

# 太阳能辅助热源密集烤房集热器最佳上下通道空间比的实验研究

沈燕金<sup>1</sup>, 许龙<sup>1</sup>, 冯坤<sup>1</sup>, 周炼川<sup>1</sup>, 唐国俊<sup>2</sup>, 汪秋霖<sup>2</sup>, 李润涛<sup>3</sup>, 王刚<sup>3</sup> (1. 云南省烟草公司文山州公司, 云南文山 663000; 2. 文山州烟草公司丘北县分公司, 云南丘北 663200; 3. 英美烟草远东烟叶有限公司, 云南昆明 650011)

**摘要** 太阳能辅助热源密集烤房是在普通密集烤房屋顶加装平板型空气集热器, 平板型空气集热器的热损主要是由于集热板温度高于玻璃盖板温度而产生的自然对流热损失引起的。玻璃盖板与吸热板的间距对自然对流影响很大, 为了使热损降到最低, 使集热器效率最高, 选取 7 座不同的烤房使它们的上下通道空间比(玻璃盖板与吸热板的间距和吸热板与集热器底板间距的比值)分别为 1:4、3:7、2:3、1:1、3:2、7:3 和 4:1, 并进行集热器热性能对比实验。结果表明, 当上下通道空间比为 1:1 时集热器效率最高, 一个烤烟周期用煤量最少。

**关键词** 太阳能辅助热源密集烤房; 平板型空气集热器; 性能测试

**中图分类号** S214.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)36-382-03

## The Testing Research on Optimal Upper and Lower Channel Space Ratio of Solar Thermal Collector Installed in Solar Energy Auxiliary Heat Source Bulk Curing Barn

SHEN Yan-jin, XU Long, FENG Kun et al (Wenshan Branch of Yunnan Tobacco Company, Wenshan, Yunnan 663000)

**Abstract** Solar energy auxiliary heat source bulk curing barn is the common curing barn whose roof is installed with flat-plate solar air collector. The heat loss of flat-plate air collector is mainly due to the temperature of absorber plate is higher than the glass cover-plate, and the temperature difference lead to the free convection loss. The distance between the absorber plate and glass cover-plate has a great influence on free convection loss. In order to make the heat loss to a minimum, the experiment selects seven different curing barn to make them top and bottom passageway spacing ration 1:4, 3:7, 2:3, 1:1, 3:2, 7:3 and 4:1, then the comparison experiment of collector heat performance is carried out. Tests prove that: when the top and bottom passageway spacing ratio is 1:1, the collector efficiency is highest and the consumption of coal is least in one flue-cured tobacco cycle.

**Key words** Solar energy auxiliary heat source bulk curing barn; Flat-plate air thermal collector, Heat performance test

目前,我国已是世界上烤烟生产量最大的国家,但是,我国目前的烤烟方式主要还是依赖传统的烧煤烘烤,以消耗大量的不可再生能源为条件。我国现在大约有 250 万座烤房,每年的烤烟季将会燃烧超过 1 000 万 t 煤炭,产生超过 3 000 万 t 温室气体<sup>[1]</sup>。随着全球性的能源危机、温室效应加剧以及煤炭等能源价格的不断攀升,可再生的、经济的能源正越来越引起人们的关注,而太阳能是最清洁的、能量巨大的可再生能源,到达地球表面的太阳辐射高达  $8.5 \times 10^{10} \text{ kW}^{[2]}$ 。太阳能辅助热源密集烤房是在普通密集烤房的基础上加装平板型空气集热器后改建而成,平板型空气集热器将太阳能直接转化为空气热能,通过温差自动控制系统将产生的热量通往密集烤房的加热室,这部分能量通入烤房后可以大量减少煤炭的使用,起到节能减排的作用。平板型空气集热器是太阳能辅助热源密集烤房的核心部分,如何提高集热器在太阳能辅助热源密集烤房中的利用效率是亟待解决的问题。国内中国科学技术大学的陈则韶等通过理论和实验相结合得出了最佳的玻璃板与吸热板的间距<sup>[3]</sup>;张彦峰等通过理论分析得出了不同倾角集热器的玻璃板与吸热板最佳间距<sup>[4]</sup>;国外的 Hollands K G T 等通过封闭空间的自然对流原理计算出热损最小时的玻璃板与吸热板的间距<sup>[5]</sup>。

笔者从集热器上下通道空间比(玻璃盖板与吸热板的间距和吸热板与集热器底板间距的比值)的角度入手,做了 7 组对比实验筛选出最佳的上下通道空间比,以使集热器的效

率达到最高。

## 1 太阳能辅助热源密集烤房的工作原理

太阳能辅助热源密集烤房是利用太阳能作为辅助热源,煤炭作为主要能源进行烟叶烘烤的专用设备,由太阳能辅助热源设备和普通密集烤房构成<sup>[6]</sup>。基本特征是在普通密集烤房的基础上加装平板型空气集热器后改建而成,平板型空气集热器将太阳能直接转化为空气热能,通过温差自动控制系统将产生的热量通往密集烤房的加热室,然后与火炉烧煤产生的热量一并通入装烟室对烟叶进行烘烤,同时集热器的进风口管道直接与装烟室相连,使热风得以循环利用。太阳能辅助热源密集烤房构造如图 1 所示,其中平板型空气集热器主要由玻璃盖板、吸热板、集热器框架和底板以及保温材料等组成。温差控制系统通过安装在平板空气集热器内和装烟室内的 2 个温度探头判断比较集热器内和装烟室内温差的大小来控制风机、电动风阀的开启和关闭。当集热器内的温度比装烟室内的温度高 15 °C 时,送风管和回风管里的 2 个电动风阀开启,同时送风管内的风机开启;当温差下降到小于 8 °C 时,2 个自动控制风阀关闭、风机停止工作。

## 2 理论分析

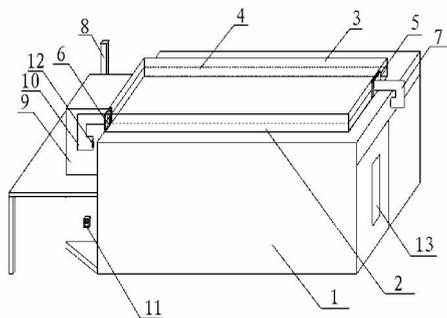
平板型空气集热器的热损主要是由于集热板温度高于透明盖板温度而产生的自然对流热损失引起的,集热器玻璃板与吸热板的间距大小必定对自然对流造成影响。热损越小,集热器的效率就越高,找到合适的集热器玻璃板与吸热板的间距就会使自然对流引起的热损最小,集热器的效率也就越高。

平板型空气集热器的吸热板与透明盖板之间的对流换热是封闭空间中的自然对流换热,其热流密度  $q_c$  可表示为:

**基金项目** 云南省烟草公司科技计划项目(2013YN34)。

**作者简介** 沈燕金(1983-),男,云南陆良人,助理农艺师,硕士,从事烟叶生产技术研究。

**收稿日期** 2015-11-26



注:1.装烟室;2.集热室;3.玻璃盖板;4.吸热板;5,6.电动风阀;  
7.集热室冷风进口管道;8.密集烤房烟囱;9.密集烤房加热室;  
10.集热室热风出口管道;11.温差控制器;12.集热室循环风机;  
13.装烟室观察窗。

图1 太阳能辅助热源密集烤房结构示意图

$$q_c = h\Delta t = \frac{K}{L} N_u \Delta t \quad (1)$$

式中, $h$ 为对流换热系数, $\Delta t$ 为吸热板与透明盖板的温差, $K$ 为空气在夹层空间平均温度下的导热系数, $L$ 为空气夹层的间距, $N_u$ 为努谢尔特数。对于自然对流换热, $N_u$ 是雷利数 $R_a$ 的函数,即:

$$N_u = f(R_a) \quad (R_a = g\beta\Delta t L^3 / \nu a) \quad (2)$$

式中, $g$ 为当地重力加速度, $\beta$ 为体积膨胀系数, $\nu$ 为运动粘度, $a$ 为导热系数。

由式(1)可知, $q_c$ 与 $L$ 、 $N_u$ 、 $\Delta t$ 等有关,且它总是随着 $\Delta t$ 的增大而增大, $L$ 对 $q_c$ 的影响比较复杂:一方面, $L$ 增大会直接使 $q_c$ 减小;另一方面,由式(2)可知, $L$ 增大时, $R_a$ 随 $L^3$ 增大,

而 $N_u$ 总是随着 $R_a$ 的增大而增大,因此, $L$ 的增大又通过 $N_u$ 间接地使 $q_c$ 增大。这两种影响何者占主导地位,对于不同的工作状态,也即对于不同的 $R_a$ 情况不一<sup>[7]</sup>,同时还要考虑到吸热板与集热器底板的距离以及玻璃盖板和吸热板的间距和吸热板与集热器底板间距的比值也会将对热损有一定的影响<sup>[8]</sup>。鉴于此,需要通过不同的上下通道空间比(玻璃盖板与吸热板的间距和吸热板与集热器底板间距的比值)实验验证得出结论。

### 3 实验验证

**3.1 实验设备** 太阳能辅助热源密集烤房(江苏现代农业科技公司)7座,定制的集热器(昆明滇威太阳能集团有限公司)7个。

### 3.2 实验方法

**3.2.1 实验处理。**实验设以下7个处理,第1组:吸热板距透明盖板10 cm,上下通道空间比1:4;第2组:吸热板距透明盖板15 cm,上下通道空间比3:7;第3组:吸热板距透明盖板20 cm,上下通道空间比2:3;第4组:吸热板距透明盖板25 cm,上下通道空间比1:1;第5组:吸热板距透明盖板30 cm,上下通道空间比3:2;第6组:吸热板距透明盖板35 cm,上下通道空间比7:3;第7组:吸热板距透明盖板40 cm,上下通道空间比4:1。在2015年7月26日(天气晴朗)对烤房装烟室进行集热器热性能空载实验。烤房规格全部相同,集热器所用的玻璃板和吸热板全部为同一材料。

**3.2.2 观察记载项目。**从11:00~16:00,每1 h记录一次装烟室温度、环境温度、集热器进口温度、集热器出口温度、集热器出口风速、太阳辐射强度。

表1 7组集热器效率统计

集热器	时间	进口温度 ( $t_1$ ) °C	出口温度 ( $t_2$ ) °C	进出口温 差( $\Delta t$ ) °C	瞬时辐射 强度 $I$ W·m <sup>2</sup>	集热器效率//%		空气流量 $G$ kg/h
						$\eta_r$	平均 $\eta_r$	
第1组	11:00	32.1	46.9	14.8	790	44.2	39.6	1 350
	12:00	32.2	47.2	15.0	931	38.3		1 360
	13:00	35.0	49.9	14.9	947	37.1		1 350
	14:00	35.4	48.7	13.3	723	43.9		1 365
	15:00	36.5	48.5	12.0	776	32.7		1 365
	16:00	37.3	49.3	12.0	693	41.2		1 360
第2组	11:00	32.0	47.0	15.0	790	44.8	40.1	1 350
	12:00	32.1	47.2	15.1	931	38.8		1 370
	13:00	35.7	50.7	15.0	947	37.6		1 360
	14:00	35.0	48.6	13.6	723	44.8		1 365
	15:00	36.5	48.5	12.0	776	33.1		1 380
	16:00	37.4	49.7	12.3	693	42.0		1 355
第3组	11:00	32.2	47.4	15.2	790	46.0	41.7	1 370
	12:00	32.5	48.0	15.5	931	40.1		1 380
	13:00	35.8	50.1	15.3	947	38.5		1 365
	14:00	35.5	49.5	14.0	723	46.3		1 370
	15:00	36.7	48.9	13.2	776	36.5		1 385
	16:00	37.5	49.9	12.4	693	42.7		1 365
第4组	11:00	31.9	47.4	15.5	790	46.8	42.2	1 365
	12:00	32.2	47.8	15.6	931	40.4		1 380
	13:00	35.8	51.0	15.2	947	38.7		1 380

接下表

续表 1

集热器	时间	进口温度 ( $t_1$ ) ℃	出口温度 ( $t_2$ ) ℃	进出口温 差( $\Delta t$ ) ℃	瞬时辐射 强度 $I$ $W \cdot m^2$	集热器效率//%		空气流量 $G$ kg/h
						$\eta_r$	平均 $\eta_r$	
第 5 组	14:00	35.2	49.2	14.0	723	46.6	41.8	1 375
	15:00	36.8	49.4	13.6	776	37.2		1 370
	16:00	37.4	49.9	12.5	693	43.4		1 375
	11:00	32.0	47.3	15.3	790	46.7		1 380
	12:00	32.5	48.0	15.5	931	40.0		1 375
	13:00	35.8	51.0	15.2	947	38.4		1 370
	14:00	35.5	49.5	14.0	723	46.3		1 365
第 6 组	15:00	36.5	50.0	13.5	776	37.1	1 380	
	16:00	37.5	49.7	12.2	693	42.3	1 375	
	11:00	32.2	47.4	15.2	790	46.0	1 370	
	12:00	32.5	48.0	15.3	931	39.6	1 380	
	13:00	35.8	50.1	15.1	947	38.1	1 365	
	14:00	35.5	49.5	13.8	723	45.7	1 370	
	15:00	36.7	48.9	12.9	776	35.8	1 390	
第 7 组	16:00	37.5	49.9	12.2	693	42.0	1 365	
	11:00	32.0	46.9	14.9	790	45.1	1 370	
	12:00	31.5	46.6	15.1	931	39.1	1 380	
	13:00	35.2	50.2	15.0	947	38.0	1 365	
	14:00	35.3	49.3	13.6	723	45.0	1 370	
	15:00	36.6	49.0	12.4	776	33.9	1 370	
	16:00	37.5	49.7	12.2	693	42.0	1 365	

**3.3 实验结果** 表 1 列出了 7 种集热器的性能。由表 1 可以看出,在太阳能辐射相同的条件下第 4 组集热器的平均温升最高,平均瞬时效率也是最高,第 4 组平均瞬时效率达到 42.2%,比最低的第 1 组高出 2.6%,说明上下通道空间比对集热器的效率有较明显的影响。为了进一步明确每个采样时刻上下通道空间比对集热器的效率,图 2 分别绘出了 11:00、12:00、13:00、14:00、15:00、16:00 时刻不同实验分组集热器的效率变化曲线。

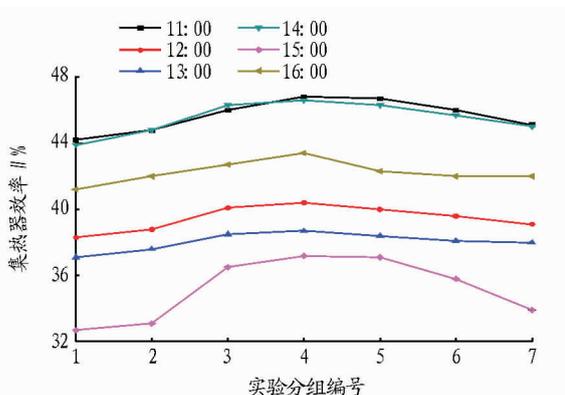


图 2 不同时刻不同实验分组集热器的效率变化曲线

从图 2 中可以看出,6 条曲线的走势基本一致,曲线类似于抛物线,有一个最高点,每个取样时刻都是第 4 组集热器的效率最高。因此可以进一步得出结论,上下通道空间比对集热器的瞬时效率有直接影响,平均瞬时效率最高的集热器,必定每个时刻的瞬时效率也是最高,当吸热板距透明盖板 25 cm,上下通道空间比 1:1 时,集热器效率的瞬时效率和平均瞬时效率最高。增加吸热板距透明盖板的距离可以增加集热器效率,这是由于上通道顶部是透明盖板,流经上通道的空气与吸热板进行热交换的同时,也接受了太阳的辐

射,与下通道相比接受了更多的能量,但是增加到一定程度后,集热器效率却开始降低,这可能与公式(1)有关,在  $L$  值增加到一定值之前, $L$  越大,对流换热越小,热损越小,当  $L$  升到一定值之后,再增大对流换热开始增大,热损变大。

**3.4 用煤量对比** 用这 7 座烤房进行烟叶烘烤实验,装烟量都为 420 杆,同一天开始烘烤,即 2015 年 7 月 27 日开烤,8 月 5 日结束。图 3 绘出了 7 座烤房用煤量的对比图。从图 3 中可以看出,第 4 组烤房的用煤量最少,比用煤量最多的大概少 27 kg。结合图 2 和图 3 会发现,集热器的效率越高,一个烤烟周期用煤量越少;效率越低,一个烤烟周期的用煤量越大,因此在集热器的安装中,一定要保证集热器的效率最高。当吸热板距透明盖板 25 cm,上下通道空间比 1:1 时,一个烤烟周期的用煤量最小。

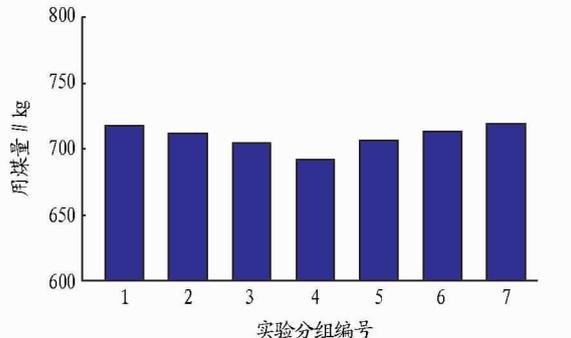


图 3 不同实验分组烤房用煤量对比

#### 4 结论

实验得出,平板型空气集热器的上下通道空间比(玻璃盖板与吸热板的间距和吸热板与集热器底板间距的比值)对集热器的热损有一定影响。当吸热板距透明盖板 25 cm,上

(下转第 387 页)

济结构指标和社会保障指标数值均有所下降;而 2010 年之后,商洛市可持续发展持续指数成倍增长,2011 年 DI 为 0.556,是 2010 年的 2.64 倍,2012 年可持续发展持续指数高达 0.811,说明商洛市正向着可持续方向发展。

**2.2.3 可持续发展协调性。**从表 2 可以看出,2008~2012 年商洛市的可持续发展协调指数为 1.293~1.721,处于强协调性发展。但 2010 和 2012 年出现 2 个低点,商洛市在这 2 个时间段内可持续发展协调性较差。2010 年在环境指标数值增长的情况下,经济指标和社会指标数值均呈现下降的趋势;2012 年在社会和环境指标数值增长的情况下,经济发展指标数值呈现下降的趋势,因此商洛市的协调性发展由强变弱。而 2010~2011 年经济、社会和环境指标都在快速增长,由弱可持续发展向强可持续发展迈进。总的来说,商洛市的协调性发展呈现下降的趋势,要保证其可持续发展的协调稳定发展,仍需付出长期的努力。

### 3 结论与讨论

该研究构建了商洛市可持续发展指标体系并对商洛市可持续发展能力进行综合分析,结果表明,2008~2012 年商洛市经济、社会和环境均呈较好发展态势,但经济发展、社会发展和环境发展三者之间不协调。其中,经济指标贡献 0.619,经济可持续发展指数由 2008 年的 0.434 增长到 2012 年的 0.988,这与近年来商洛市加大城镇资金投入,经济综合实力不断加强,人均生产总值逐年增长密切相关;第二产业占 GDP 比重和财政支出 2 个指标贡献率较低,说明商洛市经济结构相对不合理。社会指标贡献 0.285,社会可持续发展指数由 2008 年的 0.587 增长到 2012 年的 0.980,可见,随着商洛市城镇化进程不断推进,全社会消费品零售总额和城乡居民储蓄余额不断增加,都促进了商洛市社会可持续发展水平的平稳推进,但邮电业务总量和农民人均纯收入 2 个指标贡献率偏低,说明商洛市的社会保障事业不完善。环境贡献为

0.096,虽然商洛市环境可持续发展指数起点较高,2008 年 0.791 到 2012 年增加到 0.973,这与该地区长期经济发展迟缓对环境破坏较轻,随后成为南水北调中线工程水源保护区等密切相关,但工业废水、废气排放总量的贡献率偏低,反映出商洛市的环境状况不容乐观。可见,近年来商洛市主要依靠政府投资促进经济发展,其可持续发展能力和持续性表现较好,但经济结构不合理、社会保障事业不完善以及环境发展贡献低,可能会制约商洛市今后的发展,结果真实全面地反映了 2008~2012 年商洛市发展水平和问题,对该地区后期可持续发展具有现实指导意义。

### 参考文献

- [1] 刘国,许模.成都市可持续发展综合评估研究[J].国土资源科技管理,2008,25(2):74-77.
- [2] 许学强,张俊军.广州城市可持续发展的综合评价[J].地理学报,2001,56(1):54-63.
- [3] 李锋,刘旭升,胡响.城市可持续发展评价方法及其应用[J].生态学报,2007,27(11):4793-4801.
- [4] 徐君,曾旗,杜文.矿区城市可持续发展的综合评价研究[J].系统工程理论与实践,2005(1):58-60,68.
- [5] 杨多贵,陈助锋,牛文元.可持续发展四大代表性指标体系评述[J].科学管理研究,2001,19(4):58-59.
- [6] 李伟.可持续发展指标体系的比较与启示[J].华东经济管理,2005,19(1):52-53.
- [7] 贺立军,高波.县级区域可持续发展综合评价指标体系的建立[J].河北工业大学学报,2006,35(4):20-23.
- [8] 李长胜,邓宝忠.龙江县可持续发展指标体系的研究[J].哈尔滨师范大学(自然科学学报),2007,23(5):104-105.
- [9] 张妍,陈瑛,张雁.生态旅游资源评价指标体系研究[J].陕西农业科学,2010(4):148-151.
- [10] 孙丕苓,杨海娟,刘庆果.南水北调重要水源地的土地生态安全动态研究[J].自然资源学报,2012,27(9):1520-1530.
- [11] 王高建.商洛山区县域经济的可持续发展研究[J].江西农业学报,2010,22(12):178-180.
- [12] 白巧凤,张晓虎.浅论商洛山区土地资源的可持续利用[J].水土保持学报,2002,16(6):132-135.
- [13] 朱琳,吕本富.确定递阶层次结构的简便方法[J].数学的实践与认识,2005,35(6):195-198.

(上接第 384 页)

下通道空间比 1:1 时,平板型空气集热器的平均瞬时效率和瞬时效率最高。平板型空气集热器效率越高,一个烤烟周期的用煤量就越少。因此,太阳能辅助热源密集烤房集热器最佳上下通道空间比的确定,可提高集热器效率,减少煤炭的使用,从而达到节能减排的作用。

### 参考文献

- [1] 王文超,贺帆,徐成龙,等.烟叶烘烤节能技术研究进展[J].南方农业学报,2011,42(10):1267-1270.
- [2] 沈燕金,许龙,马坤,等.太阳能辅助热源密集烤房不同透光材料的集热器性能测试研究[J].安徽农业科学,2015,43(10):390-392.

- [3] 陈则韶,葛新石.确定对流热损小的平板集热器空气夹层最佳间距的理论和实践研究[J].太阳能学报,1985,6(3):287-290.
- [4] 张彦峰,俞颂秦.平板型太阳能集热器空气夹层最佳距离的确定[J].河北工学院学报,1992,21(2):101-104.
- [5] HOLLANDS K G T, UNNY T E, RAITHBY G D, et al. Free convection heat transfer across inclined air layer[J]. Journal of heat transfer, 1980, 8(1):21-24.
- [6] 许龙,冯坤,张家征,等.一种太阳能辅助热源密集烤房的设计特点与应用效果研究[J].耕作与栽培,2015,2(6):12-14.
- [7] 陈则韶,陈熹,葛新石.关于平板集热器的最佳间距和蜂窝结构热性能实验研究[J].太阳能学报,1991,12(2):109-114.
- [8] 魏生贤,李明,季旭,等.太阳能平板集热器器件纵横比与板间距优化[J].农业工程学报,2010,26(11):225-229.