

219

M.N. 伊凡诺夫斯基

〔苏〕 V.P. 索罗金

著

I.V. 雅戈德金

热管的 物理原理

RECUAN
DEWULI
YUANLI

中国石化出版社

译 者 序

本书作者是苏联的M.N.伊凡诺夫斯基、V.P.索罗金和I.V.雅戈德金，第一版于1978年出版，后来英国牛津大学把它译成英文于1982年出版（译者是R.伯曼），本书对从事热管工作的人员很有借鉴的价值。我们现根据英译本译成中文。

本书特点是对热管的物理原理进行了系统深入的讨论。全书包括引言、正文四章及两个附录。引言部分对热管技术作了总体概括和介绍，四章内容全部讲述热管的基本理论，附录介绍了热管的计算方法、计算程序及热管工质的物理性能。本书引言、第一章、第三章及附录2由顾金初译，潘永密校，前言及第二章由潘永密译，华永利校，第四章及附录1由华永利译，顾金初校。全书最后由华永利对内容相关部分进行统一。

本书主要对象是在核能技术、航天技术、电子技术以及动力、化工、电力、冶金、航空、建筑等领域从事传热工作的科技人员，也可供高等学校有关专业师生参考。

1987年6月于杭州

前 言

近年来，热管吸引了一些技术部门的科学家、设计师和工程师们更多的注意，这些技术部门包括：一是对一定过程及设备需要进行恒温控制的部门；二是需要有高效的导热器、高的传热率或需要控制、变换热流的部门。在原子能、太空研究、化学、电子和其它技术分支中，各种专家必须熟悉控制和决定热管中发生的过程及其运行的物理原理，了解热管的结构和使用的基础知识，懂得有关如何进行热管优化设计的许多概念，以及熟悉热管的临界特性和他们的应用场合。在苏联已经出现了几本热管的专著和论文集^{1~6}。本书是对热管的物理基础进行系统讨论的一个尝试。热管的工程和工艺方面的问题，将在作者打算著写的“热管的工艺基础”一书中进行讨论，可以说它是本书的续集。

自从开始研究热管以来的十几年中，已经积累了有关热管设计、试验和应用等各方面的大量资料。其中有些工作现在看来已经过时了，但其它的一些方面已被实验肯定并有了进一步的发展。每年都有许多新颖的设计思想出现，它们已被实验所证实并被应用到生产工艺中去。最近，正如一些新事物总会碰到的那样，一方面对热管应用于某些技术分支的前景过分乐观的情绪已经衰减，而另一方面，在更多踏实研究的基础上，热管已经有成效地应用在另一些技术分支中。在今日，开发新的热管设计的可能性肯定远非衰竭。实际上，目前热管在技术上的广泛应用还只是刚刚开始。

作者在写本书时面临着两难之境：对于不是专搞热管的人员来说，本书应以很通俗的方法讨论热管的一般问题并叙述在热管中发生的过程；但另一方面，对于从事热管装置的设计和应用的专业人员来说，他们需要对热管作较为深入和更为详尽的介绍，并对已经做过的工作结果进行分析。因此，问题的实质是要采取一个从简单的概念着手到详尽的描述这样一个系统的介绍形式。最后考虑结果，本书重点应放在对热管进行详细描述及对其物理原理的分析上。作者的目标集中于资料的系统化上，把一些单独的结果组成一个整体，并且对热管的计算方法和设计作出介绍。

本书所叙述的主要内容是以作者在苏联国家原子能应用委员会物理能源研究所里的热物理组所进行的研究为基础的。作者在此感谢科尔莫戈洛夫 (N.P.Kolmogorov)、库兹涅索夫 (L.M.Kuznetsov)、普罗罗克 (L.M.Prorok) 和斯特罗兹科夫 (E.N.strozhkov) 在准备初稿时所给予的帮助。

作者还将感谢对本书寄来他们的看法及评论的读者。

主要符号与下标

A ——横截面积	V ——容积
a ——声速	W ——流速
c_p ——定压比热	α ——传热系数
d ——直径	γ ——主比热比
f ——摩擦系数	δ ——膜厚度；间隙宽度
G ——容积流率或质量流率	ε ——孔隙率
g ——重力加速度	η ——运动粘度
h ——高度	θ ——接触角
K ——渗透率	κ ——充装系数
k ——波尔茨曼常数	λ ——导热率
L ——蒸发潜热	μ ——动力粘度
l ——长度	ν ——相对过热
M ——分子量	ρ ——密度
P ——压力	σ ——表面张力
Q ——热流	ψ ——势
q ——热通量	M ——马赫数
R ——气体常数	Re ——雷诺数
r ——半径	We ——韦伯数
s ——熵	ad ——绝热
T ——凯尔文温度	b ——体积
t ——摄氏温度	c ——冷凝
	cap ——毛细

circ——循环
diff●——差
eff——有效
evap——蒸发
f——摩擦
g——重力
h——水力
in——惯性
K●——冷凝

l——液体
men——弯液面
ph——相间
reft●——反射
sat——浸润
sh——屏障
son——声的
V——蒸汽
W——吸液芯

●中译者补充的下标—译者注。

112591

目 录

主要符号与下标

引言	1
第一节 热管的结构和工作原理	4
第二节 对热管工作参数的约束	7
第三节 热管的分类	11
第一章 推动力与热管中的压力平衡	21
第一节 表面力和毛细现象	21
第二节 热管中的压力平衡	30
第二章 流体动力学	34
第一节 液体在毛细系统中的流动	34
第二节 有质量注入和抽出的气体流动。热管中的 蒸汽流动	38
第三节 临界气体流动速率。热量传递的声速及 粘性极限。激波	72
第四节 热量传递的毛细限制	96
第五节 液体和蒸汽间的相互作用。由于液体雾沫 夹带入蒸汽而产生的热量传递限制	119
第三章 热量交换和质量交换	129
第一节 蒸发和冷凝。气体分子运动方程。蒸发系 数和冷凝系数	129
第二节 热管加热段的最大热通量。从吸液芯蒸发 的热阻	132

第三节	冷凝时的热量交换和质量交换·····	163
第四章	热管动力学·····	170
第一节	热管起动动力学。起动状态下的温度场·····	170
第二节	毛细结构中液体的充装·····	183
第三节	起动动力学的特殊情况·····	198
附录1	热管的计算方法·····	208
A.1.1.	计算原理·····	208
A.1.2.	压力平衡分量·····	209
A.1.3	热量传递限制·····	218
A.1.4	热管的温降·····	221
A.1.5	热管参数的优化·····	227
A.1.6	热管计算的计算机程序·····	234
附录2	热管工质的物理性能·····	265
参考文献	·····	275

引 言

格罗弗 (Grover, G.M.) 和他的同事 (美国洛斯阿拉莫斯科学实验室) 在1963年首次提出了热管这个名称, 并首先对这些装置进行了研究并讨论了它们的技术应用^{6,7}。热管更确切的名称应是传热管。然而由于最初名称已被广泛流传, 因此便保留了热管这个名称。

构思一个导热器, 其中热量的传递是靠工作介质的蒸发和冷凝, 而液体的输送则由毛细力来实现, 这样一个想法是由高格勒 (Gaugler, R.S.) 于1942年为了将它应用于制冷工程而提出来的。然而这个发明20多年来在工程上并没有得到应用, 直到高温的太空动力系统的发展才给这个设想带来了新生。

我们应该指出, 热管早先有个名称叫做珀金 (Perkin) 管。珀金管是没有吸液芯的导热器, 其中热量的传递也是通过蒸发潜热来实现的, 而载热体的循环则是由重力来完成的。这些装置是在1897年由珀金发明的, 开始时成功地应用于面包加工工业, 后来又在许多其它的领域得到应用。在热管出现之前, 一直应用没有吸液芯的热管。例如, 在建筑工业中, 这些无吸液芯的热管在永久的冻土区可使建筑物基础下面的土壤保持冻结。然而, 在蒸汽-液体的导热器中, 毛细力的利用在热管的发展过程中确是迈开了新的主要的一步。

在美国的首批试验证实了按照上述原理工作的导热器

102901

(热管)有着高的效率。这些试验之后发生了连锁反应,世界各地研究、发展和应用这种新的导热器(热管)的愈来愈多,继美国之后开展这方面工作的有西德、英国、法国、意大利、荷兰以及苏联和东欧的一些国家(捷克斯洛伐克和南斯拉夫)。现在几乎所有的发达国家都在进行热管的研究和开发工作。其中,美国的研究工作范围更是特别广泛,成百家公司以上的公司和研究机构正在进行热管的开发和应用及对热管中的过程进行研究。美国和欧洲国家在热管的研究方面还有着紧密的合作关系。

自1965年以来,关于热管的研究成果已在各种学术会议和专题讨论会上发表。近年来召开了专门讨论热管的国际会议,第一次,1973年在西德的斯图加特(Stuttgart),第二次,1976年在意大利的波伦亚(Bologna),第三次,1978年在美国的旧金山。

对热管之所以发生兴趣是由于这种导热管(热管)表现出来的所有有价值的性能,最主要的是其高度的等温性。事实上以液态金属作导热介质的热管,其有效的导热率要比导热最好的金属银和铜大一千倍甚至好几万倍。即便是传热介质的导热率和蒸发潜热都较低的低温热管,它的热阻也比最好的金属导体小几十倍。

由于热管能仅靠毛细作用力工作,所以热管能在失重状态下使用。这个特性加上热管的质量很小,使得它们能广泛地用在太空装置的各种部件中进行热量的传递和排热。在有地心吸引力的情况下热管也可以有效地工作,重力能帮助工质的输送并使这些装置的传热能力明显增加。

热管变换热流的能力是它又一个重要性能。人们可以在热管的某一部分输入高的热流密度,而同时在热管的另一端

输出低的热流密度，反之亦可。变换的程度可在一个大的范围内加以控制。顺便提一句，我们注意到，传热介质为液态金属的热管允许异常剧烈的加热，其热通量在加热段能超过 10^7 W m^{-2} ，这样高的传热率只有靠蒸发毛细多孔物体表面的液体才能得到。

特殊结构的热管（例如，充气热管）可以自动或强制控制热阻，或是可以改变有效的传热面积。因此藉热管之助来解决热二极管、温度调节器和热稳定器的制造问题是比较容易的。

热管本身自我配套这一事实对使用无疑是方便的。每一热管是整个系统一个独立的单元，它既不需要泵，也不需要其它的辅助设备^①。

原则上这些导热器可以使用于一个很宽的温度范围，从低的深冷温度（从1K起）到最高温度（2500~3000K）。并且能按给定的工作温度来选择最佳的工质：液化气体、有机液体和低沸点金属。通常，每种工质只在某一温度范围内（100~300K）才是最佳的。传热介质为液态金属的热管有相当好的传热性能，它能够传送非常大的热量，每平方米热管的横截面积可以达到 10^8 W 或更多。当操作温度降低时，介质传热的物理性能变坏，因而热管的传热能力也下降，然而这与热管的结构及实际的操作条件是密切相关的。尽管热管的结构简单，但在其中发生的过程是相当复杂的并需要详尽地加以研究。只有对发生在热管中的过程有了详细的了解，才有可能评价在特定条件下这些装置的适用性及选择最适宜的操作条件。

① 电磁热管例外。

第一节 热管的结构和工作原理

热管是给一种用于传热的蒸发-冷凝装置取的名 称。在此装置中汽化潜热是靠蒸发加热段的液体和在冷却段冷凝蒸汽来进行传递的，而工质的闭路循环则是依靠毛细作用或体积力来实现。

热管的结构多种多样，相互之间差别很大。最简单的结构型式●如图 I-1所示，它具有一个密闭的壳体，壳体内表面覆盖有一层毛细多孔的物质，叫做吸液芯，它被液相的工质饱和着。各种多孔物质都可作为吸液芯，如各种丝网或烧结的多孔结构。吸液芯可由管壳内表面上的沟槽盖上带有孔眼的屏罩或其它某些依靠毛细力的作用能把液体从冷却段输送到加热段的结构所组成。在热管的运行温度下，汽液两相能同时存在并能浸润吸液芯的任何化学纯的物质或化合物都可用作传热介质。这些传热介质有：液态氨、氮、酒精、氟里昂、水和碱金属等等。热管有的可在低的深冷温度下工作，而有的则可在高达2500℃甚至更高的温度下工作。

我们将研究在没有体积力时最简单型式的热管的运行。热量通过热传导经壳体传入管内，通常经吸液芯传给工质，并使浸润吸液芯的液体蒸发，从而导致加热部分吸液芯细孔中的液体表面形成凹形弯液面或增加凹形弯液面的曲率。在表面张力的作用下，在凹形弯液面处产生了毛细压力 ΔP_{cap} ，它作用在液体上并趋于减小液体的弯曲曲率。在弯液面上的毛细压力由拉普拉斯（Laplace）式确定如下：

$$\Delta p_{cap} = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.1)$$

●除非另有说明，否则下面只讨论这种热管。

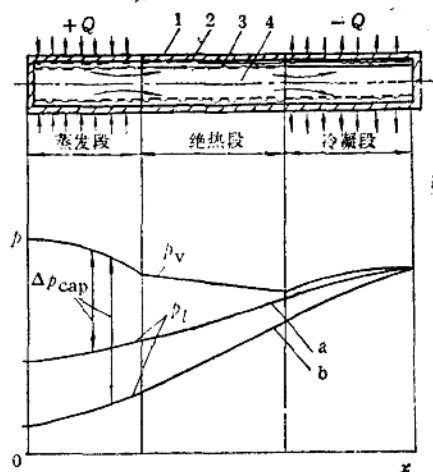


图 I-1 圆柱形热管及其蒸汽压力 p_v 和液体压力 p_l 的定性分布略图

(a) 在没有体积力时; (b) 在与吸液芯中液体流动方向相反的重力场中

1—壳体; 2—吸液芯; 3—液体; 4—蒸汽

式中 Δp_{cap} ——毛细压力;

r_1 、 r_2 ——弯液面表面的主曲率半径。

在排热段, 液体的凝聚导致吸液芯的淹没。在该段中, 吸液芯内液体弯液面的曲率与加热段中相应的曲率相比通常是可以忽略的。管中这两个段中弯液面曲率的差异以及相应的毛细压力的不同产生了一个压力降, 这个压力降就是沿着吸液芯将液体从冷凝段输送到蒸发段的推动力。在热管中“毛细泵送”就这样被用来实现工质的封闭循环。体积力、重力、离心力、电磁力等也能在热管的运行中起着同毛细力一样的作用。体积力能增进、也能阻挠热管中传热介质的循环。

在运行的热管中, 工质循环时有如下的过程发生: (i)

在加热段，液相工质由于从热源导入热量而蒸发。(ii)输送蒸汽到低压段，即排热段与冷凝段。(iii)在排热段蒸汽冷凝为液体。(iv)在毛细力和体积力的作用下把液体从冷凝段输送到蒸发段。

这些过程中的每一个过程都会产生沿着工质循环路线上压力的变化。当蒸汽沿着蒸汽通道流动时，压力变化是由摩擦产生的水力损失和惯性效应两个方面引起的：当一定量的蒸汽注入汽流（蒸发）或从汽流中除去（冷凝）时，蒸汽中的静压发生变化。在毛细力作用下沿着吸液芯运动的液体中的压力发生变化主要是由于摩擦造成的。在蒸发段和冷凝段，在液相和气相间的界面上，除毛细压力外还存在一个压力降，它是由蒸发或冷凝工质时动态的相互作用产生的。在稳定状态下，通过热管任意横截面上的相间压力差被毛细压力所平衡：

$$p_v - p_l + \Delta p_{ph} = \Delta p_{cap} \quad (1.2)$$

式中 Δp_{ph} ——由相变产生的蒸汽和液体间的压力差。

一个典型的蒸汽和液体中的压力沿着热管长度的分布如图 I-1 所示。弯液面的曲率和毛细压力两者均沿着热管长度变化。最大的弯液面曲率产生在热管蒸发段的始端，而最小的曲率产生在冷凝段的末端。曲线(a)代表在没有体积力作用情况下液体中的压力变化；为了比较，曲线(b)给出了计及重力在阻碍液体循环情

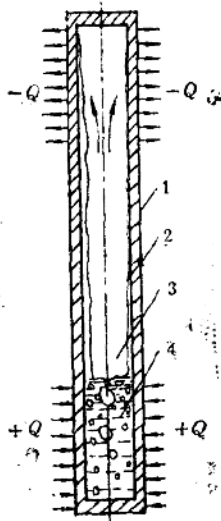


图 I-2 蒸发热虹吸管略图

1—壳体；2—冷凝液膜；

3—蒸汽；4—沸腾液体容积

况下液体中压力沿管长的分布。这对于传送一定热量的热管来说，在考虑重力影响时毛细泵送必须给出一个比热管在失重状态下工作时为高的压力降。

在重力或其它力（离心力或电磁力）能够将液体从冷凝段输送到加热段的情况下，可以使用没有毛细结构的、也即没有吸液芯的热管。没有毛细结构而利用重力来操作的热管的结构示于图 I-2，这种热管通常称为蒸发热虹吸管。

第二节 对热管工作参数的约束

热管运行时发生的物理过程对它们的工作参数有若干约束。为了热管能正常工作，我们将首先考虑那些决定最大传热率的和决定参数范围的约束（见图 I-3）。限制热量传递的一些因素是：

（1）在热管的某个部分，通常在冷凝段的始端，蒸汽流动达到声速。在这种情况下将它称为热管热量传递的“声速极限”^①。

（2）一定的毛细结构提供某种介质进行循环的能力只能到达一定的极限，这一限制通常被称为“毛细限

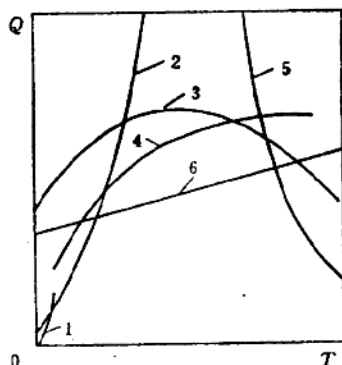


图 I-3 热管最大热量传递的限制

1—粘性极限；2—声速极限；3—毛细限制（或吸液芯极限）；4—蒸汽流夹带由吸液芯中逸出的液滴雾沫引起的限制；5—在吸液芯中由液体沸腾引起的限制；6—按热管排热可能的速率定出的极限

①以下我们将采用下列规定，在讲到“极限（Limit）”是指热管尚未失去运行能力的情况，而讲到“限制（Limitation）”是指发生临界现象的情况（如吸液芯干涸，管子过热等等）。

制”(Capillary Limitations)。在一般情况下应将它归之于“流体动力限制”。

(3) 在低温时, 蒸汽相中的摩擦限制了介质的循环并导致产生热量传递的“粘性极限”。

(4) 液体从吸液芯中逸出并进入蒸汽流的“液滴的雾沫夹带”导致毛细限制的过早到来。

(5) “介质的沸腾”和其它的影响导致在加热段达到临界现象及“热通量”的限制。

(6) 从热管中带走热量的可能性。

对于高温热管(尤其是对 $T > 1000^{\circ}\text{C}$ 的受腐蚀性介质控制的工作热管), 其主要困难在于结构材料难以维持长期的稳定性。因此人们有时将它列为对热管工作参数的第七个限制——安全工作寿命限制。热管的安全寿命受到与工质直接接触且通常还处在由于高温影响而变得更加复杂的应力状态下工作的管壁和毛细结构材料的腐蚀和机械性能稳定性的限制。

限制的因素可以是上面提及的各种限制中的任意一个, 这取决于热管的结构、工质的种类、工作温度的高低以及由热管所传递的热量。

我们将简要地讨论上面所列举的各种限制。热管中的蒸汽压力较低时, 其蒸汽比容大, 即使热量传递较小, 蒸发段末端的蒸汽速度也很大, 并能够达到声速。这时就不可能仅靠改善排热条件来增加热量传递速率, 而会发生阻塞, 导致蒸汽流的声速截止。与加热段始端等温情况下蒸汽流阻塞有关的热量传递限制被称为声速极限。传热能力的声速极限是热管在低蒸汽压力下运行时的一个特性。由声速极限所限制的轴向热流由临界横截面上的蒸汽参数来确定:

$$Q_{son} = \rho_v a L A_v \quad (1.3) \bullet$$

式中 ρ_v ——临界横截面上的蒸汽密度；

a ——声速；

L ——蒸发潜热；

A_v ——热管蒸汽通道的横截面积。

对于蒸汽压较低而以声速极限为特征的热管，当它有足够长的排热段时是有可能产生粘性极限的。粘性极限的发生是由于沿着管长蒸汽流中因摩擦而造成明显的压力损失之故。在此情况下，冷凝段末端的汽流有可能达到声速，或可能根本不会达到声速。

在稳定的热力工况下，工质的闭路循环是由诸如毛细结构所产生的压头来实现。如果在热管始端处的温度恒定，而当管传递的热量逐渐增加，则沿着汽-液流过途径的压力损失也增加。当传给热管的热量增加到某一值时，这时就会发生压头不能把必要的工质从冷凝段输送到蒸发段的情况。如果压头是由吸液芯中的毛细力作用产生，则由于毛细压头的不足就会发生所谓热量传递的毛细限制。毛细限制是由热管中流体沿着汽-液途径的压力平衡来确定：

$$\Delta p_v + \Delta p_L + \Delta p_{ph} + \Delta p_b \leq (\Delta p_{cap})_{max} \quad (1.4)$$

式中 Δp_v , Δp_L , Δp_{ph} ——分别为在介质的蒸汽中、液体中及相变时的压力损失；

●式(1.3)中的 a 对应于气流温度(静温)的声速，如用对应于滞止温度(总温)的声速 a_0 ，则

$$Q_{son} = \frac{\rho_v a_0 L A_v}{\sqrt{2(1+\gamma)}}$$

式中 γ ——比热比——英译者注。