

工业化枸杞常温真空干燥的工艺试验对比

宗学文^{1*}, 宋增全¹, 刘登科¹, 杨勇², 叶凡¹, 庞盈¹

(1. 西安科技大学机械工程学院, 陕西西安 710054) (2. 宁夏链杞智汇科技有限公司, 宁夏平罗 753400)

摘要: 为实现枸杞单次大批量干燥的提质提效, 设计制造了满足 1 125 kg 枸杞鲜果的常温真空干燥系统。在空载能力测试的基础上, 采用侧抽、端抽等不同方式开展制干效能研究, 并进行了枸杞干燥工艺试验验证。试验结果表明: 设备的真空能力及供热能力满足设计要求。枸杞常温真空干燥过程中的最大失水速率为 4 kg/h, 随干燥时间逐渐下降为 1.5 kg/h。侧抽真空方式干燥时间相比端抽、组合抽分别缩短 7.00%、3.13%, 单位能耗除湿量增大 29.27%、19.23%。枸杞优质干果比例随干燥水温的下降而逐渐增大 (54%~79%), 汽泡果比例逐渐随干燥温度的下降逐渐减少。干燥箱局部温湿度均匀性是影响干果成品比例的重要因素。研究结果为 4 吨级枸杞常温真空干燥系统开发奠定了基础, 对果蔬类、中草药等常温真空干燥系统的开发以及枸杞真空干燥成果的品质优化具有参考价值。

关键词: 枸杞; 常温真空干燥; 传质传热; 工艺优化; 汽泡果

文章编号: 1673-9078(2025)03-243-250

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0203

Experimental Comparison of Industrial Processes for Vacuum Drying of Wolfberry at Room Temperature

ZONG Xuewen^{1*}, SONG Zengquan¹, LIU Dengke¹, YANG Yong², YE Fan¹, PANG Ying¹

(1.School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2.Ningxia Lianqi Zhihui Technology Co. Ltd., Pingluo 753400, China)

Abstract: To improve the quality and efficiency of single-batch mass drying of wolfberry, a room-temperature vacuum drying system was designed and manufactured to have a capacity to dry 1 125 kg of fresh wolfberry fruits per batch. On the basis of no-load test results, the drying efficiency of the system for wolfberry was studied by side pumping, end pumping, and combined pumping. The vacuum capacity and heating capacity of the system were experimentally proved to meet the design requirements. During vacuum drying at room temperature, the water loss rate of wolfberry peaked at 4 kg/h and then gradually decreased to 1.5 kg/h with drying time. Compared with end pumping and combined pumping, side pumping resulted in a shorter drying time (7.00% and 3.13% less, respectively) and a higher dehumidification efficiency (29.27% and 19.23% higher, respectively). As the drying temperature decreased (from 60 to 53 °C), the proportion of high-quality dried wolfberry fruits gradually increased (from 54% to 79%), and the proportion of air-filled wolfberry fruits gradually decreased. Local temperature and humidity uniformity in the drying oven is an important factor affecting these proportions in the final dried wolfberry products. The research results lay a foundation for the development of a room-temperature vacuum-drying

引文格式:

宗学文,宋增全,刘登科,等.工业化枸杞常温真空干燥的工艺试验对比[J].现代食品科技,2025,41(3):243-250.

ZONG Xuewen, SONG Zengquan, LIU Dengke, et al. Experimental comparison of industrial processes for vacuum drying of wolfberry at room temperature [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 243-250.

收稿日期: 2024-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875452)

作者简介: 宗学文 (1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 复杂结构增材制造研究和智能产线技术研究, E-mail: 2825559132@qq.com

system with a capacity to dry 4 tons of fresh wolfberry fruits per batch, while providing a reference for the development of these systems for fruits, vegetables, and Chinese herbs as well as for optimizing the final vacuum-dried products of wolfberry.

Key words: wolfberry; vacuum drying at room temperature; mass and heat transfer; process optimization; air-filled wolfberry fruit

枸杞作为一种药食同源的茄科草本植物，在世界各地广泛种植。枸杞中含有多种氨基酸、微量矿物质和生物活性成分，如多糖^[1]、类黄酮^[2]和类胡萝卜素^[3]。其独特的成分属性，深受保健市场和医学药用的热爱，经常作为促进糖和脂代谢的功能食品食用，可以改善血管张力，减低降低长期心血管疾病的风险^[4]。像其他浆果一样，枸杞鲜果具有很高的含水量，它的嫩组织很容易受到机械损伤和微生物感染。干燥成为了枸杞保存最常用的处理方法之一，通过降低水活性来最大限度地减少潜在的微生物腐败和恶化的化学反应，延长储存寿命，并减少包装、处理和运输成本。

常见的干燥方法有热风干燥^[5]、微波干燥^[6]、热泵干燥^[7]、红外辐射干燥^[8]和冷冻干燥^[9]等。不同干燥工艺下枸杞成品的色泽、成分以及设备能耗也不尽相同。其中，真空干燥以较低的能耗要求和较高的干燥质量被企业和市场广泛采用。Xie等^[10]探讨了不同干燥温度和真空脉动比对枸杞脉冲真空干燥特性（PVD）和品质特性、复水率和微观结构的影响。研究结果表明：相比热风干燥，PVD可以显著减少干燥时间，并提高总多糖含量、颜色参数和复水率等方面的质量属性。Zhang等^[11]开发了一种应用于浆果干燥的中试规模脉冲真空红外干燥（PVID）系统，并对枸杞和葡萄进行的不同温度下的干燥特性与品质研究，结果表明PVID枸杞干和葡萄干相比热风干燥品质更高。Busra等^[12]采用了5种不同的干燥方法对新鲜枸杞进行干燥实验，研究了干燥动力学、生物活性成分和颜色特性的变化，研究结果表明：真空干燥可以保留新鲜枸杞样品中最多的总酚含量，高温和氧化反应会导致酚类化合物的损失，相较于冷冻干燥，真空干燥具有更低的成本和更短的干燥时间。以往学者主要基于小型干燥设备的设计与开发以及对枸杞在不同干燥工艺下的干燥动力学^[13-15]及干燥特性^[16,17]等方面进行研究，相对来说大型干燥设备的设计与开发以及枸杞工业化试验研究较少。

本研究设计开发了一种工业化常温真空干燥设备，以宁夏中宁县宁杞5号枸杞进行设备试验评估。

在此基础上以单次干燥1125 kg枸杞进行工艺实验，分析了枸杞干燥过程中干燥箱内压强和温湿度变化、样品枸杞含水率变化、干果成品比例，结合枸杞真空干燥的传热传质过程，对比了不同抽真空方式对干燥时间和单位能耗除湿量以及干燥温度对优质干果成品比例的影响，讨论了湿果和气泡果形成的原因。希望对枸杞工业化大型干燥设备的开发和解决枸杞大批量真空干燥过程中的实际工程问题提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

试验所用原料为宁杞5号，选用中宁县枸杞基地新鲜枸杞，无表面破损和病虫害，大小均匀。湿基含水量为 $(80 \pm 0.15)\%$ 。试验前将枸杞用清水清洗后放置孔状果盘晾干，清洗后枸杞吸附水含量为 $(1 \pm 0.05)\%$ 。选用单次干燥1125 kg枸杞鲜果进行试验。

1.2 实验设备结构及原理

BWJ-Z80型真空干燥箱，宁夏链杞智汇科技有限公司。

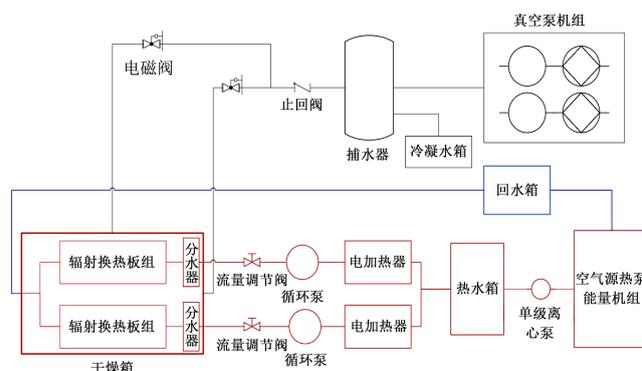


图1 枸杞真空干燥机组原理图

Fig.1 Schematic diagram of vacuum drying unit of wolfberry

如图1所示，为枸杞低温低压干燥系统图。该系统主要由供热系统、真空系统、控制监测系统三部分组成。供热系统为封闭式空气源热泵对热水箱进行循环加热，为整套系统提供热源，热水循环

泵为空气源热泵提供输送动力。采用单级离心泵将热水箱中的热水抽向干燥箱，分流至各级换热板，热水经罐内换热板后回流进热水箱；真空系统主要由罗茨泵、螺杆泵组成的真空机组和捕水器等组成，其中罗茨泵为主抽泵，螺杆泵为预抽泵，螺杆泵预抽气压达到 10 kPa 时，罗茨泵开始工作。冷凝捕水器从干燥箱抽取的湿空气，可以有效避免湿空气对真空泵内部元件的腐蚀。电磁阀控制干燥箱内的负压变化。控制监测系统可以控制设备机组的运行以及集成温度、湿度、压强、质量传感器，实时监测干燥箱内物料的温湿度变化与含水率变化。

如图 2 所示，为枸杞真空干燥系统实物图。干燥箱呈圆柱形，长 12 m，内径 3.8 m，罐内 8 cm 等距排布 21 层铝制换热板，各级换热板端口与进出水水柱并联。罐体采用不锈钢夹层硅酸铝棉制成，具有良好的保温隔热效果，可以一定程度上减少干燥过程中与环境交互的能量损失。干燥物料由货架装载果盘经滑轮推进圆柱形加热舱，果盘悬空放置于两层换热板之间进行辐射干燥。

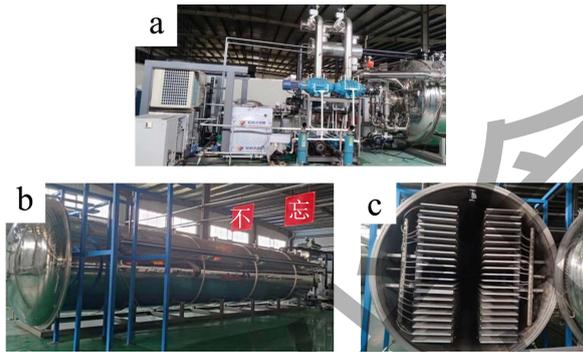


图 2 枸杞真空干燥系统实物图

Fig.2 Physical picture of the vacuum drying system of the wolfberry

注：(a) 真空供热机组；(b) 干燥箱；(c) 干燥箱内部换热板结构。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺实验分析

采用单因素实验分析方法，以 1 125 kg 枸杞鲜果为原材料，热水箱供水温度 55 °C，干燥箱压强 0.6 kPa，对比分析枸杞在侧抽、端抽、组合抽等不同真空模式下的干燥时间、能耗、单位能耗除湿量，选择最佳的抽真空模式；以热水箱供水温度 60、55、53 °C，干燥箱压强 0.6 kPa，侧抽方式，分别进行不同干燥温度下的枸杞工艺试验，探究干燥温度对枸杞干果成品比例的影响。

1.3.2 含水率和失水速率数据分析

枸杞干燥过程中的干燥程度采用含水率随干燥时间变化进行描述。在干燥过程中，采用对枸杞部分样品质量进行实时监测的方法，计算出枸杞的含水率，并绘制出含水率随时间的变化曲线。

$$W = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

W ——含水率，%；

M_0 ——枸杞的鲜果质量，kg；

M_e ——枸杞完全干燥的质量，kg；

M_t ——枸杞在任意干燥 t 时刻的质量，kg。

采用枸杞在干燥过程中的失水速率描述枸杞的传质速率，可由公式 (2) 得出：

$$V = \frac{M_{t_2} - M_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中：

V ——失水速率，kg/h；

M_{t_1} ——干燥时间 t_1 时枸杞的实时质量，kg；

M_{t_2} ——干燥时间 t_2 时枸杞的实时质量，kg。

1.3.3 真空干燥系统单位能耗除湿量

用单位能耗除湿量表示和反应枸杞真空干燥系统的综合性能指标，物料干燥除去水分以冷凝水质量为准，耗电量以电表监测电量为准。其计算公式^[18]为：

$$S_{mer} = \frac{M_{de}}{W_{tot}} \quad (3)$$

式中：

S_{mer} ——单位能耗除湿量，kg/(kW·h)；

M_{de} ——物料干燥除去的水分质量，kg；

W_{tot} ——总耗电量，kW·h。

1.3.4 干果的分类测定

枸杞烘干后取出干燥托盘，称量烘干后枸杞干果总质量。根据枸杞干燥技术规范 GB/T 18672-2014 的感官指标对枸杞干果类拣选称重。计算各类型枸杞所占比例（分类枸杞质量占枸杞干果总质量的百分比）。

1.3.5 数据分析

采用 Origin 进行数据处理及分析作图。

2 结果与分析

2.1 真空干燥系统干燥性能评估

如图 3 所示，为真空干燥箱不同抽真空方式

示意图, 该系统设计共有侧抽、端抽、组合抽(侧抽和端抽同时工作)三种抽真空方式。空载实验结果表明, 该真空系统可以达到预设计极限负压要求的 0.6 kPa, 三种不同的抽真空方式均可以在 25 min 内使干燥箱内压强到达 0.6 kPa, 说明本系统对真空泵的选型以及干燥箱的气闭性均满足设计要求。

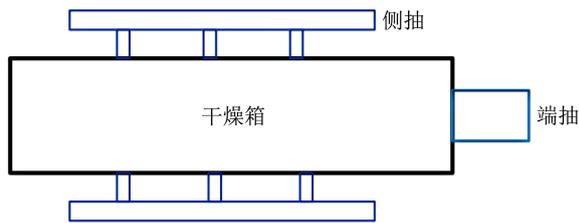


图 3 抽真空方式示意图

Fig.3 Schematic diagram of vacuum pumping mode

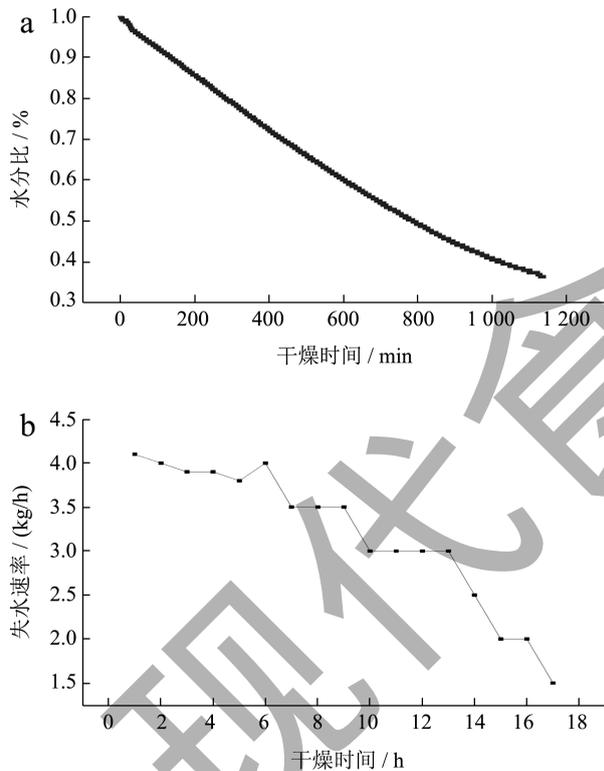


图 4 枸杞干燥速率变化曲线

Fig.4 Variation curve of lycium berry drying rate

以装载 1 125 kg 枸杞, 预设 55 °C 供热水温, 组合抽方式进行工艺试验。枸杞样品的水分比随时间的变化如图 4 所示。由于干燥过程失水速率的变化并不明显, 采用每隔 1 h 计算枸杞质量变化率, 由图 4 可知, 枸杞失水速率的整体变化趋势逐渐减小, 在干燥阶段初期最大变化率为 4 kg/h, 逐渐下降为 1.5 kg/h, 这是由于枸杞水分的蒸发主依赖水分外扩散作用和水分内扩散作用, 其干燥速度依物

料内部水分转移速度而定, 这取决于物料内部与干燥环境之间的水分子浓度差和物料表皮结构的孔隙率^[19], 干燥过程初期枸杞表面的吸附水和大部分游离水从枸杞表面蒸发较快, 故枸杞的失水速率较快。而干燥后期, 枸杞内部结合水的迁移需要更大能量, 加之枸杞相对致密的表皮和蜡层^[20], 使得枸杞内部水分汽化难以快速排出, 传质速率下降。水作为枸杞真空干燥过程的主要传质物质, 其重量变化为水分逃逸质量, 枸杞失水率可以较好的反应枸杞真空干燥过程的水分逃逸速率变化趋势, 为后续真空系统维持泵的优化改进提供数值参考。

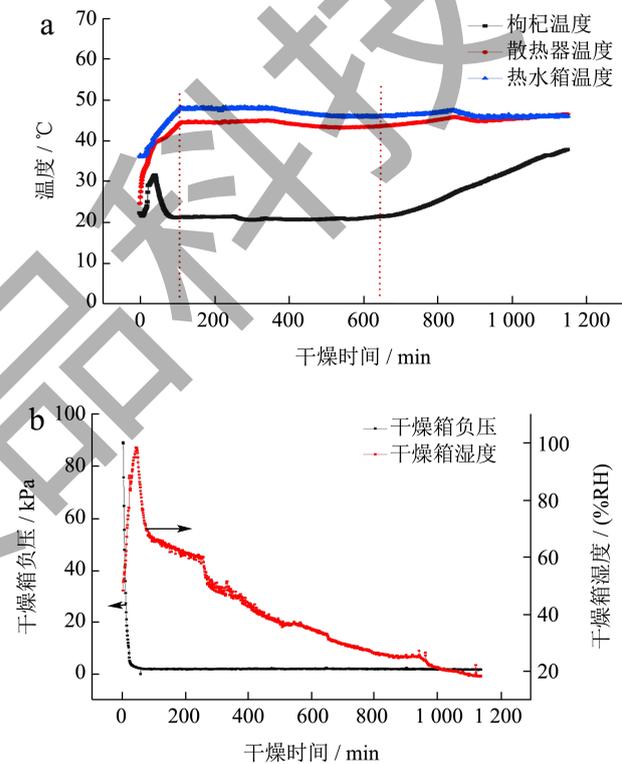


图 5 枸杞真空干燥试验工艺曲线

Fig.5 Process curve of vacuum drying test of wolfberry

如图 5 所示, 为枸杞真空干燥的工艺曲线图, 包括供热系统的温度变化以及干燥箱内的湿度和压强变化。本次干燥总用时 1 138 min (19.0 h), 热水箱温度在干燥前 90 min 逐步上升, 随后稳定在 48 °C 左右。换热板表面温度与热水箱温度变化趋势相同, 干燥开始阶段温差 5 °C 左右, 随干燥进程的延后温差逐渐缩小, 换热板和热水箱之间的输水管道保温性良好。干燥箱内枸杞温度变化可以分为三个阶段: 第一个阶段温度先上升后下降, 在干燥时间 40 min 左右达到最高点 31.6 °C, 随后进入下降阶段。这是由于干燥开始时, 真空系统工作抽走的空气造成了干燥箱内大量的能量流失, 物料温度也随之下降。

干燥箱内进入稳定低压环境之后，物料温度也随之进入稳定阶段，基本维持在 20 ℃ 左右。随着物料含水率逐渐减低，水分挥发携带的能量逐渐变少，物料温度随之上升。

干燥箱内真空压力变化呈指数下降趋势，在 30 min (0.5 h) 左右呈现线性急剧下降，随后进入稳定下降阶段。干燥箱内前期的湿度变化随物料温度上升逐渐上升，在 40 min 左右湿度达到最高点 98.2%，随后逐渐下降 16% RH。其湿度变化趋势与枸杞在干燥过程中的传质行为相关，干燥前期枸杞较快的失水速率导致箱内湿度快速上升，随后枸杞进入稳定干燥阶段，传质速率逐渐下降，随之干燥箱内湿度逐渐下降。

2.2 抽真空方式对枸杞真空干燥的影响

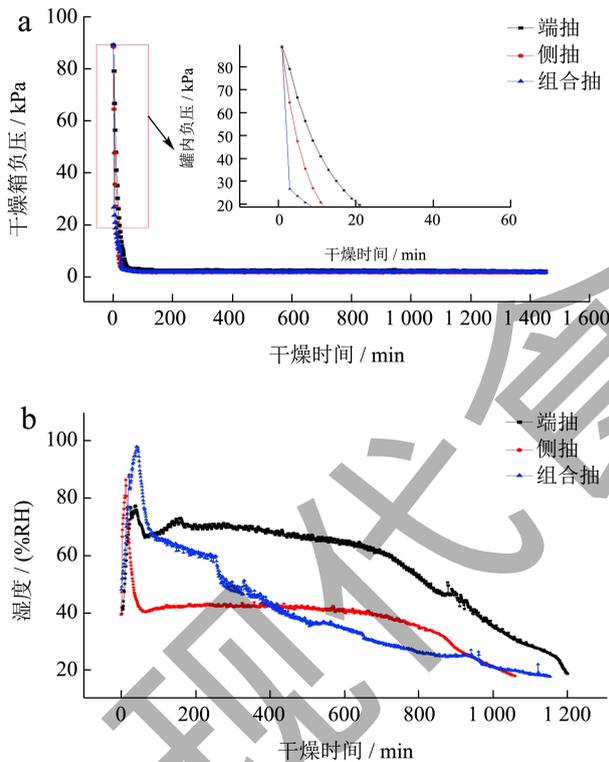


图 6 不同抽真空方式的枸杞干燥工艺曲线
Fig.6 Drying process curves of wolfberry with different vacuuming methods

如图 6 所示，为三种不同抽真空方式下枸杞的干燥工艺曲线。干燥开始后，干燥箱内压强下降的趋势基本相同，均呈现出两段变化趋势，在干燥开始 30 min (0.5 h) 内呈现急剧下降趋势，当压强下降至 2 kPa 左右后呈现缓慢下降。对比不同抽真空方式箱内压强的下降速率发现，组合抽 > 侧抽 > 端抽，说明在干燥开始阶段，组合抽可以较快的使干

燥箱进入低压环境。不同抽气方式抽气速率的不同，源于干燥箱内部的等距板间结构，在不同的抽气方式下箱内结构对流体的阻碍作用也不相同，可以等效为干燥箱内不同抽气方式下的流导不同。对比不同真空方式的湿度变化曲线可以得出，三种真空方式在干燥前 50 min 均呈现先上升后下降的变化趋势，侧抽相较于其它两种抽气方式可以在 50 min 之内将箱内湿度降至 45% RH 以下并维持整个干燥进程的低湿环境。端抽湿度变化趋势与侧抽类似，但干燥 50 min 的湿度要比侧抽高 25% RH 左右，差距随干燥时间逐渐减小，组合抽湿度在 50 min 后呈曲线下降。

如表 1 所示，为不同抽气方式的干燥能力统计表。由表可知，侧抽干燥时间最短 (18.6 h) 最大的单位能耗除湿量 (0.53 kg·h/kW)，组合抽次之，端抽效果最差。侧抽干燥时间相比端抽、组合抽分别缩短 7.00%、3.13%，侧抽单位能耗除湿量相比端抽、组合抽分别增大 29.27%、19.23%。在同样的干燥供热条件下，干燥效率的差异来源于不同真空方式下干燥箱内的湿度分布，侧抽相较于其它两种抽气方式在整个干燥过程湿度更低，具有更好的抽湿效果。

表 1 不同抽气方式的干燥能力统计表

Table 1 Statistical table of drying capacity of different pumping methods

干燥方式	鲜果质量/kg	干燥时间/h	耗电量/(kW/h)	单位能耗除湿量/(kg·h/kW)
端抽	1 125	20	1 736.3	0.41
侧抽	1 125	18.6	1 620	0.53
组合抽	1 125	19.2	1 656	0.52

2.3 干燥温度对枸杞优质干果比例的影响

试验过程中发现，不同于小型干燥设备，对于单次干燥物料重量 1 000 kg 以上的大型干燥设备，很难做到百分百优质成品，其干燥成品中存在部分干燥不均匀。根据枸杞干燥技术规范 GB/T 18672 的感官指标，对不同干燥温度下的枸杞干果进行了分类。如图 7 所示，为枸杞鲜果、优质干果和缺陷果。其中，枸杞优质干果 200 粒 /50 g，小于 370 粒 /50 g，满足 GB/T 18672 干果等级评定下的特级标准。优质干果外形呈类纺锤形，略扁稍收缩，表面无任何破损，果皮色泽鲜红或枣红色，口感软糯香甜，含水率为 6% 左右。干燥过程中出现的主要缺陷果为气泡果和湿果。气泡果表皮没有皱

缩，形成像气球一样鼓泡，其干鲜比和口感与优质干果差异不大。湿果果皮变软并伴有少量糖分溢出，其湿基含水率大于13%，主要存在于鲜果装盘不均匀的堆积处。



图7 枸杞鲜果与干燥品质不同种类果

Fig.7 Different kinds of wolfberry fruits with fresh and dry quality

注：(a) 枸杞鲜果；(b) 枸杞干果；(c) 气泡果；(d) 湿果。

如表2所示，对不同干燥温度下的干果进行分类统计发现，枸杞优质干果比例随预定干燥水温的下降至53℃时，优质干果的比例逐渐增大(54%~79%)，随着温度上升至60℃时，气泡果比例逐渐增大(11%~26%)，湿果比例未呈现规律性变化。降低干燥温度可以提高优质干果的成品比例，减小气泡果的形成，但随之干燥时间也会更长。

表2 不同温度下枸杞优质干果比例与干燥时间统计表

Table 2 Statistics of proportion and drying time of high-quality dried fruits of wolfberry at different temperatures

干燥预定水温/℃	干果比例/%	湿果比例/%	气泡果比例/%	干燥时间/h
60	54	20	26	15.7
55	63	20	17	18.6
53	79	10	11	20.0

2.4 分析与讨论

根据如图8所示水的相图变化^[21]，不同的干燥工艺皆是根据物料特性构建不同的温压环境，以达到物料水分快速干燥的目的。本文设计制造的真空

干燥系统水汽化环境为(20±3℃, 0.6 kPa)，较低的温度可以减少枸杞在干燥过程中的营养成分的流失，低压环境降低了水的汽化点，加快水分的汽化速率，真空环境防止了物料和空气之间的接触，有效阻止枸杞在干燥过程的氧化变质现象。枸杞干燥过程中的传质过程主要分为内部水分迁移和表面水分蒸发。枸杞干燥过程中水分迁移受到包括毛细管流、液体扩散、蒸汽扩散等诸多湿分扩散机理的共同影响^[22]。枸杞内部水分子与干燥箱之间的传质过程遵循Fick定律，其主要动力条件为枸杞表皮的孔隙率和水分子浓度差。

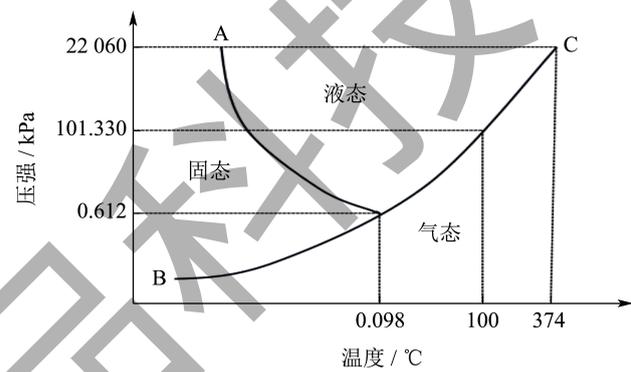


图8 水的相图

Fig.8 Phase diagram of water

根据枸杞真空干燥原理，枸杞真空干燥速率主要受干燥温度和湿度影响。当干燥温度一定，真空容器内的湿度变化是影响干燥速率的主要因素。当干燥箱湿度越低时，枸杞内部与外部环境之间的水分子浓度差越大，传质速率越快，不同抽真空方式下的工艺实验佐证了这一点。侧抽方式下具有更好的干燥效果源于它的抽湿能力更强，干燥箱内湿度更低，枸杞表面与真空容器之间的水分子浓度差更大。对于大型干燥设备来说，真空干燥箱内部结构相对复杂，在对抽真空方式的结构设计中，应着重考虑不同抽真空方式下的抽湿能力。

对枸杞的设备工艺试验目的在于提高枸杞优质干果的成品比例，为探究其干燥不均匀导致的湿果和气泡形成原因，分别采集了53℃干燥工艺下干燥箱前中后的温湿度变化，如图9所示。由图可知，干燥过程中干燥箱前端相较于中后位置温度较低，最大温差达到4℃左右。干燥箱后端相较于中、前端相对湿度更高，最大相对湿度相差5% RH。由此可见，干燥箱内温湿度并不完全均匀，这也是干燥成品出现不均匀和缺陷果的主要原因。干燥箱内局部位置温度和湿度的不均匀会影响蒸

汽扩散速率从而影响枸杞局部干燥速率。同时,鲜果的装盘均匀性也是影响优质干果成品比例的重要因素。对于大型干燥设备来说,为减少干燥成品中湿果比例应尽量保持干燥箱内温湿度和鲜果装盘的均匀性。

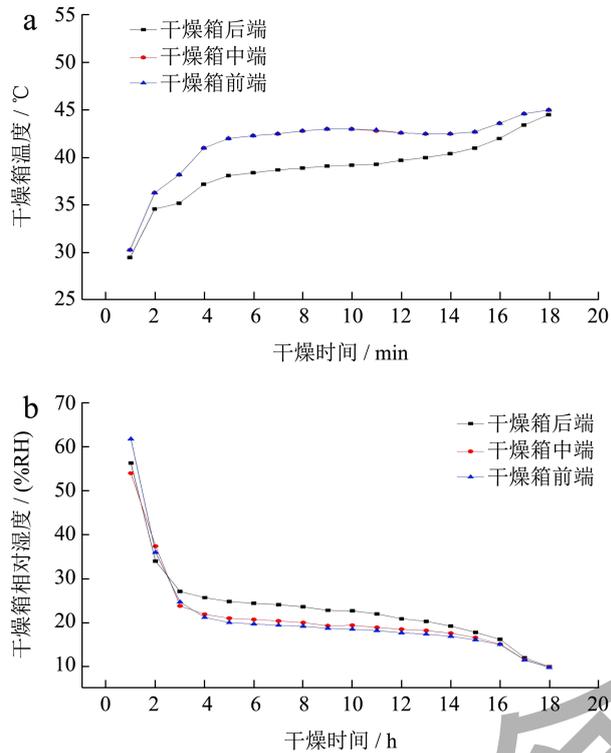


图9 干燥箱不同位置的温湿度变化

Fig.9 Temperature and humidity changes at different positions of the drying oven

而汽泡果的形成受枸杞表皮结构、干燥温度和干燥箱压强的多重影响。根据以往学者的研究表明,枸杞表面被一层由长链脂肪酸醛类和烃类组成的蜡质包裹^[23],采用物理或者化学与处理方法破蜡可以有效加快枸杞干燥速率^[24]。为保持枸杞原始的健康食用性,在本次枸杞干燥试验预处理过程中并没有添加任何化学用品对枸杞进行脱蜡处理,蜡层对枸杞水分的挥发具有一定的抑制作用,这或许是汽泡果形成的其中一个原因。在不同干燥温度的工艺试验中发现,随干燥温度降低,汽泡果比例也会随之下降。这是由于在低压环境下,干燥中后期枸杞内部水分逐渐减少,根据毛细管理论,气相逐渐占领液相,温度越高,气相的焓值越大,当果皮的收缩应力小于由气体引起的膨胀时形成了汽泡果。如何减少汽泡果还需在枸杞预处理和干燥过程中的温压调控等方面进一步研究。

3 结论

本文对枸杞常温真空干燥系统进行了干燥性能测试和工艺试验,结果表明:设备在空载时不同抽真空方式均可 25 min 之内使干燥箱达到极限负压(0.6 kPa),供热机组供热温度持续稳定,满足设计要求。枸杞常温真空干燥过程中的最大失水速率为 4 kg/h。侧抽工艺下干燥箱内湿度相较于端抽和组合抽更低,在整个干燥历程中侧抽具有更短的干燥时间(18.6 h)和单位能耗除湿量 0.53 (kg·h/kW),侧抽具有较好的抽湿效果。枸杞优质干果比例随预定干燥水温的下降至 53 °C 时,优质干果的比例逐渐增大(54%~79%),随着温度上升至 60 °C 时,汽泡果比例逐渐增大(11%~26%)。降低干燥温度可以提高优质干果的成品比例,减小汽泡果的形成,但随之干燥时间也会更长。干燥箱内温湿度分布不均匀是影响干燥成果质量的主要原因,对大型真空干燥设备的设计,应着重考虑整个干燥进程中真空干燥箱的局部温湿度均匀性,以此提高枸杞干果成品比例。

参考文献

- [1] YIN G H, DANG Y L. Optimization of extraction technology of the *Lycium barbarum* polysaccharides by Box-Behnken statistical design [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(3): 603-610.
- [2] WANG C, CHANG S, Stephen Inbaraj, et al. Isolation of carotenoids, flavonoids and polysaccharides from *Lycium barbarum* L and evaluation of antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 184-192.
- [3] LIU Y, GONG G, ZHANG J, et al. Response surface optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction polysaccharides from *Lycium barbarum* [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 110: 278-284.
- [4] DAREL, KIAT, XIA X J, et al. Enhancing the cardiovascular protective effects of a healthy dietary pattern with wolfberry (*Lycium barbarum*): a randomized controlled trial [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2021, 114(1): 80-89.
- [5] 刘伟东,顾欣,郭君钰,等.微波热风联合干燥工艺对枸杞品质和表面微生物的影响[J].农业工程学报,2019, 35(20):296-302.
- [6] MANAT C, WORAWAN P, MUDTORLRP N, et al. Chemical deterioration and discoloration of semi-dried

- tilapia processed by sun drying and microwave drying [J]. *Drying Technology*, 2017, 35(5): 642-649.
- [7] 赵丹丹,彭郁,李茉,等.枸杞热泵干燥室系统设计与应用[J].农业机械学报,2016,47(S1):359-365,373.
- [8] XIE L, MUJUMDER A S, FANG X M, 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 Bioprocess Technology*, 2017, 102: 320-331.
- [9] 曾涛,刘斌,石胜强,等.枸杞真空冷冻干燥动力学的数值模拟及分析[J].农业工程学报,2023,39(6):259-268.
- [10] XIE L, ZHENG Z A, MUJUMDER A S, et al. Pulsed vacuum drying (PVD) of wolfberry: Drying kinetics and quality attributes [J]. *Drying Technology*, 2018, 36: 1501-1514.
- [11] ZHANG W P, CHEN C, PAN Z L, et al. Design and performance evaluation of a pilot-scale pulsed vacuum infrared drying (PVID) system for drying of berries [J]. *Drying Technology*, 2020, 38(10): 1340-1355.
- [12] BUSRA T, ZEYNEP H T C, SELMA K Ç, et al. Effect of different drying techniques on total bioactive compounds and individual phenolic composition in Goji berries [J]. *Processes*, 2023, 11(3): 754.
- [13] 赵丹丹,陈冬,彭郁,等.枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析[J].中国食品学报,2018,18(3):114-124.
- [14] HEYSEM S B, ÇETIN K. Drying characteristics and degradation kinetics in some parameters of goji berry (*Lycium Barbarum* L) fruit during hot air drying [J]. *Italian Journal of Food Science*, 2021, 33(1): 16-28.
- [15] 曾涛,刘斌,石胜强,等.枸杞真空冷冻干燥动力学的数值模拟及分析[J].农业工程学报,2023,39(6):259-268.
- [16] D DONNO, M G MELLANO, E RAIMONDO, et al. Influence of applied drying methods on phytochemical composition in fresh and dried goji fruits by HPLC fingerprint [J]. *European Food Research and Technology*, 2016, 242(11): 1961-1974.
- [17] XIE L, MUJUMDER A S, ZHANG Q, et al. Pulsed vacuum drying of wolfberry: Effects of infrared radiation heating and electronic panel contact heating methods on drying kinetics, color profile, and volatile compounds [J]. *Drying Technology*, 2017, 35: 1312-1326.
- [18] VAN D A. The application of Petri nets to workflow management [J]. *Journal of Circuits Systems and Computer*, 1998, 8(1): 21-66.
- [19] 石胜强.枸杞冷冻真空干燥下水分传输与品质研究[D].天津:天津商业大学,2023.
- [20] ZHAO D D, WEI J, HAO J X, et al. Effect of sodium carbonate solution pretreatment on drying kinetics, antioxidant capacity changes, and final quality of wolfberry (*Lycium barbarum*) during drying [J]. *LWT*, 2019, 99: 254-261.
- [21] YAO J H, CHEN W J, FAN K, et al. Novel efficient physical technologies for enhancing freeze drying of fruits and vegetables: a review [J]. *Foods*, 2023, 12(23): 4321.
- [22] 谢龙.枸杞真空脉动干燥特性及干燥品质的研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [23] ZHOU Y H, VIDYARTHI S K, ZHONG C S, et al. Cold plasma enhances drying and color, rehydration ratio and polyphenols of wolfberry via microstructure and ultrastructure alteration [J]. *LWT*, 2020, 134: 110173.
- [24] ADILETTA G, RUSSO P, SENADEERA W, et al. Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 172: 9-18.