

# 吸收体形状对太阳能复合多曲面聚光器光热性能的影响

常泽辉<sup>1,2\*</sup>, 刘雪东<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 郑宏飞<sup>3</sup>, 马兴龙<sup>3</sup>

<sup>1</sup>内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

<sup>2</sup>内蒙古工业大学太阳能应用技术工程中心, 内蒙古 呼和浩特 010051;

<sup>3</sup>北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

**摘要** 为降低复合多曲面聚光器的建造成本并提高其对太阳能的利用效率, 选用内嵌吸收体的单层玻璃管作为复合多曲面聚光器的光热转化部件, 重点研究了单层玻璃管中不同形状吸收体对复合多曲面聚光器光热性能的影响机理。首先, 在光学仿真软件 TracePro 中建立了光学模型, 并基于蒙特卡罗算法模拟分析了吸收体形状对聚光器光学性能的影响机理。然后, 分析了吸收体形状对聚光器出口温度、瞬时集热量和光热转化效率的影响。结果表明, 在相同入射偏角下, “\*”形吸收体接收到的光线数多于矩形网状吸收体。当入射偏角为  $0^\circ \sim 20^\circ$  时, 内嵌“\*”形吸收体的聚光器的平均光线接收率和平均聚光效率分别比内嵌矩形网状吸收体的聚光器增加了 7.37% 和 6.66%。在晴好天气条件下, 内嵌“\*”形吸收体的聚光器的平均出口温度、平均进出口温差、平均瞬时集热量和平均光热转化效率分别为 48.5  $^\circ\text{C}$ 、23.2  $^\circ\text{C}$ 、467.5 W 和 54.85%, 分别比内嵌矩形网状吸收体的情况提高了 43.07%、31.82%、29.83% 和 24.52%。

**关键词** 几何光学; 太阳能; 吸收体; 复合多曲面; 聚光; 性能

中图分类号 TK519

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0508001

## Influence of Absorber Shape on Photothermal Performance of Solar Compound Multi-Surface Concentrator

Chang Zehui<sup>1,2\*</sup>, Liu Xuedong<sup>1</sup>, Liu Jing<sup>1</sup>, Zheng Hongfei<sup>3</sup>, Ma Xinglong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

<sup>2</sup>Engineering Center of Solar Energy Utilization Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** In order to reduce the construction cost of a compound multi-surface concentrator and improve its utilization efficiency of solar energy, the single-layer glass tube embedded absorber is selected as the photothermal conversion component of a compound multi-surface concentrator. The influence mechanism of the absorbers with different shapes in the single-layer glass tube on the photothermal performance of a compound multi-surface concentrator is mainly studied. First, the optical model of the concentrator is established in the optical simulation software TracePro, and the influence mechanism of absorber shapes on the optical performance of the concentrator is simulated and analyzed based on the Monte Carlo algorithm. Then, the influence of absorber shapes on the outlet

收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2021-09-05; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51966012)、内蒙古自治区高校青年科技英才支持计划(NJYT-18-A12)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY17491)、内蒙古科技重大专项(zdxx2018062)、内蒙古自治区研究生科研创新项目(SZ2020071)

通信作者: \*changzehui@163.com

temperature, instantaneous heating collection and photothermal conversion efficiency of the concentrator are analyzed. The results show that under the same incident angle, the number of light received by the “\* ”-shaped absorber is more than that received by the rectangular mesh receiver. When the incident angle is in the range of  $0^{\circ}$ – $20^{\circ}$ , the average light receiving rate and the average concentrating efficiency of the concentrator embedded with the “\* ”-shaped absorber are 7.37% and 6.66% higher than that of concentrator embedded with the rectangular mesh receiver, respectively. Under sunny weather conditions, the average outlet temperature, average discrepancy between air temperature of inlet and outlet, average instantaneous heating collection and average photothermal conversion efficiency of the concentrator embedded with “\* ”-shaped receiver are  $48.5^{\circ}\text{C}$ ,  $23.2^{\circ}\text{C}$ , 467.5 W and 54.85%, respectively, which are 43.07%, 31.82%, 29.83% and 24.52% higher than that of the rectangular mesh receiver, respectively.

**Key words** geometric optics; solar energy; absorber; compound multisurface; concentration; performance

## 1 引 言

太阳能聚光集热器能够将入射光线汇聚到接收体上,从而提高接收体表面的能流密度和太阳能利用效率,是实现太阳能高品位、高效率利用的重要能量转化装置<sup>[1-2]</sup>。相比其他类型的聚光器,复合多曲面聚光器因具有接收半角大、对日跟踪精度要求低、可对散射光进行接收转化和吸收体散热损失小等特点而被广泛应用于太阳能低温供能领域中<sup>[3]</sup>。其中,吸收体是复合多曲面聚光器实现光热转化的关键部件,故寻求不同结构的吸收体来改善其性能尤为重要。

为了减少接收体的导热和对流散热损失,提高聚光器在高温运行时的性能,聚光器中多使用玻璃真空管接收体<sup>[4-9]</sup>。Widyolar 等<sup>[10]</sup>提出了一种可在  $100\sim 250^{\circ}\text{C}$  温度范围内高效工作的复合抛物面聚光器(CPC),其接收体是通过将深色吸收体置于双层玻璃真空管中构成的。通过对聚光器进行仿真计算发现,当该聚光器的运行温度为  $200^{\circ}\text{C}$  时,其光学效率为 71%,热效率为 50%。Deng 等<sup>[11]</sup>设计出了一一种可嵌入建筑墙体内部的玻璃真空管式聚光器,并通过光学模拟与数学拟合计算的方法分析了该聚光器的光学效率。结果表明,该聚光器的最高与平均光学效率分别为 72.2%和 64.5%。吴德众等<sup>[12]</sup>对内置玻璃真空管式接收体的 CPC 结构进行了优化设计,并基于 TracePro 软件,提出了一种 CPC 直射光学效率的模拟计算方法。模拟结果显示,当选择的模拟日期分别为 2017 年 1 月 1 日、4 月 1 日、7 月 1 日和 10 月 1 日时,截取比为 0.16 的 CPC 相较截取比为 0.56 的 CPC,平均直射光学效率分别提高了 13.77%、15.24%、9.30% 和 11.54%。陈飞等<sup>[13]</sup>针对圆形真空管接收体提出了可以同步提高几何聚光比和接收角的新型 CPC,研究发现当入光口宽度角为  $60^{\circ}$  时,几何聚光比为 1.16,可接收角为  $74.39^{\circ}$ ,平均光学效率为 86.77%。

玻璃真空管接收体在实际应用中存在投资成本高、真空夹层间隙漏光、非运行期间过热、密封性要求高和连接工艺要求高等问题<sup>[14]</sup>。针对上述问题,常泽辉等<sup>[15]</sup>利用内聚光形成的“温室效应”,将内嵌深色吸收体的单层玻璃管放置于聚光器焦斑位置处,并研究了不同位置平板吸收体对 CPC 性能的影响。结果表明,当平板吸收体与入射光线平行时,进入聚光器内的所有光线均被吸收体接收,此时聚光器的光线接收率最高,其值为 98.90%。Zheng 等<sup>[16]</sup>通过实验测试研究了不同截面形状接收体对多曲面槽式空气集热器性能的影响。结果表明,圆形单层玻璃管式接收体的出口温度最高,能达到  $140^{\circ}\text{C}$ 。陈超等<sup>[17-19]</sup>为了提高太阳能利用率,提出了一种新型免跟踪双集热管多曲面槽式空气集热器,其中集热管是内嵌深色吸收体的单层玻璃管。基于光学与传热学理论,研究了集热器结构与运行参数对其光学性能与集热性能的影响。结果表明,与同类型单集热管集热器相比,该集热器的空气流量增加了 1 倍,单位面积集热量增加了 16%,集热效率提高了 9%。

为了降低复合多曲面聚光器在实际应用中的建造成本和运维难度,并探索提高太阳能利用效率的方法,本文将内嵌吸收体的单层玻璃管作为复合多曲面聚光器的光热转化部件,利用仿真分析与实验测试的方法对比探究了吸收体形状对复合多曲面聚光器光热性能的影响机理。首先,通过光学仿真确定最优的单层玻璃管管径与安装位置。然后,对内嵌不同形状吸收体的复合多曲面聚光器的光学性能进行了仿真计算,分析了吸收体形状对复合多曲面聚光器光线接收率与聚光效率的影响。基于光学仿真结果,搭建了复合多曲面聚光器光热性能测试实验台,在实际天气条件下测试并分析了吸收体形状对复合多曲面聚光器出口温度、瞬时集热量及光热转化效率的影响。

## 2 复合多曲面聚光器模型与参数

### 2.1 复合多曲面聚光器工作原理

复合多曲面聚光器主要由玻璃盖板、多个抛物反射镜面和接收体(内嵌吸收体的单层玻璃管)等部件构成。其中,复合多曲面聚光器的入光口的宽度为  $L$ ,单位为  $m$ ;单层玻璃管的管径为  $D$ ,单位为  $m$ ;单层玻璃管的安装高度(玻璃管轴线与聚光器底部的距离)为  $H$ ,如图 1 所示。当复合多曲面聚光器运行时,平行于聚光器对称轴的太阳光线一部分经玻璃盖板入射到抛物反射镜面上,反射后入射到单层玻璃管内。另一部分太阳光线直接入射到单层玻璃管内,在被深色吸收体接收后进行光热转化,进入单层玻璃管内的换热空气与吸收体进行热量交换以达到升温要求,进而实现复合多曲面聚光器的聚光集热功能。

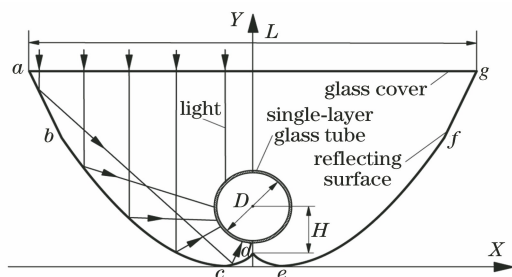


图 1 复合多曲面聚光器聚光原理示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of focusing principle of compound multi-surface concentrator

### 2.2 复合多曲面聚光器建模

为更好地研究复合多曲面聚光器的光学性能,需在 SOLIDWORKS 软件中建立该聚光器的三维模型。其中,抛物反射镜面作为光线收集汇聚部件是影响复合多曲面聚光器光学性能的主要结构,抛物反射镜面截面轮廓由直线  $ab$ 、 $fg$ ,抛物线  $bc$ 、 $ef$  及渐开线  $cd$ 、 $de$  首尾相连构成。曲线  $de$ 、 $ef$ 、 $fg$  的方程<sup>[20]</sup>为

$$\begin{cases} x_{de} = 50 \times (\sin t - t \times \cos t) \\ y_{de} = 80 - 50 \times (\cos t + t \times \sin t) \end{cases}, t \in (0, 1.59), \quad (1)$$

$$y_{ef} = (x_{ef} - 30)^2 / 320, x_{ef} \in (51.76, 290), \quad (2)$$

$$y_{fg} = 2.525 \times (x_{fg} - 290) + 211.25, \quad x_{fg} \in (290, 340), \quad (3)$$

将建好的抛物反射镜面模型与玻璃盖板、单层玻璃管等部件的模型装配到一起后可形成复合多曲面聚光器的三维模型,如图 2 所示。

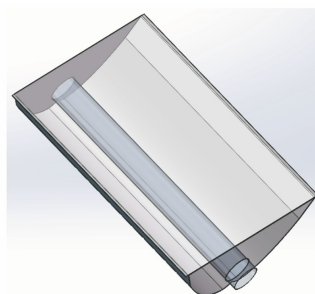


图 2 复合多曲面聚光器的三维模型  
Fig. 2 Three-dimensional model of compound multi-surface concentrator

嵌于单层玻璃管中的吸收体的性能会受到自身与太阳光的接触面积、自身对太阳光的反射与吸收能力和自身传热特性等因素的影响。综合考虑上述因素,设计了两种“光陷阱”型吸收体,其三维模型分别如图 3(a)和图 3(b)所示。“\*”形吸收体由 6 个尺寸相同的长方形不锈钢片呈放射状焊接而成。矩形网状吸收体由矩形不锈钢管与带有尺寸为  $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$  矩形网格的双层吸收网构成,并在其表面均匀喷涂了深色光吸收材料。

在探究吸收体形状对复合多曲面聚光器光学性能的影响之前,利用 SOLIDWORKS 软件将设计好的吸收体与复合多曲面聚光器的三维模型进行装配,如图 4(a)和图 4(b)所示。装配好的复合多曲面聚光器几何参数如表 1 所示。

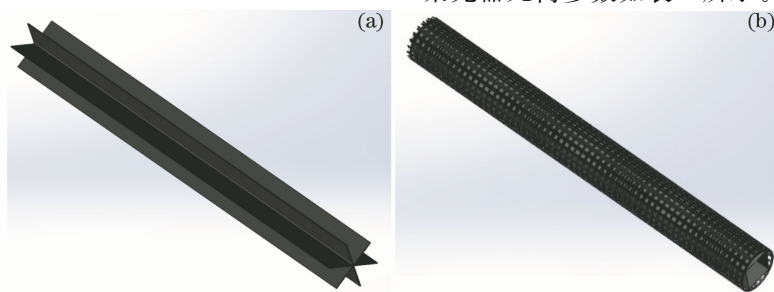


图 3 吸收体三维模型。(a)“\*”形吸收体;(b)矩形网状吸收体

Fig. 3 Three-dimensional models of absorbers. (a) “\*”-shaped absorber; (b) rectangular mesh absorber

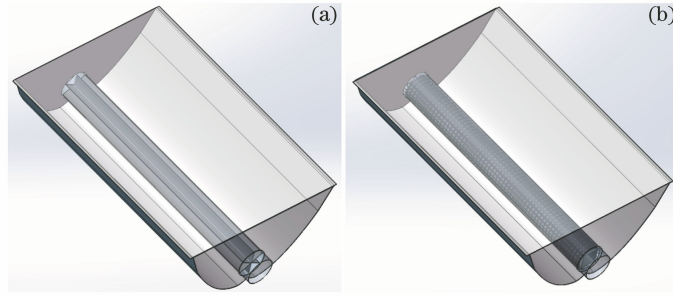


图 4 内嵌不同吸收体的复合多曲面聚光器三维模型。(a)“\*”形吸收体;(b)矩形网状吸收体

Fig. 4 Three-dimensional models of compound multi-surface concentrator embedded with different absorbers.

(a) “\*”-shaped absorber; (b) rectangular mesh absorber

表 1 复合多曲面聚光器几何建模参数

Table 1 Geometric modeling parameters of compound multi-surface concentrator

Structure	Geometric parameter / (mm×mm×mm)	
Reflecting surface	Length×width×height	2000×678×319
Glass cover	Length×width×thickness	2000×678×2
Single-layer glass tube	Length×diameter×thickness	2000×110×2
“*”-shaped receiver	Length×diameter×thickness	2000×108×1.5
Rectangular mesh receiver	Outer mesh structure	Length×diameter×thickness
	Inner mesh structure	Length×diameter×thickness
	Rectangular structure	Length×width×thickness

光学仿真软件 TracePro 可以直观地展示光线在聚光器内的传输轨迹,并可对聚光器在不同工况下的光学性能进行仿真。将装配好的复合多曲面聚光器三维模型导入到 TracePro 软件中,建立 500×200 条的平行格点光源,为与实际测试中的太阳辐照度保持一致,设定光源的太阳辐照度为 700 W/m<sup>2</sup>。随后,设置复合多曲面聚光器各部件的材质属性,分别将复合多曲面聚光器中玻璃盖板的光线透过率、抛物反射镜面的光线反射率、单层玻璃管的光线透过率和吸收体的表面吸收率设置为 92%、90%、92%和 100%。

### 2.3 复合多曲面聚光器的性能评价参数

为了准确分析不同因素对复合多曲面聚光器光热性能的影响情况,选用几何聚光比  $C_g$ 、光线接收率  $\eta_o$ 、聚光效率  $\eta_c$ 、瞬时集热量  $Q$  及平均光热转化效率  $\eta$  等参数对复合多曲面聚光器的光热性能进行定量评价,各参数的计算公式如下。

1) 几何聚光比  $C_g$

$$C_g = \frac{A_c}{A_t} = \frac{L}{\pi D}, \quad (4)$$

式中: $A_c$  为复合多曲面聚光器的入光口面积,单位为 m<sup>2</sup>;  $A_t$  为单层玻璃管的侧面积,单位为 m<sup>2</sup>。

2) 光线接收率  $\eta_o$

$$\eta_o(\alpha) = \frac{N(\alpha)}{N(0)}, \quad (5)$$

式中: $\alpha$  为入射光线偏角; $N(\alpha)$  为入射光线偏角为  $\alpha$  时吸收体表面接收到的光线数; $N(0)$  为入射光线正入射时吸收体表面接收到的光线数。此外,复合多曲面聚光器的光线接收率的单位为 %。

3) 聚光效率  $\eta_c$

$$\eta_c(\alpha) = \frac{E(\alpha)}{E(0)}, \quad (6)$$

式中: $E(\alpha)$  为入射光线偏角为  $\alpha$  时吸收体表面的能流密度,单位为 W/m<sup>2</sup>;  $E(0)$  为入射光线正入射时光线进入聚光器入光口中的能流密度,单位 W/m<sup>2</sup>。此外,复合多曲面聚光器的聚光效率的单位为 %。

4) 瞬时集热量  $Q$

$$Q = mc_p(T_{out} - T_{in}), \quad (7)$$

式中: $m$  为复合多曲面聚光器单层玻璃管内换热空气的流量,单位为 kg/s;  $c_p$  为对应运行温度下的空气比热容,单位为 J/(kg·K);  $T_{in}$  和  $T_{out}$  分别为复合多曲面聚光器进出口处空气的温度,单位 K。此外,复合多曲面聚光器的瞬时集热量的单位为 W。

5) 平均光热转化效率  $\eta$

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q dt}{\int_{t_1}^{t_2} G_{sun} A_c dt}, \quad (8)$$

式中: $G_{sun}$  为进入复合多曲面聚光器入光口中的太

阳辐射能,单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $t_1$  和  $t_2$  为复合多曲面聚光器运行开始和结束时间。此外,复合多曲面聚光器的平均光热转化效率的单位为 %。

### 3 吸收体形状的优选及对比分析

影响复合多曲面聚光器光热性能的主要因素包括单层玻璃管管径、安装位置、光线透过率、吸收体形状和表面吸收率等,因此在对吸收体形状进行优选之前,需要明确单层玻璃管的管径与安装位置。

#### 3.1 单层玻璃管管径与安装位置的确定

在利用 TracePro 软件进行仿真计算之前,需将单层玻璃管设置为圆柱形吸收体。经计算,得到了单层玻璃管的管径对复合多曲面聚光器光线接收率和几何聚光比的影响情况。其中,光线接收率为光线入射偏角分别为  $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 20^\circ$  时计算结果的平均值。

复合多曲面聚光器的光线接收率与几何聚光比随单层玻璃管管径的变化情况如图 5 所示。可以发现,当单层玻璃管管径增加时,复合多曲面聚光器的几何聚光比减小,光线接收率增加,即随着单层玻璃管管径的增加,该聚光器的集热温度在降低,光学性能在提升。综合考虑复合多曲面聚光器可被应用于太阳能低温供能系统中及图 5 中两条曲线的变化趋势,优选市场中管径为 110 mm 的单层玻璃管。

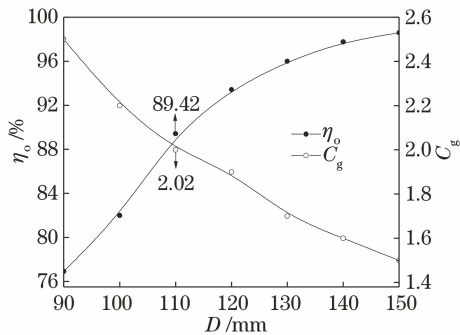


图 5  $\eta_0$  与  $C_g$  随  $D$  的变化

Fig. 5  $\eta_0$  and  $C_g$  varying with  $D$

单层玻璃管的安装位置同样会影响复合多曲面聚光器的光热性能,其中安装位置包括安装高度和安装角度。安装角度以与聚光器对称轴重合为宜,而安装高度的变化会影响到聚光器对入射光线的接收效果和传热特性。因此,对单层玻璃管安装高度  $H$  与光热性能之间的关系进行研究是有意义的。经仿真计算可得到复合多曲面聚光器的光线接收率与聚光效率随  $H$  的变化,如图 6 所示。可以看出,随着  $H$  的增大,光线接收率与聚光效率的变化趋势

一致,均先增加后减小;当  $H$  分别为 75 mm 和 80 mm 时,光线接收率与聚光效率达到最高。当单层玻璃管安装位置较低时,复合多曲面聚光器的重心较低,便于运输和安装,且有助于增强聚光器在运行时的稳定性。因此,单层玻璃管的最佳安装高度为 75 mm。

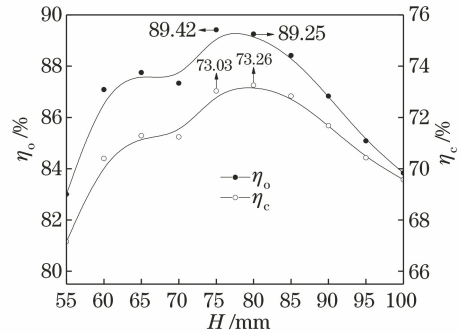


图 6  $\eta_0$  与  $\eta_c$  随  $H$  的变化

Fig. 6  $\eta_0$  and  $\eta_c$  varying with  $H$

#### 3.2 内嵌不同吸收体的聚光器的光学性能分析

对于固定安装运行的复合多曲面聚光器,其光学性能会受光线入射偏角  $\alpha$  的影响。因此,在不同的光线入射偏角下,对内嵌不同吸收体的复合多曲面聚光器进行光线追迹。吸收体形状对聚光器光线传输轨迹的影响情况如图 7 所示。可以发现,随着入射偏角的增加,进入聚光器内被吸收体接收的入射光线逐渐减少,被聚光器反射而逸出的光线逐渐增加。当光线正入射时,入射光线均被吸收体接收,仅有极少数光线逸出,且聚光器腔内光线传输轨迹呈对称分布。当光线入射偏角相同时,“\*”形吸收体接收到的光线数大于矩形网状吸收体。此外,当聚光器内嵌矩形网状吸收体时,矩形结构腔内接收不到光线,而当聚光器内嵌“\*”形吸收体时,单层玻璃管轴线处仍能接收到光线,这表明“\*”形吸收体的径向有效光线接收面积大于矩形网状吸收体。

吸收体表面能流密度分布的不均匀性会导致吸收体表面温度梯度大、形成显著的热应力与热变形,进而降低吸收体与空气介质的换热效率并减少吸收体的工作寿命<sup>[21]</sup>。为了对比不同形状吸收体表面的能流密度分布情况,在聚光器光学性能最优的正入射条件下,对两种形状吸收体中接收光线最多的表面进行能流密度分布计算。 $\alpha = 0^\circ$  情况下的“\*”形吸收体与矩形网状吸收体表面的能流密度分布情况,如图 8(a)、(b)所示,其中  $X_1$  表示单层玻璃管径向距离, $Y_1$  表示沿单层玻璃管轴向选取的吸收体长度。由于吸收体表面高能流密度区域中能

流密度分布的不均匀性对吸收体性能的影响更大,因此重点关注当  $X_1$  取值范围为 66~110 mm 时,吸收体表面沿  $Y_1$  轴的能流分布情况。可以发现,“\*”形吸收体与矩形网状吸收体的高能流密

度区均出现在  $X_1 = 88$  mm 附近,但是“\*”形吸收体沿  $Y_1$  轴的能流密度分布的均匀性明显优于矩形网状吸收体,这表明“\*”形吸收体在光热转化过程中性能更优。

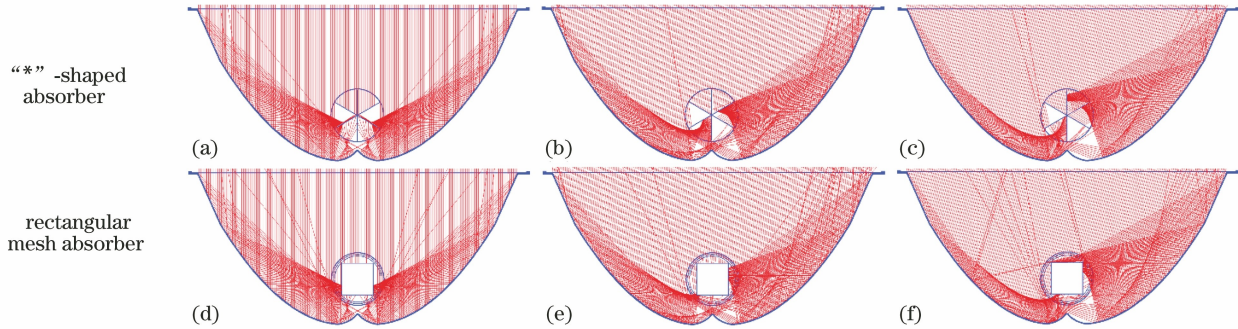


图 7 不同  $\alpha$  下的复合多曲面聚光器光线追迹图。(a)(d)  $\alpha = 0^\circ$ ; (b)(e)  $\alpha = 6^\circ$ ; (c)(f)  $\alpha = 12^\circ$

Fig. 7 Ray tracing diagrams of compound multi-surface concentrator under different  $\alpha$ .

(a)(d)  $\alpha = 0^\circ$ ; (b)(e)  $\alpha = 6^\circ$ ; (c)(f)  $\alpha = 12^\circ$

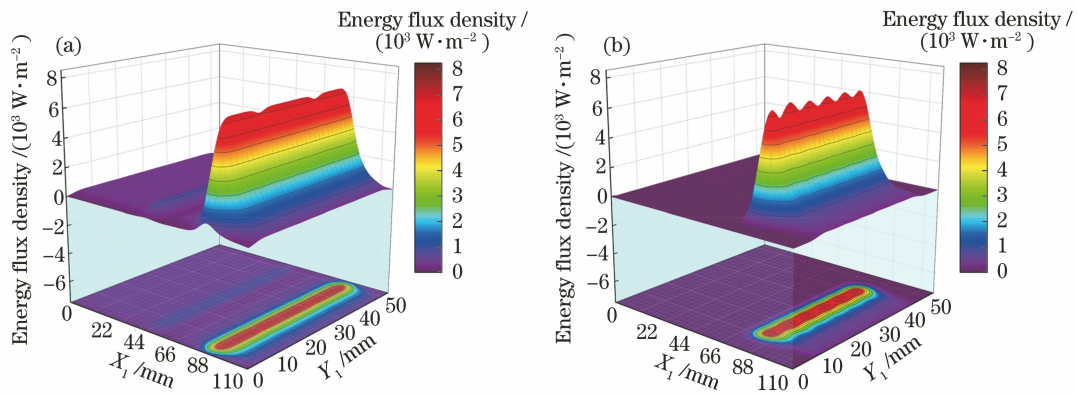


图 8 当  $\alpha = 0^\circ$  时,不同吸收体表面的能流密度分布。(a)“\*”形吸收体;(b)矩形网状吸收体

Fig. 8 Energy flux density distribution on surfaces of different absorbers when  $\alpha = 0^\circ$ .

(a) “\*”-shaped absorber; (b) rectangular mesh absorber

### 3.3 内嵌不同吸收体的聚光器的光学性能计算

由 3.2 节的仿真分析结果可知,复合多曲面聚光器内嵌“\*”形吸收体时的光学性能较好,下面将进一步定量计算吸收体形状对复合多曲面聚光器光学性能的影响。当该聚光器内嵌不同吸收体时,其光线接收率随入射偏角的变化情况如图 9 所示。可以发现,当入射偏角增大时,聚光器内嵌不同吸收体时的光线接收率变化趋势一致;当  $\alpha < 14^\circ$  时,聚光器的光线接收率受入射偏角的影响较小;当  $\alpha > 14^\circ$  时,光线接收率开始急剧降低;当光线正入射时,该聚光器光线接收率达到最高,此时聚光器在内嵌“\*”形吸收体与矩形网状吸收体的光线接收率分别为 96.00% 和 95.16%。此外,当  $\alpha$  为  $0^\circ \sim 20^\circ$  时,聚光器内嵌“\*”形吸收体时的光线接收率均大于矩形网状吸收体,前者的平均光线接收率为 87.88%,比

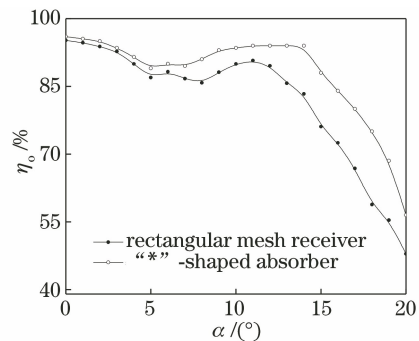


图 9  $\eta_0$  随  $\alpha$  的变化

Fig. 9  $\eta_0$  varying with  $\alpha$

后者增加了 7.37%。

图 9 是在不考虑光线携带能量及光线反射次数对能量传输影响的情况下,从光学研究角度分析了吸收体形状对聚光器光学效率的影响。由于聚光器

是能量转化装置,因此从光线传输能量角度进行分析才能更准确地评价其光学性能。聚光效率是在考虑吸收体接收到的入射光能量及多次反射光线传输的能量后,评价聚光器光学性能的参数。内嵌不同形状吸收体的聚光器的聚光效率随入射偏角的变化如图 10 所示。可以发现,当聚光器内嵌不同形状的吸收体时,其聚光效率随入射偏角的变化趋势与光线接收率的变化趋势一致。当  $\alpha = 0^\circ$  时,内嵌“\*”形与矩形网状吸收体的聚光器的聚光效率最高,分别为 73.05% 和 72.58%。当  $\alpha$  在  $0^\circ \sim 20^\circ$  时,聚光器内嵌“\*”形吸收体的平均聚光效率为 66.02%,

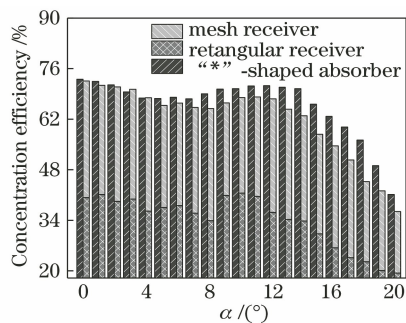


图 10 聚光效率随  $\alpha$  的变化

Fig. 10 Concentration efficiency varying with  $\alpha$

比内嵌矩形网状吸收体高 6.66%。此外,矩形网状吸收体中网状结构与矩形结构在  $\alpha$  为  $0^\circ \sim 20^\circ$  时的平均聚光效率分别为 27.98% 和 33.92%。

## 4 吸收体形状对复合多曲聚光器光热性能的影响

为了得到复合多曲面聚光器在实际运行工况下,吸收体形状对其光热性能的影响,搭建了复合多曲面聚光器光热性能测试实验台。在实际天气条件下测试分析了聚光器的运行工况、吸收体形状对其出口空气温度、瞬时集热量和光热转化效率等参数的影响,获取到了该类型聚光器实际运行的测试数据和性能变化情况。

### 4.1 测试系统与方法

复合多曲面聚光器光热性能测试实验台包括复合多曲面聚光器、气象参数监测与记录系统、温度参数测试与采集系统以及空气流速控制与校核系统,如图 11 所示。在测试过程中,将复合多曲面聚光器入光口正南朝向放置,并通过调节聚光器安装倾角使正午时的太阳光线垂直入射到聚光器的入光口处。

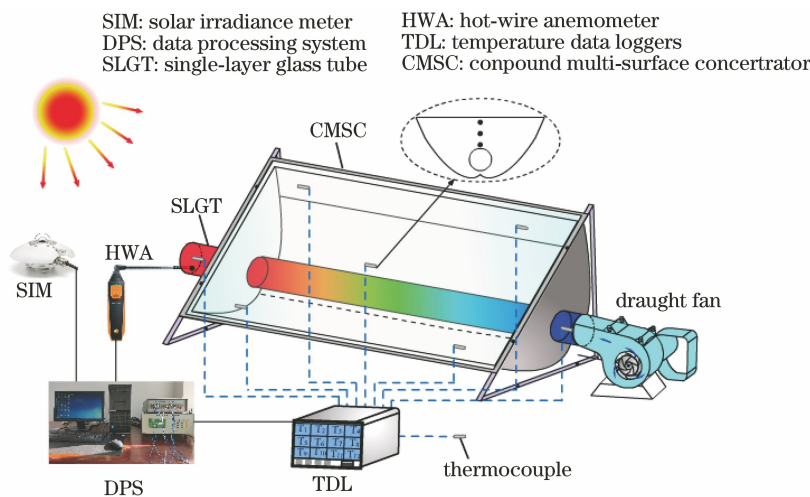


图 11 复合多曲面聚光器光热性能测试实验台

Fig. 11 Test bench for photothermal performance of compound multi-surface concentrator

测试数据包括空气流速、环境风速、太阳辐照度、环境温度、接收体进出口空气温度和聚光器腔内温度等。选用耐高温离心引风机(DZ160)驱动换热空气循环并由热线风速仪(testo 405i)对恒定空气流速进行实时校核,选用太阳能发电监测系统(TRM-FD1)对太阳辐照度进行监测并实时记录测试值,选用 K 型热电偶测量环境、接收体进出口等测点的温度值,并由无纸记录仪(Sin-R6000C)实时

采集测试数据。本次测试的地点为内蒙古呼和浩特市太阳能光热产业示范基地( $40^\circ 50' N$ ,  $111^\circ 42' E$ ),测试时空气平均流速稳定在 1.8 m/s 左右。同时,为提高测试准确性,在实验测试开始前完成了对所使用的测试仪器与元件的校核。

此外,在使用仪器测试太阳辐照度、温度和空气流速等物理量时,会产生直接测量误差。通过这些物理量计算瞬时集热量、光热转化效率等性能参数

时还会进一步产生间接测量误差。因此,为准确评价复合多曲面聚光器在实际运行工况下的光热性能,需对测试的不确定度进行分析,本次测试中各待测物理量的直接测试误差如表 2 所示。

表 2 直接测试物理量的误差

Table 2 Errors of direct testing physical quantities

Physical quantity	Error /%
Solar irradiance	2
Temperature	0.4
Air flow rate	0.7

根据(7)式、(8)式及误差分析理论计算可得瞬时集热量和光热转化效率的误差<sup>[22]</sup>,计算公式为

$$\Delta Q = \sqrt{(\Delta T)^2 + (\Delta v)^2}, \quad (9)$$

式中: $\Delta Q$  为瞬时集热量的相对误差,单位为%; $\Delta T$  为温度的测量误差,单位为%; $\Delta v$  为空气流速的测量误差,单位为%。

$$\Delta \eta = \sqrt{(\Delta T)^2 + (\Delta v)^2 + (\Delta G_{\text{sun}})^2}, \quad (10)$$

式中: $\Delta \eta$  为光热转化效率的相对误差,单位为%; $\Delta G_{\text{sun}}$  为太阳辐照度的测量误差,单位为%。

经计算,瞬时集热量与光热转化效率的相对误差分别为 0.8% 和 2.2%,满足测试精度要求。

#### 4.2 测试结果与分析

为准确测试复合多曲面聚光器内嵌不同形状吸收体时的光热性能,选择了太阳辐照度、空气质量和环境温度相近的测试日,测试时间段为 9:00—15:00。不同测试日的太阳辐照度随测试时间的变化情况如图 12 所示。可以发现,对比测试日的太阳辐照度变化趋势相近,在正午时均达到辐照度峰值。

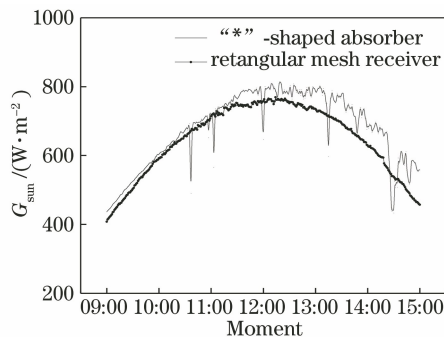


图 12  $G_{\text{sun}}$  随测试时间的变化情况  
Fig. 12  $G_{\text{sun}}$  varying with test time

复合多曲面聚光器中接收体的出口温度值是聚光器对外输出热能品位的数值体现。测试期间不同形状接收体的出口温度随时间的变化情况如图 13 所示。可以发现,不同形状接收体的出口温度随时间的变化趋势与当日太阳辐照度随时间的变化趋势

一致,均随测试时间先增大后减小,并在正午前后达到最大值。其中,“\*”形接收体的最大出口温度为 56.5 °C,比矩形网状接收体的最大出口温度高 13.5 °C。测试期间“\*”形接收体的出口温度始终大于矩形网状接收体的出口温度,前者的平均出口温度与进出口温差分别为 48.5 °C 与 23.2 °C,分别比后者高 43.07% 和 31.82%,测试结果与光学仿真计算的结果一致。

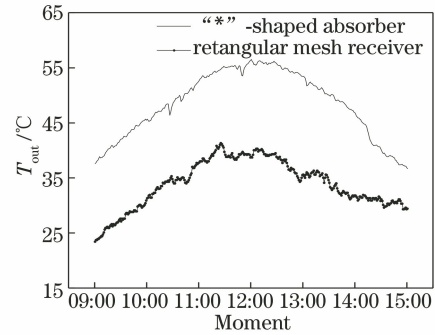


图 13  $T_{\text{out}}$  随测试时间的变化  
Fig. 13  $T_{\text{out}}$  varying with test time

瞬时集热量是复合多曲面聚光器光热性能的重要评价参数之一。在测试期间,当复合多曲面聚光器内嵌不同形状吸收体时,其瞬时集热量随时间的变化情况如图 14 所示。可以发现,该聚光器内嵌“\*”形与矩形网状吸收体时的瞬时集热量变化趋势一致,即在正午时达到最大,随着测试时间偏离正午时刻,瞬时集热量的值开始减小,这主要是因为正午时太阳辐照度值最高、入射光线偏角最小且环境温度较高,使得正午时吸收体接收到的太阳辐射能最多,且吸收体的散热损失最小。此外,在测试期间,该聚光器内嵌“\*”形吸收体的瞬时集热量始终大于内嵌矩形网状吸收体,前者最大与平均瞬时集热量分别为 594.6 W 和 467.5 W,分别比后者高 86.8 W 和 107.4 W(29.83%)。

为进一步分析吸收体形状对复合多曲面聚光器

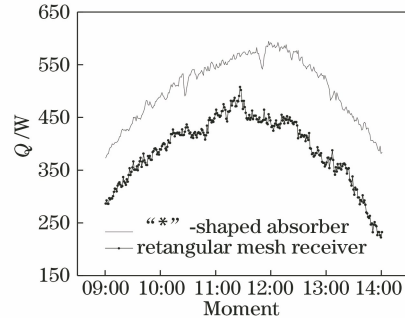


图 14  $Q$  随测试时间的变化情况  
Fig. 14  $Q$  varying with test time



光热性能的影响,对该聚光器在内嵌不同形状吸收体时的光热转化效率进行了计算,各项参数的对比情况如表 3 所示。可以发现,在太阳辐照度相近的情况下,聚光器内嵌“\*”形吸收体时的光热转化效率明显大于内嵌矩形网状吸收体的情况,二者在测试期间的平均光热转化效率分别为 54.85% 和 44.05%,前者比后者高 24.52%。

表 3 复合多曲面聚光器内嵌不同吸收体时的参数对比

Table 3 Parameter comparison of compound multi-surface concentrator with different absorbers

Parameter	“*”-shaped absorber	Rectangular mesh absorber
Solar irradiance / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	738	702
Concentrating area / $\text{m}^2$	1.3	1.3
Air flow rate / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.81	1.81
Discrepancy between inlet and outlet air temperature / $^{\circ}\text{C}$	25.3	19.7
Light-thermal conversion efficiency / %	54.85	44.05

## 5 结 论

为降低复合多曲面聚光器的建造成本、提高其对太阳能的利用效率和推动其产业化应用,选用内嵌吸收体的廉价单层玻璃管作为该聚光器的光热转化部件。首先,在光学仿真软件 TracePro 中建立了复合多曲面聚光器的光学模型,通过仿真计算得到了单层玻璃管的最佳管径与安装高度,其值分别为 110 mm 和 75 mm。在此基础上,模拟计算了吸收体形状对该聚光器光学性能的影响。仿真结果表明,当光线入射偏角相同时,“\*”形吸收体的径向有效光线接收面积大于矩形网状吸收体,且“\*”形吸收体在光线正入射时表面能流密度分布的均匀性优于矩形网状吸收体。当入射偏角为  $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$  时,聚光器内嵌“\*”形吸收体时的平均光线接收率与聚光效率分别为 87.88% 和 66.02%,分别比内嵌矩形网状吸收体时高 7.37% 和 6.66%,这表明“\*”形吸收体是更适合复合多曲面聚光器高效运行的吸收体。

为验证光学仿真计算结果,搭建了复合多曲面聚光器光热性能测试实验台,分析了吸收体形状对聚光器光热性能的影响规律。测试结果表明,在晴好天气条件下,内嵌“\*”形吸收体聚光器的平均出口温度、平均进出口温差、平均瞬时集热量和平均光热转化效率分别为  $48.5^{\circ}\text{C}$ 、 $23.2^{\circ}\text{C}$ 、 $467.5\text{ W}$  和 54.85%,分别比内嵌矩形网状吸收体高 43.07%、

31.82%、29.83% 和 24.52%。不难发现,测试结果与仿真计算结果相一致,即复合多曲面聚光器内嵌“\*”形吸收体时的光热性能优于内嵌矩形网状吸收体的情况,这为该聚光器的产业化推广应用提供了优化方向和数据支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Meng X L, Liu B, Duan C X, et al. Optical transmission characteristic of novel trough type CPV/T concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1522002.  
孟宪龙, 刘备, 段辰星, 等. 一种新型槽式太阳能 CPV/T 聚光器的光学传输特性[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1522002.
- [2] Yan J, Nie D Z, Peng Y D, et al. Design of solar dish concentrator for improving flux uniformity on planar receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0922002.  
颜健, 聂笃忠, 彭佑多, 等. 可改善平面接收器能流均匀性的太阳能碟式聚光器设计[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0922002.
- [3] Xu J T, Chen F, Deng C G. Design and analysis of a novel multi-sectioned compound parabolic concentrator with multi-objective genetic algorithm [J]. Energy, 2021, 225: 120216.
- [4] Korres D N, Tzivanidis C. Numerical investigation and optimization of an experimentally analyzed solar CPC[J]. Energy, 2019, 172: 57-67.
- [5] Kim Y S, Balkoski K, Jiang L, et al. Efficient stationary solar thermal collector systems operating at a medium-temperature range[J]. Applied Energy, 2013, 111: 1071-1079.
- [6] Li Z L, Chen M X, Meng H S, et al. Study on a mid-temperature trough solar collector with multisurface concentration[J]. International Journal of Photoenergy, 2015, 2015: 217031.
- [7] Karwa N, Jiang L, Winston R, et al. Receiver shape optimization for maximizing medium temperature CPC collector efficiency [J]. Solar Energy, 2015, 122: 529-546.
- [8] Zheng H F, Wu G, Dai J, et al. Design and testing of a shell-encapsulated solar collector with the compound surface concentrators [J]. International Journal of Photoenergy, 2015, 2015: 130187.
- [9] Duan P F, Gui T T, Chen F, et al. Surface shape model research for compound parabolic concentrators with circular absorber and its simulation verification [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0622002.  
段鹏飞, 桂特特, 陈飞, 等. 圆形吸收体复合抛物聚光器面形模型研究及仿真验证[J]. 光学学报, 2017,

- 37(6): 0622002.
- [10] Widyolar B, Jiang L, Ferry J, et al. Non-tracking East-West XCPC solar thermal collector for 200 celsius applications[J]. Applied Energy, 2018, 216: 521-533.
- [11] Deng C G, Chen F. Preliminary investigation on photo-thermal performance of a novel embedded building integrated solar evacuated tube collector with compound parabolic concentrator[J]. Energy, 2020, 202: 117706.
- [12] Wu D Z, Li M, Li G L, et al. Photothermal properties of compound parabolic concentrator under low interception ratio [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 082201.  
吴德众, 李明, 李国良, 等. 低截取比下复合抛物面聚光器的光热性能[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 082201.
- [13] Chen F, Gao C, Yang C X, et al. Surface-shape construction and optical analysis of novel solar compound parabolic concentrator with circular absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (6): 0608001.  
陈飞, 高崇, 杨春曦, 等. 新型圆形吸收体太阳能复合抛物面聚光器面形构建及光学分析[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0608001.
- [14] Li J Y. Thermal performance research on solar compound parabolic concentration system [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2020: 15-16.  
李建业. 复合抛物面太阳能聚光集热系统热性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2020: 15-16.
- [15] Chang Z H, Zhu G P, Li J Y, et al. Influences of receiver on concentrator performance of solar building heating system [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(12): 3651-3656.  
常泽辉, 朱国鹏, 李建业, 等. 接收体对太阳能建筑采暖用聚光器性能影响[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3651-3656.
- [16] Zheng H F, Tao T, Ma M, et al. Experimental test of a novel multi-surface trough solar concentrator for air heating[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 63: 123-129.
- [17] Chen C, Han F T, Mahkamov K, et al. Numerical and experimental study of laboratory and full-scale prototypes of the novel solar multi-surface air collector with double-receiver tubes integrated into a greenhouse heating system[J]. Solar Energy, 2020, 202: 86-103.
- [18] Chen C, Zhang M X, Zheng H F, et al. Thermal performance experiment for multiple clamber trough solar air collector with dual collector tubes for solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 245-252.  
陈超, 张明星, 郑宏飞, 等. 日光温室用双集热管多曲面槽式空气集热器性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 245-252.
- [19] Han F T, Chen C, Mahkamov K, et al. Modeling of a multi-surface air collector with double-receiver tubes applied in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 243-251.  
韩枫涛, 陈超, Mahkamov K, 等. 温室双集热管多曲面槽式空气集热器模型构建与应用[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 243-251.
- [20] Liu F Z, Zheng H F, Jin R H, et al. Design of a multi-surface solar concentrator [J]. Journal of Daylighting, 2019, 6(2): 176-186.
- [21] Yan J, Nie D Z, Tian Y, et al. Optimal design of concave lens for flux homogenization of solar dish/cavity collector system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1022001.  
颜健, 聂笃忠, 田勇, 等. 基于凹面透镜优化的太阳能碟式/腔体接收器系统聚焦能流均匀化研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1022001.
- [22] Ma Y Y. Study on heat collection performance of snow-proof and concentrating flat solar collector[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2020: 33-34.  
马远洋. 防雪聚光型平板太阳能集热器集热性能研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020: 33-34.