

腔体吸收器位置对太阳能槽式系统光热转换性能的影响

陈 飞¹ 李 明^{1,2} 许成木¹ 洪永瑞²

(¹ 云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650500; ² 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500)

摘要 针对腔体吸收器安装位置对其光热转换性能的影响进行了理论、模拟、实验研究。构建了太阳能槽式系统吸收器表面辐射热损失的物理模型, 并进行了数学验证, 结果表明吸收器表面的辐照度趋于均匀分布时, 系统的热辐射损失减小。基于 TracePro 软件模拟了腔体吸收器在不同位置时的光学效率、辐照度标准差, 发现腔体吸收器安装位置小于焦距时可获得较好的光学性能, 采用焦距为 1200 mm 的槽式系统进行了腔体吸收器光热转换性能的实验验证, 当腔体吸收器安装焦距为系统焦距的 98.75%, 集热温度为 201.3 °C 时, 所构建的槽式系统的热效率可达 35.53%。

关键词 光学设计; 太阳能槽式系统; 腔体吸收器; 位置; 热性能

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0922003

Influence of Photo-Thermal Conversion Characteristics by the Position of Cavity Absorber in Parabolic Trough Solar Concentrator

Chen Fei¹ Li Ming^{1,2} Xu Chengmu¹ Hong Yongrui²

(¹ Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China
² School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract The photo-thermal conversion characteristic of cavity absorber in parabolic trough solar concentrator is researched by theory, simulation and experiment. The thermal radiation loss model of cavity absorber in parabolic trough solar concentrator is established and demonstrated. Results show that while the irradiance distribution of cavity tends to be uniformity, the thermal radiation loss is reduced. The optical efficiency and standard deviation of cavity absorber at different positions are simulated by the optical design software TracePro. Results show that better optical performance can be obtained if the installed position is less than the focal length. The thermal efficiency of the cavity absorber is 35.53% with the temperature of 201.3 °C and the installed focal length of cavity absorber is 98.75% of system focal length which is 1200 mm parabolic trough solar concentrator by experimental verification.

Key words optical design; parabolic trough solar concentrator; cavity absorber; position; thermal performance

OCIS codes 220.4830; 080.2740; 260.2160

1 引 言

聚光太阳能利用中, 太阳能槽式聚光是当前被广泛应用的一种系统模式^[1-3]。槽式聚光系统几何聚光比范围较宽, 能满足工业、民用的高、中、低用热

需求, 还具有易于规模化阵列布局、占用土地面积小、安装检修方便等优点。

在槽式聚光系统运行过程中, 系统的光热转换性能是整个系统的关键, 直接影响整个系统的效

收稿日期: 2014-03-10; 收到修改稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金云南联合基金重点项目(U1137605)、国家国际科技合作项目(2011DFA60460)、云南省应用基础研究计划(2012FD018)

作者简介: 陈 飞(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事太阳能热利用方面的研究。E-mail: solarchenfei@163.com

导师简介: 李 明(1964—), 男, 博士, 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)

率^[4-6]。在太阳能槽式系统中,光热过程转换的载体是吸收器,主要分为真空管接收器和腔体式接收器,为此国内外诸多学者已对其光热性能进行了大量的研究,江守利等^[7-8]采用光线追迹法研究了分频聚光系统的局部表面的光热特性,获得了相应表面的能流分布计算公式,并分析了镜面安装、表面坡度等因素的影响,发现使用二次反射的聚光系统具有较为均匀的能流密度。Coventry^[9]对太阳能槽式热电联供系统的光学特性进行了研究,研究结果显示太阳能槽式系统的边缘处所受到的应力较大,容易发生形变,从而导致该区域及附近的太阳光线反射会聚时偏离焦线位置较大。崔映红等^[10]对抛物面槽式太阳能集热器场不同季节的光学损失进行了系统的研究,指出抛物槽式集热场的光学损失随季节改变变化不明显,在 20% 左右波动。帅永等^[11]采用数值模拟的方法研究了槽式太阳能系统吸收器表面的辐射特性,研究结果表明太阳能槽式系统的焦距对聚光比影响较小,边缘角对系统的聚光比影响明显,系统边缘角为 45° 时可获得最大聚光比。Maccari 等^[12]设计了一套测试槽式聚光系统聚光性能的装置,该装置采用几何光学的测量方法测定槽式系统聚光镜的面形,结果发现聚光镜的面形发生细小的变形都会明显降低整个镜面的聚光效果。Ju 等^[13-15]对槽式热电联供系统的太阳光谱进行分离研究,发现太阳能槽式系统分离太阳光谱后,提高了整个系统的热电性能。许成木等^[16]分析了槽式太阳能系统的几何光学特性,采用 Origin 软件计算了焦平面的能流密度分布,并考察了太阳活动对能流分布的影响。Bilgen 等^[17]采用数值模拟的方法研究了开口比、开口位置及腔体倾斜角度对腔体热性能的影响。Zhai 等^[18-19]研究了多种结构的腔体吸

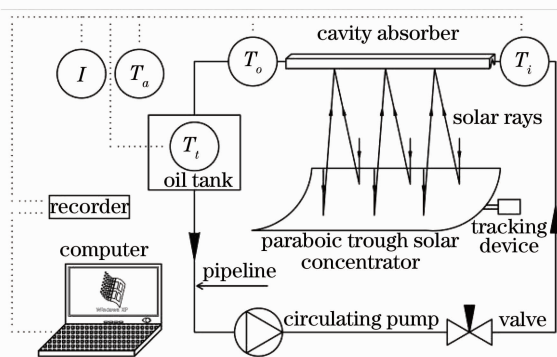
收器,结果发现内表面具有三角形结构的腔体吸收器有很好的光学效率。

太阳能槽式系统在跟踪系统的调节下,聚光镜将太阳光会聚到位于焦线位置的吸收器上,吸收器将辐射能转化成热能传递给内部的工质,腔体吸收器的安装位置直接影响了槽式系统收集和转换太阳辐射能的效率,从而影响了整个系统的集热性能。相比传统的基于太阳能槽式系统吸收器表面高性能的选择性涂层材料的开发研究,从而提高太阳能槽式系统的光热转换性能^[20-23],研究腔体吸收器在太阳能槽式系统中合理的安装位置来提高太阳能槽式系统的光热转换性能更具有易于实现的可行性和直接性,且操作简单、无需维护以及具有更好的性价比,而选择性涂层长时间运行存在老化现象,因此研究腔体吸收器的安装位置对太阳能槽式系统的光热转换性能具有重要意义。相比真空管吸收器,腔体式吸收器具有成本低、不存在漏气故障、生产过程中采用传统的材料及工艺、运输方便无需特殊维护等优点,因此本文针对腔体式建立了吸收器表面热辐射损失模型,并基于蒙特卡罗光线追迹原理,采用日照分布对不同安装位置腔体吸收器的光学性能进行了模拟研究,构建了太阳能槽式系统集热性能测试平台进行了实验验证,其结果与理论和模拟研究相吻合。

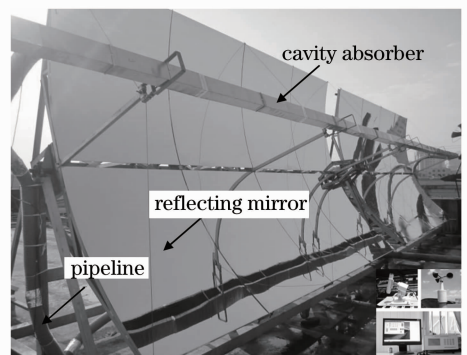
2 槽式太阳能腔体吸收器光热转换系统构建

2.1 槽式集热器

太阳能槽式集热器实验测试平台如图 1 所示,该太阳能槽式系统一共由 16 片小聚光镜组成,被固



(a) schematic of experimental set-up



(b) photograph of parabolic trough solar concentrator

图 1 太阳能槽式系统

Fig. 1 Solar concentrating system

定在金属框架上,槽式集热器的长、光口宽度分别是 308 cm 和 988 cm,焦距为 1200 mm,槽式集热器南北向放置,东西向一维自动跟踪。

实验时,在全自动一维跟踪装置的控制下,槽式集热器的反射镜将太阳光聚集到腔体吸收器,在循环泵的驱动下,工质闭循环流动,途径循环泵、调节阀、太阳能槽式系统上部的腔体吸收器、保温油箱。在腔体吸收器内被加热,最后高温的工质储存在油

箱中。在实验过程中,温度传感器自始至终记录保温油箱内工质、工质在腔体进出口以及周围环境的温度,温度传感器的精度为 0.1 ℃;太阳直射仪记录太阳直射强度,相对误差为 3%;所有记录的数据被储存在计算机中。实验过程中所用的仪器设备见图 1(b)的右下角,包括直射仪、风速风向仪、电脑、数据采集仪。实验工质为 Sklan-460 导热油,其相关参数如表 1 所示。

表 1 Sklan-460 导热油的相关参数

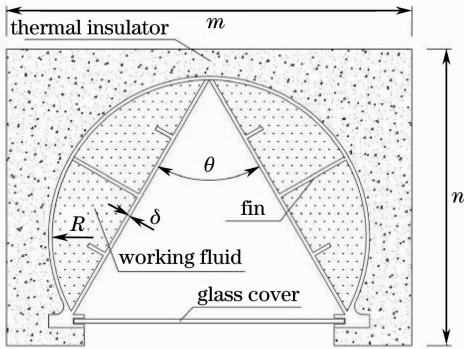
Table 1 Relative parameters of Sklan-460 mineral oil

T / C	$C_p / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$
100	2.15	0.128	820
150	2.33	0.124	790
200	2.51	0.120	760
250	2.69	0.116	725
300	2.88	0.112	690
Fitting formula	$1.7884 + 0.00363T$	$0.1359 - 0.00008T$	$885.8 - 0.65T$
R^2	0.99989	0.99996	0.99799

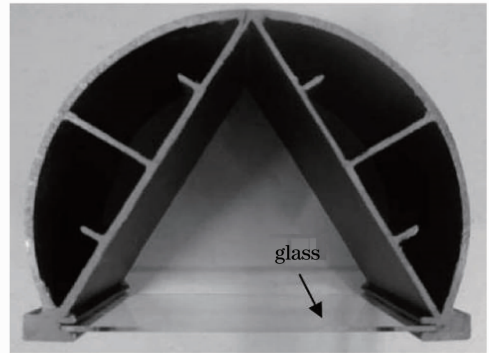
2.2 腔体吸收器

腔体吸收器的设计结构如图 2 所示,腔体吸收器的吸收表面是“V”型结构,整个腔体吸收器采用

传统的一体化制造技术,其材料为铝合金,具有良好的导热性能和较高的刚性强度。



(a) cross section of the cavity absorber



(b) photograph of cavity absorber

图 2 腔体吸收器的结构和部件

Fig. 2 Structure and object of cavity absorber

为强化腔体吸收器吸收面与工作流体之间的换热,腔体吸收器吸收面背部设有多个强化换热作用的翅片,为了减少腔体吸收器表面的红外热辐射损失,在腔体吸收器的光出口设有超白超薄玻璃卡槽,腔体吸收器的相关参数如表 2 所示。

表 2 腔体吸收器的相关参数

Table 2 Parameters of the cavity absorber

Parameters	Symbol	Specification
Radio /mm	R	43
Inscribed angle /($^\circ$)	θ	60
Thickness /mm	δ	2
Thermal conductivity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	λ	180

3 吸收器表面热损失特性

设有一平板吸收器如图 3 所示,吸收器的总面积为 A ,投射到吸收器表面的辐射能为 E ,当吸收器表面辐照度均匀分布时,吸收器总的接受能为

$$E = IA, \quad (1)$$

式中 I 为辐照度,当吸收器表面辐照度不均匀分布时,总的接受能可表示为

$$E = \sum_{i=1}^n I_i A_i, \quad (2)$$

式中 A_i 为吸收器分割成 n 等份,每一份的面积, I_i 为面积为 A_i 上的辐照度,因此有

$$A_1 = A_2 = \dots = A_i = \dots = A_n, \quad (3)$$

$$nA_i = A, \quad (4)$$

$$nI = \sum_{i=1}^n I_i. \quad (5)$$

很显然,吸收器表面辐照度高,温度也会升高,因此吸收器表面辐照度均匀和不均匀时的温度为

$$T = fI, \quad (6)$$

$$T_i = fI_i, \quad (7)$$

式中 T_i 为 A_i 的表面温度, f 为比例系数,是吸收器材料、周边环境、天空参数等的函数。由斯忒藩-玻耳兹曼定律有

$$Q_{\text{unif}} = \sigma \varepsilon A (T^4 - T_s^4) = \sigma \varepsilon (AT^4 - AT_s^4), \quad (8)$$

$$Q_{\text{non}} = \sigma \varepsilon \sum_{i=1}^n A_i (T_i^4 - T_s^4) = \sigma \varepsilon \left(\sum_{i=1}^n A_i T_i^4 - AT_s^4 \right), \quad (9)$$

式中 Q_{unif} 和 Q_{non} 分别为吸收器表面辐照度均匀和不均匀时的辐射损失。

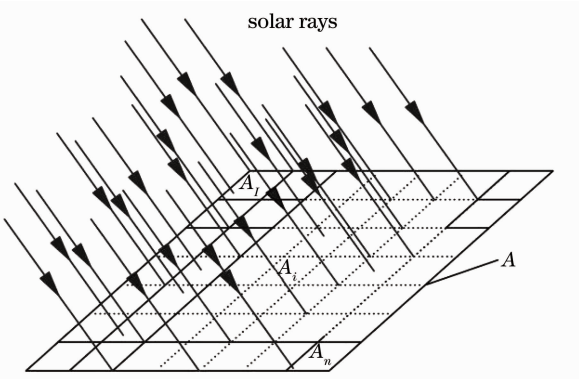


图3 平板吸收器的表面辐照示意图

Fig. 3 Schematic of irradiance on the surface of absorber

Q_{unif} 和 Q_{non} 之间的关系可由平方平均数与算数平均数之间的关系得到:

$$\frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n} \leq \sqrt{\frac{T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_n^2}{n}}, \quad (10)$$

式中,等号成立时有:

$$T_1 = T_2 = \dots = T_i = \dots = T_n, \quad (11)$$

假设:

$$T_i = \alpha_i T, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (12)$$

式中 α_i 为比例系数,由(5)~(7)式和(12)式可得:

$$n = \sum_{i=1}^n \alpha_i, \quad (13)$$

将(12)式代入(10)式得到:

$$\frac{\alpha_1 T + \alpha_2 T + \dots + \alpha_n T}{n} \leq \sqrt{\frac{T^2 \alpha_1^2 + T^2 \alpha_2^2 + \dots + T^2 \alpha_n^2}{n}}, \quad (14)$$

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n} \leq \sqrt{\frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2}{n}}, \quad (15)$$

将(13)式代入(15)式得到:

$$\frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} \geq 1, \quad (16)$$

$$\frac{\alpha_1^4 + \alpha_2^4 + \dots + \alpha_n^4}{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2} \geq 1, \quad (17)$$

$$\frac{\alpha_1^4 + \alpha_2^4 + \dots + \alpha_n^4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} \geq 1, \quad (18)$$

将(18)式改写为

$$\frac{\alpha_1^4 T^4 + \alpha_2^4 T^4 + \dots + \alpha_n^4 T^4}{\alpha_1 T^4 + \alpha_2 T^4 + \dots + \alpha_n T^4} \geq 1, \quad (19)$$

$$\frac{A_1 \alpha_1^4 T^4 + A_2 \alpha_2^4 T^4 + \dots + A_n \alpha_n^4 T^4}{A_i (\alpha_1 T^4 + \alpha_2 T^4 + \dots + \alpha_n T^4)} \geq 1, \quad (20)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n A_i T_i^4}{AT^4} \geq 1. \quad (21)$$

将(21)式与(8)、(9)式对比可看出,吸收器表面辐照度不均匀时的辐射损失比均匀时的大,即吸收器表面辐照度的方差越小,热辐射损失越小,越有益于提高系统的效率,反之亦然。

4 实验方法

4.1 光学模拟

在光线为日照分布的条件下,基于蒙特卡罗光线追迹原理对腔体吸收器光学性能进行 TracePro 模拟实验模型如图4所示,在 TracePro 模拟过程中,逐个跟踪并记录每条光线的反射、折射、透射行为,直到光线溢出系统或者完全被吸收。

4.2 模拟实验处理

为了更完善地分析腔体吸收器性能,分别从腔体吸收器的光学效率、辐照度标准差进行综合考察。光学效率体现了腔体吸收器获得到达槽式系统辐射能的大小,是腔体吸收器性能的重要参数。从图4中,可以得到计算式如下:

$$\eta_0 = \frac{\iint_A I(x, y) \cos \theta dx dy}{AI}, \quad (22)$$

式中 η_0 为腔体吸收器光学效率, A 为腔体吸收器吸收面面积, $I(x, y)$ 为腔体吸收器吸收面辐照度分布

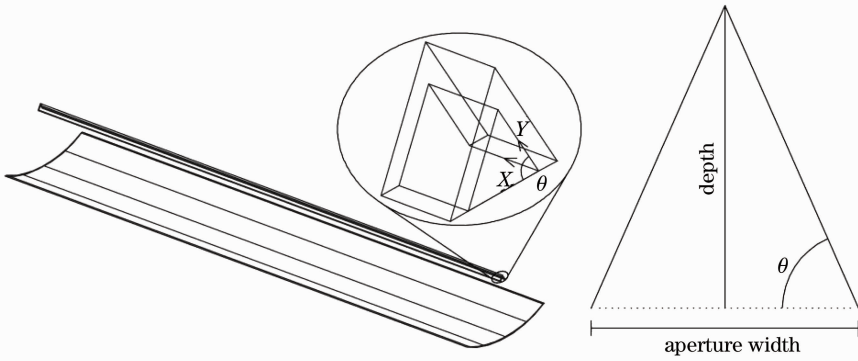


图 4 腔体吸收器的光学性能模拟模型

Fig. 4 Optical properties simulation model of cavity absorber

函数, θ 是 Y 轴与腔体吸收器采光口之间的夹角。

辐照度标准差用于衡量腔体吸收器内能量分布的均匀性, 平均辐照度相同的腔体吸收器, 辐照度标准差越大的腔体吸收器内部的温度场波动梯度越大, 其热损失越大, 在研究腔体吸收器热损失时具有重要意义。辐照度标准差 $D(I)$ 的计算式如下:

$$D^2(I) = \iint_A [I(x, y) - E(I)]^2 f(I) \cos \theta dx dy, \quad (23)$$

式中平均辐照度 $E(I)$ 计算式如下:

$$E(I) = \frac{1}{A} \iint_A I(x, y) dx dy, \quad (24)$$

而实际上, 腔体吸收器吸收面的辐照度分布函数 $I(x, y)$ 很难确定, 因此需对腔体吸收器吸收面的辐照度进行离散计算, 光学效率、平均辐照度、辐照度标准差的计算公式如下:

$$\eta_o = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_{ij} I_{ij}}{SI}, \quad (25)$$

$$E(I) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k I_{ij}}{nk}, \quad (26)$$

$$D^2(I) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k [I_{ij} - E(I)]^2}{nk}, \quad (27)$$

式中 i, j 分别为腔体吸收器吸收面 x 和 y 方向步序, n, k 分别为 x 和 y 方向的总步数, A_{ij} 为腔体吸收器吸收面第 ij 吸收单元的面积, I_{ij} 为投射到第 ij 吸收单元中的辐照度。

4.3 实验测试

实验研究分别对腔体吸收器的温升特性和集热效率进行考察, 借鉴于玻璃真空管集热特性测试中的归一化温差, 消除太阳辐照度不恒定因素的影

响^[24], 腔体吸收器的归一化温升 T^* 定义如下:

$$T^* = \frac{T_o - T_i}{I}, \quad (28)$$

式中 T_o 为腔体吸收器入口温度, T_i 为腔体吸收器出口温度, 如图 1 所示。腔体吸收器的集热效率 η_t 采用下式计算^[25-26]:

$$\eta_t = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{AI}, \quad (29)$$

式中 C_p 的定性温度 T_{av} 为

$$T_{av} = \frac{T_o + T_i}{2}. \quad (30)$$

5 实验结果

5.1 模拟实验结果

由于腔体吸收器具有轴对称性, 因此在进行腔体吸收器的光学性能模拟研究时, 只需考察其中的一半即可。腔体吸收器在不同位置时吸收面辐照度的分布情况见图 5, 随着距离对称轴位置的增大, 腔体吸收面辐照度呈现出先增大后减小的趋势, 且当腔体吸收器安装位置小于焦距时, 随着安装位置的增加, 辐照度的峰值距对称轴越远、越小; 当安装位置分别为 1180、1190、1200 mm (实验系统焦距) 时, 在距离对称轴 19、24、28 mm 的位置, 辐照度峰值分别达到 99.8、87.6、76.2 kW/m²。

腔体吸收器的安装位置对其光学性能的影响如图 6 所示, 从图 6 中可看出腔体吸收器的辐照度标准差随其安装位置的增大而减小, 而光学效率随其安装位置的增大先增大后减小。安装位置分别为 1180 mm 和 1185 mm (安装位置为原焦距的 98.75%)、1220 mm 的腔体吸收器光学效率分别为 81.12%、87.46%、68.78%, 辐照度标准差为 31471、29979、12138。

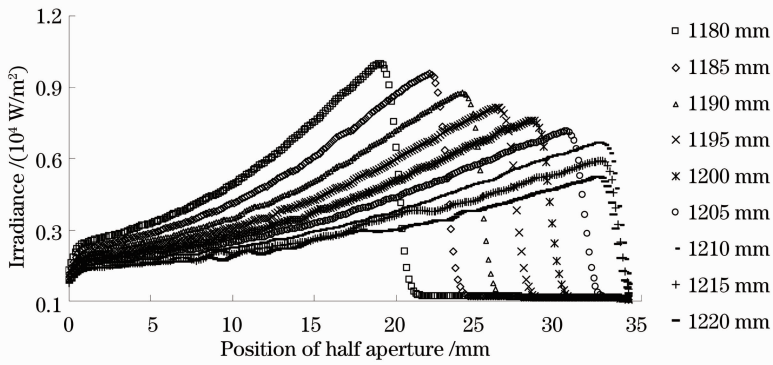


图 5 腔体吸收器在不同位置时辐照度分布情况

Fig. 5 Irradiance distribution of internal cavity absorber at different positions

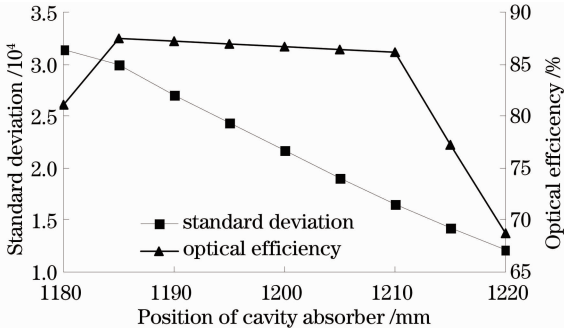


图 6 腔体吸收器在不同位置的光学效率和标准差

Fig. 6 Standard deviation and optical efficiency of cavity absorber at different positions

这是因为槽式系统先将太阳光会聚到焦线位置,达到焦线位置的会聚光线遇到吸收体时将被吸收、透射、反射,否则将会发散,会聚光线发散路径越多,能量越均匀,辐照度标准差越小。当安装位置大于焦距时,到达腔体吸收体内表面未被吸收的光线更容易溢出,发散的会聚光线无法到达其吸收表面,从而降低了光学效率;当安装位置小于焦距时,到达腔体吸收体内表面未被吸收的光线不容易溢出,提高了光学效率,因此腔体吸收器工作时可适当从槽式系统焦线位置向下偏移一些。

5.2 腔体吸收器集热特性

腔体吸收器安装在不同位置的出口温升曲线和集热效率曲线分别如图 7 和图 8 所示,从图中可以看出,腔体吸收器在安装在 1185 mm 位置时的出口归一化温升和集热效率都大于在其他位置,且集热温度在 201.3 °C 时,热效率达到了 35.53%,这与金属直通式真空管的集热效率相当^[27]。这一实验结果与理论证明和软件模拟结果相吻合,其主要原因是腔体吸收器 1185 mm 位置时具有较高的光学效率和较均匀的辐照度分布,使得腔体吸收器内表面对环境的红外热辐射损失较小,同时腔体吸收器吸

收面之间的温度梯度也较小,腔体吸收器吸收面表面之间的热量传递减小,腔体吸收器吸收面所获得的太阳辐射能更容易被选择性吸收涂层转换成热能传递给内部的工质,这也与理论证明结果相符合。

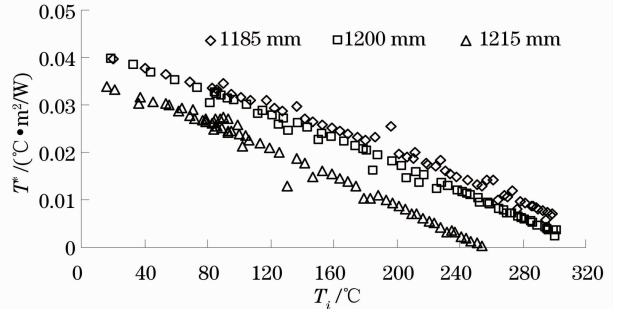


图 7 腔体吸收器在不同位置时的出口温升曲线

Fig. 7 Outlet temperature rise of cavity absorber at different positions

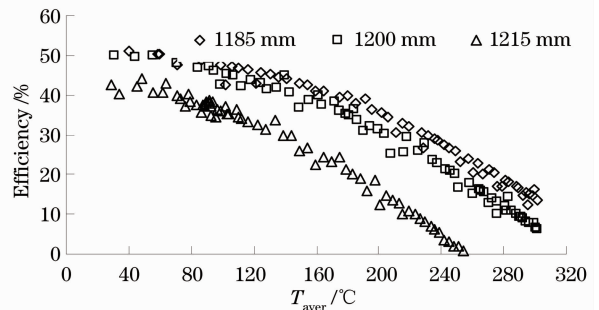


图 8 腔体吸收器在不同位置时的集热效率曲线

Fig. 8 Thermal efficiency of cavity absorber at different positions

6 结 论

针对太阳能槽式系统中腔体吸收器在不同安装位置的光热转换性能进行了理论、模拟、实验研究,可得到以下结论:

- 1) 腔体吸收器内表面的光学效率越大,且辐照

度分布越均匀,腔体吸收器的热辐射损失越小,集热效率越高。

2) 对焦距为 1200 mm 的槽式系统模拟研究发现,腔体吸收器在安装焦距为原焦距 98.75% (1185 mm) 处具有较好的光学效率和较均匀辐照度分布,实验测试结果发现,腔体吸收器在安装在此位置时的出口归一化温升和集热效率都大于其他位置,与理论证明和软件模拟结果相吻合,且集热温度在 201.3 °C 时,热效率达到了 35.53%。

致谢 本文获云南省研究生学术新人奖资助,在此致以诚挚的感谢。

参 考 文 献

- 1 C S Solanki, C S Sangani, D Gunashekar, *et al.*. Enhanced heat dissipation of V-trough PV modules for better performance [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(12): 1634—1638.
- 2 Tao Tao, Zheng Hongfei, He Kaiyan, *et al.*. A new trough solar concentrator and its performance analysis [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(1): 198—207
- 3 A Fernández-García, E Zarza, L Valenzuela, *et al.*. Parabolic-trough solar collectors and their applications [J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2010, 14(7): 1695—1721.
- 4 He Yaling, Xiao Jie, Cheng Zedong, *et al.*. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector [J]. *Renew Energy*, 2011, 36(3): 976—985.
- 5 Gong Guangjie, Huang Xinyan, Wang Jun, *et al.*. An optimized model and test of the China's first high temperature parabolic trough solar receiver [J]. *Sol Energy*, 2010, 84(12): 2230—2245.
- 6 Chen Fei, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Influence of glass thickness of reflector mirror on the concentrating characteristics in the solar 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研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1208002.
- 7 Jiang Shouli, Chen Zeshao, Hu Peng, *et al.*. Three-dimension optical model of two-stage reflective spectral beam splitting concentrating PV system [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, 30(9): 1188—1193. 江守利,陈则韶,胡 芃,等. 二次反射聚光器分频光伏系统的三维光学模型[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(9): 1188—1193.
- 8 Jiang Shouli. *Fundamental Theory and Experimental Study of Reflective Concentrating Solar Energy Utilization* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. 77—103. 江守利. 反射聚光利用太阳能的基础理论与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009. 77—103.
- 9 J S Coventry. *A Solar Concentrating Photovoltaic/Thermal Collector* [D]. Canberra: Australian National University, 2004. 101—138.
- 10 Cui Yinghong, Bei Zhenhua, Zhao Xi. Research on the heat loss of parabolic trough solar collector field [J]. *Renewable Energy Resources*, 2010, 28(5): 5—9. 崔映红, 卑振华, 赵 熙. 抛物面槽式太阳能集热器场热损失分析[J]. *可再生能源*, 2010, 28(5): 5—9.
- 11 Shuai Yong, Zhang Xiaofeng, Tan Heping. Simulation for concentrating characteristic of parabolic solar collector system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(3): 484—486. 帅 永, 张晓峰, 谈和平. 抛物面式太阳能聚光系统聚光特性模拟[J]. *工程物理论学报*, 2006, 27(3): 484—486.
- 12 A Maccari, M Montecchi. An optical profilometer for the characterization of parabolic trough solar concentrators [J]. *Sol Energy*, 2007, 81(2): 185—194.
- 13 X Ju, Z F Wang, G Flamant, *et al.*. Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic-thermoelectric hybrid system [J]. *Sol Energy*, 2011, 86(6): 1941—1954.
- 14 X Ju, A Vossier, Z F Wang, *et al.*. An improved temperature estimation method for solar cells operating at high concentrations [J]. *Sol Energy*, 2013, 93: 80—89.
- 15 M H Guo, Z F Wang. On the analysis of an elliptical Gaussian flux image and its equivalent circular Gaussian flux images [J]. *Sol Energy*, 2011, 85(5): 1144—1163.
- 16 Xu Chengmu, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Frequency statistics analysis for energy-flux-density distribution on focal plane of parabolic trough solar concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0408001. 许成木, 李明, 季旭, 等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0408001.
- 17 E Bilgen, H Oztop. Natural convection heat transfer in partially open inclined square cavities [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2005, 48(8): 1470—1479.
- 18 H Zhai, Y J Dai, J Y Wu, *et al.*. Energy and exergy analyses on a novel hybrid solar heating, cooling and power generation system for remote areas [J]. *Appl Energy*, 2009, 86(9): 1395—1404.
- 19 H Zhai, Y J Dai, J Y Wu, *et al.*. Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens [J]. *Energy Convers Manage*, 2010, 51(1): 48—55.
- 20 Wen Yuliang, Ding Jing, Yang Jianping, *et al.*. Selection of solar coatings in concentrating solar power [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, 30(6): 764—768. 文玉良, 丁 静, 杨建平, 等. 聚光太阳能热发电中吸热器吸收涂层的选择[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(6): 764—768.
- 21 K D Olson, J J Talghader. Absorption to reflection transition in selective solar coatings [J]. *Opt Express*, 2012, 20(4): 554—559.
- 22 N P Sergeant, M Agrawal, P Peumans. High performance solar-selective absorbers using coated sub-wavelength gratings [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5525—5540.
- 23 Z Y Nuru, C J Arendse, S Khamlich, *et al.*. Optimization of Al₂O₃/Pt/Al₂O₃ multilayer spectrally selective coatings for solar-thermal applications [J]. *Vacuum*, 2012, 86(12): 2129—2135.
- 24 Tian Qi. Calculation and analysis of thermal performance of the water-in-glass evacuated tubular solar collector [J]. *Energy Technology*, 2007, 28(3): 144—148. 田 琦. 水在玻璃管真空管太阳集热器热性能计算与分析[J]. *能源技术*, 2007, 28(3): 144—148.
- 25 T T Chow. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology [J]. *Appl Energy*, 2010, 87(4): 365—379.
- 26 S K Tyagi, S W Wang, M K Singhal, *et al.*. Exergy analysis and parametric study of concentrating type solar collectors [J]. *Int J Therm Sci*, 2007, 46(10): 1304—1310.
- 27 P L Singh, R M Sarviya, J L Bhagoria. Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers [J]. *Appl Energy*, 2010, 87(6): 541—550.