

## 基于碳纤维红外板加热的干燥装备设计与试验

张卫鹏<sup>1,3</sup>, 肖红伟<sup>1</sup>, 郑志安<sup>1,3</sup>, 潘忠礼<sup>2</sup>, 薛令阳<sup>1</sup>,

张玉明<sup>4</sup>, 方小明<sup>5</sup>, 刘嫣红<sup>1</sup>, 高振江<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 加利福尼亚大学戴维斯分校生物与工程系, 戴维斯 95616, 美国;  
3. 中国农业大学中国农业机械化发展研究中心, 北京 100083; 4. 上海热丽科技集团有限公司, 上海 200125;  
5. 中国农业科学院蜜蜂研究所, 北京 100093)

**摘要:** 为探索基于碳纤维红外板加热的真空脉动干燥特性, 该文将碳纤维红外干燥技术和真空脉动干燥技术相结合, 设计了基于碳纤维红外板的真空脉动干燥装备。该装备由干燥室、真空系统、单层干燥单元、控制系统组成。为便于分析, 将实际真空脉动过程划分为 4 个阶段: 抽真空阶段、真空保持阶段、破空阶段、常压保持阶段。设计了基于 MODBUS 协议的控制系統, 以触摸屏为主机, 单片机为从机, 组成控制器网络。基于干燥室内真空度的监测, 采用时序控制, 实现干燥室内“真空—常压”的连续转换。基于对碳纤维红外板温度的监测, 结合物料内部温度的反馈, 实现对干燥温度的有效调控。并以 20 mm×20 mm×5 mm 的苹果块为试验原料进行试验验证。结果表明: 1) 该干燥装备设计方案和控制方案可靠, 可实现“真空—常压”的连续脉动, 并有效干燥物料; 2) 碳纤维红外板功率 1.1 kW/m<sup>2</sup>, 发热面距离料盘上表面 3 cm 情况下, 干燥效果更佳; 3) 当碳纤维红外板表面温度为 65 ℃ 时, 在真空保持阶段, 苹果块内部温度约为 31 ℃, 常压阶段, 会迅速上升到约 37 ℃。干燥后期, 碳纤维红外板表面温度有波动下降趋势, 适当降低其温度有助于干燥进行。相比红外热风干燥, 苹果块干燥时间缩短 30%; 4) 两种干燥方式下干燥的苹果块色泽存在明显差异, 真空脉动红外干燥较优。该文研究的干燥装备和研究结果可应用于苹果块等果蔬物料的干燥, 并可为红外干燥技术、真空脉动干燥技术的联合应用提供理论依据。

**关键词:** 干燥; 红外加热; 碳纤维; 装备设计; 苹果块

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.032

中图分类号: TS255.1; TQ028.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0242-10

张卫鹏, 肖红伟, 郑志安, 潘忠礼, 薛令阳, 张玉明, 方小明, 刘嫣红, 高振江. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.032

<http://www.tcsae.org>

Zhang Weipeng, Xiao Hongwei, Zheng Zhian, Pan Zhongli, Xue Lingyang, Zhang Yuming, Fang Xiaoming, Liu Yanhong, Gao Zhenjiang. Design and experiment of vacuum pulsed drying equipment based on carbon fiber infrared heating plate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 242—251. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.032 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

真空脉动干燥技术, 是指干燥室内压力按照一定规律周期性脉动变化的干燥技术<sup>[1]</sup>。其相比于普通真空干燥, 针对适宜的物料, 具有干燥效率高、品质较好的优势<sup>[2]</sup>。普通真空干燥技术, 往往采用一个真空度或“真空保压”的方式, 物料受热后表面的水蒸气分压容易于干燥环境中的水蒸气分压平衡, 造成湿度梯度下降, 降低物料的脱水效率<sup>[3]</sup>。而真空脉动干燥技术, 由于采用连续

的周期性压力切换, 不断打破水分蒸发的平衡状态, 从加速干燥进程。Chua 等<sup>[4]</sup>采用真空脉动干燥土豆块, 发现由于干燥室内压力的不断循环变化, 物料的微观孔道也不断地被挤压与扩张, 使微孔加深, 并形成微孔之间的连通通道, 利于物料内部水分向外迁移。曹志向等<sup>[5]</sup>在胡萝卜丁的滚筒真空脉动干燥中发现, 脉动压真空干燥平均干燥速率提高 17.8%。其现已被应用于苹果块<sup>[6]</sup>、茯苓<sup>[7]</sup>、葡萄<sup>[8]</sup>等物料的研究表明, 该技术不仅能够大幅缩短干燥时间, 而且还能够获得较好的干燥品质。

真空状态下无空气等热对流传递介质, 主要依靠热传导和热辐射两种方式传递能量<sup>[9]</sup>。现有真空脉动干燥装备, 乃至真空干燥装备的热源通常采用“热水循环”或电加热板, 通过热传导加热物料。枸杞<sup>[10]</sup>等椭球形物料与加热板的接触面积较小, 为“点接触”传热, 如果干燥工艺设定不合理, 则干燥时间较长, 能耗较高。

红外辐射干燥是一种依靠电磁辐射传播能量的干燥方式<sup>[11-12]</sup>。辐射传热过程为“面接触”, 物料受热面积大, 且可穿透物料表层, 从内部加热物料, 红外辐射能

收稿日期: 2016-01-20 修订日期: 2016-06-15

基金项目: 国家科技支撑项目 (2015BAD19B010201), 国家自然科学基金 (31501548), 上海热丽科技集团有限公司 (总公司) 技改项目。

作者简介: 张卫鹏, 男 (汉), 河南西华人, 博士生, 主要从事干燥装备与生物干燥特性的研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: zwp880905@126.com

\*通信作者: 高振江, 男 (蒙古族), 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农产品 (食品) 的加工技术与装备研究, 北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: zjgao@cau.edu.cn

量直接与水分耦合，可有效提高物料干燥效率<sup>[13]</sup>。并可在干燥过程中灭酶<sup>[14-15]</sup>、灭虫<sup>[16-18]</sup>。红外干燥、红外联合热风、红外联合真空等干燥技术现已被应用在牛肉干<sup>[19]</sup>、西红柿<sup>[20]</sup>、稻米<sup>[21]</sup>、胡萝卜片<sup>[22]</sup>等物料的加工中。但常用干燥装备红外热源通常为石英电加热管，温度通常在 400℃以上<sup>[23]</sup>，结构复杂，且通常不耐真空，尤其是极端的压力变化环境。不利于红外加热技术的推广应用。

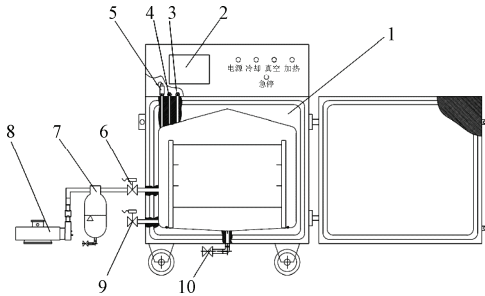
由碳纤维制作的红外加热板，可在 220 V 电压的激励下，激发红外线，能量转化效率高。且具有加热能力强、升温速度快的优势。将该种新型材料作为红外热源应用于干燥领域，可将真空脉动干燥和红外干燥技术的优势有效结合，实现农产物料的快速有效干燥。

为此，本文结合碳纤维红外板自身物理特性，设计并制造基于碳纤维红外板加热的真空脉动干燥装备，基于 MODBUS 协议实现自动化控制方案。以常见物料苹果为试验原料进行性能验证，并与普通热风干燥相对比，分析干燥速率、物料内部温度变化、色泽等指标。为基于碳纤维红外板加热的真空脉动干燥装备的设计制造和应用提供技术依据。

1 整机结构与原理

1.1 整机结构

基于碳纤维红外板加热的真空脉动干燥装备由真空系统、加热系统、控制系统三部分组成，较适合农产物料的薄层静态干燥。干燥室内部有多层料盘，可有效提高物料装载量。具体结构如图 1 所示。



1.干燥室 2.触摸屏 3.红外板温度传感器 4.物料温度传感器 5.压力传感器 6.真空电磁阀 7.冷凝器 8.真空泵 9.破空电磁阀 10.排水阀  
1.Drying chamber 2.Touch screen 3.Infrared plate temperature sensor 4.Material temperature sensor 5.Pressure sensor 6.Vacuum valve 7. Condenser 8.Vacuum pump 9. Air solenoid valve 10.Drain solenoid valve

图 1 基于碳纤维红外板加热的真空脉动干燥装置

Fig.1 Schematic diagram of infrared pulsed vacuum drying equipment based on carbon fiber infrared heating

真空系统包括水循环式真空泵（上海万经泵业制造有限公司，2BV2070 型）、冷却装置（佛山市科威力制冷设备有限公司，FNF-2.8/13 型）、板式冷凝器（上海将星化工设备有限公司，JXB50）、干燥室（南京腾飞干燥装备有限公司）。其中，板式冷凝器可利用低温冷壁来捕集物料干燥过程蒸发的可凝性蒸气，缩短真空抽气时间<sup>[24]</sup>。干燥室壳体由 304 不锈钢焊接而成，外为槽钢焊接的框架，以保证其整体强度。干燥室外部管道上连接有真空电磁阀（上海威尔顿阀门制造有限公司，

GU-20G 型）、破空电磁阀（厂家同上）。

加热系统的核心部件为单层红外干燥单元，由碳纤维红外板（上海热丽科技集团总公司）、T 形框架（南京腾飞干燥装备有限公司）、PT100 温度传感器（深圳市华伟热电偶有限公司，精度±0.2℃）组合而成。

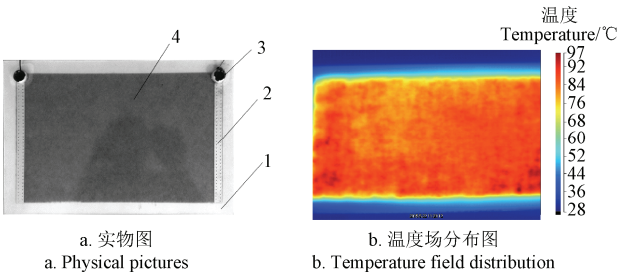
控制系统以 MT6070iH 触摸屏为主机（威纶通科技有限公司）、单片机（Microchip 公司）为从机，由 PT100 温度传感器(同上)、压力传感器 MIK-P300（杭州美控自动化技术有限公司，精度等级 0.1%FS）、信号变送器（浙江天康电子有限公司）组成，控制真空电磁阀、破空电磁阀的协调动作，调节干燥室内真空度和真空保持时间。实现常压—真空的连续脉动。主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数  
Table 1 Main technical parameters

参数 Parameters	数值 Values
外形尺寸(长×宽×高) Boundary dimension (length, width and height) /mm	2700×1200×1500
温度控制范围及精度 Range and accuracy of temperature/℃	(30~120)±0.5
相对真空度控制范围及精度 Range and accuracy of relative vacuum/kPa	(0~97)±2
料盘尺寸 Tray dimension/mm	560×430
总功率 Total power/kW	3
干燥室容积 Drying chamber volume/m <sup>3</sup>	1.5

1.2 工作原理

由碳纤维材料制作的红外辐射板，属直热式红外加热器，为“面发热”材料，可直接将电能转化为辐射能。如图 2 所示，发热层为一层碳纤维导电纸构成。将碳纤维导电纸 4 两侧粘贴电极，并置于上、下两层基材层中间，经黏合剂粘贴、热压融为一体即可；整个碳纤维红外板长宽约 60 cm×90 cm，厚度 2~3 mm，易形变；通电（220 V）后激发的红外电磁波，波长主要分布在 5~15 μm，发热面温度最高可达 120℃。其中，周围 2 cm 宽为非加热区，不能有效加热物料。干燥时，料盘需位于发热面的正下方。



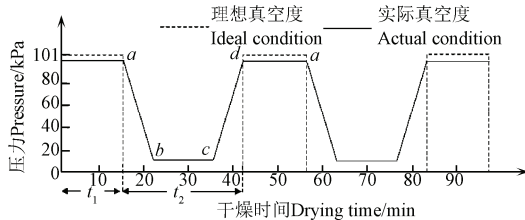
1.基材层 2.电极 3.电极结点 4.碳纤维导电纸  
1.Material layer 2.Electrode 3.Electrode junction 4.Carbon fiber conductive paper

图 2 碳纤维红外板实物图

Fig.2 Photos of carbon crystal infrared plate

真空脉动技术可在一次完整干燥过程中连续进行升压降压循环。理想状况下真空脉动干燥压力变化如图 3 虚线所示。在常压和绝对真空度之间交替循环。即干燥室内压力首先由常压保持一段时间（图中  $t_1$ ），然后变为真空，再保持一段时间（图中  $t_2$ ），如此循环往复直到干

燥的结束。所述脉动比即为真空时间  $t_2$  与常压时间  $t_1$  之比。但实际干燥作业时, 绝对的真空很难达到, 且压力传感器的模拟量信号向数字量信号转化过程中存在精度误差, 抽真空和破空过程都需要一定时间。因此, 实际脉动过程是在接近常压 ( $(95 \pm 3) \text{ kPa}$ ) 和接近真空 ( $(0 \sim 6) \text{ kPa}$ ) 之间交替循环, 如图 3 实线所示。



注:  $a$ 、 $d$  分别常压保持时间终点、起点;  $b$ 、 $c$  分别为真空保持时间起点、终点;  $t_1$ 、 $t_2$  分别为常压保持时间、真空保持时间。  
Note:  $a$ 、 $d$  are the end point, starting point of atmospheric pressure, respectively;  $b$ 、 $c$  are the starting point, end point of vacuum, respectively;  $t_1$ 、 $t_2$  are the atmospheric pressure holding time, and vacuum holding time, respectively.

图 3 真空—常压脉动示意图

Fig.3 Schematic diagram of vacuum and atmospheric pressure

为便于分析, 将实际脉动过程划分为  $ab$  抽真空阶段、 $bc$  真空保持阶段、 $cd$  破空阶段、 $da$  常压阶段。干燥机组的真空泵启动后, 真空电磁阀首先打开, 在  $ab$  段, 干燥室内压力迅速达到额定真空度。在  $bc$  段, 控制系统通过 PID 控制策略调控真空电磁阀开启/闭合, 维持干燥室内的额定压力。 $cd$  段, 真空电磁阀完全闭合, 破空电磁阀打开, 干燥室内压力迅速恢复到常压状态。 $da$  段, 破空电磁阀关闭, 等待下一个循环开始。

## 2 关键性零部件的设计与选型

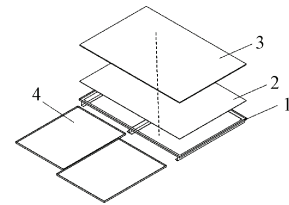
### 2.1 料架结构设计及安装

碳纤维红外板的辐射加热系统与以往的热蒸汽、电加热板的热传导加热系统不同, 其周围有约 2 cm 的“非加热区”; 红外板较薄, 平放时通电发热后会凹陷形变, 红外辐射能量的传递与辐射间距的负二次方正相关<sup>[25]</sup>, 辐射间距太大, 不利于热量传递, 辐射间距太小, 红外板微小形变即可导致局部热量集中, 温度过高。结合预试验, 确定红外板下表面与料盘底部上表面的较佳距离为 3 cm。

料架结构设计要求如下: 保证料盘易于装卸, 料盘内部物料可有效避开“非加热区”, 均匀受热, 并能够保证适宜的辐射间距。为此, 将碳纤维红外板和料盘通过支撑架集成于一体, 成为一个结构、功能完整的干燥模块—单层红外干燥单元。如图 4 所示。

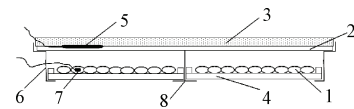
框架上部有效宽度 604 mm×904 mm, 可使红外板直接嵌入料架内部。碳纤维红外板发热面朝下, 为提高红外板的辐射干燥效果, 在其上又覆盖保温层, 避免红外辐射向上传递。碳纤维红外板、保温层沿图 4a 虚线方向垂直嵌入支撑架, 通过框架边框和中间横梁的支撑, 避免红外板自身重力导致的凹陷以及受热产生的物理形变。整个单层红外干燥单元最后逐个集成到可移动料车上, 提高物料装载率。单个料盘大小为 430 mm×560 mm,

可沿“L”槽“T”形槽推进, 保证物料辐射的均匀性及物料装卸的便捷性。相比于热传导加热系统, 该加热装置可使物料由“点接触”传热变为“面接触”辐射传热, 提高传热面积和效率。



1. 框架 2. 碳纤维红外板 3. 保温层 4. 料盘  
1. Support frame 2. Carbon fiber infrared plate 3. Thermal insulating layer 4. Material tray

a. 单元结构示意图  
a. Single infrared drying unit



1. 物料 2. 碳纤维红外板 3. 保温层 4. 料盘 5. 红外板温度传感器 6. “L”槽 7. 物料温度传感器 8. “T”形槽  
1. Materials 2. Carbon fiber infrared plate 3. Thermal insulating layer 4. Material tray 5. Infrared plate temperature sensor 6. “L”groove 7. Material temperature sensor 8. “T”groove

b. 单元传感器分布  
b. Sensor distribution

图 4 单层红外干燥单元结构及传感器分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of single infrared drying unit and sensor distribution

碳纤维红外板为面发热材料, 其正下方的物料均匀单层分布, 且距离较近, 红外板辐射传热过程可简化为两无限大平行灰体表面的辐射换热问题。该装置系统黑度为<sup>[26]</sup>

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (1)$$

式中  $\varepsilon_s$  为任意位置两灰体表面的系统黑度, 无量纲;  $X_{1,2}$  为角系数, 与辐射源尺寸和红外板直接的距离  $L$  有关, 距离越大, 值越小, 此处值为 15;  $\varepsilon_1$  为辐射源黑度, 此处范围为 0.70~0.90;  $\varepsilon_2$  为待干燥物料黑度, 不同物料取值范围不同, 此处范围为 0.6~0.95。  $A_1$ 、 $A_2$  为辐射源与被干物料的表面积, 物料均布于发热面的下方, 此处  $A_1/A_2$  为 1。

### 2.2 碳纤维红外板功率的确定

真空脉动干燥过程中, 在真空保持段, 真空度 95.5 kPa 时, 水的临界沸点为 35 °C; 碳纤维红外板极限工作温度约为 110 °C。取极限换热情况, 此处  $T_1$  为 110 °C,  $T_2$  为 35 °C。可知系统辐射换热热流密度、红外板能量辐射转化率  $\eta_1$ 、能量利用率  $\eta_2$  <sup>[27-28]</sup> 分别为

$$q_{1,2} = \varepsilon_s \sigma_0 [(T_1)^4 - (T_2)^4], \quad (2)$$

$$\eta_1 = \frac{\varepsilon_1 \sigma_0 A_1 (T_1)^4}{W_0}, \quad (3)$$



$$\eta_2 = \frac{q_{1,2} A_1}{W_0} \quad (4)$$

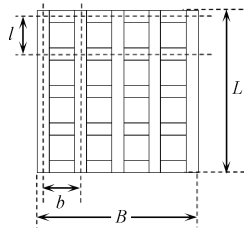
式中  $q_{1,2}$  为辐射源的热流密度,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\sigma_0$  为黑体辐射常数,  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_1$  为辐射源的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_2$  为物料温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

计算干燥过程中  $q_{1,2}$  应大于  $0.87 \text{kW}$ 。考虑到常压阶段空气对箱体冷却, 以及箱体、水蒸气等对系统黑度的影响辐射。为提高真空脉动干燥装备物料适应性, 结合碳纤维板实际制作工艺, 实际选用功率  $W_0$  为  $1.1 \text{kW}/\text{m}^2$ 。

结合公式 (3)、(4) 可知, 该条件下, 红外板能量辐射转化率  $\eta_1$ 、能量利用率  $\eta_2$  分别为 85%、52%。

### 2.3 干燥室的设计与真空泵的选型

结合已确定的料车结构及尺寸, 确定干燥室外形及尺寸。干燥室是干燥装备的核心部件, 相比于“恒真空”干燥, 该装置的干燥室要能够承受极端压力的连续脉动变化, 需要较高的强度。因此, 尽管箱式壳体设计制造复杂, 但相比圆筒形干燥室, 其较适合于长方形碳纤维红外板的安装, 满载物料时内部空隙较少, 空间利用率较高。综合考虑, 其壳体材料由 304 不锈钢焊接为箱形, 采用加强筋补强。加强筋的焊接方式如图 5, 为“口”形。



注:  $B$ 、 $L$  分别为干燥室壁面宽度、高度;  $b$ 、 $l$  分别为两加强筋之间的宽度、高度。

Note:  $B$ ,  $L$  are the width and height of drying chamber wall, respectively;  $b$ ,  $l$  are the width and height of two different stiffeners, respectively.

图 5 箱式壳体加强筋结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of box-type stiffeners

箱式壳体的厚度按矩形平板计算, 并假定被加强筋分割的小平面所受压力由加强筋均匀承受, 则校核计算公式<sup>[29]</sup>为

$$S_0 = \frac{0.224w}{\sqrt{\sigma_v}} + C \quad (5)$$

式中  $S_0$  为壳体的计算厚度,  $\text{cm}$ ;  $\sigma_v$  为材料拉伸需用应力,  $\text{MPa}$ , 此处值为  $180 \text{MPa}$ ;  $C$  为附加壁厚度,  $\text{cm}$ , 此处值为  $0.2 \text{cm}$ ;  $w$  取  $b$ 、 $l$  中的较小值, 此处值为  $20$ 。

结合计算结果, 本装置选用  $4 \text{mm}$  厚 304 不锈钢板和 16 号槽钢。其中控制柜位于干燥室上方, 在干燥室上方统一开设传感器接口, 通过航空插头 (广州市威浦机电有限公司, WS28-24) 连接干燥室内、外线路。缩短传感器信号传输距离, 并保证干燥室密封性。

真空脉动干燥过程真空系统抽气时间要求较为严格, 干燥室内真空度应在  $2 \text{min}$  内到达额定真空度  $P_g$ , 则被抽容器所要求的真空泵有效抽速<sup>[30]</sup>为

$$S_{ey} = \frac{Q}{P_g} \quad (6)$$

若  $S_g > K_e S_{ey}$ , 则泵选用合理; 其中,  $Q$  真空干燥过程中产生的总气流量,  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;  $K_e$  为主泵抽速损失系数, 此处值为  $2 \sim 2.5$ 。经计算, 本装置选用 2BV2070 水环式真空泵, 冷凝器结合相关技术手册进行选配。

## 3 控制系统的设计

### 3.1 控制系统的总体硬件设计

#### 3.1.1 主机控制器及功能模块划分

控制系统是该干燥装置的核心部分, 具有干燥室压力调控、温度检测、碳纤维红外板温度保护等功能。为此, 将控制系统的从功能划分为真空脉动控制、物料温度检测、红外板保护 3 个功能模块。其结构框图如图 6 所示。系统主机选用 Weinview 公司的触摸屏 MT6070iH, 其 RS485 串口依据 Modbus 协议与单片机进行通讯。

PT100 温度传感器 3 路用于物料内部温度检测、1 路用于检测碳纤维光波片温度。温度、压力传感器信号经过变送器转换成  $0 \sim 5 \text{V}$  标准电压信号。再经 A/D 转换、软件滤波后转换成标准数据。当从机接收到“读取”指令后, 传输至主机。主机对采集数据进行综合逻辑判断后, 发送指令到从机, 从机执行指令。

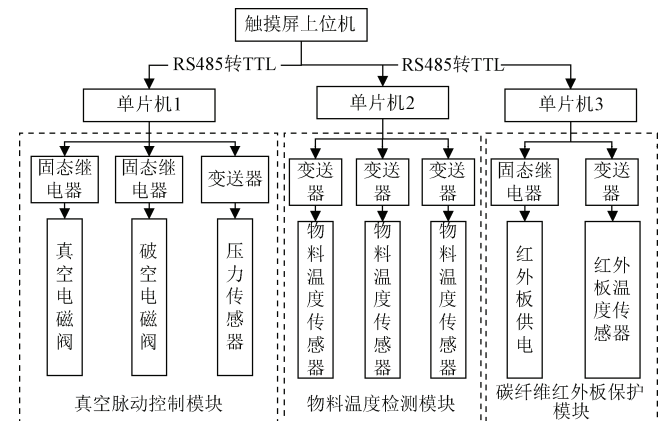


图 6 控制系统硬件结构

Fig.6 Structural diagram of control system

#### 3.1.2 从机及通讯模块

单片机需完成压力、温度等输入信号的采集, 以及电磁阀动作信号的输出, 采用单块单片机会增加软件设计的难度。本系统采用 3 块单片机, 每个单片机对应不同功能模块, 协同完成控制任务, 降低控制系统实现难度。原理图如图 7 所示。

从机选用 Microchip 公司的 8 位单片机 PIC16F877A。具有 40 个 I/O 引脚、10 位分辨率 8 通道 A/D 转换器、异步串行通信。可有效满足数据采集需要。单片机不能直接处理 RS485 通讯信号, 系统选用 MAX232 芯片进行 TTL 电平与 RS485 通讯信号的转换。单片机通过 ULN2003A 输出引脚控制固态继电器 (浙江欣大电气有限公司, HHG1-1/032F-28 10Z 型) 输出以实现碳纤维红外板供电, 以及电磁阀的控制。

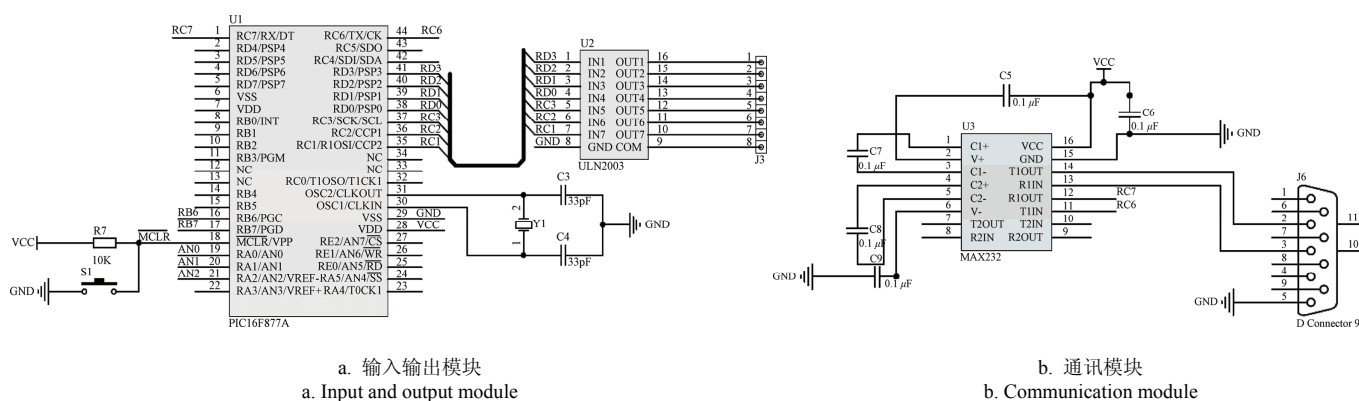


图 7 控制系统硬件结构

Fig.7 Structural diagram of control system

## 3.2 控制系统软件设计

### 3.2.1 触摸屏程序设计

干燥装备通过触摸屏人机交互界面输入、显示试验参数,主机程序包括系统界面以及宏指令库。触摸屏使用 Easybuilder 8000 开发环境编制主界面。系统主界面如图 8a 所示,可显示干燥过程中物料的温度、碳纤维红外板温度、干燥时间等参数;图 8b 参数设定界面可以设置脉动比、干燥时间、红外板表面温度等工艺参数。宏指令库包括干燥计时、各个阶段脉动过程电磁阀等程序。

触摸屏控制系统基于干燥室内压力状态监测,对装备进行时序控制,具体逻辑判断过程如图 9 所示。控制系统结合控制逻辑以及设定的不同阶段判断条件,控制真空电磁阀、破空电磁阀的开关/闭合,完成压力脉动的控制过程。

主机首先获取干燥室内压力参数,并判断处于何种

状态。当为抽真空阶段时,真空电磁阀打开,干燥室内真空度持续上升,达到设定真空度时,状态标记改为真空保持阶段。真空保持时间到时,破空电磁阀打开,状态标记改为进气阶段。干燥室内真空度小于设定值时,破空电磁阀关闭,状态标记改为常压阶段,常压阶段计时结束,状态标记更改为真空阶段,真空泵开启,开始下一阶段循环。

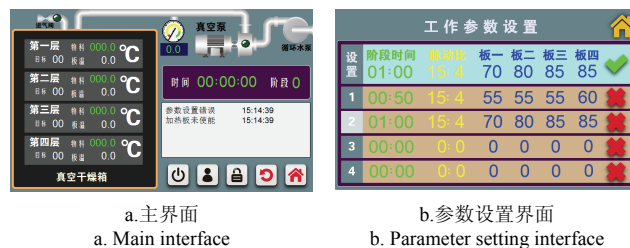


图 8 触摸屏控制界面

Fig.8 Structural diagram of control system of touch screen

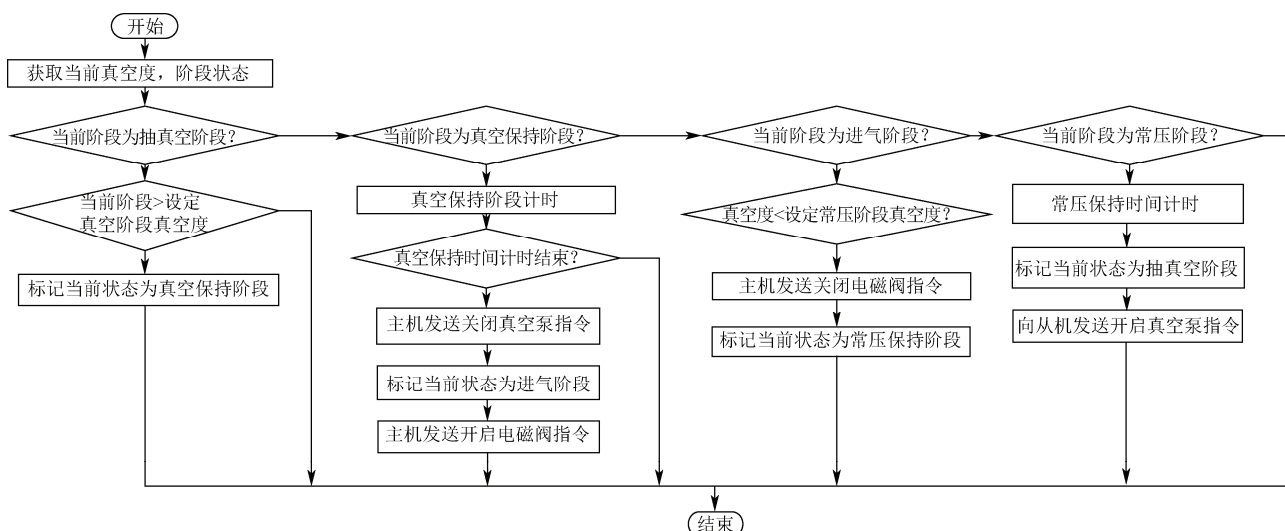


图 9 真空脉动控制系统流程图

Fig.9 Flow-process diagram of pulsed vacuum control system

### 3.2.2 单片机程序设计

单片机程序在 MPLAB IDE 集成开发环境中使用,由 C 语言编写,采用模块化程序封装,主要程序模块包括对物料温度采集模块、红外板温度采集模块、控制继电器

输出模块、串口通讯模块,以及 MODBUS 通讯模块。单片机自身没有 MODBUS 通讯模块,需依照 MODBUS 协议编写相应程序,实现触摸屏、单片机的通讯,具体通讯子程序如图 10 所示。

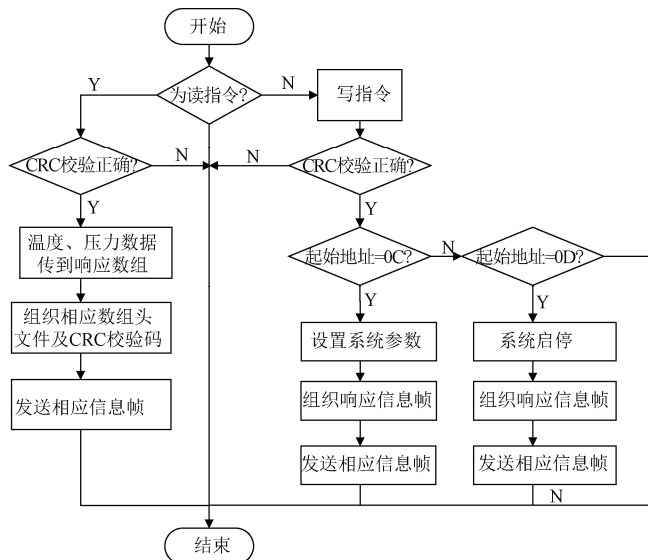
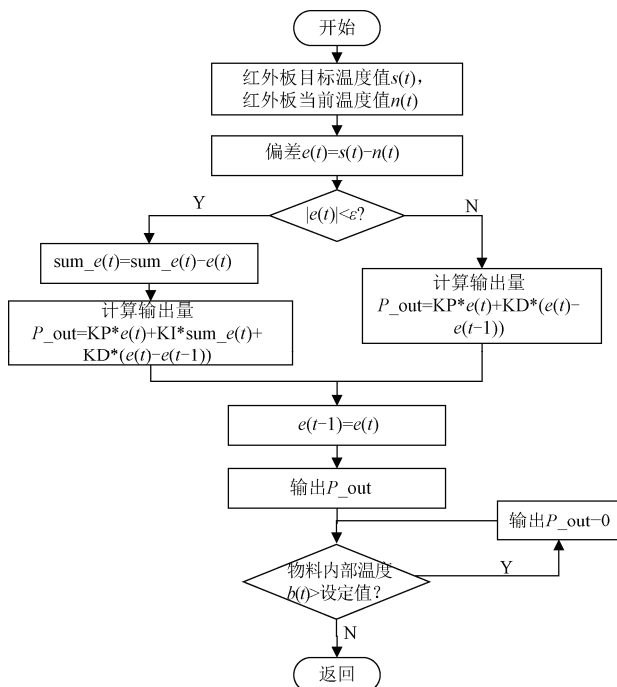


图 10 Modbus 协议信息帧的解析与查询

Fig.10 Analysis and inquiry of Modbus protocol message frame

触摸屏通过 RS485 串口发送数据，单片机通过串口中断接收到数据后，将数据存放与命令接收数组。对接收到的从机地址和功能码进行解析，判断是否为该单片机数据，若不正确则接收下一帧；若正确，则依照功能码区分是读指令还是写指令；若为读指令，则组织物料温度、红外板温度等数据，发送响应信息帧；若为写指令，则根据信息帧中的地址命令执行不同的操作，如电磁阀开/闭，系统启停等，随后发送响应信息帧。



注：KP、KI、KD 分别为比例常数、积分常数和微分常数； $e(t)$ 、 $e(t-1)$ 、 $\text{sum}_e(t)$  分别为当前时刻碳纤维红外板温度偏差、上一时刻偏差和偏差累积和， $P_{\text{out}}$  为 PID 控制输出量。

Note: KP, KI, KD is proportional constant, integral constant and differential constant, respectively;  $e(t)$ ,  $e(t-1)$ ,  $\text{sum}_e(t)$  is temperature deviation at this time, temperature deviation at last time and temperature deviation sum.  $P_{\text{out}}$  is PID output.

图 11 物料内部温度控制系统流程图

Fig.11 Flow-process diagram of pulsed vacuum control system

### 3.2.3 碳纤维红外板加热温度控制系统设计

碳纤维红外板工作温度可认为设定，范围为 35~110℃。红外板加热时物料升温较快。采用积分分离式数字 PID 控温策略精确调控红外板温度  $s(t)$ ，保证物料温度的稳定性<sup>[31]</sup>。同时，将物料内部温度反馈  $b(t)$  作为内部控制因素，当  $b(t)$  超调时，加热系统及时断电降温，避免物料温度超调，其为开关量控制。具体流程如图 11 所示。

将红外板目标温度  $s(t)$  与红外板当前温度  $n(t)$  的偏差定义为  $e(t)=s(t)-n(t)$ 。设定阈值  $\varepsilon>0$ ，当  $|e(t)|>\varepsilon$  时，采用 PID(比例积分)控制，防止板温超调，当  $|e(t)|<\varepsilon$ ，稳定输出  $P_{\text{out}}$ ，精准调控板温；其中阈值  $\varepsilon$  根据碳纤维红外板加热惯性确定为 1%。 $P_{\text{out}}$  为单片机输出占空比，调节红外板的通断时间实现板温的控制。结合试验，设定采样时间 5 s、增益系数 KP 为 0.1、积分时间 KI 为 2 min、微分时间 KD 为 0.25 min。如果物料内部温度  $b(t)>$  设定值时， $P_{\text{out}}$  输出为 0，红外板及时断电降温。

## 4 材料与方

### 4.1 试验材料及预处理过程

在干燥样机制作调试完成后，于中国农业大学干燥装备实验室进行干燥试验。以新鲜苹果块为试验原料，验证样机性能和控制系统的可靠性。物料预处理过程如下：①采购无机械损伤的苹果，品种为红富士，质量为  $(250\pm 20)$  g/个。②聚乙烯塑料密封包装后，置于纸箱中，在  $(5\pm 1)^\circ\text{C}$  条件下冷藏。干燥前，将苹果清洗干净，室温下静置 2h，待恢复至室温后使用切片机 (SQC-1，哈尔滨瑞华厨房设备厂) 切制为苹果块。③结合国家标准 GB/T 5009.3-2010《食品中水分的测定》<sup>[32]</sup> 中的直接干燥法，测定苹果块的湿基含水率为  $88.6\%\pm 0.43\%$ 。结合预试验，物料太厚干燥时间较长，太薄不易切制。因此，切制苹果块长×宽×厚约为 20 mm×20 mm×5 mm，并迅速放入干燥室内试验。

### 4.2 试验仪器及方法

碳纤维红外板—真空脉动干燥装备，红外热风干燥箱<sup>[33]</sup>。其他仪器设备同文献<sup>[34]</sup>。选取具体的试验条件如表 2 所示。干基含水率小于 6% 时停止干燥试验；每组试验重复 3 次，取平均值作为结果；取出、冷却后装入聚乙烯塑料袋，密封包装。

### 4.3 干燥特性参数计算方法

#### 4.3.1 水分比 (MR) 的计算方法

1) 苹果块干燥过程中的干燥曲线采用水分比 (MR, moisture ratio) 随干燥时间变化的曲线。不同干燥时间水分比的计算可简化为公式<sup>[35]</sup>

$$\text{MR} = \frac{M_t}{M_0} \quad (7)$$

式中  $M_0$  为物料初始干基含水率，g/g； $M_t$  为物料在  $t$  时刻的干基含水率，g/g。

干燥速率计算公式<sup>[36]</sup>表示为



$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

式中 DR 为干燥过程中时间在  $t_1$  和  $t_2$  之间的物料的干燥速率,  $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})$ ;  $M_{t_1}$  和  $M_{t_2}$  为干燥过程中时间为  $t_1$  和  $t_2$  时物料的干基含水率,  $\text{g}/\text{g}$ 。

2) 干基含水率计算公式<sup>[37]</sup>为

$$M_t = \frac{W_t - W_G}{W_G} \quad (9)$$

式中  $W_t$  为在任意干燥  $t$  时刻的总质量,  $\text{g}$ ;  $W_G$  为干物质质量,  $\text{g}$ 。

表 2 试验设计和试验参数

Table 2 Design for experiments with run conditions included

干燥方式 Drying methods	红外板温度 Infrared plate temperature/ $^{\circ}\text{C}$	风速 Velocity/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	脉动比 Pulsed ratio
红外热风干燥 Infrared oven drying	$\leq 110$	0.6	-
真空红外脉动干燥试验 1 Vacuum infrared pulsed drying test 1	$\leq 65$	-	15:4
真空红外脉动干燥试验 2 Vacuum infrared pulsed drying test 2	$\leq 110$	-	15:4

#### 4.3.2 色泽参数的测定方法

苹果块未灭酶情况下, 易褐变变色<sup>[38]</sup>。将干燥后的苹果片打磨成粉, 用色差仪 (SMY-2000SF) 测定产品色泽参数, 同参考文献[39-40]所述方法。明亮度  $L^*$  变化范围 0 (黑色) ~ 100 (白色), 红绿值  $a^*$ 、蓝黄值  $b^*$  色泽指数变化范围 -60 ~ 60。其中, 通过  $L^*$  值评价干燥效果, 其值越大表明干燥色泽效果越好。

#### 4.4 数据处理方法

试验重复 3 次, 采用 Excel 2007 软件计算 3 次试验均值后作图分析。

### 5 结果与分析

#### 5.1 物料内部温度曲线变化分析

为验证温度控制方案的可行性, 真空脉动干燥试验 1 将红外板的表面温度上限由  $110^{\circ}\text{C}$  调整为  $65^{\circ}\text{C}$ , 物料内部温度设定为  $35^{\circ}\text{C}$ , 检测红外板表面温度超调时, 温度控制系统的调控情况。结果如图 12 所示, 干燥室真空度呈周期性的脉动变化。在真空保持阶段, 物料温度约为  $31^{\circ}\text{C}$ , 红外板温度恒定为  $65^{\circ}\text{C}$ 。当变为常压阶段时, 水分沸点升高, 蒸发吸热减小, 物料内部温度迅速上升到约  $37^{\circ}\text{C}$ , 超过预设温度  $35^{\circ}\text{C}$ 。红外板停止供电, 红外板温度迅速“下坠”到约  $40^{\circ}\text{C}$ 。当下一个真空保持阶段到时, 物料内部温度再次降低到约  $31^{\circ}\text{C}$ 。红外板再次开始供电, 维持到  $65^{\circ}\text{C}$ 。

干燥前期, 物料含水率较高, 抽真空阶段水分沸点较低, 物料吸收的热量主要用于水分蒸发, 与  $65^{\circ}\text{C}$  碳纤维红外板能量供给平衡, 其温度表面温度无明显波动。干燥后期, 红外板温度波动较大。这是因为随着干燥进行, 物料含水率逐渐降低, 物料蒸发吸热能量减少, 导致  $65^{\circ}\text{C}$  碳纤维红外板能量供给过剩, 致使其在真空保持阶段表面温度就已大于  $65^{\circ}\text{C}$ , 红外板断电降温到约

$45^{\circ}\text{C}$ , 并连续波动, 但物料内部温度几乎维持恒定, 表明本装置采用的控制方案可行。也说明同一干燥过程的不同干燥阶段, 物料干燥特性不同, 干燥后期需适当降低红外板温度。

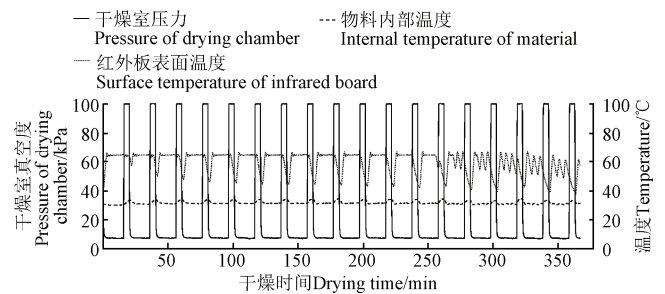


图 12 干燥室压力和物料内部温度变化曲线

Fig.12 Change curves of drying chamber pressure and internal temperature

为比较真空脉动红外干燥方式 1 的干燥效率, 设定红外热风干燥方式下的物料内部温度与其相同, 为  $31^{\circ}\text{C}$ ; 红外板额定工作温度上限为  $110^{\circ}\text{C}$ 。具体温度变化情况如图 13 所示。红外板表面温度波动较大且呈逐渐下降趋势, 尽管干燥前期红外板表面温度明显高于  $65^{\circ}\text{C}$ , 但物料温度却并无明显上升。这是因为在热风干燥条件下, 红外板除辐射加热物料外, 发热面还要依靠对流换热加热干燥室空气介质, 使其温度高于物料内部温度, 方可实现物料干燥。该过程耗费了大量能量。对比干燥过程红外板的表面温度, 表明在达到相同物料内部温度时, 真空脉动干燥条件下的红外板能耗低于红外热风干燥。

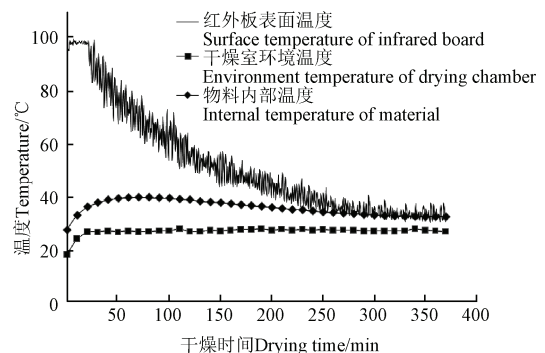


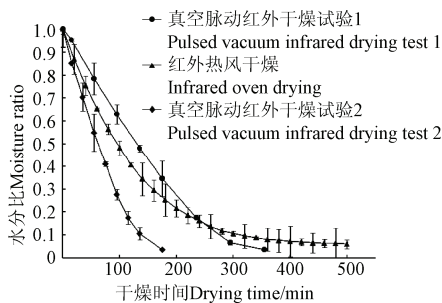
图 13 干燥过程中红外板表面温度、干燥室温度和物料 (苹果块) 内部温度的动态变化曲线

Fig.13 Temperature change kinetics curves of infrared board surface, drying chamber, and material inside during drying process

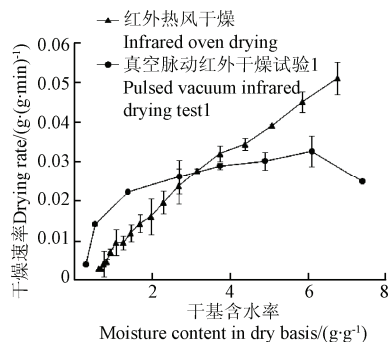
#### 5.2 不同干燥方式对苹果块干燥特性的影响

不同干燥方式水分比曲线如图 14a 所示, 其中, 真空脉动红外干燥方式 2 的红外板温度上限为  $110^{\circ}\text{C}$ , 物料内部温度  $55^{\circ}\text{C}$ , 为正常工作状态。物料干燥时间仅约为 170 min。说明红外板具有较高的传热效率, 提高辐射源温度可大幅缩短干燥时间。真空脉动红外干燥方式 1、红外热风干燥物料内部温度相同, 但达到目标含水率时间分别约为 380、500 min。说明该真空脉动过程可有效缩短苹果块干燥时间。

真空脉动干燥方 1、红外热风干燥速率曲线如图 14b。干燥前期, 真空脉动试验 1 的红外板温度 65 °C, 小于红外热风干燥的板温, 致使物料内部温度较低, 干燥速率也较低。但当物料水分比约为 0.2 时, 前者干燥速率明显高于后者。这是因为真空条件下, 物料水分沸点较低, 且红外辐射在加热物料过程中, 直接与水分耦合, 利于物料水分进一步向外迁移, 表明干燥方式也直接影响着物料的干燥速率, 物料干燥需要适宜的干燥方式<sup>[41]</sup>。



a. 苹果块干燥曲线  
a. Drying curves of apple cubes



b. 苹果块干燥速率曲线  
b. Drying rate curves of apple cubes

注: 真空脉动红外干燥试验 1, 碳纤维红外板温度上限为 65 °C; 试验 2 温度上限为 110 °C。

Note: Upper temperature limit of pulsed vacuum infrared drying test 1 is 65 °C, and test 2 is 110 °C.

图 14 苹果片不同干燥方式下的干燥曲线与干燥速率曲线

Fig.14 Apple cubes drying curves and drying rate curves of different drying methods

### 5.3 色泽参数的对比分析

真空脉动红外干燥、红外热风干燥  $L^*$  均值分别为 71.86、53.52。表明真空脉动红外干燥的苹果块色泽较优。这是因为物料干燥前苹果块未经灭酶处理, 尽管红外辐射具有灭酶效果, 但 2 种干燥方式物料内部温度均较低。红外热风干燥过程多酚氧化酶 (PPO) 仍具有较高活性, 与氧气、水共同作用发生酶促褐变,  $L^*$  值降低。而真空脉动过程使物料与氧气接触时间有限,  $L^*$  值较高。这也与巨浩羽等<sup>[42]</sup>在苹果片在中短波红外干燥中的结论相一致。说明真空脉动过程有助于热敏性物料的干燥。

## 6 结 论

本文结合碳纤维红外板厚度薄、温度敏捷性高、辐射距离近的特点, 设计了一种基于碳纤维红外板加热的真空脉动干燥装备。并以苹果片为原料进行试验验证。

1) 结合碳纤维板外形结构, 设计箱式真空干燥室。将碳纤维红外板和料架相结合, 设计了单层干燥单元, 有效提高物料装载率。基于干燥室内真空度状态监测, 对装备进行时序控制, 实现干燥室内真空度的连续“脉动”。确定碳纤维红外板功率为 1.1 kW/m<sup>2</sup>, 发热面距离料盘上表面 3 cm 时, 干燥效果较佳。采用积分分离式数字 PID 控温策略精确调控红外板温度, 并通过物料内部温度反馈调节红外板供电。分析物料内部温度变化曲线, 验证了控制方案的可行性。

2) 将新鲜苹果, 切制成 20 mm×20 mm×5 mm 苹果块, 以其试验原料对所设计的干燥装备进行试验验证, 结果表明, 该干燥装备同红外热风干燥装备相比, 物料内部温度均为 31 °C 情况下, 苹果块干燥时间缩短 30%, 且干燥色泽明显较优。在红外真空脉动干燥过程的不同干燥阶段, 苹果块干燥特性不同, 干燥后期可适当降低红外板温度, 有助于物料干燥。

致谢: 衷心感谢南京腾飞干燥装备有限公司提供相关技术支持。

### 【参 考 文 献】

- [1] 高振江, 吴定伟, 张树阁, 等. 滚筒式真空脉动干燥机设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 113—116.  
Gao Zhenjiang, Wu Dingwei, Zhang Shuge, et al. Design of pulsed vacuum drum dryer[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 113—116. (in Chinese with English abstract)
- [2] Wang Xiaotuo, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Enhanced mass transfer of osmotic dehydration and changes in microstructure of pickled salted egg under pulsed pressure[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1): 141—150.
- [3] 白俊文. 无核白葡萄干燥动力学及防褐变机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 41—45.  
Bai Junwen. Drying Kinetics and Anti-Browning Mechanism of Thompson Seedless Grapes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 41—45. (in Chinese with English abstract)
- [4] Chua K J, Chou S K. On the experimental study of a pressure regulatory system for bioproducts dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 62(62): 151—158.
- [5] 曹志向, 高振江, 林海. 滚筒式真空脉动压干燥胡萝卜丁试验研究[J]. 食品科技, 2008, 34(3): 81—85.  
Cao Zhixiang, Gao Zhenjiang, Lin Hai. Experimental investigation of roller vacuum pulsating pressure carrots drying[J]. Food Science and Technology, 2008, 34(3): 81—85. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317—324.  
Zhang Weipeng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Drying characteristics of poria cocos with different drying methods based on Weibull distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 317—324. (in Chinese with English abstract)
- [7] Dueik V, Marzullo C, Bouchon P. Effect of vacuum inclusion on the quality and the sensory attributes of carrot snacks[J]. Food Science and Technology, 2013, 50: 361—365.
- [8] 白俊文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. 农业工程学, 2013, 29(16):



- 278—285.  
Bai Junwen, Wang Jiliang, Xiao Hongwei, et al. Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 278—285. (in Chinese with English abstract)
- [9] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1036—1065.
- [10] 王栋. 基于多参数监控的真空脉动干燥过程研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 37—53.  
Wang Dong. Study on Optimization of Sectional Pulsed Vacuum Drying Process Based on Multi-parameter Monitoring[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 37—53. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马海乐, 王娟, 刘斌, 等. 马铃薯片红外加热灭酶脱水试验及动力学[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 304—310.  
Ma Haile, Wang Juan, Liu Bin, et al. Experiment and dynamics of dehydration and inactivation of enzyme of potato slices by simultaneous infrared dry-blanching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 304—310. (in Chinese with English abstract)
- [12] Pan Z, Li X, Khir R, et al. A pilot scale electrical infrared dry-peeling system for tomatoes: Design and performance evaluation[J]. Biosystems Engineering, 2015, 137: 1—8.
- [13] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 262—269.  
Zheng Xia, Xiao Hongwei, Wang Lihong, et al. Shorting drying time of Hami-melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 262—269. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李树君, 林亚玲, 潘忠礼. 红外技术用于农产品灭酶和脱水干燥的研究综述[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 109—112.  
Li Shujun, Lin Yaling, Pan Zhongli. Investigation of infrared technology on blanching and dehydration of farm products[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 109—112. (in Chinese with English abstract)
- [15] Pan Z, Mchugh T H, Valenti-Jordan J B, et al. Infrared based peeling of fruits and vegetables: US8940346[P]. 2015.
- [16] Sun Dawen. Emerging Technologies for Food Processing[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2005: 461—474.
- [17] Pekke M A, Pan Z L, Atungulu G G, et al. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2013, 6(3): 58—70.
- [18] Ding C, Khir R, Pan Z, et al. Improvement in shelf life of rough and brown rice using infrared radiation heating[J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(5): 1149—1159.
- [19] 谢小雷, 张春晖, 贾伟, 等. 连续式中红外-热风组合干燥设备的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 282—289.  
Xie Xiaolei, Zhang Chunhui, Jia Wei, et al. Development and test of continuous combined mid-infrared with hot air drying equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 282—289. (in Chinese with English abstract)
- [20] Li X, Pan Z. Dry-peeling of tomato by infrared radiative heating: part I. model development[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(7): 1996—2004.
- [21] Ding C, Khir R, Pan Z, et al. Effect of infrared and conventional drying methods on physicochemical characteristics of stored white rice[J]. Cereal Chemistry, 2015, 92(5): 278—285.
- [22] Wu B, Pan Z, Qu W, et al. Effect of simultaneous infrared dry-blanching and dehydration on quality characteristics of carrot slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(1): 90—98.
- [23] 糜正瑜, 褚治德. 红外辐射加热干燥原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 93—99
- [24] 谈治信. 新版《真空设计手册》正式出版[J]. 第 3 版. 真空, 2006(1): 58—58.
- [25] 黄本诚, 陈金明, 祁妍, 等. 真空容器设计[J]. 中国空间科学技术, 2002(3): 6—12.
- [26] Li X, Pan Z, Atungulu G G, et al. Peeling mechanism of tomato under infrared heating: Peel loosening and cracking[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128(1): 79—87.
- [27] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 549—606.
- [28] 徐成海. 真空干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 325—355.
- [29] 王晓东. 真空技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 399—415.
- [30] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 98—133.
- [31] 王栋, 林海, 姚雪东, 等. 基于 Modbus 协议的干燥控制系统设计[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2012, 30(1): 110—115.  
Wang Dong, Lin Hai, Yao Xuedong, et al. Design of the drying control system based on Modbus protocol[J]. Journal of Shihezi University :Natural Science, 2012, 30(1): 110—115 (in Chinese with English abstract).
- [32] GB/T 5009. 3—2010. 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].
- [33] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 碳纤维红外板辐射特性及其农产品物料干燥试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 285—293.  
Zhang Weipeng, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Infrared drying properties and drying experiment of carbon fiber for agricultural production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(19): 295—293. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 269—276.  
Zhang Weipeng, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Improving quality of *Poria cocos* using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 269—276. (in Chinese with English abstract)
- [35] Wang Dong, Dai Jianwu, Ju Haoyu, et al. Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer[J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(5): 701—711.
- [36] Xiao H W, Bai J W, Xie L, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food and Bioprocess Processing, 2015, 94(2): 581—591.
- [37] 巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296—304.  
Ju Haoyu, Xiao Hongwei, Zheng Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 296—304. (in Chinese with English abstract)

- [38] Bai Junwen, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Polyphenol oxidase inactivation and vitamin C degradation kinetics of Fuji apple quarters by high humidity air impingement blanching[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2013, 48: 1135—1141.
- [39] Xiao Hongwei, Law Chunglim, Sun Dawen, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. *Drying Technology*, 32(4): 418—427.
- [40] 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 276—281.
- Zhang Qian, Xiao Hongwei, Yang Xuhai, et al. Effects of pretreatment on air impingement drying characteristics and product color for line pepper[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(1): 276—281. (in Chinese with English abstract)
- [41] 郑霞, 万江静, 高振江, 等. 红外干燥技术在果蔬加工中的研究现状与展望[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(10): 1—6.
- Zheng Xia, Wan Jiangjing, Gao Zhenjiang, et al. Advances and future trends of infrared drying in processing of fruits and vegetables[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(10): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [42] 巨浩羽, 肖红伟, 白竣文, 等. 苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊 2): 186—191.
- Ju Haoyu, Xiao Hongwei, Bai Junwen, et al. Medium and short wave infrared drying characteristics and color changing of apple slices[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp2): 186—191. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment of vacuum pulsed drying equipment based on carbon fiber infrared heating plate

Zhang Weipeng<sup>1,3</sup>, Xiao Hongwei<sup>1</sup>, Zheng Zhian<sup>1,3</sup>, Pan Zhongli<sup>2</sup>,  
Xue Lingyang<sup>1</sup>, Zhang Yuming<sup>4</sup>, Fang Xiaoming<sup>5</sup>, Liu Yanhong<sup>1</sup>, Gao Zhenjiang<sup>1\*</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis One Shields Ave, Davis, CA 95616, USA; 3. China Research Center for Agricultural Mechanization Development, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. Shanghai Reli Technology Group Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 5. Bee Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The carbon fiber infrared plate has been used in fruits and vegetables drying as an innovative heating source, which has the advantages of higher heating rate, compact radiation distance, and simple structure. Apple is one of the most common drying materials. Whereas, the traditional natural open sun drying of apple cubes takes almost two days. In addition, during long drying time, products are very sensitive to microbial spoilage. Infrared radiation heating has several advantages such as high efficiency, low energy consumption, and high quality of dried products, and has been widely used in food industry. Many previous investigations indicate that vacuum pulsed drying can extensively enhance the drying rate and keep good quality of the dried products, such as bright color, high content of the heat sensitivity nutrients. In this work, based on carbon fiber infrared heating technology, a vacuum pulsed drying equipment was designed in order to combine the advantages of infrared heating and vacuum pulsed drying technology. The equipment was composed of a drying chamber, vacuum system, single drying unit and control system. For the convenience of analysis, the actual vacuum pulsed process was divided into four stages: The vacuum phase, the vacuum holding stage, the breaking stage, and the normal pressure stage. The automatic control scheme was realized based on MODBUS control protocol with the flow-process framework of the control system containing the touch screen and single chip microcomputer system. Sequential control system was realized for the continuous conversion of drying chamber from vacuum to atmospheric pressure. Combined with the feedback of the material internal temperature, drying temperature can be controlled effectively by monitoring temperature of the carbon fiber plate. The 20 mm×20 mm×5 mm apple cubes were dried to test this equipment. Result indicated that the equipment design and control system of the drying equipment were reliable, which can realize the continuous pulsing from vacuum to atmospheric pressure. When the internal temperature of the samples was kept at 31 °C, its drying time took about just 380 min, which was decreased about 30% compared with infrared hot air drying at the same drying temperature. Our results also showed that the most suitable power density of carbon fiber infrared heating plate was 1.1 kW/m<sup>2</sup> and the distance between heating surface and the upper surface of material plate was only 3 cm. In addition, when the surface temperature of the carbon fiber infrared plate was 65 °C, the internal temperature of apple cubes was 31 °C at the vacuum holding stage, and it would rise to 37 °C quickly at the normal pressure stage. The energy supply of carbon fiber infrared heating plate was excessive at the late stage of drying, and the surface temperature had a trend of fluctuating downward. The findings indicated that it was helpful to reduce the temperature of infrared plate, especially in the late drying stages. Moreover, the color attributes of the products dried under vacuum pulsed drying based on infrared heating were better than that of the infrared hot air dried samples. The findings of the current work provide theoretical basis and technology references for the design of vacuum pulsed drying equipment based on carbon fiber infrared heating and its practical application in agricultural products' drying.

**Keywords:** drying; infrared heating; carbon fibers; equipment design; apple cubes