

文章编号:0254-0096(2018)03-0737-07

# 基于腔体的双轴槽式系统集热特性动态测试

王志敏<sup>1,2</sup>, 田瑞<sup>1,2</sup>, 韩晓飞<sup>1</sup>, 赵科<sup>1</sup>, 齐井超<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 以倒梯形腔体接收器为集热器的双轴槽式太阳能聚光集热系统为研究对象, 通过实验测试和归一化温差的方法, 对该系统不同接收位置下的集热性能以及不同流量工况下的瞬时集热效率进行测试, 研究结果表明: 腔体接收器放置在不同接收位置会表现出不同的光热转换性能, 不同流量下对应的最佳接收位置不同; 通过归一化方法处理可得到 600、700、800、900 L/h 4 种流量工况下对应最大集热效率以及热损失系数, 并通过多项式拟合得出热损失系数与流量的变化关系式为  $y=139.06-0.29x+0.0002x^2$ , 可用来指导工程实际应用。

**关键词:** 太阳能; 聚光装置; 集热特性; 腔体; 流量; 动态测试

**中图分类号:** TK513.3

**文献标识码:** A

## 0 引言

太阳光通过聚焦可实现高效转化利用<sup>[1]</sup>。聚光型太阳能系统的焦平面温度较高, 接收器的集热性能影响着整个系统的光热转换效率。由于工程实际中存在各种运行误差, 腔体接收器的安装位置以及流量等因素会对系统集热特性产生较大影响, 故采用实测方法研究对工程应用很有意义。

Yapici 等<sup>[2]</sup>对槽式太阳能吸热器管壁非均匀能流边界条件下的传热过程进行数值模拟分析, 计算得到不同传热工质流速下管壁和流体的温度分布; Reddy 等<sup>[3]</sup>通过数值模拟对梯形腔体接收器的太阳能线性菲涅耳系统进行研究, 针对结构几何参数进行热损失模拟分析并优化; Chen 等<sup>[4]</sup>建立用于槽式聚光系统的腔体接收器热性能理论模型并与实验结果对比分析; 马炎等<sup>[5]</sup>利用实验方法对采用真空管的双轴槽式太阳能集热装置进行热性能测试; 徐立等<sup>[6]</sup>基于北京延庆槽式实验平台进行稳态测试和动态测试 2 种方法的对比并得出一定的结论。

综上所述, 针对槽式系统集热性能和热损失多以模拟为主, 而通过实验方法对集热性能测试的研究中大多采用真空管接收器, 因此本文对倒梯形腔体的槽式系统进行实验研究, 针对不同接收位置以及不同流量下的集热性能, 通过动态测试和归一化

的方法, 得到系统的集热效率并拟合流量与热损失系数的函数关系, 可为该领域工程实践提供理论指导。

## 1 双轴跟踪槽式太阳能聚光集热系统

### 1.1 系统组成

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 1。

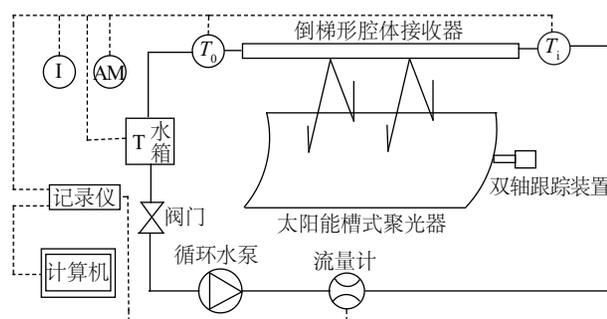


图1 系统测试流程图

Fig. 1 Flow path of test system

槽式太阳能聚光集热系统由聚光和集热两部分组成, 其工作原理为将入射太阳辐照光线通过全自动双轴跟踪下的槽式聚光器会聚成高能流密度

收稿日期: 2017-09-06

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)

通信作者: 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。tianr@imut.edu.cn

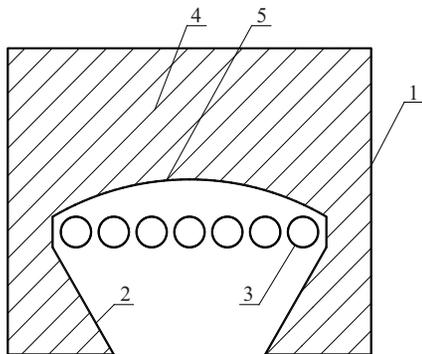
的能量后被安装在焦线处的腔体接收器所吸收,并由流动工质将其热量带出,从而进行后续的太阳能热利用。本实验测试系统中用到的槽式聚光装置为抛物型槽式聚光器,其母线方程为  $y=x^2/1820$ ,其他具体结构参数见表 1。

表 1 抛物型槽式聚光镜的相关参数

Table 1 Parameters of parabolic trough concentrators

参数	数值
聚光镜长度 $L/\text{mm}$	1500
聚光镜开口宽度 $W/\text{mm}$	1500
焦距 $f/\text{mm}$	455
聚光镜厚度 $d/\text{mm}$	3
反射率 $p$	0.91

实验中采用的腔体接收器为倒梯形结构,具体如图 2 所示,其结构参数如表 2。



1. 外壳 2. 内反射面 3. 集热管 4. 保温层 5. 圆弧反射面

图 2 腔体式接收器的剖面结构

Fig. 2 Sectional structure of cavity receiver

表 2 腔体接收器的结构参数

Table 2 Parameters of cavity receiver

参数	数值
腔体采光孔宽度 $W/\text{mm}$	50
腔体宽度 $B/\text{mm}$	120
腔体高度 $H/\text{mm}$	100
腔体长度 $L_c/\text{mm}$	1500
腔内集热管直径 $d/\text{mm}$	10
腔内集热管数量 $n$	7
腔内表面反射率 $p_{\text{cav}}$	0.7
腔内集热管表面吸收率 $\alpha_{\text{tub}}$	0.8

实验中用到的双轴跟踪系统采用锦州阳光气象公司生产的全自动双轴跟踪实验平台,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。

## 1.2 测试装置

实验中使用 LZB-25 型浮子流量计,规格为 100~1000 L/h,精度为 20 L/h,允许被测流体温度范围 -20~120 °C,如图 3a。该系统流动工质为水,故选用 MP-100R 型磁力循环泵,其最大流量为 120 L/min,最高扬程为 8.6 m,如图 3b。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%,数据采集仪可对温度数据实时记录,如图 3c。实验数据后期处理需当地太阳辐照气象数据,该数据来源为 BSRN3000 辐射观测系统,由荷兰 KIPPZONEN 辐射观测设备和美国 SCI 数据采集器组成,可实现全自动辐射观测与数据统计,设备跟踪精度  $<0.1^\circ$ ,工作温度为 -40~50 °C,辐射响应时间 5 s,精确度  $5 \text{ W/m}^2$ ,如图 3d。



a. 浮子流量计



b. 磁力驱动循环泵



c. 数据采集仪



d. BSRN 辐射观测系统

图 3 测试装置

Fig. 3 Test device

## 2 不同接收位置下的集热性能测试

对于抛物槽式聚光器而言,从光学机理分析,其焦线处为光学性能最佳处,但考虑其在实际工程应用中系统存在一定跟踪误差、聚光镜面型误差、安装误差等,通过槽式聚光系统汇聚的光线其实是在焦线水平和垂直有一定偏移的光带,同时考虑不

同的接收器结构以及不同的工质流量对应的光热转换性能并不相同,因此腔体接收器的最佳接收位置需测试获得。

根据腔体集热器的一维传热模型,集热效率的定义为:在稳态(或准稳态)条件下,集热器传热工质在规定时间内输出的能量与规定的集热器面积和同一时段内入射在集热器上的太阳辐照量的乘积之比<sup>[7]</sup>,其计算公式为:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_0} = \frac{c_p \rho q_v (T_{out} - T_{in})}{3600 \cdot I \cdot A} \quad (1)$$

式中,  $Q_u$ ——传热工质吸收的有效集热量, W;  $Q_0$ ——集热器总集热量, W;  $c_p$ ——传热工质定压比热容, J/(kg·K);  $\rho$ ——传热工质的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $q_v$ ——传热工质体积流量, m<sup>3</sup>/h;  $T_{in}$ 、 $T_{out}$ ——腔体接收器进、出口温度, K;  $I$ ——太阳直射辐照度, W/m<sup>2</sup>;  $A$ ——集热器采光面积, m<sup>2</sup>, 根据国际标准 ISO 9488—1999《太阳能-词汇》和我国国家标准 GB/T 12936—2007《太阳能热利用术语》规定聚光器采光面积, 即太阳辐射进入聚光器的最大投影面积<sup>[8,9]</sup>。

根据式(1), 实验过程中需要测试的参数分别为腔体接收器进出口温度、太阳直射辐照度、传热工质流量等。

## 2.1 实验流程

1) 根据前期对该聚光系统聚光特性的测试, 散焦现象一般出现在焦距±20 mm 范围内, 因此将本实验中的接收位置选为 435~470 mm, 以 5 mm 为间隔, 共测试 8 个不同接收平面。腔体接收器的两端支架设有可调螺母, 通过上下旋转可实现不同位置的固定。

2) 测试前将聚光镜面人工清洁, 排除聚光特性不一致对结果的影响; 同时将双轴跟踪装置调整为最佳跟踪状态, 且稳定 10 min 以上再开始实验, 排除跟踪精度导致的数据误差; 为排除太阳辐照的瞬时变化引起集热效率的飘移, 数据处理中会考虑系统热功率。

3) 实验前对该装置调试两周以上, 根据 BSRN 3000 气象数据采集系统数据总结规律, 该月份晴天时段每日 11:30~14:00 太阳直射辐照度、风速以及环温可稳定在一定范围内, 因此选择该时段进行实验测试。

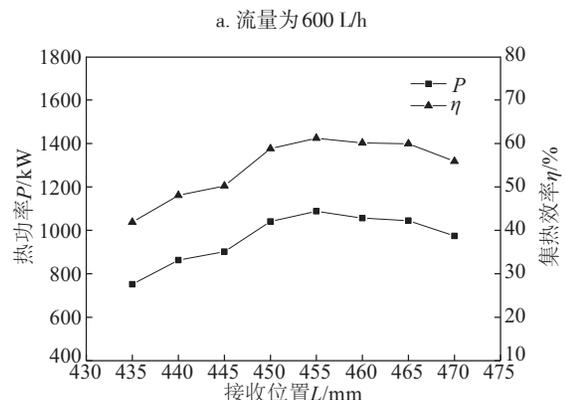
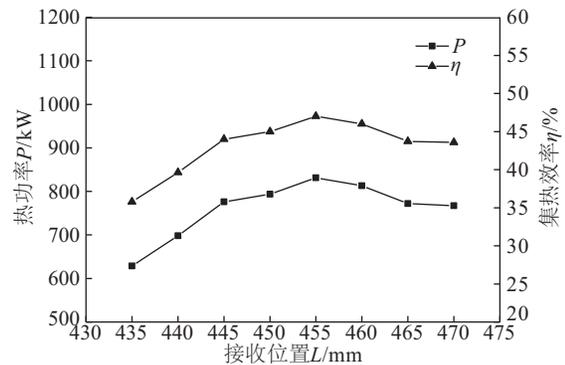
4) 实验前将测温热电偶标定, 调整数据记录仪的时间与 BSRN 气象数据采集系统的时间同步, 确保后期处理数据调取太阳辐射量以及其他环境参数准确。

5) 实验在 2017 年 7 月开展, 考虑到小流量容易导致腔体内铜管集热管出现明显胀管现象, 本实验选工质流量为 600、700、800、900 L/h 的 4 个工况进行测试, 每个流量变换 8 组腔体接收器位置, 即 435、440、445、450、455、460、465、470 mm, 每个位置测试 5 min, 以确保测试期间环境气象参数处于稳定状态。

腔体接收器的槽式集热性能测试没有相关的国家标准, 本实验中参考真空管集热器测试标准, 测试期间除 900 L/h 流量下太阳直射辐照度在 656~678 W/m<sup>2</sup> 之外, 其他 3 个流量测试期间太阳直射辐照度均在 793~810 W/m<sup>2</sup>, 满足采光面上的总太阳辐照度不小于 650 W/m<sup>2</sup>, 变化不大于±50 W/m<sup>2</sup> 的要求。以上气象条件满足测试要求。

## 2.2 数据分析

经过数据整理与分析, 计算得到腔体接收器在不同流量以及不同接收位置下的集热效率与热功率, 见图 4。



b. 流量为 700 L/h

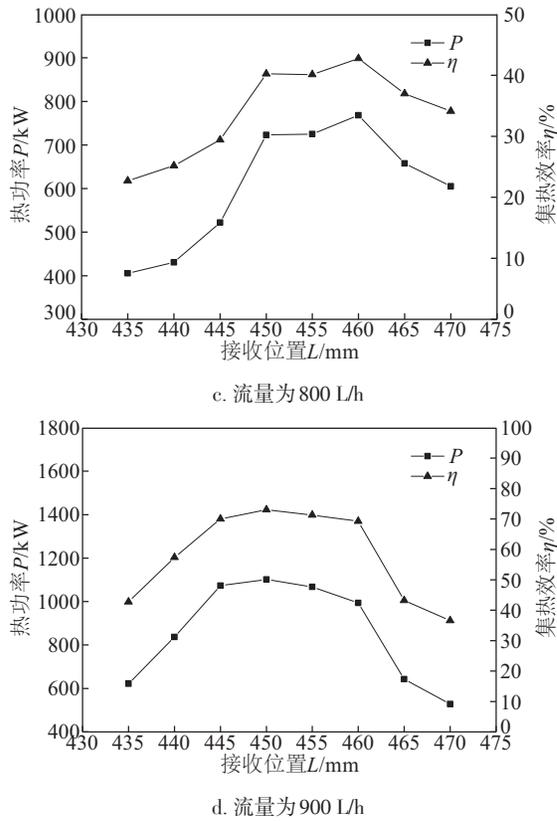


图4 集热效率、热功率随接收位置变化关系

Fig. 4 Thermal efficiency and thermal power change with receive position

由图4得知,在一定流量范围内,不同流量下对应的最佳接收位置并不相同,在以上流量中当接收位置为435和470 mm时,集热效率和热功率均较低,这是因为在偏移焦距较远处,通过腔体采光口进入腔内的汇聚光线数量较少,即光学性能较差;相同流量下对应的集热效率和热功率有较为一致的变化趋势,表明实验测试期间的辐照量变化微小,其中流量为600和800 L/h测试时间内风速较大导致其对应的集热效率整体较低。

当流量为600 L/h时,最高的集热效率和热功率出现在455 mm焦距的接收位置,分别为47.0%和831.3 kW;当流量为700 L/h时,最高的集热效率和热功率出现在455 mm处,分别为61.2%和1087.5 kW;当流量为800 L/h时,最高的集热效率和热功率出现在460 mm处,分别为42.7%和768.1 kW;当流量为900 L/h时,最高的集热效率和热功率出现在450 mm处,分别为73.0%和1101.5 kW。理论分析,当实验台架搭建好后,跟踪误差、聚光镜型面误差以及各种运行误差等会导致槽式聚光焦平面

偏移,从光学性能分析最佳焦平面具有唯一性,但腔体接收器内集热圆管在不同的接收位置下却会因为流量的不同而表现出不同的集热性能,以上最佳接收位置的结论可用于下一步对腔体接收器动态测试的研究中。

### 3 集热系统动态测试及归一化分析

针对槽式太阳能集热系统的测试,主要分为稳态测试方法和动态测试方法。稳态测试所需物理参数少,但是对于测试条件的要求较高,而动态测试考虑光学效应和热容特性,因此降低了测试条件的要求<sup>[10]</sup>。

根据呼和浩特地区合适的太阳直射辐照度  $DNI$  变化区间进行测试,流程与前述相同,选取600、700、800、900 L/h 4种流量工况,通过不同焦平面实验测试结果,其最佳安装距离分别为455、455、460、450 mm,因此测试期间将腔体安装到最佳位置。测试过程中,随时观察天气变化为分析系统性能提供参考。为消除偶然因素,太阳直射辐照度  $DNI$ 、环境风速、腔体接收器进出口温度数据均以5 min为单元取平均值。

系统集热性能测试期间,流量为600 L/h工况下太阳直射辐照度  $DNI$  变化范围为751~784  $W/m^2$ ;流量为700 L/h下太阳直射辐照度  $DNI$  为725~776  $W/m^2$ ;流量为800 L/h下太阳直射辐照度  $DNI$  为618~655  $W/m^2$ ;流量为900 L/h下太阳直射辐照度  $DNI$  为636~678  $W/m^2$ ;环境风速变化范围为0.6~3.8 m/s;工质进口温度变化范围为27~38  $^{\circ}C$ 。在无云层遮挡情况下,太阳直射辐照度  $DNI$  整体变化幅度较小,可忽略其对于系统瞬时集热效率的影响。

#### 3.1 归一化处理

为了消除实验测试中太阳辐照度以及环境温度不恒定因素的影响,借鉴真空管集热特性测试中归一化的方法,此处采用测试瞬时集热效率与归一化温差的方法对系统集热性能进行分析。

在集热效率归一化坐标轴中, $y$ 轴表示集热效率  $\eta$ , $x$ 轴表示流动工质进口温度与环境温度的差值与太阳辐照度之比。通过分布曲线拟合函数,具有以下特点:1)效率曲线在 $y$ 轴上的截距值表示集热器可获得的最大效率;2)效率曲线的斜率值表示集热器总热损失系数的大小  $U_L(W/(m^2 \cdot K))$ 。在研

究槽式聚光集热系统的光热转化性能时,从传热机理分析腔体接收器工作时存在多个向周围环境散热的表面且各自温度不同,故存在多个热损失系数,但在实验测量时,一般采用总热损失系数  $U_L$ ,反映腔体接收器的整体热损失性能。以进口温度为参考的归一化温差计算见式(2);根据能量守恒定律,依照平板和真空管集热器所用方法,引入集热器热转移因子的概念,可得到槽式聚光集热器的瞬时效率方程如式(3)。

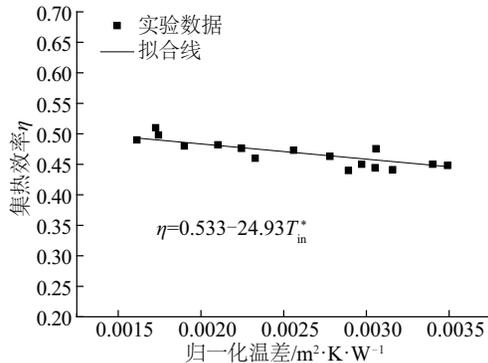
$$T_{in}^* = \frac{T_{in} - T_a}{I} \quad (2)$$

$$\eta = F_R \left[ \eta_0 - \frac{A_r}{A} U_L \frac{(T_{in} - T_a)}{I} \right] \quad (3)$$

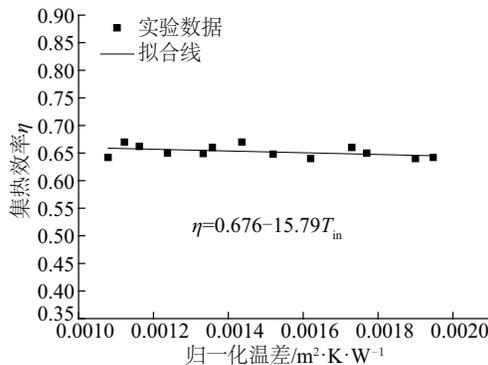
式中,  $T_{in}^*$  ——以进口温度为参考的归一化温差,  $(m^2 \cdot K)/W$ ;  $T_a$  ——环境温度,  $K$ ;  $I$  ——太阳直射辐照度,  $W/m^2$ ;  $\eta$  ——聚光集热器的集热效率;  $F_R$  ——接收器的热转移因子;  $\eta_0$  ——聚光集热器的光学效率;  $A_r$  ——接收器接收辐射的表面面积,  $m^2$ ;  $U_L$  ——集热器热损失系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

### 3.2 集热效率归一化分析

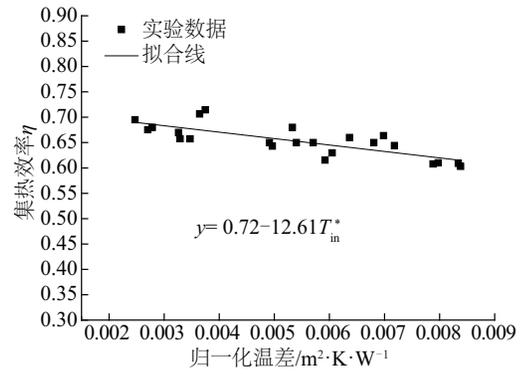
将实验数据处理后得到 4 种流量工况下的集热效率归一化直线,见图 5。



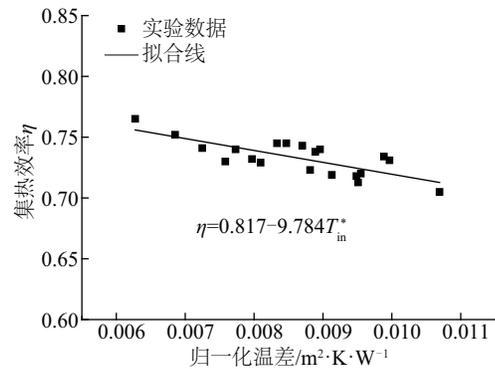
a. 流量为 600 L/h



b. 流量为 700 L/h



c. 流量为 800 L/h



d. 流量为 900 L/h

图5 流量为 600~900 L/h 工况下集热效率归一化  
Fig.5 Normalization of energy efficiency at flow rate 600-900 L/h

由图 5 可知,流量为 600、700、800、900 L/h 工况下的归一化效率曲线的拟合相关性较好,拟合结果可靠,其对应截距集热效率分别为 53.3%、67.6%、72.0%、81.7%,对应的热损失系数分别为 24.93、15.79、12.61、9.78  $W/(m^2 \cdot K)$ 。由于实验测试系统的泵以及管路所限,不可能测试所有流量下的热损失系数。因此,如图 6 所示,对上述流量工况下的热损失系数进行函数拟合,利用其函数关系式确定不同流量工况下的热损失系数,从而获得普适性的结论,

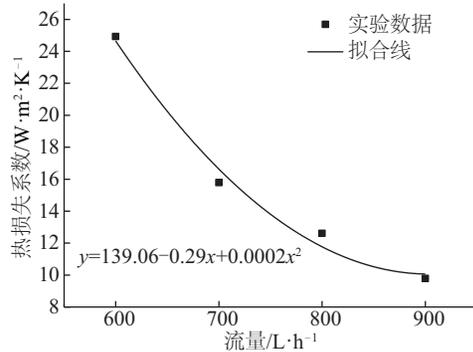


图6 热损失系数随流量变化

Fig.6 Coefficient of heat loss with flow rate

为后续热利用提供数据支撑。通过对图 6 变化曲线进行多项式拟合,得到其函数表达式为  $y=139.06-0.29x+0.0002x^2$ ,拟合的相关系数为 0.98,拟合效果好。由图 6 可知,随着流量的增大,热损失系数逐渐下降并趋于平缓,分析其原因,随着流量的增大,流动工质沿集热管出口方向的温度降低,从而使得通过对流和辐射的方式损失的热量也减小。

## 4 结 论

1)腔体接收器放在不同的接收位置会表现出不同的热性能,在本文研究的实验工况下,以集热效率和热功率作为衡量标准,当流量为 600、700、800、900 L/h 时,最佳接收位置出现在 455、455、460、450 mm 处。

2)在一定流量范围内,瞬时集热效率随流量增加而增大,热损失系数随流量增加而减小;归一化方法处理后可得到 600、700、800、900 L/h 4 种流量工况下对应最大集热效率分别为 53.3%、67.6%、72.0%、81.7%,通过多项式拟合的方法可获得总热损失系数与流量的变化关系式,用于指导不同流量下槽式聚光集热系统的热损失情况,同时该方法也可适用于不同聚光比以及不同结构接收器热损失的估算,有很好的工程实用价值。

### [参考文献]

- [1] Shuai Yong, Xia Xinlin, Tan Heping, et al. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(1): 13—21.
- [2] Yapici H, Albayrak B. Numerical solutions of conjugate heat transfer and thermal stresses in a circular pipe externally heated with non-uniform heat flux[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(6): 927—937.
- [3] Reddy K S, Ravi Kumar K. Estimation of convective and radiative heat losses from an inverted trapezoidal cavity receiver of solar linear Fresnel reflector system [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 80(6): 48—57.
- [4] Chen Fei, Li Ming, Zhang Peng, et al. Thermal performance of a novel linear cavity absorber for parabolic trough solar concentrator[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 90(1): 292—299.
- [5] 马 炎,陈海军,钱 裕,等.双轴跟踪槽式太阳能集热器性能试验[J]. *热力发电*, 2015, 44(1): 19—24.
- [5] Ma Yan, Chen Haijun, Qian Yu, et al. Performance test of a two-axis tracking parabolic trough solar collector[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 44(1): 19—24.
- [6] 徐 立,原郭丰,孙飞虎.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.
- [6] Xu Li, Yuan Guofeng, Sun Feihu. Comparison between steady-state and dynamic test methods of thermal performance of parabolic trough solar collector[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2013, 39(4): 59—63.
- [7] 常 春,张强强,李 鑫.周向非均匀热流边界条件下太阳能高温吸热管内湍流传热特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(17): 104—109.
- [7] Chang Chun, Zhang Qiangqiang, Li Xin. Turbulent heat transfer characteristics in solar thermal absorber tubes with circumferentially non-uniform heat flux boundary condition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(17): 104—109.
- [8] GB/T 4271—2007, 太阳能集热器热性能试验方法[S].
- [8] GB/T 4271—2007, Test methods for the thermal performance of solar collectors[S].
- [9] GB/T 19775—2005, 玻璃-金属封接式热管真空太阳集热管[S].
- [9] GB/T 19775—2005, Glass-metal sealed heat-pipe evacuated solar collector tubes[S].
- [10] 钱 裕,朱跃钊,王银峰,等.双轴跟踪槽式太阳能集热器实验研究[J]. *热能与动力工程*, 2015, 30(4): 623—627.
- [10] Qian Yu, Zhu Yuezhao, Wang Yinfeng, et al. An experimental study on a two-axis sun-track parabolic trough collector[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2015, 30(4): 623—627.

## DYNAMIC TEST OF COLLECTING CHARACTERISTICS OF A TWO-AXIS TROUGH SYSTEM BASED ON CAVITY

Wang Zhimin<sup>1,2</sup>, Tian Rui<sup>1,2</sup>, Han Xiaofei<sup>1</sup>, Zhao Ke<sup>1</sup>, Qi Jingchao<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Renewable Energy Key Laboratories, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** The double - axis trough solar concentrating heat collecting system with the inverted trapezoidal cavity receiver is researched, by the experimental test and normalized temperature difference method, the collector performance under different receiving positions of the system and the instantaneous collector efficiency under different flow rate are tested. The results show that light and heat transfer performance of system is different in different receiving positions, and the optimal receiving position is different under different flow rates; by normalizing the experimental data, the maximum heat collection efficiency and heat loss coefficient of 600, 700, 800, 900 L/h are obtained, and the relationship between the heat loss coefficient and the flow rate is obtained by polynomial fitting,  $y=139.06-0.29x+0.0002x^2$ , which can be used to guide the practical application.

**Keywords:** solar energy; concentrators; collector characteristics; cavity; flow rate; dynamic test