

茯苓真空脉动中试干燥装置设计与试验

张卫鹏¹ 郑志安² 陈 畅³ 潘忠礼³

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 加利福尼亚大学戴维斯分校生物与农业工程系, 戴维斯 CA 95616)

摘要: 为解决茯苓丁工业化干燥过程中破碎率高、干燥时间长的问题,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中试干燥装置,以验证该干燥方式实际应用的可行性。该中试干燥装备由干燥室、真空系统、干燥模块、控制系统等组成。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、常压阶段。控制系统以触摸屏为主机,通过 MODBUS 协议与各从机进行通讯,组成控制器网络。基于对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。控制系统基于干燥温度的实时监测和反馈,实现对碳纤维红外板加热的有效调控。以 12 mm × 12 mm × 12 mm 的茯苓丁为试验原料进行了中试试验验证。结果表明:该中试干燥装备设计方案可行,控制方案可靠,可有效实现茯苓丁的干燥。真空保持时间、常压保持时间分别为 5、4 min 时,干燥时间最短,约为 480 min。真空脉动红外干燥后茯苓丁一级品占比 83.63%,相比目前的连续式热风干燥,破碎率明显降低。

关键词: 茯苓丁; 干燥; 真空脉动; 碳纤维; 红外

中图分类号: S375; TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0362-10

Design and Test of Pilot Pulsed Vacuum Infrared Drying Equipment for *Poria cocos*

ZHANG Weipeng¹ ZHENG Zhian² CHEN Chang³ PAN Zhongli³

(1. School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California at Davis, Davis CA 95616, USA)

Abstract: In order to solve the problem of long drying time and high breakage rate of *Poria cocos* cubes during industrial drying process, the infrared drying technology of carbon fibers was combined with the vacuum pulsating drying technology, and a pulsed vacuum drying equipment was designed based on characteristic carbon fibers infrared plate. The pilot-scale drying equipment consisted of drying chamber, vacuum system, single-layer drying unit and control system. For convenience of analysis, the actual vacuum pulsed process was divided into four stages: vacuum stage, vacuum holding stage, breaking stage and atmospheric pressure holding stage. The touch screen was connected with the slave controllers by RS232/485 to form a network, and communicated with each other through the MODBUS protocol. Based on the monitoring of vacuum degree in drying chamber, the continuous conversion from vacuum to atmospheric pressure in drying chamber was realized by time sequence control. Based on the monitoring of the temperature of carbon fiber infrared board and the feedback of the drying temperature, the drying temperature can be effectively controlled. *Poria cocos* cubes with size of 12 mm × 12 mm × 12 mm was used as experimental material to verify the results. The results showed that the design and control scheme of the drying equipment were reliable, and the continuous pulsation of vacuum-atmospheric pressure can be realized, and the material can be dried effectively. The shortest drying time was about 480 min when the vacuum duration time and atmospheric pressure duration time were 5 min and 4 min, respectively.

收稿日期: 2019-01-08 修回日期: 2019-01-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0400905)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-21)和北京工商大学青年教师科研启动基金项目(QNJ2019-18)

作者简介: 张卫鹏(1988—),男,讲师,博士,主要从事干燥装备与生物干燥特性研究,E-mail: zhangwp@btbu.edu.cn

通信作者: 郑志安(1961—),男,副教授,博士生导师,主要从事中药材产业化、农产品加工技术与装备研究,E-mail: zhengza@cau.edu.cn

Compared with continuous hot air drying, the breakage rate of pulsed vacuum drying was obviously reduced. The drying equipments and results can be applied to the drying of *Poria cocos* cubes, which can provide theoretical basis for the combined application of infrared drying technology and pulsed vacuum drying technology.

Key words: *Poria cocos* cubes; drying; pulsed vacuum; carbon fiber; infrared

0 引言

茯苓(*Poria cocos*)是一种药食两用的中草药,为多孔菌类植物的菌核,常寄生于赤松或马尾松根部,又称茯灵、万桂灵等。新鲜茯苓采摘后需要依次经过发汗、剥皮、切制、干燥 4 个炮制加工环节,干燥环节直接决定茯苓丁药材的形态、货架期以及市场价格。新鲜茯苓切制成茯苓丁后,常通过自然晾晒和热风干燥进行脱水。自然晾晒需 3~7 d,如天气不好,容易霉变。热风干燥会导致茯苓丁内外水分分布不均,进而产生应力集中现象,引起茯苓丁的破裂,严重影响了茯苓的工业化生产。

为降低茯苓丁破碎率,间歇式热风干燥在茯苓丁生产中也有部分应用。如茯苓丁干燥全过程都保持较高干燥温度,物料表面脱水较快,容易导致有效成分降解和结壳等现象;而间歇式干燥通过连续的“干燥-缓苏”,实现能量间歇式供应,有利于物料内部水分向外均匀传递,但干燥总时间超过 24 h,干燥效率有待提高。水分沸点随真空度的降低而降低,因此,真空干燥可在较低干燥温度下,实现物料的快速脱水,并可有效改善物料热应力分布状况^[1]。真空干燥全过程采用恒定真空度,容易使物料表面的水蒸气分压与干燥室内的水蒸气分压处于平衡状态,从而降低湿度梯度和物料的脱水效率^[2]。通过调控干燥室压力,可不断打破这种水分平衡状态,实现干燥能量的间歇式供给,从而提高干燥效率和干燥品质^[3~5]。文献[6]提出了真空脉动干燥技术,并将其推广到枸杞^[7]、葡萄^[8]等浆果类物料的干燥中。文献[9]对比了不同干燥方式对茯苓丁干燥特性的影响,发现真空脉动干燥方式较优。文献[10]设计了真空脉动干燥样机,该样机可对真空干燥时间、常压干燥时间、干燥温度等参数进行多样化的设定和调控。但试验装置有效加热面积仅为 1 m²左右,需进一步进行中试试验验证,为工业化的推广应用积累经验。

热辐射不需要传递介质,因此在真空干燥领域有广泛应用。常见真空干燥箱多借助通过过热蒸汽或热水的盘管对物料进行加热,但热水盘管不耐腐蚀,使用寿命有限,一般 3 年左右需进行维修更换^[11]。如采用电加热板、电加热管对物料进行加

热,设备投资成本过高,目前多见于真空冷冻干燥装置。上述加热部件结构体积较大,对应的料架层与层之间的距离通常大于 80 mm,限制了装载量的提升。红外辐射作为热辐射的一种,能量可直接与水分耦合,且能穿透物料表面(厚度一般小于 2 mm),可有效提高干燥效率^[12],目前已被广泛应用于农产品加工领域^[13~18]。常用红外加热器为石英电加热管,辐射温度通常高于 400℃,需要对应的安全防护装置和定向辐射装置。工业领域所用的天然气红外辐射加热器无法在真空状态下使用,而由碳纤维制作的红外加热板,220 V 电压下即可激励红外线,目前在电采暖等民用领域有广泛应用。文献[19]对该发热材料在热风 and 真空干燥领域的应用进行了探索,发现其具有升温速度快、温度调控便捷的优势。

为解决茯苓丁热风干燥时间长、破碎率高的问题,本文结合真空脉动干燥技术和碳纤维红外板加热技术,针对茯苓丁工业化生产的加工需求,设计对应的中试干燥装置。以茯苓丁为试验原料,进行中试验证试验,并与工业生产过程中采集的热风干燥数据相对比,分析干燥速率、能耗、茯苓丁破碎率等指标,为真空脉动干燥技术、碳纤维红外板加热技术的应用提供技术依据。

1 整机结构及工作原理

1.1 整机结构

真空脉动干燥中试装置由真空系统、加热系统、控制系统 3 部分组成。具体结构如图 1 所示,真空系统由 2BV2070 型水循环式真空泵(上海万经泵业制造有限公司)、FNF-2.8/13 型冷凝器(佛山市科威制冷设备有限公司)、JXB50 型气体捕集器(上海将星化工设备有限公司)、干燥室(南京腾飞干燥装备有限公司)组成。其中,气体捕集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。干燥室外部管道上连接有 GU-20G 型破空电磁阀(上海威尔顿阀门制造有限公司)以及对应的辅助空气加热装置。料架上安装有多组加热模块,每个加热模块由碳纤维红外板(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 型温度传感器(深圳市华伟热电偶有限公司,精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)等组合而成。控制

系统采用“主-从机”模式,以 MT6070iH 型触摸屏为主机(威纶通科技有限公司);各个从机模块、PT100 型温度传感器、MIK - P300 型压力传感器(杭州美控自动化技术有限公司,精度等级 0.1%)、信号变送器(浙江天康电子有限公司)组成对应的从机系统。

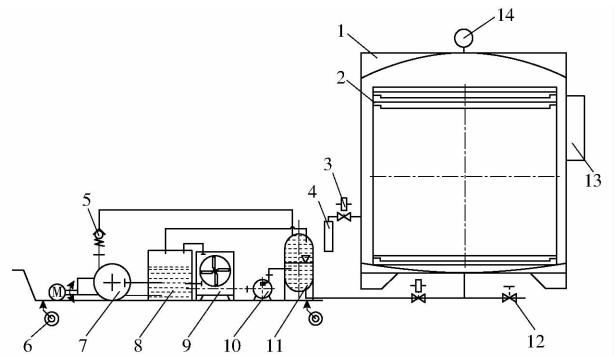


图 1 真空干燥中试装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of infrared vacuum drying equipment
1.干燥室 2.料架 3.破空电磁阀 4.辅助空气加热装置 5.单向阀 6.底座 7.真空泵 8.冷凝水箱 9.冷凝器 10.水泵 11.气体捕集器 12.排污阀 13.配电柜 14.多层警示灯

尽管箱式真空干燥室结构复杂,但内部空间利用率高,适合矩形料盘的装卸。因此,选用 4 mm 厚 304 不锈钢板和 16 号槽钢焊接干燥箱。干燥室内部料架多层,较适合农产物料的薄层静态干燥。干燥室右侧安装有配电柜,通过 WS28 - 24 型航空插头(广州市威浦机电有限公司)连接箱体内部的电源线、信号线,并保证其密封性。

1.2 工作原理

工作过程中,该装置干燥室内压力变化呈高低变化趋势。如图 2 所示,一个完整的脉动变化周期由常压保持时间 t_a 和真空保持时间 t_v 组成。 d 、 e 分别为常压保持时间 t_a 起点、终点; a 、 d 分别为真空保持时间 t_v 起点、终点。为便于论述,具体的脉动变化过程可分为 ab 抽真空阶段、 bc 真空保持阶段、 cd 破空阶段、 de 常压阶段。由于传感器信号采集和信号传递误差,实际工作过程中干燥室压力在 92 ~ 101 kPa 和 0 ~ 6 kPa 之间交替变化。

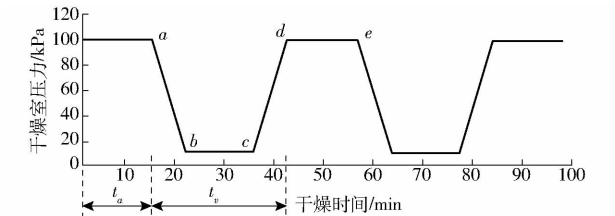


图 2 真空-常压脉动示意图

Fig.2 Schematic diagram of vacuum and atmospheric pressure

抽真空时,破空电磁阀关闭,单向阀自动打开,在

ab 段,干燥室内压力迅速达到额定真空度。而后,真空泵停止工作,单向阀自动处于关闭状态,防止真空泵内冷凝水倒吸于干燥室; bc 段真空保持时间结束后进入 cd 段,此时,破空电子阀打开,外界空气经过辅助空气加热装置进入干燥室,干燥室压力恢复至常压状态; de 段常压保持时间结束后,破空电磁阀关闭,真空泵再次启动,开始下一个真空循环过程。其中,本文 ab 段、 cd 段时间通常需要小于 2 min。

2 关键零部件设计与选型

2.1 加热元件选型

如图 3a 所示,碳纤维红外板加热元件由保护层、基质层、发热层组成。发热层为碳纤维导电纸,基质层为环氧树脂玻璃布,保护层为聚对苯二甲酸乙二醇酯树脂。碳纤维导电纸上下覆盖基质层,再覆盖保护层,在热压机上经高温、高压,并在黏合剂作用下融合而成。厚度为 2 ~ 3 mm,可水洗,耐腐蚀。碳纤维导电纸两端有金属电极,220 V 下通电可迅速激发波长为 5 ~ 15 μm 的红外波。为防止加热板过热被击穿,表面黏贴热电偶温度传感器,用于加热板温度的调控。中试装置所用加热板尺寸如图 3b 所示,总体尺寸为 600 mm $\times$ 900 mm,适宜辐射间距为 20 ~ 50 mm。单块发热功率约为 500 W,最高发热温度为 120℃,但周围有 20 mm 宽的非加热区域。

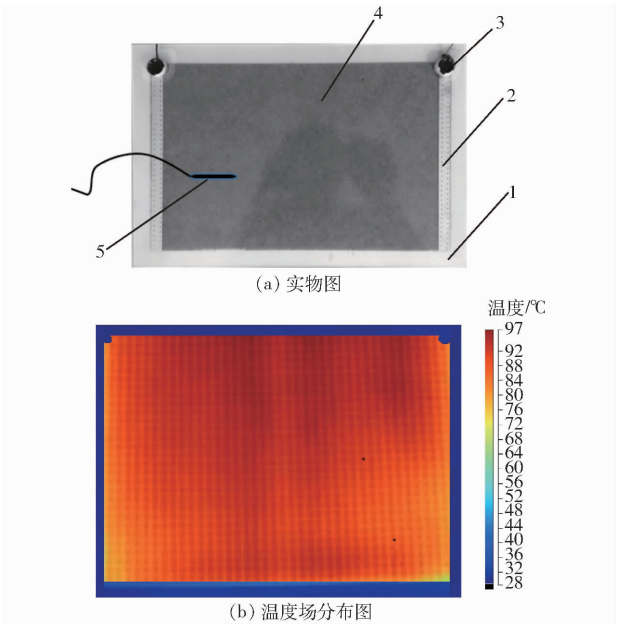


图 3 碳纤维红外板实物图与温度场分布图

Fig.3 Photos of carbon crystal infrared plate

1.基质层和保护层 2.电极 3.电极结点 4.碳纤维导电纸 5.温度传感器

2.2 加热模块设计与安装

碳纤维红外板厚度较小,长时间加热,容易产生

形变,引起干燥不均。因此,加热模块的设计既要保证料盘装卸方便、又要兼顾物料受热均匀性,同时便于后期的安装和维护。将碳纤维红外板和料盘通过支撑架集成为一体,构成一个完整的干燥模块。具体有横向安装、纵向安装两种方案供选择。

横向安装方案如图 4a 所示,支撑架上部空间有效宽度 604 mm × 904 mm,碳纤维红外板沿图中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,避免其受热后在重力作用下向内凹陷。单个料盘尺寸为 430 mm × 560 mm,可横向推进支撑架内。

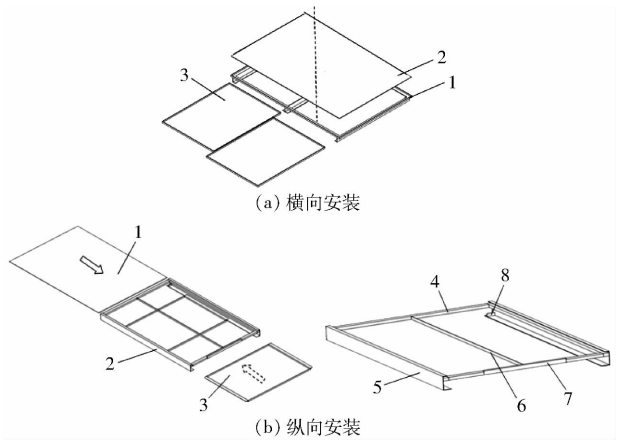


图 4 横向安装与纵向安装模块设计

Fig. 4 Design of horizontal installation module and longitudinal installation module

1. 碳纤维红外板 2. 支撑架 3. 料盘 4. 主支撑架 5. 悬挂支撑架 6. 加强板 7. 长挡块 8. 短挡块

纵向安装如图 4b 所示,料架的主支撑架由 10 mm × 20 mm 的 304 不锈钢扁管焊接而成,悬挂支撑架、长挡块由 304 不锈钢钣金折弯而成,其中悬挂支撑架为 U 形,左右对称焊接在主支撑架上,悬挂支撑架的 U 形开口间距不同,辐射距离也不同。料盘为矩形,两边带有“担边”。料盘的“担边”与悬挂支撑架贴合,可沿料盘虚线箭头所示方向,手动推进主支撑架内,短挡块限定料盘的移动位置;碳纤维红外板与主支撑架上表面贴合,可沿实线箭头所示方向,手动推进支撑架内,长挡块限制碳纤维红外板的移动位置。加强板焊接在主支撑架中心线处,避免碳纤维红外板受热向下凹陷,保证与料盘的平行度。碳纤维红外板和料盘沿相反方向推进,保证二者装卸时互不干扰,二者之间的间距为 30 mm。结合干燥室的具体结构,本文中试装置选用纵向安装模块。将制作好的纵向模块,共 10 层,以 25 mm 的间距逐层焊接在料架上。

2.3 辅助热风加热装置的设计

真空脉动循环过程中,外界干空气连续进入干

燥室,当进气温度低于干燥室内部空气对应的饱和压力和压力时,干燥室内部会产生冷凝水,不利于干燥进行。辅助热风装置,一方面可加热进入干燥室内的冷空气,另一方面过滤空气中的灰尘等杂质。具体结构如图 5 所示,主要由空气过滤器、电加热管、保温壳体组成。外界空气经空气过滤器和进气口进入加热室,沿着箭头所示方向,依次经过各个 U 形加热管表面,经出气口排进干燥室。开启时,可将外界冷空气加热到 30℃ 以上。U 形加热管间隔布置,延长空气流过加热管的路径和时间,促进空气升温,加热管选配功率为 2 kW。

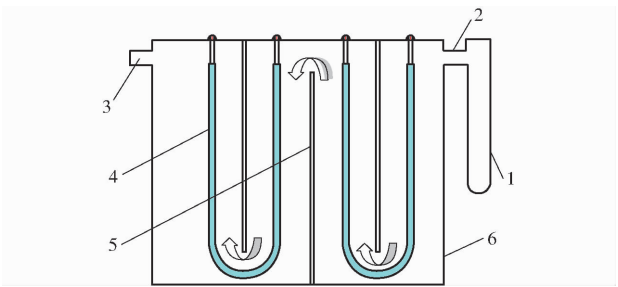


图 5 辅助热风加热装置

Fig. 5 Assist-hot air heating device

1. 空气过滤器 2. 进气口 3. 出气口 4. 电加热管 5. 隔板 6. 保温壳体

2.4 真空泵和冷凝器的选型

该真空干燥系统对抽气时间要求较为严格,干燥室抽真空时间应小于 2 min,真空泵的选型根据有效抽速 S_{ey} 确定^[20-21],公式为

$$S_{ey} = \frac{Q}{P_g} \tag{1}$$

式中 Q ——总气流量, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

P_g ——干燥室额定真空度, kPa

若实际抽速 $S_e > K_e S_{ey}$, K_e 为主泵抽速损失系数,取 2 ~ 2.5,则选用合理。经计算,本装置选用 2BV2070 型水环式真空泵。

该中试装置冷凝器传热面积可根据冷凝负荷和单位面积热负荷确定,传热面积计算公式^[22-23]为

$$A = \frac{Q_h}{K \Delta t_m} + A' \tag{2}$$

式中 A ——冷凝器换热设备面积, m^2

Q_h ——换热设备传热量,约等于碳纤维红外板的总额定功率,取 5 000 W

Δt_m ——对数平均温差,取 18.03 K

K ——冷凝壁传热系数,取 29 ~ 35 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

A' ——冷却风机补偿面积, m^2

最终求出换热面积在 3.57 ~ 4.3 m^2 之间。因此,确定冷凝器型号 FNH4.4,换热面积 4.4 m^2 ,可满足系统需求。

3 控制系统设计

3.1 硬件设计

控制系统是该干燥装置的核心部分,需要有干燥室压力调控、温度调控等功能。如图 6a 所示,将控制系统的硬件按照功能,划分为加热板温度控制模块、温湿度监测模块、温度/压力参数采集模块、质量监测模块、脉动控制模块等。对应的数据采集卡、称量仪表、从机模块等,分别设定不同的从机地址(0x01~0x0B)。触摸屏 MT6070iH 通过 RS485 串口依据 MODBUS 协议与从机进行通讯。

温度、压力传感器信号经过变送器转换成 0~5 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。主机向各个从机循环发送“读取”指令。主机对采集到的温度数据进行综合逻辑判断,发送指令到温控模块,执行 PID 控制程序

调控加热板温度。主机根据读取的干燥室压力和设定的真空保持时间、常压保持时间,发送指令到从机模块,控制真空泵和冷凝器的运行。主机向称量仪表发送“读取”指令,获取干燥过程物料质量变化。同时,采集真空干燥室内的温度和湿度变化。

3.2 软件设计

3.2.1 界面设计

控制系统具体包括系统界面及宏指令程序两部分,干燥装备通过触摸屏人机交互界面输入、显示试验参数,触摸屏主界面使用 Easybuilder 8000 软件编制。主界面如图 6b 所示,界面可显示干燥过程中碳纤维红外板温度、干燥时间等参数;并可以设置真空保持时间、常压保持时间、干燥总时间等参数。宏指令库具体包括干燥计时、压力脉动控制等程序。

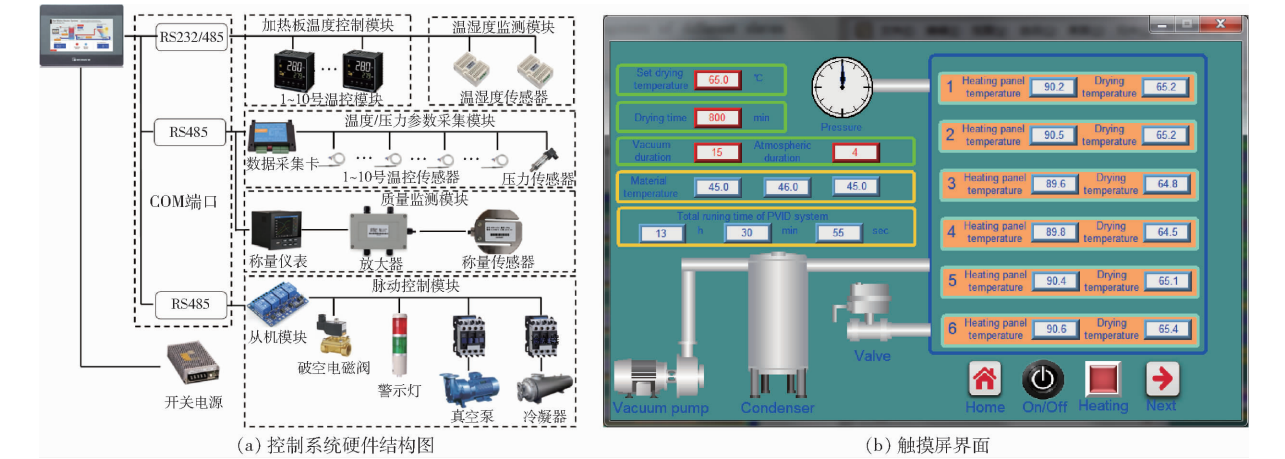


图 6 控制系统硬件组成和触摸屏界面

Fig. 6 Structural diagrams of control system

3.2.2 脉动压力变化过程的实现

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 7 所示。通过读取状态标准位以及相关的逻辑判断语句,控制破空电磁阀的开关/闭合,完成压力的调控。

主机首先获取干燥室内压力参数及设定的循环次数 N ,并判断处于何种状态。当 $N \geq 0$ 时,状态标志位设置为 ab 抽真空状态,破空电磁阀关闭,真空泵、冷凝器开始工作,干燥室内真空度持续上升;达到额定真空度时,状态标志位切换为 bc 真空保持阶段; bc 段结束时,状态标志位切换为 cd 破空阶段,真空泵、冷凝器停止工作,破空电磁阀打开,干燥室压力快速恢复到额定常压状态;当 de 常压阶段计时结束,状态标志位再循环切换为 ab 抽真空状态,并将总循环次数减 1,执行循环判断语句,直至总循环次数 N 变为 0。

4 试验验证

4.1 试验材料与方法

试验所用的茯苓采自安徽省金寨县。如图 8 所示,新鲜茯苓经过两次人工去皮、切制后,选取无边角破损的茯苓丁作为试验原料。其中,人工去除褐色外皮,最终切制为边长为 12 mm 的立方体。初始湿基含水率为 $(51.0 \pm 0.4)\%$ (干燥法,105℃干燥 24 h)。所用真空脉动红外干燥装置如图 9 所示,通过自动称量系统检测干燥过程物料质量变化,当茯苓丁湿基含水率小于 18% 时停止干燥试验;每组试验重复 3 次,取平均值作为结果。具体试验方案如表 1 所示,结合预试验结果,设定干燥温度为 65℃,试验分为 A、B 组,分别研究真空保持时间、常压保持时间对茯苓丁干燥过程的影响,以及干燥室内相对湿度变化规律。

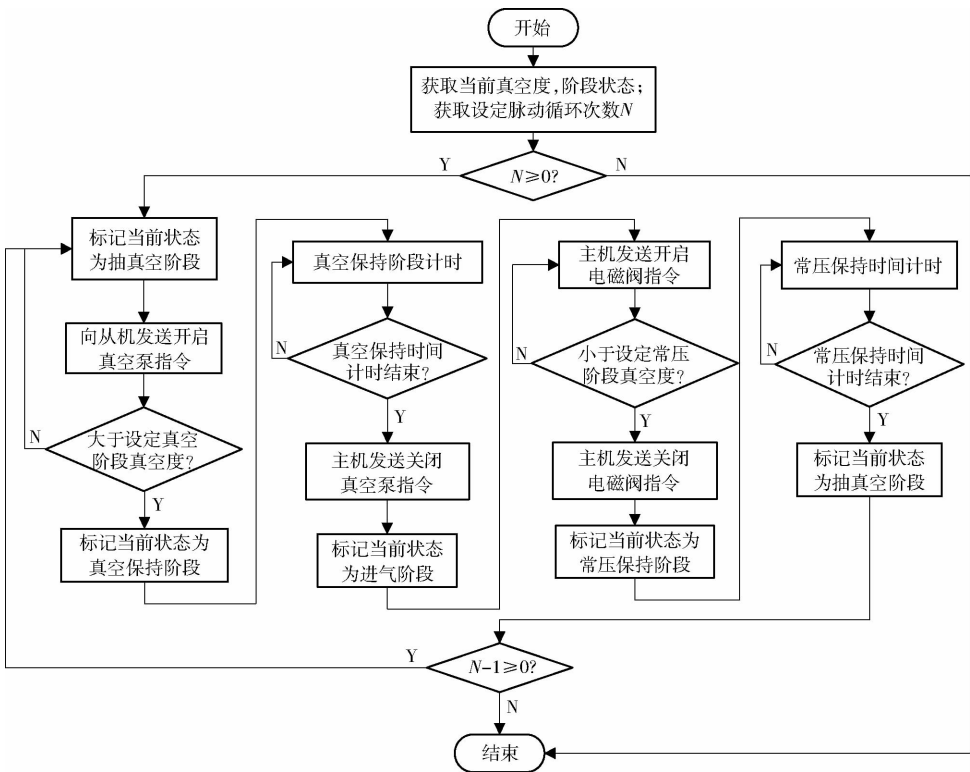


图 7 真空脉动控制系统流程图

Fig. 7 Flow-process diagram of pulsed vacuum control system

表 1 试验验证方案和试验参数

Tab. 1 Drying conditions and drying parameters

试验编号	试验条件		
	加热板温度/ ℃	真空保持 时间/min	常压保持 时间/min
A	65	2	4
	65	5	4
	65	15	4
	65	(恒真空)	0
	65	5	2
B	65	5	4
	65	5	8

注：茯苓丁装载密度为 8 kg/m²。

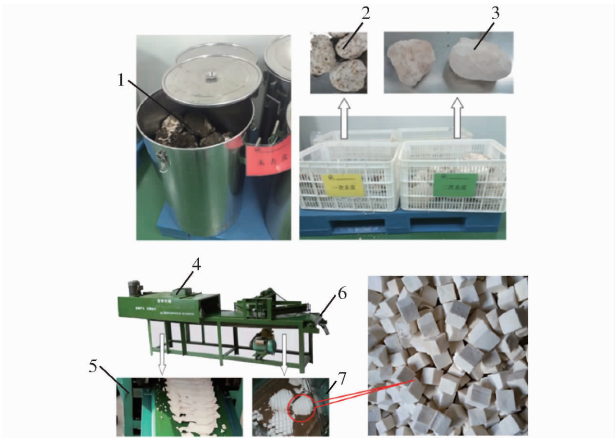


图 8 茯苓丁切制过程

Fig. 8 Cutting process of *Poria cocos* cubes

1. 茯苓 2. 一次去皮 3. 二次去皮 4. 切片部分 5. 切丁部分
6. 茯苓片 7. 茯苓丁



图 9 真空脉动干燥箱

Fig. 9 Pulsed vacuum drying equipment

1. 干燥箱 2. 冷凝器 3. 料架 4. 真空泵 5. 控制箱

4.2 参数计算

4.2.1 水分比

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。不同干燥时间水分比的计算可简化为^[24]

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \tag{3}$$

式中 M_0 ——物料初始干基含水率, g/g

M_t ——物料在 t 时刻的干基含水率, g/g

干基含水率计算公式^[25-26]为

$$M_t = \frac{W_t - W_g}{W_g} \tag{4}$$

式中 W_t ——在任意干燥 t 时刻的总质量, g

W_g ——干物质质量, g

4.2.2 破碎率

干燥后的茯苓丁采用 LSSM-150 型振动筛(安徽顺天机械制造有限公司)区分为 3 个等级,具体结果如图 10 所示,一级、二级、三级产品特点如下:一级品,立方体外形基本完整、质地紧实、边角有部分缺陷,切面有凹凸洼点或少量裂隙,部分茯苓丁颜色黄白、间或有黄斑,长、宽、高在 12 mm 以内,无不规则碎片、粉末、杂质、霉变;二级品,为在干燥过程中产生的不完整茯苓块、破碎的边角等,白色或灰白色的大小碎块或碎屑,无粉末、杂质;三级品,为茯苓筛选后残余的细小碎粒及粉末、无大块碎片,颜色洁白。人工称量后,计算各个等级产品所占百分比。

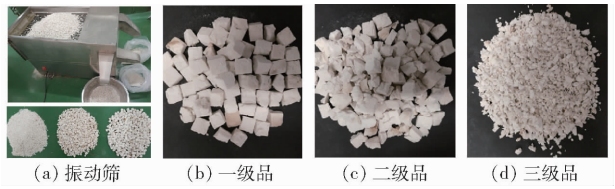


图 10 茯苓等级划分及类别

Fig. 10 Types and grades of dried *Poria cocos* cubes

5 结果与分析

5.1 压力参数对干燥过程的影响

干燥温度 65℃,常压保持时间 4 min,真空保持时间 2、5、15 min 以及恒真空条件下茯苓丁干燥曲线如图 11a 所示。不同干燥条件达到目标含水率的干燥时间分别为 500、480、520、560 min。真空保持时间 5 min 时,茯苓丁干燥时间最短,干燥总时间比恒真空缩短 80 min,这首先证明了真空保持时间过长,不利于干燥效率的提高。真空保持时间 2 min 时,干燥总时间也会增加,这表明真空脉动干燥过程中,起主导作用的依然是真空干燥;常压保持时间一定时,过短的真空保持时间也不利于干燥进行。从这个角度来说,真空脉动干燥可被认为是真空干燥的特例。

真空保持时间 5 min,常压保持时间 2、4、8 min,65℃干燥条件下,干燥曲线如图 11b 所示。干燥时

间分别为 510、480、545 min。表明过长或过短的常压保持时间,均会增加干燥总时间。与常压保持时间 4 min 相比,8 min 干燥条件下,茯苓丁干燥总时间增加约 65 min。这是因为常压保持时间过长,外界湿度较低的干空气进入箱体后,箱体与外界无气流流动,茯苓丁蒸发的水蒸气积聚在箱体内部,减缓干燥速率。当常压保持时间缩短为 2 min 时,干燥时间也会增加。一方面因为常压保持时间过短,茯苓丁未吸收足够多的热量,茯苓丁内部温度较低。当下一个真空阶段来临时,茯苓丁内部水分不能快速蒸发。另一方面,当常压时间过短时,箱体内部的空气尚未饱和,就被真空泵抽走,干燥室内部频繁的气流更替不利于干燥进行。表明真空脉动干燥需要合适的常压保持时间,既能维持物料升温,又能适时打破箱体内部水蒸气的平衡状态。因此,常压保持时间 4 min、真空保持时间 5 min,干燥时间最短。

最佳真空保持时间、常压保持时间的选择,可从另外一个角度解析。如图 12 所示,该曲线为干燥温度 65℃、真空保持时间 15 min、常压保持时间 4 min 时,干燥室内部温度、相对湿度变化曲线;其中, e、f 点分别对应真空保持时间 5、10 min 干燥室压力切换时间点。在破空阶段 cd 段,由于外界的不饱和干空气进入干燥室,相对湿度明显下降;抽真空阶段 ab 段,干燥室内高湿的热空气被真空泵抽出,温度、相对湿度也会下降;在常压阶段 de 段、真空保持阶段 bc 段的前期,相对湿度均快速增加,表明切换干燥室压力后可提高水分蒸发速率;后期相对湿度变化趋势平缓,表明茯苓丁经历快速脱水后进入湿度平衡状态。此时需切换干燥室压力,可再次提高水分蒸发速率。如果在 e、f 点切换干燥室压力,会缩短干燥总时间;沿 a' 点继续延长真空保持时间,相对湿度依然处于平衡状态,会延长干燥总时间。同理,沿 c 点继续延长常压保持时间,依然会延长干燥总时间。因此,干燥室压力的切换与干燥过程中相对湿度变化有关。微观时间尺度内干燥室内部相对湿度变化,可实时反映干

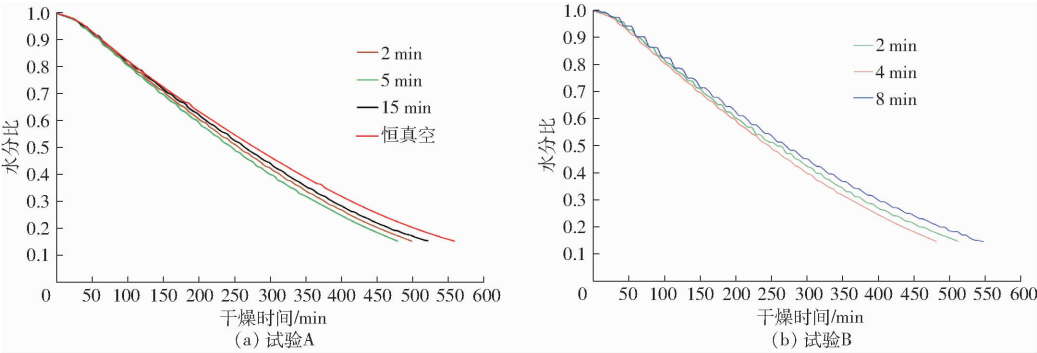


图 11 不同真空保持时间和常压保持时间下茯苓丁水分比变化曲线

Fig. 11 Drying curves of *Poria cocos* cubes at different vacuum duration and atmospheric duration

干燥过程物料水分蒸发情况。但关于干燥过程相对湿度变化的报道主要集中在热风干燥领域,相对湿度变化对真空干燥过程质热传递的影响机理,需进一步研究^[27-28]。

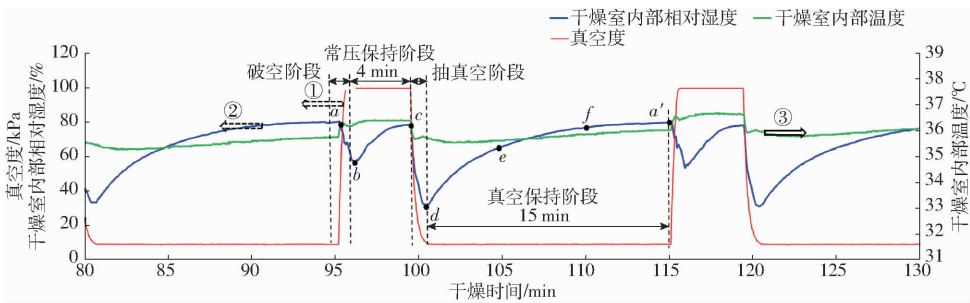


图 12 压力参数对干燥室内部温度、相对湿度变化曲线的影响

Fig. 12 Effect of pressure parameters on drying chamber temperature and relative humidity changing curves

5.2 脉动过程对干燥室内部温度、相对湿度的影响

干燥温度 65℃、真空保持时间 5 min、常压保持时间 4 min 时,干燥全过程中干燥室内部温度、相对湿度曲线如图 13 所示,干燥室内部温度变化范围 30 ~ 62℃,干燥室内部相对湿度升高到约 60% 后开始快速下降。这是因为干燥前期,茯苓丁内部水分

充足,受热后快速蒸发,干燥室内部湿度也随之升高。而随着干燥进行,茯苓丁含水率逐渐降低,脱水困难,相对湿度逐渐降低。由此可知,真空干燥室内部相对湿度变化可反映物料脱水状况,但进气温度应不能低于干燥室温度对应的饱和蒸汽压力,以避免干燥室内部产生冷凝水。

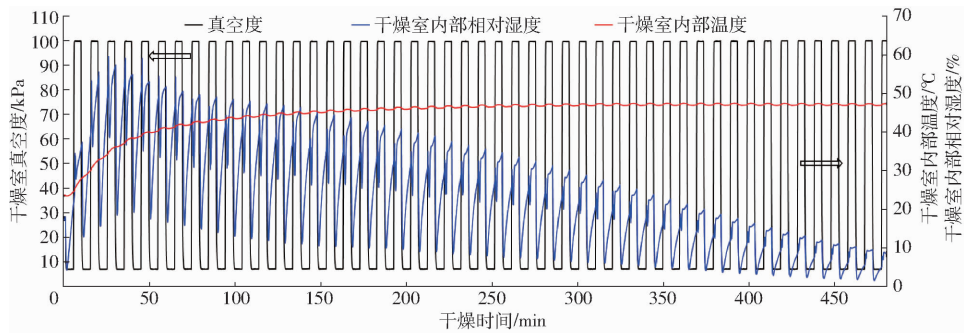


图 13 干燥全过程中干燥室内部温度、相对湿度变化曲线

Fig. 13 Chamber temperature and relative humidity changing curves during whole drying process

5.3 破碎率对比分析

如图 14 所示,真空脉动红外干燥技术下,一、二、三级所占百分比分别为 83.63%、13.40%、2.97%;而热风干燥的产品,其一、二、三级产品所占百分比分别为 55.12%、31.93%、12.95%。这表明真空脉动红外干燥可显著提高干燥茯苓丁完整性和成品率,降低二、三级产品百分比,并提高一级产品百分比。装载密度均为 8 kg/m²,真空脉动红外干燥、热风干燥技术下,干燥单位新鲜茯苓的时间分别约为 7、10 h,能耗分别约为 1.27、0.85 kW/kg。尽管真空脉动红外干燥能耗较高,但干燥时间和干燥品质明显高于热风干燥,而且产品等级明显提升,证明该干燥技术的可行性。该试验装置的装载量同热风干燥相比,依然差距较大,后期需进一步优化各个零部件的功率配比,降低能耗。图 14b 为新鲜茯苓,由于水分充足,表面平整,图 14c、14d 分别为真空脉动红外干燥、热风干燥后茯苓丁的典型代表,图 14c 中茯苓丁表面无裂纹,质地紧实;图 14d 中茯

苓丁呈现出贯穿到表面的裂纹,导致产品硬度下降,影响其外观。

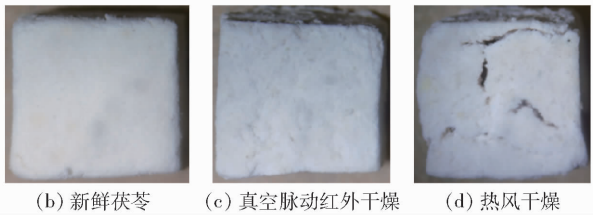
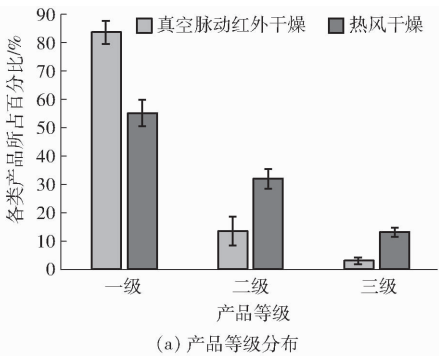


图 14 不同干燥技术下茯苓丁加工状况

Fig. 14 Processing status of *Poria cocos* cubes by different drying methods

6 结论

(1)所设计的横向安装、纵向安装模块,将碳纤维红外板和料架相结合,有效提高物料装载率,并可有效克服碳纤维红外板加热过程中的变形、凹陷问题,保证发热面与茯苓丁之间辐射间距的一致性,碳纤维红外板到料盘的辐射间距 30 mm、上下模块间距 25 mm 时,干燥效果较佳。

(2)基于“主-从机”模式设计控制系统,将各从机模块和上位机触摸屏集成为一体,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-常压”的连续转换。基于对碳纤

维红外板温度的监测,结合对干燥温度的有效调控,对真空干燥室内温度、相对时间变化进行检测。

(3)以 12 mm × 12 mm × 12 mm 的茯苓丁为试验原料对干燥中试装置进行试验验证。结果表明,该干燥装备设计方案和控制方案可靠,可有效实现茯苓丁的干燥。真空保持时间、常压保持时间分别为 5、4 min 时,干燥时间最短,约为 480 min,真空脉动干燥后茯苓丁一级品占比 83.63%,破碎率明显降低。研制的中试干燥装置可应用于茯苓丁等物料的干燥,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。

参 考 文 献

- [1] KAMILOGLU S, TOYDEMIR G, BOYACIOGLU D, et al. A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(Supp.1): 110 - 129.
- [2] DENG L, YANG X, MUJUMDAR A S, et al. Red pepper (*Capsicum annum* L.) drying: effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure[J]. Drying Technology, 2018, 36(8): 893 - 907.
- [3] WANG J, BAI T Y, WANG D, et al. Pulsed vacuum drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices: effects on drying characteristics, rehydration ratio, water holding capacity, and microstructure[J]. Drying Technology, 2019, 37(3): 301 - 311.
- [4] 张璧光,常建民,伊松林,等. 浮压下马尾松的干燥特性及水分迁移机理初探[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(5): 612 - 614.
ZHANG Biguang, CHANG Jianmin, YI Songlin, et al. The preliminary study of drying characteristics and mechanism of water movement on masson pine under floating pressures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5): 612 - 614. (in Chinese)
- [5] 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(2): 151 - 158.
- [6] 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 the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 113 - 116. (in Chinese)
- [7] XIE L, MUJUMDAR A S, FANG X, et al. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR - PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): effects on drying kinetics and quality attributes[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 102: 320 - 331.
- [8] WANG J, MU W, FANG X, et al. Pulsed vacuum drying of Thompson seedless grape: effects of berry ripeness on physicochemical properties and drying characteristic[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 106: 117 - 126.
- [9] 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 CSAE, 2015, 31(5): 317 - 324. (in Chinese)
- [10] 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.
ZHANG Weipeng, XIAO Hongwei, ZHENG Zhian, et al. Design and experiment of vacuum pulsed drying equipment based on carbon fiber infrared heating plate[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 242 - 251. (in Chinese)
- [11] 薛令阳,王书茂, MUJUMDAR A S, 等. 基于干燥均匀性的真空脉动干燥加热控制技术[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 317 - 325.
XUE Lingyang, WANG Shumao, MUJUMDAR A S, et al. Heating control technology of vacuum pulse drying based on drying uniformity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 317 - 325. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190436&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.036. (in Chinese)
- [12] 薛令阳,王书茂,高振江,等. 真空干燥过程中物料质量在线测量设备设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 326 - 337.
XUE Lingyang, WANG Shumao, GAO Zhenjiang, et al. On-line measurement of material quality in vacuum drying process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 326 - 337. <http://www.j-csam.org/>

- jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180938&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 09. 038. (in Chinese)
- [13] VISHWANATHAN K H, GIWARI G K, HEBBAR H U. Infrared assisted dry-blanching and hybrid drying of carrot[J]. Food and Bioproducts Processing, 2013, 91(2): 89 – 94.
- [14] SAVAS K, BASMAN A. Infrared drying: a promising technique for bulgur production[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 68: 31 – 37.
- [15] ZHU Y, PAN Z. 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.
- [16] 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 the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 109 – 112. (in Chinese)
- [17] PEI Y, TAO T, YANG G, et al. Lethal effects and mechanism of infrared radiation on *Sitophilus zeamais* and *Tribolium castaneum* in rough rice[J]. Food Control, 2018, 88: 149 – 158.
- [18] 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.
- [19] 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 CSAE, 2015, 31(19): 285 – 293. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 徐成海. 真空干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 325 – 355.
- [22] 王晓东. 真空技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 399 – 415.
- [23] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 98 – 133.
- [24] XIAO H, BAI J, 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 Bioproducts Processing, 2015, 94: 581 – 591.
- [25] XIAO H, PANG C, WANG L, 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.
- [26] AIDANI E, HADADKHODAPARAST M, KASHANINEJAD M. Experimental and modeling investigation of mass transfer during combined infrared-vacuum drying of Hayward kiwifruits[J]. Food Science & Nutrition, 2017, 5(3): 596 – 601.
- [27] XIAO H, BAI J, SUN D, et al. The application of superheated steam impingement blanching (SSIB) in agricultural products processing—a review[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 132: 39 – 47.
- [28] PU Y Y, SUN D W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution[J]. Biosystems Engineering, 2017, 156: 108 – 119.