

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.09.019

# 折射窗干燥装置设计与试验

## Design and drying test of refractance window drying equipment

张卫鹏<sup>1</sup> 聂一凡<sup>1</sup> 肖红伟<sup>2</sup>ZHANG Wei-peng<sup>1</sup> NIE Yi-fan<sup>1</sup> XIAO Hong-wei<sup>2</sup>郑志安<sup>2</sup> 巨浩羽<sup>3</sup> 黄志刚<sup>1</sup>ZHENG Zhi-an<sup>2</sup> JU Hao-yu<sup>3</sup> HUANG Zhi-gang<sup>1</sup>

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061)

(1. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. College of Bioscience

and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

**摘要:**分别以热水和碳纤维红外板为热源,设计并制作折射窗干燥(RW)装置、红外板折射窗干燥(IR-RW)装置,利用胡萝卜浆进行干燥试验验证,并与热风干燥结果进行对比。结果表明,RW和IR-RW干燥装置设计方案可行;当干燥温度为95℃时,二者均可在5min内实现2mm厚胡萝卜浆的快速脱水;干燥初期,二者的物料温度均迅速上升至60~75℃并保持恒定,且物料最高温度始终比干燥热源温度低约15~25℃;预热阶段,IR-RW装置仅需约2min即可达到设定温度,而RW干燥中热水需约30min达到设定温度;RW和IR-RW干燥样品的色差值、胡萝卜素含量无显著性差异( $P < 0.05$ ),分别约为17,10%,二者均未出现明显褐变和黏结现象;95℃热风干燥(HA)时间约为13min,胡萝卜素损失约32.58%,干燥产品色差值为37.5。

**关键词:**干燥;折射窗;碳纤维;胡萝卜;红外

**Abstract:** In order to explore a suitable drying device and method for heat-sensitive pulp materials, a refractance window dehydration (RW) device and an infrared refractance window de-

hydration (IR-RW) device were designed and manufactured with hot water and carbon fiber infrared plate as heat sources, respectively. The drying experiments were carried out with carrot pulp and also compared with the hot air drying. Both of the RW and IR-RW device were composed of feeding system, heating system, cooling system and unloading system. The control system was made of touch screen and a series of slave controllers. A control network was formed base on Modbus protocol to precisely control the parameters of drying process. The experimental results showed that the design scheme of RW and IR-RW drying devices was feasible and the work program was also reliable. When the drying temperature was 95℃, both of IR and IR-RW drying devices can achieve rapid dehydration, and the 2mm thick carrot pulp can be dried in 5min. The material temperature raised rapidly to 60~75℃ at the initial drying stage, and then gradually became stable in the middle drying stage, and decreased in the later drying stage. The maximum temperature of the material was 15~25℃ lower than that of the heating source of drying. In the preheating stage, it took about 2 minutes for the IR-RW device to reach the set temperature, while it took about 30 minutes for the hot water to reach the set temperature in the RW drying process. The quality attributes of the RW and IR-RW dried samples were not significantly different ( $P < 0.05$ ), and had the color difference ( $\Delta E$ ) and loss of carotene are about 17, 10% respectively. The required time for hot air drying at 75℃ was nearly 13min, and the loss of carotene was 32.58%. The HA drying samples had obvious browning and bonding phenomenon, and the color difference ( $\Delta E$ ) of HA samples was 37.5. The research results provided important information about pulp drying with RW and IR-RW drying technologies.

**基金项目:**现代农业产业技术体系建设专项资金资助(编号: CARS-21);北京市自然科学基金—市委联合资助项目(编号:KZ201810011017);国家重点研发计划(编号:2018YFD0400800、2016YFD0400305);国家自然科学基金(编号:31772026);北京市自然科学基金(编号:6204035);北京市教委组织部优秀人才项目(编号:2018000020124G034);河北经贸大学科研基金国家课题培育项目(编号:2018PY15)

**作者简介:**张卫鹏,男,北京工商大学讲师,博士。

**通信作者:**黄志刚(1966—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: huangzg@btbu.edu.cn

**收稿日期:**2020-05-08

**Keywords:** drying; refractance window; carbon fiber; carrot; infrared

折射窗干燥技术(Refractance window, RW)是一种新型薄层干燥技术,也称“偏流窗”干燥技术,可将经过调制处理的浆类物料快速干燥成粉状物料,便于贮藏运输,提高产品附加值。RW干燥装置常采用循环热水作为干燥热源,将特制的聚脂薄膜覆盖在热水表面,果浆等湿物料均匀喷涂在聚酯膜上,膜下热水的热量通过聚酯膜传递给膜上薄层湿物料,蒸发的水蒸气通过抽风机快速排出,加速物料脱水。

Lamidi等<sup>[1-2]</sup>指出浆类物料内部水分的快速蒸发,可在物料上方形成饱和蒸汽层,一定程度上遏制物料与氧气的接触,有利于营养成分的保持。Celli等<sup>[3]</sup>指出RW干燥的Haskap果浆,其花青素保留率高达90%。Caparino等<sup>[4-5]</sup>指出,当干燥温度一定时,干燥速率的快慢主要受膜上物料厚度的影响,芒果浆厚度由2 mm整加至3 mm时,干燥速率降低约40%。Bernaert等<sup>[6]</sup>指出针对高糖分物料,RW干燥技术比喷雾干燥更为有效,可有效避免干燥过程的“黏壁”现象。Abonyi等<sup>[7]</sup>发现RW干燥方式下 $\beta$ -胡萝卜素仅降低约9.9%,而转鼓干燥降低了约57%;Rajoriya等<sup>[8]</sup>发现RW干燥甚至可有效保留苹果片中的有效成分;Nemzer等<sup>[9]</sup>研究表明RW干燥有利于蓝莓浆中维生素B的保持,并将其同微波干燥、红外干燥、射频干燥归为第4代干燥技术。这些研究主要侧重于干燥工艺研究,未明确涉及具体的RW干燥装置设计,尚不能提供灵活可靠的工程应用解决方案,Raghavi等<sup>[10-11]</sup>也明确指出RW装置设计细节不清晰,制约了该技术的进一步推广应用。

RW技术以循环热水为热源,热水可循环利用,无排污;热水介质不与物料接触,避免了干燥物料的二次污染;具有一定的技术优势,但需要复杂的热水循环系统和保温装置。且热水温度的改变具有明显的滞后性,不利于干燥温度的快速调节。随着材料技术的发展和革新,新型红外热源——碳纤维红外板也逐步被推广到农业领域。因其具有发热面积大、厚度薄、温度便于调控的优势,已被应用于真空加热方面<sup>[12]</sup>。胡萝卜原料易得,且含有丰富的胡萝卜素和维生素C,加工而成的胡萝卜粉是婴儿辅食中的重要原料。试验拟先介绍碳纤维红外板发热特性和折射窗干燥原理,并提出基于碳纤维红外加热的红外折射窗干燥技术(Infrared Refractance Window, IR-RW);分别制作RW和IR-RW干燥装置,基于Modbus协议实现两种干燥装置的自动化控制方案;以胡萝卜浆为试验原料,验证该两种干燥装置设计方案的可行性,对比二者的薄层干燥特性;分析干燥效率、物料内部温度以及品质指标(色泽、胡萝卜素)的变化,为RW和IR-RW干燥技术的推广和应用提供理论依据。

## 1 整机结构及工作原理

### 1.1 碳纤维红外板发热特性

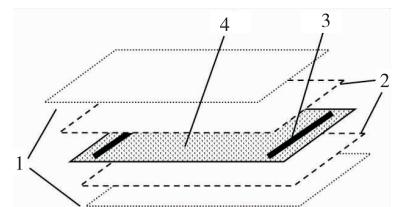
碳纤维红外板的核心发热材料是碳纤维导电纸或碳晶涂层。由于导电纸温度均匀性较差,试验选用碳晶涂层。其具体结构如图1所示,碳晶涂层4两侧粘贴电极3,上、下方分别依次覆盖基层层2和保护层1,最后经高温高压融为一体。厚度仅约为2~3 mm,碳纤维红外板长宽约为600 mm×900 mm。通电(220 V)后激发的红外电磁波,波长主要分布于5~15  $\mu\text{m}$ ,温度最高可达120  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 基于红外窗口效应的RW干燥原理

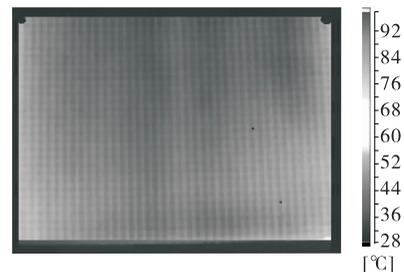
有关RW技术的干燥原理目前有两种截然不同的观点。观点一认为RW干燥有显著的“红外窗口”效应。其原理如图2(a)所示,热水表面覆盖的聚氨酯膜是一种导热性能较差的薄膜材料,可有效削弱循环水的蒸发作用及热传导作用带来的热量损失,但波长为3.0~15.3  $\mu\text{m}$ 的红外可有效穿过聚氨酯膜<sup>[13]</sup>。膜下热水被加热至约95  $^{\circ}\text{C}$ 。干燥初期,由于物料与热水温度差异大,物料与聚氨酯膜接触的部位形成一个可以使红外能量通过的“窗口”,热能主要以红外辐射的方式传送到物料。如图2(b)所示,随着物料内部水分受热蒸发,含水率的降低,物料与热水温度相近,该“红外线窗口”会逐渐关闭,能量只能以热传导的方式传送,而聚氨酯膜是热的不良导体,多余的热量又被薄膜折射回水中,从而有效避免了膜上物料被过度加热<sup>[14]</sup>,干燥后期物料温度也会出现降低的趋势。

### 1.3 基于非红外窗口效应的RW工作原理

观点二认为RW干燥的“红外窗口”效应并不显著,物料与聚氨酯膜贴合,热传导是其热量传递的主要方式。



1. 保护层 2. 基层层 3. 电极 4. 碳晶涂层  
(a) 结构简图



(b) 温度场分布图

图1 碳纤维红外板结构图

Figure 1 Photos of carbon crystal infrared plate

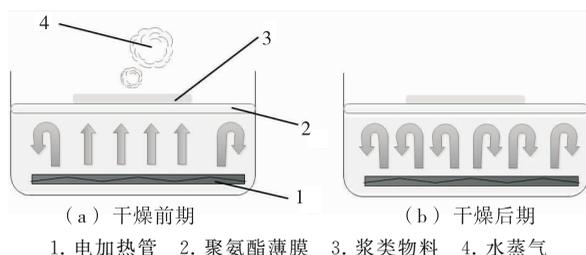


图 2 RW 热量传递过程示意图

Figure 2 Schematic diagram of RW heat transfer process

如图 3 所示,干燥后期,某些物料温度之所以降低,是因为随着物料脱水,物料与聚酯膜之间会产生气体间隙,降低了聚酯膜和物料之间的热传导系数,从而遏制了干燥后期物料温度的升高。RW 干燥过程中,适宜的干燥温度和较短的干燥时间,始终是保证物料干燥品质的关键。

基于上述各干燥工作原理的差异,对 RW 干燥过程“红外窗口”效应是否显著的判断,可转化为对干燥后期物料温度变化的判断,如干燥后期未出现物料温度降低的情况,则表明 RW 干燥后期热量不会被聚氨酯膜折射回水中,“红外窗口”效应不显著。

#### 1.4 RW 整机结构设计

如图 4 所示,RW 干燥装置由进料系统、加热系统、冷却系统和卸料系统 4 部分组成。进料系统可均匀地将物

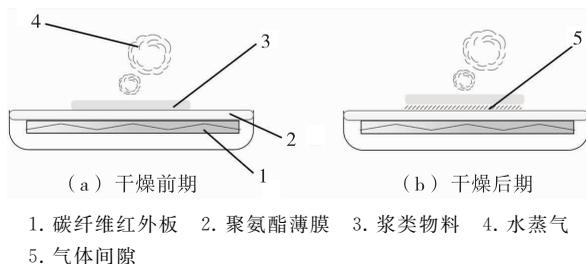
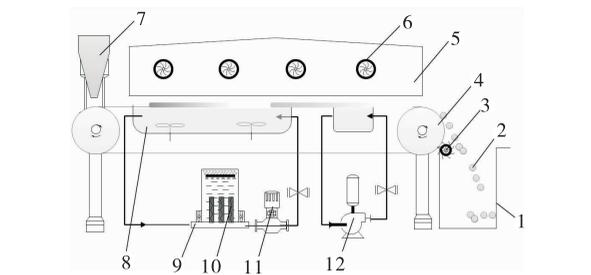


图 3 IR-RW 热量传递过程示意图

Figure 3 Schematic diagram of IR-RW heat transfer process



1. 集料仓 2. 物料 3. 卸料辊 4. 转动辊 5. 热风罩 6. 风机 7. 进料系统 8. 热水槽 9. 热水器 10. 电加热管 11. 循环水泵 12. 冷凝器

图 4 RW 干燥装置结构简图

Figure 4 Schematic diagram of RW drying equipment

料喷涂于传送带上,传送带浮于热水表面,在传动辊的带动下运动。热水温度由电加热管调控,在循环水泵的作用下,热水不断输送到热水槽内。当载有薄层物料的传送带经过此段热水体时,水分快速蒸发。干燥后期物料温度依然较高,直接进行包装,产品易黏结。而冷凝器可带动低温水体快速冷却产品,使物料温度降低至玻璃化转变温度以下,便于卸料。

#### 1.5 IR-RW 整机结构设计

如图 5 所示,IR-RW 整机结构与 RW 类似,但 RW 的热水加热系统被替换为碳纤维红外板,精简了设计结构。碳纤维红外板与聚酯膜相贴合,利于热量快速传导至上方湿物料。碳纤维红外板底部粘贴 DS18B20 温度传感器(深圳市华伟热电偶有限公司,精度 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),可实时反馈加热板温度,便于温度的精准调控。

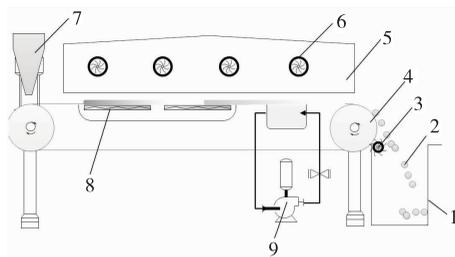
### 2 关键性零部件的设计与选型

#### 2.1 进料系统设计

浆类物料种类不同,流变特性、黏度系数也不同。常规食品级离心泵流量难以保持出口流量的稳定性。如图 6 所示,试验设计进料系统由蠕动泵、原料槽、布料喷嘴组成。一台挠性蠕动泵对应多个喷头,但因喷头位置不同,支管上最后一个喷头的压力总是低于第一个喷头的压力。为此,系统选用 FullJet 系列实心锥形喷嘴(斯普瑞喷雾系统有限公司),具有压力调节功能,每个喷头压力可精确调节至 0.15~0.25 MPa。

干燥装置传送带幅面宽度为 900 mm,喷嘴喷射幅面略小于传送带宽度。在喷射压力 0.2 MPa 下,对所需喷嘴数量进行了测试,结果如表 1 所示。由表 1 可知,当喷嘴数量为 3 时,喷雾夹角为  $30^{\circ}$ ,有效喷射距离为 380~420 mm,可满足喷射距离 400 mm 的要求。因此,3 个喷嘴等间距排列,即可满足系统设计的要求。

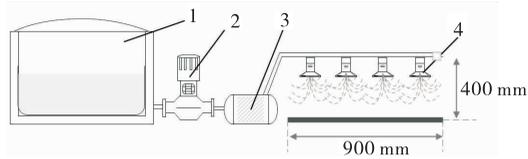
蠕动泵可平稳高效地输送含有固体颗粒的悬浮液、浆状物等。除泵头中软管外无其他部件会与物料接触,结构简单且可靠、避免了二次污染。并可通过调速器精



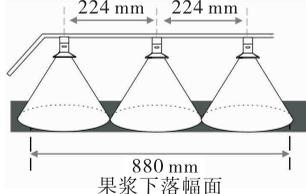
1. 集料仓 2. 物料 3. 卸料辊 4. 转动辊 5. 热风罩 6. 风机 7. 进料系统 8. 碳纤维红外板 9. 冷凝器

图 5 IR-RW 干燥装置结构简图

Figure 5 Schematic diagram of IR-RW drying equipment



1.原料槽 2.蠕动泵 3.缓存室 4.压力喷嘴  
(a) 进料系统结构简图



(b) 喷头工作示意图

图6 进料系统结构简图和喷头工作示意图

Figure 6 Structural chart of feeding system and spraying

表1 不同喷嘴数量喷射参数测试结果

Table 1 Test results of injection parameters with different number of nozzles

| 喷嘴数量 | 喷嘴间距/mm | 雾形夹角/(°) | 喷射距离/mm |
|------|---------|----------|---------|
| 2    | 300     | 40       | 340~380 |
| 3    | 224     | 30       | 380~420 |
| 4    | 180     | 20       | 420~460 |

确控制流量输出,按式(1)计算蠕动泵流量。

$$Q = rq = r \left( \frac{\pi^2 d^2 D}{4} \right)^{-6}, \quad (1)$$

式中:

$Q$ ——蠕动泵流量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;

$r$ ——蠕动泵转速,  $\text{r}/\text{min}$ ;

$q$ ——蠕动泵单位排量,  $\text{m}^3/\text{r}$ ;

$D$ ——泵壳圆周节圆直径,  $\text{m}$ ;

$d$ ——泵软管内径,  $\text{m}$ 。

因此, RW 和 IR-RW 装置的进料系统均选用 730DuN 蠕动泵(Watson-Marlow 中国有限公司),流量可达  $33 \text{ L}/\text{min}$ ,泵体转速调节范围为  $0.56 \sim 2\,000 \text{ r}/\text{min}$ ,具有 RS485 通讯功能,可配置输入输出功能。

## 2.2 RW 和 IR-RW 加热系统设计

如图 7 所示, RW 和 IR-RW 加热系统可简化为单面、薄层干燥模型。则物料水分蒸发所需热量为<sup>[15]</sup>:

$$Q_E = W_{s2} [(1 - X_{s2}) C_s T_{s2} + X_{s2} C_w T_{s2}] - W_{s1} [(1 - X_{s1}) C_s T_{s1} + X_{s1} C_w T_{s1}], \quad (2)$$

式中:

$Q_E$ ——物料水分蒸发所需热功耗,  $\text{kJ}/\text{h}$ ;

$W$ ——介质质量流量,  $\text{kg}/\text{h}$ ;

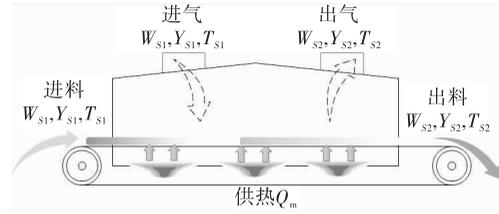


图7 热量传递示意图

Figure 7 Heat transfer diagram

$T$ ——介质温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$X$ ——物料中含水量, %;

$C$ ——介质比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$S$ ——物料中的固形物;

1——进口位置;

2——出口位置。

折射窗干燥装置的热效率为  $35\% \sim 48\%$ , 则其总热量可按式(3)计算:

$$\eta = \frac{Q_E}{Q_H}. \quad (3)$$

对于 RW 干燥装置, 能量由热水提供, 其总热量按式(4)计算:

$$Q_H = h_s S_B (T_H - T_s). \quad (4)$$

同理, IR-RW 的总热量可按式(5)计算:

$$Q_H = h_a S_B (T_{\text{carbon}} - T_s), \quad (5)$$

式中:

$h_a$ ——传导式干燥器的经验传热系数,  $\text{kJ}/(\text{h} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$ ;

$S_B$ ——干燥装置有效干燥面积,  $\text{m}^2$ ;

$T_H$ ——热水循环温度,  $90 \sim 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$T_s$ ——料层温度,  $40 \sim 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{carbon}}$ ——碳纤维红外板温度,  $90 \sim 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通过上述计算干燥装置的床层面积  $2.16 \sim 2.70 \text{ m}^2$ , 选定床层面积  $2.7 \text{ m}^2$ , 设定装置宽度为  $0.9 \text{ m}$ , 则长度为  $3 \text{ m}$ , 进而可得到其他设备关键尺寸。

## 2.3 RW 和 IR-RW 冷却系统设计

RW 和 IR-RW 干燥装置均通过冷凝器带动水体循环散热, 从而降低物料温度。为确保冷却系统满足设计要求, 需核算冷却系统散热能力。

$$T_{\text{out}} = T_{\text{in}} + \frac{Q_E}{\rho \cdot v \cdot C_p}, \quad (6)$$

式中:

$T_{\text{out}}$ ——冷却水出口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{in}}$ ——冷却水入口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{max}}$ ——系统允许冷却水最高出口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\rho$ ——冷却液体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$v$ ——冷却液体的流动速度,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$C_p$ ——冷却液体的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

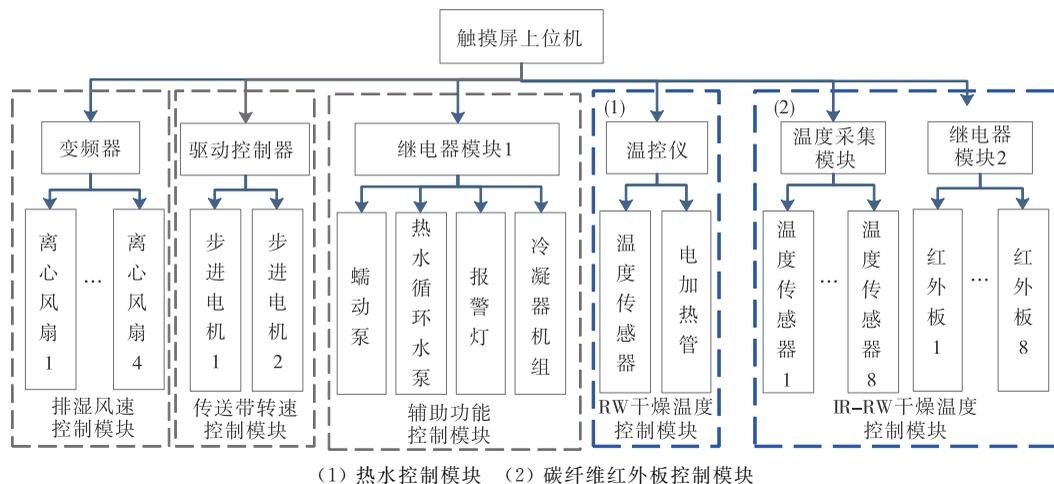


图 8 RW 和 IR-RW 控制系统结构图

Figure 8 Chart of RW and IR-RW control system

若  $T_{out} > T_{max}$ , 则冷凝系统不能解决散热问题, 需重新选配。根据计算试验装置选配 SC21CL 型号制冷机组 (杭州排浪科技有限公司)。

### 3 控制系统的设计

#### 3.1 RW 和 IR-RW 控制系统的总体设计

控制系统采用“主—从”机模式, 从机按功能可划分为排湿风速控制、传动带转速控制、辅助功能控制、干燥温度控制 4 个功能模块。如图 8 所示, 主机选用 MT6070iH 触摸屏 (Weinview 公司, 中国), 依据 Modbus 协议通过 RS485 串口, 分别与变频器、驱动控制器、继电器模块、温控仪等不同类型下位机进行通讯。主机执行自定义宏指令实时读取、存储下位机中寄存器数据, 并将其显示于人机交互界面。温控仪采用 PID 模式控制 RW 装置水槽中的电加热管, 调控热水温度。IR-RW 装置中碳纤维红外板温度变化敏捷, 采用 on/off 模式控制干燥温度。温度采集模块基于 I<sup>2</sup>C 协议读取 DS18B20 温度传感器数据, 并发送给主机。主机执行判断宏指令, 当读取温度高于设定值时, 向继电器模块 2 发生关闭指令, 停止碳纤维红外板加热, 否则通电开启加热。

排湿模块由变频器和离心风机组成, 采用耐高温型 HTDT-HTX200 温湿度传感器 (罗卓尼克, 瑞士) 读取物料上方湿度, 相对湿度测量精度为 1.5% RH。传送带由厚度为 1 mm 的聚酯膜和加强纤维黏合而成, 厚度薄, 强度高。传动辊表面压制有斜纹网格, 可增大摩擦系数。辅助功能工作模块通过零型固态继电器, 实现微小控制信号直接驱动大电流负载的蠕动泵、热水循环水泵、冷凝器机组、报警灯等。

#### 3.2 多从机通讯功能地址分配及实现流程

触摸屏循环发送读取指令, 监控各从机状态。根据内部嵌入的宏指令执行相应的逻辑判断。从机按图 8 中

从左到右的顺序, 依次分配不同的从机地址 (0x00 ~ 0xff)。触摸屏依据 Modbus 协议读取、写入数据的执行过程如图 9 所示。从机接收指令, 依照功能码来区分是读指令还是写指令, 随之进行 CRC 校验, 错误则舍弃该指令。同时判断该从机地址是否与其分配的从机地址相匹配, 不正确则舍弃该帧信息, 接收下一帧。若正确, 则根据信息帧中的功能码来执行不同的程序, 如系统的启停、返回温度数据等, 然后组织响应信息帧, 将其上传至触摸屏。

#### 3.3 RW 和 IR-RW 控制系统软件设计

触摸屏主机程序包括系统界面以及宏指令库。系统界面通过 Easybuilder 8000 开发环境编制, 如图 10 所示,

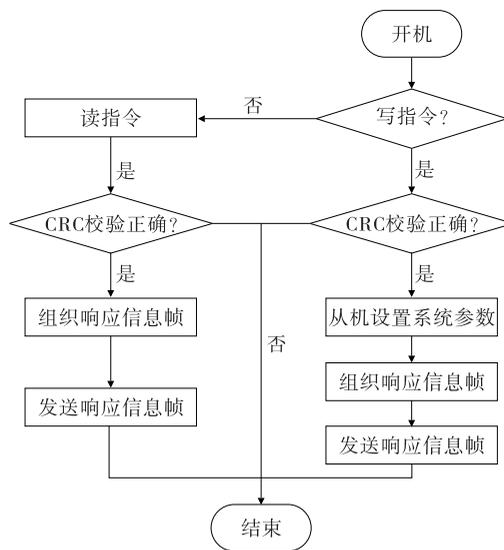


图 9 信息帧的解析与执行流程

Figure 9 Interpretation and implementation process of information frame

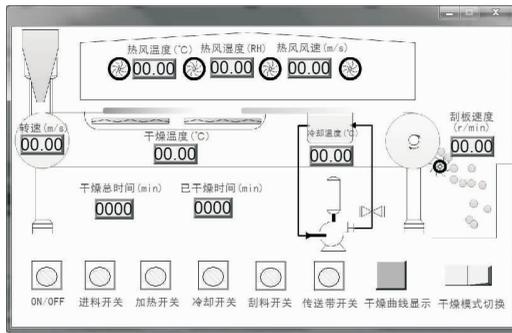


图 10 触摸屏控制界面

Figure 10 Control interface of touch screen

可动态显示、设置传动辊转速、总干燥时间、干燥温度、冷却温度等工艺参数。IR-RW 装置控制系统界面和 RW 装置类似,由右下角“干燥模式切换”按钮切换控制界面。

关键宏指令执行流程如图 11 所示。RW 装置和 IR-RW 装置热水、碳纤维红外板加热模块的宏指令分别对应(1)、(2)所示虚线框。触摸屏控制系统基于 Flag 标志位状态,对装备进行逻辑控制,当 Flag 为 1 时,表明干燥尚未结束,上位机获取设定的干燥参数,结合控制逻辑发送控制指令,控制传动辊转速、干燥温度、排湿风速等参数的调控。当 Flag 为 0 时,表明干燥时间结束,上位机发送停机指令。

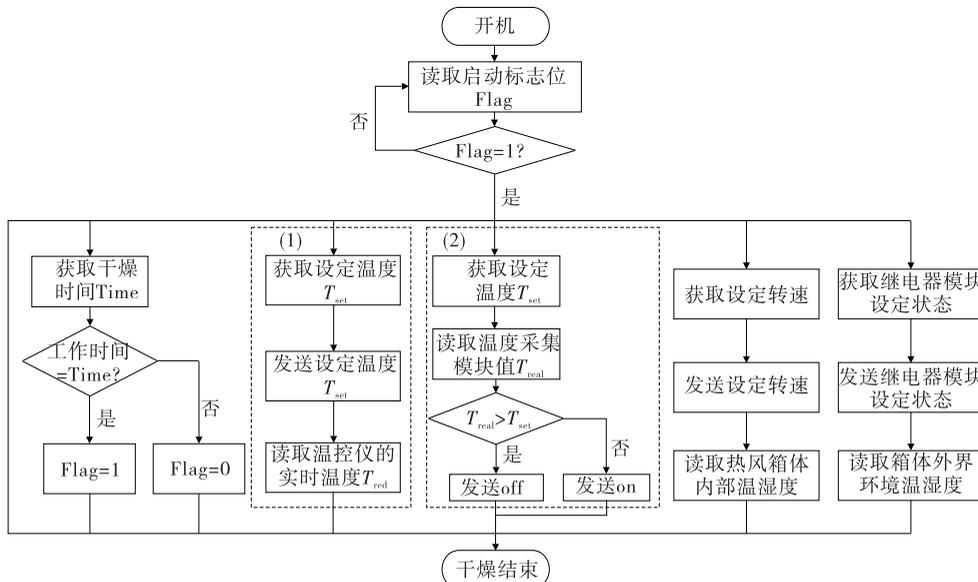


图 11 触摸屏关键宏指令执行流程图

Figure 11 Flow chart of key instruction execution of touch screen

## 4 试验装置验证材料与方法

### 4.1 试验材料及预处理过程

新鲜胡萝卜经打浆、均质后冷藏备用,备料过程耗时 < 30 min。结合 GB/T 5009.3—2010 中的直接干燥法,测定胡萝卜浆的湿基含水率为 (97.4 ± 0.42)%。

### 4.2 试验仪器及方法

RW 和 IR-RW 干燥装置均采用 NJZSD-002 型箱体(南京腾飞干燥设备有限公司),可分别安装热水加热系统、碳纤维红外加热系统,对应配置成 RW 和 IR-RW 干燥装置。如图 12 所示,RW 干燥前后胡萝卜浆状态发生明显改变,适宜干燥工艺下,干燥后胡萝卜浆无明显板结现象。对照组物料采用 101-1S 热风干燥箱(上海力辰仪器科技有限公司)烘干,热风干燥(HA)温度与 RW 和 IR-RW 干燥温度相同。

### 4.3 干燥特性参数计算

4.3.1 含水率测定 结合预试验,循环水温和碳纤维红

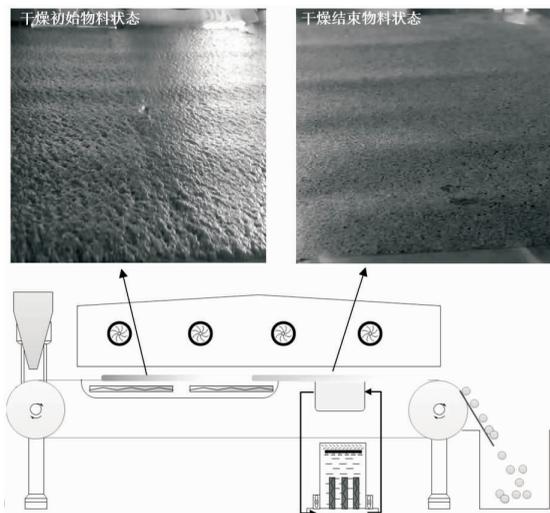


图 12 胡萝卜浆折射窗干燥前后典型物料状态

Figure 12 Typical material state of carrot pulp before and after RW drying

外板温度设定为 95 ℃。机器暂停后,从取样窗口快速取样,采用 SH10A 快速水分测定仪(上海花潮实业有限公司)测定传送带不同位置物料含水率。所有试验胡萝卜浆喷涂密度均为 0.02 L/m<sup>2</sup>,干基含水率 < 8% 时停止试验,冷却后装入聚乙烯塑料袋,真空密封包装。

#### 4.3.2 色泽、胡萝卜素、物料温度检测

(1) 色泽:干燥后产品色泽参数通过  $\Delta E$  值评价,用 HT-2000 型色差仪(深圳宏泰创想科技有限公司)测定。 $\Delta E$  值越小,表明干燥前后色泽差异越小。

(2) 胡萝卜素含量:参照 GB 5009.83—2016 的方法进行。

(3) 物料温度:RW 热水温度由温控仪获取,IR-RW 红外板温度由温度采集模块获取。聚氨酯膜的上表面温度、物料温度均由 852B 型红外测温仪(东莞万创电子制品有限公司)测定。

4.3.3 数据处理 所有试验均重复 3 次,采用 Excel 2007 软件作图。

## 5 结果与分析

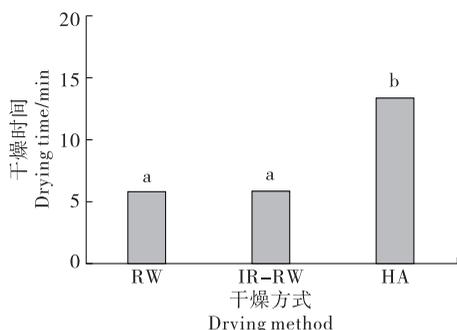
### 5.1 不同干燥方式的干燥时间对比

由图 13 可知,HA 的干燥时间最长,约为 13 min;RW 和 IR-RW 干燥仅需约 5 min,且二者无显著性差异 ( $P < 0.05$ ),表明碳纤维红外板加热系统可有效替代 RW 装置中的热水加热系统,且二者均可有效缩短胡萝卜浆的干燥时间。

### 5.2 微观结构和干燥温度曲线变化对比

5.2.1 微观结构 干燥过程通常会改变农产品物料的理化特征和质地结构<sup>[16-17]</sup>。RW 干燥和 IR-RW 干燥后物料微观结构类似,其典型电镜图如图 14 所示,干燥胡萝卜浆上表面粗糙,下表面与聚氨酯薄膜接触面,呈光滑状态,表明干燥过程中与聚氨酯薄膜贴合紧密,有利于热量传递<sup>[18]</sup>。

5.2.2 干燥温度曲线 由图 15 可知,碳纤维红外板迅速升温至 95 ℃,传送带温度也随之升温至 90 ℃,升温时间



字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 13 不同干燥方式下的干燥时间

Figure 13 Drying time of different drying methods

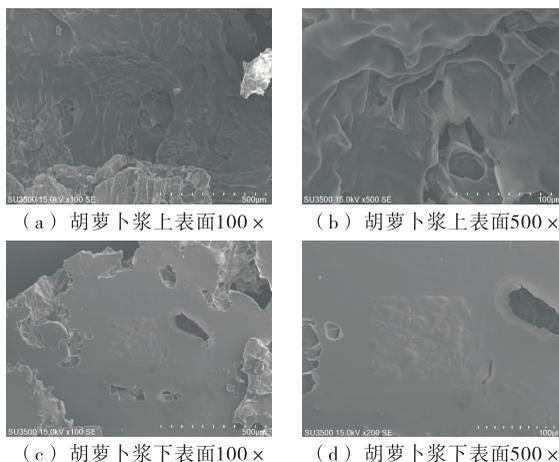


图 14 折射窗干燥胡萝卜浆典型微观结构

Figure 14 Typical picture of refractance window dry carrot pulp

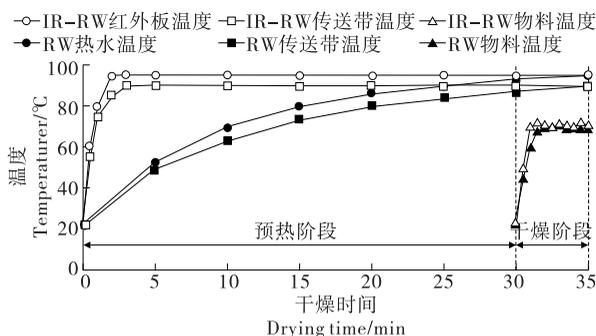


图 15 IR-RW 和 RW 装置温度变化曲线

Figure 15 Temperature changing curves of IR-RW and RW drying system

仅需约 3 min,且二者变化均较平稳,表明控制系统采用 on/off 模式可有效控制碳纤维红外板温度变化。RW 装置热水加热系统升温较慢,是因为该方式采用 PID 模式控制热水温度,热水升温速率主要与电加热管功率有关;预热 30 min 后,RW 传送带温度维持约 90 ℃。干燥阶段,胡萝卜浆喷涂于 RW 和 IR-RW 装置传送带,物料 2 min 内由室温快速升高至约 75 ℃直至干燥结束,并未出现物料温度降低的趋势,表明折射窗干燥红外窗口效应并不显著。证明 RW 和 IR-RW 干燥主要基于非红外窗口效应,依靠热传导传递热量。Jimena 等<sup>[19]</sup>通过理论计算,证明折射窗干燥过程中红外辐射传递的热量仅占约 5%,热量传递主要依靠热传导进行;但 Zotarelli 等<sup>[20]</sup>在芒果浆的干燥中发现干燥后期物料温度呈降低的趋势;这可能是由于物料特性不同,随着果浆逐渐脱水,物料与传送带之间产生间隙,空气的存在增大了热阻,阻碍了热量的传递。当胡萝卜浆浓度过高,浆液喷涂厚度过大时,会出现板结、起壳现象,物料温度也随之降低。

### 5.3 色泽、胡萝卜素含量对比

试验测得新鲜胡萝卜浆的  $L$ 、 $a$ 、 $b$  值分别为 53.4, 28.8, 44.0。由图 16 可知, RW 和 IR-RW 干燥后产品疏松, 未出现明显的黏结情况; RW、IR-RW、HA 干燥后产品的色差值  $\Delta E$  分别为 17.3, 17.8, 37.5, 且 RW 和 IR-RW 干燥的产品色泽无显著性差异, 色泽明显优于 HA 干燥。这可能与热风干燥时间较长, 酶促褐变严重有关, 与 Nascimento 等<sup>[21]</sup> 在猕猴桃片 RW 干燥中的结论相类似。新鲜胡萝卜浆中胡萝卜素含量约为 1.78 mg/g, RW、IR-RW、HA 干燥后胡萝卜素含量分别为 1.60, 1.61, 1.20 mg/g; 热风干燥胡萝卜素含量明显较低, 三者损失率分别为 10.11%, 9.55%, 32.58%。Ortiz-Jerez 等<sup>[22]</sup> 指出, RW 较短的干燥时间意味着较高的蒸发强度, 水分的快速散失可提高传送带上方的水蒸气浓度, 一定程度上遏制了物料与氧气的接触, 有利于营养成分的保持。

## 6 结论

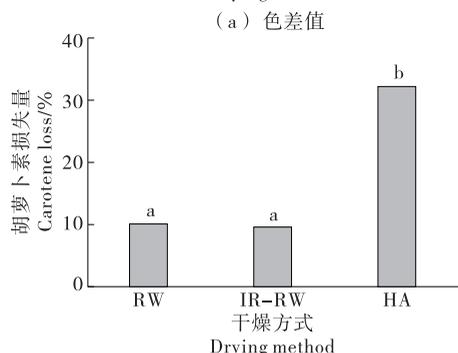
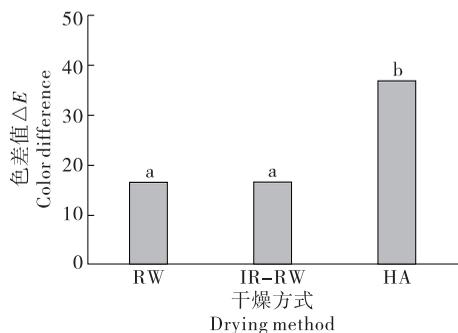
为实现浆类物料的有效干燥, 试验设计了基于热水加热、碳纤维红外板加热的折射窗干燥、红外折射窗干燥装置, 并以胡萝卜浆为原料进行试验验证。结果表明: ① 基于干燥温度等状态参数的监测, 采用 Modbus 协议对装备进行时序控制, 实现浆类物料的连续干燥。针对折射窗干燥装置, 采用 PID 模式策略精确调控干燥温度; 针对红外折射窗干燥装置中碳纤维红外板外板厚度薄、温度敏捷性高的特点, 采用 on/off 模式调控碳纤维红外

板温度, 检测温度变化过程验证了控制方案的可行性。

② 折射窗干燥和红外折射窗干燥的结果无显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 干燥时间、色差值  $\Delta E$ 、胡萝卜素损失量分别约为 5 min, 17, 10%; 但红外折射窗干燥装置在预热阶段, 升温速率明显高于折射窗干燥装置, 当干燥温度为 95 °C 时, 传送带表面温度约为 75 °C; 二者同热风干燥过程相比, 胡萝卜浆干燥时间缩短了 150%, 且品质明显较优。③ 折射窗干燥技术目前还处于应用探索阶段, 其过大的占地面积影响了其推广应用; 针对目前的小规模中试, 物料加工种类还有待进一步拓展; 因其可直接用来干燥液体或浆类物料, 快捷高效, 可推测适用于喷雾干燥、闪蒸干燥的物料同样可用于折射窗干燥。

### 参考文献

- [1] LAMIDI R O, JIANG L, PATHARE P B, et al. Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review[J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 367-385.
- [2] NINDO C I, TANG Ju-ming. Refractance window dehydration technology: A novel contact drying method[J]. Drying Technology, 2007, 25(1): 37-48.
- [3] CELLI G B, KHATTAB R, GHANEM A, et al. Refractance window™ drying of haskap berry: Preliminary results on anthocyanin retention and physicochemical properties[J]. Food chemistry, 2016, 194: 218-221.
- [4] CAPARINO O A, NINDO C I, TANG Ju-ming, et al. Physical and chemical stability of Refractance Window-dried mango (*Philippine 'Carabao' var.*) powder during storage[J]. Drying technology, 2017, 35(1): 25-37.
- [5] CAPARINO O A, SABLANI S S, TANG Ju-ming, et al. Water sorption, glass transition, and microstructures of refractance window-and freeze-dried mango (*Philippine "Carabao" var.*) powder[J]. Drying Technology, 2013, 31(16): 1 969-1 978.
- [6] BERNAERT N, VAN D B, VAN P E, et al. Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 84: 22-24.
- [7] ABONYI B I, FENG H, TANG Ju-ming, et al. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(3): 1 051-1 056.
- [8] RAJORIYA D, SHEWALE S R, HEBBAR H U. Refractance window drying of apple slices: Mass transfer phenomena and quality parameters[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(10): 1 646-1 658.
- [9] NEMZER B, VARGAS L, XIA Xiao-yan, et al. Phytochemical and physical properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by different drying methods[J]. Food Chemistry, 2018, 262: 242-250.



字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 16 不同干燥条件下的色差值、胡萝卜素损失量

Figure 16 Color difference and loss of carotene

(下转第 141 页)

表1 苹果真空打浆机性能测试

Table 1 Evaluation of performance characteristics of the apple vacuum pulper

| 真空度/<br>MPa | 产量/<br>(kg · h <sup>-1</sup> ) | 褐变度<br>(OD <sub>420 nm</sub> ) | PPO 活性/<br>(U · g <sup>-1</sup> ) | POD 活性/<br>(U · g <sup>-1</sup> ) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0.010       | 1 510                          | 0.21                           | 0.01                              | 0.06                              |
| 0.006       | 1 550                          | 0.24                           | 0.02                              | 0.14                              |
| 0.000       | 1 613                          | 0.75                           | 0.04                              | 0.36                              |

变问题,可以显著提高苹果果浆质量,苹果浆为苹果原色,口感与新鲜苹果无异。

## 5 结论

试验提出了真空设计理念,解决了苹果打浆过程中的氧化褐变问题,保证了苹果浆原汁原味;转轴采用分段设计,解决了运行过程中可能出现的打浆叶片碰撞筒体内壁磨损和安全事故;选择优质电动球阀、采用闭气式卸料器和气动阀门结构,确保了打浆机内部系统密封性,保证苹果破碎、打浆在真空下进行。保证后续的浓缩、脱气、杀菌、灌装等生产工艺中<sup>[13]</sup>的真空环境,可最大程度实现苹果汁生产的全真空状态。

## 参考文献

[1] 易建华. 褐变抑制剂对苹果多酚氧化酶抑制机理研究[J]. 食

品与机械, 2015, 31(4): 122-125.

[2] 段志芳. 陈皮黄酮对苹果汁氧化褐变的抑制作用[J]. 中国食品添加剂, 2018(7): 138-143.

[3] 梁亚男. 苹果汁褐变控制技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018(3): 280-286.

[4] 王了. HPTLC-SERS 快速检定葡萄汁中苏丹染料掺假[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 59-64, 77.

[5] 李恩山. 国内外果蔬汁加工机械的现状与发展趋势[J]. 农牧与食品机械, 1994(1): 6-8.

[6] 马荣明, 杨晓清. 食品机械与设备[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 67-72.

[7] 罗会昌. 机械工程材料工艺学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 77-86.

[8] 毛广卿. 粮食输送机械与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 273-283.

[9] 倪永良, 王海范, 崔琴. 高度毒性介质负压操作容器制造技术要求的确定[J]. 石油和化工设备, 2015(7): 5-7.

[10] 吴宗泽. 机械设计实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 901-1 242.

[11] 赵明生. 机械工程师手册[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2001: 659-669, 1 176-1 178.

[12] 陈春. 氧化白藜芦醇对鲜切苹果及果汁褐变的影响[J]. 食品工业科技, 2019(20): 285-289, 295.

[13] 胥洪. 高倍苹果果浆加工关键技术研究[J]. 食品工业, 2017(8): 5-9.

(上接第 115 页)

[10] RAGHAVI L M, MOSES J A, ANANDHARA-MAKRISHNAN C. Refractance window drying of foods: A review [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 222: 267-275.

[11] JIN Wei, MUJUMDAR A S, ZHANG Min, et al. Novel drying techniques for spices and herbs: A review[J]. Food Engineering Reviews, 2018, 10(1): 34-45.

[12] 张卫鹏, 肖红伟, 郑志安, 等. 基于碳纤维红外板加热的干燥装备设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 242-251.

[13] AZIZI D, JAFARI S M, MIRZAEI H, et al. The influence of refractance window drying on qualitative properties of kiwifruit slices[J]. International Journal of Food Engineering, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0201>.

[14] CASTOLDI M, ZOTARELLI M F, DURIGON A, et al. Production of tomato powder by refractance window drying[J]. Drying Technology, 2015, 33(12): 1 463-1 473.

[15] MUJUMDAR A S. Handbook of industrial drying[M]. 3rd ed. Taylou; CRC Press, 2006: 263-730.

[16] 王教领, 宋卫东, 丁天航, 等. 澳洲坚果中红外干燥机设计与试验[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 110-114.

[17] 卢映洁, 任广跃, 段续, 等. 基于温度梯度的带壳花生热

风干燥收缩模型研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 148-154.

[18] BAEGHBALI V, NIAKOUSARI M. A review on mechanism, quality preservation and energy efficiency in refractance window drying: A conductive hydro-drying technique [J]. Journal of Nutrition, Food Research and Technology, 2018, 1(2): 50-54.

[19] JIMENA M, GULATI T, DATTA A K, et al. Quantitative understanding of refractance window<sup>TM</sup> drying[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 95: 237-253.

[20] ZOTARELLI M F, CARCIOFI B A M, LAURINDO J B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by refractance window [J]. Food Research International, 2015, 69: 410-417.

[21] NASCIMENTO C S, RODRIGUES A M C, SILVA L H M. Development of a dehydrated product with edible film characteristics from mammee apple (*Mammea americana* L.) using Refractance Window drying[J]. Food Science and Technology, 2020, 40(1): 245-249.

[22] ORTIZ-JEREZ M J, OCHOA-MARTINEZ C I. Heat transfer mechanisms in conductive hydro-drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*) pieces[J]. Drying Technology, 2015, 33(8): 965-972.