究微波功率、脉冲喷动频率、预处理及不同组合方式对脉冲喷动微波负压干燥(PSMVD)土豆片的干燥特性及色泽、质构、均匀性等品质的影响。结果表明：Midilli 传质薄片模型优于其它三个模型；未漂烫处理及提高微波功率可以增加土豆片在干燥过程中水分扩散系数 D_{eff}，从而缩短土豆片脉冲喷动微波负压干燥时间。与传统的干燥相比，脉冲喷动微波负压干燥具有干燥周期短、产品干燥均匀性及品质较好等优点。

关键词：微波负压干燥；脉冲喷动；土豆片
中图分类号：S 375　**文献标志码**：A　**文章编号**：1673—1689(2013)11—1176—07

Characteristics and Technology of Potato Slices by Pulse-Spouted Microwave Vacuum Drying

FAN Le-ming[1]，*ZHANG Li-ping*[*1]，*ZAHNG Min*[2]，*WANG Yu-chuan*[2]
(1. School of Chemical and Materials Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: This paper investigated the model, color and texture of potato slices dried by pulse-spouted microwave vacuum drying (PSMVD) at the pressure range of 11.8~15.0 kPa using different microwave power, pulse frequency and pretreated methods. The results showed that the Midilli's model is superior to other models. The diffusion coefficient of potato slices increased when the microwave power increased, but the drying time for blanched potatoes was much longer. Compared with conventional microwave vacuum drying, PSMVD exhibited a shorter drying time, more uniformity, better color and higher quality.

Keywords: microwave-vacuum drying, pulse-spouted, potato slices

土豆又名马铃薯、山药蛋、洋番薯等，土豆中含有丰富的淀粉、蛋白质、铁、维生素等，其营养价值十分丰富，具有多种食疗保健作用。我国种植土豆面积广、产量大、能在各种土壤和气候条件下生长，因此在全国各地均有种植[1]。

微波真空干燥是在真空条件下利用微波能进

收稿日期：2012-10-25
基金项目：国家 863 计划项目(2011AA100802)。
* 通信作者：张丽萍(1976—)，女，河南三门峡人，理学博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事农产品的贮藏与加工方面的研究。
E-mail：zlp@jiangnan.edu.cn

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行物料的干燥加工，它利用微波穿透力强，使物料内外同时升温形成整体加热，缩短了干燥时间，同时在真空环境下水分子迅速扩散至物料的表面，进而加快了蒸发。与此同时，真空环境降低了物料表面水蒸气的浓度和产品内部水的沸点，使物料内部和外部的压力差增大而使水分能在较低温度下快速蒸发，因而物料能在较低的温度条件下进行干燥，可防止物料的氧化反应[2-3]。因此，干后产品的风味、颜色以及质构有所提高，真空干燥技术尤其适用于干燥高糖的水果和高值的蔬菜[4]。

传统微波真空干燥存在产品在加热过程中不均匀现象，易出现冷、热点现象，影响产品干燥品质。为了克服微波真空干燥不均匀性，脉冲喷动微波负压干燥方法通过周期性的真空压力变化，带动物料颗粒周期性喷动，从而提高了物料干燥的均匀性，避免了产品由于局部温度过高而造成的烧焦现象，从而提高干后产品的品质，同时也相应地提高干燥速率以及降低有效能耗。

1 材料与方法

1.1 试验材料

土豆：购自无锡市雪浪镇农贸市场，成熟度和大小基本一致，无腐烂变质现象，贮藏于 2 ℃的冰箱，在使用前置于空气中 2 h。

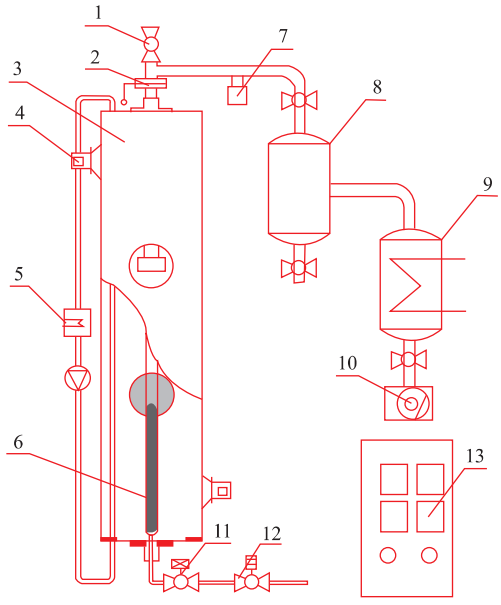
1.2 仪器设备

脉冲喷动微波负压干燥装置见图 1。FA-1104 电子天平：上海天平仪器厂；CR-400/410 色差计：日本柯尼卡美能达中国有限公司；TA-XT2i 质构仪：北京微讯超技仪器技术有限公司；红外热成像仪 IRI4010：英国 IRISYS 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 制作工艺 工艺流程：土豆→清洗→去皮→切片（直径 14 mm，厚度（5±0.5）mm）→护色（1 g/dL 氯化钠溶液）→ 预处理（100 ℃水中漂烫 3 min，未漂烫土豆片作为对照样）→ 脉冲喷动微波负压干燥。选择水分均匀一致的土豆切片 150 g 放入脉冲喷动微波负压干燥设备内进行干燥。

1.3.2 试验方法 每批土豆片干燥前，去除土豆片表面附着水分，按照 GB 5009.3—2010 分别测定土豆片漂烫前后的初始水分质量分数为 4%~5%。在干燥腔内真空压力为 11.8~15.0 kPa，不同微波功率（2.29、3.44、4.59 W/g）和脉冲频率（3.75、5、7.5 次/min）组合条件下，将土豆切片干燥到含水率约为 0.01 g/(g 干基)，每 10 分钟测定物料含水率。每个处理重复 3 次，取其平均值，绘制干燥曲线及建立模型。



1. 进料阀门；2. 挡板阀（阀板孔径为 3 mm）；3. 微波加热腔；4. 微波源（×4）；5. 水负载；6. 真空干燥管；7. CPCA-140Z 压力传感器；8. 气固分离器；9. 冷却器；10. 真空泵；11. 电磁阀；12. 气体流量调节阀；13. 控制面板。

图 1 微波真空间歇喷动干燥装置图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse-spouted microwave vacuum drying system

1.3.3 传质的数学模型 许多学者对薄层干燥模型通过经验和半经验研究，得出一些常用的薄层干燥模型，见表 1。

表 1 薄层物料经验和半经验干燥模型

Table 1 Mathematical models simulating the drying process of the potatos

序号	名称	模型方程
1	Page 模型（Page, 1949）	$MR=\exp(-kt^n)$
2	Henderson 模型（Henderson and Pabis, 1961）	$MR=k\exp(-ct)$
3	近似扩散模型（Yaldiz and Ertekin, 2001）	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-bkt)$
4	Midilli 模型（Midilli et al., 2002）	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$

物料的水分扩散系数是表示物料在特定的干

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

燥条件下的脱水能力。从表 1 可以看出:水分在降速干燥阶段,水分传递能力是受内部扩散的控制而外部的传质阻力可忽略不计,因此物料内部水分的扩散系数是传质模型中最主要参数。

1975 年,Crank 等人提出了传质扩散模型,如下:

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}\exp\left(-\frac{(2n-1)^2\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\cdot t\right)$$

2002 年,Kaymak-Ertekin 等人经过一系列的简化得到与 Henderson and Pabis (Henderson and Pabis,1961)相类似模型,即:

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\exp\left(\frac{\pi^2\cdot D_{eff}}{4L^2}\cdot t\right)=k\exp(-c\cdot t)$$

$$\ln MR=\ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right)-\frac{\pi^2\cdot D_{eff}}{4L^2}\cdot t$$

因此得:$D_{eff}=\frac{4L^2\cdot c}{4\pi^2}$

模型最优的数学统计参数:

$$R^2=1-\frac{\sum_{1}^{n}(MR_{exp,i}-MR_{pred,i})^2}{\sum_{1}^{n}(MR_{ave}-MR_{exp,i})^2}$$

$$X^2=\frac{\sum_{1}^{n}(MR_{exp,i}-MR_{pred,i})^2}{n-z}$$

$$RMSE=\left[\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(MR_{exp,i}-MR_{exp,i})\right]^{1/2}$$

式中:R^2 为相关系数;X^2 为简化的卡方检定;RMSE 为均方根差;MR 为样本含水量;n 为实验次数;L 为薄片厚度一半;z 为模型参数。

1.3.4 *色差检测* 产品色泽的测定利用 CR-400/410 色差计进行,产品的颜色变化使用 L^*(亮暗度)、a^*(红绿度)和 b^*(黄蓝度)参数表示。颜色差异 ΔE 由以下公式计算获得:

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L^*_0)^2+(a^*-a^*_0)^2+(b^*-b^*_0)^2}$$

L^*_0,a^*_0 和 b^*_0 为土豆片干燥前的色泽值。

1.3.5 *质构检测* 干燥土豆产品的质构特性采用 TA-XT2i 型质构仪进行测定。该质构仪校正使用 1 kg 的质量元件,测量探头选用 P5 型。参数设定:测试前速度 5 mm/s,测试中速度 1 mm/s,测试后速度 1 mm/s,压缩比 60%。在每次测量条件下,12 次测量的平均值作为样品的平均硬度值。

2 结果与讨论

2.1 漂烫处理对土豆片脉冲喷动微波负压干燥特性的影响

图 2 和图 3 显示了不同的漂烫处理对土豆片含水率及干燥速率的影响。对于漂烫处理的土豆片在干燥初期脉冲喷动微波负压速率低于生鲜土豆片,这可能是由于漂烫使酶活性失活,促进了细胞内的空气到达表面,改变了土豆片的内部结构[5-6];而在干燥后期,漂烫处理的土豆片干燥速率大于新鲜土豆,这可能是在后期,在同时间内漂烫处理土豆的含水量大于新鲜土豆,漂烫的土豆介电常数较大,进而吸收的能量越大。随着含水率的减少,标准偏差也随之减小[7],土豆的介电常数减小而导致水分吸收微波能减小[8],因此随着水分质量分数的减小,脉冲喷动微波负压干燥速率降低。

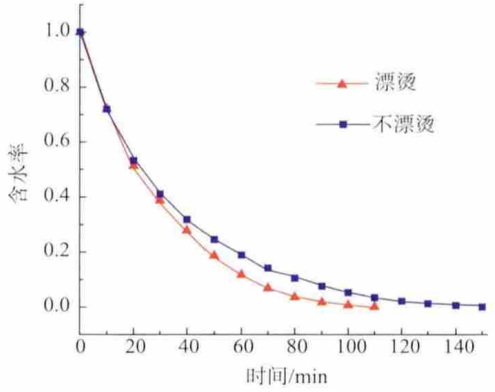


图 2 喷动频率 5 次/min 及微波功率 2.29 W/g 时漂烫与未漂烫土豆片干燥过程中含水率的变化

Fig. 2 Effect of Blanch and no Blanch on changes in moisture content during drying at 2.29 W/g and pulse-spouted frequency of 5 times /min

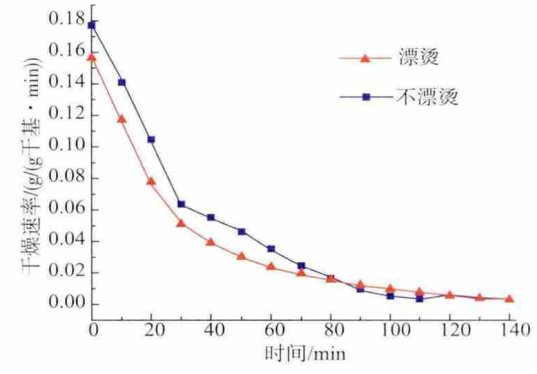


图 3 喷动频率5 次/min 及微波功率 2.29 W/g 时漂烫对干燥速率的影响

Fig. 3 Effect of Blanch and no Blanch on drying rates of potato slices at 2.29 W/g and pulse -spouted frequency of 5 times/min

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 微波功率对土豆片脉冲喷动微波负压干燥特性的影响

图 4 和图 5 显示了不同的微波功率对土豆片水分质量分数及干燥速率的影响。在干燥初期，微波功率越大，脉冲喷动微波负压干燥速率越快，而干燥 40 min 后干燥速率 V(2.29 W/g)>V(3.44 W/g)>V(4.59 W/g)，这可能是在后期，在同时间内干燥功率小的土豆片的含水量大，进而吸收的能量越大，与相比干燥功率更大的土豆片，其脉冲喷动微波负压干燥速率更快。

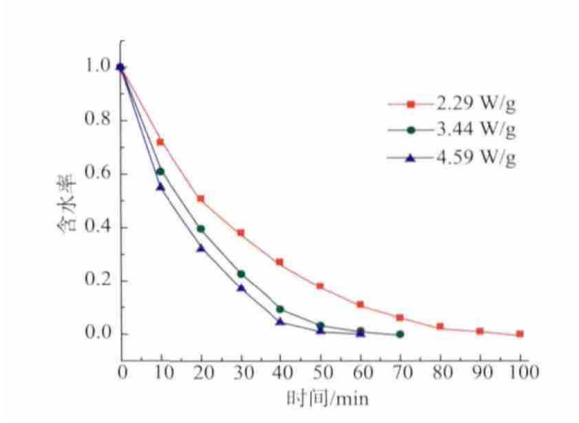


图 4 喷动频率 5 次/min 时微波功率对未漂烫土豆片水分质量分数变化的影响

Fig. 4 Effect of microwave power on changes in moisture content of raw potato slices during drying at 2.29、3.44、4.59 W/g

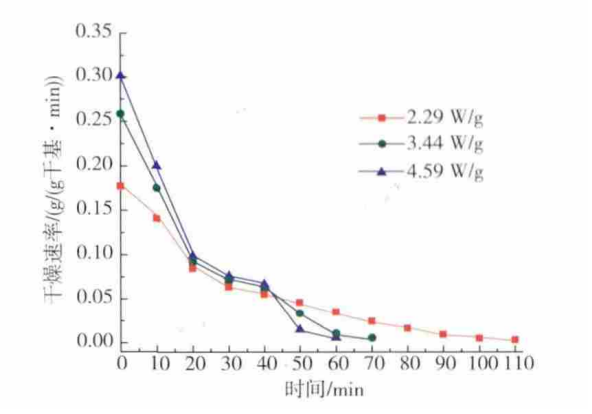


图 5 喷动频率 5 次/min 及微波功率对未漂烫土豆片干燥速率的影响

Fig. 5 Effect of microwave power on drying rates of raw potato slices at 2.29、3.44、4.59 W/g

在干燥过程水分含量变化的几个薄层模型，数据通过 oringin 8.0 进行非线性拟合，见表 2。Midilli (Midilli et al.，2002) 模型，R^2 (0.993 8–0.999 8)最大、RSEM(0.000 201–0.004 99)和 X^2(1.679 11×10^{-5}–7.770 59×10^{-4})最小。R^2 越接近 1，X^2 和 RMSE 越小，表明模型拟合度越高[9]，因此Midilli 模型优于其它三个模型。未漂烫土豆脉冲喷动微波负压干燥 D_{eff} 为 1.242 36×10^{-7}~1.898 64×10^{-7} m^2/s，漂烫土豆脉冲喷动微波负压干燥 D_{eff} 为 1.041 12×10^{-7}~1.196 64×10^{-7} m^2/s。微波功率增加、土豆片的扩散系数 D_{eff} 增大；相比 Hassini[10]微波干燥土豆 D_{eff} 为 0.355×10^{-9}~1.92×10^{-9} m^2/s，Doymaz[11]热风干燥胡萝卜 D_{eff} 为 0.776×10^{-10}~9.335×10^{-10} m^2/s，Marek [12] 热风喷动干燥大麦 D_{eff} 为 1.39×10^{-11}~3.94×10^{-11} m^2/s，Hashemi[13]微波喷动干燥大豆 D_{eff} 为 1.27×10^{-9}~6.48×10^{-9} m^2/s，其脉冲喷动微波负压干燥扩散系数 D_{eff} 大，干燥速率快，但总体干燥未漂烫处理的土豆耗时短，这与 Joanna[14]等人在真空干燥土豆块得到一致的结论。

2.3 脉冲喷动频率对土豆片微波负压干燥特性的影响

图 6 为喷动频率对微波负压干燥速率的影响，表明了随着喷动频率增大，脉冲喷动微波负压干燥速率 V(3.75 次/min)<V(5 次/min)，这可能是脉冲喷动加快，土豆片较为均匀的搅动有利于水分的传质过程，进而干燥速率加快。频率为 5 次/min 时干燥速率最快，干燥速率 V(7.5 次/min)<V(5 次/min)，可能是由于脉冲的气体为常温的空气，频率过快导致大量的常温空气与热土豆接触，从而降低了土豆的表面温度影响水分的蒸发，进而相对于脉冲频率为 5 次/min 时的脉冲喷动微波负压干燥速率有所降低。

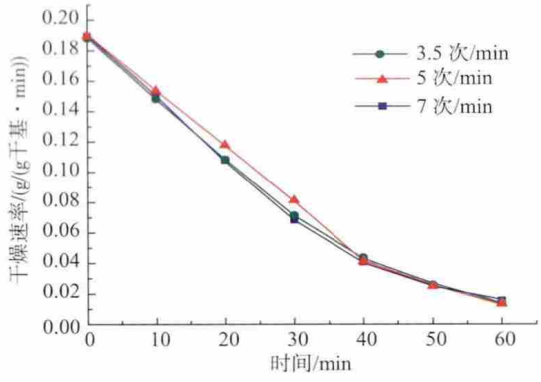


图 6 微波功率为 3.44 W/g 时脉冲喷动频率对干燥速率的影响

Fig. 6 Effect of pulse-spouted frequency on drying rates of raw potato slices at 3.44 W/g

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 四个模型的模型参数及偏差的分析

Table 2 Results of model constants and error analysis of the fitting to the four drying models

序号	微波功率/(W/g)	参数	参数	参数	R^2	X^2	RMSE
1	2.29	k=0.024 58±0.003 51	n=1.090 45±0.039 61		0.997 05	3.061 22×10^{-4}	0.003 06
2		k=1.012 82±0.019 38	c=0.034 51±0.001 11		0.995 19	4.987 9×10^{-4}	0.004 99
3		a=1.185 55±0.472 57	b=0.354 52±0.644 24	k=0.027 9±0.005 33	0.999 13	9.025 3×10^{-5}	0.000 81
4		k=0.997 57±0.011 12	c=0.030 5±0.003 09	b=−0.000 375±0.000 1	0.995 19	4.987 9×10^{-4}	0.004 99
		n=1.011 95±0.036 8					
1*		k=0.035 28±0.002 7	n=0.951 71±0.020 13		0.998 48	1.263 27×10^{-4}	0.001 01
2*		k=0.983 52±0.010 32	c=0.028 92±0.000 049		0.998 18	1.547 52×10^{-4}	0.002 17
3*		a=0.053 59±0.026 47	b=0.083 52±0.241 46	k=0.333 65±0.970 45	0.998 82	1.007 18×10^{-4}	0.001 31
4*		k=0.999 61±0.004 05	c=0.042 09±0.001 66	b=−2.078 47±0.000 022	0.999 8	1.679 11×10^{-5}	0.000 201
		n=0.892 66±0.010 65					
1	3.44	k=0.03 69±0.010 64	n=1.108 74±0.090 52		0.992 63	9.228 19×10^{-4}	0.005 54
2		k=1.007 92±0.032 6	c=0.052 74±0.003 11		0.990 38	1.2×10^{-3}	0.007 23
3		a=1.332 86±3.058 36	b=0.449 46±2.295 9	k=0.039 59±0.034 03	0.995 42	5.743 16×10^{-4}	0.002 87
4		k=0.997 03±0.027 82	c=0.049 37±0.017 01	b=−8.116 96E−4±0.000 5	0.993 8	7.770 59×10^{-4}	0.003 11
		n=0.988 76±0.116 2					
1*		k=0.033 81±0.004 83	n=0.997 35±0.039 18		0.996 24	3.672 74×10^{-4}	0.003 67
2*		k=0.992 33±0.016 31	c=0.033 24±9.155×10^{-4}		0.996 32	3.592 41×10^{-4}	0.003 59
3*		a=−30.851 38±1.14×10^{7}	b=0.994 52±2.295 9	k=0.039 56±0.034 03	0.995 99	3.916 67×10^{-4}	0.003 53
4*		k=0.998 28±0.007 59	c=0.046 22±0.003 81	b=−5.661 05E−4±8.7E−5	0.999 4	5.835 82×10^{-5}	0.000 467
		n=0.884 28±0.024 33					

注:* 为经过漂烫处理的土豆,序号 1,2,3,4 为模型(1 为 Page 模型;2 为 Henderson 模型;3 为近似扩散模型;4 为 Midilli 模型)。

2.4 漂烫处理对土豆片脉冲喷动微波负压干燥色泽的影响

色素能在空气中发生氧化反应,这依靠氧的浓度、热量、光等,崔政伟[15]等人干燥韭菜和胡萝卜、Bohm[16]等人在干燥香芹以及胡[17]等人干燥毛豆中提出了真空条件可能维持产品的色泽。

图 7 比较了土豆片漂烫与未漂烫及微波负压干燥过后色泽的变化。可以看出:与生鲜土豆相比,干燥过程 L^* 值由 75.33 增至 91.24,a^* 值由−5.27 减至−1.99,b^* 值由 26.7 至 22.9;漂烫处理的土豆片干燥中 L^* 值由 61.23 增至 71.52,a^* 值由−8.59 减至−5.21,b^* 值由 17.25 增至 39.65。然而,Joanna 等人在真空干燥土豆过程中,土豆亮度变大,向绿、蓝偏移。图 8 显示,在干燥过程中,随着含水率的减少,漂烫处理与不处理的土豆片的色差 ΔE 显著增大;由于在干燥过程中表面的非酶褐变反应,导致了土豆片变暗。Pedreschi[18]等人油炸土豆过程中,土豆颜色变化随着油炸时间而逐渐变大。

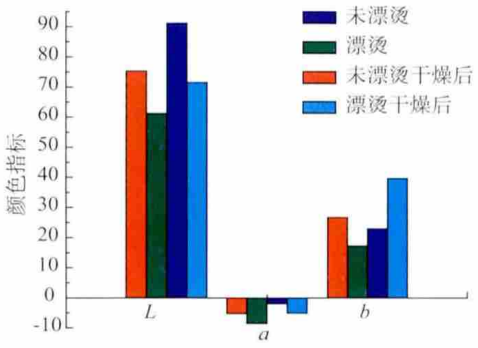


图 7 漂烫和未漂烫处理土豆片在干燥过后颜色参数的变化

Fig. 7 Color indices of raw and dried potato slices

2.5 漂烫处理或微波功率或脉冲喷动频率等对土豆片脉冲喷动微波负压干燥质构的影响

图 9 表明,在干燥过程中,土豆片分为组织的

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

软化和硬化两个阶段;在软化阶段随着含水率的减少,产品的 MF 也随之减少,与之对应产品的脆度增加;在硬化阶段,MF 增大,与之对应产品的脆度增加,这与 Pedreschi[19]研究了油炸土豆条质构变化结果一致。

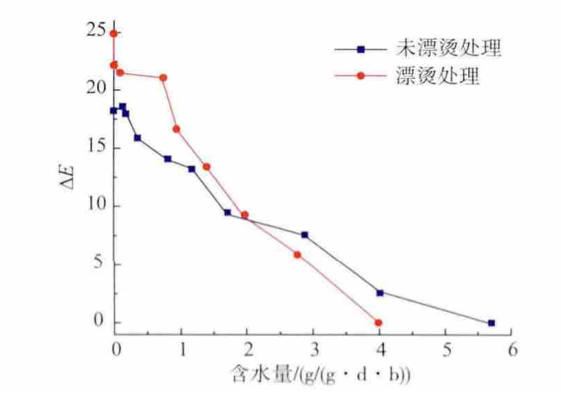


图 8 漂烫和未漂烫处理土豆片在干燥过程中色差的变化

Fig. 8 Color evolutions of raw and blanched potato slices drying at 2.29 W/g

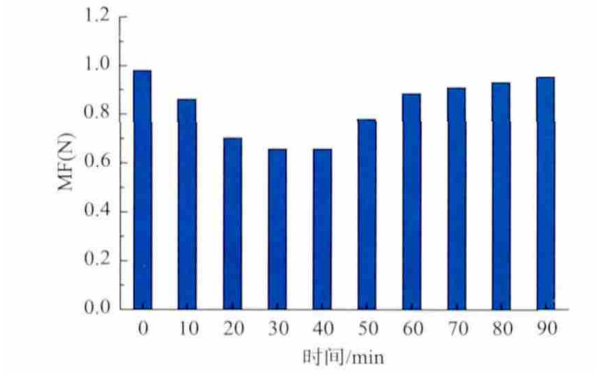


图 9 微波功率 2.29 W/g,喷动频率为 5 次/min 时土豆干燥过程中最大力的变化

Fig. 9 Maximum force (MF) vs drying time for control potato slices fried at 2.29 W/g and pulse-spouted frequency of 5 times/min

2.6 土豆片脉冲喷动微波负压干燥均匀性分析

图 10 显示了漂烫与未漂烫土豆片在干燥前后的热像图。从红外成像图中可以看出:在微波功率为 3.44 W/g, 脉冲喷动频率为 5 次/min 条件下,漂烫与未漂烫土豆片在干燥过程中表面温度分布是均匀的,最大温度差小于 4 ℃。这一结果证明,脉冲喷动微波负压干燥可以获得均匀的微波干燥产品。颜伟强[20]研究了常压微波喷动干燥胡萝卜颗粒,结果证明喷动方式可以改善微波干燥的均匀性。

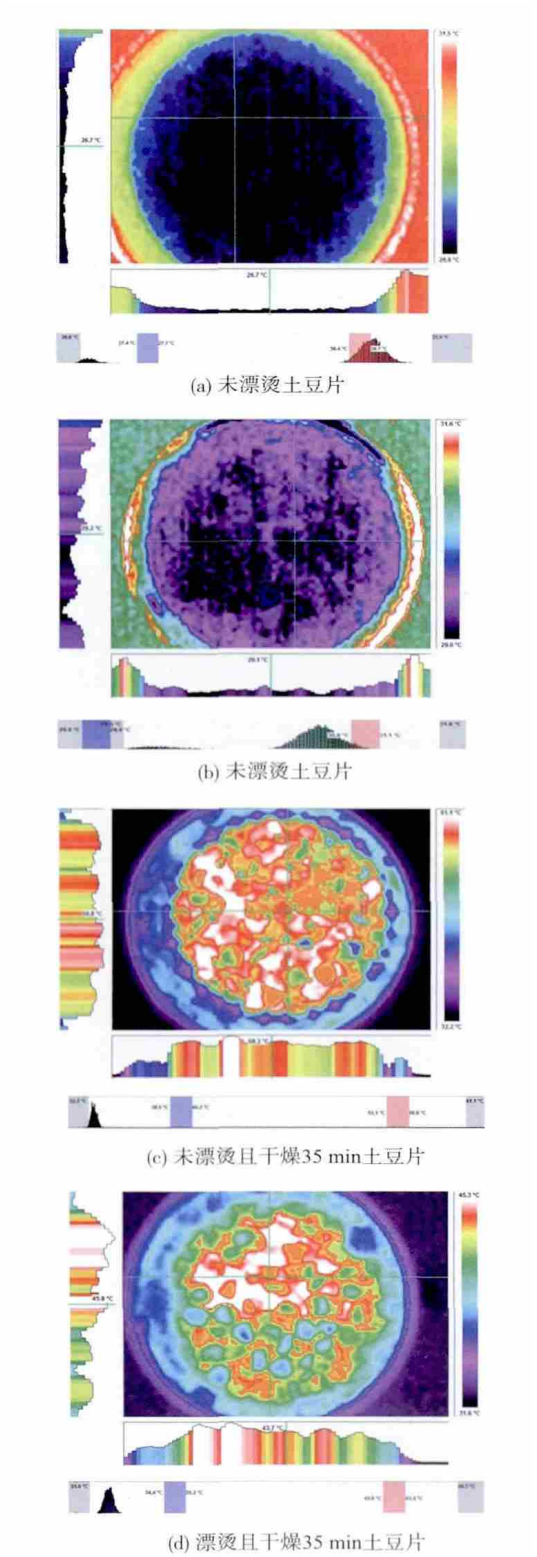


图 10 微波功率 2.29 W/g, 喷动频率为 5 次/min 时土豆片在干燥前及干燥过程中红外热成像图

Fig. 10 Thermal imagery of potato slices dried by PSMVD at the microwave power of 3.44 W/g and pulse-spouted frequency of 5 times/min

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 结 语

与传统的静止或转盘式微波真空干燥相比,脉冲喷动微波负压干燥具有干燥快、色泽优、品质高、均匀性好等优点。Midilli 传质薄片模型优于其它模型,较好表达了土豆圆片的传质过程。另外,随着干燥时间的增加,含水量逐渐减少,标准偏差也随之减小,色差 ΔE 显著的增大;功率越大,干燥速率越快,而喷动频率增大,干燥速率先增大后减小。未漂烫处理及提高微波功率可以增加土豆片干燥过程中水分扩散系数 D_{eff},缩短土豆片脉冲喷动微波负压干燥的时间。

参考文献:

[1] ZHAO Ping,WANG Li,PU Yu-lin,et al. Time-variation pattern of browning of potatoes of different varietie [J]. **Journal of Lanzhou University of Technology**,2010,36(2):63-65.

[2] ZHANG Min,TANG Jin,A S Mujumda. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2006,17:524-534.

[3] 朱德全,王继先,钱良存,等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J]. **农业工程学报**,2009,25(3):248-252.
ZHU De-quan,WANG Ji-xian,QIAN Liang-cun,et al. Optimization of technical parameters of microwave-vacuum drying of Chinese gooseberry slices[J]. **Transactions of the CSAE**,2009,25(3):248-252.(in Chinese)

[4] 蒋焕新,胡杰,崔政伟,等. 远红外真空干燥胡萝卜片过程中温度变化和模型[J]. **食品生物与技术学报**,2012,31(10):248-252.
JIANG Huan-xin,HU Jie,CUI Zhen-wei,et al. Temperature changes during the process of far infrared vacuum drying of carrots slices[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2012,31(10):1100-1104.(in Chinese)

[5] W J N Fernando,A L Ahmad,M R Othman. Convective drying rates of thermally blanched slices of potato (*Solamum tuberosum*):parameters for the estimation of drying rates[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2011,89:514-519.

[6] Marek Markowski,Joanna Bondaruk,Wioletta Blaszczak. Rehydration behavior of vacuum-microwave-dried potato cubes[J]. **Drying Technology**,2009,27:296-305.

[7] Dimitrios Argyropoulos,Albert Heindl,Joachim Muller. Assessment of convection,hot-air combined with microwave-vacuum and freeze-drying methods for mushrooms with regard to product quality [J]. **International Journal of Food Science and Technology**,2011,46:333-342.

[8] Swittra Bai-Ngew,Nantawan Therdthai et al. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips [J]. **Journal of Food Engineering**,2011,104:114-122.

[9] WANG Ying-qiang,ZHANG Min,Arun S Mujumdar. Convective drying kinetics and physical properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets[J]. **Journal of Aquatic Food Product Technology**,2011,20(4):361-378.

[10] Hassini L,Azzouz S Peczalski R,et al. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage[J]. **Journal of Food Engineering**,2007,79(1):47-56.

[11] Doymaz I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots[J]. **Journal of Food Engineering**,2004,61:359-364.

[12] Marek Markowski,Ireneusz Bialobrzewski. Kinetics of spouted-bed drying of barley:diffusivities for sphere and ellipsoid[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,96:380-387.

[13] G Hashemi,D Mowla,M Kazemeini. 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**,2009,92:331-338.

[14] Joanna Bondaruk,Marek Markowskia,Wioletta Blaszczak. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes[J]. **Journal of Food Engineering**,2007,81:306-312.

[15] CUI Zhen-wei,XU Shi-yin ,SUN Da-wei. Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves[J]. **Drying Technology**,2004,22(3):563-575.

[16] M Bohm,M Bade,B Kunz. Quality stabilization of fresh herbs using a combined vacuum-microwave drying process[J]. **Advances in Food Science**,2002,24(2):55-61.

[17] HU Qing,ZHANG Min,Mujumdar A S,et al. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination [J]. **Journal of Food Engineering**,2006,77(4):977-982.

[18] F Pedreschi,J León,D Mery,et al. Implementation of a computer vision system to measure the color of potato chips [J]. **Food Research International**,2006,39:1092-1098.

[19] F Pedreschi,J Maguilera,L Pyle. Textural characterization and kinetics of potato strips during frying [J]. **Food Engineering and Physical Properties**,2001,66(2):314-319.

[20] 颜伟强. 颗粒状切割块茎类蔬菜微波喷动均匀干燥特性及模型的研究[D]. 无锡:江南大学,2011.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net