

小型干燥与低温保鲜两用热泵系统的设计与应用

Design and application of the mini heat pump system for drying and low-temperature preservation

冯道宁^{1,2} 孙健² 李丽¹ 李志春² 盛金凤²

FENG Dao-ning^{1,2} SUN Jian² LI Li¹ LI Zhi-chun² SHENG Jin-feng²

(1. 广西机电职业技术学院, 广西南宁 530007; 2. 广西农业科学院农产品加工所, 广西南宁 530007)

(1. Guangxi Vocational College of Mechanical & Electrical Technology, Nanning, Guangxi 530007, China; 2. Agro-food Science and Technology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China)

摘要:设计一种可以实现低成本批量高温干燥加工和低温保鲜农产品的小型两用热泵系统。系统改良了保温房的结构, 将干燥室和冷库合二为一; 采用了排湿和循环一体的新型风道。由于选用混合型制冷剂, 热泵变温范围可达 5~75℃, 山药烘干和桑椹冷藏的试验结果表明: 系统整体运行稳定, 在干燥模式时其升温极限高, 脱水速率快, 在低温保鲜模式时的制冷和保温效果好, 达到了设计要求。

关键词:农产品; 干燥; 低温保鲜; 热泵系统

Abstract: A small drying and refrigerating dual-purpose heat pump system for batch processing agriculture products was developed. The system was featured with low cost, improved structure of insulated room and new wet discharge-cycle air duct. heat pump selection of mixed refrigerant aimed at the drying highest temperature and the lowest refrigeration temperature respectively was 75℃ and 5℃. These reach results demonstrated that the system was stable, meet the design requirements of the high limit temperature and dehydrate rate in dry heating mode, and work well in keep-fresh mode.

Keywords: agriculture product; dry; low-temperature preservation; heat pump

热泵是一种高效节能的新能源系统, 既可以提供热源实现对物料的加热干燥, 也可以通过热交换实现制冷对瓜果蔬菜进行保鲜^[1]。由于热泵的变温范围有限, 故国内外对热泵设备的现有研究都是围绕着单热或单冷功能, 例如: 张兰训等^[2]提出利用冷库制冷时释放的热量对干燥箱内的物品进行低温干燥; 李阳春等^[3]对热泵干燥的多种循环模式进行了

分析; Nguyen 等^[4]使用热泵闭环系统在 30~35℃ 范围内低温干燥木鳖果; 罗乔军等^[5]分析了不同结构热泵在各种气候环境下的适应状态和节能效果。

为了满足高温干燥和冷藏保鲜的需求, 企业或农户不得不购买两套热泵设备, 造成重复投资。基于此设计了一种双用途的热泵系统, 并在此基础上研究高温对山药干燥脱水效率的影响, 以及桑椹在低温冷藏状态下的保鲜效果。旨在进一步拓宽热泵在食品加工中的应用前景。

1 两用热泵系统的设计

1.1 保温房构造

冷库和烘房的保温原理相似, 但冷库的保温标准高于烘房, 保温材料选择 10 cm 厚的双面不锈钢聚氨酯保温板, 其厚度是普通烘房保温材料厚度的两倍, 此外烘房和冷库房体的结构和布局上也有显著差异, 例如烘房需要新风的进风门、排湿百叶窗、大功率的循环风机, 而冷库不需要; 且进风门和排湿百叶窗一般采用铝合金构件, 若保温房做冷藏用时会使得保温效果急剧下降, 为此对保温房进行重新设计, 使之可以满足烘房和冷库的双重需要。

保温房构造如图 1 所示, 在电控进风门 3 和排湿百叶窗 9 的外部, 均设计了与风门和窗体大小一致的保温罩, 保温罩的一边用铰链固定在保温房的外壁, 使其可以类似衣柜门一样沿着铰链的转轴灵活转动。当作烘房使用时, 将保温罩的插销打开, 保温罩以转轴为中心旋转向下拉开; 当作冷库使用时, 将保温罩沿着转轴向上闭合, 利用自带的插销将保温罩扣紧在外壁上, 这样便可形成一个完全密闭的保温冷库。

1.2 热泵机组的设计

热泵机组结构(图 2)由压缩机、四通阀、室外换热器、室内换热器、膨胀阀等过制冷剂管路连接成并形成一个制冷循环, 通过四通电磁阀完成制冷和制热模式的切换(制冷时, 制冷剂流向如图 2 中实线箭头所示; 制热时, 制冷剂流量如图 2

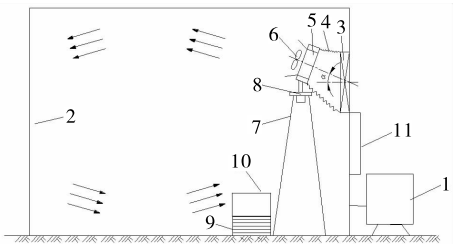
基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项(编号: 201303073-06); 国家星火计划项目(编号: 2013GA790007)

作者简介:冯道宁, 男, 广西机电职业技术学院副教授, 硕士。

通信作者:孙健(1978—), 男, 广西农业科学研究院研究员, 博士。

E-mail: jiansun@yahoo.cn

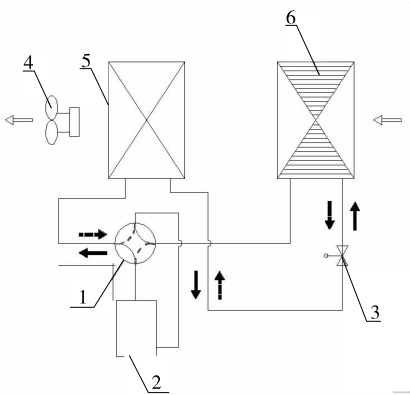
收稿日期:2016-12-21



1. 热泵主机 2. 保温房 3. 电控进风门 4. 进风罩 5. 室内散热器 6. 循环风机 7. 支架 8. 螺杆调节基座 9. 排湿百叶窗 10. 百叶窗保温罩 11. 电控进风门保温罩

图1 保温房内部构造

Figure 1 Structure of thermal insulation room



1. 四通阀 2. 压缩机 3. 膨胀阀 4. 循环风机 5. 室外换热器 6. 室内换热器

图2 热泵机组结构

Figure 2 Thermal insulation shutter

中虚线箭头所示),能够满足全年运行冷热负荷大范围变化的要求。

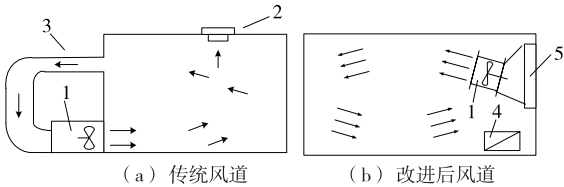
1.2.1 选用高温干燥模式 此时四通阀通电,系统按制热方式运行,室内换热器为冷凝器,室外换热器为蒸发器,其过程是冷媒通过蒸发器吸取室外的低温热源的热量,然后经过压缩机成为高温高压的气体,冷媒然后通过冷凝器放热后变成高压液体,同时冷媒的液化过程释放出的热量提升室内空气温度,冷媒再经过膨胀阀减压变成过热液体,最后流入蒸发器吸取热量后重新进入压缩机完成一个循环。

1.2.2 选用低温保鲜模式 当室内温湿度都比较高,系统运行于制冷模式。此时四通阀断电,系统冷媒的循环为制热的逆过程,室外换热器为冷凝器,室内换热器为蒸发器,冷媒通过蒸发器吸收室内空气中的热量而不断汽化,使得房间的温度降低,并把吸收的热量带到室外通过冷凝器释放。

1.3 风道的改进

系统的风道包括热循环风道和排湿风道,其直接影响干燥效率和干燥效果,传统烘干房内通常都加装了顶部排湿风扇和外接于烤房外的回风道,见图 3(a)。

改进后的风道如图 3(b)所示,减少了外接风道和排湿风机,新风道中的循环风机兼有排湿风机的功能。循环风机安在角度可调节的基座上,和水平面呈一定的倾角,利用烘房内墙形成的回流壁使得热风得以循环,从而形成了一个完整



1. 循环风机 2. 排湿风机 3. 外接风道 4. 排湿百叶窗 5. 电控进风门

图3 传统风道与改进后风道示意图

Figure 3 Structure of normal air duct and improved air duct

的循环风道;循环风机的基座底部和螺杆连接(见图 1),通过螺杆调节循环风机的倾斜角,以方便调整循环风道的角度,满足烘干过程中对风量的需求,提高烘烤效率。当需要排湿时,打开电控进风门,循环风机将外部空气吸入烤房内,当吸入的空气达到一定量时,烘房内的气压将高于烘房外的气压,内外气压差使得烘房内的湿气通过底部的百叶窗自动排出,此时循环风道兼有了排湿风道的功能^[6]。

电动进风口和排湿百叶窗均为金属材质,在系统制热干燥时必须开启,虽然两者面积不大,但金属窗体良好的导热性不利于室内保温,尤其在冬季影响更为严重,因此在后期改进中采用铝箔纤维隔热棉覆盖在窗体的外部,以保证百叶窗在正常工作下能大幅提升保温效能。在烘房内空置情况下,对烘房改进前后的保温效果进行测试,结果表明,在室外环境温度 21.3℃,室内温度 60.5℃和风速 8.4 m/s 不变的情况下,百叶窗附近的温度只有 27.2℃,比改造前低约 9℃,热量损耗约减少 60%。

1.4 循环工质

制冷剂是实现热泵大范围变温的关键要素之一,普通制冷剂如常见的 R22、R410a、R134a、R407c 等均可以在热泵上使用,且变温范围均在 15~55℃,其最低温度不能满足冷藏的需要,最高温度也不能达到高温快速干燥的标准。虽然 R22 对大气层有一定的破坏作用,但由于价格便宜,性能优良,R22 在中国市场占有率依然很高^[7]。R22 属于安全等级较高且不易燃易爆制冷剂,但 R22 在高温工况下运行,压缩机的排气温度和压力都很高,易造成压缩机频繁停机保护甚至损坏;制冷剂 R142b 虽然属于易燃易爆工质,但高温热力性能良好,R142b 必须与其他工质混合使用以提高安全等级^[8]。因此根据升温极限的不同,将 R22/R141b 按质量比为 6.6/3.4~7.0/3.0 范围混合成新型冷媒^[9]。随着 R142b 在混合冷媒中比例的增加,制热量会减小,但抑制了 R142b 的可燃性,同时有效降低系统的排气温度和压力,保证了系统的稳定运行^[10]。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料及设备

2.1.1 试验材料

山药:干基含水率为 3.39%;

桑椹:干基含水率为 8.95%。

2.1.2 试验设备

智能电表:LCDG-DG213-50 型,山东力创公司;

风速/风温仪:VC816B 型,胜利科技有限公司;
温湿度探头:SHT10 型,深圳科比商贸电子有限公司;
变频冰箱:BCD-290W 型,青岛海尔集团公司。

2.2 评价指标

2.2.1 除湿能耗比与性能系数的测定 为了对热泵系统的性能进行深入的研究,在干燥模式时对物料在不同温度的脱水速率进行了测试,同时引入除湿能耗比(specific moisture extraction rate, SMER)和热泵干燥系统的性能系数(coefficient of performance, COP)对热泵系统做综合评价^[11]。单位除湿能耗比定义为:

$$S = \frac{M}{W}, \tag{1}$$

式中:
S——除湿能耗比,kg/(kW·h);
M——热泵干燥装置的水分蒸发量,kg;
W——热泵的总耗能,kW·h。
热泵干燥系统的性能系数根据式(2)计算^[12]:
$$C = 1 + S \times h, \tag{2}$$

式中:
C——性能系数;
S——除湿能耗比,kg/(kW·h);
h——水的蒸发潜热,水在 100℃时的蒸发潜热为 1.596 kg/(kW·h)。

2.2.2 失水率的测定 采用称重法。失水率按式(3)计算:

$$X = \frac{M_L}{M_C} \times 100\%, \tag{3}$$

式中:
X——失水率,%;
M_L——流失的汁液质量,g;
M_C——初始质量,g。

2.2.3 V_C含量的测定 按 GB/T 5009.86—2003 的荧光法执行。

2.3 试验方法

烘房尺寸:3.35 m×1.8 m×1.8 m,室内初始温度是 22.4℃,相对湿度 72.6%。室外环境温度为 23.5℃,5 匹热泵功耗最大功率 4 kW,风机功耗 1 kW,风机和热泵压缩机运行频率均为工频 50 Hz,室内风机风速为 8.4 m/s,混合制冷剂 R22 和 R141b 的摩尔含量为 75%和 25%。

2.3.1 干燥温度对物料干燥特性测试 山药切片厚度为 5 mm,分别取 55,65,75℃进行干燥试验。考虑到在烘房内不同位置的风量和温度均有差异,试验中取烘房中心为定点位置^[13],分 6 层均匀放置了 24 盘重量为 1.60 kg/盘的新鲜山药。试验过程中每隔 30 min 分别从每盘中各抽取 50 g 山药进行干基含水率测试。

2.3.2 冷藏保鲜测试 设定温度为 6℃,将保温房的进风门和排湿百叶窗用保温罩封闭,以提升保温效果,但果蔬贮藏过程中会释放一些气体,累积到一定程度会使冷藏品生理失调,故每隔 8 h 人工开启保温罩一次,并利用进风门和排湿百叶窗换气 1 min。原料为新鲜桑椹,其 V_C含量为 32.2 mg/100 g,冷

藏时间为 48 h,循环风扇只开启一个(0.5 kW)。

3 结果与分析

3.1 干燥温度对山药热泵干燥特性的影响

由图 4 可知,在干燥过程中各试验组样品的干基含水率均随时间增加逐步减小,且温度越高干燥曲线越陡,说明山药的干燥特性受温度影响较大;上述结论也在图 5 中得到验证,在初始阶段的温度越高,干燥速率越大,其中 75℃的曲线斜率最大。图 4 所示的 75℃的干燥曲线在 5.5 h 附近出现明显的下降拐点,65℃的干燥曲线在 6 h 左右出现类似的下降拐点,这是因为山药内部的水分越来越少,水分从内部迁移到表面的速率和从表面蒸发到周围空气中的速率都随之降低,导致干燥变缓慢,且烘干温度越高,拐点出现的时间越早,而较低烘干温度(55℃)的干燥曲线保持相对平滑。

为公平起见,将 3 种温度干燥曲线以出现下降拐点的最早时间 5.5 h 为时间节点做数据分析。如表 1 所示,在烘干的前 5.5 h 里,75℃曲线的干基含水率和除湿能耗比均优于其他两种温度,这是由于物料初始湿度较高,高温可以显著地提高脱水效率;同时从图 4 分析可知,自 4.5 h 开始,75℃曲线的干基含水率的下降速率出现减缓,5.5~6.0 h 时尤为明显;6 h 后,75℃和 65℃的曲线趋于重合,原因在于山药含有较多糊化淀粉、甘露聚糖和黏性蛋白等成分,持续高温干燥不但对山药的营养成分产生较大的破坏,还使山药的表面产生硬化膜,阻碍内部水分的蒸发^[14-15],因此过高的干燥温度在干燥阶段的中后期会对脱水效率起反作用。

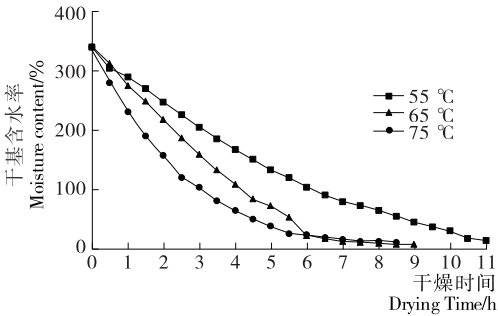


图 4 不同温度下山药的干燥曲线
Figure 4 Drying curves of Chinese yam dried at different temperatures

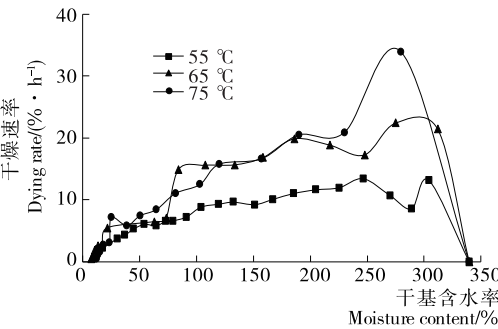


图 5 不同温度下山药干燥速率的变化
Figure 5 Changes in the drying rate of Chinese yam dried at different temperatures

表 1 不同温度下的干燥试验数据

Table 1 Test datas of drying at different temperature (5.5 h)

干燥温度/℃	干基含水率/%	系统耗能/(kW·h)	除湿能耗比	COP
55	119.5	18.3	0.99	2.58
65	53.2	21.7	1.12	2.78
75	25.1	23.1	1.17	2.87

如图 4 所示,在 75 ℃干燥条件下,7.5 h 和 8 h 的干基含水率分别为 13.1 和 12.3,两者之间的差值已小于 1%,故选取 7.5 h 为最终干燥时间。通过表 2 可以进一步分析硬化膜对干燥速率和除湿能耗比的影响,当干燥时间为 5.5 h 时其除湿能耗比值为 1.17,6 h 减为 1.07,之后随着干燥时间增加该值逐渐下降,7.5 h 时其值已低至 0.89,由上述分析可知由于硬化膜阻碍水分蒸发,系统的除湿效率已大幅减弱。故如前文所述,在烘干含淀粉和糖类较高的农产品时,应在干燥阶段的中后期适当降低干燥温度,以有效地节约能源,避免硬化膜的产生,提高干燥产品的品质^[16-17]。

表 2 75 ℃干燥时的干基含水率和除湿能耗比

Table 2 Moisture content and SMER at 75 ℃ drying

时间/h	山药干基含水率/%	系统除湿能耗比
5.5	25.1	1.17
6.0	23.6	1.07
6.5	18.3	1.01
7.0	15.3	0.94
7.5	13.1	0.89

3.2 热泵系统对桑椹的保鲜效果

失水率和 V_c 含量的变化常作为衡量水果新鲜程度的重要指标^[18-20]。因冷藏容积及物料质量不同,总能耗不具备可比性,数值仅供参考。表 3 对比了冰箱和热泵系统保鲜效果,两者储存的桑椹在 48 h 后的失水率和 V_c 含量均接近,目测表面色泽无明显差别,热泵系统在制冷状态下对果蔬的保鲜效果接近于冰箱。

表 3 热泵系统和冰箱冷藏保鲜效果对比[†]

Table 3 Comparison of cold storage effect between the heat pump and refrigerator after 48 hour

设备	桑椹重量/kg	失水率/%	V _c 含量/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)	总能耗/kW
热泵系统	50	2.75	27.5	152.00
冰箱	5	2.31	25.2	3.07

† 贮藏 48 h。

4 结论

试验结果表明,两用热泵系统在高温干燥时可以显著提

高物料初期的脱水效率,在山药烘干试验的前 5.5 h,75 ℃曲线的干基含水率和除湿能耗比均优于 55 ℃和 65 ℃温度曲线;低温状态下该热泵系统保鲜能力基本与普通冰箱持平,在冷藏试验中桑椹的脱水率和 V_c 含量与冰箱保鲜的桑椹样品并无明显差异。在制造成本上两用热泵系统仅比单热/单冷型的热泵系统增加 5 000 元左右,占设备总造价的 1/10,试验还发现干燥或冷藏所需的最佳风速因物料的材质而异,因此后期改进中将采用变频技术控制风机来优化风量的控制,同时实现保温罩的电动开启和关闭。

参考文献

[1] 孙玉红, 黄太生. 空气能热泵干燥技术在农产品加工中的应用与分析[J]. 广西农学报, 2013(3): 44-46.

[2] 张兰训, 韦玉堂, 王振辉, 等. 热泵低温干燥与冷藏保鲜联合装置的开发[J]. 农机化研究, 2008(9): 105-107.

[3] 李阳春, 王剑锋, 陈光明, 等. 热泵干燥系统几种循环的对比分析与研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 84-86, 95.

[4] NGUYEN Dinh Duc, 李保国, 薛雅萌. 木鳖果热泵低温干燥工艺研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 109-113.

[5] 罗乔军, 张进疆, 何琳, 等. 空气源热泵谷物干燥的研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 228-233.

[6] 冯道宁, 孙健, 李丽, 等. 太阳能热泵联合干燥系统: 中国, ZL201320617683.6[P]. 2014-05-17.

[7] 张硕. 制冷剂采购市场调查报告[R/OL]. (2012-07-05)[2015-08-12]. http://bao.hvacr.cn/201207_2026295.html, 2012-7-5.

[8] 赵鹏. 非共沸混合制冷剂在高温空调中的实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010: 123-125.

[9] 倪宜华, 陈志文. 非共沸混合制冷剂在高温空调中的实验研究[J]. 低温与超导, 2009(9): 69-72.

[10] 胡斌, 王文毅, 王凯, 等. 高温热泵技术在工业制冷领域的应用[J]. 制冷学报, 2011(5): 1-5.

[11] 张绪坤, 华栋, 徐刚, 等. 热泵干燥系统性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2006(4): 94-98.

[12] 高鹤, 易建勇, 刘璇, 等. 番木瓜热风干燥特性分析[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 38-42.

[13] 陈桂星, 于东, 施海敏, 等. 山药加工方法的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2010, 28(5): 35-38.

[14] 高飞, 陈洁. 干燥风速对挂面品质的影响[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2009(6): 17-20.

[15] 焦岩, 李保国, 张岩, 等. 冰箱冷藏条件对果蔬贮藏质量的影响[J]. 食品科学, 2002(6): 150-153.

[16] 何新益, 冯瑞伟, 黄宗海, 等. 冬枣变温压差膨化干燥工艺的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(4): 126-128.

[17] 王雅娇, 郭洁. 热风风速和相对湿度对扇贝柱干燥特性及品质的影响[J]. 现代食品科学, 2013(12): 2 915-2 920.

[18] 卫春会, 边名鸿, 黄治国, 等. 桑椹酒香气成分的 HS—SPME—GC—MS 分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 27-30.

[19] 包海蓉, 程裕东. 冻藏温度对桑椹品质影响的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 130-133.

[20] 李丽, 李昌宝, 邓海燕, 等. 广西桑葚果汁营养成分及抗氧化活性分析[J]. 南方农业学报, 2012, 43(9): 1 378-1 381.