

机械泵两相冷却系统过热现象的实验研究^{*}

刘 杰¹, 裴念强², 李廷勋², 郭开华^{1,2}, 何振辉²

(1. 上海交通大学制冷与低温研究所, 上海 200030;

2. 中山大学空间技术中心, 广东 广州 510275)

摘 要: 机械泵驱动两相冷却系统是一种以机械泵为驱动力的封闭式相变传热设备。在对 该系统进行研究过程中发现, 当启动蒸发器热负荷时, 在蒸发段出口将产生明显的过热现象, 并且有较大的压力脉。通过对大量实验对与过热度有关的启动温度、流量和启动热负荷进行比较分析, 得出启动温度越低, 产生的过热度越大的结论: 启动温度越低, 启动需要的过热度相对要大; 其次, 热流密度越大, 过热时间维持的越短; 最后, 从过热状态到两相状态的闪蒸过程将系统的阻力发生较大变化, 流量越大压力脉冲越高。

关键词: 机械泵驱动两相冷却系统; 过热; 两相流; 环路热管

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 06-0025-05

过热现象是指液态循环工质在系统压力不变的条件下从饱和态继续吸热并不发生汽化, 而是变为过热液体。在理想的相变过程中, 如果一种液体与固体互不互溶, 在与它们的相互接触中, 能够完全润湿 (即接触角为零), 这种液体就具备了产生均相成核的条件, 饱和液体继续吸热将立即汽化。而实际上当液体的纯度较高, 且管路内表面较光滑时, 如果没有达到一定的扰动程度, 工质将仍然保持液态, 不出现汽相, 这时液体的温度高于相同压力下相平衡时的饱和温度, 称之为过热液体。过热液体是一种亚稳态, 之所以会产生过热现象是因为液体发生核态沸腾需要有一定的过热度, 液体吸收了足够的热量, 才有产生足够多的气化核心的推动力^[1]。

机械泵驱动两相冷却系统是一种以机械泵为驱动力的封闭式相变传热设备, 是一种新型的主动式热控冷却技术, 是近年来空间散热应用中的研究热点^[2-4]。该系统克服了传统毛细力驱动环路热管系统驱动力的不足, 更适用于未来航天热控中热源紧凑密集型、长距离分布式和高热流密度发热器件的散热任务。在机械泵驱动冷却系统的启动实验过程中发现, 在热负荷加载时, 蒸发器出口处有比较明显的过热现象, 并且机械泵进出口处差压传感器测得的系统压力有较大的波动。该现象在毛细力驱动热管系统中也有过相关描述^[5-8], 而对于机械泵驱

动两相冷却系统则研究较少。本文将对影响过热度的蒸发温度、流量和热负荷等主要运行参数进行研究。

1 实验台的搭建

本文试验台是按照荷兰国际空间技术研究试验室 (NIR) 的设计方案搭建的^[9-10], 用于研究机械泵驱动两相流冷却系统的运行特性。其结构与毛细泵热管相似, 一般由机械泵、蒸发器、冷凝器、储液罐热交换器以及连接管道等几大部分组成, 如图 1 所示。该系统的工作过程是以细小管路作为蒸发器与发热设备进行热连接, 并控制蒸发器的入口处的工质为两相状态, 从而利用工质汽化吸热温度不变的特性来将发热设备的热量带出, 并通过机械泵使液体循环, 然后在冷凝器将热量散出。

试验过程中冷凝器分为 WAK 和 RAM 两块, 放置在 1 m×1 m×1 m 的为小气候箱中, 以模拟在太空中冷凝器的边界温度。而其他主要部件放置于 3 m×2.6 m×2 m 的恒温气候箱内, 并选用聚乙烯高发泡体 PEF 材料进行保温, 各部件的主要参数参考表 1。气候箱的控温精度均为 ±0.5 K。为了模拟发热源, 沿蒸发器回路贴有发热电阻, 发热量为 0~300 W 连续可调。为了对系统的温度和压力进行监控在各个主要部件都布置了测量精度为 ±0.2 °C 的 T 型热电偶和测量精度为 ±0.1 °C 的

* 收稿日期: 2007-04-26

基金项目: 科技部国际科技合作重点资助项目 (2003DF000050); 国家 973 计划前期研究专项资助项目 (2006CB708613); 广东省人民政府科技专项资助项目

作者简介: 刘杰 (1977 年生) 男, 博士生; 通讯联系人: 郭开华; E-mail: guokail@mail.sysu.edu.cn

产生的压力脉动也越大，例如图 3（a）中，在启动热负荷的瞬间，系统阻力从 9.9×10^4 Pa 变为 4.91×10^5 Pa 是正常运行时的 5 倍。其次，过热度越大，对散热对象的温度冲击也越大，从过热到两相变化过程所产生对系统的压力冲击越大。以上的实验结果对于系统的设计具有指导意义。

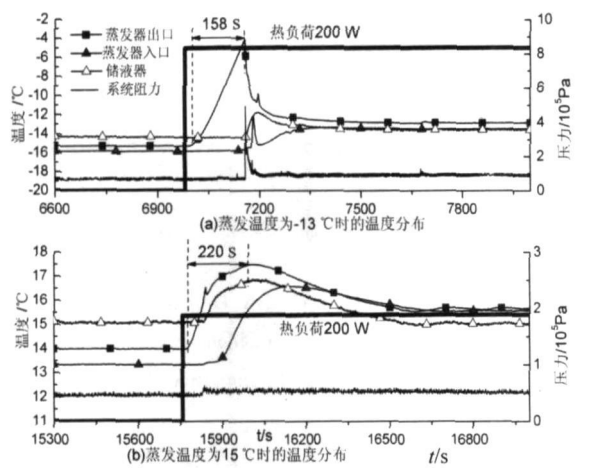


图 3 不同蒸发温度下启动后主要参数比较
Fig. 3 Startup under different set point

表 2 设定温度与过热度关系的实验数据
Tab. 2 Relationship between set point and superheat

蒸发温度 / °C	最高液态温度 / °C	过热度 / °C	过热时间 / s	系统阻力最大值 / $\times 10^5$ Pa
15.1	17.5	2.4	220	0.6
0	8.3	8.3	186	1.3
-13	-4.1	8.9	158	4.9

2.2 热流密度与过热度的关系

在传统热管或环路式热管系统（CPL/LHP）的研究过程中，毛细泵的启动在很大程度上与蒸发段上的热流密度有关，热流密度越大，越有利于毛细结构的工作^[11-12]，这主要是因为该类系统的蒸发器内布有毛细结构，蒸发段即是热量的吸收单元又是工质循环的动力来源。而机械泵驱动的两相冷却系统由于采用了机械泵作为循环的动力，因此蒸发段只是起到吸收热源热量的作用。实验表明，热流密度对其启动的难易程度影响不大，而与过热度维持时间有很大关系。

实验过程中，蒸发段的加热装置的结构和同管路的接触面积是固定的，因此可以通过改变加热量的方法来改变热流密度。实验对设定温度为 0 °C 流量为 2 g/s 的 100、200 和 300 W 的启动热负荷所产生的过热过程作了比较，如图 4、5、6 所示。从中可分析出，随着热流密度的增加，过热度分别为

7 °C，6.5 °C 和 5.7 °C，减小的幅度不大，正如前面所分析的，过热度的大小是由启动时的蒸发温度决定的，三次实验的启动温度相同，因此过热度的大小差别不大。而三者最大的区别是过热时间是明

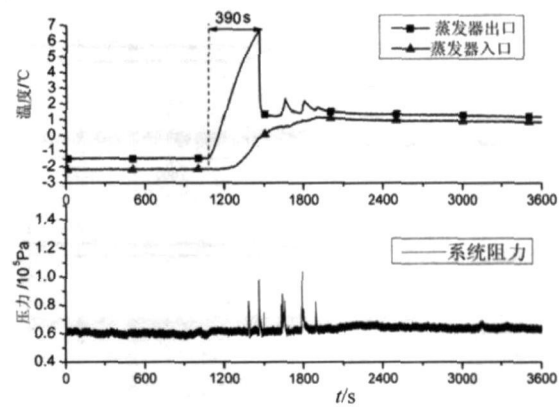


图 4 100 W 热负荷启动（流量 2 g/s）
Fig. 4 Startup under 100 W heat load (2 g/s mass flow)

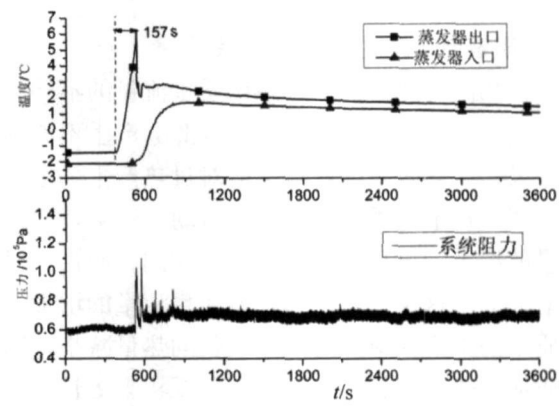


图 5 200 W 热负荷启动（流量 2 g/s）
Fig. 5 Startup under 200 W heat load (2 g/s mass flow)

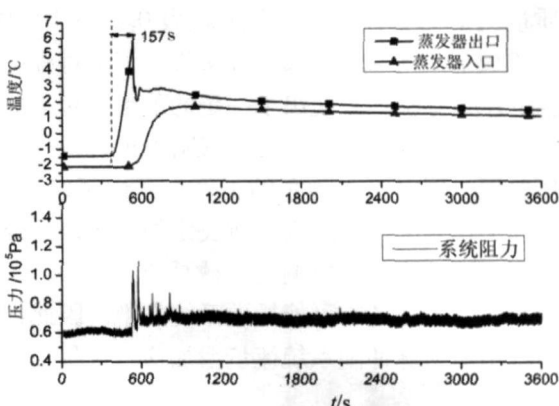


图 6 300 W 热负荷启动（流量 2 g/s）
Fig. 6 Startup under 300 W heat load (2 g/s mass flow)

显缩短的。从热力学的角度分析，热流密度越大，在相同的时间里，过热液体能够吸收更多的能量，

越有利于液态工质内的成核, 当液体内形成的气泡半径超过了成核的临界半径, 工质立即从过热状态转变成两相状态。

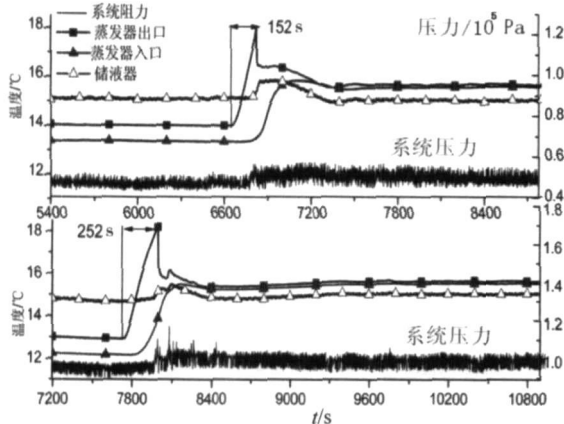


图 7 不同质量流量下启动的主要参数比较 (100 W)

Fig 7 Startup under different mass flow (100 W)

(a) 2 g/s 的启动过程; (b) 3 g/s 的启动过程

2.3 质量流量与过热度的关系

在相同的热负荷下, 系统质量流量的不同影响着工质在蒸发段的流型不同, 因此会产生不同的换热效果, 换热效果的好坏又会对过热产生一定的影响。图 7 在不同质量流量下的启动, 结果表明随着流量的增大, 过热度的大小基本相同, 而过热时间明显变大。这主要是因为随着质量流量的增加, 单位质量的工质在单位时间内吸收的热量减小, 因此工质从过热状态到达两相状态需要积累更长的时间来完成成核变化。同时从图中也可以看出, 质量流量为 3 g/s 在过热液体成核气化的闪蒸过程, 差压传感器测得的系统阻力为 1.17×10^5 Pa 要明显的大于质量流量为 2 g/s 时的系统阻力 0.56×10^5 Pa。对于机械泵驱动两相冷却系统来说, 闪蒸过程中所产生的压力脉动如果超出了一定的范围将对某些部件造成损坏, 特别是用于对系统阻力进行检测的差压传感器。同时, 因为泵的工作点是由系统阻力、流量和工作频率等主要因素所决定的, 所以系统过高的阻力波动将直接影响到机械泵的工作状态, 对于两相系统来说还有可能导致系统失稳。因此, 启动过程中压力脉冲随系统流量增加这一现象是值得注意的。

3 结 论

事实上, 液体发生核态沸腾所需要的过热度同很多因素有关, 如液体的纯度、管道的尺寸、内管壁的清纯度、粗糙程度等, 因此每次启动液体过热

度的值是几乎无法预测的。但是, 根据实验结果可以得出几条规律: 首先系统的启动温度越低, 启动需要的过热度相对要大; 其次, 热流密度越大, 过热时间维持的越短; 最后, 从过热状态到两相状态的闪蒸过程将系统的阻力发生较大变化, 流量越大压力脉冲越高。以上的实验结果为实际工程应用中机械泵驱动环路式两相冷却系统设计和应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 曾丹苓. 工程非平衡热力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1991
- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1998
- [3] THEODORE D SWANSON GAJANANA BRUR C. NASA thermal control technologies for robotic spacecraft [J]. Applied Thermal Engineering 2003 23: 1055—1065
- [4] 向艳超. 环路热管技术 (LHP) 的发展现状 [J]. 工程热物理学报, 2004 25(4): 682—684
- [5] DICKEY J T PETERSON G P. An experimental and analytical investigation of the operational characteristics of a capillary pumped loop [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer 1994 8(3): 602—607
- [6] MAIDANK Y F SOLODOVNIK N N FERSHTATER Y G. Investigation of dynamic and stationary characteristics of a loop heat pipe [J]. IX International Heat Pipe Conference Albuquerque New Mexico 1995
- [7] 张红星, 林贵平, 丁汀, 等. 环路热管启动特性的实验研究 [J]. 中国科学: E 辑, 工程科学 材料科学, 2005 35(1): 17—30
- [8] NORTH M T SARRAF D B ROSENFELD J H et al. High heat flux loop heat pipe [J]. American Institute of Physics Conference Proceedings 1997 387(1): 561—566
- [9] DELIL A A M. Development of a mechanically pumped two-phase CO₂ loop for the AMS2 tracker thermal control system [R]. National Aerospace Laboratory NLR AMS TM Meeting, Boston January 23rd 2002
- [10] VAN ES J, VAN DONK G PAUW A. AMS2 tracker thermal control system. Loop layout specification of loop components [R]. AMSIR-NLR-TN-003 issue 01, 2004
- [11] NORTH M T SARRAF D B ROSENFELD J H et al. High heat flux loop heat pipe [J]. American Institute of Physics Conference Proceedings 1997 387(1): 561—566
- [12] 钱吉裕. 毛细泵回路流动与换热机理研究 [D]. 南京理工大学, 2005

Experimental Study on Superheat Phenomena of Two-Phase Mechanically Pumped Cooling Loop

LU Jie¹, PEI Nian-qiang², LI Ting-xue², GUO Kai-hua², HE Zhen-hui²

- (1. Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
2. Center of Space Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Mechanically pumped cooling loop is a kind of heat release equipment with two-phase work fluid circulating in the closed tube. From the tests results of the system startup, it is found that heat load will cause a superheat state and at the outlet of the evaporator with a pressure shake of the whole loop. In order to investigate the superheat phenomena of MPCL, tests have been carried out with different operation conditions such as set point evaporative temperature, mass flow and heat load. It concluded that the less evaporative temperature is, the higher superheat temperature is. Moreover, superheat will last a shorter time with the heat load increasing. Finally, it is also pointed out that a greater mass flow will cause a larger pressure shake.

Key words: mechanically pumped cooling loop; superheat; two-phase loop heat pipe

(上接第 24 页)

[10] 王则柯. 单纯不动点算法基础[M]. 广州: 中山大学出版社, 1986. 132—203.

[11] TODD M J. The computation of fixed points and applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1976. 64—100.

[12] 范江华, 赵康生. 集值变分不等式问题的例外簇[J]. 数学学报, 2007, 50(1): 1—6.

The Existence of Solutions for Set-valued Nonlinear Complementarity Problems

FAN Jiang-hua¹, LI Pei-xing²

- (1. School of Mathematics, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;
2. School of Mathematical and Computational Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The set-valued nonlinear complementarity problems are studied. First, a new auxiliary function is constructed to transform the set-valued nonlinear complementarity problems into fixed point problems. By utilizing the Leray-Schauder fixed point theorem, a sufficient condition is given for the existence of the solution to the set-valued nonlinear complementarity problems. The results generalize some well-known existence theorems. Then, Leray-Schauder fixed point algorithm is established to solve the nonlinear complementarity problems.

Key words: set-valued nonlinear complementarity problem; fixed point; vector label algorithm; acyclic mapping