

# C形脉动热管启动和传热特性试验研究

李新泽,洪瑞,杜文静\*

(山东大学核科学与能源动力学院,山东 济南 250061)

**摘要:**以丙酮、无水乙醇、去离子水、甲醇以及丙酮-甲醇混合物为工质,研究不同加热功率(30~270 W)和充液率(30%~80%)下C形脉动热管(pulsating heat pipe, PHP)的传热性能。结果表明:在试验参数范围内,丙酮和甲醇作为工质时,C形PHP表现出优异的流型转变速度和启动性能,热阻随加热功率的增加总体呈下降趋势,但功率增加对热阻的改善存在明显的边际效应。热阻在不同功率区间表现出明显的充液率依赖特性,C形PHP的最佳充液率应根据实际的工作功率进行选择,以实现最优传热效果。在PHP未启动阶段,功率上升过程的热阻略低于下降过程;启动后,功率上升过程的热阻略高于下降过程,当充液率由50%增加到60%后,这一差异得到抑制。

**关键词:**脉动热管;传热;流动;试验验证;传热分析

**中图分类号:**TK172.4 **文献标志码:**A

**引用格式:**李新泽,洪瑞,杜文静. C形脉动热管启动和传热特性试验研究[J]. 山东大学学报(工学版),2026,56(2):166-174.

LI Xinze, HONG Rui, DU Wenjing. Experimental study on start-up and heat transfer characteristics of C-shaped pulsating heat pipe [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):166-174.

## Experimental study on start-up and heat transfer characteristics of C-shaped pulsating heat pipe

LI Xinze, HONG Rui, DU Wenjing\*

(School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

**Abstract:** The heat transfer performance of a C-shaped pulsating heat pipe (PHP) was experimentally investigated using acetone, absolute ethanol, deionized water, methanol, and an acetone-methanol mixture as working fluids. The experiments were conducted under varying heating powers (ranging from 30 W to 270 W) and filling ratios (ranging from 30% to 80%). The results indicated that within the experimental parameter range, the C-shaped PHP exhibited excellent flow pattern transition speed and startup performance when acetone and methanol were used as working fluids. The thermal resistance generally showed a decreasing trend with the increase in heating power; however, the improvement of thermal resistance by power increment exhibited a significant marginal effect. Thermal resistance demonstrated obvious filling ratio-dependent characteristics in different power intervals. Thus, the optimal filling ratio of the C-shaped PHP should be selected based on the actual operating power to achieve the best heat transfer effect. In the pre-startup stage of the PHP, the thermal resistance during the power-up process was slightly lower than that during the power-down process. After startup, the thermal resistance during the power-up process became slightly higher than that during the power-down process. This difference was suppressed when the filling ratio increased from 50% to 60%.

**Keywords:** pulsating heat pipe; heat transfer; flow; experimental validation; heat transfer analysis

## 0 前言

随着芯片内部集成度提升,使得热量快速积聚,过高的温度严重影响运行的稳定性和可靠性,因此实

现高性能芯片快速散热并使其能够在安全温度范围内正常运行是亟需解决的问题<sup>[1-2]</sup>。脉动热管最早由日本学者 Akachi 提出,包括蒸发段、绝热段和冷凝段三部分,内部在表面张力的作用下形成多个气塞和液塞,当对冷凝段和蒸发段分别冷却和加热时,温度不

收稿日期:2024-12-12

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME184)

第一作者简介:李新泽(2000—),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为强化传热与电力系统节能技术。E-mail:lxz2023@mail.sdu.edu.cn

\* 通信作者简介:杜文静(1977—),女,山东荣成人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为强化传热与电力系统节能技术。

E-mail:wjdu@sdu.edu.cn

均引起气液塞间的压差,推动着工质在管内来回振荡以完成热量的传递<sup>[3-5]</sup>。脉动热管(pulsating heat pipe, PHP)作为一种新型高效的散热方式,具有结构紧凑、成本低、导热性优良、无需外加能量等优点,因此在芯片冷却领域有应用优势<sup>[6-7]</sup>。

PHP的传热性能受多种因素的影响,比如充液率(filling rate)<sup>[8]</sup>、工质种类<sup>[9]</sup>、几何结构<sup>[10]</sup>、各段长度比<sup>[11]</sup>和加热功率<sup>[12]</sup>等。文献[13]研究了以水、乙醇和R-123为工质的PHP,在水平和垂直方向上热流密度和充液率对传热性能的影响,试验表明,充液率过低时蒸发段易发生烧干现象,限制PHP的极限传热性能,并且PHP匝数较小时在水平方向上难以启动。文献[14]研究管径为1.77 mm和2.03 mm时PHP的传热性能,传热量随着管径的增大而增大,传热性能得到强化。文献[15]围绕动力电池冷却场景,开展脉动热管性能研究,结果表明,根据应用场合选择适配的工质与布置方式后,脉动热管可保障受控对象安全运行。文献[16]研究弯头数分别为5、11和16时对PHP性能的影响,试验表明,随着弯头数的增加,极限传热量也随之增加,传热性能得到提升。文献[17]调查蒸发段长度从40 mm增加至240 mm、冷凝段长度保持40 mm不变时对PHP温度波动和传热性能的影响,结果表明,随着蒸发段长度的增加,蒸发段工作温度越稳定,振荡启动所需时间越短,传热热阻降低。文献[18]发现均匀加热条件下加热功率从25 W增加到200 W时,PHP随着加热功率的增加,传热热阻显著减小。而在文献[19]研究中发现,随着热负荷的增加,传热热阻呈现先减小后增加的趋势。结论不一致的原因在于二者试验的充液率有所不同。文献[9]研究了以R-123为工质,内径分别为1 mm和2 mm PHP的传热极限,发现1 mm管径可适应

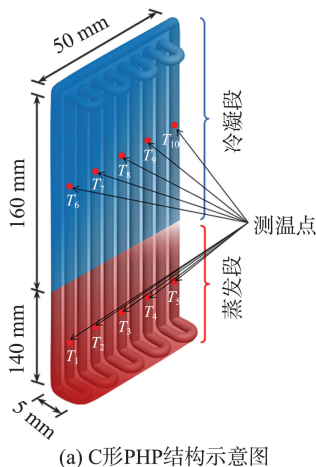
的最高热负荷为1 242 W/cm<sup>2</sup>,而2 mm管径的PHP只能达到430 W/cm<sup>2</sup>。文献[20]研究发现在以纯水作为基液的PHP中添加不同大小的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒,能够明显提升PHP的启动和传热性能,当颗粒尺寸为80 nm时传热特性最佳。文献[21]提出了顶部加热和底部冷却的L形PHP,证实该L形PHP能够将20 W的锂离子电池控制在54.7 °C内。文献[22]研究以去离子水和HFE-7100二元混合流体为工质的PHP传热性能,结果表明,混合工质形成的单向脉动循环,能够显著降低热阻,提高PHP的传热极限。

在上述文献研究的基础上,本研究以丙酮、无水乙醇、去离子水、甲醇以及丙酮-甲醇混合物为工质,研究不同加热功率和充液率下C形PHP的传热性能,充液率分别设为30%、40%、50%、60%、70%和80%,加热功率范围30~270 W;在升降热流条件下探究蒸发段和冷凝段的温度波动特性,分析C形PHP的热阻。

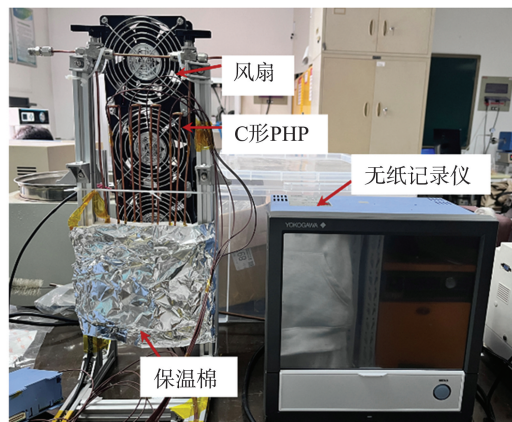
## 1 试验装置介绍

### 1.1 C形PHP结构设计

C形PHP的结构与热电偶测温点布置如图1所示。PHP采用紫铜材质,内外径分别为2 mm和3 mm,通过三通阀构成闭合循环回路,包含5个弯头。蒸发段和冷凝段长度分别为145 mm和165 mm,底部和顶部分别设有5 mm长的弯管。C形PHP沿蒸发段和冷凝段分别布置了5个T型热电偶测温点,其中 $T_{1-5}$ 为PHP蒸发段的测温点, $T_{6-10}$ 为PHP冷凝段的测温点。选取丙酮、无水乙醇、去离子水、甲醇和丙酮-甲醇混合物(体积比1:1)作为PHP工质。



(a) C形PHP结构示意图



(b) C形PHP实物图

图1 C形PHP及其测温点布置

Fig.1 C-shaped PHP and the arrangement of its temperature measurement points

## 1.2 试验系统

试验系统如图2所示,主要由无纸记录仪、交流电源、分子泵和风扇等组成。 $T_{1-5}$ 和 $T_{6-10}$ 分别为十个测温点,其中,蒸发段位于底部,采用缠绕镍铬电阻丝作为热源,并由交流电源(国电亚

光电源有限公司, HYB1760-0.5 KVA) 提供恒定功率, 冷凝方式为强制风冷。温度数据通过无纸记录仪(YOKOGAWA, GX20)采集, 采样间隔为1 s。为降低散热损失, 蒸发段外包裹玻璃纤维保温棉。

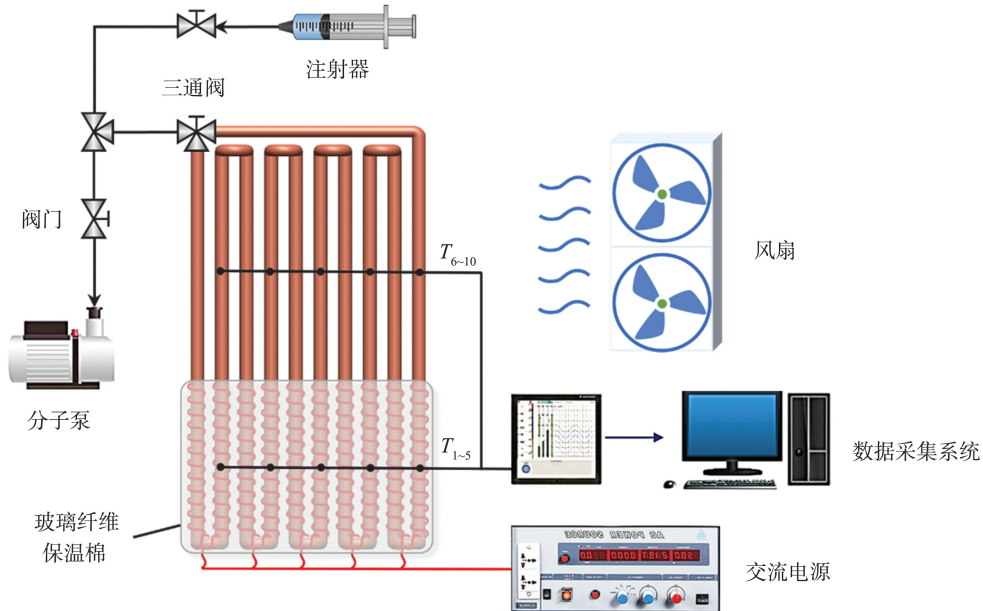


图2 C形 PHP 试验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the C-shaped PHP test system

## 1.3 试验方法

试验开始前,先使用乙醇清洗热管,随后利用分子泵对 PHP 抽真空,当热管内的绝对压力降至 $6.5 \times 10^{-4}$  Pa 时,关闭阀门。接着,使用注射器将一定量的工质充入 PHP 内部,PHP 的充液率被定义为在标准状况下注入 PHP 的工质体积与 PHP 容积之比。设定电源恒功率、开启风扇,试验开始的同时记录各测温点随时间的变化。试验初始加热功率

设定为 30 W,逐步增加功率,进行下一组工况。试验结束后使用乙醇冲洗 PHP,消除管内残余工质对下一组试验的影响。表1汇总了本研究的试验工况,包括 PHP 充注工质、充液率以及蒸发段的加热功率等。功率调节方式分为升热流和升降热流。升热流指在一组试验中,功率从最低逐步提升至最大;而升降热流则是先将功率从最低逐步升至最大后,再降低至最低。

表1 C形 PHP 试验工况  
Table 1 C-shaped PHP experimental conditions

工质	混合比	充液率/%	加热功率/W	功率调节方式
丙酮、无水乙醇、去离子水和甲醇	—	50	30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270	升热流
丙酮-甲醇	1:1	30, 40, 50, 60, 70, 80	30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270	升热流
丙酮-甲醇	1:1	50	2, 8, 14, 26, 42, 68, 86	升降热流
丙酮-甲醇	1:1	50	2, 8, 14, 23, 45, 68, 86	升降热流

注:“—”表示纯工质不涉及混合比。

## 2 数据处理及不确定度分析

充液率定义

$$x_{FR} = \frac{V_x}{V_{PHP}}, \quad (1)$$

式中: $x_{FR}$ 为充液率; $V_x$ 为标准状况下充入 PHP 工质的体积, mL; $V_{PHP}$ 为 PHP 容积, mL。

C形 PHP 的蒸发段平均温度 $T_e$ 和冷凝段平均温度 $T_c$ 分别通过布置在蒸发段和冷凝段的各5个热电偶所测温度的均值计算得到

$$T_e = \frac{\sum_{i=1}^5 T_i}{5}, \quad (2)$$

$$T_c = \frac{\sum_{i=6}^{10} T_i}{5}, \quad (3)$$

式中:  $T_e$  和  $T_c$  分别为蒸发段和冷凝段平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_i$  为第  $i$  个热电偶测温点温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

等效热阻  $R$  是衡量脉动热管传热性能的重要参数, 计算式为

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q}, \quad (4)$$

式中:  $R$  为等效热阻,  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;  $Q$  为蒸发段的输入功率,  $\text{W}$ 。

试验中各个参数的不确定度分析方法参考文献[23-24]。加热采用的交流电源输出电压为 0~300 V, 输出电流 0~4.6 A, 精度等级为 0.5。当加热功率为 30 W 时, 测量电压为 56.6 V, 测量电流为 0.531 A, 因此加热功率的相对不确定度为

$$\frac{\partial Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{I}\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{300 \times 0.5\%}{56.6}\right)^2 + \left(\frac{4.6 \times 0.5\%}{0.531}\right)^2} = 5.08\%, \quad (5)$$

式中:  $Q$  为蒸发段的输入功率,  $\text{W}$ ;  $U$  为电源输出电压,  $\text{V}$ ;  $I$  为电源输出电流,  $\text{A}$ 。

标定后的 T 型热电偶的测量精度是  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , GX20 无纸记录仪的测量精度是  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , 因此温度测量的绝对不确定度是

$$\partial T_e = \partial T_c = \sqrt{0.1^2 + 0.2^2} = 0.22. \quad (6)$$

当加热功率为 30 W 时, 蒸发段与冷凝段最小平均温差是  $(T_e - T_c)_{\min} = 13.96^{\circ}\text{C}$ 。

热阻的最大不确定度为

$$\frac{\partial R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_e}{T_e - T_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_c}{T_e - T_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{Q}\right)^2} =$$

$$\sqrt{2 \left(\frac{0.22}{13.96}\right)^2 + 0.069^2} = 7.28\%, \quad (7)$$

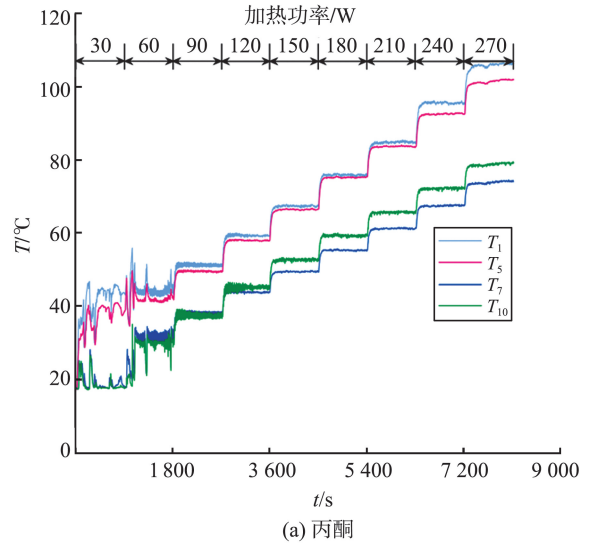
式中:  $R$  为等效热阻,  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

### 3 试验结果与讨论

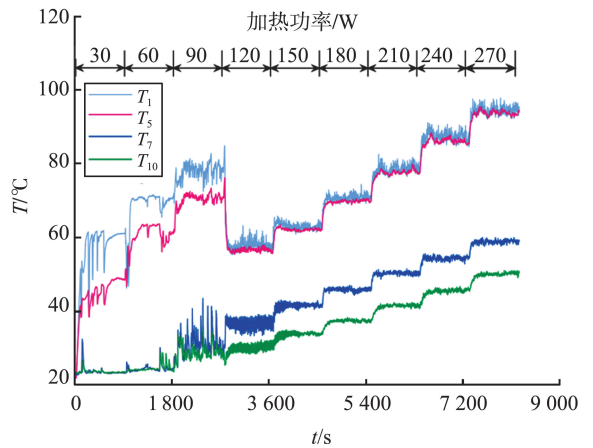
#### 3.1 充注工质影响

本节讨论充注丙酮、无水乙醇、去离子水、甲醇和丙酮-甲醇混合工质的 PHP 的热性能。丙酮与甲醇在沸点、汽化潜热、热导率、黏度、饱和蒸汽压以及化学稳定性等物性上具有显著的互补性, 混合使

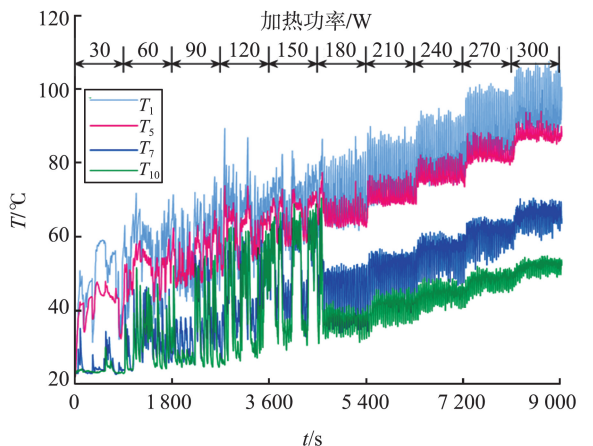
用能够优化热管的启动性能、传热性能和工作温度范围。然而, 若混合工质的配比不当, 可能导致混合物不均匀或发生相分离, 从而降低工质的稳定性。基于对热性能、流动性、热稳定性等多方面的综合考量, 本研究将丙酮-甲醇混合工质的配比固定为 1:1。充注不同工质的 C 形 PHP 蒸发-冷凝段温度波动如图 3 所示。



(a) 丙酮



(b) 无水乙醇



(c) 去离子水

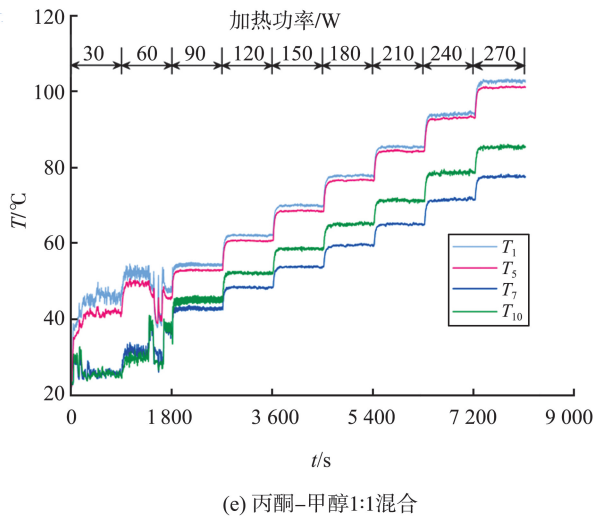
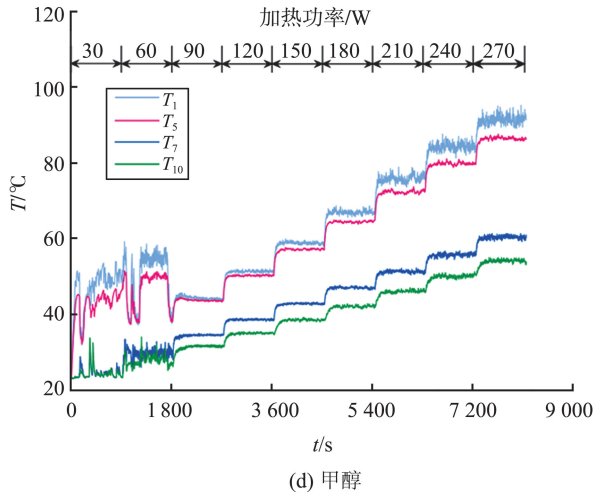


图3 充注不同工质的 PHP 蒸发-冷凝段温度波动 ( $x_{FR} = 50\%$ )

Fig.3 Temperature fluctuations in the evaporator-condenser section of PHP charged with different working fluids ( $x_{FR} = 50\%$ )

以丙酮为工质的 PHP 在 30 W 加热功率下呈现出典型的温度飞升式启动特征:蒸发段温度快速下降的同时,冷凝段温度迅速攀升。当加热功率提升至 60 W 时,PHP 壁温波动趋于平稳,管内工质流动状态发生转变。丙酮和甲醇作为工质的 PHP 表现出更快的流型转变特性,这归功于两种物质较低的沸点和热容。在相同热输入下,这些工质更易发生汽化,从而在蒸发段产生高温高压蒸汽,建立驱动工质在蒸发-冷凝段间循环流动的压差,有效促进了工质的流动。相比之下,以无水乙醇和去离子水为工质的 PHP 需要较高的加热功率阈值才能发生流型转变。值得注意的是,混合工质 PHP 在整个功率区间内均表现出较小的温度波动,这表明管内气液塞的脉动循环

过程更加稳定,这种稳定的运行特性对实际热管理应用具有重要的工程意义。随着功率的增加,以无水乙醇和甲醇为工质的 PHP 蒸发温度呈现出“增加-降低-增加”的趋势。其中,“增加”是由于功率上升导致蒸发-冷凝段需要更大的温差才能达到热平衡;“降低”则是因为管内工质完成了流型转变,进入传热效率更高且运行更稳定的循环流动状态;而再次“增加”的原因与第一次“增加”相同。相比之下,以丙酮和去离子水为工质的 PHP 并未出现这种趋势,这表明流型转变对无水乙醇和甲醇的传热性能改善更为显著。

不同工质 PHP 的热阻随加热功率的变化如图 4 所示。对于所有测试工质,PHP 的热阻随加热功率增加而递减,当加热功率增至 120 W,PHP 的热阻基本平稳,但这种改善效果表现出显著的边际效应。这种变化特性可以从热力学角度解释:随着热负荷的提升,蒸发段和冷凝段之间的温差增大,产生的驱动压差更大,促进了管内工质流动,提升了 PHP 的传热性能。

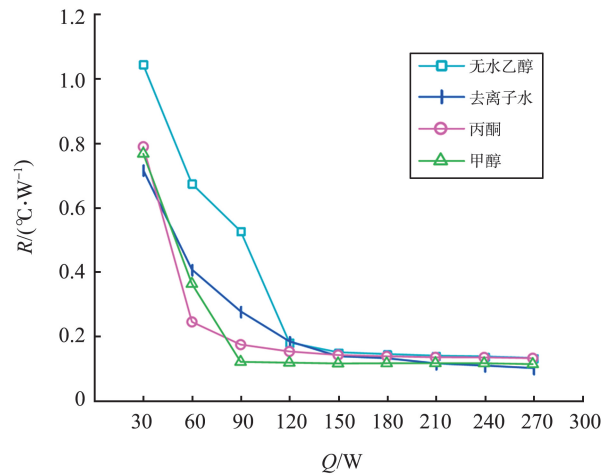


图4 PHP 热阻随加热功率的变化 ( $x_{FR} = 50\%$ )

Fig.4 Variation of PHP thermal resistance with heating power ( $x_{FR} = 50\%$ )

纯工质与混合工质 PHP 热阻随加热功率的变化规律如图 5 所示。混合工质 PHP 在低功率 (30~60 W) 和高功率 (240~270 W) 的功率区间内,热阻低于纯工质 PHP。不同工质 PHP 的平均蒸发温度特征如图 6 所示。由图 6 可知,无水乙醇和甲醇作为工质的 PHP 在流型转变后蒸发温度出现短暂下降,随后缓慢回升;而混合工质 PHP 的蒸发温度略高于丙酮,但在 270 W 时低于丙酮。

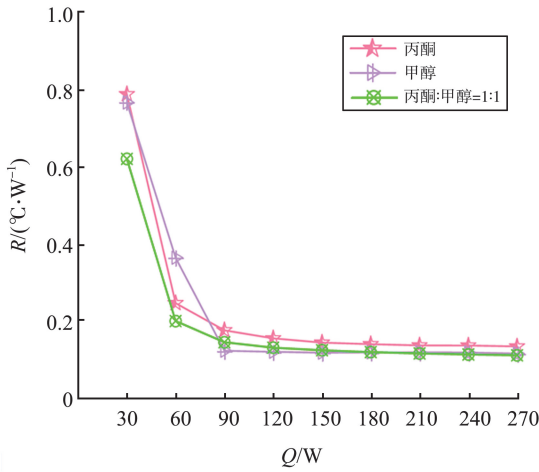


图5 纯工质和混合工质 PHP 热阻随加热功率的变化 ( $x_{FR} = 50\%$ )

Fig.5 Variation of thermal resistance of pure working fluid and hybrid working fluid PHP with heating power ( $x_{FR} = 50\%$ )

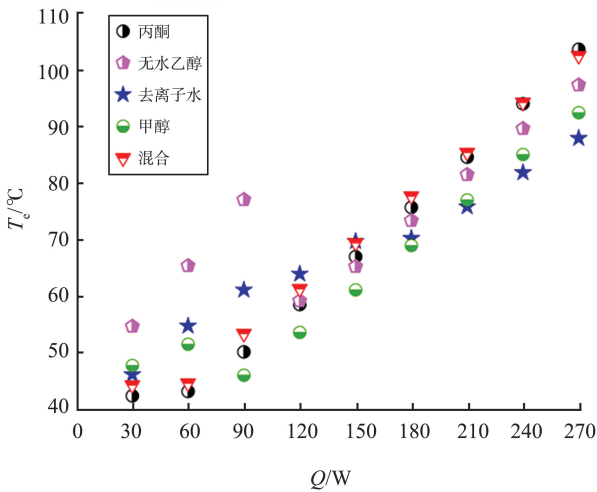
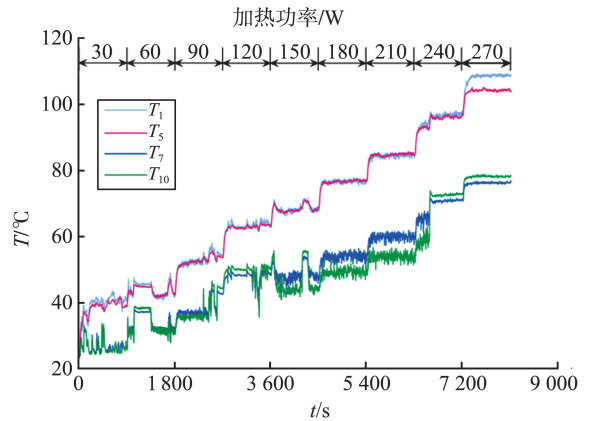


图6 不同工质 PHP 的平均蒸发温度 ( $x_{FR} = 50\%$ )

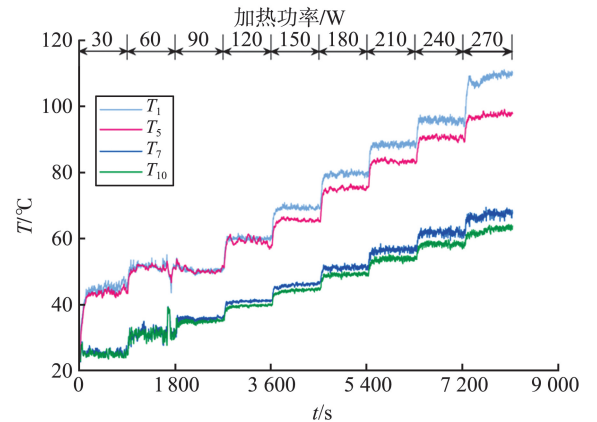
Fig.6 Average evaporation temperature of PHPs with different working fluids ( $x_{FR} = 50\%$ )

### 3.2 充液率的影响

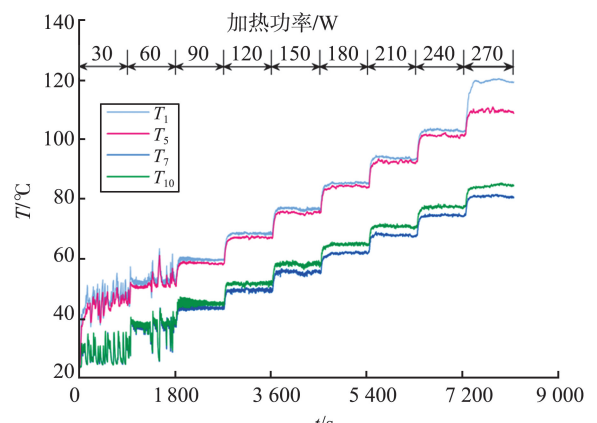
不同充液率下,蒸发-冷凝段温度波动特征如图7所示。研究表明,在管内流型进入循环流(此时蒸发与冷凝温度趋于平缓)前,随着充液率的提高,PHP的蒸发温度与冷凝温度波动会显著加剧。这种现象可归因于两个关键因素:首先,较高充液率导致液塞数量增多,需要更大的压差驱动液塞运动,从而提高了工质振荡所需的热量阈值;其次,增加充液率增大了管内工质质量,在相同温度条件下产生更高压力。由于饱和温度与压力呈正相关,蒸发段液塞需要被加热至更高温度才能汽化,这些高温液塞脉动至冷凝段后,导致蒸发段温度骤降,从而引发显著的温度波动。



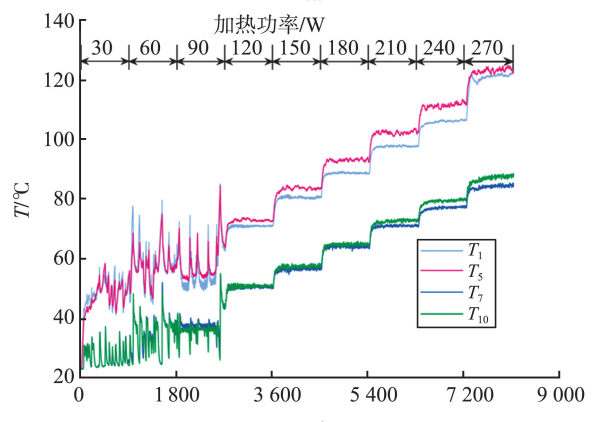
(a)  $x_{FR} = 30\%$



(b)  $x_{FR} = 40\%$



(c)  $x_{FR} = 60\%$



(d)  $x_{FR} = 70\%$

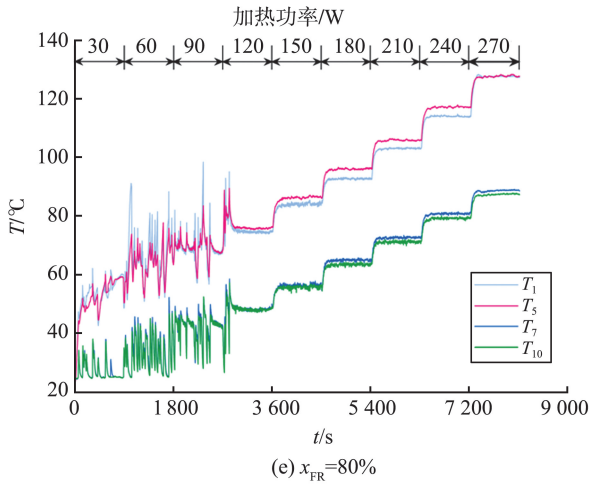
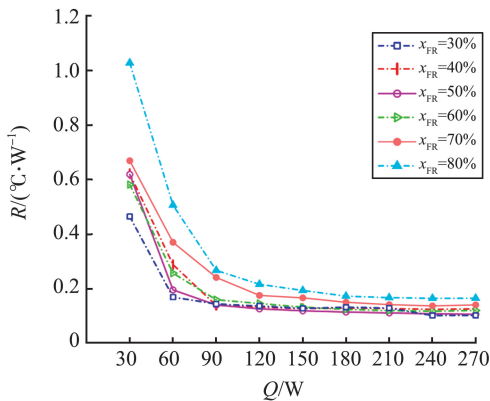


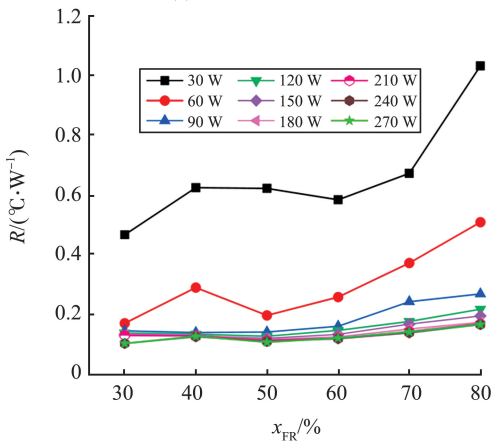
图7 不同充液率下蒸发-冷凝段温度波动  
(丙酮-甲醇混合工质)

Fig.7 Temperature fluctuations in the evaporation-condensation section under different filling ratios (acetone-methanol mixed working fluid)

丙酮-甲醇混合工质 PHP 在不同充液率下热阻随加热功率的变化如图 8 所示。



(a) 热阻随加热功率的变化



(b) 热阻随充液率的变化

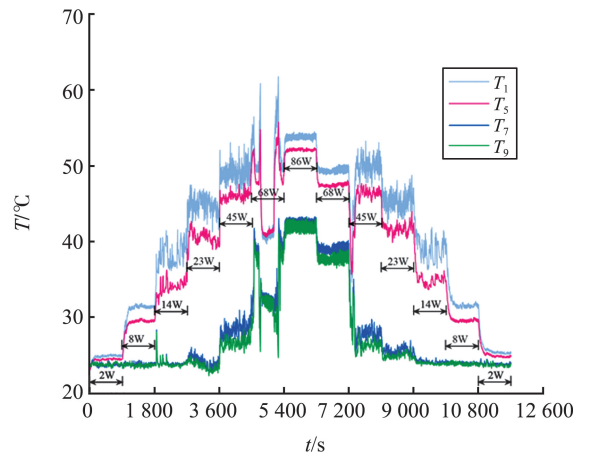
图8 不同充液率下丙酮-甲醇混合工质的 PHP 热阻变化  
Fig.8 The variation of thermal resistance of acetone-methanol mixture working fluid in PHP under different filling ratios

由图 8(a)可知,热阻随加热功率增加呈下降趋势,反映了 PHP 传热性能的持续提升。在 30% 充液

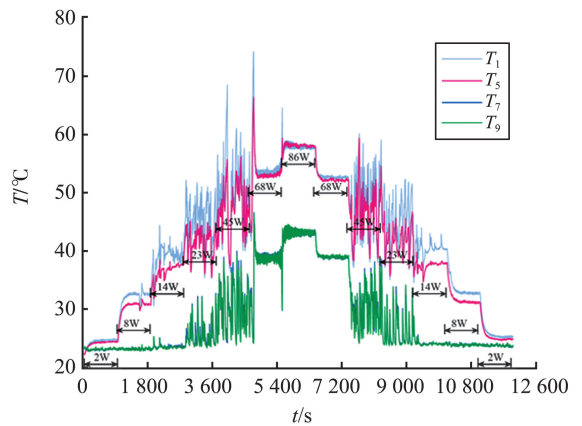
率下,热阻变化呈现三阶段特征:30~60 W 时显著下降,60~240 W 时保持稳定,240 W 后再次下降并最终趋于稳定,最低值达 0.102 °C/W。这一现象归因于 240 W 时管内流型由振荡流转变为循环流,显著提升传热效率。本研究进一步揭示 C 形 PHP 传热性能的充液率依赖特性:在低功率(30~90 W)和高功率(240~270 W)区间,30% 充液率表现出最低热阻和最佳传热性能;在中等功率区间(120~210 W),50% 充液率的热阻最低,80% 充液率的热阻最大。由图 8(b)可知,低功率区间热阻与充液率呈正相关,而高功率区间各充液率热阻趋于较低值,此时充液率对传热性能影响较小。综上所述,C 形 PHP 的最佳充液率与工作功率密切相关,在低功率和高功率区间,30% 充液率传热效果最佳;在中等功率区间,50% 充液率表现出最优传热性能。

### 3.3 升降热流条件下的运行特性

充液率为 50% 和 60% 的 PHP 在升降热流条件下的蒸发-冷凝段温度波动如图 9 所示。



(a)  $x_{FR}=50\%$



(b)  $x_{FR}=60\%$

图9 升降热流条件下蒸发-冷凝段温度波动  
Fig.9 Temperature fluctuations in the evaporation-condensation section under heat flux conditions

$T_1$  和  $T_5$  为蒸发温度,  $T_7$  和  $T_9$  为冷凝温度。由

图9可知,在50%充液率下,当加热功率处于2~8 W区间时,蒸发段和冷凝段温度呈现缓慢上升后趋于平稳的特征,表明PHP尚未启动,热量传递主要依赖管壁热传导。当功率达到14 W时,蒸发温度出现显著突变,标志着PHP成功启动,热量传递机制转变为管内气液塞振荡,传热效率显著提升。类似地,60%充液率的PHP在2~8 W功率区间同样处于未启动状态,直至功率达到14 W时系统启动。这些试验现象表明,50%和60%充液率的PHP具有相近的启动性能,其启动功率阈值约为14 W。

升降热流条件下PHP的热阻变化如图10所示。

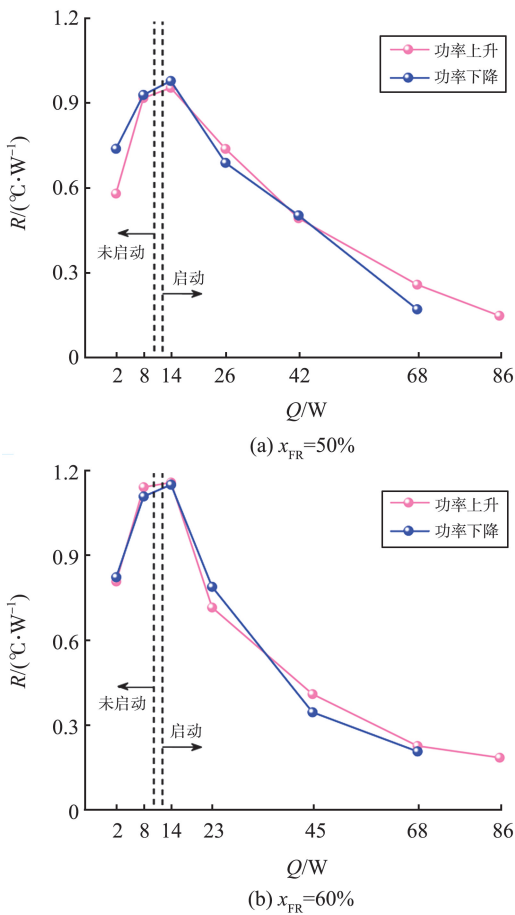


图10 升降热流条件下的热阻变化

Fig.10 The variation of thermal resistance under ascending and descending heat flow conditions

由图10可知,功率对PHP热阻的影响在启动前后呈现出显著差异:启动前,PHP热阻随功率的增加而增加;启动后,热阻随功率增加呈现下降趋势,这归因于气液两相流动强化了传热。随着加热功率持续增大,PHP热阻的下降趋势逐渐趋于平缓。这种现象归功于功率增加对工质流动速度和相变传热强化效果的边际影响逐渐减弱<sup>[25]</sup>。换言之,在较高功率区间,继续提升功率对强化传热的

贡献逐渐降低。此外,充液率为50%时,在未启动阶段,功率上升过程的热阻低于下降过程;启动后,功率上升过程的热阻略高于下降过程。而当充液率增至60%后,这一差异得到抑制。

## 4 结论

(1)就流型转变速度和启动性能而言,丙酮和甲醇作为工质的C形PHP表现出优异性能,而无水乙醇和去离子水则相对较差。丙酮-甲醇混合工质的C形PHP在整个功率区间内均保持较小的温度波动,且在低功率(30~90 W)和高功率(240~270 W)区间表现出最低热阻,展现出最优的传热性能。

(2)在管内流型进入循环流(此时蒸发与冷凝温度趋于平缓)前,随着充液率的提高,PHP的蒸发温度与冷凝温度波动会显著加剧。这主要归因于液塞数量和工质质量的增加。热阻随加热功率增加呈总体下降趋势,但表现出明显的边际效应。此外,热阻具有显著的充液率依赖特性:在低功率(30~60 W)和高功率(240~270 W)区间,30%充液率的热阻最低;而在中等功率(120~210 W)区间,50%充液率的热阻最小。因此,C形PHP的最佳充液率选择应结合实际工作功率进行优化,以实现最佳传热效果。

(3)在PHP未启动阶段,功率上升过程的热阻略低于下降过程;而启动后,功率上升过程的热阻则略高于下降过程,当充液率从50%提升至60%时,这种热阻差异显著减小。

## 参考文献:

- [1] HAO X H, PENG B, XIE G N, et al. Efficient on-chip hotspot removal combined solution of thermoelectric cooler and mini-channel heat sink[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 170-178.
- [2] ZHANG Y, HE H, HUANG B, et al. Enhanced thermal conductivity of polyvinyl alcohol insulation composites with m-BN@CNW hybrid materials[J]. Composites Science and Technology, 2021, 208: 108766.
- [3] AKACHI H. Structure of a heat pipe: USA Patent 4, 921, 041[P]. 1990-05-01.
- [4] AKACHI H. Structure of micro-heat pipe: USA Patent 5, 219, 020[P]. 1993-06-15.
- [5] TANG X, SHA L L, ZHANG H, et al. A review of recent experimental investigations and theoretical analyses

- for pulsating heat pipes[J]. *Frontiers in Energy*, 2013, 7(2): 161-173.
- [6] HAN X H, WANG X H, ZHENG H C, et al. Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 692-709.
- [7] XU Y Y, XUE Y Q, QI H, et al. An updated review on working fluids, operation mechanisms, and applications of pulsating heat pipes [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: 110995.
- [8] SAKULCHANGSATJATAI P, TERDTON P, WONG-RATANAPHISAN T, et al. Operation modeling of closed-end and closed-loop oscillating heat pipes at normal operating condition [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(7): 995-1008.
- [9] YANG H H, KHANDEKAR S, GROLL M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(1): 49-59.
- [10] KWON G H, KIM S J. Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-diameter channel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 89: 817-828.
- [11] XING M B, YU J L, WANG R X. Performance of a vertical closed pulsating heat pipe with hydroxylated MWNTs nanofluid[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 81-88.
- [12] BASTAKOTI D, ZHANG H N, LI D, et al. An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 305-332.
- [13] KHANDEKAR S, DOLLINGER N, GROLL M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(6): 707-719.
- [14] RITTIDECH S, PIPATPAIBOON N, TERDTON P. Heat-transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat-pipe with check valves[J]. *Applied Energy*, 2007, 84(5): 565-577.
- [15] 李新泽, 张双星, 杨洪海, 等. 基于电池冷却用新型脉动热管性能的实验研究[J]. *化工学报*, 2024, 75(6): 2222-2232.
- LI Xinze, ZHANG Shuangxing, YANG Honghai, et al. Experimental study on performance of new type of pulsating heat pipe for battery cooling [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(6): 2222-2232.
- [16] CHAROENSAWAN P, KHANDEKAR S, GROLL M, et al. Closed loop pulsating heat pipes part A: parametric experimental investigations [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(16): 2009-2020.
- [17] ZHAN J R, CHEN X, JI Y Z, et al. Experimental study of ethane pulsating heat pipe with varying evaporator lengths based on pulse tube refrigerator[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 145: 40-49.
- [18] SCHWARZ F, UDDEHAL S R, LODERMEYER A, et al. Interaction of flow pattern and heat transfer in oscillating heat pipes for hot spot applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 196: 117334.
- [19] BETANCUR-ARBOLEDA L A, FLÓREZ MERA J P, MANTELLI M. Experimental study of channel roughness effect in diffusion bonded pulsating heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 166: 114734.
- [20] JI Y L, MA H B, SU F M, et al. Particle size effect on heat transfer performance in an oscillating heat pipe[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(4): 724-727.
- [21] 池日光, 郭子瑞, 公绪金. L形脉动热管启动和传热特性的研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(5): 99-105.
- CHI Riguang, GUO Zirui, GONG Xujin. Start-up and heat transfer characteristics of L-shaped pulsating heat pipe[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(5): 99-105.
- [22] XU R J, ZHANG C, CHEN H, et al. Heat transfer performance of pulsating heat pipe with zeotropic immiscible binary mixtures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137: 31-41.
- [23] 施赛燕, 崔晓钰, 周宇, 等. 石墨烯/去离子水纳米流体振荡热管传热性能[J]. *化工学报*, 2016, 67(12): 4944-4950.
- SHI Saiyan, CUI Xiaoyu, ZHOU Yu, et al. Heat transfer performance of pulsating heat pipe with graphene aqueous nanofluids[J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(12): 4944-4950.
- [24] ZHOU Y, CUI X Y, WENG J H, et al. Experimental investigation of the heat transfer performance of an oscillating heat pipe with graphene nanofluids [J]. *Powder Technology*, 2018, 332: 371-380.
- [25] 崔晓钰, 李治华, 孙慎德, 等. 振荡热管的热阻变化规律及烧干特性 [J]. *化工学报*, 2013, 64(6): 2022-2028.
- CUI Xiaoyu, LI Zhihua, SUN Shende, et al. Thermal resistance variation and dryout phenomenon of pulsating heat pipe [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(6): 2022-2028.