

文章编号 1004-924X(2016)06-1281-08

## 复合抛物面-渐开线聚光的闷晒式太阳能热水器

史继富<sup>1</sup>, 朱艳青<sup>1,2\*</sup>, 李注苓<sup>1</sup>, 李育坚<sup>1</sup>, 徐刚<sup>1\*</sup>, 季杰<sup>3</sup>

(1. 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  
广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东广州 510640;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科技大学, 安徽合肥 230026)

**摘要:**针对全玻璃真空管与平板太阳能热水器存在系统复杂、成本高、不易维护等缺点,以及传统闷晒式热水器存在集热效率低和热损失严重等问题,提出了一种集热效率高、热损失小、成本低的基于复合抛物面-渐开线聚光的闷晒式太阳能热水器。对复合抛物面、渐开线以及复合抛物面和渐开线二者结合的聚光器进行了优化设计,制作了与该聚光系统配套的带有选择性吸收涂层的集热器水箱。最后,搭建了闷晒式热水器系统并进行了集热性能测试。结果表明,当太阳辐照强度的平均值为 $800\text{ W/m}^2$ 、周围环境的平均温度约为 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 时,闷晒式热水器可以将 $40\text{ L}$ 水从 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 加热至 $62.20\text{ }^\circ\text{C}$ ,系统的瞬时效率截距为 $0.63$ ,热损系数为 $10.40\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。而传统黑色聚乙烯塑料袋闷晒式热水器的瞬时效率截距为 $0.31$ ,热损系数为 $13.32\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ,与其相比,本系统在集热效率和保温性能上有着明显的优势,完全能够满足人们的日常生活用热水,具有良好的市场前景。

**关键词:**太阳能;复合抛物面聚光器;渐开线;闷晒式太阳能热水器;瞬时效率;选择性吸收涂层

**中图分类号:**TK513.1;TK519 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162406.1281

## Novel integrated solar water heater with compound parabolic and involute concentrator

SHI Ji-fu<sup>1</sup>, ZHU Yan-qing<sup>1,2\*</sup>, LI Zhu-ling<sup>1</sup>, LI Yu-jian<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1\*</sup>, JI Jie<sup>3</sup>

(1. *Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*  
3. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zhuyq@ms.giec.ac.cn; xugang@ms.giec.ac.cn*

**Abstract:** A novel integrated solar water heater with compound parabolic and involute concentrator with high heat-collecting efficiency, low heat loss and low cost was introduced, aiming at such disadvantages of all-glass evacuated tubular and flat plate solar water heater as complex system, high cost

**收稿日期:**2016-03-14; **修订日期:**2016-04-11.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51506205);广东省科技计划资助项目(No. 2014A010106018, No. 2013A011401011, No. 2011A032304003);粤港合作项目(No. 2014B050505015);广东省特支计划(No. 2014TQ01N610);中国科学院广州能源研究所所长创新基金资助项目(No. y307p81001);广东省太阳能光热先端材料工程技术研究中心建设项目(No. 2014B090904071);广州市珠江科技新星专项(No. 2014J2200078);中国科学院可再生能源重点实验室基金资助项目(No. y507j41001).

and maintenance inconvenience and such problems of the conventional integral solar water heater as low heat-collecting efficiency and serious heat loss. The optimization design was done for the concentrator of the compound parabolic, involute and the combination of compound parabolic and involute. Then the heat collector tank with selective absorbing coating which is matched with the concentrator system was designed. Finally, the integral solar water heater system was set up and the test for the heat collecting performance was performed. The results show that when the average solar irradiation intensity is  $800 \text{ W/m}^2$  and the average temperature of the ambient environment is about  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , the integral solar water heater can heat 40 L water from  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $62.20 \text{ }^\circ\text{C}$  with the cut length of efficiency of the system is 0.63 and the heat loss coefficient is  $10.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ . However, the cut length of efficiency of the traditional integral solar water heater with black polyethylene plastic bag is 0.31 and the heat loss coefficient is  $13.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ , compared to which, the proposed system has obvious advantage on heat collecting efficiency and thermal insulation properties. Therefore it can fully meet the demands of people for hot water for daily life with good market prospect.

**Key words:** solar energy; compound parabolic concentrator; involute; integral solar water heater; instantaneous efficiency; selective absorbing coating

## 1 引言

随着工业的发展和人口的增长,人类对化石能源的过度消耗以及由此引发的环境污染引起了社会的广泛关注,因此,开发和利用可再生的清洁能源成为亟待解决的问题。作为一种资源丰富的新能源,太阳能具有安全、无污染、且基本不受地理条件限制等优点,因此得到了广泛的研究和应用<sup>[1-5]</sup>。其中,太阳能光热具有转化效率高的优点,是太阳能开发利用的重要方式之一,其代表性器件有太阳能热水器<sup>[6-9]</sup>。太阳能热水器的工作包括两个过程:(1)集热过程:热水器吸收太阳光,将太阳能转化为热能,将水加热;(2)储热过程:被加热的热水进入保温水箱储存。为了得到较高的光热转化效率,需要对集热及储热过程进行优化。

目前,常见的太阳能热水器有全玻璃真空管与平板太阳能热水器,这两种热水器分别通过真空管和平板内的太阳能选择性吸收涂层来实现光热转化。优质的太阳能选择性吸收涂层应当具有高的吸收率( $\alpha > 90\%$ )和低的发射率( $\epsilon < 10\%$ ),以最大限度地吸收太阳光和减少红外热辐射。选择性吸收涂层的性能对集热过程有决定性的影响。加热的水储存在保温水箱内,以减少储存过程的热损失。它们的光热转化效率较高( $50 \sim 60\%$ )<sup>[10-12]</sup>,但由于集热和储热是分开进行的,这两种集热器通常存在系统复杂、成本高、不易维护

等缺点。

闷晒式太阳能热水器是较早出现的热水器,其集热与储热同时进行,具有结构简单、成本低等优点。常见的形式有塑料袋式和浅池式等<sup>[13-16]</sup>。闷晒式热水器通过吸热涂层吸收太阳光,将太阳能转化为热能,并将内部的水加热,热水直接储存在塑料袋或浅池内。在集热过程中,由于结构的限制,闷晒式热水器一般采用黑色塑料(塑料袋式)或黑漆(浅池式)来吸收太阳光,这些材料的发射率比较高( $> 80\%$ )<sup>[18]</sup>,基本等于其吸收率,因此不具有选择性吸收特性,导致热转化效率低;在储热过程中,太阳光一般是从上部照射到热水器上,为了充分吸收太阳光,加快热量传递速度,其上部一般不加保温材料(主要是由于市场上尚无经济性的高透过高保温的材料)。而热水由于密度较小,一般聚集在闷晒式热水器的上部,导致热量损失严重。因此,其光热转化效率( $\sim 30\%$ )明显低于真空管或平板太阳能热水器<sup>[17]</sup>,从而限制了其推广应用。

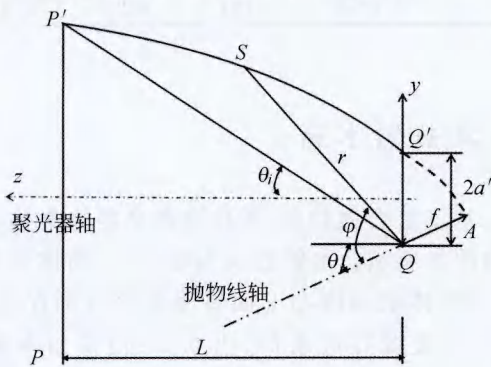
在集热器的下部采用具有高吸收率、低发射率的选择性吸收涂层,实现高的光热转换效率;通过光学设计使得太阳光从闷晒式热水器的下部照射到热水器上,并在集热器的上部及四周进行保温,是闷晒式热水器能够同时实现高效集热与高效储热的途径。因此,本文提出了一种复合聚光的新型闷晒式太阳能集热器,对复合抛物面-渐开线聚光器进行了优化设计,使得吸光面转为下方。

接着对闷晒式水箱的上方和周围进行了良好的保温处理,在闷晒式水箱的下部镀制了高吸收率、低发射率的选择性吸收涂层。最后,搭建了新型闷晒式太阳能集热系统,并对该系统进行了集热性能的测试。

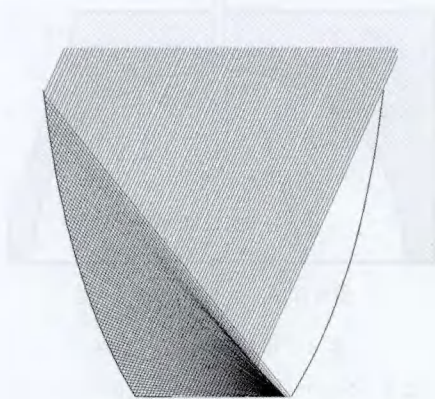
## 2 聚光器设计

### 2.1 复合抛物面聚光器

复合抛物面聚光器 (Compound Parabolic Concentrator, CPC) 是一种基于边缘光学原理的非成像聚光器<sup>[19-25]</sup>,具有最大的理论会聚比,在最大集光角内的光线都不发生返回现象。图 1 所示为 CPC 的设计图和光线追迹图,入射孔径为  $PP'$ 、出射孔径为  $QQ'$ ,边缘光线  $PQ'$  (或  $P'Q$ ) 与聚光器轴构成最大集光半角  $\theta_i$ ,  $P'$  和  $Q'$  之间的 CPC 的形状为抛物线,其轴平行于  $PQ'$ ,焦点位于  $Q$ ,该抛物面可用极坐标  $(r, \varphi)$  表示。



(a)



(b)

图 1 复合抛物面聚光器 (a) 设计图和 (b) 光线追迹图  
Fig. 1 (a) Design and (b) ray tracing diagram of CPC

取出射孔径的中心作为直角坐标系的原点,并沿着聚光器轴取  $z$  轴,可以得到聚光器面形的参量表达式:

$$y = \frac{2a'(1 + \sin \theta_i) \sin(\varphi - \theta_i)}{1 - \cos \varphi} - a', \quad (1)$$

$$z = \frac{2a'(1 + \sin \theta_i) \cos(\varphi - \theta_i)}{1 - \cos \varphi}. \quad (2)$$

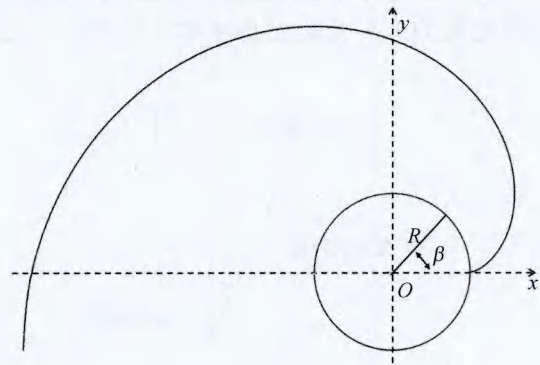
这种聚光器具有最大的集光角和会聚比,但是基于此种聚光方式的集热器无法实现光从下部入射。

### 2.2 渐开线聚光器

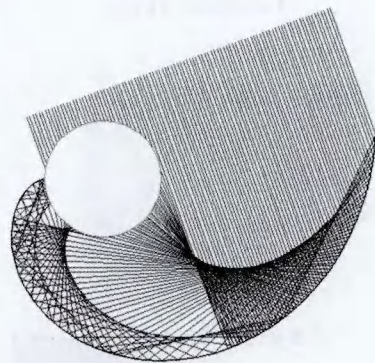
如图 2(a) 所示,基圆的圆心为  $O$ ,半径为  $R$ ,展角为  $\beta$ ,则圆的渐开线参数方程为:

$$x = R(\cos \beta + \beta \sin \beta), \quad (3)$$

$$y = R(\sin \beta - \beta \cos \beta). \quad (4)$$



(a) 数学模型  
(a) Mathematical model



(b) 光线追迹图  
(b) Ray tracing

图 2 渐开线聚光器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of involute concentrator

根据圆的渐开线性质<sup>[26]</sup>,渐开线上任意一点的法线与渐开线的基圆相切,如果以渐开线为反

射面,则入射到渐开线面的光线均能够反射到基圆上,如图 2(b)所示,那么此种聚光器可以使水箱的吸光面转为下方。再在水箱的上部和周围进行保温处理,从而降低热损失。然而其会聚比却有限。

### 2.3 复合抛物面-渐开线聚光器

CPC 具有最大会聚比的优点,可以最大限度地收集太阳光,而渐开线聚光器则可以实现闷晒式热水器的下部集热,因此本文将二者有效地结合起来,在保证较大会聚比的前提下,实现太阳光从水箱的下部照射到水箱上部。CPC-渐开线聚光器结构如图 3 所示,根据 CPC 和渐开线的性质,在 CPC 的最大集光角范围内的光线,均能够从 CPC 的出口到达渐开线形状的曲面上,而经渐开线反射的光线均能反射到基圆上。该设计的最大集光角为 $25^\circ$ ,此集光角基本可以满足一天内

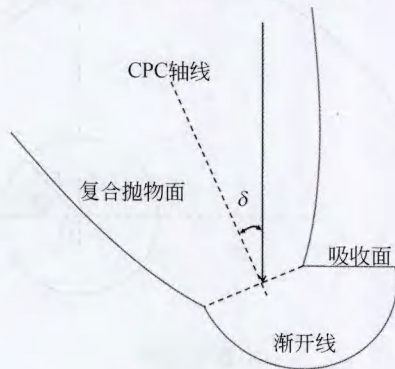
正午时段太阳高度角的变化。吸收面为平面,如图 3(b)所示,仅存在小部分光返回的现象。

利用 Tracepro 软件在不同入射半角  $\delta$  下,模拟了集光效率  $g$ ,结果如表 1 所示。可以看出,在本文设计的最大入射半角  $12.5^\circ$  内,集光效率相对较高,可达 88%;但当  $\delta > 12.5^\circ$  时,效率急剧下降,且在入射半角为  $20^\circ$  时,集光效率下降到 40%。使用时,CPC 集光角对应于太阳高度角的变化,由于一天中太阳高度角的变化较小,以广州夏至这一天为例,10:00~14:00 的高度角为  $62^\circ \sim 89^\circ$ ,变化值仅为  $27^\circ$ ,大部分太阳光能够集中在系统的最大集光角内。

表 1 在不同入射半角下集光效率的模拟结果

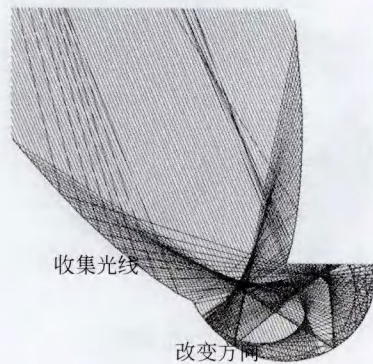
Tab. 1 Simulation results of collect light efficiency at different incident angles

$\delta/(\circ)$	0	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 20$
$g/\%$	88	87 (75)	86 (73)	45 (42)	40 (38)



(a) 设计图

(a) Design scheme



(b) 光线追迹图

(b) Ray tracing

图 3 复合抛物面-渐开线聚光器

Fig. 3 Schematic diagram of compound parabolic and involute concentrator

### 3 集热器水箱

基于复合抛物面-渐开线聚光器的集热器水箱如图 4 所示。水箱底面为吸光面,筒体为半圆形,在筒体的周围和上面有厚的聚氨酯保温层。另外,还设置有进水口、出水口、溢流口和温度探头。

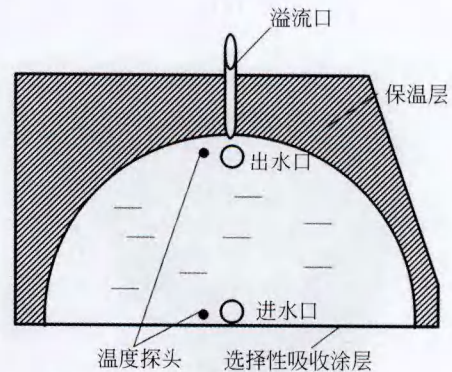


图 4 集热器水箱示意图

Fig. 4 Schematic diagram of collector tank

为了提高太阳能的光热转换效率,采用磁控溅射方法在集热器水箱底面制备了 Nb-Si-N 基太阳能选择性吸收涂层<sup>[27-32]</sup>。用 Lamda750 型紫

外-可见近红外分光光度计测量该涂层在 0.3~2.5  $\mu\text{m}$  内的反射光谱,用 TENSOR27 型 BRUKER 红外光谱仪测定涂层在室温下的红外反射光谱。图 5 为根据课题组之前报道<sup>[30-32]</sup>的方法制备的 Nb-Si-N 选择性吸收涂层的反射光谱,计算可得选择性吸收涂层的吸收率为 94.42%、发射率为 4.4%,这一结果说明 Nb-Si-N 选择性吸收涂层具有优良的选择吸收特性。与传统闷晒式常用的黑色塑料(聚乙烯)的反射光谱进行对比测试,计算得到其吸收率为 94.17%、发射率为 95.0%,说明传统的黑色塑料不具有选择性吸收特性。

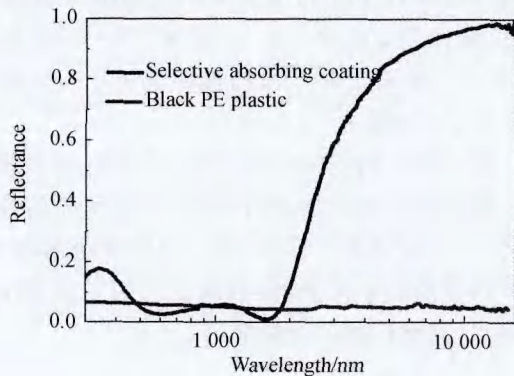


图 5 太阳能选择性吸收涂层和黑色塑料的反射谱  
Fig. 5 Reflectance spectra of solar selective absorbing coating and black plastic

#### 4 性能测试

新型闷晒式太阳能热水器的实验装置如图 6 所示,CPC 和渐开线采用的铝材成型,反射面为高反射率的 PET 反光膜,其反射率为 95%,CPC 的最大集光角为 25°,系统的聚光比为 3.5,水箱中水的体积为 40 L。

本文旨在测试系统的集热温度和瞬时效率。太阳热水器瞬时效率的计算公式<sup>[12,33]</sup>为:

$$\eta = MC_p(T_{i+1} - T_i) / A(H_{i+1} - H_i), \quad (5)$$

$$I = (H_{i+1} - H_i) / \Delta\tau, \quad (6)$$

式中: $\eta$  为瞬时效率, $M$  为水箱中水的质量, $C_p$  为水的比热, $T_i$  为  $i$  时刻水箱内的平均水温, $A$  为热水器的采光面积, $H_i$  是  $i$  时刻的曝辐量, $I$  为平均太阳辐射度, $\Delta\tau$  为时间间隔。

测试实验时,使用辐射传感器以及 PC-2 太阳辐射记录仪记录太阳光的光强  $I$ ;多路温度采集仪测试环境温度  $T_a$ 、水箱下部水的温度  $T_1$ 、水

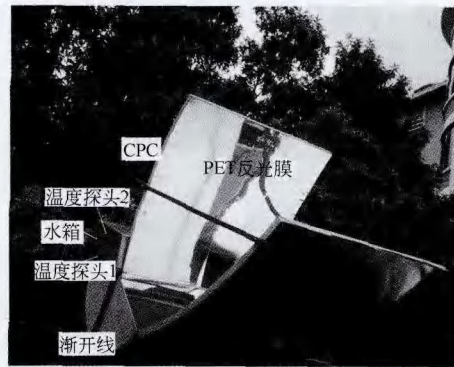


图 6 新型闷晒式太阳能热水器  
Fig. 6 Novel integrated solar water heater with proposed collecting system

箱上部水的温度  $T_2$ ,计算瞬时效率时取  $T_1$  和  $T_2$  的平均值  $T_s$ 。

如图 6 所示,系统测试时 CPC 集光角的开口为东西方向,整个装置与水平面的夹角为 10°,此夹角可以根据季节进行调节。测试广州某一天 10:00~15:00 热水器的集热性能,当天晴且无云,无持续风向  $\leq 3$  级。新型系统和传统闷晒式黑色水袋热水器的瞬时效率曲线如图 7 所示。当天太阳辐照强度的平均值为 800  $\text{W}/\text{m}^2$ ,周围环境的平均温度约为 21  $^{\circ}\text{C}$ ,水箱内水的初始温度为 21  $^{\circ}\text{C}$ ,14:30 左右集热器内水的温度达到最高值 62.20  $^{\circ}\text{C}$ ,此后温度不再增加,说明系统的集热与热损失达到了平衡。

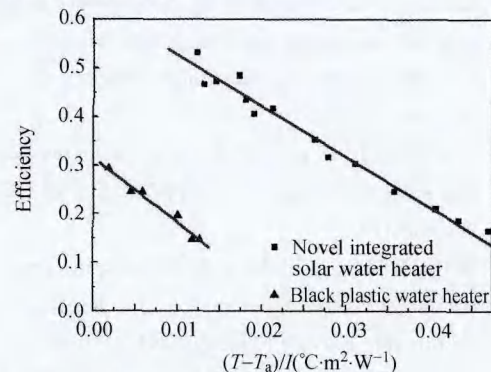


图 7 新型和传统黑色塑料袋闷晒式太阳能热水器的瞬时效率曲线

Fig. 7 Fitting efficient curves of novel integrated solar water heater and black plastic water heater

新型闷晒式太阳能热水器的瞬时效率拟合曲线为:

$$\eta = 0.63 - 10.40(T_s - T_a) / I. \quad (7)$$

传统黑色塑料袋闷晒式太阳能热水器的瞬时效率拟合方程为:

$$\eta_b = 0.31 - 13.32(T_b - T_a)/I. \quad (8)$$

新型闷晒式太阳能热水器的效率截距为0.63,热损系数为 $10.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;传统黑色塑料袋闷晒式太阳能热水器的效率截距为0.31,热损系数为 $13.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。由此可知,复合抛物面-渐开线聚光器和高吸收低发射的选择性吸收涂层,可以大幅提高闷晒式热水器的集热效率,其集热效率甚至高于传统的平板与真空管热水器的效率(50%~60%)。与传统黑色塑料袋闷晒式热水器相比,新型热水器无论是在瞬时效率还是在保温性能上均有着明显的优势。另外,系统还具有免维护、成本低及热效高的优点,具有良好的市场前景。

## 5 结 论

本文提出了一种集热效率高、热损失小、成本低新型闷晒式太阳能热水器。该热水器采用复

合抛物面与渐开线相结合的新型复合聚光系统,实现了非跟踪低倍聚焦,使得热水器水箱的吸光面转移到下方,在水箱的周围和上部进行了保温处理,有效降低了热损失,解决了传统热水器上部的热量损失问题。另外,在集热器的下部采用了高吸收率、低发射率的选择性吸收涂层,实现了高的光热转换效率。根据光学设计和热水器水箱设计,制作了新型闷晒式热水器系统,在集热器的下部制备了选择性吸收涂层,并对该系统进行了集热性能测试。实验结果表明,在太阳辐照强度平均值为 $800 \text{ W}/\text{m}^2$ 、周围环境的平均温度约为 $21^\circ\text{C}$ 的条件下,可将40 L水从 $21^\circ\text{C}$ 加热到 $62.20^\circ\text{C}$ ,系统效率方程的截距为0.63,热损系数为 $10.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

本文提出的闷晒式太阳能热水器,与传统的黑色塑料袋闷晒式热水器相比,有着明显的性能优势;与全玻璃真空管和平板太阳能热水器相比,有着明显的成本优势,能够满足人们的日常生活用热水,具有广阔的市场前景。

## 参考文献:

- [1] GUNEY M S. Solar power and application methods [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,57:776-785.
- [2] KHAN J, ARSALAN M H. Solar power technologies for sustainable electricity generation-A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,55:414-425.
- [3] CHOW T T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology [J]. *Applied Energy*, 2010, 87:365-379.
- [4] BUKER M S, RIFFAT S B. Building integrated solar thermal collectors-A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015,51:327-346.
- [5] WEINSTEIN L A, LOOMIS J, BHATIA B, et al.. Concentrating solar power [J]. *Chemical Reviews*, 2015,115:12797-12838.
- [6] 韩雪冰,魏秀东,卢振武,等.太阳能热发电聚光系统的研究进展[J].中国光学,2011,4(3):233-239.  
HAN X B, WEI X D, LU ZH W, et al.. Review of concentration system in solar thermal power plant [J]. *Chinese Optics*, 2011,4(3):233-239. (in Chinese)
- [7] 季杰.太阳能光热低温利用发展与研究[J].新能源进展,2013,1(1):7-31.
- [8] JI J. Developing and study of low-temperature solar thermal energy conversion applications [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2013,1(1):7-31. (in Chinese)
- [9] ABHISHEK S, VARUN, EISEBII A A. A thermodynamics review of solar air heater [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43:863-890.
- [10] ZHANG X Y, YOU SH J, XU W, et al.. Experimental investigation of the higher coefficient of thermal performance for water-in-glass evacuated tube solar water heaters in China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014,78:386-392.
- [11] 贺鹏,代彦军.高性能平板太阳能集热器集热性能优化研究[J].建筑科学,2015,31(12):58-108.  
HE P, DAI Y J. Optimization of high performance flat-plate solar collector [J]. *Building Science*, 2015,31(12):58-108. (in Chinese)
- [12] COLANGELO G, FAVALE E, MIGLIETTA P, et al.. Innovation in flat solar thermal collector: A review of the last ten years experimental results [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,57:1141-1159.

- [12] 宋爱国. 平板式与真空管式太阳热水器瞬时效率实验曲线分析[J]. 首都师范大学学报, 2000, 2(3): 25-28.  
SONG A G. Analysis of instantaneous efficiency curve about flat plat solar water heaters and evacuated tubular solar water heaters [J]. *Journal of Capital Normal University*, 2000, 2(3): 25-28. (in Chinese)
- [13] 王恒月, 黄永定. 闷晒式全玻璃真空管太阳能热水器[J]. 太阳能, 2007, 3: 32.  
WANG H Y, HUANG Y D. Full glass vacuum tube integrated solar water heater [J]. *Solar Energy*, 2007, 3: 32. (in Chinese)
- [14] 熊尚义. 真空管闷晒热水器—评介与建议[J]. 地球太阳能, 2005, 8: 53-55.  
XIONG SH Y. ETC with metallic bottle—review and constructive comments [J]. *Earth solar energy*, 2005, 8: 53-55. (in Chinese)
- [15] 江建民. 弱聚光—闷晒复合式太阳能热水器光学系统优化设计初探[J]. 甘肃科学学报, 1992, 4(1): 19-24.  
JIANG J M. First study on optimum design of optical system in integral solar water heater with low-ratio concentrator [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 1992, 4(1): 19-24. (in Chinese)
- [16] 罗运俊. 家用太阳热水器[J]. 可再生能源, 2004, 115(3): 77-79.  
LUO Y J. Domestic solar water heater [J]. *Renewable Energy*, 2004, 115(3): 77-79. (in Chinese)
- [17] 谭艳平. 太阳能热水器与建筑一体化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.  
TAN Y P. *Research of Solar Water Heater and Integrated Design of the Building* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [18] 钟柳文, 李育坚, 史继富, 等. 聚合物集热器与太阳能建筑结合应用探讨[J]. 中国太阳能工程, 2015, 9: 33-35.  
ZHONG L W, LI Y J, SHI J F, et al.. The application discuss of the polymeric solar collector and solar building [J]. *China Solar Engineering*, 2015, 9: 33-35. (in Chinese)
- [19] WINSTON R, MINANO J, BEBUTEZ P. *Non-imaging Optics* [M]. Academic Press, 2004.
- [20] 王成龙, 马军, 范多旺. 线性菲涅尔式聚光系统的镜场布置与优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 78-82.  
WANG CH L, MA J, FAN D W. Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel reflector system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 78-82. (in Chinese)
- [21] 朱艳青, 李育坚, 王雷雷, 等. 线性菲涅尔反射式太阳能集热系统的设计与试验研究[J]. 新能源进展, 2014, 2(2): 117-121.  
ZHU Y Q, LI Y J, WANG L L, et al.. Design and experimental study on linear Fresnel reflector solar collector system [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2014, 2(2): 117-121. (in Chinese)
- [22] WILLIAM S D, JIRACHOTE D. Twenty years' experience with a novel geometry ICPC evacuated solar collector [J]. *Energy Procedia*, 2014, 57: 2285-2294.
- [23] 郑飞, 李安定. 一种新型复合抛物面聚光器[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 663-665.  
ZHENG F, LI A D. A new type of CPC concentrator [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2004, 25(5): 663-665. (in Chinese)
- [24] LUN J, BENNETT W, ROLAND W. Characterization of novel mid-temperature CPC solar thermal collectors [J]. *Energy Procedia*, 2015, 70: 65-70.
- [25] 秦华, 冯东太, 葛硕硕, 等. 组合非球面太阳能聚光镜的光学设计[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 844-854.  
QIN H, FENG D T, GE SH SH, et al.. Optical design of build-up aspherical solar concentrating mirror [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 844-854. (in Chinese)
- [26] 黄战华, 刘洋, 何明霞, 等. 基于渐开线原理的快速光学延迟线装置[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3289-3294.  
HUANG ZH H, LIU Y, HE M X, et al.. Fast optical delay line device based on involute principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3289-3294. (in Chinese)
- [27] 王泉河, 徐刚, 徐雪青, 等. Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 太阳能选择性吸收涂层的研制[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1748-1752.  
WANG Q H, XU G, XU X Q, et al.. Preparation of Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar selective absorbing coating [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(12): 1748-1752. (in Chinese)
- [28] 熊德华, 陈炜, 李宏. 太阳能光热转化选择性吸收涂层研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(9): 50-58.  
XIONG D H, CHEN W, LI H. Recent progress in solar-thermal selective absorber coatings [J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(9): 50-

58. (in Chinese)
- [29] 马鹏军, 耿庆芬, 刘刚. 太阳能光谱选择性吸收涂层研究进展 [J]. 材料导报 A, 2015, 29(1): 48-60. MA P J, GENG Q F, LIU G. Recent investigations in solar spectrally selective coatings [J]. *Materials Review A*, 2015, 29(1): 48-60. (in Chinese)
- [30] SUN Y M, XIAO X D, CHAI G Q, *et al.*. Microstructure, optical properties and thermal stability of  $ZrB_2$  and Zr-B-N thin films as high-temperature solar selective absorbers [J]. *Material Express*, 2014, 4(3): 205-212.
- [31] SUN Y M, XIAO X D, CHAI G Q, *et al.*. Improvement of thermal stability of  $ZrB_2/Si_3N_4$  coatings as high-temperature solar selective absorbers [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 521: 581-585.
- [32] 孙耀明. 太阳能中高温选择性吸收涂层的制备及性能研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. SUN Y M. *Study of Mid- and High-temperature Solar Selective Absorbers* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [33] 王志峰, 王德芳. 家用太阳热水器热性能试验方法及标准探讨 [J]. 太阳能学报, 2000, 21(3): 248-252. WANG ZH F, WANG D F. Comment on the Chinese national testing standard of domestic solar water heater [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2000, 21(3): 248-252. (in Chinese)

## 作者简介:



史继富(1982—),男,山东人,博士,副研究员,2010年于南开大学获得博士学位,主要从事太阳能热利用的研究与开发。E-mail: shijf@ms.giec.ac.cn

## 通讯作者:



朱艳青(1983—),女,山东人,硕士,助理研究员,2009年于中国科学院长春光机所获得硕士学位,主要从事太阳能热利用的研究与开发。E-mail: zhuyq@ms.giec.ac.cn

## 通讯作者:



徐刚(1970—),男,四川人,博士,研究员,1999年于中国科学院物理所获得博士学位,主要从事太阳能光热、光电纳米复合材料的研究与开发。E-mail: xugang@ms.giec.ac.cn