

文章编号:1673-1689(2009)02-0156-06

微波热风干燥挤压方便米饭的脱水和复水数学模型的建立

焦爱权^{1,2}, 庄海宁^{1,2}, 金征宇^{*1,2}, 邓力^{1,2}, 黄海燕^{1,2}

(1. 食品科学与技术国家重点实验室, 江南大学 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:文中采用微波干燥,热风干燥及微波热风组合干燥方法,对挤压方便米饭进行脱水干燥。研究了微波功率在210~560 W,热风温度在70~90℃干燥条件下,挤压方便米饭的干燥动力学、复水动力学及色泽的变化情况,并建立了相应的预测模型。结果表明,微波功率、热风温度及其组合方式对最终产品的品质有很大的影响,干燥速率、复水速率及总颜色变化值随着微波功率、热风温度的提高而显著增加。与单独采用热风或微波干燥法相比,组合干燥法可大大缩短干燥时间,最佳组合干燥条件为:微波功率300 W,热风温度80℃。

关键词:热风干燥;微波干燥;微波热风组合干燥;挤压方便米饭

中图分类号:TS 210

文献标识码:A

Modeling Dehydration and Rehydration of Instant Rice Subjected to Combined Microwave-Hot-Air Drying

JIAO Ai-quan^{1,2}, ZHUANG Hai-ning^{1,2}, JIN Zheng-yu^{*1,2}, DENG Li^{1,2}, HUANG Hai-yan^{1,2}

(1. State Key Lab of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Instant rice with twin-screw extruder was subjected to convective hot-air, microwave and combined microwave-hot-air dehydration. The combination of three microwave power (210, 300, 560 W) and three air temperature (70, 80, 90 °C) were investigated to find the drying kinetics, rehydration kinetics and colour change. Combined microwave and hot-air drying could decreased the drying time required when compared to drying with either hot-air or microwave energy alone. Predictive models were developed to describe dehydration and rehydration kinetics. Dehydration rate, rehydration rate and total colour change of rehydrated product generally increased with microwave level and air temperature. The combination of MW=300 W and T=80 °C was the optimal dry-process in terms of drying time, rehydration time and colour.

Key words: convective hot-air drying, microwave drying, microwave - hot-air drying, Instant rice with extruder

收稿日期:2007-10-27

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD05A01)。

* 通讯作者:金征宇(1962-),男,江苏扬州人,工学博士,教授,博士生导师,粮食、油脂与植物蛋白工程。

Email: jinlab2008@yahoo.com

挤压方便米饭是以低成本的碎米作为主要原料,适当添加其他谷物粉、食品添加剂以及微量营养素,经复配、调质、挤压成型、干燥等工序制成的颗粒状即食米制品,经短时间复水后,其各项性质酷似蒸煮米饭^[1-2]。干燥是挤压方便米饭生产的关键技术之一,干燥方式的选择及干燥条件的控制对产品的复水品质等指标有非常显著的影响,不同的干燥工艺可以得到质量完全不同的产品^[3-4]。热风干燥是最为被广泛采用的食品干燥方法,相对于其他干燥方法,热风干燥具有处理量大、操作简单和干燥费用低等优点。但是,热风干燥能效低、耗时长,并且产品表面易硬化。微波干燥是一种成本相对较低的干燥方法,干燥速度快、时间短,并能较好地保持食品的色、香、味、形,但这种方法的主要缺点是加热的不均匀性。微波热风组合干燥可以克服各自方法单独使用时的缺点^[5-8]。微波能可加快产品内部水分以液体或蒸气形式向产品表面迁移,然后随着热风流,该法可快速有效的除去食品内部水分。目前该法已成功应用于果蔬干制品的加工中^[9-11]。对于挤压方便米饭,微波热风组合干燥法前景看好。本研究中,作者采用热风干燥,微波干燥和微波热风组合干燥对挤压方便米饭进行脱水干燥,旨在探索优质、高效、节能的组合干燥方便米饭的工艺。

1 材料与方 法

1.1 主要实验设备及材料

DS32-II双螺杆挤压机:济南赛信膨化机械有限公司;微波-热风组合干燥系统:600 W,2450 MHz,含有一个2 kw的加热器(自制);WSC-S色差仪:上海物理光学仪器厂;碎杂交籼米(9718品种):江苏省兴化米业有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 挤压方便米饭制备工艺 碎米(或大米)→粉碎→过筛→复配→调质→高温挤压蒸煮→熟化物料→粉碎→过筛→复配→调质→低温挤压成形→干燥→冷却→成品。

1.2.2 干燥操作

1)热风干燥:设置3个温度(70、80、90℃)进行研究,风速为(1±0.5)m/s;

2)微波干燥:设置3种微波能量(210、300、560)W进行研究,空气温度为(23±1)℃(自然流动);

3)微波热风组合干燥:研究9种干燥条件(70、

80、90)℃×(210、300、560)W,热风速度为(1±0.5)m/s。

每个实验随机重复做3次。湿度比(MR)通过方程式(1)计算:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

其中M为干燥t分钟后的水分含量;M₀为样品的初始水分质量;M_e为样品干燥平衡的水分质量。

1.2.3 复水操作 取上述脱水后的样品15g,放入沸水中进行复水。样品要在固定时间间隔内测定重量,直到连续重量相差±0.05g。复水增重率(WGR)、复水率(RR)可通过方程式(2)计算。

$$WGR = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100$$

$$RR = \frac{W_t \times 85\%}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

式中W_t为复水t分钟时样品的重量;W₀为样品的初始重量;W_t为复水完全时样品的重量。

1.2.4 颜色测定方法 采用色差仪(D65光源、CIE-L*a*b*色度系统)来进行颜色测定。其中,L*为黑白指数,其值越大,产品越白(亮);a*、b*值分别代表米饭红绿度和黄蓝度。每一种干燥方法测五次米饭的颜色值,取平均值。总颜色变化指数DE*值按方程(3)计算。

$$DE^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

式中L₀*,a₀*,b₀*分别表示样品在干燥前的颜色参照值。

1.2.5 综合评定指数^[11] 为了用统一指标比较各种干燥方法,产生了综合评定指数(S)。需要考虑到产品的相对颜色(Y₁),相对复水速率(Y₂),相对复水率(Y₃)和相对干燥速率(Y₄)。在这个研究当中,需测定的参数按权重由大到小排列为:颜色,复水速率(k_r),复水率(RR),脱水速率(k_d),所占比重分别为0.4,0.3,0.2,0.1(λ₁,λ₂,λ₃,λ₄)。S值通过方程(4)计算:

$$S = \sum_{i=1}^4 \lambda_i Y_i; \quad (4)$$

其中,Y₁ = 1 - $\frac{DE^* - DE_{min}^*}{DE_{max}^* - DE_{min}^*}$;

$$Y_2 = \frac{k_r - k_{rmin}}{k_{rmax} - k_{rmin}};$$

$$Y_3 = \frac{RR - RR_{min}}{RR_{max} - RR_{min}};$$

$$Y_4 = \frac{k_d - k_{dmin}}{k_{dmax} - k_{dmin}}$$

2 试验结果

2.1 干燥速率变化曲线

挤压方便米饭脱水干燥时,干燥速率(dx/dt)是MR的函数。以MR为横坐标, dx/dt 为纵坐标不同微波功率MW和温度T条件下作图1。

由图可知,干燥速率随着微波功率的增大而加快,在干燥开始阶段都呈上升趋势,到达一个最大值,相当于MR在0.6左右。干燥速率达到最大值后随着MR的减少而降低。温度相同时,微波热风组合干燥比热风干燥的速率快得多。

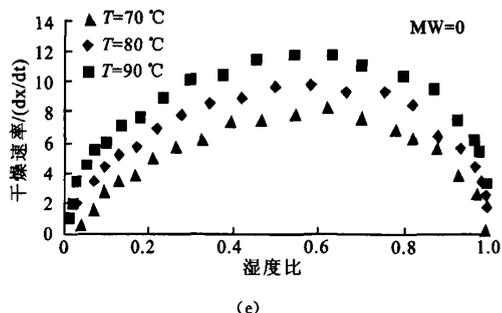
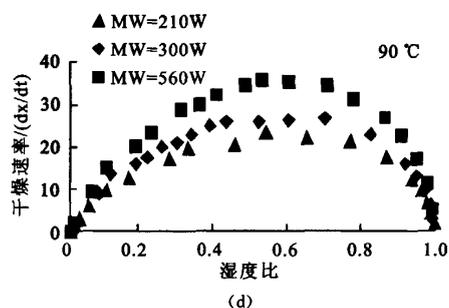
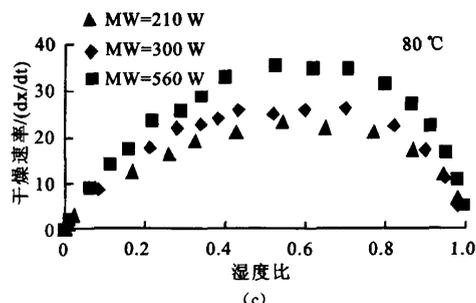
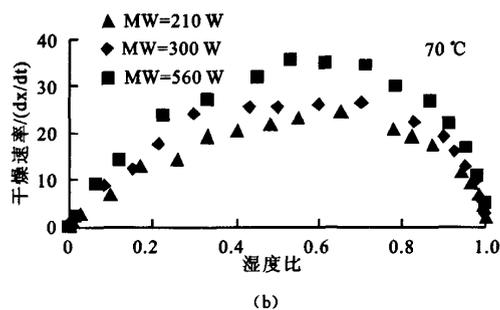
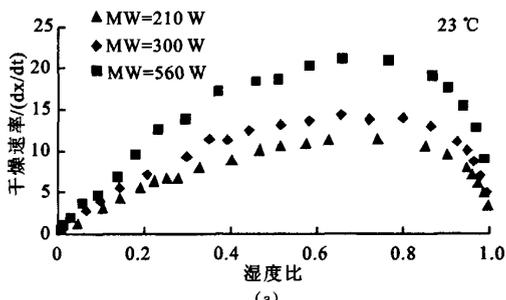


图1 不同干燥条件下的MR- dx/dt 图

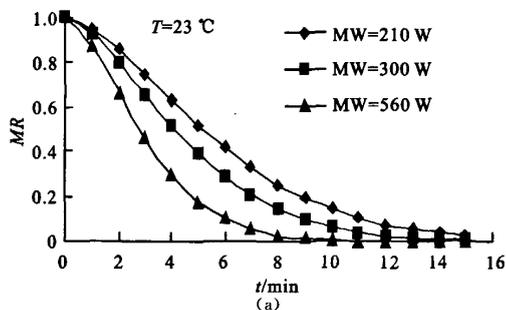
Fig. 1 Drying rate behaviour of instant rice subjected to different drying method and time

米饭经过微波热风组合干燥和微波干燥所得的速率曲线形状相似。干燥速率开始时增加,被认为是样品在最初阶段“升温”,即样品的预热,这时质量损失较小,只有表面部分水分汽化。达到峰值后干燥速率维持一定的水平,样品进入恒速干燥阶段,水分快速汽化,与热风干燥相比,微波热风组合干燥和微波干燥在这一阶段的持续时间较短。之后干燥速率降低,归因于样品接近表面及表面的水分蒸发变干,样品进入内部扩散控制阶段。干燥曲线中峰值的大小随着微波功率的增加而增大。这可能与体积受热膨胀、内部多孔结构的快速形成有关。水蒸气受到微波能量作用通过扩散作用蒸发出去,微波功率越大,扩散作用越强烈,水分蒸发后形成的孔结构越密,水分传质的通道也就越多,因而干燥的速度也就越快,并且脱水后产生的多孔结构将影响随后的复水过程。

2.2 干燥过程的数学模型

MR是干燥时间(t)、微波功率(MW)和热风温度(T)的函数。以时间 t 为横坐标,MR为纵坐标,作图2。

在实验的条件范围内,随着干燥时间的延长,MR趋于平衡值零,而到达平衡时所需干燥的时间明显取决于干燥方法的选择。达到平衡水分含量时,热风干燥所用时间最长,达20 min;微波干燥较快,达12 min;而组合干燥更快,只需5分钟。



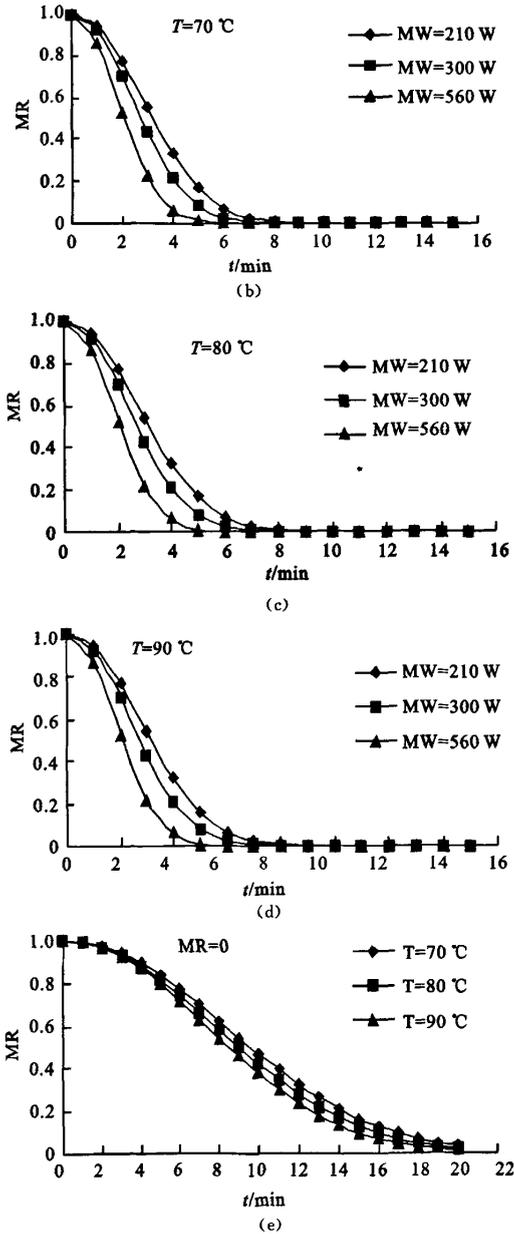


图 2 不同干燥条件下的 MR-t 曲线

Fig.2 Moisture ratio (MR) as a function of different drying method and time

图中曲线均呈指数形式,且当 $t=0$ 时, $MR=1$, $t \rightarrow \infty$ 时, $MR \rightarrow 0$ 。由此,可采用 Page 方程作为干燥的数学模型,即 $MR = \exp(-k_p t^n)$, k_p, n 为待测系数。通过 $MW=210 \sim 560$ W, $T=70 \sim 90$ °C, $t=0 \sim 20$ min 的 15 次干燥试验,采用最小二乘法,对不同的温度及微波功率进行回归分析,得 15 个回归方程(回归系数 A_i, B_i 的值如表 1)。查表可知, $F_{0.01}(1,13) = 9.07$,

$F_{0.01}(1,18) = 8.29$, 方程均达极显著水平。

表 1 不同干燥条件下的 k_p, n 值

Tab.1 The value of k_p and n at different drying method and time

试验号	MW/W	T/°C	k_p	n	F	样本数
1	210	23	0.055 6	1.549	857.23	15
2	300	23	0.077 3	1.550	353.65	15
3	560	23	0.144 5	1.551	625.45	15
4	0	70	0.005 8	2.117	653.26	20
5	210	70	0.058 6	2.119	864.19	15
6	300	70	0.081 3	2.127	530.15	15
7	560	70	0.145 3	2.128	620.13	15
8	0	80	0.006 7	2.126	436.52	20
9	210	80	0.059 6	2.135	379.86	15
10	300	80	0.081 5	2.130	392.76	15
11	560	80	0.147 7	2.116	630.74	15
12	0	90	0.007 4	2.127	1 026.61	20
13	210	90	0.060 8	2.136	1 053.87	15
14	300	90	0.083 7	2.115	1 426.58	15
15	560	90	0.148 0	2.12	957.32	15

进一步采用逐步回归法得 k_p 为:

$$k_p = 2.51 \times 10^{-4} MW + 8.26 \times 10^{-5} T \quad (5)$$

$$F = 187.53, F_{0.01}(2,12) = 12.97$$

而 n 值与干燥方式 I_m 的选择有关:

$$n = 2.12 - 0.58 \times I_m \quad (6)$$

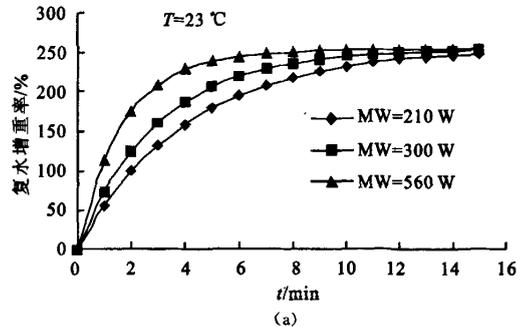
仅在微波干燥时, $I_m = 1$, 其它情况为 0。将(5)、(6)式代入方程 $MR = \exp(-k_p t^n)$, 得

$$MR = e^{(-2.51 \times 10^{-4} MW + 8.26 \times 10^{-5} T) \times t^{(2.12 - 0.58 I_m)}} \quad (7)$$

式(7)即为挤压方便米饭脱水干燥过程数学模型(即干燥曲线方程)。

2.3 复水过程的数学模型

以复水时间(t)为横坐标,复水增重率(WGR)为纵坐标,作复水曲线图,见图 3。



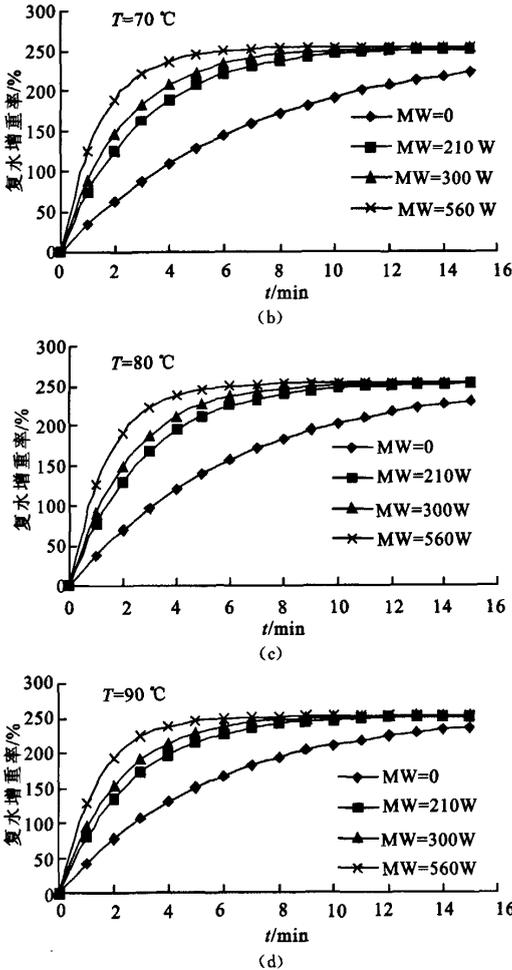


图 3 不同干燥条件下的 WGR-t 图

Fig. 3 Weight gain on rehydration (WGR) as a function of different drying method and time

由图可知,用微波热风组合干燥法干燥的样品复水速率要明显快于单独使用热风干燥、微波干燥的样品。

图中曲线均具有相似的有界增长形态,且符合一级方程特征,因此可采用数学模型^[13]:

$$WGR = WGR_e - WGR_e e^{-k_t t} \quad (8)$$

其中 WGR_e 为复水平衡增量比。非线性回归方程(7)适用于复水实验实测数据,经残差平方和最小化分析估算方程(7)的回归系数,其结果高度显著,置信度达 95%。因 WGR 是 t, T 和 MW 的函数,为进一步说明他们之间的关系,需要对数据深入分析。

实验发现 WGR_e 在实验条件范围内变化很小,为 250 ± 3 , 然而复水速率系数 k_t 随着 MW 和 T 的增大而显著增大。通过深入分析后发现,线性模型 $k_t = a_t MW + b_t T$ 最适合描述 MW 和 T 与 k_t 的关

系。通过线性回归分析计算,系数 a_t, b_t 的值分别为 $6.3 \times 10^{-4} W^{-1} \min^{-1}$ 和 $1.0 \times 10^{-3} ^\circ C^{-1} \min^{-1}$ 。于是得出描述 WGR 与干燥时间,热风温度和微波功率的函数关系式:

$$WGR = WGR_e - WGR_e e^{(-6.3 \times 10^{-4} MW + 1.0 \times 10^{-3} T)t} \quad (9)$$

上述方程可适当描述挤压方便米饭的复水动力学过程。通过方程(9)可估算出达到复水平衡水分质量分数 85% 水平时的复水时间。

2.4 颜色变化

复水挤压方便米饭的 L^* 值是 MW 和 T 的函数。在不同温度条件下,以 MW 为横坐标,以 L^* 值为纵坐标,作图 4。当微波、组合干燥的微波功率 $\geq 210 W$ 时, L^* 值随着 MW 和 T 的增大而显著减小 ($p < 0.01$)。这表明在干燥过程中样品变暗,其变暗的程度随着微波功率的增加而加深。同样我们也研究了复水后方便米饭总体颜色的变化情况,见图 5。

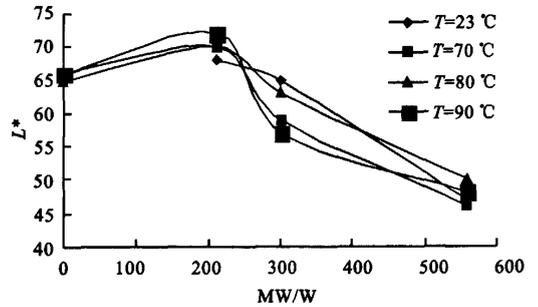


图 4 不同干燥条件下的 MW- L^*

Fig. 4 Lightness (L^*) as a function of microwave power and air temperature

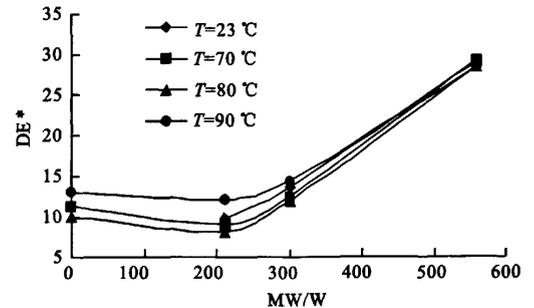


图 5 不同干燥条件下的 MW- DE^*

Fig. 5 Total colour change (DE^*) as a function of microwave power and air temperature

从图中我们可以看出, $MW > 210 W$, DE^* 值随着 MW 和 T 的增大而显著增大 ($p < 0.01$)。然而在 $MW \leq 210 W$ 条件下, DE^* 值与微波功率的关系却不显著 ($p > 0.01$)。

2.5 最佳干燥条件的选择

设定干燥完成时间 t 为样品水分含量降低至为

11%所需的时间,则可通过方程(7)估算出干燥速率 k_d ;复水后样品的水分含量达到复水平衡水分含量的85%左右时,产品的硬度与新鲜蒸煮米饭的相近,故复水时间按达到接近复水平衡水分85%所需的时间计算。按方程式(3)计算各种干燥方法的综合评定指数(S),结果见表2。由表可知,在MW=210 W, T=70℃的微波、热风组合干燥条件下可得到最高的S值,处理后的产品在色泽、水分含量、复水速度、干燥速率上都显现出很好的品质。

3 结 语

挤压方便米饭的脱水和复水过程受干燥方式、微波能量和热风温度的影响;微波热风组合干燥速度是热风干燥的4倍,是微波干燥的2倍;组合干燥所需的复水时间比单独使用微波或热风干燥所需的时间少50~70%。在所研究的范围内,在MW=300 W, T=80℃的微波热风组合干燥条件下干燥,复水后的产品具有最佳的品质。

表2 不同干燥条件下的复水时间及S值

Tab.2 Rehydration time and synthetic evaluation index (S) for each drying microwave power level and air temperature level examined

MW/W	T/℃	t/min	S
210	23	12.1	0.67±0.06
300	23	9.2	0.67±0.16
560	23	7.0	0.38±0.06
0	70	14.5	0.62±0.07
210	70	5.7	0.77±0.02
300	70	4.8	0.79±0.08
560	70	3.0	0.47±0.08
0	80	14.8	0.58±0.14
210	80	6.8	0.88±0.09
300	80	5.0	0.91±0.12
560	80	3.4	0.49±0.02
0	90	15.0	0.54±0.12
210	90	7.0	0.80±0.10
300	90	5.7	0.83±0.03
560	90	3.8	0.45±0.08

参考文献(References):

- [1] 安红周,赵琳,金征宇.工程重组方便米复配机理的研究[J].食品科学,2006,27(9):126-131.
AN Hong-zhou, ZHAO Lin, JIN Zheng-yu. Formulating study on new type instant rice[J]. *Food Science*, 2006, 27(9): 126-131. (in Chinese)
- [2] 安红周,金征宇,赵晓文.挤压制备营养方便米的品质[J].食品与生物技术学报,2005,24(2):22-26.
AN Hong-zhou, JIN Zheng-yu, Zhao Xiao-wen. Study on the quality of nutrition-fortification instant rice using extrusion processing[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2005, 24(2): 22-26. (in Chinese)
- [3] V Karathanos, S Anglea, M Karel. Collapse of structure during drying of celery[J]. *Drying Technology*, 1993, 11: 1005-1023.
- [4] K M Waananen, M R Okos. Analysis of bulk flow transfer[J]. *Technology Today*, 1991, (32): 289-296.
- [5] Andres A, Bilbao C. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air microwave dehydration[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, (63): 71-78.
- [6] T Funebo, T Ohlsson. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom[J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, (38): 252-267.
- [7] 张敏,成刚.蔬菜热风干燥过程的节能技术[J].食品与生物技术学报,2007,26(6):6-8.
Zhang Min, Chang Gang. Research progress on the energy reduce of air drying process for dehydrated vegetables[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2007, 26(6): 6-8. (in Chinese)
- [8] G P Sharma, S Prasad. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave - hot air combination[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 50, 99-105.
- [9] M MASKAN. Kinetics of colour change of Kiwifruits during hot and microwave drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, (48): 169-175.
- [10] G P SHARMA. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave hot air combination[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 50, 99-105.
- [11] KHRA ISHEH N A M, COOPER T J R, MAGECT R A. Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions drying[J]. *Technology International*, 1997, (15): 1003-1022.
- [12] 刘魁英.食品研究与数据分析[M].北京:中国轻工业出版社,1998.
- [13] A A Gowen, N Abu-Ghannam, J Frias. Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave - hot-air drying[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2008, (9): 129-137.

(责任编辑:杨萌)