

文章编号:1671-6833(2013)06-0104-04

# 风量对太阳能集热器热性能影响的实验研究

魏新利, 郭春杰, 孟祥睿, 赵晓丽

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 在搭建的太阳能集热器实验台上, 对  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3 种风量下集热器的热性能进行了实验研究, 利用 CFD 软件建立了集热板模型并对太阳辐射强度为  $300 \sim 700 \text{ W}/\text{m}^2$ 、室外环境温度为  $6 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内各工况下的热性能参数进行了模拟研究. 结果表明: 在 3 种风量下稳定运行时, 空气温升依次为  $22.45, 17.57, 14.37 \text{ }^\circ\text{C}$ , 集热效率依次为  $38.56\%, 45.13\%$  和  $49.06\%$ ; 根据各工况下热性能参数的模拟数值得到了相应工况下的最佳运行风量, 为实际工程中太阳能集热器运行风量的选取提供参考数据.

**关键词:** 太阳能集热器; 空气温升; 集热效率; 最佳风量

**中图分类号:** TK511+.2

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.06.025

## 0 引言

太阳能供暖系统能够把被太阳加热的空气有组织地输送到室内, 从而起到采暖和输送新风的双重作用. 集热器是整个系统的核心部件, 目前国内外学者<sup>[1-6]</sup>关于系统风量对其热性能的研究较少, 缺乏为太阳能集热器实际工程中运行风量选取提供数据, 为此笔者搭建了太阳能集热器实验台并对  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3 种风量下集热器的热性能进行实验研究, 利用 CFD 软件对集热板模型进行模拟研究, 以探究辐射强度为  $300 \sim 700 \text{ W}/\text{m}^2$ 、室外环境温度为  $6 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内各工况下的最佳运行风量.

## 1 太阳能集热器实验台简介

太阳能集热器实验台由太阳辐射模拟装置(超高压短弧氙灯)、集热器和实验测试系统三部分组成, 如图 1 所示. 实验选用额定功率为  $350 \text{ W}$  的超高压短弧氙灯(简称球形氙灯)作为太阳辐射模拟装置, 集热器由集热板、外壳和风机等部件组成. 为增强空气与集热板的换热过程, 集热板表面加工有向内侧凹陷且两侧有孔缝的结构单元体, 其横向和竖向间距均为  $0.012 \text{ m}$ . 集热板的材质为钢板, 几何尺寸为  $0.21 \text{ m} \times 0.31 \text{ m} \times 0.000 6$

$\text{m}$ , 外表面涂有吸收率  $\alpha = 0.94$  的选择性涂层. 外壳的材质为有机玻璃, 用来封装和固定集热板并形成空气流道, 几何尺寸为  $0.5 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ . 风机用来为空气流道提供负压, 经测量风机可提供的 3 种风量分别为  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$ .



图 1 太阳能集热器实验台

Fig. 1 The experimental platform of solar collector

实验所需的测试参数有太阳辐射强度、集热板表面温度、进出口空气温度, 测试仪器及其参数如表 1 所示.

## 2 集热性能分析

太阳能集热板吸收到的太阳辐射能绝大部分用来加热过流空气, 此外还有小部分热量通过对流和辐射的方式散失到周围环境中, 故其热平衡

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-07-10

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(112102310041)

作者简介: 魏新利(1956-), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事低温余热制冷机发电、太阳能的开发利用、生物质能利用等方面的研究, E-mail: xlwei@zzu.edu.cn.

方程为

$$\alpha I A = m_{\text{air}} C_p (T_{\text{exit}} - T_{\text{amb}}) + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} \quad (1)$$

表 1 实验测试仪器及其参数

Tab.1 Experimental test apparatus and parameters		
测试仪器	数量	精度
PHFSB 总辐射传感器	1	± 2%
USB7410 温度采集仪	1	± 1%
E 型热电偶温度传感器	13	± 0.1 ℃

集热效率是单位时间内太阳能集热器实际获得的有用能与集热板吸收的太阳辐射能之比,其计算式为

$$\eta = \frac{m_{\text{air}} C_p (T_{\text{exit}} - T_{\text{amb}})}{\alpha I A} \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为集热板的吸收率; $I$  为太阳辐射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $A$  为集热板的集热面积,  $\text{m}^2$ ;  $m_{\text{air}}$  为流经集热器空气的质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $C_p$  为空气的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_{\text{exit}}$  为集热器出口处的空气温度,  $\text{K}$ ;  $T_{\text{amb}}$  为室外空气温度,  $\text{K}$ ;  $Q_{\text{conv}}$  和  $Q_{\text{rad}}$  分别为对流和辐射热损失,  $\text{W}$ .

### 3 实验结果分析

参照郑州地区晴朗天气(12月7日~9日)12:00~14:00 期间内太阳辐射强度和室外环境温度的监测数据,选取太阳辐射强度  $I = 300 \text{ W}/\text{m}^2$ 、环境温度  $T_{\text{amb}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  作为实验研究工况.

#### 3.1 集热板表面温度

在  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3 种风量下,集热板表面温度随时间的变化如图 2 所示.

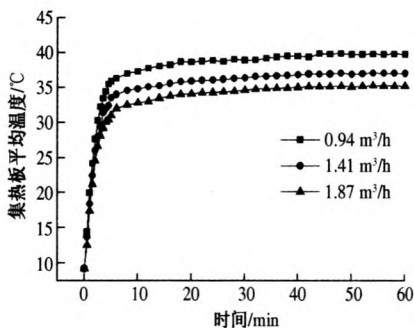


图 2 3 种风量下集热板的表面温度  
Fig.2 The temperature of collector plate under the three volumes

从图 2 可以看出,集热板表面温度在开机运行后迅速升高,约经 10 min 后进入稳定状态.在  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3 种风量下稳定运行时,集热板表面温度分别为  $39.74, 36.99, 35.19 \text{ }^\circ\text{C}$ ,即集热板表面温度随系统风量的增大而降低.

#### 3.2 出口空气温度

在  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3 种风量下,集热器出口空气温度随时间的变化如图 3 所示.

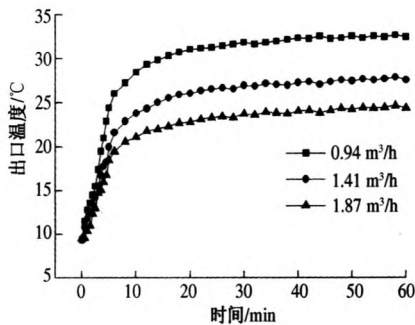


图 3 3 种风量下空气出口温度  
Fig.3 The outlet air temperature under the three volumes

从图 3 可以看出,与集热板表面温度变化相比,出口空气温度达到稳定状态有一定的滞后性.在 3 种风量下稳定运行时,出口空气温度分别为  $32.45, 27.57, 24.37 \text{ }^\circ\text{C}$ ,因进口空气温度为  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,故空气温升分别为  $22.45, 17.57, 14.37 \text{ }^\circ\text{C}$ ,即空气温升随系统风量的增大而下降.

#### 3.3 集热效率分析

将各参数在稳定运行时的数值代入计算式可知,集热效率在  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3 种风量下分别为  $38.56\%, 45.13\%$  和  $49.06\%$ ,即集热效率随系统运行风量的增大而升高.这是由于随着系统风量的增大,集热板表面温度是降低的,集热板与周围环境的传热温差减小,相应的对流和辐射热损失减小,由热平衡方程知,太阳能集热器获得的实际有用能增大,因而集热效率随风量的增大而升高.

### 4 最佳风量的确定

因集热板上结构单元体的横向和竖向间距均为  $0.012 \text{ m}$ ,为简化模型的计算量和加快求解速度,在利用 Gambit 软件建立集热板的几何模型时仅选取包含 4 个单元体结构的局部集热板及前后一定范围内的空气作为研究对象,如图 4 所示.

在对求解域网格划分时,采取分区域划分、结构化网格和非结构化网格相结合的方式.为消除网格数量对模拟结果的影响,共划分了 5 种类型的网格进行独立性考核,最终确定模型的网格数量为 462 789.

利用 Fluent 软件对模型计算求解时,文献[7]表明:过流空气与集热板内表面及孔缝处的

换热过程可以忽略,因此模型的边界设定为质量流量进口、自由流出口、集热板外表面为热流率边界、内表面及孔缝处为绝热边界、四周为对称边界,求解器的设定为 3D、稳态、层流 ( $Re \approx 138$ ) 和 DO 辐射模型,其它采用默认设置.

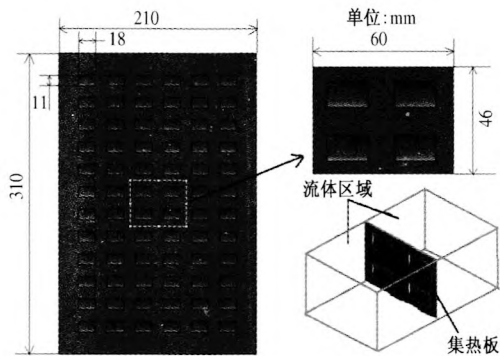


图 4 集热板结构及几何模型

Fig. 4 The structure and model of the collector plate

由于模型仅包含 4 个单元体结构的局部集热板,其集热面积为  $0.002\ 76\ \text{m}^2$ ,而实验中集热板面积为  $0.065\ 10\ \text{m}^2$ ,因此在验证模型可靠性时,需将实验中的 3 种风量按面积折算为相应的系统风量,折算后  $0.94, 1.41, 1.87\ \text{m}^3/\text{h}$  3 种风量下性能参数的实验值和模拟值对比如表 2 所示.

表 2 性能参数的实验值和模拟值对比

Tab. 2 The comparison of performance parameters' experimental and simulated values

性能参数	0.94 m <sup>3</sup> /h		1.41 m <sup>3</sup> /h		1.87 m <sup>3</sup> /h	
	实验	模拟	实验	模拟	实验	模拟
$T_{\text{col}}/\text{℃}$	39.74	40.04	36.99	37.27	35.19	35.39
$T_{\text{out}}/\text{℃}$	32.45	32.78	27.57	27.65	24.37	24.46
$\eta/\%$	38.56	39.13	45.13	45.47	49.06	49.68

从表 2 可以看出,在 3 种风量下集热板表面温度、出口空气温度和集热效率的实验值和模拟值的相对误差均小于 5%,故该模型是可靠的、可用于下一步的模拟研究.

在太阳能集热器实际工程应用中,确定系统

运行风量时应综合考虑系统风量对出口温度和集热效率的影响.根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》<sup>[8]</sup>的有关规定,夏热冬冷地区室内供暖宜采用的设计温度为  $16 \sim 22\ \text{℃}$ ,由于集热器出口温度要比室内设计温度高  $5\ \text{℃}$  左右,集热器的出口空气温度应在  $22 \sim 26\ \text{℃}$  范围内为宜.

为得到单位面积集热板上的最佳运行风量,笔者对太阳辐射强度为  $300 \sim 700\ \text{W}/\text{m}^2$ 、室外温度为  $6 \sim 12\ \text{℃}$ 、风量为  $7.2 \sim 108\ \text{m}^3/\text{h}$  范围内各工况下的热性能参数进行了模拟分析.现仅以太阳辐射强度  $I = 300\ \text{W}/\text{m}^2$ 、环境温度  $T_{\text{amb}} = 10\ \text{℃}$  工况下,出口空气温度和集热效率随系统风量的变化为例进行说明,如图 5 所示.

由图 5 可知,太阳辐射强度  $I = 300\ \text{W}/\text{m}^2$ 、室外环境温度  $T_{\text{amb}} = 10\ \text{℃}$  工况下,单位面积集热板上的最佳运行风量为  $25.2 \sim 36\ \text{m}^3/\text{h}$ ,此时出口空气温度为  $22 \sim 26\ \text{℃}$ ,集热效率为  $47.76\% \sim 52.78\%$ .

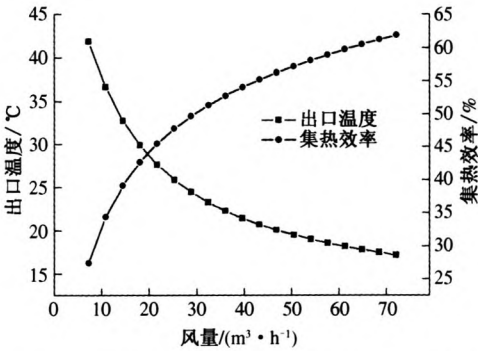


图 5 出口空气温度和集热效率随风量的变化

Fig. 5 The variation of the outlet air temperature and the thermal efficiency with the air volumes

根据太阳辐射强度为  $300 \sim 700\ \text{W}/\text{m}^2$ 、室外温度为  $6 \sim 12\ \text{℃}$ 、风量为  $7.2 \sim 108\ \text{m}^3/\text{h}$  范围内各工况下出口空气温度和集热效率的模拟数据,可以得到相应工况下单位面积集热板上的最佳运行风量,如表 3 所示.

表 3 各工况下最佳运行风量汇总表

Tab. 3 The summary table of optimal volume under different conditions

辐射强度/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	6 ℃	8 ℃	10 ℃	12 ℃
300	21.6	21.6 ~ 28.8	25.2 ~ 36.0	36 ~ 43.2
400	28.8 ~ 36.0	36.0 ~ 43.2	43.2 ~ 50.4	43.2 ~ 64.8
500	43.2	43.2 ~ 57.6	50.4 ~ 64.8	57.6 ~ 86.4
600	50.4 ~ 57.6	57.6 ~ 72.0	64.8 ~ 86.4	71.0 ~ 108.0
700	57.6 ~ 72.0	64.8 ~ 86.4	79.2 ~ 100.8	86.4 ~ 108.0

太阳辐射强度在  $300 \sim 700 \text{ W/m}^2$ 、室外温度  $6 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内各工况下,单位面积集热板上最佳运行风量的数据表明,其数值随太阳辐射强度的增大而增大,随室外环境温度的升高而增大.表3中的数值为各工况下单位面积集热板上的最佳运行风量,在太阳能集热器的工程应用中,由集热板的实际有效集热面积与相应工况下单位面积集热板上最佳运行风量的数值,得出实际太阳能集热器的实际系统运行风量值.

## 5 结论

笔者搭建了太阳能集热器实验台并对  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3种风量下集热器的热性能进行了实验研究,利用 CFD 软件建立了集热板的几何模型并对太阳辐射强度在  $300 \sim 700 \text{ W/m}^2$ 、室外温度  $6 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内各工况下的性能参数进行了模拟分析,得到以下结论:

(1)集热板表面温度在开机运行  $10 \text{ min}$  后进入稳定状态,在  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3种风量下稳定运行时分别为  $39.74, 36.99, 35.19 \text{ }^\circ\text{C}$ ,即集热板表面温度随系统风量的增大而降低;

(2)相较于集热板表面温度,出口空气温度达到稳定有一定的滞后性.在  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3种风量下稳定运行时,空气温升分别为  $22.45, 17.57, 14.37 \text{ }^\circ\text{C}$ ,即空气温度随系统风量的增大而降低;

(3)集热效率在  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$  3种风量下稳定运行时分别为  $38.56\%, 45.13\%$  和  $49.06\%$ ,即集热效率随系统运行风量的增大而升高;

(4)根据辐射强度为  $300 \sim 700 \text{ W/m}^2$ 、室外温度  $6 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内各工况下性能参数的模拟数据,提出了相应工况下单位面积集热板上的最佳运行风量,为工程上运行风量的选取提供参考数据.

## 参考文献:

- [1] GUNNEWIEK L H, BRUNDTETT E, HOLLANDS K G T. Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired plate collectors[J]. Solar Energy, 2002, 72: 317 - 325.
- [2] GUNNEWIEK L H, BRUNDRETT E, HOLLANDS K G T. Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area[J]. Solar Energy, 1996, 58: 227 - 237.
- [3] GAWLIK K, CHRISTENSEN C, KUSTECHER C. A numerical and experimental investigation of low conductivity unglazed transpired solar air heaters[J]. Solar Energy Engineering, 2005, 127: 153 - 155.
- [4] 叶宏,葛新石.带透明蜂窝的太阳空气加热器的实验研究[J].太阳能学报,2003,24(1):27 - 31.
- [5] 高立新,孙绍增,王远峰.无盖板渗透型太阳能空气集热器热性能的实验研究[J].节能技术,2012,3(2):155 - 158.
- [6] 高立新,王天成,孙绍增.无盖板渗透型集热器热性能的对比试验[J].可再生能源,2012(6):1 - 4.
- [7] KUTSCHER C F. An investigation of heat transfer for air flow through low porosity perforated plates[D]. Colorado:University of Colorado, 1982.
- [8] 中国建筑科学研究院.GB 50736—2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

## Experimental Research of Air Flow Volume on the Influence of The Solar Collector's Thermal Characteristics

WEI Xin-li, GUO Chun-jie, MENG Xiang-rui, ZHAO Xiao-li

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A solar collector system experimental platform was built and the experimental was researched to get the thermal characteristics of this collector under the three air flow volumes of  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$ . The collector plate model was built by the CFD software, and the simulation was researched to get the thermal performance parameters when the solar radiation was within the range of  $300 \text{ W/m}^2$  to  $700 \text{ W/m}^2$  and the ambient temperature was between  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . The results demonstrated that the increase of air temperature were respectively  $22.45, 17.57, 14.37 \text{ }^\circ\text{C}$ , and the heat collector efficiency was respectively  $38.56\%, 45.13\%, 49.06\%$  under the volume of  $0.94, 1.41, 1.87 \text{ m}^3/\text{h}$ . The different kinds of conditions' optimal volume was got according to the simulation values of corresponding thermal performance parametres, which was to provide the reference data for the selection of operation volume in the solar collector's practical engineering.

**Key words:** solar collector; increase of air temperature; thermal efficiency; optimal volume