

# 热 管

(美) E. R. F. 温特 W. O. 巴希 著

科 学 出 版 社

11207106

# 管 热

|     |            |   |   |
|-----|------------|---|---|
| [美] | E. R. F. 温 | 特 | 著 |
|     | W. O. 巴    | 希 |   |
| 陈   | 叔          | 平 | 译 |
| 蒋   | 章          | 焰 | 校 |

科 学 出 版 社

## 内 容 简 介

本书对六十年代出现的一种新型传热装置——热管作了评述性的介绍。书中首先叙述了热管的工作原理。然后解释了热管各工作限的机理，并对确定各工作限的实验和理论研究工作作了较详细的评述。书中还概括地介绍了热管的应用和控制问题。

本书主要对象是在动力、化工、冶金、电力、电子学以及反应堆、宇宙航行等方面从事传热工作的人员，也可供其他对热管感兴趣的读者作为一本入门参考书。

E. R. F. Winter and W. O. Barsch

The Heat Pipe

from "Advances in Heat Transfer, Vol. 7"

Academic Press, New York, 1971

## 热 管

[美] E. R. F. 温 特 著  
W. O. 巴 希  
陈 叔 平 译  
蒋 章 焰 校

\*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1975 年 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1975 年 6 月第一次印刷 印张：4 1/4

印数：0001—15,200 字数：95,000

统一书号：15031·101

本社书号：507·15—10

定 价： 0.45 元

## 译 者 的 话

热管是六十年代出现的一种新型传热装置。

早在四十年代，热管的概念已经有人提出。但是这个想法一直没有得到试验的机会。直到六十年代，由于宇宙航行方面的需要，热管才得到发展。

第一根热管于1964年运行成功。由于它具有传热量大、温度均匀、结构简单、工作可靠、没有运动部件等一系列特点，因而立即受到许多国家的重视。在不到十年的时间内，开展了大量实验研究和理论分析工作，积累了不少资料。

本书对于1970年6月以前有关热管的文献作了较好的综合评述，可以作为一个人门的参考。

近年来，热管发展十分迅速。特别在应用方面，早已越出了宇宙航行的范围，扩大到许多工业和科研的领域。有不少热管的应用已付诸实践，提出的新概念也层出不穷。这些在本书中都未能反映。为了弥补这种不足，译者补充了部分文献目录，供读者参考。

为了使内容更加醒目，译者添加了部分小标题，但叙述文字未作增删。对原文中明显的错误，译者尽可能作了订正。但限于外文和专业水平，译文中错误在所难免，敬希读者指正。

译 者

1974年6月

# 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 一、引言 .....            | 1   |
| 二、热管现象 .....          | 3   |
| (一) 热管的描述和类型 .....    | 3   |
| (二) 热管的工作原理 .....     | 7   |
| 三、文献述评 .....          | 17  |
| (一) 概括性的文献 .....      | 17  |
| (二) 材料试验 .....        | 18  |
| (三) 热管的工作特性 .....     | 34  |
| (四) 热管的应用 .....       | 57  |
| (五) 热管的控制 .....       | 61  |
| (六) 热管理论 .....        | 63  |
| 四、小结 .....            | 101 |
| 符号表 .....             | 103 |
| 参考文献 .....            | 107 |
| 附录：热管的最新文献和欧洲文献 ..... | 117 |
| 附录的参考文献 .....         | 121 |
| 译者补充的参考文献 .....       | 124 |
| 名词对照表 .....           | 128 |

## 一、引 言

最近几年,研制把热能从一处高效地输运到另一处的方法,变得越来越重要了.此外,空间时代的到来促使要研究这样一类传热装置:它们重量要轻,而寿命又比较长.在1944年,通用发动机有限公司的高格勒(Gaugler)<sup>[1]</sup>首先提出了这样一种装置,不过它并不是为空间技术用的.但是,那时的热输运问题用比较常规的传热方法和传热装置都可以解决,因而使他的发明的真正潜力被埋没了约二十年之久.1962年,特雷费森(Trefethen)<sup>[2]</sup>在向通用电气公司提交的报告中,提出了一种可以在宇宙飞船中应用的无动力热装置.这个装置由一根空心管组成,其内表面覆盖有一层多孔衬套.利用毛细作用引起的连续质量循环,把能量从管子的一端传递到另一端.但是,没有试图做实验来证实这个想法,结果这个建议被悄悄地掩埋在公司的档案中了.

1964年,洛斯-阿拉莫斯科学实验室的格罗弗(Grover)等人<sup>[3]</sup>独立地重新提出了类似于高格勒的一个装置,并且造了一个新名词“热管”来称呼它.格罗弗及其同事们当时从事宇宙飞船发电方面的工作,但是他们立即看出了热管在其它领域内有潜力.热管的定义如下:在一个密闭结构中装有若干工质,借助于液体的蒸发、蒸汽的输运和冷凝、然后靠毛细作用使冷凝液从冷凝段返回到蒸发段,用这种办法把热能从结构的一部分传递给另一部分,这样一种结构就称为热管.因为能量由纯饱和蒸汽流所传递,所以热管通常是很接近等温的.如果流体偶然被沾污,或者如科特(Cotter)<sup>[4]</sup>和卡佐夫

(Katzoff)<sup>[5]</sup>所讨论的那样,故意引入另一种流体,则热管就可能丧失其等温的特性。

1964 年以后,与大学和产业部门有关的许多团体和个人,对热管的兴趣越来越大,纷纷开始各自的研究,并制订了研制计划。作为这些研究的结果,最近几年在公开文献中出现了一百多篇论文。这里讨论的论文包括直到 1970 年 3 月前后发表的都在内。除此之外,1970 年 6 月 21 日到 24 日在美国加利福尼亚州的洛杉矶召开了美国机械工程师协会空间工艺和传热会议,在会上提出的大约十二篇有关热管的文章将在本文的附录中谈到。

## 二、热管现象

### (一) 热管的描述和类型

#### 1. 热管的描述

从引言中给出的定义显然可以看出：所有热管有一些共同的特性。首先，所有热管都要有一个通常称为蒸发段的東西。蒸发段是热管的一段，热能从某个外源通过此段进入它的壳壁中，随后再从那里传递给工质。其次，所有热管都包括一个冷凝段，工质在那里冷凝，最后把它的冷凝热传递给外热汇。许多热管还有一个处在蒸发段与冷凝段之间的绝热段。绝热段除了为流体提供一个通道以外，只是起把热源和热汇隔开的作用，以使热管能与任何给定的外部几何形状的要求相配。

除了纵向的几个段，即蒸发段、冷凝段和绝热段以外，为了讨论方便，在径向也可把热管再分成三部分。最外面的外壳一般简称为“管壳”。管壳在机械上的唯一目的是把热管的

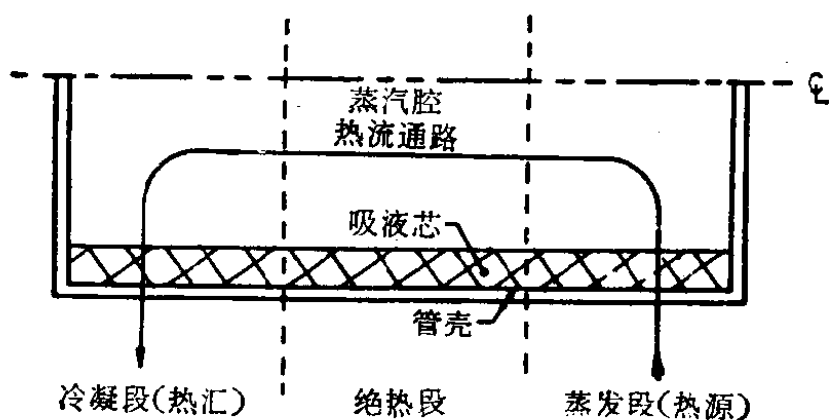


图1 热管的各个部件

工作部分封闭起来,并使热管结构坚固。由于内压常常与环境压力不等,因此管壳必须能经受住压差,不致鼓起或胀裂。这个约束再加上价格和加工上的考虑,导致广泛地采用圆筒形“管子”作为管壳结构。管壳除了容纳流体和“压力”以外,还是从源到汇的热流通路的一个重要部分(见图1)。因此管壳壁应该薄,以使它们的热阻最小。这个特性与容纳压力所要求的厚壁是直接对立的,因而它本身有最佳化的可能。下一个径向部件通常称为吸液芯。为了便于讨论,可以把吸液芯简单地看作为一个多孔材料,其中充满了许多细小的和随机地互相连通的毛细沟槽。本文后面将要比较详细地讨论各种类型的吸液芯和它们的特性。吸液芯利用液体的表面张力使液体从冷凝段返回到蒸发段。吸液芯通常被牢固地贴附在或者压在管壳的内壁上,不过并非一定这样做。由于吸液芯一般被低导热率的工质(液态金属的情况除外)所浸透,因此吸液芯-流体基体通常是沿热流通路的主要阻力。因此在选择合适的吸液芯时,必须考虑其热特性以及液体的输运特性。热管的内部空间通常称为蒸汽腔,它是蒸汽从蒸发段流向冷凝段的通道。

## 2. 热管的类型

现在应该很清楚,热管的定义并没有规定其结构要有一定的几何形状。事实上,已经制成了各种各样形状的大量热管,并作了试验。在图2—4上描绘了几种常用的和不常用的热管。格罗弗等人设想的热管示意图见图2(A)<sup>[3]</sup>。这种特殊形状的热管有两个特点:一个是长径比相当大,另一个是有多孔的吸液芯材料覆盖在结构的内表面上。初期的研究人员认为:热管要高效率地工作,这两个特点是很重要的。图2(B)和2(C)说明了两种典型的热管结构,它们的长径比也很

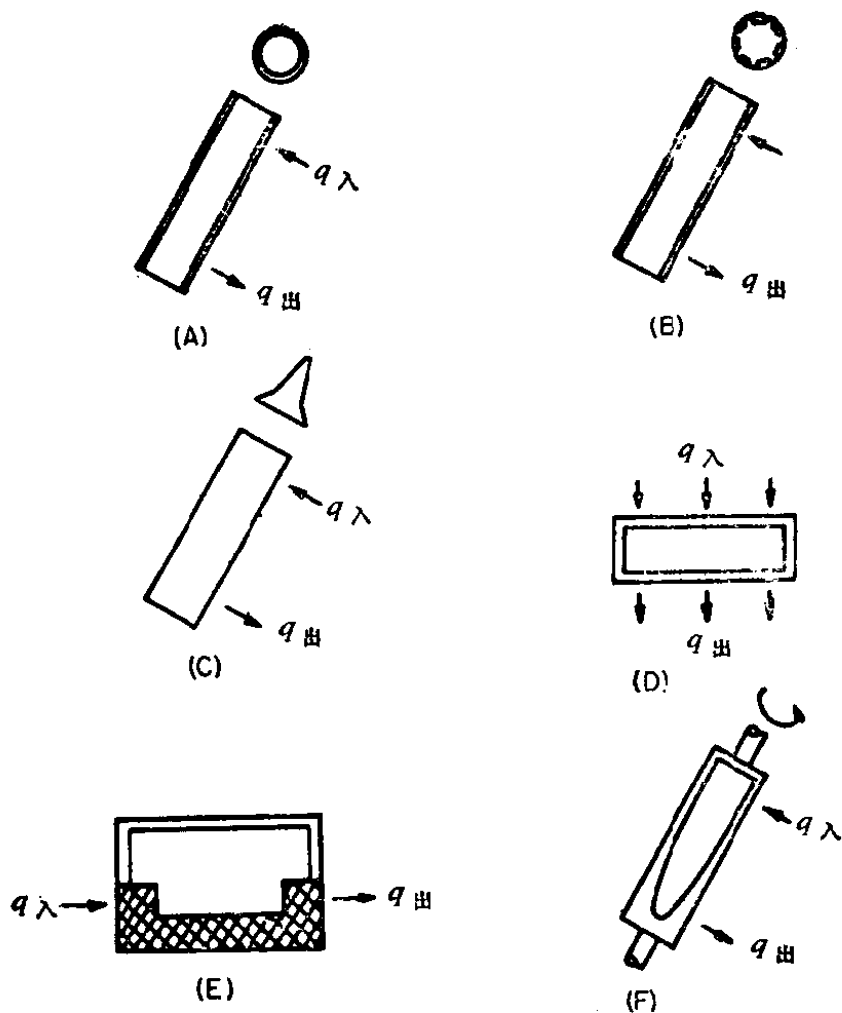


图2 几种典型的热管几何形状

大,但是液体是在凹槽和缝隙中被毛细作用所运输的. 凹槽和缝隙与管壳结构组成一个整体,这与图2(A)中所示的多孔吸液材料正好相反,后者只是被固定在管壳内壁上. 图2(D)所示热管的长径比很小. 有此种长径比的热管常常称为“蒸汽室”或“蒸汽室散热片”. 图2(E)所示的装置也符合我们的热管定义,不过液体和蒸汽的流动通路被机械地分开,而在比较常见的热管中只是液-汽分界面把液体和蒸汽的流动通路分开. 最后,图2(F)描绘的装置是最近提出来的“旋转热管”<sup>[6]</sup>. 它利用旋转机械装置的离心力使液体返回蒸发段. 虽然旋转装置似乎对许多热输运问题来说是很有希望的,但它不符合我们的热管定义,因而不作详细讨论.

显然热管形状的变化是非常多的。例如卡佐夫<sup>[5]</sup>以及康韦(Conway)和凯利(Kelley)<sup>[7]</sup>都考虑过轮胎形的热管。有些研究人员<sup>[5,8,9]</sup>提出并设计了挠性热管。美国无线电公司制造了各种形状的热管,并已经工作。其中有两种示于图 3(A) 和 3(B) 上<sup>[10]</sup>。图 3(A) 所示的结构能沿一个 90° 弯头高效地运输热量。图 3(B) 是一个五叉装置,它可以用任何几个叉作为蒸

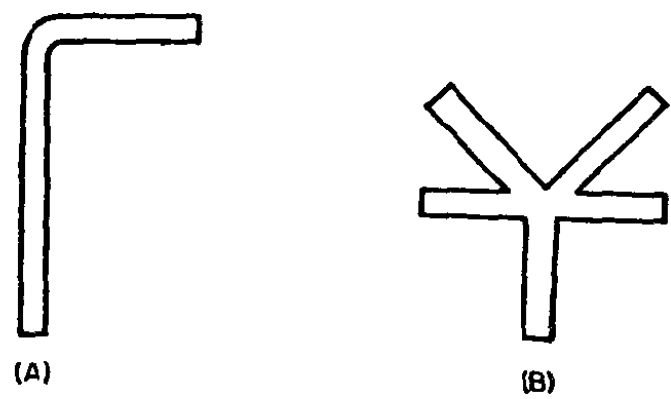


图 3 各式各样的热管几何形状<sup>[10]</sup>

发段,而把其余几个叉作为冷凝段。为了加工方便,两种型式都用圆筒形的断面,但并不一定都这样要求。除了上述形状

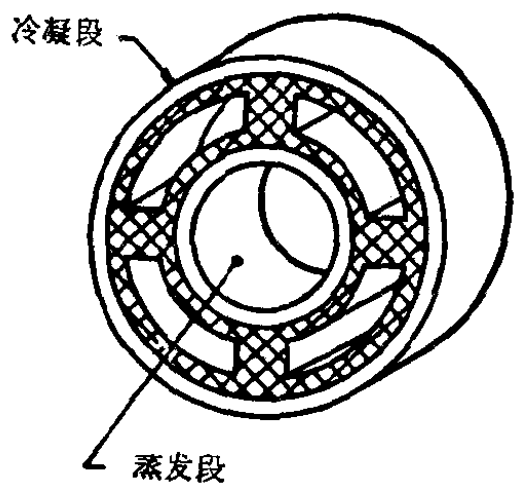


图 4 径向热管<sup>[11]</sup>

以外,有些研究人员<sup>[10,11]</sup>制成并试验了一种所谓径向热管。径向热管如图 4 所示,它把热能从热源运输给一个同心的热汇。在这种情况下,贴在环形通道的两个内表面上的吸液芯被辐条所串通,而辐条由另加的吸液芯材料组成。在这里也和其它大多数几何形状的热管一样,冷

凝段和蒸发段的相对位置可以互换,以便适应任何特殊的热运输问题。上述几何形状的种类决不包括所有可能的结构,

只是拿出来作为例子，说明热管可从多方面适用于各种传热问题。

## (二) 热管的工作原理

初看起来，热管的工作好象非常简单。由于适当工质的连续质量循环和相变，热能就从蒸发段传递给冷凝段了。相变机理以及随之而来的相变潜热的吸收或释放，早已被认识到是一个高效率的传热过程。许多小器具，例如煮咖啡壶和回流冷凝器，都把相变传热与重力引起的质量循环结合起来了。锅炉在大多数情况下是用机械泵使工质连续循环并加以补充的。但是，在热管中，工质是靠流体本身的表面张力来实现连续循环的。这是一种独特的质量传递的方法，它既促使人们对热管的兴趣日益增长，但也是热管成功地工作的主要障碍之一。为了更好地弄清楚热管的工作原理和限制，下面让我们来较详细地考虑热管中发生的各种物理效应。

### 1. 热管的稳态工作

热管的稳态工作可以简略地示于图 5 上。管壳内壁用多

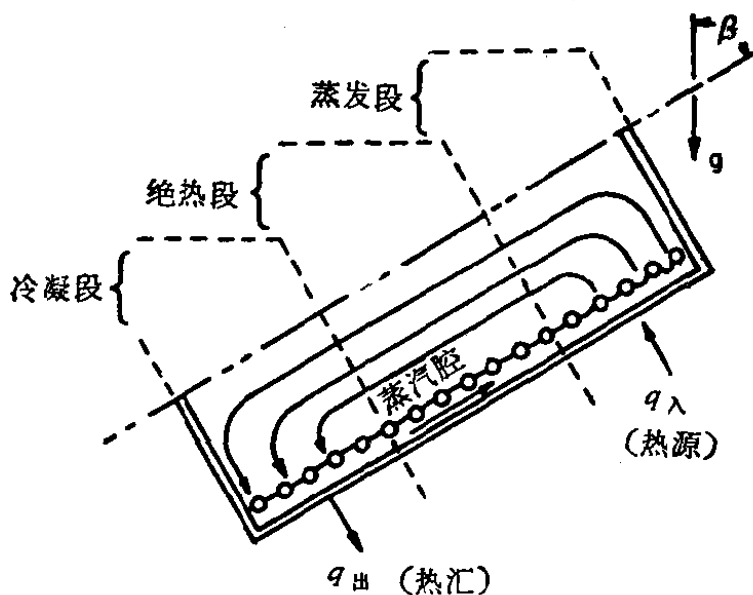


图 5 热管示意图

孔毛细结构作衬里,而毛细结构中则用某种工质浸透。装入管壳内的工质数量必须足够多,以便充满(浸透)毛细结构的所有毛细孔。工质稍微超过一些所花的代价,与工质不足可能造成的热管损坏的几率相比,要小得多。热管蒸汽腔内的蒸汽基本上处在与液体表面温度相应的饱和压力下。实际上与液体表面平衡时的蒸汽的饱和压力还取决于表面的曲率半径。如果液体表面是凸的,则蒸汽压力就比作用于平表面上的压力大;而如果弯月面是凹的,则就小。这个效应一般非常小,证明上述考虑是正确的。在弯月面半径达到1微米数量级以前,这个效应并不重要<sup>[12]</sup>。因为在大多数热管中典型的毛细孔都大于1微米,所以忽略这个效应不会带来很大的误差。

从源到汇的热传递主要受六个同时发生而又互相关联的过程的影响。这六个过程是:(1)热量从源通过管壳壁和吸液芯-液体基体传递到液-汽分界面;(2)液体在蒸发段内的液-汽分界面上蒸发;(3)蒸汽腔内的蒸汽从蒸发段输运到冷凝段;(4)蒸汽在冷凝段内的液-汽分界面上冷凝;(5)热量从液-汽分界面通过吸液芯-液体基体和管壳壁传给热汇;(6)在吸液芯内由于毛细作用使冷凝液从冷凝段回流到蒸发段。现在让我们更详细地分别考虑以上每一个过程。

从热源向蒸发段内液-汽分界面的传热基本上是一个传导过程。对于水或酒精这类低导热率的流体来说,由于吸液芯的导热率比流体高,因此热能通过吸液芯-液体基体差不多完全靠多孔吸液芯材料的传导。但是,对高导热率的液态金属来说,热量既通过吸液芯结构传导,也被毛细孔内的液体所传导。对流传热是很小的,因为要产生任何有意义的对流流动,毛细孔是太小了。由穿过吸液芯材料-液体基体的传导所造成的温降的大小,取决于工质、吸液芯材料、吸液芯厚度以及径向净热通量。这个温降可以从华氏几十度变到几百度,

并且是沿热流通路的主要温度梯度之一。

在热能传递到液-汽分界面附近以后,液体就可能蒸发.与液体蒸发的同时,从表面离开的净质量流使液-汽分界面缩回到吸液芯结构里面,造成一个凹形的弯月面,如图 5 所示.这个弯月面的形状对热管工作原理有决定性的影响.在单个毛细孔上的简单力学平衡表明:对于球形分界面,蒸汽压力超过液体压力的数量等于两倍表面张力除以弯月面半径.这个压差是液体流动和蒸汽流动两者的基本推动力.它主要与循环时作用于液体的重力和粘滞力相对抗.示于图 5 上的液-汽分界面的假想形状在热通量比较低时大概是十分逼真的.但是如果热通量增高,则弯月面还要进一步缩入吸液芯里面,而呈现一个更复杂的形状<sup>[13]</sup>,最后它可能妨碍毛细结构内的液体流动.一旦液体吸收了汽化潜热而蒸发后,蒸汽就开始通过热管的蒸汽腔向冷凝段移动.此流动是由在蒸汽腔内占优势的小压差所引起的.蒸发段内的温度比冷凝段内的温度稍微高一些,因此前者的饱和压力比后者的饱和压力也稍微高一些,从而造成了这个压差.这个温降常常作为热管工作成功与否的一个判据.如果此温差小于 1 或 2°F,则热管常常被说成是在“热管工况”下工作,即等温工作<sup>[3,14,15]</sup>.在蒸汽向冷凝段流动的同时,从蒸发段的下游部分不断加进补充的质量,因之在整个蒸发段内轴向的质量流量和速度是不断增加的.在热管的冷凝段则出现相反的情况.

热管的蒸发段内和冷凝段内的蒸汽流动,在动力学上与通过多孔壁注入或吸出的管内流动是等价的.流动可以是层流,也可以是湍流,取决于热管的工作情况.当蒸汽流过蒸发段(和绝热段)时,由于粘滞效应和加速度效应,压力不断下降.一旦达到冷凝段,蒸汽就开始在液体-吸液芯表面上冷凝,减速流动使部分动能回收,从而使在流体运动方向压力有所

回升。应该指出：蒸汽腔内的驱动压力要比蒸发段与冷凝段内流体的蒸汽压差稍微小一些。这是因为要维持一个连续蒸发的过程，蒸发段内液体的蒸汽压必须超过相邻蒸汽内的压力。同样，为了保持连续冷凝，正在冷凝中的蒸汽的压力必须超过相邻液体的蒸汽压。

当蒸汽冷凝时，液体就浸透冷凝段内的毛细孔。弯月面有很大的曲率半径，从而实际上可以认为它基本上是无穷大的。在热管内只要有过量的工质，就一定集中在冷凝表面上，因而实际上保证有一个平的分界面。冷凝热通过吸液芯-液体基体和管壳壁传递给热汇。如果有过量液体存在，从分界面到管壳外面的温降将比蒸发段内相应的温降大。事实上，有些研究人员<sup>[14,16]</sup>认为：冷凝段内的热阻是热管设计中应考虑的主要参量之一。

最后，由于毛细作用，冷凝液通过吸液芯被“啣送”到蒸发段。通常把液体流看作是层流，并假定被粘滞力所支配。由于粘滞损失，当热管在重力场下工作时还因高度的增加，压力沿液流通路是下降的。当热管在冷凝段比蒸发段高的重力场下工作时，实际上破坏了采用吸液芯的目的，因为重力可以使冷凝液沿管壳壁的内侧返回，其粘滞损失比在吸液芯内液体流动造成的损失来得小。在这种工作方式下，就认为热管退化到回流冷凝器或热虹吸。因此，在本文中总是认为重力引起的压力损失大于零（蒸发段在冷凝段的上方）或等于零（把热管放在水平位置来模拟无重力环境）。

## 2. 各种源-汇配合对热管工作的影响

热管的蒸汽温度有时也称为工作温度。因为它基本上取决于热管与热源和热汇的配合情况，所以对可能的各种源-汇配合以及它们对热管工作的影响进行简单的讨论是合适的。

蒸汽温度会自行调整,使得在蒸发段内和冷凝段内穿过吸液芯-液体基体和管壳壁的温降刚好能把给定的热流从热源传递给热汇。换句话说,蒸汽的绝对温度是随源和汇加给蒸发段和冷凝段的温度高低而定的。热管外壁上的温度可以是“确定的”,也可以是“浮动的”,视源或汇施加的限制的型式而定。在蒸发段,“浮动”温度通常是把某种热通量边界条件施加于热源的结果。用电阻加热器、感应线圈、射频线圈或辐射加热作为热源,就很容易做到这一点。在冷凝段,“浮动”温度通常是辐射冷却的影响。确定的温度可以这样保持:或者把热管的一端放在恒温槽中,或者利用第二工质的蒸发热或冷凝热,在恒温下把热量相应地加入或带走。

现在我们来考虑几种源-汇配合下沿热流通路(见图1)的可能有的几种定性的温度分布曲线。如果源和汇都是恒定的“确定”温度,则就得到图6(A)所示的温度分布曲线。对于这种情况,只可能有一个轴向热流率。热管内的蒸汽温度十分接近源温和汇温的平均值,而且大概稍微接近于源温度,因为液体-吸液芯基体内的热阻在冷凝段内比在蒸发段内来得大。如果汇温是确定的而源温容许浮动,则就得到图6(B)所示的温度分布曲线。源和汇的这种特殊配合在低温热管的实验室试验工作中(电阻加热和水套冷却)常常碰到。如分布曲线a和c所示,随着热通量的增加,源温和汽温也升高。相反,如果热通量保持不变而汇温升高,则如分布曲线a和b所示,汽温和源温也要升高,但此时蒸发段内和冷凝段内的温度梯度都保持不变。如果源温是确定的,而汇温容许浮动,则就得到图6(C)所描绘的分布曲线。在这种情况下我们从分布曲线a和b看到:要是源温确定,则为了与更大的热通量相适应,汽温必须下降;反之如果源温升高,则在给定热通量下汽温就必须上升。图6中重要的遗漏是源温和汇温都容许浮动的情

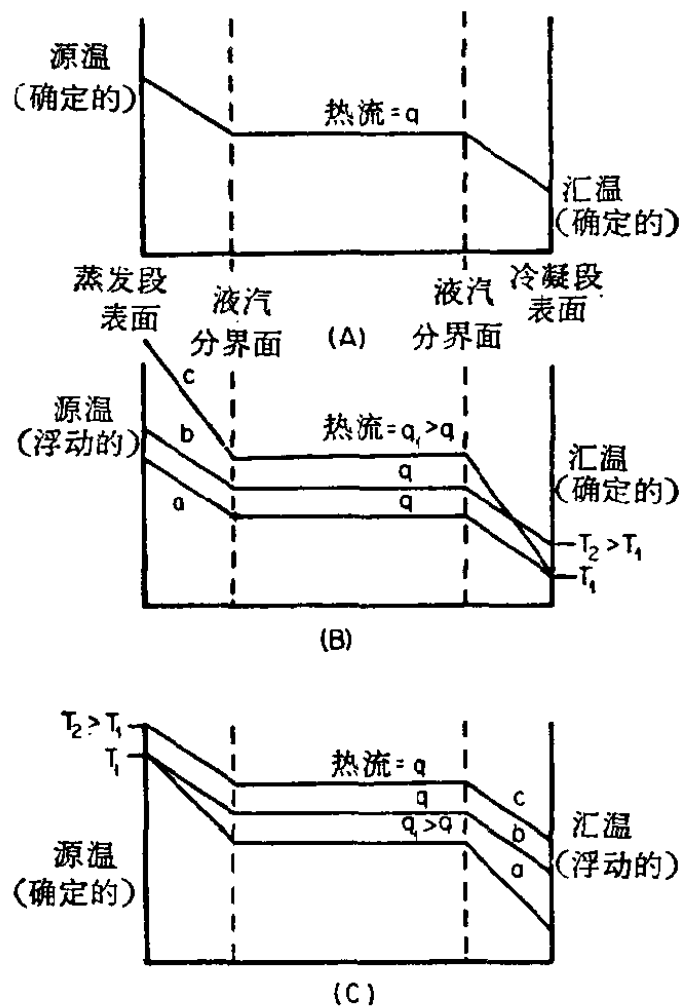


图 6 沿热流通路的定性温度分布曲线

况,这在高温液态金属热管的实验室试验时(感应加热或射频线圈加热和辐射冷却)常常碰到。对于这种情况,热管的工作温度将自行调整到某个值,使总的热输入等于总的热输出。因为这种自调整取决于所用的源和汇的确切类型,也许还取决于管壳壁本身的某些性质,例如电阻率或发射率,所以不能作出有关工作温度的确切表示。一般来说,增加热通量将使热管的工作温度升高。

### 3. 热管工作的限制

热管特有的工作原理还取决于工质的连续循环,因此,实际上热管成功地工作受到的所有限制(各种工作限)都以这种