

动力技术

蛇形管平板式太阳能集热器的试验研究

李俊贤 王辉涛 王 华 包桂蓉
(昆明理工大学,昆明 650093)

摘 要 为了探寻一种在中高温场合使用的平板式太阳能集热器,设计和开发了小流量、大温差的蛇形管平板式太阳能集热器,并进行了空晒试验和瞬时效率试验。试验结果表明:集热器的空晒温度可达 170.2℃,热损系数为 5.239 W/(m²·℃),载热工质进口温度 70℃时效率 52%—55%。通过对集热器各部分温度变化趋势的比较,提出改进措施,以提高蛇形管平板式集热器在中高温工况下的集热性能。

关键词 太阳能 蛇形管平板式集热器 空晒试验 集热效率

中图法分类号 TK512.2; **文献标志码** A

太阳能是一种可再生的清洁能源,我国太阳能资源十分丰富,绝大多数地区年平均日辐射量在 4 kW·h/(m²·d) 以上。全国有 2/3 以上的地区年辐照量大于 502 万 kJ/m²,年日照时数在 2 000 h 以上^[1]。对太阳能的有效利用,一方面可减少对不可再生能源的消耗,缓解能源短缺及环境污染问题;另一方面可以满足发展分散式能源的要求。

常见的非聚焦太阳能集热器有平板式、真空管式和真空热管式集热器。平板式太阳能集热器以其造价低廉、可承压、不爆管和集热面积大等优点获得广泛的应用;但由于普通平板式集热器热损大,高温段热效率偏低,在太阳能发电有机朗肯循环、制冷空调等场合应用效果不够理想。为此我们设计了一种小流量、大温差的蛇形管平板式太阳能集热器,通过试验测试其空晒温度及其瞬时热效率,分析试验结果,提供改进的措施,使之更好的满足于对太阳能中高温应用的要求。

1 试验装置和测量系统

1.1 集热器

要获取更高的温度和提高平板集热器集热效率,一方面要减小集热器热损,另一方面要增大得热。为此我们设计了以下结构,如图 1 所示(表 1 为集热器的几何尺寸参数):

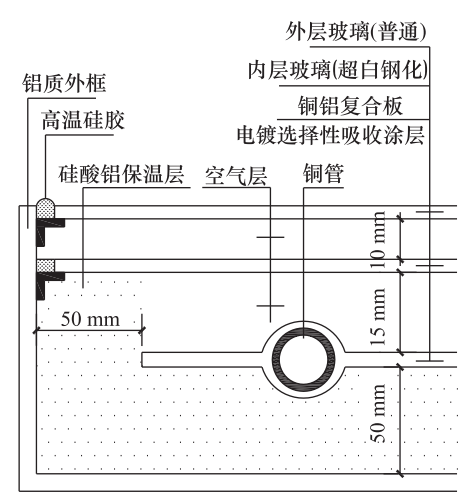


图 1 蛇形管平板式集热器截面图

从图 1 可看出,蛇形管平板式集热器主要由铝质外框、铜铝复合板(吸热板,电镀选择性吸收涂层)、钢化超白玻璃(内层)、普通玻璃(外层)、硅酸

铝保温材料、铜管组成。内通载热工质的铜管通过压合与铜铝复合板联接。

表 1 集热器几何尺寸参数

外形尺寸/mm ³	2 000 × 1 000 × 100
采光面积/m ²	1. 665
保温层厚度/mm	50
铜管间距/mm	140
玻璃间距/mm	10
吸热板至内玻璃间距/mm	15

2.2 试验和测量装置

试验采用导热油 VP—1 作为循环工质,通过高温导热油泵实现强制循环。如图 2 所示。

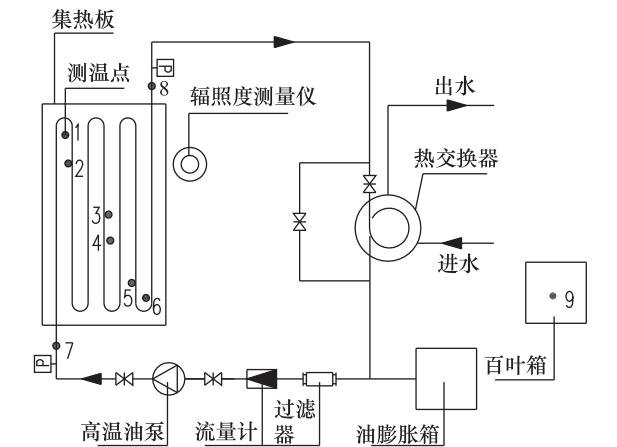


图 2 试验和测量装置图

整个试验系统由油循环系统和测试系统构成,油循环系统包括蛇形管平板集热器、油冷却器、铜阀门、铜管、PVC 管(冷却水管)、高温油泵。测试系统包括:百叶箱、压力表、铂电阻、质量流量计和太阳辐射测量仪组成。系统共设置 9 个测温点,沿吸热板对角线均布 3 个测温点,自吸热板左上角至右下角分别为 2 号、4 号、6 号;沿内玻璃内侧对角线布 2 个测温点,标号自内玻璃内侧左上角至右下角分别为 1 号、5 号;3 号测温点布于外玻璃外侧中心,用于测量外玻璃外侧温度;9 号测温点悬空布置于百叶箱内,百叶箱用纸箱做成,四面用刀切割成百叶状,试验时放置于无太阳直射处,箱体离地面大于 1 m。太阳辐射度和流量的数据分别由太阳辐射测量仪和质量流量计测得,太阳辐射测量仪安装在平

行于集热器板面的支架上,其所测得的值即为集热器采光面所获得的太阳辐照度。表 2、表 3 分别为测试仪表详细参数、集热器的安装环境。

表 2 测试仪表规格

名称	规格
测温仪表	XMT—808 智能温控仪,响应时间: ≤0.5 s 测量精度:0.5 级
热电阻	进口薄膜铂电阻,精度:(1/3) DIN
辐射表	型号:TBQ—2 测试范围:0 ~ 2 000 W/m ²
质量流量计	型号:KLB—CMF1—DN10 温度测量范围:—60 ℃ ~ +200 ℃

表 3 集热器安装环境

地点	昆明理工大学冶能学院屋顶
纬度	25. 04°
经度	102. 73°
海拔	1 891 m
安装方位	正南
安装倾角	20°

3 结果与讨论

3.1 集热器空晒试验

为了验证集热器的最大集热温度,本试验进行了空晒性能测试。对系统充加载热工质前用硅酸铝保温材料包裹集热器进出口管,并把集热器铜管进出口封闭,避免管外与管内空气间的对流对空晒测试结果的影响。

试验时,每 10 min 记录一次 1、2、3、4、5、6、9 测点的温度数据和太阳辐照度数据;取 2、4、6 测点的平均温度为吸热板温度,1、5 测点平均温度为玻璃内侧温度。测试时间 2010-9-16 日 9:40 ~ 17:00,当日天气晴朗,间或少云,微风。结果如图 3 所示。

试验结果表明:(1) 吸热板温度、内玻璃内侧温度、外玻璃外侧温度随着太阳辐照度的变化而变化,且变化幅度依次减小,即吸热板温度随太阳辐照度的变化最大,外玻璃外侧温度随太阳辐照度的变化最小;(2) 在太阳辐照度达到全天最大值

1 285 W/m²,吸热板温度最高温度可达 170.2 °C,吸热板与环境温差最高达 147.4 °C;(3)吸热板温度升高幅度随着太阳辐照度的增大而变得缓慢,这是由于随着板温的升高,热损也随之增大导致的。

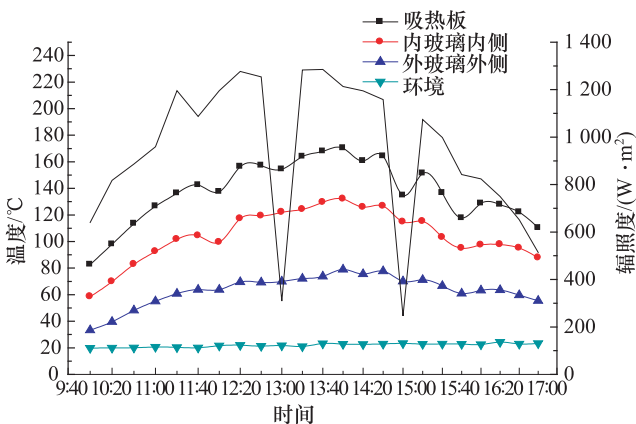


图3 辐照度、温度变化曲线

平板型集热器的热损主要是通过玻璃面板的向外散热。对于双层玻璃组成的面板,当玻璃间的空气隔热层厚度为 20 mm 左右时,热阻最大^[6]。而本集热器面板双层玻璃间空气层厚度仅 10 mm。因此,若增大玻璃间空气层厚度,尚能进一步提高集热器的集热性能。

3.2 瞬时效率试验

3.2.1 试验理论分析

瞬时效率试验可以让我们对集热器的热效率有个定量的了解。本实验通过测得的温度和辐照度参数计算集热器瞬时效率,并拟合出瞬时效率拟合方程,公式推导如下。

以载热流体的进口温度表示的平板型太阳能集热器热平衡方程为:

$$Q_u = A_a F_R [I(\tau\alpha)_e - U_L(T_{f,i} - T_a)] \quad (1)$$

式(1)中:

Q_u —有用的有效收益, W;

A_a —集热器采光面积, m²;

F_R —集热器热转移因子;

I —采光面太阳辐照度, W/m²;

$(\tau\alpha)_e$ —有效透过吸收率;

U_L —集热器总热损系数, W/(m²·K);

$T_{f,i}$ —载热流体进口温度, °C;

T_a —环境温度, °C。

瞬时集热效率为实际获得的有效功率与集热器采光表面接受的太阳辐照度之比:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a I} \quad (2)$$

式(2)中:

η —瞬时集热效率;

式(2)代入式(1)可得:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{T_{f,i} - T_a}{I} = \eta_0 - UT^* \quad (3)$$

式(3)中:

η_0 — $T_{f,i} = T_a$ 时的效率;

T^* —归一化温差, (K·m²)/W;

U —以 T^* 为参考的集热器总热损系数, W/(m²·K)。

实际有用的有效收益计算如下:

$$Q = mc_f \Delta T \quad (4)$$

式(4)中:

m —载热流体质量流量, kg/s;

c_f —载热流体在集热器内平均温度下的比热容, J/(kg·K);

ΔT —载热流体进出口温差, °C;

由试验测得的载热流体进出口温度、载热流体流量、环境温度、太阳辐照度等参数,代入式(3)、式(4)计算得出各离散点的值,通过线性拟合,即可得出以归一化温差为参考的集热器总热损系数。

3.2.2 集热性能测试与分析

测试时间 2010-10-23 日 10:00 ~ 17:00, 当日上午天空无云, 下午少云, 微风, 载热工质流量 (190 ± 10) kg/h。吸热板内各测温点温度、载热流体进出口测温点和环境测温点温度的变化趋势曲线如图 4 所示。

从图 3 中可以看出:

(1) 吸热板温度与载热流体出口温度变化趋势一致, 即吸热板温度的微小变动都会引起载热流体出口温度的变化;

(2) 由于采用了蛇形管设计, 增加了载热流体在集热器内流道长度, 相比于普通平行流道式平板集热器, 载热流体进出口温差较大, 最大温差 11.2 °C;

表 4 蛇形管平板式集热器瞬时效率曲线测试数据

时间	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_a/^\circ\text{C}$	$I/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$m/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	$C_f/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	η	$(T_i - T_a)/I$
10:10	50.2	55.9	20	702	196	1 641	0.435 7	0.043 02
10:20	52.2	59.1	20.6	714	196	1 647	0.520 46	0.044 258
10:30	53.6	61.6	20.4	800	195	1 654	0.538 09	0.041 5
10:40	56	64.5	20.2	862	197	1 660	0.537 98	0.041 531
10:50	58	67.2	20.8	879	183	1 669	0.533 32	0.042 321
11:00	59.4	69	20.3	915	181	1 674	0.530 36	0.042 732
11:10	60.7	70.4	21.2	934	184	1 677	0.534 64	0.042 291
11:20	62.1	71.8	21.9	948	185	1 683	0.531 5	0.042 405
11:30	62.8	73.4	21.2	1 012	183	1 685	0.538 84	0.041 107
11:40	63.5	73	21.8	987	196	1 685	0.530 33	0.042 249
11:50	65	75.6	23.5	1 031	187	1 692	0.542 72	0.040 252
12:00	65.8	76	22.5	1 048	196	1 692	0.538 49	0.041 317
12:10	65.6	75.5	22.6	1 020	195	1 692	0.534 26	0.042 157
12:20	66.1	76.9	23.3	1 057	188	1 695	0.543 2	0.040 492
12:30	67.1	77.6	23.1	1 062	191	1 700	0.535 59	0.041 431
12:40	67.6	78.3	23.4	1 104	198	1 700	0.544 27	0.040 036
12:50	68.2	79.8	24.2	1 137	190	1 700	0.549 77	0.038 698

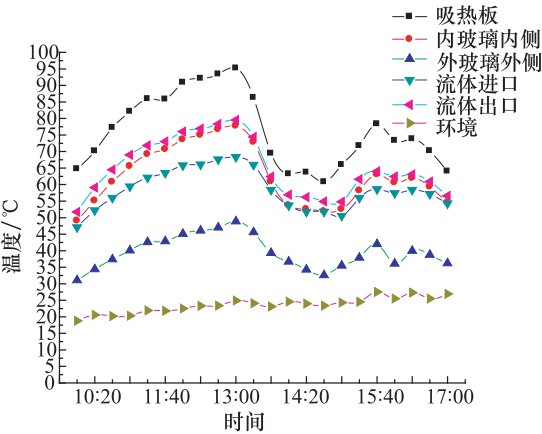


图 4 温度变化曲线

(3) 随着吸热板温的升高,吸热板与流体出口的温差也逐渐增大,最大温差出现于 13:00,此时吸热板达到最大温度,吸热板与载热流体出口的温差为 15.7℃。吸热板与载热流体出口温差较大,其原因为两者间的热阻比较大,因此,采取必要措施提高载热流体出口温度,减小吸热板至载热流体的传

热热阻,以进一步改善集热器性能。可主要通过以下措施来增强吸热板至载热流体的传热性能:(1)使铜管与吸热板压合紧密,尽量避免两者之间出现空气层,达到减少甚至消除接触热阻之目的;(2)增大管内壁对流体的对流换热系数。

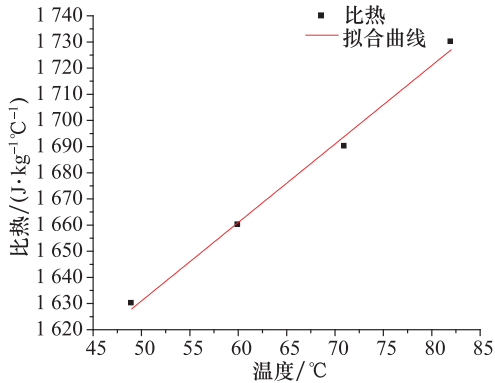


图 5 载热工质 VP—1 比热拟合曲线

3.2.3 集热瞬时效率测试

从图 4 可看出,下午时段太阳辐射不稳定,为了

拟合准确,取 10:10~12:50 的数据,此时段太阳辐照度稳定,阶跃点较少,测试结果列于表 4。

在进行瞬时效率曲线拟合之前进行了以下工作:(1)各时间点数据的选择;从表 4 中可看出,10:10的数据与其他时间点数据差异较大,舍弃;(2)载热工质比热的拟合;由于载热工质 VP—1 的比热分段给出,在瞬时效率方程拟合之前对其比热进行处理,其拟合曲线如图 4 所示;根据各时间点集热器内工质的平均温度查取比热填入表 4。

由表 4 的数据,拟合的集热器效率曲线如图 6 所示。

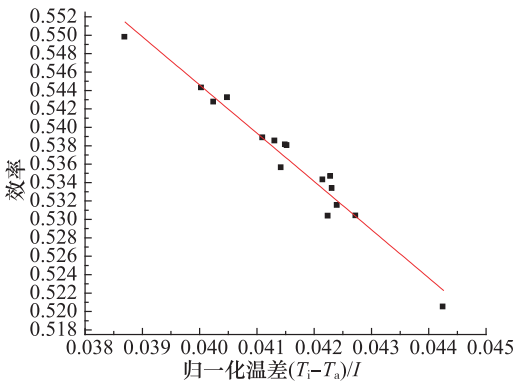


图 6 瞬时效率拟合曲线

拟合得到的集热器瞬时效率方程如式(5)。

$$\eta = 0.754 - 5.239 (T_i - T_a) / I \tag{5}$$

从该瞬时效率方程及特征曲线可以看出:(1)当集热器载热工质进口温度等于环境温度时,吸热板与外界基本无热交换,效率截距 0.754;(2)当集热器载热工质进口温度大于环境温度时,吸热板便对外界散热,效率呈下降趋势,效率曲线斜率 -5.239,即集热器热损系数为 5.239 W/(m²·℃)。进口工质温度越高,环境温度越低,瞬时效率越低,此时高温运行时集热器的性能也就越差。

4 结论

通过对集热器的试验,结果表明:(1)在对集热器的空晒试验时,当太阳辐照度为 1 285 W/m²,集热器空晒温度达到 170.2℃,吸热板与环境温差

147.4℃;(2)在进行负载试验时,当太阳辐照度为 1 137 W/m²,载热流体进出口温差达 11.2℃;吸热板与载热流体出口的温差为 15.7℃。且吸热板温度与载热流体出口温度变化趋势一致。(3)从瞬时效率曲线可以看出,集热器在中高温运行时,效率为 52%—59%;通过对瞬时效率的拟合,得出此平板集热器的热损系数 5.239 W/(m²·℃)。(4)可通过如下措施进一步提高集热器集热性能:①调整玻璃间距,减小吸热板通过面板向环境的散热损失,②减小吸热板至载热流体间的热阻。

由上可知,本论文设计的蛇形管平板式太阳能集热器集热性能优于常规的平板式太阳能集热器;蛇形管式平板集热器保温性能好、载热工质低流量大温差、中高温运行性能较好等优点使其更适合用于有机朗肯循环、制冷空调等场合。

参 考 文 献

1 张金宝. 谈谈太阳能资源分布. 南方农机,1995;3:21—23

2 Saitoh H. Field experiments and analyses on a hybrid solar collector. Applied Thermal Engineering,2003;23:2089—2105

3 Hussein H M S. Theoretical and experimental investigation of wickless heat pipes flat plate solar collector with cross flow heat exchanger. Energy Conversion and Management,2007;48:1266—1272

4 Duffie J A, Beckman W A. Solar energy processes. New York; second ed., Wiley, 1991

5 李骥洪,江 晴. 一种高效平板太阳能集热器试验研究. 太阳能学报,2001;22:131—135

6 孟凡康,殷志祥,闰明慧. 双层玻璃空气层厚度变化对热阻影响的试验研究. 节能,2007;6:54—57

7 Tyagi S K, Wang Shengwei. Exergy analysis and parametric study of concentrating type solar collectors. International Journal of Thermal Sciences,2007;46:1304—1310

8 Luminosu I, Fara L. Determination of the optimal operation mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation. Energy, 2005;30:731—747

9 Gertzos K P, Pnevmatikakis S E. Experimental and numerical study of heat transfer phenomena, inside a flat-plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH), with indirect heat withdrawal. Energy Conversion and Management,2008;49:3104—3115

Experimental Analysis of Serpentine-flow Flat-plate Solar Collector

LI Jun-xian, WANG Hui-tao, WANG Hua, BAO Gui-rong

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China)

[Abstract] A serpentine-flow flat-plate solar collector of small volume and large temperature difference is designed and developed in order to explore the flat-plate solar collector used in high temperature situation. And experiment of stagnation and instantaneous efficiency is carried out. The results shown that stagnation temperature can reach $170.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and heat loss coefficient is $5.239\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Efficiency of solar collector between 52% — 55% when inlet temperature of working fluid is $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. By comparison the temperature trend of various parts of the collector the corrective measure is proposed to improve performance of serpentine-flow flat-plate solar collector in high temperature conditions.

[Key words] solar energy serpentine-flow flat-plate collector experiment of stagnation thermal efficiency

(上接第 1440 页)

The Study on CO₂ Immiscible Mechanism in Low Permeability Reservoir

ZHAO Ming-guo¹, LI Jin-zhu¹, WANG Zhong-bin²

(Key Laboratory of Enhanced Oil & Gas Recovery, Ministry Education¹, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, P. R. China;

Gudao Oil Production Plant of Shengli Oil field², Dongying 257231, P. R. China)

[Abstract] Because Shu101 well area of Daqing Oilfield is low permeability reservoir, with reservoir conditions, through a series of laboratory experiments, the CO₂ flooding mechanism is determined. Research shows that with the increased CO₂ injection, dissolved gas oil ratio, volume expansion coefficient and coefficient increases, viscosity decreases, bound water volume expansion. When injection CO₂ with 27 MPa, 1.484 7 times the volume expansion of oil formation, the residual oil saturation decreased 11.43%, formation of oil viscosity decreases the viscosity of 48.51% to the original, bound water volume expansion 1.132 4 times. At the same time reducing the formation pressure from 27 MPa to the original formation pressure, the expansion will depend on dissolved CO₂ can be taken out of crude oil 15.49%. In addition, after the injection of CO₂, CO₂-formation reduces the interfacial tension of oil, CO₂ can lead light hydrocarbons in the formation of oil extraction and vaporization, thereby improving oil recovery.

[Key words] Daqing Oilfield low permeability reservoir CO₂ immiscible laboratory experiment