

基于菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统的 新型吸收器集热性能实验研究

马 玄¹, 章代红², 代彦军¹, 李 显¹, 黄官正¹, 王如竹¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院太阳能发电与制冷教育部工程研究中心, 上海 200240;

2. 安徽国电能源设备工程有限公司, 安庆 246700)

摘 要: 介绍一种与菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统匹配的新型吸收器, 在吸收器上方固定 CPC, 以增加其集热效率。首先理论上分析聚光系统的光学效率以及吸收器的集热效率和焓效率; 然后通过实验测定导热油在吸收器不同进口温度和流量下的集热性能。利用最小二乘法拟合得到集热效率和归一化温度 T^* 的线性关系, 获得整个聚光集热系统的光学效率 η_o 。最后通过焓效率确定吸收器在不同流量下的最佳运行温度 T_{opt} 。在流量 580 L/h 时约为 145 °C, 在流量 400 L/h 时约为 142 °C。

关键词: 太阳能; 定日镜; 光束追踪; 吸收器和 CPC; 集热效率; 最佳运行温度

中图分类号: TK51

文献标识码: A

0 引 言

二次反射塔式聚焦太阳能技术和传统塔式热发电系统相比由于聚光比更高, 抗风性好, 吸收器易维护, 投资成本低等优点被广泛研究和推广, 其设计概念是由 Rabl 等^[1]1976 年首次提出。之后大量的研究工作集中在利用非成像的二次聚光器, 例如复合抛物面型集热器 (compound parabolic concentrators, CPC), 将定日镜反射的光线进一步聚焦到更高的水平, 来增加整个聚光系统的聚光比和吸收器吸收的能量和温度, 来和不同的发电装置配合进行发电。Kribus 等^[2]提出不同形式的二次反射装置的设计方法: 塔顶利用截取的轴对称 CPC 进行二次聚光, 塔顶安装的轴对称圆锥台, 塔顶双曲面聚光器和塔底 CPC 配合, 塔顶椭圆面聚光器和塔底 CPC 配合, 并且分析每种形式的集热量和聚光比的上限值。Yogev 等^[3]对二次反射塔式聚光系统进行了可行性研究, 即在塔顶安装双曲面反射镜, 塔底用多个开口为正六边形的 CPC 组合, 使得整个系统

具有更好的光学效率和稳定的能流分布。Segal 等^[4]对比相同定日镜数量情况下传统塔式聚光系统和反射塔式聚光系统性能发现反射塔式太阳能系统可得到更高的集热温度和集热效率; 通过分析确定了集热器效率最大时的吸收器工作温度。Leonardi 等^[5]根据二次反射塔式系统定日镜和双曲面反射镜的尺寸提出一种优化程序来探究 CPC 单元的最佳尺寸来获得尽可能多的太阳能; 魏秀东等^[6]设计并模拟 1 个二次反射塔式太阳能聚光系统 (31 副定日镜、1 个双曲面反射镜和 CPC), 计算了系统的光斑尺寸和光学效率。代彦军等^[7,8]利用蒙特卡罗光线追踪的方法对比菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统和传统塔式系统, 并且通过实验研究基于此聚光系统下圆锥形腔体吸收器的光热转热性能, 模拟优化得到圆锥形腔体吸收器的最佳锥角。

基于以上的研究, 本文依据小规模菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统的光斑尺寸设计一种和其相匹配的吸收器, 并在吸收器上面固定 CPC 进一步聚光, 通过实验研究其集热效率以及吸收器的最

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51276112)

通信作者: 代彦军 (1971—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能热利用方面的研究。yjdai@sjtu.edu.cn

佳运行温度 T_{opt} 。

1 菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光集热系统

1.1 系统组成

线性菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光集热系统主要由 2 组线性菲涅尔定日镜 (heliostat, H)、2 个二次反射镜 (beam-down concentrator, BC)、CPC、2 个吸收器以及其他的辅助设备 (恒温油槽, 变频高温油泵等) 组成, 如图 1a 所示。集热系统中定日镜 H1, H2 朝向为正南和正北, 分别对应二次反射镜 BC1 和 BC2。系统原理为: 以二次反射

镜的上焦点为目标点, 与其对应的线性菲涅尔定日镜将入射的太阳光线聚焦到塔顶的二次反射镜, 由二次反射镜将定日镜反射的太阳光线进行二次聚光, 将光线聚焦到其下焦点位于系统中央接近地面处, 然后再有 2 个吸收器内 (编号 1#, 2#) 上面安装的 CPC 聚光器再次聚光, 最终将光线聚焦到吸收器表面, 用以加热循环系统中的导热油, 由此将太阳能转变为热能加以利用, 如图 1b 所示。集热系统中 1# 和 2# 吸收器并行放置在油泵和圆齿轮流量计之间形成 2 条支路, 保证每条支路上的阻力尽可能相等, 使得每个吸收器内导热油的流量相等。

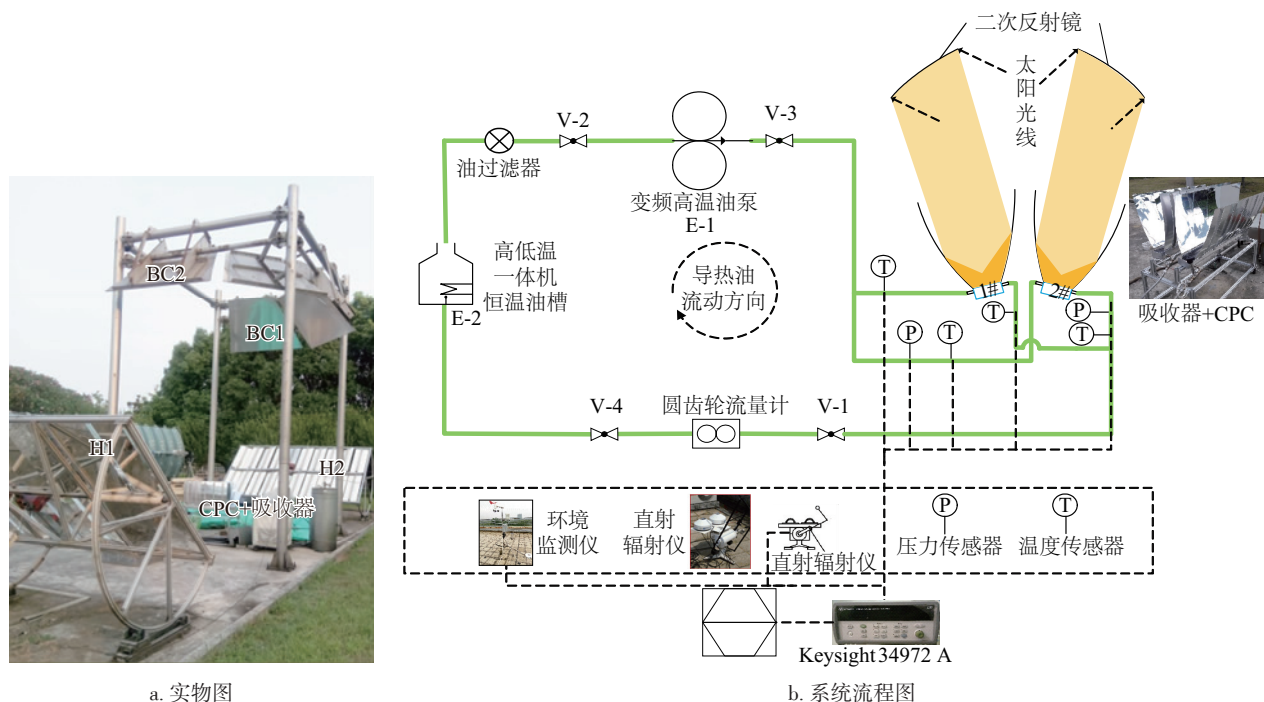


图 1 二次反射塔式太阳能聚光集热系统

Fig. 1 Beam-down concentrating solar tower system

1.2 系统部件

1.2.1 线性菲涅尔定日镜和二次反射镜

菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光集热系统中每组定日镜结构如图 2 所示, 定日镜尺寸长 W_h 为 4.2 m, 宽 l_h 为 2.2 m, 其共由 20 片子镜组成; 上下 2 排子镜平行, 长 l_m 为 1.0 m, 宽 W_m 为 0.4 m, 相邻子镜中心的间距 ΔW 为 0.42 m。

系统采用球面作为二次反射镜, 面型如图 3 所示, 其正面开口为等腰梯形。表 1 为二次反射镜的

具体尺寸参数。

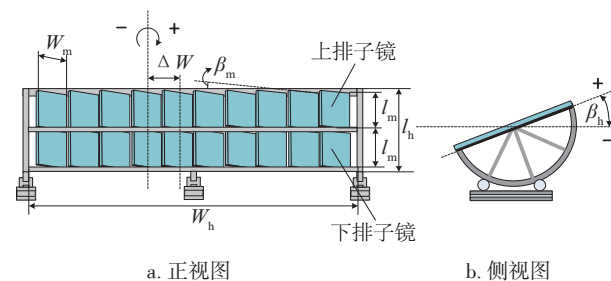


图 2 定日镜结构

Fig. 2 Structure of heliostat

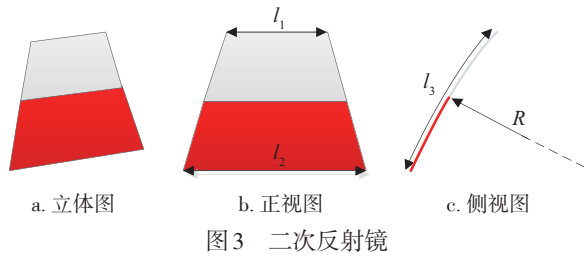


Fig. 3 Beam-down concentrators

表1 二次反射镜(BC)的几何参数

Table 1 Geometric parameters of BC

参数	BC1	BC2
开口上底边长度 l_1/m	1.1463	1.1463
开口下底边长度 l_2/m	2.1305	2.1305
侧面圆弧长度 l_3/m	1.643	1.643
圆弧半径 R/m	10.4584	10.4584

1.2.2 吸收器和 CPC 聚光器

菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光集热系统的每块二次反射镜 BC 聚集的焦斑形状由 SolTrace 软件模拟显示为条形如图 4, 因此设计 2 个吸收器, 分别放置在对应 2 条光斑的焦平面上。每个吸收器有 2 个全铝翅片换热器并排放置, 在两端由集管连接而成, 如图 5 所示。这种吸收器制造简单、质量轻、成本低, 具体参数见表 2。为使吸收器最大限度将太阳辐射转化为热能加以利用, 在其表面用喷涂方法涂覆选择性吸收涂层(80 °C 时吸收率 0.9, 发射率 0.3)。

为减少光线的溢出损失, 增加系统的聚光效率, 同时增加聚光系统的聚光比, 从而提高吸收器以及整个聚光集热系统的集热效率, 将吸收器与

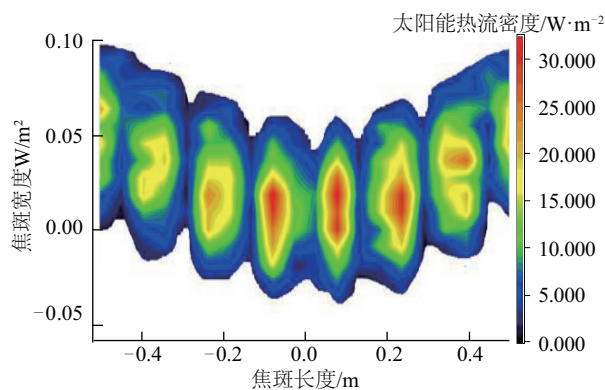


图4 菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光集热系统焦斑形状

Fig. 4 Focal plane shape of beam-down concentrating solar tower

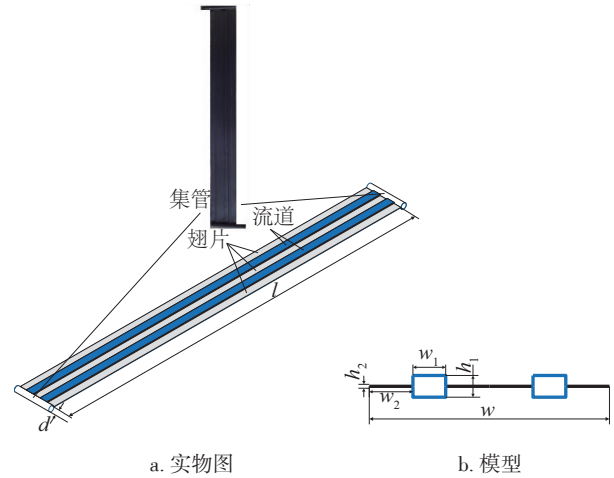


图5 吸收器

Fig. 5 Receiver

表2 吸收器几何参数

Table 2 Geometric parameters of receiver

mm			
参数	数值	参数	数值
长度 l	1000	流道高度 h_1	5
宽度 w	100	流道宽度 w_1	14
进出口管径 d	15	翅片厚度 h_2	0.5
		翅片宽度 w_2	18

2D-CPC 结合再次聚光, 如图 6 所示, 设计参数见表 3。为固定吸收器和 CPC 的位置, 自行设计一个和吸收器尺寸相仿的外壳, 外壳里面平铺岩棉, 一方面是可减少吸收器背面的对流换热损失, 提高集热效率; 另一方面是为保证吸收器中心面与 CPC 出口平面重合。将外壳放置在长方形支架上, 与外壳连接的 2 个横梁可转动, 以确保实验时调节 CPC 的开口方向使光线可基本垂直入射, 如图 7 所示。

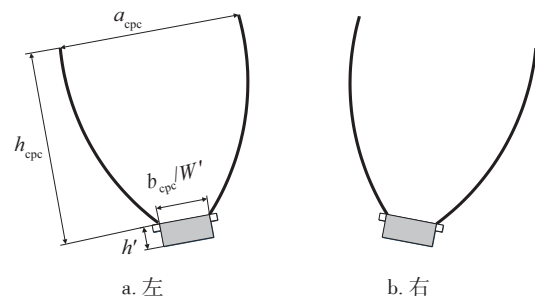


图6 CPC 聚光器

Fig. 6 CPC concentrator

表3 CPC和凹槽几何参数

Table 3 Geometric parameters of CPC and groove

结构部件	参数	数值
CPC	长度 l_{cpc}/mm	1000
	高度 h_{cpc}/mm	460
	上开口宽度 a_{cpc}/mm	346
	下开口宽度 b_{cpc}/mm	105
	聚光比 C_{cpc}	3.30
	最大入射半角 $\alpha/(\circ)$	26
凹槽	长度 l_g/mm	1030
	高度 h_g/mm	60
	宽度 w_g/mm	105

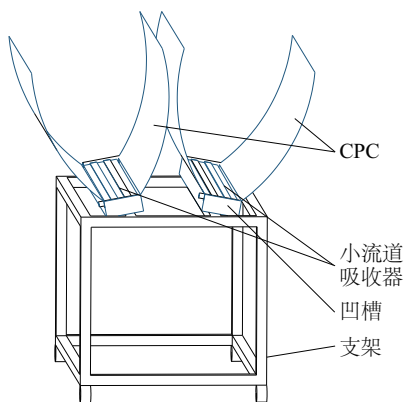


图7 集热实验台整体结构

Fig. 7 Structure of experimental collection instrument

2 系统光热转换

2.1 系统光学效率分析

菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光集热系统光学效率与余弦效率 η_{\cos} 、阴影和遮挡效率 η_{sh} 、大气透过率 η_{at} 以及溢出效率 η_{it} 这 4 个因子有关。由于文中聚光系统的光线传播距离较短,在此忽略大气透过率的影响

1) 余弦效率 η_{\cos}

余弦效率是指由于入射光线与定日子镜之间存在一定角度而引起入射太阳光线可见面积与子镜表面面积之比,因此余弦效率的表达式为:

$$\eta_{\cos} = \cos \theta \quad (1)$$

式中, θ ——入射太阳光线方向向量与定日子镜法向量之间的夹角, $(^\circ)$ 。

2) 阴影和遮挡效率 η_{sh}

由于单台线菲涅尔镜的固有特性,阴影和遮挡损失是线菲涅尔镜相邻子镜之间排布的原因导致光线入射时因为相邻子镜的遮挡导致光线无法到达线菲涅尔镜全部的反射表面上引起的损失,如图 8 所示。另外,根据系统定日镜场排布以及追日过程中太阳位置的变化,二次反射镜在线菲涅尔镜产生阴影,造成入射光线损失。因此阴影和遮挡效率可定义为未发生阴影和遮挡的面积与线菲涅尔镜总面积之比。

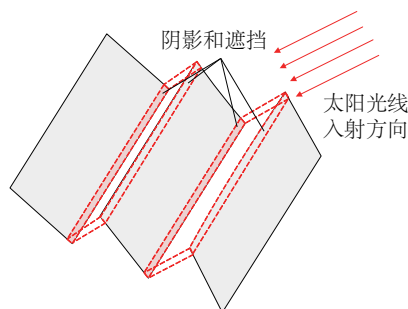


图8 定日子镜之间阴影和遮挡损失

Fig. 8 Shading and blocking loss between adjacent sub-mirrors

3) 溢出效率 η_{it}

经线菲涅尔镜反射的太阳光线因没有能到达接收器表面,而溢出至外界大气中所导致的能量损失称为溢出损失。

4) 系统几何聚光比

聚焦集热系统的几何聚光比 C 可定义为:

$$C = \frac{A_c}{A_a} \quad (2)$$

式中, A_c 、 A_a ——线菲涅尔镜场总采光面积以及吸收器采光面的面积, m^2 。

2.2 系统集热效率分析

1) 吸收器的集热效率及热损失

为了同时测量吸收器的集热性能和热损失,通过调节定日镜 H1 将光线聚焦到 1#吸收器,用来测试导热油不同进口温度和流量工况下吸收器的集热性能;2#和 1#吸收器对称放置,但实验中不调节定日镜 H2,以使 2#吸收器不接受光线照射,用来测试相应工况下吸收器的热损失。1#和 2#吸收器并行放置在油泵和圆齿轮流量计之间形成 2 条支路,保证每条支路上的阻力尽可能一样,因此实验中每个吸收器的流量相等,即为圆齿轮流量计读数的

一半。

根据能量守恒定律,可列出 1#和 2#吸收器的热平衡方程:

$$Q_{1,\text{eff}} = \alpha Q_{1,a} - Q_{1,\text{loss}} \quad (3)$$

$$Q_{2,\text{loss}} = \dot{m}_1 c_p (T_{2,i} - T_{2,o}) \quad (4)$$

式中, $Q_{1,\text{eff}}$ ——1#吸收器内导热油带走的能量, W;
 $Q_{1,a}$ ——1#吸收器表面入射的太阳辐射能, W;
 α ——涂层吸收率; $Q_{1,\text{loss}}$ ——吸收器的热损值, W;
 $T_{2,o}$ 、 $T_{2,i}$ ——2#吸收器导热油进出口温度, K;
 \dot{m}_2 ——2#吸收器中导热油的质量流量, kg/s;
 c_p ——导热油的定压比热, J/(kg·K)。

1#吸收器导热油吸收的能量 $Q_{1,\text{loss}}$ 可通过式(5)得到:

$$Q_{1,\text{eff}} = \dot{m}_1 c_p (T_{1,o} - T_{1,i}) \quad (5)$$

式中, $T_{1,o}$ 、 $T_{1,i}$ ——1#吸收器进出口温度, K;
 \dot{m}_1 ——1#吸收器中导热油的质量流量, kg/s; c_p ——导热油的定压比热容, J/(kg·K)。

$$Q_{1,a} = \eta_o A_c I_b \quad (6)$$

式中, η_o ——系统的光学效率; A_c ——定日镜面积, m²; I_b ——太阳法向直射辐射强度, W/m²。

集热器热损失包括吸收器表面对流、导热和辐射热损,而文献[9]中对于成像聚光系统,热损失近似与吸收器表面温度和外界环境温度成正比:

$$Q_{1,\text{loss}} = U_L A_a (T_{1,r} - T_{\text{env}}) \quad (7)$$

式中, U_L ——吸收器的总热损系数, W/(m²·K);
 $T_{1,r}$ ——1#吸收器表面温度, K。

所以 1#吸收器的集热效率为:

$$\eta = \frac{\dot{m}_1 c_p (T_{1,o} - T_{1,i})}{A_c I_b} = \alpha \eta_o - \frac{U_L (T_{1,r} - T_{\text{env}})}{CI_b} \quad (8)$$

而 $T_{1,r}$ 通过实验很难测得,且在理想条件下 $T_{1,r}$ 和吸收器内工质的平均温度 $T_{1,f}$ 相等,因此集热效率可写成:

$$\eta = \alpha \eta_o - \frac{U_L (T_{1,f} - T_{\text{env}})}{CI_b} \quad (9)$$

从而吸收器的集热效率可以表示为基于归一化温度 $T^* = \frac{T_{1,f} - T_{\text{env}}}{I_b}$ 的统一表达式。

此时,吸收器的热损失为:

$$Q_{\text{loss}} = U_L A_a (T_{1,f} - T_{\text{env}}) \quad (10)$$

另外,考虑到 1#吸收器与 2#吸收器的几何结构、光学和材料参数相同,本文假设两者具有相同的热损失系数 U_L (在相同的平均流体温度条件下)。

2) 吸收器的焓效率

吸收器作为聚光集热的关键部件,其性能直接影响着光热转换的效率,而在太阳能中高温热利用领域关注更多的是吸收器吸收的热量尽可能多的转化为有用能,即吸收器的焓效率。

根据文献[10]中的公式,整理得到吸收器焓效率的表达式:

$$\eta_E = \frac{\left[\alpha - \frac{U_L (T_{1,r} - T_{\text{env}})}{\eta_o CI_b} \right] \left(1 - \frac{T_{\text{env}}}{T_{1,f}} \right)}{\psi} \quad (11)$$

式中, ψ ——辐射焓能比,即辐射能到辐射焓的理论最大转换效率。

$$\psi = 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{\text{env}}}{T_F} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{\text{env}}}{T_F} \right)^4 \quad (12)$$

式中, T_F ——吸收器表面焦斑区域的温度, K。

假设焦斑区域近似为黑体辐射源,则其温度为:

$$T_F = \sqrt[4]{\frac{\eta_o CI_b}{\sigma}} \quad (13)$$

这样在一定的运行工况下(如直射辐射 I_b , 环境温度 T_{env} , 吸收器热损系数 U_L 等已知),利用式(11)求出即可求出不同进口温度下的焓效率,进而确定吸收器的最佳工作温度。

3 实验结果与分析

利用上文介绍的实验系统装置对吸收器的相关集热性能进行了实验测试,测试过程中聚光系统定日镜的追踪角度根据文献[11]进行设置,通过 2 个步进电机依次调节定日镜的滚转角及其子镜的俯仰角进行追踪太阳。实验时可通过高低温一体机恒温油槽(温度范围为-20~300℃)控制吸收器进口导热油温度,以及变频高温油泵控制系统中导热油的流量,圆齿轮流量计放置在主流道上,其流量测定范围为 180~600 L/h。实验过程中导热油进口温度设定 80, 100, 110, ..., 180℃, 间隔为 10℃;导热油总的流量设定为 400 和 580 L/h。

测试时间为 2016 年 7 月 21 日、23 日、25 日共 3 d,均为晴好天气,每个工况持续时间为 2 min,期

间直射辐射的变化范围在 $\pm 20 \text{ W/m}^2$,环境温度波动小于 1°C ,整个测试时段内风速为 $0.4\sim 3 \text{ m/s}$ 。图9为测试工况下的天空直射辐射和吸收器周围环境温度的变化情况。

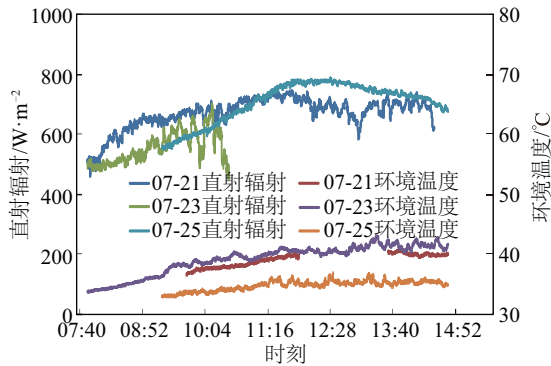


图9 测试时间段内直射辐射与环境温度的平均值

Fig. 9 Average data of DNI and environmental temperature during test conditions

3.1 吸收器效率及热损的测定

图10为测试过程中1#和2#吸收器的进出口温差随进口温度的变化曲线,从图10中可看出在同一流量下,1#和2#吸收器进出口温升和温降都会随着导热油进口温度的增加而增加,但受到直射辐射、环境温度及风速变化的影响,1#吸收器在导热油不同进口温度下其进出口温升会不同程度的增加,具体体现为得热量和集热效率的变化。另外对于相同流量下,随着导热油进口温度的升高,1#和2#吸收器的温升和温降趋于相等。总体而言,吸收器进口温度越高,温升越小;而吸收器进出口温差随着导热油流量的增加而减小。

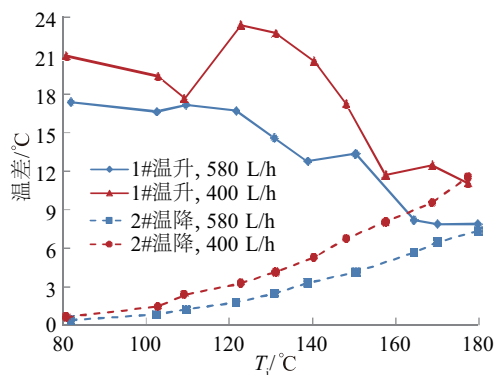
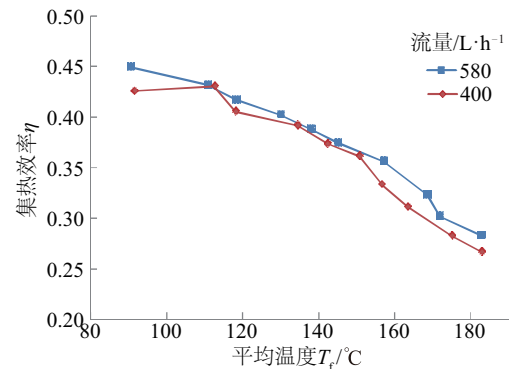


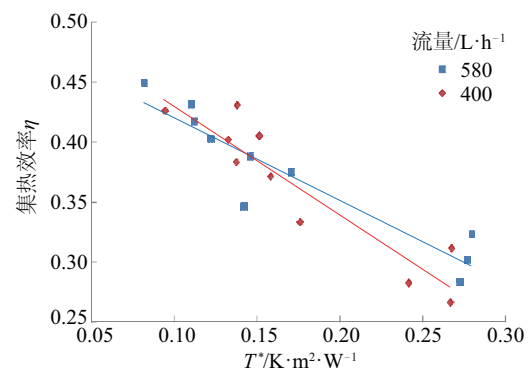
图10 不同工况下1#、2#吸收器进出口温差

Fig. 10 Temperature differences between inlet and outlet of receiver 1# and 2# under different test conditions

根据上述测试数据,采用式(8)计算在不同进口温度和流量下吸收器的效率曲线,如图11a所示。从图11可看出集热效率随着导热油平均温度的升高逐渐降低:1)进口流量为 580 L/h 时,导热油平均温度为 90.6°C ,集热效率 44.93% ;导热油平均温度为 130°C ,集热效率 40.21% ;导热油平均温度为 157.1°C ,集热效率 34.57% ;导热油平均温度为 182.8°C ,集热效率 28.31% ;2)进口流量为 400 L/h 时,导热油平均温度为 91.4°C ,集热效率 42.59% ;导热油平均温度为 134.4°C ,集热效率 39.17% ;导热油平均温度为 156.6°C ,集热效率 33.33% ;导热油平均温度为 183.0°C ,集热效率 26.65% 。同时随导热油流量的升高,吸收器的集热效率会有小幅上升,因此适当增大导热油的流量可以提高吸收器的集热效率。



a. 导热油平均温度



b. 归一化温度

图11 吸收器集热效率曲线

Fig. 11 Thermal efficiency curve of receiver

虽然吸收器热损系数 U_L 是风速和集热器运行温度的函数,但对于大多数吸热器来说,其效率用线性拟合是一种很好的近似^[7],将效率曲线拟合为一条直线,则其截距为系统的光学效率 $\alpha\eta_0$,斜率为

U_L/C 。图 11b 为线性拟合的归一化集热效率曲线, 由此可得基于吸收器的聚焦集热系统的光学效率: 导热油流量为 580 L/h 时, $\alpha\eta_o$ 为 48.87%, U_L/C 为 0.6943 W/(m²·K); 导热油流量为 400 L/h 时, $\alpha\eta_o$ 为 52.21%, U_L/C 为 0.9314 W/(m²·K)。

图 12 为不同流量下 2#吸收器的热损系数随导热油进口温度的变化情况。从图 12 中可看出导热油流量为 580 L/h, 进口温度为 80, 100, 110, ..., 180 °C 时, 2#吸收器的热损系数 U_L 由 80 °C 时的 12.11 W/(m²·K) 增加到 180 °C 时的 80.61 W/(m²·K); 导热油流量为 400 L/h, 进口温度经过相同的调节, 热损系数为 13.54 W/(m²·K) 上升到 88.64 W/(m²·K)。随着导热油流量的增加, 吸收器的热损失及热损系数会相应的降低。

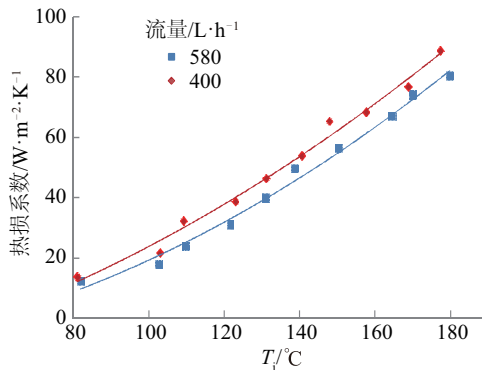


图 12 2#吸收器的热损系数随温度的变化

Fig. 12 Heat loss coefficient variation with temperature at different volume rates for 2# receiver

根据 2#吸收器测得的热损系数和 1#吸收器的流体的平均流体温度, 可求得 1#吸收器的热损失, 如图 13 所示, 从图 13 中可看出导热油流量为 580 L/h,

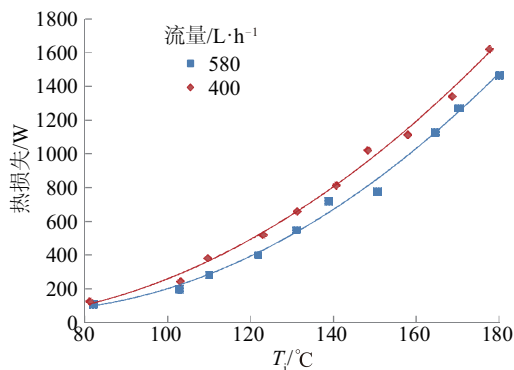


图 13 1#吸收器热损失随进口温度的变化

Fig. 13 Heat loss variation with inlet temperature at different volume rates for 1# receiver

进口温度为 80, 100, 110, ..., 180 °C 时, 热损失由 109.77 W 增加到 1465.13 W; 导热油流量为 400 L/h, 进口温度经过相同的调节, 热损失为 123.79 W 增加到 1621.87 W。随着导热油流量的增加, 吸收器的热损失降低。

3.2 吸收器最佳运行温度的确定

将不同工况下的相关参数代入式(11)即可求出对应的烟效率, 如图 14 所示。在相同流量下, 吸收器的烟效率随导热油进口温度的增加先增加而后减小, 因此吸收器存在一个最佳运行温度 T_{opt} 。导热油流量在 580 L/h 下, 吸收器最大的烟效率为 37.01%, 集热效率为 38.67%; 导热油流量在 400 L/h 下, 此时吸收器最大的烟效率 32.94%, 集热效率为 37.11%。随着导热油流量的增加, 吸收器的烟效率会略微增加, 从图中从拟合的烟效率曲线上可看出, 不同流量下吸收器的最佳运行温度 T_{opt} 则相差不多, 基本在同一温度范围内, 当流量为 580 L/h 时, T_{opt} 约为 145 °C; 当流量 400 L/h 时, T_{opt} 约为 142 °C。

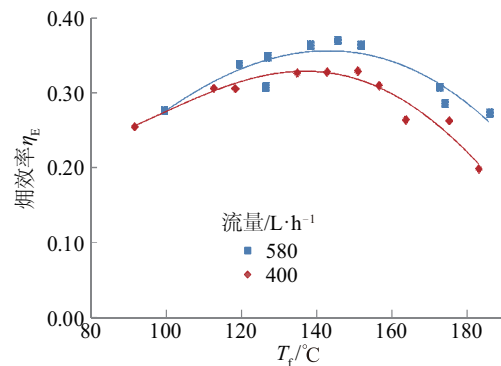


图 14 不同流量下吸收器的烟效率随其内导热油平均温度 T_r 的变化

Fig. 14 Exergy efficiency of receiver with average temperature of heat transfer oil inside it under different volume rates

4 结 论

本文介绍了采用新型吸收器的线菲定日镜二次反射塔式太阳能聚光集热实验系统, 通过实验研究了聚光系统的光学效率、吸收器的集热效率以及热损和热损系数, 并通过吸收器烟效率公式确定了吸收器运行的最佳温度, 得到如下结论:

1)实验研究了导热油在吸收器内不同进口温度和流量下的集热效率:导热油流量为 580 L/h 时,进口温度从 80~180 ℃,吸收器的集热效率由 44.93%降低到 28.31%,其热损失从 52.44 W 上升到 1118.64 W,其热损系数由 12.11 W/(m²·K)上升到 80.16 W/(m²·K);流量为 400 L/h,进口温度从 80~180 ℃变化时,吸收器集热效率从 42.59%降低到 26.65%,其热损失从 58.61 W 上升到 1207.00 W,其热损系数由 13.51 W/(m²·K)上升到 88.64 W/(m²·K)。

2)根据集热效率通过最小二乘法拟合为归一化温度 T 线性关系得到聚光系统的光学效率,当流量为 580 L/h 时, η_o 为 54.3%;当流量为 400 L/h 时, η_o 为 58.01%。

3)根据不同运行工况下的相关参数,求出吸收器相应的焓效率,由此获得最佳运行温度 T_{opt} ,当导热油流量为 580 L/h 时, T_{opt} 为 145 ℃;当流量为 400 L/h 时, T_{opt} 为 142 ℃。

参考文献

- [1] Rabl A. Tower reflector for solar power plants[J]. Solar Energy, 1976, 18(3): 269—271.
- [2] Kribus A, Krupkin V, Yogev A. et al. Performance limitations of heliostat fields[A]. ASME Solar Energy Conference[C], Washington, USA, 1997.
- [3] Yogev A, Kribus A, Epstein M, et al. Solar “tower reflector” systems: A new approach for high-temperature solar plants[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1998, 23(4): 239—245.
- [4] Segal A, Epstein M. Comparative performances of ‘tower-top’ and ‘tower reflector’ central solar receivers[J]. Solar Energy, 1999, 65(4): 207—226.
- [5] Leonardi E. Detailed analysis of the solar power collected in a beam-down central receiver system[J]. Solar Energy, 2012, 86(2): 734—745.
- [6] Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Yu Weixing, et al. Ray tracing and simulation for the beam-down solar concentrator[J]. Renewable Energy, 2013, 50: 161—167.
- [7] Dai Yanjun, Li Xian, Zhou Lu, et al. Comparison-based optical study on a point-line-coupling-focus system with linear Fresnel heliostats[J]. Optics Express, 2016, 24(10): A966.
- [8] Li Xian, Dai Yanjun, Wang Ruzhu. Performance investigation on solar thermal conversion of a conical cavity receiver employing a beam-down solar tower concentrator[J]. Solar Energy, 2015, 114: 134—151.
- [9] Duffie J A, Beckman W A. Solar engineering of thermal processes[M]. New York: Wiley Inter Science, 2013.
- [10] 谢文韬. 菲涅尔太阳能集热器热性能研究与热迁移因子分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [10] Xie Wentao. Investigation on thermal performance of fresnel solar collectors and analysis on heat removal factors[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.
- [11] 马 玄, 代彦军, 李 显, 等. 点、线耦合聚焦塔式太阳能线菲涅尔镜追踪角时空变换特性研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(7): 1833—1840.
- [11] Ma Xuan, Dai Yanjun, Li Xian, et al. Detailed study on the sun-tracking characteristic of a point-line-coupling beam-down concentrating solar tower with linear Fresnel heliostats[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(7): 1833—1840.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PERFORMANCE OF RECEIVER IN BEAM-DOWN CONCENTRATING SOLAR TOWER WITH LINEAR FRESNEL HELIOSTATS

Ma Xuan¹, Zhang Daihong², Dai Yanjun¹, Li Xian¹, Huang Guanzheng¹, Wang Ruzhu¹

(1. *Institute of Refrigeration and Cryogenics, Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of M. O. E,*

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Anhui State Grid Energy Equipment Engineering Company, Anqing 246700, China)

Abstract: In this paper, a novel type of receiver cooperated with beam-down concentrating solar tower system with linear Fresnel heliostats is introduced, above which CPC is mounted so that its solar-thermal efficiency is expected to be higher. First, optical efficiency of the system and solar-thermal efficiency of receiver are theoretically analyzed, including receiver's exergy efficiency and are then measured through corresponding experiments at different inlet temperature and flow rates inside the absorber. By straight regression fitting, the linear relationship between the solar-thermal efficiency and the ratio of temperature difference to the DNI is obtained, where $\alpha\eta_0$ is the value of the point of intersection with y -axis of the straight regression line. Finally, exergy efficiencies under different test conditions are calculated, thus attaining the receiver's optimal operation temperature at different flow rates: T_{opt} is about 145 °C at 580 L/h; T_{opt} is about 142 °C at 400 L/h.

Keywords: solar energy; heliostats; beam tracking; receiver fixed with CPC; solar-thermal efficiency; optimal operation temperature