

一种 CPC 型热管式太阳能集热器的实验研究

任云锋, 鱼剑琳, 赵华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 将复合抛物面聚光器(CPC)和热管平板式集热器相结合,研究了一种以平面形吸热板为接收器的CPC型热管式太阳能集热器.采用碘钨灯模拟太阳光辐射,在不同辐射强度下,对CPC型热管式太阳能集热器和普通热管平板式太阳能集热器的集热温度、瞬时效率、平均效率及平均热损系数等热性能进行了对比实验研究.研究表明:与普通热管平板式太阳能集热器相比,CPC型热管式太阳能集热器不但提高了集热温度和集热效率,而且降低了热损失.这一研究结果为太阳能集热器的进一步发展提供了有意义的参考.

关键词: 复合抛物面聚光器;热管;太阳能集热器

中图分类号: TK512 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)03-0291-04

Experimental Research on a Compound Parabolic Concentrator Heat Pipe Type Solar Collector

Ren Yunfeng, Yu Jianlin, Zhao Hua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this research a heat pipe type solar collector with compound parabolic concentrator (CPC) was studied, in which CPC was applied to heat pipe flat-plate solar collector with a flat absorbing plate. By using iodine tungsten lamp light to imitate solar radiation, the experimental investigations were conducted for a CPC heat pipe type solar collector and a common heat pipe flat plate solar collector in a room. Under different simulating radiation intensity conditions, the thermal performances comparison of the two types of solar collectors were carried out, including the fluid temperature in collectors, instantaneous collector efficiency, average collector efficiency and average heat loss coefficient. The results indicate that the CPC heat pipe type solar collector not only increases the fluid temperature in collector and instantaneous collector efficiency, but also decreases average heat loss coefficient compared with the heat pipe flat plate solar collector.

Keywords: compound parabolic concentrator; heat pipe; solar collector

太阳能集热器是太阳能制冷系统的关键设备之一,开发新型高效的太阳能集热器对太阳能制冷技术的推广具有重要意义.复合抛物面聚光器(CPC)型热管式太阳能集热器是一种新型的太阳能集热装置.这种集热器应用了CPC聚光技术和热管技术,既可以提高集热温度和集热效率,又可以避免一般集热器的防冻性、结垢性等问题.

Tripanagnostopoulos 等^[1-3]对CPC型集成采

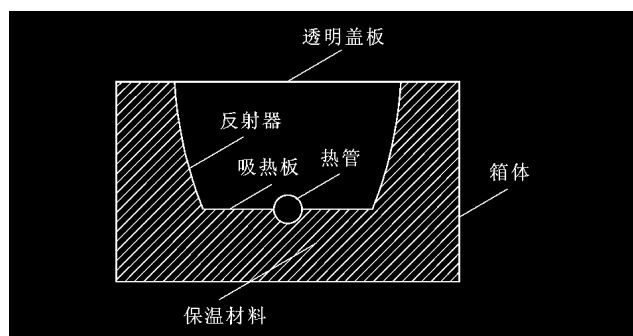
集器系统(ICS)的热性能进行了较深入的理论和实验研究,结果表明,CPC型ICS系统在白天和夜晚都有较好的性能. Ronnelid 等^[4]对CPC型太阳能集热器进行了实验方面的研究,详细分析了反射器、透明热绝缘体等材料的光学和热学性质以及它们的几何布置对热损失的影响. Hussein 等人^[5-6]对热管平板式太阳能集热器进行了较深入的研究,分析了太阳辐射强度、吸热板温度和厚度、冷凝段长度等对瞬

时效率的影响. Ortabasit^[7]和许雪松^[8]等对内聚光CPC型热管真空管式太阳能集热器进行了较深入的研究,通过对集热器进行传热分析,建立了集热器的总热损系数、效率的数学模型,并通过实验进行了验证.对于以平面形热管吸热板为接收器的外聚光CPC型热管式太阳能集热器,目前国内外开展的研究还很少,本文将对这种集热器进行实验研究.

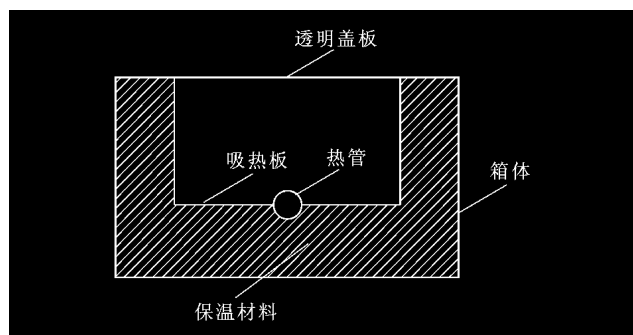
1 实验用集热器的结构

图1a是本文实验采用的只包含单根热管的CPC型热管式集热器的实验单元.类似于一般热管平板式太阳能集热器的结构,将若干个这种单元并联组合在一起,就可作为实际使用的集热器. CPC型热管式集热器主要包括:透明盖板、热管和吸热板、CPC聚光反射器、保温材料、外箱体.其工作原理是:当太阳辐射能透过玻璃盖板后,一部分直接被涂有表面吸收涂层的热管吸热板吸收,另一部分经过CPC聚光反射器反射后再被热管吸热板吸收.热管通过内部工质的相变过程将热量输送给蓄热器.

与内聚光CPC型热管真空管式太阳能集热器相比,这种外聚光CPC型热管式太阳能集热器的优点是结构相对简单,制作成本较低,因此具有一定的实际应用意义.另外,为了与普通热管平板式太阳能集热器对比,本文同时采用了单根热管平板式集热器的实验单元进行对比实验分析,如图1b所示.



(a)CPC型热管式



(b)普通热管平板式

图1 集热器的结构示意图

2 实验装置

CPC型热管式集热器的实验装置示意图见图2.

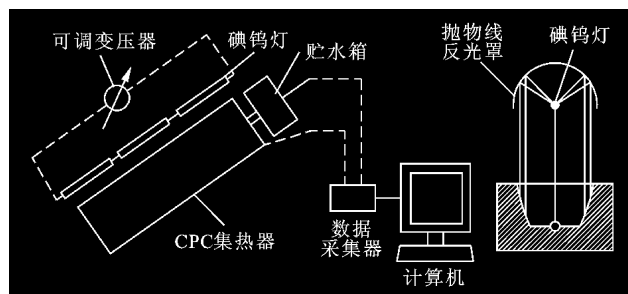


图2 CPC型热管式集热器的实验装置示意图

实验在室内进行,模拟太阳光辐射的装置由3支碘钨灯加上抛物面反光罩组成.实验所模拟的太阳辐射与集热器采光面相垂直,即与聚光器的光轴相平行.通过改变可调变压器的输出电压来控制碘钨灯的功率,以获得集热器采光面上所需的辐射强度.实验测量辐射强度使用的是长春气象仪器厂生产的DFY2型天空辐射表.测量时辐射表置于玻璃盖板上,辐射表的接受辐照的平面与玻璃盖板平面平行.吸热体得到的热量通过热管冷凝段传给贮水箱中的水,从而引起水箱中水温发生变化,通过测试水箱中的水温来计算集热器的热效率.实验中采用铜-康铜热电偶测量温度.采集的数据通过Agilent的数据采集系统34970A连接到计算机,计算机每隔5 min自动采集一次数据.

实验中采用的CPC型热管式集热器的主要结构组成及尺寸如下.

集热器箱体由0.5 mm厚的镀锌铁皮制成,集热面积为730 mm×208 mm.箱体内所使用的保温材料为聚苯乙烯,透明盖板为经过钢化的低铁浮法平板玻璃,厚5 mm.

热管为铜-水重力热管,尺寸根据集热面积设计,其蒸发段长度为730 mm,绝热段长度为100 mm,冷凝段长度为120 mm.热管的直径为22 mm,壁厚为1.25 mm.蒸发段吸热板(铜翅片)厚度为0.4 mm,热管和吸热板组成的吸热体为730 mm×172 mm,吸热体表面涂有黑色的哑光漆.

CPC聚光反射器所用的材料为0.1 mm厚的铝箔,其反射率为0.9,吸收率为0.1.聚光器的聚光比C为1.21(它是将C=1.25的基本CPC的上部平截掉一部分后得到的),其尺寸如图3所示.

用贮水箱做蓄热器,其外型为竖放圆柱体,盛水

2.35 L. 另外,实验中集热器的安装倾角大约为 35° .

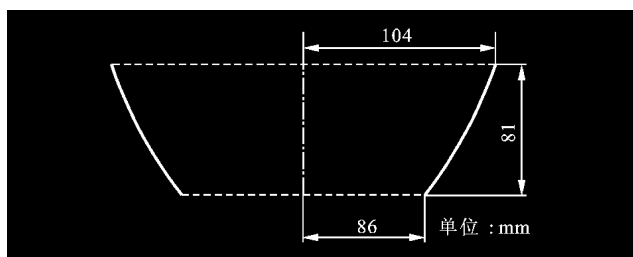


图3 CPC聚光器的尺寸示意图

3 实验结果及讨论

为了探讨CPC型热管式太阳能集热器与普通热管平板式太阳能集热器在热性能上的差异,在室内稳定光照条件下,本文重点实验研究了两种集热器的集热温度、瞬时效率、平均效率及平均热损系数等主要热性能参数。两种集热器采用相同的水箱,其中盛水量皆为2.35 L. 另外,两种集热器的吸热板面积都为 $730\text{ mm} \times 172\text{ mm}$,但两种集热器的采光面积不同,CPC型的采光面积大一些。

3.1 贮水温度的比较

贮水温度是衡量集热器热性能的主要参数之一。为了充分说明两种集热器在贮水温度方面的差异,分别在不同的辐射强度 $I=679, 892\text{ W/m}^2$ 下研究了两种集热器的贮水温度随光照时间的变化规律。

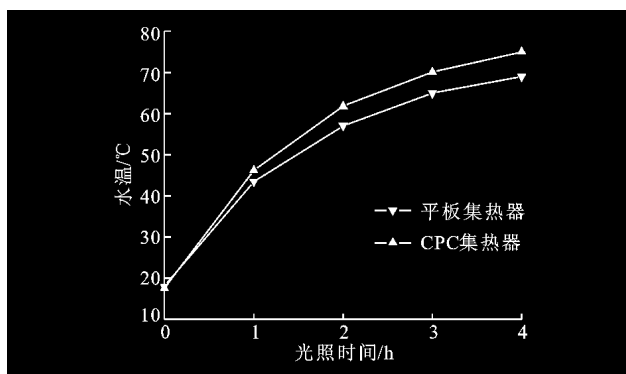
图4a是在 $I=679\text{ W/m}^2$ 的条件下,两种集热器贮水温度随光照时间的变化曲线。从约 18°C 开始,经过4 h的光照后,CPC型热管式太阳能集热器的贮水温度升高到约 75°C ,比普通热管平板式太阳能集热器的贮水温度高出了约 6°C 。

图4b是在 $I=892\text{ W/m}^2$ 的条件下,两种集热器贮水温度随光照时间的变化曲线。从约 15°C 开始,经过4 h的光照后,CPC型热管式太阳能集热器的贮水温度升高到约 91°C ,比普通热管平板式太阳能集热器的贮水温度高出了约 10°C 。

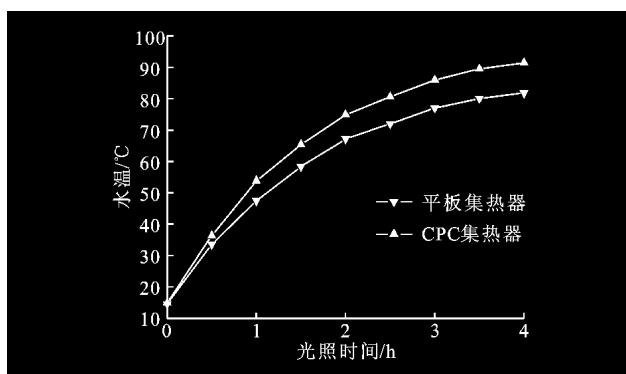
可见,把CPC技术应用到普通热管平板式太阳能集热器上,可以增大吸热板上得到的热流密度,从而可以提高太阳能集热器的集热温度。

3.2 瞬时效率及非稳态效率方程

测试数据时间间隔的不同将影响最终的瞬时效率。从原则上讲,时间间隔越小,应越接近“瞬时”的要求,但考虑到过短的时间间隔将不能引起水箱水温的可测性变化,因此用一段时间的平均效率替代瞬时效率。兼顾到以上各种要求,本文取5 min作为



(a) $I=679\text{ W/m}^2$



(b) $I=892\text{ W/m}^2$

图4 贮水温度随光照时间的变化

测试数据的时间间隔,其计算公式为

$$\eta = \frac{Mc_p(t_{i+1} - t_i)}{A_c I \Delta\tau} \quad (1)$$

式中: η 为瞬时效率; M 为水箱中水的质量,kg; c_p 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t 为水箱内的水温, $^\circ\text{C}$;下标 i 和 $i+1$ 表示前后两个时刻; A_c 为集热器采光面积, m^2 ; $\Delta\tau$ 为测试时间,s。

图5是 η 随 $(t_m - t_a)/I$ 的变化关系图,其中 $t_m = (t_{i+1} + t_i)/2$, t_a 是环境温度。普通热管平板式集热器可用最小二乘法回归得出非稳态效率曲线,而CPC型热管式集热器的非稳态效率曲线一般采用二次曲线拟合^[2-3]。

从上述非稳态效率曲线可以看出:无论何种集热器,随着 $(t_m - t_a)/I$ 的增大,即水温的升高, η 减小。这是由于水温越高,则吸热板温度越高,吸热板对外的热量损失越严重。从整体上看,CPC型热管式太阳能集热器的效率高于普通热管平板式太阳能集热器的效率。

CPC型热管式太阳能集热器拟合所得的非稳态效率方程为

$$\eta_{\text{CPC}} = 0.77 - 6.36 \left(\frac{t_m - t_a}{I} \right) - 66.5 \left(\frac{t_m - t_a}{I} \right)^2 \quad (2)$$

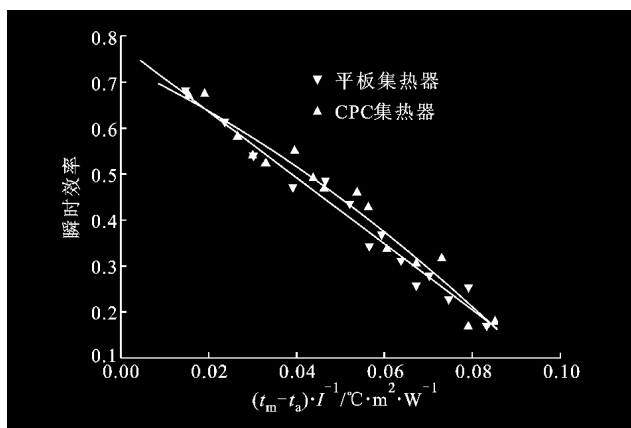
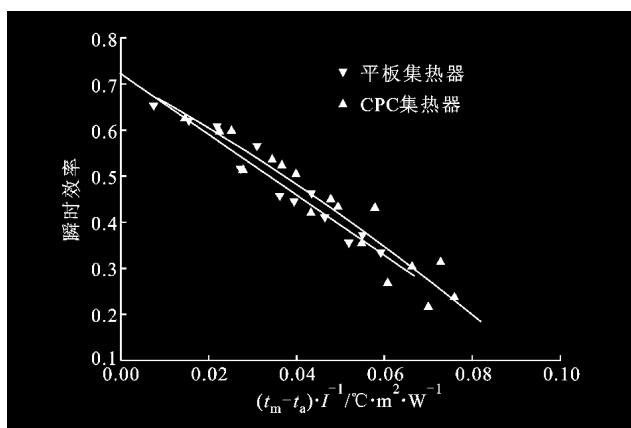
(a) $I=679 \text{ W/m}^2$ (b) $I=892 \text{ W/m}^2$

图5 太阳能集热器的非稳态效率曲线

普通热管平板式太阳能集热器拟合所得的非稳态效率方程为

$$\eta_p = 0.754 - 7.0 \left(\frac{t_m - t_a}{I} \right) \quad (3)$$

3.3 平均效率的比较

集热器的平均效率是其热性能的另一个重要指标. 平均效率是指在有太阳辐照条件下的一定时间内, 太阳能集热器贮水所获得的热量与照射到太阳能集热器采光面上的太阳辐射能量之比. 平均效率可用下式求得

$$\eta_m = \frac{M c_p (t_e - t_s)}{A_c I \Delta \tau} \quad (4)$$

式中: η_m 为一段时间内的平均效率; t_s 为初始贮水温度, $^{\circ}\text{C}$; t_e 为终止贮水温度, $^{\circ}\text{C}$.

两种集热器平均效率的比较见表1.

从表1可以得出: 在 $I=679, 892 \text{ W/m}^2$ 的条件下, 在水温较低 ($30 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 的情况下, CPC型热管式太阳能集热器的平均效率略高于普通热管平板式太阳能集热器; 在水温较高 ($60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上) 的情况下, CPC型热管式太阳能集热器的平均效率比普通热

管平板式太阳能集热器的平均效率约高 30%. 可见, 在集热温度较高时, CPC型热管式太阳能集热器的优势很大.

表1 两种集热器平均效率的比较

$I /$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	贮水温度/ $^{\circ}\text{C}$	η_m	
		普通热管平板式	CPC型热管式
679	30~60	0.517	0.546
	60~75	0.106	0.142
892	30~60	0.560	0.578
	60~85	0.189	0.248

3.4 平均热损系数的比较

平均热损系数是指是在无辐照条件下的一定时间内, 单位时间、单位采光面积的太阳能集热器贮水温度与环境温度之间单位温差平均热量损失, 可用下式求得

$$U_L = \frac{M c_p (t_1 - t_4)}{A_c (t_m - t_a) \Delta \tau} \quad (5)$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad (6)$$

式中: U_L 为平均热损系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; t_m 为平均贮水温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_1 \sim t_4$ 分别代表不同时刻的数据测量值.

当贮水温度大约为 $46 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始记录测试数据, 取 $\Delta \tau = 4 \text{ h} = 14\,400 \text{ s}$, 根据式(5)和(6)计算得到CPC型热管式太阳能集热器和普通热管平板式太阳能集热器的平均热损系数分别为 $5.76, 6.07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

由上述结果可知, CPC型热管式太阳能集热器的平均热损系数小于普通热管平板式太阳能集热器的平均热损系数. 这是因为相对于单位采光面积来说, 前者的吸热板面积小于后者.

4 结 论

本文实验研究结果表明, 将CPC应用到普通热管平板式太阳能集热器中, 则太阳能集热器的热性能可以获得提高. 在同样的辐射强度条件下, CPC型热管式太阳能集热器的集热温度比普通热管平板式的高, 并且随着辐射强度的增加, 提高程度更大. 从瞬时效率和平均效率上看, CPC型热管式太阳能集热器的效率均高于普通热管平板式太阳能集热器的效率. 特别是在集热温度较高时, CPC型热管式太阳能集热器显示了更大的优势.

参考文献:

- [1] Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M, Nousia T H. CPC type integrated collector storage systems[J]. Solar Energy, 2002, 72 (4): 327-350.
- [2] Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M. ICS solar systems with horizontal (E-W) and vertical (N-S) cylindrical water storage tank [J]. Renewable Energy, 2004, 29 (1): 73-96.
- [3] Souliotis M, Tripanagnostopoulos Y. Experimental study of CPC type ICS solar systems[J]. Solar Energy, 2004, 76 (4): 389-408.
- [4] Ronnelid M, Karlsson B. Experimental investigation of heat losses from low-concentrating non-imaging concentrators[J]. Solar Energy, 1996, 57 (2): 93-109.
- [5] Hussein H M S, Mohamad M A, El-Asfour A S. Optimization of a wickless heat pipe flat plate solar collector[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40 (18): 1949-1961.
- [6] Hussein H M S, Mohamad M A, El-Asfour A S. Theoretical analysis of laminar-film condensation heat transfer inside inclined wickless heat pipes flat-plate solar collector[J]. Renewable Energy, 2001, 23 (3/4): 525-535.
- [7] Ortabasit U, Buehl W M. An internal cusp reflector for an evacuated tubular heat pipe solar thermal collector[J]. Solar Energy, 1980, 25 (1): 67-68.
- [8] 许雪松. CPC型热管式真空集热器的研究[D]. 南京: 南京工业大学机械与动力工程学院, 2004.

(编辑 荆树蓉)