

小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置设计与试验

邓改革^{1,2} 康宁波¹ 王松磊^{1,3} 刘贵珊³ 何建国^{1,3}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 中国矿业大学银川学院信息工程学院, 银川 750021;

3. 宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 目前,真空预冷装置体积大、能耗高,且捕水器捕水量不能适应水蒸气蒸发量等,针对上述问题,设计了一台基于盐水蓄冷的小型枸杞真空预冷装置。根据技术要求建立了枸杞真空预冷数学模型,对枸杞表面传质边界层进行了理论分析,对真空泵、真空预冷冷负荷、盐水蓄冷系统以及计算机检测系统的关键部件参数进行了设计计算,并试制出一台小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置。试验结果表明:该真空预冷装置能够在 879 s 内将 8.714 kg 带柄鲜枸杞的中心温度降至保鲜温度 4.0℃,在补水率 4.50% 情况下鲜枸杞失水率为 5.29%;该装置捕水器设计捕水率为 75.00%,实际捕水率为 79.32%;试验期间盐水箱中盐水温度从 -20.1℃ 升高至 -9.8℃,盐水所蓄冷量保证了真空预冷过程的顺利完成,通过调节盐水泵、改变盐水循环速度实现了捕水器捕水量与水蒸气蒸发量的平衡,满足设计要求。

关键词: 带柄鲜枸杞; 真空预冷; 盐水蓄冷

中图分类号: S663.9; S379.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)04-0367-06

OSID:



Design and Experiment of Small Cooling Storage Vacuum Precooling Device for Fresh Wolfberry with Stem

DENG Gaige^{1,2} KANG Ningbo¹ WANG Songlei^{1,3} LIU Guishan³ HE Jianguo^{1,3}

(1. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. School of Information Engineering, China University of Mining and Technology Yinchuan College, Yinchuan 750021, China

3. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: At present, the vacuum pre-cooling device has a large volume, high energy consumption, and the water catching capacity of the water trap can not be well adapted to the problem of evaporation of water vapor. In order to solve the above problems, a small-scale wolfberry vacuum precooling device based on brine storage was designed. According to the technical requirements, the mathematical model of vacuum precooling was established. The theoretical analysis of the surface mass transfer resistance layer was carried out. The key parameters of the vacuum pump, vacuum precooling and cooling load, brine storage system and computer detection system were designed and calculated. Finally, a small cooling storage vacuum precooling device for fresh wolfberry with stem was produced. The experimental results showed that the vacuum precooling device can reduce the center temperature of 8.714 kg fresh wolfberry to the preservation temperature of 4.0℃ in 879 s, and the water loss rate was 5.29% when the water replenishment rate was 4.50%. The water trap of the device was designed to have a water catch rate of 75.00%, and the actual water catch rate was 79.32%. The brine temperature in the brine tank was increased from -20.1℃ to -9.8℃ during the test. The cold storage capacity of the brine in the tank can ensure the smooth completion of the vacuum pre-cooling process. By adjusting the brine pump to change the brine circulation speed, the balance between the catchment of the water trap and the evaporation of water vapor was achieved, which met the design requirements.

Key words: fresh wolfberry with stem; vacuum precooling; cool storage of brine

收稿日期: 2019-08-13 修回日期: 2019-10-10

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大科技项目(2018BCF01001)

作者简介: 邓改革(1987—),男,博士生,中国矿业大学银川学院讲师,主要从事水利水电工程研究,E-mail: mood.happy@163.com

通信作者: 何建国(1960—),男,教授,主要从事农业工程自动化装备研究,E-mail: hejg@nxu.edu.cn

0 引言

枸杞鲜果为浆果类果实,皮薄肉厚,含水、含糖量高,采后如不及时降温冷却,在较高温度下极易受机械损伤和微生物的影响而腐烂变质^[1]。采后及时预冷是延长枸杞鲜果保质期的有效途径^[2-10]。传统冷库预冷方式降温速度慢,且不均匀,预冷期间枸杞较强的呼吸作用容易使其营养成分消耗过快,造成品质下降。真空预冷技术通过水分在真空条件下迅速蒸发、吸热来降低果蔬自身的温度^[11],与其他预冷方式相比,具有降温迅速和降温均匀的显著优势,因此,受到越来越多的重视。

国内外不少学者对真空预冷进行了研究。文献[12]采用响应面法结合遗传算法对西兰花采后真空预冷进行优化,确定了西兰花的最佳真空预冷工艺参数;文献[13]对真空冷却和常规冷却肉丸的微生物状况进行了分析;文献[14]研究了改良气氛真空冷却(MAVC)对3种不同叶白菜品质的影响;文献[15]进行了冬枣真空预冷预处理方法筛选的研究;文献[16]进行了菜心真空预冷效果的试验研究,探讨了其对真空预冷的适应性;文献[17]将塑料薄膜包装袋与真空预冷技术相结合的冷藏保鲜技术应用于子芋上,研究分析了其冷藏保鲜效果;文献[18]设计了真空预冷装置的计算机检测系统,实现了真空预冷过程中真空室内压力、产品质量和温湿度数据的实时测量;文献[19]进行了柱形蔬菜的真空预冷试验,探讨了其预冷方式的有效性。

上述研究主要集中在真空预冷工艺参数及真空预冷后果蔬品质变化等方面,所涉及到的真空预冷装置存在体积大、能耗高,且捕水器捕水量不能适应水蒸气蒸发量等问题。目前,针对浆果类,尤其是枸杞的真空预冷装置及真空预冷效果方面的研究鲜有报道。本文对小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷设备进行研究,对关键部件参数进行设计计算,并试验验证设备的性能,以期对浆果类小型蓄冷真空预冷装置设计提供参考。

1 总体设计方案

1.1 技术要求

真空预冷对象是中宁产头茬带柄鲜枸杞。设计要求通过该真空预冷装置能够使10 kg鲜枸杞的中心温度在25 min内从25℃降至保鲜温度4.0℃;同时要求采用盐水蓄冷的方式为捕水器的正常运行提供充足的冷量。

1.2 系统结构与工作原理

根据技术要求本文设计了小型蓄冷式带柄鲜枸

杞真空预冷装置,该装置主要由补水管、真空预冷装置罐体、摄像头、空气温湿度传感器、中心温度探头、压力探头、控制面板、捕水器、真空压力表、进气口消声器、真空泵、膨胀阀、冷凝器、压缩机、制冷盐水箱和盐水循环泵组成。小型蓄冷式枸杞真空预冷装置整机结构示意图如图1所示。

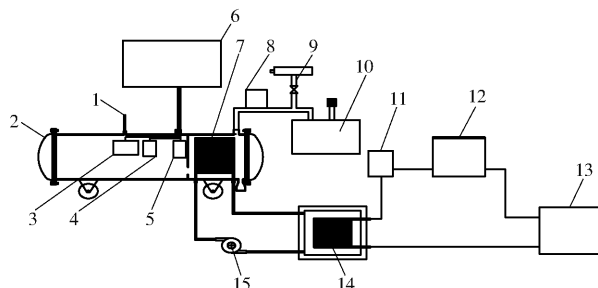


图1 小型蓄冷式枸杞真空预冷装置整机结构示意图

Fig.1 Schematic of whole machine structure of small cold storage type wolfberry vacuum precooling device

1. 真空预冷补水管 2. 真空预冷装置罐体 3. 空气温湿度传感器 4. 中心温度探头 5. 压力探头 6. 控制面板 7. 捕水器
8. 真空压力表 9. 进气口消声器 10. 真空泵 11. 膨胀阀 12. 冷凝器 13. 压缩机 14. 制冷盐水箱 15. 盐水循环泵

其工作原理为:首先启动装置的盐水蓄冷制冷系统,制冷系统将盐水箱中盐水温度降至 -20°C ,打开盐水泵启动捕水系统;启动真空泵将真空罐中气体排至罐外,随着罐内压力降至水闪发点,枸杞表面水分迅速蒸发,并不断从枸杞表面吸收热量,枸杞温度逐渐降低;真空罐内压力传感器和温度传感器实时监测罐体内压力和枸杞温度,当温度达到设定温度时,预冷过程完成。

1.3 理论分析

(1) 数学模型及假设

在枸杞真空预冷过程中真空罐可视为绝热容器,其表面水分蒸发后从枸杞自身吸收热量,枸杞表面温度及含水率均降低,导致枸杞内部与表面存在较大的温度梯度和水分梯度,在梯度势作用下枸杞表面与内部存在传热和传质的热湿迁移现象^[20],如图2所示。

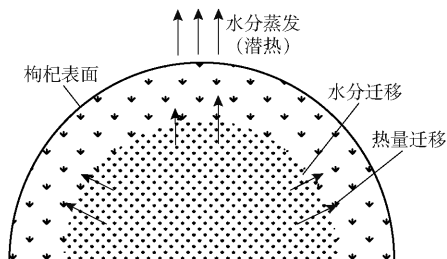


图2 枸杞内部水分热量迁移

Fig.2 Wolfberry internal heat moisture migration

在枸杞真空预冷过程中,真空罐中水蒸气被真空泵抽走使其水蒸气化学势小于枸杞表面空气中水

蒸气化学势,导致枸杞表面水蒸气向真空罐空气侧移动,破坏了枸杞表面自由水间化学势平衡,枸杞内部自由水将补充到其表面空气并扩散至真空罐空气中,使枸杞温度降低。为了便于分析计算,建立半径为 R 的类球形数学模型,如图 3 所示。并进行理论假设:真空罐中空气和水蒸气视为理想气体;枸杞视为类球形物体,各向同性,在真空预冷过程中物性参数恒定,不发生形变;枸杞内部水分迁移以液态形式进行,并且水分的蒸发只在枸杞表面进行;枸杞表面传质边界层很薄,假定其仅有传质而无热交换^[2]。

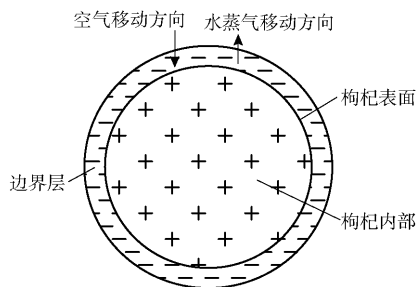


图 3 枸杞表面水蒸气扩散

Fig. 3 Wolfberry surface water vapor diffusion

(2) 枸杞表面传质边界层理论分析

在传质交换过程中,枸杞表面与真空罐空气之间形成传质边界层,如图 3 所示,水蒸气的扩散通过边界层完成,该边界层对冷却过程有较大的影响。将该传质边界层划分为上、下气体层,接近枸杞表面的下层气体水蒸气分压近似等于枸杞表面溶液饱和压力,而接近真空罐上层气体水蒸气分压近似等于真空罐中水蒸气分压力,且下层气体水蒸气分压高于上层,所以枸杞表面水蒸气扩散方向为自下而上^[2]。建立水蒸气扩散的模型,假设水蒸气质通流量为 m ,扩散距离为 y ,如图 4 所示,图中 p_{aw} 、 p_{fw} 、 p_w 分别表示真空罐中水蒸气分压、枸杞模型表面水蒸气分压及枸杞表面温度所对应纯水的饱和水蒸气压。在传质边界层中,水蒸气通过枸杞表面扩散至真空罐中,空气向枸杞表面扩散,但空气无法通过枸杞表面,最终导致部分空气混合物整体向真空罐流动,使枸杞表面压力保持平衡。定义该股整体流动质的平均速度为 v ,由于在传质过程中传质边界层空气与水蒸气混合物总压力 p 保持不变,故传质边界层中压力梯度表示见图 4b。

引入质扩散系数 D 表示物质扩散能力,假定已知温度为 T_0 ,压力为 p_0 ,在该状态下的质扩散系数为 D_0 时,任意状态下质扩散系数 D 与温度 T 、压力 p 的关系可表示为^[21]

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \frac{p_0}{p} \quad (1)$$

由文献[2]可得枸杞表面水蒸气扩散量与真空

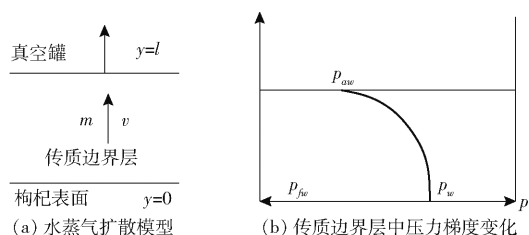


图 4 传质边界层中水蒸气扩散

Fig. 4 Water vapor diffusion in mass transfer resistance layer

罐中水蒸气分压 p_{aw} 、贮藏环境压力 p 的关系为

$$M = D_0 \frac{p_0}{T_0^{3/2}} \frac{T^{1/2}}{R_w l} \ln \frac{p - p_{aw}}{p - p_{fw}} \quad (2)$$

或
$$M = D_0 \frac{p_0}{T_0^{3/2}} \frac{T^{1/2}}{R_w l} \ln \left(1 + \frac{p_{fw} - p_{aw}}{p - p_{fw}} \right) \quad (3)$$

式中 M ——水蒸气扩散量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 l ——扩散距离, m
 R_w ——气体常数, kJ/kg

从式(2)、(3)可以得出:在真空预冷过程中枸杞表面水蒸气扩散量随真空罐中水蒸气分压 p_{aw} 与贮藏环境压力 p 的减小而增大,随着枸杞表面水蒸气扩散量的增大其冷却速率相应提高。

2 关键部件及参数设计

2.1 真空泵选型计算

真空泵是真空预冷系统的关键部件,其抽气速率和抽气压力直接决定了预冷速度和预冷终温。真空泵在工作过程中需要将真空罐中的空气以及部分未被捕水器捕捉的水蒸气全部排出罐外。现通过计算确定真空泵相关参数。

(1) 真空泵参数计算

真空泵所需的抽气速率计算公式为^[4]

$$w = \frac{V}{t} \quad (4)$$

其中 $V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$
 式中 w ——真空泵所需的抽气速率, L/min
 V ——应排气体总体积, L
 t ——抽气时间, min
 V_1 ——真空罐容积, L
 V_2 ——由外部泄漏入真空罐内的气体体积, L
 V_3 ——物品带入气体体积, L
 V_4 ——捕水器未收到的水蒸气体积, L

真空罐容积为 70.65 L,经测试真空预冷过程中由外部泄漏入真空罐内的气体量为真空罐容积的 30%,为 21.195 L,根据经验物品带入的气体体积按真空罐容积的 10% 计算,为 7.065 L;参阅说明书该型号捕水器未收到的水蒸气量按全部水蒸气体积的 25% 计算,为 $90712.5 \text{ L} \times 25\% = 22678.125 \text{ L}$,具体

计算过程如下:

单位质量水在压力 p 条件下成为蒸气时的容积计算公式为^[4]

$$V_0 = \frac{946T_1}{237p} \quad (5)$$

式中 V_0 ——单位质量水蒸气容积, L/g

T_1 ——操作状态的绝对温度, K

操作温度 $T_1 = 273.15 + 4 = 277.15$ K, 操作压力 $p = 5.0 \times 133.32 = 666.60$ Pa, 代入式(5)可得 V_0 为 221.25 L/g。

由于缺少枸杞真空预冷相关试验资料, 参考其他浆果类果品真空预冷补水率数据, 按照 4.1% 的补水率进行计算, 则水蒸发质量为: $10 \text{ kg} \times 4.1\% = 410.00$ g, 总共产生水蒸气体积 V 为 90 712.50 L。

根据式(4)计算出真空泵的抽气速率为 911.08 L/min。

最终选定的真空泵为 XD-0063 型旋片式真空泵, 抽气速率为 1 050 L/min, 功率为 2.2 kW, 极限压力 10 Pa, 转速 1 450 r/min。

(2) 真空预冷冷负荷计算

装置真空预冷冷负荷即捕水器捕水所需冷量^[22], 10 kg 枸杞由初温 25℃ 预冷到 4.0℃ 所需冷量由枸杞表面水分蒸发的汽化潜热提供, 即

$$Q_y = Cm'\Delta T = m'\alpha\gamma = Q_q \quad (6)$$

式中 Q_y ——枸杞预冷所需热负荷, kJ

Q_q ——枸杞自身水分汽化潜热, kJ

m' ——枸杞质量, kg

C ——枸杞比热容, kJ/(kg·K)

ΔT ——枸杞预冷前后温差, 取 21 K

α ——枸杞含水率, 取 80%

c ——枸杞水分蒸发率, %

γ ——水的汽化潜热, 2 498.2 kJ/kg

通过表 1、2 可计算得枸杞的综合比热容为 3.69 kJ/(kg·K), 根据式(6)计算得到 10 kg 枸杞在真空预冷降温过程中需要被外部吸收的热量为 774.90 kJ, 真空预冷过程中水分蒸发率 c 为 3.88%, 即 10 kg 枸杞的水分蒸发质量为 $10\,000 \times 3.88\% = 388.00$ g。枸杞水分蒸发量应 100% 被捕水器捕集, 取 10% 的安全余量, 即 $1.1 \times 388.00 \text{ g} = 426.80 \text{ g}$, 则捕水器的冷负荷为 426.80 g 水的汽化潜热量, 即

$$Q_1 = \frac{m_0\gamma}{\tau} = \frac{0.4268 \times 2498.2}{25 \times 60} = 0.711 \text{ kW} \quad (7)$$

式中 Q_1 ——枸杞预冷捕水器所需冷量, kW

m_0 ——捕水器捕水量, kg

τ ——枸杞预冷时间, s

故装置真空预冷冷负荷为 0.711 kW。

表 1 枸杞组成成分质量分数

成分	干果	鲜果
水分	14.10	80.00
灰分	4.55	1.06
脂肪	4.45	1.04
蛋白质	11.82	2.75
总糖	48.35	11.26
其他	16.73	3.89

表 2 枸杞中主要成分的比热容

Tab. 2 Specific heat capacity of main ingredients in wolfberry

成分	计算式
糖类	$C = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$
蛋白质	$C = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$
脂肪	$C = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$
灰分	$C = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$
水分	$C = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$

2.2 盐水蓄冷系统设计

为了保证该试验装置运行的连续性以及满足水大量蒸发时对冷量的需求, 采用氯化钙盐水蓄冷的方式来储存真空预冷所蓄冷量。根据设计要求盐水蓄冷系统采用质量分数为 23.8% 的氯化钙水溶液, 其起始凝固温度为 -25.7℃, 密度为 1 220 kg/m³, 详细参数如表 3 所示。

表 3 氯化钙水溶液的热物理性质

Tab. 3 Thermophysical properties of aqueous calcium chloride solution

温度/ ℃	比热容/ (kJ·(kg·K) ⁻¹)	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	热扩散率/ (m ² ·s ⁻¹)
20	2.973	0.565	1.56×10^7
10	2.952	0.551	1.53×10^7
0	2.931	0.538	1.51×10^7
-5	2.910	0.530	1.49×10^7
-10	2.910	0.523	1.48×10^7
-15	2.910	0.518	1.46×10^7
-20	2.889	0.510	1.44×10^7
-25	2.889	0.504	1.43×10^7

盐水工作温度为 -20 ~ -5℃, 该盐水系统在工作时向真空预冷系统提供的冷量为 774.9 kJ, 当盐水温度从 -20℃ 上升至 -10℃ 时所需盐水量应满足

$$Q_y = C_1 m_1 \Delta T_1 \quad (8)$$

式中 C_1 ——盐水比热容, 取 2.91 kJ/(kg·K)

ΔT_1 ——盐水换热前后温差, 取 10 K

m_1 ——盐水质量, kg

得到所需盐水量为 26.6 kg, 其体积为 21.8 L。考

虑盐水无法装满盐水箱以及预留一定的余量,最终设计的盐水箱容积为 50.0 L。

2.3 计算机检测系统

通过计算机检测系统实时检测真空预冷过程中真空罐内压力、枸杞温度、捕水器温度等多个参数的变化^[18]。真空罐中配置有 3 个空气温湿度传感器来测量真空罐内不同位置空气的温湿度;配置有 3 个热电偶来测量真空罐内枸杞中心温度,其探头尺寸(直径×长度)为 2 mm×15 mm;配置 1 个压力变送器来测量真空罐内的压力,传感器见图 5,具体参数如表 4 所示。传感器将采集的温湿度信息传递给单片机,单片机通过串口与计算机进行通信。通过采用专门开发的软件,温度、压力设备运行时间等信息可以实时显示并进行储存。



图5 温湿度传感器及压力变送器

Fig. 5 Temperature and humidity sensor and pressure transmitter

表4 传感器参数

Tab. 4 Detailed parameters of sensor

名称	型号	测量范围	测量精度
空气温湿度传感器	RS-WS-N01-6	温度 -40 ~ 80℃, 相对湿度 0 ~ 100%	±0.5℃, ±3%
热电偶	HSTL-LWPT100	-50 ~ 150℃	±0.5℃
压力变送器	BST9900	100 Pa ~ 40 MPa	0.1%

经游标卡尺测量真空预冷鲜枸杞尺寸为:横径 7.80 ~ 10.80 mm,至果柄根部纵径 17.10 ~ 21.52 mm。

3 样机试验及性能分析

根据技术要求试制的小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置如图 6 所示。其整机尺寸(长×宽×高)为1 200 mm×600 mm×1 270 mm。

采用该装置对 8.714 kg 带柄鲜枸杞进行试验验证。在试验验证过程中通过补水箱对枸杞进行补水,补水前、补水后及真空预冷后带柄鲜枸杞质量分别为 8.714 0、9.112 9、8.630 7 kg,经计算枸杞补水率为 4.50%,失水率为 5.29%。真空预冷过程中枸杞中心温度、真空预冷罐体内压力随时间变化曲线

如图 7 所示。

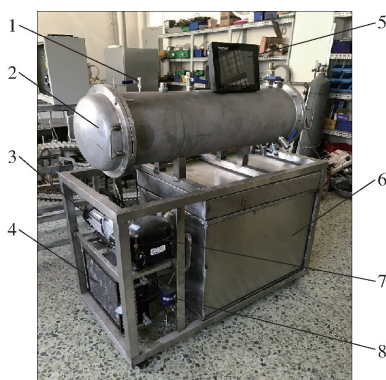


图6 小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置实物图

Fig. 6 Physical map of small-scale cold storage type vacuum pre-cooling device of fresh wolfberry with stem

1. 真空预冷补水管 2. 真空预冷装置罐体 3. 真空泵 4. 冷凝器
5. 控制面板 6. 盐水箱 7. 压缩机 8. 膨胀阀

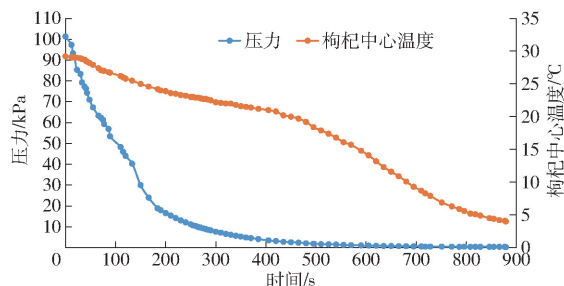


图7 真空预冷过程中枸杞中心温度、真空罐压力变化曲线

Fig. 7 Changing curves of wolfberry center temperature and vacuum tank pressure during vacuum pre-cooling

由图 7 可知,真空预冷前 5 min 可划分为真空预冷第 1 阶段,该阶段真空泵工作效率高,抽速快,压力下降速率大,外界空气的渗入对压力变化影响较小;此阶段枸杞与真空罐内空气主要进行对流换热,换热量小,枸杞中心温度下降缓慢。真空预冷第 5 分钟至达到预冷终温可划分为真空预冷第 2 阶段,随着真空泵持续工作,真空罐内压力继续降低,这一阶段真空泵工作效率降低,抽速慢,压力下降速率小;随着压力逐渐达到对应温度下水的闪发压力,枸杞表面水分大量蒸发,不断从枸杞表面及环境中吸收热量,枸杞表面温度下降较快,此阶段枸杞内部主要以热传导方式传递热量,与预冷第 1 阶段相比枸杞中心温度下降增快,真空预冷 879 s 后枸杞中心温度已降至保鲜温度 4.0℃;真空预冷过程中枸杞的补水率为 4.50%,失水率为 5.29%。

从捕水器运行初期至达到水闪发点之前,通过捕水器的气体以空气为主,水蒸气含量少,捕水器捕水效率较高;随着真空罐内压降至水闪发点,水蒸气大量蒸发,罐内相对湿度达到 100%,捕水器任务加重,大量水蒸气在冷凝管上凝结,其上水

膜厚度增加,在捕水器管道上会出现滴水现象。水膜厚度增加使凝结管导热系数和对流换热系数降低,捕水器捕水效率随之降低。该真空预冷装置捕水器设计捕水率为75.00%,在真空预冷过程中通过对捕水器捕水收集、称量,同时考虑预冷过程中枸杞总失水量,最终捕水器实际总捕水率计算公式为

$$\eta = \frac{m_2}{m_3} \times 100\% \quad (9)$$

式中 η ——捕水器捕水率, %

m_2 ——捕水器捕水量,取382.5 g

m_3 ——真空预冷过程中通过捕水器水蒸气总质量,取482.2 g

计算出捕水器捕水率为79.32%。盐水箱中所蓄盐水在真空预冷之前提前将其降温至工作温度,在此次试验中盐水箱共储存盐水25 L,从室温(25.0℃)降至工作温度-20.1℃所需的蓄冷时间为81 min,带柄鲜枸杞真空预冷结束后盐水温度升高为

-9.8℃。

4 结论

(1)设计的小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置的整机尺寸(长×宽×高)为1200 mm×600 mm×1270 mm,装置布局合理,结构紧凑,方便开展相关试验。

(2)试制的该小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置能够在879 s内将8.714 kg枸杞的中心温度降至保鲜温度4.0℃,在补水率4.50%情况下枸杞失水率为5.29%;该装置捕水器设计捕水率为75.00%,实际捕水率为79.32%。

(3)盐水箱中盐水从室温(25.0℃)降至工作温度-20.1℃所需的蓄冷时间为81 min,真空预冷结束后盐水温度升高至-9.8℃,盐水所蓄冷量能够保证真空预冷过程的顺利进行;试验过程中通过调节盐水泵、改变盐水循环速度,实现了捕水器捕水量与水蒸气蒸发量的平衡,满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 王剑功,李江阔,张鹏,等. 草莓在不同类型及型号冰箱中保鲜效果的研究[J]. 食品工业, 2016, 37(9): 94-98. WANG Jianguo, LI Jiangkuo, ZHANG Peng, et al. Preservation effect of strawberries in the different types and models of refrigerator[J]. The Food Industry, 2016, 37(9): 94-98. (in Chinese)
- [2] 吴冬夏,申江,张川,等. 草莓真空预冷理论分析及实验研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 270-274. WU Dongxia, SHEN Jiang, ZHANG Chuan, et al. Theoretical analysis and experimental study on strawberry vacuum pre-cooling[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 270-274. (in Chinese)
- [3] 申江,张川,刘升,等. 多功能果蔬保鲜装置的研制及大白菜真空预冷实验[J]. 制冷学报, 2017, 38(1): 107-112. SHEN Jiang, ZHANG Chuan, LIU Sheng, et al. Development of multi-functional fresh-keeping device and experiment of cabbage vacuum pre-cooling[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(1): 107-112. (in Chinese)
- [4] 翟家佩,苏树强. 果蔬真空预冷装置的设计与研究[J]. 真空, 2001(2): 25-29. ZHAI Jiapei, SU Shuqiang. Design and development of vegetable vacuum forecooling installation[J]. Vacuum, 2001(2): 25-29. (in Chinese)
- [5] 陈颖,刘宝林,宋晓燕. 荷兰豆真空预冷及其对贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 276-279. CHEN Ying, LIU Baolin, SONG Xiaoyan. Effect of vacuum pre-cooling treatment on storage quality of sweet broad pea[J]. Food Science, 2013, 34(6): 276-279. (in Chinese)
- [6] 陈文烜,郜海燕,房祥军,等. 快速预冷对杨梅采后生理和品质的影响[J]. 中国食品学报, 2010, 10(3): 169-174. CHEN Wenxuan, GAO Haiyan, FANG Xiangjun, et al. Effect of rapid pre-cooling on postharvest physiology and quality of Chinese Bayberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(3): 169-174. (in Chinese)
- [7] 陈威,丁伟华. 新鲜蔬菜真空预冷实验分析[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 494-498. CHEN Wei, DING Weihua. Study on vacuum pre-cooling experiment inside fresh vegetables[J]. Food Science, 2007, 28(12): 494-498. (in Chinese)
- [8] 鄂晓雪,柳建华,王融,等. 真空预冷处理提高草莓与蟠桃的冷藏品质[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(1): 75-80. E Xiaoxue, LIU Jianhua, WANG Rong, et al. Vacuum pre-cooling treatment for improving cold storage quality of strawberries and flat peaches[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2014, 36(1): 75-80. (in Chinese)
- [9] 林永艳,谢晶,朱军伟,等. 真空预冷对青菜贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(21): 314-317. LIN Yongyan, XIE Jing, ZHU Junwei, et al. Effect on quality of green grocery with vacuum cooling during the storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(21): 314-317. (in Chinese)
- [10] 刘芬,张爱萍,刘东红. 真空预冷处理对青花菜贮藏期间生理活性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 106-110. LIU Fen, ZHANG Aiping, LIU Donghong. Effect of vacuum pre-cooling on physiological activities of broccoli during storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 106-110. (in Chinese)
- [11] 刘斌,朱龙华,叶庆银,等. 不同装栽率及补水量对杏鲍菇真空预冷的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 274-277. LIU Bin, ZHU Longhua, YE Qingyin, et al. Influence of packed rate and compensated water on vacuum precooling of king oyster mushroom[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 274-277. (in Chinese)

- combined microwave-hot-air drying[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(1): 129 - 137.
- [15] XIAO H W, PANG C L, WANG L H, 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.
- [16] 巨浩羽, 肖红伟, 白峻文, 等. 苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J/OL]. *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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 2): 186 - 191. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s235&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.035. (in Chinese)
- [17] 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 CSAE*, 2015, 31(10): 269 - 276. (in Chinese)
- [18] 徐建国, 徐刚, 张绪坤, 等. 利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 271 - 276.
XU Jianguo, XU Gang, ZHANG Xukun, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(12): 271 - 276. (in Chinese)
- [19] JIN X, VANDER S R, GERKEMA E, et al. Moisture distribution in broccoli: measurements by MRI hot air drying experiments [C]// *Procedia Food Science*. 11 th International Congress on Engineering and Food (ICEF11), 2011: 640 - 646.
- [20] XIAO H W, LAW C L, SUN D W, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. *Drying Technology*, 2014, 32(4): 418 - 427.

(上接第 372 页)

- [12] JOSÉ C C S, SIDNEI A A, WONDER A L A, et al. Optimization of vacuum cooling treatment of postharvest broccoli using response surface methodology combined with genetic algorithm technique[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 144: 209 - 215.
- [13] OZTURK H M, OZTURK H K, KOCAR G. Microbial analysis of meatballs cooled with vacuum and conventional cooling[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(9): 2825 - 2832.
- [14] ZHU Zhiwei, WU Xinwei, GENG Yi, et al. Effects of modified atmosphere vacuum cooling (MAVC) on the quality of three different leafy cabbages[J]. *LWT*, 2018, 94: 190 - 197.
- [15] 闫静文, 王雪芹, 刘宝林, 等. 冬枣真空预冷预处理方法的筛选[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(3): 354 - 355, 359.
YAN Jingwen, WANG Xueqin, LIU Baolin, et al. Screening of pretreatment methods on vacuum cooled Dongzao jujube[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(3): 354 - 355, 359. (in Chinese)
- [16] 陈羽白, 林海英, 赵华海, 等. 菜心真空预冷效果的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(5): 161 - 165.
CHEN Yubai, LIN Haiying, ZHAO Huahai, et al. Effect of vacuum precooling for flowering Chinese cabbage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(5): 161 - 165. (in Chinese)
- [17] 石小琼, 邓金星, 张映斌. 真空预冷技术在子芋冷藏保鲜上的应用研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(4): 86 - 90.
SHI Xiaoqiong, DENG Jinxing, ZHANG Yingbin. Application research of vacuum pre-cooling technology in refrigeration and preservation of Ziyu[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(4): 86 - 90. (in Chinese)
- [18] 贺素艳, 王德昌, 马永志. 真空预冷实验装置计算机检测系统[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(10): 111 - 113.
HE Suyan, WANG Dechang, MA Yongzhi. Vacuum pre-cooling experimental device computer detection system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(10): 111 - 113. (in Chinese)
- [19] 张彧, 杨启容, 刘大维. 柱形蔬菜的真空预冷实验[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(3): 194 - 196.
ZHANG Yu, YANG Qirong, LIU Dawei. Vacuum precooling experiment of cylindrical vegetables [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(3): 194 - 196. (in Chinese)
- [20] 张川. 果蔬减压冷藏理论与实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2017.
ZHANG Chuan. Theoretical and experimental study on hypobaric storage of fruits and vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2017. (in Chinese)
- [21] 刘海鑫. 食品减压冷藏中三个主要参数的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
LIU Haixin. Experimental study of three critical parameters in food stuff hypobaric storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [22] 丁峰. 低压冷却储藏设备性能研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2015.
DING Feng. Performance study of low pressure cooling and storage equipment [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2015. (in Chinese)