

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.042

槽式太阳能集热系统集热性能试验研究

钱旺 王振华 马赛 刘贵林 贺刚 罗金海

(中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 槽式太阳能集热系统在太阳能热发电领域的应用比较成熟, 由于其光-热转化效率高的特点, 近些年在牧草干燥领域的应用也越来越多。为了进一步提高牧草干燥效率, 以槽式太阳能集热系统作为稳定的干燥热风能源输出, 研究其真空集热管集热性能和热损失是槽式太阳能热利用的关键。利用槽式太阳能集热系统加热导热油储能, 通过追踪真空集热管进、出口温度和真空集热管内温度, 阐述了进入真空集热管内的导热油瞬时温度与集热器瞬时光热转换效率和真空管热损失的关系。结果表明, 集热器瞬时光热转换效率与导热油进入真空集热管的温度有关, 进入真空集热管导热油温度越低, 换热越充分, 真空集热管热损失越少, 真空集热管瞬时光热转换效率越高。加大真空集热管出口和入口的导热油温差是提高槽式太阳能集热蓄热能力的关键。

关键词: 牧草干燥; 槽式太阳能集热系统; 集热性能; 试验

中图分类号: S226.6; S214.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0320-07

Experiment on Collector Performance of Parabolic Trough Solar Collecting System

QIAN Wang WANG Zhenhua MA Sai LIU Guilin HE Gang LUO Jinhai

(Hohhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd., Huhhot 010010, China)

Abstract: Because of its high photo-thermal conversion efficiency, the parabolic trough solar collecting system in solar thermal power generation is more mature. Therefore, in recent years more and more applications were made in the field of forage drying. In order to further improve the efficiency of forage drying, as steady output of dry hot wind energy, the parabolic trough solar collecting system, the heat collecting performance and heat loss of vacuum heat collecting pipes were studied. Through studying, the factors that improved the heat gathering efficiency of the system was found out. Tracking the inlet, outlet and inner temperatures of a vacuum heat collector by heating the heat transfer oil storage energy using a slot solar heat collector system. The effect of instantaneous temperature of heat transfer oil was discussed from different angles, especially when entering vacuum heat collector on the transient heat conversion efficiency of heat collector. It can be deduced from the opposite side that the instantaneous heat conversion efficiency of the collector was related to the temperature of the heat guide medium when entering the collector. The lower the temperature of the heat transfer oil of the collector was, the more full the heat exchange was, and the less the heat loss of the vacuum heat collector can be got, the higher the instantaneous heat conversion efficiency of the collector can be obtained. So how to increase the heat transfer oil temperature difference between the outlet and inlet of the collector was the key to improve the heat storage capacity.

Key words: forage drying; parabolic trough solar collecting system; gathering performance; experiment

0 引言

槽式太阳能集热系统在太阳能热发电领域最为

成熟, 在国外, 槽式太阳能发电系统已经有多年的大规模商业化应用经验^[1-2]。Luz 公司 1984—1991 年间在美国加利福尼亚州 Mojave Desert 陆续兴建 9 座

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701700)

作者简介: 钱旺(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: qianwang0319@163.com

通信作者: 马赛(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: 752015788@qq.com

槽型抛物面太阳能电站。美国加州太阳能电站的槽型抛物面太阳能集热器目前已经从 LS-1 型发展到 LS-3 型^[3]。GARCIA 等^[4]对单程和双程槽式集热器的传热和流动特性进行了数值研究,并与美国 Sandia 实验室的数据进行了对比分析,研究表明双程集热器的热效率比单程集热器要高。YONG 等^[5]研究了一种双层玻璃抛物槽式太阳能集热器的性能,设计了 4 种不同的吸热管布置方案,以空气为工作工质,考虑太阳辐射、散射、遮挡效应对集热器的影响。国内对槽式太阳能集热技术的关注较晚,产业也多集中在高温太阳能热发电上。文献[6-7]结合热力学第一定律与热力学第二定律,对槽式太阳能直接产生蒸汽热发电系统进行了传热和 分析。王志锋^[8]对单轴跟踪太阳聚集系统进行了光学分析,重点分析了集热管内流体混合对流的传热过程。

槽式太阳能集热系统除了可以用于发电外,近些年在工、农业领域也开始应用^[9]。鉴于我国目前还没有成熟的商用槽式太阳能集热系统,一般其需求的温度范围为 100~300℃^[10]。适合的工艺或过程有清洗、干燥等^[11],主要应用于牧草加工领域^[12]。

本文针对牧草干燥所需热风温度,选择合适的蓄热材料,研究槽式太阳能集热系统真空集热管的集热性能和热损失,找出提高系统集热效率的因素。

1 总体结构和工作原理

试验使用的槽式太阳能集热系统是由太阳能聚光集热器、自动追踪系统、导热油循环系统、热风扩散系统、控制系统和可移动平板拖车系统 6 部分组成,如图 1、2 所示,图 2 中 I_0 表示太阳直射辐射强度(单位:W/m²), m 表示导热流体流量(单位:kg/m²), T_0 表示真空管入口温度(单位:℃), T_1 表示测点温度(单位:℃), T_2 表示真空管出口温度(单位:℃)。试验过程要确保油温的恒定,主要通过油箱、温控仪、加热器和油泵的组合和联动来实现。温控仪通过程序

直接调用可调加热器,根据油箱内温度传感器测得的温度来开启加热器的加热功能,确保恒温条件的实现。具体工作流程为:设定恒温油箱温度值,启动油泵,开启加热器,导热油途经循环泵、流量计、流量调节阀、吸热器、集热器,上下保温油箱进行回路循环并加热。



图 1 试验系统实物图

Fig. 1 Physical mapping of test system

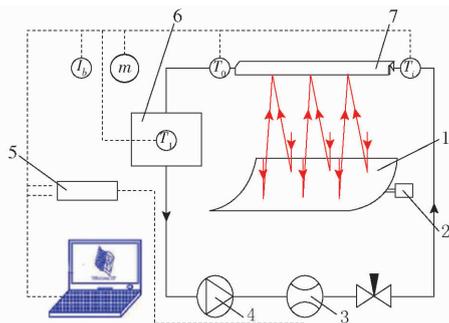


图 2 试验系统工作原理图

Fig. 2 Working principles of test system

1. 槽式太阳能镜片 2. 自动追踪系统 3. 流量计 4. 循环泵
5. 控制系统 6. 油箱 7. 真空管集热器

槽式太阳能集热系统试验时,真空集热管内的导热油工质被加热,温度升高的工质回流储存在油箱中。在试验研究过程中,通过温度传感器记录保温油箱内的工质和真空集热管入口、出口处的工质温度,工质的流量通过流量计记录,系统的环境参数由环境记录仪进行记录,太阳直射辐射仪记录试验当天的太阳直射辐射强度,且记录的数据均储存在计算机中。槽式太阳能集热系统参数见表 1。

表 1 槽式太阳能集热系统参数

Tab. 1 Parameters of parabolic trough solar collecting system

参数	数值/方式	参数	数值/方式
聚光方式	槽式抛物面	集热面积/(mm × mm)	3 000 × 4 000
聚光焦距/mm	1 280	抛物镜宽度/m	3
抛物面镜片数/件	8	集热玻璃管径/mm	100
金属管管径/mm	42	集热管长度/m	4
设备质量/kg	1 000	功率/kW	4.5
频率/Hz	50	转速/(r · min ⁻¹)	2 800
风机输入电压/V	380	气压/kPa	2 000
导热油燃点/℃	320	油箱最大容量/L	250
集热温度/℃	≤280	跟踪方式	单轴自动
追踪精度/(°)	±1	时控跟踪速率/((°) · h ⁻¹)	15
东西跟踪角/(°)	≤145	电动推杆行程/mm	900
外形尺寸/(mm × mm × mm)	6 600 × 3 000 × 2 750	系统电源电压/V	24
设备总电源电压/V	380(50 Hz)		

2 试验仪器及设备

2.1 温度传感器

由于集热管的温度很高,本试验采用高温型温度传感器,凡是安装于腔体的温度传感器,均采用定制型带螺纹的温度传感器,保温油箱内安装 Pt100 型高温传感器,温度传感器参数如表 2 所示,图 3 为温度传感器的实物图。

表 2 温度传感器参数

Tab. 2 Temperature sensor parameters

名称	类型	温度/℃	精度/℃
带螺纹温度传感器	Pt100	0 ~ 300	0.1
高温型温度传感器	Pt100	0 ~ 300	0.1



图 3 温度传感器

Fig. 3 Temperature sensor

2.2 流量计

流量计选用具有差压管的耐高温孔板流量计,差压管材料为 304 号不锈钢,流量测量范围 0.1 ~ 6.0 m³/h,精度为 1.0 级,工作温度小于等于 400℃,工作压力小于等于 1.6 MPa。在测量导热油流量过程中,为减少该流量计的热损失,试验采用硅酸铝保温棉包裹流量计的差压管道进行保温。

2.3 循环泵

循环泵工作温度小于等于 500℃,循环泵的电机选用三相异步交流电机,额定功率为 1 500 W。试验采用硅酸铝保温棉包裹高温循环泵来进行保温,在循环泵出口安装流量调节阀,调节导热油的工质流量。

2.4 直辐射仪及环境记录仪

TBS-2-2 型直辐射仪用来测量太阳辐射能的直辐射部分,其辐射波段为 280 ~ 3 000 nm,辐射测量范围 0 ~ 2 000 W/m²,由锦州阳光科技发展有限公司生产,其性能参数见表 3,图 4 为实物图。

表 3 直辐射仪参数

Tab. 3 Direct radiometer parameters

参数	数值	参数	数值
灵敏度/($\mu\text{V}\cdot(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})^{-1}$)	7 ~ 14	电源电压/V	220
跟踪精度/%	±1	质量/kg	5
年稳定性/%	±1	内阻/ Ω	80
响应时间/s	≤15	工作温度/℃	±45

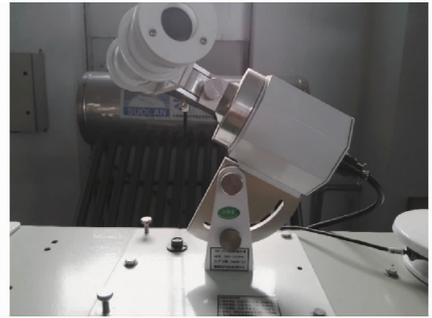


图 4 直辐射仪

Fig. 4 Direct radiometer

2.5 保温油箱及导热油选取

导热油燃点为 350℃,安装有温度控制系统,保证运行安全可靠。集热管安装有温度显示器,可设置最高温度,当温度高于设置最高温度时,集热管内油路进行循环,使高温油循环至油箱;当集热管内油温度低于设定值时,油泵停止工作,继续升温。油箱体积 150 L,试验注入 120 kg 导热油。本文选择进口高温导热油为传热介质,其物性参数如表 4 所示。

表 4 导热油物性

Tab. 4 Physical properties of thermal oil

参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 530 ~ 1 550
闪点/℃	230
运动粘度/($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	16 ~ 19
酸值(以 KOH 计)/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.05
残炭百分比/%	0.05
最高使用温度/℃	350
最高允许膜温/℃	375

2.6 数据采集记录仪

数据采集记录仪如图 5 所示,该采集记录仪设有多个温度探头安装通道,多个太阳直射安装通道、多个环境风向和风速通道,可自由选择通道口。如图 5 所示,采集记录仪具有记录功能,且内部的各项参数可通过计算机 486 口进行传输,计算机与记录仪的通讯协议采用 RS232 串口协议。数据采集记录仪主要是记录集热管进出口温度、油箱温度以及油箱进出口处的温度。同时还对环境温度、直辐射强度、风速、太阳能直辐射量进行测量和数据采集。

2.7 其他仪器

试验还应用了美国 FLUKE 公司的 FLUKE NORMA 5000 型功率分析仪;美国 Agilent Technologies 公司的 34901A Agilent 模块;机械工业畜牧机械产品质量监督检测中心的高温循环油浴锅;巩义市予华仪器有限责任公司的 LC 25 型高温齿轮流量计;沧州宇泰泵业有限公司的 PUN 600E



图5 记录仪及计算机

Fig. 5 Recorder and computer

型高温循环泵;嘉兴市南湖区明达教育仪器厂的16026型风速计;群特科技股份有限公司的CENTER350型红外测温仪;锦州阳光科技发展有限公司的温度传感器;广州苏郎仪表有限公司的K型热电偶;锦州阳光科技发展有限公司的直辐射仪及环境记录仪。

3 试验测试方法与结果分析

3.1 试验测试方法

3.1.1 试验测试条件

试验时间选在2016年7月6日06:00,试验地点为内蒙古呼和浩特市赛罕区昭乌达路山丹街2号中国农机院呼和浩特分院院内。夜间最低/高气温为17℃/32℃,白天东南风1~2级,蓄热油箱导热油质量为120 kg。

累计加热120 kg导热油由初始温度加热到210℃所需时间,分5个阶段调整设定集热管上下限温度,当集热管内油温达到设定上限值时,集热管内油路进行循环,使高温油循环至油箱,油箱中低温导热油进入集热管内;当油温低于设定值时,油泵停止工作,继续聚焦集热升温。分阶段调整集热上下限温度,可加快换热频率,提高集热效率。

3.1.2 真空集热管集热效率

由于太阳辐照度不恒定因素的影响,在研究过程中需要对玻璃真空管集热特性测试做温差归一化处理^[13-15]。真空集热管的归一化温度升高值 T^* 定义为

$$T^* = \frac{T_0 - T_i}{I} \quad (1)$$

式中 I ——辐射强度, W/m^2

真空集热管的集热效率 η_i 为

$$\eta_i = \frac{mc_p T^*}{A} \times 100\% \quad (2)$$

式中 c_p ——导热流体定压比热容, $J/(kg \cdot K)$

A ——集热面积, m^2

c_p 的定性温度 T_{av} 计算式为

$$T_{av} = \frac{T_0 + T_i}{2} \quad (3)$$

3.1.3 真空集热管热损失

真空集热管的热损失性能试验利用试验台进行,采用背对太阳法。试验安排在2016年7月16日,天气晴朗、无风,待太阳落下后,将槽式太阳能集热系统转到真空集热管无法采到光的位置,将已经加热后的导热油进行自然循环冷却,此时真空集热管的出口温度低于进口温度,温差的存在是真空集热管工作时热损失的根本原因^[16]。

为了使真空集热管的热损失测试结果准确,与真空集热管长度相对应^[17-19],热损失单位采用 W/m ,测试的玻璃真空集热管热损失 U_{Lr} 计算公式为

$$U_{Lr} = \frac{mc_p (T_i - T_0)}{L} \quad (4)$$

式中 L ——腔体的长度, m

3.1.4 真空集热管光热转换效率

导热油雷诺数 Re_{r2} 计算式为^[20-21]

$$Re_{r2} = 2RV/v_{r2} \quad (5)$$

其中 $v_{r2} = 4.01 \times 10^{-2} T_m^{-1.93}$ (6)

$$T_m = (T_j + T_0)/2 \quad (7)$$

式中 v_{r2} ——导热油的运动粘度

V ——导热油流速

R ——导热油热阻

T_j ——腔体吸收器吸收面温度, $^{\circ}C$

所以导热油努赛尔数 Nu_{r2} 计算公式为

$$Nu_{r2} = 0.037 (Re_{r2}^{4/5} - 871) / Pr_{r2}^{1/3} \quad (8)$$

其中 $Pr_{r2} = 5.00 \times 10^5 T_m^{-2.12}$ (9)

式中 Pr_{r2} ——导热油普朗克数

所以腔体吸收器圆弧壁面和工质之间的对流换热 h_{r2} 为

$$h_{r2} = \lambda_{r2} Nu_{r2} \quad (10)$$

其中 $\lambda_{r2} = -8.00 \times 10^{-5} T_m + 0.136$ (11)

式中 λ_{r2} ——导热油的导热系数, $W/(m \cdot K)$

腔体吸收器有效吸热面周长为 C_{absb} ,因此腔体吸收器圆弧壁面和工质之间的对流换热量 Q_{conr3} 计算公式为^[22]

$$Q_{conr3} = C_{absb} h_{r2} (T_0 - T_i) / (AI) \quad (12)$$

真空集热管的光热转换效率公式为^[21]

$$\eta = (Q_{conr3} - Q_l) / (I_b D) \times 100\% \quad (13)$$

式中 D ——槽式系统采光口宽度, m

Q_l ——真空集热器玻璃外管热散失量,在试验中假定不计

3.1.5 不确定度分析

测试过程中测量相对不确定度的基础理论计算公式为^[23]

$$U_r^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i) \quad (14)$$

$$\text{其中 } y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (15)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_n 为函数 y 的未知变量, $U(x_i)$ 为 x_i 的相对不确定度。

玻璃真空集热管集热效率相对不确定度 $U_r(\eta_i)$ 和热损失相对不确定度 $U_r(U_{Lr})$ 的计算式为^[24]

$$U_r^2(\eta_i) = \left(\frac{1}{m} \right)^2 U^2(m) + \left(\frac{1}{T_0 - T_i} \right)^2 (U^2(T_0) + U^2(T_i)) + \left(\frac{1}{I} \right)^2 U^2(I) \quad (16)$$

$$U_r^2(U_{Lr}) = \left(\frac{1}{m} \right)^2 U^2(m) + \left(\frac{1}{T_0 - T_i} \right)^2 (U^2(T_0) + U^2(T_i)) \quad (17)$$

3.2 试验结果分析

3.2.1 真空集热管集热温度和集热效率

真空集热管的集热温度如图6所示,在2016年7月6日10:17油箱内导热油温度达到220.3℃。

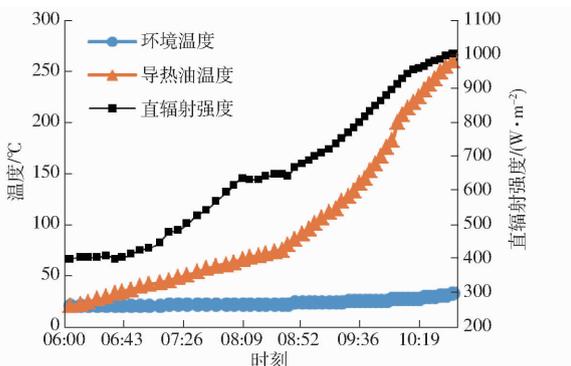


图6 蓄热油箱蓄热试验结果

Fig. 6 Heat recovery test for fuel tank

为确保安全起见,防止导热油自燃,人为手动控制自动跟踪系统。在图6中,真空集热管的集热温度达279.3℃,这验证了真空集热管的集热温度在安全使用范围内,达到了预期设计参数。

从图6可以看出,直射辐射曲线与油箱温度曲线呈现正相关,趋势相同。直射辐射曲线呈现二段式。第1阶段,直射辐射强度从400 W/m²开始稳步增长。第2阶段从08:30以后,太阳的直射辐射强度增强,太阳能槽式集热器试验台镜面与太阳光保持垂直性较好。油箱温度变化曲线同样呈现二段式。第1阶段,油箱温度开始缓慢上升,集热器本身材料吸收热量和太阳的直射辐射值低。第2阶段从08:30以后,太阳的直射辐射强度增强,槽式集热器试验台太阳能跟踪系统良好。

如表5所示,通过式(1)~(3)可得 η_i ,由式(5)~(13)可得 η ,将式(2)、(4)结果代入

式(16)、(17)可计算出 η_i 和 U_{Lr} 的相对测量不确定度。基于太阳能槽式聚光系统的集热效率最大试验测量值的相对不确定度为6.24%。从表5中可得,真空集热管集热效率的理论计算值大于试验值,两者的相对误差在7.10%以内。

表5 试验测量值与理论计算值对比

Tab. 5 Comparison of test measurement and theoretical calculation results

$T_i/^\circ\text{C}$	$I_b/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$T_a/^\circ\text{C}$	$\eta_i/\%$	$\eta/\%$	相对误差/%
65.4	639	21.6	68.27	70.31	4.65
90.4	679	22.7	65.34	67.95	7.10
132.6	787	24.6	60.07	63.82	5.88
159.3	851	25.5	59.12	62.01	4.66
176.4	883	25.8	58.94	60.78	3.03
206.8	931	26.4	57.32	59.07	2.96
220.3	954	27.5	56.99	57.34	0.61
249.8	989	30.1	53.84	55.46	2.92
273.4	997	33.7	50.76	52.68	3.64

试验数据表明真空集热管集热性能达到了集热系统设计值的要求。真空集热管的光热转化效率的理论计算值大于试验集热效率的主要原因是,槽式太阳能系统运行时无法保证理想状态(没有风速),槽式太阳能集热系统的跟踪装置与太阳的运动轨迹存在滞后性、整套真空集热管连接处的保温性能也是原因之一。

3.2.2 导热油工质温度对真空集热管集热性能的影响

真空集热管工作时,影响真空集热管吸收面与真空玻璃外表面的温差的导热油工质温度的变化情况如图7所示,导热油工质温度与真空集热管吸收面和真空玻璃外表面的温差成正比,随导热油工质温度的升高,温差增大的幅度越来越大。

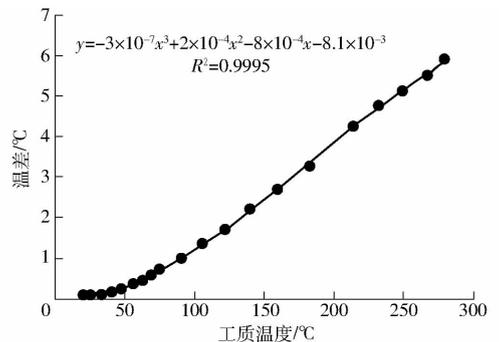


图7 导热油工质温度对真空集热管吸收面与真空玻璃外表面温差的影响

Fig. 7 Effect of heat conduction oil working temperature on temperature difference between vacuum heat collector absorption surface and vacuum glass outer surface

该试验说明采用真空玻璃罩式的集热管对提高真空集热管的集热性能有很大的作用,而且这种作用在高温集热时体现得很明显。

如图 8 所示,导热油工质温度与真空集热管吸收面与导热油的温差成反比,随着导热油工质温度的升高,温差降低的幅度越来越小。

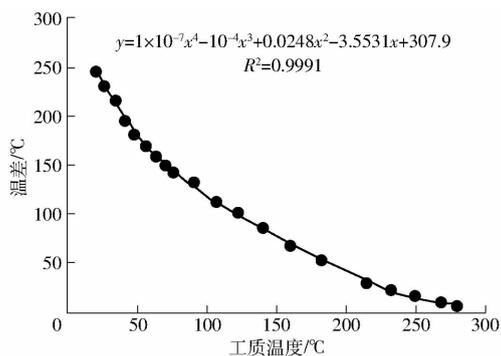


图 8 导热油工质温度对真空集热管吸收面与吸收面内导热油温差的影响

Fig. 8 Effect of temperature of heat transfer oil on temperature difference between heat transfer oil in vacuum heat collecting tube

导热油工质温度与导热油的运动粘度成反比,导热油在真空集热管吸收面内侧的强化对流换热性能增强,所以随着导热油工质温度的升高,导热油与真空集热管吸收面的温度梯度也在逐渐降低。

导热油从真空集热管吸热面吸收的热量取决于真空集热管吸收面与导热油温差,如图 9 所示,从图 9 可看出,随着真空集热管吸收面与导热油温差越来越大,导热油从真空集热管吸热面吸收的热量与真空集热管吸收面与导热油温差成反比,趋势线呈对数型。

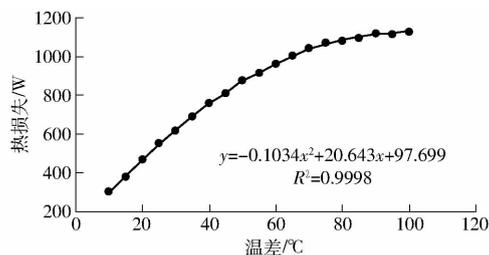


图 9 真空集热管吸收面与导热油温差对导热油吸收热量的影响

Fig. 9 Influence of temperature difference between heat absorption surface and heat conduction oil in vacuum heat collecting tube on heat absorption of heat transfer oil

当两者温差为 30℃时,导热油从真空集热管吸热面吸收的热量为 619 W,当真空集热管吸收面与导热油工质的温差为 70℃时,导热油从真空集热管吸热面吸收的热量为 1 043 W,温差从 30℃升高到

70℃,导热油从真空集热管吸热面吸收的热量静增加值为 424 W;当真空集热管吸收面与导热油工质的温差为 100℃时,导热油从真空集热管吸热面吸收的热量为 1 132 W,温差从 70℃升高到 100℃,导热油从真空集热管吸热面吸收的热量的静增加值只有 89 W。

随着两者温差的逐渐提高,导热油从真空集热管吸热面吸收的热量增多,真空集热管的集热温度随之降低,使得真空集热管与周围环境之间的对流热损失和辐射降低,同时也提高了集热管吸收面和导热油之间的温差,增强了真空集热管吸收面和导热油的对流换热,从而提高了真空集热管的集热性能。

3.2.3 真空集热管光热转换效率

真空集热管内工质温度与集热效率的关系如图 10 所示,从图 10 可得,真空集热管的集热效率的线性拟合决定系数 R^2 为 0.997 7 时,线性拟合的截距集热效率达到了 77.91%。

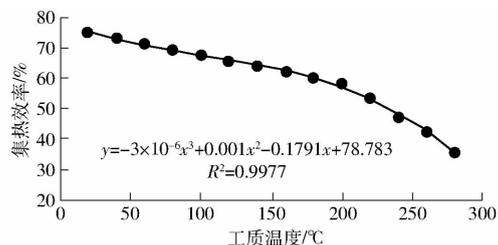


图 10 真空集热管内工质温度与集热效率关系曲线
Fig. 10 Temperature and heat gathering efficiency of working material in vacuum heat collecting tube

从图 10 还可以看出,真空集热管的光热转换效率随真空集热管内工质温度的增加而降低。真空集热管的集热温度在太阳能中低温领域,吸收器的光热转换效率随真空集热管内工质温度的增加,降低得较为缓慢,吸收器的光热转换效率随真空集热管内工质温度的增加,降低得较为迅速,当真空集热管内部工质温度为 200℃时,真空集热管的集热效率为 58.30%。

这是因为随着真空集热管集热温度的升高,真空集热管的玻璃真空管外壁到吸收器金属外管的温度也会随之升高,从而导致真空集热管的玻璃真空管外壁到吸收器金属外管的温度与周围环境温度的温差增大,这导致真空集热管的玻璃真空管外壁到吸收器金属外管的外壁对其周围环境的辐射损失是绝对温度的非线性的四次幂函数,因此辐射损失也会迅速提升。从而导致真空集热管总的热损失迅速上升,因此真空集热管的光热转换效率随真空集热管内工质温度的增加而降低得越来越快。

3.2.4 集热管热损失

集热管的热损失测试结果如图 11 所示,在图 11 中集热管的热损失试验测量值最大相对不确

定度为 10.8%。从图 11 中可看出,集热管的热损失与工质集热温度成正比,试验测试的结果和理论计算值吻合。

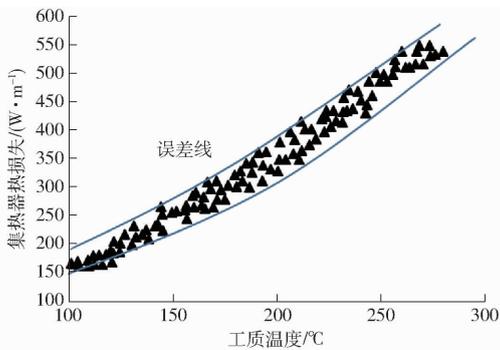


图 11 集热管的热损失测试结果

Fig. 11 Test results of heat loss for heat collector

4 结论

(1)进行了真空集热管吸收面与导热油工质的温差对导热油从真空集热管吸热面吸收热量的影响

的研究,随着真空集热管吸收面与导热油工质温差的增大,导热油通过真空集热管吸热面吸收的热量呈指数增长。可见,在槽式太阳能聚光系统加热导热油过程中,导热油进入集热器的温度越低,真空集热管吸收面与导热油之间的温差越高,集热器的集热效率越高。因此,降低进入集热器的导热油温度可以提高集热器的集热效率。

(2)建立了真空集热管的光热转换物理模型,结果发现真空集热管入口工质瞬时温度与集热器瞬时光热转换效率成反比,真空集热管内部工质温度由 25℃ 增加到 200℃,真空集热管的集热效率由 77.91% 降低到 58.30%。因此,降低进入真空集热管内的导热油温度是提高集热效率的有效办法。

(3)真空集热管的总热损失系数与导热油工质温度成正比。因此,在高温集热过程中保持真空集热管吸收面与导热油温差在合适范围内,可以降低总热损失率,提高光热转换效率。

参 考 文 献

- 1 周希正,李明,魏生贤,等. 组合跟踪的槽式聚焦集热器太阳辐照量的研究[J]. 能源工程, 2006(6): 32-35.
- 2 JA D, WA B. Solar engineering of thermal processes[M]. New York: Wiley, 1991.
- 3 BUIE D, MONGER A G, DEY C J. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations[J]. Solar Energy, 2003, 74(2): 113-122.
- 4 GARCIA V, VELZQUEZ N. Numerical simulation of parabolic trough solar collector; improvement using counter flow concentric circular heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(3-4): 597-609.
- 5 YONG K, TAEAEBEOM S. Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube[J]. Renewable Energy, 2007, 32(5): 772-795.
- 6 李四海,张红,战栋栋,等. 槽式太阳能直接产生蒸汽发电系统火用分析[J]. 热力发电, 2008(11): 39-43.
- 7 徐吉富,朱跃钊,蒋金柱,等. 新型槽式真空热管集热器的热效率及火用效率分析[J]. 真空, 2009(2): 27-36.
- 8 王志峰. 抛物跟踪式太阳高温集热器的研究[J]. 太阳能学报, 2000, 21(1): 69-76.
WANG Zhifeng. The optical analysis and heat transfer of parabolic solar collector[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2000, 21(1): 69-76. (in Chinese)
- 9 王永军,王胜利. Na₂SO₄/MgO 复合相变蓄热材料的制备及性能研究[J]. 冶金能源, 2011(3): 42-45.
- 10 钱旺,杨世昆,刘贵林,等. 苜蓿草干燥试验与收获工艺优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 231-234, 288. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s47&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.047.
QIAN Wang, YANG Shikun, LIU Guilin, et al. Optimization on harvesting technology and drying experiment of alfalfa[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 231-234, 288. (in Chinese)
- 11 FERNANDEZ-GARCIA A, ZARZA E, VALENZUELA L, et al. Parabolic-trough solar collectors and their applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 1695-1721.
- 12 LOURDES G R, CARLOS G C. Design parameter selection for a distillation system coupled to a solar parabolic trough collector[J]. Desalination, 1999, 122(2-3): 195-204.
- 13 LATIF O S V. Calentamiento solar decrudos pesados[J]. Revista de la Facultad de Ingenieria, 2001, 16: 53-60.
- 14 PATONDE A M. Simulation and performance evaluation of parabolic trough solar power plants[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2006.
- 15 FORRISTALL R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver[R]. NREL, 2003.
- 16 傅炳珊,陈渭民,马丽. 利用 MODTRAN 3 计算我国太阳直接辐射和散射辐射[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 51-58.
FU Bingshan, CHEN Weimin, MA Li. The computations of solardirect and diffuse radiation over China by using MODTRAN 3[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, 24(1): 51-58. (in Chinese)

- LI Shuang, YIN Jianjun, LI Yaoming. Kinematic characteristic analysis of D-knotter and its ancliary [J]. Machine Design and Research, 2011, 27(1): 18 - 21. (in Chinese)
- 6 万其号, 布库, 张志毅, 等. D 型打结器的结构及运动分析[J]. 农机化研究, 2009, 31(4): 17 - 19.
WAN Qihao, BU Ku, ZHANG Zhiyi, et al. The analysis of configuration and movement for twine knotter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 17 - 19. (in Chinese)
- 7 尹建军, 李双, 李耀明. D 型打结器及其辅助机构运动仿真与时序分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 103 - 107.
YIN Jianjun, LI Shuang, LI Yaoming. Kinematic and time series analysis of D-knotter and its ancillary mechanisms [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 103 - 107. (in Chinese)
- 8 杨清亮. 发明是这样诞生的[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 34 - 67.
- 9 TAN R H, MA J H, LIU F, et al. UXDs-driven conceptual design process model for contradiction solving using CAIs[J]. Computers in Industry, 2009, 60(8): 584 - 591.
- 10 TAN R H, MA L H, YANG B J. Systematic method to generate new ideas in fuzzy front end using TRIZ[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(2): 14 - 19.
- 11 檀润华, 杨伯军, 张建辉. 基于 TRIZ 的产品创新模糊前端设想产生模式研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(6): 1990 - 1995.
TAN Runhua, YANG Bojun, ZHANG Jianhui. Study on patterns of idea generation for fuzzy front end using TRIZ [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(6): 1990 - 1995. (in Chinese)
- 12 檀润华, 马建红, 陈子顺, 等. 基于 TRIZ 中需求进化定律的一类原始创新过程研究[J]. 中国工程科学, 2008, 10(11): 52 - 58.
TAN Runhua, MA Jianhong, CHEN Zishun, et al. Study on the process model of an original innovation based on needs evolution laws of TRIZ [J]. Engineering Sciences, 2008, 10(11): 52 - 58. (in Chinese)
- 13 张平, 罗金海, 马赛, 等. TRIZ 理论在能源循环体系上的应用[J]. 科学管理研究, 2016, 34(2): 5 - 8.
ZHANG Ping, LUO Jinhai, MA Sai, et al. Establishment of circulation energy system based on TRIZ theory [J]. Scientific Management Research, 2016, 34(2): 5 - 8. (in Chinese)
- 14 翟改霞, 包德胜, 王志军, 等. 牧草播种机排种装置关键部件设计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 47 - 51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s108&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.008.
ZHAI Gaixia, BAO Desheng, WANG Zhijun, et al. Design for metering device key parts of pneumatic grass seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 47 - 51. (in Chinese)
- 15 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 16 于永泗, 齐民. 机械工程材料[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003.
- 17 邓文英. 金属工艺学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- 18 田启华. 基于公理设计的机械产品设计方法研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
TIAN Qihua. Reseach on approach of mechanical product dseign based on axiomatic design and its application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- 19 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001: 58 - 60.
- 20 宋保维. 系统的可靠性设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000: 60 - 61.

(上接第 326 页)

- 17 GILMAN P. Solar advisor model user guide for version 2.0 [R]. Sandia National Laboratories, 2008.
- 18 张耀明, 王军, 张文进, 等. 太阳能热发电系列文章(1)聚光类太阳能热发电概述[J]. 太阳能, 2006(1): 39 - 41.
- 19 LUPFERT E, GEYER M, SCHIEL W, et al. EURO TROUGH design issues and prototype testing at PSA [C] // Solar energy: the power to choose. Proceedings of Solar Forum, 2001: 387 - 392.
- 20 Paneltec-Corp. Structural facet fabrication-phase II manufacturability study [R]. Lafayette, CO: SNL, 2000.
- 21 BENDT P, RABL A. Optical analysis of point focus parabolic radiation concentrators [J]. Applied Optics, 1981, 20(4): 674 - 683.
- 22 杜胜华, 夏新林, 唐尧. 太阳光不平行度对太阳能聚集性能影响的数值研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(4): 387 - 393.
DU Shenghua, XIA Xinlin, TANG Yao. Numerical investigation on effects of non-parallelism of solar rays on concentrating solar power [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(4): 387 - 393. (in Chinese)
- 23 钱旺, 杨世昆, 刘贵林, 等. 太阳能牧草干燥成套设备干燥工艺参数优化 [J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 110 - 118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180813&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.013.
QIAN Wang, YANG Shikun, LIU Guilin, et al. Optimization of drying process parameters of solar herbage dry equipment [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 110 - 118. (in Chinese)
- 24 RIFFELMANN K J, NEUMANN A, ULMER S. Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region [J]. Solar Energy, 2006, 80(10): 1303 - 1313.