

## 太阳能-热泵联合干燥系统的开发和测试\*

田永军\*\*<sup>1</sup>, 王皓<sup>2</sup>, 王显龙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 广东金融学院, 广东 广州 520521)

**摘要:**建设太阳能-热泵联合干燥示范平台,以期更好推广其在干燥行业的应用。使用自动控制系统,实现对干燥过程中恒温操作,并采用智能启停的热回收器回收排放的废热。基于干燥系统平台对新鲜蔬菜进行干燥实验,测试结果表明:新开发的联合干燥系统的能耗比传统干燥方式降低3~4倍,干燥后的菜干品相上乘。实验证明,本次开发的智能控制干燥系统节能减排效果显著,适合在干燥行业推广应用。

**关键词:**太阳能-热泵干燥系统;热回收器;自动控制系统

**中图分类号:**TK01<sup>+</sup>8 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-2871(2015)02-005-05

**DOI:**10.13588/j.cnki.g.e.1000-2871.2015.02.002

## Design and Test of Solar-Heat Pump Drying System

TIAN Yong-jun<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, WANG Xian-long<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong University of Finance, Guangzhou 520521, China)

**Abstract:** An exemplary platform of solar-heat pump drying system was established so as to promote its application in drying industry. Constant temperature operation in drying process is achieved by the automatic control system, and waste heat is reclaimed by heat recoverer with intelligent start/stop device. Based on this drying system platform a drying experiment of fresh vegetables was conducted. The results show that energy consumption of the new drying system reduced to one third or one fourth in comparison with the traditional drying method. The dried vegetables by the new drying system have good appearance and high quality. The experiments confirmed that the new intelligent drying system have effective performance of energy saving and emission reduction. It is suitable for extensive application in drying industry.

**Key words:** solar-heat pump drying system; heat recycling device; automatic control system

## 0 引言

干燥作业涉及国民经济的很多领域,所用能源占国民经济总能耗的12%左右,在干燥生产过程中推广

\* 收稿日期:2014-10-16

\*\* 基金项目:广州市产学研合作资助项目(2013Y2-00091)

通信作者:田永军, E-mail: tianyj@ms.giec.ac.cn; 电话: +86-20-37280253

节能应用具有重大的经济和社会意义<sup>[1]</sup>。

近年来国内外大力研究和推广新能源和可再生能源干燥<sup>[2-3]</sup>,例如利用太阳能、生物质热源、热泵和地热等方式进行干燥,取得了较好的实效。太阳能干燥具有突出优点,同时太阳能具有随机性、间歇性的特点,连续进行的干燥作业需要配备辅助热源。热泵具有节能、稳定和无污染排放等优点,在我国的很多地区可以全年运行,是一种理想的太阳能辅助干燥热源,近年来太阳能-热泵干燥方式得到广泛的研究和生产应用<sup>[4-6]</sup>。

### 1 实验设备

图 1 为太阳能-热泵联合干燥系统干燥房(a)和热源系统(b)的实物照片。干燥系统建于广东佛山三水乐平,属于热带季候风气候,全年平均气温和最低气温均高于零度,太阳能-热泵热源可以满足全年任何时段的 24 h 连续干燥需求。

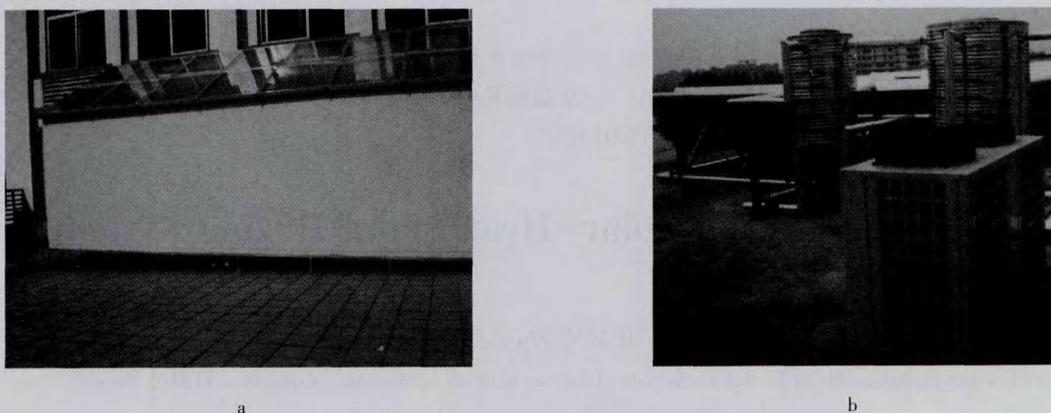


图 1 太阳能-热泵干燥系统干燥房(a)和热源(b)照片

联合干燥系统结构示意图如图 2,其中换热柜内部安装有换热器和离心风机,干燥房内部由布风孔板隔开为上下两层,底层送风,物品在上层干燥,循环风流动方向如图中箭头所示。运行时,当干燥房中的热风湿度超过设定值,控制系统自动开启热回收器排放湿空气,并与新风换热,降低室内热空气湿度。在干燥房中温度发生变化后,通过逻辑计算控制流量调节阀的开度改变换热器中流过的热水流量,维持物品干燥的吸热和散热平衡,实现恒温干燥。

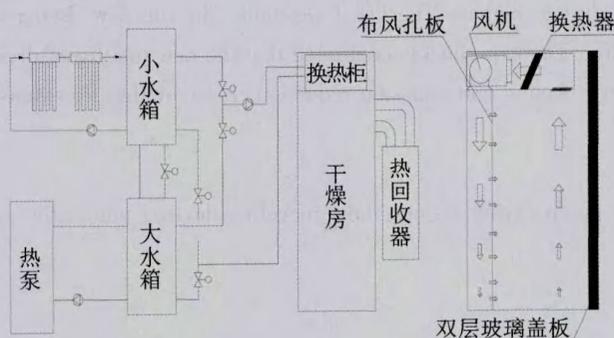


图 2 联合干燥系统示意图

在干燥房的顶部安装有双层玻璃盖板,干燥某些需要有阳光照射的物品时(如腊肠、腊肉等),盖板在保证阳光投射的同时,有效防止顶部散热。双层盖板中间的空气夹层存在降低干燥房顶部传热系数,减少散热

损失,对比单层玻璃盖板,其顶部散热损失降低几十倍。在夜晚或者物料禁止阳光照射的情况下,盖板下面的遮挡板铺开可以防止太阳直晒。通过玻璃盖板的使用,干燥房变成类似太阳能集热器的功能,提高了太阳能的利用率。

使用太阳能供热时,当小水箱水温超过设定值后,控制大小水箱间阀门打开进行流动,保持小水箱水温恒定和蓄热。阴天或者夜晚时小水箱水温不能满足使用要求,控制开启热泵循环加热大水箱中的水。

本实验所用装置和仪器参数见表 1。

表 1 系统设备和测试仪器相关参数

| 设备和仪器  | 型号和参数                               | 设备和仪器  | 型号和参数                 |
|--------|-------------------------------------|--------|-----------------------|
| 太阳能集热器 | 50 m <sup>2</sup> 真空管,Φ 58×1 800    | 太阳能辐射表 | TBQ-2,稳定性±5%          |
| 保温水箱   | 300 L、1 000 L 各 1 个                 | 温湿度传感器 | 湿度±3%RH,温度±0.5℃       |
| 水泵     | 威乐 PH 041 E 和 PH 254 E              | 风速传感器  | 分辨率 0.05 m/s          |
| 循环离心风机 | 4 kW,9 000~11 000 m <sup>3</sup> /h | 电子天平   | 量程 210 g,精度±0.1 mg    |
| 热回收器   | 0.25 kW,800 m <sup>3</sup> /h       | 电子磅秤   | 量程 300 kg,准确度 0.02 kg |

## 2 系统测试数据

干燥系统通过计算机视窗操作实现对运行参数的自动记录和控制设定,通过软硬件配合实现自动智能控制。预设参数包括水箱温度、干燥房温湿度、排气湿度、干燥时间、热源控制模式等,开发的控制界面如图 3 所示。

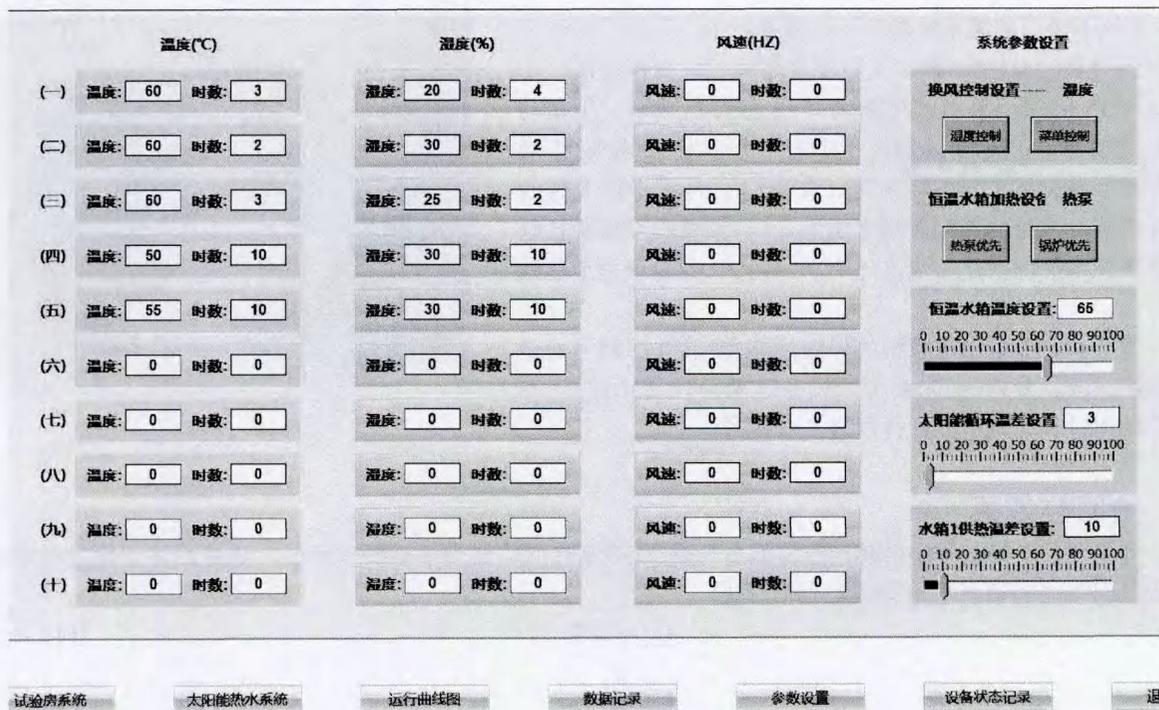


图 3 干燥系统控制软件界面图

被干燥物品为初始含湿量为 95% 的新鲜蔬菜,均匀放置于干燥房内的不锈钢多层置物板上。主要测量

参数包括:太阳能总辐射强度、干燥房内和环境的干湿球温度,测量样品的重量。即时测量集热器倾斜面上太阳能总辐射强度值随时间变化如图4所示。

被干燥菜干质量随时间变化如图5。随着干燥过程的进行,被干燥蔬菜的含水量逐渐降低,其质量变化曲线斜率先增大后减小。干燥过程前期平缓的原因在于干燥房初始温度低,在室温逐渐升高的过程中,蔬菜中水分蒸发速率逐渐增加,为升温干燥阶段。干燥房内温度达到设定值后,随着干燥作业的进行,干燥曲线斜率基本不变,为恒速干燥阶段。当样品干燥除去一定水分后,干燥出的水分中结合水所占的比率增加,干燥难度增大,此时样品中水分蒸发速率随着样品含水量的降低而降低,干燥曲线斜率降低。

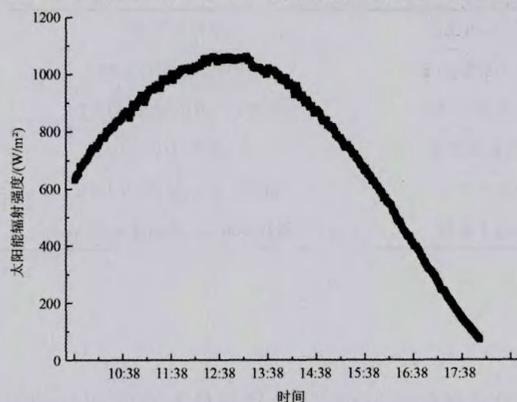


图4 太阳能辐射强度变化图

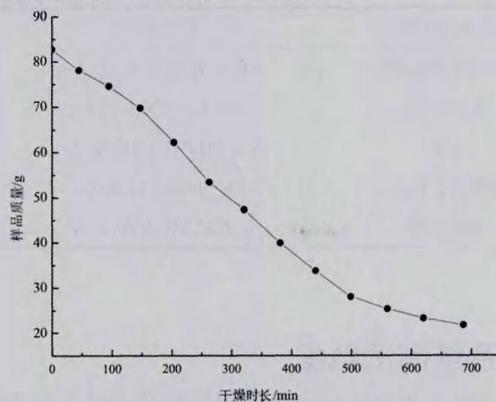


图5 干燥样品质量变化图

系统干燥后的菜干实物照片如图6所示。干燥后的菜干洁净,品相好,无粉碎,在空气中放置多天后未腐烂变质。干燥运行18 h,完全采用太阳能热源,未曾开启热泵。干燥前菜干质量为200 kg,干燥后菜干中的水分蒸发90.86%,干燥过程中水泵和风机总电耗为79.5 kW·h。传统干燥方式的能耗与蒸发水分的汽化潜热之比为2~3,本实验干燥所耗电能和蒸发水分的汽化潜热之比为0.63左右,具有显著节能效果。

本实验建设的干燥系统的保温性能、换热效率和干燥量还有很大改善余地,尚未发挥干燥系统的最佳使用性能,在推广使用过程中其节能性可以进一步提升。

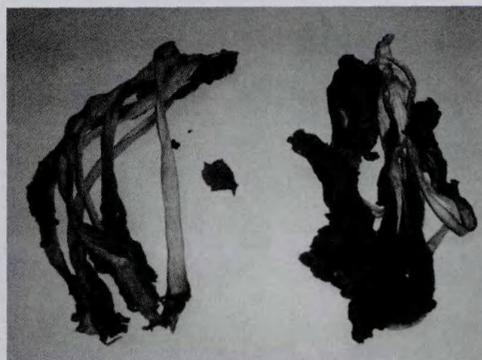


图6 干燥后的菜干照片

### 3 热回收效果

为了评估干燥过程中的热回收器的运行效果,控制热回收器为手动操作状态。测量计算干燥过程中热回收器回收的能量值 $Q_s$ 和能量热回收比 $k$ 。

$$Q_s = \sum W_s \cdot t \quad (1)$$

$$k = \frac{W_s}{W_i} \quad (2)$$

$$W_s = \Delta h \cdot \nu \cdot \rho \quad (3)$$

其中, $W_s$ 为热回收器运行过程中回收的能量功率,kW; $k$ 为测量的时间间隔,s; $W_i$ 为热回收器运行功耗,kW; $\Delta h$ 为湿空气在热回收系统进出口间的焓差,kJ/kg; $\nu$ 为湿空气排放的体积流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ; $\rho$ 为湿空气排放时的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

将实验数据带入计算公式(1)、(2),求得热回收器的回收热量功率如图 7 所示。随着干燥作业的进行,干燥物品的湿度降低,排放湿空气的焓值降低,热回收器热量回收的功率降低,而热回收器运行耗功不变, $k$ 的数值逐渐降低。

统计热回收器每小时回收能量值可知,在干燥测试的 350 min 时间内,热回收器回收热量 42.61 kJ,回收能量与自身耗电比为 29,可见热回收器的安装运行具有可观的经济效益和良好的节能效果。

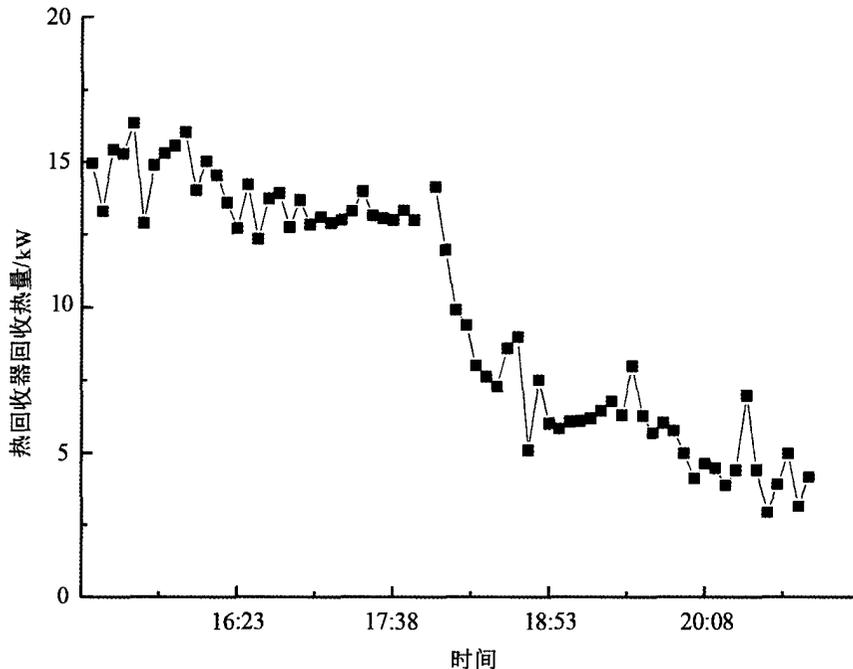


图 7 热回收器能量回收功率随时间的变化

## 4 结论

本工作设计一套太阳能-热泵联合干燥系统,以真空管集热器所采集的太阳能作为主要干燥热源,以高温热泵作为辅助备用热源,采用智能控制软硬件实现 24 h 连续恒温干燥。

利用本系统对新鲜蔬菜进行干燥测试表明,设计的系统运行稳定,干燥后的菜干品相优秀。通过智能控制系统,实验过程中温度波动被有效地限制在要求的范围内,满足恒温要求;采用蓄能水箱,有效延长了太阳能热源的使用时长;热回收器的采用实现了显著节能的经济效果。

## 参考文献:

- [1] 崔春芳, 童忠良. 干燥新技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1-46.
- [2] Pallav Purohit, Atul Kumar, Tara Chandra Kandpal. Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation[J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1568-1579.
- [3] 李海霞, 朱跃钊, 廖传华. 可再生能源在干燥装备中的应用[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(5): 226-229.
- [4] 詹长军. 太阳能热泵联合干燥装置在干燥领域的比较优势[J]. 农业工程技术, 2010(3): 22-23.
- [5] 车本佳. 太阳能热耦合热泵干燥系统运行优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [6] Seyfi Şevik, Mustafa Aktaş, Hikmet Doğan, et al. Mushroom drying with solar assisted heat pump system[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 72(8): 171-178.