

# 正弦波纹太阳能空气集热器数值模拟分析

李水莲<sup>1,2</sup>, 马新灵<sup>1</sup>, 魏新利<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州职业技术学院 机械工程系, 河南 郑州 450121)

**摘要:** 利用 CFD 软件对正弦波纹太阳能空气集热器的性能进行数值模拟, 分析了平行模型和垂直模型的优劣: 当流道与波纹平行时, 集热板与空气换热充分, 热损失少, 集热效率比垂直模型的平均集热效率提高了 4.16%; 当流道与波纹垂直时, 由于波谷处死角的影响, 其出口温度比较低、热损失大、换热效率降低. 并分析 U 型、X 型、S 型不同进出口方式下正弦波纹太阳能空气集热器的热性能可知, X 型进出口方式下集热器的出口温度最高, 热损失最小, 压降最小, 平均热效率最高, 可以达到 83.54%.

**关键词:** 正弦波纹形集热板; 平均集热效率; CFD; 数值模拟

**中图分类号:** TK513.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.009

## 0 引言

太阳能空气集热器是一种利用空气为热媒的太阳能加热装置, 可广泛地应用于太阳能采暖、通风、除湿等领域. 最常用的结构形式是平板式太阳能空气集热器, 它具有结构简单、密封要求低、不需要防冻等优点, 但也存在集热效率低、热损失大等缺点. 为了提高太阳能空气集热器的效率, 许多研究者在吸热板和绝缘板之间的空气流道上增设挡板. 如 Yeh Ho-Ming 等<sup>[1]</sup>设计了扰流型太阳能空气集热器; Dursun P<sup>[2]</sup>设计了吸热板带锥体的太阳能空气集热器; Abdul-Malik 和 Ebrahim<sup>[3]</sup>设计了 V 形吸热板的太阳能空气集热器; Matrawy. K. K<sup>[4]</sup>设计了在吸热板和底板之间增加金属叶片的空气集热器; 吕坤<sup>[5]</sup>设计了圆柱阵列太阳能空气集热器; 叶宏等<sup>[6]</sup>对带透明蜂窝的 I 型和 II 型太阳能空气集热器进行了实验研究等等, 在集热器空气流道侧增加扰流板能增加流体在集热器中的流程, 同时扰流板可作为肋片增强传热, 由此提高集热器集热性能. 然而这些装置同样存在集热效率低、热损失大等缺点. 为进一步提高太阳能空气集热器的集热效率, 从改变集热板的形状着手, 设计了一种正弦波纹形太阳能空气集热器, 用数值模拟的方法对其热性能进行了分析研究.

## 1 物理模型

研究对象为正弦波纹形太阳能空气集热器如图 1 所示. 其腔内几何尺寸为 500 mm × 1 000 mm × 120 mm, 所用材料<sup>[7]</sup>底部吸热板为紫铜基底, 表面为选择性黑铬涂层, 对太阳光辐射的总吸收率可达 0.97, 长波辐射发射率仅为 0.1, 四周及底部维护结构均采用 60 mm 厚聚苯板进行绝热, 上部盖板为 4 mm 普通单玻. 正弦波纹吸热板的形状特征参数如下: 波长为 50 mm; 波峰的高度为 10 mm; 吸热板中心位置距离玻璃盖板 80 mm. 空气在吸热板和盖板之间流动, 并且是从高位置往低位置流动, 因为空气受热在热浮升力作用下由低处往高处流动. 空气从高位置往低位置流动时, 冷热空气混合, 吸热板、玻璃盖板及流道的温度分布更均匀.

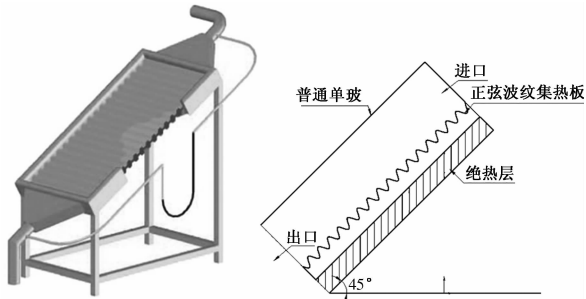


图 1 正弦波纹太阳能空气集热器及其示意图

Fig. 1 Sinusoidal-corrugated solar air collector

收稿日期:2013-11-03; 修订日期:2013-12-12

基金项目:河南省科技攻关计划项目(112102310041)

作者简介:李水莲(1978-),女,河南焦作人,郑州职业技术学院讲师,郑州大学博士研究生,主要从事节能技术的研究, E-mail:lotus427@126.com.

2 计算模型

2.1 建模与网格划分

运用 ICEM 软件建模并进行网格划分,如图 2 所示. 近壁区进行网格加密,无量纲壁面距离  $y^+$  的最大值为 30. 经网格无关性考察,平行模型指空气流道和波纹槽平行,如图 2(a) 所示,计算网

格数为 55 万非结构网格;垂直模型指空气流道和波纹槽垂直,如图 2(b) 所示,计算网格数为 52 万结构网格. 多进口模型是指空气从主进口流入后分 5 个次进口同时进入,然后从 5 个分出口汇聚在一起从主出口流出,计算网格数为 34 万结构网格,如图 2(c) 所示. 多进出口模型根据进出口方式的不同又分为 S 型、U 型和 X 型,如图 3 所示.

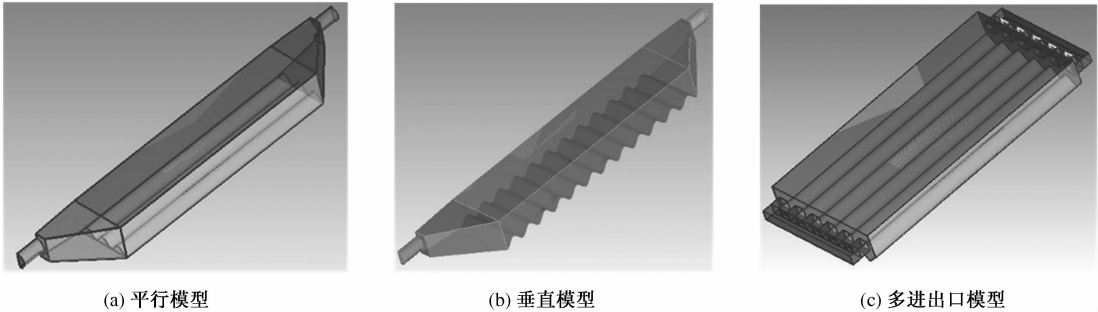


图 2 正弦波纹太阳能空气集热器模型  
Fig. 2 The model of the sinusoidal-corrugated solar air collector

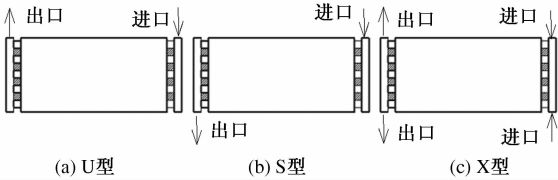


图 3 正弦波纹太阳能空气集热器进出口方式示意图  
Fig. 3 The sinusoidal-corrugated solar air collector with many inlets and outlets

2.2 边界条件及物性

集热器内部流动近似为管道流,通过计算其雷诺数,判断其内部流动为湍流. 湍流模型选取 Realizable  $k-\varepsilon$  模型,该模型在负压力梯度流动、分离流及复杂二次流的预测方面更具有优势. 集热器内部的传热过程主要包括集热板与腔内空气的对流换热,集热板与玻璃盖板的辐射换热,玻璃盖板与两侧空气的对流换热以及玻璃盖板与外界环境的辐射换热. 由于对流换热占主导,所以在模拟时不考虑集热板与玻璃盖板的辐射换热,以及玻璃盖板与外界环境的辐射换热<sup>[8]</sup>. 由于内部空气流速较低,可按不可压流体处理,但温度变化较大并导致密度变化,其物性采用 Boussinesq 假设.

根据 GB/T 50364—2005,集热器倾角应与当地纬度一致:如系统侧重在夏季使用,倾角宜为当地纬度减  $10^{\circ}$ ;如系统侧重在冬季使用,其倾角宜为当地纬度加  $10^{\circ}$ . 郑州处在北纬  $34.44^{\circ}$ ,且系统在冬季使用,因此太阳能空气集热器的放置与水平面有  $45^{\circ}$  夹角,计算时需考虑浮升力影响. 进出

口、集热板、四周维护结构以及玻璃盖板的边界条件及物性如表 1 所示. 其中,  $\rho$  为盖板的密度;  $h_f$  为盖板与空气的对流换热系数;  $c_p$  为盖板的定压比热容;  $t_f$  为环境温度;  $\lambda$  为盖板的导热系数.

表 1 边界条件及物性参数		
Tab. 1 Boundary conditions and physical parameters		
项目	边界条件	物性
入口空气	温度 288 K	Boussinesq 假设
	入口速度 2 m/s	
吸热板	出口边界热流	—
	密度 765 W/m <sup>2</sup>	
透明盖板	混合边界条件	$\rho = 2\,500\text{ kg/m}^3$
	$h_f = 20\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$	$c_p = 800\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
	$t_f = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\lambda = 0.077\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
其它壁面	绝热	—

3 数值模拟结果分析

模拟采用 Fluent 软件包进行计算,对流项的离散格式为二阶迎风,扩散项的离散格式为一阶迎风,采用 Simple 算法. 计算过程中,除能量方程外,其它方程残差下降 5 个数量级.

3.1 不同流动方式下空气集热器性能比较

3.1.1 集热器内部流动特性

由于中截面上(距离集热板 60 mm)的流动受固体壁面的影响最小,因此可以用来反映主体流动特性. 图 4 为不同流动模型中中截面空气迹线图. 由图 4 可知,在垂直模型中,由于波谷和波峰的影响,空气的流动轨迹改变,产生涡流死区,

而涡流死区导致玻璃盖板温度较高,散热损失增大,从而会对集热效率产生不利影响. 因此,消除各种涡流死区是提高集热效率的有效途径之一. 在平行模型中,由于空气流动顺着波谷,所以涡流死区相对较少,集热效率较高.

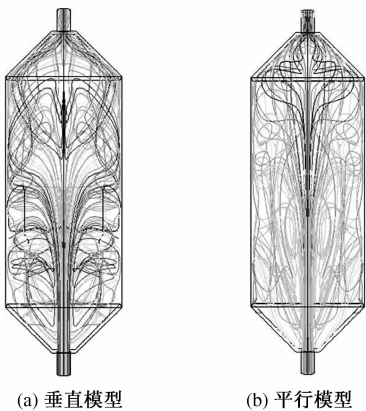


图 4 不同流动模型中截面空气迹线图  
Fig.4 Stream line distribution of center section with different flow model

3.1.2 集热板温度分布

图 5 为不同流动模型下集热板温度分布云图. 由图 5 可知,垂直模型集热板温度分布比较均匀;而平行模型集热板温度分布不均匀,靠近壁面的温度较高,这是由于壁面的阻挡,空气长时间的滞留导致局部温度升高,所以应设法降低平行模型中集热板的局部高温区.

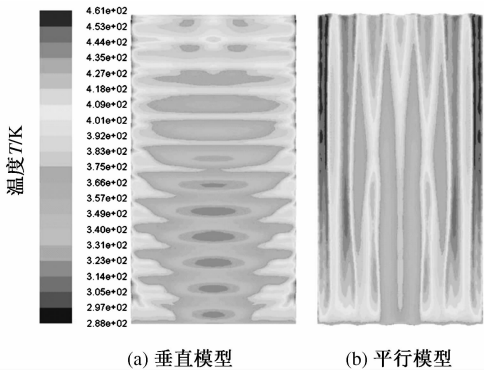


图 5 不同流动模型下集热板温度分布图  
Fig.5 Temperature distribution of absorber plate with different flow model

3.1.3 集热器的性能参数

表 2 是不同类型的正弦波纹集热器性能的综合性能比较. 由表 2 可知,当流道与波纹平行时其集热效率高,原因是这种流动方式下死角少、换热充分. 而当流道与波纹垂直时,由于波谷处死角的影响其换热效率降低;并且平行模型的出口温度

比垂直模型的出口温度高,玻璃盖板平均温度比垂直模型的低,平行模型的热损失少.

表 2 不同型式正弦波纹集热器的性能参数比较  
Tab.2 Comparative analysis on the performance of sinusoidal-corrugated solar air collector with different types

模型类型	出口温度 $T/K$	空气吸热 量 $Q/W$	集热效率 $\eta/\%$	热损失 $q/W$	压降 $P/Pa$
垂直模型	332.11	302.42	75.61	97.57	3.25
平行模型	334.54	319.09	79.77	80.91	3.22
多进口	U 型 332.48	305.00	76.25	95.00	14.79
出口	S 型 331.88	300.82	75.21	99.17	14.70
	X 型 336.74	334.17	83.54	65.82	3.60

3.2 不同进出口方式下集热器性能比较

3.2.1 集热器内部流动特性

图 6 为不同进出口方式下中截面空气迹线图. 由图 6 可知,S 型和 U 型都存在涡流死区,而 X 型涡流死区相对较少,换热更充分,对应的热损失较小(见表 2 数据). 可见,X 型进出口方式比较好.

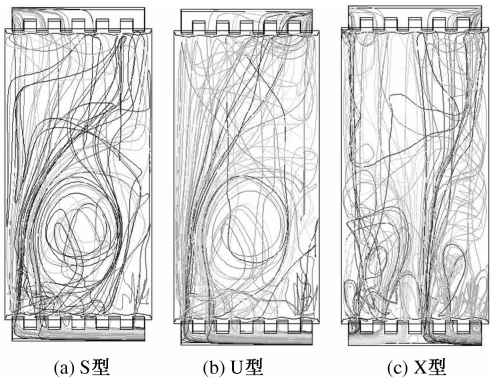


图 6 不同进出口中截面空气迹线图  
Fig.6 Stream line distribution of center section with different types

3.2.2 集热板温度分布

图 7 为不同进出口方式下集热板温度分布云图. 由图 7 可知,S 型和 U 型集热板温度分布不均匀,导致集热板和空气间的换热不充分,热损失增加;X 型集热板温度分布比较均匀,换热充分,热损失相对较小. 表 3 是不同类型的集热器的板温对比. 表 3 也可以验证这点,主要原因还是涡流死区对其影响.

3.2.3 不同类型正弦波纹集热器的参数对比

通过表 2 和表 3 中不同类型的正弦波纹集热器性能的综合比较可知,X 型进出口方式下集热效率最高,出口温度最高,热损失最小,压降最小. 原因是这种方式下空气与集热板的换热最充分,涡流死区最少,空气流动中的阻力最小.

表 3 不同类型的集热器板温对比  
Tab.3 Contrast of the plate temperature with different types of collector K

模型类型	集热板温度			玻璃盖板温度		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均
垂直模型	461.4	314.1	370.4	327.0	291.1	298.0
平行模型	419.3	312.6	373.6	322.3	292.0	296.4
多 进 出 口	U 型	533.2	329.7	380.1	326.8	289.4
	S 型	555.5	330.5	380.2	330.4	288.5
	X 型	547.5	315.2	377.1	337.1	289.3

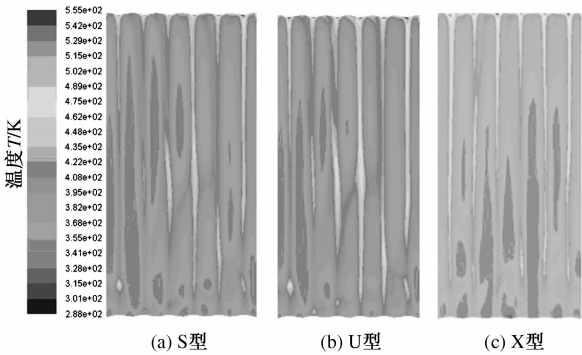


图 7 不同进出口下集热板温度分布图  
Fig.7 Temperature distribution of absorb plate with different types

4 结论

在给定的尺寸和工况参数下,通过对正弦波纹太阳能空气集热器在不同流动方式和不同进出口方式下进行了数值模拟分析.

(1)从流动方式上来说,平行模型比垂直模型的平均集热效率高,原因在于垂直模型的涡流死区较多,热损失大;而平行模型的涡流死区相对

较少,热损失小,效率高.  
(2)从不同进出口方式来看,多进出口模型中的 X 型进出口集热效率最高,压降最小,出口温度最高.  
(3)正弦波纹集热板增加了集热面积,可以进行多次反射和吸收,有利于提高其集热效率.

参考文献:

[1] YEH Ho-ming, LIN T T. The effect of collector aspect ratio on the collector efficiency of flat-plate solar air heaters [J]. Energy, 1995, 20(10): 1041 – 1047.  
[2] DURSUN P. The performance of a solar air heater with conical concentrator under forced convection [J]. Thermal Sciences, 2003, 42 (6):571 – 581.  
[3] ABDUL-MALIK, EBRAHIM. Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate [J]. Heat and Mass Transfer, 2002, 45(16):3383 – 3396.  
[4] MATRAWY K K. Theoretical analysis for an air heater with a box-type absorber [J]. Solar Energy, 1998, 63 (3):191 – 198.  
[5] 吕坤. 圆柱阵列太阳能空气集热器的实验研究 [D]. 青岛:青岛建筑工程学院环境与市政工程学院,2004.  
[6] 叶宏,葛新石. 带透明蜂窝太阳能空气集热的实验研究[J]. 太阳能学报,2003,24(1):27 – 31.  
[7] Hüseyin Benli. Experimentally derived efficiency and exergy analysis of a new solar air heater having different surface shapes[J]. Renewable Energy, 2012, 50: 58 – 67.  
[8] 胡建军,孙喜山,徐进良. 太阳能平板空气集热器内部流动与传热分析[J]. 热能动力工程, 2011, 26(5): 615 – 620.

Numerical Simulation on Thermal Performance of Sinusoidal-corrugated Solar Air Collector

LI Shui-lian<sup>1,2</sup>, MA Xin-ling<sup>1</sup>, WEI Xin-li<sup>1</sup>

(1. School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450121, China)

**Abstract:** The thermal performance of sinusoidal-corrugated solar air collectors was studied by numerical simulation by using CFD software, and the parallel and vertical models were analyzed. When the flow is parallel to the corrugated plate, the heat exchanger between the plate and the air is fully with less heat loss, and the heat collecting efficiency is improved by 4.16% than the vertical model; when the flow is vertical to the corrugated plate, the outlet temperature is relatively low with larger heat loss and low efficiency because of the dead space. The thermal performance in the U type, X type, S type of the sinusoidal-corrugated solar air collector was also analyzed. Results show that type X is the best of three types with the highest outlet temperature, the minimum heat loss and pressure drop, and the average thermal efficiency of collector can reach 83.54%.

**Key words:** sinusoidal-corrugated absorber plate; solar air collector; CFD; numerical simulation