

锅 炉 和 窑 炉 节 能 热 管 换 热 器

方 彬 白文彬 编

哈 尔 滨 工 业 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书主要叙述热管与热管换热器的基本理论、基本构造原理、设计计算方法、设计计算的实例及在工业热力设备节能中的应用,同时介绍了常用的重力热管的加工制造过程。

本书还叙述了回收各种工业锅炉和窑炉排烟余热的热管,及热管换热器在实际应用中存在的一些关键性技术问题及实验研究的结果。

本书可供采用热管节能的工程技术人员和从事传热、热工的专业人员参考,也可供高等院校有关专业的师生参考。

锅炉和窑炉节能热管换热器

方 彬 白文彬 编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 10.75 字数 246,000

1985年7月第1版 1985年7月第1次印刷

印数 1-15,000

书号 15341.20 定价 2.20元

前 言

热管作为一门新技术,已经逐渐被我国广大的工程技术人员所熟知和重视。热管可应用于航天、原子反应堆、电子器件、电机、电器、太阳能的利用、轻工、化工、机械等方面。热管的研究工作和在工业上的应用进展很快。特别在国家号召节省能源以来,热管技术在工业锅炉、窑炉上节能的应用越来越多,在为国家节省能源方面正起着积极的作用。

热管这个概念和它的工作原理是在 1964 年首次由美国的洛斯阿拉莫斯科学实验室提出来的。热管是一个能在小的温度梯度下把热量从一处传递到另一处的高效率的传热元件。它诞生不久就得到了广泛的应用和迅速的发展。自 1971 年以来,乔治·华盛顿大学每年组织一期“热管理论与实用”的研究班。这个研究班吸引了众多的工程师和大学教师,使他们有机会了解热管这一新技术及其在各方面的应用和发展情况。

1973年在德意志联邦共和国召开了第一次国际热管会议,1976年和1978年相继在意大利和美国召开了第二次和第三次国际热管会议,在会议上宣读了大量的研究文章。

当前,我国对热管技术的研究和应用也越来越广泛。在工业热力设备节能中,热管换热器的研制工作发展得也很迅速。各种锅炉和窑炉排烟余热回收热管换热器的数量近几年增长很快,不仅在低温($200\sim 300^{\circ}\text{C}$)排烟中进行余热回收,而且在中温($300\sim 600^{\circ}\text{C}$)排烟中也应用了热管进行余热回收。在应用中对一些关键性技术问题,例如积灰、磨损和腐蚀等问题,都进行了实验研究,并取得了实验数据和满意的实验结果。

全书共分为八章、归纳为四部分内容:一是热管及热管换热器的基本理论与基本构造;二是热管换热器的设计计算;三是热管换热器的应用;四是热管换热器的加工制造工艺过程。

本书的前七章由哈尔滨工业大学热工教研室的方彬编写、第八章由电子工业部 49 所的白文彬编写。

本书的不当之处,敬请读者指正。

编 者

1984年9月25日

目 录

第一章 热管工作原理	(1)
§ 1—1 热管的简述.....	(1)
§ 1—2 热管的结构原理.....	(2)
§ 1—3 热管工作的基本原理.....	(4)
§ 1—4 热管的特点.....	(6)
第二章 热管的构造原理	(10)
§ 2—1 工质.....	(10)
§ 2—2 管芯.....	(12)
§ 2—3 管壳.....	(13)
§ 2—4 相容性.....	(14)
第三章 热管的基本理论	(17)
§ 3—1 热管的工作极限.....	(17)
§ 3—2 粘性限.....	(18)
§ 3—3 音速限.....	(18)
§ 3—4 携带限.....	(19)
§ 3—5 毛细限.....	(21)
§ 3—6 沸腾限.....	(21)
§ 3—7 热管内的压力分布.....	(22)
第四章 热管换热器	(24)
§ 4—1 气—气热管换热器.....	(24)
§ 4—2 气—液热管换热器.....	(26)
§ 4—3 热管换热器的结构.....	(28)
§ 4—4 热管换热器的长度比.....	(30)
§ 4—5 热管的管径.....	(34)
第五章 热管换热器的设计计算	(37)
§ 5—1 热管的热阻.....	(37)
§ 5—2 传热系数.....	(42)
§ 5—3 翅化效率和翅化比.....	(44)
§ 5—4 气体绕流翅片管束时的放热系数和阻力.....	(48)
§ 5—5 流体绕流光管管束时的放热系数和阻力.....	(50)
§ 5—6 管束的外部沸腾换热.....	(53)

§ 5—7	热管的工作温度	(55)
§ 5—8	传热平均温差	(56)
§ 5—9	露点腐蚀和管壁温度的计算	(58)
第六章	热管换热器的设计例题	(60)
§ 6—1	气—气型热管换热器的设计实例	(60)
§ 6—2	气—液型热管换热器的设计实例	(81)
§ 6—3	气—汽型热管换热器的设计例题	(102)
第七章	热管换热器的应用	(109)
§ 7—1	热管在蒸汽机车上的应用	(109)
§ 7—2	热管空气预热器在炼厂圆筒炉上的应用	(115)
§ 7—3	热管换热器在隧道窑上的应用	(121)
§ 7—4	小锅炉热管换热器	(126)
§ 7—5	热管及其在蒸汽机船上的应用	(130)
§ 7—6	热管换热器在燃气轮机上的应用	(133)
§ 7—7	热管省煤器	(138)
§ 7—8	热管空气预热器	(141)
§ 7—9	热管气—气加热器	(142)
第八章	重力式热管的制造	(145)
§ 8—1	重力式热管的制造	(145)
§ 8—2	重力式热管材料的选择	(145)
§ 8—3	重力式热管制造工艺	(149)
附录 1	单位换算	(152)
附录 2	干空气的热物理性质	(154)
附录 3	在大气压力下烟气的热物理性质	(155)
附录 4	饱和水的热物理性质	(156)
附录 5	干饱和水蒸汽的热物理性质	(157)
附录 6	其他热管工质的热物理性质	(158)
附录 7	金属材料的密度、比热容和导热系数	(163)
附录 8	几种常用材料的拉伸强度极限	(164)
附录 9	双曲线函数值	(165)
参考文献		(166)

第一章 热管工作原理

随着科学技术的发展,工程需用的设备和仪器等越来越多。其中一些设备和仪器是同热能有关的,并且要求能对热能进行输送和转移。因此,把热能高效地从一处输送到另一处,或者说把热能高效地从一物体输送到另一个物体的研究工作,显得越来越重要。尤其是在能源紧张的情况下,这方面的研究工作不仅重要,而且有着更深远的意义。作为传热元件就其种类来说目前已经不少了,但是作为高效的传热元件,目前确实为数不多。而热管则是一个高效的传热元件,它还具有许多特殊的用途和性能。这一章扼要地叙述热管的基本工作原理及其特点。在叙述热管的工作原理之前,首先介绍一下什么是热管。

§ 1—1 热管的简述

一般来说,热管就是把普通的管子(如各种金属管等)抽成真空,注入工作液体,然后封口,并能够把热能从其一端输送到它的另一端。早期对热管概念的叙述是在1962年,特雷费森在向通用电气公司提交的报告中,提出了一种可以在宇宙飞船中应用的无动力热装置。这个装置是由一根空心管组成,其内表面覆盖有一层多孔衬套,利用毛细作用引起的连续质量循环,把能量从管子的一端传递到另一端。这段话不仅是对热管概念的一个深刻描述,而且也是一个发明创造。可是这一发明,由于没有及时用实验来证实,结果被悄悄地放置在公司的档案中。到1964年洛斯阿拉莫斯科学实验室的格罗费等人独立地重新提出了类似以前提出的传热装置,并给它一个新的称呼叫做热管。接着有人给热管下了一个定义:在一个密闭结构中装有若干工质,借助于液体的蒸发、蒸汽的输送和冷凝、然后靠毛细作用使冷凝液从冷凝段返回到蒸发段,用这种办法把热能从结构的一部分传递给另一部分,这样一种结构就构成成为热管。

现在,我们制造的热管,一般都是采用各种密封金属管子的结构,管中装有若干工质,但在装工质以前必须在密封的管子中形成真空,这可采用真空泵抽。或是用煮沸法形成真空。工质在输送热能之前要由液态变为气态,否则是不能输送热能的。工质把热能从热管的一端输送到另一端之后,工质重新冷凝成液态,然后靠毛细作用使冷凝液从冷凝段返回到蒸发段,这对于处在水平工作位置和与水平成很小夹角以及冷凝段在加热段下面的热管来说是必要的。但对处于垂直工作位置的热管或者处于与水平位置夹角比较大的热管来说可以没有毛细结构,这时热管内工质的回流就要靠重力回流了,如图1—1(a)所示。目前我国余热利用节能中应用的热管大部分是这种热管。虽然没有毛细结构的热管在工质回流和工质回流的均匀性等方面远不如毛细结构的热管,但是在热管的制造工艺性和热管的制造成本等方面却比有毛细结构的热管要优越得多。图1—1(b)与(a)

的不同点是在热管的内壁四周上设有叫作输液芯的构造，这种热管的工作液体的回流依靠输液芯，工作不受位置的限制。

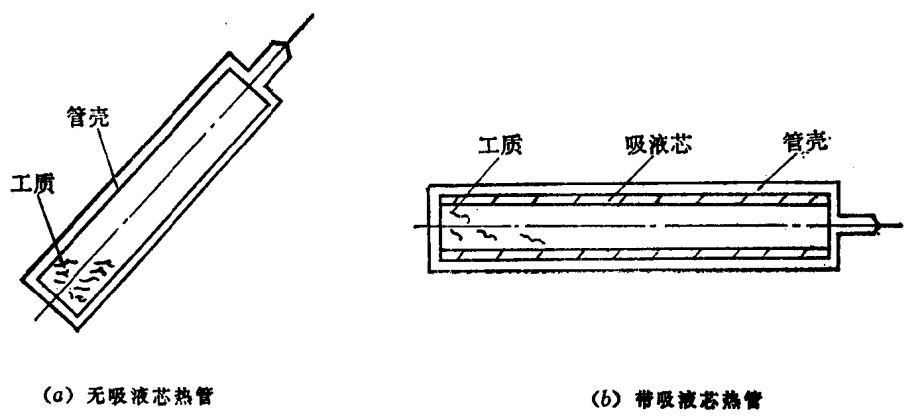


图1—1 热管简图

§ 1—2 热管的结构原理

热管从纵向来看可以分为三段，即蒸发段、绝热段和冷凝段，如图1—2所示。有时也把热管的加热段叫做蒸发器，冷凝段叫做凝结器，绝热段叫做传送段。传送段作为流体的通道，把蒸发器（热源）与凝结器（冷源）分隔开。热管的绝热段的长度可以很长，也可以很短；其材料可以与管壳一样，也可以不一样；可以是刚性的，也可以是柔性的。这样使热管能适应布置任意需要的几何形状。但是，工业上节能热管和余热利用热管的绝热段是比较短的，只是管壳的一小段。但是，这很短的一段绝热段仍然把加热段与冷凝段分隔开，而且在此处还得把通过加热段的热流体与通过冷凝段的冷流体分隔开。所以，热管的密封环都放在绝热段里，显然，热管膨胀的相对死点也应该在这里。

从热管的径向方向来看也可以将热管分为三个组成部分，即管壳、吸液芯和蒸汽空间。对一般热管来说，热流体从热源来至热管总要先经过管壳。如果把热管传送能量的

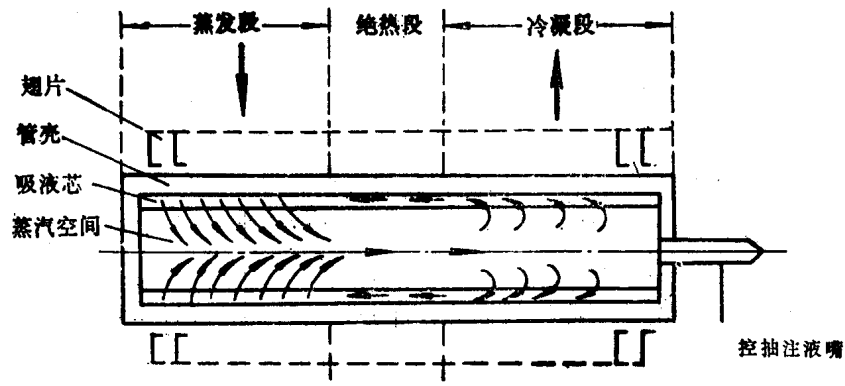


图1—2 热管的结构原理图

过程假设成一条热流线的话,那么这条热流线的途径一定是先经过管壳、吸液芯、蒸汽空间,然后再由蒸汽空间经吸液芯和管壳离开热管。在气—气热管换热器中的热管为了增加其换热能力一般都是带有翅片的,如图1—2中所示。下面分别叙述一下热管的各组成部分及其作用。

一、管壳

管壳通常作容器,容器的机械作用是封闭热管中的工作流体,并且增加结构的刚性。因为管壳内的工作压力与管壳外的环境压力之间相差很大,因此,管壳必须能承受压力差而不致于变形或破裂。管壳除了承受压力差之外还是热流线的一段必经之路。因此,管壳热阻的大小也是影响传热的重要的一环。从承受压力差的角度而言,要求管壳壁厚一些好;而从传热的角度而言,要求管壳壁薄一些好。目前,热管采用金属圆管,一般外径的范围为 $\phi 25 \sim \phi 42\text{mm}$,管壳壁厚为 $1.5 \sim 3\text{mm}$ 。用相应尺寸的端盖通过焊接封住管子的两端。平时要防止空气漏入管内,以免管内的真空遭到破坏。热管工作时,管内要产生很高的温度,即是工质的饱和蒸汽温度,相应要产生很高的压力,即工质的饱和蒸汽压力,饱和蒸汽压力与饱和蒸汽温度是以一定的关系联系着的。如以水为工质的热管,在管内温度为 250°C 时,其相应的压力为 40.56公斤/厘米^2 ,这么高的压力就要由管壳来承受了。管壳材料要根据热管使用的温度范围和工作液体的性质来综合考虑加以选定,一般管壳的材料有铝、铜、钢和不锈钢等。目前在工业上节能常用的低温、中温范围以水为工质的热管,其管壳一般常用钢—铜复合管。这里,铜作衬套,它一般有两个用途:(1)用铜作衬套把工质水和管壳钢分隔开来,因为铜与水是化学相容的,而水与钢是化学不相容的;(2)在以铜作衬套的内壁上拉毛细结构槽道比较方便。如在较低环境温度工作的热管其管材可以选为全铜管材,但这时热管管壳的温度一般不超过 220°C 。如热管工作的环境温度再低时,可以选用铝作为管壳材料。如在以水为工质的工作液体中加入了缓蚀剂,可以使这种水溶液与钢长期在高温接触下不起或基本不起化学反应,不产生或基本不产生不凝气体。这时可以选无缝碳钢管作为管壳材料,这可使热管的重量和造价等指标有所下降。如热管的环境工作温度很高,这时不仅工质要换,而相应的管壳材料也要换。如钠热管,其工质为钠,这时的管壳材料就要采用不锈钢了。管壳的材质、薄厚的选择不仅要承受压力、减小热阻、还要从价格的高低加以综合考虑,对一般工业上应用的热管换热器来说,其成本的高低也是非常重要的,这几方面总是有矛盾的。因此,需要选择一个相对满意的厚度和材质。对有翅片热管的强度的薄弱环节不是在中间,而是在两端盖的焊接处。因此,管壳可以选得薄一些,在两端盖焊接处可以设法加强。

二、吸液芯

带吸液芯的热管内工质的流动是利用毛细现象来保证的。对吸液芯的主要要求是要起到一个毛细泵的作用。在热管管壳内壁安放金属丝网、多孔金属,以及在内壁上面拉上槽(轴向槽或周向槽道等),都能起到一个毛细泵的作用,都能将工质从冷凝段输送到蒸发段。如以多孔物质作为吸液芯,吸液芯内被许多任意相互连接的细小毛细管通路所充满。吸液芯通常是紧贴或者挤压在容器内壁上,利用液体的表面张力从凝结段将液体送回到加热段。如吸液芯是由低导热系数的工质浸透,吸液芯与流体层通常在热流线

路上出现较大的阻力。因此，在选择吸液芯时，考虑到热性质及流体的传输性质是必要的。

三、蒸汽空间

热管内蒸汽空间是作为蒸汽输送能量的通道。蒸汽是否能在蒸汽通道中高效率的传递能量呢？一般来说是没有问题的。但是，进一步说也有许多因素影响着蒸汽的流动，影响着蒸汽对热能的输送。在蒸汽空间里蒸汽的流动是一个复杂的流动。热管里面工作液体的流动是很复杂的双相流动。

四、翅片

一般在工业上应用的热管，特别是气—气换热器热管无论是加热段或冷凝段，在管壳的外表面都绕上翅片或串上翅片，这样做是为了增加热管的传热能力。一般加上中等高度的翅片，热管的翅化比，即翅片表面积与光管外面积之比值，一般在6~9左右。这样就可以大大提高热管的传热能力。

一般取：翅片高2.5毫米，翅片厚度 0.5~1.0毫米，翅片间距 3~20毫米，材质为08号钢。

§ 1—3 热管工作的基本原理

上面讨论了热管的概念和热管的结构原理，本节讨论热管的一般工作原理。从上述的讨论可知，热管是一个封闭容器，封闭容器内抽出不凝结气体，形成真空，为了使热管能够很快的起动和很好的工作，要求管内始终保持一定的真空度，装有一定量的能够汽化的液体，并装有起毛细作用的吸液芯结构。管内工作液体在加热段吸热沸腾后汽化，蒸汽带着大量的热能进入冷凝段，然后进行凝结放热，把大量的热能传递给了冷凝段的冷流体。工质完成了把能量从加热段输送到冷凝段之后，以液态形式在吸液芯结构毛细系的抽吸作用下，重新返回到加热段。重复这一过程，形成循环，使热管连续不断地工作，不断地传递热能，这就是热管工作的基本原理。把这样一个传递热能的过程，用一条假想的热流线表示，如图1—3所示。

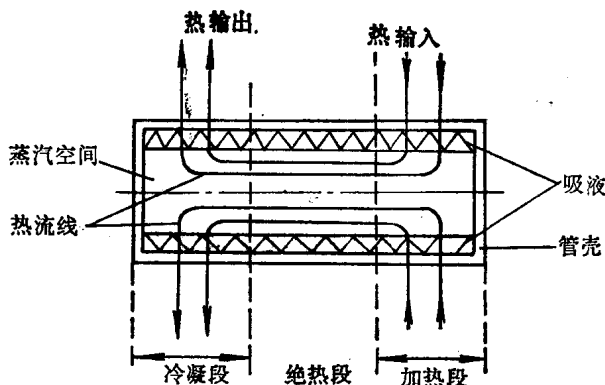


图1—3 热管工作原理图

热管中工质传递热能的过程是通过工质的相变过程进行的。加热段热流体包含了大量的热能（如各种窑炉的排烟，这种热流体中就包含了大量的热能），这些热能在传递给工质时是通过工质的相变进行的。工质由液态逐渐吸热，当吸入一定量的热能时就变为汽态。工质由液态变为汽态一定要吸热，而吸收的热量往往很多。工质由液态变为汽态所吸收的热量叫做汽化潜热。工质就是把汽化潜热这部分热能输送到了冷凝段。由于工质被冷却，工质由汽态又变成为液态，同时向冷流体（如冷却介质空气或水）放出凝结潜热。

热管之所以能够进行高效率的传递热能，成为一个高效率的传热元件，就在于它利用了传热学中相变潜热的吸收和释放两个最强烈的过程。热管的工作利用相变吸、放潜热的机理和毛细泵或重力引起工作流体的循环进行输送热能，这就构成了热管工作基本原理的核心。

由于工质的汽化潜热量与凝结潜热量一致，又由于过程的进行中认为是理想的，与外界无热量交换，所以，反应在热管两端温度上也是一致的，亦即热管等温性是非常好的。工质的汽化和凝结的过程都是在蒸汽空间中进行的，在这个空间中工质所处的状态为饱和状态，而饱和蒸汽温度与饱和蒸汽压力之间不是独立的，二者之间是有对应关系的，这一点对热管的工作和设计以及实验都是非常重要的。由于饱和温度和饱和压力有这样一个关系，又由于工质由加热段到冷却段之间温度变化很小，就决定了热管蒸汽空间中的压力变化也是很小的。因此，毛细结构中的工作液体的一点表面张力或管中少量工作流体的重力就能克服热管工作中所产生的压力差。这一点与锅炉中工质的循环有根本的不同。锅炉中工质的循环是用机械泵进行强迫循环，而且还需要补充工质。热管中的工质根本不用机械泵循环，也不需要补充。

热管内工作流体的连续循环是依靠工作液体的表面张力。这种独特的传质方式即使热管获得了独特的成效，又成为热管正常工作的主要障碍之一。对热管内壁装有多孔的毛细管结构物，必须使之浸透工作流体。为此，必须有足够量的工作流体注入管内，使流体充满所有毛细管结构的毛孔。工作流体稍微过量不会影响热管的正常工作。相反，要是工作流体的量不充足，不能把所有的毛细管结构的毛孔充满，则有可能成为热管破坏的原因之一。热管蒸汽的饱和压力和液体表面的平衡取决于表面的曲率半径。如果液体表面是凸面的，则蒸汽压力比作用在平面上的压力要大些；如果是凹面，则要小些。毛细结构抽吸力的大小是由吸液芯毛细孔内液体表面的曲率半径差得来的。要使毛细结构能保证工作流体的循环，它必须足以克服系统的粘性的动力学损失，必须补偿反向的重力作用。毛细结构的抽吸力通常比一般的动力系统可得到的抽吸力小，因而热管在重力环境中的应用受到一定的限制。

从上述的讨论中可知，在热管的整个工作过程中，流体动力学是很重要的。传热理论则提供了通过热管各部件，如管壳、吸液芯和工作流体以及热管与热源和冷源界面输入和输出热能的热传导率的依据。因此，对设计、实验以及运行热管及其换热器的技术人员来说熟悉基本的流体力学和传热学及工程热力学的知识是必需的。

为了使上述热管工作性能好，除理论上讨论和保证外，还必须作到下列几点：

1. 热管在工作期间不产生腐蚀和在热管工作温度条件下不出现不凝结气体。为了

保证这一点，管壳、吸液芯和工作流体三者应当经过严格的选择，保证三者之间是化学相容的。

2. 热管内一般应设有加强换热的毛细结构，如各种吸液芯或沟、槽等。
3. 热管外面一般应设有翅片来加强热管的换热能力。
4. 热管的管壳和吸液芯应当经过严格的清洗，如酸洗、碱洗和水洗等，并对管壳和吸液芯要除气。工作流体应该是高纯度的。
5. 热管在工作前，内部应保持真空状态，保证具有一定的真空度。
6. 热管管壳应保证具有一定的强度，热管在工作时要承受一定的高压而不漏泄。

§ 1—4 热管的特点

上面讨论了热管的工作基本原理和为保证此原理的实现所必需的几个条件。热管的基本结构原理决定它的工作基本原理，而工作原理又决定了热管的基本特点和应用。

热管是一个新型的传热元件，无论什么形式的热管都是一个换热元件或利用换热进行控制或开关的元件。除了控制或开关用的热管元件之外，热管的绝大多数是换热元件。热管作为换热元件与其它形式的换热元件相比有如下几方面的特点及优缺点。

一、传热系数高

热管的热传导能力强就是因为热管的传热系数高。例如工作温度在 1000K 下的钠热管，其相当导热系数的数量级可达 10^3 [瓦/米·K]。钠热管管壳材料一般采用镍铬钢，在同温度下，热管管壳材料镍铬钢的导热系数为 25 [瓦/米·K]，热管的传热系数是热管管壳材料的导热系数的 40000 倍，比更好的金属导热体的导热系数也要高 $10^3 \sim 10^4$ 倍。当然，热管的热传递能力也是随工作流体及其工作温度等的不同而改变的。

对于传热元件来说，传热系数 [K] 是个重要的技术经济指标。在气—气换热的情况下，我们可以拿热管与常用的传热元件—光管和翅片管进行比较，可以在相同的传热面积和传热温差下，比较它们之间的传热系数与传热量的大小。在这种情况下对上述三种换热元件的传热系数进行了计算，并将计算结果列入表 1—1 中。

表 1—1 气—气换热情况下三管传热系数的比较

传 热 元 件	传热系数 K 瓦/米 ² ·℃
光 管	20
翅 片 管	37.4
热 管	268.8

通过表 1—1 中数值的比较可以看出：在气—气换热的情况下，热管最优，其传热系数为光管的 10 倍以上，为翅片管的 6 倍以上。

二、传递热量大

热管传递的热量，是指管内加热段液体吸热变为蒸汽的汽化潜热量，到凝结段蒸汽

又变为液体放出的潜热量。这种吸收或放出的潜热量是相当大的,比不是靠相变吸收或放出热量的元件要大得多。

热管在轴向传递热量的大小可和同尺寸的铜棒传递热量(导热)的大小相比较,如图1—4所示。图中所表示的热管和铜棒的直径都为 $\phi 12.7$ 毫米,长度都是300毫米。尽管铜的导热系数为350~400(瓦/米·度),仅次于银,但由图1—4中可见,铜棒要在很大的温差下才能传递一定的热量,而热管在很小的温差下就可以传递很大的热量。

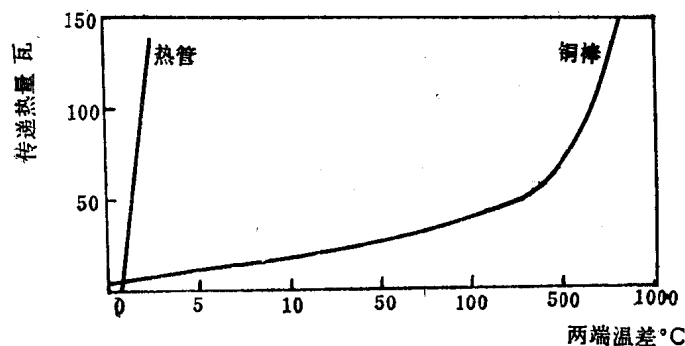


图1—4 传热元件传递热量比较图

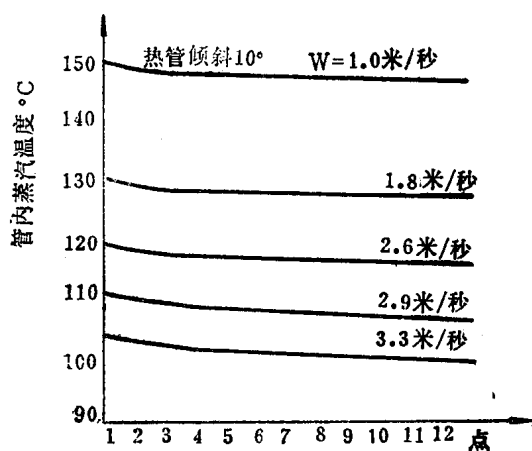


图1—5 管内温度沿管长分布图

图中各点与热管长度的对应关系如下:

1点—20毫米	2点—200毫米
3点—320毫米	4点—560毫米
5点—740毫米	6点—920毫米
7点—1080毫米	8点—1260毫米
9点—1440毫米	10点—1620毫米
11点—1800毫米	12点—1920毫米

如铜棒在100°C温差下才能传递30瓦的热量,而热管在几度的温度下就可以传递上百瓦的热量。实验证明,热管有极高的热传导能力,与金属良导体相比,其导热能力要高许多倍,因此,热管有近超导体之称。热管的传递热量的强度约为良导体的 10^8 倍,有时可达 10^4 倍左右。

三、等温性能好

在热管内的传热过程,由于是相变过程,再加上管内工作流体的纯度很高,因此,热管内蒸汽的温度基本上是恒温的。对一般工业上余热回收热管来说,管内有纵向槽道毛细结构的、长2米左右的热管,在两端测量其管内蒸汽温度的温度差不超过5°C,有的情况下只差2~3°C,如图1—5所示。图1—5中所表示的曲线是在各种冷却风速(W)下测得的,在高风速(3.3米/秒)下,测得热管内两端的温差较大些,

但是在低风速(1.0米/秒)下测得的温差就很小。不管在那种风速下都可明显的看出,热管内的温差是很小的。这一点与其它传热元件相比是一个很大的优点。

四、温度范围广

热管能适应的温度范围和各种热管的具体结构，与采用的工作流体和热管的环境工作温度等有关。目前热管能适应的温度范围一般为 -200°C 到 2000°C ，可见，热管所适应的温度范围是非常广的，这样的温度范围是任何其他传热元件所难以达到的。由于热管适应的温度范围非常广，一般习惯地分成几个温度区域。通常工作温度在 350°C 以上，属于高温热管；工作温度在 200°C 到 350°C 的属于中温热管；工作温度在 200°C 以下，可视为低温热管。工作温度对工作流体和热管管壳，吸液芯材料的选择有决定性的影响。一般是根据热管工作环境温度的高低，首先确定工作流体，然后根据工作流体考虑到其化学相容性来确定管壳和吸液芯的材质。常用的工作流体和与其适应的工作温度范围列于表1—2中。

表1—2 常用工作流体及与其适应的工作温度范围

工 作 流 体	熔点 $^{\circ}\text{C}$	大气下沸点 $^{\circ}\text{C}$	工作温度范围 $^{\circ}\text{C}$
氦	-272	-269	-271~-269
氮	-210	-196	-203~-160
氢	-78	-33	-60~100
弗立昂11	-111	24	-60~120
戊烷	-130	28	-20~120
弗立昂113	-35	48	-10~100
丙酮	-95	57	0~120
甲醇	-98	64	10~130
PP2	-50	76	10~160
酒精	-112	78	0~130
庚烷	-90	98	0~150
水	0	100	30~200
PP5	-70	160	0~225
导热油	12	257	150~395
水银	-39	361	250~650
硫	112	440	200~600
铯	29	670	450~900
钾	62	774	500~1000
钠	98	892	600~1200
铷	179	1340	1000~1800
铯	960	2120	1800~2300

五、热管其他方面的特点

热管除了上述一些特点之外，还具有一些特点。如构造简单、无运动部分、工作可靠、重量轻，在失重的情况下也能很好的工作，把热管应用到两种流体之间换热可以作到两种流体互不渗混、不泄灌。

热管不论多大、多长，每一只都是一个独立的换热元件。如组成一个换热器或装置，可以根据现场的情况和设计计算的情况，取任意根数进行组合。对每一根热管都可以进行任意拆换。

热管的工作是安全可靠的。因为选用合适的工作液体，热管工作在合适的温度下，一般热管内的工作压力都在常压左右。有的热管装有某种工作液体在较高的温度下工作，在管内会产生一定的高压，这时应对热管经过进行强度计算，如果强度够了，热管在工作时是不会出现什么问题的。

对热管来说，那一端接触高温流体，那一端即是加热段，同样，那一端接触冷流体，那一端就是冷凝段。这就是说，热管传递热量的方向完全取决于外界条件。

由热管内装有工作液体的物理性质决定，当外界温度低于管内工作液体的熔点温度时，热管就会自动停止工作，即可起自动停车的作用，实现自动控制温度。

热管虽然具有许多的优点，但是，也存在以下几个方面问题：

1. 由于热管的直径较小，一般在 $\phi 30$ 毫米左右，所以，长度就不能太长，一般为 2000 毫米左右。这样长度的热管是满足不了工业上的要求的。另外，现在一般应用单根热管所传递的热量一般只有 2 瓦左右，也满足不了换热或散热的要求。由于单根热管所能传递的功率还比较小，因此，每台热管换热器热管的根数还是相当多的。所以进一步研究提高单根热管传递的功率是很有意义的。

2. 现在常用工作液体的工作温度范围还很窄，如工作液体水是很理想的一种工质，但其环境工作温度范围太窄了。一旦热管加热段温度和热量增高，由于热管内工作液体压力增高的速度很快，容易使热管破裂。

3. 目前，热管在比较高的温度下工作，还存在腐蚀问题和工作液体不稳定的问题等。

第二章 热管的构造原理

热管构造的三要素是：

- (1) 工质或工作流体；
- (2) 管芯或毛细结构；
- (3) 管壳。

这三要素有机的组合是热管进行正常工作的基础。三要素的组合有时是矛盾的。下面就来讨论组合的原则。

§ 2—1 工 质

欲确定一种适宜的工质，首先要考虑的是蒸汽运行的温度范围，可按表 1—2 来选择。但是，在大致相同的温度范围内，可能有几种工质同时可供选用。为了确定所采用的工质最佳，必须考察其各种特性。主要要求如下：

1. 工质与管芯和管壳材料的相容性；
2. 热稳定性能好；
3. 工质能润湿管芯和管壳材料；
4. 在运行温度范围内，蒸汽压力不是太高或者太低；
5. 汽化潜热大；
6. 导热系数高；
7. 工质的液相和蒸汽相的粘度低；
8. 表面张力大；
9. 冰点或凝固点要适当。

除了以上的要求之外，还必须根据与热管内热流所受到的各种限制有关的热力学来考虑选择工质。这些限制有粘性限、声速限、毛细限、携带限和核沸腾限，这些限制将在第三章中讨论。

一只热管能否长期的运行，能否稳定地进行工作等问题都是直接与材料的不相容性有关的，这一点涉及到热管的三要素，下面要详细地讨论。然而，工质的热性能在使用过程中有可能降低(退化)，还要防止流体分解成不同成分。因此，必须要求工质在整个可能运行的温度范围内热稳定性好。

流体表面的性质好似一张绷紧的薄膜，这与液体的表面张力和表面的大小有关。由于液体分子受到吸引力，所以整个液面就有拉力作用。表面张力随温度及压力而变化，不过，随压力的变化往往很小。表面张力的有效值由于受液—蒸汽、液—液或液—固界

面上积累的外来物质的影响,可能有较大的变化。

在设计热管时,为了使它能够克服重力运行,并产生较大的毛细驱动力,所以,希望表面张力大一些。此外,还必须使工质润湿管芯和管壳材料,即接触角为零,或者是非常小。

在运行的温度范围内蒸汽压力必须大,以避免蒸汽速度过大。因为蒸汽速度大就使温度梯度大,又能把与之反向流动的冷凝液携带走,或者还会由于可压缩性引起流动不稳定。但是,压力又不能太高,太高必须用厚壁管壳。

希望工质的汽化潜热大,以使用少量的液流来传递大量热量,从而保持管内的压差小。

工质的导热率越大越好,这是为了减少径向温度梯度,以及减小在管芯与管壳交界面上产生核沸腾的可能性。

为了把液流的阻力减至最小,要选用蒸汽相和液相粘度低的工质。

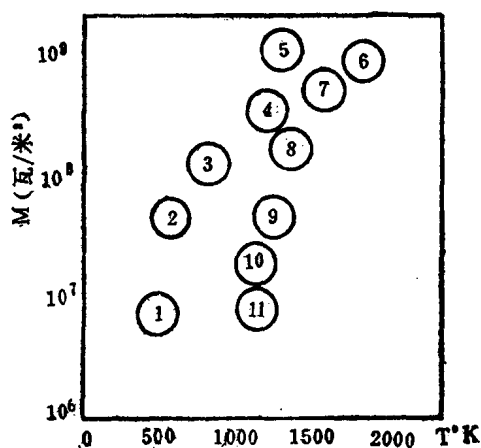


图2—1 选择工质的M数(在沸点下)

- | | | | |
|-------------------|--------------------|-------|------|
| 1—NH ₃ | 2—H ₂ O | 3—Hg | 4—Cd |
| 5—Zn | 6—Li | 7—Mg | 8—Na |
| 9—K | 10—Rd | 11—Cs | |

工质的品质因数 $M = \sigma_i L_{PL} / \mu_i$, 它为快速比较工质的好坏提供了便利的方法。M数越大越好。图2—1中给出了一些工质在 200~1750K 范围内,在沸点下的品质因数M。水和所有的有机流体,如丙酮和酒精相比,其显著的优点是汽化潜热和表面张力大。当然,最终还要根据成本、可利用性、相容性以及以上所列举的其他因素来选定工质。

品质因数的大小是选择工质的唯一准则。在特定的情况下,其他因素可能更为重要。例如,就成本而言,宁愿选择钾而不选择铯或铷,因为他们的成本比钾高一百多倍。又如,在 1200~1800K 范围内,锂比大部分金属(包括钠在内)的品质因素都大,但是若采用锂作工质,就需用抗锂合金作管壳;而采用钠作工质,则可用不锈钢作管壳。因此,选用钠—不锈钢这种性能低一些的热管将是便宜和方便的。

热管所用的工质范围很广泛,从 4K 下用氢,直到 2300K 下用锂。在 350~500K 范围内应用水作工质的优越性最明显。在这个温度范围内,其它可供选择的有机流体的品质因数都偏低。在稍低一些的温度范围内(270~350K),希望用氨作工质。但是,为了使氨保持高纯度,要求细心操作。丙酮和酒精是低蒸汽压的工质。上述这些工质常用于宇航设备的热管内。水和甲醇与铜相容,常用来冷却电子仪器设备。

在 500~650K 范围内,可用高温有机传热体,如联苯与联苯氧化物的低共熔混合物,其沸点在大气压下为 260℃左右,但是其表面张力和汽化潜热小。若含有很多其它有机化合物,则当膜温度超过临界值时,联苯就很快分解掉。然而,这种低共熔混合物和许多具有相同运行温度范围的其他流体不同,它们具有特定的沸点,而不是一个沸点

范围。

当热管的工作温度进一步提高,就进入液态金属的工作范围。水银的有效工作温度范围为 $500\sim 950\text{K}$,水银具有诱人的热力特性。在室温下仍呈液态,这使热管的制作、充液操作和起动等都可以大大简化。但它也有不足之处,除了有些毒性之外,它用作热管工质与作热虹吸管的工质不同,其主要的问题是难于润湿管芯和管壳。人们几乎没作这方面的研究,所以,关于水银润湿性能的文章很少。

热管的工作温度范围更高一些时,则希望用钙、钾和钠作工质。附录里载有它们与热管有关的特性。

如果热管的工作温度在 1400K 以上,通常选用锂作工质,但也可以用银作工质。

§ 2—2 管 芯

热管管芯的选择同工质的选择一样与很多因素有关,但其中主要的因素是与工质的性质紧密相关。管芯的主要作用是产生毛细压差,把工质从冷凝段输送到蒸发段。此外,还必须能把液体分布到蒸发段上可能吸热的任何范围内。尤其是在失重的情况下,当冷凝液回流的距离超过 1米 时,常常需要使用不同形式的管芯才能起到这两个作用。

管芯产生的最大毛细压差,随毛细孔的减小而增加,而对管芯所要求的另一个特性,即渗透率,它随毛细孔的增大而增加,故均匀管芯的最佳毛细孔尺寸是两者折衷的结果。从这个意义上讲,管芯有三种主要的形式。水平放置的热管和重力辅助式热管采用低性能管芯,它具有较大的毛细孔。在需克服重力的场合下,需要小毛细孔。通常要求热管的传热能力高,故必须采用非均匀的管芯或干道管芯,并且用细孔结构来辅助促使液体的轴向流动。

另一方面,管芯的厚度应适当。增加管芯的厚度可以提高热管的传热能力,但是却增加了管芯的径向热阻,又使传热能力降低,于是蒸发段容许的最大热通量也随之降低。蒸发段的总热阻还与管芯内工质的放热系数有关。管芯还必须具有其它方面的一些重要性能,如与工质的相容性和润湿性、易于制作成和热管内壁一样并且最好是性能稳定的形状。此外,造价也应便宜。

一、均匀管芯

均匀管芯有很多种形式,最常用的管芯是用丝网或斜纹织品制成的。所用的材料为不锈钢、镍、铜及铝。并加工成具有一定尺寸范围的毛细孔。各种丝网及斜纹织品的毛细孔尺寸和渗透率,查有关的表格。为了增加液体流动的能力,可开一些粗一点的流道。在管内壁上开槽道的铜热管和铝热管,已用于失重环境(一般在地球重力场内,单用槽道管芯不能产生很大的毛细压差,而且携带现象还可能限制热管的轴向热流量。为克服这一问题,在槽道上覆盖一层丝网)。

二、干道管芯

高性能热管必须采用干道管芯。为了克服这种热管工质导热系数低的不利因素,必须把热管的温度梯度减至最小。这种热管的内径只有 5.25毫米 。传输热量为 15瓦 ,在 1