

脉动热管启动过程的实验研究

徐荣吉¹, 王瑞祥^{1,2}, 丛伟¹, 任娜颖¹, 吴业正¹

(1. 西安交通大学制冷及低温工程系, 710049, 西安; 2. 北京建筑工程学院城市建设工程系, 100044, 北京)

摘要: 为了使电子设备在启动过程中具有更好的稳定性, 采用控制恒定热流密度和冷凝温度的方法对平板开槽型脉动热管的启动过程进行了系统的实验研究. 实验发现: 在特定工况下, 启动过程中脉动热管管内工质会突然剧烈沸腾, 此时脉动热管蒸发段温度突然降低, 冷凝段温度突然升高, 广义热阻突然降低. 针对本实验装置, 存在一个使脉动热管启动迅速而且达到稳定运行状态时广义热阻最小的最佳充灌率(50%)、最佳管体倾斜角度(50°)和最佳加热功率(28.5 W). 热管冷却段冷却水流量对脉动热管启动性能影响较小.

关键词: 脉动热管; 启动过程; 实验研究

中图分类号: TK 124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0530-04

Experimental Study on Start-up Process of Pulsating Heat Pipe

Xu Rongji¹, Wang Ruixiang^{1,2}, Cong Wei¹, Ren Nuoying¹, Wu Yezheng¹

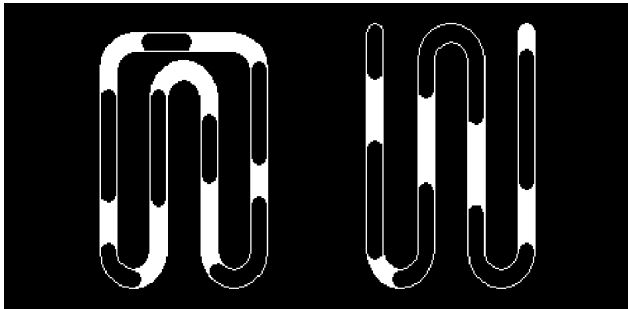
(1. Department of Refrigerating and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Metropolitan Construction Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: An experimental investigation for a looped and parallel-grooved pulsating heat pipe (PHP) was carried out to obtain a more steady start-up process for an electrical apparatus with controlling the input heat flux and condensing temperature. The experimental results show that the working fluid in the pipe abruptly boils in a special condition at the start-up process, and meanwhile the temperature in the evaporating section of PHP falls and the temperature in the condensing section increases. The broad sense thermal resistance of PHP suddenly falls down at the same time. Moreover, the PHP quickly attains steady working state with an optimum charge rate of 50 per cent of volume quantity, an optimum inclination angle of 50 degrees and an optimum heating capacity of 28.5 W. In addition, the effect of the cooling water flux on the performance of the PHP's start-up process is weak.

Keywords: pulsating heat pipe; start-up process; experimental study

脉动热管是20世纪90年代提出的新型热管^[1], 是极具潜力的电子器件冷却器. 与传统热管相比, 其最大的特点是结构简单(无芯, 形状可以任意弯曲), 当量传热系数大, 体积小. 脉动热管有回路型和非回路型2种类型(见图1). 国内外学者主要研究了管内工质流型的变化^[2]、管径^[3-7]、工质种类^[4]、充注率^[4-7]、加热方式^[5]、倾斜角度^[4,6-7]及管弯曲的数目^[2,4]等对脉动热管传热性能的影响, 并建立了

一些数学模型. 脉动热管从启动到稳定运行分为启动阶段和稳定运行阶段. 从开始加热到稳定运行的过程为脉动热管的启动阶段. 启动阶段是一个动态的传热传质过程, 也是一个不稳定的过程, 对此过程的实验研究以及机理认识对电子设备启动过程的稳定性有重要意义, 但迄今未见对启动过程系统研究的报道. 本文对平板开槽回路型脉动热管启动过程的各个影响因素进行了系统的实验研究.



(a)回路型 (b)非回路型

图1 脉动热管的2种基本形式

1 脉动热管实验系统

一根毛细管的内径满足式(1)是成为脉动热管的必须条件

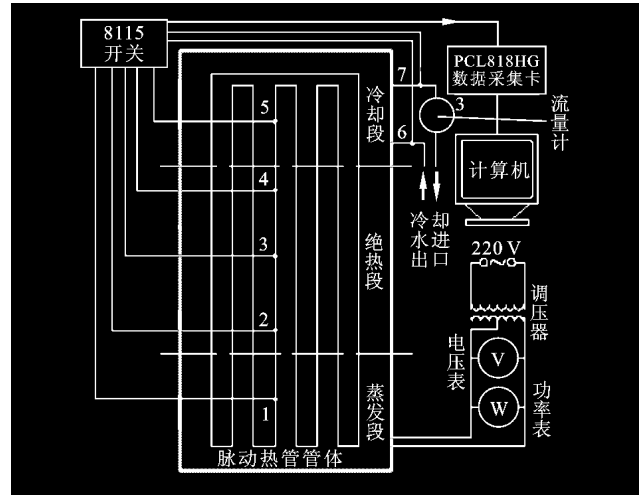
$$D \leq 1.8 \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: D 为脉动热管的内径(m); σ 为管内工质的表面张力($N \cdot m^{-1}$); ρ_l, ρ_v 分别为工质液态、气态时的密度($kg \cdot m^{-3}$).将毛细管抽真空,然后充注部分工作介质(如水、氟利昂、乙醇、FC-72等),在管内就会形成间歇的气塞和液塞,如图1所示.根据需要将毛细管弯成蛇形结构,就成为一根脉动热管.

脉动热管实验系统包括平板开槽型脉动热管、温度采集部分和工况设定部分.脉动热管是具有细小流通面积的蛇形管,它分成蒸发段、绝热段和冷却段3部分.蛇形通道中的工质通过蒸发、冷凝和脉动将热量从加热段带到冷却段,这样就构成了一个平板开槽型脉动热管.沿脉动热管通道轴线方向分布5个T型(精度 $0.1^\circ C$)热电偶,如图2所示,用于测量脉动热管运行时的温度分布.热电偶输出的信号通过8115开关单元、PCL818HG高速数据采集卡传到电脑,用自编的Labview程序实现温度监控和采集.在冷却水进出口分别布置一个热电偶,测量冷却水的进出口温度.脉动热管管内流型在不同工况以及不同运行阶段是不同的,流型的变化是其传热性能的主要影响因素,透过过聚碳酸酯玻璃盖板可以随时观察管内工质的流型变化.为了比较不同工况下脉动热管的启动性能,测试了加热功率 Φ 、脉动热管倾斜角度 θ 、冷却水流量 Q 和工质充灌率 C 对脉动热管启动性能的影响.所测试的具体工况如表1所示.

表1 脉动热管启动测试工况

工况	Φ/W	$C/\%$	$\theta/^\circ$	$Q/cm^3 \cdot s^{-1}$
1	20,28.5,40	50	30	6
2	28.5	30,50,70	70	6
3	28.5	50	30,50,70	6
4	28.5	50	30	2,6,12



1~7:热电偶温度测点

图2 脉动热管实验系统示意图

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

脉动热管性能实验研究主要有2种方法^[4]:一种是控制恒定的加热功率和冷凝温度,改变蒸发温度和压力;另一种是控制恒定的蒸发温度和冷凝温度,改变加热功率.作者采用第一种方法对平板开槽回路型脉动热管的启动过程进行研究.在此实验方法下,启动过程蒸发段温度是脉动热管传热性能的主要标志,到达稳定状态时脉动热管的传热热阻是其性能的标志,故定义脉动热管广义热阻 R_{PHP} 为蒸发段和冷却段温差与加热功率之比(见图3)

$$R_{PHP} = (T_e - T_c) / \Phi \quad (2)$$

式中: T_e 和 T_c 分别为蒸发段和冷却段的温度.

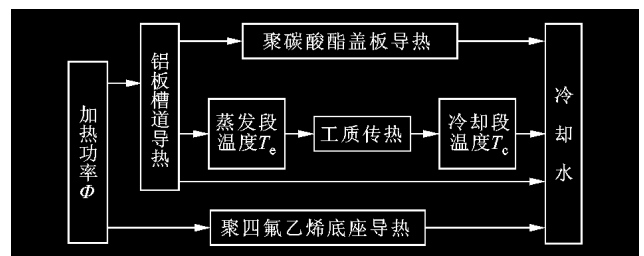


图3 脉动热管的传热示意图

表1所列的4种工况的实验结果如图4所示,实验发现,存在一个使脉动热管启动迅速、达到稳定状态时热阻最低的最佳充灌率(50%)、最佳倾斜角度(50°)和最佳加热功率(28.5 W).

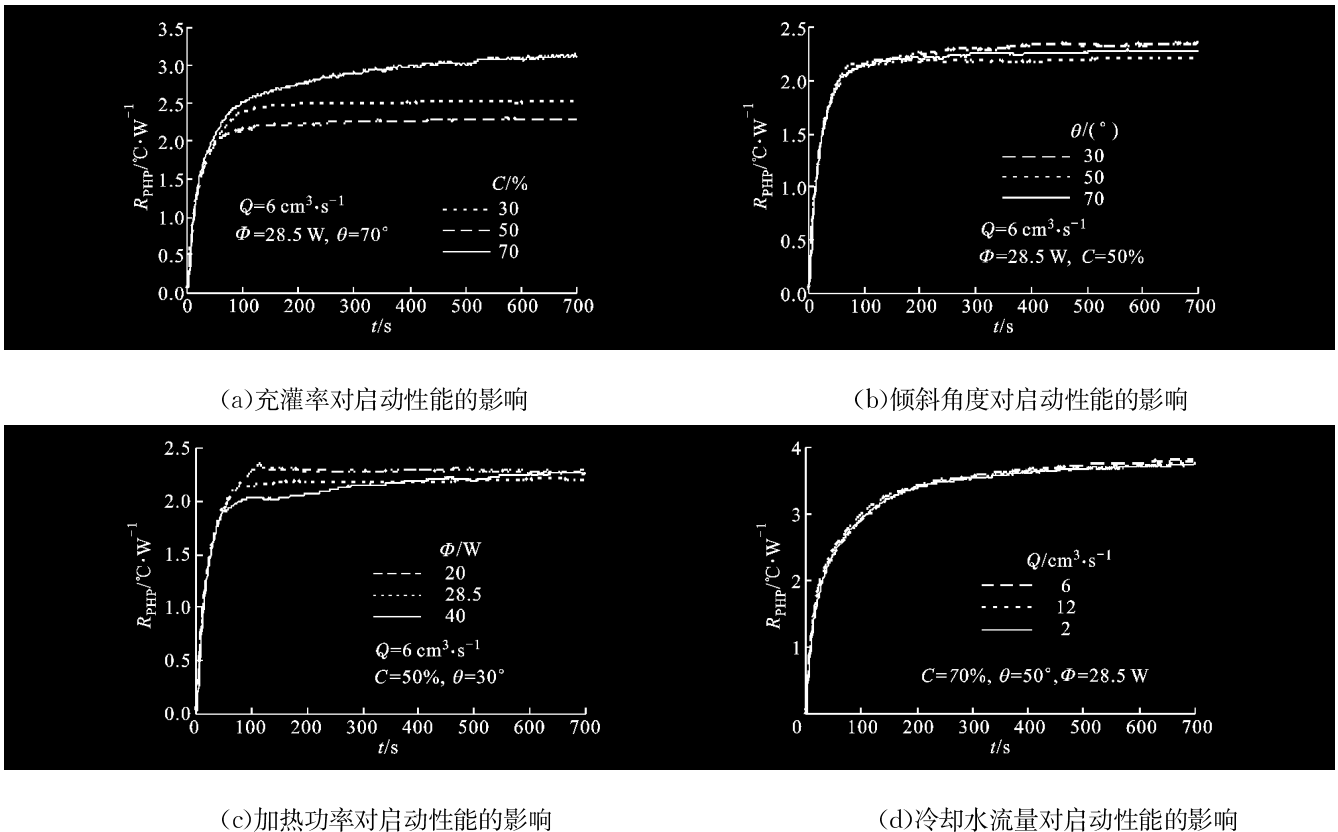


图4 脉动热管启动阶段的传热性能变化

2.2 影响因素分析

脉动热管蒸发段传热过程为:电阻片的发热量通过铝管壁的热传导传递到热管内壁,然后热量传递给工质,工质吸热沸腾并脉动,热量分别以工质内能(显热)、工质温升(潜热)、机械能(动能和位能)形式贮存,并对外做功,还有一部分由于与外界质量交换被带走。根据热力学第一定律,能量方程表示为

$$Q_e = \Delta U_e + \frac{1}{2} m_e v^2 + m_e g \Delta z_e + \Delta m_e \gamma - m_o h_{oe} + m_i h_{ie} + W_e \quad (3)$$

式中: ΔU_e 为蒸发段工质(液态和气态)的内能增量; m_e 为蒸发段工质的质量; v 为工质的平均脉动速度; Δz_e 为工质竖直高度的变化; $\frac{1}{2} m_e v^2 + m_e g \Delta m_e$ 为机械能贮存能量; Δm_e 为相变工质的质量, γ 为工质的汽化潜热,则 $\Delta m_e \gamma$ 为相变工质的汽化潜热; m_i 、 m_o 分别为进出蒸发段的工质质量, h_{ie} 、 h_{oe} 分别为进出蒸发段工质的焓,则 $m_i h_{ie} - m_o h_{oe}$ 为工质质量变化与外界交换的能量; W_e 为与外界交换的功量。在启动阶段,开始没有相变产生,热量主要以工质的内能形式贮存,即 $Q_e = \Delta U_e$,然后产生少量气泡,推动液塞小幅度脉动,随着温度升高,脉动幅度频率增加,直到形成稳定的单向脉动循环。

2.2.1 充灌率对启动性能的影响 由图4a可以看出:当充灌率为50%时,脉动热管启动最迅速,达到稳定状态时广义热阻最小;当充灌率为30%时,启动阶段各个通道单独脉动,随着加热段温度的升高,工质脉动的幅度增加,直到形成单向脉动循环。当充灌率增加到50%时,管内工质增加,在重力、表面张力及脉动力作用下,使蒸发段回液充分,脉动热管稳定运行时广义热阻最小。当充灌率增加到70%时,蒸发段回液充分,但是流动摩擦阻力增大,使脉动频率降低,导致传热能力降低,广义热阻增大,启动过程较慢。

2.2.2 倾斜角度对启动性能的影响 由图4b可以看出:存在一个最佳倾斜角度(50°)使脉动热管启动迅速,且到稳定状态时热阻最小。脉动热管倾斜角度的改变,实际改变了重力在垂直方向的分力,使重力、表面张力、脉动力三者既能保证蒸发段良好的回液不至于烧干,又能保证脉动的幅度与频率,使脉动阻力不是很大。需要说明的是,实验脉动热管是平板开槽型的,有3个壁面传热,与四周传热热管的实验结果可能不一致。在图4b中 $\theta=50^\circ$ 的工况下,广义热阻变化曲线在90s处有一个波峰。通过实验观察,在波峰以前的加热阶段,蒸发段的工质仅有少量的泡态沸腾产生,能量主要以工质的显热形式贮存,

到达波峰时刻工质会突然剧烈沸腾,并很快达到稳定运行阶段.脉动热管管体分布的5个热电偶的温度变化也说明了此突沸过程的存在,如图5所示.突沸产生的原因是:在启动阶段刚开始时,热量主要以工质显热形式贮存,随着继续加热,因形成气泡需要有过热度,故工质先达到过热状态,直到突然剧烈沸腾,形成突沸点.过了突沸点后,温度降低,蒸发段热电偶与绝热段入口热电偶温度突降,而热量由于剧烈沸腾传到冷凝段,使绝热段出口与冷凝段热电偶温度突升.

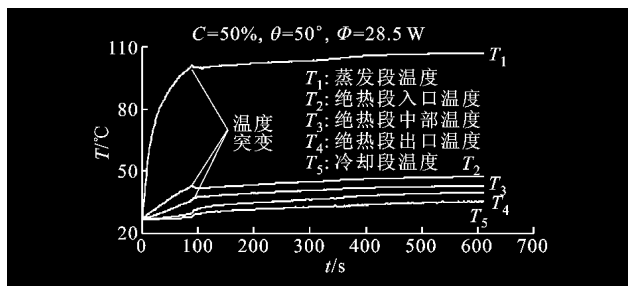


图5 脉动热管的温度分布图

2.2.3 加热功率对启动的影响 由图4c可以看出:加热量为20 W时启动速度较慢,当加热量为40 W时,虽然启动过程比较迅速,但由于启动阶段很难形成单向脉动,不能保证蒸发段良好的回液,容易烧干.随着工质脉动频率的增加,逐渐形成单向脉动循环后,脉动热管运行才能稳定.

2.2.4 冷却水流量对启动的影响 冷却水流量对脉动热管启动性能影响较小,见图4d.在启动阶段,热量主要从加热电阻片传递到管内工质,启动速度与冷却水流量大小没有太大关系.但是,增加冷却水流量,也就增加了热管冷凝段的散热能力,对达到稳定后热管的性能是有影响的.

3 结论

(1)在本实验装置中,存在一个最佳充灌率50%、最佳倾斜角度 50° 以及最佳加热功率28.5 W,使脉动热管启动迅速,而且达到稳定状态后广义热阻最小.

(2)冷却水流量对热管启动过程的性能影响较小,主要影响稳定状态时脉动热管的传热性能.

(3)在启动过程中,广义热阻有一个突降过程,

是由于管内工质突然沸腾引起的脉动热管蒸发段温度突降和冷凝段温度突升所造成的.

参考文献:

- [1] Akachi H, Polasek P, Stulc P. Pulsating heat pipes [C]//Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne, Australia: Pergamon Press Ltd., 1996: 208-217.
- [2] Khandekar S, Groll M. An insight into thermo-hydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43: 13-20.
- [3] Sakulchangsatjatai P, Terdtoon P, Wongratanaphisan T, et al. Operation modeling of closed-end and closed-loop oscillating heat pipes at normal operating condition [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 995-1008.
- [4] Chroensawan P, Khandekar S, Groll M, et al. Closed loop pulsating heat pipes, part A: parametric experimental investigations [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 2009-2020.
- [5] 杨蔚原, 张正芳, 马同泽. 回路型脉动热管的运行与传热 [J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(9): 1398-1401.
Yang Weiyuan, Zhang Zhengfang, Ma Tongze. Running and heat transfer of looped pulsating heat pipe [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(9): 1398-1401.
- [6] 曹小林, 席战利, 周晋, 等. 脉动热管运行可视化及传热与流动特性的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 411-415.
Cao Xiaolin, Xi Zhanli, Zhou Jin, et al. Experiment investigation of the visualization of pulsating heat pipe operation as well as heat transfer and flow characteristics [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(4): 411-415.
- [7] 曹小林, 周晋, 晏刚. 脉动热管的结构改进及其传热特性的研究 [J]. 工程热物理学报, 2004, 35(5): 807-809.
Cao Xiaolin, Zhou Jin, Yan Gang. Improvement on structure of pulsating heat pipe and experiment study on its characteristics of heat transfer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 35(5): 807-809.

(编辑 王焕雪)