

# 冰温真空干燥系统的设计与实现

## Design and application of an ice-temperature vacuum drying system

厉建国<sup>1,2</sup> 万金庆<sup>1,3</sup> 赵彦峰<sup>4</sup>

LI Jian-guo<sup>1,2</sup> WAN Jin-qing<sup>1,3</sup> ZHAO Yan-feng<sup>4</sup>

(1. 上海海洋大学, 上海 201306; 2. 农业部冷库及制冷设备质量监督检验测试中心〔上海〕, 上海 201306;

3. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 4. 上海开山冷冻系统技术有限公司, 上海 201306)

(1. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Quality Supervision, Inspection and Testing Center for Cold Storage and Refrigeration Equipment〔Shanghai〕, Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Kaishan Refrigeration Technology Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

**摘要:**冰温真空干燥对食品的营养成分破坏小,干燥品质高,但对冰温的精确控制一直是该领域的难点。在分析冰温真空干燥原理和干燥装置特点的基础上,设计改进冰温真空干燥系统及控制流程,并以白萝卜为材料进行试验。结果表明,该系统可以实现协调、稳定地运行,并控制物料温度在设定值的 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,达到了设计目标,可为后续的冰温研究提供试验平台。

**关键词:**冰温;真空干燥;温度控制

**Abstract:** The ice-temperature vacuum drying processing dose little damage to the nutrition of food products, and helps to preserve their high quality. However, the precise control of ice-temperature is difficult in this field. On the basis of analyzing the principles of ice-temperature vacuum drying process and the features of drying equipment, the ice-temperature vacuum drying system with improved control flow was set up and the experiments with the sample of white radish wear were carried out. The results showed that this system could operate steadily at the set sample temperature value  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and provided a platform for the follow-up study of the ice-temperature vacuum drying process.

**Keywords:** ice-temperature; vacuum drying; temperature control

冰温真空干燥是指食品在真空干燥过程中,物料温度保持在冰温。冰温是指从食品的冰点到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度区间,处于冰温状态的食品不会冻结,避免了冻藏引起的蛋白质变性、组织破坏等问题,相比冷藏,其呼吸作用和微生物繁殖也被

有效抑制,延长了贮藏期<sup>[1]</sup>。另外,冰温的诱导作用还可以促使生物体内氨基酸浓度增加,使其更加鲜美<sup>[2-3]</sup>。在真空干燥领域,干燥工艺对干燥品质有着重要影响,类似的设备,采用不同的工艺,得到不同的效果<sup>[4]</sup>。在将冰温概念应用于真空干燥工艺的探索中,相关文献<sup>[5-7]</sup>指出,冰温真空干燥比热风干燥要好,某些指标与真空冷冻干燥相当,甚至优于真空冷冻干燥。此外,提高并控制物料温度至冰温可缩短真空干燥周期,进而节能<sup>[8]</sup>。

冰温技术对控温要求很高,对应不同的食品,冰温可设定值为 $-0.5\sim -2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[9]</sup>,且温度波动应不超过 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。常规制冷设备难以实现冰温要求,阻碍了冰温技术在中国的应用和推广。在对冰温真空干燥研究过程中,难以找到冰温控制的具体方法。经过长期的试验探索和改进,较严格意义上的“冰温”真空干燥过程得以实现,即整个干燥过程均实现了物料温度在设定值 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内。

本研究基于冰温理论和真空干燥技术,在前期大量手动控制试验得到的数据和操作经验的基础上<sup>[10]</sup>,整理控制策略,根据已有设备的实际配置现状,重新设计并制作控制系统,以期实现物料在冰温状态下的自动真空干燥,为今后改进冰温真空干燥设备,提高真空干燥效率,提供参考。

## 1 系统概述

### 1.1 冰温真空干燥系统的组成

冰温真空干燥试验装置系统原理图见图1。本装置主要由真空箱、冷阱、真空系统、加热系统和测控系统组成。真空箱置于冷库内<sup>[11]</sup>;冷阱由一套制冷机组为其提供冷量;真空系统主要由真空泵、压力变送器、漏气阀及放气阀组成;加热系统由电加热板和可控硅调压器组成;测控系统(SCADA)负责采集与保存相关温度、压力和物料重量等实时数据,并控制干燥装置按要求运行。

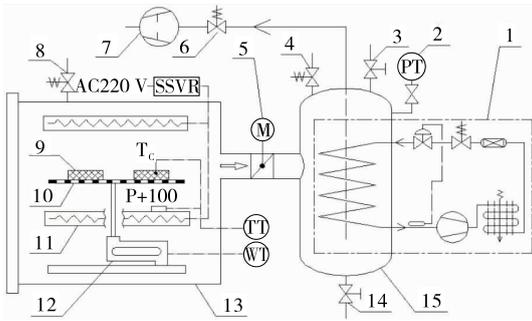
**基金项目:**国家自然科学基金项目(编号:31171764)

**作者简介:**厉建国,男,上海海洋大学工程师,硕士。

**通信作者:**万金庆(1964—),男,上海海洋大学教授,博士。

E-mail:jqwan@shou.edu.cn

**收稿日期:**2017-07-19



1. 冷阱制冷机组 2. 真空压力变送器 3. 手阀 4. 放气阀 5. 电动蝶阀 6. 止油阀 7. 真空泵 8. 漏气阀 9. 物料 10. 托盘 11. 电加热板 12. 重量传感器 13. 真空箱 14. 排水阀 15. 冷阱  
图1 干燥试验装置系统原理图

Figure 1 Schematic diagram of the drying system

1.2 影响物料温度的因素分析

冰温真空干燥过程中,物料温度的精确控制是难点:物料同时存在内部水、冰、气三相的相变、传质与与外部环境传热、传质。前期的手动冰温真空干燥预试验表明,影响物料温度控制的主要因素有辐射热量、进气方式(由漏气阀进气或放气阀进气)和真空压力。图2为被干物料(被控对象)与真空箱体、加热板和漏气之间的热平衡关系,它们之间的热平衡关系见式(1)。

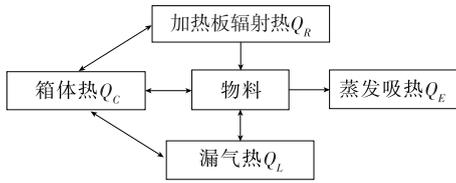


图2 物料热平衡关系图

Figure 2 Heat gain relationship of samples

$$Q_E + cm\Delta t = Q_R \pm Q_L \pm Q_C, \quad (1)$$

式中:

$Q_E$  —— 物料水分蒸发带走的热量, kJ;

$c$  —— 物料比热容, kJ/(kg · °C);

$m$  —— 物料质量, kg;

$\Delta t$  —— 物料温度变化, °C;

$Q_C$  —— 箱体传热量, kJ;

$Q_R$  —— 加热板传热量, kJ;

$Q_L$  —— 漏气传热量, kJ。

在式(1)中,  $Q_C$  为等式的平衡项,该热量以辐射形式传递,数值小且稳定,在控温过程中可忽略;  $\Delta t$  为判断物料热平衡的温度指标,在冰温控制过程中,该项要求  $\leq \pm 0.5$  °C,对热量的影响也可忽略。要使物料温度波动在冰温范围内,实现物料  $Q_E \approx Q_R \pm Q_L$  的热平衡是控制关键。

1.3 物料温度控制方案设计

物料干燥需要热量,常见的热风干燥通过控制热风温度将热量传递给被干物料;在真空冷冻干燥中,被干物料多放置在搁板上,通过控制搁板的温度加热被干物料(加热量不可使物料内水分融化),上述2种干燥方法,并没有将物料温

度作为被控参数进行控制。本装置将物料温度作为被控参数,控制框图见图3。图3中,  $t_1$  为物料温度,  $t_2$  为加热板表面温度,加热板与物料间的辐射传热  $Q_R$  的大小与其绝对温度的四次方之差  $[(t_2 + 273)^4 - (t_1 + 273)^4]$  呈正比。在  $t_1$  主回路中,物料温度偏差与加热量的大小( $t_2$ )并无确定的对应关系,传统控制策略无法实现控制曲线,采用模糊控制策略解决;板温  $t_2$  为控制中引入的副参数,采用PID控制,形成副回路,与主回路一起组成串级控制回路。

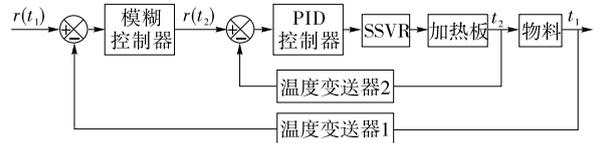


图3 物料温度串级控制框图

Figure 3 Cascade control loops of the sample temperature

2 控制系统的组成

2.1 系统的硬件结构

控制系统的硬件结构见图4。现场传感器采集的温度、压力和设备运行状态等实时数据,经过 AI/DI 模块送入 PLC 中,运算后输出的模拟量或数字量通过 AO/DO 模块输出驱动信号到执行装置。安装有组态软件的上位机实时读取 PLC 数据寄存器中的数据并显示在人机交互界面,同时还将所需要的数据进行归档保存,以便后期分析和优化。

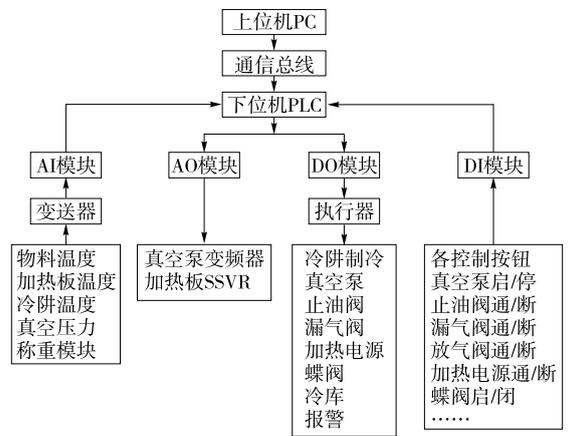


图4 控制系统硬件结构图

Figure 4 Hardware structure of control system

控制电路在设计时考虑了自动控制 and 手动控制 2 种需求,设置了手动/自动切换开关。根据控制要求和实验室的实际条件,选用西门子 S7-200 系列<sup>[12]</sup>的 CPU224XP CN 为主模块,搭配一块 EM231 和一块 EM232 扩展模块。

2.2 控制流程及 PLC 程序设计

2.2.1 冷阱制冷系统的控制 冷阱制冷机组采用二位控制,并设定冷阱的控制偏差为  $\pm 1.5$  °C。即当低于设定温度 1.5 °C 时,停机;当高于设定温度 1.5 °C,同时满足停机时间  $> 3$  min 时,重新开机。

2.2.2 温度—压力联合控制 以某一物料控制在冰温带  $T_m \sim 0$  °C 为例( $T_m$  为物料冰点),其干燥过程控制流程图见图5。

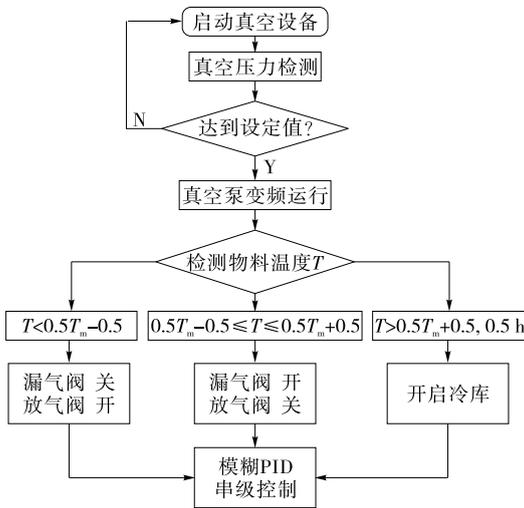


图 5 温度—压力联合控制流程图

Figure 5 Flowchart of temperature-pressure combined controlling

冷阱温度达到设定值后,开启真空系统,使真空泵定频 50 Hz 运行,漏气阀 8 和放气阀 4 处于关闭状态;达到设定压力后,真空泵降频到 38 Hz 运行。当物料温度  $T < (0.5T_m - 0.5) ^\circ\text{C}$  时,保持阀 8 关、阀 4 开;当  $(0.5T_m - 0.5) ^\circ\text{C} \leq T \leq (0.5T_m + 0.5) ^\circ\text{C}$  时,阀 8 开、阀 4 关;在干燥中后期,物料脱水的阻力越来越大,蒸发所需要的热量也逐渐减少,此时加热板的温度也调节到最低,若还不能将物料温度控制在冰温带,即  $T > (0.5T_m + 0.5) ^\circ\text{C}$  并且该状态保持 0.5 h 以上,则开启冷库制冷,辅助物料降温。以上各阶段加热板启用模糊—PID 串级控制策略。

2.2.3 人机界面的设计 上位机人机主界面见图 6。该人机监控界面选用组态王 7.55 组态软件编写,具备实时显示设备运行状态、设定系统工艺参数、启停设备以及数据采集保存等功能。

### 3 试验研究

选取白萝卜为干燥对象,验证该控制系统对冷阱制冷系统、真空系统、加热板及物料温度的控制能力和对整个机组的协同控制效果。

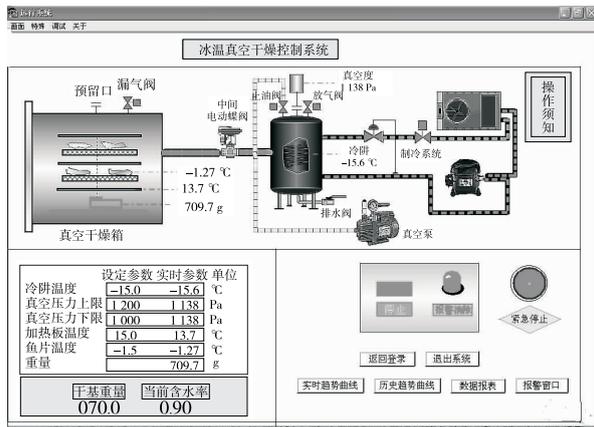


图 6 监控系统主界面

Figure 6 Main interface of SCADA

### 3.1 干燥方法

将新鲜萝卜 700 g 左右(测得含水率 93%,冰点为  $-3.0 ^\circ\text{C}$ ,重量根据样品摆放和重量传感器量程综合考量确定)清洗干净,切成约 5 mm 薄片,均匀放到干燥箱的网状托盘上。启动冰温真空干燥设备,按照干燥流程自动进行干燥。当样品含水率降至 30%后结束运行,干燥用时 20~22 h。

### 3.2 结果与讨论

冷阱温度变化曲线见图 7,在整个干燥过程中,控制冷阱的温度在  $(-15 \pm 1.5) ^\circ\text{C}$  内,满足试验要求。

干燥箱真空压力变化曲线见图 8,箱真空压力在  $(1.1 \pm 0.1) \text{ kPa}$  内波动,与试验中压力设定相一致。

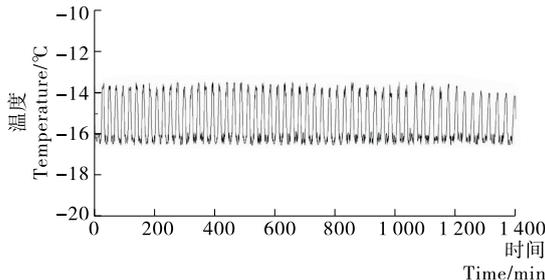


图 7 冷阱温度变化曲线

Figure 7 Curves of cold trap temperature

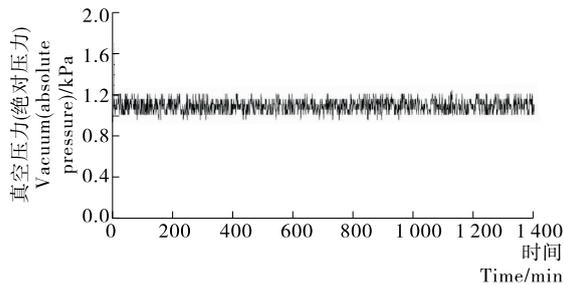


图 8 真空压力变化曲线

Figure 8 Curves of vacuum

图 9 为物料在真空压力为  $(1.0 \sim 1.2) \text{ kPa}$  下的温度变化曲线。干燥初始,随着真空箱压力的降低,物料表面水分开始大量蒸发,物料温度迅速降低到  $0 ^\circ\text{C}$  以下。PLC 控制器根据测得的实时温度信号,通过 Fuzzy-PID 控制程序决策后选择合适的加热温度,并输出相应的 4~20 mA 控制信号到可控硅调压器,进而控制加热板的辐射热量,使物料温度稳定在冰温带内。到了干燥后期,由于物料本身传热传质阻力增

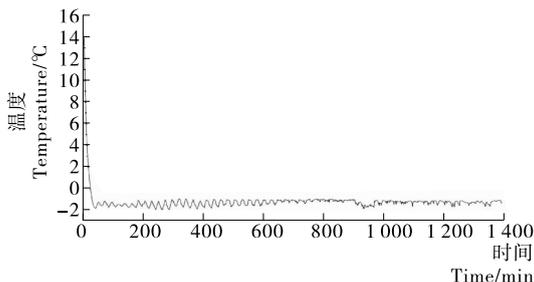


图 9 物料温度变化曲线

Figure 9 Curves of sample temperature

(下转第 156 页)

氧化的指标,值得进一步研究。

乙醇分级提取获得的不同蜂胶黄酮样品中黄酮质量、含量与抗氧化活性之间有一定的相关性,说明乙醇分级提取蜂胶黄酮从提取效果、分离效果和抗氧化活性上都具有一定优势。

### 参考文献

- [1] 罗火林,刘星星,龚上信,等.不同地区蜂胶和树胶的红外谱图分析[J].光谱学与光谱分析,2015,35(11):3 058-3 062.
- [2] 张翠平,平舜,黄帅,等.蜂胶的地理来源、植物来源及化学成分的研究[J].中国药学杂志,2013,48(22):1 889-1 892.
- [3] 田进军,薛艳,候振健.伪三元相图法制备 O/W 型蜂胶微乳[J].食品与机械,2011,27(3):127-129.
- [4] 徐响,张红城,董捷.蜂胶功效成分研究进展[J].食品工业科技,2008,29(9):286-289.
- [5] 房柱.蜂胶——黄酮化合物的宝库[J].蜜蜂杂志,1998(9):11-12.
- [6] 潘娅,郑德俊,周莉玲,等.蜂胶生理活性与药理作用研究浅释[J].中华中医药学刊,2004,22(2):381-382.
- [7] SAWICKA D, CAR H, BORAWSKA M H, et al. The anticancer activity of propolis[J]. Folia Histochemica Et Cytobiologica, 2012, 50(1): 25-37.
- [8] MASSARO C F, KATOULI M, GRKOVIC T, et al. Antistaphylococcal activity of C-methyl flavanones from propolis of Australian stingless bees (*Tetragonula carbonaria*) and fruit resins of *Corymbia torelliana* (Myrtaceae)[J]. Fitoterapia, 2014, 95(2): 247-257.
- [9] AGÜERO M B, GONZALEZ M, LIMA B, et al. Argentinean

propolis from *Zuccagnia punctata* cav. (Caesalpinieae) exudates: phytochemical characterization and antifungal activity [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(1): 194-201.

- [10] 张翠平,胡福良.蜂胶中的黄酮类化合物[J].天然产物研究与开发,2009,21(6):1 084-1 090.
- [11] 付英娟.蜂胶中有效成分的提取及应用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007:18-31.
- [12] 马士巧,马海乐,潘忠礼,等.黑蜂蜂胶不同极性提取物的体外抗氧化活性[J].中国食品学报,2016,16(8):53-58.
- [13] 张云香,杨志孝,安蔚,等.不同溶剂对蜂胶黄酮提取率影响的研究[J].时珍国医国药,2006,17(1):9-10.
- [14] 王宗成,蒋玉仁,刘小文,等.响应面优化生姜姜叶总黄酮提取工艺及其抗氧化活性研究[J].天然产物研究与开发,2015,27(9):1 582-1 588.
- [15] 欧阳凯,何先元,陈飞,等.四齿四棱草总皂苷提取工艺优化及抗氧化性研究[J].食品与机械,2016,32(7):141-145.
- [16] 刘安,罗松,李祁广,等.不同工艺制备辣椒籽油的体外抗氧化活性比较[J].食品与机械,2016,32(6):168-170.
- [17] 陆俊,罗丹,张佳琦,等.三叶木通不同部位多酚、黄酮含量及抗氧化活性比较[J].食品与机械,2016,32(8):132-135.
- [18] 梁巧楣.蜂胶总黄酮的制备及含量测定[J].中国现代医学杂志,2007,17(17):2 123-2 126.
- [19] 安砚波,王浩.响应面法优化蜂胶总黄酮的提取工艺[J].中国蜂业,2016,67(9):46-49.
- [20] 玄红专,胡福良.不同地区蜂胶抗氧化活性与化学组分的研究进展[J].蜜蜂杂志,2009,29(2):7-10.

(上接第 91 页)

大,脱水速度逐渐变慢,所需汽化潜热也相应减少,此时加热板的热辐射以及进气带入的热量会较明显地影响物料的温度,物料温度会逐渐上升。在试验中,利用冷库将进气冷却,可将物料的温度较好地维持在 $(-1.5 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 。

## 4 结论

冰温真空干燥工艺能够加快物料干燥速度,节省设备运行时间。但是干燥过程中的物料温度控制方法阻碍该真空干燥工艺的推广。通过本装置对冰温真空干燥装置控制系统的设计改进和多次调试运行,验证了该系统设计的可行性与合理性。

(1) 提出了温度—压力联合控制方案,可以保持整个干燥过程的真空压力在 $(1.1 \pm 0.1) \text{ kPa}$ ,物料温度在设定值的 $\pm 0.5 ^\circ\text{C}$ ,符合冰温设备的控温精度要求。

(2) 设计的控制系统能使冷阱系统、真空系统、加热系统等协调、稳定地运行,并具备系统动态监控、数据采集、状态报警等多种功能。

(3) 该系统为后续冰温干燥食品品质方面的深入研究提供了平台,适用于果蔬、水产等多种物料,具备较强的通用性。

### 参考文献

- [1] 石文星,彦启森,马灵芝,等.冰温技术及其在食品工业中的应用[C]//2001福建省冷藏技术研讨会论文集.[出版地不详]:福建

建省制冷学会,2001:39-44.

- [2] 李林,申江,王晓东.冰温贮藏技术研究[J].保鲜与加工,2008(2):38-41.
- [3] 服部國彦.提高食品新鲜度及口味的冰温技术[C]//第3届中国食品冷藏链新设备、新技术论坛论文集.北京:中国制冷空调工业协会,2007:79-84.
- [4] 徐成海,张志军,张世伟,等.真空干燥现状与发展趋势分析[J].干燥技术与设备,2009,7(5):207-213.
- [5] 申江,李帅,齐含飞.低温真空干燥对胡萝卜品质的影响[J].制冷学报,2012,33(2):64-67.
- [6] 庞文燕,王金庆,姚志勇,等.不同干燥方式对青鱼片鲜度的影响[J].广东农业科学,2013,40(15):124-126,141.
- [7] 陈青云,施文正,王金庆,等.三种干燥方式对罗非鱼片风味物质的影响[J].食品工业科技,2014,35(16):323-327.
- [8] 胡俊,蒲彪,何锦凤.真空冷冻干燥过程中节能措施探讨[J].食品与机械,2007,23(2):122-125.
- [9] 应月,李保国,董梅,等.冰温技术在食品贮藏中的研究进展[J].制冷技术,2009(2):12-15.
- [10] 姚志勇,王金庆,庞文燕,等.冰温真空干燥过程中维持冰温的方法初探[J].食品工业科技,2014,35(9):196-202.
- [11] 王金庆,庞文燕,姚志勇,等.一种冰温真空干燥装置及生鱼片冰温真空干燥的方法:中国,CN201310302006X[P].2013-11-27.
- [12] 赵景波,阿伦,李杰臣.西门子 S7-200PLC 实践与应用[M].北京:机械工业出版社,2012:26-193.