

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-556-08

太阳能热水辅助热泵干燥系统性能研究

梁俊宇¹ 黎学娟² 姚昊翊² 王云峰² 王达达¹ 袁兴宇¹

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院 昆明 650217;

2. 云南师范大学能源与环境科学学院 昆明 650500)

【摘要】 搭建了太阳能热水辅助热泵干燥系统,以马铃薯片作为干燥物料,在冬季进行了不同热水温度的太阳能热水辅助热泵干燥实验,以及单一热泵干燥实验。实验结果表明:当辅助热水温度为30℃时,太阳能热水辅助热泵干燥系统制热量与COP值高于基础组,也高于辅助热水温度为20℃和10℃组的值,证明太阳能热水辅助热泵干燥系统能有效的提高系统效率,且辅助热水温度越高,太阳能热水辅助热泵系统更节能;同时总结了系统制热量与COP值随着干燥箱内温度、“薯片”水分迁移量的变化呈曲线上升的趋势。

【关键词】 太阳能热泵;蓄能辅助;系统性能;干燥性能

中图分类号 TB61 文献标识码 A

Study on Performance of Solar Hot Water Assisted Heat Pump Drying System

Liang Junyu¹ Li Xuejuan² Yao Haoyi² Wang Yunfeng² Wang Dada¹ Yuan Xingyu¹

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Test & Research Institute, Kunming, 650217;

2. School of energy and environment Science, Yunnan Normal University, Kunming, 650500)

【Abstract】 A solar hot water assisted heat pump drying system was established. Potato chips were used as drying materials. Experiments of solar hot water assisted heat pump drying and single heat pump drying were carried out in winter. The experimental results show that when the auxiliary hot water temperature is 30℃, the average heat production, COP and energy saving rate of the solar hot water assisted heat pump drying system are increased by 3.82%, 8.24% and 5.27%, respectively, compared with the single heat pump drying system, which proves that the solar hot water assisted heat pump drying system can effectively improve the system efficiency. At the same time, through the experimental analysis of the drying system, the auxiliary hot water temperature should be greater than 20℃, solar hot water can play the role of auxiliary heat pump unit to improve efficiency.

【Keywords】 solar heat pump; Energy storage assist; System performance; Drying performance

基金项目: 云南电网公司科技项目(YNKJXM20190087); 云南省大学生创新创业项目(S202110681021S)

作者简介: 梁俊宇(1983-), 男, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: ljy_1029@163.com

通讯作者: 姚昊翊(1989-), 女, 硕士研究生, 讲师, E-mail: yaohaoyi@ynnu.edu.cn.

收稿日期: 2021-12-23

0 引言

干燥是为了便于贮藏农副产品而对其进行加工的重要方式之一。目前,传统的干燥方式已不能满足现代工业化大规模生产中对干燥设备及干燥方式的需求,且随着人们对高质量生活环境的要求逐步提升以及国家对节能、环保的大力推行,新型

干燥技术的研究层出不穷,其中太阳能热泵干燥技术占据了主导地位,它综合了太阳能干燥和热泵干燥的优点,解决了太阳能干燥受时间、气候等因素制约的问题^[1-3]。

在太阳能热泵干燥技术的研究中,部分研究人员开展了详尽的测试,如基于开式吸收式热泵构建

连续型真空干燥系统, 依托 Aspen Plus 软件对系统进行建模, 分析了系统性能系数及干燥能耗参数^[4]; 测试新型空气源高温热泵循环、多功能直膨式太阳能与空气源复合系统, 并与传统热泵循环进行了对比研究^[5-7]; 还有研究人员建立了热泵干燥系统数学模型, 研究了送风温度和环境温度等循环参数变化对热泵干燥系统的性能影响^[8]。

但在经过实验研究以及现场运行发现, 太阳能热泵干燥系统仍存在一些缺陷, 如在太阳辐射强度较低时(夜晚或阴雨天气), 环境温度也会较低, 太阳能系统不能有效的工作; 而空气源热泵系统易结霜, 导致系统效率降低。所以将太阳能热泵与储能系统结合, 在太阳能充足的时候将多余的能量储存起来, 而在太阳辐射强度较低的情况下, 利用储存下来的能量辅助热泵工作, 极大程度上解决了空气源热泵在较低环境温度下工作效率降低的问题^[9-11]。

表 1 干燥系统设备主要参数

Table 1 Main parameters of drying system equipment

设备名称	性能参数
压缩机	R22 定频转子压缩机; 额定输入功率: 975W; 排气量: 16.4cm ³ /rev
蒸发器、冷凝器	翅片管式换热器; 换热面积: 0.22m ²
循环水泵	全扬程: 7m; 功率: 66~118W; 最大流量: 62L/min
电子膨胀阀	输入电压: 12V; 开度步长范围: 0~500
干燥箱	长×宽×高: 1m×1m×1m; 保温材料: 酚醛板
变频器	电压: 380V; 额定功率: 0.75kW; 频率范围: 0~50Hz
风扇	最大转速: 1400r/min; 最大功率: 200W

设备整体由两大循环系统构成, 分别为热水循环系统及工质循环系统, 主体设计成箱式, 便于搬运、易于放置且空间利用合理; 热泵为干燥设备核心部分, 通过蒸发器实现与外界环境交换热能的作用, 辅以冷凝器、压缩机、膨胀阀、风扇等辅助完

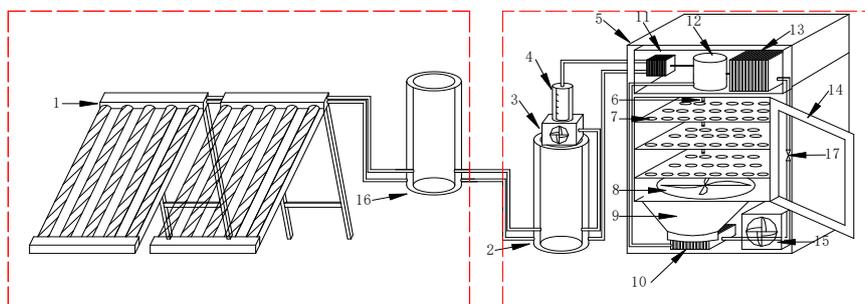
从前期的实验研究与数据分析可以看出太阳能储能蓄水辅助热泵系统是一种高效、合理分配能源的模式, 在低温环境工况下, 能有效解决太阳能辅助热泵系统存在的缺陷^[12]。因此本文将采用太阳能热水辅助热泵制热系统的原理, 在室外利用搭建的太阳能热水辅助热泵干燥系统进行干燥实验, 通过辅助系统提高热泵干燥系统的效率, 达到降低电能的消耗, 节约费用的目的。

1 系统描述与实验设计

1.1 系统结构

太阳能储能供热-热泵联合干燥系统的结构图和实物图分别如图 1 及图 2 所示。该系统由空气源热泵干燥机组、太阳能集热器、循环水泵、板式换热器、蓄热水箱、干燥箱等组成, 主要参数列于表 1 中。

成干燥任务, 同时去除干燥废气中的水分, 实现余热的回收和再利用; 太阳能集热器产生的热水为干燥设备提供辅助热源, 利用水介质提高了太阳能在能量消耗中的占比, 提高干燥设备的能源利用率, 且提高干燥速度及干燥质量。



太阳能供热系统

太阳能热水辅助空气源热泵干燥系统

1. 太阳能集热器; 2. 双层蓄热水箱; 3. 循环水泵; 4. 转子流量计; 5. 干燥箱; 6. 传感器; 7. 干燥盘; 8. 干燥风扇; 9. 散热口; 10. 冷凝器; 11. 板式换热器; 12. 压缩机; 13. 蒸发器; 14. 门板; 15. 除湿风扇; 16. 保温水箱; 17. 电子膨胀阀

图 1 太阳能热水辅助热泵干燥系统结构图

Fig.1 Structure of solar hot water assisted heat pump drying system

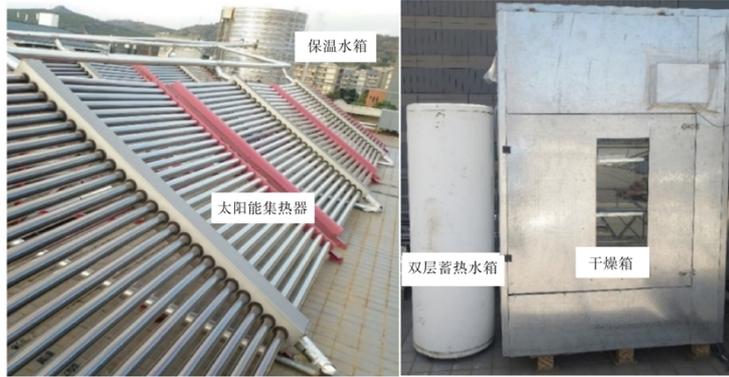


图 2 太阳能热水辅助热泵干燥系统实物图

Fig.2 Physical picture of solar hot water assisted heat pump drying system

1.2 系统运行原理

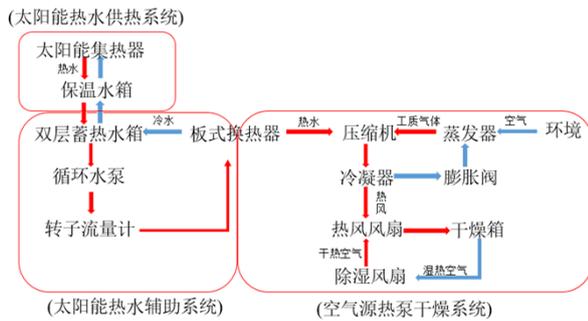


图 3 太阳能热水辅助热泵干燥系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of solar hot water assisted heat pump drying system

根据图 3 所示的系统原理, 太阳能热水辅助热泵干燥系统在运行工作时包括太阳能热水循环、空气循环和工质循环三个过程。

太阳能热水循环过程: 将太阳能热水供热系统产生的热水接入双层蓄热水箱中, 热水通过循环水泵进入板式换热器进行对流换热, 换热后的冷水流进双层蓄热水箱, 再流回到太阳能热水供热系统循环加热。在本章中, 调节太阳能热水温度保持不变, 利用循环水泵控制热水流量, 因此对太阳能热水循环过程只研究板式换热器制热量。

空气循环过程: 冷凝器经过换热产生热风, 风机热风吹入干燥箱内; 干燥箱排出的湿热空气由除湿风机除湿后进入干燥箱, 完成热风余热回收过程。同时, 外界环境空气经过蒸发器与工质换热。

工质循环过程: 即为传统压缩式热泵工质循环过程。从电子膨胀阀流出的工质进入蒸发器里并吸

收空气中的热量变为气态, 高温低压气态工质进入压缩机进行等熵压缩过程, 变为高温高压气态流出压缩机进入冷凝器, 向空气释放热量后变为低温低压工质进入电子膨胀阀。

系统干燥原理可分为两条路径来分别说明:

路径一: 太阳能热水辅助。太阳能集热器接收太阳辐射, 加热保温水箱中的水, 热水流至双层储热水箱外层, 经由循环水泵送至板式换热器内, 将热量传递至压缩机, 换热后的水回流至双层储热水箱内层, 再通过循环水泵流入太阳能集热器的保温水箱中进行加热, 完成完整循环。

路径二: 空气源热泵干燥, 利用蒸发器内工质 R22 热传导介质实现与环境空气源的热源交换, 再将热量传递至压缩机、冷凝器, 冷凝器释放热量, 干燥风扇将热量形成热风对干燥箱内空气加热, 达到对物料干燥的目的, 湿热空气再通过除湿风扇进行除湿, 湿空气排出干燥箱外, 循环的热空气再经由干燥风扇进行回收热量, 经过冷凝器的高温低压工质通过电子膨胀阀产生了低温低压工质, 再次进入蒸发器, 构成完整热泵循环。

干燥系统在实际使用过程中, 可分为两种运行模式: (1) 单一热泵干燥模式, 即关闭路径一, 开启路径二; (2) 补水辅助供热模式, 即两条路径同时开启, 两条路径的热量在压缩机汇合, 再传递至冷凝器释放热量, 利用干燥风扇将热风供给干燥箱。

太阳能热水辅助热泵干燥系统其热源来自于太阳辐射及空气中的热量, 在晴朗天气下, 太阳辐

射较高, 使用太阳能集热器对水介质进行加热, 储存在蓄热水箱中, 辅助完成干燥任务。在阴雨及夜晚情况下, 太阳辐射不足, 利用蓄热水箱储存的热水辅助热泵或单一利用空气中热量进行热泵供热干燥; 该系统采用底部风扇进风方式, 在干燥箱内利用风扇提供的动力及热空气自身升力形成较强的循环气流, 干燥箱内的高温空气使得物料蒸发出自身所含的水分, 同时出现箱内温度上升、湿度下降的现象, 除湿风机启动, 将湿热空气排出水分后, 干热空气再次通过干燥风扇得到利用, 而干燥箱内空气被持续加热, 直至达到干燥要求。

1.3 实验方法与内容

1.3.1 实验预处理

干燥物料选用“钻心乌”马铃薯, 属茄目薯科根茎类植物, 其特点为皮薄而光滑, 表皮为白色, 内呈白肉, 中间有深紫色与浅紫交替转心样椭圆环, 淀粉含量高, 含硒元素、青花素, 含有很高的营养

价值。

每组实验准备新鲜马铃薯 20kg, 对马铃薯统一去皮后进行清洗, 最后使用切片机将马铃薯切成 5mm 厚的均匀薄片, 放置锅内热烫 10min 断生, 再利用纱网沥干水分后均匀平铺到干燥盘内, 进行称重记录后入箱, 再将三个干燥盘, 包括样品盘在内同一时间放入干燥箱。

1.3.2 实验方法

将经过预处理的“薯片”平铺在干燥盘上, 测量物料重量, 设定箱内风机频率为 45Hz, 风速为 4.4m/s, 热水流量为 7.5L/min。干燥箱预热半小时消除箱体热容影响后将干燥盘放入干燥箱内进行干燥, 利用温湿度传感器和 T 型热电偶采集干燥箱内温、湿度, 每隔 1 小时对物料样品进行称重。采用卤素水分仪检测干燥前、后“薯片”的含水率, 测试三次, 取平均值。测试过程中所用主要设备参数如表 2 所示。

表 2 干燥系统测试设备参数

Table 2 Parameters of drying system test equipment

设备名称	型号/品牌	测量范围	精度	数量
温湿度传感器	FG6010	-20~80℃; 0~99.9%RH	±0.1% ±0.1%	4 支
卤素水分仪	米德 QL-100A	0.0001~120g	±0.001%	1 台
电能表	德力西 DTS1777	0.1~19999.9kWh	±0.1%	1 个
转子流量计	LZB-25	1.0~10.0L/min	±2.5%	1 个
电子秤	浦东计量仪器厂	0.2~30kg	±0.1%	1 台

实验在冬季室外环境中进行。实验共设计四组, 分别为基础组 (单一热泵模式)、10℃、20℃及 30℃热水辅助组, 每组包含 3 盘干燥样品。干燥实验开始之前, 对干燥箱预热半个小时。当样品质量差值≤0.5g 时干燥过程结束。

为进行对比, 开展了自然晾晒实验, 将预处理好的“薯片”平铺在干燥盘上, 选择室外空旷无遮挡、太阳照射时间长的区域放置, 每隔 1 小时对物料进行称重。

为客观分析实验结果, 对测量数据进行不确定度分析, 如式 (1) [13]:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + L + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, w_R 为合成的不确定性, w_1 、 w_2 、 w_n 为

自变量的不确定性。R 是自变量的给定函数。计算得出干燥系统的制热量与 COP 最大不确定度均为 2.51%。

2 结果与讨论

2.1 系统能效分析

根据上述实验数据, 通过 REFPROP 物性软件可以得到对应冷凝压力和温度下工质的焓值, 计算出系统制热量[14]:

$$Q_c = q_m (h_{c1} - h_{c2}) \quad (2)$$

式中, q_m 为工质的质量流量, g/s; h_{c1} 为压缩机排气口焓值, kJ/kg; h_{c2} 为冷凝器出口焓值, kJ/kg。热泵的性能系数 COP 值计算公式为[15]:

$$COP = \frac{\int_0^t Q_c dt}{W} \quad (3)$$

式中, t 为系统运行时间, h ; W 为系统的耗电量, kWh 。

如图 4、图 5 所示, 根据公式 (2)、(3) 计算出四组实验的系统制热量和 COP 值。辅助热水温度为 30℃ 组的平均系统制热量为 3.4104kW, 基础组的平均系统制热量为 3.2849kW, 辅助热水温度为 20℃ 组的平均系统制热量为 3.2211kW, 辅助热水温度为 10℃ 组的平均系统制热量为 2.9371kW。辅助热水温度为 30℃ 组的平均系统制热量相比于基础组、辅助热水温度为 20℃ 组和辅助热水温度为 10℃ 组的平均系统制热量分别提高了 3.82%、5.88%、16.12%; 基础组的平均系统制热量相比于辅助热水温度为 20℃ 组和辅助热水温度为 10℃ 组的平均系统制热量分别提高了 1.98%、11.84%。辅助热水温度为 20℃ 组的平均系统制热量相比于辅助热水温度为 10℃ 组的平均系统制热量提高了 9.67%。辅助热水温度为 30℃ 组的平均 COP 为 2.8046, 基础组的平均 COP 为 2.5913, 辅助热水温度为 20℃ 组的平均 COP 为 2.3194, 辅助热水温度为 10℃ 组的平均 COP 为 2.0905, 辅助热水温度为 30℃ 组的平均 COP 相比于基础组、辅助热水温度为 20℃ 组和辅助热水温度为 10℃ 组的平均 COP 分别提高了 8.24%、20.92%、34.16%; 基础组的平均 COP 相比于辅助热水温度为 20℃ 组和辅助热水温度为 10℃ 组的平均 COP 提高了 11.72%、23.95%。辅助热水温度为 20℃ 组的平均 COP 相比于辅助热水温度为 10℃ 组的平均 COP 提高了 10.95%。

从图 4、图 5 可以得出辅助热水温度为 30℃ 组的系统制热量和 COP 大于基础组, 大于辅助热水温度为 20℃ 组和辅助热水温度为 10℃ 组的值; 而辅助热水温度为 20℃ 和 10℃ 组的系统制热量和 COP 小于基础组的值, 说明在室外实验中, 辅助热水温度为 20℃ 和 10℃ 的太阳能热水辅助系统对干燥系统并没有像在室内实验一样, 对热泵系统提供有效的热量辅助, 这是由于在室外热量损失大, 低温度的热水在板式换热器中热量交换较少, 使得热泵系统产生的热量在经过板式换热器时, 将一部分热量消耗用于与热水的能量交换, 提高了辅助热水的温度。图 6 所示为辅助热水温度为 10℃ 时板式换热器进出口水温变化图。在进行补水辅助供热模式时, 板式换热器出水口温度高于进水口温度,

证明了板式换热器此时并没有将热水中的热量传递给工质, 反而是消耗了工质中的热量给水升温。而辅助热水温度为 20℃ 组的制热量与 COP 接近基础组的制热量与 COP 值, 因此在该干燥系统中, 辅助热水温度应大于 20℃, 使得太阳能热水能够达到辅助热泵机组提高效率的作用。

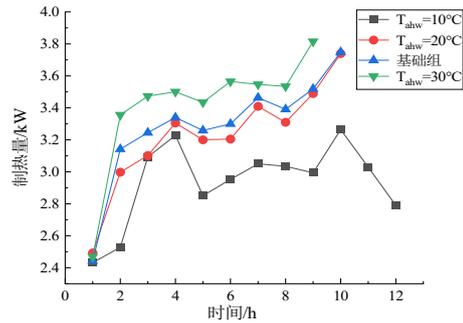


图 4 太阳能热水辅助热泵干燥系统制热量

Fig.4 Heat production by solar hot water assisted heat pump drying system

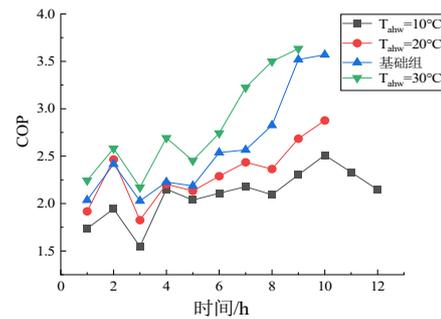


图 5 太阳能热水辅助热泵干燥系统 COP

Fig.5 COP of solar hot water assisted heat pump drying system

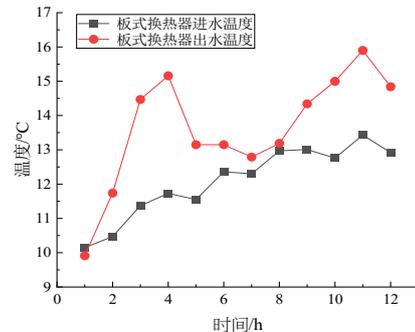


图 6 辅助热水温度为 10℃ 时板式换热器进出口水温对比图

Fig.6 Comparison of inlet and outlet water temperature of plate heat exchanger when auxiliary hot water temperature is 10°C

由图 4 得出, 在干燥的前 4 小时, 干燥箱内温

度上升, 系统制热量增加; 干燥 4 至 5 小时, “薯片”表面水分大量蒸发, 导致干燥箱内温度下降, 系统制热量下降; 干燥 5 至 6 小时, 水分蒸发后, 温度逐渐上升, 系统制热量增加; 干燥 6 至 8 小时, 辅助热水温度为 30℃ 组的“薯片”内部水分逐渐蒸发出来, 干燥箱内温度下降, 系统制热量缓慢下降; 干燥 8 至 9 小时, “薯片”的水分基本蒸发完, 干燥箱内温度上升, 系统制热量上升, 干燥结束。干燥 5 至 7 小时, 基础组和辅助热水温度为 20℃ 和 10℃ 组的“薯片”水分蒸发后, 温度逐渐上升, 系统制热量增加; 干燥 7 至 8 小时, 基础组和辅助热水温度为 20℃ 组的“薯片”内部水分蒸发出来, 干燥箱内温度下降, 系统制热量下降; 干燥 9 至 10 小时, “薯片”的水分逐渐蒸发完, 干燥箱内温度上升, 系统制热量上升, 干燥结束。干燥 7 至 9 小时, 辅助热水温度为 10℃ 组的“薯片”内部水分蒸发出来, 干燥箱内温度下降, 系统制热量下降; 干燥 9 至 10 小时, 水分蒸发后, 干燥箱内温度上升, 系统制热量增加; 干燥 10 至 12 小时, 此时已是晚上 9 点到 11 点, 环境温度的下降, 系统热量损失增加, 干燥箱内温度下降, 导致系统制热量有所下降。

2.2 干燥结果对比分析

分析太阳能热水辅助热泵干燥系统性能时, 除了系统制热量与 COP 值外, 还要分析系统干燥性能, 如单位能耗除湿量 SEMR 和单位时间除湿量 MER 等干燥性能指标。

在本次实验中, 传统自然晾晒的干燥耗时为 18 小时, 基础组的干燥耗时为 10 小时, 辅助热水温度组为 20℃ 的干燥耗时为 10 小时, 辅助热水温度组为 10℃ 的干燥耗时为 12 小时, 辅助热水温度为 30℃ 组的干燥耗时为 9 小时。

干燥速率 (DR, dry rate) 是指单位质量干物质在单位时间蒸发的水量, 单位为 kg/kg·h, 其公式为^[1]:

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{d_t} \quad (3)$$

式中, M_{t+dt} 和 M_t 分别为 $t+dt$ 、 t 时的物料干基含水率, %; d_t 为干燥所经过的时间, h。

干燥系统的单位能耗除湿量是评价热泵干燥系统节能性能的重要指标之一, 即除去干燥物料中

的水分的质量与太阳能热水辅助热泵干燥系统消耗的总能量之比, 用 SMER (specific moisture extraction rate, kg/kWh) 表示, 又称比吸湿率。单位能耗除湿量值越大, 系统越节能, 表达式为^[16]:

$$SMER = \frac{M_w}{W_p} \quad (4)$$

式中, M_w 为从干燥物料中除去的水的质量, kg; W_p 为干燥系统干燥过程中消耗的总电能, kWh。

单位除湿量是反映干燥速度的指标, 用 MER (moisture extraction rate, kg/h) 表示, 表达式为^[16]:

$$MER = \frac{M_d}{H} \quad (5)$$

式中, M_d 为干燥过程的除湿量, kg; H 为干燥时间, h。

节能率^[16]:

$$\eta = \frac{Q_d - W_p}{Q_d} \quad (6)$$

式中, Q_d 为干燥“薯片”过程中所需的总热量, kJ。

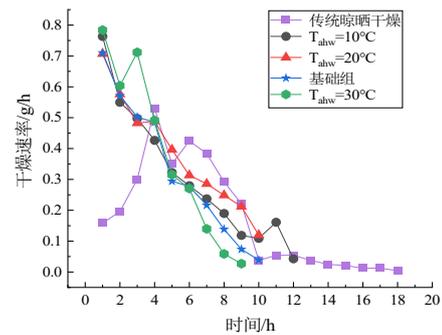


图 7 干燥速率曲线图

Fig.7 Drying rate curve

如图 7 所示, 根据公式 (3) 计算结果得出不同组干燥速率曲线。传统自然晾晒干燥速率慢, 干燥耗时长。在干燥系统中, 干燥箱内干燥温度越高, “薯片”干燥速率越快, 因为随着温度的升高, 传热动力越大, “薯片”的水分迁移速度加快。另一方面, 温度升高后, “薯片”表面的相对湿度下降, 马铃薯片与环境的湿度差值增大, 使“薯片”中的水分更快散发出来, 从而干燥所需时间缩短^[17,18]。在干燥过程中, 干燥前期干燥速度较快, 随着干燥箱内温度的升高, “薯片”表面水分被蒸发; 当表面水分蒸发完后, “薯片”内外水分产生浓度差,

内部水分向外表扩散继续蒸发。同时在干燥过程中“薯片”的表面水分先流失,形成较为质密的外壳,内部水分向外迁移受到阻碍,因此干燥后期,随着干基含水量的减少,干燥速率下降^[19]。这与莲藕片^[20]、杏鲍菇片^[21]、山药片^[22]等热风干燥结果相似。

表 3 干燥系统性能指标结果表

Table 3 Performance index results of drying system

实验组	干燥 时长 /h	干基含 水率/%	SMER/ (kg/kWh)	EMR/ (kg/h)	η /%
$T_{ahw}=10$ °C	12	9.588	0.7026	0.9983	51.62
$T_{ahw}=20$ °C	10	8.903	0.7357	1.03	56.76
基础组	10	8.039	0.8066	1.0478	60.46
$T_{ahw}=30$ °C	9	5.801	1.0473	1.2987	63.64

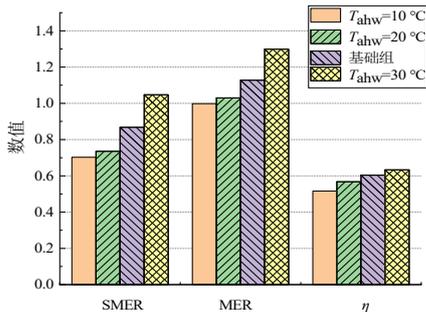


图 8 干燥系统性能指标结果对比图

Fig.8 Comparison of drying system performance index results

根据上述式(4)、(5)和(6)计算得出结果如表3及图8所示,辅助热水温度为30°C组的单位能耗除湿量 SMER、单位除湿量 MER 以及节能率 η 高于基础组,高于辅助热水温度为20°C组和10°C组。辅助热水温度为30°C组的 SMER 相比于基础组和辅助热水温度为20°C组和10°C组,分别增长了29.84%、42.35%、49.07%;基础组的 SMER 相比辅助热水温度为20°C组和10°C组分别增长了9.64%、14.81%;辅助热水温度为20°C组的 SMER 相比辅助热水温度为10°C组增长了4.71%。辅助热水温度为30°C组的 MER 相比于基础组和辅助热水温度为20°C组和10°C组,分别增长了23.94%、26.09%、30.09%;基础组的 MER 相比辅助热水温

度为20°C组和10°C组分别增长了1.73%、4.96%;辅助热水温度为20°C组的 MER 相比辅助热水温度为10°C组增长了3.18%。辅助热水温度为30°C组的节能效率相比于基础组和辅助热水温度为20°C和10°C组,分别增长了5.27%、10.18%、23.28%;基础组的节能效率相比辅助热水温度为20°C和10°C组,分别增长了6.52%、17.11%;辅助热水温度为20°C组的节能效率相比辅助热水温度为10°C组增长了9.96%。这是因为当干燥箱温度越高,“薯片”水分迁移速度加剧,干燥速率越快,使得干燥时间越短,总用电量越少,流失水分越多,导致干基含水率越低,最终导致单位能耗除湿量、单位除湿量以及节能率越高。

如图9所示,左边为太阳能热水辅助热泵干燥系统干燥的成品,色泽均匀,呈现亮黄色;右边为传统自然晾晒干燥的成品,色泽暗灰色,少部分呈乌黑色。“薯片”长时间暴露在空气中,表面容易发生氧化,传统自然晾晒干燥耗时较长,被氧化的更加严重,颜色就会发生比较明显的变化。传统自然晾晒干燥成品的含水率也较高,用时18h。常温自然条件下要达到热泵干燥这样的含水率较困难,传统自然晾晒干燥成品的含水率为11.573%;而太阳能热水辅助热泵干燥系统最长耗时为12h,成品含水率为9.588%。因此,使用太阳能热水辅助热泵干燥系统不仅节约时间,干燥后的产品外观品相更优。



图 9 薯片干燥成品效果对比图

Fig.9 Effect comparison of dried potato chips

3 结论

本研究对太阳能热水辅助热泵干燥系统与单一热泵干燥,即基础组的系统性能和干燥性能进行了对比分析。同时还进行了传统的自然晾晒实验,将其干燥速率、干燥成品的外观品相与干燥系统进行对比分析。得出结论如下:

- (1) 辅助热水温度为30°C组的系统制热量与

COP值高于基础组,高于辅助热水温度为20℃和10℃组的值。同时,系统制热量与COP值并不是呈现直线上升状态,其随着干燥箱内温度、“薯片”水分迁移量的变化呈曲线上升趋势。

(2)传统自然晾晒干燥速率慢,干燥耗时久。在干燥系统中,干燥箱内干燥温度越高,“薯片”干燥速率越快。同时在干燥过程中,干燥前期干燥速度较快;干燥后期,随着干基含水量的减少,干燥速率下降。

(3)辅助热水温度为30℃组的比吸湿率SMER、单位除湿量MER以及节能率 η 高于基础组,高于辅助热水温度为20℃和10℃组,干燥耗时与干基含水率则相反。说明辅助热水温度越高,太阳能热水辅助热泵系统更经济、节能效果好。

(4)在外观品相上,太阳能热水辅助热泵干燥系统干燥的成品色泽均匀,呈亮黄色,而传统自然晾晒干燥的成品色泽暗灰色,少部分呈乌黑色,因此使用太阳能热水辅助热泵干燥系统不仅节约时间,干燥后的产品外观品相更优。

参考文献:

- [1] 李招海.太阳能辅助热泵干燥系统的热力性能研究[D].南京:东南大学,2019.
- [2] 徐政,王哲,李光明.光伏-热泵型与集热型太阳能污泥干化对比研究[J].太阳能学报,2020,41(8):185-191.
- [3] 吴文婧,倪美琴,张玉雪,等.复合热泵热水系统运行特性的分析研究[J].流体机械,2020,48(4):78-82.
- [4] 潘永坤,马素霞,王玉坤,等.开式吸收式热泵型真空干燥系统建模及性能分析[J].科学技术与工程,2020,20(21):8568-8572.
- [5] 黄紫祺,张小松.太阳能空气源复合热泵系统的理论与实验分析[J].化工学报,2016,67(S2):356-361.
- [6] 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.
- [7] 明廷玉,李保国.太阳能与热泵联合干燥茶叶的应用研究[J].太阳能学报,2017,38(10):2730-2736.
- [8] 卞悦,王铁军,陈小华,等.空气能热泵干燥系统设计与模拟研究[J].低温与超导,2018,46(10):90-93.
- [9] Xiang G. Analysis and Optimization of air source-water source heat pump energy storage interconnection system[D]. Shandong Jianzhu University, 2020.
- [10] Guang J, Renlei C, Shaopeng G, et al. Experimental Study on Heat Pump Heating Performance of Solar Energy Cross-Season Heat Storage in Severe Cold Areas[J]. Building Science, 2019,35(12):33-37,125.
- [11] Xiaodong G. The Study on the Operation Strategy of the Solar Assisted Water Source Heat Pump Space Heating System[D]. Dalian University of Technology, 2018.
- [12] Li X, Wang Y, Li M, et al. Performance testing of a heat pump system with auxiliary hot water under different ambient temperatures[J]. Energy and Built Environment, 2021.
- [13] Xu L, Li E, Xu Y, et al. An experimental energy performance investigation and economic analysis on a cascade heat pump for high-temperature water in cold region[J]. Renewable Energy, 2020,152:674-683.
- [14] Liu Z J, Wang Q M, Wu D, et al. Operating performance of a solar/air-dual source heat pump system under various refrigerant flow rates and distributions[J]. Applied Thermal Engineering, 2020.
- [15] Wang W, Li M, Hassanien R H E, et al. Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,134:310-321.
- [16] 张世超.太阳能-空气源热泵双热源联合干燥系统枸杞干燥研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [17] 冯晞,胡巧群,诸爱士.马铃薯片热风对流干燥模型与特性[J].粮食与油脂,2018,31(7):52-55.
- [18] 刘艳,陶胜达,唐小闲,等.马铃薯片热风干燥特性及动力学模型[J].保鲜与加工,2019,19(4):82-88.
- [19] 周罗娜,王辉,刘嘉,等.马铃薯片的热泵干燥与干燥动力学拟合[J].江苏农业科学,2019,47(16):208-213.
- [20] 江宁,李丽娟,李大婧,等.莲藕片热风干燥特性及动力学模型[J].江苏农业科学,2015,43(1):247-250.
- [21] 王斌,杨大伟.杏鲍菇干燥及其品质特性的研究[J].包装与食品机械,2017,35(6):18-20.
- [22] 徐馨,柯亚婕,汤尚文,等.热风干燥过程中山药水分状态的变化研究[J].保鲜与加工,2020,20(2):177-180.