蛇形太阳能空气集热器流道布置的优化分析

贾斌广¹,李晓²,刘芳¹,韩韬¹

(1.山东建筑大学 热能工程学院,山东 济南 250101; 2.山东省产品质量检验研究院,山东 济南 250102)

摘 要:加装扰流板的蛇形太阳能空气集热器是平板式太阳能空气集热器的常见改进形式。文章对上风道、双 风道、下风道蛇形太阳能空气集热器的集热效率和热量损失进行模拟分析。分析结果表明:3种太阳能空气集热 器的集热效率随着测试时间的变化均呈现出先升高后降低的变化趋势;上风道、双风道、下风道蛇形太阳能空 气集热器的平均集热效率分别为 57.53%,64.69%,65.24%,热量损失分别为 429.26,323.97,317.01 W。

关键词:蛇形流道;数值模拟;集热效率;热量损失

中图分类号: TK515 文献标志码: A 文章编号: 1671-5292(2019)01-0034-06

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.01.006

0 引言

太阳能具有储量丰富、分布广泛、清洁无污染 等优点,因此太阳能利用技术成为国内外学者的 研究热点^{[1],[2]}。太阳能空气集热器是一种利用太阳 能加热空气的装置,适用于农产品(种子、水果和 蔬菜等)的干燥^[3]。此外,太阳能空气集热器也适 用于加热带有辅助加热器的建筑物,在冬季能够 减少该建筑物的能源消耗^[4]。

扰流板式太阳能空气集热器内部设置了若干 个扰流板,这样可以延长流体在集热器内的流程。 此外,这些扰流板既可以作为肋片以增加该集热 器内部的传热强度、又可以作为集热板以增大该 集热器的集热面积,从而提高该集热器的集热性 能。蛇形流道太阳能空气集热器是一种常见的 扰流板式太阳能空气集热器,国内外学者对其进 行了大量研究。钱珊珠⁶⁰对不同扰流板数量的蛇 形平板式太阳能空气集热器的集热效率进行研 究,研究结果表明:扰流板数量的增加并不一定能 够提升集热器的集热效率:集热器的集热效率主 要取决于集热器出口流速和内部温升状况。李晓 琳四週设计出一种蛇形双流道平板式太阳能空气 集热器、并通过实验与数值模拟对该集热器的集 热效率进行研究,研究结果表明,当空气流道高度 与整个集热器总高度之间的比例系数为 0.5 时, 该集热器的集热效率比传统平板式太阳能空气集 热器升高了 21.74%。胡建军¹⁹、马龙¹¹⁰共同提出了 具有蛇形流道的开孔折流板式太阳能空气集热

器,并对该集热器集热效率的影响因素进行正交 分析,发现当扰流板开孔数量为5时,该集热器的 集热效率最高,为86.83%。刘一福^[11]对下风道蛇 形太阳能集热器的集热效率进行模拟研究,研究 结果表明,该集热器的最高集热效率为76.81%, 热损系数为3.06 W/(m²·K)。MFEl-khawajah^[12]对 普通蛇形流道太阳能空气集热器的集热板进行改 进,以金属丝网代替集热板,并通过测量发现,改 进后太阳能空气集热器的集热效果较好,最高集 热效率可达到85.9%。

基于以上研究成果,本文对上风道、下风道、 双风道蛇形太阳能集热器的集热效率和热量损失 进行模拟分析,以得到上述参数的影响因素,最终 确定蛇形太阳能空气集热器的最佳结构形式。

1 物理模型

图1为3种太阳能空气集热器结构示意图。



收稿日期: 2018-02-11。

基金项目:国家自然科学基金(51406105)。

通讯作者:刘 芳(1977-),女,博士,副教授,研究方向为多孔介质传热传质、建筑节能以及空气源热泵供暖系统的优化。 E-mail:fliu@sdjzu.edu.cn





图1 3种太阳能空气集热器结构示意图

Fig.1 The structure of snake shaped solar air collector 1-出风口;2-扰流板;3-保温材料;4-进风口;5-透明盖板;6-集热板

3 种太阳能空气集热器中透明盖板、集热板 和保温材料的几何参数、材质及物性参数如表 1 所示。

表 1 3 种太阳能空气集热器中各部件的几何参数、 材质及物性参数

Table 1 Material, geometry and physical properties of the components of the three types solar air collectors

勾称	几何参数	廿居	密度	比热容	导热系数	吸收	透过
省孙	mm	的灰	kg/m³	$J\!/(kg\boldsymbol{\cdot}^{\boldsymbol{\circ}}\!$	$W\!/(m\boldsymbol{\cdot}^{\circ}\!\!\!\!^{\circ}\!\!\!^{\circ}$	率	率
透明盖板	2 000×1 000×4	聚碳酸酯	1 200	1 170	0.24	-	0.9
集热板	2 000×1 000×4	铝	2 719	871	202.4	0.94	-
保温材料	2 000×1 000×50	聚氨酯	45	1 800	0.026	-	_

2 数学模型

为了便于对太阳能空气集热器进行数值模 拟,本文对数学模型作如下假设:空气在太阳能空 气集热器内的流动状态和换热过程为稳态;忽略 太阳能空气集热器外壁面与外界环境之间的辐射 换热,整个系统中仅集热板吸收太阳辐射能;流道 内的空气既是粘性不可压缩流体,又是辐射透明 介质;忽略黏性力做功所引起的耗散热。

在上述假设条件的基础上,空气在太阳能空

气集热器流道内的流动传热规律可以通过连续性 方程、动量方程、能量方程进行描述。为了便于描述上述控制方程,本文建立通用控制方程形式,见 式(1)。

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \phi) + S \quad (1)$$

式中: ρ 为空气的密度, kg/m^3 ; ϕ 为通用变量,该变 量在连续性方程中为 1,在动量方程中为空气的 速度分量 u_i ,在能量方程中为集热板、空气、透明 盖板的温度 T; \vec{u} 为空气的速度矢量; Γ 为广义扩 散系数,该变量在连续性方程中为 0,在动量方程 中为空气的动力粘度 μ ,在能量方程中为 λ/c (即 空气的导热系数与其比热容的比值);S 为广义源 项,该变量在连续性方程中为 0,在动量方程中为 沿 x_i 方向 (x,y,z 轴方向)的压力梯度– $\partial P/\partial x_i$ (P为空气压力),在能量方程中为 0。

由于空气在蛇形太阳能空气集热器内的流动 状态通常以湍流为主,并且空气的流动方向会发 生 180°偏转,从而导致自身与集热器内壁面之间 发生分离,因此在模拟过程中应选用 RNG $k-\varepsilon$ 模 型^[11]。

流道内空气的湍流流动方程为

$$\rho \frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{i}}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{k}}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{\mathrm{i}}} \right] + G_{\mathrm{k}} - \rho \varepsilon \qquad (2)$$

$$\rho \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{i}}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{\mathrm{i}}} \right] + G_{\mathrm{1s}} \frac{\varepsilon}{L} - G_{\mathrm{s}2} \rho \frac{\varepsilon^{2}}{L} \qquad (3)$$

式中: G_k 为由空气平均速度梯度引起的湍动能;k为空气的湍动能; ε 为空气的耗散率; C_{s2}^* 为修正系数; C_{1s},σ_k,σ_s 均为经验常数,分别为1.42,0.72,0.75; μ_i 为空气的模化粘性系数;t为时间。

DO 模型适用于所有光学厚度的数值模型, 并可以解决半透明壁面问题,因此在太阳能空气 集热器的求解过程中宜采用该模型。

DO 模型方程的表达式为

$$\frac{\mathrm{d}I_{\lambda}(\vec{r},\vec{s})}{\mathrm{d}s} + (\alpha_{\lambda} + \sigma_{s})I_{\lambda}(\vec{r},\vec{s}) = \alpha_{\lambda}n^{2}I_{\mathrm{b}\lambda} + \frac{\sigma_{s}}{4\pi} \int_{0}^{4\pi} I_{\lambda}(\vec{r},\vec{s}) \Phi(\vec{s},\vec{s}') \mathrm{d}\Omega$$
(4)

式中: $I_{\lambda}(\dot{r}, \dot{s})$ 为太阳辐射强度; $I_{b\lambda}$ 为集热板的黑体辐射强度, $W/(m^2 \cdot \mu m); \alpha_{\lambda}$ 为集热板的光谱吸收

系数; Ω 为计算微元的立体角,rad; \dot{r} 为太阳光线 的位置向量; \dot{s} 为太阳光线的方向向量; \dot{s} '为太阳 光线的散射方向向量;s 为太阳光线的沿程长度, m;n 为透明盖板对太阳光线的折射指数; σ_s 为斯 蒂芬–波尔兹曼常数, $W/(m^2 \cdot C^4); \Phi(\dot{s}, \dot{s}')$ 为凝聚

相的散射相函数。

3 数值计算

3.1 边界条件及热物性

本文基于济南市 2017 年 10 月 7 日的气象参数,对太阳能空气集热器模型的边界条件作如下 设置。

①太阳能空气集热器的空气入口设置为速度 入口,根据测试日 10:00-14:00 的平均气温,将 空气入口的温度设置为 17 ℃。

②太阳能空气集热器与地面之间的夹角设置 为 45°。

③透明盖板设置为对流换热边界,外界自由 流温度设置为 17 °C,外界空气与透明盖板之间的 对流换热系数 h_w 由经验公式 $h_w=5.4+2.8v^{13}$ 进行 确定。式中:v 为空气流速。通过计算得到本文中 h_w 为 15 W/(m²·°C)。

3.2 求解设置及网格划分

本文采用三维双精度模式进行仿真计算。其 中:速度与压力的耦合采用 SIMPLE 算法进行计 算;其余变量采用二阶迎风差分格式进行计算。基 于以上数学模型的特点,本文采用 TGrid 四面体 非结构性网格对整体模型进行划分。

本文利用双风道蛇形太阳能空气集热器的模 拟结果对模型进行网格无关性验证,模拟结果见 表 2。

	表 2	网格无关性驱	佥证
Table	2 Grid	independence	verification

	网格数/万	空气流量/m ³ ·h ⁻¹	进、出口温度差/℃	吸热量/W	
	61.8	80.6	44.1	955	
	87	80.6	45.6	987	
	115	80.6	46.5	1 006.3	
	172	80.6	46.6	1 009.1	
_					2

本文在模拟过程中,将网格数由 61.8 万逐渐 增加至 172 万。由表 2 可知,当网格数为 115 万 时,双风道蛇形太阳能空气集热器的吸热量比网 格数为 87 万时增加了 1%,因此本文集热器模型 的网格数取 115 万。 3.3 数值算法验证

将本文的模型结果与文献[8]的实验结果进 行对比,见表 3。

表 3 模拟算法验证

Table 3 Simulation algorithm verification

入口	平均太阳辐	出口温度	出口温度	出口温度
温度/℃	照度/W・m ⁻²	测量值/℃	模拟值/℃	相对偏差/%
-12	548	18.6	19.7	5.91%
-11.5	825	25.3	26.5	4.73%
-11	899	30.6	32.1	4.90%
-11	937	29.8	31.7	6.37%
-12	717	25.4	23.9	5.90%

由表 3 可知,在相同的入口温度、太阳辐照度 条件下,利用本文算法得到的出口温度模拟值与 文献[8]的出口温度测试值之间相对偏差的平均 值低于 6%,因此本文的模拟算法比较可靠。

4 结果分析与讨论

上风道、下风道、双风道蛇形太阳能空气集热 器内部空气流场及温度场的分布情况各不相同, 导致这3种空气集热器内部的对流换热特性也存 在显著差别。本文通过分析太阳辐照度和空气流 量对3种空气集热器集热效率的影响,以获得蛇 形太阳能集热器的最佳结构形式。

4.1 太阳辐照度对空气集热器集热效率的影响 太阳能空气集热器集热效率的计算式为

$$\eta = \frac{Q_{\rm u}}{AG} = \frac{mc_{\rm f}(t_{\rm o} - t_{\rm i})}{AG} \tag{5}$$

式中:Q_u为空气所获得的热量;A 为集热器的采 光面积;G 为单位面积集热器所接收到的太阳辐 照度;m 为空气的质量流量;c_f为空气的定压比热 容;t_o为空气的出口温度;t_i为空气的进口温度。

图 2,3 分别为测试日太阳辐照度及 3 种空气





Fig.2 Solar irradiance and collection efficiency of three types solar air collectors with time

· 36 ·





集热器的集热效率、出口温度随时间的变化情 况。

图 2,3 中 3 种空气集热器的进口风量均为 69 m³/h。由图 2 可知,3 种空气集热器的集热效率 均随着太阳辐照度的增大而呈现出逐渐降低的 变化趋势。12:00 时,太阳辐照度最大,3 种空气 集热器的集热效率均达到最小值,该结论与文献 [14]的模拟结果相接近。这是由于在相同进口风 量下,随着太阳辐照度逐渐增大,太阳能空气集 热器内部空气温度逐渐升高,从而增大了该空气 集热器内部空气与外界环境之间的对流换热温 差以及该空气集热器的热量损失,并导致该空气 集热器的集热效率随之降低。实验过程中,上风 道、下风道、双风道蛇形太阳能空气集热器的集 热效率分别变化了 0.98%,3.89%,1.45%,这说明 太阳辐照度对 3 种太阳能空气集热器的集热效 率影响较小。

由图 2,3 还可看出,上风道蛇形太阳能空气 集热器出口温度的平均值比双风道、下风道蛇形 太阳能空气集热器分别降低了 5.74,6.86 °C,上风 道、双风道、下风道蛇形太阳能集热器集热效率 的平均值分别为 57.53%,64.69%,65.24%。综上 可知,双风道、下风道蛇形太阳能空气集热器的 集热效率相接近,上风道蛇形太阳能空气集热器 的集热效率和出口温度均较低。

4.2 进口风量对空气集热器集热效率的影响

图 4 为当太阳辐照度为 826 W/m² 时,3 种空 气集热器的集热效率和出口温度随进口风量的 变化情况。由图 4 可知,随着进口风量逐渐增加, 3 种空气集热器的出口温度均逐渐降低,集热效 率均逐渐升高。这是因为随着进口风量逐渐增



Fig.4 The change of outlet temperature and collection efficiency of three types air collectors with time under different inlet air volume

加,空气掠过集热板的速度逐渐加快,从而逐渐增 强了集热板与空气之间的对流换热强度。同时,随 着进口风量逐渐增加,空气集热器流道内空气的 平均温度逐渐降低,使得空气集热器内部的热量 损失逐渐降低。

由图 4 还可看出、当进口风量为 34.6~69.12 m³/h 时,上风道蛇形太阳能空气集热器的集热效 率最低、下风道蛇形太阳能空气集热器的集热效 率最高,下风道蛇形太阳能空气集热器出口温度 的平均值比双风道、上风道蛇形太阳能空气集热 器分别高出 3.45,9.33 ℃,下风道蛇形太阳能空气 集热器的平均集热效率比双风道、上风道蛇形太 阳能空气集热器分别高出 2.57%,8.73%; 当进口 风量为 69.12~103.68 m³/h 时,双风道蛇形太阳能 空气集热器的出口温度和集热效率较高,其出口 温度的平均值比下风道、双风道蛇形太阳能集热 器分别高出 0.43,4.65 ℃,双风道蛇形太阳能空气 集热器的平均集热效率比下风道、双风道蛇形太 阳能集热器分别高出 0.74%, 7.03%。综上可知, 双 风道蛇形太阳能空气集热器适用于低出口温度的 工况,下风道蛇形太阳能空气集热器适用于高出 口温度的工况,从整体来看,下风道蛇形太阳能空 气集热器的集热效率较高。

4.3 进口风量对空气集热器热量损失的影响

太阳能空气集热器的热量损失主要分为三部 分,分别为顶部透明盖板热量损失(简称为顶部热 量损失)、侧面热量损失和底部热量损失。由于本 文中太阳能空气集热器的底部与侧面均包覆了聚 氨酯保温材料,且这些保温材料均与外界空气相 接触,因此可以将侧面热量损失与底部热量损失

· 37 ·

合在一起,称为保温层热量损失。图 5 为不同进 口风量下 3 种空气集热器内各部分的热量损失。



图 5 不同进口风量下 3 种空气集热器内各部分的 热量损失

Fig.5 Heat loss of three types air collectors at different airflow rates

由图 5 可知,随着风量逐渐增加,3 种空气集 热器的顶部热量损失、保温层热量损失均呈现出 逐渐下降的变化趋势。这与图 4 中随着风量逐渐 增大,太阳能空气集热器集热效率逐渐升高的结 论相符合。双风道、下风道、上风道蛇形太阳能空 气集热器的顶部热量损失与总热量损失的比值分 别为82.88%,84.25%,57.96%(3种空气集热器的 顶部热量损失均超过总热量损失的 50%), 这是 由于透明盖板的导热系数远高于聚氨酯保温材 料,并且为了提高透明盖板的透过率,其厚度通常 小于 10 mm,因此透明盖板的保温性较差,导致 3 种空气集热器的顶部热量损失较大。此外,3种空 气集热器所采用的透明盖板和保温材料均一致, 而下风道蛇形太阳能空气集热器的板架较高,使 得在透明盖板与集热板之间形成了一个空气夹 层,该空气夹层相当于透明的保温材料,因此下风 道蛇形太阳能空气集热器顶部热量损失与总热量 损失的比值较小。此外,通过3种空气集热器顶 部热量损失的变化趋势可以看出,下风道太阳能 空气集热器的顶部热量损失受风量影响较小,上 风道、双风道空气集热器的顶部热量损失受风量 影响较大。这是由于下风道蛇形太阳能空气集热 器内集热板与透明盖板之间存在空气夹层,集热 板的热量需要经过空气夹层并以热传导的方式传 递给透明盖板,然后再向外散失。双风道、上风道 蛇形太阳能空气集热器的透明盖板均与流道内的 空气相接触,流道内的空气以对流换热的方式将 热量传递给透明盖板并向外散失。

由图 5 还可看出,上风道、双风道、下风道蛇

形太阳能空气集热器保温层热量损失的平均值分 别为 194.6,61.26,54.22 W。这是由于上风道蛇形 太阳能空气集热器的集热板紧贴底部保温材料, 集热板的得热量一部分通过对流换热的方式传递 给空气,另一部分通过热传导的方式传递给保温 材料并向外散失。双风道、下风道蛇形太阳能空气 集热器的集热板均与保温材料之间存在间隔,并 形成空气流道,因此对于这两种空气集热器而言, 集热板的得热量先以对流换热的方式传递给空 气,然后空气再以对流换热的方式将热量传递给 保温材料,并向外界散失。综上可知,下风道、双风 道蛇形太阳能空气集热器的保温层热量损失较 小,顶部热量损失较大。

5 结论

本文以3种常见的蛇形太阳能空气集热器为 研究对象,分析了太阳辐照度和进口风量等参数 对上述3种空气集热器集热效率和热量损失的影 响,分析结果如下。

①太阳辐照度对3种空气集热器的集热效率 影响较小;风量对3种空气集热器的集热效率影 响较大,随着风量逐渐增大,3种空气集热器的集 热效率均逐渐升高。

②下风道蛇形太阳能空气集热器的平均集热 效率最高,达到 65.24%,双风道、下风道太阳能空 气集热器的保温层热量损失较小。

③3 种空气集热器的顶部热量损失比较接 近,且顶部热量损失在总热损失中的占比较大,上 风道、下风道、双风道蛇形太阳能空气集热器顶部 热量损失与总热量损失的比值分别为 58.30%, 82.46%,83.92%,因此如何降低顶部热量损失成 为蛇形太阳能空气集热器的研究重点。

参考文献:

- [1] 蒋绿林,张亮,侯亚祥,等.运行模式对土壤源太阳能 热泵垂直埋管换热影响的研究[J].可再生能源, 2016,34(3):347-352.
- [2] 陈红兵,牛浩宇,张磊,等.供热与集热模式下热管式 太阳能 PV/T 热泵系统实验研究 [J]. 可再生能源, 2017,35(12):1791-1797.
- [3] Sreekumar A. Techno –economic analysis of a roof integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables [J].Energy Conversion and Management, 2010,51:2230–2238.

- [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 Conversion and Management, 2011, 52: 2392-2400.
- [5] Moummi N, Youcef-ali S, Moummi A, et al. Energy analysis of a solar air collector with rows of fins [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(10):1043-1053.
- [6] 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):178-203.
- [7] 李晓琳,庄卫东.蛇形双流道平板式太阳能空气集热器的设计与试验[J].黑龙江八一农垦大学学报,2017,29(4):94-98.
- [8] 李晓琳.蛇形双流道平板式太阳能空气集热器设计与 研究[D].鸡西:黑龙江八一农垦大学,2017.

- [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.
- [10] 胡建军,马龙,刘凯彤.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.
- [11] 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.
- [12] M F El-khawajah, L B Y Aldabbagh, F Egelioglu. The effect of using transverse fins on a double pass flow solar air heater using wire mesh as an absorber[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2011, 85:1479-1487.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析--CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [14] 王新彬.寒冷地区村镇学校建筑太阳能采暖技术应用 研究[D].济南:山东建筑大学,2010.

Optimization analysis of flow path arrangement in snake shaped flow path solar air collector

Jia Binguang¹, Li Xiao², Liu Fang¹, Han Tao¹

(1.School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; 2.Shandong Institute of Product Quality Inspection and Research, Ji'nan 250102, China)

Abstract: Snake shaped solar air collectors equipped with spoilers were the common improvement for flat-panel solar air collectors. Through the simulation analysis of the three snake shaped solar collectors of the upper plenum, double plenum and lower leeway, it is obtained that the collection efficiency of the three collectors increases first and then decreases with time. The average efficiency of the snake shaped solar air collectors with three structures of the upper plenum, double plenumand lower leeway was 57.53%, 64.69, 65.24%, respectively. The heat loss was 429.26, 323.97, 317.01 W.

Key words: snake shaped flow path; numerical simulation; heat collection efficiency; heat loss