

热管文集

中国科学院北京力学研究所

上海科学技术情报研究所

热 管 文 集

中国科学院北京力学研究所

*

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 6 字数: 145,000

1976年5月第1版 1976年5月第1次印刷

印数: 1—6,250

代号: 151634·285 定价: 0.75 元

(只限国内发行)

序 言

热管是新近出现的一种具有很高导热性能的元件，自一九六四年美国格罗弗等人发表第一篇论文以来，美国、西德、英国、苏联、日本等世界各国先后开展了大量的实验和理论研究工作。热管最早用于宇宙航行中的热控制，空间能源内之热传递以及电子设备的冷却，近来已有效地应用于国防和民用工业的各个部门。

通常，热管由管壳、起毛细管作用的多孔结构物——管芯以及传递热能的工作液体等构成，组成一个高真空封闭系统。其工作原理是：当加热热管的蒸发段时，在管芯内的工作液体即蒸发，并带走潜热，蒸汽从中心通道流向热管的冷凝段，凝结成液体，同时放出潜热；在毛细力的作用下，液体又流回蒸发段。这样，完成了闭合循环，从而将大量的热从加热区传到散热区。此外，还有离心力热管或称旋转热管（它是利用离心力作用回流凝结液的）；电渗透热管（利用电渗透压力回流凝结液）；电流体动力学热管（利用设化电流体动力学力作用回流凝结液）；重力热管（在重力场中，采用重力回流凝结液）。不过目前大量的热管还是利用管芯的毛细管现象，这是迄今为止的最有成效的一种方式。

由于热管的工作原理主要是利用介质的相变过程，所以它比任何金属导体的传热能力要大得多，它的导热系数可以超过铜、银的几倍到上千倍。轴向温度降落很小，在冷却方式主要是辐射散热的情况下，接近等温运行。此外，热管还具有结构简单，无运动部分，工作可靠，体积小重量轻等一系列优点。

热管的结构形状可以是各式各样的，因应用对象而异，可以是直管、弯管、板形、叉形、汽室形，或者蒸发器与凝结器径向布置，或者由多根热管组成管族换热器等。

热管的管壳、管芯和工作液体的选择，主要由热管的工作条件，特别是工作温度来确定。因为热管应用的温度范围很广（可以从 -200°C 到 2200°C ）和用于多种多样的场合，因此结构材料和工作液体的选择范围也是很大的。对高温热管（温度在 350°C 以上者），管壳与管芯材料可选用镍铬钢、镍、铌、钽、钛、钼、钨等及其合金，工作液体可以选择铯、钾、钠、锂、钡、铅、铟、银等。对中温热管（大约 $50\sim 350^{\circ}\text{C}$ ）和低温热管（温度在 50°C 以下），管壳与管芯材料可选用铜、不锈钢、铝、镍等，工作液体可选择水、水银、氨、氟里昂、氮以及某些有机化合物。

热管材料与工作液体的选择要考虑化学相容性。若选择适当，且真空度高，清洁与装配工艺良好，则热管的寿命可达数千甚至数万小时。

热管的出现虽然还仅仅十余年，但由于它的工作温度范围很大，因此它的应用是极其广泛的。

按照热管的特点,即热管所起的作用通常可分为五个应用方面。1. 等温恒温。利用热管等温的特点,例如用于各种宇宙飞行器的热控制。2. 能量传递。如各种电子设备的散热。3. 热流密度变换。如变换由放射性同位素发生的低热流为热离子转换器工作所要求的高热流。4. 产生恒定的热流,即用来恒定由不稳定热源供应的热流量变化。5. 单向输热或称做热二极管。如用于太阳能贮热的单向热管。

热管的具体应用如下:

宇宙飞船或卫星在太空飞行中,太阳照射面与阴暗面的温差甚大,这是飞行体外壳热应力所不允许的,采用热管后可减少这个温差,例如宇宙飞船在10米周边的外壳上缠上长热管,温差可以从 275°C 减少到 44°C 。此外,热管用于宇宙飞行器内电子设备的散热,可使散热器重量轻,散热量大。热管用于空间能源中之能量传递甚为优越,如一种空间用太阳热离子转换器,采用热管后可以使重量从320克减小为78克。空间用核燃料电池采用热管后可以使反应堆外表面上的热流密度增大,使反应堆有较高的热功率,单位功率重量轻,可以自由选择热离子转换器的工作温度等优点。

热管用于冷却火箭发动机,可以改进冷却效果,使通过火箭喷管喉部壁面的尖峰热流密度拉平,从而降低喉部壁面的温度梯度,使它不易被烧毁。

在裂变反应堆中,可以用热管来将核燃料放出的热通过辐射屏蔽区传递到换热器,这种用热管冷却的核反应堆空间动力装置,具有简单、元件重复、安全可靠和运行自动化等优点。在可控核反应堆中,采用热管组件再生区能克服结构翘曲等严重问题。

热管用于热电发生器,雷达天线罩热保护,以及用于积累低温同位素冷却发动机系统中之能量传递等,都是较为理想的。此外,热管用于自动武器冷却,高速飞机涉及的散热问题,以及军舰上的散热等。

热管在电子设备方面的应用例子是很多的。如用来冷却行波管,功率放大器,四极管,半导体器件,各种电子组件,整流器和发射机等电子设备。印刷电路板在绝大多数情况下,可以在其周围用小管状热管冷却。在某些电子设备中,热管可作为整体结构的一部分,如应用于微波天线。

大功率电动机转子可以采用旋转热管来冷却。电器开关用热管冷却也有良好的效果。热管用于电容器冷却可以大大改善能量储存,减少电容器的体积和重量,使部件的工作可靠性提高。

在机械工程方面,采用旋转热管可以冷却高速钻头、重负荷轴承与齿轮等旋转件的摩擦热,也可以用于涡轮发动机的叶片冷却。切削工具用热管冷却(工具体内钻孔构成热管),可以提高切削速度,改善冷却情况。

各种摩擦力型和电磁型刹车与离合器采用热管散热,可以制造体积小,容量大和成本低的刹车与离合器。

热管用于热工测量上也是多方面的，例如利用热管原理，可以用相当简单的设备测量出处于 600°C 以上温度和 500 毛以上压力下的金属蒸汽压力。热管还可用于物体高温（如 $800\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ）导热率的精确测量。

在化工方面，从强放热反应器，催化反应器，高温热解或等离子化学反应中进行等温导热或冷却，以及用来控制流程温度或炉子温度等。干燥或者硫化过程也可以采用热管心轴构成圆筒来实现。

在连续铸造中，采用径向热管冷却铸锭可以提高生产的安全可靠性。在硬模铸造和喷射铸模中，热管作为型心套，由于凝固冷却时间缩短，可大大提高生产率。

此外，热管还可用在食物保存、冷冻手术刀、空调设备，地热发电的热交换等方面。

随着现代科学技术的不断发展，人们对于热管的认识将逐步深化，热管的性能将进一步提高，应用范围也将会不断扩展。

我国对热管的研究还刚开始不久，中国科学院北京力学研究所从一九七二年起开始了对热管的研究，并取得了一定的成绩，如从用于电子设备散热的初步试验情况来看，效果是显著的。重庆大学用热管散热器冷却可控硅整流器，也收到了良好的效果。

为将热管这一新技术尽快地应用于我国国防和工农业生产的有关领域，现将中国科学院北京力学研究所最近几年对热管进行的研究成果汇集成册，以供有关的工人、革命干部、科技人员和高等院校师生参考。

由于水平有限，错误之处请批评指出。

一九七六年三月

目 录

钠热管初步实验.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组	(1)
钠热管性能实验.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组	(8)
复合芯子钠热管性能实验研究.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组	(20)
三种常温径向热管的实验研究.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组	(38)
径向水热管应用于速调管收集极冷却的设计与实验.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组	
.....	中国人民解放军 1905 研究所 D2021 设计组	(51)
200 安培风冷		
100 安培自冷	硅整流元件热管散热器的研制.....	
.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组	(66)
风冷 500 安培可控硅热管散热器的研制.....		
.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组	(75)
各向同性热管芯子中的液体流动规律.....		
.....	中国科学院北京力学研究所热管研究组张保栋	(81)

钠热管初步实验

中国科学院北京力学研究所热管研究组(1973年7月)

钠热管是工作在 $500\sim 900^{\circ}\text{C}$ 的碱金属热管。由于金属钠具有良好的物理性质,即汽化潜热、表面张力、导热系数和润湿能力都比较高,粘度相对较低,还有合适的饱和蒸汽压——温度曲线,因此以金属钠作为工作介质、并有良好的毛细结构(管芯)的热管可望得到很高的传热效率和良好的等温性。可以预计钠热管将在大能量传输和等温插件等方面得到广泛应用。作为研究工作的第一步,首先必须对钠热管进行原理性实验。本文叙述第一根钠热管的实验结果,包括热管的初步运行,在辐射散热情况下轴向温度分布的测量以及热管传递功率的测量。测试结果热管在辐射散热时工作温度达 680°C ; 在冷凝段带冷却水套时传递功率达 1688 瓦,这时工作温度为 610°C 。

热管的制备

1. 热管的结构

如图 1 所示,热管壳体由一根外径为 26 毫米、壁厚 2 毫米和长 510 毫米的不锈钢管和两端的封头构成,毛细结构用 120 目的不锈钢丝网卷成。毛细结构内、外径的最佳比值 $r_v/r_w = \sqrt{\frac{2}{3}}$ 考虑^[1],网格的层数为 7,总厚度 1.25 毫米,卷后点焊成整体。在尾端封头上接有一根外径 8 毫米的经过退火处理的镍管,用以灌注钠和最后封接。

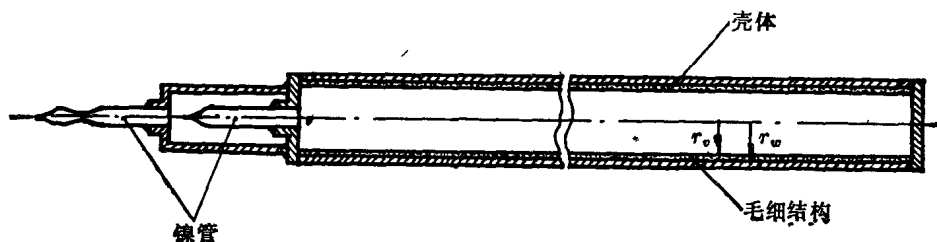


图 1 钠热管结构

2. 热管的制造工序

a. 清洗: 为了保证热管的正常运行,在组装前对所有零件都进行严格的清洗。清洗是在专门的不锈钢清洗槽中进行的。洗液有三氯乙烯,酒精,酒精、过氧化氢与氢氧化钠的混合液,盐酸、硝酸和蒸馏水等。按一定的顺序进行清洗,最后在无尘土和油脂的环境中干燥,然后密封保存。

b. 组装: 把卷好的毛细芯子装入壳体使之贴近内壁面,然后加上封头进行焊接。所有焊

接均用氩弧焊。焊接时焊缝部分的内外侧均需用氩气保护,以防止氧化。对所有焊缝都要进行真空检漏,漏气率不大于 10^{-8} 毛-升/秒。

o. 除气: 组装后整个部件在 900°C 下进行真空除气,以排除金属中含有的气体,如氢、氧等。除气在真空除气炉中进行。在整个除气过程中真空度应不低于 5×10^{-6} 毫米汞柱。为此必须控制升温速度,并在部件冷却到 150°C 以前不应停止抽真空,以免部件氧化。

d. 灌钠: 灌钠前热管部件接到灌注系统进行预抽真空,真空度为 10^{-6} 毫米汞柱的数量级,然后充以少量氩气,关闭高真空阀,使系统保持静真空。加热贮钠罐中的固体钠,此种钠预先经过净化处理,含氧量在 20ppm 以下。固体钠熔化后开启钠阀,利用压力差把液体钠灌入热管内。灌入量为 43.4 克。关闭钠阀,待热管内的钠冷却成固体后再把热管抽真空至 10^{-6} 毫米汞柱,然后用冷焊钳把热管尾端的镍管冷焊并夹断,使热管在高真空下封闭。冷焊过程中必须注意监视真空度的变化,务必使热管封闭时保持足够的真空度。冷焊后在冷焊端加一保护盖,保护盖上再接一根镍管,在镍管内部需要焊接的部位填加银焊剂。保护盖下端与热管封头先用氩弧焊焊接,再用冷焊钳把有银焊剂的镍管部分(共两处)夹扁,但不夹断。在封接时,先把盖内抽真空至 10^{-5} 毫米汞柱,然后在外部加热使银焊剂熔化,使之焊接密封,最后停止抽真空。用这种方法可使热管冷焊端在牢固的保护盖内可靠地密封,并可免除机械碰伤的危险。

e. 烘烤: 热管制作完毕后,尚需在高温下进行长时间烘烤。目的是使常温下为固体的金属钠能很好地渗透到毛细结构中去,使毛细结构充分润湿,否则热管很难起动。烘烤仍在真空除气炉中进行。烘烤温度为 800°C ,烘烤时间为 20 小时。

热管试验情况和结果讨论

1. 第一阶段试验

这一阶段试验内容是热管的起动与初步运行。目的是要观察热管能否正常运行。起初,热管的一端在管式电阻炉中加热。开始时升温速度较慢,使毛细结构中的钠熔化和回流补充,避免蒸发段烧干。经过约半小时的起动后,热管即进入正常运行,然后逐渐加温至约 700°C ,这时可以看到热管在炉外的部分由于热量大量导出而发红。后来,试验在高频炉上进行,即用高频感应的办法加热。为了比较,在高频线圈内并排放置两根管子: 一根为热管,另一根为与热管同样大小的一般不锈钢管,在同样的条件下进行加热。试验情况见图 2。从照片上可以看出,上面的热管在线圈以外的部分由于热量大量传出而烧红发亮,而下面的不锈钢管却由于

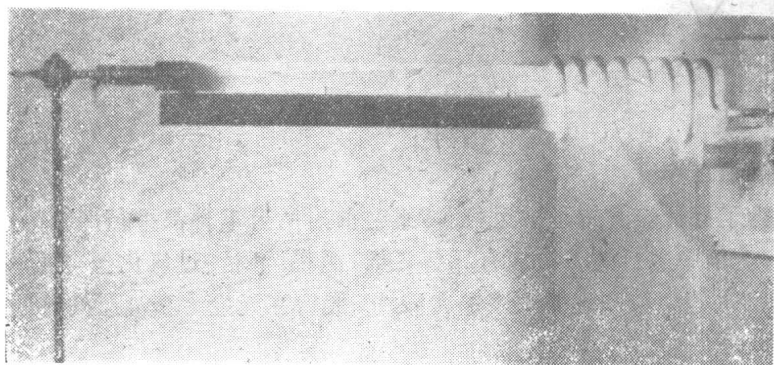


图 2 钠热管的对比试验

热量传出来很少,所以保持原来的颜色。基于同样的原因,在线圈内的部分则是不锈钢管的温度比热管的温度高。由此可以看出,作为传热元件来说,热管比其他金属导体要优越得多。

2. 第二阶段试验

这一阶段试验包括热管在辐射散热的情况下轴向壁温分布的测量和在强迫水冷情况下热管传递功率的测量。

a. 辐射散热时的轴向壁温分布 试验时热管在高频线圈以外的部分直接暴露在空气中,通过高温辐射和空气的自然对流散热。进行了不同工作温度的试验。壁温分布用10个镍铬-镍铝热电偶测量。采用带有直径1毫米的保护套管的铠装热电偶。热接点用电阻焊直接点焊在热管表面上。测点分布见图3。热电偶的电势值由一台多点数字电压表测量。仪表本身的精度为10微伏,但由于高频干扰,测量误差最大可达50微伏。

轴向壁温分布的几个典型曲线亦示于图3上。热电偶1至4测量的是蒸发段壁温。从图3上可以看出,当蒸发段壁温在580℃以上时,壁温沿轴向的分布在热管的大部分长度内是接

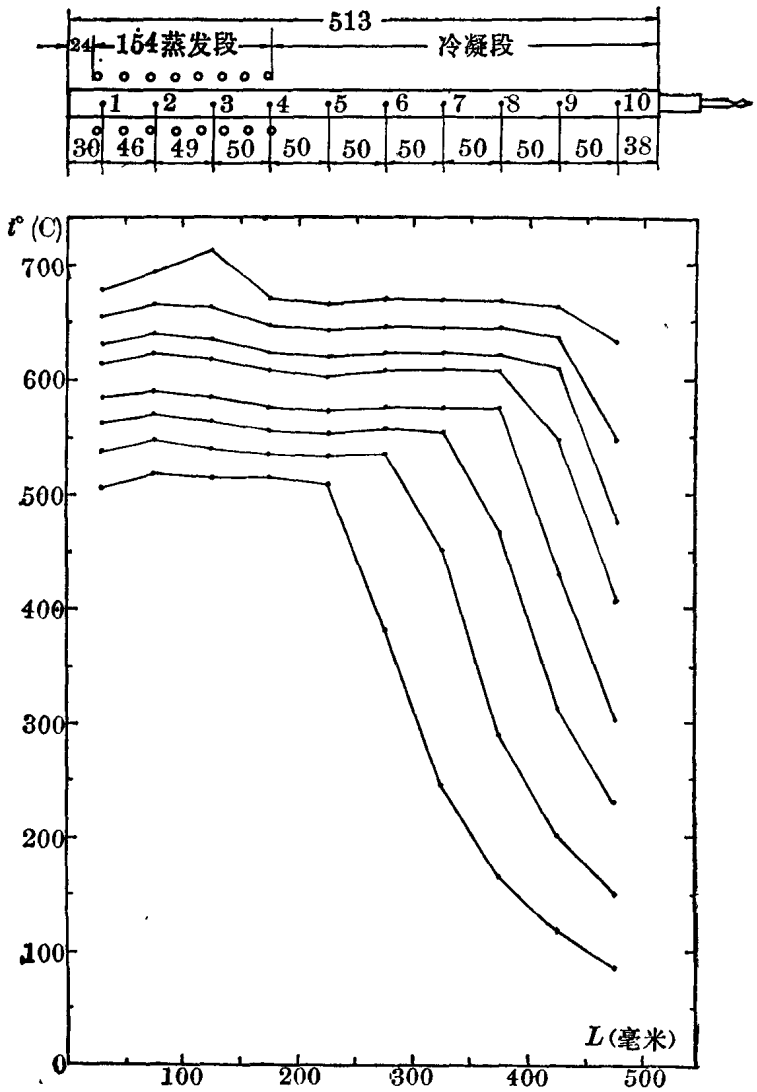


图3 热管在辐射散热时的轴向壁温分布

近于水平的,可以近似地认为热管等温运行。蒸发段温度稍高一点,这是由于存在径向传热温差的结果。但在冷凝段的尾部、壁温陡然下降,这主要是由于热管内有不凝结气体之故。这在图2的照片上也可以观察到,热管尾部发黑的一段就是被不凝结气体占据的区域。这些气体在热管运行时被钠蒸气驱赶到热管尾部,因而减少了冷凝段的有效长度。这个不凝结气体区的长度是随热管的运行温度而变化的。在运行温度低时,不凝结气体区较长。因为这时热管的功率比较低,钠蒸气压也低,因此不凝结气体占据的体积就比较大,这就显著地缩短了热管的有效长度。随着功率增加,运行温度上升,钠蒸气压也增加,不凝结气体就被压缩到较小的区域,使热管的等温段加长。这个问题,在要求热管进行大功率传输时,由于有效长度的缩短,降低了能够传输的功率,因而是一个缺点。但是从上面的讨论中可以看出,这些不凝结气体具有自动调节热管工作温度的特性,因此可加以利用。国外现在有一种热管叫做恒温热管,就是在热管中注入一定数量的不凝结气体,而使热管具有自动保持恒温的特性,达到温度控制的目的,扩大了热管的应用范围。当然,人为注入的气体应当是与工作介质和结构材料均不起化学反应的气体,即惰性气体,否则将降低热管的使用寿命。

还必须指出,由于不凝结气体的存在,使热管内部蒸气流动的问题变得复杂化了。现在有些研究者认为,在热管冷凝段内,钠蒸气与不凝结气体没有明确的分界面,而是在一段较长的区域内,钠蒸气与不凝结气体互相渗混,这时热管蒸气腔内的蒸气压分布就不是总压而是变成分压了,这样原来一些计算热管内部流动问题的理论也就不大适用,而用测量蒸气温度分布来推算饱和蒸气压分布的方法也受到了一定的限制。

但是不凝结气体的存在使热管的起动问题变得比较容易解决。在钠热管起动时,如果冷却量过大,冷凝量也很大,冷端的钠蒸气就变得很稀薄,因此冷端的背压和温度都很低。这时如继续加大蒸发段功率,则由于热端蒸气压升高,而冷端背压却不变,故使蒸气流速增加,到一定程度就达到声速,发生阻塞现象,使蒸气流量不能再增加,达到所谓声速极限。这时传递的功率不能再增加,如果冷却量过大就使冷端的液态钠冻结成固体,从而使热管起动不起来。因此,对液态金属热管来说,起动时加热功率和冷却量都不能过大。根据文献[3]的数据,钠热管在入口温度为 440°C 时相当于声速极限的轴向功率只有 65瓦/厘米^2 。因此,起动时必须仔细控制加热功率,而在冷却量太大的情况下,钠热管往往起动不起来。但是,如果热管内有不凝结气体,则起动时由于这种气体被赶到冷端而使冷端背压不过分降低,冷凝面积也变小,蒸气流动速度小,这样使热管的起动问题变得容易解决了。

b. 热管传递功率的测量 为了测量传到冷凝段的功率,在冷凝段外装上一个螺旋管形的冷却水套。水套长255毫米,如图4所示。为了减少接触热阻,在螺旋管之间以及螺旋管与套管之间的空隙中灌以锡。由于热管表面温度比较高,冷却水套的内壁不能直接接触热管表面,因此在这两者之间有一个宽度为0.5毫米的气隙,依靠气隙内空气的导热和二壁面间直接辐射换热来进行冷却。在冷却水进、出口处装有热电偶来测量冷却水的温升。测出口水温的热电偶热接点装在一个钻上许多小孔的铜块内,以便测量出口水的平均温度。此外,还要测量冷却水的流量。从测得的温升和流量即可算出冷却水带走的热量,也就是热管传递的热量或功率。热管中间有一段长100毫米的绝热段。用厚0.1毫米的不锈钢片制成的两层辐射屏来减少辐射散热损失。在辐射屏外表面装有一个热电偶测量辐射屏温度,以便计算散热损失。绝热段的热管表面上装有两个热电偶测量绝热段壁温。冷却水从压头一定的高位水箱供给,以保证流量稳定。

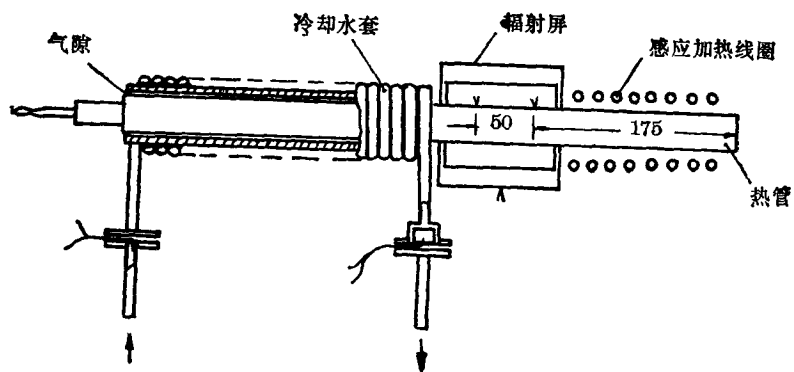


图4 热管功率试验装置

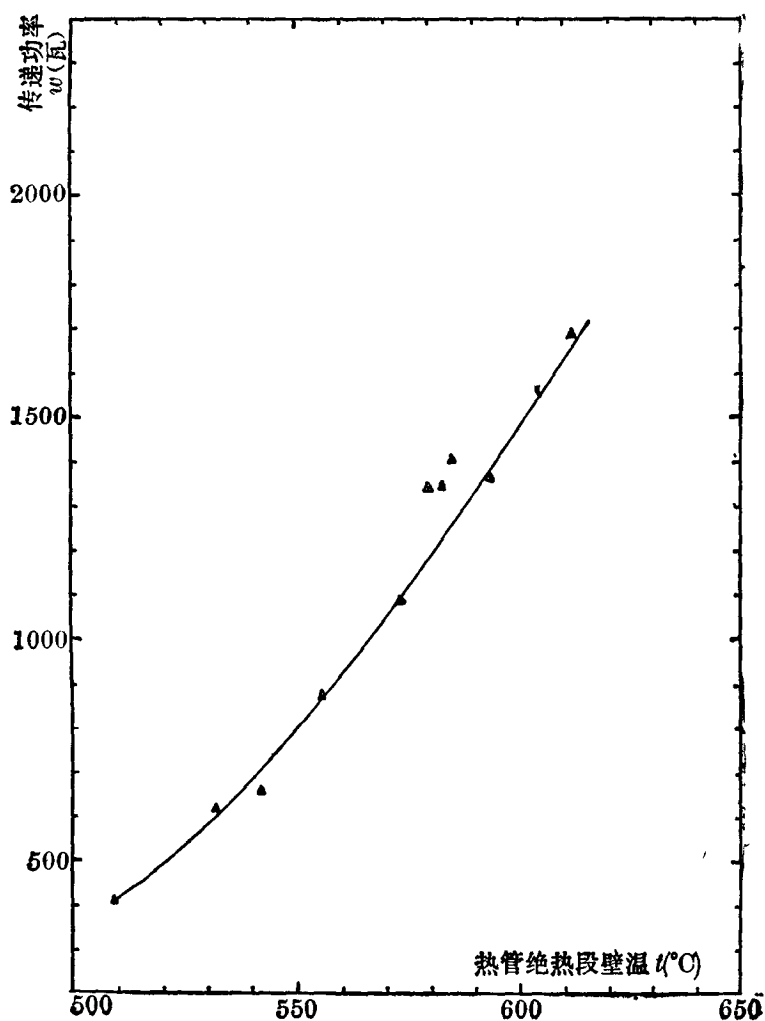


图5 热管在不同温度下传递的功率

热管壁温用数字电压表测量。由于冷却水温升较小(只有摄氏几度到十几度),故用高精度的 UJ25 型电位差计来测量冷却水的进、出口温度,以保证必要的测量准确度。

测量功率的试验,从壁温 510°C 到 610°C 测量了十个工况。测量结果见图 5。最高的试验点,即壁温为 612°C 时,热管冷凝段放出的热量为 1618 瓦,绝热段辐射屏的散热损失(包括自然对流与辐射)为 70 瓦,故热管总的传递功率为 1688 瓦。当壁温高于 612°C 以后,热管蒸发段出现了局部过热,局部壁温急剧上升,因此再提高热管工作温度就有困难了。这个现象在辐射散热实验时也出现过。从图 3 上可以看到,最上面的曲线上第三点的温度反常地上升了,也是局部过热的结果。

o. 局部过热问题的探讨 为了探讨局部过热的问题,在试验结束后对这根热管进行了解剖。解剖时采取了一系列措施,使热管中的钠在解剖过程中始终与外界空气隔绝,以避免钠取出时被氧化。最后,把热管中的钠浸没在煤油中。对这根热管解剖的结果,发现热管中的钠相当一部分变成灰黑色。而且在蒸发段发生局部过热处的管壁与网格都有一些黑色的、与水不反应的沉积物,但其他部分的管壁与网格都异常光亮完好。毛细结构(特别是在蒸发段的部分)没有发生变形。从解剖结果可以对局部过热的原因进行初步的分析。从取出的钠看来相当一部分是被氧化了,而且还有一些其他杂质。这样,当热管功率大到一定程度时,这些氧化钠与其他杂质就积聚在蒸发段的毛细结构内,堵塞了部分网格,妨碍了介质的及时补充,因此造成了局部过热。

由此看来,作为工质的钠应当尽量提纯,比如蒸馏。另外,在热管组装焊接及除气等过程中应当尽量避免氧化,以免金属氧化皮被钠还原成氧化钠。在灌钠及最后封接过程中也要保持较高的真空度,不能让外界空气漏入,使封接后热管中的钠保持很高的纯度。

由于局部过热的出现,使热管功率测量的试验受到一定限制,因此未能测出热管的极限功率。

结 论

对一根钠热管进行的初步试验证明,在辐射散热情况下,热管是接近等温运行的,工作温度达 680°C 。在用水强迫冷却的情况下,传递功率最高达到 1688 瓦,这时工作温度为 610°C 。这说明热管作为一种新型传热元件是有较大的优越性的。不凝结气体的存在使热管的轴向温度分布变陡了,但使热管容易起动。试验中遇到了局部过热的问题,对热管的解剖证明局部过热主要是由于钠中的杂质堵塞毛细网格引起的。因此要对钠进行蒸馏提纯,而且在灌注过程中不能让空气漏入以免使钠氧化,同样在热管组装焊接和除气过程中都要尽可能避免金属氧化,以免金属的氧化皮被钠还原成氧化钠。

附录 试验数据的整理

对热管传递功率试验的测量结果进行了数据整理,计算了绝热段辐射屏的散热损失,包括自然对流和辐射两部分。

1. 自然对流散热按下式计算

$$\text{Nu}_f = 0.47 \text{Gr}_f^{1/4}$$

$$Gr_f = \beta_f \frac{gd^3}{\nu_f^2} \Delta t_R$$

$$Nu_f = \frac{\alpha d}{\lambda_f}, \quad \beta_f = \frac{1}{T_f}$$

$$Q_{2c} = \alpha F \Delta t_R$$

2. 辐射散热损失计算

$$Q_{2R} = \varepsilon_1 C_0 F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\varepsilon_1 = 0.2, \quad \varepsilon_1 C_0 = 0.98$$

$$d = 0.068, \quad l = 0.1$$

$$F = 0.0214$$

3. 冷却水带走功率的计算

$$Q_1 = GC_p \Delta t$$

$$W = Q/0.86$$

符 号 说 明

Nu_f ——努谢尔特准则，下标“ f ”表示取周围空气的温度
为定性温度，下同

Gr_f ——格拉晓夫准则

α ——放热系数 (大卡/米²·时·°C)

β_f ——空气的容积膨胀系数 (1/°C)

ν_f ——空气的动力粘度 (米²/秒)

λ_f ——空气的导热系数 (大卡/米·时·°C)

T_f ——空气温度 (°K)

Δt_R ——辐射屏与周围空气的温差 (°C)

d ——辐射屏外层直径 (米)

l ——辐射屏外层长度 (米)

F ——辐射屏外层表面积 (米²)

Q_{2c} ——自然对流散热损失 (大卡/时)

ε_1 ——辐射屏黑度

C_0 ——绝对黑体的辐射系数 $C_0 = 4.9$ (大卡/米²·时·°K⁴)

T_1 ——辐射屏壁温 (°K)

T_2 ——房子内，墙壁温度 (°K) $T_2 = 287$ °K

Q_{2R} ——辐射散热损失 (大卡/时)

C_p ——冷却水的比热 $C_p = 1$ (大卡/公斤·°C)

G ——冷却水流量 (公斤/时)

Δt ——冷却水温升 (°C)

Q_1 ——冷却水带走的热量 (大卡/时)

W ——功率 (瓦)

r_e ——热管蒸气通道半径

r_w ——热管壳体内壁面半径

参 考 文 献

[1] T. P. Cotter, "Theory of Heat Pipes" LA-3246-MS.

[2] J. E. Kemme, "Ultimate Heat Pipe Performance." (Thermionic Conversion Specialist Conference, 1968).

[3] J. E. Deverall, J. E. Kemme, L. W. Florschuetz, "Sonic Limitation and Startup Problems of Heat Pipes" LA-4518.

钠 热 管 性 能 实 验

中国科学院北京力学研究所热管研究组(1973 年 12 月)

对热管来说,在工质选定后,热管工作性能的好坏取决于热管的设计,其中主要是取决于毛细结构的设计。十年来,国外的研究者已对钠热管的热力性能进行了大量的理论和实验研究。例如,文献[7]首先对热管进行了理论分析,文献[4]、[5]、[6]等对热管的起动性能与声速极限进行了理论计算和实验研究。但是,这些研究还远不够成熟,而且往往有互相不一致的地方。到目前为止,还缺乏可以作为设计依据的可靠资料,也没有一套成熟和统一的设计计算方法。因此,必须开展对钠热管热力性能的实验研究,以便积累一些数据资料,供钠热管设计者参考。

本文将叙述一种结构的钠热管实验研究结果,内容包括热管的制造工艺和热力性能实验。热力性能实验包括辐射冷却条件下温度分布特性,一般功率(即低于极限功率),声速极限和最大功率的实验结果。

热管的设计与制备

1. 热管的构造

热管管壳是由一根外径为 26 毫米、内径为 21.8 毫米的不锈钢管与两端堵头以及作为灌钠和封口用的外径为 8 毫米的镍管组成,如图 6 所示。毛细结构用 350 目的不锈钢丝网卷成圆筒,然后点焊成整体,层数为 21 层。毛细结构与管壳内壁之间略有间隙,便于液体钠的回输。

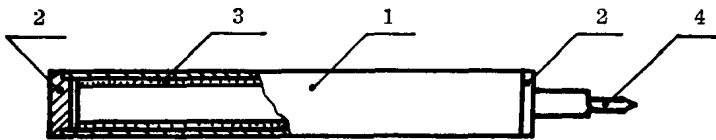


图 6 热管结构

1—管壳 2—堵头 3—毛细结构 4—封口用镍管

热管的主要结构参数如下:蒸气通道直径 d_v : 1.88 厘米;热管长度 l_1 : 40 厘米;毛细网格长度 l_2 : 39.5 厘米;网格空隙度 ε : 0.75。

2. 热管的制造程序

(1) 清洗:零件准备就绪之后,首先进行清洗。清洗的目的是为了除去油污和脏物,以保证工作介质能很好地浸润到整个毛细结构中去,并使热管能正常运行。清洗液有三氯乙烯,酒精,过氧化氢、氢氧化钠与酒精的混合液,盐酸,硝酸和蒸馏水等。按一定的顺序分别用上述清洗液反复清洗几次,最后在干净的干燥箱中干燥,然后密封保存待焊。

(2) 组装：为防止氧化，所有零件均在氩气保护下用氩弧焊进行焊接。焊接完毕进行真空检漏。

(3) 除气：组装完毕后，把整个部件放在真空除气炉中，在 940°C 的温度下进行除气，以排除金属中吸附的气体。在整个除气过程中，真空度不低于 5×10^{-5} 毫米汞柱。

(4) 钠的蒸馏与灌注：为了提高热管的性能和寿命，我们对工作介质钠进行蒸馏提纯，以便除去氧化钠和其它杂质，使纯度比较高的钠在热管中能顺利地运行，毛细结构不易被堵塞。

钠的蒸馏是在专门的蒸馏系统中进行的，见图 7。在蒸馏之前，首先对整个系统进行真空加热除气，以便保证蒸馏时所需的静真空。然后从阀门 9 处对整个系统充氩气，接着关闭阀门 9 和 8，使贮钠罐 2 和蒸馏罐 4 之间的所有加热器通电加热。当贮钠罐和通道上的温度达到要求的温度时（一般在 150°C 左右），这时打开阀 1 和钠阀 3 并充以一定压力的氩气（一般为表压 $0.3 \sim 0.5$ 公斤/厘米²），把熔化了了的钠缓缓地压入蒸馏罐。当钠达到所要求的数量时（钠的数量由贮钠罐中的探针法测量），立即关闭阀 3 和阀 1，切断加热电源。等蒸馏罐中钠冷却凝固之后，即可启动真空机组并打开阀 8 进行抽气。当真空度达到所要求的数值后（真空度一般高于 5×10^{-6} 毫米汞柱即可），关闭阀 8，使蒸馏罐 4 的加热器通电加热，温度控制在 $500^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$ 之间，进行蒸馏；同时在两个 U 形通道处取下活动加热器，换以冷却水罐，并使量筒 5 以及量筒与蒸馏罐之间通道上的加热器均通电加热，使温度控制在一定的范围（通道上的温度控制在 $200 \sim 250^{\circ}\text{C}$ ，量筒的温度控制在 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 左右）。这样，钠处于静真空的状态下进行蒸馏。钠的蒸汽首先在量筒下部的 U 形管中凝固，然后堵塞通道，使蒸馏以后的钠都贮存在量筒中，

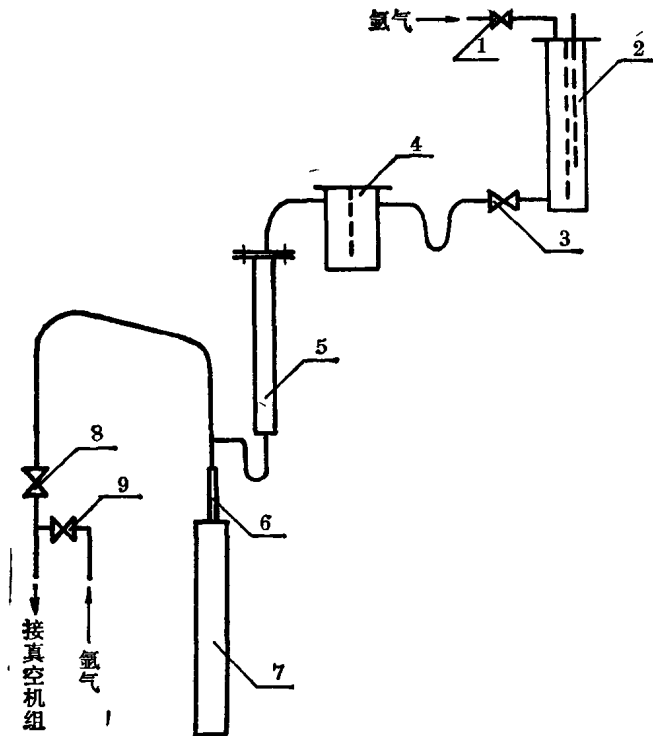


图 7 钠的蒸馏与灌注系统示意图

1—气阀 2—贮钠罐 3—钠阀 4—蒸馏罐 5—量筒
6—封口镍管 7—热管 8—真空蝶阀 9—放气阀

以便测量钠的蒸馏数量。测量方法是采取电阻-电压降法,即使量筒两端通以恒定的直流电流(5安),然后用电位差计 UJ23 测量该两端电压降的变化,就可求出钠的高度,从而可算出钠的数量。当钠的数量达到要求或蒸馏罐中的钠全部蒸完后即可停止加热,蒸馏就告完毕。

接着进行灌注。首先打开伐 8 对热管抽真空(5×10^{-6} 毫米汞柱以上),然后关闭伐 8,对量筒 5 和热管 7 以及它们之间的通道进行加热。当温度都达到钠的熔点以上时,量筒中的钠在本身重量和两边压差的作用下就会流到热管中去,等钠冷却到室温以后再打开伐 8,对热管抽真空,真空度达到 4×10^{-6} 毫米汞柱时,用冷焊钳在 6 处冷焊封口并夹断。

以上系统所有的加热器都是用可调变压器调节加热电压的,使加热的温度控制在所要求的范围。温度是用 0.2 毫米的镍铬-镍铝热偶点焊在关键的位置上并用电位差计 UJ23 测量的。

本实验热管的灌钠量为 40.5 克。

(5) 烘烤:热管灌钠封口完毕后即可进行高温真空烘烤。烘烤温度为 700°C ,时间为 20 小时,仍在真空除气炉中进行。烘烤的目的是为了使热管中的钠在高温下变成蒸气,能很好地渗透到整个毛细网格中去,由于烘烤的时间足够长,使毛细结构能被钠蒸汽充分润湿,这样热管才能正常地起动运转。

实验装置与测量方法

1. 加热系统

实验的加热设备是一台 GP-15B 型的高频感应加热炉,感应加热线圈是双层的,由铜管制成,线圈长 125 毫米,直径 100 毫米,输出的加热功率是连续可调的。

2. 绝热段

热管的绝热段长 115 毫米。为了加强绝热效果,我们采用厚为 0.2 毫米的薄青铜片制成的多层螺旋形的辐射隔热屏,铜片两边点焊着许多锯齿形支撑架,以保证层与层之间的距离。辐射屏两端有两个同样材料制成的端盖,在邻近加热线圈的一端加垫一层厚云母片并与加热线圈保持一定距离,以避免高频电的跳火现象与减弱感应加热的影响。采用青铜材料是由于它具有可点焊性以及受感应加热较弱,并且辐射系数较小。实验证明这种隔热屏的绝热效果还比较好,但由于材料太薄,在高温下容易氧化烧坏,影响实验温度再升高,所以绝热手段还须继续改进。

3. 冷却系统

热管的冷却段长 150 毫米,外面套有一个水冷却的热流量计。热流计包括一根长 150 毫米,内径 27 毫米的钢管,在钢管外螺旋形地绕着许多圈铜管,在铜管与钢管之间的所有间隙都用锡填满,以减小热阻。热流量计的进水端通过一小型孔板流量计和保持恒定水位的水箱相连,它的出水端通下水道。在水套钢管内壁与热管外壁之间保持有 0.5 毫米的间隙,因为热管的工作温度很高(最高可达 800°C 以上),如果水套直接和热管接触,水套内壁面的冷却水就要沸腾,产生蒸汽泡,难以测量功率,所以水套与热管之间要保持一定的间隙。间隙中的传热依靠间隙内气体的导热来完成。所以间隙小传热效率可高一些。

在间隙中充空气是不能满足传热要求的,因为热管在不同工作温度下极限功率变化达数倍,而且其数值往往比较大。在热管工作温度一定时冷凝段的总传热温差变化是很小的,因

为冷却水温的变化充其量也只占总温差的 10% 左右。所以冷凝段的传热主要取决于间隙中的导热,但空气的导热系数比较小而且数值一定,因此必须在间隙中充以氮气和空气的混合物(氮气的导热系数约为空气的 5 倍)。调节两种气体的混合比即可在较大范围内改变冷却量,从而满足在不同工况下测量极限功率的要求。这就要求建立一个可以连续调节氮气和空气不同混合比的装置,如图 8。混合比例的调节是通过调节氮气罐和空气罐出口的两个阀门 6、7 使 U 形管中达到不同的静压比来实现的。

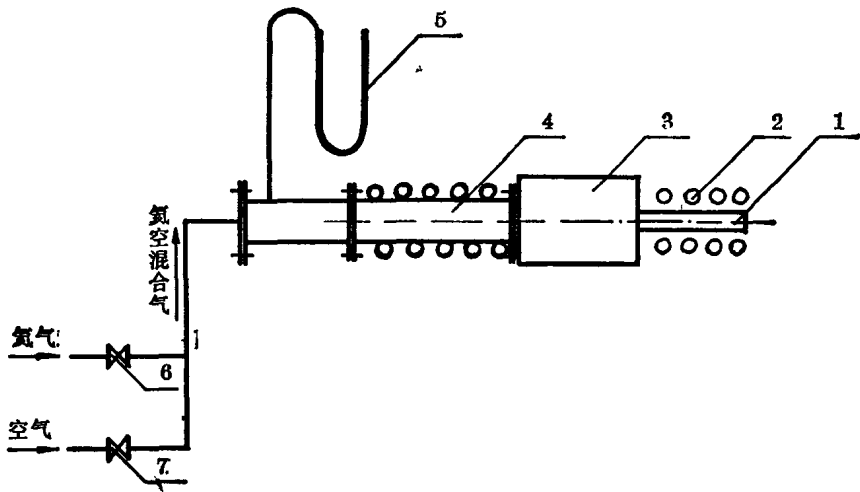


图 8 氮气——空气比例调节系统示意图

1—热管 2—高频感应加热线圈 3—辐射隔热屏 4—热流量计
5—U 形压差计 6—氮气调节阀 7—空气调节阀

4. 测量系统

在进行辐射散热实验时,热管分为两部分:加热段长 125 毫米,辐射散热段长 275 毫米,直接暴露在空气中以辐射和自然对流散热,环境温度室温。温度测量是用国产的带不锈钢保护套,套管直径为 1 毫米的镍铬-镍铝热电偶。

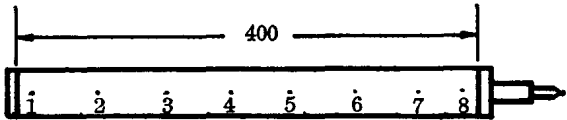


图 9 热偶测点位置序号

进行热管的轴向传热性能实验时(包括空气隙和氮气隙),热管分为三部分:加热段、绝热段和冷却段。测温所用热电偶和上述辐射散热时一样。这三种实验中热偶测点的分布位置见图 9 和表。

表 各种实验时热偶的分布

热 偶 序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
辐射实验时测点距离(毫米)	5	63	125	182	243	301	350	395
空气隙实验时测点距离(毫米)	6	65	125	190	237	331		
氮气隙实验时测点距离(毫米)	14	65	125	190	237	277	337	385