



DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2018-0790

## 扰流板太阳能空气集热器的流道优化

贾斌广<sup>1</sup>, 刘芳<sup>1</sup>, 王达<sup>2</sup>, 张大鹏<sup>1</sup>, 韩韬<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101; <sup>2</sup> 中华全国供销合作总社济南果品研究院, 山东 济南 250200)

**摘要:** 通过改变常规的蛇形流道的扰流板式太阳能空气集热器的扰流板布置, 开发出一种涡旋形流道太阳能空气集热器, 并对其进行实验与模拟研究。研究发现在平均太阳辐照度 $819.7\text{W}/\text{m}^2$ 、温度 $7.33^\circ\text{C}$ 、流量 $0.025\text{kg}/\text{s}$ 的条件下, 涡旋形太阳能空气集热器的集热效率可达 $59.14\%$ , 比蛇形太阳能空气集热器高 $2.18\%$ ; 而其压力损失仅为蛇形太阳能空气集热器的 $37.26\%$ , 且随着流量的增加, 压损降低更加明显; 同时得到在出口温度为 $30\sim 90^\circ\text{C}$ 范围内, 涡旋形太阳能空气集热器的热损系数在 $4.6\sim 5.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 之间, 热迁移因子在 $0.64\sim 0.72$ 之间, 二者的平均值各自较蛇形太阳能空气集热器高 $0.06\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 与 $0.019$ 。与蛇形太阳能空气集热器相比, 涡旋形的太阳能空气集热器增加了太阳能空气集热器的集热效率, 同时大幅降低压力损失。

**关键词:** 涡旋形太阳能空气集热器; 集热效率; 热损系数; 热迁移因子

中图分类号: TK513.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613 (2019) 02-0819-07

## Optimization of flow path for the spoiler solar air collector

JIA Bingguang<sup>1</sup>, LIU Fang<sup>1</sup>, WANG Da<sup>2</sup>, ZHANG Dapeng<sup>1</sup>, HAN Tao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; <sup>2</sup> Jinan Fruit Research Institute, National Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Jinan 250200, Shandong, China)

**Abstract:** By changing the layout of spoiler plates of the solar-air collector with serpentine flow channel, a spiral solar air collector was developed with numerical and experimental studying. The results showed that under the conditions of the average solar irradiance, temperature and flow rate being  $819.7\text{W}/\text{m}^2$ ,  $7.33^\circ\text{C}$  and  $0.025\text{kg}/\text{s}$  respectively, the heat-collecting efficiency of the solar air collector could reach  $59.14\%$ , which was  $2.18\%$  higher than that of the serpentine solar air collector. The pressure loss for spiral one was only  $37.26\%$  of the pressure for serpentine solar collector, and the pressure loss decreased significantly with the increase of flow rate. The heat loss coefficient of the spiral solar air collector was in the range of  $4.6\sim 5.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  and the heat transfer factor was between  $0.64\sim 0.72$  in the temperature range of  $30\sim 90^\circ\text{C}$ . The average value of the two was  $0.06\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  or  $0.019$  respectively higher than those of the snake solar air collector. Compared with serpentine solar air collector, the spiral solar-air collector increases the heat collection efficiency of the solar air collector and greatly reduces the pressure loss.

**Keywords:** spiral solar air collector; heat collection efficiency; heat loss coefficient; thermal migration factor

收稿日期: 2018-04-17; 修改稿日期: 2018-08-09。

基金项目: 国家自然科学基金 (51406105)。

第一作者: 贾斌广 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太阳能与制冷技术。E-mail: jiabingguang78@163.com。

通信作者: 刘芳, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为建筑节能与空气源热泵系统。E-mail: fliu@sdjzu.edu.cn。

引用本文: 贾斌广, 刘芳, 王达, 等. 扰流板太阳能空气集热器的流道优化[J]. 化工进展, 2019, 38(2): 819-825.

**Citation:** JIA Bingguang<sup>1</sup>, LIU Fang<sup>1</sup>, WANG Da<sup>2</sup>, ZHANG Dapeng<sup>1</sup>, HAN Tao<sup>1</sup>. Optimization of flow path for the spoiler solar air collector[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(2): 819-825.

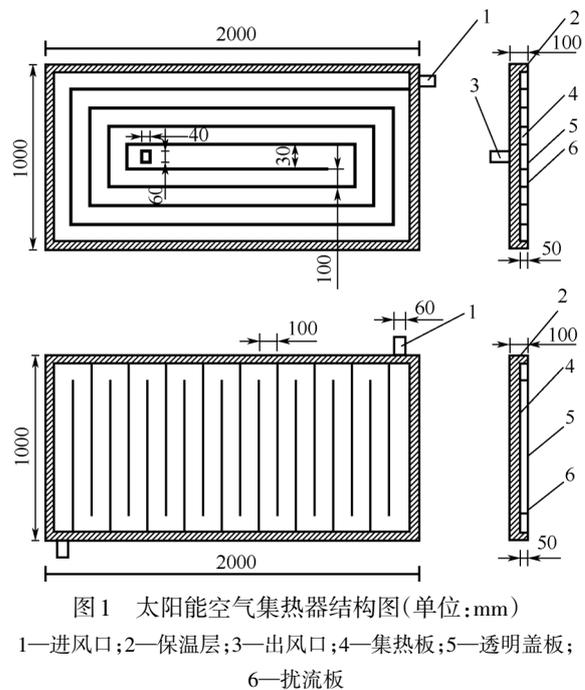
太阳能空气集热器是利用太阳能加热空气的简单装置,其在干燥农产品如种子<sup>[1]</sup>、水果和蔬菜<sup>[2-3]</sup>中具有许多应用。此外,太阳能空气加热器用于加热辅助加热器的建筑物,以在冬季节约能源<sup>[4]</sup>。

平板式太阳能空气集热器的基本设计包括一个或多个位于吸收板上方的透明盖板,空气通过与集热板的对流换热来达到对太阳能的有效利用<sup>[5-6]</sup>,其具有结构简单、成本低廉的优点。但同时太阳能空气集热器内的空气与集热板之间的对流传热能力较低,制约着太阳能空气集热器的发展<sup>[7]</sup>。胡建军、马龙等<sup>[8-9]</sup>提出了开孔折流板式集热器,并对其影响因素进行正交分析,在最优结构下效率最高可达到86.83%。Ho等<sup>[10]</sup>通过实验和理论方法研究了双流扰流板式的太阳能空气集热器的性能,当上下流道流量比为0.5时,效率最高达到70%。Ekadewi等<sup>[11]</sup>在集热器内添加V形挡板与扰流板,通过对V形肋片进行实验与模拟分析,其最佳间隔比为 $S/H=1$ 。Gulcimen等<sup>[12]</sup>设计了一种新型扰流板太阳能空气集热器,用以干燥果蔬,当空气流量为0.033kg/s时效率为63%。El-khawajah等<sup>[13]</sup>对普通蛇形流道太阳能空气集热器的集热板进行改进,以金属丝网替代集热板,取得良好的集热效果,最高效率可达到85.9%。夏佰林等<sup>[14]</sup>通过对扰流板的实验与模拟研究,得到太阳能空气集热器热迁移因子、效率因子随扰流板数量的变化,得到扰流板最佳间距为60~100mm。Wei等<sup>[15]</sup>对带有翅片式吸收器的太阳能空气集热器的热性能进行了理论分析和实验研究,分析了设定角度、流量和进气方式对太阳集热器性能的影响,并通过实验验证了其理论计算模型。

综上所述,加装扰流板可以有效增强空气与集热板的对流换热,但同时由于空气在扰流板形成的流道中进行多次180°的转弯,因而气流在集热器流道内部分布情况更为复杂,形成涡流区(又称“死水区”),导致集热器腔体内流速降低<sup>[16]</sup>。而目前对扰流板太阳能空气集热器的研究多专注于扰流板的数量与结构尺寸,而对扰流板组成的流道研究较少。本文通过流体力学与传热学基本原理对蛇形流道的太阳能空气集热器进行了流道改进,提出一种涡旋形太阳能空气集热器。通过对涡旋形太阳能空气集热器与蛇形太阳能空气集热器进行模拟分析,为扰流板太阳能空气集热器的设计改进提供一定的依据。

## 1 太阳能空气集热器结构

涡旋形、蛇形太阳能空气集热器结构如图1所示,集热器的尺寸为2000mm×1000mm×100mm。主要部件包括透明盖板、内外壳体、集热板、保温层和扰流板。集热器两侧及底部均包覆有岩棉作为保温层,其中保温层厚度为50mm,集热器上表面覆盖3.2mm单层平板钢化玻璃,其进口、出口尺寸为60mm×40mm。集热器的集热板上喷涂了具有高吸收率、低发射率的特殊涂层,其太阳能吸收率为0.96,其尺寸为1930mm×930mm×4mm。扰流板由吸热涂层折叠而成,流道的宽度为100mm。



## 2 数值模拟计算

### 2.1 数学模型

本文基于如下假设建立数学模型。空气在太阳能空气集热器内的流动和换热过程为稳态;忽略太阳能空气集热器外壁面与外界的辐射换热,整个系统仅透明盖板与集热板吸收太阳辐射;流道内空气为粘性不可压缩流体与辐射透明介质,同时忽略由黏性力做功所引起的耗散热。

空气在太阳能空气集热器内为湍流流动,且随流道变化,流动方向会发生180°与90°偏转,导致流体分离。因此选用在模拟负压力梯度流动,流体

分离流动和复杂的二次流动具有优势<sup>[7]</sup>的 Realizable  $k-\epsilon$  模型。同时对太阳能空气集热器的辐射模拟计算采用 DO 模型，以求解半透明壁面问题。

### 2.2 边界条件及网格划分

参考济南地区 2018 年 2 月 6 日的气象参数，模型边界条与物性参数件设置如表 1 所示。

整个数学模型在 Gambit 软件中进行建模。由于太阳能空气集热器内存在扰流板并分割出流道，空间结构相对复杂，故在网格划分时采用 TGrid 四面体非结构性网格进行网格划分。为了在保证计算精度的同时提高计算速度，在空气流道部分进行网格加密，网格体积为 10，在保温层区域网格体积为 20，整个计算模型的网格数为 824883。

### 2.3 模拟算法验证

本文通过对涡旋型太阳能集热器（见图 2）进行实验，以 2018 年 2 月 6 日的外界气候参数（大气透明度良好，外界空气温度在 4~8℃，风速在 0~3m/s）作为边界条件，对模拟结果与实验结果进行比较，如图 3 所示。发现最大误差为 5.03%（11:30 时），平均误差在 3% 以内，故认为模拟结果与实验数据吻合良好，证明模拟方法可行。

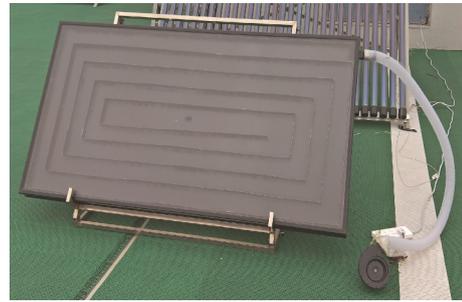


图2 太阳能空气集热器实物

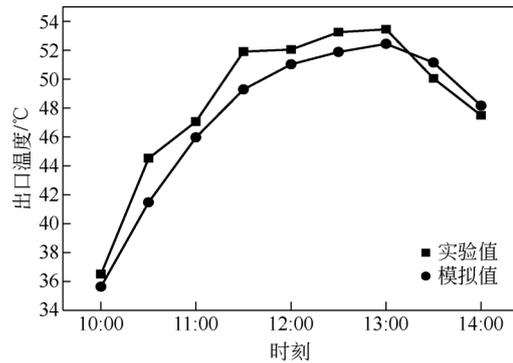


图3 模拟算法验证

## 3 太阳能空气集热器评价方法

### 3.1 集热效率

太阳能空气集热器的光热转换效率定义为流道内空气吸收的能量与集热器表面所吸收的太阳辐射之比，考虑到实际运行过程中的风机耗能，定义太阳能空气集热器的瞬时集热效率为式(1)。

$$\eta = \frac{m c_p (T_o - T_i)}{A_c G + \frac{m}{\rho} \Delta P \eta_{pmp}} \quad (1)$$

### 3.2 总热损系数

本文利用 Klein 于 1979 年提出的经验公式计算顶部热损失系数  $U_t$ ，如式(2)~式(6)。

$$U_t = \frac{1}{\frac{N}{\frac{\zeta}{T_{p,m}} \left( \frac{T_{p,m} - T_a}{N + f} \right)^x + \frac{1}{h_w}} + \frac{\sigma (T_{p,m} + T_a)(T_{p,m}^2 + T_a^2)}{\frac{q}{\varepsilon_{p,m} + 0.00591 N h_w} + \frac{2N + f - 1 + 0.122 \varepsilon_p - N}{\varepsilon_c}} \quad (2)$$

$$\zeta = 1 - 0.000051 \beta^2 \quad 0^\circ < \beta < 70^\circ \quad (3)$$

$$f = (1 + 0.0892 h_w - 0.1166 h_w \varepsilon_{p,m})(1 + 0.07866 N) \quad (4)$$

$$x = 0.43 \left( 1 - \frac{100}{T_{p,m}} \right) \quad (5)$$

$$h_w = 5.7 + 3.8 v \quad (6)$$

太阳能空气集热器底部与边缘热损失通过底部隔热层和外壳向环境空气散失，因为其温度较低，故可以忽略辐射散热，常作为一维热传导处理，因此集热器底部损失系数  $U_b$ 、集热器边缘损失系数  $U_c$  为式(7)、式(8)。

表1 边界条件及物性参数

集热器单元	边界条件	材质	密度/kg·m <sup>-3</sup>	比热容/J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	热导率/W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	吸收率	透过率
透明盖板	对流换热 $h_w=12W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	玻璃	2500	840	0.76	—	0.92
集热板	流固耦合	铝	2719	871	202.4	0.96	—
保温材料	对流换热 $h_w=12W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	岩棉	120	1220	0.04	—	—

$$U_b = \frac{k}{d} \tag{7}$$

$$U_e = \frac{kA_c}{dA_c} \tag{8}$$

集热器总热损系数  $U_L$  为式(9)。

$$U_L = U_i + U_b + U_e \tag{9}$$

### 3.3 热迁移因子

太阳能空气集热器热迁移因子  $F_R$  定义为集热器实际输出的能量与假定整个吸热板处于工质进口温度输出的能量之比，见式(10)、式(11)<sup>[18]</sup>。

$$F_R = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{A_c[S - U_L(T_i - T_a)]} \tag{10}$$

$$S = \tau\alpha G \tag{11}$$

## 4 结果分析

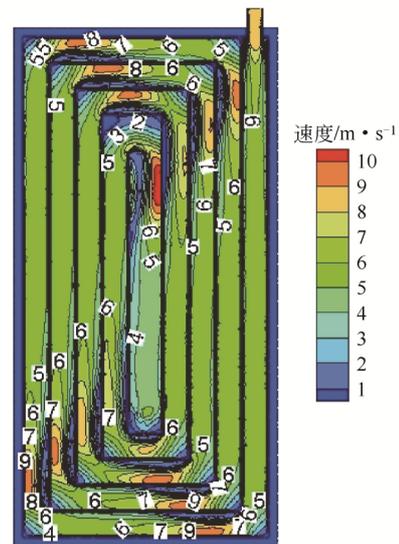
太阳能空气集热器的集热效率、热迁移因子及压力损失等于空气的流动及进出口温差密切相关，在2018年2月6日的气象条件下，两种太阳能空气集热器内的速度场分布如图4所示。

从图4(a)中可以得到蛇形太阳能空气集热器内空气在蛇形流道内的拐角处速度梯度较大，在气流转弯的内侧形成分离涡，在外侧形成气流高速区，局部最高速度达到13m/s；而图4(b)中的涡旋形太阳能空气集热器内空气速度梯度远小于蛇形太阳能空气集热器，在流道中部流体呈均匀流动状态，在气体转弯处的速度梯度远小于蛇形太阳能空气集热器，局部最高速度仅为10m/s，远低于蛇形太阳能空气集热器。原因是蛇形太阳能空气集热器的气流在流道内发生180°的转弯，造成流道截面形状及流体方向发生剧烈变化，在压力差的作用下，流体发生分离现象<sup>[16]</sup>，在流道弯折处内侧出现分离涡；而涡旋形太阳能空气集热器的空气在流道内仅进行90°的转弯，气流的速度、截面形状变化相对平缓，从而压力差较小，分离涡与速度梯度相对于蛇形太阳能空气集热器均有所降低。

图5为典型工况下两种太阳能空气集热器的工作情况。在流量为0.025kg/s下，对两种结构的太阳能空气集热器的运行情况模拟发现，随着太阳辐射照度的增加，集热效率呈上升趋势；在11:00—14:00太阳辐射照度在900W/m<sup>2</sup>以上时，效率趋于平稳，辐射照度对效率的影响较小。在平均太阳辐射照度为819.7W/m<sup>2</sup>、温度为7.33℃、流量为0.025kg/s的条件下，涡旋形和蛇形太阳能空气集热器的平均集热效率分别为59.14%、56.96%，热迁移因子分别为0.693、0.674。模拟工况下涡旋形太阳能空气



(a) 蛇形太阳能空气集热器速度场



(b) 涡旋形太阳能空气集热器速度场

图4 速度场分布图

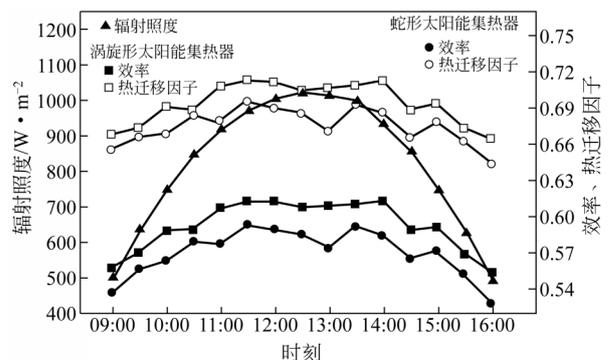


图5 太阳能空气集热器工作情况

集热器效率比蛇形太阳能空气集热器平均集热效率高2.18%，热迁移因子高0.019。

图6为不同流量下的热迁移因子与效率的关系。随着空气流量的增加，两种形式的太阳能空气

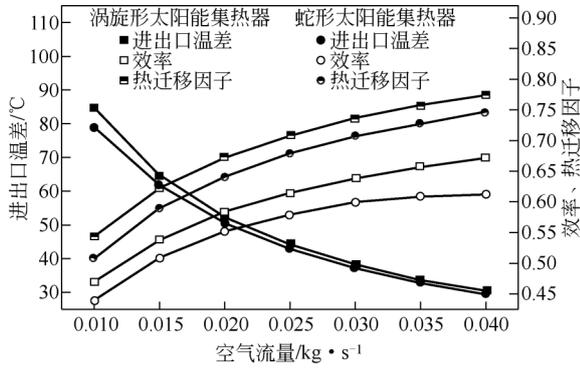


图 6 流量对集热效率与热迁移因子的影响

集热器的集热效率、热迁移因子均呈上升趋势，温差呈下降趋势。当空气流量为 0.01 ~ 0.04kg/s 时，涡旋形太阳能空气集热器的进出口温差、效率与热迁移因子均高于蛇形太阳能空气集热器。与模拟结果相符。随着流量的增加，蛇形集热器的效率趋于稳定，在 60% ~ 62% 之间；而涡旋形太阳能空气集热器的效率最高可达 65.6%。两种形式的太阳能空气集热器的热迁移因子与效率的差值均随流量的增加而增大，但涡旋形太阳能空气集热器的最大差值 (11.91%) 小于蛇形太阳能空气集热器最大差值 (13.64%)。表明随着流量的增加，蛇形太阳能空气集热器集热器的理论集热能力与实际集热能力均高于蛇形太阳能空气集热器。

图 7 表示空气流量与压力损失的变化情况。由图 7 可得，随着流量的增加，两种太阳能空气集热器的压力损失逐渐增加，且压力损失与流量呈近似幂函数关系。但涡旋形太阳能空气集热器的压力损失远小于蛇形太阳空气能集热器，且随着空气流量的增加，两者的差值逐渐增大；蛇形太阳空气能集热器的压损与涡旋形太阳能空气集热器的压损比值也随着流量的增加呈下降趋势，在流量为 0.01 ~ 0.04kg/s 的范围内，压力比从 37.26% 到 33.40%。结果表

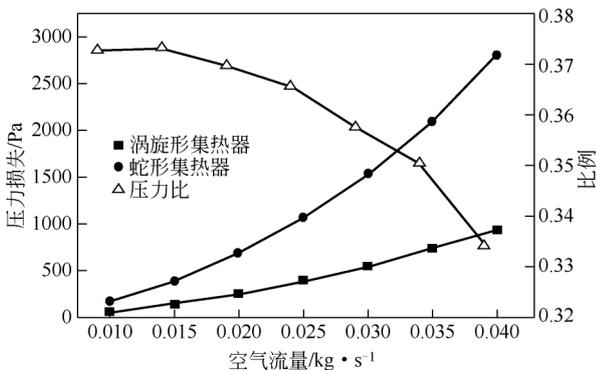


图 7 太阳能空气集热器的压力损失

明：涡旋形与蛇形太阳能空气集热器相比，在实际运行中可以大幅降低风机能耗与噪声。

从图 8 中可以看出，总热损系数与太阳能空气集热器空气出口和外界环境温差呈线性相关，与文献[17]一致。随着集热器出口温度的不断增加，热损系数也在逐渐增加。原因是随着出口温度的增加，集热板、透明盖板的温度增加，集热板、透明盖板对外界的辐射散热变大，导致热损系数增加。在空气出口和外界环境温差为 30 ~ 90°C 的范围内，总热损系数在 4.6 ~ 5.6W/(m²·K)，同时涡旋形太阳能空气集热器的总热损系数始终比蛇形太阳能空气集热器高。其原因在于涡旋形太阳能空气集热器在优化空气与集热板对流换热的同时，也增加了空气与透明盖板的散热。但二者的平均差值仅为 0.06W/(m²·K)，几乎可以忽略。此外，两种结构的太阳能空气集热器的热损失系数不仅低于文献[20]中的 8~10W/(m²·K)，也远低于太阳能空气集热器的标准<sup>[19]</sup>要求[9W/(m²·K)]。

图 9 为涡旋形、蛇形太阳能空气集热器效率与热迁移因子的关系。其中热迁移因子数值越大，代表太阳能空气集热器内空气与集热板对流换热能力越强，受外界条件的影响越小。从图 9 中可以看

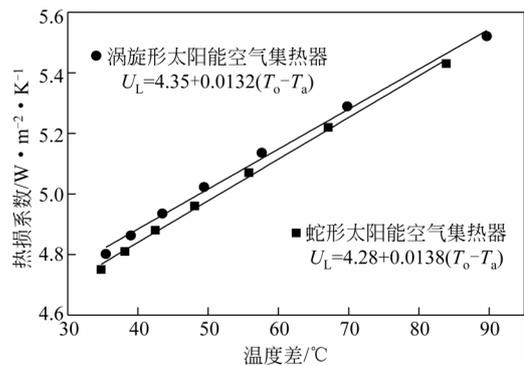


图 8 总热损系数与空气出口和外界环境温差的关系

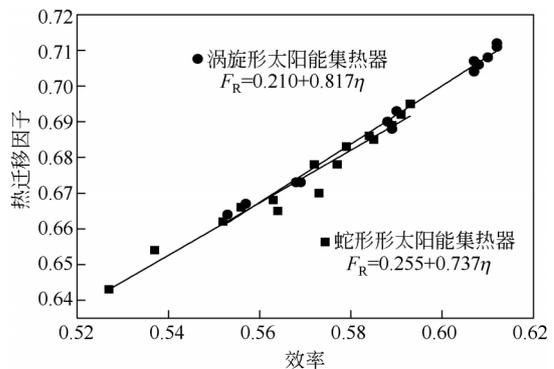


图 9 热迁移因子与集热效率的关系

出,两种太阳能空气集热器的效率集中在 52%~62% 之间,热迁移因子集中在 0.64~0.72 之间,热迁移因子总是高于集热效率。在相同的辐射照度、空气流量条件下,涡旋形和蛇形太阳能空气集热器的效率分别为 56%~62% 和 52%~60%。显然,相比于蛇形太阳能空气集热器,涡旋形的流道结构能有效提高太阳能空气集热器的集热效率。

## 5 结 论

通过对涡旋形太阳能空气集热器的实验测试与模拟分析,对两种结构的太阳能空气集热器的典型工况下的集热情况、热迁移因子、效率、总热损系数进行分析,得到了以下结论。

(1) 涡旋型太阳能空气集热器的集热效率相对于蛇形太阳能空气集热器的效率有一定提升,在 2018 年 2 月 6 日的典型工况下,涡旋形和蛇形集热器的平均集热效率分别为 59.14%、56.96%。随着流量变化,两种太阳能空气集热器的最大效率与热迁移因子分别为 65.6% 和 62.1%、0.775 和 0.748。

(2) 涡旋形太阳能空气集热器的沿程阻力损失远小于蛇形太阳能空气集热器,仅为蛇形集热器的三分之一左右。且随着流量增加,涡旋形太阳能空气集热器的压损与蛇形集热器的压损比逐渐减小。故涡旋型太阳能空气集热器在实际工程中多组集热器集中工作时降压效果明显,可以有效降低风机能耗与噪声。

(3) 涡旋形、蛇形太阳能空气集热器出口与外界温差与热损系数、热迁移因子与效率均呈线性关系。且涡旋形太阳能空气集热器的热量损失与热迁移因子均略高于蛇形太阳能空气集热器。

### 符号说明

- $A_c$  —— 太阳能空气集热器采光面积,  $m^2$   
 $A_e$  —— 太阳能空气集热器侧壁总面积,  $m^2$   
 $c_p$  —— 空气定压比热容,  $J/(kg \cdot K)$   
 $d$  —— 太阳能空气集热器保温材料厚度,  $m$   
 $h_w$  —— 为环境空气与玻璃盖板的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $G$  —— 太阳能辐照量,  $W/m^2$   
 $k$  —— 太阳能空气集热器保温材料的热导率,  $W/(m \cdot K)$   
 $m$  —— 空气的质量流量,  $kg/s$   
 $N$  —— 玻璃层数  
 $\Delta P$  —— 太阳能空气集热器进出口压差,  $Pa$   
 $S$  —— 太阳能空气集热器单位面积上吸收的太阳能,  $W/m^2$

- $T_i, T_o, T_{p,m}, T_a$  —— 分别为太阳能空气集热器进口、出口、集热板的温度与外界环境温度,  $K$   
 $U_i, U_e, U_L$  —— 分别为太阳能空气集热器的顶部、侧面与总热损系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $v$  —— 环境风速,  $m/s$   
 $\beta$  —— 太阳能空气集热器倾斜角度,  $(^\circ)$   
 $\varepsilon_{p,m}, \varepsilon_c$  —— 分别为集热板与透明盖板发射率  
 $\eta_{pup}$  —— 风机效率  
 $\rho$  —— 空气密度,  $kg/m^3$   
 $\sigma$  —— 斯蒂芬-玻耳兹曼常数,  $W/(m^2 \cdot K^4)$

### 下角标

- $c$  —— 透明盖板  
 $i$  —— 进口  
 $o$  —— 出口  
 $p, m$  —— 集热板  
 $w$  —— 外界

### 参考文献

- [1] CHAKRAVERTY A, DAS S K. Development of a two-directional air flow paddy dryer coupled with an integrated array of solar air heating modules[J]. Energy Convers Manage, 1992, 33: 183-190.
- [2] SREEKUMAR A. Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables[J]. Energy Convers Manage, 2010, 51(11): 2230-2238.
- [3] AMER B M A, HOSSAIN M A, GOTTSCHALK K. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana[J]. Energy Convers Manage, 2010, 51(4): 813-820.
- [4] ZHAO D L, LI Y, DAI Y J, et al. Optimal study of a solar air heating system with pebble bed energy storage[J]. Energy Convers Manage, 2011, 52: 2392-2400.
- [5] TAN H M, CHARTERS W W S. Experimental investigation of forced-convective heat transfer for fully-developed turbulent flow in a rectangular duct with asymmetric heating[J]. Solar Energy, 1970, 13(1): 121-125.
- [6] LIU C H, SPARROW E M. Convective-radiative interaction a parallel plate channel application to air-operated solar collectors [J]. Int. J. Heat Mass. Transfer, 1980, 23(8): 1137-1146.
- [7] BAHREHMEND D, AMERI M, GHOLAMPOUR M. Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with forced convection[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 357-368.
- [8] 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.  
 HU Jianjun, MA Long, LIU Kaitong, et al. Parameters optimization of solar air collector with holes on baffles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 227-231.
- [9] 马龙. 开孔折流板型太阳能空气集热器流动传热特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.  
 MA Long. Study on flow and heat transfer characteristics of a baffled solar air collector[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [10] HO C D, CHANG H, WANG R C, et al. Performance improvement of a double-pass solar air heater with fins and baffles under recycling operation [J]. Applied Energy, 2012, 100: 155-163.

- [11] EKADEWI A, HANDOYO, DJATMIKO I, et al. Numerical studies on the effect of delta-shaped obstacles' spacing on the heat transfer and pressure drop in V-corrugated channel of solar air heater[J]. *Solar Energy*, 2016, 131: 47-60.
- [12] GULCIMEN F, KARAKAYA H, DURMUS A. Drying of sweet basil with solar air collectors[J]. *Renewable Energy*, 2016, 93: 77-86.
- [13] EL-KHAWAJAH M F, ALDABBAGH L B Y, EGELIOGLU F. The effect of using transverse fins on a double pass flow solar air heater using wire mesh as an absorber[J]. *Solar Energy*, 2011, 85 (7): 1479-1487.
- [14] 夏佰林, 赵东亮, 代彦军, 等. 扰流板型太阳能平板空气集热器集热性能[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(6): 870-873.  
XIA Bailin, ZHAO Dongliang, DAI Yanjun, et al. Study on a flat plate solar air collector with baffles[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(6): 870-873.
- [15] WEI Chang, WANG Yunfeng, LI Ming, et al. The theoretical and experimental research on thermal performance of solar air collector with finned absorber[C]// *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, SHC 2014, China: Energy Procedia*70: 13-22.
- [16] 钱珊珠, 赵宇航. 扰流板数量对集热器集热效率的模拟研究[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(9): 178-181.
- QIAN Shanzhu, ZHAO Yuhang. Simulation of collector efficiency based on the number of spoilers[J]. *Proceeding of the Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(9): 178-181.
- [17] 刘一福. 扰流板型太阳能平板空气集热器数值模拟分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2012.  
LIU Yifu. Spoiler solar panels numerical simulation of heat collector[D]. Hengyang: Nanhua University, 2012.
- [18] FISCHER S, PERERS B, BERGQUIST P. Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1/2/3): 117-123.
- [19] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 太阳能空气集热器技术条件: GB/T 26976—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications of solar air collector: GB/T 7714—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [20] 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.  
WANG Linjun, GAO Zhangwei, ZHANG Dong, et al. Thermal performance analysis of a flat plate solar air collector with double channels[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2016, 37(10): 2562-2568.