

铝排管集热器吸收太阳能、空气能和环境能研究

魏毅立,郭静轩

(内蒙古科技大学 内蒙古自治区光热与风能发电重点实验室,内蒙古 包头 014010)

摘要:对无透光和保温材料封装的新型铝排管平板集热器进行吸热特性分析,建立了吸收太阳能、空气能和环境能的数学模型,并分析了流体滞止特性对平板集热器吸收空气能的影响。进一步针对铝排管平板集热器的设计参数,通过 TRNSYS 软件进行仿真。在 TRNSYS 软件中对于影响集热器吸热性能的参数进行了单一变量分析。仿真结果显示:该平板集热器集热效率相比普通集热器大大提高。风速对空气能吸收量影响较大,风速越大,滞止温度越高,空气能吸收量越多;辐射量对太阳能吸收量影响作用明显,但对环境能吸收有减小趋势;集热面积增大和集热器整体性能提升有很大的关联作用;环境温度对环境能吸收量有很大的决定作用;入口流量对集热性能的提升存在峰值影响力,而进口温度的增加会降低集热器的集热效率。该平板集热器通过实际应用表明,其性能与仿真结果相符,且能够大大提高集热器效率。

关键词:平板集热器;太阳能;空气能;环境能

中图分类号:TK519 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.03.032

[引用本文格式]魏毅立,郭静轩.铝排管集热器吸收太阳能、空气能和环境能研究[J].热能动力工程,2020,35(3):220-229. WEI Yi-li, GUO Jing-xuan. Study on the absorption of solar energy, air energy and environmental energy by aluminum tube collector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 220-229.

Study on the Absorption of Solar Energy, Air Energy and Environmental Energy by Aluminum Tube Collector

WEI Yi-li, GUO Jing-xuan

(Key Laboratory of Photothermal and Wind Power Generation in Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, Post Code: 014010)

Abstract: The heat absorption characteristics of a new type of flat plate collector with aluminium exhaust tubes packaged with non-transparent and thermal insulation materials are analyzed. The mathematical models of absorbing solar, air and environmental energy are established. The influence of fluid stagnation characteristics on the air energy absorption of flat plate collector is studied and analyzed. The mathematical model is verified by TRNSYS software. Aiming at the design parameters of flat plate collector with aluminium row tubes, the single variable analysis of the parameters affecting the heat absorption performance of the collector is carried out in TRNSYS software. The results show that the overall collection efficiency of the flat plate collector is much higher than that of the ordinary collector. Wind speed has a great influence on the air energy absorption. The larger the wind speed is, the higher the stagnation temperature is, the more the air energy absorption is. Radiation has a clear effect on the solar energy absorption, but it has a decreasing trend on the environmental energy absorption. The increase of the collector area has a great

收稿日期:2019-08-26; 修订日期:2019-10-25

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2016MS0515);内蒙古自治区科技成果转化项目(CGZH2018151)

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region(2016MS0515), Scientific and Technological Achievements Conversion Project in Inner Mongolia Autonomous Region(CGZH2018151)

作者简介:魏毅立(1962-),男,内蒙古包头人,内蒙古科技大学教授, E-mail:wei3787@sina.cn.

通讯作者:郭静轩(1995-),男,山东省泰安人,内蒙古科技大学硕士研究生, E-mail:1042232666@qq.com.

correlation with the improvement of the overall performance of the collector. The environmental temperature has a great effect on the environmental energy absorption. The inlet flow rate has a peak influence on the improvement of collector performance, and the increase of inlet temperature will reduce the collector efficiency. At the practical application, the performance of the flat plate collector is also consistent with the simulation results, and the efficiency of the collector is greatly improved.

Key words: flat-plate collector, solar energy, air energy, environmental energy

引 言

当前国家的“蓝天保卫战”进入攻坚阶段,清洁能源供暖是供暖的未来发展趋势,清洁能源供暖的研究也在进一步推进。在针对严寒地区供暖问题上,集热器作为清洁能源供暖系统中能量吸收与传递的设备,它的性能优劣与设计参数、材料和外观的设计具有很大关系。对此,许多学者对其中一种使用较多的平板集热器进行了多项研究。

文献[1-2]以集热器的盖板间距、工质流量、入口温度为研究对象,得出了集热器热损失系数和集热效率随三个参数的变化情况。对系统的参数设定、降低热损量和提高集热器效率有一定的指导意义,但存在局限性;文献[3-5]对平板集热器结构进行了改进,并针对集热管间距、工质入口温度和质量流量等进行了定性分析,但缺乏实际的应用研究;文献[6]分析了大气降尘量和降水量对平板集热器盖板透过率的影响作用,但针对的是北京地区,应用范围有所受限。

上述文献中虽都对集热器进行了不同的研究,对于集热器的发展有推动作用,但都缺少对集热器的多种能量吸热性能的研究分析。本文所研究的集热器,是没有透光和保温材料的铝排管平板集热器,该集热器主要应用于太阳能热泵供暖^[7]系统中。在该系统中,铝排管平板集热器裸露在大气中,是热泵供暖系统中能量的输入端,其内部工质运行温度低于环境气温。工质在集热器内吸收热量,在过热度控制之下,集热器输出端输出的过热蒸汽进入压缩机进行增压增温过程后,经末端散热装置用于供暖,再经膨胀阀等装置回流到集热器内完成循环过程。

在工质温度低于环境温度的工况下,可以保证在吸收太阳辐射能的同时,也可以吸收空气传热能

和环境辐射能(以下简称空气能和环境能)。极大地提高集热效率,大幅降低系统运行成本。本文就该铝排管平板集热器,对太阳能、空气能和环境能的吸收性能研究分析。

1 铝排管平板集热器

铝排管平板集热器是一种新型的热泵供暖蒸发器,可同时吸收太阳能、空气能和环境能,集热效率相比于普通的平板集热器提高很多。该平板集热器(蒸发器)单管截面如图 1 所示。

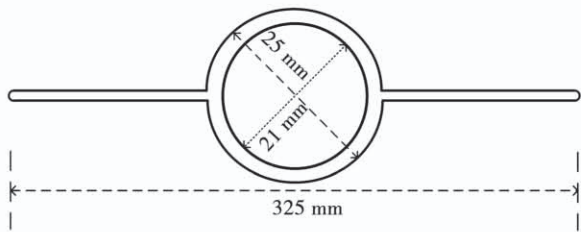


图 1 集热器铝排管单管截面图
Fig. 1 Single section diagram of aluminum collector tube

铝排管平板集热器是由图 1 所示的单管组合而成。管道内径为 21 mm,外径为 25 mm,壁厚 2 mm,翅片厚度 1 mm,翅片长度 150 mm,管道与翅片为一体的单管,单管总宽度为 325 mm。单管与单管之间由相同材料的弯管连接而成,即组成 U 型管。铝排管平板集热器的剖面图与俯视图分别如图 2 和图 3 所示。

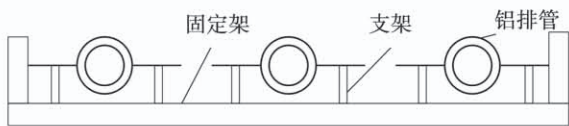


图 2 集热器剖面图
Fig. 2 Collector profile

图 3 ~ 图 4 为微能源网实验平台搭建中应用的

9.15 m² (不包含固定架面积)的平板集热器实物。

对集热器的性能分析,工质选用与太阳能热泵系统的工质相同,都选用 R22 作为制冷剂。虽然在《蒙特利尔议定书》中已经明确规定在未来时间将逐步禁用 R22 制冷剂,但选用其他制冷剂(不包含水)进行代替,在系统运行原理上是相同的,所以在本分析中选用 R22 制冷剂是具有代表性的。

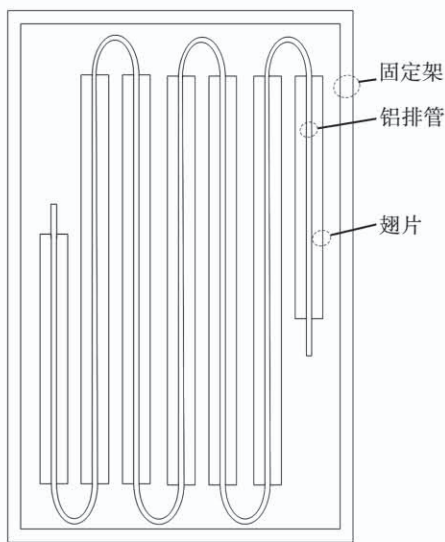


图3 集热器俯视图

Fig.3 Overhead view of collector



图4 铝排管平板集热器

Fig.4 Aluminum tube flat plate collector

系统运行的压-焓图如图5所示。制冷剂在热泵系统运行中可分为4个过程。1到2是在压缩机中完成的过热蒸汽的增压增温过程;2到4是过热蒸汽变为过冷液的冷凝过程;4到5是节流阀的膨胀过程,得到的是饱和气与饱和液的混合物。平板集热器内完成的主要工作,就是图4中直线5到1的过程。集热器作为热量输入端,工质吸收热量后,

由原来的饱和混合状态变为过热蒸汽^[8]。

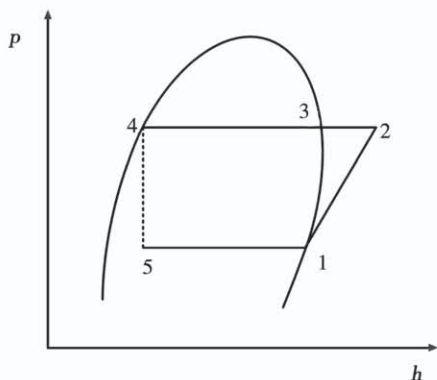


图5 压-焓图

Fig.5 Pressure-enthalpy diagram

集热器的性能在一定程度上对于系统整体的运行效率有关键作用。对集热器进行性能分析,对于提高系统的运行效率,降低运行成本等有很大的推动作用。

2 集热器数学模型

铝排管平板集热器在正常工况下,内部工质运行温度低于环境温度,可同时吸收太阳能、空气能和环境能,大大提高集热效率。

2.1 太阳能吸收量

铝排管平板集热器在稳态工况下的工质运行温度低于环境温度,热损失量为零。集热器对太阳能的吸收量主要由两部分决定,太阳能在集热器表面的总辐射量,还有集热器表面的光学损失量^[9]。运行在稳态工况时,其数学模型为:

$$Q_r = A_a I - Q_{l_0} \quad (1)$$

式中: Q_r —太阳能吸热量, kJ/h; A_a —集热器采光面积, m²; I —集热器表面太阳辐射度, kJ/(h · m²); Q_{l_0} —光学损失量, kJ/h。

铝排管平板集热器的光损失 Q_{l_0} 为:

$$Q_{l_0} = A_a I (1 - \alpha) \quad (2)$$

式中: α —集热器吸热板吸收率。

将式(2)带入式(1)可得到平板集热器太阳能吸热量数学模型:

$$Q_r = A_a I - A_a I (1 - \alpha) = A_a I \alpha \quad (3)$$

2.2 空气能吸收量

对空气能的吸收,在吸热板表面温度低于环境

温度的工况下,吸热板顶部与底部一定会与相邻环境产生对流换热。吸热板从空气中吸收的对流换热量就是空气能的吸收量。空气能吸收量数学模型为:

$$Q_a = Q_{\text{conv},t} + Q_{\text{conv},b} \quad (4)$$

式中: Q_a —空气能吸热量, kJ/h; $Q_{\text{conv},t}$ —顶部对流换热量, kJ/h; $Q_{\text{conv},b}$ —底部对流换热量, kJ/h。

集热器顶部与底部的对流换热量计算模型为:

$$\begin{cases} Q_{\text{conv},t} = A_a h_{t,\text{conv}} (T_e - T_{\text{fpc}}) \\ Q_{\text{conv},b} = A_a h_{b,\text{conv}} (T_e - T_{\text{fpc}}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $h_{t,\text{conv}}$ —顶部对流换热系数, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$; $h_{b,\text{conv}}$ —底部对流换热系数, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{fpc} —集热器表面温度, K; T_e —环境温度, K。

集热器表面与环境的对流换热系数^[10]与风速密切相关的。在无风时,平板集热器与环境的对流换热是因温度不同形成的自然对流换热,在有风的情况下,相当于无相变强制对流换热。表示为风速的一维线性函数形式:

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

式中: h_w —与风速有关的对流换热系数; v_w —风速, m/s 。

集热器顶部与底部的对流换热系数因风向因素会有所不同,引入底部换热系数影响值 μ ,集热器的表面换热系数为:

$$h_{t,\text{conv}} = \mu h_{b,\text{conv}} = h_w = 5.7 + 3.8v_w \quad (7)$$

式中: μ —底部换热系数影响值。

对流换热中,关于环境并且与风速有关的对流换热过程中,忽略风的势能变化,风的动能变化对对流换热是存在一定影响的。根据滞止点特性,在无限接近集热器吸热板表面,绝热且忽略摩擦的条件下,环境温度会上升为滞止温度,它因风在集热器表面的风速突降而产生,滞止温度^[11]为:

$$T_{0e} = T_e + \frac{v_w^2}{2c_{p,a}} \quad (8)$$

式中: T_{0e} —滞止温度, K; $c_{p,a}$ —空气定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

2.3 环境能吸收量

平板集热器的环境能吸收量,即部分空气能和太阳辐射能以外吸收的热能,是与环境和集热器之间的辐射传热系数有关的。参与辐射换热的位置主

要发生在集热器顶部和底部,则辐射换热量数学模型为:

$$Q_e = Q_{e,t} + Q_{e,b} \quad (9)$$

式中: Q_e —辐射换热量, kJ/h; $Q_{e,t}$ —顶部辐射换热量, kJ/h; $Q_{e,b}$ —底部辐射换热量, kJ/h。

由集热器顶部和底部产生的辐射换热量为:

$$\begin{cases} Q_{e,t} = A_a h_{t,e} (T_e - T_{\text{fpc}}) \\ Q_{e,b} = A_a h_{b,e} (T_e - T_{\text{fpc}}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $h_{t,e}$ —顶部辐射换热系数, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$; $h_{b,e}$ —底部辐射换热系数, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

计算集热器顶部与环境的辐射换热^[12]系数时,将天空看做黑体,其数学模型为:

$$h_{t,e} = \varepsilon \sigma \frac{T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{fpc}}^4}{T_e - T_{\text{fpc}}} \quad (11)$$

式中: ε —集热器表面发射率; σ —斯蒂芬玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_{sky} —天空温度, $0.055 2 T_e^{1.5}$ 。

底部辐射换热系数的数学计算模型为:

$$h_{b,e} = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_{es}} - 1} (T_e^2 + T_{\text{fpc}}^2) (T_e + T_{\text{fpc}}) \quad (12)$$

式中: ε_{es} —底部周围环境发射率。

2.4 工质吸热影响系数

集热器集热板吸收的总能量,其中被工质带走的能量决定于铝排管的导热系数与工质在铝排管内的强制对流换热系数。

铝排管的导热系数^[13]:

$$h_{p,\text{cond}} = \left[\frac{F}{2\pi\lambda L} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \right]^{-1} \quad (13)$$

式中: $h_{p,\text{cond}}$ —铝排管导热系数, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$; F —传热面积, m^2 ; λ —材料导热率, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$; L —单管长度, m; D_2 、 D_1 —集热管的外径与内径, m。

工质在管内的强制对流^[14]换热系数为:

$$h_{1,\text{conv}} = (1430 + 23.3T_1 - 0.048T_1^2) v_l^{0.8} D_1^{-0.2} \quad (14)$$

式中: $h_{1,\text{conv}}$ —管内对流换热系数, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_1 —工质平均温度, $^\circ\text{C}$; v_l —工质流速, m/s 。

2.5 集热器总吸收量

在上述分析的基础上,即可根据对太阳能、空气

能和环境能的吸热量,计算出集热器吸热板的总吸热量 Q_u :

$$Q_u = Q_r + Q_a + Q_e$$

(15)

式中: Q_u —集热器总吸热量, kJ/hr。

另外,通过工质的质量流量^[15]也可以计算集热器的总吸热量:

$$Q_u = c_p q_m (T_{fo} - T_{fi})$$

(16)

式中: c_p —工质定压比热容, J/kg · K; q_m —工质质量流量, kg/s; T_{fo} 、 T_{fi} —工质的出口与入口温度, K。

在得到集热器吸热量之后,即可计算出表征集热器吸热能力的重要参数,集热器功率。

3 仿真分析

3.1 仿真参数设置

在 TRNSYS 中对平板集热器进行建模仿真分析,入口工质从无限大空间以恒定流量、恒定温度进入溶液泵,经溶液泵以恒定温度与流量进入集热器,集热器出口工质进入无限大空间,以此方法进行各参数对集热性能的影响分析。

仿真时间为 24 h,初始参数如表 1 所示。

表 1 初始参数

Tab. 1 Initial parameters

项目 1	参数 1	项目 2	参数 2
集热管内径/m	0.021	采光面积/m ²	9.15
集热管外径/m	0.025	风速/m · s ⁻¹	0
入口温度/℃	-20	辐射度/kJ · (h · m ²) ⁻¹	500
流量/kg · s ⁻¹	1.25	环境温度/℃	0
集热器表面吸收率	0.9	集热器表面发射率	0.1
工质	R22	集热器倾角/(°)	45

3.2 风速对集热性能的影响

分析风速对集热性能的影响时,只改变集热器的迎风风速,其他参数均不变,结果如图 6 ~ 图 8 所示。

从图中可以看出,风速的不断提升,总吸收量和集热器功率随空气能吸收量的增加明显增大,因为对流换热系数的增大,顶部和底部的对流换热量增加。集热器表面温度因为集热器吸收的内能增加而增大,在导热系数不变的情况下出口温度增加。环境能吸收量因为表面温度的增大而略微减小。风速改变对太阳能吸收量没有影响。

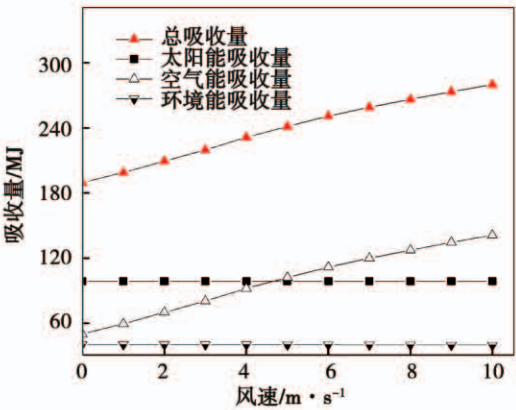


图 6 风速对吸热量的影响

Fig. 6 The influence of wind speed on heat absorption

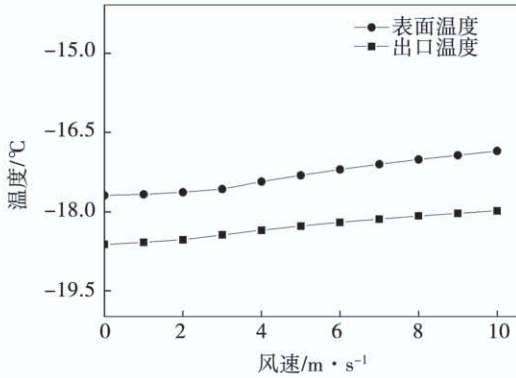


图 7 风速对集热器温度的影响

Fig. 7 The influence of wind speed on collector temperature

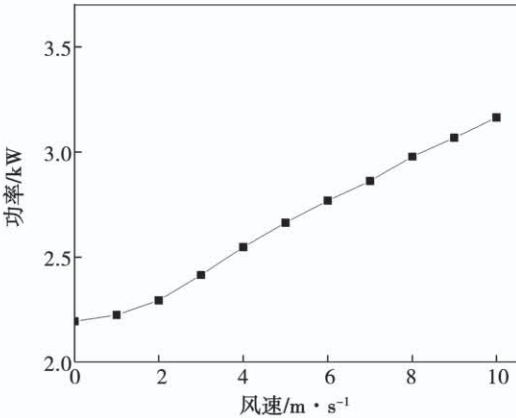


图 8 风速对集热器功率的影响

Fig. 8 The influence of wind speed on collector power

3.3 辐射量对集热性能的影响

只改变集热器采光面的辐射量,其余参数维持初始值不变。结果如图 9 ~ 图 11 所示。

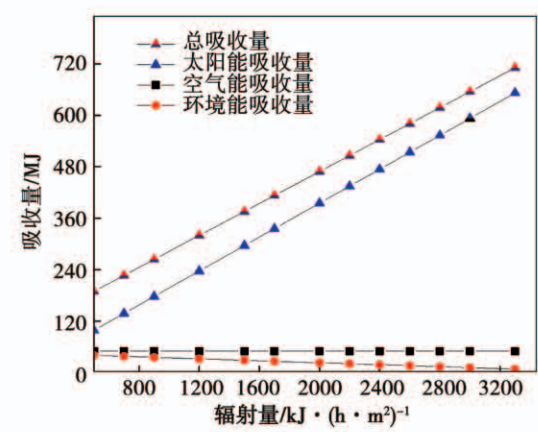


图 9 辐射量对吸热量的影响

Fig.9 The influence of radiation on heat absorption

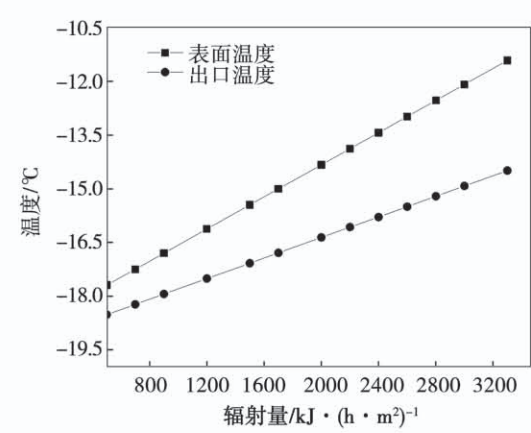


图 10 辐射量对集热器温度的影响

Fig.10 The influence of radiation on collector temperature

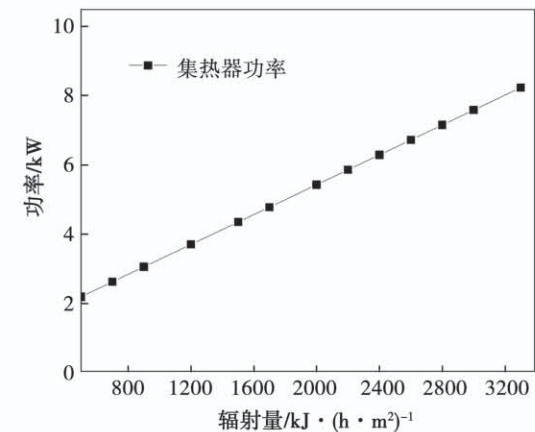


图 11 辐射量对集热器功率的影响

Fig.11 The influence of radiation on collector power

从图中可以看出,辐射量增加对空气能吸收量影响不明显,而集热器功率和总吸收量随着辐射量

的不断增大而增大,集热器表面温度增加。这主要因为辐射量增加之后,集热器表面吸收的太阳能增加较快产生。环境能吸收量因为表面温度的增加,与环境的辐射换热系数减小而减小,但不足以影响总吸收量的增加趋势。

3.4 集热器面积对集热性能的影响

只改变集热器的采光面积,其余参数维持初始值不变。结果如图 12 ~ 图 14 所示。

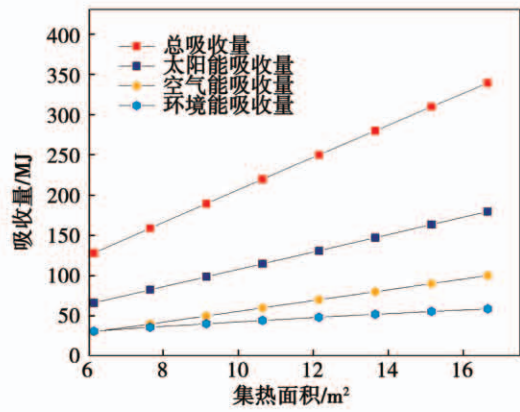


图 12 集热面积对吸热量的影响

Fig.12 The influence of collector area on heat absorption

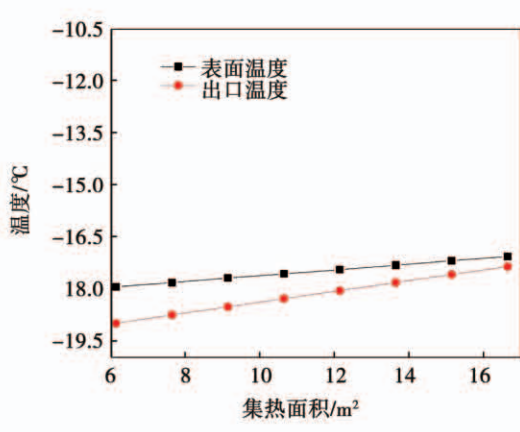


图 13 集热面积对集热器温度的影响

Fig.13 The influence of collector area on collector temperature

从图中可以看出,只改变集热器的集热面积,太阳能吸收量、空气能吸收量和环境能吸收量随着集热面积的增大明显增大,总吸收量也随之增大。但对于环境能来说,虽然随着集热面积的增大,辐射换热面积逐渐增长,因为其辐射换热系数受到表面温度的影响,环境能吸收量增长速度逐渐放缓。

对于出口温度,在入口流量不变的情况下,随着

集热面积的增大,在管内的换热面积增大,工质温度增长较快。增加集热面积对集热器功率的提升作用影响较小。

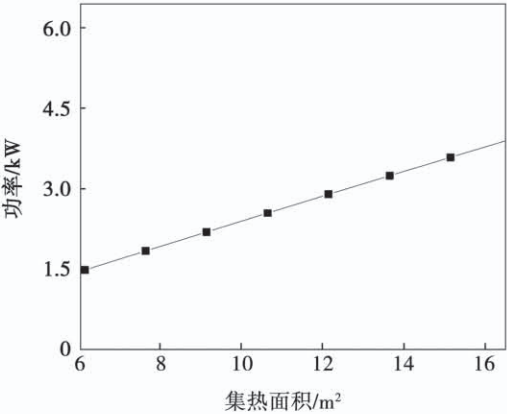


图 14 集热面积对集热器功率的影响

Fig. 14 The influence of collector area on collector power

3.5 环境温度对集热性能的影响

只改变环境温度,其余参数维持初始值不变,环境温度对集热器集热性能的影响如图 15 ~ 图 17 所示。

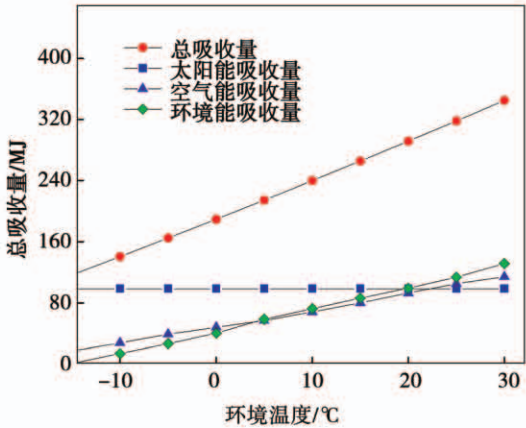


图 15 环境温度对吸热量的影响

Fig. 15 The influence of ambient temperature on heat absorption

从图中可以看出,环境温度的提升对环境能吸收的影响相对对空气能的影响更大,主要因为环境温度的提升对辐射换热系数的增长作用更强产生的。表面温度、出口温度和集热器功率,随集热器表面吸收量的增加而增加。

太阳能吸收量并没有因为环境温度的提升而改变。

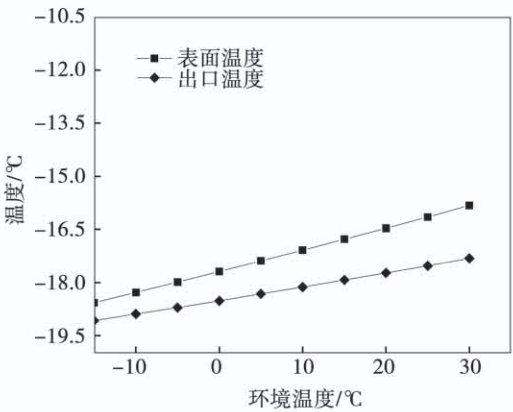


图 16 环境温度对集热器温度的影响

Fig. 16 The influence of ambient temperature on collector temperature

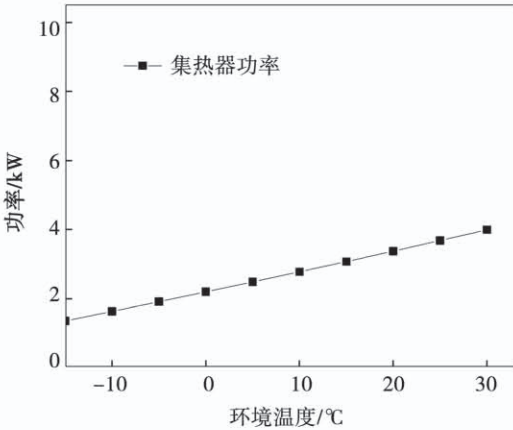


图 17 环境温度对集热器功率的影响

Fig. 17 The influence of ambient temperature on collector power

3.6 入口流量对集热性能的影响

只改变工质的入口流量,其余参数维持初始值不变,集热器的集热性能分析结果如图 18 ~ 图 20 所示。

根据入口流量对集热器性能的影响来看,随着入口流量的增加,表面温度和出口温度降低;空气能吸收量和环境能吸收量增加,总吸收量也增加,但幅值增量都比较小,并且随入口流量的不断增长,增加趋势逐渐平缓。这主要通过入口流量对管内工质的换热系数影响产生。各参量的增长趋势逐渐平稳,说明入口流量对于集热器的性能提升存在一个峰值影响力。

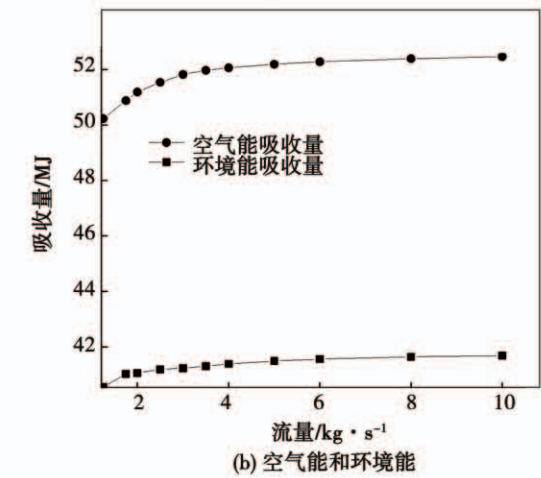
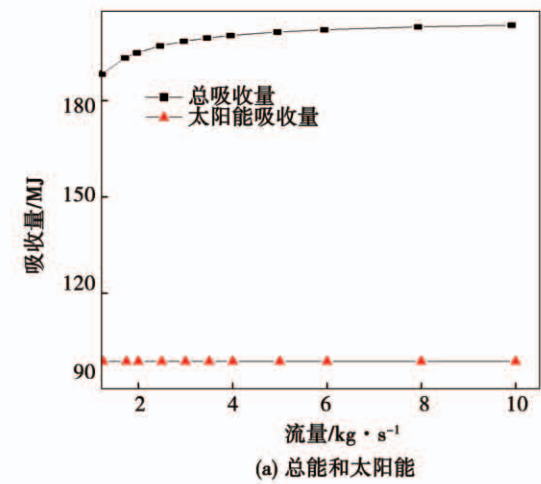


图 18 流量对吸热量的影响

Fig. 18 The influence of flow rate on heat absorption

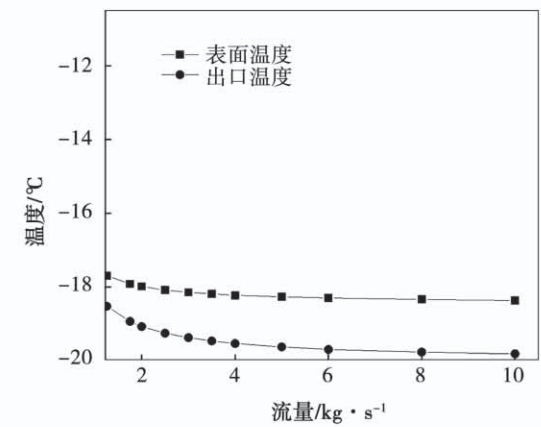


Fig. 19 The influence of flow rate on collector temperature

3.7 进口温度对集热性能的影响

只改变工质的进口温度,环境温度等其它参数维持初始值不变,集热器的集热性能分析结果如图 21 ~ 图 23 所示。

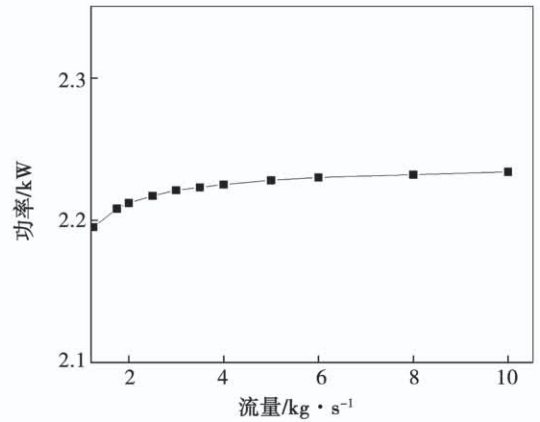


Fig. 20 The influence of flow rate on collector power

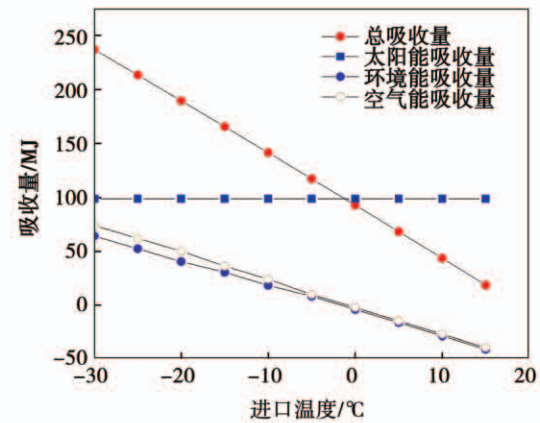


Fig. 21 The influence of inlet temperature on heat absorption

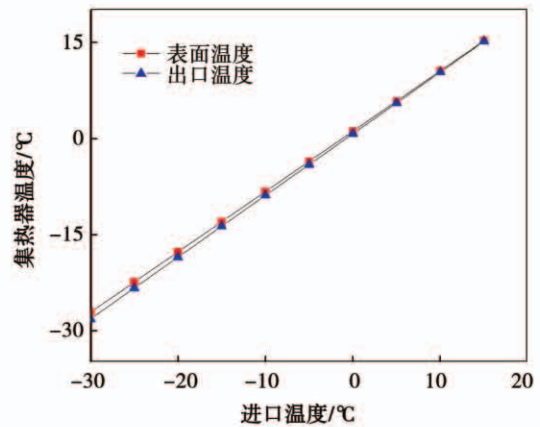


Fig. 22 The influence of inlet temperature on collector temperature

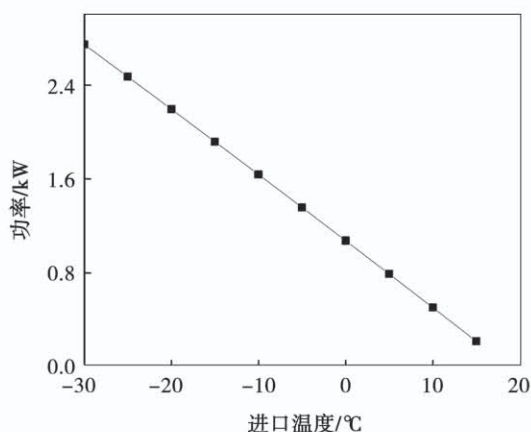


图 23 进口温度对集热器功率的影响

Fig. 23 The influence of inlet temperature on collector power

从图中可以看出,改变集热器的进口温度,对太阳能吸热量没有影响,而总吸热量和集热器功率随着空气能吸收量和环境能吸收量的减小而减小。空气能与环境能吸收量减少的重要原因是因为进口温度的增加,管内对流换热系数降低,集热器与环境温度的差值变小,辐射换热量与对流换热量的大幅降低造成。在进口温度高于环境温度的工况下,辐射换热量和对流换热量成为集热器的热损量,使得集热器吸收量和集热器功率一直降低。

4 结 论

针对铝排管平板集热器的设计参数,对影响铝排管平板集热器集热性能的参数进行了仿真分析,得出结论:

(1) 风速、环境温度、入口流量和进口温度的改变,对太阳能吸收量没有影响。太阳能辐射量的增加、集热器面积的增大和集热器反射率的降低,对太阳能吸收量均会有质的提升。

(2) 集热器空气能吸收量,随风速的增加、环境温度提升、入口流量的增加而增加,其中风速的改变对空气能吸收量的影响最明显。风速越大,滞止温度越高,空气能吸收量也越多。但进口温度的升高,会导致空气能吸收量的减小。

(3) 随着入口流量增加和环境温度的提升,集热器环境能吸收量增加。但入口流量的不断增加,

对于环境能吸收量的提升作用会减弱,并存在最大的吸热量影响值。进口温度的增加会降低集热器的集热效率。

(4) 铝排管平板集热器可同时吸收太阳能、空气能和环境能,且总吸收量为太阳能、空气能和环境能的吸收量总和,可大大提升集热器的集热效率。

参考文献:

- [1] 刘思宇,赵 耀,代彦军. 双层中空玻璃盖板太阳能平板集热器集热性能实验测试研究[J]. 可再生能源,2018,36(8): 1125-1130.
LIU Si-yu, ZHAO Yao, DAI Yan-jun. Experimental research on thermal performance of a solar flat-plate collector with double-glass panels [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(8): 1125-1130.
- [2] 孙自帅,陶汉中,张建东,等. 双层玻璃盖板平板太阳能集热器数值模拟[J]. 热力发电,2016,45(11): 54-60.
SUN Zi-shuai, TAO Han-zhong, ZHANG Jian-dong, et al. Numerical simulation on thermal performance of flat plate solar collector with double glass covers [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 54-60.
- [3] 车永毅,厚彩琴. 太阳能平板集热器关键参数对其热性能的影响[J]. 建筑节能,2016,44(11): 28-33.
CHE Yong-yi, HOU Cai-qin. Effects of key parameters on thermal performance of solar flat-plate collector [J]. Building Energy Efficiency, 2016, 44(11): 28-33.
- [4] 曹丽华,张 来,姜铁熹. 蛇形流道太阳能平板集热器的数值分析[J]. 东北电力大学学报,2018,38(1): 43-48.
CAO Li-hua, ZHANG Lai, JIANG Tie-liu. Numerical analysis on flat-plate solar collector with snake-shaped channel [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(1): 43-48.
- [5] 杨 宾,左德功,赵艺茵. 增效盖板对平板集热器热性能的影响研究[J]. 河北工业大学学报,2016,45(2): 68-73.
YANG Bin, ZUO De-gong, ZHAO Yi-yin. Research of the effect of the efficiency cover plate on the thermal properties of the flat plate collector [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2016, 45(2): 68-73.
- [6] 王 敏,李博佳,徐 伟,等. 大气降尘及降水对平板集热器盖板透过率影响的实验研究[J]. 太阳能学报,2018,39(11): 3053-3059.
WANG Min, LI Bo-jia, XU Wei. experimental study on effect of dustfall and rainfall to cover transmittance of flat-plate solar collectors [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3053-3059.

[7] 魏毅立,邓昊翀,马利斌. 太阳能热泵系统仿真与分析[J]. 实验室研究与探索,2019,38(5):102-106.

WEI Yi-li,DENG Hao-chong,MA Li-bin. Simulation and analysis of solar energy heating pump system[J]. Research and Exploration in Laboratory,2019,38(5):102-106

[8] 魏毅立,王洪明. 独立式太阳能-空气源热泵热风供暖系统的设计[J]. 热能动力工程,2018,33(7):128-134.

WEI Yi-li,WANG Hong-ming. Design of independent heating system with solar and air source heat pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2018,33(7):128-134.

[9] 高 腾. 平板太阳能集热器的传热分析及设计优化[D]. 天津:天津大学,2012.

GAO Teng. Heat transfer analysis and design optimization of flat plat solar collector[D]. Tianjin:Tianjin University,2012.

[10] 杨世铭,陶文铨,传热学[D]. 北京:高等教育出版社,2006.

YANG Shi-ming,TAO Wen-cuo. Heat Transfer [D]. Beijing: Higher Education Pres,2006.

[11] CENGEL YA,BOLES MA. Thermodynamics: An engineering approach[M]. America: McGraw-Hill Education,2011.

[12] 卢 郁,于洪文,丁海成,等. 平板太阳能集热器热性能数学建模及模拟[J]. 济南大学学报(自然科学版),2013,27(3): 293-297.

LU Yu,YU Hong-wen,DING Hai-cheng, et al. Mathematical modeling and simulation of thermal properties of flat-plate solar collector[J]. Journal of University of Jinnan (Sci & Tech), 2013,27(3):293-297.

[13] 陈 东. 热泵技术手册[M]. 北京:化学工业出版社. 2019.

CHEN Dong. Handbook of heat pump technology[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing Hous. 2019.

[14] BADESCU V. Optimum fin geometry in flat plate solar collector systems [J]. Energy Conversion & Management, 2006, 47: 2397-2413.

[15] 赵 斌,冯婧恒,董晓冬,等. 高原槽式太阳能集热器热性能动态实验研究[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2018, 40(4):38-44.

ZHAO Bin,FENG Jing-heng,DONG Xiao-dong. et al. Dynamic experimental research on thermal performance of trough solar collectors in plateau[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition),2018,40(4): 38-44.

(单楚舒 编辑)