

热管与热管换热器

REGUAN

YU

REGUAN HUAN REQI

- 庄骏 徐通明 石寿椿 编
- 上海交通大学出版社



内 容 提 要

本书内容包含下面三个主要部分：(1) 热管基本理论，(2) 热管设计、制造和应用；(3) 热管换热器设计和应用。书中用较多篇幅介绍了热管换热器的结构类型、设计方法以及在国内外应用的典型实例，旨在为迫切希望了解热管技术的同志提供一本较为系统的入门资料。

本书可以作为高等学校化工、动力、冶金等各有关专业的教学参考用书，亦可供从事热工、传热、节能等工作的科技人员参考。

热管与热管换热器

出 版：上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发 行：新华书店上海发行所

排 版：浙江上虞汤浦印刷厂

印 刷：常熟文化印刷厂印刷

开 本：850×1168(毫米) 1/32

印 张：11.875

字 数：304000

版 次：1989年5月 第1版

印 次：1989年6月 第1次

印 数：1—3900

科 目：197—273

ISBN 7-313-00493-1/TK·12

定价：2.65 元



前 言

近年来热管技术飞快发展,特别是热管换热器在余热回收方面的应用取得了良好的效果。它结构种类多、体积紧凑、效率高、价格低、使用方式灵活多变,很自然地受到工程技术界的欢迎和重视。热管技术在能量贮存、化学反应器方面的研究和开发也出现了好征兆。研究热管的部门日益增多,目前国内至少有10所高等学校设有研究机构或研究组,每年有不少大学生和研究生从事这方面的毕业设计和研究工作。化工、动力、冶金等设计单位中从事热管换热器设计的人员也逐渐增加,他们迫切希望了解众多的应用实例、设计参数、运转效果,以充实他们设计方案;另一方面在一些高等学校已开设了“热管和热管换热器”的选修课程。如何尽快地提供一本系统地反映最新热管技术的教材,是一件迫不及待的事。本书正是本着这样的目的而编写的。

英国雷丁(Reading)大学 P. Dunn 教授和美国乔治·华盛顿大学 S. W. Chi 在他们的著作中对热管理论和设计作了经典和系统的论述,编者除了把他们著作中的精华有机地联系成一个整体纳入有关章节外,还编入了两相闭式热虹吸管、旋转热管、可变热导热管等最新内容。这样本书既能较全面的反映了近代热管技术的概貌,又较系统地介绍了热管换热器的理论基础。同时,本书在热管换热器方面,基本反映了第五届国际热管会议以来的技术成就。

本书稿已作为高等学校高年级的选修教材试用过四届。由于编者水平有限,错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

1988 年于南京

绪 论

一、热管发展史及现状^[1]

热管是一种具有高导热性能的传热元件。热管的概念首先由美国通用汽车公司的 Gaugler 1942 年提出的。他当时的想法是：液体在某一位置上吸热蒸发，而后再在它下方的某一位置放热冷凝，不附加任何动力而使冷凝的液体再回到上方原位置上继续吸热蒸发，如此循环，达到热量从一个地点传送到另一个地点的目的。Gaugler 所提出的第一个专利是一个冷冻装置。如图 0-1 所示。

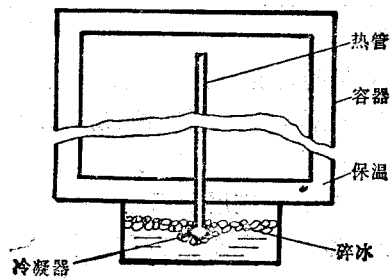


图 0-1 Gaugler 1944 年的专利设备

插在小室中的热管吸收外界热量使热管内部的工作液体汽化，蒸汽在管内流向小室下方的碎冰盘，并在那里冷凝和放出热量。冷凝后的工作液体再借助于管内的毛细吸液芯所产生的毛细抽吸力输送到上端，继续吸收热量汽化，如此循环达到致冷的目的。Gaugler

所提出的吸液芯是采用烧结的铁粉制成的。由于时代条件的限制，Gaugler 的发明在当时未能得到应用。

1962 年 Trefethen 向美国通用电气公司提出报告，倡议在宇宙飞船上采用一种类似 Gaugler 提出的传热设备。但因这种倡议并未经过实验证明，亦未能付诸实施。

1963 年 Los-Alamos 科学实验室的 Grover 在他的专利中正式提出“热管”的命名。该装置基本上与 Gaugler 的专利是一致的。他用一根不锈钢管作壳体，钠为工作介质，管内装有丝网吸液芯的热管。对试验结果进行了有限的理论分析，并提出了采用银、锂作为热管的工作介质的观点。

1964 年 Grover 等人首次公开了他们的试验结果。此后英国原子能实验室开始了类似的钠和其他工作介质热管的研究工作。而美国的兴趣主要在于热管在核热离子二极管转换器方面的应用。与此同时，在意大利的欧洲原子能联合核研究中心开展了相当多的热管研究工作。应用方面仍在于热离子转换器，热管的工作温度达到 1600°C 至 1800°C 。

1964~1966 年期间，美国无线电公司制作了用玻璃、铜、镍、不锈钢、钼等材料作为壳体，水、铯、钠、锂、铷等作为管内工作液体的多种热管，工作温度最高可达到 1650°C 。

1967~1968 年在美国，应用于工业的热管日渐增多。应用涉及到空调、电子器件冷却和电机的冷却等方面。并初次出现了柔性、平板式的异形热管。

Los-Alamos 科学实验室在热管研究方面的工作一直处于领先地位。它的工作重点是在人造卫星上热管的应用和热管理论方面的研究上。在 1967 年，一根不锈钢-水热管首次在空间运转成功。1965 年 Cotter 首次较完整地阐述了热管理论。他建立了热管中所发生的各个过程的基本方程，并提出了计算热管工作毛细极限的数学模型，从而奠定了热管理论的基础。

Katzoff 于 1966 年首先发明了有干道的热管。干道的作用是
为从冷凝段回到蒸发段的液体提供一个压力降较小的通道，大大地
提高了热管的传输能力。

1969 年苏联和日本的有关杂志均发表了热管应用方面的研究
文章。在日本的文章中已有描述带翅片热管束的空气加热器，在能
源日趋紧张的情况下，可用它来回收工业排气中的热能。同年 Tur-
ner 和 Bienert 提出了用可变热导热管来实现恒温控制。Gray 研究
了一种新型热管——旋转热管，这种热管没有吸液芯，依靠转动中离
心力的分力使液体从冷凝段回流到蒸发段。这些发明都是热管技术
中的重大进展。

1970 年在美国出现了供应商品热管的部门，热管的应用从宇航
扩大到了地面。值得提出的是在横穿阿拉斯加输油管线工程中，应
用热管作为管线支撑，以构成地面永冻层。该工程使用热管的数量
达到 112000 多根，单根管长达 9~23 m。

70 年代以来，热管技术飞速发展，各国高等学校、科研机构 and 公
司均投入了相当多的人力物力来进行多方面的研究，国际学术会议
也活跃起来，1973、1976、1978、1981、1984 年分别在联邦德国、意大
利、美国、英国和日本相继举行了第一、二、三、四、五次国际热管会
议。1984 年 5 月我国首次派代表参加在日本东京召开的第五次国
际热管会议。并应邀作报告介绍我国热管的研究和应用情况。

1974 年以后，热管在节约能源和新能源开发方面的研究得到了
充分的重视，用热管制成换热器来回收废热，并将它用于工业，以节
约能源。美国和日本在这方面所取得的进展最为显著。

1980 年美国 Q-Dot 公司生产了气-液换热的热管废热锅炉^[2]。
日本帝人工程公司也成功地用热管做成锅炉给水预热器，使锅炉排
烟温度降到 160℃，解决了露点腐蚀问题^[3]。

80 年代以后，热管换热器的研制工作迅速开展。回转型、分离
型等新的结构型式相继出现，并日趋大型化。

近年来,工业中的实际应用已证明热管换热器确是一种高效、紧凑、耐用的换热设备。它的结构形式多样,使用方式灵活多变,特别适用于中、低温排气的余热回收。最近热管换热器在蓄能技术方面又有了新的应用^[4,5]。

随着工业技术的发展,特别是考虑到现代能源形势的需要,热管技术正越来越广泛地渗入到各个工业领域中,发挥出重要的作用。

二、我国应用热管的情况及存在的问题

我国热管研究开始于1970年左右,在1972年,第一根钠热管运行成功,以后相继研制成功氨、水、钠、汞、联苯等各种介质的热管,并在应用上取得了一定的进展。1980年国内第一台试验性热管换热器运转成功,各地相继出现各种不同类型的、不同温度范围的气-气热管换热器及气-液热管换热器,在工业余热回收方面发挥了良好的作用,并积累了一定的使用经验。热管应用作为一项新技术,目前还存在如下一些有待进一步解决的问题。

(1) 价格偏高 虽然目前工业应用的热管换热器的投资一般在一年左右可全部回收(少数可在半年左右),但由于批量生产工艺尚未成熟,一些制造厂的价格不尽合理,因此价格偏高的现象仍然存在;

(2) 工作温度在300℃以上工业热管的研制和使用还不成熟 目前在工业上大多数用碳钢-水热管,工作温度一般在250℃以下,超过250℃,则管内蒸汽压力偏高,汽化潜热降低。一些高温介质的热管,如联苯、汞、钠、硫-碘热管尚处于实验室阶段。工业应用的实例不多;

(3) 工业使用的时间还不够长,应用面也不够广 虽然热管换

热器在国内连续使用的最长时间已超过7年,但为数不多,一些问题还未充分暴露。已发现了灰堵、露点腐蚀等问题,还需进一步寻求良好的解决办法。

目前国内各大区几乎都有热管研究单位,制造单位也日益增多,随着应用面的逐步扩大,研究工作的不断深入和经验的不断积累,以上问题是能够得到解决的。

参 考 文 献

- [1] Dunn, P., Reay, D. A., *Heat Pipes*, 2nd ed., Pergamon Press (1978)
- [2] Littwin, D. A., Mccurley, J., *Proceeding of the 4th International Heat Pipe Conference* (1981) 213~224
- [3] 阿波村齐,《省エネルギー》, 33, 5 (1981) 19~24
- [4] Kawakami, S. et al., *Proceeding of the 5th International Heat Pipe Conference*, Pre Prints, III (1984) 50
- [5] 架谷昌信等,《化学装置》(日),1 (1984) 93

目 录

前 言	1
绪 论	1
一、热管发展史及现状	1
二、我国应用热管的情况及存在的问题	4
第一章 热管的工作原理、结构及应用	1
一、热管和两相热虹吸管	1
二、热管的几种基本功能和特性	2
三、热管技术	4
四、热管的结构形式	7
五、吸液芯结构	9
六、热管的应用	14
七、发展中的热管技术	14
第二章 热管理论	20
一、热管的主要工作过程	20
二、液体的表面张力和表面张力系数	23
三、接触角与浸润现象	24
四、弯曲液面两边的压力差	25
五、毛细升高和毛细压差	26
六、热管内的毛细压力差	27
七、流体在圆管内流动的摩擦压力损失	30
八、热管吸液芯中液体流动的压力降	31
九、热管内蒸汽流动的压力降	32
十、Cotter 理论	38

第三章 热管的传热极限	53
一、粘性传热极限.....	55
二、声速传热极限.....	58
三、毛细传热极限.....	66
四、携带传热极限.....	85
五、沸腾传热极限.....	88
第四章 热管的特性	93
一、热管的起动特性.....	93
二、热管的温度特性.....	94
三、热管吸液芯的有效导热系数.....	97
第五章 热管设计	101
一、工作液体的选择	101
二、吸液芯的选择	106
三、管壁材料的选择	106
四、设计计算... ..	107
五、设计举例	113
第六章 两相闭式热虹吸管	120
一、两相闭式热虹吸管的传热机理	121
二、充液量与倾角对热虹吸管性能的影响	127
三、两相闭式热虹吸管的传热极限	138
四、热虹吸管的不稳定现象	150
第七章 旋转热管	158
一、旋转热管的类型、工作原理和应用	158
二、旋转热管内凝结过程的理论分析	163
三、影响旋转热管传热性能的各种因素	169
四、旋转热管内蒸发段的传热	174
五、具有圆柱形内表面的旋转热管	176
六、水平平行旋转热管	180

第八章 可变热导热管(VCHP)	190
一、改变热管热导的方法	190
二、可变热导热管的平面交界面理论	198
三、充气式可变热导热管	203
四、扩散交界面理论	210
五、其他类型的可变热导热管	217
第九章 热管换热器的分类和应用	224
一、热管换热器的类型	224
二、热管换热器的应用	244
第十章 热管换热器的零部件和制造工艺	265
一、热管换热器的零部件	265
二、换热器制造工艺	280
第十一章 热管换热器的设计计算和优化	296
一、热管换热器的设计计算	296
二、热管换热器的最优化设计	329
附 录	340

第一章 热管的工作原理、结构及应用

一、热管和两相热虹吸管

1. 热 管

典型的热管结构如图 1-1 所示。密闭的管内，先抽成 $1.3 \times 10^{-1} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 的负压，在此状态下充入少量液体，管的内壁上贴有同心圆筒式的金属丝网(或其他多孔介质)，称为吸液芯。吸液芯内充满工作液体，在热管的一端加热后，管内空间处于负压状态下，吸液芯中的液体因吸收外界热量而汽化为蒸汽，在微小的压差下流向热管的另一端，并向外界放出热量且凝结为液体。该液体借助于贴壁金属丝网的毛细抽吸力返回到加热段，并再次受热汽化。如此反复循环，连续不断地将热量由一端传向另一端。由于是相变传热，因此热管的内部热阻很小，能以较小的温差获得较大的传热率。

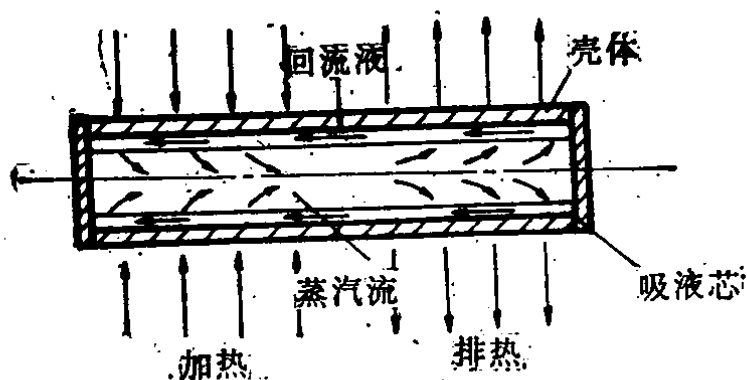


图 1-1 热管工作图

冷凝的液体可依靠吸液芯毛细泵的送力回到加热段，也可依靠重力回到加热段(重力热管)，或者依靠离心力的分力(旋转热管)和

依靠渗透力回流到加热段(渗透热管)。另外还有依靠电力(电动力热管)、磁力(磁流体动力热管)回流到加热段。以上几种不同的液体回流方式有不同的用途,可根据不同的需要选定。在地面上应用热管时,热管的加热段若处于冷凝段之下,则冷凝液的回流同时受到毛细力和重力的双重作用,这种热管称为重力辅助热管。

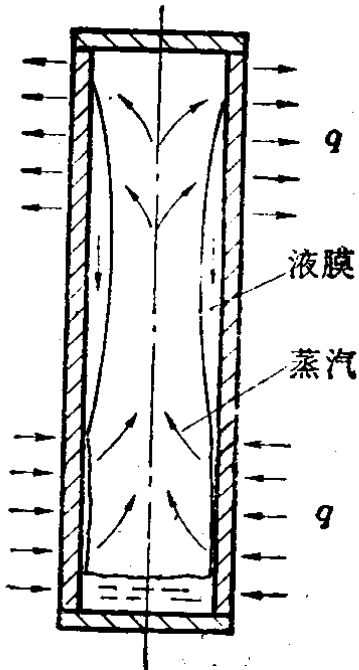


图 1-2 两相热虹吸管

2. 两相热虹吸管

如图 1-2 所示,该热管内没有吸液芯,液体依靠重力回流。所以这种装置的加热段只能在冷凝段的下部。若反之,则不能工作。由于其结构简单,造价低廉,且具有单向导热的特点,因此在地面应用中很受欢迎。在工业余热回收的热管换热器中,所采用的热管绝大多数属于此种类型。一般称其为两相热虹吸管或重力热管,以区别于具有吸液芯的热管。

二、热管的几种基本功能和特性[1]

热管有 6 种基本功能和特性如图 1-3 所示。图中横坐标代表温度,纵坐标 W 为热管传递的功率。

(1) 在某个固定的温度下开始传导热量,如图 1-3 (a) 所示。热管在低于指定的温度下不工作,一旦达到指定的温度热管就开始工作。

(2) 在某个给定的温度下停止工作,如图 1-3 (b) 所示。当热管内部的传热量达到某一极限值时,热管便停止工作。

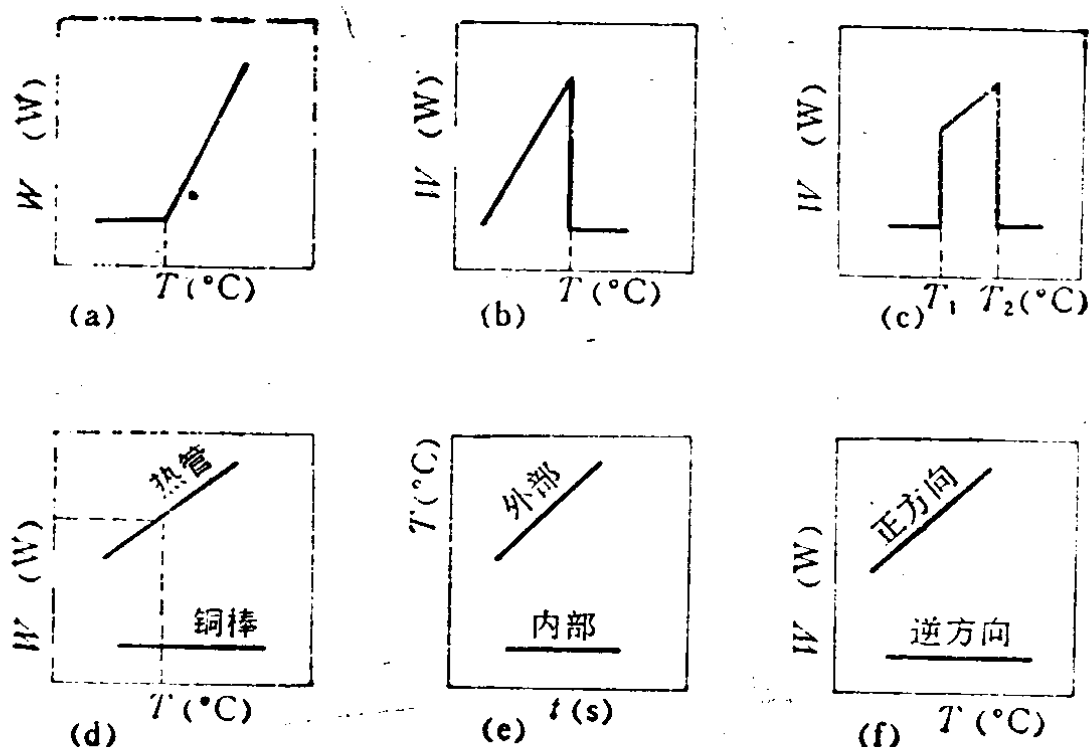


图 1-3 热管的基本功能和特性

(3) 将上述两种特性组合起来,就成为热开关,如图 1-3 (c) 所示。在 T_1 时热管开始工作。在 T_2 时热管停止工作。这可在热管内部加阀控制或切断蒸汽通往冷却段的流路来实现上述功能。

(4) 在等温条件下具有极高的导热率,如图 1-3 (d) 所示。在一定温度 T 时,热管的导热率约相当于铜的 40~10000 倍。

(5) 热屏蔽特性,如图 1-3 (e) 所示。在某种情况下用热管作为设备的壁面,可起到热屏蔽的作用。当外部温度极高时,设备内部仍可保持一定的温度而不受外界影响。

(6) 热二极管特点,如图 1-3 (f) 所示。热管只能在一个方向上导热,而在逆方向上热管不能工作。

三、热管技术

根据热管的特性及工作原理,可以把热管技术分为6个方面,每一个方面都可按实际情况发挥它的作用。

1. 温度展平

热管的表面有很好的温度均匀性,用它来保持所要求的恒温环境是很适宜的。例如设想一块多层平板,里面被许多互相连通的蜂窝状热管填满,这些热管能使任何局部的热流很快散开,从而使平板保持均匀的温度分布。又如在化学工业中,用热管作为等温化学反应器的热源是相当有利的,特别对于在固定床催化反应器内,轴向触媒温度分布的不均匀问题可望获得很好解决。理论分析和试验都证明是正确的。

2. 源汇分隔

所谓源汇分隔是指利用热管将热源和热汇(冷源)分隔在两个场所进行热交换,分隔的距离可以根据实际需要及所采用的热管性能来定,可以从几米到几十米。80年代新发展的大型分离式热管换热器就是这种技术应用的典型。这种装置目前处理气体的流量可达 $6.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ (标准状态)^[2]。在100 m距离上传送热量的长挠性热管也已研制成功^[3]。源汇的分隔在化工生产中的又一个重要用途是将化学反应器的反应热,可用热管导出器外加以处理^[4]。这一方法不论是对于固定床反应器还是流化床反应器,或反应釜都是可行的。

3. 变换热流密度

热管能以小的加热面输入热量,而以大的冷却面输出热量,或者

相反,即以大的加热面输入热量,以小的冷却面输出热量。如此,可使单位面积上的热流量发生变化。因而可为某些工厂中需要供热或放热的场所提供新的技术。例如可用较短的 加热段 吸收 热源的热量,而用较长的冷却段输出热量到一个需要吸热的 场所去,或者相反。热管的热流变换如图 1-4 所示。

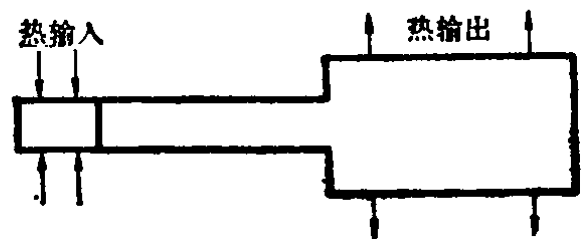


图 1-4 热管的热流变换

4. 热控制(可变热导热管)

可变热导热管可用来作恒温控制。所谓可变热导热管即是热阻可变的热管。在热管中充以一定量的不凝性气体,当热管工作时,不凝性气体被压缩到冷却段,管内工作液体的饱和蒸汽和不凝性气体形成一个交界面把热管分成两个区域,如图 1-5 所示。

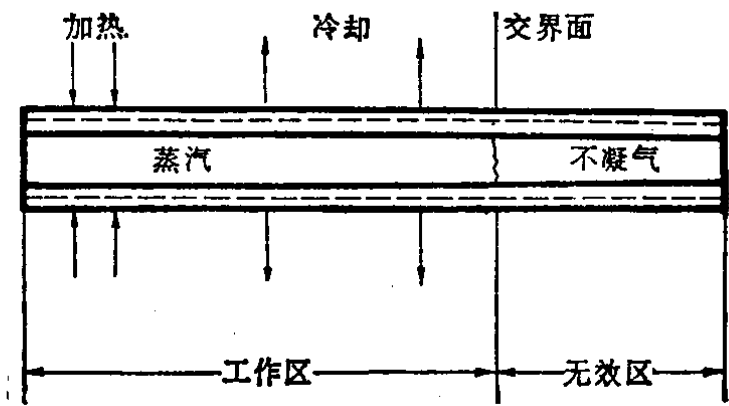


图 1-5 充气热管的平衡状态

当加热段热源的温度高于额定值时,热端的热量输入就要增加,

管内饱和蒸汽压力升高,不凝性气体被压缩,交界面向右移动,冷却面积加大,热量输出也随之增大,管内饱和蒸汽压力下降,直至达到额定值维持平衡为止。当热源温度低于额定值时,热端的热量输入减少,管内饱和蒸汽压力下降,不凝性气体膨胀,交界面向左移动,冷却面积缩小,热量输出减少,管内蒸汽压力逐步回升,到达额定值时维持平衡。因此热量输入增加,热量输出也增加;热量输入减少,热量输出也减少。如此可保持热管工作温度不变。

5. 单向导热(热二极管)

利用重力热管的传热原理,可把热管作为单向导热元件,应用于太阳能取暖上,已取得了很好的效果。将重力热管的加热段置于室外,并以一定的角度倾斜,使在室内的散热段位置高于室外加热段位置。当太阳照射加热段时,热管将热量传入室内。当夜晚太阳落山时,室内温度高于室外。但由于这时加热段已处于冷却段之上,因而热管不工作,室内热量就不会散出去。类似原理被用于阿拉斯加输油管线支架的冷冻固定中。冬季大气温度低于地下土壤温度;夏季大气温度高于地下土壤温度,重力式热管不工作,因而冻土不致融化,保证了支架夏天不下沉,解决了严寒地带输油管线铺设中的一个重大难题。工程使用了 112000 千根热管(9~23 m 长),制造费用为 1300 万美元,估计使用寿命为 30 年,在每根管子传递 300 W 热量的情况下,热管两端温差不到 1°C ^[5]。

6. 旋转元件的传热(旋转热管)

旋转热管的基本原理如图 1-6 所示,管子内壁加工成一定锥度,工作液体在加热段加热后液体被汽化。蒸汽到达冷却段后;冷凝成液体,沿管壁借助于离心力的分力返回到蒸发段。用旋转热管做电机轴可在体积不变、温升相同的情况下,使电机输出负荷提高一倍。此项工作已由上海南洋电机厂和南京化工学院的实验所证实。旋转