

倒梯形腔体接收器的结构设计及光学性能

王志敏^{1,2}, 田瑞^{1,2}, 齐井超¹, 李培涛¹, 卫强¹

¹内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

²风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要 针对槽式聚光系统,设计了一种倒梯形管簇式腔体接收器,采用理论研究、TracePro 软件模拟以及实验的方法对腔体结构设计中某些几何参数对接收器的光学性能的影响进行分析及优化,并对其安装位置偏移对光学性能的影响展开研究。结果表明:倒梯形上壁面为弧面反射面可使光学效率提高近 4%;随着开口角度增大光学效率逐渐增大,随着圆弧半径增大光学效率先增大后缓慢降低,开口角度 65°与反射圆弧半径 90 mm 的组合结构具有较高的光学效率、较均匀的集热管壁能流以及较好的光热转化效率;腔体接收器安装在焦距垂直向下 5 mm 范围内可获得优于焦距处的光学效率;运用归一化温差和测试瞬时集热效率的方法得到槽式聚光集热系统的光学效率为 73%,与模拟的理想值较吻合。

关键词 光学设计;腔体接收器;蒙特卡罗光学追迹法;槽式聚光器;光学效率

中图分类号 TK513.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1222003

Structural Design and Optical Performance of Inverted Trapezoidal Cavity Receiver

Wang Zhimin^{1,2}, Tian Rui^{1,2}, Qi Jingchao¹, Li Peitao¹, Wei Qiang¹

¹ School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology,
Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

² Ministry of Education Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Utilization Technology,
Hohhot, Inner Mongolia 010051, China

Abstract A new inverted trapezoidal cavity receiver with absorber of a bundle of tubes used in trough solar concentrator system is designed. The influence of some geometric parameters in the cavity design on the optical performance of the receiver are theoretically analyzed and optimized by theoretical analysis, Tracepro software simulation and experimental methods. Furthermore, the influence of installation position deviations on optical performance of the cavity receiver are studied. Simulation and analysis results show that the wall surface on inverted trapezoid is reflex arc surface, whose optical efficiency can be improved nearly 4%. The optical efficiency increases gradually with the increase of opening angle, and firstly increases and then decreases slowly with the increase of arc radius. The combination of the opening angle of 65° and the radius of the reflection arc 90 mm has higher optical efficiency, more uniform energy flux distribution on the wall of collector tube, and better photothermal transfer efficiency. When vertical installation position is 5 mm below focal length, the optical efficiency is better than that at the focal length. By using the normalized temperature difference and the test method of the instantaneous heat collection efficiency, the optical efficiency of the trough concentrating collector is 73%, which is in good agreement with the ideal value of the simulation.

Key words optical design; cavity receiver; Monte Carlo ray-trace method; trough concentrator; optical efficiency

OCIS codes 220.1770; 080.2740; 350.6050; 000.6850; 260.2160

收稿日期: 2017-08-21; **收到修改稿日期:** 2017-08-31

基金项目: 内蒙古自治区重大基础研究开放课题(2017)、内蒙古自治区科技创新引导奖励基金(2017)

作者简介: 王志敏(1982—),女,博士研究生,讲师,主要从事传热传质强化和新能源利用技术方面的研究。

E-mail: wzm.imut@163.com

导师简介: 田瑞(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事传热传质强化和能源利用技术方面的研究。

E-mail: tianr@imut.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

槽式太阳能聚光系统是典型的太阳能应用模式,其中接收器是系统中光热转化的重要部件,除常用的玻璃-金属直通式真空管之外,基于黑腔效应且成本低、稳定性好的腔体接收器被国内外学者广泛研究^[1-2]。腔体接收器的结构以及与聚光镜之间的光学耦合关系直接影响槽式系统的光学性能,因此在腔体接收器结构的设计及优化过程中引入光学分析对槽式太阳能聚光系统有重要意义。

Boyd 等^[3]提出圆柱形的线聚焦腔体接收器,并加装了圆弧形的保温层;Barra 等^[4]和 Chou 等^[5-6]提出在圆柱形腔体接收器内布置吸热圆管以及将圆管与腔体内壁紧密结合的方案;Rynolds 等^[7]对梯形腔体接收器进行实验研究,重点研究了腔体的结构布置;Singh 等^[8]对管簇结构的梯形腔体热损特性进行了计算流体力学(CFD)模拟和实验测试研究,分析了各种结构参数的影响,不过其应用场合为非涅耳透镜太阳能聚光系统;翟辉^[9]对线聚焦下不同结构腔体集热器的光学性能以及集热性能进行了优化和实验研究;陈飞等^[10-11]对“V”型太阳能线聚焦腔体吸收器进行理论、光学模拟等研究;戴景民等^[12]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。徐立等^[13]对抛物面槽式太阳能集热器热性能测试中的稳态和动态测试两种方法进行对比,提出其适用范围。

综上所述,当前国内外针对腔体接收器的研究多以强化传热、减少热损为主,在腔体结构设计以及与槽式聚光器的光学匹配方面涉及不多。而在腔体光学几何参数设计中协同考虑太阳光线从入射到反射会聚进入腔内集热器的全部光程可提高腔体接收器的光学特性,因此本文从几何光学理论对一种倒梯形管簇式腔体接收器的结构进行分析,通过 TracePro 光学软件对腔体结构设计及优化展开模拟,并对腔体接收器的安装位置偏移对聚光系统光学性能的影响展开模拟研究,最后通过实验的方法验证该腔体结构的光学性能,从而为工程实际应用提供理论依据和数据参考。

2 物理模型及参数介绍

2.1 槽式太阳能聚光系统

槽式太阳能聚光集热系统由聚光和集热两部分组成,其原理为将入射太阳辐照光线通过槽式聚光器会聚成高能流密度的能量后被安装在焦线处的接收器所吸收,并进行后续的太阳能热利用。模拟中用到的槽式聚光装置为抛物型槽式聚光器,其抛物面母线方程为 $y = x^2/1.82$,其他具体结构参数见表 1。槽式太阳能聚光器-腔体接收器的系统示意图如图 1 所示。

表 1 抛物型槽式聚光镜的相关参数

Table 1 Parameters of the parabolic trough concentrator

Parameter	Value
Length L /mm	1500
Aperture width W /mm	1500
Focal length f /mm	455
Glass thickness d /mm	3
Reflectivity ρ	0.91

2.2 倒梯形腔体接收器

接收器是太阳能聚光集热系统中的核心部件,其光学性能直接影响着光热转化效率。腔体接收器是基于黑腔原理设计的装置,入射光线在聚光器反射后通过采光孔进入腔体,在腔体内经过多次直射、反射和漫反射,最终部分光线被腔体的集热元件所接收,接收的光线在集热元件上实现光热转换并被流动工质带走。本研究根据现有抛物型槽式聚光器设计了倒梯形管簇式结构的腔体接收器,其剖面结构如图 2 所示,腔体接收器内部为倒梯形结构,中间为保温材料,外表面呈长方形,为使进入腔体接收器的光线实现光热转化最大化,该设计中采用了管簇式布置。

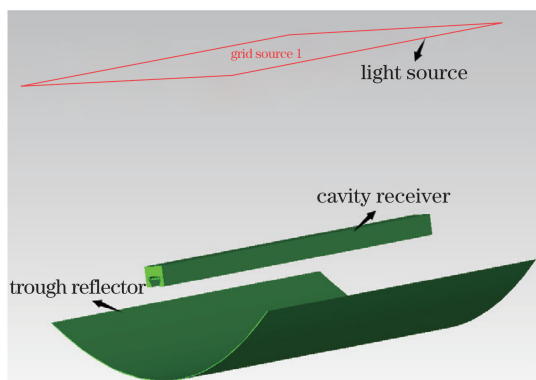
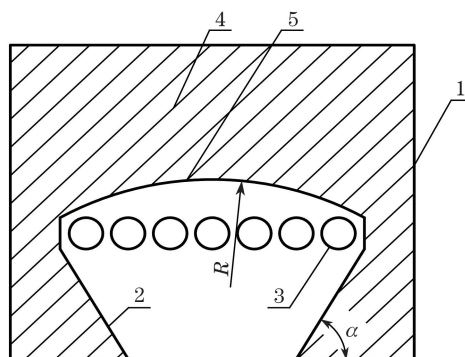


图 1 槽式聚光-腔体接收器集热系统示意图

Fig. 1 Schematic of trough reflector-cavity receiver thermal collection system



1: shell; 2: internal reflection surface; 3: collector tube; 4: insulating layer; 5: arc reflector

图 2 腔体接收器的剖面结构

Fig. 2 Profile structure of the cavity receiver

常见的设计中腔体内壁为吸收面且上壁面与集热元件直接接触,这样会有较大的导热损失,也会影响集热管接收的总光通量以及管壁能流分布的均匀性,因此本设计中腔体内壁贴高反射率的反射膜,将倒梯形上壁面改为圆弧面,在腔体内布置有一定数量的集热管簇用来接收入射光线,且集热管簇与圆弧面不接触。在布管方式一定的情况下,影响腔体接收器光学性能的几何参数包括:采光孔开口宽度、反射圆弧半径 R 以及倒梯形开口角度 α 。根据前期聚光器焦斑宽度实测值,本研究中采光孔开口宽度设计为 50 mm,以反射圆弧半径以及倒梯形开口角度为主要变量进行分析,腔体接收器的结构参数见表 2。

表 2 腔体接收器的结构参数

Table 2 Structure parameters of the cavity receiver

Parameter	Value	Parameter	Value
Opening width W_c /mm	50	Diameter of tube d /mm	10
Cavity width B /mm	120	Number of tube N	7
Cavity height H /mm	100	Reflectivity of inner surface P_{cav}	0.7
Cavity length L_c /mm	1500	Absorptivity of tube α_{tub}	0.8

3 理论分析

光学效率是评价腔体接收器光学性能的重要指标,其定义为集热体吸收的太阳辐射能与进入聚光器采光面上的太阳辐射能的比值,具体到本研究的管簇型腔体又可写成:

$$\eta_0 = \frac{\iint_A G(x, y) dx dy}{G_n A_n}, \quad (1)$$

同时根据太阳光在聚光过程中经历的各个环节也可写成^[14]:

$$\eta_0 = \rho (\gamma \tau \alpha_{eff})_n K(\theta), \quad (2)$$

(1)式中 η_0 为集热器的光学效率; $G(x, y)$ 为腔体集热管簇表面的能流密度分布函数,单位为 W/m^2 ; A 为腔体内集热管簇表面积,单位为 m^2 ; G_n 为同一时段内投射到聚光器采光面上的太阳辐照量,单位为 W/m^2 ; A_n 为聚光器光孔的面积,单位为 m^2 。(2)式中 ρ 为抛物反射镜面的反射率, γ 为接收器对于会聚光线的采集因子, τ 为当接收器有玻璃盖板时的玻璃透射率, α_{eff} 为接收器的有效吸收率, n 为会聚光线在腔内的反射次数, $K(\theta)$ 为入射太阳光以 θ 角倾斜入射时的综合影响因子。

本文主要研究主要研究腔体接收器结构对槽式太阳能聚光系统光学效率的影响,对于已有的抛物面聚光镜以及一定精度下保证太阳光垂直入射的双轴跟踪系统, ρ 和 $K(\theta)$ 的影响不予考虑;本设计的腔体接收器未采用玻璃盖板,因此 $\tau=1$; γ 采集因子表示镜面反射的辐射落到接收器的百分比,是光线聚焦过程中反射和聚焦损失的体现,其值与接收器开口宽度以及聚光镜表面的光洁度、型面误差和接收器安装误差引起的

聚焦光斑大小有关;因本设计的管簇式腔体接收器内表面为反射面,其有效吸收的太阳辐射能体现在集热管簇表面最终获得的能流,因此腔体接收器的有效吸收率 α_{eff} 由腔体内表面反射率、会聚光线在腔内的反射次数 n 以及集热管壁的涂层吸收率决定。

图 3 为集热系统的光线路径图,由图中 details 2 可知,随着倒梯形开口角度 α 的减小,通过聚光镜反射进入腔内的光线在到达集热管簇壁面时光路的反射次数增加,而入射光线每经历一次反射,就伴随着能量被吸收和反射衰减损耗,从而降低了到达集热管壁的能流密度,因此光学效率减小;由于接收器的遮挡作用,集热管簇位于中心处会存在能流遮蔽区,导致腔体内并列的集热管簇表面能流具有较大的不均匀性,进而导致光热转化效率降低。为了解决该问题,该结构中加入圆弧反射面,其作用类似于均光罩,如图 3 中 details 1 所示,可将更多光线聚焦到遮蔽区集热管的上表面,在增大腔体内表面积同时使集热管簇壁面能流分布更加均匀,从而提高了光学效率。不同半径的圆弧反射面对光线路径的改变作用不尽相同,因此对于光学效率的影响程度也不同。

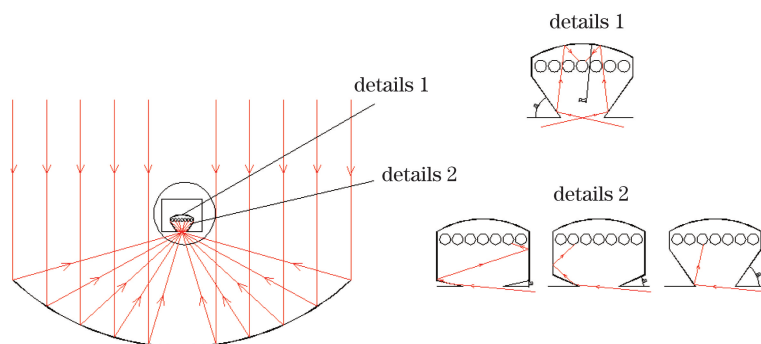


图 3 集热系统光线路径图

Fig. 3 Ray path diagram of the heat collection system

以上分析中,倒梯形腔体开口角度 α 和圆弧反射面半径 R 均会引起系统光学效率的改变,若通过几何光学理论进行计算,过程较为繁琐,因此在腔体结构的确定以及寻优过程中采用基于蒙特卡罗光学追迹法的 TracePro 软件进行模拟研究^[15]。

4 模拟分析

采用 TracePro 软件展开模拟研究工作,根据表 1、表 2 的参数建立物理模型并设置材料属性,光源模型采用格点光源,太阳辐照强度设定为 850 W/m^2 ,在聚光器正上方 2000 mm 处设置矩形发射面作为光源,光线数量为 10^4 条且均匀分布。

4.1 腔体接收器结构对光学效率的影响

考虑到理论和实际加工的可行性,本研究选取了合适的反射圆弧半径 R 以及倒梯形开口角度 α 的变化范围进行单因素研究,模拟结果如图 4、5 所示。由图 4 可知,随着开口角度 α 的增大,光学效率先缓慢波动,在 $\alpha = 45^\circ$ 之后明显增大,分析其原因除反射次数增加导致的能量衰减损耗外,开口角度的增大也使得入口反射面增加,其内表面反射光线的临界逸出角增大,逃逸光线减少,而圆弧反射面的设计增大了腔体内表面积,从而增加了集热管簇上的总光通量,同时使集热管壁能流分布均匀,提高了光学效率。从图 5 可见,随着圆弧半径的增大,光学效率呈现先增大后缓慢降低的趋势,在 $R = 90 \text{ mm}$ 处出现最大值,这是因为太小的圆弧半径会导致腔体深度增大,影响集热管簇表面的能流均匀性,同时减少了光通量,另外腔体重心的升高影响运行稳定性;而圆弧半径太大又减小了反射弧面,改变了入射光线的光程,不利于集热管簇对光线的吸收。

为了获得最优腔体结构,针对上述分析结果,选取不同的倒梯形开口角度(α 为 $65^\circ, 55^\circ, 45^\circ$)和反射圆弧半径(R 为 $80, 90, 100 \text{ mm}$)的组合形式展开进一步研究,结果如图 6 所示。由图 6 可见,当开口角度相同时,圆弧反射面结构的腔体接收器光学效率均明显高于平面反射面;随着倒梯形开口角度的增大,光学效率均增大,不过圆弧反射面半径和开口角度对腔体接收器光学性能的影响程度不同,圆弧反射面半径从 80 mm 增加到 90 mm 再到 100 mm 时,对应只产生 0.3% 的效率增大和 0.05% 的效率减小;而对于开口角度从 65° 变

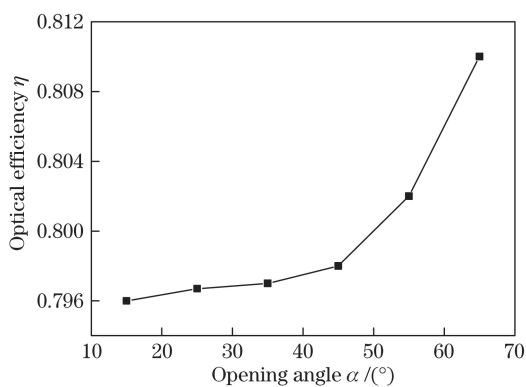


图 4 开口角度 α 对光学效率的影响

Fig. 4 Influence of opening angle α on optical efficiency

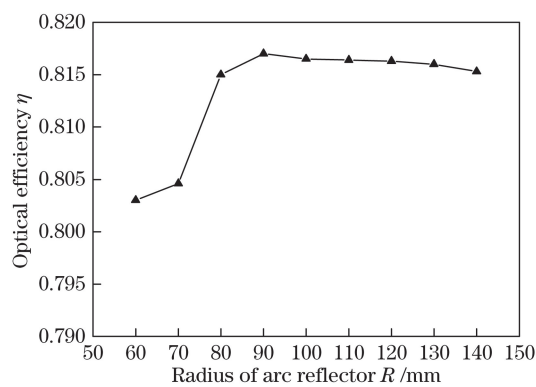


图 5 反射圆弧半径 R 对光学效率的影响

Fig. 5 Influence of the radius of arc reflector on optical efficiency

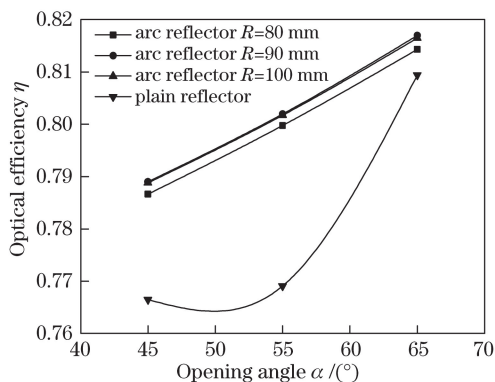


图 6 不同腔体接收器结构参数对光学效率的影响

Fig. 6 Influence of different parameters of cavity structure on optical efficiency

化到 45° 则导致 4.3% 的效率下降,综合以上组合结构,当开口角度为 65° 、反射圆弧半径为 90 mm 时,该腔体接收器的光学效率可以达到最高。

4.2 腔体集热管壁能流均匀性分析

管簇式腔体接收器的设计中,集热单元布置为一定数量的集热管,腔体接收器结构的变化会改变集热管簇壁面能流分布的状况,而能流分布的不均匀程度直接影响集热管的热损失,因此引入标准差的概念对集热管壁能流的均匀性进行分析。

将倒梯形腔体接收器内部从左至右的 7 根集热管壁上的能流密度分别定义为 $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7$,对于一组离散型的随机数列,在概率统计中经常使用标准差作为统计分布程度上的测量。标准差为方差的算术平方根,反映组内个体间的离散程度,此处用标准差表示多根集热管上能流分布的均匀程度,其计算过程见(3)式和(4)式。通过该数学方法分析集热管壁能流分布的均匀情况。

随机数列的平均值 \bar{E} 为

$$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7}{7}, \quad (3)$$

标准差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (E_i - \bar{E})^2}{7}}. \quad (4)$$

图 7 直观地显示出不同腔体结构内集热管壁能流分布差异较大。图 8 通过计算标准差数值将不同结构下管簇能流的均匀性量化,由图可知所研究组合结构中开口角度为 65° 与反射圆弧半径为 80, 90, 100 mm 这三组能流分布相对较为均匀,开口角度为 65° 、反射圆弧半径为 90 mm 的组合结构对应的能流标准差最低,即该种腔体接收器结构下集热管壁能流分布最为均匀。

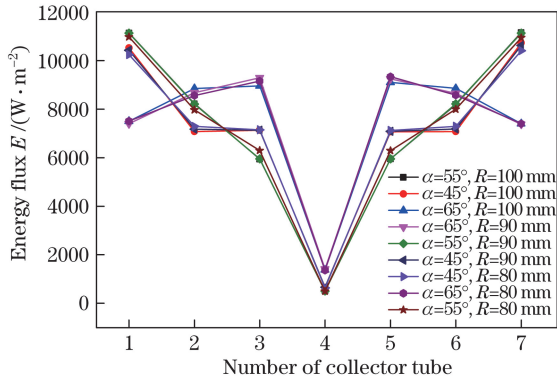


图 7 不同腔体结构的集热管壁能流分布

Fig. 7 Energy flux distribution of collector tube wall for different cavity structures

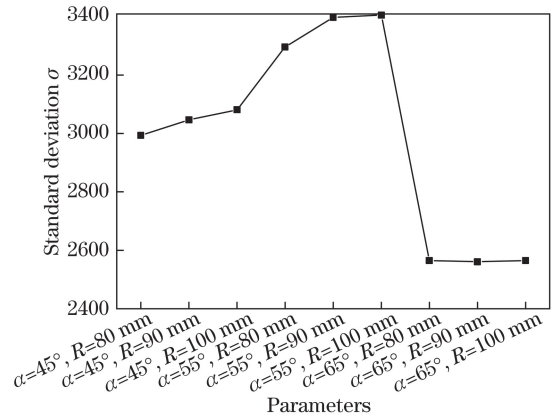


图 8 不同腔体结构的集热管壁能流标准差

Fig. 8 Energy flux standard deviation of collector tube wall for different cavity structures

4.3 腔体内集热管簇热力学分析

为了更全面地对倒梯形腔体接收器结构寻优,采用计算流体动力学软件 Fluent 对倒梯形腔体内工质流动和传热过程进行分析。考虑到已研究的结论中倒梯形开口角度对腔体光学效率的影响明显,此处热力学模拟采用最优角度 65°下对应的 80,90,100 mm 三种反射圆弧半径开展。

本设计中腔体集热铜管内工质为流动的水,因处于低温段运行,集热管簇壁面能流与管内工质的传热方式主要以强制对流换热为主。管内强制对流换热问题的特征在于:在流体进入圆管后,流体边界层有一个从零开始增长直到汇合于管中心线的过程。相似地,当流体与管壁之间有热交换时,管壁面的热边界层也有这样的过程。当流动边界层和热边界层汇合于中心线时,称流动和换热已经充分发展,此后换热强度保持不变。通常可以将不可压缩、常物性、无内热源的二维模型的对流传热控制方程式如下所示。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

式中 u 和 v 分别为流体在 x 、 y 方向的速度,单位均为 m/s ; ρ 为密度,单位为 kg/m^3 ; τ 为时间,单位为 s ; F_x 和 F_y 为体积力在 x 、 y 方向的分量,单位均为 N ; p 为压力,单位为 Pa ; η 为动力黏度,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; t 为温度,单位为 $^\circ\text{C}$; λ 为导热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C_p 为比定压热容,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

热力学模拟中,集热管壁能流是分析腔体接收器传热性能的重要边界条件,将 4.1 节中 TracePro 光学模拟获得的集热管壁能流密度通过编写自定义函数(UDF)程序输入给定的热流边界,从而实现太阳能槽式聚光集热系统的光学和热力学的耦合,其他边界条件设置:进口边界条件设置为速度进口 0.1 m/s ,温度进口 300 K ,相对压力为 0 ,工质出口边界条件设置为 outflow,可以获得表面传热系数,以及工质出口温度;网格划分采取自动划分法,体尺寸控制中的 Element Size(单元尺寸)设置为 1 mm ,膨胀控制采用 First Layer Thickness(第一层厚度),其中 First Layer Height 设定为 0.5 mm ,Maximum Layers 设定为 4 ,网格划分的节点数为 356780 ,单元数为 917019 ,经过网格的无关性验证,计算过程中采用湍流模型和 SIMPLE 算法。努赛尔数(Nu)是表征对流换热强度的相似准则数,此处通过 Nu 表示不同腔体结构下集热管内工质强化对流换热的效果,模拟结果见图 9,其中用到的公式有牛顿冷却公式:

$$Q = Ah \Delta t, \quad (8)$$

努赛尔数 Nu 公式:

$$Nu = \frac{hL}{\lambda}, \quad (9)$$

式中 Q 为对流传热量,单位为 W ; A 为换热面积,单位为 m^2 ; h 为对流换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; Δt 为固体壁温和流体温度的差值,单位为 K ; L 为定型几何尺寸,单位为 m ; λ 为流体的导热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$ 。

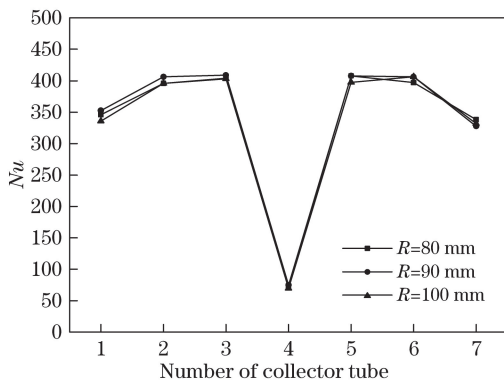


图 9 不同集热管对应的最大 Nu

Fig. 9 Maximum Nu for different collector tubes

图 9 表示腔体接收器开口角度为 65° 时内部 7 根集热管在不同反射圆弧半径下对应的最大 Nu , 由图 9 可以看到, 不同反射弧面对集热管内工质的对流换热效果影响不同, 反射圆弧半径为 90 mm 时对应的 Nu 更大, 意味着该种弧面结构更有利于强化对流换热。

综合光学模拟、能流标准差及热力学模拟的研究结果, 最终将腔体结构优化为开口角度 65° 和反射圆弧半径 90 mm 的组合, 接下来的偏焦量研究将以该结构开展。

4.4 安装位置偏移对接收器光学性能的影响

对于槽式太阳能聚光系统, 由于聚光镜面误差、安装误差以及跟踪误差等的存在, 聚焦光线实际上是在垂直和水平方向上有一定偏焦量的光带, 因此研究偏焦量对系统光学性能的影响对实际运行中腔体接收器的安装位置有指导意义。

定义腔体接收器采光孔安装位置处于聚光镜焦线时, 垂直和水平位置偏移为零; 当安装位置高于聚光镜焦距时, 偏焦量为正值, 反之为负值; 当安装位置在焦线左边时, 水平偏焦量为负值, 反之为正值。垂直偏焦量用 Δz 表示, 水平偏焦量用 Δx 表示。研究结果见图 10 和图 11。

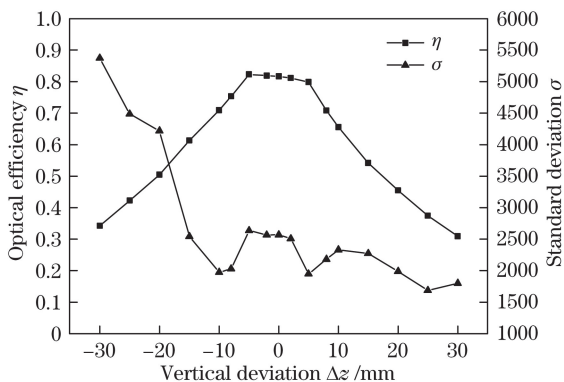


图 10 垂直偏移对光学性能的影响

Fig. 10 Influence of vertical deviation on optical performance

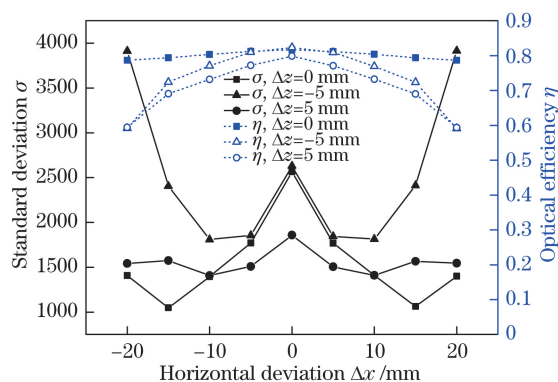


图 11 水平偏移对光学性能的影响

Fig. 11 Influence of horizontal deviation on optical performance

由图 10 可知, 随着垂直偏焦量 Δz 从 -30 mm 到 30 mm 变化的过程中, 腔体内集热管壁能流标准差整体呈逐渐下降的趋势, 在 $-5\sim 5\text{ mm}$ 之间有一个小的起伏, 究其原因为在焦距以及焦距附近, 焦斑相对集中, 而远离焦距处光线趋于发散, 发散的路径越多, 能流越均匀; 当 $\Delta z > 0$ 时, 随着偏移的距离增大, 光学效率逐渐降低; 而当 $\Delta z < 0$ 时, 随着偏移的距离增大, 光学效率呈先增后减的趋势, 最大值出现在 $\Delta z =$

-5 mm处,该位置光学效率可达81.3%,图中 Δz 在-5~5 mm范围内时光学效率波动不大,当 $\Delta z > 5$ mm或 $\Delta z < -5$ mm时,光学效率快速下降。这一现象的原因在于:当安装位置在焦距垂直向上时,入射光线通过聚光器反射会聚后易从腔体采光孔溢出,且随着偏移焦线距离越大,能够到达采光孔并进入腔体的光线越来越少,导致光学效率下降;而当安装位置在焦距垂直向下时,聚光器会聚光线全部通过采光孔进入腔体且光线不易溢出,可以提高光学效率,但如果偏移量较大时,聚光器会聚光线还没有达到最大量就已经进入腔体内部,从而损失掉一部分光线。

图11表示水平偏焦量对光学性能的影响,模拟结果以 $\Delta x = 0$ 左右两边对称。当水平偏焦量增大时,标准差逐渐减小又增大,当 $\Delta z = 0$ 时标准差在水平偏焦量 ± 15 mm处最低,当 $\Delta z = \pm 5$ mm时标准差在水平偏焦量 ± 10 mm处为最低;当 $\Delta x > 0$ 时,随着水平偏焦量的增大,光学效率在不同的垂直偏焦量工况下均发生一定的减小,当 $\Delta z = 0$ 时, Δx 在0~20 mm范围内光学效率波动不大,当 $\Delta z = \pm 5$ mm时随着水平偏移量增大光学效率下降幅度较缓;综合以上分析可见,水平偏焦量对光学效率的影响弱于垂直偏焦量。

5 实验分析

当前针对槽式聚光系统光学效率的测试需要光学成像的方法,且需要特定的光学测试设备并满足一定的测试条件^[16],根据能量平衡关系可建立聚光集热器的瞬时集热效率和系统光学效率关系式:

$$\eta_c = \eta_0 - \frac{U_L(T_r - T_a)A}{G_a A_a} \quad (10)$$

式中 η_c 为聚光集热器效率, η_0 为聚光集热器光学效率,皆无因次; G_a 为同一时段内投射到聚光器采光面上的太阳辐照量,单位为 W/m^2 ; A_a 为聚光器光孔的面积,单位为 m^2 ; A 为接收器接收辐射的表面积,单位为 m^2 ; U_L 为集热器总热损失系数,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_r 为接收器的进出口平均温度, T_a 为环境温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。同时已有文献^[17-18]通过测试工质温升的系统集热效率的方法对真空管和腔体接收器的槽式聚光系统推算出对应的光学效率,吻合度高,因此本研究采用动态测试腔体集热器瞬时集热效率和归一化温差的方法对模拟结果进行验证,归一化温差 T^* 的计算公式为

$$T^* = \frac{T_{\text{in}} - T_{\text{out}}}{G_a} \quad (11)$$

式中 T_{in} 为进口温度, T_{out} 为出口温度,单位均为 $^{\circ}\text{C}$ 。

5.1 实验平台

实验系统由双轴跟踪平台、槽式聚光器、倒梯形腔体接收器、支撑机构、集热水箱、流量计以及泵等组成,见图12。其中双轴跟踪平台采用锦州阳光气象公司生产的全自动双轴跟踪系统,该系统由传感器、控制系统、机械传动系统构成,跟踪探测器模式为光电跟踪,精度为小于 $\pm 0.625^{\circ}$;实验用倒梯形管簇式腔体结构由前述模拟结果确定,槽式聚光镜和腔体接收器的结构性能参数见表1和表2;浮子流量计所用型号为LZB-25型,精度为20 L/h;实验中测温装置包括K型热电偶和拓普瑞TP700多路型数据记录仪,K型热电偶测量误差限定在实际测量温度的0.75%左右;太阳辐照气象数据采用BSRN3000辐射观测系统,精确度为 $5 \text{ W}/\text{m}^2$;考虑到腔体采光孔处未设计盖板,实验选取晴朗无风天气进行。

根据呼和浩特地区太阳直接辐照度(DNI)变化情况,测试时间段选取为11:00~14:30,实验测试期间DNI变化范围为 $648.7 \sim 688.5 \text{ W}/\text{m}^2$,变化幅度小于 $50 \text{ W}/\text{m}^2$,可忽略其对系统瞬时集热效率的影响。环境风速变化范围为 $0.6 \sim 2.8 \text{ m}/\text{s}$,选取800 L/h流量工况,系统中腔体接收器安装位置可调,参考前面模拟研究结果放置在焦距垂直向下5 mm即450 mm处。测试过程中,数据采集记录间隔为1 min,为消除偶然因素,太阳DNI、环境风速、腔体接收器进出口温度数据均以5 min为单元,取单元时间内的平均值。

5.2 实验结果

实验数据以及拟合结果见图13,从图13可见腔体接收器所能达到的最大集热效率为73%,而无任何热损失的集热效率即光学效率,因此实验值比模拟的理想值降低了8.3%。分析其原因为:模拟中并未考虑系统跟踪误差、聚光镜厚度以及聚光镜分体导致的太阳光线偏移,且模拟中太阳辐照强度设定为 $850 \text{ W}/\text{m}^2$,

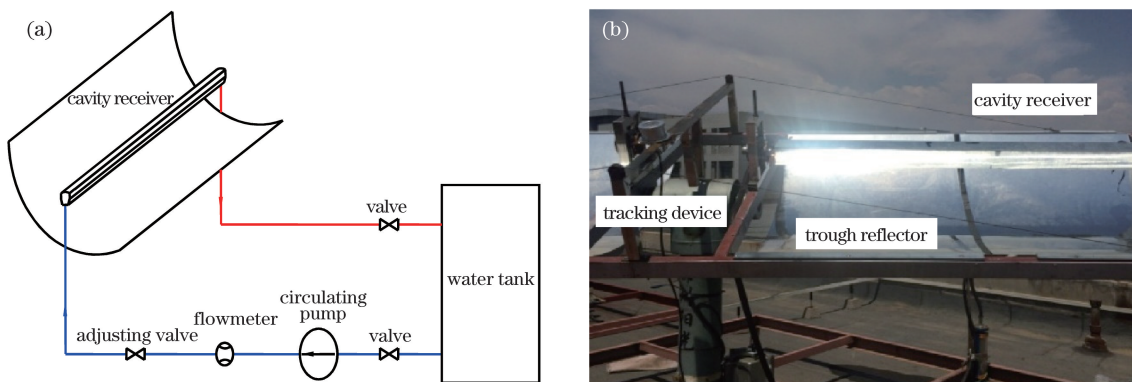


图 12 测试系统(a)流程图和(b)实物图

Fig. 12 (a) Flow chart and (b) physical photo of the test system

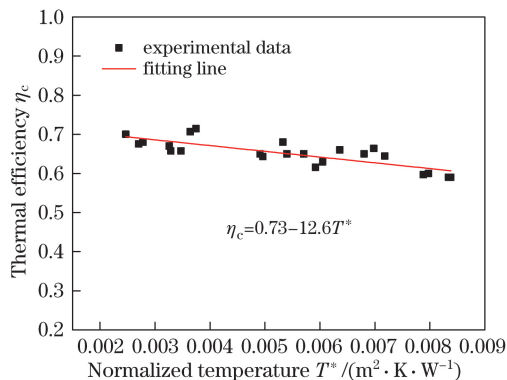


图 13 归一化集热效率

Fig. 13 Normalized thermal collection efficiency

而实验测试期间太阳辐照低于此值,以上原因均是影响光学效率的因素,该实验测试值可为系统进一步优化提供参考。

6 结 论

针对与抛物型槽式聚光器匹配的管簇型倒梯形腔体结构的设计,以开口角度和反射圆弧半径等几何参数作为变量,通过理论分析、软件模拟以及实验测试的方法进行研究并优化,同时就安装位置偏移对光学性能的影响进行研究,结果表明:

1) 倒梯形上壁面设计为弧面反射面可使其光学效率提高近 4%;开口角度和圆弧半径是倒梯形腔体接收器结构中的重要影响参数,随着开口角度 α 的增大,光学效率先缓慢波动,在 $\alpha = 45^\circ$ 之后明显增大;随着圆弧半径的增大,光学效率先增大后缓慢降低;在组合研究中,开口角度为 65° 与反射圆弧半径为 90 mm 的组合结构可以达到较高的光学效率,同时集热管簇能流分布较为均匀,且在低温运行时强化传热效果最佳,因此多因素评价和优化腔体接收器的结构设计是有必要的。

2) 结合实际运行状态,腔体接收器安装在垂直偏焦距 $\Delta z = -5$ mm 处光学效率可达到最高为 81.3%,在垂直方向的安装应控制在 ± 5 mm 的偏移范围内;在水平方向的安装应控制在 ± 20 mm 的偏移,在水平偏焦距 ± 15 mm 处可以获得集热管壁较为均匀的能流分布;安装过程中,重点关注垂直方向的偏移量。

3) 运用归一化温差和测试瞬时集热效率的方法得到槽式聚光集热系统的光学效率为 73%,与模拟的理想值有较好的吻合度,今后可从跟踪误差、聚光镜型面误差以及腔体结构等方面对系统光学性能进行进一步优化。

参 考 文 献

[1] Sulaiman F A. Energy and sizing analyses of parabolic trough solar collector integrated with steam and binary vapor

- cycles[J]. *Energy*, 2013, 58(1): 561-570.
- [2] Cheng Z D, He Y L, Cui F Q, *et al.* Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with non-uniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(6): 1770-1784.
- [3] Boyd D A, Ryszard G, Roderick S. A cylindrical blackbody solar energy receiver[J]. *Solar Energy*, 1976, 18 (5): 395-401.
- [4] Barra O A, Franceschi L. The parabolic trough plants using black body receivers: experimental and theoretical analyses[J]. *Solar Energy*, 1982, 28 (2): 163-171.
- [5] Chou Q L, Ge X S, Li Y F. The influence of environment condition on the heat efficiency of solar cavity receiver with absorber of a bundle of tubes[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1996, 17 (1): 81-86.
- [6] Chou Q L, Li X Q, Xu G. The experiment validation of the dynamic simulation model for 3-dimensions thermal network of medium temperature solar collector system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1999, 20 (2): 196-199.
- [7] Reynolds D J, Jance M J, Behnia M, *et al.* An experimental and computational study of the heat loss characteristics of a trapezoidal cavity absorber[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1-3): 229-234.
- [8] Singh P L, Sarviyab R M, Bhagoriab J L. Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(2): 541-550.
- [9] Zhai Hui. Theoretical and experimental investigation of linear concentrating solar collector with cavity absorber[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
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.
- [10] Chen Fei. Study on the optical property and thermal performance of solar linear concentrating system with cavity absorber[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2015.
陈飞. 线聚焦腔体聚光系统光学特性及集热性能研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2015.
- [11] 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.
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.
- [12] Dai Jingmin, Liu Ying. The study of flux distribution on focal plane in parabolic-trough concentrators[J]. *Acta Energiæ 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] Xu Li, Yuan Guofeng, Sun Feihu, *et al.* Comparison between steady-state and dynamic test methods of thermal performance of parabolic trough solar collectors[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2013, 39(4): 59-63.
徐立, 原郭丰, 孙飞虎, 等. 抛物面槽式太阳能集热器热性能稳态与动态测试方法的比较[J]. *兰州理工大学学报*, 2013, 39(4): 59-63.
- [14] John A D, William A B. *Solar engineering of thermal processes*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013: 322-371.
- [15] Yan Jian, Peng Youduo, Cheng Ziran, *et al.* Moving accumulative computation method for flux distribution of heat absorber in symmetry concentrating solar collector system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0508001.
颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 对称型太阳能聚光集热系统吸热器能流分布的运动累加计算方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0508001.
- [16] 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.
- [17] Feng Zhikang, Li Ming, Wang Yunfeng, *et al.* Study on optical efficiency characteristics of receivers in a solar parabolic trough concentrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0122002.
冯志康, 李明, 王云峰, 等. 太阳能槽式系统接收器光学效率的特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0122002.
- [18] Kutscher C F, Netter J C. A method for measuring the optical efficiency of evacuated receivers[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2014, 136(2): 010907.