

直通式真空管空气集热器热性能实验及干燥应用

王云峰¹, 常 伟², 李 明¹, 李国良¹, 罗 熙¹

(1. 云南师范大学太阳能研究所, 昆明 650500; 2. 楚雄禄丰县第三中学, 楚雄 651204)

摘 要: 在直通式太阳能玻璃真空管空气集热器基础上改进联箱结构, 并搭建测试平台对该种改进型空气集热器进行热性能实验研究。通过实验比较改进前后集热器的温升和效率, 获得改进后集热器出口温度与太阳辐照度关系的线性回归方程, 掌握不同空气质量流量对集热器出口温度和集热效率的影响规律, 分析得到该种真空管的最佳串联个数, 并对应用该种集热器的太阳能干燥系统的干燥效果进行初步测试分析。该研究结果可为太阳能空气集热干燥系统的设计及应用提供参考。

关键词: 真空管; 太阳能; 干燥; 实验

中图分类号: TK513.1

文献标志码: A

0 引 言

干燥是人们应用太阳能最早的领域之一, 从最初为保存食物而进行的干燥, 逐渐发展到各种农产品、中药材和工业产品的干燥^[1-2]; 太阳能干燥方式也从最初的自然晾晒, 发展到各种太阳能间接干燥、太阳能蓄热干燥和太阳能与各种辅助设备联合干燥等^[3-5]。而众多太阳能干燥设备中, 将太阳辐射能转换为热能的太阳能集热器是其核心部件, 其效率的高低直接影响着干燥系统性能的优劣, 因而太阳能空气集热器的设计和改进受到更多关注^[6-7]。目前太阳能干燥领域仍以平板式空气集热器研究居多, 原因是平板式空气集热器的空气流道设置形式多样^[8-9], 吸热板形状和结构变化也较多^[10-11], 且与干燥室结合方式较灵活^[12], 但其笨重的缺点在规模化应用中日渐凸显。随着真空管集热器技术的成熟和大力推广, 一些新型结构的真空管集热器被尝试应用于空气加热领域并取得较好效果。李明等^[13]研究内插管式真空管空气集热器在不同天气情况和不同放置方式下的热性能; 文献^[14]将内插管式集热器的联箱结构进行改进, 使得热空气流道在一个联箱内形成了一级串联结构; 而 Lamnatou 等^[15]又将该种内插管式集热器应用于干燥中; 国内浙江海宁某公司也将该种类型的空气集热器应用于腊鸡腿的干燥中^[16]。但是这种结构在每根真

空管底部会使气流方向有个 180° 的改变, 且空气流道直径较小, 使得流道延程阻力和压力损失都很大, 增加了风机功耗。因此有学者提出一种两端皆开口的直通型真空管改进结构, 对其建立单管传热模型并分析流量、效率与出口温度的关系^[17]。上海交通大学的代彦军将 CPC(compound parabolic concentrator) 聚光器与该种直通真空管结合起来, 使得该系统在流量为 0.007 m³/s 时效率能达到 48%^[18]。而云南某太阳能公司也生产该种太阳能直通式真空管, 并将若干根真空管并联组合使用, 发现此类型的集热器虽沿程阻力小但出风温度较低, 真空管高温段效率高的优势未能体现。

本文基于直通式真空管太阳能空气集热器, 对其联结使用方式进行改进, 并对其基本热性能进行实验研究, 获得不同太阳辐射强度、不同质量流量、不同串联数目下集热器的热性能, 以期对直通型真空管空气集热器的改进提供一定的参考。

1 直通太阳能真空管空气集热器

1.1 试验装置

本文所研究的空气集热器是将直通式全玻璃太阳能真空管空气集热器联箱工艺进行改进, 使集热器风道由并联改为串联结构, 集热器改进前后的工作原理分别如图 1a~图 1c 所示。

收稿日期: 2017-06-26

基金项目: 西南地区可再生能源研究与开发协同创新中心(05300205020516009); 云南省应用基础面上项目(2018FB098)

通信作者: 李 明(1964—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能利用、制冷、农业能源工程方面的研究。lmllldy@126.com

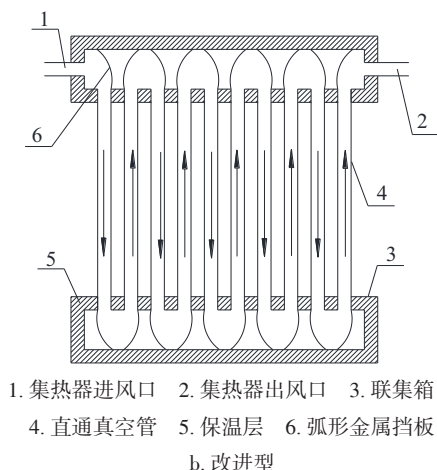
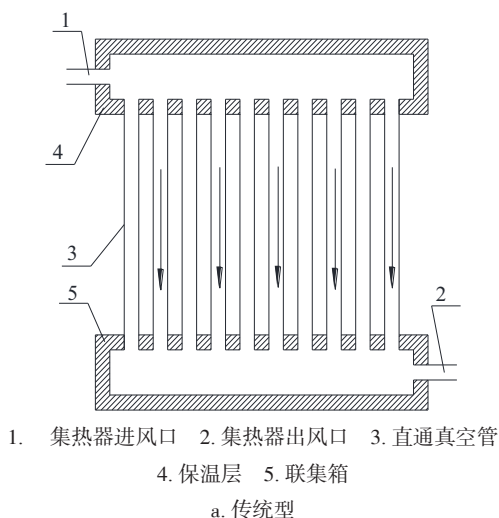


图1 传统型和改进型直通真空管空气集热器示意图

Fig. 1 Traditional and improved direct pass evacuated tube solar air collector

该种空气集热器由 20 根 1.9 m 长的直通真空管组成,直通真空管底部设有约 0.2 m 长的波纹状缓冲段结构,以防止工作过程中玻璃管因热应力而产生炸管,具体参数如表 1 所示。联箱外部尺寸 2.0 m×0.2 m×0.18 m,内部空气流道直径 0.12 m。集热器轮廓采光面积 1.7 mm×2.2 mm,有效集热面积 2.67 m²。

表1 直通真空管主要参数

Table 1 Parameters of direct pass evacuated tube

透射率	吸收率	发射率	内径/mm	外径/mm	壁厚/mm
0.93	0.93	0.06	47	58	3

1.2 试验方法及过程

太阳能空气集热器测试平台如图 2 所示,主要包括变频风机、变频器、进出口空气流量计,空气温度传感器、总辐射表、风管、数据采集系统和倾角可调支架等。测试平台支架朝南倾斜放置,其 25°倾角与昆明纬度基本一致。集热器采用出风口引风方式,其工质体积流量通过调整变频风机频率,改变引风机转速来调节进风量大小。采用质量流量控制方法,通过涡街流量计测得体积流量,根据风温和压力大小修正密度,计算出过程中的质量流量。集热器进、出口温度采用测量精度为±0.1℃的 Pt100 铂电阻测量,并采用文献[19]所述的六点安装方式布置温度探头;测量精度 2%的 TBQ-2 总辐射表放置在与集热器同角度的倾斜面上以测量太阳辐照强度;此外环境温度、风速等相关数据,均用 TRM-2 型太阳能数据测试仪进行记录。

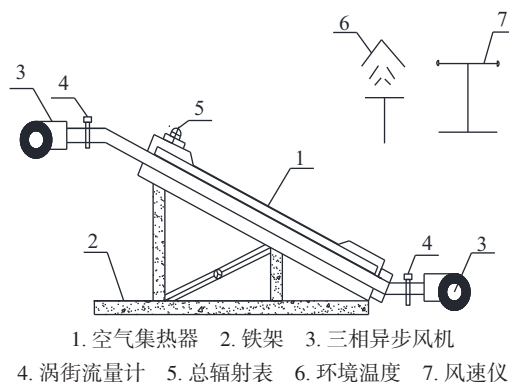


图2 空气集热器测试平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of (solar air collector test system)

太阳能空气集热器瞬时效率依据现行国标 GB/T26977—2011^[20]中给出的参考公式计算:

$$\eta = \frac{c_{pma} \dot{m} \Delta T}{A_g G} \quad (1)$$

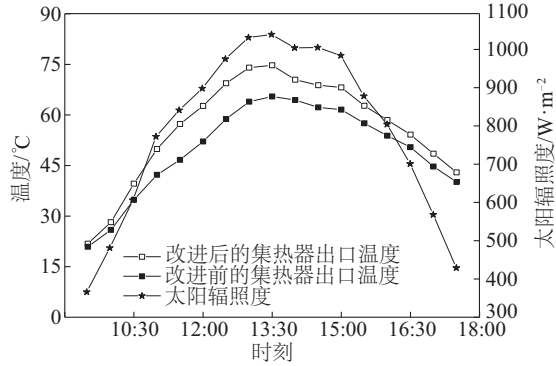
式中, η ——瞬时效率; c_{pma} ——湿空气的比热容, J/(kg·℃); \dot{m} ——湿空气质量流量, kg/s; ΔT ——集热器进出口温差, ℃; A_g ——集热器的总面积, m²; G ——采光面上的太阳辐照度, W/m²。

2 结果与分析

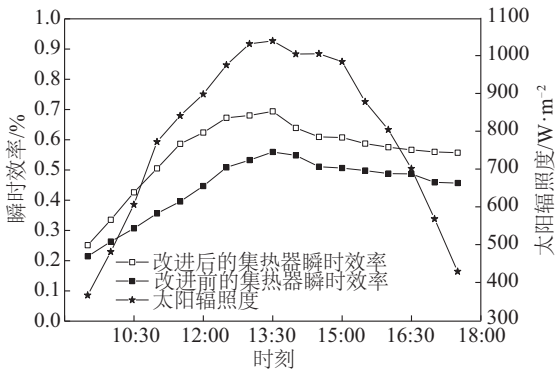
2.1 直通真空管集热器改进前、后热性能对比

同时对改进前后的 2 套直通真空管空气集热器进

行对比测试,2套集热器均进行不同流量下的全天性能实验测试,图3为2015年3月某个典型晴天的测试数据,测试过程中空气质量流量均恒定在0.045 kg/s,工作期间的环境温度变化范围为12~17℃,环境风速变化范围约1~3 m/s。



a. 集热器出口温度对比



b. 集热器瞬时效率对比

图3 集热器改进前后热性能对比

Fig. 3 Comparison of thermal performance of two collectors

由图3可知,改进后的空气集热器热性能明显优于改进前,二者在进口温度相同的情况下出口温度和瞬时效率最大分别相差10.7℃和19.1%。质量流量、太阳辐照度和倾角都相同的情况下,性能有所差异的主要原因是未改进的直通真空管空气集热器各真空管之间是并联状态,各管内空气流速较串联方式时慢,且管道内壁光滑,这使得真空管内壁面与空气介质之间的对流换热热边界层较厚,换热系数较小,且换热通道长度也只是单根真空管长度,空气未经充分热交换便离开管道,因此集热器出口温度偏低。而改进后的集热器是多根真空管串联,空气在集热器内依次经过各真空管加热,而在每根管子的入口段,由于入口段效应,会使其热边界层受到破坏,流动状态发生改变,有助于换热系数的提高。同时,换热路径增加数倍,空气经真空管

逐级换热,获得更多热量后温升较高。根据式(1),在相同比热容和质量流量情况下,进出口温差提高会使得瞬时效率也得到提高(在合适的风量下,多真空管串联热损小于热风换热量)。由图3还发现,集热器在达到最高出风温度前,随着辐照度的增加,温度及瞬时效率都有较快增长,但当辐照度开始下降后,集热器出口温度和瞬时效率下降速率均小于太阳辐照度降低速率,这主要是受集热器热容影响,因此在辐照度降低以后,集热器的瞬时效率下降缓慢,甚至会稍微提升。其他不同流量下出口温度和瞬时效率变化趋势与图3基本相同。

由上可知,优化后的串联式直通真空管空气集热器热性能有所提升,以下将对影响其热性能的相关因素展开研究。

2.2 集热器出口温度与辐照度之间的关系

由式(1)可得^[21]:

$$\eta = \frac{c_{pma} \dot{m} \Delta T}{A_g G} = \frac{c_{pma} \dot{m} (T_o - T_i)}{A_g G} \quad (2)$$

$$= \frac{A_a}{A_g} F_R (\tau \alpha) - \frac{A_a}{A_g} F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G}$$

式中, A_a ——集热器的集热面积, m^2 ; T_o ——集热器出口空气温度, $^{\circ}C$; T_i ——集热器进口空气温度, $^{\circ}C$; T_a ——环境温度, $^{\circ}C$; F_R ——集热器热迁移因子; $\tau \alpha$ ——集热器的透射吸收积; U_L ——集热器的总热损系数。

对式(2)整理可得:

$$T_o - T_i = G \frac{A_a}{c_{pma} \dot{m}} F_R (\tau \alpha) - \frac{A_a (T_i - T_a)}{c_{pma} \dot{m}} F_R U_L \quad (3)$$

由式(3)可知当集热器的进口温度与环境温度相当即 $T_i = T_a$ 时,流量恒定情况下空气集热器进出口温差与太阳辐照值线性相关,该关系可根据2015年2~4月中典型天气条件中的32 d试验数据线性拟合得到:

$$T_o - T_i = 0.379999 + 0.04223G \quad (4)$$

拟合结果如图4所示,测试期间的太阳辐照值在100~1000 W/m^2 之间变化,空气质量流量为0.045 kg/s,其拟合决定系数 R^2 为0.97609。对于本文所设计的真空管太阳能空气集热器,根据温升公式(4)和太阳能辐照度即可预测出集热器的出口温升,这对于今后该集热器实际应用中的功率计算有参考意义。

2.3 辐照度变化对集热器热性能的影响

在集热器空气质量流量恒定为0.045 kg/s时,测试集热器热性能受太阳辐照度影响情况,选取2015年3月某典型晴天试验数据,如图5所示。

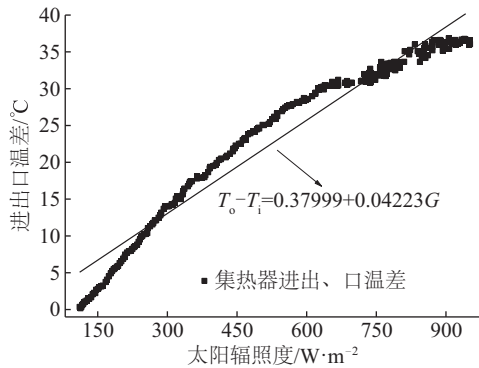


图4 集热器进出口温差与太阳辐照度之间线性关系

Fig. 4 Linear correlation between solar radiation and difference between outlet and inlet temperature

试验测试从上午 09:00 点开始,太阳辐照度逐渐增加,在 13:33 时达到最大值 1064 W/m^2 ,测试期间环境温度基本维持在 14°C ,有 $\pm 3^\circ\text{C}$ 的波动。集热器进出口温差随太阳辐照度的增加而提高,但在 11:09~16:10 时间段内进出口温差趋于稳定,基本保持在约 36°C ,不再随太阳辐照度的增加而提高。而集热效率却随太阳辐照度的增加而降低,维持在约 55%,最低效率 50.1% 出现在太阳辐照度最高时,主要原因是集热管温度的提高导致其不可逆热损失增大,尽管太阳辐照度提高,但真空管热损的增大使其很难继续升温,在恒定质量流量情况下集热管只能达到某一最高温度,因此综合表现为集热效率下降。

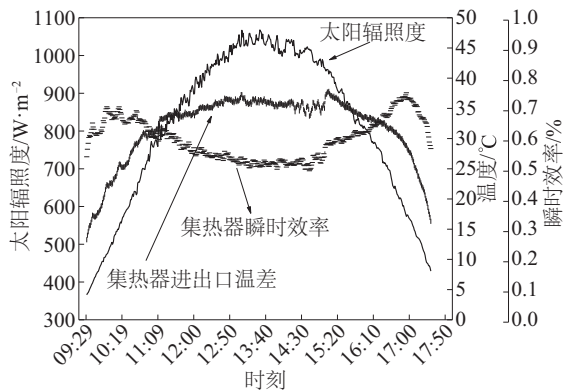


图5 太阳辐照度对集热器热性能的影响

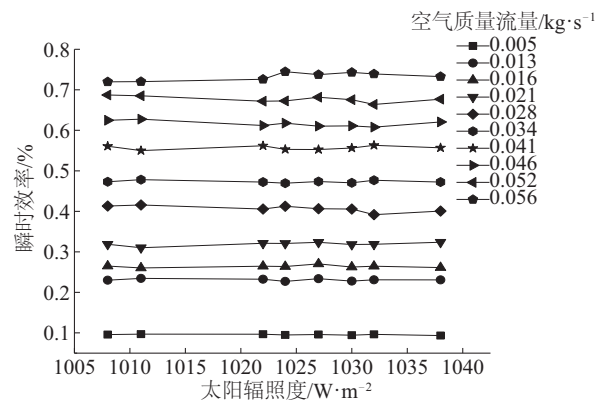
Fig. 5 Variation of the thermal performance of solar air collector with solar irradiance

下午 16:00 以后,太阳辐照度迅速降低,但是出口温度仍维持在较高温度一段时间后才逐渐降低,这段时间内集热器瞬时效率反而提高,最高达 70%,而出口温度只有约 45°C 。其原因是此种全玻璃直通真空管的热延迟时间较长,在热容影响下,热惯性较大。因此在下

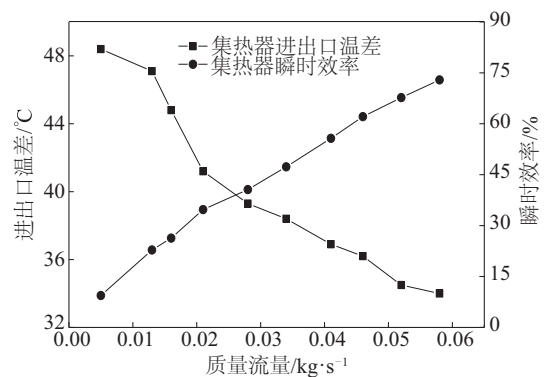
午太阳辐射条件变差,直通真空管本身蓄热对传热工质的辅助加热效应会较明显,或者在太阳辐射波动较大情况下,它仍能维持集热器出口温度的稳定。

2.4 质量流量变化对集热器热性能的影响

为研究集热器内空气质量流量对其热性能的影响,本文选取 10 个不同的质量流量进行测试,分别为 0.005、0.013、0.016、0.021、0.028、0.034、0.041、0.046、0.052 和 0.056 kg/s 。测试在 2015 年 5 月期间进行,每组流量测试时间约为 1 h,各组交替记录的间隔时间约为 30 min,以消除前一组热容对后一组试验结果的影响,且为保证测试期间太阳辐照度变化尽可能小,选择多个晴天的 11:00 至 14:00 期间内进行连续测试,以使太阳辐照度变化基本保持在 $1000 \pm 50 \text{ W/m}^2$ 范围内,环境温度也基本维持在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$,测试结果如图 6 所示。



a. 瞬时效率与质量流量之间的关系



b. 质量流量对温差以及瞬时效率的影响

图6 质量流量对集热器热性能的影响

Fig. 6 Influence of mass flow on thermal performance of air collector

由图 6 可知,在太阳辐照度变化不大的情况下,集热器的进出口温差、瞬时效率均与空气集热器内部工质的质量流量有较大关联。随着集热器内部工质流量的

增大,集热器进出口温差和瞬时效率分别出现降低和增大的趋势。当空气的质量流量从 0.005 kg/s 增至 0.056 kg/s ,集热器的进出口温差降低了 14.4°C ,其瞬时效率却从 9.4% 增至 72.9% 。集热器的进出口温差随工质质量流量的增大而降低,但降幅较慢,根据式(1)计算得到的瞬时效率在大流量时增幅较大,这主要是因为大流量下真空集热管热损较小,并且低温高流速下热边界层更薄,吸热管内壁与空气之间的传热更好。由图 6b 可知,集热器出口温度与集热效率变化趋势是相反的,当既要满足集热器较高的出口温度,又想要保证有较高的集热效率时,可根据图 6b 中 2 条曲线的交点即选取流量 0.028 kg/s 附近来平衡所要求。

2.5 集热器升温特性研究

在联集箱每隔 2 根真空处布置 1 个测温点,分别位于第 2、第 4、第 6、第 8、第 10、第 12、第 14、第 16 和第 18 根真空管的进口处,共设 9 个测温点。试验测试时间为 2015 年 5 月 7~30 日,分别测试了全天太阳辐照度变化下各测温点的温度变化情况,目的在于了解该串联式直通真空管空气集热器工质流动过程中的温升情况,探究该空气集热器的最优串联数目和温度变化,为优化结构提供参考。图 7 为测试期间内某一典型晴天的测试结果,根据上节结论其质量流量选为 0.030 kg/s 。

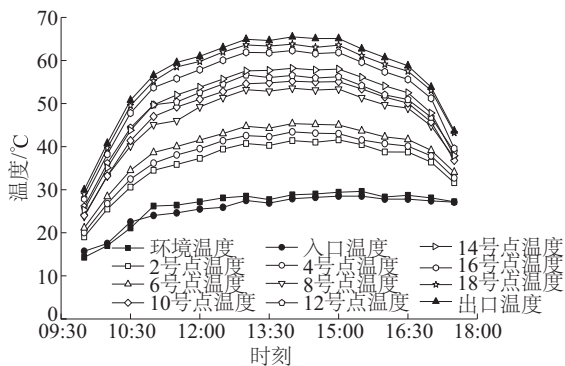


图7 集热器真空管不同位置处的温度变化

Fig. 7 Temperature variation of different positions in air collector

从图 7 可看出,试验刚开始的一段时间内各测试点温差不大,这段时间主要是集热器各部件吸收能量提高自身温度,但随着测试进程深入,太阳辐照度的增高,集热器内部各测温点变化趋于稳定,从入口到出口呈现出一个梯级上升的趋势,在入口温度为 25.3°C 时,出口温度最高时可上升至 65.1°C 。直通真空管空气集热器前 6 根真空管内温度增幅较缓慢,第 2、第 4 和第 6 根真空管中午时最大温差都为 3°C ;而至第 6 根管后温度上升

幅度较大,第 8 根管与第 6 根管之间有接近 10°C 温差;但在第 16 根真空管以后,温度升高越来越困难,升幅不大,主要原因是此时真空管内的空气温度与真空管壁之间温差达到最小,管壁对流传热的得热量与辐射热损失几乎达到平衡,内部空气热流密度梯度很小,很难再通过与真空管内壁的吸热层换热而提高温度。由此可知,在设计此类串联型直通真空管空气集热器时,不宜将过多直通真空管进行串联,串联数目过多除了会加大集热器内部工质流动阻力,增加牵引风机功耗外,还会浪费真空管,在第 15 根真空管以后空气温度上升幅度较小,继续串联过多的真空管已无实际意义。

3 干燥应用初步研究

本文干燥设备采用的太阳能供热系统由 240 支直通真空集热管组成,每个联箱有 30 根管,共 8 个空气集热器联箱,分为 4 组 4 排,采用串、并联结合方式连接,再与热泵和干燥房结合,系统实物如图 8 所示。该干燥系统的工作原理为:在离心风机牵引下外界冷空气进入直通管空气集热器内进行加热,加热后的热风经循环管道进入干燥房的混合风室,在混合风室内与干燥房内的部分循环余热风进行混合后再通过循环风机的送入主干燥室内,利用热风对物料进行干燥作业。



图8 太阳能-热泵干燥系统实物图

Fig. 8 Photograph of solar energy-heat pump system

因只研究该系统在太阳能单独供热情况下的干燥性能,选取 2015 年 4~5 月间的 2 次干燥测试结果进行分析。实验干燥物料为白萝卜切片,根据其质量变化曲线、脱水率曲线以及干燥房内的温度分布对干燥系统的性能进行预估,以期对直通真空管空气集热器的应用提供参考。因所需干燥温度较低且集热器总面积较大,2 次实验过程中太阳能空气集热器的质量流量均保持 0.09 kg/s 不变,干燥时间均为 450 min ,物料均采用平铺放置。2 次干燥测试中各层物料堆放质量不同,如表 2 所示。

表3 干燥物料质量汇总

Table 3 Weight of drying material

项目	层数						
	1	2	3	4	5	6	7
第1次测试 物料质量/g	99	102	121	177	116	128	128
第2次测试 物料质量/g	113	81	91	88	105	135	104

2次测试期间的太阳辐照情况和集热器阵列进出风温度如图9所示。2次实验中集热器最高出风温度均能达到70℃,第1次实验在下午15:00后太阳辐照急剧下降,出风口温度下降很快,最低为35℃,但仍比环境温度高10℃左右,无辐照持续1h后,在16:00时辐照有回升,集热器出口温度迅速回升,最大达55℃。第2次实验为多云天气,太阳辐照在下午时候有明显较大波动,集热器出口风温波动范围在10℃左右。2次测试天气情况及出风温度说明该集热器阵列在稳定干燥风温上有较好效果。

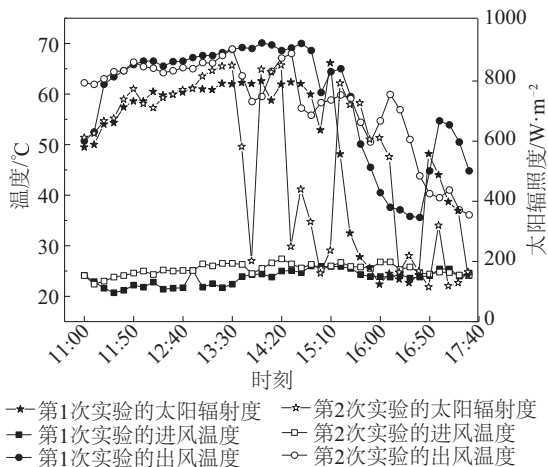
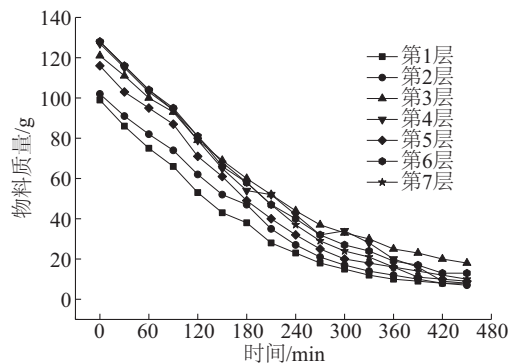


图9 太阳辐照度和集热器阵列进/出口温度

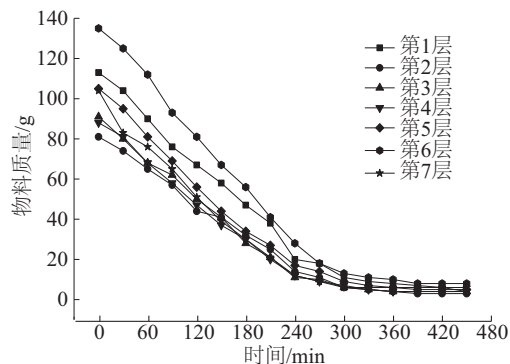
Fig. 9 Variations of solar irradiation and temperature of inlet and outlet of air collectors array

物料共分7层摆放,干燥过程中每隔半小时对各层物料进行一次取样称重,其物料脱水情况及样品质量变化曲线如图10所示。从图10的2次测试的干燥曲线可知,第2次干燥的效果较第1次好,在300min后物料质量基本保持不变,此时物料脱水已经达到热风干燥的最大限度,物料初始含水率在85%~90%之间,干燥过程进行300min以后,物料含水率已经低至5%以下,远低于普通萝卜干要求的10%的含水率。第1次测试中干燥速率低于第2次,其原因可能与天气变化有关,如图9中,辐照度的降低引起集热器出风温度低,进而导

致干燥房内温度降低。进一步分析干燥房内不同位置处的温度变化,如图11所示。



a. 第1次干燥取样质量变化



b. 第2次干燥取样质量变化

图10 干燥物料质量变化

Fig. 10 Variations of drying material weight

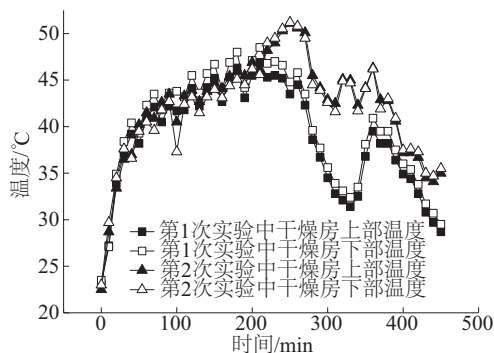


图11 干燥房内不同位置处温度分布情况

Fig. 11 Temperature variation at different positions in drying house

2次测试中干燥房内的温度分布变化趋势基本接近,干燥房内上下层的温度相差很小,最大不超过3℃,这跟干燥房的进出风口位置有关。但2次测试同一个位置处的温度在不同时段相差很大,最大温差达13.6℃,在180min之前的干燥阶段,2次测试温度基本相同,在180min后的温度差异主要是太阳辐照度的变

化而引起的。在整个物料干燥期间内,虽然干燥室内温度会随太阳辐照变化而波动,风温也不十分稳定,但是利用本文所研究的太阳能直通管空气集热器作为热源的干燥系统,对物料进行干燥已经达到较好效果,而对于风温稳定性及供热持续性将采用热泵辅助来解决,本文不再深入研究。

4 结 论

通过构建直通真空管太阳能空气集热器实验测试平台,并在其基础上对改进型直通真空管空气集热系统进行了基本热性能实验研究。分析了不同太阳辐照度、不同质量流量下的热性能,并对采用该种集热器组成的干燥系统的干燥效果进行了初步测试。

1)与传统直通真空管空气集热系统热性能进行了对比,在同一质量流量下,改进后的空气集热器在集热效率及出口温度上均优于传统的直通型空气集热系统。

2)对试验测试结果进行拟合,得到了进出口温度与太阳辐照度的线性关系,在空气质量流量为 0.045 kg/s,其拟合确定系数 R^2 为 0.97609,能根据太阳能辐射值预测出集热器的出口温升,为该集热器工程应用计算提供参考。

3)分析了集热器出口温度及效率随太阳辐照度变化的情况,在恒定质量流量 0.45 kg/s,环境温度在 14 ℃ 时,进出口最大温差能达 36 ℃,最高效率可达 70%。考虑到集热器出口温度与集热效率变化趋势的差异性问题,在研究了集热器质量流量和效率的关系后,选取流量 0.028 kg/s 附近作为最佳平衡点。

4)研究真空管串联数量与集热效率和温升的关系,发现在第 15 根真空管以后出风温度上升幅度较小,继续增加串联真空管数目效果不明显,还会增加延程阻力及牵引风机功耗。

5)对本文所研究的直通型真空管的工程实践应用领域进行初探,搭建太阳能-热泵联合干燥系统,对单独采用太阳能真空直通管进行供热的干燥过程进行测试,发现该系统性能已基本满足工程需求。

【参考文献】

- [1] TIWARI S, TIWARI G N, AL-HELAL I M. Development and recent trends in greenhouse dryer: A review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016(65): 1048-1064.
- [2] PIRASTEH G, SAIDUR R, RAHMAN S M A, et al. A review on development of solar drying applications [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014 (31): 133-148.
- [3] VIJAYAVENKATARAMAN S, LNIYAN S, GOIC R. A review of solar drying technologies [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2012(16): 2652-2670.
- [4] EL- SEBAH A A, SHALABY S M. Solar drying of agricultural products: A review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2012(16): 37-43.
- [5] BELESSIOTIS V, DELYANNIS E. Solar drying [J]. Solar energy, 2011, 85(8): 1665-1691.
- [6] BAL L M, SATYA S, Naik S N. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(8): 2298-2314.
- [7] KABEEL A E, HAMED M H, OMARA Z M, et al. Solar air heaters: design configurations, improvement methods and applications—A detailed review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, 70: 1189-1206.
- [8] EL- SEBAH A A, SHALABY S M. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint [J]. Energy conversion and management, 2013, 74: 109-116.
- [9] EKECHUKWU O V, NORTON B. Review of solar-energy drying systems III: Low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications [J]. Energy conversion and management, 1999, 40(6): 657-667.
- [10] LI S L, WANG H, MENG X R, et al. Comparative study on the performance of a new solar air collector with different surface shapes [J]. Applied thermal engineering, 2017, 114: 639-644.
- [11] KARIM M A, PEREZ E, AMIN Z M. Mathematical modelling of counter flow V-grove solar air collector [J]. Renewable energy, 2014, 67: 192-201.
- [12] FUDHOLI A, SOPIAN K, GABBASA M, et al. Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 51: 1191-1204.
- [13] 常伟, 李明, 王云峰, 等. 内插式真空管空气集热器的热性能研究 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 269-273.
- CHANG W, LI M, WANG Y F, et al. The experimental research on thermal performance of the evacuated tubular solar air collector with inserted tubes system [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2015, 43 (12): 269-273.
- [14] LIANG H. Experimental research on the all- glass evacuated tube solar air collector [C]// Proceedings of the ISES 2007 solar world congress, Institute of

- Electrical Engineering, Beijing, China, 2007.
- [15] LAMNATOU C H R, PAPANICOLAOU E, BELESSIOTIS V, et al. Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector [J]. *Applied energy*, 2012, 94: 232-243.
- [16] 居仁林, 李明, 徐永锋, 等. 真空管型太阳能空气干燥工程设计及性能分析[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(12): 3000-3006.
- JU R L, LI M, XU Y F, et al. Design and performance analysis of solar heated air drying project made up with all glass- evacuated tubular solar collector [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2015, 36(12): 3000-3006.
- [17] PARADIS P-L, ROUSSE D R, Hallé S, et al. Thermal modeling of evacuated tube solar air collectors [J]. *Solar energy*, 2015, 115: 708-721.
- [18] LI X, DAI Y J, LI Y, et al. Performance investigation on a novel single-pass evacuated tube with a symmetrical compound parabolic concentrator [J]. *Solar energy*, 2013, 98(Part C): 275-289.
- [19] 马光柏, 苏士民, 周玲, 等. 太阳能空气集热器测试的实践和总结[J]. *太阳能*, 2013(24): 49-53.
- MA G B, SU S M, ZHOU L, et al. The testing practice and summary of the solar air collector [J]. *Solar energy*, 2013(24): 49-53.
- [20] GB/T 26977—2011. 太阳能空气集热器热性能试验方法[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2011.
- GB/T 26977—2011. Test methods for the thermal performance of solar air collectors [S]. Standardization Administration of the People's Republic of China, 2011.
- [21] 王志峰. 全玻璃真空管太阳能空气集热器热性能试验方法研究[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(2): 141-147.
- WANG Z F. Study on measurement of thermal performance of all-glass evacuated tubular solar air heater [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2001, 22(2): 141-147.

EXPERIMENTAL STUDY ON DIRECT PASS ALL-GLASS EVACUATED TUBULAR SOLAR AIR COLLECTOR AND DRYING APPLICATION

Wang Yunfeng¹, Chang Wei², Li Ming¹, Li Guoliang¹, Luo Xi¹

(1. *Solar Energy Research Institute, Yunnan normal University, Kunming 650500, China*;

2. *The No.3 Middle School of Lufeng County, Chuxiong 651204, China*)

Abstract: The conventional direct pass all-glass evacuated tubular solar air collector is improved, and an experimental test platform is set up to investigate the thermal performance of this kind of solar air collector. The temperature raising process and the efficiency condition of the improved collectors are contrasted with the former one. A linear fitted curves is completed according to the experimental data, which shows the relationship between the outlet temperature of the new kind of collector and the solar irradiance. The interrelationship among the mass flow, the outlet temperature of collector and the thermal efficiency has been analyzed. And the number of evacuated tube series has been optimized as well. Finally, a solar drying system using the new kind of solar air collectors is built, which is tested and analyzed preliminarily. The results of this paper can provide some reference and help for designing of a solar drying system.

Keywords: evacuated tube energy; solar; drying; experiment