

苹果片变温压差膨化干燥特性与动力学研究^{*}

何新益¹ 程莉莉^{1,2} 刘金福¹ 黄宗海¹ 杜先锋² 汪 姣^{1,2}

(1. 天津农学院食品科学系, 天津 300384; 2. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230036)

【摘要】 探讨了膨化初始含水率和抽真空干燥温度对苹果片变温压差膨化干燥特性的影响,建立了苹果片变温压差膨化干燥动力学模型。结果表明:苹果片变温压差膨化干燥过程分为加速干燥、恒速干燥和减速干燥3个阶段,干燥过程大部分处于减速干燥;不同干燥条件下的苹果片变温压差膨化干燥满足Page方程;苹果片有效扩散系数在 $1.52 \times 10^{-9} \sim 8.87 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内。所建模型可以预测干燥条件下的苹果片变温压差膨化干燥过程中含水率的变化,特定系数 k 、 n 与膨化初始含水率和抽真空干燥温度呈线性关系,相关系数 r^2 分别为 0.845、0.997。

关键词: 苹果片 变温压差膨化干燥 干燥特性 干燥动力学

中图分类号: TS272.59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0130-06

Drying Characteristics and Dynamics of Apple Slices by Explosion Puffing Drying at Variable Temperatures and Pressure Difference

He Xinyi¹ Cheng Lili^{1,2} Liu Jinfu¹ Huang Zonghai¹ Du Xianfeng² Wang Jiao^{1,2}

(1. Department of Food Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China

2. College of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract

The objective was to investigate the effects of puffing initial moisture content and vacuum drying temperatures on the characteristics of apple slices dried by explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference. The drying kinetics model of explosion puffing drying at variable drying conditions was obtained. Results showed that the drying process of explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference obviously existed increase-rate, constant-rate and falling-rate period. Page model provided better simulation of drying curves for apple slices at different puffing drying conditions. The effective moisture diffusivity of apple slices dried by explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference was among $1.52 \times 10^{-9} \sim 8.87 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. The established model can predict the moisture content change during explosion puffing drying time. Fitting undetermined coefficients k and n of Page model were linear with puffing initial moisture content and vacuum drying temperature. The coefficients of correlation r^2 were 0.845 and 0.997, respectively.

Key words Apple slices, Explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference, Drying characteristics, Drying kinetics

引言

变温压差膨化干燥是一种新型果蔬干燥方法,它结合了热风干燥和真空冷冻干燥的优点、克服了

真空低温油炸干燥等的缺点^[1]。国外在20世纪80年代已有连续式变温压差膨化设备,并对苹果、胡萝卜等多种果蔬的膨化工艺进行了一些研究^[2~3]。变温压差膨化干燥技术在国内苹果加工中备受关注,

主要集中在膨化工艺和品质控制方面^[4-7],但对苹果变温压差膨化干燥特性和干燥动力学方面的研究鲜见报道^[8-10]。

要研究苹果变温压差膨化干燥特性和动力学,首先必须能在线检测苹果片在膨化干燥过程中的质量变化。笔者在前期研究工作过程中改进了变温压差膨化干燥设备,在膨化罐中安装了质量在线检测装置^[11],可实现干燥过程中果蔬质量变化的在线观测。干燥时间的长短和产品品质是变温压差膨化干燥技术的关键,由于初始含水率与干燥时间密切相关,抽真空干燥温度与干燥时间及干燥品质有着不可分割的关系,因此,本文在前期对苹果膨化工艺研究的基础上^[7,11],在固定其他干燥关键因素的条件下,研究苹果片初始含水率、抽真空干燥温度条件对苹果变温压差膨化干燥特性的影响,建立苹果片变温压差膨化干燥动力学模型。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

市售新鲜水晶富士苹果,购于天津市红旗农贸批发市场。

SH10A 型水分快速测定仪(上海精密科学仪器有限公司);QDPH10 型变温压差果蔬膨化干燥机(天津市勤德新材料科技有限公司);在线质量检测装置(天津农学院食品加工厂);DHG-9123A 型电热恒温鼓风箱(上海精宏实验设备有限公司);多功能苹果切皮机(山东招远市金王电器有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 苹果片预处理

将新鲜苹果洗净后去皮切成厚度为 2.5 mm 的薄片,用 0.02% 的亚硫酸钠浸泡 30 min,沥干表面水分后,预干燥至干基含水率 30%、41%、54%,将预干燥后的苹果片用食用塑料袋密封后置于 10℃ 以下均湿 24~36 h,备用。

1.2.2 初始含水率对变温压差膨化干燥的影响

取预干燥处理后的苹果片 2 000 g(初始干基含水率为 30%、41%、54%),平铺于托盘置于膨化罐中,另取 150 g 苹果片作为指示试样,密封膨化罐后进行膨化干燥,膨化温度设定为 95℃;达到膨化温度并保持 5 min 后卸压,抽真空干燥处理至干基含水率低于 8%;抽真空干燥温度设定为 78℃;在线观测干燥过程中指示试样质量的变化。

1.2.3 抽真空干燥温度对变温压差膨化干燥的影响

取初始干基含水率 30% 的苹果片 2 000 g 平铺于托盘置于膨化罐中,另取 150 g 苹果片作为指示

试样,密封膨化罐后进行膨化干燥,膨化温度设定为 95℃;达到膨化温度并保持 5 min 后卸压,抽真空干燥处理至干基含水率低于 8%;抽真空干燥温度设计为 68、78、88℃;在线观测干燥过程中指示试样质量的变化。

1.2.4 含水率测定

采用干燥法^[12],均以干基计。

1.2.5 水分比测定

水分比用于表示一定干燥条件下物料还有多少水分未被干燥去除,计算公式为^[13]

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$
 (1)

式中 M_t —— t 时刻的含水率,%
 M_e ——平衡含水率,%
 M_0 ——初始含水率,%

1.3 干燥动力学模型

为了研究苹果片变温压差膨化干燥过程中苹果片初始含水率、抽真空干燥温度和干燥时间与 M_R 之间的关系,利用 SPSS 13.0 软件对试验数据进行拟合,建立干燥动力学模型。干燥动力学模型研究中常用的 3 种经典模型如表 1 所示。

表 1 3 种经典薄层干燥模型		
Tab.1 Three classic models of thin layer drying		
序号	模型名称	模型方程
1	Newton	$M_R = \exp(-kt)$
2	Henderson and Pabis	$M_R = A \exp(-kt)$
3	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$

对不同膨化初始含水率、抽真空干燥温度下的 M_R-t 分别使用表 1 中的 3 种干燥模型进行拟合求解,其中 A 、 k 、 n 为待定系数。

模型优劣评价以决定系数 R^2 、平均相对误差百分比 P 这两个拟合优度来评判。 R^2 、 P 表示模型的精确度和可靠度, R^2 越接近于 1,模型决定系数越高, P 越小,模型越可靠。 R^2 、 P 计算公式为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R_i} - M_{R_{pre,i}})(M_{R_i} - M_{R_{exp,i}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_{R_i} - M_{R_{pre,i}})^2 \sum_{i=1}^N (M_{R_i} - M_{R_{exp,i}})^2}}$$
 (2)

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|M_{R_{exp,i}} - M_{R_{pre,i}}|}{M_{R_{exp,i}}}$$
 (3)

式中 $M_{R_{exp,i}}$ ——水分比试验值 N ——样本数
 $M_{R_{pre,i}}$ ——水分比预测值

1.4 苹果片有效扩散系数(D_{eff})测定

扩散系数反映物料在一定干燥条件下的脱水能力^[14],也是干燥机优化设计的重要参数之一,所以

材料的内部水分扩散系数是果蔬干燥过程数学模型中的主要参数,研究片状果蔬扩散系数对于整个干燥过程和干燥工艺具有重要意义^[15]。片状物料在降速干燥阶段的干燥特性可以用 Fick 扩散第二定律来表示^[16~17],即

$$\frac{\partial M_R}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M_R$$

(4)

当片状物料表面水分瞬间与周围空气达到平衡时,忽略外部其他阻力,式(4)的解为

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 n^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

(5)

式中 L ——物料厚度的 1/2,m

对于较长干燥时间可以取 $n=1$,并对 M_R 取对数,则式(5)可以简化为

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}$$

(6)

2 结果与分析

2.1 初始干基含水率

初始干基含水率分别为 30%、41%、54% 的苹果片在膨化温度为 95℃、抽真空干燥温度为 78℃、停滞时间 5 min 膨化条件下,干燥曲线如图 1 所示(−20~0 min 为升温阶段,膨化干燥从 0 min 开始计),失水速率曲线如图 2 所示。由于苹果片表面积较大,失水较快,所以在升温过程中水分就有较大损失。

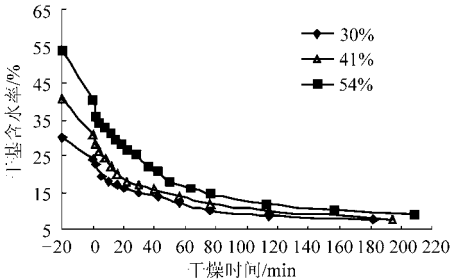


图 1 不同初始干基含水率下苹果片膨化干燥曲线
Fig. 1 Drying curves of variation for apple slices at different pre-drying moisture contents

从图 1 中可以看出,不同初始干基含水率下,随着初始干基含水率的升高,干燥时间延长。由图 2 可知,在 3 种初始干基含水率条件下,变温压差膨化干燥初始阶段失水速率最大,这是由于在卸压的瞬间大部分水分被空气带走;干燥一段时间后进入恒速干燥;经历一段时间的恒速干燥后进入减速干燥过程直至干燥结束。干燥过程中恒速期相对较短,不同初始干基含水率其恒速干燥阶段时间也有所差异,初始干基含水率越高,其恒速干燥阶段时间相对

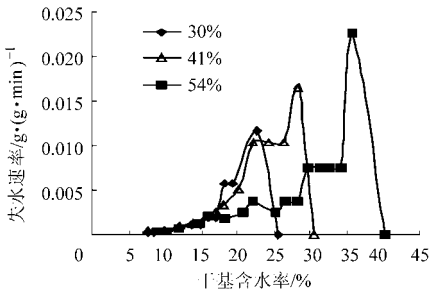


图 2 不同初始干基含水率下膨化苹果片失水速率曲线
Fig. 2 Drying curves of variation of drying rates vs moisture content for apple slices at different pre-drying moisture contents

更长些。这一结果可能与不同初始干基含水率苹果片的水分扩散系数有关。在恒速干燥阶段水分子从苹果片内部迁移到表面的速率大于(或等于)水分子从表面扩散速率,干燥速率是由水分表面扩散控制^[18]。在相同抽真空干燥温度条件下,初始干基含水率苹果片的水分扩散系数越大,其水分子从苹果片内部迁移到表面的能力越强,恒速干燥阶段时间也越长。

从图 2 还可以看出,苹果变温压差膨化干燥过程大部分处于减速干燥阶段,这一结果与郑素霞等^[9]报道的微波干燥过程相似,只是变温压差膨化在膨化开始时有一段加速干燥过程。

2.2 抽真空干燥温度

在初始干基含水率、膨化温度相同的条件下,采用 68、78、88℃ 3 种抽真空干燥温度进行膨化干燥试验,膨化过程中苹果片的膨化干燥曲线如图 3 所示,失水速率曲线如图 4 所示。

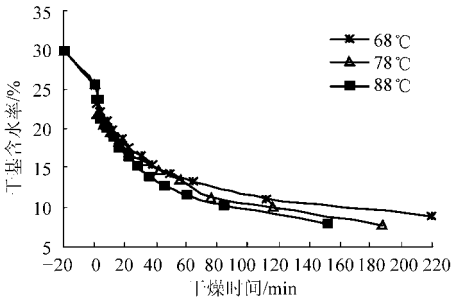


图 3 不同抽真空干燥温度下苹果片干燥曲线
Fig. 3 Drying curves of variation for apple slices at different vacuum drying temperatures

由图 3 可知,在抽真空干燥温度为 68℃ 时,苹果片干燥至含水率低于 8% 需要 220 min;抽真空干燥温度为 78℃ 时,需要 187 min;抽真空干燥温度为 88℃ 时,需要 152 min。由此可见,随着抽真空干燥温度的升高,干燥时间逐渐缩短。由图 4 可知,采用 3 种不同的抽真空干燥温度进行干燥时,干燥开始时失水速率很大,之后很快开始恒速干燥,在经历一段时间的恒速干燥后进入减速干燥阶段。

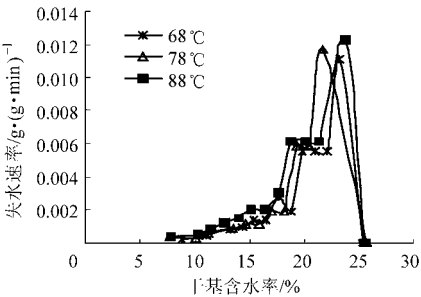


图 4 不同抽真空干燥温度下苹果片失水速率曲线

Fig. 4 Drying curves of variation of drying rates *vs* moisture content for apple slices at different vacuum drying temperatures

2.3 动力学方程拟合

苹果片在变温压差膨化干燥的升温阶段质量就开始减少,含水率也相应降低。本研究主要是针对变温压差膨化干燥开始后苹果片的干燥动力学方程,因此,膨化干燥 0 min 时的实际含水率为膨化初

始含水率(M_{puff0})。

2.3.1 干燥动力学模型的选择

参照 1.3 节方法,对表 1 中的 3 种干燥模型分别进行拟合优度比较,得各干燥模型的拟合优度统计量值如表 2 所示, T 为抽真空干燥温度。

由表 2 可知,Newton 干燥模型下不同膨化初始含水率、抽真空干燥温度条件下的 $M_R - t$ 决定系数 R^2 在 0.599 ~ 0.929 之间,Henderson and Pabis 干燥模型下不同膨化初始含水率、抽真空干燥温度条件下的 $M_R - t$ 决定系数 R^2 在 0.885 ~ 0.958 之间,Page 干燥模型下不同膨化初始含水率、抽真空干燥温度条件下的 $M_R - t$ 决定系数 R^2 在 0.991 ~ 0.999 之间。由此可见,Page 干燥模型下各种干燥条件的决定系数 R^2 最大,同时其平均相对误差百分比 P 值也最小,所以 Page 模型能够更好地描述苹果片变温压差干燥过程。Page 模型下各待定系数如表 3 所示。

表 2 3 种干燥模型拟合优度统计量值比较

Tab.2 Fitting parameters of three drying models

初始干基含水率/%	$M_{puff0}/\%$	$T/^\circ\text{C}$	Newton		Henderson and Pabis		Page	
			R^2	P	R^2	P	R^2	P
30	25.6	78	0.875	19.017	0.954	14.042	0.999	11.795
41	30.5	78	0.929	21.551	0.958	13.051	0.999	10.409
54	40.3	78	0.863	16.412	0.932	11.020	0.998	4.545
30	25.4	68	0.599	14.284	0.885	8.289	0.991	2.147
30	25.5	88	0.784	16.408	0.887	10.102	0.995	2.059

表 3 Page 模型拟合待定系数

Tab.3 Fitting undetermined coefficients of Page model

$M_{puff0}/\%$	$T/^\circ\text{C}$	k	n
25.6	78	0.061	0.714
30.5	78	0.063	0.667
40.3	78	0.064	0.614
25.4	68	0.073	0.513
25.5	88	0.093	0.525

2.3.2 干燥动力学模型的建立

利用 SPSS 13.0 统计软件对表 3 中 Page 模型下的待定系数 k 、 n 与初始含水率、抽真空干燥温度进行多元回归分析,得出待定系数 k 、 n 与 M_{puff0} 和 T 的关系式为

$$k = 0.019M_{puff0} - 0.002T + 0.226 \tag{7}$$

$$n = -0.661M_{puff0} + 0.019T - 0.623 \tag{8}$$

式(7)和式(8)的相关系数 r^2 分别为 0.845、0.997,统计量 Sig 值分别为 0.010、0.007,均小于 0.05,故可认为待定系数 k 、 n 与 M_{puff0} 、 T 的线性关系成立。因此,不同膨化初始含水率、抽真空干燥温

度条件下苹果片变温压差膨化干燥的干燥动力学模型可以表示为

$$M_R = \exp\left(-\left(0.019M_{puff0} - 0.002T + 0.226\right)t^{-0.661M_{puff0} + 0.019T - 0.623}\right)$$

这一试验结果与林喜娜等^[8]报道的苹果红外辐射干燥过程符合 Modified Page equation- II 模型不一样。这可能是由于红外辐射干燥是通过辐射的方式进行热量的传递,而变温压差膨化是通过热传导和辐射进行热量的传递。热量传递方式不同导致符合的模型不同。

2.4 模型验证

参照 1.2.1 节和 1.2.2 节,以预处理一批初始干基含水率为 30% 的苹果片进行验证试验,变温压差膨化干燥条件为膨化温度为 95℃、抽真空干燥温度 78℃。图 5 是根据预测 M_R 值和实测 M_R 值绘制的干燥曲线。

应用 SPSS 13.0 统计软件对预测值和实测值进行 t 检验,得出统计量 Sig 值为 0.545,大于 0.05,表明两条曲线之间无显著性差异,预测值与试验值符合程度较好,因此认为 Page 模型可以用于描述变温

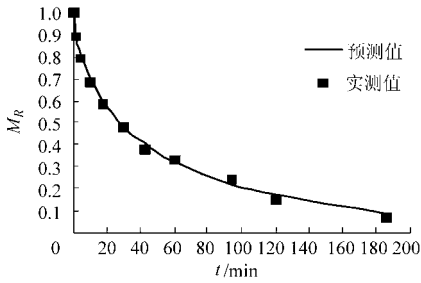


图 5 实测 M_R 与预测 M_R 比较

Fig. 5 Comparison between the experimental and predicted M_R

压差膨化干燥过程中含水率的变化。

2.5 苹果片有效扩散系数的确定

分别将苹果片在变温压差膨化干燥过程中各种干燥条件下的 $\ln M_R - t$ 作图,其结果如图 6 所示。

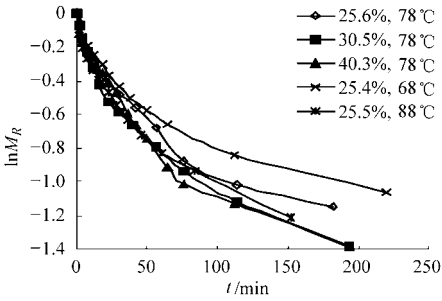


图 6 $\ln M_R - t$ 曲线

Fig. 6 Curves of $\ln M_R - t$

结合图 1~4 及图 6 可以看出,在变温压差膨化干燥过程中,扩散系数可以分为两个阶段:干燥开始至第 56 min,为第 1 阶段,干燥速率较快,处于加速和恒速干燥阶段;干燥第 56 min 至干燥结束,为第 2 阶段,干燥速率较慢,处于减速干燥阶段。采用 Microsoft Excel 软件工具对图 6 干燥曲线分段添加线性趋势线,得出趋势线方程斜率。方程斜率与苹果片有效扩散系数 D_{eff} 关系式为

$$S_{lope} = \frac{D_{eff} \pi^2}{4L^2}$$

(9)

式中 S_{lope} ——趋势线方程斜率

由式(9)可计算出不同干燥条件下苹果片 2 个干燥阶段的有效扩散系数,其计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知,在变温压差膨化干燥第 1 阶段有效扩散系数在 $6.85 \times 10^{-9} \sim 8.87 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围

表 4 不同干燥条件下的苹果片有效扩散系数

Tab. 4 Effective diffusion coefficient of apple slices at different dry conditions

M_{puff0} /%	抽真空	第 1 阶段		第 2 阶段	
	干燥	第 1 阶段	有效扩散	第 2 阶段	有效扩散
	温度 T /℃	斜率	系数 / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	斜率	系数 / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
25.6	78	-0.011 2	7.10×10^{-9}	-0.002 4	1.52×10^{-9}
30.5	78	-0.014 0	8.87×10^{-9}	-0.004 1	2.60×10^{-9}
40.3	78	-0.013 4	8.49×10^{-9}	-0.003 4	2.16×10^{-9}
25.4	68	-0.010 8	6.85×10^{-9}	-0.002 8	1.77×10^{-9}
25.5	88	-0.012 9	8.18×10^{-9}	-0.004 1	2.60×10^{-9}

内;第 2 阶段有效扩散系数在 $1.52 \times 10^{-9} \sim 2.60 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间,明显低于第 1 干燥阶段有效扩散系数。变温压差膨化干燥第 1 阶段,随着膨化初始含水率的升高,苹果片有效扩散系数有先增大而后减小的趋势;在膨化初始含水率相同、抽真空干燥温度不同的条件下,随着抽真空干燥温度的升高,苹果片的有效扩散系数增大。这一结果与变温压差膨化干燥过程中高含水率苹果片失水速率较快、恒速干燥阶段相对较长相一致。苹果片有效扩散系数在变温压差膨化干燥第 2 阶段变化趋势同干燥第 1 阶段基本相同。由此可以看出,苹果片有效扩散系数与膨化初始含水率、抽真空干燥温度有关。

3 结论

(1)苹果片变温压差膨化干燥过程存在加速干燥、恒速干燥和减速干燥 3 个阶段,干燥大部分过程处于减速干燥阶段。随着抽真空干燥温度的升高,苹果片的变温压差膨化干燥时间逐渐缩短。

(2)不同干燥条件下的苹果片变温压差膨化干燥过程符合 Page 方程。Page 方程中待定系数 k 、 n 与 M_{puff0} 、 T 呈线性关系。

(3)膨化初始含水率和抽真空干燥温度影响苹果片变温压差膨化干燥时间和苹果片的有效扩散系数,苹果片的有效扩散系数在 $1.52 \times 10^{-9} \sim 8.87 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内。

参 考 文 献

1 毕金峰,魏益民. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6):308~312.
Bi Jinfeng, Wei Yimin. Review on explosion puffing drying for fruits and vegetables at variable temperature and pressure difference [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6):308~312. (in Chinese)

2 Sullivan J F, Konstance R P, Dellamonica E S, et al. Carrot dehydration-optimization process studies on the explosion puffing process [J]. Food Science, 1981, 46(5):1 537~1 542.

3 Torreggiani D, Toledo D T, Bertolo G. Optimization of vapor induced puffing in apple dehydration[J]. Journal of Food

- Science, 1995, 60(1): 181 ~ 185, 194.
- 4 毕金峰. 苹果变温压差膨化干燥工艺优化研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 213 ~ 218.
Bi Jinfeng. Optimization of explosion puffing drying process of apple at variable temperature and pressure difference [J]. Food Science, 2008, 29(11): 213 ~ 218. (in Chinese)
- 5 石启龙, 张培正. 苹果气流膨化干燥工艺研究[J]. 食品科学, 2001, 22(12): 32 ~ 34.
Shi Qilong, Zhang Peizheng. Experimental study on the parameters of low temperature explosion puffing drying for apple chips [J]. Food Science, 2001, 22(12): 32 ~ 34. (in Chinese)
- 6 张炎, 姚开, 贾冬英. 浸糖工艺对气流膨化苹果脆片的影响[J]. 食品与发酵工业, 2009, 45(2): 45 ~ 47.
Zhang Yan, Yao Kai, Jia Dongying. Effect of sugar-soaking on apple chips by explosion-puffing drying technology [J]. Food and Fermentation Technology, 2009, 45(2): 45 ~ 47. (in Chinese)
- 7 程莉莉, 何新益, 郭飞飞, 等. 护色处理和膨化干燥工艺对苹果脆片品质影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 127 ~ 129.
Cheng Lili, He Xinyi, Guo Feifei, et al. Effects of color protection treatment and puffing drying process on the quality of apple slices [J]. Food & Machinery, 2011, 27(1): 127 ~ 129. (in Chinese)
- 8 郑素霞, 李远志, 罗树灿, 等. 微波对苹果脆片干燥特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2004, 25(3): 109 ~ 111.
Zheng Suxia, Li Yuanzhi, Luo Shucan, et al. Effect of microwave on the dehydration feature of apple crispy chips [J]. Journal of South China Agricultural University, 2004, 25(3): 109 ~ 111. (in Chinese)
- 9 王颖, 郭玉明. 苹果介电常数与干燥特性相关性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 182 ~ 190.
Wang Ying, Guo Yuming. Correlation between dielectric constant and drying characteristics of apple [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 182 ~ 190. (in Chinese)
- 10 林喜娜, 王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 128 ~ 132.
Lin Xi'na, Wang Xiangyou. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 128 ~ 132. (in Chinese)
- 11 何新益, 刘金福, 王步江, 等. 控制物料在膨化干燥过程中水分和温度变化的膨化罐: 中国, 201020582768.1 [P]. 2010-10-15.
- 12 GB5009.3—2010 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 2010.
GB5009.3—2010 National food safety standard Determination of moisture in foods[S]. 2010. (in Chinese)
- 13 Ebru Kavak Akpinar, Yasar Bicer. Modeling of the drying of eggplants in thin-layers [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2005, 40(3): 273 ~ 281.
- 14 杨俊红, 焦士龙, 郭锦棠, 等. 菜豆种子薄层干燥物料内部水分扩散系数的确定[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(2): 211 ~ 214.
Yang Junhong, Jiao Shilong, Guo Jintang, et al. Determination of the moisture diffusivity for kidney bean seed thin layer drying [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(2): 211 ~ 214. (in Chinese)
- 15 宋贤聚. 低含油率马铃薯脆片加工过程研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 33 ~ 34.
Song Xianju. Studies on the process of low oil content potato chips [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008: 33 ~ 34. (in Chinese)
- 16 Wang Z F, Sun J H, Chen F, et al. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomade with and without hot air pre-drying [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 536 ~ 544.
- 17 Akpinar E, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(10): 1689 ~ 1705.
- 18 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 220 ~ 226.