

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-512-07

平板式蒸发器环路热虹吸管启动特性实验研究

余航宇 钟 巍 彭玉程 郑玲玲

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 为研究平板式环路热虹吸系统的启动特性,搭建了以乙醇为工质的实验平台,系统考察了热流密度、充注率和高差对启动过程的影响。实验在热流密度 3、5、7、10kW/m²,充注率 30%、50%、100%,以及高差 110、180、250cm 条件下进行,通过分析启动过程中各测点温度响应、启动时间及蒸发端平均温度最高值,揭示了不同参数下系统启动行为的变化规律。结果表明:增大热流密度可显著缩短启动时间,但会提高蒸发端温度峰值;增大充注率会延缓系统启动并加剧蒸发端热量积累;高差对启动特性的影响呈非单调变化,在本实验范围内,180cm 高差下综合启动表现较优。研究结果可为平板式环路热虹吸系统的结构设计、参数匹配与运行优化提供实验依据。

【关键词】 环路热虹吸管; 平板式蒸发器; 启动特性; 实验研究

中图分类号 TK172.4 文献标志码 A

Experimental Study on the Start-Up Characteristics of a Loop Thermosyphon with a Flat-Plate Evaporator

Yu Hangyu Zhong Wei Peng Yucheng Zheng Lingling

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 To investigate the start-up characteristics of a flat-plate loop thermosyphon system, an experimental platform using ethanol as the working fluid was established. The effects of heat flux, filling ratio, and height difference on the start-up process were systematically examined. Experiments were conducted at heat flux of 3, 5, 7 and 10kW/m², filling ratios of 30%, 50% and 100%, and height differences of 110, 180 and 250cm. By analyzing the temperature responses at different measuring points during start-up, the start-up time, and the maximum average temperature of the evaporator section, the variation in the start-up behavior of the system under different operating conditions was revealed. The results show that increasing the heat flux can significantly shorten the start-up time, but it also increases the temperature peak at the evaporator section. Increasing the filling ratio delays system start-up and aggravates heat accumulation in the evaporator section. The influence of height difference on the start-up characteristics is non-monotonic, and within the present experimental range, the system exhibits the best overall start-up performance at a height difference of 180cm. The present results provide an experimental basis for the structural design, parameter matching, and operational optimization of flat-plate loop thermosyphon systems.

【Keywords】 Loop thermosyphon; Flat-plate evaporator; Start-up characteristics; Experimental study

0 引言

随着全球能源需求的持续增长与“双碳”战略目标的深入推进,能源的高效、清洁利用已成为科技发

展的核心议题之一。在能源转换与利用的各个环节,无论是高性能计算、动力电池、太阳能集热系统,还是工业余热回收,都面临着日益严峻的热流密度管理

基金项目: 碳化硅纤维制备工艺新路线及相关设备的设计研究 (KYL202410-0052)

作者简介: 余航宇 (2001.02-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: hangyu0212@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 钟 巍 (1991.03-), 男, 博士, 副教授, E-mail: weizhong@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-03-12

挑战。高效的热管理技术不仅是保障设备可靠运行、延长使用寿命的关键,更是提升系统整体能源效率、实现节能降耗的重要途径。在众多热管理方案中,两相传热技术因其卓越的传热效率而备受青睐。其中环路热虹吸管是一种借助内部工质相变过程来传递热量,依靠气液相密度差实现循环的换热装置^[1]。它充分利用了热传导原理与相变介质的快速热传递性质,通过环路热虹吸管将发热物体的热量迅速传递到热源外,其导热能力超过任何已知金属^[2]。环路热虹吸管作为一种基于内部流体循环和相变的换热装置,具有结构简单、导热系数极高、安装灵活、维护要求低等特点^[3],是解决关键散热问题的潜在方案。蒸发端作为环路热虹吸管组成的重要部分,通常直接与热源(如电加热片、电子器件或集热板)紧密接触,是环路热虹吸管吸收热量、发生沸腾相变的核心部位。蒸发端内部结构形式可以多种多样,从最简单的光滑圆管,到带有内螺纹、微翅片或多通道结构的加强型蒸发器,再到与热源贴合良好的平板型蒸发器,其设计需要综合考虑传热性能、流动阻力以及加工工艺等因素。相比其他结构的蒸发器,平板式蒸发器能够更好地适应大面积面热源和空间受限场合,有利于增大受热接触面积、降低接触热阻并改善受热面的温度分布,因此在功率电子器件等场景中具有较好的应用前景。

已有研究表明,充注率、高差(蒸发器与冷凝器之间的高度差)以及热流密度是决定环路热虹吸系统性能的关键因素^[4,5]。其中,高差直接提供工质循环所需的重力驱动力;充注率决定系统中液相和气相的体积分配,从而影响液柱高度、回流条件及两相流型;热流密度则控制相变强度和两相流动结构。多位学者系统考察了高差、充注率和热流密度对启动特性的影响,揭示了液柱静压与流动阻力之间的竞争机制以及驱动力饱和现象:Zhang等^[6]在对CO₂循环热虹吸系统的研究中观察到,增加高度差会导致更高的循环流量和更好的制冷量。但当高度差超过0.5m时,制冷量提升幅度较小。多名学者也得出同样结论,适当增大高度差可提高循环流量与制冷量,但超过一定阈值后性能提升趋于饱和^[7-9];Cao等^[10]研究了不同充液率下环路热虹吸管的启动特性,实验的充液率范围从9%增加到80%,结果表明,在35%充液率下该环路热虹吸管具有最好的传热性能和稳定性。在不同充注率下,

传热性能随高度差增加通常呈现“先增强后稳定”的规律,并伴随系统过冷度和过热度的变化^[11,12]。相关工作还指出,通过合理匹配高度差与充注率,可在减小流动压降的同时保证充分液体回流,使系统运行更接近“理想循环”状态^[13-15]。此外,蒸发器内部流道结构同样会显著影响两相流动与传热行为,例如减小流道高度有助于提升系统运行稳定性,而在一定范围内增大流道高度和热流密度则有利于强化沸腾换热^[16,17]。综上所述,高差、充注率及热流密度等因素对系统启动和稳定运行均具有重要影响。然而,现有研究多针对传统管状蒸发器环路热虹吸管展开,而关于平板式蒸发器启动特性的系统研究仍较为有限。相比传统管状结构,平板式蒸发器内部传热传质及两相流动过程更为复杂。与此同时,环路热虹吸管在循环路径、压力分布和流动阻力等方面有别于经典热虹吸管,导致平板式蒸发器的启动过程具有更强的耦合性。当前,针对热流密度、充注率和高差等关键因素对其启动行为影响的研究仍显不足,从而限制了该类系统的设计优化与工程应用。

基于上述认识,本文设计并搭建了一套平板式环路热虹吸实验系统,以充注率、热流密度和高度差(110cm、180cm和250cm)为主要调控参数,系统研究了平板蒸发端在实际运行条件下的启动特性。通过分析不同工况下系统启动过程中的温度响应、启动时间及运行状态变化,揭示了各关键因素对平板式环路热虹吸启动行为的影响规律,为该系统的结构优化和运行参数选择提供了实验依据。

1 实验设置

1.1 实验设备

实验平台包括五个主要部分,如图1(a)所示,它主要包含一个环路热虹吸管(包括1-蒸发端;2-汽线;3-冷凝端;4-液线),一个加热系统(包括5-金属加热片QYB01;6-电源WPS3010H),一个冷却系统(包括7-亚克力水套;8-恒温水浴KDC-0520AZ;9-转子流量计DFA-15T),一个数据测量系统(包括10-数据采集仪Agilent 34980A;11-电脑及管路上所布置的温度和压力测点)与一个充注与抽真空系统(包括12-工质;13-真空泵LICHEN 2XZ-2B)。测点布置如图1(a)所示,蒸发端设置10个测点,分别

为: 底面 (T-Type: T_{e1} , T_{e2} , T_{e3} , T_{e4}), 侧面 (T-Type: T_{e5} , T_{e6}), 顶面 (T-Type: T_{e7} , T_{e8} , T_{e9} , T_{e10}), 汽线 (K-Type: T_{vl1} - T_{vl9}), 冷凝端 (T-Type: T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} , T_{c4}), 液线 (K-Type: T_{ll1} - T_{ll10}), 冷凝端与蒸发端测点间距不变, 汽液线测点间距随高差改换而更改。

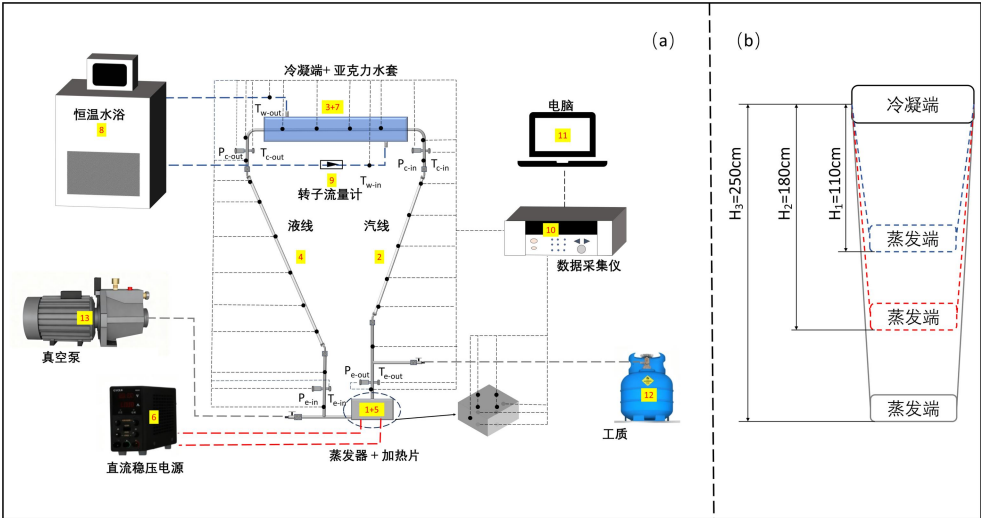


图1 平板式蒸发器环路热虹吸管传热性能测试实验台架示意图 (左) 和不同高差示意图 (右)

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup for heat transfer performance testing of the loop thermosyphon with a flat-plate evaporator (left) and schematic of different height differences (right)

在本研究中, 需要根据实验台对冷凝器和蒸发器之间的高度差进行改换。这种改换是通过更换预先准备好的定长软管 (PN-300) 来实现的。高度差 (H) 为蒸发器底部与冷凝器底部之间的距离。如图1 (b) 所示, 具体尺寸如表1所示。然后, 对组装好的环路热虹吸管系统通入高压气体, 检查其气密性是否合格。具体实验设备实物图如图2所示。本文所采用的蒸发端为矩形平板腔体结构, 内部为空腔, 无吸液芯、微通道等结构, 受热面为蒸发器底面, 蒸汽由蒸发端上部进入汽线, 冷凝液经液线从侧面回流至蒸发端。与传统管状蒸发器相比, 该结构具有受热面积大、适于面热源耦合及便于测量蒸发端壁面温度分布等特点, 更适合研究平板式环路热虹吸系统的启动过程与温度响应特性。

表1 部件参数尺寸

Table 1 Geometrical parameters of the components		
部件	参数	尺寸
蒸发端	腔体边长/cm	10
	腔体高/cm	4
	壁厚/mm	5
	长/cm	50
冷凝端	内径/mm	6
	壁厚/mm	1

续表1 部件参数尺寸

Table 1 Geometrical parameters of the components		
部件	参数	尺寸
汽线	长/cm	136/200/264
	内径/mm	6
	壁厚/mm	1
液线	长/cm	138/210/282
	内径/mm	6
	壁厚/mm	1

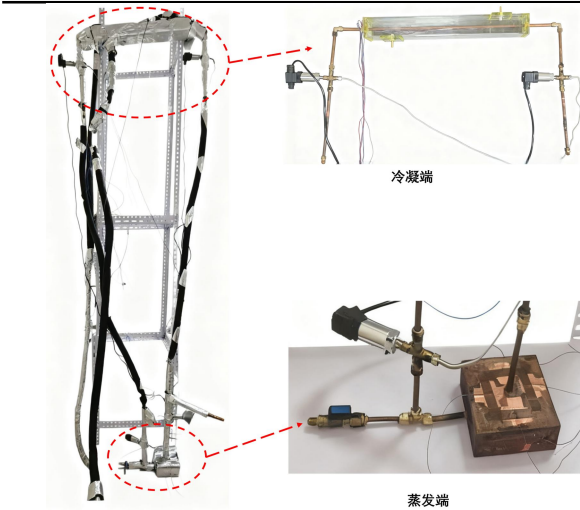


图2 实验设备实物图

Fig.2 Photograph of the experimental apparatus

1.2 实验条件

本研究中的测试参数如表2所示。各参数取值范围综合考虑了装置结构尺寸、系统可启动性、实验安全性以及变量对比的代表性。热流密度范围覆盖了系统由启动较困难到能够较快建立循环的典型输入区间; 充注率取30%、50%和100%, 分别对应较低、中等和较高充液率, 以考察液体充装量对启动特性的影响; 高差取110、180和250cm, 以覆盖本实验台可调范围内的低、中、高三重力驱动水平。上述取值既保证了不同工况具有可比性, 也可较好地反映主要影响因素对启动特性的作用规律。对于每个工况, 首先开启冷水机组, 以保证良好的温度均匀性和冷却水的准确性。冷水浴以20℃的恒定温度和1.5L/min的恒定流速向亚克力水套输送冷却水。然后, 开启计算机和数据采集装置, 并记录数据。之后, 将直流电源调整为建议的热输入。若系统不能稳定运行, 则测试时间大于60min, 以确保启动失败; 若系统能够稳定运行或出现周期性振荡, 则测量时长为40min左右。此外, 为了安全, 当任何测量点温度高于100℃时, 实验停止。

表2 实验测试参数

Table 2 Experimental test parameters

测试参数	范围
热流密度/(kW/m ²)	3,5,7,10
冷却水温度/℃	20
冷却水流量/(L/min)	1.5
充注率/%	30,50,100
工质	乙醇
高差/cm	250,180,110

1.3 数据处理

在本研究中, 充液率定义为蒸发器在室温下充入的工质体积与其体积的比值, 可计算:

$$FR = \frac{V_{fe}}{V} \quad (1)$$

式中: FR 为充液率; V_{fe} 为蒸发器中充入的工质体积; V 为蒸发器的容积。根据直流电源功率, 热输入可由式(2)计算。

$$Q_m = U \cdot I \quad (2)$$

式中: Q_m 为热输入; U 和 I 为直流电源提供的电压和电流。由于实验中蒸发端受热面积保持不变, 为提高不同研究之间的可比性, 本文采用热流

密度 q 表征输入强度, 其定义为:

$$q = \frac{Q_{in}}{A_e} \quad (3)$$

式中: A_e 为蒸发端有效受热面积。

蒸发器与热源直接接触的蒸发器底面平均温度是衡量环路热虹吸管散热性能的直观参数, 实验过程中底面平均温度应始终处于安全温度限值以下。在本实验中, 底面温度测点均匀布置; 因此, 采用底部测量点的平均温度来表征受热面的整体温度。平均温度定义如式(4)。

$$T_{e,ave} = \frac{1}{4} \sum_{i=4}^1 T_{ei} \quad (4)$$

2 结果与分析

本节利用实测数据对平板蒸发器环路热虹吸管在不同工况下的启动状态进行分析, 同时, 分析了不同关键因素对平板式环路热虹吸管启动的影响。

2.1 热流密度对启动特性的影响

如图3所示, 在充注率为50%、高差为180cm的条件下, 系统在不同热流密度下均经历了启动初期热量积累、冷凝端逐步响应以及循环逐渐建立的过程, 但温度响应速度和启动特征随热流密度变化明显。总体来看, 随着热流密度由3kW/m²提高至10kW/m², 蒸发端温度上升速率明显加快, 冷凝端测点的响应时刻逐渐提前, 表明系统内部蒸汽生成和传输过程被显著强化。

从启动时间来看, 3kW/m²、5kW/m²、7kW/m²和10kW/m²条件下, 系统启动时间分别为3435s、1930s、1340s和945s, 呈现出随热流密度增大而显著缩短的趋势。这说明较高的热输入有利于工质更快达到汽化条件, 从而缩短启动初期的热积累过程, 加速环路内汽液循环的建立。从温度峰值来看, 蒸发端平均温度 T_{eave} 的最高值分别为66.37℃、74.81℃、77.89℃和81.00℃, 随热流密度增大而逐步升高, 表明更大的热流密度虽然能够促进快速启动, 但同时也会使蒸发端在启动阶段承受更高的温度水平。

结合图3中温度曲线变化可见, 在低功率条件下, 各测点温升较缓, 冷凝端响应滞后较为明显, 系统达到有效循环所需时间较长; 而在高功率条件下, 蒸发端温度快速上升, 冷凝端较早出现明显响应, 系统启动过程显著提前。因此, 可以认为热流

密度是影响平板式环路热虹吸启动特性的主要因素之一,适当提高热流密度有助于改善系统启动性

能,但也会带来蒸发端温度峰值升高的问题。

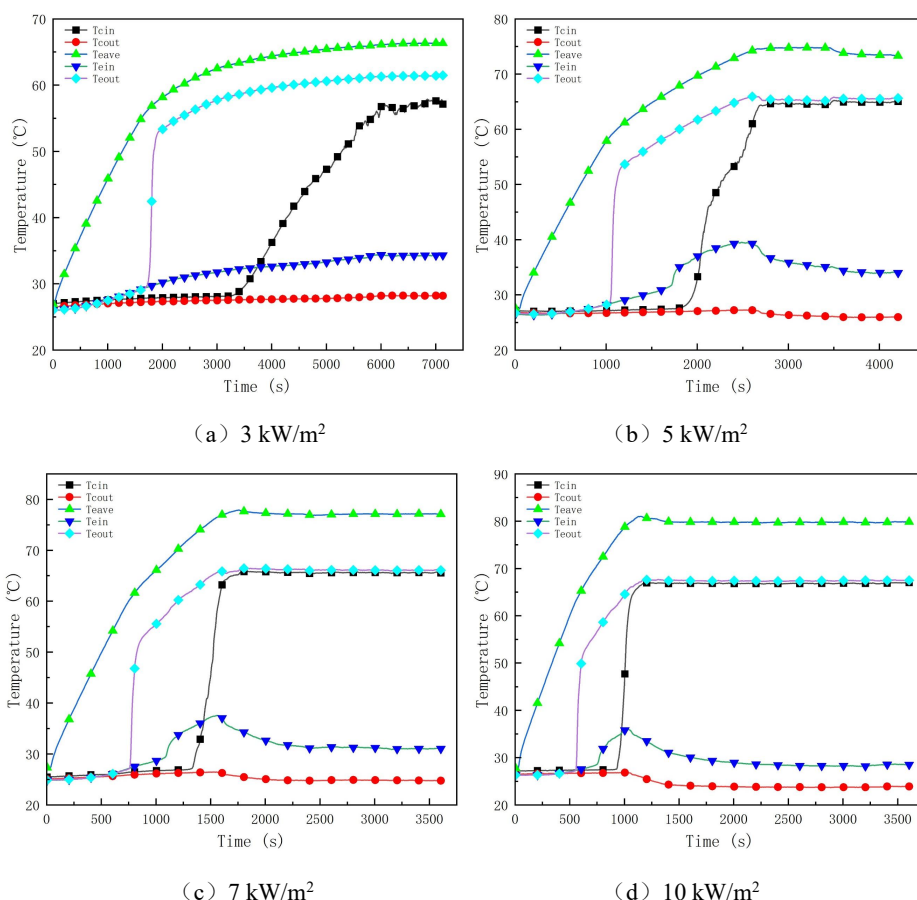


图3 充注率50%、高差180cm条件下不同热流密度下的温度响应曲线

Fig.3 Temperature response curves under different heating powers at a filling ratio of 50% and a height difference of 180cm

2.2 充注率对启动特性的影响

在7kW/m²条件下,不同充注率工况均能顺利完成启动,且启动时间差异较明显,因此选取该工况分析充注率影响。如图4所示,在热流密度为7kW/m²、高差为180cm的条件下,不同充注率下系统的温度响应过程存在明显差异。随着充注率由30%提高至50%并进一步增大到100%,蒸发端与冷凝端测点的温度响应整体向后延迟,表明系统启动过程逐渐变慢。与此同时,蒸发端温度上升幅度逐渐增大,说明高充注率条件下系统在启动初期更容易出现热量积累。

定量来看,30%、50%和100%充注率下的启动时间分别为990s、1340s和2365s,呈明显增加趋势;对应的 T_{eave} 最高温度分别为71.21℃、77.89℃

和92.88℃,也随充注率升高而显著升高。可见,较低充注率下系统能够较快建立循环,启动响应更迅速;而在高充注率条件下,系统内部液体库存增加,蒸发端需要消耗更多热量用于液体升温 and 相变准备,从而导致冷凝端响应滞后、启动时间延长。

从图4中的温度响应过程还可以看出,100%充注率下蒸发端温度上升更快且峰值更高,而冷凝端响应相对滞后,说明在循环尚未充分建立之前,热量主要集中在蒸发端,导致局部温升更加明显。相比之下,30%充注率下各测点响应更快,温度峰值也相对较低,表现出更好的启动特性。因此,在本实验条件下,充注率增大总体上不利于系统启动,适中的低充注率更有利于缩短启动时间并抑制蒸发端温度过高。

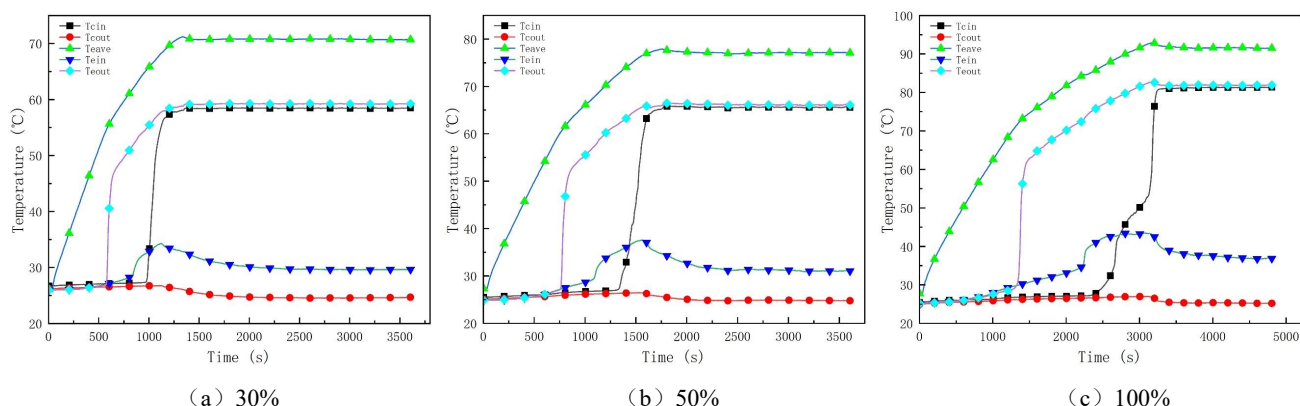
图4 热流密度 7kW/m^2 、高差 180cm 条件下不同充注率下的温度响应曲线

Fig.4 Temperature response curves under different filling ratios at a heating power of 7kW/m^2 and a height difference of 180cm

2.3 蒸发冷凝高差对启动特性的影响

在 5kW/m^2 条件下,不同高差工况均能完成启动且温度响应差异较清晰,因此选取该工况分析高差影响。如图5所示,在充注率为50%、热流密度为 5kW/m^2 的条件下,不同高差下系统均能够完成启动过程,但各测点的温度响应先后和启动时间存在一定差异。总体来看,高差对启动特性的影响弱于热流密度和充注率,其变化规律也并非简单单调,而是表现出一定的最优区间特征。

实验结果表明,当高差分别为 110cm 、 180cm 和 250cm 时,系统启动时间分别为 2455s 、 1930s 和 1970s 。可以看出,随着高差由 110cm 增大到 180cm ,启动时间明显缩短;但当高差进一步增大至 250cm 后,启动时间并未继续缩短,反而较 180cm 略有增加。对应的 T_{ave} 最高温度分别为

80.64°C 、 74.81°C 和 75.05°C ,同样表现为 180cm 条件下最低,而 110cm 条件下最高。该结果说明,在本组工况下,中高差更有利于系统启动和蒸发端温度控制。

从温度曲线变化来看,较小高差下系统循环驱动力相对不足,导致冷凝端响应较慢,蒸发端热量积累较多,启动过程相对滞后;而适当增大高差后,重力回流作用增强,有利于促进汽液循环建立,从而缩短启动时间并降低蒸发端温度峰值。但当高差继续增大时,液柱静压和流动阻力等影响也可能增强,使高差的有利作用受到一定限制,因此其改善效果不再继续增强。由此可见,高差对平板式环路热虹吸启动特性的影响具有明显的耦合性和非单调性,在本实验条件下, 180cm 高差表现出相对较优的启动性能。

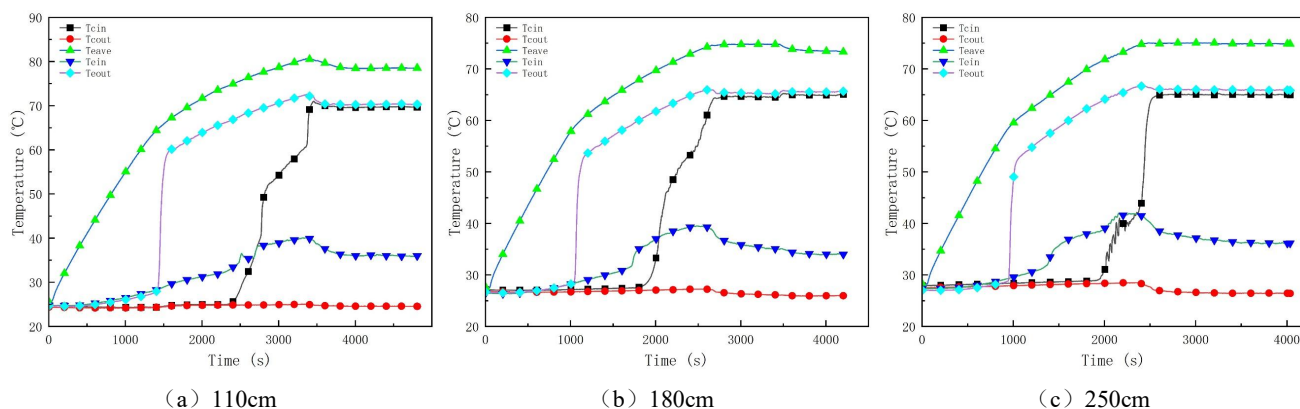
图5 充注率50%、热流密度 5kW/m^2 条件下不同高差下的温度响应曲线

Fig.5 Temperature response curves under different height differences at a filling ratio of 50% and a heating power of 5kW/m^2

3 结论

本文搭建了以乙醇为工质的平板式环路热虹吸实验系统,在热流密度3、5、7、10kW/m²,充注率30%、50%、100%以及高差110、180、250cm条件下,对系统启动过程中的温度响应、启动时间及蒸发端温度变化进行了实验研究。结果表明,平板式环路热虹吸的启动过程受热流密度、充注率和高差共同影响,其中前两者作用更为显著。

(1)在充注率为50%、高差为180cm的条件下,随着热流密度由3kW/m²增大至10kW/m²,系统启动时间由3435s缩短至945s,而蒸发端平均温度最高值由66.37℃升高至81.00℃。这说明提高热流密度能够显著强化蒸发端相变和蒸汽输运过程,促进系统快速启动,但同时会提高启动阶段的温度峰值。

(2)在热流密度为7kW/m²、高差为180cm的条件下,随着充注率由30%提高至100%,系统启动时间由990s增加至2365s,蒸发端平均温度最高值由71.21℃升高至92.88℃。这说明过高充注率会增加系统液体库存和启动初期热惯性,不利于循环的快速建立,并会加剧蒸发端热量积累。

(3)在充注率为50%、热流密度为5kW/m²的条件下,高差对启动特性的影响呈现非单调规律。与110cm和250cm的情况相比,高差为180cm时系统启动时间最短、蒸发端平均温度最高值最低,这表明适中的高差更有利于兼顾循环驱动力和流动阻力,从而获得较优的启动性能。

综上,合理提高热流密度、控制适中的充注率并匹配合适的高差,是改善平板式环路热虹吸启动性能的关键。在本实验范围内,中等高差和较低充注率更有利于系统平稳、快速启动。研究结果可为平板式环路热虹吸系统的结构设计和运行参数优化提供参考。

参考文献:

- [1] Chen F, Liao S, Gong G. Finite time thermodynamic analysis and optimization of water cooled multi-split heat pipe system (MSHPS)[J]. Energy and Built Environment, 2022,3(3):373-383.
- [2] 王君豪,岳源,唐璐,等.歧管式一体化环路热管芯片散热器[J].物联网技术,2024,14(9):3.
- [3] Cao J, Zheng Z, Asim M, et al. A review on independent and integrated/coupled two-phase loop thermosyphons [J]. Applied Energy, 2020,280:115885.
- [4] Louahlia-Gualous H, Le Masson S, Chahed A. An experimental study of evaporation and condensation heat transfer coefficients for looped thermosyphon[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,110:931-940.
- [5] Wu C Y, Wang S B, Pan C. Chaotic oscillations in a low pressure two-phase natural circulation loop under low power and high inlet subcooling conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 1996,162(2):223-232.
- [6] Zhang H, Shao S, Jin T, et al. Numerical investigation of a CO₂ loop thermosyphon in an integrated air conditioning system for free cooling of data centers[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,126:1134-1140.
- [7] Cao H, Ding T, He Z, et al. Research on the refrigerant column height in the downcomer of a two-phase loop thermosyphon[J]. International Journal of Refrigeration, 2018,94:40-48.
- [8] Yang S, Guo X, Xu H, et al. Experimental study on the loop thermosyphon with a flat evaporator under different evaporator chamber thicknesses for IGBT cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025,240:126682.
- [9] Zhang P, Yang X, Rong X, et al. Simulation on the thermal performance of two-phase thermosyphon loop with large height difference[J]. Applied Thermal Engineering, 2019,163:114327.
- [10] Cao J, Chen C, Su Y, et al. Experimental study on the temperature management behaviours of a controllable loop thermosyphon[J]. Energy Conversion and Management, 2019,195:436-446.
- [11] Zhang S, Wang L, Bai Y, et al. Experimental and theoretical analysis of a closed loop two-phase thermosiphon under various states for latent heat storage[J]. Energy Reports, 2020,6:1-7.
- [12] Xu H, Guo X, Yang S, et al. Influence of height difference on thermal performance and flow stability of loop thermosyphon equipped with vertically placed flat evaporator for IGBT module cooling[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025,218:110124.
- [13] Zhang P, Shi W, Li X, et al. A performance evaluation index for two-phase thermosyphon loop used in HVAC systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,131: 825-836.

(下转第540页)