

低温环路热管综述

林兵谣¹, 谢荣建², 陶乐仁¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 环路热管是以多孔毛细芯抽吸力为动力的相变传热设备, 可根据实际应用改变结构形式, 能在远距离传热的同时保持良好的均温性, 并且可在微重力环境下运行。环路热管工作温区较广, 按照其工作温区一般可分为高温环路热管(350 K 以上)、常温环路热管(200 ~ 350 K)和低温环路热管(200 K 以下)。为了满足深空探测的需要, 低温环路热管广泛应用于航天设备温控系统中并表现出优异的性能。按照孔隙特征和结构形式将用于环路热管的毛细芯分为四种, 简要阐述每种毛细芯制备和特点; 综合分析近年来低温环路热管技术主要理论和实验研究成果, 将目前低温环路热管常见的工作温区分成五个部分, 分析影响低温环路热管传热性能的因素, 包括工质充装量、反重力高度、次蒸发器功率等。最后, 提出优化措施以满足未来深空以及地面应用的需求。

关 键 词: 环路热管; 多孔芯; 传热; 相变

中图分类号: TK172.4

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.03.001

[引用本文格式] 林兵谣, 谢荣建, 陶乐仁. 低温环路热管综述[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 1-12. LIN Bing-yao, XIE Rong-jian, TAO Le-ren. Review of cryogenic loop heat pipe technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 1-12.

Review of Cryogenic Loop Heat Pipe Technology

LIN Bing-yao¹, XIE Rong-jian², TAO Le-ren¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, Post Code: 200083)

Abstract: Loop heat pipe (LHP) is an efficient two-phase heat transfer device which utilizes the capillary effect of the porous wick to circulate the working fluid. Many system structures of LHP are developed to fit different applications. Loop heat pipes are capable of transferring heat over long distance while keeping the thermal homogeneity, and operating in micro-gravity environment. Due to their different operating temperature range, loop heat pipes are categorized into three types: high temperature LHP (above 350 K), normal temperature LHP (200 - 350 K), and cryogenic LHP (below 200 K). To meet the challenging requirements of deep space exploration missions, cryogenic LHPs are utilized to collect waste heat from spaceflight and show excellent performance. Porous wicks for loop heat pipes are divided into four kinds according to porosity characteristics, and their manufacture process and features are briefly introduced. This paper reviews both theoretical work and experimental work of cryogenic loop heat pipe in recent years. Five different temperature ranges of cryogenic loop heat pipes (CLHPs) are categorized. Attention is paid to the start-up and operating characteristic of different CLHP. The parameters that affect the CLHP performance are analyzed, including adverse elevation, heat load applied to the secondary evaporator, and working fluid inventory. At last, some optimization strategies are given to meet the need of future space and terrestrial applications.

Key words: loop heat pipe, porous wick, heat conduction, phase change

引 言

环路热管技术(Loop heat pipe, LHP)最初由前苏联科学家 MAYDANIK 提出。环路热管利用多孔介质的毛细压力使管内工质克服阻力循环流动。液态工质在毛细芯汽液界面弯月面蒸发吸热,形成的蒸汽经气体槽道流入气体管线,随后在冷凝器冷凝成液态,并经液体管线进入储液器。工质在储液器内通过液体引管流入液体槽道浸润毛细芯,整个过程无需附加动力。传统环路热管由蒸发器、冷凝器、液体管线、气体管线、储液器和毛细芯组成,具有远距离传热,抗重力性能强,均温性好等优势,广泛应用于能源利用、电子设备冷却、余热回收和飞行器温度控制等领域。发展至今,应用于不同领域的环路热管有不同的形式:圆柱形蒸发器受热面积大,抗压性能好,但是不适用于集成电路板、CPU 等平面形状的设备散热;用于电子设备散热的环路热管多采用更加贴合发热表面的平板型环路热管;为了适应飞行器飞行姿势的变化,防止在飞行过程中毛细芯供液不足,双储液器环路热管以及并行双冷凝器环路热管^[1]、并联蒸发器环路热管^[2-3]、纳米流体力工质环路热管^[4-5]、远距离传热环路热管^[6]、超薄平板式环路热管^[7]等应运而生^[8-11]。

第一个环路热管由俄罗斯科学家 MAYDANIK 和 GERASIMOV 等人研发并测试。以水为工质,传热距离 1.2 m,传热量 1 kW^[12],自此许多国家和地区的专家学者不断对其进行研究和优化。热管以可以在失重状态下运行、体积小和效率高等特性,广泛应用于航天器温度控制,近年来对低温环境下热管的研究也有所增多。

低温环路热管是用于控制低温下工作的设备温度的重要部件,由于可在微重力环境下运行,广泛应用于地球探测及深空探测等领域。由于常温下的低温工质处于超临界状态,相比常温环路热管,低温环路热管增加了储气室,用于降低常温下环路热管内部压力,有些低温环路热管还有次蒸发器、次储液器和次冷凝器等设备。同时,低温环路热管也存在不同于常温环路热管的问题,比如超临界启动、明显地受环境寄生热影响等。

国内外学者对低温环路热管进行了相关的理论研究和实验分析,各种形式的高性能低温环路热管

得以研发,取得的成果也得到了一定程度的推广。本文总结了近期低温环路热管的研究进展,分析其发展趋势和方向,以明确今后的研究方向。

1 毛细芯

毛细芯是低温环路热管中的核心部件,提供的毛细抽吸力使工质克服压降循环往复,保证系统运行,对毛细芯的选择必须慎重。

毛细芯主要有 3 种结构形式^[13]:金属网式、沟槽式以及金属烧结式。金属网式毛细芯是将一定目数的金属丝网贴附在环路热管蒸发器内壁;沟槽式则是通过挤压、车削等加工工艺在蒸发器内壁加工出轴向或环向微沟槽,这两种毛细芯的加工工艺较简单;金属烧结式包括粉末烧结以及纤维烧结。粉末烧结是将金属粉末加热到约熔点二分之一温度时产生的现象,这种形式的毛细芯应用范围最广,技术也较成熟。目前烧结毛细芯主要几种结构形式如表 1 所示。

1.1 单层单孔隙特征烧结毛细芯

单层单孔隙特征烧结毛细芯如图 1 所示,一般是指一次烧结成型,孔径分布呈正态分布的毛细芯。烧结温度、烧结时间等参数对毛细芯的孔径、孔隙率等影响较大。王德志等人^[16]以羰基镍粉为原料制备毛细芯,实验对比分析了不同烧结时间、烧结温度和装料密度对镍粉毛细芯性能参数的影响。实验表明,烧结时间小于 30 min 时,随烧结时间延长,孔隙率及渗透率都显著降低,继续延长烧结时间后,降低趋势变缓。除了烧结工艺,主粉末材料中掺杂一定比例其他粉末对毛细芯性能也有改善。崔可航等人^[17]实验分析了镍铜毛细芯中铜粉比例对导热系数的影响。由于铜和镍属于无限互溶系,掺杂了铜粉的毛细芯导热系数低于纯铜或者纯镍毛细芯。

目前,烧结金属粉末毛细芯根据粉末材料主要有烧结镍粉毛细芯、烧结铜粉毛细芯、烧结不锈钢金属粉末毛细芯、烧结钛粉毛细芯以及多种金属粉末混合烧结毛细芯等。从烧结工艺来看,铜的烧结是比较容易的,但是铜过高的导热系数会增大蒸发器向储液器的热泄漏,如何降低毛细芯导热系数是当下的研究重点,除了采用新材料,在金属粉末中掺杂一些其他粉末颗粒也被证明是一种有效途径。镍铜固溶体降低了导带电子的数量,阻碍了电子以及声子的传导,因此毛细芯有效导热系数大幅度降低。

表 1 烧结金属粉末毛细芯方法及特点

Tab. 1 Methods and characteristics of sintered wick for LHP

类型	方法	特点
单层单孔隙特征	目前主要的制备方法是冷压烧结和松散烧结,除此之外还有粉浆浇注烧结,溶胶-凝胶烧结、等静压成型烧结、挤压成型烧结等 ^[14]	可以满足绝大多数环路热管需求,但是单一孔隙特征的毛细芯无法解决毛细压力和渗透率、矛盾
单层双孔隙特征	粉末团聚型 (Bi-disperse 型) 金属粉末中注入粘合剂,使金属粉末团聚成粉末块并按照颗粒直径筛分,随后放入模具中烧结成型同时去除粘合剂^[15] 造孔剂占位型 (Bi-porous 型) 金属粉末中掺加造孔剂(NaCl 等)烧结,烧结后溶盐造孔;也可以在金属粉末中加入造孔剂(尿素等),压制成坯后溶解造孔剂,然后烧结而成	存在大孔径和小孔径,提高毛细抽吸力的同时流动阻力较低,有效改善环路热管在高热流密度下的传热性能
双层复合毛细芯	不同层的金属粉末放入模具中烧结成型,或者在主毛细芯的基础上二次烧结	小孔径层提供较大毛细压力,大孔径层减小液态工质流动阻力或者蒸汽渗透率
三层复合毛细芯	多在主毛细芯基础上采用二次烧结,第三层毛细芯多为绝热棉等,直接贴付在二次芯上,起到减少热泄漏的作用	这种复合毛细芯多用于平板式蒸发器,其减少热泄漏的思路值得借鉴

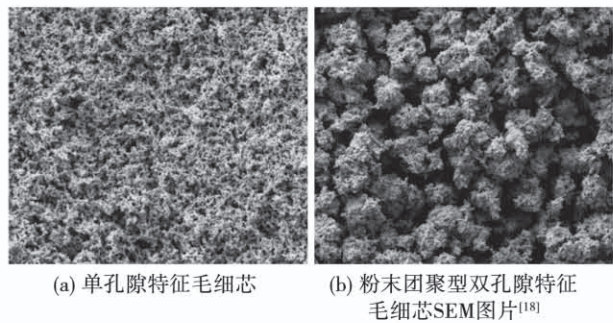


图 1 单孔隙特征毛细芯与粉末团聚型双孔隙特征毛细芯 SEM 图片

Fig. 1 The SEM pictures of traditional porous wick and bi-disperse wick of CLHP

1.2 单层双孔隙特征烧结毛细芯

Lin 等人^[18]实验对比分别采用粉末团聚型(Bi-disperse 型)毛细芯和单孔隙特征毛细芯的蒸发器传热性能,发现在 400 W 负荷下,前者传热性能是后者的 2.3 倍,且采用小粒径粉末团烧结成的毛细芯可以增大液膜蒸发的比表面积,在高负荷下可以提供更高地液膜蒸发传热系数。造孔剂占位型(Bi-porous 型)毛细芯如图 2 所示,大孔孔径由造孔剂决定,更加方便控制,Bi-porous 型毛细芯的造孔剂不仅会影响孔径以及孔隙率,还会影响毛细芯的导热系数。徐计元等人^[20]以高纯镍粉和钛粉为原料,NaCl 为造孔剂,采用冷压烧结的方法制备出间隙

孔,平均孔径约 2.5 μm ,生成孔的平均孔径 17 μm 的镍钛合金双孔隙毛细芯。实验表明,NaCl 含量的增加会使孔隙率增加,而气态或者液态工质导热系数小于固态毛细芯,使毛细芯导热系数随 NaCl 含量增加而减小。

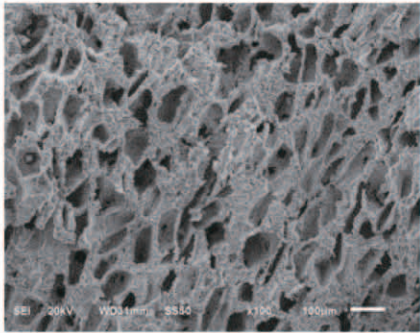


图 2 造孔剂占位型双孔隙特征毛细芯^[19]

Fig. 2 Bi-porous wicks of CLHP^[19]

上述两种双孔隙特征毛细芯制备方法不同,但是都是为了制备出有大孔径和小孔径的两种孔。渗透率、孔径比值和数量都会影响这种毛细芯传热能力,双孔隙特征毛细芯的双峰型孔径分布使其在高热负荷下的传热能力优于单孔隙特征毛细芯^[15]。

1.3 双层复合结构烧结毛细芯

李强等人^[21]对比采用单一芯和复合芯的两套环路热管性能。复合芯外层毛细芯厚度 2 mm,平均

孔径 $0.7\ \mu\text{m}$, 内层厚度 $3\ \text{mm}$, 平均孔径 $10\ \mu\text{m}$, 单一芯孔径 $4.3\ \mu\text{m}$, 厚度 $5\ \text{mm}$ 。实验表明, 采用复合芯的环路热管启动时间更短, 传热极限也更大。

目前, 大多数复合毛细芯为两层单孔隙特征毛细芯二次烧结而成, 复合毛细芯的毛细抽吸性能主要取决于其内层的孔隙特性, 如果内层采用大孔径, 小负荷下汽液界面会向毛细芯内部移动, 大孔径毛细抽吸力较小, 环路热管会出现温度波动现象, 因此建议内层采用小孔径, 外层采用大孔径毛细芯, 这样可以在提供足够毛细抽吸力的同时及时将气体排至蒸汽槽道^[19]。复合毛细芯每层毛细芯厚度对其整体性能的影响是未来研究重点。

1.4 三层复合结构烧结毛细芯

徐进良等人^[22-23]制备了用于平板型环路热管的三层复合结构毛细芯, 主毛细芯用 $88\ \mu\text{m}$ 枝状铜粉直接与蒸发器壁一起烧结, 二次芯则采用 $100\ \mu\text{m}$ 球状铜粉二次烧结于主芯上, 第三层毛细芯采用高吸水性隔热棉, 导热系数较低, 起到降低热泄漏的作用。实验表明, 这种环路热管, 在 $200\ \text{W}$ 加热功率下, 蒸发腔壁面中心温度最低仅 $64\ ^\circ\text{C}$ 。王野^[24]同样采用二次烧结的方法制备双层毛细芯, 然后铺设保温棉。在 $180\ \text{W}$ 加热功率下, 蒸发腔壁面温度最低 $63.3\ ^\circ\text{C}$ 。

毛细芯为环路热管的运行提供动力, 根据应用环境和热管结构合理选择毛细芯材料和加工方法至关重要。总的来说, 评价一种毛细芯的优劣, 主要由毛细压力、渗透率、导热能力和加工复杂程度来决定。烧结粉末毛细芯加工过程中影响参数较多, 烧结温度、烧结时间和装料密度等工艺参数对毛细芯工作性能影响很大, 可通过多次实验对比得到最佳加工工艺。单层单孔隙特征毛细芯可满足不同温区环路热管需求, 双孔径毛细芯和多层复合毛细芯对于增加毛细极限和减少热泄漏有一定帮助。

统计分析 2003 年至今共 44 篇低温环路热管文献, 得到各种低温环路热管毛细芯材料的比例, 如图 3 所示。由于低温工质的热物性参数等原因, 低温环路热管的传热能力较常温环路热管小很多, 而单纯依靠毛细芯强化换热效果不明显, 同时铜粉和不锈钢粉末烧结温度较低, 与大多数低温工质兼容, 因此目前低温环路热管的主毛细芯多为单层单一孔径烧结镍粉和烧结不锈钢金属粉末毛细芯。尽管如此, 三层复合毛细芯中减小热泄漏的理念对低温环

路热管的性能提升同样有益。

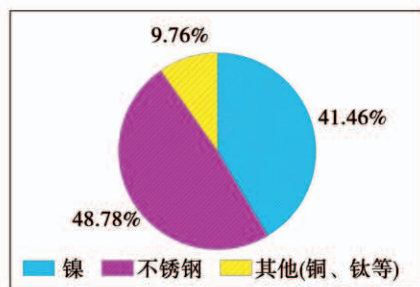


图 3 低温环路热管毛细芯材料的应用

Fig. 3 Application of materials of porous wicks for CLHP

2 低温环路热管结构类型

BAI 等人^[25]将低温环路热管按照系统结构分为五种形式, 如表 2 所示。目前, 低温环路热管研究较多的结构形式是带次回路型。究其原因, 这种系统结构较复杂, 但是有许多优势: 次回路蒸发器可加速主蒸发器降温, 辅助主回路启动; 同时环境寄生热对低温环路热管工作温度影响较大, 在主回路低负荷运行情况下, 次蒸发器施加一定热负荷可消除环境寄生热的影响, 使环路热管整体运行平稳。

3 低温环路热管的实验研究

目前, 低温环路热管常见工作温区有五个: $180\sim 200\ \text{K}$ 温区、 $70\sim 120\ \text{K}$ 温区、 $30\sim 40\ \text{K}$ 温区、 $20\sim 30\ \text{K}$ 温区和 $2\sim 4\ \text{K}$ 温区。

3.1 $180\sim 200\ \text{K}$ 温区低温环路热管

3.1.1 传统型

传统型 CLHP 要实现超临界启动, 重力辅助是很必要的, 即冷凝器高于蒸发器放置, 利用重力使液态工质流向蒸发器浸润毛细芯。低温热沉开启后, 冷凝器温度降至工质临界温度时液态工质在重力作用下通过管线流入蒸发器, 工质完全浸润毛细芯后可对蒸发器施加负荷。除了重力作用, 热沉温度和汽液分布对启动时间也有一定影响。崔峥等人^[26-27]以阿尔法磁谱仪低温冷却系统为研究对象, 实验分析其中的环路热管在真空低温条件下的启动特性, 较低地热沉温度以及蒸发器核心内存在气态工质有利于启动。蒸发器核心内存在气体会增大蒸发器向储液器的漏热; 太低的热沉温度会增大蒸发器内蒸汽压降, 减小蒸汽过热度, 进而导致系统阻力增大。陈跃勇等人^[28-29]采用热导率较低的氮化硅

陶瓷作为吸液芯,实验分析采用这种毛细芯的 CLHP 启动性能,与金属毛细芯相比,氮化硅陶瓷毛细芯热扩散系数较大,导致环路热管的启动时间长,且温升较大。重力辅助还会影响 CLHP 传热能力。PEREIRA^[30]设计了一种传统结构的低温环路热管,传热距离 350 mm,采用烧结不锈钢金属粉末毛细

芯,孔径 5 μm ,管线内径 4 mm。实验表明:在重力辅助作用下,以丙烷为工质时,最大传热能力 30 W;以氦为工质时,最大传热能力 25 W;以氩为工质时,最大传热能力 20 W。而在水平状态下环路热管的传热能力则大大降低。

表 2 低温环路热管结构形式及特点 (150 K 以下)
Tab.2 Structures and features of CLHP (below 150 K)

类型	结构形式	特点
传统型		优点:结构简单 缺点:辅助启动措施有限 适用热源:集中式热源
加热冷凝器辅助启动型		优点:增加了次蒸发器辅助启动措施 缺点:次蒸发器加热负荷会抵消一部分冷量 适用热源:集中式热源
串联次蒸发器型		优点:增加了次蒸发器辅助启动措施 缺点:结构较复杂 适用热源:集中式热源
带次回路型		优点:启动时间短;对环境寄生热有良好的应对机制 缺点:结构最复杂 适用热源:集中式热源
毛细芯分离型		优点:散热面积大 缺点:毛细芯负荷与蒸发器负荷相互制约 适用热源:大面积集中热源

3.1.2 带次回路型

带次回路型 CLHP 超临界启动过程较传统型复杂。低温热沉开启后,冷凝器、次蒸发器和次储液器温度不断降低,降至临界温度以下冷凝液出现在次储液器和次蒸发器,工质完全浸润次毛细芯后可启动次回路,次蒸发器产生的气体推动冷凝器内低温工质流向主蒸发器,主毛细芯被完全浸润后对主蒸

发器施加负荷可启动主回路。对这种 CLHP 在 180 ~ 200 K 温区内的研究较少。刘成志等人^[31]研发了一种并行双蒸发器 CLHP,工质为乙烷,包含两个主蒸发器和一个次蒸发器,所有蒸发器尺寸相同,外径 14 mm,长 40 mm,毛细芯为不锈钢金属粉末烧结而成,平均孔径 4 μm 。实验表明:在次蒸发器负荷 7 W 时,这种环路热管启动时间约 40 min;次蒸发器

负荷 3 W 时启动时间约 80 min,这是由于负荷会影响毛细芯外气体流速;最大传热量 16 W,此时热阻 1.3 K/W。

3.1.3 加热冷凝器辅助启动型

加热冷凝器辅助启动型 CLHP 超临界启动过程:低温热沉开启后,冷凝器温度逐渐降至临界温度,次蒸发器内出现液态工质后对次蒸发器加热,产生的气体推动过冷液体通过两侧管线流向蒸发器,使蒸发器降温并被工质浸润。刘成志等人^[32]在紫铜块内部刻出蛇形工质换热通道的形式代替蛇形管冷凝器,同时,在通道上加工出凸起,起到次蒸发器的作用。设计并测试了这种 CLHP 的启动及传热能力,实验采用乙烷为工质,蒸发器内径 13 mm,长 40 mm。启动过程中冷凝器加热功率由 0.8 W 增加至 1.6 W,随后降至 0.7 W,降温的时间约 90 min,传热能力 12 W×0.61 m。对传统型 CLHP 冷凝器加热同样可以起到加速启动的效果。刘成志等人^[33]设计并测试了采用乙烷工质的传统型 CLHP,蒸发器外径 22 mm,长 70 mm,毛细芯孔径 1 μm,孔隙率为 40%。通过在冷凝器上施加 4 W 的加热功率,可使环路热管降温所需时间减少一半。这种环路热管原理都是相同的:冷凝器内出现的气态工质推动低温工质流向蒸发器,加速降温。

3.2 70~120 K 温区低温环路热管

3.2.1 传统型

莫青等人^[34]实验研究一种重力辅助的传统结构 CLHP,采用液氮工质,传热距离 100 mm,蒸发器外径 17 mm,烧结不锈钢金属粉末毛细芯,孔径 4~6 μm。当气体管线约高于液体管线 3 mm 时,传热极限 2 W,将高度差增加至 20 mm,传热能力上升至 11 W。重力辅助被认为是提升 CLHP 传热能力的重要因素,成为提高 CLHP 传热效率和性能的可行措施。

3.2.2 加热冷凝器辅助启动型

轴向和螺纹槽道同样可以起到次蒸发器的作用。莫青等人^[35-38]将内部有轴向槽道的短管加入冷凝器的设计中作为次蒸发器,加热次蒸发器时产生压力推动前方冷凝液流动。实验中采用液氮为工质,毛细芯孔径 8~12 μm,热传输距离 200 mm。在最佳充液率下,这种结构的环路热管水平状态下可传输 12 W 热量,此时热阻 4.7 K/W,重力辅助高度 3.5 cm 时最大传热量 20 W。基于类似的原理,杨

帆等人^[39]将螺纹槽道加入冷凝器中,启动时加热螺纹槽道,产生的气体推动低温工质流向蒸发器。采用烧结不锈钢金属粉末毛细芯,孔径 2~5 μm。实验表明,在充气压力 4.35 MPa、冷凝器加热功率 1 W 时,启动时间约 8 000 s。

总结相关文献发现,加热冷凝器辅助启动型 CLHP 的次蒸发器形式多种多样,这些形式不仅成本低廉,效果较好,运行时还可以起到强化冷凝的作用,为后续实验和设计提供了参考。但是目前理论研究较少,可以建立相应传热模型,考虑相应次蒸发器边界和摩擦阻力,得到工质温度分布,对比实验分析流动和传热规律,更深入研究加热冷凝器辅助启动型 CLHP 传热机理。

3.2.3 串联次蒸发器型

这种类型的 CLHP 启动过程类似于加热冷凝器辅助启动型 CLHP,冷凝器降温至工质临界温度后加热次蒸发器,产生的气体推动液态工质流向主蒸发器,但是由于串联次蒸发器型 CLHP 传统的次蒸发器结构可以阻止过冷液体反向流动,所以过冷液体只能通过液体管线流向主储液器和主蒸发器。KHRUSTALEV^[40]研发了一种串联次蒸发器型 CLHP,以氧为工质,次蒸发器和次冷凝器均串联一起,次蒸发器位于两个冷凝器之间,启动时加热次蒸发器,产生的气态工质推动次冷凝器中的低温液态工质流向主蒸发器。主蒸发器采用烧结不锈钢金属粉末毛细芯,孔径 2.4 μm,次蒸发器负荷 4 W 时,可在反重力高度 5 cm 下传热 9 W。GONCHAROV 等人^[41]设计并测试了一种无储液器低温环路热管,次蒸发器位于两个冷凝器之间,冷凝器与次蒸发器直接接触,冷凝器同时起到储液器的功能,启动过程与前者类似,加热次蒸发器,推动次冷凝器内的液体流向主蒸发器。以氮为工质时,热沉温度 80 K,传热能力 2.0~2.5 W。

串联次蒸发器型 CLHP 是环路热管的一个发展方向,传热能力强,均温性较好,现有的文献从重力倾角、热沉温度和工质等方面进行了一定研究。理论上这种 CLHP 加工工艺不是很复杂,且在远距离传热环路热管中有较大潜力,但是目前缺乏大量实验数据和相应理论分析支持。

3.2.4 带次回路线型

次蒸发器负荷直接影响启动时间和能否启动成功^[42-45]。环路热管的漏热量一定时,系统存在最小

次蒸发器负荷,低于这个值毛细芯不会被工质浸润,且次蒸发器负荷越大,启动时间越短^[46-48]。此外,在主蒸发器负荷较低时,次蒸发器负荷可显著提高系统稳定性^[49]。马路等人^[50-51]设计并实验测试了低温环路热管,蒸发器外径 19 mm,长 105 mm,采用烧结不锈钢粉末毛细芯,孔径 2.8 μm 。启动实验中发现,次蒸发器施加 15 W 负荷时主蒸发器降温时间 84 min,20 W 负荷时降温时间只有 40 min 左右。

不同系统的最佳充装压力和充装量不同,在最佳充装压力下的降温过程中主蒸发器能够以最短时间达到稳定状态^[49],低于或者高于这个值对传热有一定影响。ZHAO 等人^[52-53]研发了一种液氮温区高热量传输低温环路热管,蒸发器外径 27 mm,长 45 mm,热传输距离 0.48 m,采用烧结不锈钢粉末毛细芯,毛细芯孔径约 5 μm 。实验测得其最佳充装压力 3.35 MPa(对应充液量 25.94 g),高于或者低于这个值,系统温差和热阻都会增加。DU 等人^[44]测试主蒸发器负荷 2 W,次蒸发器负荷 3 W 时,环路热管在 1.0、1.2、1.4 和 1.6 MPa 充装压力下的启动性能,并指出超临界启动时间对小范围内充装压力的变化不敏感。

系统结构形式,比如次回路接入主储液器位置、储气罐接入位置等对启动也有一定影响。BAI 等人^[45]实验研究次回路接在主储液器顶部、中部和底部对启动和传热能力的影响。发现三种情况下系统均可实现超临界启动,且启动过程区别很小。但是接在底部时,传热能力只有 6 W。分析认为,接在底部时,主毛细芯会出现供液不足的情况,在低负荷下即烧干。

环境寄生热以及重力对环路热管的影响显而易见,环境寄生热会导致环路的工作温度明显升高^[50,54],并且会导致制冷机功率增加;反重力高度越高,系统工作温度越高^[49]。

总结相关文献发现:(1) 不同系统的最佳充液率的不同,充液率会影响温度分布,同时也是影响传热极限的主要因素。(2) 图 4 是近年低温环路热管文献得到的低温工质使用分布情况。可见,氮是这个温区最常用的工质。氮也是 70 ~ 120 K 温区相对优良的低温工质,通常优于氧等。(3) 增加重力倾角是提升 CLHP 性能的一种措施。增加重力倾角可抵消一部分液态工质流动阻力,根据克拉贝龙方程,这会减小主蒸发器和主储液器间的饱和温差,相应

地两者间热泄漏减小。(4) 次蒸发器负荷不止会影响启动时间,还会降低蒸发温度以及增加低负荷时主回路稳定性。(5) 次回路接入位置会影响主蒸发器供液稳定,应谨慎选择。

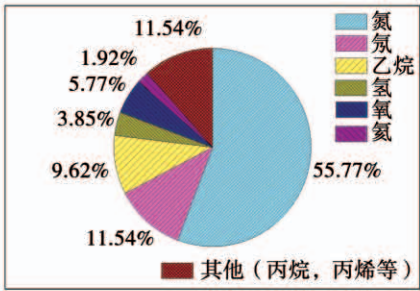


图 4 低温环路热管工质应用

Fig.4 Application of working fluids for CLHP

3.3 30 ~ 40 K 温区低温环路热管

LIN 等人^[55-56]测试了一种不锈钢 - 氮带次回路型 CLHP,G - M 制冷机提供热沉温度。蒸发器外径 13 mm、内径 11 mm、长 50 mm,毛细芯为烧结镍粉,孔径 0.5 μm 、孔隙率 55%,气、液管线外径 3 mm、内径 2 mm、长度分别为 700 和 600 mm,冷凝管线外径 2 mm,内径 1 mm。储气罐位于主液体管线靠近冷凝器,环境温度 298 K,充气压力 2.9 MPa,实验表明,这种不锈钢 - 氮 CLHP 可传输 4 W $\times$ 0.6 m,最小热阻 0.4 K/W。

HOANG 等人^[57]研发一种用于远红外望远镜的液氮温区 CLHP,工质为氮,采用毛细芯分离型,管材为 304L 不锈钢,毛细芯外径 5.3 mm、长 50.8 mm、孔径 1.5 μm 。实验测得其最大传热量 4.2 W,此时毛细芯负荷 2.5 W。

为了保证光学望远镜等设备的良好运行状态,研发液氮温区及更低温区的 CLHP 迫在眉睫。毛细芯分离型 CLHP 超临界启动过程:低温热沉开启后,冷凝器、储液器以及毛细芯温度持续降低,降至临界温度后液态工质浸润毛细芯,对毛细芯施加负荷,推动过冷工质流向蒸发器,蒸发器温度降至临界温度后可对蒸发器施加负荷完成启动。这种 CLHP 蒸发器外形为平板状,表面布置蛇形管道,这样的结构极大地增加了吸热的面积,还可根据实际需要改变该蒸发器形状和尺寸,因此这种 CLHP 具备目前已有环路热管不可比拟的适应性和传热性能。

3.4 20 ~ 30 K 温区低温环路热管

HOANG 等人^[58-59]设计并实验测试了一种以

氢为工质的带次回路型 CLHP。蒸发器和储液器外径 19 mm,长 25.4 mm,毛细芯为烧结 316L 不锈钢粉末,平均孔径 3 μm ,孔隙率 40%,环境热沉 80 K,次蒸发器负荷 2.5 W 时,实验测得其最大传热量 12.5 W。

随着工作温区的降低,环路热管传热量的降低不可避免,这是低温工质物理特性决定的。且随着温区降低,系统启动时间会延长,而次蒸发器可加速主回路启动。上述文献中的变负荷运行、高热流密度实验等验证了带次回路型 CLHP 在液氢温区的稳定性,且次蒸发器可以使主回路从烧干状态迅速恢复正常运行状态,这种形式的环路热管在未来航天及其它工业领域有很大应用前景。

3.5 2~4 K 温区低温环路热管

KU 等人^[60]研发用于大面积散热的液氢温区 CLHP,工作温区 3.2~4 K,毛细芯独立于蒸发器设计,采用烧结不锈钢粉末毛细芯,孔径 1.32 μm 。实验发现,启动降温期间蒸发器和冷凝器间的热传导仅限于不锈钢管道,对毛细芯施加负荷不会加速启动过程。最终约 68 h 后,蒸发器温度降至 3.5 K。不同于传统型环路热管,毛细芯分离型环路热管有两个独立的热源分别对毛细芯和蒸发器施加负荷(Q_{PUMP} 和 Q_{EVAP}),任意一个负荷的改变都会影响毛细芯压降。所以这种环路热管的毛细极限是由 Q_{PUMP} 和 Q_{EVAP} 共同影响的,也就是说,对于一个给定的 Q_{EVAP} ,毛细极限对应某个 Q_{PUMP} 值。在毛细极限实验中,固定 Q_{EVAP} 为 100 mW,当 Q_{PUMP} 增加 90 mW 时毛细芯出现烧干现象。在随后的蒸发器传热能力实验中,固定 Q_{PUMP} 为 30 mW, Q_{EVAP} 在 100 mW 时,蒸发器温度约 5 K,传热温差约 1.5 K;将 Q_{PUMP} 增加至 50 mW, Q_{EVAP} 在 140 mW 时环路热管还可以稳定运行,此时蒸发器温度约 8 K,传热温差约 4.5 K。

这种 CLHP 工作温区达到 3.2~4 K,因为这种环路热管启动时蒸发器和冷凝器的传热仅限于通过管线的热传导,所以从冷凝器降温到蒸发器降至临界温度以下所需时间极其漫长。由于超流氢的存在,更低温区的 CLHP 意义不大。

4 低温环路热管运行

4.1 启动特性

不同于常温环路热管工质(如水、乙醇等),CLHP 内的工质(如氧、氮等)在系统启动之前,在室

温状态下处于超临界状态,工质无法浸润毛细芯,因此不能像常温环路热管一样直接在蒸发器施加负荷启动环路热管。在 CLHP 启动前要将其内部工质冷却至汽液两相状态,待工质浸润毛细芯后再启动。CLHP 的启动是很复杂的瞬态过程,蒸发器内工质的汽液分布直接影响启动进程,MAYDANIK^[61]最先发现非工作状态下的环路热管内汽液分布有四种类型:(1) 气体槽道与毛细芯内均充满气态工质;(2) 气体槽道与毛细芯内均浸润液态工质;(3) 气体槽道充满液态工质而毛细芯内存在气态工质;(4) 气体槽道充满气态工质而毛细芯内存在液态工质。以上四种情况中第三种情况最难启动,因为蒸发器气体槽道内的工质发生核态沸腾需要达到一定的过热度,而当毛细芯内存在气体时,蒸发器向储液器热泄漏大,液态工质过热度不易形成;而第四种情况是最容易启动的,因为此时蒸发器气体槽道存在气态工质,不需要核态沸腾所需的过热度^[62]。除了汽液分布情况,许多学者还分析了重力因素、不凝性气体、充装压力和副蒸发器负荷等因素对环路热管启动性能的影响。在重力辅助作用下,冷凝器内过冷工质流向蒸发器,加速蒸发器降温至临界温度^[34];反重力状态下 CLHP 阻力增大,冷凝器内液态工质流动阻力增大,相应的蒸发器降温速率降低,启动时间延长。不凝性气体(non-condensable gas, NCG)是指 CLHP 工作温度范围内无法冷凝成液态的气体,主要来源于系统生产、清洗以及充装等过程,NCG 可能造成稳态运行温度升高、冷凝器传热性能恶化以及毛细芯性能下降等多种不利影响。此外,由于 NCG 分压力的作用,启动需要蒸发器和储液器之间形成更大的温度差,造成启动困难甚至失败^[63-64]。次蒸发器的存在可极大加速主回路启动,次蒸发器负荷越大,次毛细芯表面气体流速也越大,从而加速推动冷凝器内过冷工质流向主蒸发器,加速其降温过程。

CLHP 在某些情况下启动时会出现温度迟滞、工质逆流等现象。温度迟滞是指在蒸发器负荷、热沉温度或者环境温度变化时,CLHP 温度变化滞后的现象;目前,多认为温度迟滞现象与环境寄生热和环路热管内初始汽液分布有关^[65-67]。工质逆流是指气态工质经储液器由液体管线流向冷凝器,从冷凝器流出的液态工质经液体管线流向蒸发器的现象。出现工质逆流的原因很多,比如毛细芯孔径过

大、受环境寄生热影响等。温度迟滞现象对控温目标温度稳定有一定影响,工质逆流也会加大环路热管热阻,实际运行中应尽量避免这两种情况。目前,对 CLHP 中出现的这两种现象的相关报告及机理分析较少。

4.2 温度振荡特性

一般来说,环路热管在某个工况达到稳态后各组件温度平稳,而在某些情况下会出现温度在某一范围内振荡的现象,称之为温度振荡。这种现象最初由 J Ku 等人^[68]发现,认为温度振荡现象是蒸发器负荷变化时冷凝器内液相与两相区分界面在冷凝器中周期性移动导致的。WANG 等人^[27,69-70]认为温度振荡有三种类型,第一种是由于气体管线以及冷凝器内液塞引起的频率极大、振幅较小、持续数秒的温度振荡;第二种是汽液界面在冷凝器出口周期性移动导致的,这种情况下液体管线温度振荡幅度较大,蒸发器和储液器振幅较小。第三种是由于低负荷、低热沉温度等引起的频率较低,振幅较大的温度振荡,振幅可达几十度。

目前,对 CLHP 运行中出现的温度振荡机理研究有限。MO 等人^[36]在液氮温区 CLHP 低充液率实验中发现蒸发器负荷较低时,冷凝器液相区变长,储液器液态工质不足,汽液界面出现在毛细芯内部而不是毛细芯表面,汽液界面的位置移动会导致温度振荡现象。闫涛等人^[71]对带次回路型 CLHP 运行中出现的温度振荡现象进行分析,指出温度振荡具有可逆性和可重复性,是否发生温度振荡仅与当时蒸发器负荷有关,与负荷施加历史无关。认为引起这种 CLHP 温度振荡的原因是储液器向二次蒸发器断续供液导致的。

目前,对温度振荡的分析大多以实验数据为依据,缺乏更直观更有效的方法。可视化是分析这种现象较好的方法。

4.3 主动控温技术

环路热管主动控温技术是为了解决其控温能力较弱、不能主动控温目标温度的问题。CLHP 在低负荷下蒸发器内部会存在一部分蒸气,此时 CLHP 的热负荷的改变不会影响其系统温差。目前,CLHP 的主动控温就是利用这一点,对储液器进行加热主动控制 CLHP 内气体量,使其在蒸发器负荷改变时维持系统温差恒定^[72],同时控制热沉温度,使 CLHP 具备毛细泵回路(Capillary Pumped Loop, CPL)的功

能。目前,对 CLHP 主动控温的研究有限, GULLY 等人^[73]在液氮温区带次回路型 CLHP 主动控温实验中对储液器施加 0.1、0.2 和 0.4 W 负荷,蒸发器负荷在 10 W 以下时,系统温差分别维持在约 1.0、2.5 和 5.0 K。闫涛等人^[74]指出储液器施加负荷过大会导致储液器蒸汽量过多,CLHP 无法正常工作;且蒸发器温度相比于储液器未施加负荷时高,目前还没有在主动控温过程中不会提高 CLHP 工作温度的方法,CLHP 的主动控温机理尚待深入分析,且控温范围也十分有限。

5 结论及展望

考虑到 CLHP 的特殊性,结合对国内外文献的调研,CLHP 技术发展趋势可概括为以下四个方面:

(1) 可视化 CLHP 可以更加真实地体现热管内部工质的流动和相变过程,对目前存在的一些问题,如温度振荡、温度迟滞现象等,通过可视化可以更加直观地观察到汽液界面位置、管线以及储液器中液面位置,对深层次解释 CLHP 传热和流动机理具有重要意义。

(2) CLHP 在深空探测器温控系统中有较多应用,实际应用中要求 CLHP 质量尽可能小,因此 CLHP 轻量化是未来发展的趋势。

(3) 随着精确控温要求的提高,主动控制目标设备的温度成为 CLHP 的一个发展方向。目前 CLHP 的主动控温范围有限,如何在不影响环路热管工作性能的前提下扩大控温范围是一个研究重点。

(4) CLHP 毛细芯多为单孔隙特征金属粉末烧结毛细芯,向储液器热泄漏现象难以解决,研发可以减小热泄漏,增强传热能力和传输距离的 CLHP 毛细芯是专业发展的趋势。

参考文献:

- [1] XIE Y, ZHOU Y, WEN D, et al. Experimental investigation on transient characteristics of a dual compensation chamber loop heat pipe subjected to acceleration forces[J]. Applied Thermal Engineering, 2018(130): 169-184.
- [2] LIN G, LI N, BAI L, et al. Experimental investigation of a dual compensation chamber loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(15): 3231-3240.
- [3] BAI L, LIN G, WEN D, et al. Experimental investigation of startup behaviors of a dual compensation chamber loop heat pipe with insufficient fluid inventory[J]. Applied Thermal Engineering, 2009,

- 29(8):1447–1456.
- [4] XIE Y, ZHANG J, XIE L, et al. Experimental investigation on the operating characteristics of a dual compensation chamber loop heat pipe subjected to acceleration field[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 81: 297–312.
- [5] LI J, LV L. Performance investigation of a compact loop heat pipe with parallel condensers[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 62: 40–51.
- [6] A GONCHAROV K, A GOLOVIN O, A KOLESNIKOV V. Multi-evaporator loop heat pipe[C]//America: AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2001
- [7] BUGBY D, WRENN K, WOLF D, et al. Multi-evaporator hybrid loop heat pipe for small spacecraft thermal management[C]. Piscataway NJ: 2005 IEEE Aerospace Conference, 2005: 810–823.
- [8] GUNNASEGARAN P, ABDULLAH M Z, YUSOFF M Z, et al. Optimization of SiO₂ nanoparticle mass concentration and heat input on a loop heat pipe[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015(6): 238–250.
- [9] THARAYIL T, ASIRVATHAM L G, RAVINDRAN V, et al. Thermal performance of miniature loop heat pipe with graphene-water nanofluid[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016(93): 957–968.
- [10] NAKAMURA K, ODAGIRI K, NAGANO H. Study on a loop heat pipe for a long-distance heat transport under anti-gravity condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016(107): 167–174.
- [11] HONG S, ZHANG X, WANG S, et al. Experiment study on heat transfer capability of an innovative gravity assisted ultra-thin looped heat pipe[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015(95): 106–114.
- [12] MAYDANIK Y F. Loop heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(5): 635–657.
- [13] 程齐军, 欧耀辉, 周水波, 等. Cu 基热管芯体多孔材料增孔补强的研究[J]. *粉末冶金技术*, 2012, 30(1): 28–33.
- CHENG Qi-jun, OU Yao-hui, ZHOU Shui-bo, et al. Research on increasing porosity and strengthening matrix of copper wick used for heat pipe[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2012, 30(1): 28–33.
- [14] 王小鹰. 环路热管用多孔毛细芯的制备及性能分析[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- WANG Xiao-ying. Preparation and properties of porous wick for loop heat pipe[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [15] 曲 燕, 张坤峰. 环路热管双孔径分布毛细结构的研究进展[J]. *粉末冶金工业*, 2014, 24(3): 48–55.
- QU Yan, ZHANG Kun-feng. Review of Bi-porous wick structure for loop heat pipe[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2014, 24(3): 48–55.
- [16] 王德志, 王小鹰, 周 盼, 等. 烧结工艺对环路热管用 Ni 多孔毛细芯性能的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2014, 19(5): 687–694.
- WANG De-zhi, WANG Xiao-ying, ZHOU Pan, et al. Effect of sintering process on properties of Ni porous capillary wicks for loop heat pipe[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2014, 19(5): 687–694.
- [17] 崔可航, 辛公明, 程 林, 等. 环路热管毛细芯有效导热系数的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(9): 1543–1546.
- CUI Ke-hang, XIN Gong-ming, CHENG Lin, et al. Effective thermal conductivity of loop heat pipe wicks[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(9): 1543–1546.
- [18] LIN F, LIU B H, JUAN C C, et al. Effect of pore size distribution in bidisperse wick on heat transfer in a loop heat pipe[J]. *Heat & Mass Transfer*, 2011, 47(8): 933–940.
- [19] 徐计元, 邹 勇, 程 林. 环路热管复合毛细芯的孔结构优化与性能研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(23): 70–74, 152.
- XU Ji-yuan, ZOU Yong, CHENG Lin. Pore structure optimization and properties of composite wicks for loop heat pipes[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(23): 70–74, 152.
- [20] 徐计元, 邹 勇, 杨得帅, 等. 环路热管镍钛双孔隙毛细芯的性能优化[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(5): 73–78, 13.
- XU Ji-yuan, ZOU Yong, YANG De-shuai, et al. Properties optimization of Ni-Ti biporous wicks for loop heat pipe[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(5): 73–78, 13.
- [21] 李 强, 周海迎, 宣益民. 复合结构毛细蒸发器传热特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2008(1): 148–150.
- LI Qiang, ZHOU Hai-ying, XUAN Yi-min. Investigation on heat transfer characteristics of composite capillary evaporator[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008(1): 148–150.
- [22] 赵紫薇. 多尺度微细结构强化回路热管传热的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- ZHAO Zi-wei. Multi-scale structure surface of a loop heat pipe for performance improvement[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [23] 王 野, 纪献兵, 郑晓欢, 等. 多尺度复合毛细芯环路热管的传热特性[J]. *化工学报*, 2015, 66(6): 2055–2061.
- WANG Ye, JI Xian-bing, ZHENG Xiao-huan, et al. Heat transfer characteristics of loop heat pipe with modulated composite porous wick[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(6): 2055–2061.
- [24] 王 野. 多尺度毛细芯环路热管传热特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- WANG Ye. Heat transfer characteristics of loop heat pipe with multi-scale porous wick[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [25] BAI L, ZHANG L, LIN G, et al. Development of cryogenic loop heat pipes: A review and comparative analysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015(89): 180–191.
- [26] 崔 峥, 王乃华, 程 林. AMS 低温冷却系统环路热管设计与测试[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(8): 1497–1501.
- CUI Zheng, WANG Nai-hua, CHENG Lin. Design and test for the AMS cryocooler loop heat pipes[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(8): 1497–1501.
- [27] WANG N, CUI Z, BURGER J, et al. Transient behaviors of loop heat pipes for alpha magnetic spectrometer cryocoolers[J]. *Ap-*

- plied Thermal Engineering, 2014, 68(1): 1-9.
- [28] 陈跃勇. 180~200 K大冷量低温回路热管的研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.
- CHEN Yue-yong. Study on high capacity cryogenic loop heat pipe working between 180-200 K[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences), 2016.
- [29] 陈跃勇, 牟永斌, 谢荣建, 等. 基于氮化硅陶瓷毛细芯的低温回路热管研究[J]. 红外, 2016, 37(8): 21-23, 28.
- CHEN Yue-yong, MU Yong-bin, XIE Rong-jian, et al. Study of the cryogenic loop heat pipe based on Si₃N₄ ceramic wick[J]. Infrared, 2016, 37(8): 21-23, 28.
- [30] PEREIRA H, HAUG F, SANTOS SILVA P, et al. Cryogenic loop heat pipes for the cooling of small particle detectors at CERN[C]. Tucson (Arizona): AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2010: 1039-1046.
- [31] 刘成志, 杨帆, 董德平, 等. 乙烷双蒸发器低温回路热管的实验研究[J]. 低温与特气, 2012, 30(3): 7-11.
- LIU Cheng-zhi, YANG Fan, DONG De-ping, et al. Experimental investigation on ethane double-evaporator cryogenic loop heat pipe[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2012, 30(3): 7-11.
- [32] 刘成志, 董德平, 杨帆. 乙烷温区低温环路热管设计与实验[J]. 低温工程, 2011(6): 57-59.
- LIU Cheng-zhi, DONG De-ping, YANG Fan. Design and experimental investigations of ethane cryogenic loop heat pipe[J]. CRYOGENICS, 2011(6): 57-59.
- [33] 刘成志, 杨帆, 董德平. 150~250 K温区低温环路热管的降温启动研究[C]. 上海: 上海市制冷学会第八届会员代表大会暨2011年学术年会, 2011.
- LIU Cheng-zhi, YANG Fan, DONG De-ping. Investigation of temperature decrease and starting process of a cryogenic loop heat pipe operating between 150 K-250 K[C]. Shanghai: The 8th Member Representative Conference of Shanghai Refrigeration Society and 2011 Academic Annual Conference, 2011.
- [34] 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(1): 49-52.
- MO Qing, LIANG Jing-tao, CAI Jing-hui, et al. Experimental study of cryogenic loop heat pipe using nitrogen as working fluid[J]. CRYOGENICS, 2005(1): 49-52.
- [35] 莫青, 蔡京辉, 梁惊涛, 等. 槽道热管在加快低温回路热管主蒸发器降温过程中作用的实验研究[J]. 低温工程, 2005(4): 14-17.
- MO Qing, CAI Jing-hui, LIANG Jing-tao, et al. Investigation of the performance of an axial-grooved heat pipe as the secondary evaporator of a CLHP[J]. CRYOGENICS, 2005(4): 14-17.
- [36] MO Q, LIANG J. Operational performance of a cryogenic loop heat pipe with insufficient working fluid inventory[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(4): 519-527.
- [37] MO Q, LIANG J, CAI J. Investigation of the effects of three key parameters on the heat transfer capability of a CLHP[J]. Cryogenics, 2007, 47(4): 262-266.
- [38] MO Q, LIANG J T. A novel design and experimental study of a cryogenic loop heat pipe with high heat transfer capability[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(3): 770-776.
- [39] 杨帆, 董德平. 一种提高低温环路热管主蒸发器降温速率的新方法及实验结果[J]. 低温工程, 2011(3): 34-38, 54.
- YANG Fan, DONG De-ping. A novel method accelerating temperature decreasing speed of main evaporator and experiment result[J]. CRYOGENICS, 2011(3): 34-38, 54.
- [40] KHRUSTALEV D. Cryogenic Loop Heat Pipes as Flexible Thermal Links for Cryocoolers[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002: 709-716.
- [41] KONSTANTIN G, ALEXEY O, VASILY B. Two-phase thermal control loops for cryogenic temperature[M]. Minsk: V Minsk International Seminar, 2003.
- [42] BAI L, LIN G, ZHANG H, et al. Experimental study of a nitrogen-charged cryogenic loop heat pipe[J]. Cryogenics, 2012, 52(10): 557-563.
- [43] BAI L, LIN G, ZHANG H, et al. Operating characteristics of a miniature cryogenic loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(25): 8093-8099.
- [44] DU C, BAI L, LIN G, et al. Determination of charged pressure of working fluid and its effect on the operation of a miniature CLHP[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 63: 454-462.
- [45] BAI L, LIN G, ZHANG H, et al. Effect of component layout on the operation of a miniature cryogenic loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60: 61-68.
- [46] 周顺涛, 莫青, 张红星, 等. 深冷环路热管传热性能研究[J]. 航天器工程, 2010, 19(3): 91-95.
- ZHOU Shun-tao, MO Qing, ZHANG Hong-xing, et al. Experimental study on heat transfer performance of cryogenic loop heat pipe[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(3): 91-95.
- [47] 周顺涛, 莫青, 张红星, 等. 深冷环路热管超临界启动实验研究[J]. 低温工程, 2010(3): 18-21, 60.
- ZHOU Shun-tao, MO Qing, ZHANG Hong-xing, et al. Experimental investigation on supercritical startup of cryogenic loop heat pipe[J]. Cryogenics, 2010(3): 18-21, 60.
- [48] 胡桥. 深冷环路热管的设计与实验[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- HU Qiao. Research on cryogenic loop heat pipes[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [49] BAI L, LIN G, WEN D. Parametric analysis of steady-state operation of a CLHP[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(8): 850-858.
- [50] 马路. 低温环路热管(CLHP)的实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- MA Lu. Experimental investigation on cryogenic loop heat pipe[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [51] 李强, 马路, 宣益民. 低温环路热管(CLHP)的实验研究

- [J]. 工程热物理论, 2010, 31(1): 120–123.
- LI Qiang, MA Lu, XUAN Yi-min. Experimental investigation of cryogenic loop heat pipe[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(1): 120–123.
- [52] ZHAO Y N, YAN T, LIANG J. Experimental study on a cryogenic loop heat pipe with high heat capacity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(15): 3304–3308.
- [53] YAN T, ZHAO Y N, LIANG J, et al. Investigation on optimal working fluid inventory of a cryogenic loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 334–337.
- [54] 柏立战, 林贵平. 深冷环路热管稳态运行特性的理论分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1530–1535.
- BAI Li-zhan, LIN Gui-ping. Theoretical analysis of steady-state operating characteristics of a cryogenic loop heat pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1530–1535.
- [55] GUO Y, LIN G, BAI L, et al. Experimental study of the thermal performance of a neon cryogenic loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 1266–1274.
- [56] GUO Y, LIN G, HE J, et al. Experimental study on the supercritical startup and heat transport capability of a neon-charged cryogenic loop heat pipe[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 134: 178–187.
- [57] T HOANG T, A O'CONNELL T, KU J, et al. Large area cryocooling for far infrared telescopes[C]. California: SPIE Proceedings, Cryogenic Optical Systems and Instruments X, 2003, 5172–5177.
- [58] HOANG T T, O'CONNELL T A, KHRUSTALEV D K, et al. Cryogenic Advanced Loop Heat Pipe In Temperature Range of 20–30 K[C]. Moscow, SPIE Proceedings, 12th International Heat Pipe Conference, 2016.
- [59] T HOANG T, A O'CONNELL T, KU J, et al. Performance demonstration of hydrogen advanced loop heat pipe for 20–30 K cryocooling of far infrared sensors[M]. California: SPIE Proceedings, Cryogenic Optical Systems and Instruments XI, 2005.
- [60] LYONS W C, PLISGA G J, LORENZ M D. Standard handbook of petroleum and natural gas engineering (Third Edition), Chapter 4-Drilling and Well Completions[M]. Boston: Gulf Professional Publishing, 2016.
- [61] MAYDANIK, SOLODOVNIK, FERSHTATER. Investigation of dynamic and stationary characteristics of loop heat pipe[C]. Albuquerque, New Mexico, Proceedings of the 9th International Heat Pipe conference, 1995: 1002–1006.
- [62] 张红星, 苗建印, 邵兴国. 相变材料辅助环路热管启动的实验研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1732–1737, 1743.
- ZHANG Hong-Xing, MIAO Jian-Yin, SHAO Xing-Guo. Experimental investigation on start up performance of loop heat pipes with phase change material containers[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1732–1737, 1743.
- [63] SINGH R, AKBARZADEH A, MOCHIZUKI M. Operational characteristics of the miniature loop heat pipe with non-condensable gases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(17): 3471–3482.
- [64] 何江, 林贵平, 柏立战, 等. 不凝气体对环路热管工作性能的不利影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2377–2384.
- HE Jiang, Lin Gui-ping, BAI Li-zhan, et al. Adverse effect of non-condensable gas on the operating[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2377–2384.
- [65] HONGXING Z, GUIPING L, TING D, et al. Investigation on startup behaviors of a loop heat pipe[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2005, 19(4): 509–518.
- [66] 曲燕. 环路热管技术的研究热点和发展趋势[J]. 低温与超导, 2009, 37(2): 7–14.
- QU Yan. Hot study and development trend of loop heat pipes[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(2): 7–14.
- [67] VERSHININ S V, MAYDANIK Y F. Hysteresis phenomena in loop heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5): 962–968.
- [68] KU J, OTTENSTEIN L, KOBEL M, et al. Temperature oscillations in loop heat pipe operation[C]. Albuquerque: AIP Conference Proceedings, 2001.
- [69] CHEN Y, GROLL M, MERTZ R, et al. Steady-state and transient performance of a miniature loop heat pipe[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(11): 1084–1090.
- [70] LU X Y, HUA T C, LIU M J, et al. Thermal analysis of loop heat pipe used for high-power LED[J]. Thermochimica Acta, 2009, 493(1): 25–29.
- [71] 闫涛, 梁惊涛, 杨鲁伟. 低温回路热管温度振荡现象研究[C]. 合肥: 第九届全国低温工程大会, 2009.
- YAN Tao, LIANG Jing-tao, YANG Lu-wei. A study of temperature oscillation of the cryogenic loop heat pipe[C]. HeFei: 9th National Conference of Cryogenic Engineering, 2009.
- [72] 闫涛, 梁惊涛. 一种可主动控制工作温度的低温回路热管[J]. 宇航学报, 2010, 31(9): 2218–2222.
- YAN Tao, LIANG Jing-tao. A cryogenic loop heat pipe with actively controllable operating temperature[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(9): 2218–2222.
- [73] GULLY P, MO Q, YAN T, et al. Thermal behavior of a cryogenic loop heat pipe for space application[J]. Cryogenics, 2011, 51(8): 420–428.
- [74] GULLY P, YAN T. Thermal management of a nitrogen cryogenic loop heat pipe[C]. Tucson: AIP Conference Proceedings, 2010: 1173–1180.

(丛敏编辑)