

暖通空调中的热管

——应用与制作

雷 亨 顺 编

中国建筑工业出版社

暖通空调中的热管

——应用与制作

雷亨顺 编



中国建筑工业出版社

热管是近十几年迅速发展起来的一种高效传热元件，它在许多领域里得到了应用与重视。为了使这一新技术能为广大群众所掌握，广泛进行实践与探索，本书以通俗浅近的方式，论述了热管的原理、特性及其应用与限制；同时结合我国的现实条件，介绍了一些简化的设计方法和制作方法。

本书可供暖通空调专业技术人员参考，也可供具有中等文化程度的读者阅读。

暖通空调中的热管——应用与制作

雷亨顺 编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：3 字数：75 千字

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷

印数：1—10,300册 定价：0.33元

统一书号：15040·3810

前 言

这本小册子是根据几次业务性和学术性会议上的报告提纲补充、修改写成的。在这些会议上，许多热情的同志迫切地要求编写一本比较通俗易懂，能够把热管原理讲清楚，并能结合我国现阶段的实际条件，帮助他们着手实践的资料。正是在这些同志们的积极鼓励 and 热情帮助下，我接受了同志们的委托，尝试着编写了这本小册子。如果没有辜负大家的期望，起到了点滴交流和推广的作用，我将首先向这些热情的同志们致谢，并诚挚地希望同志们对这本小册子提出批评和指正的宝贵意见。

此外，感谢范兆玲同志为这本小册子描绘了全部插图。

雷亨顺

1979.2.于重庆大学动力系

统一书号：15040·3810

定 价：0.33 元

目 录

热管简史与现状(代序)	1
第一部分 热管的原理与应用	4
一、热管的基本原理	4
1-1 热管的三个组成部分	4
1-2 热管的三个工作区段	5
1-3 热管的九个传热环节	6
1-4 热管的热力循环	10
二、热管的特性	11
2-1 良好的导热性	11
2-2 理想的等温性	12
2-3 热流密度的可调性	13
2-4 热流方向的可逆性	13
2-5 工作温度的可控性	14
2-6 特殊要求的适应性	15
三、热管应用中的限制条件	16
3-1 热源和冷源的限制	16
3-2 工作流体和材料的限制	17
3-3 重力的影响和限制	21
3-4 声速极限	23
3-5 携带极限	26
3-6 毛细极限	29
3-7 热流极限	32
四、热管在暖通、空调中的应用	36
4-1 热管换热器用于建筑物的热风采暖	36
4-2 离心式热管空调器	41
4-3 热管在采暖系统中的应用	45

4-4 热管氨发生器	47
4-5 太阳能热管系统	49
第二部分 热管的设计与制作	52
五、热管元件的设计	52
5-1 热管与其它传热方案的比较	52
5-2 热管几何尺寸的初步考虑	56
5-3 热管工作温度的设计	57
5-4 热管工作流体的选择	58
5-5 热管吸液芯的设计	58
5-6 热管管壳材料的选择	62
5-7 热管的充液量和真空	63
5-8 热管外部换热面的设计	64
5-9 热管的单管试验	65
六、热管换热器的设计	70
6-1 设计的依据和条件	70
6-2 定性温度的选择和物性参数的确定	71
6-3 确定换热器的基本尺寸	72
6-4 基本传热计算	75
6-5 换热器的总尺寸	78
七、热管的制作方法	78
7-1 管壳材料的准备与机械加工	78
7-2 焊接及清洗	79
7-3 吸液芯的制作	80
7-4 热管组装	81
7-5 真空及检漏	82
7-6 充注工作液	84
7-7 热管封口	85
7-8 简易重力热管的制作	86
7-9 热管制作工艺方框图	87
参考文献	88
附录	89

热管简史与现状（代序）

世界上最早的一项热管专利是1944年由美国通用公司的高格勒以不太引人注目的“传热器件”的名称提出来的。处于第二次世界大战的历史条件，又没有明确的需要，而且没有实践效果的任何支持，这项专利的先进思想被埋没了二十年之久！

1962年，美国的特雷费森向通用电力公司提出了在宇宙飞船上采用液体表面张力泵压循环的传热器件的倡议，同样由于未经实验的证明，这个倡议也没有能够实现。

1964年，美国洛斯—阿拉莫斯科学实验室的格罗弗等人，在空间技术迅速发展的有利形势下，从设想到实验，然后以“热管”为名在《应用物理杂志》上公开发表了他们的论文和实验结果。“热管”的命名从此获得了公认，并立即引起了人们广泛的兴趣和重视。

从1968年开始，世界上出现了第一个常规应用的热管器件，它是美国无线电公司(RCA)在宇宙飞船发报机中采用的晶体管用热管散热器。此后，热管的应用就愈来愈广泛了。

热管概念的形成和发展的简史有力地向人们揭示：生产技术要求，以及从理论到实践的成功，这就是新技术具有强大生命力的基本条件。

十多年来，热管技术的发展十分迅速。在理论上，它促进了两相流动和多孔介质中传热和传质的深入探讨，并且在电子计算机的帮助下，已经出现了某些典型热管结构的最佳

化程序设计。在应用方面，热管技术已经从空间技术领域转移到了民用建设，范围愈来愈广。例如，在阿特拉斯火箭周围全都布满了热管。借助这些热管使火箭容器和美国“天空实验室”轨道站的起居舱保持了均温，防止了宇宙飞行器进入大气层时外壳被强烈加热。又如美国阿拉斯加州永久冻土层输油管道的热管保护系统，不仅在一个工程上使用的热管数量是创记录的（十一万四千支），而且在热管长度上也是创记录的（最长21.34米/70英尺）。苏联设计的一种新型双向作用的外燃机，共有四个加热室，利用热管将相邻的两个加热室连接，充分利用了热能。据称这种结构能使外燃机的效率提高到55%，比现有水平提高了15%。前几年还出现了一种内装电极的热管，在高压电的作用下，管中的蒸汽离子化，并在电极之间产生了位差。有人预测，有可能利用热管来制作一种没有活动部件，而且能量损耗最小的发电机。

在常规应用中，西德采用热管散热器的电力机车，从1974年开始行驶在国家的铁路干线上。澳大利亚等国的太阳能热管系统已经投入正式运行。英国热管冷却的电动机已经系列化了。

在暖通、空调方面，美国柯达公司已经在一座七层楼的建筑物中利用太阳能/热管/制冷系统实现了全年的调节控制。应用于这个领域和工业余热利用方面的热管换热器，在美国、日本、西德等国都已经有了系列的商品供应。

在医学方面，研制针状的热管手术刀已有好些年了。现在已进入研制微型热管将能量供给人工心脏，利用热管保存活组织和血液等。

除了上面简要介绍的这些情况外，作为研究课题和实验室成果来说，热管的应用方案可以说是五花八门，无论是机

械加工，或是轻工、化工及其它工业生产方面都有不少报导，有关这方面的资料大都刊登在各种专业性期刊杂志和会议录中，有兴趣的读者请直接阅读这些文献。

我国对热管技术的理论和实验研究工作已有六、七年的历史，实验室的研究成果已经开始用于生产。重庆钢丝绳厂采用可控硅（1000安）热管散热器的整流装置已经投产运行近一年，性能良好。现在，热管散热器和热管单管元件的生产厂已经有好几家了。

由于热管技术在理论上和应用上都在不断发展，在世界范围内，已经分别于1973年在西德，1976年在意大利和1978年在美国召开了三次国际热管会议。美国的新墨西哥大学已经正式开出了热管课程。其它许多专业性会议，如国际传热会议，能量转换会议，热物理会议，全苏传热传质会议，太阳能会议，以及一些学会的年会上都有热管的专题或分组会。我国国内的一些学会会议及行业会议，如换热器会议，热物理学会会议，宇航学会会议，建筑学会及制冷学会会议，变流行业会议等也都列入了热管报告的内容。

但是，对热管技术究竟应当如何评价呢？认识是不一致的。有的认为热管技术的生命力很强，有极其广阔的应用前景；有的则认为在人们生活的重力场中，热管应用的限制性很大，不会有什么前途。作者的观点是：热管是有用的，但不是万能的。我们应当充分利用并发挥热管的一些重要特性，但不能忽视和超越在应用中的某些客观和主观的限制条件。这本小册子正是基于上述的观点，以通俗的方式论述了热管的原理、特性及其应用与限制；同时结合我国的现实条件，介绍了一些简化的设计方法和制作方法，仅供有兴趣的同志们参考。

第一部分 热管的原理与应用

一、热管的基本原理

1-1 热管的三个组成部分

热管的基本结构如图 1 所示，它是由三个部分组成的。

1. 热管壳体

热管壳体是一个完全密封的容器，它的几何形状没有特殊的限制。仅仅是由于第一支热管的出现呈圆管形，所以一般都以圆管形作为典型的代表。热管壳体的内部空腔在制作时要保持很高的原始真空（一般均在 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 毫米汞柱范围），所以热管壳体的任何一道焊缝都必须经得起高真空检漏的严格考验，确保完全密封的要求。连接在壳体上的细管

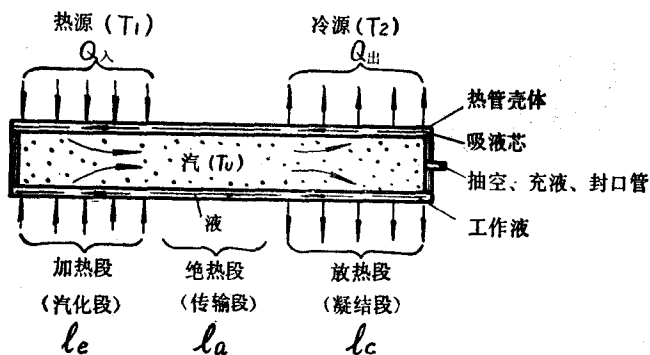


图 1 热管组成部分与工作区段

是用作抽真空、充注工作液和最后封口的。对这根细管的封口，要保证永久密封的要求。

2. 吸液芯

在热管壳体的里层壁面上，装有一层用毛细材料构成的吸液芯。它的作用是在其中均匀而稳定的保持一层薄薄的工作液膜。当热管工作时，它又是凝结液回流的可靠通道。

3. 工作液

工作液是热管工作时的热传输介质。液态的介质储存在多孔的吸液芯层内，汽态的介质则充满整个热管的内部空腔。由于热管制作时的初始真空很高，所以除非是实际温度比工作液的凝固点温度还低，热管内的液汽两相共存的工作介质始终是饱和的。

1-2 热管的三个工作区段

热管制作时通常是在工作液未注入热管之前先抽真空，再注入工作液，最后封口永久密封。所以在热管未正式工作之前，热管内部的状态取决于当时的环境温度和热管工作介质在该温度下所对应的饱和压力。这就是热管工作前的初始参数。

参见图 1，当热量自高温热源 (T_1) 传入热管时，处于热管加热段内壁吸液芯中的饱和液体随即吸热汽化变成蒸汽并进入热管空腔。所以这一段称作汽化段

由于蒸汽分子不断进入汽化段空腔，空腔内的压力不断升高，蒸汽分子便由汽化段经中间传输段流向热管的另一端。蒸汽在这里对冷源 (T_2) 放出潜热后重新凝结成为液体，并为吸液芯层所吸收。所以这一段称作凝结段。

在热管的吸液芯层内，凝结液不断从凝结段进入吸液芯，工作液则不断从汽化段脱离吸液芯，因而在毛细吸液芯

层的两端形成了毛细压力差。在这个毛细压力差的推动作用下，凝结液便以吸液芯层为通道，从凝结段经传输段重新回流到汽化段，从而完成了一个循环。这就是热管的基本工作原理。

显然，根据上述的基本工作原理，从热管与外界环境的换热来看，热管可以划分为加热段、绝热段和放热段；从热管内部的工作过程来看，则可以划分为汽化段、传输段和凝结段。不过这两种划分工作区段的方法是彼此对应的，完全一致的，不要把它们对立起来。

应当指出的是，在热管的三个工作区段中，加热（汽化）段和放热（凝结）段是必不可少的，但绝热（传输）段则可有可无。在实际应用的热管结构中，没有绝热（传输）段的情况是很多的。

1-3 热管的九个传热环节

从传热学的角度来分析研究热管的工作原理时，可以把它归纳为九个传热环节，它们是：

1. 热源与加热段壁面的换热

这个换热过程对热管来说是一个外部过程。实现这个过程的方式可以是导热、对流和辐射中的一种或两种。因为是外部换热过程，所以不应当包括在热管的固有特性项目之内。

2. 热管加热段固体壁的导热

在一般情况下，热管的壳体壁都是金属的而且比较薄，所以这个导热环节的特性比较固定，也比较简单。

3. 汽化段吸液芯层的传热

热管汽化段吸液芯层是毛细多孔材料和饱和工作液组合在一起的复合层。这种复合的吸液芯层是固、液两相物质相

互渗透的结构。在比较简单的情况下，可以假设复合层中只是导热。这时可以近似地把导热过程当作固、液两相物质的并联热路或串联热路加以分析和处理。基于这种观点，在复合吸液芯层中，不允许有汽泡产生。但是，更复杂的情况是存在的，即在大的热负荷条件下，复合吸液芯中出现了汽泡。这时，复合吸液芯层变成了固、液、汽三相共存的结构。吸液芯层中的传热并非简单的导热过程，而是一种相当复杂的固体导热、液体对流和液汽相变同时发生的综合过程。一旦出现了这样的过程，导热就是次要的了。这是另一种观点所作的分析。作者倾向于后一种观点的分析。

目前，关于吸液芯层的传热机理虽然有所争论，但是热管汽化段吸液芯层的传热过程正是热管不同于其它换热设备的关键所在，这是所有的研究者都一致承认的。

4. 汽化段液汽界面的传热

热管汽化段的液汽界面可能是变化的，而且十分复杂，但液汽界面的存在则是必然的。只要这个界面存在，界面上的换热就一定是相变（汽化）换热。相对于其它传热方式来说，汽化换热的热强度很大，对整个热管的传热过程不会造成明显的影响。

5. 蒸汽的传输换热

在热管内部空腔里的蒸汽流动过程是借助于蒸汽分子的质量传输而实现热量传输的。蒸汽从汽化段流向凝结段，理论上是一个压差流动过程，但实际上可以认为是等温的。对于正常工作的热管所进行的测量表明，热管两端的蒸汽温度几乎没有差别。

6. 凝结段汽液界面的换热

在凝结段，工作蒸汽放出潜热并重新凝结为液体。所以

凝结段汽液界面上的换热也是相变（凝结）换热，它的换热强度甚至可以比汽化换热强度还大。

7. 凝结段吸液芯层的导热

工作蒸汽在凝结段重新凝结成为液体后，凝结液便全部进入凝结段的吸液芯层或聚集在它的表面。所以凝结段吸液芯层总是处于被凝结液充分饱和甚至过饱和的状态。这是一个稳定的固液两相组合的复合层，其中肯定不会有汽泡存在，所以它的传热只是导热。

应当指出的是，在某些低热阻的热管结构中，凝结段完全没有吸液芯层。所以这个传热环节有时并不存在。

8. 凝结段固体壁的导热

这个传热环节和加热段固体壁的性质完全一样，是一个最简单的导热过程。

9. 凝结段外壁面对冷源的放热

和第一个传热环节一样，对热管来说，它也是一个外部换热过程，不包括在热管自身特性项目之内。这个换热过程可以是导热、对流和辐射三种方式中的一种或两种构成。

上述九个传热环节就是热管在高温热源（ T_1 ）和低温冷源（ T_2 ）之间完成热量传输的全部过程。其中第一和第九两个环节是外部换热环节；第二至第八七个环节是热管自身的内部换热环节。根据传热学的原理。这九个传热环节是一个完整的串联热路，而每一个单一的环节则相当于整个热路中的一个热阻。所以从热源（ T_1 ）到冷源（ T_2 ）的传热过程可以表示成图 2 的热路结构。

理论和实践表明，在热管的热路中，各个环节的热阻绝对值相差极大。其中 R_4 、 R_5 和 R_6 相对于其它环节的热阻而言小得可以忽略不计，于是：

$$R_{e1}(\text{汽化段内热阻}) = R_2 + R_3 + R_4 \approx R_2 + R_3$$

$$R_{c1}(\text{凝结段内热阻}) = R_6 + R_7 + R_8 \approx R_7 + R_8$$

$$R_i(\text{热管内热阻}) = R_{e1} + R_5 + R_{c1} \approx R_2 + R_3 + R_7 + R_8$$

进一步的分析和实践发现: $R_2 \ll R_3$; $R_7 \gg R_8$ 。所以, 对热管内热阻起决定性作用的是 R_3 (汽化段吸液芯层热阻) 和 R_7 (凝结段吸液芯层热阻)。因之, 从结构设计到运行方式上设法减小 R_3 和 R_7 是减小热管内热阻最有效的途径。例如, 重庆大学热管教研组研制的大功率1000安可控硅热管散热器就是在这个原则的指导下, 取消了凝结段的吸液芯代之以自由干道, 从而使散热器的总热阻显著降低, 达到了同类型的世界先进水平。

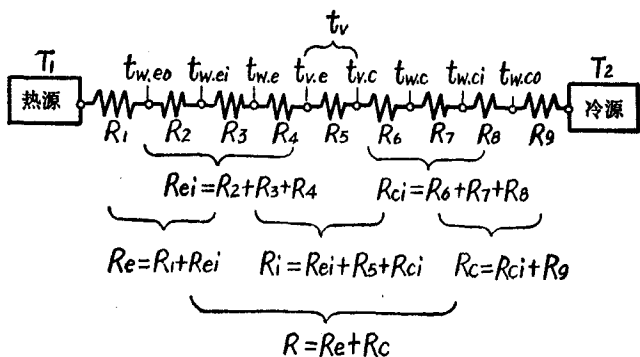


图 2 热管的热阻和热路

至于外热阻 R_1 和 R_9 , 在常规应用的情况下, 它们往往和吸液芯层的热阻 R_3 和 R_7 具有相同的数量级或者更大。于是:

$$R_o(\text{加热段热阻}) = R_1 + R_{e1} \approx R_1 + R_3$$

$$R_o(\text{放热段热阻}) = R_{c1} + R_9 \approx R_7 + R_9$$

$$R(\text{热管总热阻}) = R_0 + R_6 \approx R_1 + R_3 + R_7 + R_9$$

上式表明，在热管的设计和应用中，应当同时注意热管内热阻和外热阻两方面的问题，两者不可偏废。

1-4 热管的热力循环

从热力学的观点来分析和研究热管原理，可以把热管内部的工作过程归结为一个独立的热力循环。这个热力循环由以下四个过程组成。

1. 汽化段中工作液体吸热汽化
2. 热管内空腔蒸汽传输流动
3. 凝结段中蒸汽放热凝结
4. 吸液芯层内凝结液毛细泵压回流

基于热力学一、二定律的原则，热管在较高温度 T_1 下输入一定数量的热量，而在较低温度 T_2 下输出同样数量的热量，于是在热管系统内部产生了“功”。这个功在数量上与系统的热力学损失相当。能量的转换过程发生在弯曲的汽-液界面上，在那里，热能转换成了表现为压力头的机械能。

十分重要的一点是，热管内部汽-液界面的曲率是自动调节的。也就是说，毛细泵压（系统的“功”）刚好等于流动所需的能。

应当指出，在任何一个热力学循环中，一定的温差必须存在于吸热与放热过程之间。这就是说，放热温度一定低于吸热温度。然而，在许多热管中，这个伴随工质循环的温度差 ΔT 较之其它的导热温差要小得多。但必须承认，任何理想的热管也不是绝对等温的，因为它必须服从热力学第二定律。

此外，热管的热力学循环是在一个独立的元件中实现