

# 太阳能槽式系统接收器光学效率的特性研究

冯志康<sup>1</sup> 李明<sup>1,2</sup> 王云峰<sup>2</sup> 陈飞<sup>2</sup> 冀孟恩<sup>1</sup> 洪永瑞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500

<sup>2</sup>云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650500

**摘要** 从理论上分析了真空管和三角形腔体两种接收器之间的光学效率差异,给出了腔体接收器有效吸收率取优化值时临界安装位置的计算表达式,并基于TracePro软件进行了模拟计算验证。模拟结果显示腔体光学效率可达89.1%,而真空管为77.1%,垂直和平行方向安装位置的偏差对两者效率的影响类似,但腔体接收器光学效率变化曲线呈现轻微的不对称性,垂直安装位置取焦距下方5~20 mm范围内最佳。反射镜面偏转误差对接收器效率的影响较大,偏转角度应控制在0.4°以内,超出该角度时腔体效率下降的幅度小于真空管。实验测试结果证实了这一结论,并且推算出在理想安装条件下、集热温度为168.6 °C时两者集热效率达到平衡点55.0%,低于该临界温度时腔体接收器更占优势。

**关键词** 光学设计; 接收器; 光学效率; 太阳能槽式系统; 集热效率

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0122002

## Study on Optical Efficiency Characteristics of Receivers in a Solar Parabolic Trough Concentrator

Feng Zhikang<sup>1</sup> Li Ming<sup>1,2</sup> Wang Yunfeng<sup>2</sup> Chen Fei<sup>2</sup> Ji Meng'en<sup>1</sup> Hong Yongrui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

<sup>2</sup>Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** Optical efficiency differences between the evacuated tube receiver and a triangular cavity receiver are theoretically analyzed. Furthermore, the calculation expressions of the critical installation position for the optimal effective absorptivity of the cavity receiver are given, which is validated through TracePro software simulation. Simulation results show that the optical efficiency of cavity receiver can reach 89.1%, while the evacuated tube's efficiency is 77.1%. Meanwhile, the installation position deviations in the vertical or parallel direction have similar impacts on efficiencies of both receivers, but the cavity's efficiency curve is slightly asymmetrical, which indicates that the best vertical installation position is 5~20 mm below focal length. It is also observed that mirror deflection error has greater influence on receiver efficiency, and the deflection angle should be controlled within 0.4°. Beyond this range, the descend degree of cavity receiver efficiency is less than the evacuated tube, which is confirmed by experimental test results. In addition, the thermal efficiencies of both receivers would meet at equilibrium point of 55.0%, in the case of ideal installation condition and heat collecting temperature of 168.6 °C. Below this critical temperature, cavity receiver has a higher efficiency.

**Key words** optical design; receiver; optical efficiency; solar parabolic trough concentrator; thermal efficiency

**OCIS codes** 220.4830; 000.6850; 080.2740; 260.2160

收稿日期: 2015-07-13; 收到修改稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金云南联合基金重点项目(U1137605)、西南地区可再生能源研究与开发协同创新中心(05300205020516009)、云南省可再生能源研究创新团队(2006PY03)

作者简介: 冯志康(1988—),男,硕士研究生,主要从事太阳能热利用方面的研究。E-mail: ynnufzk@163.com

导师简介: 李明(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事太阳能利用方面的研究。

E-mail: lmllldy@126.com(通信联系人)

## 1 引 言

抛物槽式聚光系统把低能流密度的太阳辐射转化为高品质的清洁热源,不仅被广泛应用在温度高达400℃的太阳能热发电领域<sup>[1]</sup>,而且在80℃~250℃中低温范围内的热加工、干燥、制冷等工业和商用领域有着良好的发展前景<sup>[2-4]</sup>。接收器作为太阳能槽式系统中采集会聚光线并进行光热转换的关键部件,其性能直接决定着整个系统的优劣。目前太阳能槽式系统中采用最多的接收器形式是直通式金属-玻璃真空管,其优点是在高温下仍能保持较小的热损失,缺点则是制造工艺复杂、价格偏高和容易破损。为了克服这些缺点,国内外学者又提出了腔体式接收器的概念<sup>[5-7]</sup>。

太阳能槽式系统的光学效率是其在没有热损失的理想条件下所能达到的最大能量采集效率,一方面取决于接收器与抛物反射镜面之间的光学耦合关系,另一方面则受到系统安装和运行过程中引入的各种光学误差的影响<sup>[8-10]</sup>。因此,针对特定接收器模式下光学误差对系统效率的影响成为研究的关注点。Halil等<sup>[11]</sup>把槽式系统中可能的光学误差分为随机性误差和非随机性误差两大类,并分别采用统计方法和光学模型分析两类误差的影响,给出了比较通用的结论。Treadwell等<sup>[9]</sup>发现太阳能槽式系统整体偏离跟踪面16 mrad后将导致其全年输出下降30%,而接收器在垂直方向偏移也会有类似的结果。戴景民等<sup>[12]</sup>采用蒙特卡罗法计算了镜面形状误差、跟踪误差和接收器位置误差对槽式系统焦面上能流密度分布的直接影响。Zhu等<sup>[13]</sup>基于光学软件FirstOPTIC,考察了接收器在平行和垂直方向上的偏移误差对系统光学效率的影响。陈飞等<sup>[14]</sup>研究了太阳能槽式系统中反射镜玻璃厚度引起的焦斑发散现象。Serrano等<sup>[15]</sup>在分析直接产蒸汽的太阳能槽式系统性能时,针对镜面缺陷和真空管接收器在高温下的吸收管弯曲现象建立了光学模型,而Khanna等<sup>[16]</sup>则专门研究了吸收管弯曲情形下的壁面能流密度分布。但是,上述研究基本集中在以真空管为接收器的太阳能槽式系统上,而鲜有针对腔体接收器的光学误差影响分析。这主要是因为目前实际运行中的太阳能槽式系统绝大部分都采用真空管接收器,而腔体接收器受到的关注相对较少。另外,腔体接收器形状结构的多样化也导致了很难得出统一的分析结论。本课题组设计了一种适用于中低温范围的三角形腔体接收器,并针对其在太阳能槽式系统中的垂直安装位置对光热转换效率的影响进行了部分研究<sup>[7]</sup>。但是,在实际条件下还可能存在着其他形式的位置偏差以及镜面误差,进一步考察这些光学误差的影响对于优化腔体接收器的结构设计,以及预测槽式系统产能输出是十分必要的。

本文将结合三角形腔体接收器本身结构特点从几何光学理论上分析其与现有真空管接收器之间的主要光学效率特性差异,基于TracePro软件分别模拟计算三种位置偏移情形以及镜面偏转误差对两种接收器光学效率的影响,最后通过实验方法进行验证,以期获得两者在光学性能方面的综合对比结果,并为下一步对腔体接收器结构的优化工作提供参考。

## 2 理论分析

太阳能槽式系统的光学效率 $\eta_{opt}$ 定义为接收器吸收的辐射能与入射到抛物镜面上总的太阳直射能之比,根据聚光过程中的各个环节可以写出其具体表达式为<sup>[8]</sup>

$$\eta_{opt} = \rho(\gamma\tau\alpha_{eff})_n K(\theta), \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为抛物镜面的反射率,  $(\gamma\tau\alpha_{eff})_n$ 中三项分别为入射太阳光线与抛物镜开口平面垂直时接收器的拦截因子、玻璃护罩的透射率和接收器的有效吸收率,  $K(\theta)$ 为太阳光线以 $\theta$ 角度入射时对上述三项的综合影响因子。考虑接收器结构对系统光学效率的影响,在实验过程中使用同一套抛物反射镜,并且采用二维跟踪方式使太阳光线始终保持垂直入射,故 $\rho$ 、 $K(\theta)$ 两项的影响可忽略。剩下 $\gamma$ 、 $\tau$ 和 $\alpha_{eff}$ 三项与接收器的结构形式和材质有关,实验用的两种接收器截面结构如图1所示,抛物反射镜和两种接收器的相关参数如表1~3所示。

从图1可以看出,该腔体接收器比真空管接收器少了一层玻璃护罩,因此透射率 $\tau=1$ ,即会聚光线在抵达吸收面的路程中少了一次吸收和反射损耗。但是玻璃护罩可以有效抑制吸收面上的空气对流热损失,是通常真空管在高温下集热效率高于腔体接收器的主要原因。为了尽量减小风速变化对腔体接收器集热测试结果的影响,实验选择在晴朗无风的气象条件下进行。

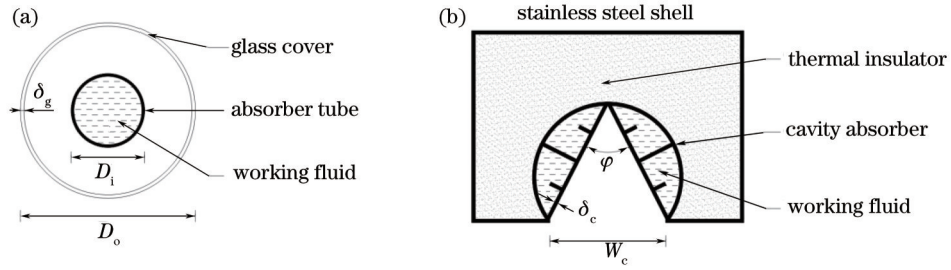


图 1 两种接收器的截面示意图。(a) 真空管接收器; (b) 腔体接收器

Fig.1 Cross section of two receivers. (a) Evacuated tube receiver; (b) cavity receiver

表 1 反射镜的相关参数

Table 1 Parameters of the reflector

Parameter	Symbol	Value
Aperture width /mm	$W$	2220
Length /mm	$L$	1820
Slot width /mm	$W_s$	75
Focal length /mm	$f$	1150
Glass thickness /mm	$d$	5
Reflectivity	$\rho$	0.91

表 2 真空管接收器的相关参数

Table 2 Parameters of the evacuated tube receiver

Parameter	Symbol	Value
Outer diameter of absorber tube /mm	$D_i$	42
Outer diameter of glass cover /mm	$D_o$	100
Thickness of glass cover /mm	$\delta_g$	2
Transmissivity of glass cover	$\tau_{eva}$	0.92
Absorptivity of absorber tube	$\alpha_{eva}$	0.95

表 3 腔体接收器结构参数

Table 3 Parameters of the cavity receiver

Parameter	Symbol	Value
Opening width /mm	$W_c$	66
Radio /mm	$R$	41
Inscribed angle /( $^\circ$ )	$\varphi$	54
Thickness of cavity walls /mm	$\delta_c$	2
Absorptivity of receiving surfaces	$\alpha_{cav}$	0.90

两种接收器的结构差异还直接影响了有效吸收率  $\alpha_{eff}$ , 对于真空管接收器来说, 会聚光线在吸收面上只经历一次吸收和反射, 因此有效吸收率  $\alpha_{eff,eva} = \alpha_{eva} = 0.95$ ; 而腔体接收器的有效吸收率  $\alpha_{eff,cav} = 1 - (1 - \alpha_{cav})^n$ , 与会聚光线在腔内的反射次数  $n$  有关。本实验中所用的腔体由铝合金材料一体化拉制成形, 吸收表面采用  $\alpha_{cav} = 0.9$  的铝阳极氧化涂层, 当光线反射 2 次之后  $\alpha_{eff,cav}$  即可达到 0.99, 基本上成为了一个黑腔。图 2 是理想情况下采用腔体接收器的太阳能槽式系统光路示意图, 为了使会聚光线能在腔内至少反射 2 次, 需满足如下关系:

$$2\omega \leq 90^\circ - \varphi/2. \quad (2)$$

$\omega$  角与  $M$  点的位置有关, 设  $M$  点坐标为  $(y_M, z_M)$ , 则根据抛物线方程可得

$$z_M = \frac{1}{4f} y_M^2. \quad (3)$$

当  $M$  点位于镜面边缘处时  $\omega$  角最大, 此时  $y_M = \frac{W}{2}$ ,  $\omega$  角与  $M$  点处抛物线斜率的关系为

$$\tan \omega = \tan \frac{\phi_r}{2} = \frac{dz}{dy} \Big|_{y=\frac{W}{2}} = \frac{W}{4f}, \quad (4)$$

式中  $\phi_r$  为抛物镜面的边缘角, 联立(2)式和(4)式解得

$$\frac{W}{f} \leq 4 \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{4} \right), \quad (5)$$

代入表 1 和表 3 中的相关参数, 得到两边结果为  $1.93 \leq 2.45$ , 说明在理想情况下所用抛物反射镜形成的会聚光线均满足该腔体接收器要求的(2)式条件。

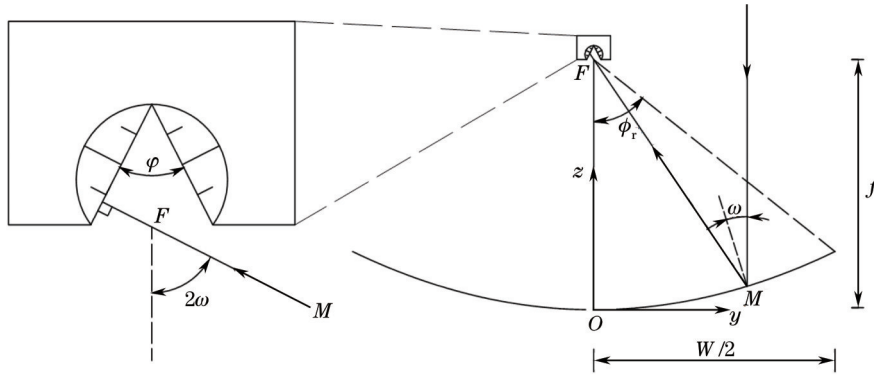


图 2 理想情况下太阳能槽式聚光系统的光路示意图

Fig.2 Schematic of solar parabolic trough concentrator optical path under ideal condition

在非理想情况下, 由于太阳张角  $\omega_s = 0.267^\circ$ 、抛物镜面安装误差角  $\Delta\omega_m$ 、跟踪误差角  $\Delta\omega_t$  的存在, 会聚光线不再全部经过焦点  $F$ , 此时抛物镜面边缘处形成的会聚光线  $\overline{MD}$  方程为

$$z_{MD} = \left( y - \frac{W}{2} \right) \tan \left( 90^\circ + \phi_r + \omega_s + \Delta\omega_t + 2\Delta\omega_m \right) + \frac{W^2}{16f}. \quad (6)$$

如果腔体接收器还存在垂直位置偏移  $\Delta z$  和平行位置偏移  $\Delta y$ , 将可能出现如图 3 所示的光线逸出现象, 吸收面  $\overline{BA}$  和逸出光线  $\overline{DE}$  的方程为

$$z_{BA} = \left( y + \frac{W_c}{2} - \Delta y \right) \tan \left( 90^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + f + \Delta z, \quad (7)$$

$$z_{DE} = \left( y - \frac{W_c}{2} - \Delta y \right) \tan \left[ 270^\circ - (\phi_r + \omega_s + \Delta\omega_t + 2\Delta\omega_m) - \varphi \right] + f + \Delta z. \quad (8)$$

联立(6)~(8)式, 可以求出  $D$  点坐标和腔体接收器的临界位置。如果  $\Delta\omega_t$ 、 $\Delta\omega_m$  和  $\Delta y$  均取 0, 则存在一个临界值  $\Delta z_0 = -4.9 \text{ mm}$ ; 当腔体接收器低于这个位置时所有进入腔内的会聚光线都至少被反射 2 次, 高于这个位置时开始有部分会聚光线(主要来自抛物镜面边缘处)在腔内反射一次后逸出, 从而导致光学效率略微下降。上述分析过程从几何光学理论的角度进一步解释了文献[7]中描述的腔体接收器安装位置小于焦距时具有较高集热效率的实验现象。

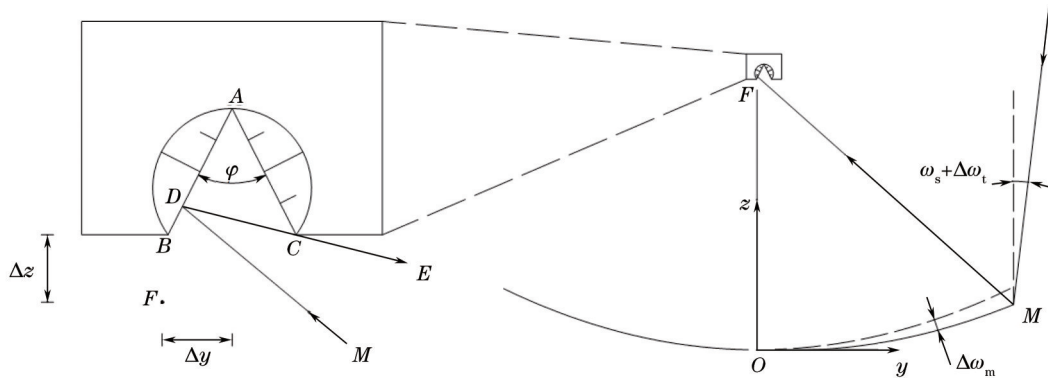


图 3 非理想情况下腔内会聚光线逸出示意图

Fig.3 Schematic of light leaks from the cavity under non-ideal conditions



接收器的拦截因子  $\gamma$  定义为实际到达接收器吸收面的辐射能量与抛物镜反射的总辐射能量之比<sup>[8]</sup>。由(6)式可以计算出会聚光斑的宽度,但是不能给出具体的能流密度分布,在除  $\gamma = 1$  和  $\gamma = 0$  以外的情形下采用解析方法计算接收器的光学效率比较困难。因此,采用基于蒙特卡罗光线追迹原理的 TracePro 光学软件,按表 1~3 的参数分别建立以真空管和腔体作为接收器的太阳能槽式系统模型,在太阳辐照分布光源下通过改变模型的位置参数来模拟各种误差条件,最后根据光线统计结果得出接收器吸收的辐射能量与入射太阳辐射能量之比,即为所求的光学效率。

### 3 模拟结果

图 4 为垂直位置偏移对两种接收器光学效率影响的模拟结果,从图中可以看出腔体接收器光学效率  $\eta_{opt,cav}$  最高可达 89.1%,而真空管接收器光学效率  $\eta_{opt,eva}$  最高为 77.1%,产生这一差距的原因是腔体接收器没有玻璃护罩的透射率损失并且具有更高的有效吸收率。其次,腔体接收器位置在  $\Delta z = -20 \sim -5$  mm 的范围内有最大光学效率,从  $\Delta z \geq -5$  mm 开始曲线呈缓慢下降趋势,这与前面分析结果完全吻合。把真空管接收器的轴线与抛物镜焦点重合的位置作为  $\Delta z = 0$ ,可见其光学效率曲线呈对称分布。总的来说垂直位置偏移在  $\pm 20$  mm 范围的内波动对两种接收器的光学效率都不会有太大变化。最后,图 4 还反映出涂层吸收率对于两种接收器光学效率的影响程度不同,对于腔体接收器来说  $\alpha_{cav}$  降低 0.05 只导致了 1.9% 的效率下降,而对于真空管来说则导致了 4.1% 的效率下降。在实际运行条件下,涂层吸收率往往随着集热温度升高和寿命损耗而逐渐降低,从这个角度来说腔体吸收器的效率稳定性高于真空管接收器。

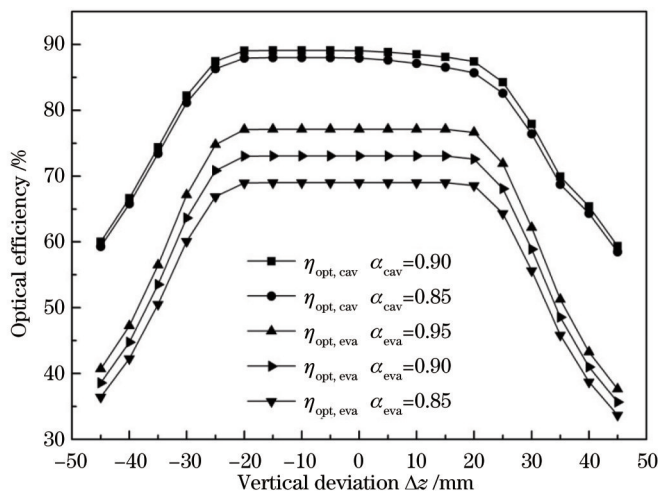


图 4 垂直位置偏移对两种接收器光学效率的影响

Fig.4 Vertical deviation influence on optical efficiency of two receivers

两种接收器发生平行位置偏移时的光学效率变化如图 5 所示,可以看出  $\Delta y$  对腔体接收器的影响小于真空管接收器。在  $\Delta z = 0$  高度处腔体接收器允许的偏移距离为  $\Delta y = 25$  mm,而真空管接收器只有 15 mm,这是由于腔体开口宽度大于真空管直径,拦截会聚光线的效率更高,但同时也意味着对流和辐射热损失要大于真空管。另外,图中还给出了不同  $\Delta z$  高度下的模拟结果,可以看出在偏离  $\Delta z = 0$  的其他高度处聚光能流密度分布趋于均匀,使得水平位置偏移的影响减弱,效率曲线的下降趋于平缓,但是总体效率变低。

由于腔体接收器没有类似真空管的旋转轴对称性,因此有必要考虑其相对于焦线  $F$  的偏转角度  $\Delta\phi$  的影响。如图 6 所示,  $\Delta\phi$  达到  $30^\circ$  时,腔体接收器光学效率仅下降 4%,但是通过进一步考察两个吸收面上的辐照度  $I_1$  和  $I_2$ ,发现两者的差距也随之增大。辐照度的差距会导致两吸收面的平均温度不同,相互产生横向的辐射能流传递,这对腔体内部的光热转换效率是不利的。从图中结果来看,安装腔体接收器时  $\Delta\phi$  不宜超过  $5^\circ$ 。

采用的抛物反射镜属于分体式,由两面镜子组成,在长期运行过程中容易发生因支撑架结构松动导致的镜面偏转误差。图 7 给出了单边镜面偏转误差对两种接收器光学效率的影响。对真空管和腔体接收器来说镜面误差角  $\Delta\omega_m$  都不应超过  $0.4^\circ$ ,否则会导致明显的效率下降,这对槽式系统反射镜的安装精度提出了较高

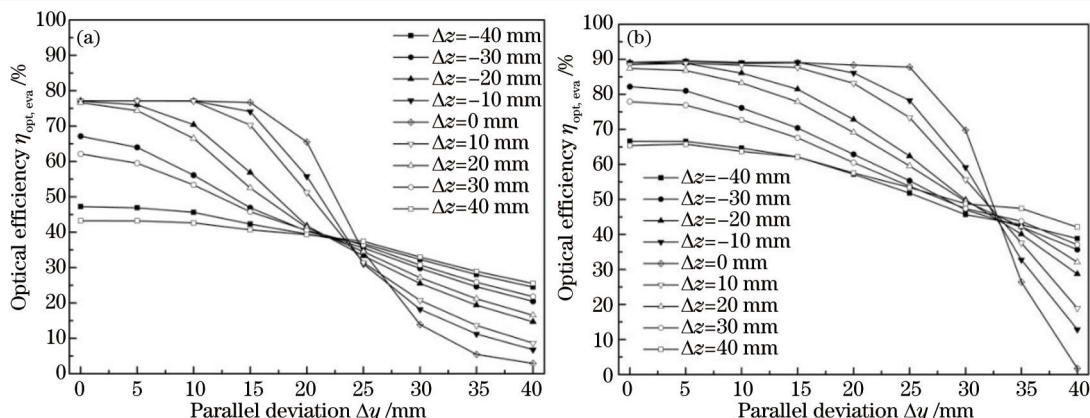


图5 平行位置偏移对光学效率的影响。(a)真空管接收器;(b)腔体接收器

Fig.5 Parallel deviation influence on optical efficiency. (a) Evacuated tube receiver; (b) cavity receiver

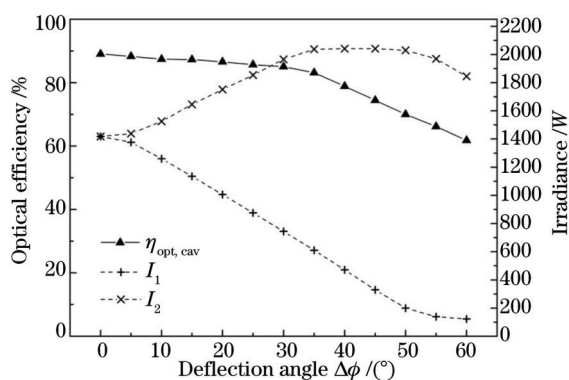


图6 腔体接收器偏转误差对光学效率和吸收面辐照度的影响

Fig.6 Influence of cavity receiver deflection on optical efficiency and absorbing surface irradiance

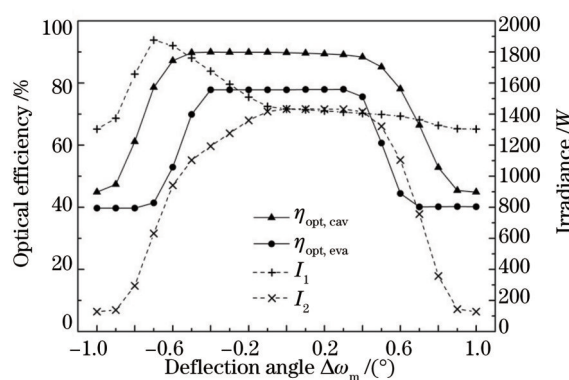


图7 单边镜面偏转误差对光学效率和吸收面辐照度的影响

Fig.7 Half-side reflector deflection influence on optical efficiency and absorbing surface irradiance

的要求。当  $\Delta\omega_m=0.5^\circ$  时,  $\eta_{opt,cav}$  降低 4.6%, 而  $\eta_{opt,eva}$  降低 17.1%; 当  $\Delta\omega_m=0.6^\circ$  时,  $\eta_{opt,cav}$  降低了 11.7%, 而  $\eta_{opt,eva}$  下降幅度达 33.4%, 说明在超出合理安装精度的情况下腔体接收器效率的下降速度比真空管要慢, 因此其性能相对稳定。另外, 图中还给出了腔体接收器两吸收面的辐照度变化情况, 由于  $I_1$  和  $I_2$  的差别越小越有利于光热转换, 所以对于腔体接收器而言  $\Delta\omega_m$  最好应控制在  $-0.1^\circ \sim 0.4^\circ$  之间。

## 4 实验测试

### 4.1 测试原理

太阳能槽式系统光学效率的测试目前主要是采用光学成像的方法<sup>[17-18]</sup>, 其得到的结果精确, 但是过程较为复杂, 而且对仪器和测试条件要求很高。Kutscher 等<sup>[19]</sup>提出了由工质温升曲线斜率推算真空管接收器光学效率的方法, 其结果与实际相吻合。把这一方法推广至槽式系统的整个集热循环过程中, 在二维跟踪模式下系统的能量平衡方程为

$$\eta_{opt} I_b A \Delta t = CM [T(t + \Delta t) - T(t)] + Q_{loss}, \quad (9)$$

式中  $I_b$  为太阳直射,  $A$  为抛物反射镜开口面积,  $\Delta t$  为测量时间,  $C$  为导热油工质的比热容,  $M$  为导热油工质的总质量,  $T(t + \Delta t) - T(t)$  为测量时间段内导热油工质的温度变化,  $Q_{loss}$  为测量时间段内总的系统热损失。于是系统集热效率为

$$\eta_{sys} = \frac{CM [T(t + \Delta t) - T(t)]}{I_b A \Delta t} = \eta_{opt} - \frac{1}{I_b A} q_{loss}. \quad (10)$$

与文献[19]中的方法相比, 多引进了热损失率  $q_{loss}$ , 由整个系统向外界的传导、对流和辐射损失组成, 是集热温度  $T$  与环境温度  $T_a$  之差  $\Delta T$  的函数, 于是(10)式可以写成如下形式<sup>[8,20]</sup>

$$\eta_{sys}(\Delta T) = \eta_{opt} - a\Delta T - b\Delta T^4, \quad (11)$$

式中两个常数  $a$  和  $b$  可由实验测试结果拟合得出。

### 4.2 实验平台

测试实验平台见图8,该平台由集热系统和测试系统组成,其中所用的反射镜和接收器尺寸参数如表1~3所示。集热系统聚光部分使用手工拼装的抛物槽式反射镜,因支撑架结构工艺问题导致镜面存在一定程度的偏转误差;接收器支架经过改装后可以方便地安装和替换真空管或腔体接收器进行实验,并且使其与镜面的相对位置在焦距上下150 mm范围内可调;根据前面分析的结论,测试过程中两接收器安装位置均被固定在焦距下方10 mm处以获得最佳集热效果。集热系统循环部分包括接收器、保温油箱、高温油泵和波纹管,为了使(11)式中  $\Delta T^4$  项的影响尽量小,特别加强了管路各处的保温;循环工质采用SKALN Texaherm 320-46导热油,总质量20.5 kg。测试系统采用北京天裕德TRM-2型太阳能测试仪,分别采集环境温度、风速风向、太阳直射和接收器进出口温度以及保温箱进出口温度等数据。

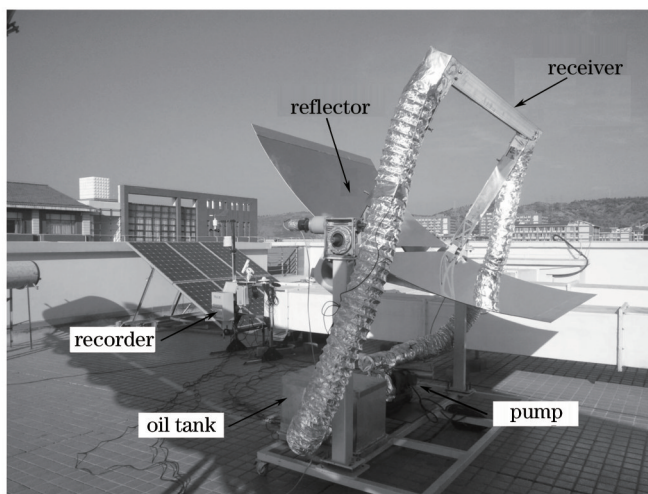


图8 测试平台实物图

Fig.8 Photograph of testing platform

## 5 实验结果与讨论

采用两种接收器时系统集热效率随温差  $\Delta T$  变化的实验结果如图9所示,可以看出两条曲线均呈现出较好的线性关系,说明加强循环管路保温的措施有效抑制了总的辐射热损失,而且在160 °C温度范围内接收器吸收面上辐射热损失对系统集热效率影响很小,因此(11)式中的  $\Delta T^4$  项可以忽略。线性拟合的结果显示腔体接收器的光学效率为80.7%,比理想值下降了8.4%;而真空管接收器的光学效率只有50.2%,比理想值下降了26.9%,两者的下降幅度和图7的分析结论相符,说明镜面偏转误差是该系统集热效率下降的主要原因。

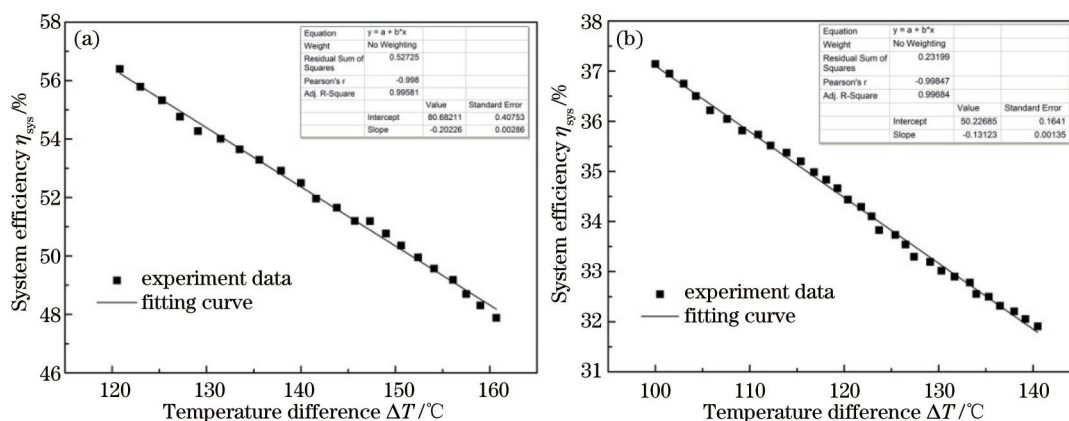


图9 两种接收器的系统集热效率。(a) 腔体接收器; (b) 真空管接收器

Fig.9 System thermal efficiency of two receivers. (a) Cavity receiver; (b) evacuated tube receiver



实验结果还显示,虽然腔体接收器的光学效率和稳定性高于真空管,但是其热损失系数约为真空管的1.54倍,因此两者的集热效率随 $\Delta T$ 升高而下降的速度不同。在理想安装条件下这两条效率曲线存在一个交叉点,根据拟合得到的 $a$ 值可以估算出该效率平衡点位于 $\Delta T=168.6\text{ }^\circ\text{C}$ 处,对应的系统集热效率为55.0%。而在非理想安装条件下,两种接收器效率的差异是系统光学误差和热损失率综合影响的结果。系统光学误差是主要影响因子,导致腔体的集热效率始终明显高于真空管。当 $\Delta T=120.8\text{ }^\circ\text{C}$ 时,采用腔体的系统集热效率为56.4%,而采用真空管的效率仅为34.4%,两者相差22.0%;当 $\Delta T$ 升至 $160.1\text{ }^\circ\text{C}$ 时,采用腔体和真空管的系统集热效率分别降至48.1%和29.5%,仍然有18.6%的差距。

## 6 结 论

针对太阳能槽式系统中三角形腔体和真空管这两种接收器的光学效率特性进行了理论、模拟和实验上的对比研究,得到以下结论:

1) 会聚光线在腔体内部的反射次数为至少2次时,腔体接收器有效吸收率可达99%以上,是其光学效率高于真空管的主要原因,但是这一条件能否满足与抛物镜面几何尺寸、腔体接收器的位置及镜面安装误差角有关。

2) 抛物反射镜面的角度偏转误差对两种接收器光学效率的影响较大,安装时单边镜面偏转角度应控制在 $0.4^\circ$ 以内。当 $\Delta\omega_m=0.6^\circ$ 时,真空管光学效率下降了33.4%,而腔体接收器只下降11.7%,显示出较高的稳定性。

3) 理想安装条件下腔体接收器在 $168.6\text{ }^\circ\text{C}$ 的相对集热温度以下时可具有更高的热效率,考虑到其主要的热损失来自于开口处的空气对流换热和吸收面在高温下对外界的热辐射,今后可从上述两个角度出发对腔体结构进行优化,进一步扩大腔体接收器的适用温度范围。

## 参 考 文 献

- 1 Manuel Romero, Jose Gonzalez-Aguilar. Solar thermal CSP technology[J]. WIREs Energy Environ, 2014, 3(1): 42-59.
- 2 Soteris Kalogirou. The potential of solar industrial process heat applications[J]. Applied Energy, 2003, 76(2): 337-361.
- 3 F J Cabrera, A Fernandez-Garcia, R M P Silva, *et al.*. Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20(4): 103-118.
- 4 Ahmet Lokurlu, Fritz Richarts, Dirk Kruger. High efficiency of solar energy with newly developed parabolic trough collectors(SOLITEM PTC) for chilling and steam production in a hotel at the Mediterranean coast of Turkey[J]. International Journal of Energy Technology and Policy, 2005, 3(1): 137-146.
- 5 David A Boyd, RyszardGajewski, Roderick Swift. A cylindrical blackbody solar energy receiver[J]. Solar Energy, 1976, 18(5): 395-401.
- 6 Zhai Hui. Theoretical and Experimental Investigation of Linear Concentrating Solar Collector with Cavity Absorber[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- 7 翟 辉. 采用腔体吸收器的线聚焦太阳能集热器的理论及实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- 8 Chen Fei, Li Ming, Xu Chengmu, *et al.*. Influence of photo-thermal conversion characteristics by the position of cavity absorber in parabolic trough solar concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922003.
- 9 陈 飞, 李 明, 许成木, 等. 腔体吸收器位置对太阳能槽式系统光热转换性能的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922003.
- 10 John A Duffie, William A Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013: 322-371.
- 11 G W Treadwell, N R Grandjean. Systematic rotation and receiver location error effects on parabolic trough annual performance[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1982, 104(11): 345-348.
- 12 Xiang Ming, Li Ming, Wang Liuling, *et al.*. Investigation of performance on trough concentrating solar photovoltaic/thermal system based on super cells[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 482-489.
- 13 项 明, 李 明, 王六玲, 等. 空间太阳能电池槽式聚光热点联供系统特性分析[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 482-489.
- 14 Halil M Guven, Richard B Bannerot. Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries [J]. Solar Energy, 1986, 36(6): 535-550.
- 15 Dai Jingmin, Liu Ying. The study of flux distribution on focal plane in parabolic-trough concentrators[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(9): 1096-1100.



- 戴景民, 刘 颖. 抛物柱面聚光器焦面能流分布特性研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(9): 1096-1100.
- 13 Guangdong Zhu. Study of the optical impact of receiver position error on parabolic trough collectors[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2013, 135(8): 031021.
- 14 Chen Fei, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Influence of glass thickness of reflector on the concentrating characteristics in the solar-energy trough system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1208002.  
陈 飞, 李 明, 季 旭, 等. 太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1208002.
- 15 J J Serrano-Aguilera, L Valenzuela, L Parras. Thermal 3D model for direct solar steam generation under superheated conditions[J]. Applied Energy, 2014, 132(11): 370-382.
- 16 Sourav Khanna, Suneet Singh, Shireesh B Kedare. Effect of angle of incidence of sun rays on the bending of absorber tube of solar parabolic trough concentrator[C]. Energy Procedia, 2014, 48: 123-129.
- 17 Wang Huarong, Li Bin, Wang Zhifeng, *et al.*. Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112007.  
王华荣, 李 彬, 王志峰, 等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112007.
- 18 Ren Lanxu, Wei Xiudong, Niu Wenda, *et al.*. Surface error of parabolic trough solar concentrators based on the theoretical overlay photographic method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412001.  
任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 基于吸热管反射成像法测量抛物槽式太阳能聚光器的面形误差[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412001.
- 19 Charles F Kutscher, Judy C Netter. A method for measuring the optical efficiency of evacuated receivers[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2014, 136(2): 010907.
- 20 Loreto Valenzuela, Rafael Lopez-Martin, Eduardo Zarza. Optical and thermal performance of large-size parabolic-trough solar collectors from outdoor experiments: A test method and a case study[J]. Energy, 2014, 70(3): 456-464.

栏目编辑: 韩 峰