

文章编号: 1672-8785(2016)08-0021-03

基于氮化硅陶瓷毛细芯的低温回路热管研究

陈跃勇^{1,2} 牟永斌¹ 谢荣建¹ 董德平¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 利用氮化硅陶瓷多孔材料作为毛细芯设计了一种以乙烷为工质的低温回路热管样机, 并对其降温及传热性能进行了研究。试验结果表明, 通过在蒸发器上施加 4 W 的热量, 这种低温回路热管能够在常温下实现启动, 并能顺利实现降温; 在降温过程中, 通过不断增大加热功率, 可以加快低温回路热管的降温; 当蒸发器的温度为 190 K 时, 该样机可以稳定传输 30 W 的热量。

关键词: 氮化硅; 陶瓷; 乙烷; 低温; 回路热管

中图分类号: TB6; TK1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.08.004

Study of Cryogenic Loop Heat Pipe Based on Si_3N_4 Ceramic Wick

CHEN Yao-yong^{1,2}, MOU Yong-bin¹, XIE Rong-jian¹, DONG De-ping¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By using the Si_3N_4 ceramic porous material as a wick, a cryogenic loop heat pipe prototype which uses ethane as its working fluid is designed. The cool-down and heat transfer performance of the prototype is studied. The experimental results show that this cryogenic loop heat pipe can operate at room temperature and realize cool-down smoothly when 4 W heat is applied on the evaporator. In the cool-down process, the cool-down of the cryogenic loop heat pipe may quicken with the increase of heat power. When the temperature of the evaporator is 190 K, the prototype can transfer 30 W heat stably.

Key words: Si_3N_4 ; ceramic; ethane; cryogenic; loop heat pipe

0 引言

随着我国航天技术的飞速发展, 人们对空间红外/光学探测技术的需求日益增加, 空间光学成像/探测系统也越来越多。除了红外焦平面探测器需要采用制冷装置之外, 部分或全部光学部件也需要在低温条件下工作, 以降低背景

辐射。作为一种高效的两相换热设备, 低温回路热管利用工质在蒸发器内蒸发并吸收热源的热量来产生蒸气, 然后蒸气经气体管线流入到冷凝器中冷凝成液体并向冷源释放热量, 最后冷凝液在毛细芯产生的毛细力的驱动下流入到蒸发器中完成循环。与传统的热管相比, 低温回路热管的毛细结构只存在于蒸发器中, 其蒸气和

收稿日期: 2016-04-13

作者简介: 陈跃勇(1988-), 男, 河南许昌人, 博士研究生, 主要研究方向为空间载荷高效热控技术。

E-mail: chenyy@mail.sitp.ac.cn

液体通过两条不同的光滑管路流动, 适合各种空间布局, 能够实现热量的远距离传输和降低制冷机对红外/光学系统的振动, 因此是一种优势巨大的空间光学热控技术^[1]。在深低温领域, 尤其是围绕近红外和中波红外探测器的制冷需求, 液氮温区低温回路热管是一种非常好的方案, 因而很多学者对其进行了研究。例如, 杨帆等人^[2]设计了一种最大传热能力为 6 W 的具有螺纹槽道的液氮温区低温回路热管。周顺涛等人^[3]设计了一种液氮温区低温回路热管并对其进行了实验研究。结果表明, 这种深低温回路热管能够实现超临界启动, 并且对周期性载荷具有很好的适应性。为了满足高精度和高灵敏度红外探测的应用需求, Hoang T T 等人^[4]设计了一种可满足红外探测系统在水平和垂直两个方向上转动需求的具有万向节结构的先进回路热管。在中低温光学应用领域, 刘成志等人^[5]设计了一种传热能力为 16 W 的使用乙烷作为工质的双蒸发器低温回路热管。

1 实验装置

针对金属粉末烧结毛细芯的热导率较高而造成毛细芯径向漏热较大的问题, 我们采用了热导率相对较低的高性能氮化硅陶瓷毛细芯 (见图 1)。与传统低温回路热管使用的镍粉等金属毛细芯相比, 这种毛细芯利用 β -氮化硅晶柱烧结, 因而具有较高的孔隙率和通孔率; 而且陶瓷



图 1 氮化硅陶瓷毛细芯

芯的脆性较大, 表面加工后微孔不会堵塞; 通过机械加工方法制作符合尺寸精度要求的形状, 可以实现与蒸发器管壳的良好配合。而金属毛细芯则无法进行加工; 由于在烧结过程中, 毛细芯的外形变化不一致, 导致与蒸发器管壳很难配合。传统的低温回路热管使用的蛇形盘管冷凝器是将不锈钢等金属管线加工成蛇形构型, 并将其与紫铜板焊接而成的。其重量大, 尺寸大, 且热阻较高。为了满足轻量、高效的空间应用需求, 我们在综合考虑微通道换热器换热效率高、结构紧凑等优点后, 创新性地设计了一种微通道冷凝器结构。其加工工艺是在一块紫铜块上切割出间距很小的肋片, 并通过真空钎焊将其与另一块有对应凹槽的紫铜块焊接成一体, 使肋片与下板之间形成流道。与蛇形盘管冷凝器相比, 该结构重量轻, 尺寸小, 热阻低。其他部件的材料均为不锈钢。表 1 列出了这种低温回路热管各部件的具体尺寸。图 2 所示为实验时各部件的测点布置情况。

2 实验结果及讨论

2.1 降温过程

在实验中, 我们使用乙烷作为工质。根据美国国家标准与技术研究院的 REFPROP 物性查询软件可知, 乙烷的临界温度为 305 K。因此, 在室温状态下, 低温回路热管内的工质处于两相状态。在常温下对蒸发器进行加热, 即可实现低温回路热管的启动。因为乙烷低温回路热

表 1 低温回路热管各部件的尺寸参数

部件	尺寸 /mm
蒸发器	$\Phi 23/\Phi 20 \times 85$
毛细芯	$\Phi 20/\Phi 8 \times 80$, 孔径为 $1 \mu\text{m}$ 孔隙率为 0.55
补偿器	$\Phi 23/\Phi 21 \times 60$
液体引管	$\Phi 7.8/\Phi 3 \times 120$
液体管线	$\Phi 3/\Phi 2 \times 1000$
气体管线	$\Phi 3/\Phi 2 \times 1100$
冷凝器	$45 \times 45 \times 6$, 槽宽为 0.5 mm 槽深为 2 mm, 共 36 条流道

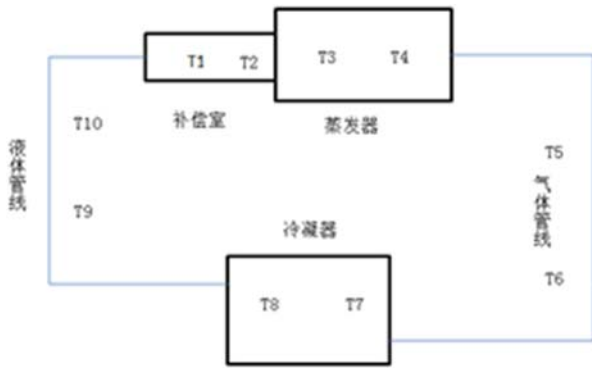


图 2 低温回路热管的结构布局及测点布置

管的工作温区为 180 ~ 200 K，所以需要进行真空低温试验。当低温回路热管运行时，由于真空室内的温度为室温，各部件正常工作时的温度远低于室温。为了减少辐射漏热，我们在低温回路热管进罐之前，用 30 层镀铝聚酯薄膜隔热材料对各部件进行了包扎。

在正常工作之前，低温回路热管需要经历一个降温过程。图 3 所示为本文设计的低温回路热管的降温曲线。在系统真空度达到 1×10^{-3} Pa 后，向系统提供液氮，使冷凝器降温；经过近一个半小时的降温之后，冷凝器的温度达到并稳定在 170 K。先对蒸发器施加 4 W 的功率。从图 3 中可以明显看出，液体管线温度在测点 T9 和 T10 处迅速降低，说明此时蒸发器内的工质开始蒸发，产生的蒸气经气体管线输到冷凝器后推动冷凝液进入到液体管线中。在液体管线降温的同时，蒸发器、补偿器和气体管线先经历升温

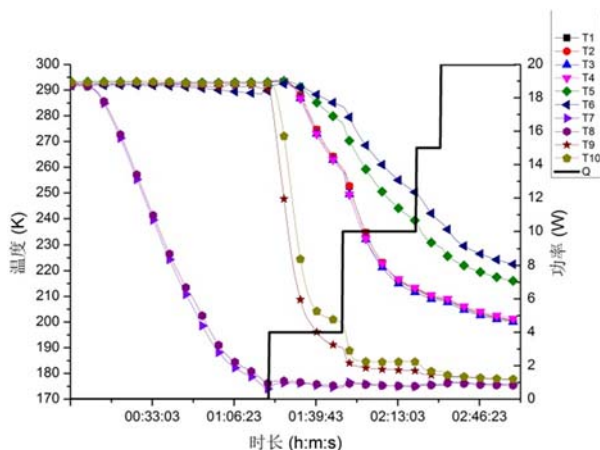


图 3 低温回路热管的降温过程

后再开始降温，说明随着蒸发器的不断加热，有越来越多的冷凝液进入到蒸发器核心之中。随后根据降温速率，不断增加蒸发器的加热量 (10 W ~ 15 W ~ 20 W)；在施加 20 W 功率半个小时之后，蒸发器的温度降至 200 K，至此降温过程基本完成。

2.2 30 W 性能研究

在降温过程完成后，将蒸发器的加热功率增至 30 W。图 4 所示为 30 W 加热功率下低温回路热管的温度变化曲线。可以看出，蒸发器、补偿器和气体管线的温度持续降低；加热 40 min 后，各部件的温度达到平衡，说明此时低温回路热管处于稳定的工作状态。

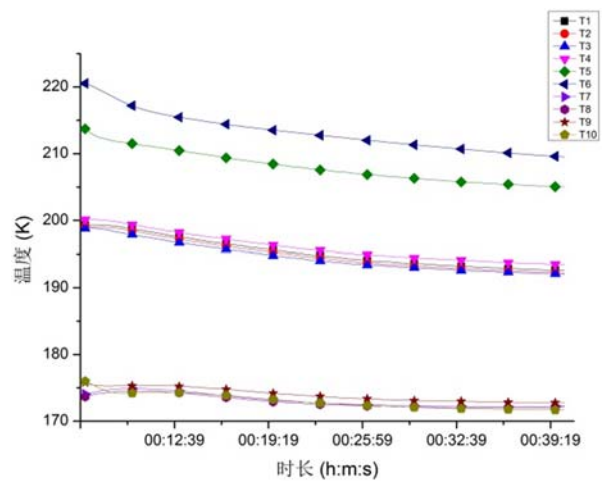


图 4 30 W 下低温回路热管的各点温度曲线图

3 结束语

我们利用氮化硅陶瓷多孔材料作为毛细芯自行研制了一种以乙烷为工质的低温回路热管。通过对该低温回路热管的降温及传热性能进行研究，可以得出以下结论：

(1) 这种低温回路热管能够在常温下实现启动，并能顺利实现降温。在降温过程中，通过增大加热功率，可以加快回路的降温。

(2) 这种低温回路热管在 190 K 下能够稳定传递 30 W 的热量。

(3) 与金属毛细芯相比，氮化硅陶瓷毛细芯存在的不足之处是热扩散系数较大，造成低温回路热管的启动时间长，且温升较大。

(下转第 28 页)