

空间低温热管的设计与实验研究

朱建炳, 王根生

(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

DESIGN AND EXPERIMENT OF A SPACE CRYOGENIC HEAT PIPE

ZHU Jianbing, WANG Gensheng

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The cryogenic heat pipe is an efficient heat transfer device. It is used for space cryogenic heat transfer technology. An artery wick cryogenic heat pipe with nitrogen as the working fluid developed for spaceborne radiant coolers is described. It is fabricated of stainless steel tube with the diameter of 6mm and the length of 210mm, the operating temperature from 80K to 120K, the maximum heat transfer load reached 2.5W. An experimental investigation is described concerning the heat pipe heat transport characteristics. The results indicate that the heat conduction performance of the cryogenic heat pipe has the advantages of solid conductors at the same volume. It can meet entirely the demands of the low temperature focal plane coupling of the spaceborne radiant coolers.

Key Words: cryogenic heat pipe; radiant cooling; cryogenic heat transfer

摘要: 介绍了为空间辐射制冷器研制开发的一种干道吸液芯氮气低温热管, 该热管直径为 6 mm, 长度 210 mm, 工作温度 80.0~120.0 K, 最大传热功率可达 2.5 W; 并对其传热性能进行了实验研究。实验结果表明低温热管的传热性能远远优于固体的导热性能, 完全能够满足辐射制冷器冷焦面耦合需要。

关键词: 低温热管; 辐射制冷; 低温热传导

中图分类号: O644.2; V444.3⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7086(2000)02-0091-07

1 引言

热管是一种具有高导热性能的传热元件, 根据其工作温度不同可分为高温、中温和低温热管。在空间技术中主要采用中、低温热管作为卫星、火箭、飞船等机件及有效载荷设备的散热、均热和热能输送元件。由于低温热管具有在工作区域传输效率高、能量消耗极小、无活动部件、结构紧凑、较小的体积质量比等突出的优点, 已被作为低温传热的重要手段。欧美等国家和地区, 早已把低温热管作为空间低温传热的首选元件, 被广泛用于航天器热控、空间辐射散热、遥感技术中红外探测器低温制冷及光学元件表面的热控等技术中^[1~10]。

空间辐射制冷器是为新一代地球遥感卫星开发研制的一种长寿命、高可靠性的低温制冷

收稿日期: 1999-08-31

作者简介: 朱建炳(1967-), 男, 甘肃省平凉市人, 工程师, 主要从事低温制冷、低温物性测量的研究。

设备,是卫星有效载荷红外遥感探测系统的关键部件。为了进一步降低辐射制冷器的温度,提高给定温度下的制冷量,适应多元红外探测器阵列的需求,利用低温热管可将安装探测器元件的冷焦面与辐射制冷器远距离分离。这样一方面可以使冷焦面在光学系统中的配准精度易于得到保证,以提高红外扫描仪成像质量;另一方面,可以使冷块产生的冷量能够有效地远距离传输,使辐射制冷器的设计有较大的自由度,并使其获得充分大的冷空间视场,增大辐射制冷器的制冷量。由此可见,低温热管已经成为提高空间辐射制冷器性能的一项关键技术。

应用于空间制冷技术中的热管有刚性和挠性两种类型。由于挠性热管带有一个体积较大的贮气室,这给制冷设备的结构设计带来了一定的困难。因此,采用刚性热管软联接的方案得以实施,以保证冷焦面的光学准直精度。作者介绍了为空间辐射制冷器研制开发的一种氮气刚性低温热管,该热管主要是将红外遥感设备探测器阵列的热量输送到辐射制冷器二级冷块上,以辐射热交换的形式散发到宇宙空间这个无限大的热沉中去,同时将辐射制冷器的冷量有效地输送到红外探测器冷焦面上,保证探测器阵列的工作温度,降低背景噪声。根据辐射制冷器制冷温度和所产生的冷量及红外探测元件正常工作温度要求,该低温热管的工作温度范围为 $90.0\sim 110.0\text{ K}$,热管的传热功率大于 200.0 mW 。对其主要要求是传输效率高、传热温差小(小于 1.0 K),以减少传输过程中的冷量损失,并且要求在地面重力场($1-g$)和空间零重力($0-g$)环境下均能正常工作。

2 低温热管的设计

热管是一种依靠吸液芯毛细力使传热工质在封闭管内进行闭循环的热传导元件,通过内部工质相变传热,因此热管的内部热阻很小,能以较小的温差获得较大的传热功率。影响热管性能的几个主要因素有:(1)管内的工作介质气体;(2)管内吸液芯的结构形式;(3)热管的工作温度;(4)热管的传输功率;(5)热管壳体材料。

2.1 热管工质气体的选择

低温热管是依靠工质气体的相变循环来传热的,因此工质气体的各种物理性质对热管的工作性能有着重要的影响。工质气体的选择一般应考虑以下3个原则:(1)工质气体适应热管的工作温度范围;(2)工质气体与壳体材料、管芯相容,且工质气体具有热稳定性;(3)工质气体有良好的热物理性质。

正常的低温热管工作时,工质气体必然工作在气-液两相状态。因此,所选择的工质气体的液化点应低于热管的工作温度,而临界点必须高于热管的工作温度,热管才能正常工作;同时工质液体的表面张力及汽化潜热要大,表面张力大的液体有助于提高吸液芯在重力环境中的毛细抽吸力;汽化潜热大的工质,在一定传热量的条件下,需要更小的液体流量,以减小液体回流的流动压降。低温热管工作介质的液态与气态密度比率要比其它热管的小,它决定了热管内部液体与气体流通面积的大小。一般来说,低温热管的液体流动截面比其它热管的要大。工质液体的热导率要大,因为当工质液体流动层或吸液芯较厚时,较小的液态热导率将引起热管较大的径向温度梯度,造成热管轴向温差加大。同时液体的动力黏性系数要小,以降低工质的流动阻力。由于工质气体在高温和低温条件下的热物性有了很大的差别,这些性质对工质气体的选择有重要影响。

依据该热管工作条件及上述工质气体选择原则,氧气和氮气均可作为该热管工质;但是,氮气热管在常温下存放压力较低,比较安全,因此选用高纯氮气作为该热管的工质气体。

2.2 热管吸液芯的设计

热管吸液芯的主要作用是产生毛细压差,把工质液体从冷凝段输送到蒸发段,同时把液体分布到蒸发段任何位置。因此,吸液芯的设计是一个十分复杂的问题,也是热管设计的关键所在。从要求提供最大传热功率的观点出发,吸液芯应具有非常小的有效毛细孔半径 r_c ,以提供最大的毛细压力;吸液芯液体的渗透率 K 值要大,以减少回流液体的压力损失;管芯的厚度应适当,导热热阻要小,以减少径向导热损失。同时,选择吸液芯时在满足传热要求的基础上,应注意结构要简单、容易制作。

由于空间低温热管具有传热性能要求高,温度均匀性要好,高可靠、长寿命等特殊要求,通过对金属丝网芯、轴向槽道芯及干道芯等几种吸液芯的性能进行比较,采用了在空间应用最为广泛、特别是在零重力环境下工作性能较好的干道吸液芯,如图 1 所示。这种吸液芯是一种复合式结构,干道和管壳吸液芯之间能较好地相互沟通,除具有较大的毛细力外,由于有干道的存在,可以减小吸液芯的厚度,对于具有低热导率的工质气体氮气,可以降低径向热阻;同时,由于液体是通过干道中回流,使液体流动阻力减小,获得较高的轴向传热能力。热管内壁制成细的螺旋槽道。这种周向细槽既可提供较大的毛细力,又能使液体在热管中周向分布均匀。管壳内表面及干道上衬两层镍铁合金丝网,热管最大毛细抽吸力便由丝网的毛细孔径而定。丝网的有效毛细孔半径 r_c 由下式确定^[11]

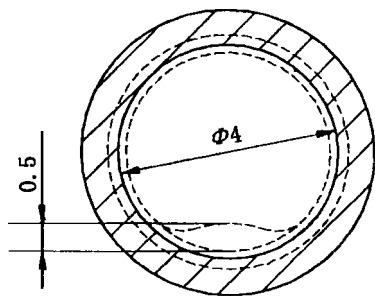


图 1 干道吸液芯结构

$$r_c = 1.36 \frac{t-d}{2} \quad (1)$$

式中 d 为丝径; t 为网格间距。

丝网产生的最大毛细力为

$$P_{c \max} = \frac{2\sigma}{r_c} \quad (2)$$

式中 σ 为液体表面张力系数。

干道吸液芯低温热管应用于空间低温传热时,对工质充装量提出了更严格的要求,过量的工质将使工质液体在气体腔周围流动,影响热管性能;工质量不足使干道管内总不能充满流体而出故障。根据前人实践经验,对于氮气热管在 90 K 充装的液氮量是充液槽容积的 1.05 倍时,热管工作性能最佳。英国雷丁大学 P·D·Dunn^[12] 以此为依据,给出了干道的最大直径

$$D_{\max} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{H^2 + \frac{8\sigma}{\rho_1 g}} - H \right) \quad (3)$$

式中 H 为干道距管底的高度; σ 为液体表面张力系数; ρ_1 为液体密度。

干道吸液芯的缺点是干道内如果产生气泡将阻塞干道,严重影响热管性能,因此必须具有“再启动”能力;同时,对工质气体的充装量及管壳、管芯的清洗提出了更高的要求,以保证完全去除不凝性气体;干道不能与管壳接触。

2.3 管壳材料的选择及管壳设计

热管管壳的作用是把工质与外界环境隔开,因此要防漏、耐压,并进行热量传输。壳体材料

和吸液芯材料的选择首先应满足与工质气体相容性要求,防止材料腐蚀产生不凝性气体,影响热管性能;同时,壳体材料还应满足导热性能和强度要求,并具有良好的焊接性能和机械加工性能。低温热管是在低温条件下进行工质气体的充装,当热管贮存于室温条件下时,热管内部压力将远远大于充装压力,因此管壁选择要足够厚,使其能够承受管内的最大压力。除了满足热管的传热和安装要求外,热管管径要小。为了保证热管单向传热的要求,管壳材料的轴向热导率要尽可能小,而径向热导率应尽可能大,对于同一种管壳材料很难满足此要求,同时选择热管的冷凝段和蒸发段要有足够的长度。壳体壁厚由下式确定^[13]

$$S = \frac{pd_i}{2[\sigma]\psi - p} + C \quad (4)$$

式中 p 为常温下热管设计压力; d_i 为管壳内径; $[\sigma]$ 为材料许用应力; ψ 为焊缝系数,取 0.7~0.8; C 为壁厚附加量。

根据上述管壳材料选择条件,并结合空间辐射制冷器对刚性低温热管材料温度收缩系数要小,以免给冷焦面造成影响的要求,选用了强度高、焊接性能较好的不锈钢作为管壳材料,管内壁制成周向螺纹槽,以保证流体周向分布均匀。

2.4 低温热管的制作及工作过程

该低温热管由热管和铝合金导热法兰两部分组成。热管由外径为 6 mm,管壁厚 1 mm 的不锈钢管制成,长度为 210 mm;蒸发段和冷凝段长度各为 40 mm,冷凝段通过导热法兰与辐射制冷器二级冷块联接。管壳内壁上的周向细槽用细牙丝锥制成,每厘米约 20 槽;吸液芯的制作是先沿管壳内壁敷设两层镍铁合金丝网(丝径 25 μm),确保与管壳之间接触良好;然后把一根适当粗细的芯棒插在丝网层中间,压出如图 1 所示的流体通道来。所有零件在组装前必须进行认真彻底清洗,保证完全去除油污和杂质;焊缝必须严格进行检漏,漏率要求小于 $1.33 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$;热管在充装工质气体前需抽真空除气,然后用液氮预冷,充装要求很高的高纯氮气,在 156.0 K 时充装压力至 7.8 MPa,然后封接充气口。为了保证热管与导热法兰热接触良好,将导热法兰提前热套在热管的冷凝段,并进行焊接。

红外探测元件的热量通过热管的蒸发段进入热管体内,使蒸发段管壁上液氮蒸发变成气体,在气体压差作用下移向热管冷凝段,吸收来自辐射制冷器的冷量又被冷凝成液体,通过干道吸液芯的毛细力作用回流到蒸发段,再次吸收热量释放冷量。热管就是这样周而复始地将辐射制冷器的冷量传输到红外探测器阵列上,降低其工作温度,同时红外元件的热量通过导热法兰的外表面输送到辐射制冷器的冷块上,以辐射热的形式散发到冷黑空间去。

3 低温热管性能实验设备

低温热管的性能实验在空间环境模拟设备内进行,它由环模真空室、液氮热沉、导热铜板及测试设备组成,如图 2 所示。热管冷凝段的导热法兰通过导热铜板与环模设备的液氮热沉联结,并调节铜板使热管处于水平位置。在热沉中加注液氮后,通过缠绕在导热法兰上的辅助加热器控制,使热管的冷凝段保持在 80.0~120.0 K 温度下。在热管冷凝段和蒸发段均装有经过标定的直径为 0.1 mm 镍铬-康铜热电偶,以便比较两端温度。温度通过 DLXJY-1 型温度巡检仪显示并打印。热管的蒸发段装有测试冷量的电加热器,两个电加热器均用直径为 0.2 mm 康铜电阻丝直接缠绕而成,在其外包装绝热保温带及双面镀铝涤纶薄膜,把热量损失降到最

低。加热功率由精密电压/电流表示出。

在热管性能实验前,首先开启环模设备的机械泵和冷凝真空泵,使环模室内达到并维持 2.0×10^{-4} Pa 以上的高真空,减小对流换热对热管性能的影响;然后给热沉加注液氮,一方面提供热管性能实验所需冷量,另一方面用液氮热沉保持热管环境温度稳定。为防止辐射传热对热管传热性能的影响,用多层超级绝热材料将热管全部包裹起来。

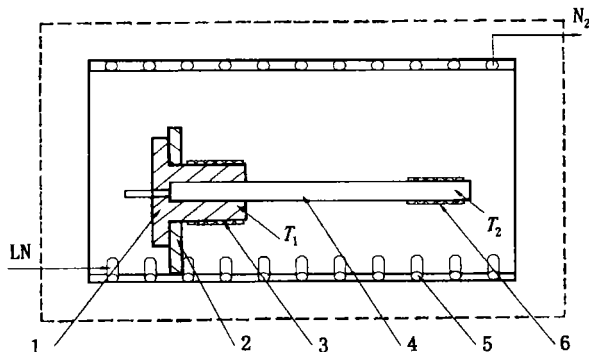


图2 低温热管性能试验装置

1. 导热法兰; 2. 导热铜板; 3. 辅助加热器; 4. 低温热管; 5. 液氮热沉; 6. 加热器。

4 低温热管性能实验结果与分析

低温热管的传热极限是在绝热条件下热管所能输送的最大热量,超过这个极限就会使蒸发段吸液芯产生“干涸”现象而破坏工质的相变循环过程,使热管不能通过工质气体相变循环传热,导致轴向温差增大。这时主要依靠管壁热传导传递热量。热管传热极限主要取决于工作温度和能引起内部循环破坏的其它因素。从使用条件看,低温热管最主要的是毛细限。在热管吸液芯中,当内部气、液体循环流动的阻力和重力势头超过了

最大毛细力时便产生毛细限

$$\Delta p_c \geq \Delta p_l + \Delta p_v + \Delta p_g \quad (5)$$

式中 Δp_c 为热管毛细限; Δp_l 为热管内部液体流动阻力; Δp_v 为热管内部气体流动阻力; Δp_g 为热管重力势头。

在丝网吸液芯中,毛细力主要取决于工质流体的表面张力和丝网的毛细孔大小。对于低温热管,由于流体表面张力很小,因此选择复合干道吸液芯时可使丝网的有效毛细孔足够小,同时可以降低液体流动阻力。

4.1 热管启动特性

由于低温热管在试验前是贮存在常温下,工质气体氮气在常温时为超临界状态。热管的启动是从超临界状态开始,有一个从超临界状态向两相共存状态转化的过程。在这个过程中必须先制冷,使工质气体凝结并放出一定热量,才能使热管启动。因此低温热管与其它热管相比有着不同的启动要求。在低温热管启动过程中蒸发段不能加热,而必须在液氮热沉中加入足量的液氮,通过冷凝段制冷并使工质气体低于临界温度后热管才启动。热管启动后,内部工质气体相变循环工作过程开始,热管温度很快达到均匀,这时可以加上热负载进行试验。

4.2 热管传热性能

低温热管性能实验是通过一系列稳态工作点取得热管的传热极限,传输的热量和工作温度是通过蒸发段和导热法兰上的电加热器控制。热管启动完全等温后即可加热。加热功率逐步增大,调节导热法兰上的加热器功率借以改变热管工作温度。正常情况下,热管的轴向温差小于 1 K,当达到热管传热极限后,热管轴向温差急剧增大,表明工质液体循环已被破坏,通过温度与轴向温差之间的关系可取得给定工作温度下的传热极限。图 3 所示为该氮气低温热管在

水平方向上的传热性能。由图可以看出该热管的有效工作温度范围从 80 K 到临界点 120 K, 传热功率不小于 500 mW, 在 90 K 达到最大传热量 2.5 W。

4.3 热管与固体导热性能比较

低温热管的主要优点是传热效率高, 热阻小, 温度均匀性好。对于固体导热体来说, 当截面一定时, 热阻随长度增加而增大, 而热管的热阻主要取决于穿过蒸发段和冷凝段管壁

及吸液芯厚度方向的热阻, 基本上与长度无关。只要传热距离不是很短, 热管即显示出很大的优越性。将该热管和导热性能最好、与热管具有同样外形尺寸的铜杆导热性能对比发现, 热管的导热性能比铜杆高出一个数量级, 而质量只有铜杆的 1/10。热管的缺点是与固体导热件相比结构比较复杂; 使用时要考虑其热负荷和温度范围; 在地面受重力影响而限制了使用。

5 结论

1) 干道吸液芯氮气低温热管具有较高的传热效率和低的热阻, 有效工作温度范围 80.0~120.0 K, 在 90.0~110.0 K 范围内轴向温差小于 0.5 K, 传热功率不小于 1.0 W, 最大传热功率达 2.5 W, 完全能够满足空间辐射制冷器冷量传输的要求。2) 当低温热管温度下降到临界温度以下方可启动; 低温热管主要依靠工质气体的相变循环传热, 与固体导热相比具有较高的传热效率和温度均匀性, 且质量较轻, 适合空间低温传热要求。3) 我国在低温热管技术的开发研究方面起步较晚, 制造技术较落后, 在低温热管开发应用技术方面正处于探索性阶段。作者在这方面进行了初步的探索, 对于低温热管的开发应用还需要进一步深入地研究, 特别是在航天技术中, 零重力场对低温热管启动性能和传热性能的影响是一个很重要的因素, 这方面研究还是一片空白。

致谢: 在设计过程中得到了俄罗斯国立热能技术工厂的 Rybkin B I 先生许多有益的帮助, 热管的加工制作全部在俄罗斯国立热能技术工厂完成; 在性能实验过程中又得到了兰州物理研究所的潘雁频、王少臣、姜继善、于秀明、逢伟、胡成贵、马吉祥等同志的大力支持, 在此表示真诚地感谢。

参考文献:

- [1] DEVERALL J E, KEMME J E. Satellite heat pipe[R]. USAEC Report, LA-3278, 1970.
- [2] TURNER R C. The constant temperature heat pipe—a unique device for the thermal control of spacecraft components[C]. AIAA 4th Thermophysics Conf, 1969; 379~410.
- [3] HASSAN H, ACCENSI A. Spacecraft applications of low temperature heat pipe[C]. 1st Int Heat Pipe Conf, 1973; 890~912.
- [4] REAY D A, SUMMERBELL D. The development of heat pipes for satellites[C]. 1st Int Heat Pipe Conf, 1973; .

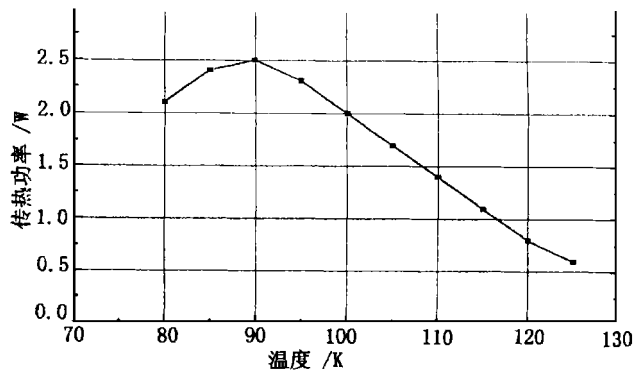


图3 氮气干道低温热管传热能力

1109~1131.

- [5] WRIGHT J P, PENCE W R. Development of a cryogenic heat pipe radiator for a detector cooling system [C]. ASME Paper, 73-ENAS-47, 1973.
- [6] MURRAY D O, FOSTER W G. A cryogenic heat pipe for satellite sensor cooling [C]. ASME Paper, 73-ENAS-50, 1973.
- [7] SAVAGE C J, AELDERS B G M. Development of a technological model variable conductance heat pipe radiator for marots type communication spacecraft [C]. The 3rd Int Heat Pipe Conf, 1978, 479~493.
- [8] ANTONIUK D, POHNER J. Development of an oxygen axial groove heat pipe for a microgravity flight experiment [J]. AIAA, 1991, 91, 1357.
- [9] BRENNAN P J, THIENEL L, SWANSON T, *et al.* Flight date for the cryogenic heat pipe experiment [J]. AIAA, 1993, 93, 2735.
- [10] FLEISCHMAN G L, GIER K D, WONG L S. Heat pipe performance in spsce technology experiment [J]. AIAA, 1994, 94, 2030.
- [11] 马同泽, 汪肇平, 赵嘉琪. 热管网状毛细芯毛细力及渗透率研究[J]. 工程热物理学报, 1980, 1(2): 85~99.
- [12] P D 邓恩, D A 雷伊. 热管[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [13] 庄骏, 徐通明, 石寿椿. 热管与热管换热器[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- [14] 侯增琪, 华诚生, 郭舜, 等. 槽道热管性能研究及其应用[J]. 宇航学报, 1980, (1): 36~49.

中国真空学会 2000 年主要学术活动计划表

序号	会议名称	主要内容	时间	会期	地点	联系人	电话
1	21 世纪中国真空科技创新学术研讨会	邀请各领域的有关专家、学者、工厂技术负责人作国际同类产品的发展情况综述报告, 讨论国内外差距和本领域的创新方向和要求。	三季度	2 天	待定	薛增泉 于 溥	(010)62751769 (024)24110136
2	薄膜产品产业化研讨会	讨论薄膜产品应用和产业化, 推动薄膜技术的发展	9 月或 10 月	3 天	杭州	谭 宁 周思平	(010)65816296 (010)68878447
3	真空技术推广应用研讨会	向西北地区用户宣传普及真空技术, 开拓真空市场	三季度	3 天	兰州 太原	周思平	(010)65816296 (010)68878447
4	质谱与检漏专委会第十周年会	质谱与检漏方面的学术交流	秋季	3 天	厦门 东莞	陈许旭	(010)62782113
5	获得与测量学术交流会	交流真空获得与测量及其应用	10 月	3 天	待定	孙 京	(024)24809925 - 2041
6	电子材料与器件学术交流会	电子材料与器件方面的学术交流	9 月或 10 月	3 天	待定	王保平	(025)3792449
7	展望 21 世纪纳米科学学术研讨会	纳米表面科学方面的学术交流	9 月	3 天	北京	周均铭	(010)62551205
8	真空科技继续教育培训班	1. 真空科技理论基础 2. 真空科技高新技术	11 月	2 周	南京	江 南	(025)3792764
9	全国中学生真空科技夏令营	普及真空科技知识	7 月 20 日 至 25 日	5 天	厦门	祁 健	(0931)8267121 - 5387
10	真空技术培训班	讲述真空技术理论及实习操作	6 月	10 天	北京	邱稚琼	(010)68878447

(中国真空学会办公室方莉莉供稿)