

文章编号: 1000-8055(2008)08-2138-10

环路热管的地面实验研究现状

林贵平¹, 李楠¹, 张红星²

(11 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

21 中国空间技术研究院, 北京 100086)

摘 要: 环路热管技术是目前航天器热控制领域内最前沿的热控技术, 而双储液器环路热管更是凭借其正常工作不受蒸发器和储液器方位限制成为航空和民用领域的研究热点. 分析了环路热管及双储液器环路热管的地面实验研究现状; 对可视化实验研究成果进行了总结分析; 针对目前关于环路热管在某些方面的传热机理和运行特性的研究还不够深入, 提出在稳态、动态、主动控温等方面还需进行大量的可视化实验研究, 对一些既往的理论和猜测还有待可视化的验证.

关 键 词: 环路热管; 热控制; 双储液器; 地面实验; 可视化实验

中图分类号: TB131

文献标识码: A

State of the art of ground experiments of loop heat pipe

LIN Guoping¹, LI Nan¹, ZHANG Hongxing²

(11 School of Aeronautic Science and Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

21 China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

Abstract: Loop heat pipe (LHP) is the most advanced heat transfer device in the spacecraft thermal control field, and dual compensation chamber LHP (DCC-LHP) has become hot spot in the aero and ground applications since it can work without the limit of the orientation between the evaporator and compensation chamber. In this paper, the state of the art investigation on ground experiments of LHP and DCC-LHP had been analyzed; the visualized experiments results had been summarized; due to the investigative deficiencies in some aspects of the heat transfer mechanism and circulating behaviors in LHP, more visualized experiments should be carried out for the steady state, transient performance and active thermal control characteristics, and the visualized validation should be made to previous theories and assumptions.

Key words: loop heat pipe; thermal control; dual compensation chamber; ground experiments; visualized experiments

环路热管(Loop heat pipe, 简称 LHP)技术是目前航天器热控制领域内最前沿的热控技术, 它能够通过柔韧的管线快速地将热源热量传送到特定热沉中, 具有传热温差小、传热性能高、远距

离传输热量和控温特性良好等优点. 同时, 整个循环过程依靠自身蒸发器中毛细芯的毛细作用来完成, 不需要额外的动力驱动, 具有更高的可靠性. 鉴于此, 环路热管作为一种新型的热控技术正逐

收稿日期: 2007-02-17; 修订日期: 2007-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(50676006)

作者简介: 林贵平(1966-), 男, 湖北汉川人, 教授、博士生导师, 主要从事飞机环境控制与生命保障技术、飞机防结冰技术及传热传质技术研究.

渐被应用于航天飞行器上,成为高功率航天器上一种有效的热控制手段之一,是各国航天机构的研究热点.

双储液器环路热管 (Dual compensation chamber loop heat pipe, 简称 DCC2LHP) 是一种改进型环路热管,它在蒸发器两侧分别设置一个储液器,巧妙的解决了重力场中液体工质会聚集在下方的储液器而无法浸润毛细芯的问题.使环路热管的正常工作不再受蒸发器和储液器方位的限制,这样就为环路热管广泛应用于航空机载设备及民用领域提供了良好的前景.

双储液器环路热管在飞机综合热量管理中的应用可以使热量得到合理调配,降低飞机能耗,并减少相应热量传输设备的数目.例如传统的飞机防冰系统多采用热气防冰,即利用从发动机压气机引出的热空气作为热源,对发动机唇部及其进气道表面进行加热.很显然,这种防冰系统会对发动机的性能产生不利的影响,不仅增大了发动机的燃油比耗,减小发动机推力,在结构上也增加了发动机进气道的气动阻力.一方面飞机防冰需要热量,另一方面飞机上有很多系统的废热需要排散,如发动机尾气、液压系统、飞机环境控制系统等.双储液器环路热管可以轻松实现利用废热进行飞机机翼、发动机及进气道的防冰,将飞机液压系统和电子设备系统散发的废热利用环路热管自动传输和分配到防冰的区域,避免使用传统的从发动机引气的防冰方式,可以达到降低燃油消耗和系统重量,提高并改善发动机和飞机总体性能的目的.

1 常规环路热管的实验研究现状

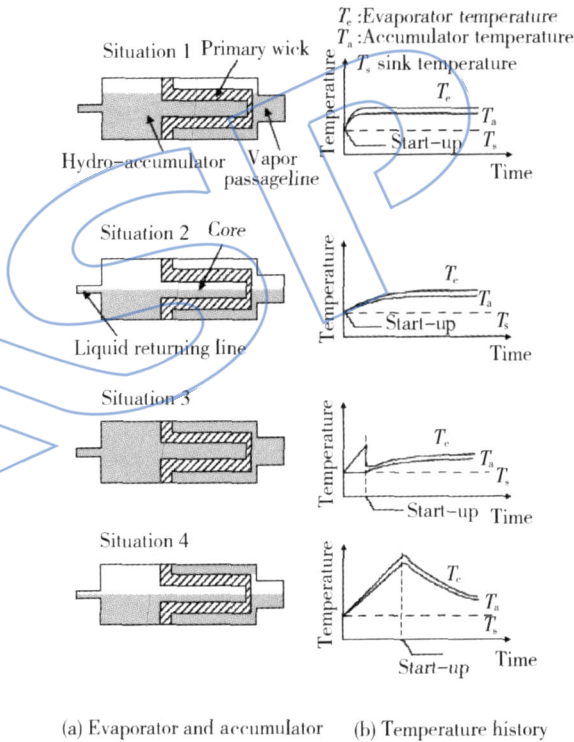
环路热管的研究方法主要包括实验研究、理论分析及应用研究.实验研究可以验证理论分析的正确性,同时又是开展应用研究的前提和基础,在环路热管的研究方法中具有重要的地位.国际上对环路热管的实验研究热点主要集中在航天器热控制应用领域,已发表的文献报道了各种关于常规环路热管的实验研究结果,各有侧重的考察了其运行原理和特性.

文献[1]对一套不锈钢管壳、镍粉芯、氨工质的环路热管进行了一系列的地面实验研究,考察了不同方位、反重力高度、热沉温度下环路热管的稳态运行、启动和动态运行、烧干特性以及对热载荷变化的迅速响应特性等.文献[2]也通过一系列地面实验研究了环路热管的运行机理、温度控制及其传

热特性,分析了环路热管热导随传热功率变化的规律.Yuming Chen 等人通过稳态和瞬态实验验证了微型环路热管在重力场中的运行能力^[3].

1.1 启动特性研究

LHP 在各种条件下的启动特性是人们研究的重点,也是推动 LHP 工程化过程中必须解决的问题.文献[4]第一次描述了环路热管的四种启动方式,指出蒸气槽道存在蒸气而液体干道被液体充满的气液分布状态最容易启动(如图 1 所示).文献[526]指出当把地面的实验结论应用于空间飞行器时,必须考虑微重力对启动的影响,因为这时环路热管内部的气液分布状态具有很多不确定的因素.



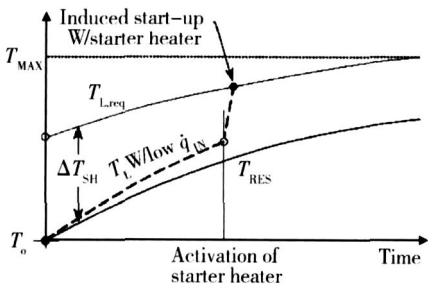
(a) Evaporator and accumulator (b) Temperature history

图 1 四种不同的启动方式

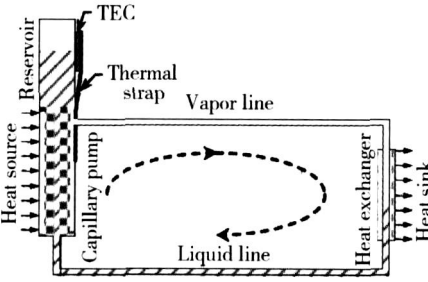
Fig. 1 Possible LHP start-up scenarios

小热载荷的启动一直是制约 LHP 应用的瓶颈,有研究者认为热载荷必须达到最小限值才能发生核态沸腾^[7].从 2003 年开始,美国海军实验室就进行了一系列小热载荷下的启动实验.并针对小热载荷或仪器设备热容较大时 LHP 不能自行启动的情况,应用了具有高热流密度的小型加热器和热电制冷器进行辅助启动,取得了良好的效果^[8](如图 2 所示).Nagai H 等人也对一套应用于全天候 X 光成像仪的双冷凝器环路热管进行了小热载荷下的启动实验^[9].

文献[10]进行了两种方式的启动实验,一种是



(a) 小型加热器辅助启动



(b) 热电制冷器辅助启动

图 2 辅助启动措施

Fig. 2 Induced start-up procedures

传输管线保持室温, 其他部件都处于冷环境; 另一种为所有部件都处于冷环境中. 实验发现, 传输管线保持室温的启动要花费很长的时间, 这种启动方式在开始阶段气液管线中将有大量气体存在, 并导致在随后的几分钟内, 气体都通过液体引管进入了液体干道, 这种方式成功启动的几率很小.

通过以上分析, 可以看出, 现有的实验研究成果对 LHP 的启动特性进行了较为全面的分析. LHP 的启动与输入功率、回路的初始状态、外界条件、回路的放置方式等具有直接的联系, 每一个条件的变化都会引起启动特性的改变^[11].

1.2 不稳定现象的实验研究

环路热管在启动、运行、卸载和停机过程中会出现一系列不稳定现象, 对环路热管的正常运行造成不利的影响. 文献[12]在实验中发现, 较小热载荷和较大热载荷下环路热管容易出现温度波动现象; 冷凝器入口处的温度波动是由于小热载荷下启动芯内工质蒸发引起(如图 3 所示); 冷凝器出口处的温度波动则是由于工质充装量和储液器容积的不匹配(如图 4 所示). 文献[3]观察到了液体管线上的温度波动现象, 作者认为这是由于改变工况后液体管线中出现了气泡.

文献[13]对微型环路热管中的温度波动现象进行了实验研究, 作者认为, 温度波动的表现为气液界面在冷凝器中的位置移动, 同时会引起储液器温度以及液体干道内蒸汽区体积的变化. 该

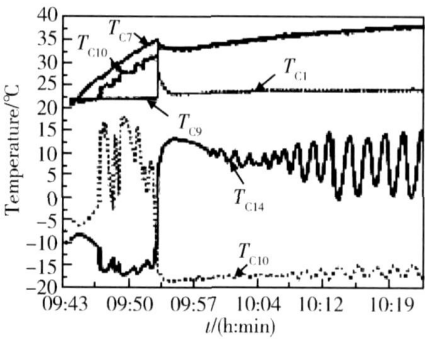


图 3 冷凝器入口处的温度波动
(T_{C14} 为冷凝器入口测温点)
Fig. 3 Temperature oscillation in the entrance of condenser (T_{C14} is the temperature measuring point in the entrance of condenser)

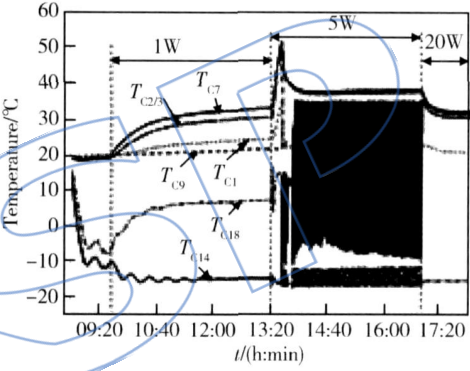


图 4 冷凝器出口处的温度波动
(T_{C18} 为冷凝器出口测温点)
Fig. 4 Temperature oscillation in the exit of condenser (T_{C18} is the temperature measuring point in the exit of condenser)

文作者同时指出, 这种观点仍需要更深入的分析验证, 因为还缺少可视化的实验支持.

文献[14]对温度迟滞现象进行了较为全面的实验分析, 指出温度迟滞的出现是缘于液态工质在储液器和冷凝器中的重新分布. 其原因可分为: 蒸发器中毛细作用的迟滞, 储液器充满液体后的亚稳态以及液体工质在环路热管中的初始分布. 温度迟滞现象如图 5 所示.

可以看出, 关于环路热管的不稳定现象已取得了一定的研究成果, 但大多数对不稳定成因的分析还处于猜测阶段, 需要更深入的研究.

1.3 主动控温特性

环路热管的一个重要特性是具有主动控温能力, 它可以把环路热管的工作温度控制在很狭小的范围内, 适用于要求高精度温度的场合. 文献[15][16]研究了通过加热或冷却储液器对环路热

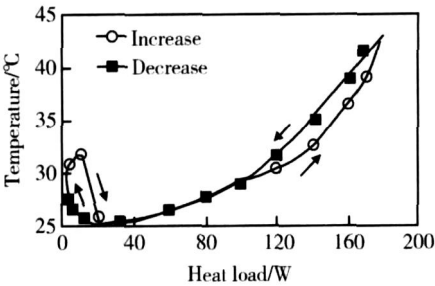


图 5 随热载荷变化所出现的温度迟滞现象
Fig. 5 Hysteresis phenomena with the heat loading change

管进行主动温度控制的方法. 文献[17]进行了用热电制冷器(TEC)对双储液器、双蒸发器环路热管进行主动控温的实验(如图 6 所示). 实验中, 热电制冷器可以通过电流的自动变向实现对储液器的加热和冷却, 以使运行温度得到主动控制. 实验取得了良好的效果, LHP 的工作温度被控制在 $\pm 1\text{ K}$ 的范围内, 并且同传统的电加热器(EH)控温相比要节省 30%~60% 的能量(如图 7 所示). 文献[18]指出对储液器进行主动控温时, 在固定热导区内储液器仍处于饱和状态.

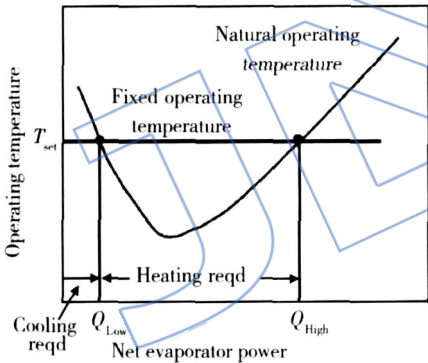


图 6 对环路热管进行主动控温
Fig. 6 LHP operating temperature control

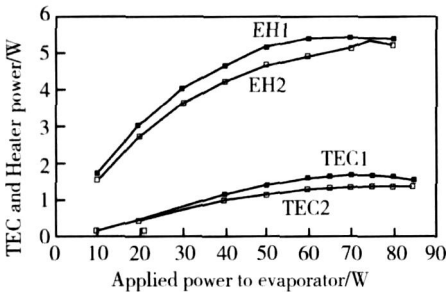


图 7 热电制冷器与电加热器输入功率对比
Fig. 7 Comparison of TEC power and electrical heater power

主动控温是使环路热管走向工程应用的关键技术, 现有的实验研究成果表明了环路热管具有优良的主动控温能力, 展现了其在精确温控方面的巨大应用潜力.

1.4 常规环路热管研究现状总结

综上所述, 已有的实验研究基础和成果揭示了环路热管的一些基本原理和特性, 基于回路内能量和压力平衡的分析已可以对环路热管的大多数原理和特性给出解释. 但是, 环路热管在一些特殊工况和特殊结构形式应用时的运行特性仍不明确, 对某些机理的认识还存在误区或停留在猜测阶段, 如重力辅助姿态下的运行规律、启动和运行时一些特有的动态特性等. 因此有针对性的实验研究仍需进一步开展.

2 双储液器环路热管的研究现状

2.1 国外研究现状

与常规环路热管相比, 双储液器环路热管的研究工作一直开展得十分缓慢. 俄罗斯国家科学院热物理研究所曾为美国空军实验室(AFRL)设计了一套双储液器环路热管, 并通过实验验证了其在不同姿态下均能运行的能力^[19]. 实验考察了双储液器环路热管在四种不同方位下的稳态、动态及启动特性, 并将其中三种方位下的实验结果同俄罗斯热物理研究所的结果进行了对比. 结果表明, 由于装置结构上的一些差异导致系统的热阻增大, 稳态运行温度升高; 当输入热载荷小于 50 W 时, 启动时会出现倒流现象; 当改变热沉温度后, 还伴随有温度波动现象.

文献[20]对两套双储液器环路热管进行了不同重力方位下的实验, 主要考察了不同大小、频率及波形(方波和正弦波)的输入热载荷对环路热管运行特性的影响. 得到了最低和最高的传热极限, 并且发现循环热载荷对于环路热管在小热载荷下的启动具有积极意义.

2.2 国内研究现状

我国也开展了一些关于双储液器环路热管的实验研究. 文献[21]设计并加工了一套双储液器环路热管, 给出了通过储液器体积和工质充装量的匹配设计来避免最难启动的气液分布情形出现的方法. 通过一系列的地面重力场实验研究, 验证了 DCC2LHP 在重力场中运行不受蒸发器和储液器方位限制的特性; 发现了在不同的蒸发器和储液器姿态下(如图 8 所示), DCC2LHP 的控温规

律和运行特性会有所不同(如图 9 所示);实验结果同时表明,在对环路热管建模时,必须考虑回流液体过热量中存在没有补偿透过毛细芯漏热的无效部分.

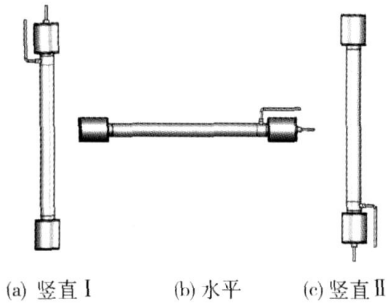


图 8 蒸发器和储液器的三种姿态

Fig. 8 Three orientations between evaporator and compensation chamber

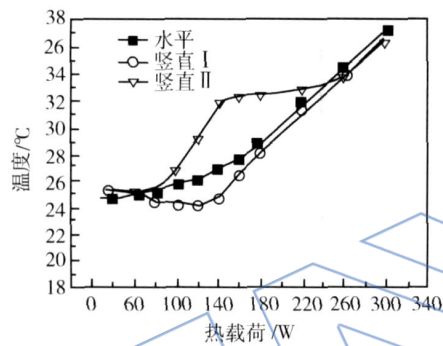


图 9 姿态对稳态工作温度的影响

Fig. 9 Impact of the orientation on steady temperature

文献[22]通过实验研究了双储液器环路热管在三种姿态下的稳态运行特性,验证了其在任何姿态下均可运行的能力,作者认为重力辅助姿态下的工作温度偏低是由系统外回路压降引起的,可变热导区内工作温度随热载荷变化是由储液器内的能量平衡决定的.实验还发现了热载荷递增和递减时的温度迟滞现象及芯内蒸发导致的温度波动现象(如图 10,图 11 所示).

2.3 双储液器环路热管研究现状总结

通过已有的实验结果可以看出,双储液器环路热管在各种姿态下均能运行的能力已经得到实验验证.但同常规环路热管相比,其控温规律和运行特性会有所不同.因此,虽然已开展的工作对双储液器的稳态、启动和各种不稳定现象等有了一定的研究成果,但还不够深入和细致,其结构的优化、不同方位下的启动和运行特性等都还需要更深入的实验研究,许多工作都需进一步开展.

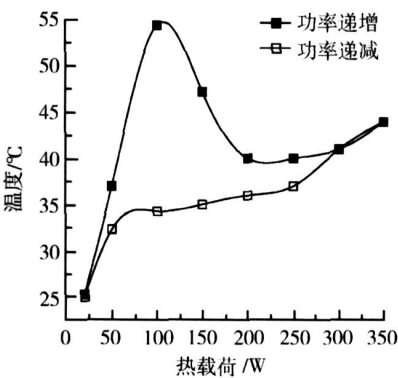


图 10 双储液器环路热管的温度迟滞现象

Fig. 10 Hysteresis phenomena in DCC-LHP

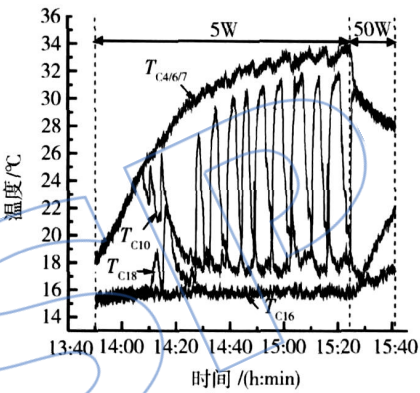


图 11 双储液器环路热管的温度波动现象

Fig. 11 Temperature oscillation of DCC-LHP

3 环路热管可视化研究现状

环路热管的可视化实验研究目前在国内外开展的还比较少,也鲜见有相关文献发表.既已发表的几篇文献对不同类型的环路热管进行了不同程度、不同方式的可视化实验研究,取得了一定的研究成果,同时也为进一步大量开展可视化实验奠定了基础,充分展现了这种实验方法在研究环路热管运行特性方面的重要意义.关于双储液器环路热管的可视化实验研究目前还未见相关文献发表.

3.1 储液器嵌入式环路热管可视化

储液器嵌入式环路热管是对传统环路热管的一种改进.它借助液体干道作为储液器,优化了环路热管的整体结构,使毛细芯的液体供给更为及时和充分,提高了环路热管运行的可靠性.文献[23]中作者对储液器嵌入式环路热管进行了瞬态及稳态数学建模,为了提高模型的精确程度,作者借助储液器局部可视化实验来研究储液器内部的热传和流动特性.

实验方案:蒸发器壳体采用铝制材料,工质为

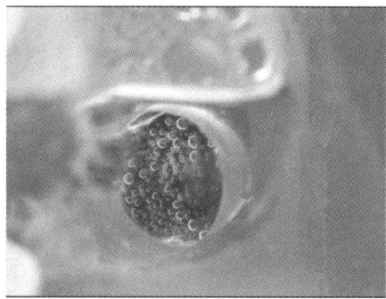


图 16 毛细芯呼吸现象
Fig. 16 Vapor bubbles breathing

3) 核态沸腾现象: 竖直实验中当输入功率很大时, 毛细芯表面发生了核态沸腾现象(如图 17 所示). 同时, 蒸汽管线中的液柱也停止了移动. 作者认为, 一个可能的解释就是大功率下输入的能量全部用于了核态沸腾.

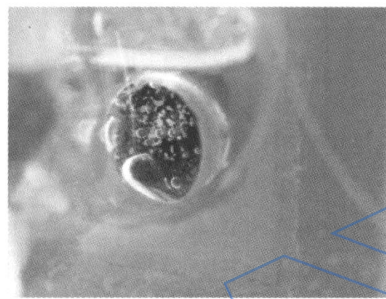


图 17 核态沸腾现象
Fig. 17 Nucleate boiling

4) 毛细芯干涸现象: 实验中观察到了毛细芯的干涸现象. 作者认为, 干涸的形成是受重力方位影响的. 竖直方位下, 只观察到了毛细芯部分干涸现象, 而且并没有造成环路热管停止运行. 而在水平状态下, 发生了毛细芯完全干涸的现象.

3.3 中子放射成像可视化

文献[25]利用中子放射成像技术对单储液器环路热管进行了可视化实验. 作者认为, 利用中子图像可以有效地确定冷凝器中冷却液的分布, 清晰地观察到一些主要部件内的气液状态. 文中指出, 中子放射成像技术对于了解 LHP 的运行特性大有帮助, 可以为 LHP 建模和设计的改进提供可靠依据.

实验方案: 利用中子束发射装置对环路热管的关键部件进行中子照射, 根据不同物质在中子放射成像图中的表现差异对环路热管进行可视化. 其中管壳为铝制材料, 氨作为运行工质, 水为冷却介质. 水和氨很容易进行中子成像, 而铝制管壳在中子成像图中几乎是透明的. 液体和气体由

于密度的差异也很容易观察, 液体表现的暗一些, 而气体更明亮些. 实验中, 气液管线被高高挂起以便于进行可视化观察. 实验装置如图 18 所示.

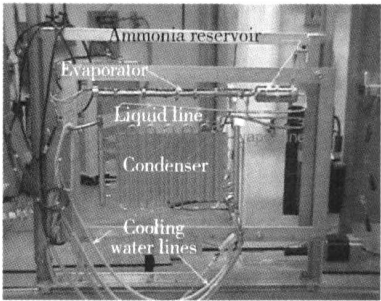


图 18 中子放射成像中用到的环路热管
Fig. 18 LHP used in the neutron radiography

主要结论:

1) 重力对于 LHP 工作特性的影响: 观察到由于重力的负面作用, 冷凝器中不总是充满冷却液, 有时管路中会存在气泡进而影响冷凝器的换热效果(如图 19 所示). 利用中子放射成像图, 可以适时的调整相关设备的方位以消除重力的负面影响, 确保冷凝器管路中总是充满冷却液体.

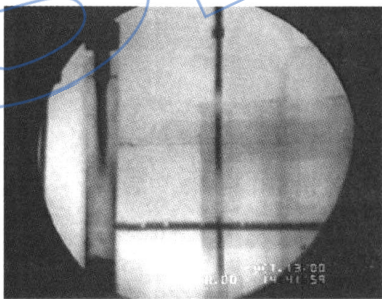


图 19 冷凝器部分充满
Fig. 19 Condenser is partially filled

2) 倒流现象: 作者利用中子放射成像观察到, 当停止对蒸发器输入热载荷时, 会发生瞬态的倒流运行现象. 作者分析认为, 倒流发生的原因是由于停止输入热载荷后, 蒸发器依靠自然对流和辐射向周围环境散热导致内部压力下降引起的.

3) 两相流动状态: 在热沉温度低于 20 e 的稳态运行中, 气液管线中都是单相工质. 但在瞬态过程(调整热沉温度和输入功率后)及较高的热沉温度时, 气液管线中都呈现出两相状态(如图 20 所示).

4) 瞬态特性: 进行了环路热管两种运行模式的实验, 即维持蒸发器恒温 and 定功率输入. 对于前者, 利用反馈装置控制功率的输入以实现恒温模式. 实验中发现, 当停止输入功率时, 蒸发立即停

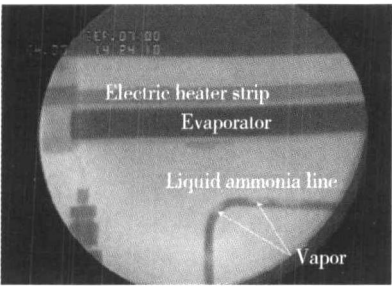


图 20 液体管线中气液两相状态
Fig. 20 Twophase in the liquid line

止并导致倒流的发生,而第二种运行模式则不会出现这种现象.

5) 毛细芯部分干涸:当对环路热管卸载或停机后,由于倒流的发生蒸汽槽道将充满液体,从而在中子成像图中不被显现出来.而当载荷施加后,气体的生成又使蒸汽槽道变得清晰可见(如图 21 所示).利用该实验观测结果,作者认为,采用适当的方法,毛细芯内的干涸现象也可以被观察到.不仅可以观察到干涸发生的位置,也可以观察到毛细芯干涸的程度.

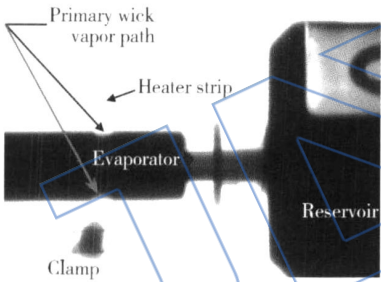


图 21 蒸发器与储液器的中子成像
Fig. 21 Neutron radioscopic image of the evaporator and compensation chamber

6) 冷凝器特性:实验中作者观察到,稳态运行中无论加热功率和热沉温度如何变化,冷凝器中的气液界面总是处于冷凝器的末端.由此,作者得出结论,环路热管在不同的工况下可以通过自身对工质流速、饱和温度和毛细压差的调节实现气液界面始终处于冷凝器的出口.

3.4 可视化研究现状总结

既已开展的可视化实验对不同形式的环路热管的稳态及动态运行特性进行了初步的实验研究,直观地观察到了环路热管的典型现象,如核态沸腾、倒流现象等,并利用观测结果对环路热管的运行机理进行了客观的分析,充分展现了可视化研究方法的重要价值和充分的可行性.但我们也可以看到,目前可视化开展的还很少,相关的研究

成果极其有限,而关于双储液器的可视化研究还未见开展.鉴于此,更加规范、更加具体的可视化实验还有待进一步深入.

4 有待开展的研究

虽然通过大量的实验研究人们已对环路热管的启动过程、运行特点等很多方面有了较为清晰的认识和理解.但在诸如小功率的启动,温度波动以及向大功率负荷应用领域拓宽等方面,仍然需要大量的研究.而目前基于双储液器环路热管的实验研究相对较少,可开展研究的空间很大.因此,广泛开展环路热管,特别是双储液器环路热管的深入研究是十分重要和必要的.

4.1 可视化实验研究

环路热管的可视化实验研究,主要是通过局部可视化,观察在一定的运行状态下其关键部件内的气液分布和转化状态,从而可以更为直观和客观地研究环路热管的传热机理和运行特性.通过实验,可以较为全面的掌握环路热管的启动、稳态以及各种不稳定现象的运行规律,验证理论研究及建模仿真的正确性和准确程度,有助于对其结构形式进行进一步优化和改进.同时,关于双储液器环路热管的实验结论也可以展现其在航空、地面等加速度场中的广阔应用前景.

鉴于目前开展的大多数环路热管实验研究都是借助温度和压力数据,缺少对客观现象的直观显示,所以许多对传热机理和运行特性的分析还缺少充分的依据,甚至停留在猜测阶段.因此,建议大力开展环路热管,特别是双储液器环路热管的可视化实验研究,直观地观察环路热管的运行状态,如储液器内的气液分布、液体引管处的自然对流、芯内蒸发以及冷凝器中气液界面的位置移动等,并利用相关的成像装置进行拍摄记录.最后,利用观察结果结合其他测量数据对环路热管的传热机理和运行特性进行总结分析,为其理论研究和应用研究奠定基础.

4.2 研究内容

通过对研究现状的分析,仍需大力开展的可视化研究工作包括:

1) 稳态运行特性研究:进行可视化环路热管在不同蒸发器和储液器方位、反重力高度、热沉温度、热载荷等条件下的稳态运行实验,通过观察不同稳态工况下环路热管内的气液分布转换状态,更为直观的研究其稳态运行特性.

2) 启动特性研究: 进行环路热管在不同工况下的启动实验. 包括不同的热沉温度和启动热载荷, 不同的设备方位和初始气液分布, 不同的部件初始环境以及发热设备热容和不凝性气体对启动的影响等. 观察不同启动状态下各部件内的气液分布情况, 并采取一定的辅助启动措施, 观察辅助启动时环路热管内气液状态的变化.

3) 不稳定现象分析: 研究环路热管在启动、运行、卸载和停机等过程中出现的一系列不稳定现象, 包括芯内蒸发、温度波动、倒流和温度迟滞现象等. 观察各种不稳定现象发生时环路热管内的气液状态, 更为客观地研究不稳定现象的形成原因.

4) 主动控温特性: 针对目前仪器设备高精度的控温要求, 充分开展各种形式的主动控温实验, 通过可视化分析, 综合比较不同方法的优缺点, 寻找最佳方案.

5) 对既往理论和猜测进行验证: 通过可视化实验可以直观地对一些既已取得的理论和猜测进行确认. 如储液器内液体越多, 工质温度就越低^[26]; 冷凝器中气液界面位置移动引起/固定热导区0的热导发生变化^[18]; 对储液器进行主动控温时, 在固定热导区储液器仍处于饱和状态^[18]; 重力辅助姿态下倒流自运行可能是由于芯内蒸发引起^[18]; 冷凝器进出口温度波动缘于气液界面位置变动^[27]等等.

5 结 论

环路热管作为一种新型的传热装置, 正凭借其各方面的优异性能成为各国航天机构的研究热点, 双储液器环路热管的出现使环路热管的应用从航天走向了航空和地面. 目前, 人们已通过大量实验对环路热管的运行特性有了一定的认识. 本论文针对现阶段国内外环路热管地面实验研究现状, 提出大力开展环路热管, 特别是双储液器环路热管可视化研究的建议, 以期更为直观和客观地研究环路热管的传热机理和运行特性, 为环路热管的理论研究和应用研究奠定足够的实验基础.

参考文献:

[1] Meyer R, Muller R, Beckmann K, et al. Investigation of the heat transfer performance of a capillary pumped ammonia loop under gravity [R]. Society of Automotive Engineers Paper No. 932304, 1993.

[2] 张红星, 林贵平, 曹剑锋, 等. 回路热管性能的地面实验研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(5): 462-472.

ZHANG Hongxing, LIN Guiping, CAO Jianfeng, et al. Ground experimental study on the performance of loop heat pipes [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(5): 462-472. (in Chinese).

- [3] Chen Yuming, Manfred Groll, Rainer Mertz, et al. Steady state and transient performance of a miniature loop heat pipe [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45: 1082-1090.
- [4] Maidanik Y, Solodovnik N, Fershtater Y. Investigation of dynamic and stationary characteristics of a loop heat pipe [R]. Albuquerque, New Mexico: The 9th International Heat Pipe Conference, 1995: 1002-1006.
- [5] Ku J. Operating characteristics of loop heat pipes [R]. SAE Paper No. 19920122007, 1999.
- [6] Kaya T, Ku J. Ground testing of loop heat pipe for spacecraft thermal control [R]. AIAA Paper No. 923447, 1999.
- [7] Douglas D, Ku J, Kaya T. Testing of the geoscience laser altimeter system (GLAS) prototype loop heat pipe [R]. AIAA Paper 9920473, 1999.
- [8] Triem T, Robert W, Kwok H. Star2up behavior of an ammonia loop heat pipe [R]. San Francisco: 3rd International Energy Conversion Engineering Conference, 2005: 1212.
- [9] Nagai H, Muto M, Murakami M. Star2up behavior of double2condenser loop heat pipe [R]. Toronto: 38th AIAA Thermophysics Conference, 2005: 1210.
- [10] Gluck D, Gerhart C, Stanley S. Startup of a loop heat pipe with initially cold evaporator, compensation chamber and condenser [J]. Proc. of 11th IHPC 1999, 1: 362-41.
- [11] 向艳超, 侯增祺, 张加讯. 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.
- XIANG Yanchao, HOU Zengqi, ZHANG Jiaxun. The state2of2the2art of loop heat pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(4): 682-684. (in Chinese)
- [12] 张红星, 林贵平, 丁汀, 等. 环路热管温度波动现象的实验分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(2): 116-120.
- ZHANG Hongxing, LIN Guiping, DING Ting, et al. Experimental investigation on temperature oscillation of loop heat pipes [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(2): 116-120. (in Chinese)
- [13] Jentung Ku, Laura Ottenstein, Mark Kobel, et al. Temperature oscillations in loop heat pipe operation [R]. Albuquerque, New Mexico: Space Technology and Applications International Forum, 2001.
- [14] Sergey V, Yury F. Hysteresis phenomena in loop heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 962-968.
- [15] Maidanik Y, Fershtater Y, Solodovnik N. Design and investigation of methods of regulation of loop heat pipe for terrestrial and space applications [R]. Society of Automotive Engineers Paper No. 941407, 1994.
- [16] Wolf D, Bienert W. Investigation of temperature control

- characteristics of loop heat pipes [R]. Society of Automotive Engineers Paper No. 941576, 1994.
- [17] Jentung Ku, Hosei Nagano. Using thermoelectric converters for loop heat pipe operating temperature control [C]//4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). California: 2006: 128.
- [18] 张红星. 环路热管两相传热技术的理论和实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
- ZHANG Hongxing. Theoretical and experimental investigation of loop heat pipes [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [19] Gluck D, Gerhart C, Stanley S. Characterization of a high capacity, dual compensation chamber loop heat pipe [C]//Space Technology and Application International Forum. Albuquerque: American Institute of Physics, 1999: 943-948.
- [20] Long J B, Ochterbeck J M. Response of loop heat pipes to transient heat loads [J]. American Society of Mechanical Engineers, 1999, 36(4): 363-367.
- [21] LIN G P, ZHANG H X, SHAO X G, et al. Development and test results of a dual compensation chamber loop heat pipe [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal of Thermophysics and Heat Transfer, accepted on 24 Mar 2006.
- [22] 凤键婷, 林贵平, 柏立战. 双储液器环路热管运行特性的实验研究 [C]// 北京航空航天大学第四届研究生学术论坛. 北京: 2007.
- FENG Jianting, LIN Guiping, BAI Lizhan. Experimental investigation on operating characteristics of a dual compensation chamber loop heat pipe [C]// 4th Academic Forum for Graduate Students at Beihang University. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [23] Tetsuro Ogushi, Seiji Haga, Hiroaki Ishikawa, et al. Mathematical modeling for predicting steady state and transient characteristics of reservoir embedded looped heat pipe (RELHP) [R]. Florida: 31st International Conference on Environmental Systems, 2001.
- [24] Junwoo Suh I, Debra Cytrynowicz, Praveen Medis, et al. Flow visualization within the evaporator of planar loop heat pipe [C]//Space Technology and Applications International Forum. United States: 2005: 193-202.
- [25] John M, Jack S, Abel P Q Ya Chuang, et al. Study of a loop heat pipe using neutron radiography [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2004, 61: 701-705.
- [26] Fershtater Y, Maidanik Y. Analysis of the temperature field in the capillary structure of an antigravity heat pipe [J]. Inzhenern i Fizicheski Zhurnal, 1986, 51(2): 203-207.
- [27] 张红星, 丁汀, 邵兴国, 等. 环路热管工作不稳定性的实验分析 [C]// 中国工程热物理年会 2004 年会议论文集. 北京: 北京中科院工程热物理所, 2004: 1092-1098.
- ZHANG Hongxing, DING Ting, SHAO Xingguo, et al. Experimental investigation on instability of loop heat pipes [C]// China Engineering Thermophysics Conference. Beijing: 2004: 1092-1098. (in Chinese)