

太阳能-热泵联合茶叶烘焙装置的创新设计与实验研究*

姚远^{1,2,3,4}, 廉永旺^{1,2,3}, 王显龙^{1,2,3}, 陈颖^{4†}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 广东工业大学, 广州 510006)

摘要: 本文介绍了一种创新设计的太阳能-热泵联合茶叶烘焙装置。结构优化的槽式聚光型太阳能集热器采用双循环热水作为传热媒介。热泵机组采用某新型高温热泵工质, 可获得高达 85℃ ~ 90℃ 的输出热风。该装置可实现太阳能单独干燥、热泵单独干燥和太阳能-热泵联合干燥等三种工作模式。使用该装置分别进行了三种工作模式下的高温烘焙茶叶的实验研究。结果发现, 在干燥量相同的前提下, 太阳能单独干燥模式最省电, 热泵单独干燥和太阳能-热泵联合干燥耗电量几乎相同, 太阳能单独干燥比另外两种干燥模式省电 50% 以上。

关键词: 太阳能集热器; 热泵; 干燥; 节能

中图分类号: TK511

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.01.007

Experimental Study on an Innovative Hybrid Solar Heat Pump System for Tea Drying

YAO Yuan^{1,2,3,4}, LIAN Yong-wang^{1,2,3}, WANG Xian-long^{1,2,3}, CHEN Ying⁴

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

2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: An innovative hybrid solar heat pump drying system is presented in this paper. For the dual loop solar water subsystem, the parabolic trough solar collectors with optimized structure was employed. For heat pump subsystem, a new type of heat pump working fluid was used, which can produce hot air of 85°C to 90°C. This system can realize three kinds of working modes, including solar energy alone drying, heat pump alone drying and hybrid solar heat pump drying. An experimental study on the three working modes was carried out, respectively. The results show that under the same conditions, the power consumption for solar alone drying mode is the lowest, while the energy consumption for heat pump alone drying mode and hybrid mode is almost the same. Solar drying alone working mode can save more than 50% energy than the other two modes.

Key words: solar collector; heat pump; drying; energy conservation

0 引言

茶叶烘焙一般是制茶工艺过程的最后一道工序, 其目的是蒸发茶叶内多余水分, 促使叶内含物起热化、构香作用, 增进和固定品质, 以利贮藏^[1-3]。其工艺特点是干燥温度高, 烘干时间长, 对茶叶各部分的干燥均匀性有较高要求^[4-6]。从茶叶整个干燥工艺过程中的耗能量来分析, 耗能最大的工序就是烘焙工序。

因此, 茶叶加工行业节能降耗技术的研究重点是在烘焙工艺^[7-10]。近年来, 利用太阳能和热泵对农副产品进行中低温干燥加工的技术取得了较大进展, 但是高温烘干技术仍是一个有待解决的技术难点^[11-14]。本研究团队设计了一种太阳能-热泵联合烘干装置, 采用太阳能槽式聚光型集热器和新型高温热泵工质, 提高了系统传热工质的输出温度。本文详细介绍了此联合干燥装置的设计特点与应用于茶叶烘焙的试验情况,

* 收稿日期: 2016-09-22 修订日期: 2016-12-13
基金项目: 广东省产学研合作项目 (2013B091500059)
† 通信作者: 陈颖, E-mail: chenying@gdut.edu.cn

并对太阳能-热泵高温烘干技术应用于茶叶烘焙工艺的可行性进行了技术经济分析。

1 槽式太阳能集热器的结构设计

高温联合烘干装置中的太阳能集热器采用槽式集热器, 反光镜面为抛物柱面, 太阳光接受器采用的是发黑翅片管, 管外套真空管保温。聚光光路图如图 1^[4]所示, 下部曲线为抛物线, 是反光镜面的法向横截面, 圆形为真空管横截面。槽式集热器集热单元的主要结构尺寸如图 2 所示, 每个集热单元的开口采光面积是: $S=1\text{ m} \times 2\text{ m}=2\text{ (m}^2\text{)}$ 。该集热器由 6 个集热单元并联组成, 平行放在同一个水平支架上。每个集热单元的下轴铰接一个同步拉杆, 同步拉杆与电机驱动的电动推杆联动。电动推杆的伸缩带动同步拉杆平行移动, 同步拉杆又带动集热

单元绕真空管接收器旋转, 推杆电机由太阳跟踪器控制。

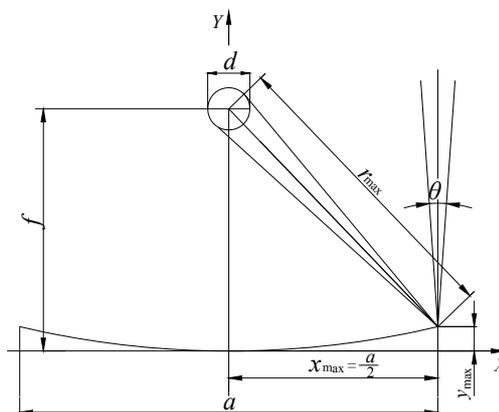


图 1 抛物柱面集热器光路图

Fig. 1 Schematic drawing of light in the reflector

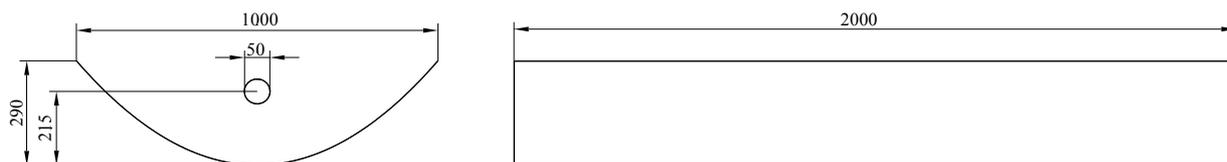
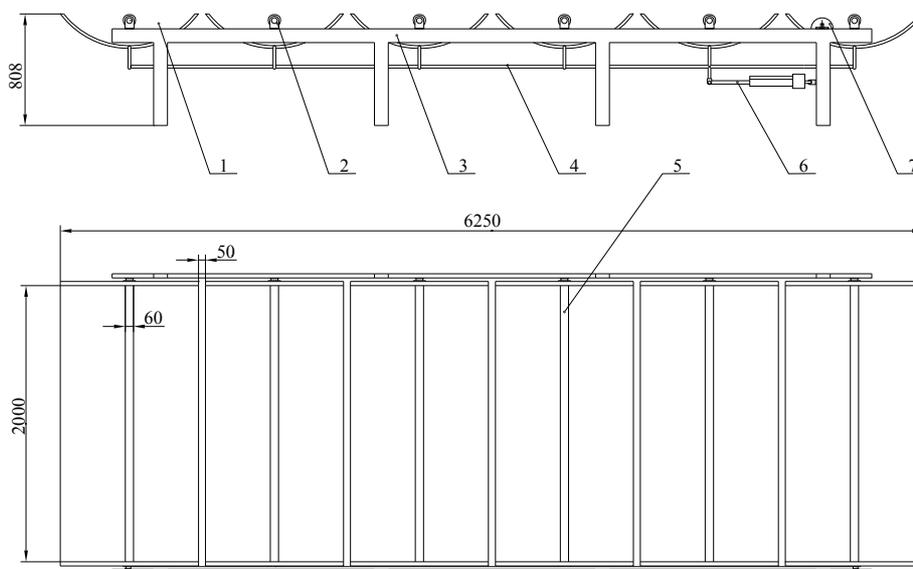


图 2 槽式集热器单元结构图 (图中数字单位: mm)

Fig. 2 Structure drawing of trough collector unit

此机械结构与目前常用的槽式集热器相比, 具有以下几个特点: (1) 反射镜面无支架和背板, 节材减重, 降低制造成本; (2) 推杆联动机构保证了各个反射镜面在追踪太阳时的一

致性, 大大提高了聚焦精度; (3) 集热单元下方的开口以及免侧板设计, 可以通过雨水冲刷和风吹作用, 实现镜面的自清洁。其整体结构尺寸如图 3 所示。



1-集热单元; 2-固定回转轴; 3-支架; 4-同步拉杆; 5-真空管套装翅片管; 6-电动推杆; 7-太阳跟踪器

图 3 槽式集热器整体结构图 (图中数字单位: mm)

Fig. 3 Structure drawing of trough collector

2 联合干燥装置的工作模式

该太阳能-热泵联合干燥装置可以实现太阳能单独干燥、热泵单独干燥和联合干燥三种模式, 见图 4。下面对每种工作模式的前提条件和工作流程分别阐述。

2.1 太阳能单独干燥模式

当太阳辐射强度超过 500 W/m^2 且天气持续晴朗时, 可采用太阳能单独干燥模式。此时, 热泵系统处于不工作状态, 通过调节四个三通阀, 使烘干箱流出的空气只进入太阳能热水换热器, 不再经过热泵机组的蒸发器和冷凝器。由于采用聚光型太阳能集热器, 当太阳辐射强度超过 500 W/m^2 且天气持续晴朗时, 集热器可以将热水加热至 95°C 以上, 热水进入换热器后, 与风道中的空气换热, 可将空气升温至 85°C 左右, 升温后的空气进入烘干箱对茶叶进行烘焙, 排气阀定时打开排湿。

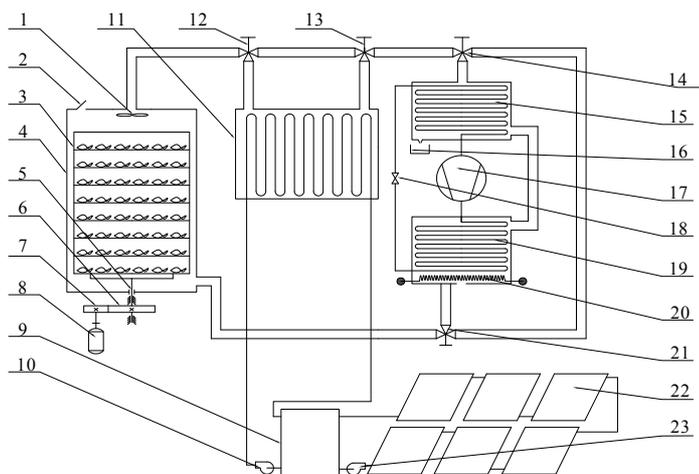
2.2 热泵单独干燥模式

当天气为阴雨天, 完全没有太阳光辐射时, 可采用热泵单独干燥模式。此时, 太阳能集热器系统不工作, 集热器里面的传热水不再循环, 蓄水箱与

太阳能热水换热器之间也停止水循环。通过调节 4 个三通阀, 使烘干箱流出的空气绕过太阳能热水换热器, 只经过热泵机组的蒸发器和冷凝器。蒸发器吸收空气中的热量, 使烘干箱排出的空气降温并析出水分, 降温降湿后的排气进入冷凝器, 吸收冷凝器的热量后变成高温空气再次进入烘干箱对茶叶进行烘焙。在此工作模式下, 不通过排气阀排湿, 只通过蒸发器降温排湿, 这样就将每次烘干的余热最大限度地地进行回收, 实现封闭式热风循环。

2.3 太阳能-热泵联合干燥模式

当太阳光辐射强度低于 500 W/m^2 , 或者是多云天气, 阳光经常被短时遮挡, 可采用太阳能-热泵联合干燥模式。此时, 烘干箱流出的空气先进入太阳能热水换热器对空气进行预热升温, 吸收一部分热量, 然后进入热泵机组再次吸热升温, 最后返回烘干箱对茶叶进行干燥处理。这种模式一般适合茶叶在含湿量比较大、干燥温度不太高、烘干前后温差大时采用。到了高温度、小温差干燥阶段, 如果太阳能热水温度不高, 烘干排出的空气进入太阳能热水换热器后不仅不会吸热, 反而会散失热量, 加大热泵的负荷, 增加干燥过程的耗电量。



1-轴流风机; 2-排气阀; 3-回转搁架; 4-烘干箱; 5-回转轴; 6-传动大齿轮; 7-传动小齿轮; 8-电机; 9-蓄水箱; 10-循环水泵 A; 11-太阳能热水换热器; 12-三通阀 A; 13-三通阀 B; 14-三通阀 C; 15-蒸发器; 16-凝水槽; 17-热泵压缩机; 18-节流阀; 19-冷凝器; 20-辅助电加热器; 21-三通阀 D; 22-太阳能槽式集热器; 23-循环水泵 B

图 4 太阳能-热泵联合干燥装置流程示意图

Fig. 4 Flow diagram of solar energy heat pump combined drying equipment

3 太阳能-热泵联合干燥装置的设计计算

该太阳能-热泵联合干燥装置的设计目标为: 在 3 h 内, 将 50 kg 茶叶的含水率由 15%降低到 5%。

根据上述目标, 进行下列热力学参数计算。

3.1 干燥装置热功率计算

3.1.1 50 kg 茶叶烘焙干燥过程中需要排出的水量

$$m_p = \frac{m(w_1 - w_2)}{100 - w_2}$$

式中, m_p 为茶叶干燥过程中排出的水分质量, kg; m 为茶叶干燥前的质量, kg; w_1 、 w_2 分别为干燥前、后茶叶的含水率, %。代入已知数据, $m = 50$ kg、 $w_1=15\%$ 、 $w_2=5\%$, 可解出 $m_p=5.26$ kg

3.1.2 干燥的热负荷

茶叶干燥装置的热负荷取决于茶叶干燥过程中所需要消耗的热量, 由以下几项组成。

(1) 干燥前茶叶预热升温所需热量 Q_1 (kJ)

$$Q_1 = m [c_{p1}(1-w_1) + c_{p2}w_1] (T_2 - T_1)$$

式中, m 为干燥前茶叶的质量, kg; c_{p1} 、 c_{p2} 分别为干燥前茶叶和水的比热, kJ/(kg·K); w_1 为茶叶的初含水率; T_1 、 T_2 分别为茶叶干燥前后的温度, °C。

根据文献[1]实验数据, 茶叶的比热容因含水率不同而异, 当含水率为 6.4%, 比热容约 1.63 kJ/(kg·K), 含水率为 74% 的鲜叶比热容为 3.5 kJ/(kg·K)。含水率 15% 的茶叶, 大致推算出其比热容 $c_{p1}=1.88$ kJ/(kg·K)。水的比热 $c_{p2}=4.2$ kJ/(kg·K)。茶叶的初含水率 $w_1=15\%$, 设干燥前茶叶温度 $T_1=25$ °C, 干燥后茶叶温度 $T_2=85$ °C。

代入上述已知数据, 可求出茶叶预热升温所需热量 Q_1 :

$$Q_1 = 50 \times [1.88 \times (1-0.15) + 4.2 \times 0.15] \times (85-25) = 6684 \text{ (kJ)}$$

(2) 茶叶中水分蒸发所需的热量 Q_2 (kJ)

$$Q_2 = m_p \times \gamma$$

式中, m_p 为茶叶干燥过程中排出的水分质量, kg; γ 为水的汽化潜热, kJ/kg。

由前面的计算结果, 可知茶叶干燥过程中排出的水分质量 $m_p = 5.26$ kg。查饱和水蒸气热力性质表可知, 水在 85°C 的汽化潜热 $\gamma = 2293.7$ kJ/kg, 计算得出:

$$Q_2 = m_p \times \gamma = 5.26 \times 2293.7 = 12065 \text{ (kJ)}$$

(3) 茶叶干燥装置的散热损失 Q_3

Q_3 和干燥装置的温度和保温情况有关, 一般按经验可取前两项和的 5% 左右, 即:

$$Q_3 = 0.05 \times (Q_1 + Q_2) = 0.05 \times (6684 + 12065) = 938 \text{ (kJ)}$$

由上述计算, 可求得该茶叶干燥机一个工作周期所需总热量为:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 6684 + 12065 + 938 = 19687 \text{ (kJ)}$$

按照茶叶烘焙工艺过程要求, 一个工作周期的时间是 3 h, 所以茶叶烘焙干燥装置的热功率为:
 $W = Q / (3600 \times 3) = 1.83$ (kW)

3.2 槽式太阳能集热器集热面积计算

槽式太阳能集热器集热面积 A 的计算公式为^[5]:

$$A = \frac{W}{H \times \eta} \text{ (m}^2\text{)}$$

式中, W 为热功率, W; H 为工作时太阳辐射强度, W/m²; η 为集热器综合效率。

设工作时太阳平均辐射强度为 500 W/m², 集热器综合效率 (按供热热水温度 85°C) 为 0.32, 代入上式可求出真空管集热面积为:

$$A = \frac{W}{H \times \eta} = \frac{1830}{500 \times 0.32} = 11.44 \text{ m}^2 \approx 12 \text{ m}^2$$

4 太阳能-热泵联合干燥装置的茶叶烘干试验

4.1 太阳能单独干燥模式的性能测试

4.1.1 性能测试参数与计算公式

太阳能供热系统的性能可用集热器热效率 η_T 和系统供热系数 ε_{COP} 来表示。前者反映太阳辐射能转变为热能的效率, 后者等于集热器内热水实际得热与太阳能供热系统风机及循环水泵能耗和的比值, 它反映了系统的供热效率^[6]。

集热器热效率 η_T 的计算公式:

$$\eta_T = \frac{q_{1t}}{Q_T} = \frac{Gc_{p2}\Delta t}{IA}$$

式中, q_{1t} 为集热器里热水的实际得热量; Q_T 为集热器上得到的太阳辐射热能; G 为集热器里面的热水流量; c_{p2} 为水的比热; Δt 为集热器里水的温升; I 为太阳能辐射强度; A 为槽式集热器开口面积。

系统供热系数 ε_{COP} 的计算公式:

$$\varepsilon_{COP} = \frac{q_{2t}}{W_1 + W_2}$$

式中, q_{2t} 为太阳能热水换热器中的换热量; W_1 为风机消耗功率; W_2 为水泵消耗功率。

4.1.2 实验客观环境条件

时间: 2015 年 10 月 15 日

天气: 晴微风, 气温 18°C ~ 25°C

地点: 广州, 纬度 23.117°

方向：聚光轴与南北方向平行放置

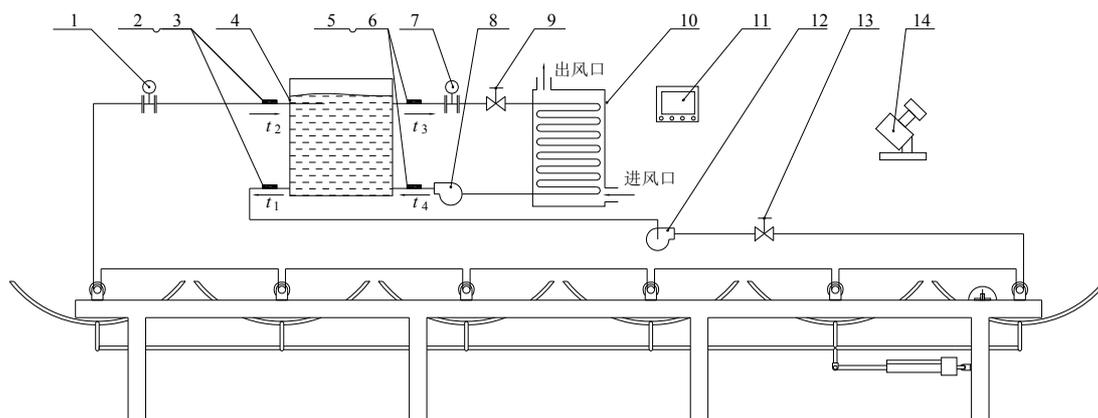
太阳辐射强度：450~550 W/m²

干燥对象：经过初烘的高山茶，初始含水率实测为 15.8%，初始重量 50 kg，目标含水率为 5%。

4.1.3 实验原理与装置

实验装置如图 5 所示，传热工质为自来水，水泵 A 驱动自来水在槽式集热器和蓄水箱之间循环流动加热。流量计 B 记录此循环的水流量。热电偶 A、

B 分别紧贴在集热器—水箱出入口管道外壁上，用以测量被集热器加热前后的水温 t_1 和 t_2 ，数据线连接无纸记录仪记录温度变化。在水箱另一侧，水泵 A 驱动自来水在太阳能热水换热器和蓄水箱之间循环流动，目的是加热即将进入干燥箱的空气。流量计 A 记录此循环的水流量。热电偶 C、D 用以测量进出换热器前后的水温 t_3 和 t_4 。太阳辐射仪实时记录太阳光辐射强度。



1-流量计 B；2-热电偶 A；3-热电偶 B；4-保温水箱；5-热电偶 C；6-热电偶 D；7-流量计 A；8-水泵 A；9-流量调节阀 A；10-太阳能热水换热器；11-无纸记录仪；12-水泵 B；13-流量调节阀 B；14-太阳辐射仪

图 5 槽式集热器实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental device of the trough collector

4.1.4 实验结果与讨论

实验选择从 11:00 开始，15:20 结束，每隔 20 min 无纸记录仪自动记录一次热电偶测得的水箱温度。先将太阳能集热器—蓄水箱循环打开，转动调节阀 B 至设定流量 $G_1=1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，并保持流量不变，流量计 B 读数。太阳辐射仪每一分钟读数一次，取 20 min 内的平均值。当蓄水箱出口温度 t_1 达到 95℃ 左右时，打开太阳能热水换热器—蓄水箱循环，转动调节阀 A 至设定流量 $G_2=2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，并保持流量不变，流量计 A 读数。水泵 A 和 B 的电机功率均为 $W_1=0.15 \text{ kW}$ ，风机的电机功率为 $W_2=0.3 \text{ kW}$ 。根据测试数据记录，列表 1。由表 1 中所列数据可以看出：(1) 在太阳能单独干燥工作模式下，系统供热效率高。此处的供热效率实际上是单位电功供热量，是表征干燥过程中节电率的参数。表 1 中最小供热系数为 6.32，最高为 7.78。空气源热泵的供热系数一般为 3~5，电热炉供热系数最高只有 1，所以，太阳能单独干燥工作模式比常规干燥模式耗电量小。(2) 采用槽

式太阳能集热器获取高温热源时 (95℃ ~ 100℃)，集热器集热效率仍可维持在 0.39 ~ 0.47，与平板集热器或真空管集热器在获取 70℃ 左右热源水时相比，集热效率并无明显降低，说明此聚光太阳能集热器在获取高温热源时性能优异。

4.2 热泵单独干燥模式的性能测试

4.2.1 性能测试参数与计算公式

除湿能耗比 (specific moisture extraction rate, SMER) 是热泵干燥装置综合性能的主要指标，定义为消耗单位能量所除去物料中的水分量 (即物料中的水分去除量与热泵干燥装置消耗的电量之比)。除湿能耗比用 R_{SME} 表示，公式表达为：

$$R_{\text{SME}} = \frac{M_{\text{DE}}}{W_{\text{C}} \times t}$$

式中， R_{SME} 为除湿能耗比，kg/(kW·h)； M_{DE} 为从物料中除去的水分的质量，kg； W_{C} 为热泵的电功率，kW； t 为干燥时间，h。

表 1 太阳能单独干燥模式的性能参数

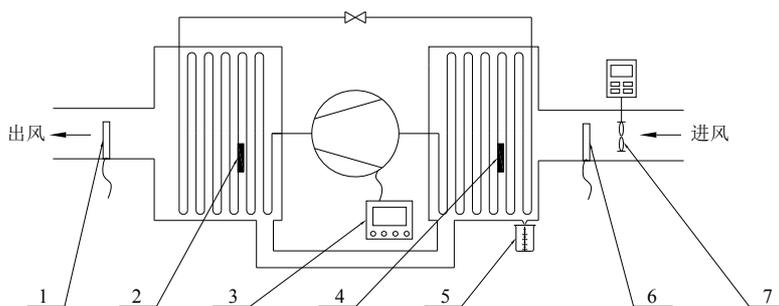
Table 1 Performance parameters of solar energy single drying mode

日期	记录时刻	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$	$T_4/^\circ\text{C}$	平均辐射强度 $I/(\text{W}/\text{m}^2)$	集热器集热 效率 η_T	太阳能供热 系数 ε_{COP}	茶叶含水率 /%
10.14	11:20	40.6	42.2	-	-	518	0.45	-	15.8%
10.14	11:40	59.1	60.8	-	-	522	0.47	-	13.1%
10.14	12:00	80.9	82.4	-	-	536	0.41	-	11.4%
10.14	12:20	96.8	98.4	97.1	95.6	562	0.42	7.29	10.2%
10.14	12:40	94.1	95.6	95.5	94.1	524	0.42	6.81	9.3%
10.14	13:00	90.6	92.0	91.8	90.5	535	0.38	6.32	8.5%
10.14	13:20	93.4	94.9	95.2	93.6	548	0.40	7.78	7.6%
10.14	13:40	96.8	98.2	97.7	96.4	526	0.39	6.32	6.9%
10.14	14:00	92.8	94.3	94.5	93.1	511	0.43	6.81	6.4%
10.14	14:20	97.5	98.9	99.2	97.7	523	0.39	7.29	6.0%
10.14	14:40	94.7	96.1	97.0	95.4	486	0.42	7.78	5.7%
10.14	15:00	92.3	93.8	94.1	92.5	497	0.44	7.78	5.4%
10.14	15:20	94.9	96.2	95.8	94.3	472	0.40	7.29	5.3%

4.2.2 实验原理与装置

实验装置如图 6 所示, 从干燥房出来的空气经右边风道进入热泵, 在进风口装有风量计和气温传感器 B, 分别测量实际风量 G_A 和空气进口温度 T_4 。空气首先进入热泵的蒸发器, 在这里蒸发器吸收空气的热量, 使空气降温除湿。在蒸发器上贴有热电偶 B, 测量蒸发温度 T_2 。热泵压缩机装有电机功率表, 测量电机输入功率 W 。蒸发器底部的漏液孔下

面装有量杯, 测量水分蒸发量 M_{DE} 。空气经过蒸发器后进入冷凝器, 在冷凝器中吸热升温, 冷凝器上贴有热电偶 A, 测量冷凝温度 T_1 , 空气从冷凝器出来后从右边的出风口进入干燥房。在出风口装有气温传感器 A, 测量空气出口温度 T_3 。干燥对象仍旧是经过初烘的高山茶, 初始含水率实测为 15.5%, 初始重量 50 kg, 终含水率目标是 5%。本实验装置的热泵压缩机标称输入功率为 1.1 kW。



1-气温传感器 A; 2-热电偶 A; 3-电机功率表; 4-热电偶 B; 5-量杯; 6-气温传感器 B; 7-风量计

图 6 热泵干燥实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of heat pump drying equipment

4.2.3 实验结果与讨论

表 2 记录了热泵闭式干燥时间段内各个测试参数的测量值以及除湿能耗比的计算值。由表 2 中所列数据可以看出: 当冷凝温度一定时, 随着进风温度的升高, 进风温度与出风温度的温差也越来越小, 说明热泵实际供热量在逐渐减小, 所以压缩机耗电功率越来越小。同时, 随着进风温度升高, 水分蒸

发速率也在降低, 并且超过压缩机耗电功率的下降速度, 因此, 热泵的除湿能耗比也在逐渐降低。除湿能耗比的降低, 说明该热泵在闭式高温干燥的工作状态下, 其干燥节电性能随着进风温度的升高而降低。但从绝对耗电量的方面分析, 由于压缩机的绝对耗电功率是不断降低的, 所以绝对耗电量随干燥时间的延长而越来越小。

表2 热泵单独干燥模式的性能参数

Table 2 Performance parameters of heat pump single drying mode

冷凝温度 $T_1 / ^\circ\text{C}$	蒸发温度 $T_2 / ^\circ\text{C}$	出风温度 $T_3 / ^\circ\text{C}$	进风温度 $T_4 / ^\circ\text{C}$	压缩机耗电功率 W / kW	蒸发水分质量 $M_{\text{DE}} / \text{kg}$	茶叶含水率 /%	除湿能耗比 R_{SME}
110	17.1	57.6	30.1	1.25	0	15.5%	0.00
110	19.5	60.2	34.2	1.22	0.59	14.5%	1.91
110	21.8	62.6	38.6	1.16	1.14	13.4%	1.85
110	24.3	64.9	42.4	1.12	1.65	12.6%	1.79
110	27.1	67.3	46.3	1.12	2.13	11.7%	1.71
110	29.4	69.8	50.1	1.08	2.58	10.9%	1.64
110	31.5	72.1	54.3	1.06	3.01	10.1%	1.61
110	33.7	74.5	58.6	1.03	3.42	9.3%	1.57
110	35.6	76.7	62.5	0.98	3.81	8.5%	1.55
110	37.3	79.3	66.8	0.91	4.18	7.8%	1.57
110	39.4	81.4	71.2	0.85	4.52	7.1%	1.55
110	41.3	84.2	75.4	0.82	4.82	6.5%	1.44
110	43.2	87.6	80.1	0.74	5.09	5.9%	1.38

4.3 太阳能-热泵联合干燥模式的性能测试

在天气晴好的条件下, 单独使用太阳能集热器进行干燥, 其供热系数可达到 7 左右, 无疑是最节电的干燥模式。但太阳能不稳定, 波动大的特点极大地制约了太阳能单独干燥模式的应用。而热泵是电力驱动的供热设备, 其工作状态非常稳定可靠, 不受外界环境影响。因此, 在太阳能集热设备供热能力因太阳辐射量降低而下降时, 可将太阳能集热器与热泵联合起来为干燥房供热, 该工作模式既能保证供热的稳定性又可实现省电的目的, 可充分利用两种设备各自的优点, 是一种非常有应用前景的干燥新模式。前面已经将本研究团队研制的太阳能-热泵联合干燥装置的运行原理和机械结构做了详细的阐述(见图 6), 本节内容根据实验数据, 主要对该模式的节电性能进行定量分析。

4.3.1 实验客观环境条件

时间: 2015 年 10 月 20 日

天气: 多云, 气温 $16^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$

地点: 广州, 纬度 23.117°

方向: 聚光轴与南北方向平行放置

太阳辐射强度: $410 \sim 530 \text{ W/m}^2$

干燥对象: 经过初烘的高山茶, 初始含水率 15%, 初始重量 50 kg, 终含水率 5%。

4.3.2 实验结果与讨论

本实验从 11:00 开始, 11:00-12:00 只运行太阳能集热器系统, 目的是以最低能耗加热蓄水箱中的热水, 将蓄水箱中的热水作为热泵的取热热源。在此阶段, 系统的耗能主要是两台循环水泵, 每台功率是 0.15 kW, 两台共计 0.3 kW。12:00-15:00 同时运行太阳能和热泵系统, 此时的系统耗能除了水泵, 还有热泵压缩机, 风机等零部件。该实验中测得的太阳辐射强度与时间的对应变化关系绘制成图 7, 各部件的耗电功率及系统供热功率与时间的对应关系绘制成图 8。从图 7 中可以看到, 太阳辐射强度在 4 h 内波动比较明显, 最低是 328 W/m^2 , 最高是 497 W/m^2 。如果采用太阳能空气集热器单独干燥, 会造成干燥温度变化波动大, 对茶叶的提香非常不利, 严重影响茶叶成品的质量。本茶叶干燥装置采用的太阳能集热器是热水型的, 并用保温水箱作为中间过渡容器。由于水的比热比空气大得多, 因此短时的太阳辐射波动不会对水箱中的水温造成大的波动。这样, 进入太阳能换热器的热水可以保持在一个相对稳定的温度。由图 8 可以看出, 该系统的耗电功率和供热功率基本上也是呈平稳状态, 并没有随太阳辐射强度变化而出现明显的变化。这也验证了蓄热水型的太阳能集热器可以起到抚平太阳能波动的作用。

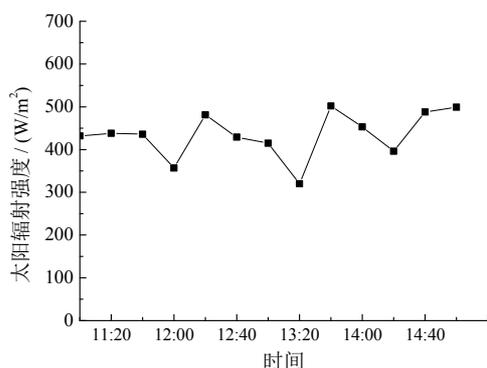


图 7 太阳辐射强度随时间变化曲线

Fig. 7 The curve of solar radiation intensity changes with time

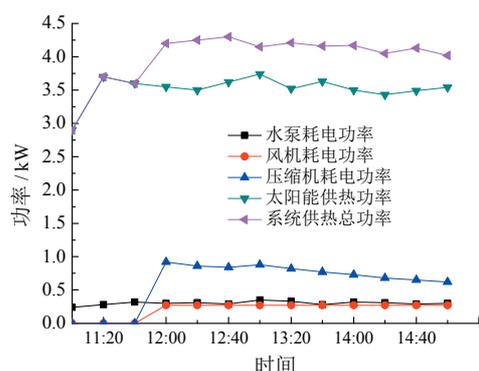


图 8 系统各种功率参数随干燥时间变化的曲线

Fig. 8 Curves of various power parameters with drying time

4.4 三种高温干燥模式的节电分析

前文对太阳能-热泵联合干燥装置三种高温干燥模式的实验情况进行了详细介绍,并根据实验结果进行了干燥性能变化特点的分析。本节主要对三种高温干燥模式的节电性与经济性进行对比分析。由于三个实验的干燥对象与干燥目标是相同的,因此可以此作为对比基础,将三种模式完成相同干燥任务的耗电量计算出来,作为节电性的比较依据。由图 9 可以看出,在三种干燥模式中,太阳能

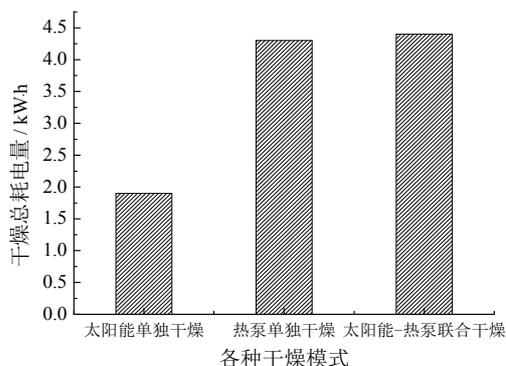


图 9 三种干燥模式的耗电量对比图

Fig. 9 Power consumption comparison chart of three drying model

单独干燥是最节电的,耗电量不到 $2 \text{ kW}\cdot\text{h}$,热泵单独干燥和太阳能-热泵联合干燥的耗电量差不多,为 $4.4 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 左右,是太阳能单独干燥模式的 2 倍多。由于本太阳能集热器采用的是热水双循环模式,循环水泵增加了耗电量,与太阳能干燥中常用的空气集热器相比,耗电较大。所以,在此次实验中,太阳能-热泵联合干燥模式在节电性上与热泵单独干燥模式相比,并无优势。

5 结 论

本文主要介绍了创新设计的太阳能-热泵联合干燥装置的结构特点和其应用于高温烘焙茶叶的实验情况。

装置的特点总结如下:(1)采用结构优化的槽式聚光型太阳能集热器,并用双循环热水作为传热媒介,在太阳辐射波动较大时,仍可以输出相对稳定的热源;(2)热泵机组采用某新型高温热泵工质,可获得高达 $85^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ 的输出热风;(3)该装置根据实际情况可转换为太阳能单独干燥、热泵单独干燥和太阳能-热泵联合干燥等三种模式。

三种干燥模式高温烘焙茶叶的实验结果,可得如下结论:(1)一般来说,当平均太阳辐射强度超过 $600 \text{ W}/\text{m}^2$,采用太阳能单独干燥模式最为节电,相对节电率超过 50%。(2)当太阳辐射强度波动较大或平均低于 $300 \text{ W}/\text{m}^2$,无论是采用热泵单独干燥模式还是太阳能-热泵联合干燥模式,其耗电量相差不多,大约是太阳能单独干燥模式耗电量的 2 倍。该结论只适用于本干燥装置应用于高温烘焙茶叶的情况,对于其他含水率高且烘干温度低的干燥物料并不一定正确,更多类型干燥物料的实验研究还有待进行。

参考文献:

- [1] 成洲. 茶叶加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2015.
- [2] 钟映富, 李中林, 周正科, 等. 绿茶恒温烘干中水分与叶绿素的变化规律分析[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, 26(1): 88-90, 94. DOI: 10.3969/J.ISSN.1673-9869.2004.01.024.
- [3] 钟秋生, 林郑和, 陈常颂, 等. 烘焙温度对九龙袍品种乌龙茶生化品质的影响[J]. 茶叶科学, 2014, 34(1): 9-20. DOI: 10.3969/j.issn.1000-369X.2014.01.003.
- [4] 张灵枝, 陈维信, 王登良, 等. 不同干燥方式对普洱茶香气的影响研究[J]. 茶叶科学, 2007, 27(1): 71-75. DOI: 10.3969/j.issn.1000-369X.2007.01.011.

- [5] 袁弟顺, 杨江帆, 孙云, 等. 不同烘干温度对茉莉花茶品质的影响[J]. 江西农业学报(自然科学), 2004, 26(5): 763-766. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2286.2004.05.023.
- [6] 刘飞, 王云, 李春华, 等. 茶叶干燥技术研究现状及展望[J]. 中国农学通报, 2015, 31(6): 210-215.
- [7] 郭学理. CD-6CHZ-9B 型茶叶烘焙机在茶叶生产上的应用[J]. 现代农业科技, 2016(5): 188, 190. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2016.05.110.
- [8] 杨君, 李细荣. 基于炭焙—电烘焙技术的武夷岩茶烘焙机研究[J]. 宜春学院学报, 2011, 33(8): 70-71. DOI: 10.3969/j.issn.1671-380X.2011.08.026.
- [9] 董士林. 链板式茶叶烘干机叶温—含水率模型[J]. 农业机械学报, 1989(4): 44-48.
- [10] 吴泽球, 陶中南. 茶叶烘干机械的技术现状及研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 263-266.
- [11] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [12] 贺飞, 唐兰, 黎清荐. 太阳能辅助热泵干燥技术及其研究进展[J]. 建筑节能, 2016, 44(7): 46-50. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2016.07.012.
- [13] 李锐, 王瑞霞, 江燕涛. 太阳能热泵联合干燥农产品的实验研究[J]. 制冷, 2016, 35(2): 70-76. DOI: 10.3696/J.ISSN.1005-9180.2016.02.014.
- [14] 冯道宁, 孙健, 李丽, 等. 小型太阳能空气源热泵联合果蔬干燥系统研究与设计[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 160-163. DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2015.03.039.

作者简介:

姚 远 (1976-), 男, 在职博士, 高级工程师, 主要从事太阳能热利用、中低温余热制冷、高效传热传质等方面的研究。

陈 颖 (1969-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事强化传热的基础理论以及空调制冷系统的能量高效利用技术研究。