

研究论文

新型水平环路热虹吸管启动性能

朱震¹, 王银峰², 熊国辉², 范红途¹, 朱跃钊²

(¹南京工业大学能源科学与工程学院, 江苏 南京 211816; ²南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 热管作为热超导元件已开始应用于中高温槽式太阳能热利用系统, 但太阳辐射频繁变化的特点使得热管启动性能对热管集热性能影响很大。本文研制一套水平环路热管 (HLTS), 以导热油为工质, 搭建了热管启动性能测试平台, 考察充液量、热通量及环境温度对启动性能影响。结果表明, 工质流动方向为单向流, 充液量对 HLTS 运行的影响较大, 最佳充液量 3.325 kg, 当水平蒸发段工质充满度为 100% 时, 蒸发段传热流型发生改变, 管内形成脉动流; 热通量增大时启动时间减少, 启动温度为 150℃ 不变; 环境温度 < 9℃ 时, 对热管启动有很大影响, 冬季工质凝固, HLTS 启动时间延长, 影响热管集热。

关键词: 太阳能; 热虹吸管; 传热; 启动特性; 充满度

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151316

中图分类号: TK 172.4

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 05—1755—07

Start-up performance of novel horizontal loop thermosyphon

ZHU Zhen¹, WANG Yinfeng², XIONG Guohui², FAN Hongtu¹, ZHU Yuezhao²

(¹College of Energy Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China;

²School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: Thermosyphon has begun to be used in the midium-high temperature trough type solar energy heat utilization system. The characteristics of the solar radiation makes a great influence on the solar collection efficiency in the start-up performance of thermosyphon, and thus solar collecting performance changes. The novel horizontal loop thermosyphon (HLTS) with the dowtherm has been developed. The platform has been set up to test the influence of filling content, heat flux and ambient temperature to the start-up performance of the HLTS. As the result, the direction flow of steam in the evaporator of HLTS is single and the filling content has influenced the operation of heat pipe. The best filling content of injection is 3.325 kg, and the pulsating flow forms in the evaporator when the ratio is 100%. The start-up time changes short when the heat flux increases in the same filling, while the start-up temperature of HLTS does not change and keeps in the temperature of 150℃ when the filling content is 3.325 kg. The best heat flux is 7.619 kW · m⁻² as the NHLT used in the solar collector. Moreover, the low temperature makes the oil frozen in the evaporator at below 9℃ with extending time of the start-up of thermosyphon.

Key words: solar energy; thermosyphon; heat transfer; start-up performance; fullness

2015-08-19 收到初稿, 2016-01-11 收到修改稿。

联系人: 范红途。第一作者: 朱震 (1991—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2014BAJ01B06); 国家自然科学基金项目 (51276086)。

Received date: 2015-08-19.

Corresponding author: Prof. FAN Hongtu, fanht@njtech.edu.cn

Foundation item: supported by the National Science and Technology Foundation of China (2014BAJ01B06) and the National Natural Science Foundation of China (51276086).

引 言

太阳能作为清洁可再生能源, 越来越受到青睐。槽式直接产蒸汽系统 DSG (direct steam generation) 是太阳能中高温利用技术^[1-2]的一种, 目前应用在 DSG 技术上的核心集热元件主要是腔体集热管和直通式集热管^[3], 但是腔体式集热管加工工艺复杂且不易规模化生产; 直通式集热管热损大、集热效率低, 现有 DSG 系统中集热器内部工质存在气液分离过程复杂, 在较强非均匀辐射条件下造成集热器周向传热不均引起炸管等问题^[4-6]。环路热管 LHP^[7] (loop heat pipe) 因其高效传热、均温性优良及成本低等特点^[8-9], 正逐渐应用于太阳能热利用领域^[10-13]。

浙江大学张良等^[14]搭建一种基于 U 形热管式回路集热管的自然循环槽式 DSG 系统并产生了中温蒸汽 (120~200℃, 0.7~0.8 MPa), 其启动时间在 1 h 左右, 热管集热效率为 66.2%~79.2%。倪煜^[15]将槽式聚光器与热管技术结合, 建立 50 kW 的自然循环太阳能蒸汽发生系统, 得到 0.5~0.8 MPa 的饱和蒸汽, 系统效率为 35.04%。陈欢等^[16-17]结合两相流热虹吸管技术建立了自然循环槽式 DSG 系统, 经实验研究, 得到热管充液率增大, 冷凝水入口段蒸汽逆流和上升管流动增强等结论, 但系统运行时内部蒸汽流动方向不清晰, 无法确定内部流动状态, 造成分析困难。此外, Zhao 等^[18]研发了一种适用建筑物的新型环路热管, 通过实验证明高度为 1.7 m 的蒸发热管在 72℃ 下启动, 得出工质以 5.1 L·min⁻¹ 流动速度进入热交换器效果最好。Franco 等^[19]设计并测试了 3 种模式下小尺寸闭式两相热虹吸管的热传递性能, 研究了热沉、运行压力和充液量对传热性能的影响。

热管技术在槽式 DSG 系统中仍面临诸多问题。其中关键问题是频繁变化的太阳能辐射使热管面临频繁启动, 而要充分发挥热管作为核心元件的超导热性能, 良好的启动性能非常重要。其次, 中高温太阳能集热器多使用有机工质热管^[20], 工作温度在 150~400℃ 之间, 具有启动温度高, 环境温度低时工质会凝固等特点, 再者, 针对应用在太阳能集热元件中大尺寸环路热管启动性能的研究较少^[21], 应用到实际工程中仍需要大量研究。

为此, 研发一种新型水平环路热虹吸管 HLTS (horizontal loop thermosyphon)^[22], 以满足太阳能中高温热利用系统, 尤其是槽式 DSG 系统的工程

需要。主要开展不同充液量、热通量及环境温度下该 HLTS 启动性能的研究, 为 HLTS 在太阳能槽式 DSG 系统中的应用提供实验依据。

1 新型水平环路热虹吸管研制

新型水平环路热虹吸管 (HLTS) 由蒸发段、蒸汽上升管、冷凝段、冷凝液下降管及 U 形储液管等组成, 以 400℃ 为工作温度设计, 研究 HLTS 的传热性能, 其尺寸参数见表 1。HLTS 壳体选用 S30408 不锈钢材料, 蒸发段腔体内采用金属丝网作为吸液芯结构, 选取导热姆 (C₁₂H₁₀ 和 C₁₂H₁₀O 的混合物) 为热管工质。

表 1 HLTS 基本设计参数

Table 1 Basic design parameters of HLTS

Parameter	Value
working temperature/℃	400
evaporator inner diameter /mm	68
evaporator length /mm	2000
inner diameter /mm	24
condensation length/mm	1400
ascension pipe height/mm	536
downcomer height/mm	1138
external diameter of liquid line/mm	32
inner diameter of liquid line/mm	24

2 实验部分

2.1 实验装置

对 HLTS 启动性能进行室内实验研究, 实物如图 1 所示, 实验系统由 HLTS、加热系统、冷却系统、温度测量与数据采集系统 4 部分组成。HLTS 实验系统和温度测点热电偶分布如图 2 所示, 其中, 测点 T06 与 T08 测量上升管温度, T13 与 T14 测量冷凝段进出口温度, T07 与 T09 分别测量下降管斜段与垂直段温度, T17 测量 U 形储液段温度, 以 T_e 表示蒸发段管壳的平均温度, T_l 表示炉膛平均温度, F_r 表示 HLTS 的充满度大小。冷却系统中, 布置在汽包内的 HLTS 冷凝段加有翅片, 以增大传热面积, 汽包上布置有进水出汽管法兰、压力传感器和安全阀等部件。加热系统采用四点控温加热管式炉, 加热炉分 4 个模块同步对蒸发段加热, 系统可设定加热功率、加热时间和加热方式以便根据实验需求对蒸发段热通量进行操控。整个系统保温采用硅酸铝和岩棉, 以减少散热损失。实验用仪器仪表见表 2。

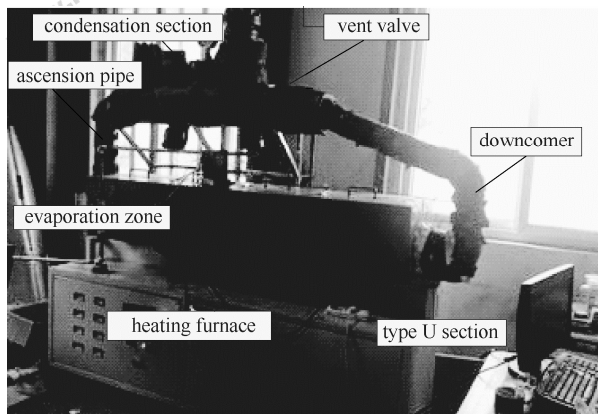


图 1 新型水平环路热虹吸管实物图

Fig.1 Object graph of HLTS

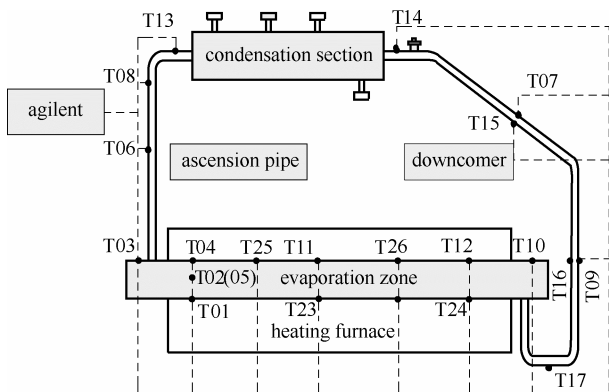


图 2 水平环路热虹吸管测温点布置

Fig.2 Temperature measuring point layout of horizontal loop thermosyphon

表 2 材料规格和仪器仪表

Table 2 Material specifications and instrument

Designation	Type and specification	Accuracy
centrifugal pump	DC-2015	—
turbine flowmeter	HHLCAD	±1%
tube furnace	WN-08-G(90)	—
power meter	LCDG-DG110-50	±1%
electric energy meter	DDS1330-LCO	±0.5%
Agilent VIDXJ	34970A	0.004%
thermocouple	K/2, φ0.5 mm	±0.1 K

2.2 实验过程

对 HLTS 进行充液,采用高温排气法生成热管,并对排气量进行收集,用初始充液量减去排气量即为环路热管充液量。设定加热炉最终加热温度 500℃,通过调节加热炉输出功率模拟太阳能辐射热通量的变化,研究不同热通量条件下热管的启动性能。

在环境温度 15℃时,3 种充液量分别为 2.126、3.325 和 6.192 kg,在不同热通量 2.476、3.619、4.952、7.619、9.523 kW·m⁻² 条件下,测试 HLTS 的启动

性能。

3 实验结果与讨论

3.1 温度对充满度的影响

与直立的热虹吸管不同,本实验 HLTS 的蒸发段为水平布置,工质体积随工作温度升高而增大,造成工质在蒸发段内体积变化,特殊情况下蒸发段的传热流型也将发生改变。不能简单地用充液量研究对 HLTS 传热的影响,为此本文引用充满度来辅助说明,所谓充满度是指实时蒸发段工质占有体积与蒸发段体积的百分比。

图 3 为 3 种不同充液量在不同热通量下对应的充满度曲线。

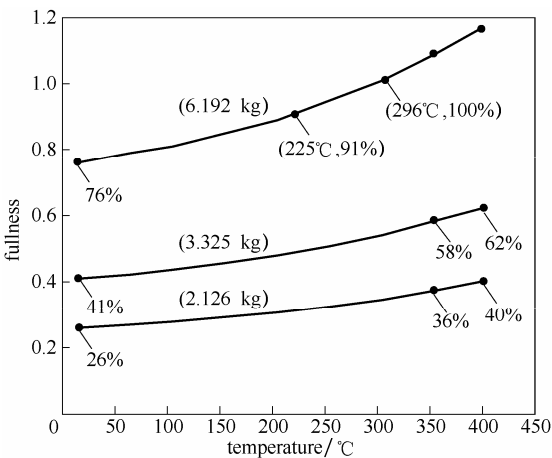


图 3 不同温度下各充满度变化

Fig.3 Changes of fullness at different temperature

在 HLTS 回路中除蒸发段液池及 U 形储液管外,其余部分均可认定为汽相。热管工作温度低于 355℃时,由导热姆的物性参数计算出环路热管内饱和蒸汽质量<130.5 g,饱和蒸汽质量占工质总充液量的 6%,因此实验中可忽略因导热姆汽化对整个蒸发段内液态工质体积变化的影响。当环境温度为 15℃,热管的充液量为 6.192 kg 时,工质在水平蒸发段管内的充满度为 76%,在 296℃时其充满度将达到 100%,此时蒸发段充满液态工质,热管启动性能将受到很大影响,继续升高温度后,工质将溢出蒸发段,延伸至上升管段;充液量 3.325 kg 时,在 15 和 355℃时对应的充满度分别为 41%和 58%;充液量 2.126 kg 时,在 15 和 355℃时对应的充满度分别为 26%和 37%。

3.2 充液量对启动性能的影响

图 4 为环境温度 15℃时,3 种不同充液量在热通量 9.523 kW·m⁻² 下 HLTS 启动性能测点温度曲

线图。HLTS 在初始运行阶段时,蒸发段工质不断吸收热量,上升管的温度测点 T06 与 T08 起初温度保持不变,热管未启动,随着热量的持续输入,工质温度升高,达到一定过热度后工质在蒸发段内发生核态沸腾,由于存在 U 形管段,产生蒸汽进入上

升管,热管瞬间启动。如图 4(a)所示,从上升管测点 T06 和 T08 温度曲线判断,热管蒸发段上加载适当的热通量后,蒸汽流进入上升管,但是由于启动初始时产生的蒸汽经过回路壁面先用于预热管壁,因而 T07 与 T09 温度变化滞后于 T06 与 T08。随着蒸发段不断吸热,蒸汽量增多,蒸发段产生的蒸汽通过下降管到达 U 形段,布置于 U 形储液段的温度测点 T17 也随之变化,此时蒸汽开始充满环路,热管启动向稳定趋势发展,最终实验各充液率下 T06/T08 与 T07/T09 间温差 $<3^{\circ}\text{C}$,热管均温性良好。图 4(c)为充液量 6.192 kg 时,热管的启动性能实验各温度测点图,随着蒸发段温度升高,充满度增大,当上升管温度和蒸发段平均温度分别为 185 和 275 $^{\circ}\text{C}$,充满度 F_r 为 97% 时,HLTS 开始启动。系统运行 20 min 时,蒸发段温度达到 296 $^{\circ}\text{C}$, F_r 为 100%,蒸发段体积被全充满。

3 种不同充液量下,HLTS 的启动时间、启动温度和稳定运行时刻表见表 3。从表中数据可见充液量 2.126 kg 启动时间最长,启动温度最低。充液量 3.325 kg 启动时间与充液量 6.192 kg 启动时间基本一致,其稳定时间与充液量 2.126 kg 实验得到时间较一致。比较 NHLT 的启动性能可知最佳充液量为 3.325 kg。

表 3 3 种不同充液量启动性能的比较

Table 3 Performance of start-up in three different filling ratio

Performance	Value at different filling content		
	2.126 kg	3.325 kg	6.192 kg
start time/min	26	18	17
start temperature/ $^{\circ}\text{C}$	112	146	185
stable time/min	70	71	60
fullness in stable time/%	37	58	100

图 5 为充液量 6.192 kg 时,蒸发段轴向测点温度曲线图和蒸发段周向测点温度曲线图。

由图 5(a)可见,图中起始温度较高是由于热管保温效果较好,前期实验未能完全冷却导致,不影响蒸发段温度特性和启动性能分析。蒸发段整体温度达到 296 $^{\circ}\text{C}$ 时,蒸发段充满度为 100%,蒸发段没有气相空间,气泡长大脱离壁面引起工质剧烈波动并形成间歇式脉动流,此流动强化了 HLTS 的传热,使环路温差减小,有利于换热,但也易造成热管壁热疲劳,图中蒸发段管壁测点 T04、T11、T12、T25、T26 温度曲线呈波浪线,可验证此脉动现象。从图 4(a)、(b)温度曲线可分析其他两组充液量条件下热

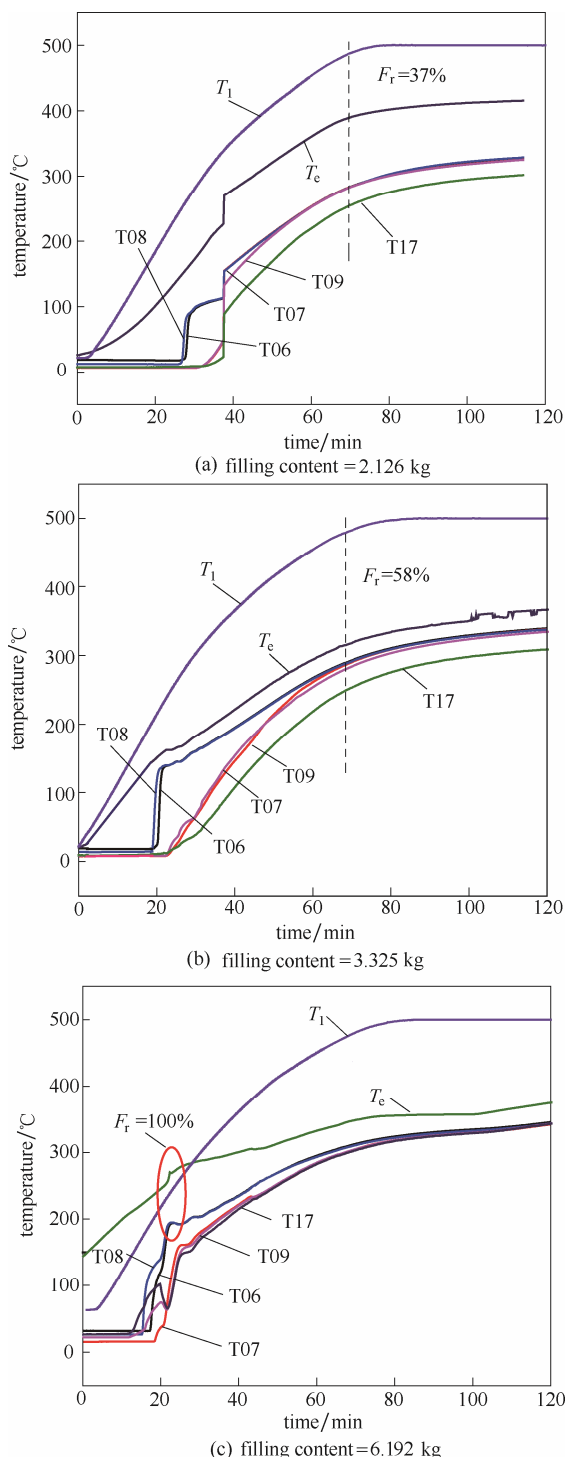


图 4 不同充液量下的启动曲线

Fig.4 Start-up line at different filling contents
(9.523 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 15 $^{\circ}\text{C}$)

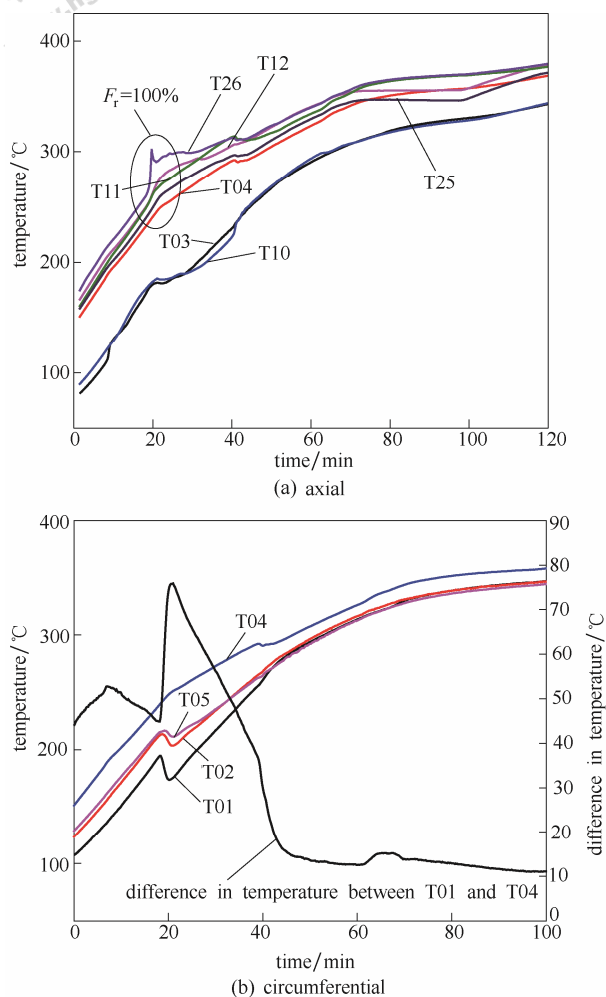


图5 蒸发段温度曲线

Fig.5 Graph of temperature distribution in evaporator (15°C)

管启动特性, HLTS 稳态运行时, 充满度分别为 38% 和 58%, 蒸发段未发生间歇式脉动流动, 同时, 分析蒸发段测点温度曲线图可发现, 蒸发段顶端温度 T26 最高, T04 最低, 从右往左有明显温度梯度, 由于 T03 与 T10 处于蒸发段出口和进口位置, 温度低于蒸发段内各测点温度。因 U 形段存在液封, HLTS 工质只能由蒸发段流入上升管, 经冷凝段、下降管回到蒸发段。

由图 5(b)可见, HLTS 启动时 T04 与 T01 的最大温差达到 75°C, 蒸发段顶端温度 T04 高于底端温度 T01, 这是由于蒸发段管内工质流动单向流, 蒸发段顶端为饱和蒸汽, 蒸汽上行到 T04 处出现过热。HLTS 启动后, 传热逐渐趋向稳定, 热管达到平衡态时, 最高温度达到 358°C, 两者温差为 7°C, 并保持稳定。综上, 蒸发段顶端工质蒸汽存在过热, 顶端温度最高, 而蒸发段周向水平方位温度近似, 可知工质在 HLTS 中沸腾时水平对称。

3.3 热通量对启动性能的影响

HLTS 的启动过程分为 3 个阶段: time-1, 启动酝酿期; time-2, 启动波动期; time-3, 启动稳定期。在启动酝酿期, 管壁与工质之间为对流传热, 液态工质不断吸热升温, 直到饱和温度; 随着热量持续地输入, 工质开始发生核态沸腾, 热管开始启动, 液池内部工质产生的蒸汽较少, HLTS 运行不稳定, 出现温度波动现象, 称为启动波动期; 随着热量持续输入, 工质产生的蒸汽进入环路, HLTS 各部分温度开始稳定, 启动进入稳定期。

图 6 为 2.476、3.619 和 7.619 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 热通量下 HLTS 的启动特性图, 由图可见, 热管启动温度均为 150°C, 表明启动温度与热通量无关。但是热通量越大, 启动时间越短, 3 种热通量对应的启动时间分别为 80、75 和 30 min, 图 6(a)是低热通量下启动温度曲线, 系统运行开始 75 min 后, 蒸汽迅速流动到冷凝段进口处, 随后 HLTS 下降管与 U 形管段温度呈波动性上升, 热损失一定情况下, 输入功率低, 热管启动时间减慢, HLTS 启动后至稳定期时间为 45 min, 热管运行后 240 min 仍然没有达到完全稳定状态。当热通量 7.619 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, HLTS 启动时间为 30 min, HLTS 在 120 min 后就处于稳定运行状态, 稳定运行时间远小于在 2.476 与 3.619 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 工况所需时间。所以本实验选择 7.619 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 为较佳热通量, 作为后期聚光器聚光面积设计参考。

3.4 环境温度对启动性能的影响

本文选作热管工质的导热姆临界凝固温度为 9°C, 低温环境将严重影响热管启动性能, 本次实验探讨两种不同环境温度对热管启动性能的影响。图 7 为环境温度 15 与 6°C, 充液量为 2.126 kg 下, 热通量为 4.952 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 HLTS 的启动温度曲线。环境温度 15°C 时, 由图 7(a)可见当运行 50 min 时, 上升管温度升高, 蒸发段蒸汽继续沿着管线进入冷凝器, 冷凝器出口温度与下降管温度升高, HLTS 往稳定运行方向发展。当环境温度为 6°C 时, 由图 7(b)可见, 因蒸发段导热姆凝结, 严重影响 HLTS 启动, 热管运行时蒸发段不断输入热量使管内工质融化直至产生饱和蒸汽涌入上升管, 上升管温度骤升并在冷凝段停止, 温度保持 140°C 不变, T13 温度发生波动, 由于蒸汽无法在管内形成回路, 蒸汽在冷凝段处受阻持续 65 min, HLTS 无法正常启动, 随后蒸发段热量通过管壁传至 U 形管段, 温度逐渐升高使 U 形段内工质融化, 此时 HLTS 回路通畅,

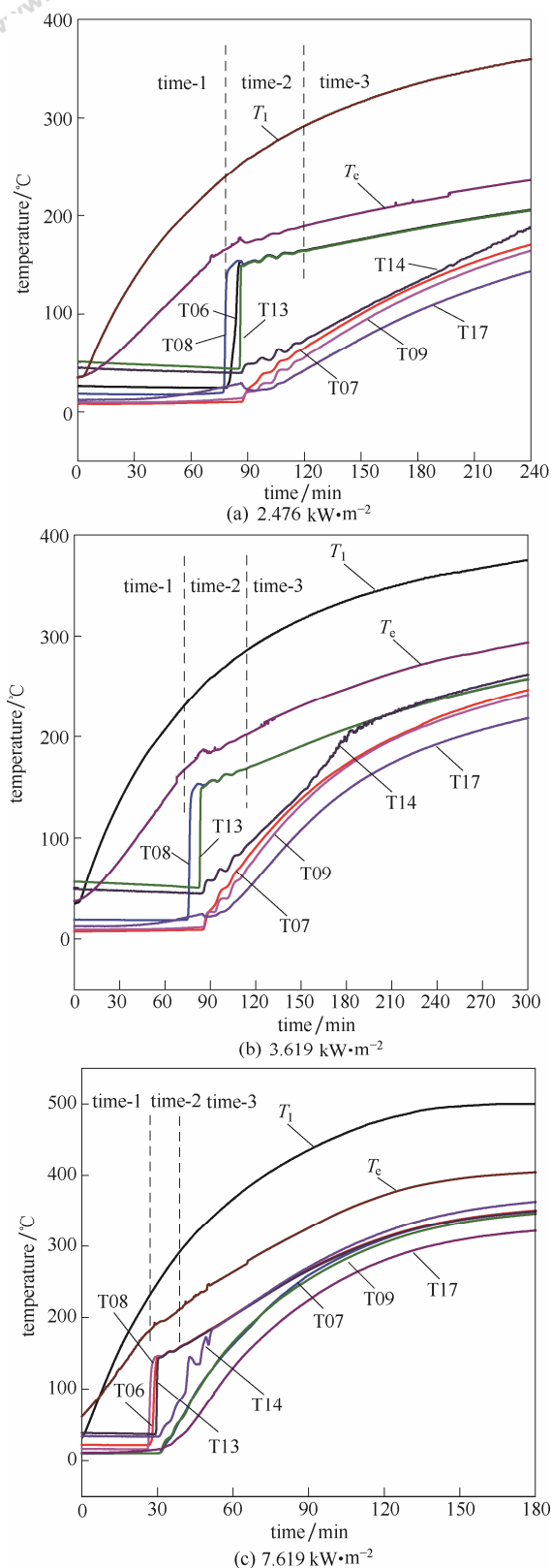


图 6 不同热通量下的启动曲线

Fig.6 Start-up line at different heat loads (3.325 kg, 15°C)

滞留在冷凝段处蒸汽冷凝液流至下降管回到蒸发段,下降管与U形段温度骤然升高,最终达到稳定

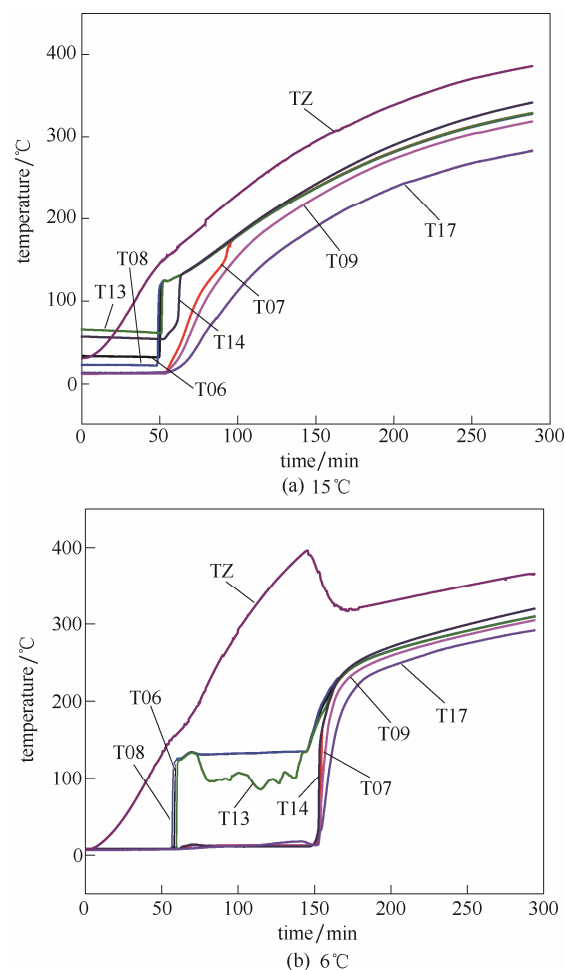


图 7 不同环境温度下热管启动性能曲线

Fig.7 Start-up line at different ambient temperatures

运行状态。实验表明 HLTS 冬季运行模式下,由于外界温度低,导热姆在管内凝结,太阳光在冬季光照时间少,热管启动时间加长,严重影响正常运行,因此在工程设计时,需增设防冻保温措施,减少环路热损。

4 结 论

通过对 HLTS 一系列启动实验与分析,得出以下结论。

(1) HLTS 蒸发段管内充满度随蒸发段温度的升高而增大,当导热姆充满蒸发段腔体,工质传热流型转变为间歇式脉动流。HLTS 运行时,上升管出口处温度最低,其后部分温度逐渐升高,并形成明显梯度,因U形段存液,可判定工质是单向流动,工质流动方向由上升管进入冷凝段,通过下降管回到蒸发段腔内。

(2) 充液量 3.325 kg 为最佳充液量。充液量过多时,温度逐渐升高,腔体内工质全充满,蒸发段

出现脉动流, 整个环路管段温差减小, 易造成金属热疲劳, 影响热管使用寿命。

(3) 充液量一定时, HLTS 在低热通量下启动温度发生波动, 形成较长启动波动期, HLTS 达到稳定运行时间增长; 而 HLTS 在高热通量下启动时间和稳定时间短。因此, 选择合理的热通量是设计太阳能聚光器镜面面积的关键, 为满足后续 DSG 产蒸汽需要, 本文选择 $7.619 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 作为合理模拟太阳能辐射热通量。

(4) HLTS 应尽量在正常环境温度 ($\geq 9^\circ\text{C}$) 下运行。低环境温度易造成工质蒸发段及 U 形管段凝结, 堵塞环路, 严重影响热管正常启动并对设备造成损坏, 实验时必须对 HLTS 进行适当防冻保温措施。

References

- [1] 徐荣吉, 何雅玲, 肖杰, 等. 槽式太阳能电站集热管热性能测试[J]. *太阳能学报*, 2012, (1): 99-104.
XU R J, HE Y L, XIAO J, *et al.* Heat loss testing of parabolic trough solar receiver [J]. *Acta Energy Solaris Sinica*, 2012, (1): 99-104.
- [2] 李扬, 葛仕福, 葛剑, 等. 槽式太阳能直接产生蒸汽系统集热管传热特性研究[J]. *太阳能学报*, 2014, (9): 1653-1657.
LI Y, GE S F, GE J, *et al.* Study on heat transfer in the absorber tube of direct solar steam generation [J]. *Acta Energy Solaris Sinica*, 2014, (9): 1653-1657.
- [3] 张业强, 吴玉庭, 马重芳, 等. 槽式太阳能真空集热管的热损失测量[J]. *化工学报*, 2011, **62**(S1): 185-189.
ZHANG Y Q, WU Y T, MA C F, *et al.* Trough receiver heat loss testing [J]. *CIESC Journal*, 2011, **62**(S1): 185-189.
- [4] ALMANZA R, LENTZ A. Electricity production at low powers by direct steam generation with parabolic troughs [J]. *Solar Energy*, 1998, **64**(1/2/3): 115-120.
- [5] MILLS D. Advances in solar thermal electricity technology [J]. *Solar Energy*, 2004, **76**(1/2/3): 19-31.
- [6] ZARAZA E, VALENZUELA L, LEON J, *et al.* The DISS project: direct steam generation in parabolic trough systems. Operation and maintenance experience and update on project status [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, **124**(2): 126-133.
- [7] 黄素逸, 黄树红. 太阳能热发电原理及技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
HUANG S Y, HUANG S H. *Solar Thermal Power Generation Principle and Technology* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [8] BAI L Z, ZHANG L P, LIN G P, *et al.* Development of cryogenic loop heat pipes: a review and comparative analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **89**(5): 180-191.
- [9] WANG Z Y, YANG W S. A review on loop heat pipe for use in solar water heating [J]. *Energy and Buildings*, 2014, **79**: 143-154.
- [10] NORTON B, PROBERT S D. Natural-circulation solar-energy stimulated systems for heating water [J]. *Applied Energy*, 1982, **11**(3): 167-196.
- [11] YU Z T, HU Y C, HONG R H, *et al.* Investigation and analysis on a cellular heat pipe flat solar heater [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2005, **42**(2): 122-128.
- [12] MATHIOULAKIS E, BELESSIOTIS V. A new heat-pipe type solar domestic hot water system [J]. *Solar Energy*, 2002, **72**(1): 13-20.
- [13] JAISANKAR S, RADHAKRISHNAN T K, SHEEBA K N. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer and the trailing edge of twisted tapes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**(5/6): 1224-1231.
- [14] 张良, 胡亚才, 俞自涛. 自然循环太阳能集热系统: 201110004634.0 [P]. 2011-05-04.
ZHANG L, HU Y C, YU Z T. Natural circulation system solar energy: 201110004634.0 [P]. 2011-05-04.
- [15] 倪煜. 以纳米流体为工质的自然循环太阳能集热系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
NI Y. Investigation of natural circulation solar energy system utilizing nanofluid [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [16] 陈欢. 自然循环太阳能蒸汽发生系统传热特性实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
CHEN H. Experimental investigation of heat transfer characteristics of a natural circulation solar steam generation system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [17] 陈欢, 王红梅, 俞自涛, 等. 自然循环槽式太阳能中高温集热系统实验研究[J]. *浙江大学学报*, 2012, (9): 1666-1670+1707.
CHEN H, WANG H M, YU Z T, *et al.* Experimental investigation of a natural circulation parabolic trough collector system for medium-high temperature steam generation [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2012, (9): 1666-1670+1707.
- [18] ZHAO X D, WANG Z Y, TANG Q. Theoretical investigation of the performance of a novel loop heat pipe solar water heating system for use in Beijing, China [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, **30**(16): 2526-2536.
- [19] FRANCO A, FILIPPESCHI S. Experimental analysis of closed loop two phase thermosyphon (CLTPT) for energy systems [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, **51**: 302-311.
- [20] 李桂云, 屠进. 高温热管工质的选择[J]. *节能技术*, 2001, (1): 42-44.
LI G Y, TU J. Working fluid choicing for high temperature heat pipe [J]. *Energy Conservation Technology*, 2001, (1): 42-44.
- [21] 王鑫煜, 辛公明, 田富中, 等. 小管径重力热管启动特性[J]. *化工学报*, 2012, **63**(S1): 94-98.
WANG X Y, XIN G M, TIAN F Z, *et al.* Start-up behavior of gravity heat pipe with small diameter [J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(S1): 94-98.
- [22] 朱跃钊, 王银峰, 陈海军, 等. 太阳能中高温环路热管蒸汽发生器: 201410535919.0 [P]. 2015-01-14.
ZHU Y Z, WANG Y F, CHEN H J, *et al.* Steam generator of middle-high temperature loop thermosyphon: 201410535919.0 [P]. 2015-01-14.