

# 新型低热损平板集热器理论模拟和实验研究

王显龙, 廉永旺, 李华山, 姚 远, 王令宝, 卜宪标  
(中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640)

**摘要:**提出一种高效太阳能平板集热器的思路,集热器内部装有透明抑流板减少集热器顶部散热损失。对比分析集热器顶部热量传递过程进行迭代模拟计算。对集热器中抑流板的光学特性进行创新性说明,针对几种不同假设进行模拟,通过对比分析找出符合实验测试结果的说明。理论模拟和实验测试表明,平板集热器的玻璃盖板吸收太阳热,试验台中的透明抑流板的实际光线透过率远远高于其全波长太阳光透过率,使得安装透明抑流板的平板集热器热水器系统的热效率比没有安装的系统高10%左右。

**关键词:**平板集热器;透明抑流板;迭代计算

中图分类号:TK512

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2015)09-0127-04

## Theory Simulation and Test Studying of New Plate Collector with Low Heat Loss

Wang Xianlong, Lian Yongwang, Li Huashan, Yao Yuan, Wang Lingbao, Bu Xianbiao

(Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** To design an efficient solar plate collector with internal transparent limiting convection plate, its top heat loss decrease. Collector top heat transfer process is analyzed by iterative calculation. The optical properties of limiting convection plate is described, based on several different hypotheses heat transfer is simulated with comparison with the experimental results to find the consistent interpretation. Theoretical simulation and test show that the glass cover of plate collector absorb solar heat, and actual ray transmittance of limiting convection plate is more higher than its full wavelength sunlight transmittance, the heat efficiency of solar heat water system with limiting convection plate is higher about 10% than none plate.

**Keywords:** solar plate collector; transparent limiting convection plate; iterative calculation

太阳能热水器是如今应用最为广泛的太阳能产品,仅在中国,太阳能热水器2012年的产量达到 $6390 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,保有量达到 $22070 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

平板集热器具有结构简单,成本低,生产、安装、维护简单,运行稳定安全和寿命长的特点<sup>[1,2]</sup>,在世界各地得到广泛研究和应用<sup>[3-5]</sup>。为提升太阳

能利用率,人们提出一些提高平板集热器效率的思路,例如采用蜂窝盖板、超白玻璃盖板、优质吸收涂层、吸热体整体成型及真空盖板等方式<sup>[6-13]</sup>,这些尝试取得了很好的效果。但是这些研究往往将成本、实用性和效率因素分开考虑,限制了高效产品的推广。

收稿日期:2015-07-08

基金项目:广东省科技计划项目(2013B010405013);广州市产学研合作项目(2013Y2-00091);广东省重大科技专项(No. 2013A011405001, No. 2012A010800024, No. 2013A011404007)。

作者简介:王显龙(1979-),男,内蒙古,助理研究员,硕士,主要从事太阳能热利用和余热利用。  
E-mail: wangxl@ms.giec.ac.cn。

本文设计加工一款加装透明抑流板的高效平板太阳能集热器,减少顶部散热损失,提高热效率。建立传热模型并基于热平衡公式进行对比迭代计算,通过实验测试数据验证新产品性能,对比证明抑流板光学性能的创新性说明。

## 1 实验装置

此次组装的高效平板热水器系统采用自然循环系统,在玻璃盖板和吸热板之间放置一块透明抑流板,另外组装一套无抑流板其他方面完全一致的太阳能热水系统,同时同地进行测量,试验台如图1所示。

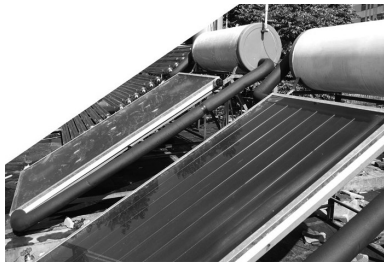


图1 实验台照片

Fig.1 Photo of experimental system

本次组装的两个太阳能热水器系统,循环工质使用自来水。测量参数包括太阳辐射强度、水箱中的水温和环境温度。

## 2 模型和计算

平板集热器采用玻璃盖板密封,内部为腔体自然对流或者空气导热,传热系数可以通过公式计算给出,图2给出两种集热器的热量传递示意图。

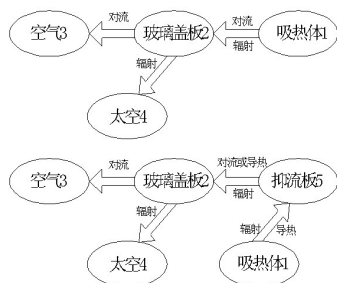


图2 有无透明抑流板的两种集热器顶部散热对比图

Fig.2 Top heat loss contrast of two collectors

### 2.1 系统吸热量计算

无抑流板情况下的有效吸热量:

$$q_{ab} = E \cdot \lambda_1 \cdot \alpha_1 \quad (1)$$

有抑流板情况下的有效得热量:

$$q_{ab} = E \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \alpha_1 \quad (2)$$

其中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\alpha_1$  为已知材料的特性参数,  $E$  通过仪器测量给出。作者认为,参数  $\lambda_2$  的数值不能准确反映本次试验台实际运行的光学特性。太阳光透过玻璃盖板后,某些波段的光线被吸收或者以反射等方式削弱,再经过透明抑流板时,被削弱的太阳光线透过率实际上得到增强,因为  $\lambda_2$  所反映的太阳光透过抑流板被削弱部分的光线已经在  $\lambda_1$  计算中体现,即是说透过玻璃盖板的光线中所含有的最容易被削弱光波段(被吸收或者反射)的含量降低许多,因而透明抑流板的透过光线的被削弱比率大大降低,间接导致抑流板透过率增强。抑流板的太阳光透过率  $\lambda_2$  是全波长太阳光的透过率,在本系统的实际使用过程中,需要透过抑流板的光线并非全波长太阳光,是某些波段已经被削弱或者消失的光谱,因而其透过率发生变化。为验证这种思路,在理论计算中对抑流板透过率分别取值进行计算,结合实验测试结果进行验证。

### 2.2 系统散热量计算

系统散热包括水箱散热、连管散热和集热器散热。两个不同测试系统的集热器散热结构不同,其他两个方面的散热组成一样。集热器散热结构中,两个集热器的背部和侧面散热结构相同,仅仅顶部散热不同,因此仅仅对系统的顶部散热进行对比模拟和计算<sup>[14]</sup>。

无透明抑流板的顶部散热,对玻璃取热平衡:

$$q_{loss} = q_{12l} + q_{12r} = q_{23l} + q_{24r} \quad (3)$$

有透明抑流板的顶部散热,需要对对玻璃和抑流板取热平衡:

$$q_{loss} = q_{15l} + q_{15r} = q_{23l} + q_{24r} = q_{25l} + q_{25r} \quad (4)$$

$$\text{其中, } q_{abl} = h_{ab} \cdot (T_a - T_b) \quad (5)$$

$$q_{abr} = \frac{\sigma \cdot (T_a^4 - T_b^4)}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \quad (6)$$

$$h_{ab} = N_{aLab} \cdot \frac{k_{ab}}{L_{ab}} \quad (7)$$

$$R_{aLab} = \frac{g \cdot \beta_{ab} \cdot (T_a - T_b)}{\alpha_{ab} \cdot \nu_{ab}} \quad (8)$$

$$N_{ul} = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708}{R_{aLab} \cdot \cos \tau} \right]^8 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\tau)^{1.6}}{R_{aLab} \cdot \cos \tau} \right] + \left[ \left( \frac{R_{aLab} \cdot \cos \tau}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^8 \quad (9)$$

在计算  $N_{ul}$  参数的公式(9)中,如果 [ ] 中的计算值为负值,则取零。

针对玻璃盖板和透明抑流板是否吸收部分太阳能和抑流板透过率的变化(采用两种假设,一种情况是透过率与玻璃盖板相同,另外一种情况取抑流板光线透过率为 100%),将公式(5)~(9)按照对应的不同下标而依次分别代入公式(3)和公式(4)中,通过集热器顶部传热计算公式,分别对无抑流板系统的两种情况和有抑流板系统的三种情况进行迭代计算,将计算结果整理如图3和图4。

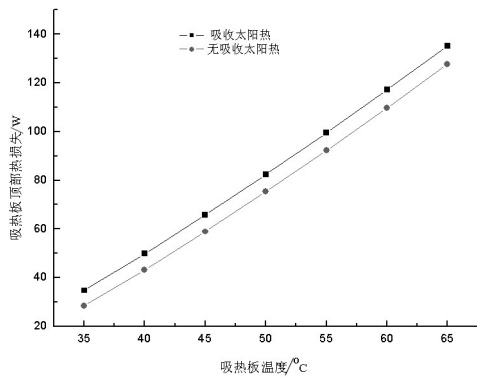


图3 无抑流板的平板集热器顶部散热量

Fig.3 Top heat loss of plate collector with limiting convection plate

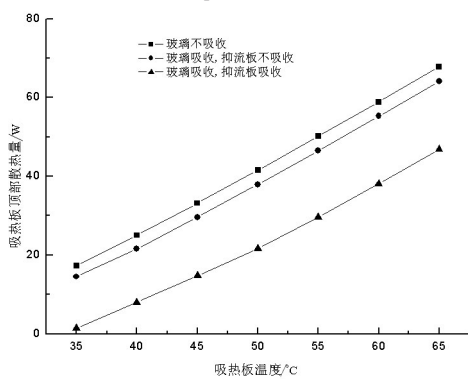


图4 有抑流板的平板集热器顶部散热量

Fig.4 Top heat loss of plate collector without limiting convection plate

计算过程中发现,无抑流板集热器中,吸热板开始升温后短时间内,与玻璃盖板间产生一个较小温差就会导致二者之间的空气散热方式由

导热变为自然对流,换热系数迅速增加。透明抑流板的存在,使得只有在吸热板长时间升温后,温度高于某个数值并继续升温后(此数值远远高于无抑流板集热器的散热方式转变时的温度),在吸热板、抑流板和玻璃盖板间的两个腔体的散热方式由空气导热先后转变为自然对流。因为两个腔体间距不同且其两端温度差别大,两个腔体的散热方式转换所对应的吸热板温度不一致。在吸热板温度相同时,有抑流板集热器顶部的两个腔体的导热或者对流换热系数均低于无抑流板集热器的系数,同时其辐射散热量也因为换热表面数量的增加而降低<sup>[14]</sup>,这两种因素的联合作用,导致抑流板集热器的顶部散热量远远低于同参数下的无抑流板集热器,显示在图中可以看出图4中的散热量的数值远远小于同参数下的图3中的数值。

### 2.3 效率计算

将以上顶部散热计算结果以及连管导热散热和水箱导热散热计算结果带入公式(1)和(2),计算不同情况下的平板集热器的某几个代表性温度点的瞬时热效率,整理结果如图5所示。其中的抑流板吸收太阳热代表计算过程中其透过率按全波长太阳光的透过率进行模拟计算,其透过率按照与盖板同样吸收率计算。

其中的玻璃盖板太阳光吸收率为7%,透过率为80%。抑流板光学特性取值分为两种情况,一种为板吸热是指其光学特性与玻璃盖板一致,另外一种不吸热状况时取光线透过率为100%。

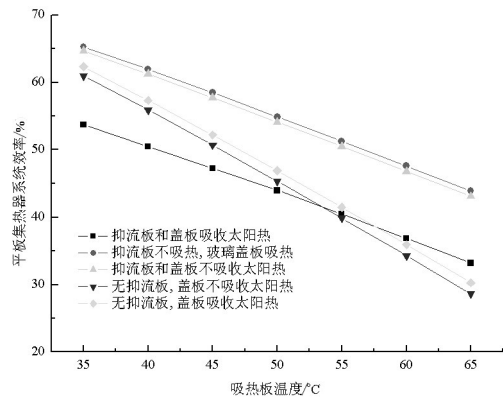


图5 不同假设模拟参数下的集热器瞬时效率

Fig.5 The momentary efficiency of collectors by different given simulated parameter

## 3 实验测试

表1 实验测试数据汇总对比

Table 1 Contrast of test data

测试日期	5月1日		5月2日		5月26日		5月28日		6月5日	
	无板	有板	无板	有板	无板	有板	无板	有板	无板	有板
6点水温/℃	26.1	27.1	44.9	47.7	28	28.5	27.3	27.5	26.7	26.6
热水器效率/%	55.77	64.93	40.98	41.21	53.52	61.77	57.66	66.85	56.62	65.70

试验台可以连续多天对温度、太阳能辐射强度进行记录,通过对几个有代表性的晴天的测量数据进行归纳,如表1所示。

由表1中的数据可以看出,在水箱中的起始水温较低情况下,有抑流板的平板集热器系统太阳能热利用效率高,经过白天8h的日晒(表1效率为从8点到16点的系统效率)效率绝对值高接近10%,相对值高15%~20%。这个结果与图5模拟计算结果中的抑流板和盖板吸收太阳热相反,即是说按照抑流板的太阳光全波长透过率来计算错误的,验证了本文吸热计算章节中的关于抑流板透过率发生变化的说明。

图5中的玻璃盖板不吸收太阳热的假设计算显示,在透过率相同的情况下,玻璃盖板的吸热效果提高系统热效率。

在起始温度较高时(表1中的5月2日情况),有抑流板系统的热热水系统效率稍高于无抑流板系统,导致这种状况状态产生的原因在于有抑流板集热器的起始温度高于无抑流板系统,在运行过程中一直维持此状态,在同一时刻有抑流板系统的除集热器顶部散热外的其他部分的散热要高于无抑流板系统,由此可知集热器顶部散热要远远小于无抑流板系统。

## 4 结论

在玻璃盖板和吸热板之间增加一块透明抑流板的平板集热器,加工工艺简单,成本增加少。使用过程中透明抑流板的太阳光透过率远远高于其全波长太阳光透过率,同时抑流板降低了吸热板顶部换热系数,平板集热器太阳能利用率增加显著。实验测试结果表明,有抑流板太阳能热水器的日热效率比没有抑流板的系统增加10%左右,因为高温时段其他部分散热量增加,使得高温情况下有抑流板系统日热效率增加幅度降低,这些测试数据与几种错误假定排除后的理论模拟结果相吻合。

## 参考文献:

- [1] 王如竹,代彦军.太阳能制冷[M].北京:化学工业出版社,2007,20-28.
- [2] Peragon F C, Palomar J M, Casanova P J, *et al.* Characterization of solar flat plate collectors[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(3): 1709-1720.
- [3] 高腾. 平板太阳能集热器的传热分析及设计优化[D]. 天津大学, 2012: 2-7.
- [4] Luca A T, Federico S, Mattia D R. Dynamic thermal models and CFD analysis for flat-plate thermal solar collectors- A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30(2): 526-537.
- [5] Alvarez A, Cabeza O, Muñiz M C, *et al.* Experimental and numerical investigation of a flat-plate solar collector[J]. *Energy*, 2010, 35(9): 3707-3716.
- [6] 李骞洪,江晴. 一种高效平板太阳能集热器实验研究[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(2): 131-135.
- [7] 吴和英. 蜂窝技术与平板型太阳集热器[J]. *中国科技信息*, 2006, 7: 81-82.
- [8] Chen Z Q, Gu M W, Peng D H. Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(14-15): 1967-1973.
- [9] Maatouk K, Shigenao M. Theoretical approach of a flat-plate solar collector taking into account the absorption and emission within glass cover layer[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(7): 787-794.
- [10] 魏生贤,李明,刘江涛,等. 高效平板集热器件吸热面与透明间距优化[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(9): 1413-1418.
- [11] Akhtar N, Mullick S C. Computation of glass-cover temperatures and top heat loss coefficient of flat-plate solar collectors with double glazing[J]. *Energy*, 2007, 32(7): 1067-1074.
- [12] 魏海波,龚肖南,孙清,等. 真空磁控溅射法沉积平板集热器板芯选择性吸收涂层[J]. *真空*, 2010, 47(3): 5-8.
- [13] 季杰,马进伟,孙炜,等. 一种新型双效太阳能平板集热器的光热性能研究[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(10): 1470-1474.
- [14] 葛新石,叶宏,译. 传热和传质基本原理[M]. 北京:化学工业出版社,2009,342-520.