

# 桃片超声渗透-红外辐射干燥特性及能耗研究

张鹏飞, 吕健, 周林燕, 毕金峰, 刘璇, 吴昕烨

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 超声波的空化效应可提高渗透过程中传质效率。为研究桃片超声渗透-红外辐射干燥特性及干燥能耗, 进行了超声渗透后红外 60、70、80 °C 干燥试验, 得到干燥特性曲线, 建立干燥动力学模型; 同时, 对干燥过程的能耗进行了分析。结果表明: 超声可增加桃片渗透脱水速率和固形物渗入率, 超声渗透时间选择 30 min ( $T_1$ ) 及 60 min ( $T_2$ ) 为宜; Verma et al. 模型较好拟合了桃片超声渗透-红外辐射干燥规律, 未经渗透、 $T_1$  及  $T_2$  渗透处理桃片在 60、70、80 °C 干燥条件下水分有效扩散系数分别为  $8.8789 \times 10^{-9} \sim 1.3011 \times 10^{-8}$ 、 $7.1213 \times 10^{-9} \sim 1.0393 \times 10^{-8}$ 、 $6.6771 \times 10^{-9} \sim 8.7785 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ; 随着温度升高, 干燥所需能耗降低; 经超声渗透脱水后, 干燥所需能耗增加。不同条件下, 干燥能耗均在干基水分含量 0.3 左右急剧增加, 可作为水分转换点, 利用其它干燥方式, 如变温压差膨化干燥, 达到节约能耗、提高产品品质的目的。试验结果为桃片红外辐射干燥工艺参数优化及开发新型果蔬脆片提供参考。

**关键词:** 桃片; 红外辐射; 渗透脱水; 特性; 能耗

文章篇号: 1673-9078(2015)11-234-241

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.11.036

## Drying Characteristics and Energy Consumption of Peach Slices during Ultrasound-assisted Osmotic Dehydration in Combination with Infrared Radiation

ZHANG Peng-fei, LV Jian, ZHOU Lin-yan, BI Jin-feng, LIU Xuan, WU Xin-ye

(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The cavitation effect of ultrasonic waves can improve the efficiency of mass transfer in the process of osmotic dehydration. In order to study the drying characteristics and energy consumption of peach slices during ultrasound-assisted osmotic dehydration in combination with infrared radiation, drying experiments after ultrasound-assisted osmotic dehydration were carried out at 60, 70, and 80 °C, respectively; the drying curves were obtained, and the mathematical models for the drying kinetics were established. Meanwhile, the energy consumption during the drying process was analyzed. The results showed that ultrasound-assisted osmotic dehydration could improve the ratio of water loss and solid gain. The appropriate ultrasound-assisted osmotic times were set at 30 min ( $T_1$ ) and 60 min ( $T_2$ ), and the Verma et al. model was found to be suitable to describe the drying characteristics of peach slices during the ultrasound-assisted osmotic dehydration and infrared radiation. The effective moisture diffusivity values of non-treated,  $T_1$  and  $T_2$  treated peach slices at 60, 70, and 80°C were in the ranges of  $8.8789 \times 10^{-9} \sim 1.3011 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $7.1213 \times 10^{-9} \sim 1.0393 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , and  $6.6771 \times 10^{-9} \sim 8.7785 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectively. With the increase in temperature, energy consumption reduced but increased after ultrasound-assisted osmotic dehydration. Under different treatments, energy consumption increased rapidly with a moisture content of about 0.3 (dry basis), which can be a moisture conversion point to use other drying methods, such as explosion puffing drying at varied temperatures and pressures, to reduce energy consumption and improve product quality. This study provides a reference for the parameter optimization in the infrared drying of peach slices and the development of new fruit slices.

**Key words:** peach slices; infrared radiation; osmotic dehydration; characteristics; energy consumption

收稿日期: 2015-01-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503142)

作者简介: 张鹏飞(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向农产品加工及贮藏工

通讯作者: 毕金峰(1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为果蔬加工理论与技术

桃果实后熟期,会出现呼吸高峰和乙烯释放高峰,导致桃果实感官品质降低、采后寿命缩短<sup>[1]</sup>。果蔬干制作为一种重要的加工途径,发展迅速,市场前景良好,是延伸桃加工产业链的重要趋势。渗透脱水是指在一定温度下,将原料浸入高渗透压溶液中除去部分水分的一种方法。在渗透脱水过程中主要存在两个相反的过程,原料中的水分渗出和溶液中的溶质渗入,同时还有原料中少量可溶性物质的溶出<sup>[2]</sup>,如有机酸、还原糖、风味物质、色素等。超声波作为一种物理能量形式,可使介质粒子振动,这种振动在亚微观范围内引起超声空化现象,使固液体系中液体介质的质点运动增加,微孔扩散得以强化,从而提高渗透过程中传质效率<sup>[3]</sup>。然而渗透脱水只能除去部分水分,得到的产品仍具有较高含水率,难以实现长期保藏。因此有必要联合其他干燥方式将原料水分含量降至安全水平,常见的联合干燥方式包括渗透脱水-热风干燥、渗透脱水-真空油炸干燥、渗透脱水-冷冻干燥。红外辐射干燥,是一种新兴果蔬干燥技术。红外线是介于可见光和微波之间的电磁波,波长范围为0.76~1000 μm,根据波长把红外分为短波(近)红外(0.76~2 μm)、中波红外(2~4 μm)和长波(远)红外(4~1000 μm)3个区域<sup>[4]</sup>。红外干燥技术具有高效、节能、环保的特点,已成功应用于蓝莓、葡萄、苹果等干燥中,但国内外对于红外辐射干燥桃片的研究还未见相关报道。

目前,国内外学者主要集中研究了渗透脱水联合干燥的优势,即改善产品的组织结构,减小干燥过程中原料收缩,提高干制产品的复水性,保持产品较好的色泽及风味<sup>[5,6]</sup>。应用超声波渗透脱水可以在较低渗透温度下获得较高的水分损失及固形物增加,同时保留原料的天然风味、色泽及热敏性营养成分<sup>[7]</sup>。但渗透脱水后物料干燥特性及能耗报道较少,因此本文以桃片为原料,探究超声渗透时间及干燥温度对桃片红外辐射干燥过程及耗能情况的影响,得到相应的干燥特性曲线,确定适宜的数学模型,分析干燥能耗的变化,为桃片红外辐射干燥工艺参数优化及开发新型果蔬脆片提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

原料为久保桃,硬度、色泽、成熟度等基本一致,采摘于北京平谷(2014/7/20)。麦芽糖为食品级,购于桂林顺来意食品有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

本试验所用红外辐射干燥设备(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)、温度控制触摸屏两部分组成。其中DDS7178型单向数字电表及K型热电偶DT-610B自行设计安装于红外辐射干燥设备。

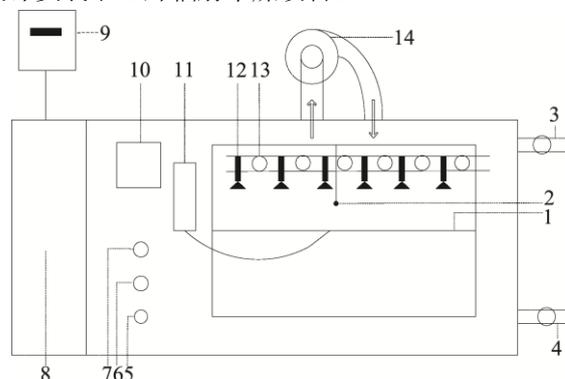


图1 红外辐射干燥箱结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of infrared drying equipment

注:1.物料托盘,2.红外温度传感器,3-4.进/出风口,5.风速调节器,6.触摸屏开关,7.风机开关,8.电源控制箱,9.电表,10.触摸屏,11.K型热电偶,12.喷风斗,13.红外加热管,14.鼓风机。

其他仪器设备:电子天平:AUW220型,日本岛津公司;超声波发生器(工作频率40 KHz,功率500 w):KQ-500Z型,昆山市超声仪器有限公司;手持阿贝折光仪:MASTER-2α,日本日立公司;电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9203,上海一恒科技有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 原料预处理

桃去皮去核后,切成厚度10 mm、直径20 mm的圆柱状。实验前将桃片贮于-18 °C冰柜中。采用105 °C恒温干燥法得到其初始干基水分含量为8.83 (d.b)。

#### 1.3.2 超声渗透脱水处理

将桃片从冰柜中取出,常温下解冻60 min。选用50 Brix(用阿贝折光仪校准)的麦芽糖溶液作为渗透液,渗透温度设定为40±1 °C;料液比设定为1:10,以防止渗透过程中出现稀释现象。超声渗透后,将桃片迅速取出,用流动的水清洗表面附着的糖液,并用吸水纸吸除表面水分。根据渗透过程中水分损失(Water loss, WL)、固形物增加(Solids gain, SG)选择适宜的超声渗透时间。WL及SG计算公式<sup>[8]</sup>如下:

$$WL(g/g) = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$SG(g/g) = \frac{m - m_0}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $M_0$ -原料初始鲜重(g), $M$ -原料某时刻鲜重(g),

$m_0$ -原料初始干重 (g),  $m$ -原料某时刻干重 (g)。试验重复3次, 取平均值。

### 1.3.3 红外辐射干燥

物料经超声渗透脱水后单层平铺放入已工作稳定的红外箱的托盘。固定辅助强度 (0.8 W/cm<sup>2</sup>) 及出口风速 (1 m/s), 前1 h每10 min记录样品质量变化, 之后每30 min记录样品质量变化, 直至质量变化小于0.02 g/30 min, 停止试验。考察超声渗透时间及干燥温度 (60、70、80 °C) 对于桃片干燥特性及能耗的影响, 试验重复2次。

### 1.3.4 干燥模型及评价指标

试验中所用4个干燥动力学数学模型, 见表1。

其中水分比 (moisture ratio,  $MR$ ) 用于表示一定干燥条件下样品的剩余含水率, 计算公式如下:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

式中,  $M$ -样品任意时刻的干基含水率,  $M_e$ -样品的平衡干基含水率,  $M_0$ -样品的初始干基含水率。

干燥速率 (drying rate,  $DR$ ) 计算公式如下:

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

式中,  $M_{t_1}$  和  $M_{t_2}$  分别为干燥到  $t_1$  和  $t_2$  时样品的干基含水率, g/g;  $t_1$  和  $t_2$  为对应的干燥时间, min。

表1 干燥曲线分析数学模型

Table 1 Mathematical models for drying kinetics

编号	模型名称	模型公式
1	Newton	$MR = \exp(-k \cdot t)$
2	Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
3	Henderson and pabis	$MR = a \exp(-k \cdot t)$
4	Verma et al.	$MR = a \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-g \cdot t)$

注: 数据引自参考文献<sup>[9]</sup>。

试验得到数据进行拟合回归分析, 并采用决定系数 $R^2$ 、卡方检验值 $\chi^2$ 及均方根误差 $RMSE$ 进行模型拟合评价,  $R^2$ 值越大、 $\chi^2$ 和 $RMSE$ 越小, 说明模型的拟合性越好。其表达式如下:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

### 1.3.5 水分有效扩散系数

当长方形、圆柱形和球形等形状的物料的干燥阶段处于降速干燥时, 可以用菲克扩散方程来描述其干燥特性。Crank认为干燥过程中水分迁移主要是利用水

分扩散进行, 并假设所有的样品都有相同的初始水分分布且忽略样品在干燥过程中的收缩, 那么样品有效扩散系数满足如下方程<sup>[10]</sup>:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

式中,  $D_{eff}$ -样品的水分有效扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $L$ -样品厚度的一半, m;  $t$ -干燥时间, s;  $n$ -考虑的组数。

对于长时间的干燥, 上式可以简化, 并以此计算出 $D_{eff}$ 。方程如下:

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

### 1.3.6 能耗计算

红外辐射干燥能耗由单向数字电表直接读出, 计算公式:

$$E = \frac{W \times 3600}{m} \quad (9)$$

$E$ -能耗 (kJ/g),  $W$ -电耗 (kW h),  $m$ -去除水分质量 (g)。

### 1.3.7 数据分析

采用SPSS19.0进行方差分析, 显著性差异水平 $p < 0.05$ 。采用Origin 8.0进行模型拟合、回归分析及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 超声渗透 WL 与 SG

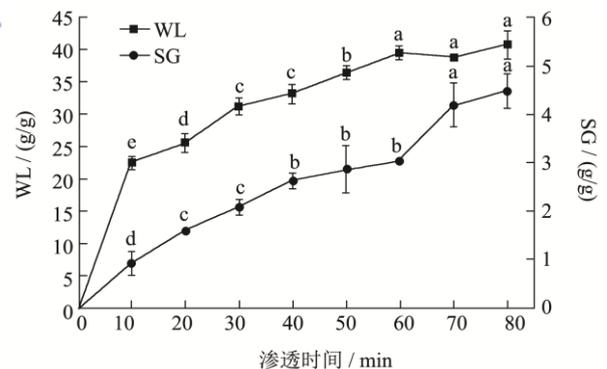


图2 超声渗透时间对 WL 及 SG 影响

Fig.2 Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration time on WL and SG

注: 同一指标不同字母表示差异显著。

超声渗透时间对桃片WL及SG的影响如图2所示。由图可知, 随着超声渗透时间的增加, WL与SG均逐渐上升。当超声渗透30 min时, WL为31.23±1.32%, SG为2.07±0.17%, WL较20 min有显著性差异, SG较40 min有显著性差异; 当超声渗透60 min时, WL为39.52±1.05%, SG为3.02±0.08%, WL较50 min有显著性差异, 且60 min后趋于平衡, SG较70 min有显著性

差异。超声渗透脱水进行到中后期，物料水分含量下降，渗透压差降低，最终导致传质推动力下降，*WL*趋于平衡。且长时间的超声渗透处理，果蔬组织结构明显破坏<sup>[11]</sup>，*SG*显著增加。此外，超声渗透60 min后，桃片出现糜烂现象，组织软化严重。

由图可知，超声渗透30 min，*WL*较60 min有显著性差异，*SG*较60 min有显著性差异。因此，30 min ( $T_1$ )及60 min ( $T_2$ )可作为后续红外辐射干燥超声渗透处理时间。超声渗透30 min，桃片干基水分含量为 $5.48 \pm 0.08$ ；超声渗透60 min，桃片干基水分含量为 $4.14 \pm 0.06$ 。

## 2.2 干燥特性

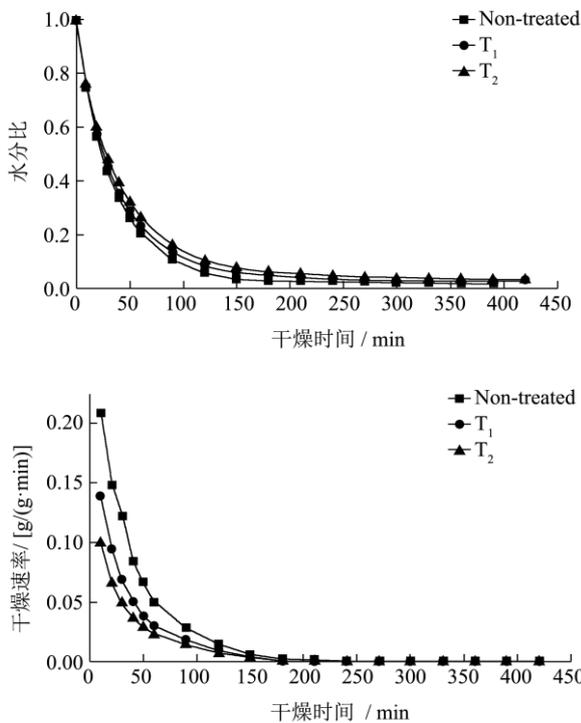


图3 60 °C下不同处理对桃片 *MR* 及干燥速率的影响  
Fig.3 Influence of different treatments at 60 °C on the moisture ratio and drying rate of peach slices

图3~5分别为经不同超声渗透处理的桃片，在60、70、80 °C的干燥特性曲线和干燥速率曲线。由图3可知，60 °C下，桃片的水分含量均随着干燥时间的延长而减少，干燥过程均属于降速干燥过程。未经渗透 (Non-treated) 的桃片干燥速率最大，水分含量随着时间延长降得最快，其次为 $T_1$ 处理组， $T_2$ 处理组干燥速率最小，水分含量随着时间延长降得最慢。同样的现象也出现在70及80 °C干燥过程中。干燥过程中存在“干区”与“湿区”，随着干燥进行，湿区直径加速减小，二者出现分离现象<sup>[12]</sup>。干湿界面逐步退缩到物料内部，物料表面成为干区，导致物料表面硬化、结

壳，进而使物料整体水分传递速率下降<sup>[12]</sup>。

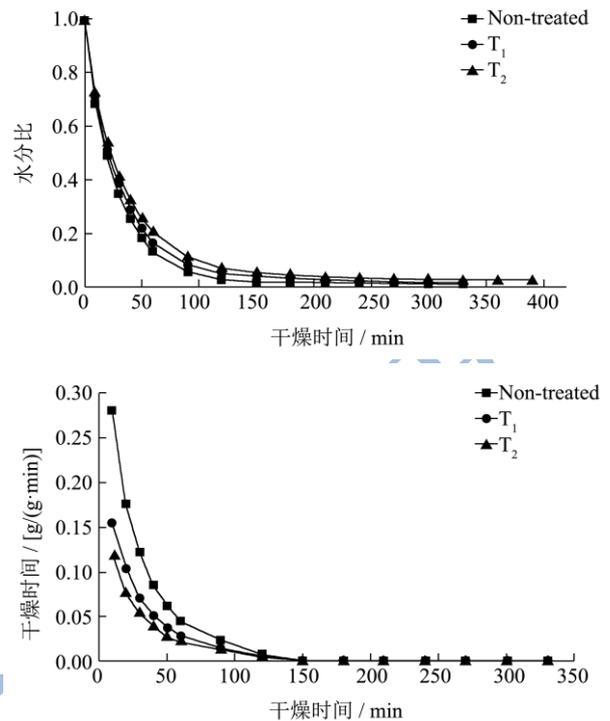


图4 70 °C下不同处理对桃片 *MR* 及干燥速率的影响  
Fig.4 Influence of different treatments at 70 °C on the moisture ratio and drying rate of peach slices

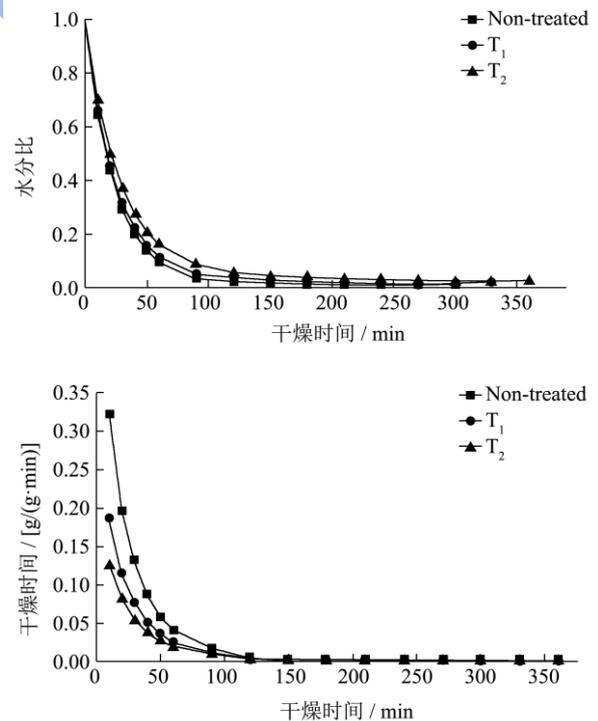


图5 80 °C下不同处理对桃片 *MR* 及干燥速率的影响  
Fig.5 Influence of different treatments at 80 °C on the moisture ratio and drying rate of peach slices

超声时间影响渗透过程中水分损失，导致红外辐射干燥初始干基水分含量 $T_2 < T_1 < \text{Non-treated}$ 。但是经

过超声渗透处理, 固形物渗入桃片内部, 且固形物渗入量 $T_1 < T_2$ 。由于固形物的渗入, 桃片干燥过程中水分向外扩散阻力增加, 导致干燥速率降低。

由图 3、4、5 也可知, 不同干燥温度 (60、70、80 °C) 对桃片红外辐射干燥特性的影响。针对同一渗透处理, 温度越高, 桃片干燥所需时间越短, 水分降低越快, 干燥速率越大。以  $T_1$  处理组为例, 干燥温度为 60、70、80 °C 时, 桃片干燥到安全含水率的时间分别约为 420、230、160 min。

### 2.3 干燥模型的拟合及求解

由表2可知, 所用4个数学模型均能较好地模拟桃片的红外辐射干燥过程中的水分变化, 其中Verma et al. 模型拟合程度最好, 其 $R^2$ 均值高达0.9997,  $RMSE$ 及 $\chi^2$ 的均值分别为0.0043、 $2.6515 \times 10^{-5}$ 。因此, 认为Verma et al.模型最适宜模拟桃片红外辐射干燥过程水分变化规律。

表 2 桃片干燥模型数据拟合结果  
Table 2 Fitting results of drying models for peach slices

干燥模型	干燥条件	模型参数			统计		
		k	a	g	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
Newton	60°C	0.0266			0.9976	0.0140	$2.0882 \times 10^{-4}$
	70°C	0.0352			0.9983	0.0118	$1.4733 \times 10^{-4}$
	80°C	0.0396			0.9990	0.0092	$9.0769 \times 10^{-5}$
	$T_1+60^\circ\text{C}$	0.0253			0.9893	0.0286	$8.6056 \times 10^{-4}$
	$T_1+70^\circ\text{C}$	0.0312			0.9945	0.0208	$4.6333 \times 10^{-4}$
	$T_1+80^\circ\text{C}$	0.0385			0.9961	0.0172	$3.1467 \times 10^{-4}$
	$T_2+60^\circ\text{C}$	0.0227			0.9854	0.0336	$1.2000 \times 10^{-3}$
	$T_2+70^\circ\text{C}$	0.0283			0.9896	0.0279	$8.2764 \times 10^{-4}$
	$T_2+80^\circ\text{C}$	0.0330			0.9916	0.0251	$6.6750 \times 10^{-4}$
Page	60°C	0.0337	0.9346		0.9982	0.0120	$1.6125 \times 10^{-4}$
	70°C	0.0457	0.9238		0.9991	0.0082	$7.642 \times 10^{-5}$
	80°C	0.0419	0.9834		0.9989	0.0090	$9.4167 \times 10^{-5}$
	$T_1+60^\circ\text{C}$	0.0500	0.8134		0.9950	0.0190	$4.9000 \times 10^{-4}$
	$T_1+70^\circ\text{C}$	0.0472	0.8824		0.9965	0.0162	$3.0143 \times 10^{-4}$
	$T_1+80^\circ\text{C}$	0.0521	0.9105		0.9971	0.0144	$2.3643 \times 10^{-4}$
	$T_2+60^\circ\text{C}$	0.0519	0.7790		0.9946	0.0199	$4.4118 \times 10^{-4}$
	$T_2+70^\circ\text{C}$	0.0549	0.8147		0.9950	0.0187	$3.9500 \times 10^{-4}$
	$T_2+80^\circ\text{C}$	0.0500	0.8134		0.9950	0.0190	$4.9000 \times 10^{-4}$
Henderson and pabis	60°C	0.0263	0.9905		0.9976	0.0138	$2.1375 \times 10^{-4}$
	70°C	0.0347	0.9877		0.9983	0.0112	$1.4357 \times 10^{-4}$
	80°C	0.0396	0.9985		0.9989	0.0091	$9.7500 \times 10^{-5}$
	$T_1+60^\circ\text{C}$	0.0243	0.9690		0.9896	0.0273	$8.3176 \times 10^{-4}$
	$T_1+70^\circ\text{C}$	0.0306	0.9829		0.9945	0.0202	$4.6857 \times 10^{-4}$
	$T_1+80^\circ\text{C}$	0.0380	0.9879		0.9959	0.0168	$3.2429 \times 10^{-4}$
	$T_2+60^\circ\text{C}$	0.0215	0.9593		0.9862	0.0317	$1.3000 \times 10^{-3}$
	$T_2+70^\circ\text{C}$	0.0273	0.9707		0.9899	0.0268	$8.0750 \times 10^{-4}$
	$T_2+80^\circ\text{C}$	0.0321	0.9765		0.9916	0.0242	$6.6467 \times 10^{-4}$
Verma et al.	60°C	0.0018	0.0304	0.0283	0.9999	0.0017	$3.4793 \times 10^{-6}$
	70°C	0.0039	0.0335	0.0375	0.9997	0.0043	$2.2557 \times 10^{-5}$
	80°C	-0.0015	0.0098	0.0002	0.9999	0.0018	$4.2595 \times 10^{-6}$
	$T_1+60^\circ\text{C}$	0.0034	0.0913	0.0300	0.9995	0.0060	$4.3057 \times 10^{-5}$

转下页

接上页

T <sub>1</sub> +70℃	0.0025	0.0494	0.0346	0.9998	0.0038	1.7895×10 <sup>-5</sup>
T <sub>1</sub> +80℃	0.0022	0.0362	0.0418	0.9998	0.0030	1.1343×10 <sup>-5</sup>
T <sub>2</sub> +60℃	0.0037	0.1218	0.0285	0.9993	0.0070	5.8699×10 <sup>-5</sup>
T <sub>2</sub> +70℃	0.0039	0.0924	0.0338	0.9995	0.0059	4.1614×10 <sup>-5</sup>
T <sub>2</sub> +80℃	0.0044	0.0775	0.0385	0.9996	0.0054	3.5731×10 <sup>-5</sup>

为进一步研究桃片超声渗透-红外辐射干燥过程中渗透时间 ( $T_{od}$ ) 和干燥温度 ( $T_{em}$ ) 对水分的影响, 可利用二次多项式对 Verma et al. 模型中的参数  $a$ 、 $k$ 、 $g$  的数值进行回归分析, 除了考虑每个独立变化因素的一次和二次作用外, 还需考虑各个因素之间的交互作用。发现因素的一次及其交互作用回归效果最好, 得到渗透时间、干燥温度与参数  $a$ 、 $k$ 、 $g$  之间的关系式如下:

$$a = 0.2514 + 1.5556 \times 10^{-5} T_{od} - 0.0033 T_{em} + 1.8 \times 10^{-5} T_{od} \cdot T_{em} \quad (R^2 = 0.9476) \quad (10)$$

$$k = 0.0123 - 1.7833 \times 10^{-4} T_{od} - 1.55 \times 10^{-4} T_{em} + 3.1667 \times 10^{-6} T_{od} T_{em} \quad (R^2 = 0.9115) \quad (11)$$

$$g = -0.0103 + 1.4778 \times 10^{-4} T_{od} + 6.8 \times 10^{-4} T_{em} - 3 \times 10^{-6} T_{od} T_{em} \quad (R^2 = 0.9765) \quad (12)$$

将式(10)、(11)和(12)代入 Verma et al. 模型中, 得到:

$$MR = (0.2514 + 1.5556 \times 10^{-5} T_{od} - 0.0033 T_{em} + 1.8 \times 10^{-5} T_{od} T_{em}) \exp[-(0.0123 - 1.7833 \times 10^{-4} T_{od} - 1.55 \times 10^{-4} T_{em} + 3.1667 \times 10^{-6} T_{od} T_{em})t] + (0.7486 - 1.5556 \times 10^{-5} T_{od} + 0.0033 T_{em} - 1.8 \times 10^{-5} T_{od} T_{em}) \exp[-(-0.0103 + 1.4778 \times 10^{-4} T_{od} + 6.8 \times 10^{-4} T_{em} - 3 \times 10^{-6} T_{od} T_{em})t] \quad (13)$$

## 2.4 水分有效扩散系数

运用菲克第二定律计算桃片超声渗透-红外辐射干燥水分有效扩散系数, 结果如表3所示。

表3 不同条件下桃片红外辐射干燥水分有效扩散系数

Table 3 Moisture effective diffusion coefficients of peach slices

under different drying conditions

干燥条件	有效扩散系数 $D_{eff}/(m^2 s)$	$R^2$
60℃	8.8789×10 <sup>-9</sup>	0.9421
70℃	1.1454×10 <sup>-8</sup>	0.9343
80℃	1.3011×10 <sup>-8</sup>	0.9209
T <sub>1</sub> +60℃	7.1213×10 <sup>-9</sup>	0.9361
T <sub>1</sub> +70℃	9.5064×10 <sup>-9</sup>	0.9326
T <sub>1</sub> +80℃	1.0393×10 <sup>-8</sup>	0.9136
T <sub>2</sub> +60℃	6.6771×10 <sup>-9</sup>	0.9461
T <sub>2</sub> +70℃	7.7859×10 <sup>-9</sup>	0.9341
T <sub>2</sub> +80℃	8.7785×10 <sup>-9</sup>	0.9259

由表3可知, 同一温度下, 不同渗透时间对  $D_{eff}$  值

影响不同。Non-treated的桃片  $D_{eff}$  值最大, 其次为 T<sub>1</sub> 处理组, T<sub>2</sub> 处理组  $D_{eff}$  值最小。以 70℃ 为例, Non-treated、T<sub>1</sub> 及 T<sub>2</sub> 处理组  $D_{eff}$  值分别为 1.1454×10<sup>-8</sup>~7.7859×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s。由于渗透时间越长, 固形物渗入量越大, 湿分扩散到表面阻力加大, 对原料内部水分迁移影响越大。

同一渗透处理下, 桃片水分有效扩散系数随着干燥温度的升高而升高。以 T<sub>1</sub> 处理组为例, 干燥温度为 60、70 及 80℃ 时, 桃片水分有效扩散系数为 7.1213×10<sup>-9</sup>~1.0393×10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s。随着干燥环境温度提高, 物料内部温度提高, 从而造成蒸汽压梯度使湿分扩散到表面并同时使液体湿分迁移。

## 2.5 能耗

由图6可知, Non-treated、T<sub>1</sub> 及 T<sub>2</sub> 处理组桃片在红外辐射干燥 60、70、80℃ 时, 能耗均随着干基含水率降低而增加。干燥初期, 随着干基含水率降低, 能耗增加相对缓慢; 之后, 能耗增加急剧。干燥可以看作是不同状态的水分按自由度大小逐个脱除的过程。桃片内部大部分水分为自由水, 其次为不易流动水和结合水。干燥前期, 桃片中自由水的自由度较大, 易于去除, 此阶段能耗随着干基含水率降低, 增加相对缓慢; 半结合水自由度低于自由水, 不易去除, 只在大部分自由水脱出后才开始缓慢被去除, 此阶段能耗随着干基含水率降低急剧增加<sup>[13]</sup>。但能耗随着水分状态(自由水、不易流动水及结合水)的具体变化还需通过低场核磁共振(LF-NMR)的横向弛豫时间反演谱进行探索分析, 这也是后续试验研究的内容。

同一温度, 不同渗透时间对能耗影响不同。以 70℃ 为例, 虽然初始干基含水率不同, 但去除相同比例的水分, Non-treated、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理组桃片所需能耗逐步增加。这也是由于渗透过程中固形物渗入桃片内部, 引起干燥过程中水分向外扩散阻力增加。同一渗透处理, 随着温度升高, 去除相同比例的水分所需能耗逐步降低。以 T<sub>1</sub> 处理组为例, 60、70、80℃ 下, 干燥所需能耗均逐步降低, 这与番石榴热风干燥能耗研究结果相一致<sup>[14]</sup>。

由图6可知, 在干基水分含量 0.3 左右, 不同条件的桃片能耗曲线均急剧增加, 此后干燥能耗较大。不同条件下桃片红外辐射干燥至干基含水率 0.3 时, 能耗

如图7所示。

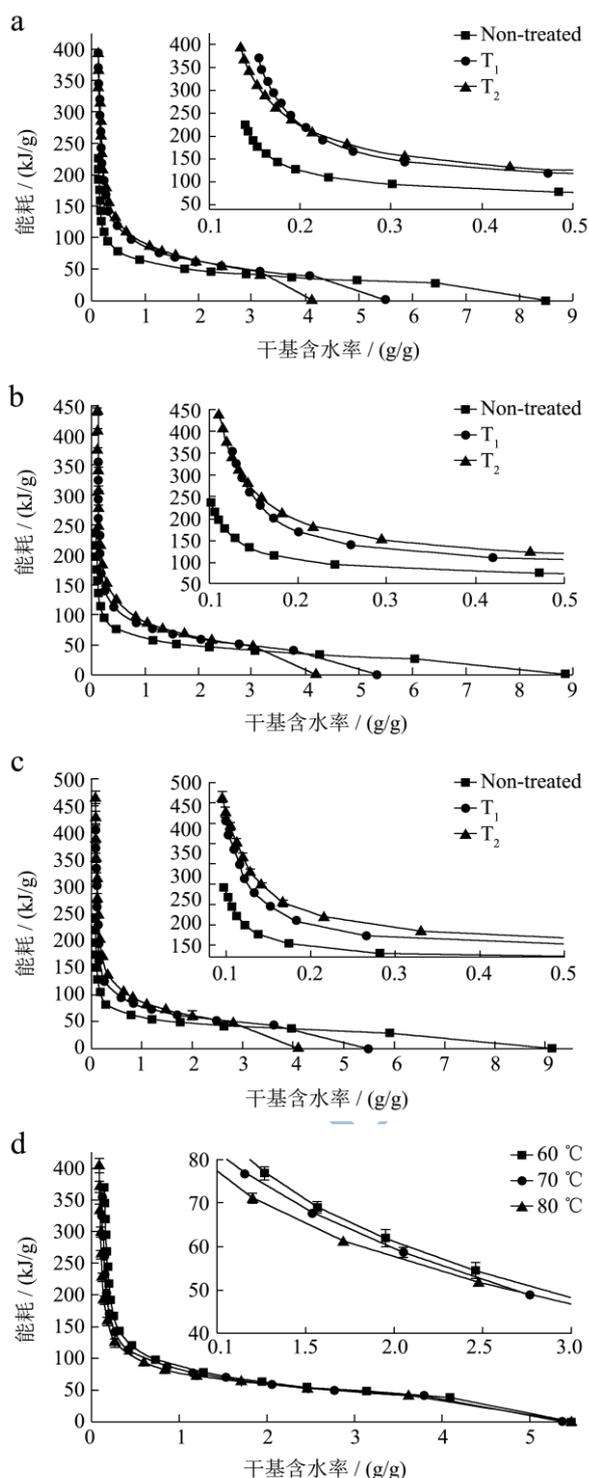


图6 不同条件下桃片红外辐射干燥能耗曲线

Fig.6 Drying profiles of energy consumption for the IR drying of peach slices under different conditions

注: a-60°C, b-70°C, c-80°C, d-T<sub>1</sub>。

未经渗透处理,桃片60、70、80 °C干燥所需能耗为93.75~80.25 kJ/g;经T<sub>1</sub>处理,桃片60、70、80 °C干燥所需能耗为151.50~123.50 kJ/g;经T<sub>2</sub>处理,桃片60、70、80 °C干燥所需能耗为162.55~143.75 kJ/g。充分利

用红外辐射前期干燥速率快,能耗低的优势,以干基水分含量0.3作为联合干燥水分转换点,之后联合其他干燥方式干燥至安全水分含量,如利用变温压差膨化干燥瞬间泄压,使物料内部水分瞬间蒸发,从而节约能耗,节省时间,延长产品的货架期。

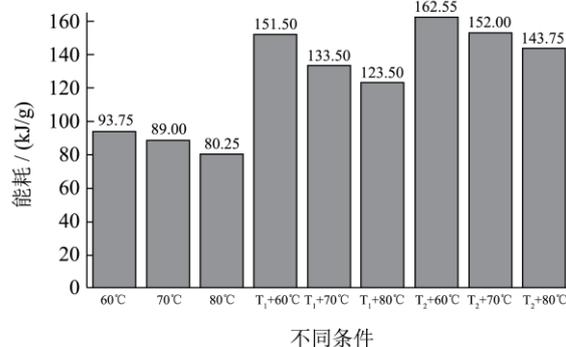


图7 不同条件下干燥至水分含量0.3(干基)能耗

Fig.7 Energy consumption when drying to a moisture content of 0.3 (d.b) under different conditions

### 3 结论

3.1 超声渗透脱水技术可提高桃片渗透过程中传质效率,增加脱水速率和固形物渗透率。但超声渗透时间60 min以内为宜,60 min后桃片组织结构破坏严重。根据固形物渗透量不同,超声渗透脱水时间选择30或60 min。

3.2 超声渗透脱水时间和干燥温度均会影响桃片红外辐射干燥速率。干燥速率随着渗透时间增加而降低,随着干燥温度升高而提高。

3.3 Verma et al. 模型能较好的反映桃片干燥过程,描述水分随时间的变化规律。未经渗透、T<sub>1</sub>及T<sub>2</sub>处理组桃片在红外辐射干燥60、70、80 °C水分有效扩散系数为 $8.8789 \times 10^{-9}$ ~ $1.3011 \times 10^{-8}$ 、 $7.1213 \times 10^{-9}$ ~ $1.0393 \times 10^{-8}$ 、 $6.6771 \times 10^{-9}$ ~ $8.7785 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3.4 随着温度的升高,桃片红外辐射干燥所需能耗降低;桃片经超声渗透脱水后,红外辐射干燥所需能耗增加。不同条件下,桃片干燥能耗均在干基水分含量0.3左右急剧增加。可以此作为联合干燥水分转换点,利用其它干燥方式,如变温压差膨化干燥,达到节省时间、节约能耗、提高产品品质的目的。

### 参考文献

[1] Manganaris G A, Vasilakakis M, Diamantidis G et al. Effect of calcium additives on physicochemical aspects of cell wall pectin and sensory attributes of canned peach (*Prunus persica* (L) Batsch cv Andross) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(10): 1773-1778

- [2] Kaymak-Ertekin F, Sultanoğlu M. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples [J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 46(4): 243-250
- [3] Deng Y, Zhao Y. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(9): 1575-1585
- [4] 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): 183-188  
WANG Xiang-you, CAO Rui-bing, SUN Chuan-zhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(7): 183-188
- [5] Zou K, Teng J, Huang L, et al. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 51(1): 253-259
- [6] An K, Li H, Zhao D, et al. Effect of osmotic dehydration with pulsed vacuum on hot-air drying kinetics and quality attributes of cherry tomatoes [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(6): 698-706
- [7] 张慜, 曹晖. 食品渗透脱水研究进展[J]. *干燥技术与设备*, 2005, 4: 3-9  
ZHANG Min, CAO Hui. Research and development of osmotic dehydration [J]. *Drying Technology and Equipment*, 2005, 4: 3-9
- [8] Yadav B S, Yadav R B, Jatain M. Optimization of osmotic dehydration conditions of peach slices in sucrose solution using response surface methodology [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(5): 547-555
- [9] Hii C L, Law C L, Cloke M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(2): 191-198
- [10] Doymaz İ. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(6): 760-766
- [11] Mulet A, Carcel J A, Sanjuan N, et al. New food drying technologies-use of ultrasound [J]. *Food Science and Technology International*, 2003, 9(3): 215-221
- [12] 徐建国, 徐刚, 张绪坤, 等. 利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 271-276  
XU Jian-guo, XU Gang, ZHANG Xu-kun, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12): 271-276
- [13] 张绪坤, 祝树森, 黄俭花, 等. 用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 282-287  
ZHANG Xu-kun, ZHU Shu-sen, HUANG Jian-hua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 282-287
- [14] Cal ñ-Sanchez Á, Figiel A, Szarycz M, et al. Drying kinetics and energy consumption in the dehydration of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils and rind [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(7): 2071-2083