



# V 型孔板渗透式太阳能空气集热器结构设计与实验测试

姜 坪<sup>1</sup>, 林熙龙<sup>1</sup>, 张元明<sup>1</sup>, 冷兴阳<sup>2</sup>

(1.浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2.长春燃气热力设计研究院, 长春 130022)

**摘 要:** 通过改进集热板结构、优化空气流道, 提出了一种 V 型孔板渗透式太阳能空气集热器。采用 CFD 模拟软件对 V 型孔板渗透式太阳能空气集热器内部的速度场与温度场进行模拟, 并实验测试了 V 型孔板渗透式太阳能空气集热器的集热效率。结果表明: 在风量为  $0.00513 \sim 0.08060 \text{ m}^3/\text{s}$  条件下, 2 排孔有隔板的 V 型孔板渗透式太阳能空气集热器的瞬时集热效率比普通平板式太阳能空气集热器高  $3.73\% \sim 24.89\%$ ; 在其他条件相同的情况下, 有隔板与无隔板的集热器相比, 集热效率可提高  $23.46\%$ ; 集热板上的孔口排数对集热效率有一定影响, 增加孔口排数不一定能提高集热效率。V 型孔板渗透式太阳能空气集热器集热效率高, 不同组合的开口模式适用不同的场合, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 太阳能空气集热器; 集热效率; 性能测试; CFD 模拟

中图分类号: TU831.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)09-0676-06

## Structure design and experimental test of V-shaped orifice permeable solar air collector

JIANG Ping<sup>1</sup>, LIN Xilong<sup>1</sup>, ZHANG Yuanming<sup>1</sup>, LENG Xingyang<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2.Changchun Gas Thermal Design and Research Institute, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In this paper, a V-shaped orifice permeable solar air collector was proposed by improving the structure of the heat collection plate and optimizing the air flow path. The CFD simulation software was used to simulate the velocity field and temperature field inside the V-shaped orifice permeable solar air collector, and the heat collection efficiency of the V-shaped orifice permeable solar air collector was experimentally tested. The results show that the instantaneous heat collection efficiency of the V-shaped orifice permeable solar air collector with two rows of holes and partitions is  $3.73\% \sim 24.89\%$  higher than that of the ordinary flat-plate solar air collector under the condition of air flow of  $0.00513 \sim 0.08060 \text{ m}^3/\text{s}$ . With other conditions same, the collector efficiency can increase by  $23.46\%$  compared with the non-separator; the number of orifices on the collector plate has a certain influence on the heat collection efficiency, and increasing the number of orifices does not necessarily improve the heat collection efficiency. The V-shaped orifice permeable solar air collector has high heat collection efficiency, and different combinations of opening modes are suitable for different occasions. Hence, V-shaped orifice permeable solar air collector has good application prospects.

**Key words:** solar air collector; heat collection efficiency; performance test; CFD simulation

收稿日期: 2019-03-14 网络出版日期: 2019-06-04

作者简介: 姜 坪(1963—), 男, 山东文登人, 副教授, 主要从事建筑节能及建筑热环境方面的研究。

## 0 引言

太阳能是一种分布广、储量丰富且清洁无污染的可再生能源。太阳能的热利用一般有太阳能水集热器与太阳能空气集热器两种方式。太阳能水集热器是利用太阳能产生热水提供给用户,已获得较为广泛的应用。太阳能空气集热器则是利用太阳能直接加热空气,可以用于干燥、房间供热等<sup>[1-2]</sup>。尽管一般的太阳能空气集热器与太阳能水集热器相比,换热能力略差,但太阳能空气集热器的热量不需通过水的2次转换,可直接产生热空气,它可用于干燥物品,提高冬季空气源热泵的性能。不仅如此,它还可以在夏季为建筑降低室内冷负荷,在冬季降低室内热负荷,在过渡季节强化室内通风换气,改善室内热环境与空气品质。

国内外学者对太阳能空气集热器的研究主要有以下方面:对太阳能空气集热器流道、集热板构造进行优化,进而提高太阳能空气集热器的集热效率<sup>[3-9]</sup>;研究空气流量、太阳辐射强度、进口空气温度等因素对集热性能的影响,并提出集热器的优化方案<sup>[10-14]</sup>。王林军等<sup>[3]</sup>提出一种平板型双流道太阳能空气集热器,实验表明,空气的双流道式流动,可强化与集热板的对流换热。丁刚等<sup>[4]</sup>将传统平板空气集热器中的对角型进出口流道改为多进出口式流道,实验结果表明,出口温度明显提升,集热器的瞬时效率有明显提升。胡建军等<sup>[5]</sup>将开孔型折流板加入到集热器中,增强空气与集热板之间的扰流作用,提高空气与集热板的换热能力。Zhang等<sup>[6]</sup>提出一种带有开孔波纹板的太阳能空气集热器,通过在波纹板上开凿缝孔以扩大集热器换热面积,增强传热效果。苗庆伟等<sup>[7]</sup>对两种不同运行模式下的太阳能空气集热器进行数值模拟与实验测试,研究波纹板开孔率对太阳能空气集热器性能的影响,研究结果表明,集热板开孔率最佳范围为8%~16%。Alam等<sup>[8]</sup>发现在吸热上设置肋、翅片等不同形状的构件,可以提高太阳能空气集热器的集热效率。Singh等<sup>[9]</sup>研究了具有V型肋的太阳能集热器的性能,并且与普通平板集热器相比,它具有更好的热性能。Abuska等<sup>[10]</sup>通过实验研究了集热板的V型槽构造对太阳能空气集热器集热效率的影响,实验结果表明,当空气流量为0.1 kg/s时,集热效率可达66%。王亮等<sup>[11]</sup>通过数值模拟,研究了折流板折形角度、板间距对折形折流板式太阳能空气集热器的影响,结果发现,当折形角度为60°且折流板间距为350 mm时,

集热效率为46.84%。朱婷婷等<sup>[12]</sup>将平板型太阳能空气集热器与高效热导元件-微热管阵列相结合,提出一种平板型太阳能空气集热器,试验发现,当送风量为290 m<sup>3</sup>/h时,该集热器的瞬时集热效率约为68%。也有学者通过构建数值模拟模型,采用FLUENT软件研究进口空气的流量及温度、太阳辐射强度及最佳运行风量等因素对太阳能空气集热器热性能的影响,为集热器的优化、选型提供了参考<sup>[13-14]</sup>。从上述研究结果来看,改进集热板的结构是提高太阳能空气集热器集热效率的重要因素。

本文通过改进集热板的结构设计、优化空气流动,提出了一种V型孔板渗透式太阳能空气集热器。该集热器采用V型孔板加隔板作为集热板,增大了集热板面积;同时以孔口及隔板形成合理的空气流道,以增强换热效果。本文对3种结构的V型孔板渗透式太阳能空气集热器,进行了CFD模拟分析及实验测试,确定具有最高集热效率的结构。

## 1 V型孔板渗透式太阳能空气集热器结构

V型孔板渗透式太阳能空气集热器的结构示意图如图1所示,由外壳8、V型孔板集热板7、隔板5、进风口、出风口以及玻璃盖板6构成,具体尺寸为长1000 mm,宽600 mm,高200 mm。

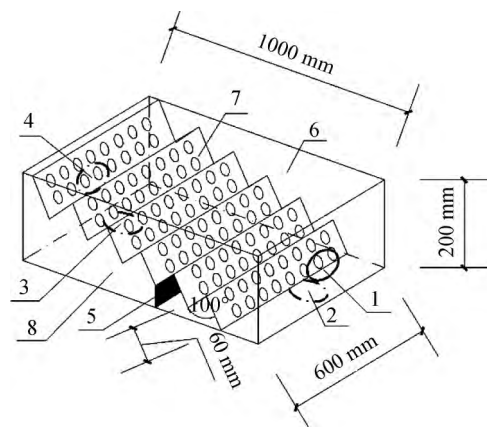


图1 V型孔板渗透式太阳能空气集热器结构

1—出风口 1;2—出风口 2;3—进风口 3;4—进风口 4;5—隔板;  
6—玻璃盖板;7—V型孔板集热板;8—外壳

外壳8为2 mm厚的酚醛铝箔复合夹芯板,兼作保温层,其导热系数为0.02~0.03 W/(m·K),可以有效减少传热损失。集热器表面玻璃材料采用4 mm厚的布纹钢化玻璃,以提高对太阳辐射的吸收率。V型孔板集热板7由阳极氧化铝合金板制成,为了增大它与空气的传热面积,集热板7 V型折翼的宽设计为60 mm,折角设计为100°,折翼数量设计为32片,并在折翼上打出40个直径2 mm的

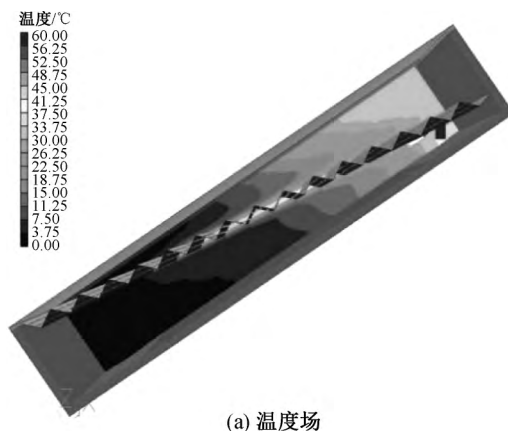
圆孔,孔距为12 mm,并将其在集热器中呈对角线倾斜放置。为了适应不同的应用场合,集热器底部设有进风口4,背部下方设有进风口3,上部设有出风口1,背部上方设有出风口2,孔口、孔径均为100 mm。将太阳能空气集热器紧贴外墙放置时,若进风口4与出风口1进行组合,室外空气被集热板加热,温度升高,在热压作用下迅速上升从出风口1排出,使得落在外墙上的太阳辐射热通过太阳能空气集热器被带走,从而减小夏季建筑冷负荷;若进风口3与出风口1进行组合,室外空气在热压作用下进入室内,可以改善过渡季节室内热环境,也提高了室内空气质量;若进风口3与出风口2进行组合,室内空气通过进风口3进入集热器吸收热量,再由出风口2回到室内,通过集热器循环加热来为室内供暖。

隔板设置于集热板与外壳的中间位置,使得集热板与外壳组成的背部腔体被间隔成互不相通的两部分,进来的空气被强制流过V型孔板,延长了换热时间,同时也增加了换热面积。

为了优化太阳能空气集热器的结构,设计了3种结构进行计算机模拟分析并进行实验测试:a)2排孔、无隔板;每个V型折翼打2排孔,集热器中间位置无隔板;b)2排孔、有隔板;每个V型折翼打2排孔,集热器中间位置设置隔板;c)3排孔、有隔板;每个V型折翼打3排孔,集热器中间位置设置隔板。

## 2 不同结构V型孔板渗透式太阳能空气集热器的CFD模拟

采用Phoenics软件对上述3种结构的太阳能



(a) 温度场

空气集热器内部速度场和温度场进行计算机模拟。选用 $k-\epsilon$ 湍流模型进行模拟计算, $k-\epsilon$ 模型方程如式(1)~(2)所示:

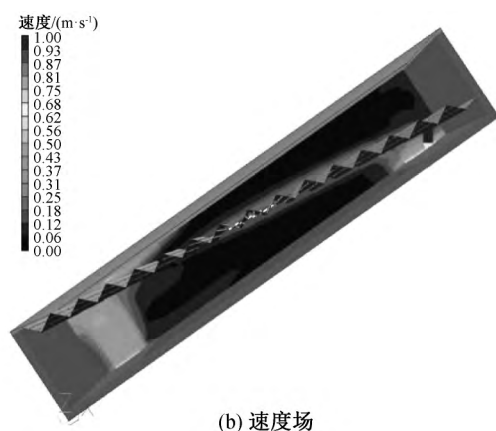
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho K u_j) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial K}{\partial x_2} \right) + \mu_t \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho \epsilon u_2) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \alpha_s \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_2} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} \mu_t \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{K} \quad (2)$$

其中: $\rho$ 为空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $K$ 为空气紊流动能, $\text{J}$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $x_1$ 和 $x_2$ 为坐标位置; $u_1$ 和 $u_2$ 分别为 $x_1$ 和 $x_2$ 坐标方向上的空气流速, $\text{m}/\text{s}$ ;  $\mu_t$ 为空气的黏性系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $\mu_{\text{eff}}$ 为空气的有效黏性系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $\epsilon$ 为紊流动能耗散率, $\%$ ;  $\alpha_s$ 为空气在可压缩湍流中过渡的扩散产生的波动,取1.393;  $\alpha_k$ 为湍流普朗特数,取1.393。  $C_{\epsilon}$ 、 $C_{\epsilon 1}$ 以及 $C_{\epsilon 2}$ 为模型经验常数, $C_{\epsilon}$ 取值在0.07到0.09之间;  $C_{\epsilon 1}$ 取值在1.41到1.45之间;  $C_{\epsilon 2}$ 取值在1.91到1.92之间。

太阳能空气集热器模型的倾角为 $45^\circ$ ,进风口4和出风口1为开启状态,其余2个风口为关闭状态。外壳壁面的边界条件设置为绝热,出风口空气流速设置为 $1 \text{ m}/\text{s}$ ,进风口空气温度设置为 $0^\circ\text{C}$ ,V型孔板集热板作为热源热流密度设置为 $400 \text{ W}/\text{m}^2$ ,玻璃盖板为复合传热边界。

模拟计算后得到的3种结构的太阳能空气集热器的温度场和速度场,如图2~图4所示。



(b) 速度场

图2 2排孔无隔板温度场和速度场

通过计算机模拟结果可以得知:

a)玻璃盖板内侧有一温度边界层,边界层内空气温度较主流空气的温度低,说明集热器的主要热量损失是在玻璃盖板位置。

b)将图2与图3进行对比,发现无隔板的集热

器出口断面的气流有较大的温度梯度,且容易形成气流的短路,影响温度场和速度场的均匀性,而设置隔板后情况有较大改善,因此设置隔板是合理且有效的。

c)将图3与图4进行对比,发现2排孔有隔板

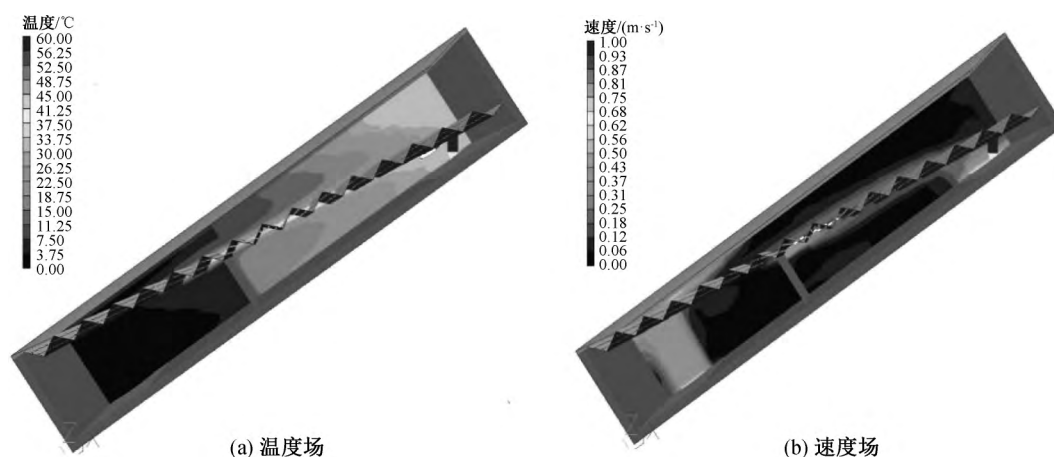


图 3 2 排孔有隔板温度场和速度场

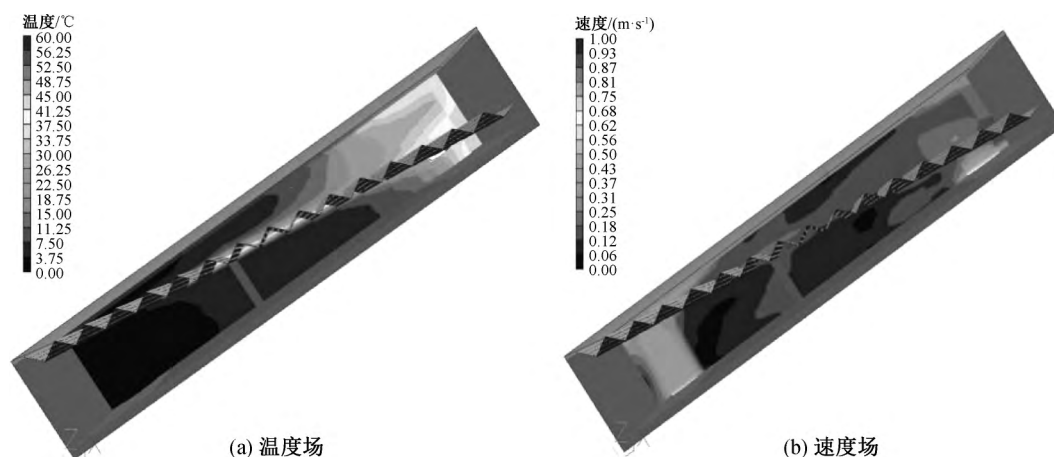


图 4 3 排孔有隔板温度场和速度场

的太阳能空气集热器与 3 排孔有隔板的太阳能空气集热器的速度场和温度场均匀程度大致相同,2 排孔有隔板的集热器内部温度要略高于 3 排孔有隔板的集热器内部温度,而内部流速则与 3 排孔有隔板的集热器大致相同。

综合计算机模拟结果可知,在 3 种结构中,2 排孔有隔板结构的集热效率最优。

### 3 3 种结构 V 型孔板渗透式太阳能空气集热器的实验测试

#### 3.1 实验方案及数据

实验测试安排在一块前方无建筑物遮挡的草坪上,集热器与地面倾斜角为  $45^\circ$ ,如图 5 所示,分别测量 3 种结构太阳能空气集热器的进出口空气温度、进出口风速、以及测试时的太阳辐射强度,测试数据如表 1 所示。采用的测试仪器为 TSI9555-P 型温湿度、VF110 风速测量仪、TBQ-2 太阳能辐射表。其中:TSI9555-P 型温湿度测试仪的测点设置在进风口和出风口,测点数量各一个;VF110 风速测量仪的测点设置在进风口,为降低误差,风速测点数量设

置为 3 个,取 3 点的平均速度作为该工况下的进口风速。测试采用强制对流,驱动风机安装在集热器的出风口处,进风口和出风口采用不同的组合方式,当 4 个风口中的 2 个风口为开启状态时,其余 2 个风口为关闭状态。



图 5 V 型孔板渗透式太阳能空气集热器实验测试现场

#### 3.2 集热效率计算

太阳能空气集热器的集热效率  $\eta$  是指在稳态条件下运行时,太阳能空气集热器单位集热面积在单位时间内所得到的热量与到达单位玻璃盖板面积的太阳辐射强度  $I$  之比,集热效率  $\eta$  的计算公式<sup>[15]</sup>为:

表1 3种结构V型孔板渗透式太阳能空气集热器实验测试数据

集热器结构	进出口组合	平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风量×10 <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	环境温度/℃	出口温度/℃	太阳辐射强度/(W·m <sup>-2</sup> )
2排孔 无隔板	1-4	0.66	3.32	29.3	85.5	611.484
	1-3	0.60	2.98	29.8	91.9	656.972
	2-4	0.91	4.55	31.1	78.5	614.467
	2-3	0.78	3.92	32.6	75.6	560.776
2排孔 有隔板	1-4	1.23	6.13	31.9	83.3	611.484
	1-3	1.15	5.73	31.2	81.2	577.927
	2-4	1.05	5.26	30.4	81.0	607.010
	2-3	1.03	5.13	30.5	81.5	565.250
3排孔 有隔板	1-4	1.16	5.78	32.2	56.7	286.353
	1-3	1.08	5.38	29.3	62.2	448.173
	2-4	1.20	6.00	29.8	46.6	249.814
	2-3	1.10	5.52	30.9	39.8	124.925

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c S} = \frac{\rho m_v \Delta t C_p}{A_c \tau_c \alpha_{ap} I} \quad (3)$$

其中: $\rho$ 取为1.29 kg/m<sup>3</sup>; $m_v$ 为空气体积流量,m<sup>3</sup>/s; $C_p$ 为空气定压比热容,J/(kg·K),取1.005 J/(kg·K); $\Delta t$ 为经过集热器后的温升,℃; $A_c$ 为接收太阳辐射的集热板的面积,m<sup>2</sup>; $\tau_c$ 为玻璃盖板的太阳辐射透过率,%; $\alpha_{ap}$ 为集热板对太阳辐射的吸收率,%。

以2排孔有隔板的集热器为例计算集热器的集热效率。进出风口直径为100 mm,风口面积 $A=0.0079$  m<sup>2</sup>,进出口温差 $\Delta t=51.4$  ℃,测得的太阳辐射强度为611.484 W/m<sup>2</sup>,集热器内折翼尺寸大小为0.60 m×0.06 m,每排有40个孔口,孔口直径为2 mm,所以集热器集热板面积为: $A_c=32 \times 0.60 \times 0.06 - \pi \times 0.0012 \times 2 \times 40=1.151$ (m<sup>2</sup>)。

集热板吸收的热量用 $S$ 来表示,单位是W/m<sup>2</sup>。

$$S = \tau_c \alpha_{ap} I \quad (4)$$

其中: $\tau_c$ 取0.87; $\alpha_{ap}$ 取0.93。

根据式(4)可得: $S=0.87 \times 0.93 \times 611.484=494.752$ (W/m<sup>2</sup>)。

根据式(3)可求得集热效率: $\eta=(1.29 \times 0.00613 \times 1.005 \times 51.4 \times 1000)/(1.151 \times 494.752)=71.73$ (%)。

根据上述方法计算出的集热效率如表2所示。

### 3.3 实验测试结果分析

a)2排孔有隔板太阳能空气集热器的集热效率比2排孔无隔板太阳能空气集热器在不同的进出口组合下分别提高29.25%、29.80%、12.18%、22.59%,平均提高23.46%,说明隔板在V型孔板渗透式太阳能空气集热器的性能提升方面具有显著作用。

表2 3种结构V型孔板渗透式太阳能空气集热器集热效率

集热器类型	进出口组合	集热效率/%
2排孔无隔板	1-4	42.48
	1-3	39.21
	2-4	48.86
	2-3	41.85
2排孔有隔板	1-4	71.73
	1-3	69.01
	2-4	61.04
	2-3	64.44
3排孔有隔板	1-4	68.85
	1-3	54.98
	2-4	56.17
	2-3	54.75

b)2排孔有隔板太阳能空气集热器的集热效率比3排孔有隔板太阳能空气集热器的集热效率在不同的进出口组合下分别提高2.88%、14.03%、4.87%、9.69%,平均提高7.86%,说明集热板上的孔口排数对于集热效率有一定的影响。

c)2排孔有隔板的集热器有较高的集热效率,这与计算机模拟计算的结果一致。

2排孔有隔板的V型孔板渗透式太阳能空气集热器以45°的倾角进行放置,在风量为0.00613 m<sup>3</sup>/s,太阳辐射强度611.484 W/m<sup>2</sup>的实验条件下,最高瞬时集热效率为71.73%。文献[11]中的平板式太阳能空气集热器以45°的倾角进行放置,在风量为0.00513 m<sup>3</sup>/s(比本次实验风量略低),太阳辐射强度562.040 W/m<sup>2</sup>的实验条件下,最高瞬时集热效率为46.84%,V型孔板渗透式太阳能空气集热器的集热效率要比其提高24.89%;文献[12]中的平板式太阳能空气集热器以45°的倾角进行放置,在风量为0.08060 m<sup>3</sup>/s(远高于本次实验风量),太

阳辐射强度  $620.000 \text{ W/m}^2$  的条件下,最高瞬时集热效率为  $68.00\%$ ,V型孔板渗透式太阳能空气集热器的集热效率要比其提高  $3.73\%$ ;文献[10]中的平板式太阳能空气集热器以  $45^\circ$  的倾角进行放置,在风量为  $0.07750 \text{ m}^3/\text{s}$ (远高于本次实验风量),太阳辐射强度  $580.000 \text{ W/m}^2$  的实验条件下,最高瞬时集热效率为  $66.00\%$ ,V型孔板渗透式太阳能空气集热器的集热效率要比其提高  $5.73\%$ 。

#### 4 结 论

通过对3种结构的V型孔板渗透式太阳能空气集热器的CFD模拟分析及实验测试,并与文献报道的普通太阳能空气集热器分析对比,结果表明:

a)在风量为  $0.00513 \sim 0.08060 \text{ m}^3/\text{s}$  的条件下,2排孔有隔板的V型孔板渗透式太阳能空气集热器的瞬时集热效率比普通平板式太阳能空气集热器可提高  $3.73\% \sim 24.89\%$ 。

b)设置V型折板及折板穿孔均有增加传热面积、强化对流换热的作用;设置隔板对集热效率的提高有重要作用,在其他条件相同的情况下,有隔板与无隔板相比,集热效率平均可提高  $23.46\%$ ;集热板上排孔数的设置对集热效率有一定影响,在其他条件相同的情况下,2排孔与3排孔相比,集热效率平均可提高  $7.86\%$ 。在3种不同结构的太阳能空气集热器中,2排孔有隔板集热器的集热效率最高。

c)模拟计算结果显示,太阳能空气集热器的主要热损失集中在玻璃盖板上。

V型孔板渗透式太阳能空气集热器结构简单、造价低、集热效率高,4种不同组合的开口模式适用不同的场合,具有良好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 吴一博,侯思雨.平板型太阳能空气集热器的研究进展[J].中国住宅设施,2017(1):68-71.
- [2] 关恒利.太阳能干燥技术在农村粮食干燥中的应用[J].农业科技与装备,2011(3):35-37.
- [3] 王林军,高章维,张东,等.平板型双流道太阳能空气集热器热性能研究[J].太阳能学报,2016,37(10):

2562-2568.

- [4] 丁刚,左然,张旭鹏,等.平板式太阳能空气集热器流道改进的试验研究和数值模拟[J].可再生能源,2011,29(2):12-15.
- [5] 胡建军,马龙,刘凯彤,等.开孔型折流板太阳能空气集热器参数优化[J].农业工程学报,2016,32(14):227-231.
- [6] Zhang H, Ma X, You S, et al. Mathematical modeling and performance analysis of a solar air collector with slit-perforated corrugated plate[J]. Solar Energy, 2018, 167:147-157.
- [7] 苗庆伟,由世俊,张欢,等.一种冲孔波纹板渗透型空气集热器性能优化研究[J].太阳能学报,2016,37(10):2554-2561.
- [8] Alam T, Saini R P, Saini J S. Use of turbulators for heat transfer augmentation in an air duct: A review[J]. Renewable Energy, 2014, 62:689-715.
- [9] Singh S Chander S, Saini J S. Thermo-hydraulic performance due to relative roughness pitch in V-down rib with gap in solar air heater duct: Comparison with similar rib roughness geometries [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 43:1159-1166.
- [10] Abuşka M, Şevik S. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses of flat-plate and V-groove solar air collectors based on aluminium and copper[J]. Solar Energy, 2017, 158:259-277.
- [11] 王亮,满意.折形折流板式太阳能空气集热器的数值模拟[J].可再生能源,2018,36(7):997-1003.
- [12] 朱婷婷,刁彦华,赵耀,等.微热管阵列式太阳能平板空气集热器集热性能[J].农业工程学报,2016,32(11):250-257.
- [13] 魏新利,郭春杰,孟祥睿,等.风量对太阳能集热器热性能影响的实验研究[J].郑州大学学报(工学版),2013,34(6):104-107.
- [14] 郭训虎,王亮,马芳芳.波纹板双风道空气集热器的研究[J].洁净与空调技术,2018(3):29-31.
- [15] Li S, Wang H, Meng X, 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.

(责任编辑:康 锋)