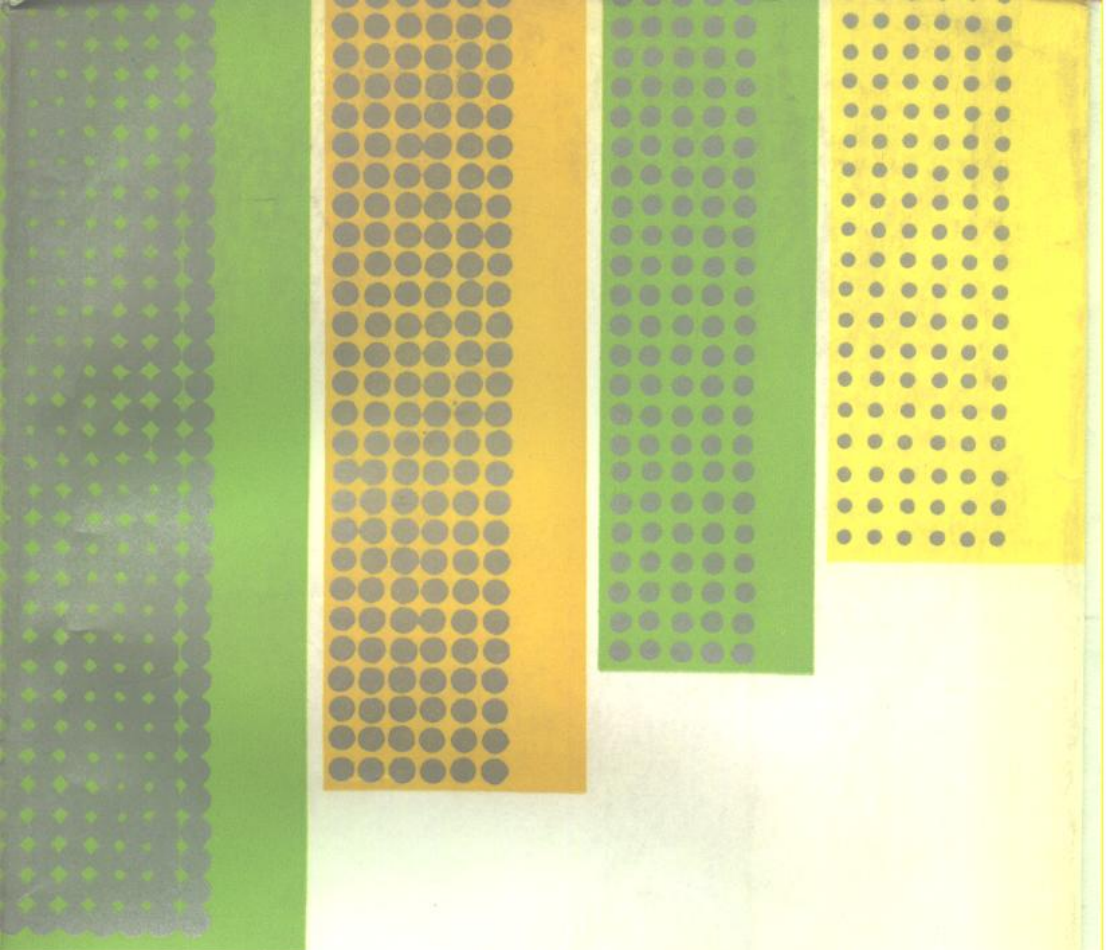




李亭寒 华诚生 等编著

化学工业出版社

热管设计与应用

热管设计与应用

李亭寒 华诚生等 编著

化学工业出版社

本书的第一章主要介绍热管的基本工作原理。第二、三章阐述普通热管及可控热管的设计及计算公式。第四、五章讲述热管制造、检测及性能试验。第六章主要介绍热管的应用。

本书内容丰富、实用，在讲清热管基本原理的基础上，着重介绍有关热管的设计、制造和应用等各个环节的实际问题，以利热管技术的推广应用，在强调节能的今天，本书的出版更有一定的现实意义。

本书各章的编写人：第一章郭舜；第二、三章华诚生；第四章文耀普；第五章曹黎明；第六章李亭寒。全书由侯增祺校阅。

本书可供有关部门的设计、研究、工厂的科技人员参考，也可供大专院校师生参考。

热管设计与应用

李亭寒 华诚生等 编著

责任编辑：苗延秀

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $11^{2/3}$ 字数309千字印数1—8,770

1987年8月北京第1版1987年8月北京第1次印刷

统一书号15063·3922定价2.80元

序 言

热管作为一种高效传热元件自六十年代问世以来,在传热技术领域里的影响越来越大。世界上许多国家,特别是美、西德、英、苏、日等国的研究机构、大学和许多公司进行了大量的实验和理论研究工作,至今已经开了四次国际热管会议,热管在许多工业部门得到应用,并已有批量生产热管的专门工厂。

在我国,自一九七〇年开始热管理论和实验研究以来,在航天器的温度控制、电器和电子设备及器件的冷却、等温炉、标准黑体、太阳能利用,以及工业余热回收等方面的应用都取得了进展。已形成了一批有一定实力的研究单位及专业生产点,可以研制和生产各种类型的热管。在节能领域中,热管换热器引起了许多工业部门的兴趣和重视,在一些生产场合进行了成功的应用。

随着热管在工业生产中推广应用,大家迫切需要一种实用的热管设计、制造和应用方面的书,已经出版的热管方面的书,有些偏重于理论,有些偏重于产品介绍,而对设计、实验、制造、检测以及应用的方案选择等方面介绍较少,因此,本书在力求讲清基本原理的基础上,着重介绍有关热管的设计、制造和应用等各个环节的实际问题,以利于热管技术的推广应用。

本书第一部分(第一章)介绍热管的基本工作原理,对可控热管、特种热管只做简单介绍,以使读者对各种热管有一全面了解。

第二部分(第二、三章)详细介绍了普通热管及可控热管的设计步骤及有关公式,使读者能够根据书中提供的方法进行热管设计,同时,给出了工质热物性的经验公式,以便于进行计算机计算。详细介绍了各种热管特别是中温热管的寿命试验结果,推荐了可能的热管工质和材料的组合。

第三部分(第四、五章)介绍热管制造、检测及性能实验。主

要是根据作者的实际工作经验及一些文献上的零星资料整理的。

第四部分（第六章）介绍热管的应用。其中包括热管换热器的应用、设计计算及与其它类型换热器的比较，此外，就热管的一些主要应用方面做了介绍，对热管在传热中的地位和作用进行了讨论。

附录给出了有关热管管材、管芯及工质性能等基本数据，以便于设计计算及应用时查找。

本书限于作者水平，书中不足和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 热管的基本工作原理	1
1.1 概述	1
1.2 工质的流动和最大传热能力	6
一、毛细现象	6
二、热管的最大毛细压头	8
三、体积力	11
四、工质液体的流动阻力	12
五、蒸汽的流动阻力	13
六、整个管长上的总流动阻力	15
七、最大热流	20
八、传热	26
1.3 可控热管及几种特种类型的热管	30
一、可控热管	30
二、特种热管	37
参考文献	49
第二章 热管设计	50
2.1 设计要求	50
一、工作温度范围	50
二、热负荷及热流密度	50
三、温度均匀性及总温降	50
四、动态特性	51
五、尺寸、重量和几何形状	51
六、力学环境	51
七、可靠性与寿命	52
八、特殊要求	52
九、安装要求	52
2.2 一般热管设计方法	53

一、工质选择	53
二、管芯设计	65
三、管壳设计	95
四、工质充装量的计算	98
2.3 相容性	102
一、中温热管的相容性	104
二、高温热管的相容性	108
2.4 热管设计举例	112
一、传热热管的设计	112
二、等温热管的设计	117
参考文献	121
第三章 气体控制可变热导热管	124
3.1 平面界面理论	125
一、平面模型用于控制能力分析	127
二、用平面模型计算贮气室体积	133
三、被动气体控制热管的控制限	135
四、平面模型的精度	136
五、反馈控制可变热导热管	137
3.2 扩散界面理论	149
3.3 可变热导热管的设计	152
一、确定设计要求	152
二、基本热管的设计	153
三、选择可控热管的类型	156
四、用平面界面理论进行初步设计	157
五、用扩散界面理论改进设计	157
六、结构设计	158
参考文献	159
第四章 热管制造	161
4.1 热管的实际结构	161
4.2 清洗	164
一、铝和铝合金管壳清洗工艺	165
二、铜和铜合金管壳清洗工艺	165
三、不锈钢管壳清洗工艺	166

四、不锈钢丝网管芯的清洗工艺	167
4.3 焊接	167
4.4 检漏	168
一、气泡法	171
二、热槽法	171
三、卤素法	172
四、氨检漏法	173
五、氨质谱仪检漏	173
4.5 耐压试验	173
4.6 工质提纯	173
一、蒸馏法	175
二、凝固-熔化法	176
4.7 充液	176
一、抽真空	177
二、除气	178
三、注入工质	179
四、封口	180
4.8 热管检验	183
参考文献	184
第五章 热管试验技术	185
5.1 中温轴向槽道热管(航天用)	186
一、加热方式	186
二、冷却方式	186
三、测温热电偶的布置	187
四、试验热管的水平及倾斜度的调节	187
五、试验过程	187
六、数据处理	188
七、用氨和丙酮做工质的几种热管的试验结果及分析	188
5.2 低温热管	193
一、测试系统	193
二、试验过程	195
5.3 高温热管	193
一、试验装置及测量系统	198

二、性能试验	200
三、传输总功率的计算	200
5.4 可变热导热管	203
一、试验及测量	203
二、性能测试	204
5.5 热二极管	206
一、试验装置简述	207
二、典型的热二极管试验结果	208
5.6 重力热管及热虹吸管	210
一、概述	210
二、重力热管的稳态性能	211
三、最大传热能力的影响因素	212
5.7 挠性热管	216
5.8 热管寿命试验	217
一、热管寿命试验应考虑的因素	217
二、寿命试验	219
三、寿命试验台	220
参考文献	220
第六章 热管应用	221
6.1 热管换热器	221
一、概况	221
二、热管换热器的特点	221
三、热管换热器的应用	224
四、热管换热器中的热管	229
五、气-气热管换热器的设计计算	235
六、热管换热器和其它类型换热器的比较	252
七、热管废热锅炉	255
八、其它类型的热管换热器	258
6.2 热管技术在航天器上的应用	263
一、在温度均匀化方面的应用	264
二、在散热和温度控制方面的应用	268
三、航天器上使用热管的设计考虑	272
6.3 热管用于电机及电器设备的冷却	273

一、热管用于电机冷却	273
二、热管用于其它电器设备的冷却	273
6.4 热管用于电子元件及微型组件的散热	282
一、热管冷却半导体器件	283
二、电子束管收集极和高压、大电流硅元件热管散热器	287
三、热管在机载电子设备温控系统上的应用	292
6.5 热管在太阳能利用方面的应用	295
一、在平板式集热器上的应用	295
二、热管式真空管平板集热器	297
三、热管在聚焦型集热器上的应用	298
四、热管在太阳能电站的应用	299
五、热管在热能贮存系统上的应用	300
6.6 热管在其它方面的应用	301
一、热管在阿拉斯加输油管线中的应用	302
二、热管用于燃油蒸发管	303
三、热管等温炉及黑体	304
四、热管在船舶化冰和道路化雪方面的应用	308
五、热管在空调贮能系统中的应用	310
6.7 热管应用中应当注意的问题	314
一、热管在传热过程中的地位和作用	314
二、热管的集热和散热问题	314
参考文献	315
附录1 常用金属管材的机械性能和物理性能	317
附录2 金属丝编织方孔网基本参数查对表 (HB1862-73)	320
附录3 铜粉的化学成分及规格	320
附录4 几种工质的纯度标准	321
附录5 工质热物理性质表	322
附录6 单位换算表	345

第一章 热管的基本工作原理

1.1 概 述

我们知道，利用如图1-1所示的一套蒸发-凝结封闭循环机构，便能在小温差下传递很大的热流。这个系统包括：蒸发器、蒸汽通道、循环泵、冷凝器、凝结液体通道，还有一定数量的工质。该装置利用工质吸收和释放汽化潜热来传递热量。只要各流动通道很好地与外界隔热，蒸发器和冷凝器之间的温差就会很小，即单位时间、单位温差下传递的热量将是很大的。循环泵用于冷凝液体的回流，以保证系统连续工作。

现在设想将上述系统缩小成一个紧凑的机构，用毛细抽吸结构代替循环泵来使冷凝液体回流。这就是我们要谈的“热管”。

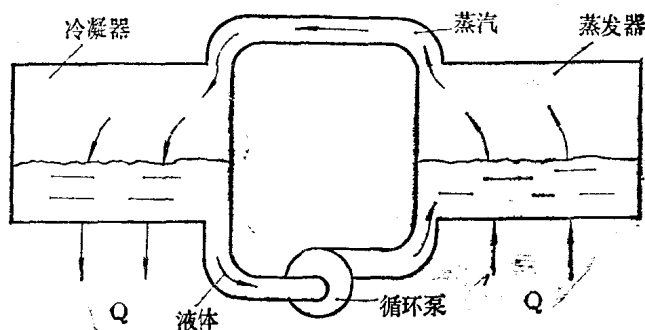


图 1-1 蒸发-凝结传热装置示意图

图1-2为一个典型的管式热管的结构示意图。外面是一个密封的壳体，沿管壁的内侧铺设一定厚度的毛细材料，通常称为管芯。管芯中吸满工质液体。在管中心的空间里充满着工质的饱和蒸汽。

当热管的一端（加热段）与热源联结时，热量通过管壁传递给管芯中的工质液体，液体温度的升高使其自由表面上的蒸发加强，

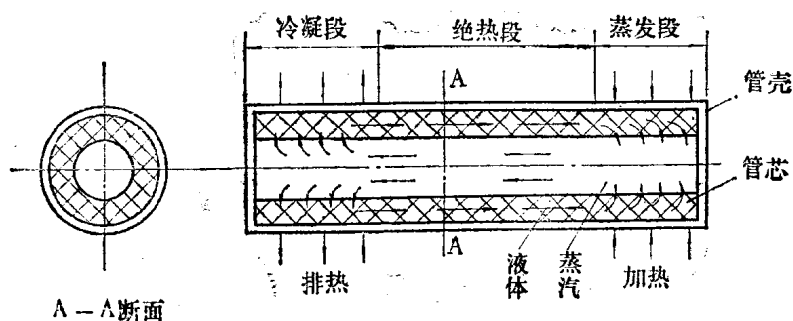


图 1-2 热管结构示意图

所以，加热段又称蒸发段。我们用 P_1 表示此处的蒸汽压力。与此同时，热管的另一端（排热段又称冷凝段）与热沉（冷源）联结或处于自然排热状态。冷凝段的蒸汽压力用 P_2 表示。在压差 $(P_1 - P_2)$ 的作用下，蒸汽由加热段流到排热段，并在那里凝结下来，放出汽化潜热，通过管壁传出去。如果把中间的管段（一般称为绝热段）很好地与外界隔热，同时忽略管壁导热的影响，则蒸汽从蒸发段得到的热量将全部交给冷凝段。这个热量是

$$Q = \dot{m}_v \lambda \quad (1-1)$$

式中 Q ——传热量

$\dot{m}_v$ ——蒸汽的质量流量

λ ——工质的汽化潜热

热管中充装的工质量，通常掌握在使热管工作时正好浸满管芯结构，或略多一点。蒸发段的管芯结构中的工质液体受热蒸发，使汽-液交界面缩进毛细结构内（见图1-3），弯月面的曲率半径减小；在冷凝段中，由于蒸汽的不断凝结，使液面的曲率半径变得很大。我们知道，在热管整个长度上，汽液交界面处两边的静压差都应与此相应的局部毛细压差相平衡。这样，蒸发段的弯月面附近液体的压力为 $P_1 - \frac{2\sigma \cos\theta}{R_1}$ ，这里 σ 是工质液体的表面张力系数； θ 是液体与管芯结构固体表面间的接触角； R_1 是蒸发段液体弯月面的曲率

半径。在冷凝段中弯月面附近液体的压力为 $P_2 - \frac{2\sigma\cos\theta}{R_2}$, R_2 是冷凝段液体弯月面的曲率半径。当 R_1 足够小时, 工质液体就能在压差 $\left(P_2 - \frac{2\sigma\cos\theta}{R_2} \right) - \left(P_1 - \frac{2\sigma\cos\theta}{R_1} \right)$ 的作用下克服流动阻力而通过毛细结构回流到蒸发段, 从而保持热管连续工作。这个驱动液体

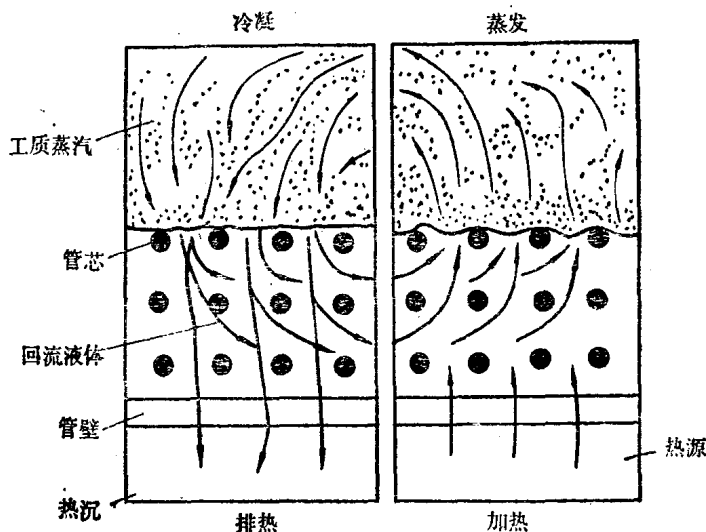


图 1-3 蒸发-凝结过程示意图

流动的压头可表示为:

$$\begin{aligned}\Delta P_l &= \left(P_2 - \frac{2\sigma\cos\theta}{R_2} \right) - \left(P_1 - \frac{2\sigma\cos\theta}{R_1} \right) \\ &= 2\sigma\cos\theta \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - (P_1 - P_2)\end{aligned}$$

$$\text{即 } 2\sigma\cos\theta \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P_l + \Delta P_v \quad (1-2)$$

式中 $\Delta P_v = P_1 - P_2$ 。此式表明, 为了克服热管工质的汽相和液相的

流动摩擦阻力, 以及动量及重力压差, 热管中的毛细结构必须有足够的抽吸压力

$$\Delta P_c = 2\sigma \cos\theta \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1-3)$$

与图1-1所示的系统比较, 这个毛细抽吸压力就相当于其中循环泵的压头。但是, 与循环泵相比, 热管的毛细结构没有运动部件、不消耗能量、结构紧凑。这是热管能成为高效的传热器件的基本原因之一。

从前面的分析知道, 维持热管工质不断地循环流动是热管正常工作的基本条件, 为此, 工质在毛细结构中形成的毛细抽吸压头 ΔP_c 必须与工质液体压降 ΔP_l 和蒸汽压降 ΔP_v 之和相平衡, 即

$$\Delta P_c = \Delta P_l + \Delta P_v \quad (1-4)$$

式中 ΔP_c 与工质特性、毛细结构有关。 ΔP_v 和 ΔP_l 则除了与毛细结构、工质特性有关外, 还随工质流量的增加而增大。从式 (1-1) 知, 当热管的热负荷 Q 增加时, 热管的质量流量相应增大。此时, ΔP_l 和 ΔP_v 亦相应增大。当热流量增大到一定程度, 毛细压头就会不足以克服工质的流动阻力, 于是就发生液体流动中断。这时, 我们就认为热管达到了毛细工作能力极限。在流动中断之前, 热管所能承受的最大热流负荷, 就称为最大工作热流或简称为最大热流, 用 $Q_{\max}$ 表示。因为这一最大热流实际上还和热管长度有关 (显然, ΔP_l 、 ΔP_v 与管长有关), 所以, 一般用“传热能力因子”来表示热管的传热能力, 在最简单的情况下, 它是最大热流 $Q_{\max}$ 与热管的有效长度 l_{eff} 的乘积 $Q_{\max} \cdot l_{eff}$ 。当然, 决定热管最大传热能力还不只是毛细工作能力的限制, 还有所谓声速限、携带限等, 这些我们将在后面讨论。

除了上述最大传热能力之外, 普通热管的另一个重要性能指标是热导 U (有时亦用当量传热系数)。

$$Q = U(T_{o,e} - T_{o,c}) \quad (1-5)$$

式中 Q ——通过热管的热流量, W

$T_{o,e}$ 、 $T_{o,c}$ ——热管加热段和冷却段的外壁温度, $^{\circ}\text{C}$

U ——热导, $W/^{\circ}C$

热导是热管在单位温差下所传递的热量,与固体导热体相比,热管的热导值很大,这是热管的主要优点之一。我们知道,热导是热阻的倒数。对于固体导热体来说,当截面一定,热阻随长度的增加而增大,热导则随之减小。但热管的热阻基本上取决于穿过蒸发段和冷凝段管壁及管芯厚度方向的热阻,因而热导基本上与长度无关。所以,只要传热距离不是很短,热管将显示出很大的优越性。但当传热距离很短时,情况则可能相反。关于这个问题以后还要谈到。现举一个例子粗略地将热管传热与固体导热进行比较。设在热源和热沉(冷源)之间装一导热体(图1-4),它们之间的距离为 $l=100\text{cm}$ 。导热体直径为1.5厘米,两端各插进5厘米。我们分别用热管和铜棒来作导热体时,试比较其传热量的大小。铜棒导热体的温差为 $\Delta T_k = \frac{Q_k l}{Ak}$, 式中 k 为铜的导热系数。热管的温差由式

$$(1-5) \text{ 知为 } \Delta T_H = \frac{Q_H}{U}。 \text{ 由假定 } \Delta T_k = \Delta T_H, \text{ 则有 } Q_H/U = Q_k l/Ak,$$

即 $Q_H/Q_k = Ul/Ak$, 设蒸发段和冷凝段的当量传热系数均为 $0.5W/cm^2^{\circ}C$, 那么热管热导为 $U=3.93W/^{\circ}C$, 在传热距离 $l=100\text{cm}$ 情

况下, 则热管传热量与铜棒传热量之比 $\frac{Q_H}{Q_k} = \frac{3.93 \times 100}{0.79 \times 3.9} = 128$ 。

热管能够作到有很大的热导,除了表明它能在小温差下传递很大的热流这一特性外,还意味着热管具有相当大的拉平温度的能力,这在一般工程技术应用中是十分有用的。同时,热管重量轻、热容小、不消耗外功、工作可靠,因而在某种程度上可以成为良好的导热器件。除此之外,还可以制成各种各样的“可变热导”热管,这类热管在运行时,可根据要求自行调节其热导或进行热流方

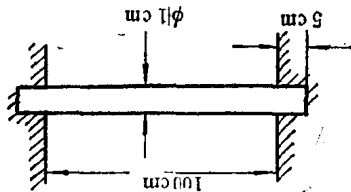


图 1-4 热管与固体棒传热的比较

向控制，或自动开启或关闭热通路，等等。

但是，为了避免通常易于产生的误解，这里有必要强调一下热管的缺点。其一是，与固体导热体相比，热管的结构比较复杂，使用时还需要考虑其热负荷和温度的适用范围等。其二是，热管中的毛细力比较小，在一般情况下远不足以克服重力，因此在地面使用时，必然受方向的限制，没有固体导热体的方向任意性。总之，热管尽管有许多优点，但总不是一种“拿来就可用”的那么方便的东西。然而，只要我们掌握了它的规律，在使用中就能扬长避短，使它很好地发挥作用。

1.2 工质的流动和最大传热能力

如前所述，热管是靠其工质的流动和相变来传递热量的。我们现在将讨论有关工质流动的各种因素及其对热管工作的影响。这个分析是以热管已建立起正常工作状态为前提的，即工质各相已达到了稳定流动平衡状态。

前也提及，热管中流体流动的驱动力是毛细结构的毛细抽吸压头。这个压头除了推动蒸汽流动外，还提供推动液体回流的压头。换句话说，热管在稳定状态时，其毛细抽吸力必须与液、汽两相的流动阻力平衡。而热管可能达到的最大毛细抽吸力必须大于或等于各流动阻力之和。此外，工质还常常受到体积力（如重力等）的作用。这种力对毛细驱动作用可能起阻碍作用，也可能起帮助作用，要由具体情况决定。图1-5 给出一个圆管型热管的流动示意图和压力分布。按照此图的方位，由重力造成的压差 ΔP_g 显然为负值。按前面的分析，流动平衡方程为

$$\Delta P_c - \Delta P_g = \Delta P_l + \Delta P_v \quad (1-6)$$

现从此式出发分别讨论影响流动的各个因素。

一、毛细现象

将一毛细管插入液体，在液体与毛细管之间的附着力和液体自身的内聚力的作用下，管内和管外液面高度不同（图1-6），这个现象叫做毛细现象。如果液体对毛细材料浸润，即接触角 $\theta < 90^\circ$ ，则

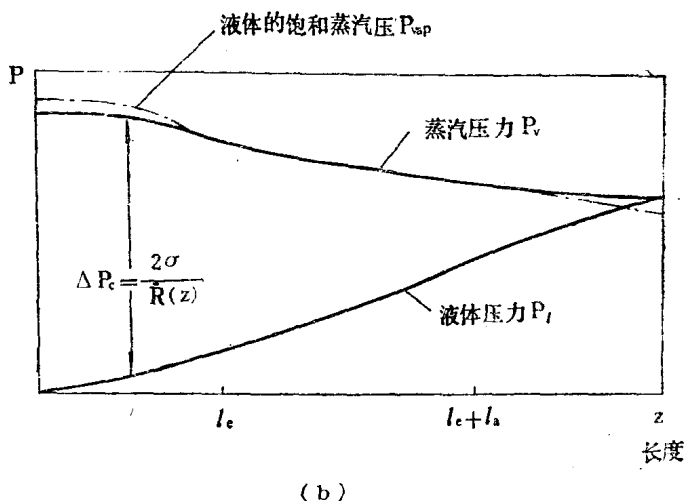
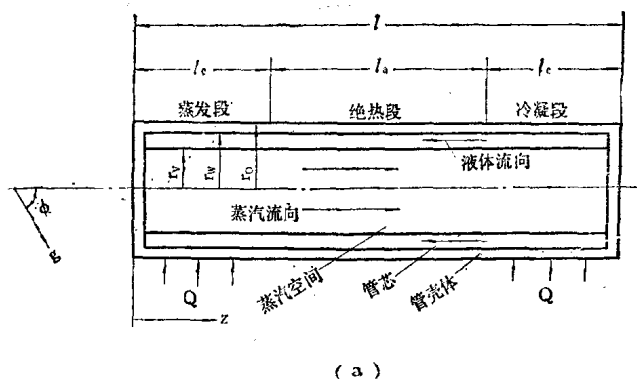


图 1-5 热管工质的流动及其压力分布

管内液面呈凹弯月形，管内液体上升一定的高度。显然，毛细作用的大小与液体及毛细材料的性质有关。我们用 ΔP_c 表示汽液交界面两边的压差。若弯月面的形状是任意的，则其平均曲率可用其任意一对相互垂直的正截面曲率之和 $\left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}\right)$ 来表示（图1-7）交界面可能的最大毛细压差对应于最小的弯月面曲率半径。即

$$\Delta P_{i\max} = \sigma \left(\frac{1}{R_{a\min}} + \frac{1}{R_{b\min}} \right) \quad (1-7)$$