

文章编号: 1672-8785(2019)02-0025-05

低温回路热管技术研究

谢荣建 文佳佳 刘 成 刘 超 闫凯芬
刘博轩 余徐飞 吴亦农

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 作为一种高效的两相传热装置, 环路热管主要利用工质的气液相变实现热量的远距离传输, 因此工质的性质及充装系数对其性能具有很大影响。主要对影响低温回路热管性能的几种关键因素(包括工质品质因数、充液率、重力等)进行了理论及实验研究, 并对回路热管进行了优化。将脉管制冷机作为冷源, 对其与回路热管进行了集成应用性能研究, 为回路热管的空间应用奠定了理论及实验基础。

关键词: 回路热管; 充液率; 低温集成

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.02.005

Research on Cryogenic Loop Heat Pipe Technology

XIE Rong-jian, WEN Jia-jia, LIU Cheng, LIU Chao, YAN Kai-fen, LIU Bo-xuan, YU Xu-fei, WU Yi-nong
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: As a high efficient two-phase heat transfer device, the loop heat pipe implements far distance transfer of heat mainly by using the gaseous phase change of a working fluid. Therefore, the nature of working fluid and its filling ratio have a great influence on the performance of the loop heat pipe. Several key factors including figure of merit, fluid filling rate and gravity that have influences on the performance of loop heat pipes are studied theoretically and experimentally. The loop heat pipes are optimized. By using a pulse-tube cooler as the cold source, the application performance of it integrated with the loop heat pipe is studied. This research has laid the theoretical and experimental foundation for the space application of loop heat pipes.

Key words: loop heat pipe; fluid filling rate; cryogenic integration

0 引言

低温环路热管是一种应用于低温区域的高效传热装置^[1-5]。由于具有传热能力强、柔性良好以及无需运动部件等诸多优势, 它常被用于航天器载荷热控^[6-11], 其主要部件包括蒸发器(内置毛细芯)、气体管线、冷凝器、液体管

线、补偿器和工质等。环路热管依靠工质的相变和流动来实现高效的远距离传热^[3], 所以工质物性和充装系数对其性能具有很大影响。因此, 回路热管设计首先利用工质的品质因数对工质物性进行筛选, 即通过验证适用于低温环路热管的品质因数来判断工质适用性的理论正

收稿日期: 2018-12-13

作者简介: 谢荣建(1983-), 男, 福建浦城人, 副研究员, 博士, 主要从事热控技术及热工程新技术研究。E-mail: xierongjian@mail.sitp.ac.cn

确性, 然后在不同充装系数下对回路热管进行实验研究, 得到 180 K 温区回路热管的最优充液率。

同时, 随着回路热管的不断发展, 其应用领域越来越广, 且可能会在各种姿态下运行, 包括重力辅助和反重力等姿态。所以需要分别对回路热管在重力辅助、平放和反重力姿态下的稳态运行特性进行实验研究。

最后, 为了设计高效稳定的脉管制冷机与低温热管耦合传热系统, 针对低温回路热管的瞬态传热机理不清晰、耦合应用特性尚不明确等问题, 我们采用理论与实验相结合的方法, 从点到面地剖析系统优化设计问题。首次搭建了基于脉管制冷机与回路热管的可拆卸式低温真空实验平台(见图 1)。

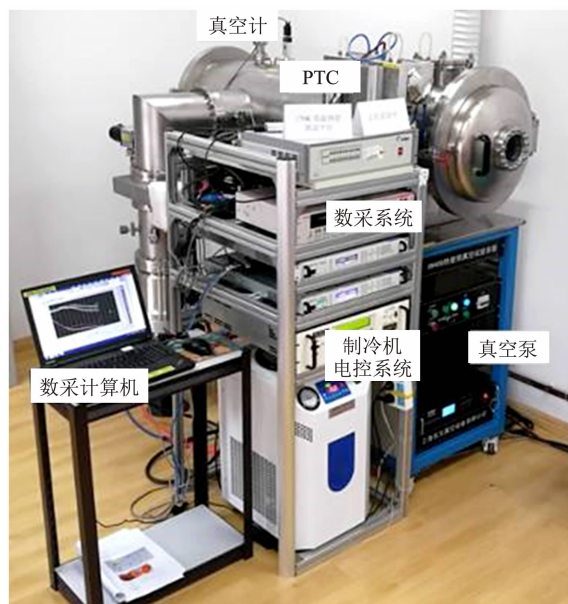


图 1 脉管制冷机与回路热管耦合实验平台

1 最优充液率实验验证

回路热管的充液率 η 为液态工质与整个热管的体积百分比^[7]:

$$\eta = V_l / V_{\text{total}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, V_l 和 V_{total} 分别为液态工质体积和整个回路热管体积。调整制冷机的输入功率以将冷凝器的温度保持在 170 K, 然后充装不同的工质量。试验前均完成了热管检漏和部件承压试验

并具备一套低温工质充装系统, 可实现工质 0.1 g 误差范围内的充装。图 2 所示为各充装系数下所对应的最佳工况热管温差。试验结果表明, 乙烷低温环路热管的最佳充装系数约为 65%, 其性能随着充装量的增加而呈现出“U”字形变化, 即蒸发温度随充装量的增加而先降低后升高。当充装工质为乙烯时也得到了类似结果, 热管的最佳充装系数约为 65%, 但其整体温差明显减小。

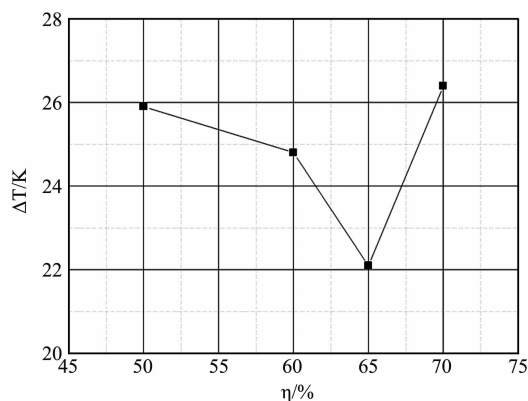


图 2 乙烷低温环路热管最佳工况时的相应温差

2 不同姿态下的回路热管内部质量流量测试

我们分别对回路热管在重力辅助、平放、反重力(蒸发器与冷凝器的相对角度为 $\pm 8^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 以及 0° 等)姿态下的稳态运行特性进行了实验研究(实验装置见图 3)。

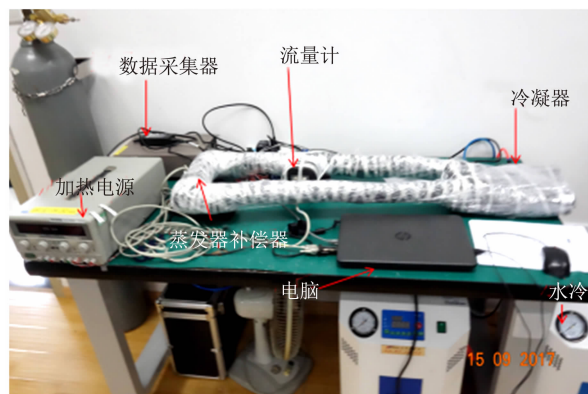


图 3 不同姿态下流量测量实验装置的示意图

图 4 为 20° 倾角下的回路热管流量测量值。同时, 通过对比不同倾角下流量随加热功

率的变化(结果见图 5), 得到了以下结论:

(1)在不同倾斜度下, 质量流量始终随着蒸发器加热功率的增大而增大, 基本呈线性变化, 且斜率大致相同。这符合回路热管蒸发相变的规律。

(2)当小功率温度稳定时, 回路热管实际上处于亚稳定状态, 其质量流量处于反复波动的状态。尤其是存在抗重力或重力辅助时, 其波动幅度特别大; 而且倾斜度越大, 相同情况下所对应的波动幅度越大。

(3)当加热功率过大时, 回路热管的蒸发器中会发生核态沸腾, 间断性地产生气泡, 破坏气液界面, 使得质量流量反复波动, 从而导致回路热管的温差急剧上升。

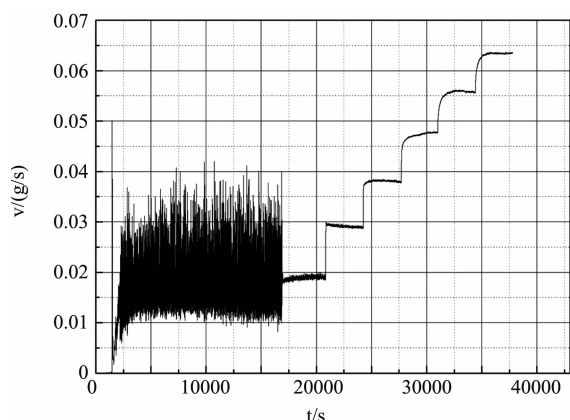


图 4 倾斜度为 20°时的流量图

3 优化后的回路热管性能实验结果

通过合理选择回路热管工质、优化充液率及冷凝器结构、测定质量流量以及对回路热管

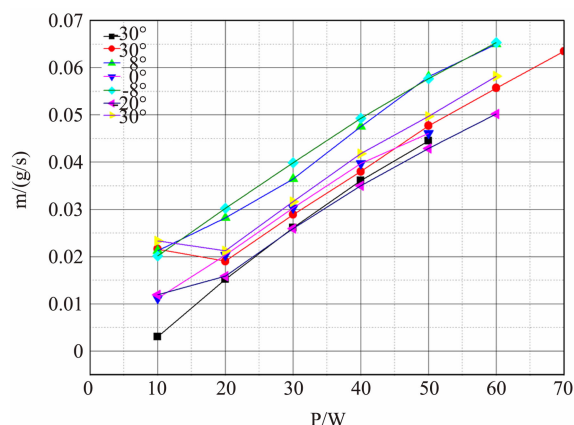


图 5 不同倾角下质量流量随加热功率的变化

进行建模优化, 设计出了一种合理的回路热管结构, 并对其真空环境性能进行了研究。图 6 和图 7 所示分别为本文设计的回路热管结构及其实验结果曲线。结果表明, 该回路热管的传输距离为 0.8 m, 能够在 5 W 加热功率下迅速启动; 启动后, 蒸发器的温度降至 190 K 所需的时间约为 34 min; 回路热管在 170 K 下传热 40 W 时的冷热端温差为 8.5 K。

4 基于回路热管的空间低温集成系统研究

空间低温集成系统通过科学的热设计方法对冷源、传热元件和负载对象进行耦合, 从而达到小温差、远距离、大冷量、柔性等各种系统冷量传输要求; 同时, 该系统还对制冷源的制冷能力、稳定性、寿命以及抗干扰性等具有很高的要求。因此, 回路热管和机械制冷机被广泛应用于低温热传输系统。

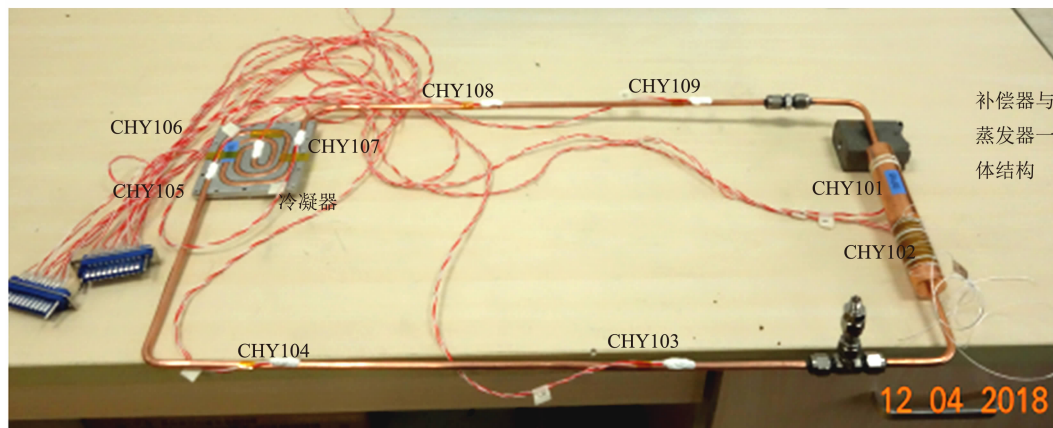


图 6 优化后的热管结构及其测点示意图

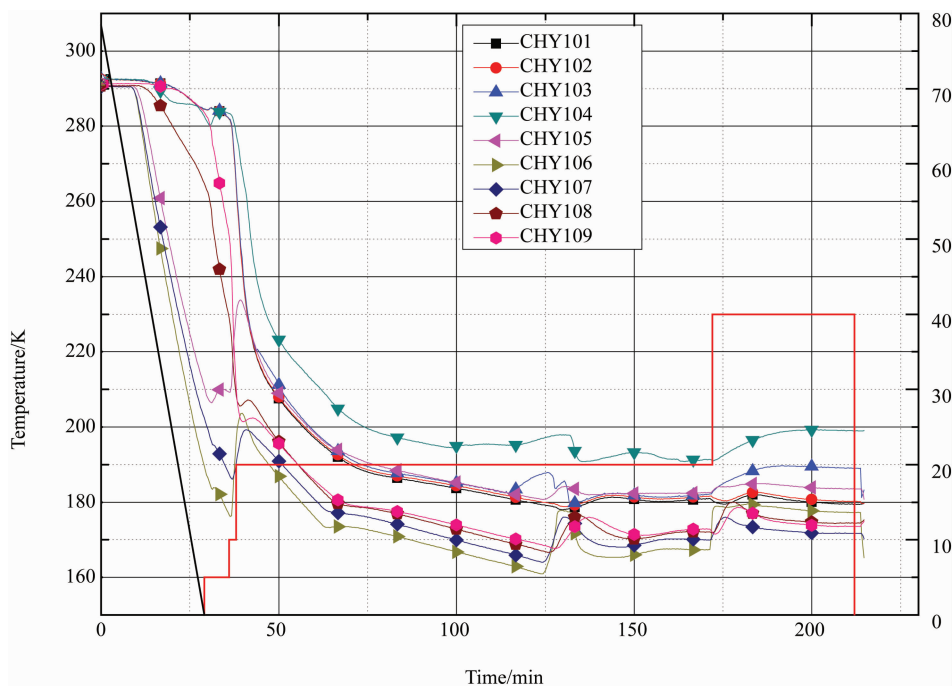


图 7 实验过程的温度曲线图

在基于机械制冷机的低温集成系统中,采用脉管制冷机作为冷源。通过将回路热管用作脉管制冷机的冷量传输元件,可以满足小温差、远距离、大冷量的应用要求;由于具有一定的柔性特性,它还能有效地隔绝冷源振动干扰;系统布置更加紧凑,可实现集成系统的高效设计。目前,这项低温集成研究成果已用于工程项目。应用系统将两台脉管制冷机作为冷源,并将两根低温环路热管以及两根槽道热管(互为备份)作为冷量传输结构。图 8 为该系统的结构示意图。其中,主焦面的尺寸为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$,热容为 12.3 kJ/K 。通过合理的绝热设计和耦合设计,所得到的低温集成系统实现了主焦面温度控制 188 K 、冷量传输距离 0.6 m 及冷量 100 W 的传输目标。在传输冷量 100 W 时,冷头温度为 168.1 K ,主焦面的最低温度为 179.1 K ,传输链路的总温差仅为 11.7 K 。图 9 所示为系统温度的具体情况。

大冷量、远距离的冷量高效传输是大规模低温集成系统必须解决的问题。将低温系统集成设计理念和方法应用到焦面组件低温集成系统的冷源及热传输元件上,是一项新的尝试

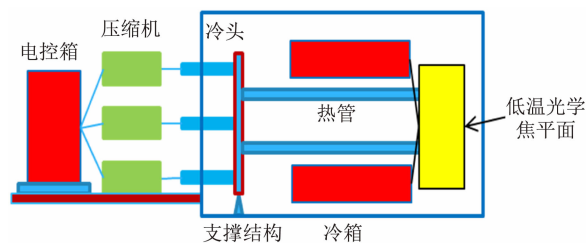


图 8 脉管制冷机与低温热管耦合集成应用的示意图

和突破。针对未来极低温微波探测、大规模焦平面等低温集成系统的建立,我们已经拥有了完善的技术储备和应用经验。

5 总结与展望

本文对影响低温回路热管性能的几种关键因素(包括工质品质因数、充液率、重力等)进行了理论及实验研究,验证了适用于低温回路热管湍流模型的品质因数的适用性,为低温回路热管的工质选择奠定了一定的理论基础。同时,基于实验得到了充液率的“U”形曲线,并找到了回路热管的最优充液率。测试结果表明,在 0.8 m 传输距离上,回路热管在 170 K 下传热 40 W 时的冷热端温差为 8.5 K 。在具体应用方面,我们对不同姿态下回路热管内部

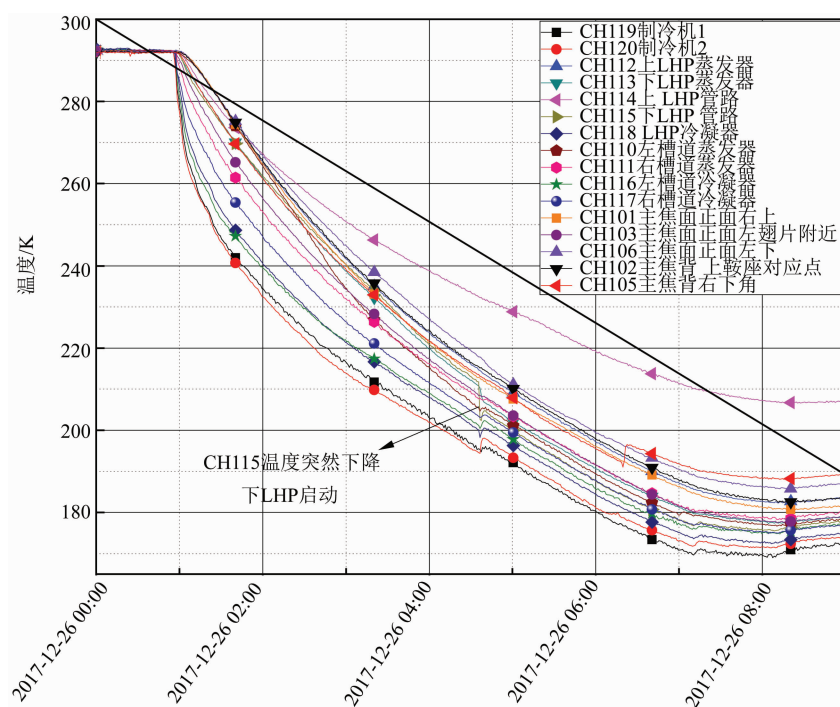


图 9 集成系统的降温过程

的质量流量进行了测试,研究了重力作用对回路热管内部状态的影响规律,并将脉管制冷机作为冷源与回路热管一起进行了集成应用性能研究,以确保回路热管空间应用的可靠性。目前,180 K 回路热管与脉管制冷机的耦合应用结构已经在项目中得到了预研应用。未来我们将对更低温区的回路热管进行理论与应用研究,拓展回路热管空间集成系统的应用范围,提高集成系统设计的便捷性和效率。

参考文献

- [1] Maidanik J, Vershinin S, Kholodov V, et al. Heat Transfer Apparatus [J]. *Journal of Heat Recovery Systems*, 1986, **6**(1): 14-15.
- [2] Chandratilleke R, Hatakeyama H, Nakagome H. Development of Cryogenic Loop Heat Pipes [J]. *Cryogenics*, 1998, **38**(3): 263-269.
- [3] Ku J. Operating Characteristics of Loop Heat Pipes [C]. Denver: 29th International Conference on Environmental System, 1999.
- [4] Dunbar N, Cadell P. Working Fluids and Figure of Merit for CPL/LHP Applications [C]. El Segundo: CPL-98 Workshop (The Aerospace Corpo-

ration), 1998.

- [5] Mishkinis D, Ochterbeck J. LHP: Criteria Approach [C]. Belarus: 10th Minsk International Seminar, 2003.
- [6] 王亦伟, 岑继文, 蒋方明, 等. 充液量对回路热管性能的影响 [J]. *光电子·激光*, 2015, **26**(4): 676-681.
- [7] 柏立战, 林贵平, 张红星. 重力辅助环路热管稳态运行特性的实验研究 [J]. *航空学报*, 2008, **29**(5): 1112-1117.
- [8] 莫青, 梁惊涛, 蔡京辉, 等. 液氮温区重力辅助深冷回路热管的实验研究 [J]. *低温工程*, 2005, **27**(1): 49-52.
- [9] 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*, 2005, **35**(1): 17-30.
- [10] Hoang T T, O'Connell T A, Jentung K, et al. Design Optimization of a Hydrogen Advanced Loop Heat Pipe for Space-based IR Sensor and Detector Cryocooling [C]. *SPIE*, 2003, **5172**: 86-96.
- [11] 王录, 苗建印, 张红星. 制冷机与深冷环路热管集成系统传热特性试验研究 [J]. *航天器工程*, 2016, **25**(3): 63-68.