

# 热管

马同泽 侯增祺 吴文铤 编著

532272

科学出版社

532272

TK13  
08

HK07/2/  
热 管

马同泽 侯增祺 吴文铄 编著



C0224620

1983

## 内 容 简 介

本书主要叙述热管的基本理论、设计方法及工程应用,同时简要地介绍了热管的性能、特殊类型、制造和实验方法。它不仅包括国外最新的研究成果,而且对我国近十年来的研究和应用成果也作了重点介绍。理论部分力求系统,设计制造部分讲究实用,应用部分除给出实例外还叙述了设计考虑因素。

全书共分六章。第一、二章较详细地叙述了一般热管的工作原理,内部流动和传热过程及其数学描述,传热和温度性能的分析及实验结果。第三、四章叙述热管的特殊类型,着重可控热管的工作过程和理论,热管的设计计算方法和必要的的数据,并给出计算实例。第五章介绍热管的制造工艺和实验方法。第六章介绍热管在一般工业和航天技术中的应用前景和实例。附录中给出了各种工质的物性数据供设计计算之用。

本书可供从事传热和热工专业的科研和工程技术人员参考,亦可供高等院校有关专业的师生参考。

## 热 管

马同泽 侯增祺 吴文飏 编著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

太阳宫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年5月第一版 开本:787×1092 1/32

1983年5月第一次印刷 印张:13 1/2

印数:0001—6,300 字数:321,000

统一书号:15031·493

本社书号:3072·15—10

定价:2.10元

# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 绪论                      | 1   |
| 第一章 热管理论                | 8   |
| §1.1 热管工作原理             | 8   |
| §1.2 表面张力和毛细现象          | 11  |
| §1.3 毛细芯中的液体流动          | 19  |
| §1.4 蒸汽流动、声速传热极限及粘性传热极限 | 26  |
| §1.5 液体与蒸汽的相互作用及携带传热极限  | 42  |
| §1.6 热管中压力平衡及毛细力传热极限    | 46  |
| §1.7 热管中的径向传热与沸腾极限      | 51  |
| §1.8 热管的起动              | 77  |
| 第二章 热管的基本特性             | 90  |
| §2.1 热管的传热能力            | 90  |
| §2.2 热管的温度特性            | 99  |
| §2.3 热管的热流密度变换特性        | 117 |
| §2.4 热管的恒温特性            | 118 |
| 第三章 可控热管及特殊型式热管         | 125 |
| §3.1 可变热导热管             | 125 |
| §3.2 热二极管               | 154 |
| §3.3 重力热管及抗重力热管         | 160 |
| §3.4 渗透热管               | 171 |
| §3.5 电渗透及电动力热管          | 174 |
| §3.6 旋转热管               | 176 |
| 第四章 热管设计                | 184 |
| §4.1 热管设计要求             | 184 |

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| §4.2  | 工质及管壳材料的选择 .....   | 185 |
| §4.3  | 管壳设计 .....         | 197 |
| §4.4  | 管芯设计 .....         | 202 |
| §4.5  | 设计举例 .....         | 234 |
| §4.6  | 可控热管设计 .....       | 246 |
| 第五章   | 热管的制造与试验 .....     | 267 |
| §5.1  | 制造工艺 .....         | 267 |
| §5.2  | 性能实验 .....         | 234 |
| §5.3  | 寿命试验 .....         | 290 |
| 第六章   | 热管的应用 .....        | 293 |
| §6.1  | 引言 .....           | 293 |
| §6.2  | 热管换热器 .....        | 294 |
| §6.3  | 电子器件与电气设备的冷却 ..... | 317 |
| §6.4  | 等温热管 .....         | 333 |
| §6.5  | 其他工业应用 .....       | 346 |
| §6.6  | 热管的空间应用 .....      | 368 |
| 附录 I  | 工作介质物理性质 .....     | 389 |
| 附录 II | 单位换算表 .....        | 400 |
| 主要符号表 | .....              | 406 |
| 索 引   | .....              | 418 |

## 绪 论

热管是一种具有很高传热性能的元件。早在1942年Gaugler<sup>(1)</sup>就曾提出热管的原理，不过那时工业中的传热问题用一般方法即可解决，因而他的发明未能得到引用和发展。直到1964年，美国 Los Alamos 科学实验室的 Grover 等人<sup>(2)</sup>独立地提出了类似于Gaugler提出的一种元件，并且取名为“热管”，此后吸引了很多的科学技术工作者从事热管研究，使热管得到很快的发展。

美国科学家作了第一批实验，证明了热管的高效率传热能力，以后引起了连锁反应，相应地在西德、意大利、荷兰、英国、苏联、法国及日本等国均展开了大量的研究工作。美国无线电公司是第一个大规模研制热管的商业机构，1966年他们已研制出各种热管。Los Alamos 科学实验室对热管的研究在世界上一直处于领先地位，1967年他们首次将一支实验用水热管送入地球卫星轨道<sup>(3)</sup>，并取得热管运行性能的遥测数据。证明了热管在零重力条件下运行成功。

Feldman<sup>(4)</sup> 和 Eastman<sup>(5)</sup> 等人指出了热管在各个技术领域中应用的巨大潜力。

1968年热管作为卫星仪器温度控制的手段第一次应用于测地卫星 GEOS-I<sup>(6)</sup>，热管壳用铝合金，工作介质为氟利昂11，目的是减少卫星中不同应答器之间的温差。以后在1972年发射的天文卫星 OAO-C 和1974年发射的应用技术卫星ATS-F上都成功地用了相当数量的热管作为温度控制的手段。

Cotter<sup>(7)</sup>于1965年提出一套热管理论，以后在其基础上理

论又有了进一步的发展。Levy<sup>8</sup>、Deverall 和 Kemme<sup>9</sup> 等人以及 Busse<sup>(10)</sup> 对于声速极限理论作出了较大的贡献。Busse 还提出了适用于液态金属热管起动过程的粘性极限理论。

Ferrell 等<sup>(11)</sup> 对被液体所浸透的多孔物质中的蒸发沸腾传热作了大量的研究。

田长霖<sup>(12-15)</sup> 在双组分热管、毛细芯性质、蒸汽流动及热管性能研究方面都作出了很大的贡献。

Katzoff<sup>(16)</sup> 提出了热管的另一种类型——可控热管的设想，而后来 Marcus<sup>(17)</sup> 对这种热管的设计和理论作出了积极的贡献。

一种新的热管类型，它不用毛细芯，而是靠管子旋转产生的离心力使液体从冷凝端回到蒸发端，称为旋转热管，这种热管首先是由 Gray<sup>(18)</sup> 提出的，它可用来冷却旋转物体。

除空间技术外，热管首先被用于电子工业领域，用以冷却电子器件，例如电子管、半导体元件和集成电路板等。文献 [19] 于 1969 年首先报告了用于冷却大功率行波管的热管研制。Brost 等<sup>(20)</sup> 报道了西德成功地研制出用于大功率半导体元件冷却的热管散热器，并在电气机车上运行了四年，它的重量为传统的散热器重量的五分之一。此外用热管作为等温部件以提供等温环境，对于半导体材料的生产工艺以及高精度的测量技术也具有很大的吸引力。

早期的热管研究者对于以液态金属为工作介质的热管十分重视，这种热管被用于热离子发电器的供热和排热系统。目前这一研究在世界各国仍在继续进行中。

由于热管技术的迅速发展，它的使用范围扩大到电机和机械部件的冷却，例如电机转子和定子的冷却，变压器、高速轴承和铸模等的冷却。将热管应用于医用手术刀及半导体工艺的等温炉是七十年代中发展起来的。近年来利用热管传输地热以

加热地面，防止结冰。或者反之，在冻土地区用热管将地面热量传输到空气中，以保持地基的稳定性。这方面已得到大量应用并取得很好的效果，如美国阿拉斯加输油管线上已使用十一万余根热管<sup>[21]</sup>。

最近热管应用的新领域是在能源工程中，用于余热回收和空调的热管换热器已经部分商品化。将热管技术发展并用于地热能 and 太阳能的利用以及煤的气化工艺的研究正在进行。由于利用重力可以克服毛细力不足的缺点，因此重力辅助热管的研究和应用近年来受到很大重视。

1973年在德意志联邦共和国召开了第一次国际热管会议<sup>[22]</sup>，1976年和1978年相继在意大利和美国召开了第二次<sup>[23]</sup>和第三次<sup>[24]</sup>国际热管会议。目前对热管的研究和应用日益广泛和深入，使用不同的介质可以制成从 4K 到 2300K 温度范围内不同工作温度区的热管，热管的新结构也多种多样。由于使用条件不同，热管可以按照需要制成圆管形、同心管形以及平板形等各种不同的几何形状。

多年来人们在热管毛细芯方面作了大量的研究工作。在单一的毛细结构基础上发展了复合毛细芯，由单一的丝网、槽道及烧结芯到简单的干道、螺旋干道及板式干道等。目前毛细芯结构发展的趋势是：在空间技术的应用中，为了高的热管性能而不惜用较大成本研制复杂的结构，而在一般工业上则在性能满足要求的条件下，尽量采用工艺简单成本较低的结构。例如，利用重力使液体回流附加较简单的毛细结构的所谓“重力辅助”热管或者完全无毛细芯的重力热管（或称“热虹吸管”）受到重视，这类热管的机理研究也在加强。

我国对热管的研究始于七十年代初，在应用和基础研究方面已进行了大量的工作，从低温液氮热管到高温钠热管都进行了研制和性能研究，热管在电子工业、空间技术及能源工程等

方面的应用已有了良好的开端。例如，热管在卫星中作为温度控制的手段，在电子工业中热管散热器及热管等温件已得到实际应用，作为余热回收的热管换热器也正在研制和实验。以上一些应用都收到非常显著的效果。

热管具有以下一些特性：

(1) 较大的传热能力 由于热管的传热主要靠工作介质相变时吸收和释放汽化潜热以及蒸汽流动传输热量，而多数工质的汽化潜热是很大的，因此不需要很大的蒸发量就能带走大量的热。

(2) 较高的等温性 热管表面的温度分布取决于蒸汽的温度分布、相变时的温差以及通过管壁和毛细芯的温降。蒸汽处于饱和状态，蒸汽流动和相变时的温差很小。而管壁和毛细芯比较薄，所以热管的表面温度梯度很小，当热流密度很低时可以得到高度等温的表面。热管的当量导热系数愈大则等温性愈高，它的当量导热系数可以是紫铜的数倍以致数千倍，液态金属热管的当量导热系数可以达到紫铜的一千倍或者更高。

(3) 具有热流密度变换的能力 热管中蒸发和凝结的空间是分开的，因此可以实现热流密度变换，在加热端可用高热流密度输入，而在冷却端可以用低热流密度输出，反之亦可。变换比例可以在较大范围内变化，这种性能在实际应用中被广泛利用。

(4) 具有恒温特性（可控热管） 一种充惰性气体的热管可以在输入热量变化时改变热管冷凝段的散热面积，以适应传热量的变化，从而使加热端热源温度维持稳定。

此外类似电子元件中的二极管和开关，热管可制成熟二极管和热开关，前一种热管仅仅在一个方向上大量传热，而在另一方向传热性能极差。后一种热管有使热量流通和停止流通的作用。

根据工作温度范围的不同，热管可分为以下数类：

(1) 深冷热管 工作温度在  $0-200\text{K}$  范围内的热管称为深冷热管，在此温度区工作的热管其介质可采用纯化学元素物质（如氦、氩、氮、氧等）或化合物（如乙烷、氟利昂等）。

(2) 低温热管 工作温度在  $200-550\text{K}$  范围内的热管称为低温热管，这类热管的工作介质可采用氟利昂、氨、酒精、丙酮、水及某些有机物。在这类热管中最普及的工作介质为水，它具有很好的物理性质。

(3) 中温热管 工作温度在  $550-750\text{K}$  范围内的热管称为中温热管。这类热管的工作介质有导热姆 A（联苯-苯醚共溶剂）、水银、硫或铯等，其他更好的工作介质还有待进一步的研究和发现。

(4) 高温热管 工作温度在  $750\text{K}$  以上的热管称为高温热管。这类热管的工作介质可以是钾、钠、锂、铅、银及其他高沸点液态金属。这些热管的传热性能极高，例如锂热管的轴向热流密度可以达到  $15\text{千瓦/厘米}^2$  以上。温度在  $1300\text{K}$  以上的热管管壳一般用耐高温材料制成，并且这种热管只能在真空或惰性气体保护下工作，因为在此高温下材料的氧化腐蚀是很剧烈的。

本书共分六章，第一章叙述热管理论，它包括毛细现象理论、液体和蒸汽的流动规律、毛细芯中径向传热机理、极限传热理论等。第二章叙述热管的性能，给出各种热管轴向最大传热量及各种因素的影响。分析热管各部分热阻及其计算式，讨论热管的温度分布特性及其影响因素。第三章叙述热管类型，将介绍普通热管以外的各类热管工作原理，例如可控热管、重力热管、旋转热管、电渗透热管、热二极管等的原理和特性。第四章叙述热管的设计，即设计中应考虑的问题、计算方法和数据。第五章叙述热管的制造工艺及实验方法，包括高低温热

管的制造工艺、实验方法及设备。第六章将介绍热管在各个领域的应用情况和前景，列举典型的应用实例。

由于热管的理论和技术在不断地发展，应用也日益广泛，因此现有的认识是很不完善的，有待今后进一步的深入研究和充实。

## 参 考 文 献

- [1] Gaugler, R. S., Heat transfer device. U. S. Patent 2350348. December 21, 1942, Published June 6, 1944.
- [2] Grover, G.M., Cotter, T. P. and Erikson, G. F., Structure of very high thermal conductance, *J. Appl. Phys.*, Vol. 35, №.6, 1964.
- [3] Deverall, J.E. and Kemme, J.E., Satellite heat pipe, USAEC Report LA-3278, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, September 1970.
- [4] Feldman, K.T. and Whiting, G.H., Applications of the heat pipe, *Mech. Engng.*, Vol. 90, №. 11, 1968.
- [5] Eastman, G. Y., The heat pipe, *Scient. American*, Vol. 218, №.5, 1968.
- [6] Anand, D.K., Heat pipe application to a gravity gradient satellite, Proc. of ASME Annual Aviation and Space Conference, Beverley Hills, California, June 16—19, 1968.
- [7] Cotter, T.P., Theory of heat pipes, USAEC Report. LA-3246, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, 1965.
- [8] Levy, E.K., Theoretical investigation of heat pipes operating at low vapor pressures, *J. Eng. Ind.* Vol. 90, №.4, 1968.
- [9] Deverall, J.E., Kemme, J.E. and Flarschuetz, L. W., Some limitations and start-up problems of heat pipes, LA-4518, 1970.
- [10] Busse, C.A., Theory of the ultimate heat transfer limit of cylindrical heat pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, №.1, 1973.

- [11] Ferrell, J.K. and Johnson, H. R., The mechanism of heat transfer in the evaporator zone of a heat pipe, ASME Preprint 70-HT/SPT-12, June 1971.
- [12] Tien, C.L. and Rohani, A.R., Theory of two-component heat pipes, *Jour. Heat Transfer*, Series C, Vol. 94, №.4, 1972.
- [13] Tien, C.L. and Rohani, A.R., Analysis of the effects of vapour pressure drop on heat pipe performance, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, №.1, 1974.
- [14] Tien, C.L. and Sun, K. H., Minimum meniscus radius of heat pipe wicking materials, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, №. 11, 1971.
- [15] Sun, K.H. and Tien, C.L. Simple conduction model for steady-state heat pipe performance, *AIAA Jour.*, Vol.10, №. 8, 1972.
- [16] Katzoff, S., Heat pipes and vapor chambers for thermal control of spacecraft, AIAA Thermophysics Specialist Conference, AIAA paper 67—310, April 1967.
- [17] Marcus, B.D. Theory and design of variable Conductance heat pipes, NASA CR-2018, April 1972.
- [18] Gray, V. H., The rotating heat pipe—a Wickless hollow shaft for transferring high heat fluxes, ASME Paper 69-HT-19, 1969.
- [19] Calimbas, A.T. and Hulett, R. H., an avionic heat pipe, ASME Paper 69-HT-16, 1969.
- [20] Brost, O., Groll, M. and Münzel, W. D., Technical application of heat pipes, 3rd International Heat Pipe Conference, Palo Alto, California, U.S.A. May 22—24 1978.
- [21] Waters, E.D., Johnson, C.L. and Wheeler, J. A., The application of heat pipes to the trans-Alaska pipeline, 10 th Inter-society Energy Conversion Engineering Conference, 1975 Record.
- [22] International Heat Pipe Conference, Stuttgart, Federal Republic of Germany, October, 15—17, 1973.
- [23] 2 nd International Heat Pipe Conference, Bologna, Italy, 31 March—2 April, 1976.
- [24] 3 rd International Heat Pipe Conference, Palo Alto, California, U.S.A. May 22—24, 1978.

# 第一章 热管理论

## §1.1 热管工作原理

热管的一种典型结构如图1.1所示，它由管壳、毛细多孔材料和工作液体组成。将管内空气排出，充以液体使填满毛细材料中的微孔并加以密封。管的一端为蒸发段而另一端为冷凝段，根据应用的需要中间可布置一绝热段。当一端受热时则毛细材料中的液体蒸发，蒸汽流向另一端，另一端由于受到冷却使蒸汽凝结成液体，液体再沿多孔材料靠毛细力的作用流回蒸发端，如此循环不已，热量由热管的一端传至另一端。

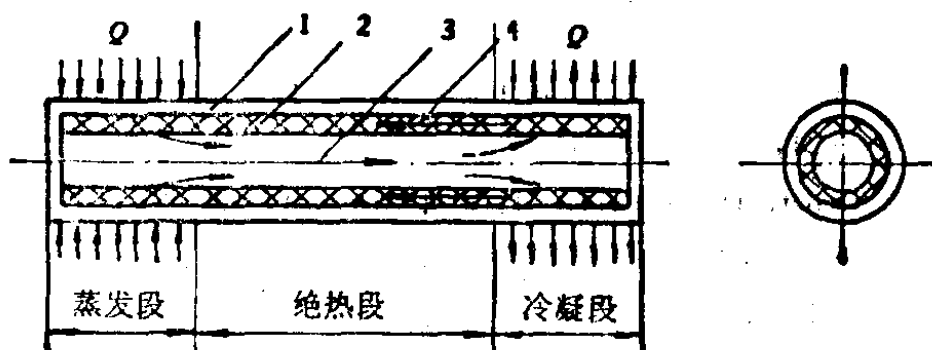


图1.1 热管原理图

1. 热管壳, 2. 热管芯, 3. 蒸汽, 4. 液体

对于普通热管，其液体和蒸汽循环的主要动力是毛细材料和液体结合所产生的毛细力。由于热管在重力场中所处的方位不同，液体的体积力所起的作用也有所不同，当热管水平放置时液体的质量力在轴向的分力为零。当热管倾斜而加热端在下时，体积力起辅助液体流动的作用；而当加热端在上时，质量

力在轴向的分力与液体的流动方向相反，因而起阻止液体流动的作用。蒸汽的体积力可以忽略不计。为了保证液体和蒸汽的循环，毛细力需要克服液体的流动压降和蒸汽的压降，而液体的体积力在压力平衡中或者为零，或者为推动力，或者为阻力。

假设热管中沿蒸发段蒸发率是均匀的，沿冷凝段冷凝率也是均匀的，则其质量流率、压力分布、温度分布及弯月面曲率的分布如图1.2所示。由于蒸发段液体不断蒸发，汽-液交界面向毛细孔一侧下陷，形成弯月面。液体的流动自右至左，因而压力自右至左逐渐降低，而蒸汽的流动方向相反，因而压力梯度的方向也相反。液体弯月面的曲率则在蒸发段的端部为最大，逐渐变小，在冷凝段端部曲率一般为零。这种现象是蒸发、凝结和毛细力作用的综合结果。

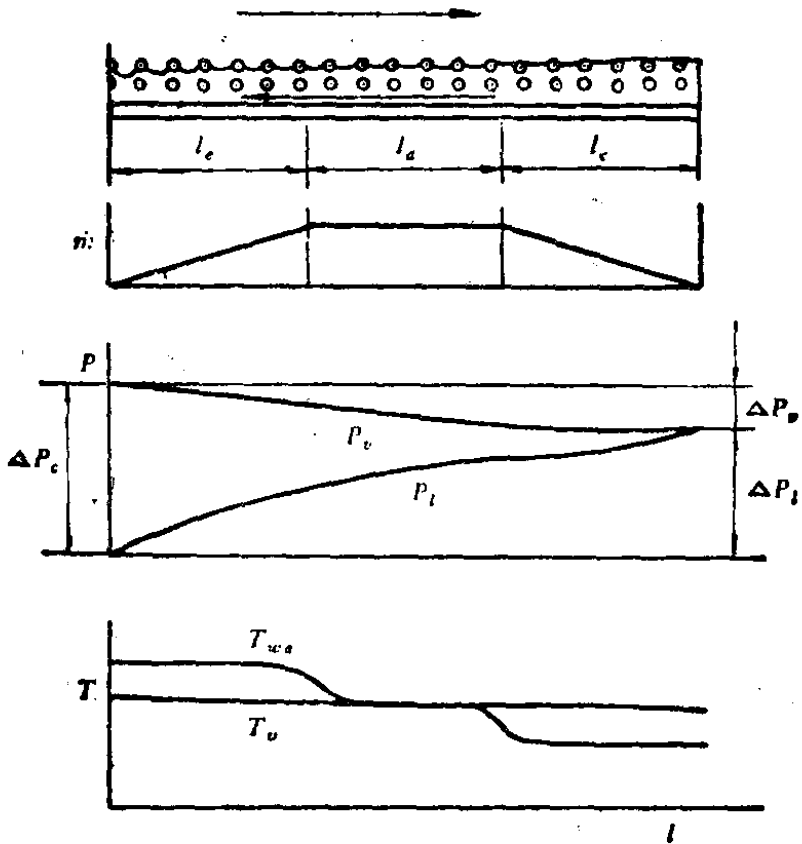


图1.2 热管内质量流、压力和温度分布

热管正常工作时毛细力必须克服工质循环中的所有流动和

相变的压差，在简单的模型中暂时忽略蒸发端和冷凝端由于相变在汽-液交界面上产生的压力降以及重力使液体在径向产生的压差，在本章的以后几节将讨论这些压降的物理意义，对于简单模型压力平衡式为

$$\Delta P_c = \Delta P_l + \Delta P_v \pm \Delta P_g \quad (1.1)$$

上式中  $\Delta P_l$  为液体从冷凝端流向蒸发端所产生的压降， $\Delta P_v$  为蒸汽从蒸发端流向冷凝端所产生的压降， $\Delta P_g$  为蒸发段端部由毛细力所产生的液体和蒸汽之间的压差。如热管倾斜放置（非水平），则重力对液体轴向压力的影响不可忽略。在两端液体的重力压差  $\Delta P_g$  可为正值或负值，视方位而定，它最终影响液体的压力分布。蒸汽和液体的压力分布见图1.2。

热管虽然是一种传热性能极好的元件，但它的传热率受到一定的限制。这种限制完全受流动过程的控制，达到这一极限值时传热量无法再增加，称为“极限”。某些极限达到后，蒸汽的流速不再增加，

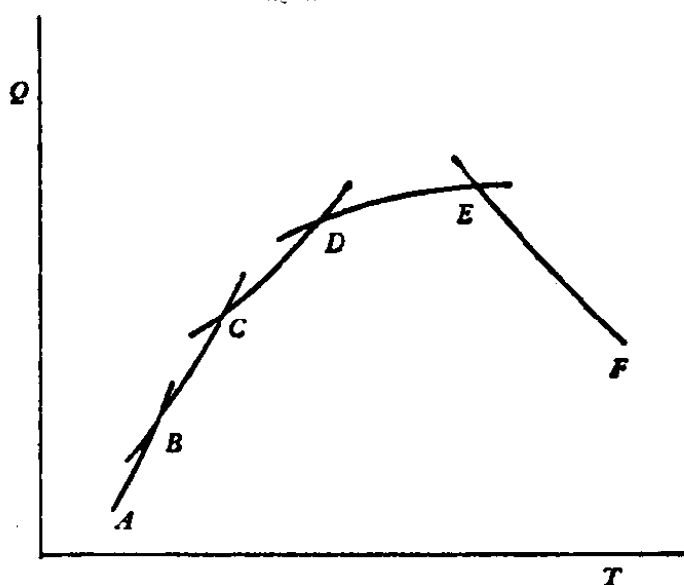


图1.3 热管的传热极限

除非改变工作温度。而对于另一些极限，当其达到后工作流体的循环中断，热管蒸发段局部烧干并出现过热。图1.3所示为热管的传热极限曲线，从低温到高温这些极限是：AB为粘性极限，BC为声速极限，CD为携带极限，DE为毛细力极限，EF为沸腾极限。热管一般应在极限传热曲线以下工作，以后将进一步说明每一极限的含意。

热管一般应在极限传热曲线以下工作，以后将进一步说明每一极限的含意。

## §1.2 表面张力和毛细现象

### 1. 表面张力

液体中的分子相互吸引，其中任意一个分子被周围其它分子所吸引，而且在各个方向所受到的吸引力是均等的，因此最后的合力为零。然而在液体表面或者靠近液体表面上的分子所受到的吸引力的合力不为零，它受到一个内向的合力作用。由于这一原因液体趋向于一种具有最小表面积的形状，在真空中一个自由下降的液滴将具有球形。

液体表面分子与邻近介质分子的相互作用处于动力不平衡状态。如果液体周围是本身的蒸汽，则表面层所受的力的方向是朝液体内部。因为液体的密度远远大于蒸汽密度，液体表面分子所受到液体本身分子的吸引力大于蒸汽分子对它的作用力，因此液体分子从容积中移向表面时需要消耗功。当液体表面增加时也必须作功，因为分子需要从容积中移动到表面，这种功在等温条件下表示为

$$dW = -\sigma dF \quad (1.2)$$

式中 $dF$ 为表面积增量， $\sigma$ 为液体表面特性的基本量，称为表面张力系数或表面张力。从式(1.2)可知表面张力系数为在等温条件下增加液体单位表面积所需的功。

任何系统当它达到平衡状态时也就是具有最小能量的状态。液体在平衡条件下具有最小表面积。存在着一种阻止表面积增加的力，这种力的方向与液体表面积相切，其作用趋势是缩小表面积，这种力即为表面张力。表面张力作用在两种介质（或者两种相）交界的薄层中。

当液体与固体接触时也存在表面张力，此时液体的表面形状取决于作用在液体上的三种力，即液体、气体和固体三种介

质中任意两种介质界面上的力。

## 2. 接触角

液体与固体接触时由于相互作用而具有一定的形状，用接触角这一参数表示其形状特性最为方便。如图1.4所示，当液体与固体及气体介质接触时在每二相之间有一界面。在三种介质的交点作用着三种表面张力。液体与气体相互作用时为 $\sigma_{l,g}$ ，气体与固体相互作用时为 $\sigma_{g,s}$ ，固体与液体相互作用时为 $\sigma_{s,l}$ 。当系统处于平衡状态时，沿着壁面的合力应等于零，即

$$\sigma_{g,s} = \sigma_{s,l} + \sigma_{l,g} \cos \theta \tag{1.3}$$

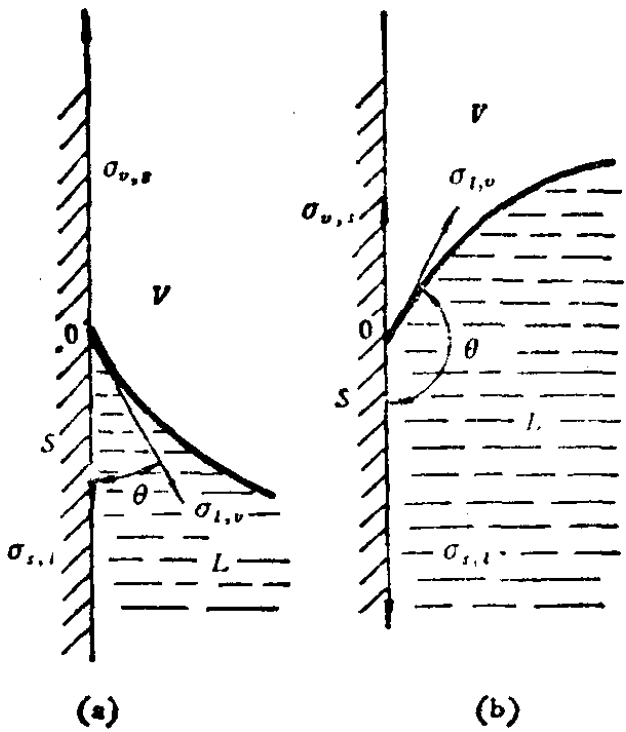


图1.4 液体弯月面形状  
(a)  $\theta < \pi/2$ , (b)  $\theta > \pi/2$

与固体壁面及液体表面相切的二切线之间的夹角称为接触角或浸润角。从上式可得

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{g,s} - \sigma_{s,l}}{\sigma_{l,g}} \tag{1.4}$$

接触角仅仅与三种接触介质的性质有关，由式(1.4)可知，当 $\sigma_{g,s} > \sigma_{s,l}$ 时，即气体与固体之间表面张力大于固体与液体之间的表面张力，则接

触角为锐角 ( $\theta < \pi/2$ )。液体表面为凹形弯月面，如图1.4(a)所示，此种情形为液体部分地浸润固体表面。当 $\sigma_{g,s} < \sigma_{s,l}$ 时，接触角为钝角 ( $\theta > \pi/2$ )。液体弯月面为凸形，如图1.4(b)所示，此种情形为液体不浸润固体表面。当 $\theta = 0$ 时，则液体完全