

机械泵驱动冷却回路在模拟航天温度边界下散热能力分析*

刘 杰¹, 郭开华², 何振辉²

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033;

2. 中山大学空间技术中心, 广东 广州 510275;)

摘 要: 对机械泵驱动两相冷却系统在模拟太空工作的边界问题条件下散热能力和工作特性进行实验研究, 从而得到结论: 当系统的热负荷较小而边界温度较低时, 放热量变大使系统平均温度降低, 造成蒸发段温度无法控制, 冷凝器的温度也可能会降到低于工质的凝固点冻结, 冷凝段管路也将因固态工质堵塞而无法循环, 此时需采取降低储液器设定温度的方法来减小系统的放热量。当系统的热负荷较大而边界温度较高时, 系统在冷凝器的放热量较小而使得热负荷无法完全释放时, 系统的平均温度上升, 造成泵的入口温度达到工质的饱和温度, 产生的气泡有可能会对机械泵内的部件产生气蚀, 并引起机械泵工作不稳定, 无法保证设定的流量循环。实验结论为该类系统的设计与应用提供了可靠的依据。

关键词: 热控; 航天; 机械泵驱动; 散热; 两相流

中图分类号: TK24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 05-0033-04

机械泵驱动两相流冷却系统是一种新型的航空航天主动式热控系统, 该类系统在地面散热冷却方面应用比较成熟, 而目前用于航天两相流冷却技术仍然以毛细泵驱动的环路热管为主。随着未来小型探测器高发热量、高热流密度、复杂回路及高控温精度的发展趋势, 以机械泵为驱动力的两相流冷却系统为必然的发展趋势^[1]。作为一种较高级别的主动式航天冷却系统, 国内外许多学者包括俄罗斯航天中心和美国国家航空航天管理局已经对此技术立项研究近 10 年的时间。为消除毛细泵驱动回路(CPL)的不稳定特性, 提高其传热能力, NASA 于 1987 年在 CPL 的液体回流管上添加装辅助机械泵, 研制出“机械泵辅助毛细泵冷却系统”, 又称为混合型 CPL 或高功率宇宙飞船热管理系统^[2]。1989 年, 为了设计自由号太空站热控系统, Brown 等^[3]提出太空站机械泵氨两相循环系统, 经过长达 4 年的地面以及空间模拟实验。近年来对于该类系统的较为突出的研究主要集中在荷兰空间技术中心^[4-5]与中山大学空间技术中心在“AMS2 太空反物质探测器”冷却系统研制方面, 该系统首次以 CO₂ 为循环工质实现热量的传递^[6-7]。此外中山大学研究人员对该系统的储液器的设计进行改进^[8], 并且在控温策略上采用了主回路与半导体

制冷片相结合的新方法^[9]。对于该类系统在模拟轨道运行中散热能力的研究工作和系统的动态相应特性较少, 本文围绕该问题展开实验。

1 系统实验台的研制与分析

本研究的实验台部件包括机械泵、蒸发器、冷凝器、储液罐、热交换器以及连接管道等几大部分。为了保证机械泵能正常工作, 泵的入口应该保持过冷度大于 5℃ 的液体。从泵出来的工质如果直接流入蒸发段吸热, 则散热段的温差至少要大于 5℃, 因为过冷液体首先要以显热的方式散热然后再进入到饱和态。这样两相流在蒸发段恒温散热的优势就难以发挥, 特别是对热控要求较高的空间探测装置。因此要在蒸发段的入口前用预热器将液体加热到饱和状态。热交换器的作用是将蒸发器出口的两相流体和从泵来的过冷液体进行耦合换热, 使得进入蒸发器的液体接近于饱和点, 这在航空应用中比较紧张的能源预算下是行之有效的。

实验过程中将 WAK 和 RAM 两块冷凝器放置在 1 m × 1 m × 1 m 的为小气候箱中, 以模拟冷凝器在空间轨道运行时的放热边界温度。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材料进行保温, 气候箱的控温精度

* 收稿日期: 2008-03-12

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, 讲师; E-mail: lujor@163.com

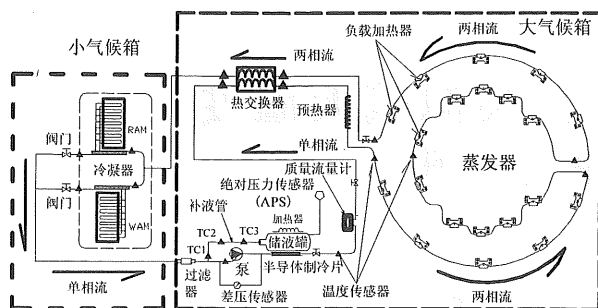


图1 机械泵驱动两相冷却系统结构原理图

Fig.1 Structure of a Mechanical Pumped Cooling Loop

均为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了模拟发热源，沿蒸发器回路贴有发热电阻，发热量为 $0\sim 300\text{ W}$ 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标定后精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 T 型热电偶，在泵的前后和蒸发器的进出口处布置了差压传感器。系统的流量选用科里奥利质量流量计进行实时测量。上位机通过数据采集仪对所有传感器进行实时监控。系统选用的循环工质为 CO_2 ，这主要是因为 CO_2 在饱和态的热力学性质较适合于机械泵驱动的回路式热管系统的工作。

热阻件模型是机械泵驱动主动式两相流冷却系统的基本单元，主要是由蒸发器、冷凝器、换热器、驱动泵和连接管路等几大部分组成。其中流动与传热通用模型：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 A) = A \frac{\partial p}{\partial x} + F_k + F_w + s_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho H A) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} A \right) + h(T_w - T)A_w + Q_{in} \quad (3)$$

$$\rho = f(T, p) \quad (4)$$

式中 ρ 为密度， A 为流体回路截面积， u 为流速， p 为压力， s_M 为动量源， U 为内能， H 为焓， λ 为导热系数， T 为温度， h 为对流换热系数， Q 为输入热量。为了使模型封闭，必须引入一些有关流动传热的物理关系式。局部阻力为

$$F_k = -f_k \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho u^2 A$$

沿程壁面的摩擦阻力为

$$F_w = -f_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho u^2 A$$

2 实验研究

当机械泵驱动两相冷却系统在太空工作时，冷

凝器将被安置在两块朝向相反的辐射板上，辐射板的另外一边朝向太空。该设计可以保证在随轨道运行时，总有一块辐射板处于被向太阳的“冷面”，再通过控制两块冷凝器进口处的电磁阀，就可保证温度过高的辐射板侧的冷凝器将被切断，冷凝器的边界温度也将会作周期性波动。为了对系统的散热能力和动态响应特性进行研究，实验过程根据模拟计算所提供的轨道数据^[10]，控制冷凝器所在的小气候箱温度波动。实验内容主要包括小气候箱温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的周期性变化时变热负荷过程，变化周期为 90 min ，实验过程中质量流量为 2.8 g/s ，蒸发段设定温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.1 小气候箱的温度波动为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

图2可见，系统顺利启动以后，热负荷从 100 W 增加到 200 W ，再增加到 300 W ^[11]。由于边界温度的升高，冷凝器的放热量减小，在系统蒸发段的热量为 200 W 时，蒸发器的温度已经基本稳定，蒸发器的温度基本等于储液器的 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的设定温度，且不会因为小气候箱运行到较高温度而温度升高；当系统的热量增加至 300 W 时，随着小气候箱的温度运行到高温部分，由于冷凝器的放热温差减小，放热量不足使得系统冷却能力不够，因此系统的整体温度呈上升趋势，如图2，在小气候箱温度上升至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，泵入口温度已经达到了 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的设定温度，说明此时齿轮泵的入口工质状态为气液两相流，此时机械泵的工作状态进入不稳定状态，工质在系统内很难继续循环，蒸发器内工质吸热汽化温度急剧上升，为了避免设备烧毁，保护机械泵免受气蚀，系统必须停止工作。

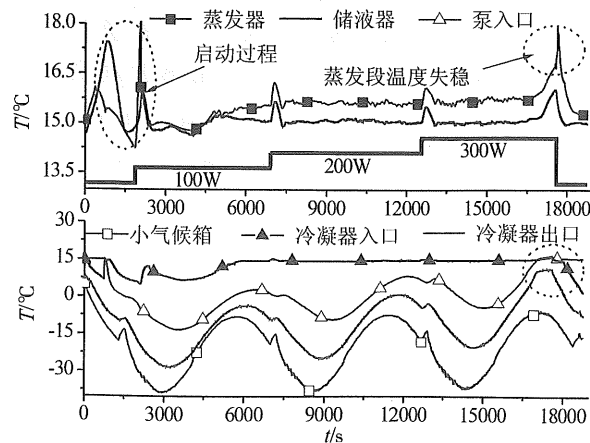


图2 补液管上的测点温度变化

Fig.2 Temperature variations on the connecting pipe

2.2 小气候箱的温度波动为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

由图3为实验结果可见，当蒸发段的加热量为

100 W 或者 200 W 时,蒸发段的温度特点表现为进出口的温差较小、整体温度的温度比较均匀,而随时间的波动较大。例如在 100 W 的热负荷下,蒸发段的工作温度从设定的 15 °C 降低到 13.5 °C,在热负荷为 200 W 时,设定温度降低为 14.5 °C。当加热量增加到 300 W 时,蒸发段的工作才能够稳定在设定的工作温度。

这是因为当蒸发器的热量较小且系统运行在冷边界时,系统的放热量大于吸收的热量,而储液器温控装置中加热器的输入功率有限,因此系统整体的温度降低,蒸发段的工作温度也随着下降。当冷凝段温度低于工的凝固点时,冷凝段管路将因工质冻结堵塞而无法循环,从而导致系统停止工作。在这种情况下,当冷凝器随航天气运行到轨道温度较高的位置时,密闭管路内冻结的工质开始融化,如果受热不均,融化在冻结管路中部发生,工质的体积膨胀将导致冷凝管路胀破。为了避免该类情况的发生,保证蒸发器工作在冷凝器在低温轨道运行的条件下仍然工作在设定温度上,可通过降低系统工作温度来减小冷凝器的放热量,在航空背景能源紧张的条件,该方法更为行之有效,这也是在系统运行过程中需要改变“设定温度”的主要原因。如果通过轨道参数得到的低温度边界条件经常发生,为了运行安全,则因采取冷凝段增加额外的加热装置的方法以及毛细管防冻的设计方案。

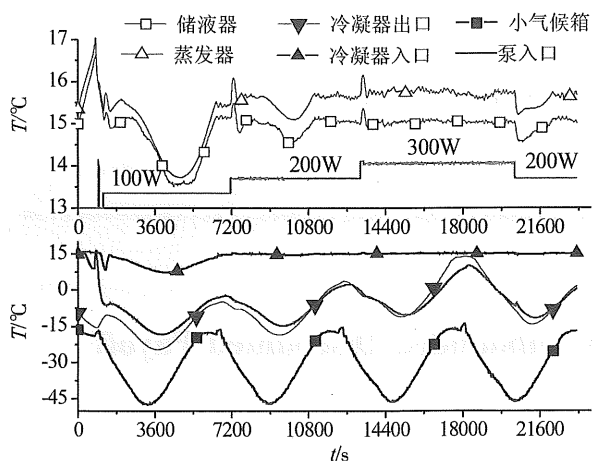


图3 系统主要部件的温度分布

Fig. 3 Temperature variations of the main components

3 结论

通过对机械泵驱动两相流冷却系统在模拟航天温度波动边界条件下散热能力的实验可以得到以下结论:当边界温度较低、系统的放热量较大时,储

液器的温控装置在最大加热状态都不能够保持其维持在设定温度,系统温度下降。此时,冷凝器的放热温度有可能会降低至工质的凝固点而堵塞冷凝回路,甚至引起管路破裂。可以采用降低储液器工作温度的方法来减小系统的放热量,从而使达到新的热量平衡。如果系统的设定温度达到设计下限,则需在冷凝器增加加热装置来补偿散热量。当边界温度较高,系统在冷凝器的放热量较小而使得热负荷无法完全释放时,系统的整体温度上升,泵的入口温度达到饱和温度,工质将变为气液混合态产生的气泡有可能会对机械泵内的部件产生气蚀,并引起机械泵工作不稳定,无法保证设定的流量循环。此时唯一的措施是升高设定温度的来增加系统的放热量,确保进入机械泵的工质为纯液态。如果系统的设定温度到达上限,系统必须停止工作。总之,如果超过系统设定温度在航天运行边界条件下出现比较频繁,则需考虑更改设计或者更换循环工质。

参考文献:

- [1] HOA C, DEMOLDER B, ALEXANDRE A. Roadmap for developing heat pipes for ALCATEL SPACE satellites [J]. Appl Therm Eng, 2003, 23: 1099 - 1108.
- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] HOLMES H R, GOEPP J W. Development of lock heed pumped two-phase thermal bus [J]. AIAA paper, 1987 (87): 1627.
- [4] ES J van, DONK G van, PAUW A. AMS02 tracker thermal control system: loop lay-out & specification of loop components [R]. AMSTR-NLR-TN-003 issue 01, 2004.
- [5] DELIL A A M. Development of a mechanically pumped two-phase co2 loop for the ams - 2 tracker thermal control system [R]. National Aerospace Laboratory NLR AMS TIM Meeting. Boston January 23rd 2002.
- [6] 刘杰, 裴念强, 郭开华, 等. 二氧化碳两相冷却系统特性研究 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(1): 72 - 76. LIU Jie, PEI Nianqiang, GUO Kaihua, et al, Theoretical and experimental investigation on characteristics of CO₂ mechanically pumped two phase cooling system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University. 2008, 42(1): 72 - 76.
- [7] 莫冬传, 黄臻成, 侯增祺, 等. AMS-II 硅微条两相热控系统工质选择 [C]. 第十届全国热管会议论文集, 贵阳, 2006: 375 - 382.
- [8] 刘杰, 裴念强, 郭开华, 等. 新型空间机械泵两相流冷却系统周期波动温度边界下的散热特性实验研究 [J]. 核动力工程. 2008, 29(2): 96 - 100. LIU Jie, PEI Nianqiang, GUO Kaihua, et al. Experimental investigation on characteristics of mechanical pumped

- two-phase cooling system under periodic temperature boundary conditions [J]. Nuclear power engineering, 2008, 29(2): 96-100.
- [9] 裴念强, 郭开华, 刘杰. 半导体制冷在新型环路热管的应用计算[J]. 低温物理学报, 2007, 129(1): 42-45.
- PEI Nianqiang, LIU Jie, GUO Kaihua. Applied calculation of peltier cooler one new LHP[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics. 2007, 129(1): 42-45.
- [10] 裴念强, 刘杰, 郭开华, 一种空间热控箱及其在运行轨道中的热分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 127(S2): 73-77.
- PEI Nianqiang, LIU Jie, GUO Kaihua. A space thermal control box and its thermal analysis in Orbit[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 127(S2): 73-77.
- [11] LIU Jie, PEI Nianqiang, GUO Kaihua, et al. Experimental investigation on startup of a novel two-phase cooling loop [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(4): 939-946.

Experimental Investigation on Cooling Capacity of The MPCL System Under Simulated Space Boundary Conditions

LIU Jie¹, GUO Kai-hua², HE Zhen-hui²

(1. Institute of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. Center of Space TECH., Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The two-phase mechanical pumped cooling loop (MPCL) is a promising thermal control system. Experiments have been carried out to investigate cooling capacity and running characteristics under simulated temperature boundary conditions and variation heat load. It is concluded: when the condensers' heat rejection is higher than heat load on the evaporators, the system average temperature becomes lower and lower, which may lead to working fluid freezing in the condensers. It must decrease the set point evaporative temperature by controlling the accumulator. On the contrary, when the condensers' heat rejection is lower than heat load on the evaporators, the system average temperature becomes higher and higher, which may cause bubble appearing at the pump inlet and pump cavitation corrosion. It is necessary to increase the set point to avoid the pump running in an unstable station. All conclusions proved strong supporting for the system design and space applications

Key words: thermal control; space applications; mechanically pumped; cooling; two-phase

(上接第 27 页)

Nonzero-Sum Stochastic Games with Unbounded Discounted Payoff

YANG Jie^{1,2}, GUO Xian-ping²

(1. School of Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2. School of Mathematics and Computational Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Discrete time two-person nonzero-sum stochastic games with the discounted payoff criterion and a countable state space is studied, here the payoff functions might have neither upper nor lower bounds. The existence of Nash equilibria is proved in randomized stationary strategies by using the Fan's fixed-point theorem under the "drift" and the standard "continuous-compact" conditions, which are usually used in zero-sum stochastic games.

Key words: nonzero-sum stochastic game; expected discounted payoff criterion; Nash equilibria; countable state space