

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.035

苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究*

巨浩羽 肖红伟 白竣文 谢 龙 娄 正 高振江

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了提高苹果片的制干品质、缩短干燥时间,采用中短波红外干燥技术干燥苹果脆片。研究了不同干燥温度、切片厚度和辐射距离对苹果片干燥特性和色泽的影响。试验结果表明:干燥温度对干燥时间有显著的影响;影响顺序由大到小依次为:干燥温度、切片厚度、辐射距离;苹果切片的整个干燥过程属于降速干燥,通过费克第二定律得出苹果片的水分有效扩散系数在 $(2.85 \sim 7.24) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内,通过阿伦尼乌斯公式得出干燥活化能为 36.58 kJ/mol ;干燥温度对干燥后的苹果片的色泽具有重要影响,当干燥温度为 70°C ,辐射距离为 80 mm ,切片厚度为 5 mm 时,既有较快的干燥速率又能够得到比较高的 L^* 值(75.860)。

关键词: 苹果片 色泽 中短波红外辐射 干燥特性

中图分类号: S375; TQ028.6+76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0186-06

Medium and Short Wave Infrared Drying Characteristics and Color Changing of Apple Slices

Ju Haoyu Xiao Hongwei Bai Junwen Xie Long Lou Zheng Gao Zhenjiang

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the drying quality of apple slices and shorten the drying time, medium and short wave infrared was applied to drying apple slices. The drying experiments were investigated under different drying temperatures, slice thicknesses and radiation distances. Experimental results showed that the drying temperature had a significant influence on the drying processing, while the slices thickness was less significant and the radiation distance was the last. The whole drying procedure appeared a falling rate period. According to Fick's Second Law, the water effective diffusion coefficient (D_{eff}) was worked out. In medium and short wave infrared drying condition, the D_{eff} ranged from $2.85 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ to $7.24 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. The activation energy determined from Arrhenius equation was 36.58 kJ/mol . On the other hand, drying temperature had a marked impact on the color changing, while the slices thickness and radiation distance had a little influence on color value. Both high L^* value and drying efficiency were ensured when the drying temperatures was 70°C , slice thickness was 5 mm and the radiation distance was 80 mm .

Key words: Apple slice Color value Medium and short wave infrared Drying characteristics

引言

苹果片现有的干燥方式有真空低温油炸、真空冷冻干燥、微波真空干燥、热风干燥等^[1]。为了缩

短苹果片的干燥时间,提高干燥品质,国内外学者在干燥技术方面作了很多的研究^[2-4]。然而大部分苹果片干燥方法都存在干燥时间长、能耗大、色泽变暗等缺点。目前,红外辐射干燥技术因其较高加热效

收稿日期: 2013-06-17 修回日期: 2013-07-09

* 国家自然科学基金资助项目(31201436)

作者简介: 巨浩羽,博士生,主要从事农产品干燥装备和技术研究, E-mail: ju56238@163.com

通讯作者: 高振江,教授,博士生导师,主要从事农产品(食品)的加工技术与装备研究, E-mail: zjgao@cau.edu.cn

率而越来越受到研究学者的关注,许多学者对此进行了研究^[5-12],并得出相关结论。

使用 0.75~4 μm 范围的中短波,与目前的红外干燥相比,其特点是辐射频率大,能量高,可以使分子间发生转动能级、振动能级的跃迁^[13]。将中短波红外干燥应用于农产品的干燥可能会提高干燥的效率,降低能耗。由于干燥过程受到物料厚度、辐射强度、辐射距离等因素的影响^[14],本文将探讨不同干燥温度、辐射距离和切片厚度对苹果片干燥特性和色泽的影响,为中短波干燥苹果脆片提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置

本研究用于苹果片干燥的中短波红外干燥箱(泰州圣泰科红外科技有限公司)如图 1 所示,主要由主体装置(红外加热管、离心风机)以及温度控制触摸屏两部分组成。

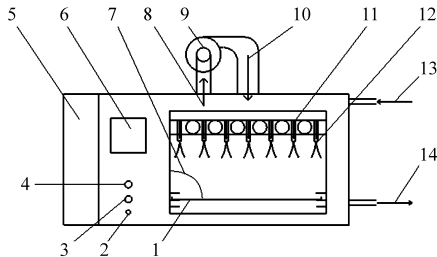


图 1 中短波红外干燥箱

Fig.1 Schematic diagram of medium and short wave infrared drying equipment

1. 物料托盘 2. 风速调节旋钮 3. 触摸屏开关 4. 风机开关
5. 电源控制箱 6. 触摸屏 7. 温度传感器 8. 回风管道 9. 离心风机 10. 进风管道 11. 红外加热管 12. 喷嘴 13. 进风口 14. 出风口

其他仪器设备:YP 型电子秤(上海精密科学仪器有限公司),DHG-9140A 型电加热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科技有限公司),DZQ400/2D 型真空包装机(北京市天月缘包装机械有限公司)。

1.2 试验原料

苹果购于北京新发地农产品批发市场,挑选新鲜无虫害、表面完整无机械损伤的原料作为试验材料。平均直径为 6.5 cm,平均质量为 260 g/个,去皮去籽后的平均湿基含水率为 (88.6 ± 0.5)% (105℃,干燥 24 h)。试验前将苹果放于纸箱中并将其置于(5 ± 1)℃ 的冰箱中保存。

1.3 试验方法

按照试验要求设定干燥温度,其中温度控制系统会自动调节辐射强度使干燥室温度达到预设值。将苹果切成直径为 5 cm 不同厚度薄片,先将试验样品放置于 80℃ 中的热水中烫漂处理 1 min,以防止

褐变的发生。然后分别采用不同干燥温度和辐射距离进行干燥试验。干燥初期每隔 15 min 测定样品的质量变化,中期每 30 min 测定样品的质量变化,末期每 1 h 测定一次质量变化。直到湿基含水率降到 5% 以下或者质量变化小于 0.2 g/h 时停止试验。将干燥后的产品冷却至室温放入保鲜袋中贮存,然后进行下一组试验。具体试验安排如表 1 所示,每组试验重复 3 次。

表 1 试验设计和试验参数

Tab.1 Design and parameters for experiments

试验序号	干燥温度 $T/^\circ\text{C}$	辐射距离 H/cm	切片厚度 D/mm
1	60	12	5
2	65	12	5
3	70	12	5
4	75	12	5
5	80	12	5
6	70	8	5
7	70	16	5
8	70	12	3
9	70	12	7

1.4 干燥参数的计算方法

苹果片的中红外干燥过程中的干燥曲线采用水分比随干燥时间变化的曲线。不同干燥时间苹果片的水分比计算公式为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \tag{1}$$

- 式中 M_o ——初始干基含水率,%
 M_e ——干燥到平衡时的干基含水率,%
 M_t ——在任意干燥 t 时刻的干基含水率,%

由于苹果片的平衡干基含水率 M_e 远小于 M_o 和 M_t ,式(1)可以简化为^[15]

$$M_R = \frac{M_t}{M_o} \tag{2}$$

干燥速率计算公式表示为

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \tag{3}$$

式中 M_{t_1} 、 M_{t_2} ——干燥过程中 t_1 和 t_2 时刻苹果片的干基含水率,%

干基含水率计算公式为

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \times 100\% \tag{4}$$

- 式中 W_t ——在任意干燥 t 时刻的总质量,g
 G ——干物质质量,g

1.5 色泽的测定方法

将干燥后的苹果片磨成粉,采用 SMY-2000SF 型色差仪,依照 CIELAB 表色系统测量产品的明亮度 L^* 、色泽指数 a^* 、 b^* 。 L^* 值变化范围是 0 (黑

色)~100(白色); a^* 表示红绿值,其范围是-60(纯绿色)~60(纯红色); b^* 表示蓝黄值,其范围是-60(纯蓝色)~60(纯黄色)。其中 L^* 值越大,产品的颜色越好。

2 结果与分析

2.1 干燥温度对干燥特性的影响

在辐射距离为120 mm,切片厚度为5 mm时,不同干燥温度下苹果片的干燥曲线如图2所示。由图2a可以看出,苹果片的干基含水率随着干燥时间的延长而呈现逐渐降低的趋势,其中干燥温度越高

干燥时间越短,含水率降低越快。干燥温度分别为60、65、70、75、80℃时,苹果片的干燥时间分别为300、240、180、150、120 min。干燥温度为80℃的干燥时间比其在60℃条件下缩短了50%。但是干燥温度不宜过高,因为含水率很高的果蔬组织中蒸汽迅速膨胀易使细胞壁破裂,内容物流失^[6]。由图2b可以看出,干燥温度越高,苹果脆片的干燥速率越大。干燥过程中没有出现明显的恒速干燥阶段,只有降速干燥阶段。这一结论与 Ruiz Celma A^[16]利用红外辐射干燥葡萄时得出的结果相一致。

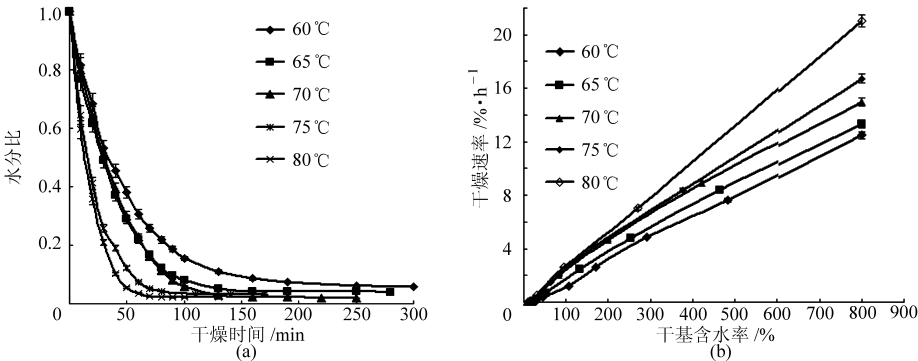


图2 不同干燥温度下苹果片干燥曲线和干燥速率曲线
Fig.2 Drying curves and drying rate curves of apple slices under different drying temperatures
(a) 干燥曲线 (b) 干燥速率曲线

2.2 切片厚度对干燥特性的影响

图3为干燥温度为70℃,辐射距离为15 cm时,不同切片厚度苹果片的干燥曲线和干燥速率曲线。由图3a可以看出,苹果片的水分比随着干燥时间的延长而呈现降低趋势,其中切片越薄水分比降低得越快。切片厚度分别为3、5、7 mm时,对应的干燥时间分别为135、180、300 min。3 mm厚的切片比5 mm干燥时间缩短了33.3%。当切片厚度为7 mm时,干燥时间明显延长,这可能是因为中红外对物料的辐射深度有限,适宜于薄层物料的干燥,对于厚物料的干燥效果较差^[6]。由图3b可看出,切片越薄,干燥速率越快;切片越厚则内部水分扩散所需要克

服的阻力就越大,干燥速率越低。主要是因为干燥速率与物料厚度的平方呈反比^[17],因此得到同样的干燥效果,需要更多的时间。

2.3 辐射距离对干燥特性的影响

干燥温度为70℃,切片厚度为12 cm时不同辐射距离下苹果片的干燥曲线如图4所示。

辐射距离从80 mm增加到160 mm后,其干燥时间增加,干燥速率降低,干燥曲线基本重合,辐射距离为80 mm时比辐射距离为160 mm时干燥时间缩短了12.5%。当辐射距离越近时物料所吸收的热流密度越大,物料内部温度升高,此时温度梯度与水分梯度一致,从而加速水分的扩散。此结论与

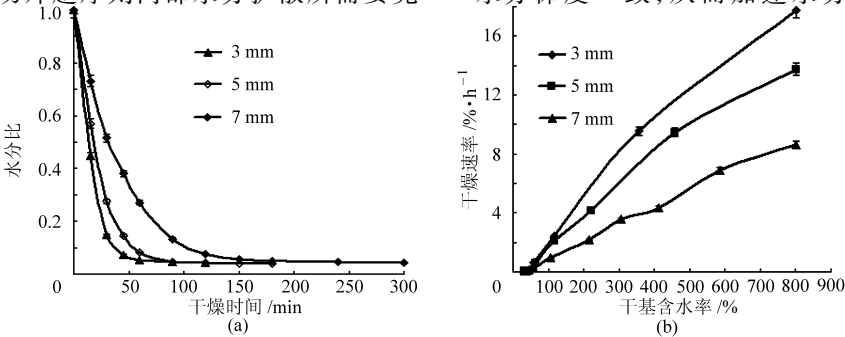
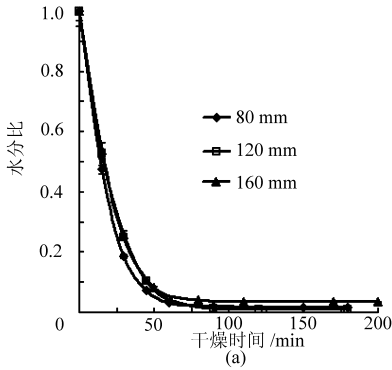


图3 不同厚度苹果片干燥曲线和干燥速率曲线
Fig.3 Drying curves and drying rate curves of apple slice under different slice thicknesses
(a) 干燥曲线 (b) 干燥速率曲线

Dorota^[8]的研究结论一致。辐射距离越近,干燥速率越大,这可能是因为辐射距离越近,物料所吸收的



能量越多,致使干燥速率越快;反之,干燥的速率越慢,此结果与林喜娜^[6]的研究结论相一致。

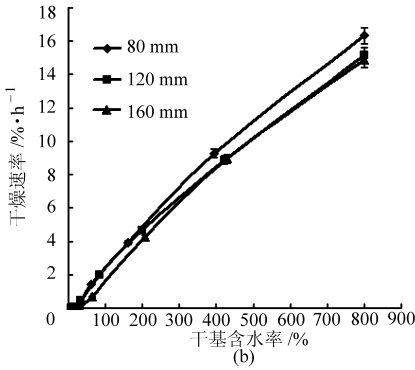


图 4 不同辐射距离下苹果片干燥曲线和干燥速率曲线

Fig. 4 Drying curves and drying rate curves of apple slice under different radiation distances

(a) 干燥曲线 (b) 干燥速率曲线

将不同干燥条件下的干燥时间作单因素方差分析。由表 2 可知,干燥温度、切片厚度和辐射距离对苹果片的红外干燥时间均有显著性影响,并且在试验范围内,影响顺序由大到小依次为:干燥温度、切片厚度、辐射距离。

表 2 单因素试验方差分析

Tab. 2 Analysis of variance for single factor experiment						
因素	差异源	平方和	自由度	均方差	F	P
干燥温度	组间	21. 077	4	5. 269	254. 97	5. 14 × 10 ⁻¹⁰
	组内	0. 207	10	0. 0207		
	总计	21. 284	14			
切片厚度	组间	15. 461	2	7. 730	140. 90	9. 06 × 10 ⁻⁶
	组内	0. 329	6	0. 054		
	总计	15. 790	8			
辐射距离	组间	0. 580	2	0. 290	28. 91	8. 31 × 10 ⁻⁴
	组内	0. 060	6	0. 010		
	总计	0. 640	8			

注:显著性水平 $\alpha = 0. 1$ 。

2.4 不同干燥条件下的水分有效扩散系数

苹果片在干燥中呈现出明显的降速干燥过程,这表明苹果片的干燥是由内部水分的扩散控制的^[18],因此中短波红外干燥苹果片中的水分扩散可以由简化的费克第二定律表示^[19],即

$$M_R = \frac{M_t}{M_o} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t \right) \tag{5}$$

式中 D_{eff} ——水分有效扩散系数, m^2/s

L ——苹果片的厚度, m

t ——干燥时间, s

对式(5)的两边取自然对数得到

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t \tag{6}$$

因此可以画出 $\ln M_R$ 关于 t 的关系曲线,通过线性回

归计算出斜率 k ,就可以得出水分有效扩散系数 D_{eff} 。不同干燥条件下计算结果如表 3 所示。

表 3 $\ln M_R$ 线性回归拟合公式和水分有效扩散系数

Tab. 3 $\ln M_R$ linear regression formulas and effective moisture diffusion coefficients of apple slices

序号	线性回归公式	R^2	$D_{\text{eff}}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1	$\ln M_R = -1.360 \times 10^{-4} t - 0.0589$	0.9785	3.44×10^{-10}
2	$\ln M_R = -1.560 \times 10^{-4} t - 0.0142$	0.9925	3.95×10^{-10}
3	$\ln M_R = -1.902 \times 10^{-4} t + 0.0121$	0.9844	4.82×10^{-10}
4	$\ln M_R = -2.419 \times 10^{-4} t - 0.1159$	0.9449	6.13×10^{-10}
5	$\ln M_R = -2.859 \times 10^{-4} t - 0.0368$	0.9813	7.24×10^{-10}
6	$\ln M_R = 2.501 \times 10^{-4} t - 0.0606$	0.9830	6.34×10^{-10}
7	$\ln M_R = 1.794 \times 10^{-4} t - 0.0721$	0.9686	4.54×10^{-10}
8	$\ln M_R = -3.129 \times 10^{-4} t - 0.1167$	0.9915	2.85×10^{-10}
9	$\ln M_R = -1.027 \times 10^{-4} t - 0.0852$	0.9499	6.39×10^{-10}

由表 3 可以看出苹果片的水分有效扩散系数范围在 $(2.85 \sim 7.24) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。其值随着干燥温度的升高而增大;随着辐射距离的增大而减小;随着苹果片的厚度的增加而增大。其中随温度的变化结论与 Ibrahim^[20]研究结果一致,并且在相同干燥温度下略高于其得出的水分有效扩散系数 $(2.93 \sim 6.08) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.5 不同干燥温度下苹果片的干燥活化能

物料的水分有效扩散系数和干燥温度可以用阿伦尼乌斯公式表示为^[19]

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right) \tag{7}$$

式中 D_0 ——物料中的扩散基数,为定值, m^2/s

E_a ——物料的干燥活化能, kJ/mol

R ——气体摩尔常数,为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

T ——物料的干燥温度, $^{\circ}\text{C}$

对式(7)两边取自然对数得到

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T + 273.15} \quad (8)$$

因此可以作出 $\ln D_{\text{eff}}$ 关于 $\frac{1}{T + 273.15}$ 的关系曲线,通过线性回归可以计算出干燥活化能 E_a 的值。

由图 5 可知,苹果片干燥活化能为 36.58 kJ/mol,说明从苹果片中去除 1 mol 水的启动能量为 36.58 kJ。表 4 列举出了常见果蔬的干燥活化能。由表 4 可知苹果的干燥活化能比胡萝卜和杏子的高,而比青豆和无核紫葡萄的干燥活化能低。干燥活化能与物料的形状和组成有关。苹果中含有较多的糖分,对水分有吸附作用^[18],故较难干燥。

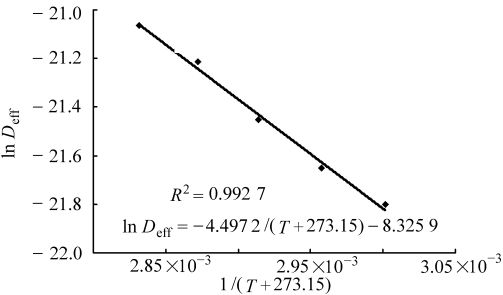


图 5 水分有效扩散系数与干燥温度的关系曲线
Fig.5 Relation curves of moisture effective diffusion coefficients and drying temperatures

2.6 不同干燥条件对苹果片色泽的影响

由图 6 可知,干燥温度对干燥后的苹果片的色泽有显著影响,而在不同切片厚度和辐射距离下的

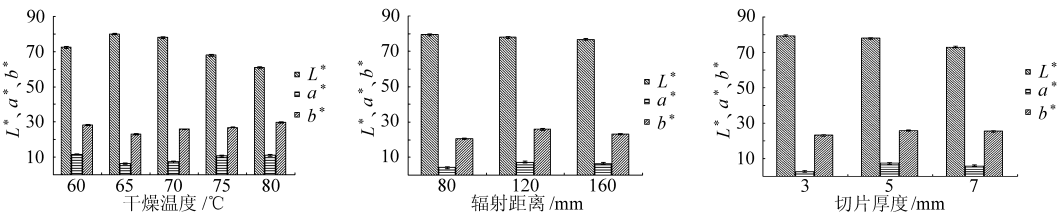


图 6 不同干燥条件对苹果片色泽的影响
Fig.6 Apple slices' color value under different drying conditions

3 结论

(1) 干燥温度、切片厚度和辐射距离对苹果片的干燥时间均有显著性影响。干燥时间随着干燥温度的升高而减少,随着切片厚度和辐射距离的增大而延长。各个因素影响顺序由大到小依次为:干燥温度、切片厚度、辐射距离。

(2) 通过费克第二定律得出,中短波红外干燥

表 4 常见农产品物料的干燥活化能

Tab.4 Drying activation energy of common vegetables		
物料	活化能 E_a /kJ·mol ⁻¹	来源
苹果	36.58	本文
胡萝卜	28.36	文献[21]
杏子	30.62	文献[18]
无核紫葡萄	67.29	文献[22]
青豆	39.47	文献[23]

苹果片干燥之后色泽基本保持不变。 L^* 值在 65℃ 时达到最大值,然后随着温度的上升而逐渐减小。这可能是因为:① 在干燥温度 60℃ 时,苹果中的多酚氧化酶(PPO)仍具有很高的活性^[24],在干燥过程中和氧气、水共同作用发生酶促褐变,使苹果片的明亮度降低。② 在温度不断升高的过程中,苹果中的糖类物质开始逐渐分解,发生美拉德反应,使苹果片的 L^* 值降低。因此适当的低温可以获得更高的 L^* 值,此结论与 Kamil^[25] 和 Yi^[10] 的研究结果一致。此外,随着褐变的增加, a^* 增加, L^* 减小^[26],故 L^* 值可以反映干燥后的苹果脆片的品质。当干燥温度在 65℃,辐射距离为 120 mm,切片厚度为 5 mm 时的 L^* 为 82.97,高于其他加工方法如微波真空干燥膨化得到的苹果片的 L^* (81.140) 和热风干燥得到的苹果片的 L^* (75.860)^[4]。考虑到干燥温度在 70℃ 时干燥速率大于 65℃ 的干燥速率,且色泽指标良好,故加工过程中可以选择干燥温度为 70℃。

条件下,物料具有较高的水分有效扩散系数,其值在 $(2.85 \sim 7.24) \times 10^{-10}$ m²/s 范围内,通过阿伦尼乌斯公式得出干燥活化能能为 36.58 kJ/mol。

(3) 干燥温度对干燥后的苹果片色泽具有显著影响。在干燥温度为 70℃,辐射距离为 80 mm,切片厚度为 5 mm 时既能缩短干燥时间又能使苹果片具有较高的 L^* (75.860)。

参 考 文 献

1 毕金峰,方芳,公丽艳,等. 苹果干燥技术研究进展[J]. 农产品加工·学刊,2010(3): 4~7.
Bi Jinfeng, Fang Fang, Gong Liyan, et al. Review on drying technology for apple[J]. Innovational Edition of Farm Products Processing,2010(3): 4~7. (in Chinese)
2 韩清华,李树君,马季威,等. 微波真空干燥膨化苹果脆片的研究[J]. 农业机械学报,2006, 37(8): 155~158,167.
Han Qinghua, Li Shujun, Ma Jiwei, et al. Microwave vacuum drying and puffing characteristics of apple chips[J]. Transactions of

- the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 155 ~ 158, 167. (in Chinese)
- 3 袁越锦, 徐英英, 党新安, 等. 热风真空组合干燥苹果片试验研究[J]. 食品科技, 2012, 37(4): 80 ~ 82, 85.
Yuan Yuejin, Xu Yingying, Dang Xin'an, et al. Experiments on drying of apple slices by combination of hot-air and vacuum[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(4): 80 ~ 82, 85. (in Chinese)
- 4 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的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 127 ~ 129.
Cheng Lili, He Xinyi, Guo Feifei, et al. Effects of colour protection treatment and puffing drying process on the quality of apple slices[J]. Food & Machinery, 2011, 27(1): 127 ~ 129. (in Chinese)
- 5 张丽丽, 王相友. 红外辐射加热技术在果蔬脱水干燥中的应用研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 193 ~ 195.
Zhang Lili, Wang Xiangyou. Development and discussion of infrared radiation drying technology on fruits and vegetables[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 193 ~ 195. (in Chinese)
- 6 林喜娜. 果蔬红外干燥模型的建立及在线实时检测系统设计[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
Lin Xi'na. Modeling and on-line measurement system design of infrared radiation drying for fruits and vegetables[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 7 Hasan Togrul. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(3): 311 ~ 323.
- 8 Dorota Nowak, Lewicki P P. Infrared drying of apple slices[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2004, 5(3): 353 ~ 360.
- 9 Souad Timoumi, Daoued Mihoubi, Fethi Zagrouba. Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-reddrying of apple slices[J]. LWT—Food Science and Technology, 2007, 40(9): 1 648 ~ 1 654.
- 10 Zhu Yi, Pan Zhongli. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4): 441 ~ 452.
- 11 刘云宏, 朱文学, 马海乐. 地黄真空红外辐射干燥模型[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 122 ~ 126.
Liu Yunhong, Zhu Wenxue, Ma Haile. Model of vacuum infrared radiation drying on rehmanniae[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 122 ~ 126. (in Chinese)
- 12 Swasdiwevi T, Devahastin S, Sa-adchom P. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(1): 100 ~ 106.
- 13 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 177 ~ 182.
Wang Xiangyou, Cao Ruibing, Sun Chuazhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 177 ~ 182. (in Chinese)
- 14 王相友, 林喜娜. 果蔬红外辐射干燥动力学的影响因素综述[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 114 ~ 120.
Wang Xiangyou, Lin Xi'na. Influence factors of kinetics of infrared radiation drying for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 114 ~ 120. (in Chinese)
- 15 Doyamz İ. Effect of pre-treatments using potassium metabisulphide and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(3): 281 ~ 287.
- 16 Ruiz Celma A, López-Rodríguez I, Cuadros Blázquez F. Experimental modeling of infrared drying of industrial grape by-products [J]. Food and Bioproducts Processing, 2009, 87(4): 247 ~ 253.
- 17 俞书宏, 马宝娇, 翁颐庆. 振动流化床(VFB)干燥性能及传热特性研究[J]. 武汉化工学院学报, 1992, 14(3 ~ 4): 99 ~ 104.
Yu Shuhong, Ma Baojiao, Weng Yiqing. Research on the dry performance and heat-transfer property of vibrates the fluid bed (VFB)[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 1992, 14(3 ~ 4): 99 ~ 104. (in Chinese)
- 18 肖红伟, 张世湘, 白峻文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 318 ~ 323.
Xiao Hongwei, Zhang Shixiang, Bai Junwen, et al. Air impingement drying characteristics of apricot[J]. Transactions of the CASE, 2010, 26(7): 318 ~ 323. (in Chinese)
- 19 Doyamz İ. Air-drying characteristics of tomatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1 291 ~ 1 297.
- 20 İbrahim Doymaz. Effect of citric and blanching pre-treatments on drying and rehydration of amasya red apples[J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88(2): 124 ~ 132.
- 21 Doymaz İ. Convective air drying characteristics of thin layer carrots[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 359 ~ 364.
- 22 Xiao Hongwei, Pang Changle, Wang Lihong, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 233 ~ 240.
- 23 Senadeera W, Bhandari B R, Young G, et al. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 58(3): 277 ~ 283.
- 24 刘树兴, 王乐. 苹果多酚氧化酶特性及无硫护色脱水研究[J]. 食品工业科技, 2011(3): 334 ~ 336.
Liu Shuxing, Wang Le. Characteristics of polyphenol oxidase in apple and non-sulfur prevention of discoloration in dried apple slice processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011(3): 334 ~ 336. (in Chinese)
- 25 Kamil Sacilik, Ahmet Konuralp Elicin. The thin layer drying characteristics of organic apple slices [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(3): 281 ~ 289.
- 26 Mandala I G, Anagnostaras E F, Oikonomou C K. Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(3): 307 ~ 316.