

# 热 管 及 其 应 用

辽宁省科学技术情报研究所

一九七七年三月

# 目 录

## 一、什么是热管

1. 热管的基本概念
2. 热管的类型
3. 热管的优点
4. 热管的发展简史

## 二、热管材料的选择及有关问题

1. 热管材料的相容性问题
2. 管 壳
3. 吸 液 芯
4. 工 质
5. 制 造 工 序

## 三、热管的应用

# 热管及其应用

“当你把热管的一端接触某个高温热源时，你千万不要试图触摸另一端。因为这会使你在发觉太烫之前就已被烧伤了。”热管技术权威机构—美国新墨西哥大学技术应用中心W·朗的这番议论，生动地描述了热管—这种新型传热装置的形象和特点。

很多热传递工作者看了这段话，将会对“热管”产生很浓厚的兴趣，并提出诸如“什么是热管？”“用什么材料制做的？”“它有哪些用途？”……一连串的问题。本文为了促进我省对热管的研究、制造以及广泛应用，打算从以下几个方面对热管技术进行简单的介绍。

## 一、什么是热管

### 1. 热管的基本概念

热管是这样一种装置：重量轻，结构简单，没有可移式机械部件，完全自含。它可以高速高效地在温降极小的情况下不依赖重力把热量从一处传至另一处。热管的科学、严格的定义是这样的：在一个密闭结构中装有若干液体工质，借助于液体的蒸发，蒸汽的输送和冷凝，并依靠吸液芯的毛细作用使冷凝液从冷凝段返回蒸发段，用这种方法把热能从结构的一端传递到另一端，这样一种结构就叫“热管”。

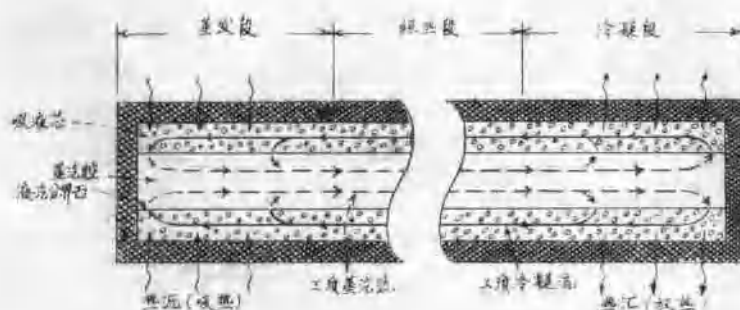


图1 基准型吸液芯热管

从以上定义中显然可以看出，所有热管有一些共同之处。首先，所有热管都有一个通常称为蒸发段的部分。蒸发段是热管的一段，热能从某个外源通过此段进入热管的壳壁中并立即传递给工质，工质吸热后在此蒸发成为蒸汽。其次，所有热管都有一个冷凝段，工质蒸汽在此冷凝并把冷凝潜热释放出来传给外部热汇。多数热管还有一个处在蒸发段和冷凝段之间的绝热段。绝热段除了为流体提供一个通道之外，还起着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合。

除了在轴向上可分为蒸发段、冷凝段和绝热段以外，在径向上还可以分为管壳、吸液芯、蒸汽腔三个组成部分。管壳的作用是把工作部分封闭起来并使热管结构坚固。由于热管的内压常常与环境压力不等，因此管壳必须能经受住压差，不致在压差的作用下产生鼓起或胀裂。从这点出发，再加上成本核算以及加工上的考虑，多数采用圆筒形“管子”作为管壳结构。管壳除了容纳流体和承受压力之外，还是从热源到热汇的热流通路的一个重要部分。因此，壳壁应力求薄以使其热阻达到最小，这显然是与承受压差所需要的厚壁是相矛盾的，这里就产生了一个使管壳壁最佳化的问题。吸液芯通常被贴附在或压在管壳的内壁上，它利用液体的表面张力使冷凝液体从冷凝段返回蒸发段。由于吸液芯被低导热率工质所浸透（以某些液态金属做工质的高温热管除外），所以吸液芯一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，必须考虑其热特性和液体输送特性。蒸汽腔系指热管内部的空间，它是蒸汽从蒸发段流向冷凝段的通道。

## 2. 热管的种类

目前世界上已经研制并付诸使用的热管，可谓变化多种，花样纷繁，很难从一个统一的角度去归纳分类。为了尽可能详尽地向大家介绍这种技术，本文从以下几个角度介绍各种类型的热管。

首先，按其冷凝段凝结液体回流方式分为以下三种：

1. 依靠结构中的毛细作用和工质的表面张力使液体返回蒸发段的，称为吸液芯热管；
2. 利用旋转运动所产生的离心力使液体返回蒸发段的，称为旋转热管；
3. 依靠凝结液自身重力返回的，称为重力热管。除此三种之外，尚有利用电渗透压力回流液体的电渗透热管和利用极化电流流体动力学力作用回流液体的电流体动力学热管。但因尚未付诸广泛使用，本文就不再详述了。

旋转热管（参见图2），这种热管通常是装在转动设备上，利用旋转体内腔，空心轴或旋转体轴心钻孔构成热管容器，抽真空注入液体后密封。在操作中，旋转体受热端使容器内的液体蒸发，蒸汽传输到旋转体的冷凝端放出汽化潜热而凝为液体，该液体随同旋转体一道旋转，由于离心力作用沿旋转容器内壁形成液膜而返回受热端。这样便不断地将热源所需散发的热量传输到冷却端的外界冷源。

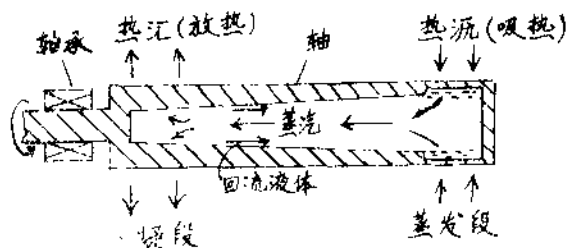


图2 旋转热管

重力热管（参见图3），这种热管仅由管体容器和传热体组成。抽真空后注入液体，操作中，热管在下部受热，液体沸腾产生的蒸汽在上端散热凝结，凝结液靠自身重力返回受热端。

这种热管的应用仅限于地面重力场蒸发段低于冷凝段的场合。但是，由于它结构简单，制做方便，工作可靠，在地面应用中，只要可能就应优先考虑应用。

以上两种也称为无芯热管。

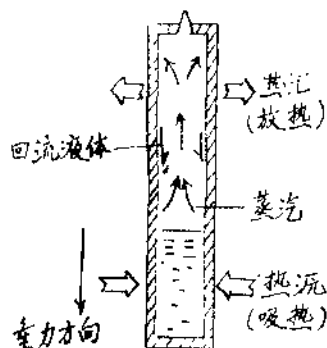


图3 重力热管

吸液芯热管（参见图1），本文以下几个部分都将主要围绕这种热管进行论述。本文第一部分的“热管的基本概念”中所提出的热管定义也是针对吸液芯热管而言的。迄今为止，在热管技术的开发、研制工作中，吸液芯热管领有优势的地位。

吸液芯热管由管壳、起毛细作用的多孔结构物—吸液芯和传递热量的液体工质构成。管内抽成真空后，充入工作流体浸透吸液芯到饱和状态为止，然后密封管壳。

由上所述，热管内热量的传递是依靠液体的沸腾与冷凝，这是换热强度最高的热传递方式。而且热管内的空间为饱和蒸汽充满，因此，从蒸发段到冷凝段，温降极小，几乎是相等的，即是说采用热管可以在温差很小的情况下传递大量的热负荷，这就是热管导热能力非常高的原因所在。吸液芯热管保持正常工作必须注意以下几点：（1）管内应保证没有不凝气体存在（特意充气的热管除外），否则会影响其热传导率。

这就要求在选择管壳、吸液芯和工质的材料时，必须考虑它们之间的相容性，使它们在足够长的时间内不发生不利的化学反应。（2）吸液芯必须保证有足够的抽吸力。（3）在装配时应保持各部清洁及工质的纯净，否则会使工质滞流影响热管工作效应。

很清楚，吸液芯热管的定义并没有对其形状进行限制。事实上，已经制成了各种各样形状的大量热管。图4描述了几种常用的和不常用的热管。其中（1）、（2）长径比很大，但（1）是在管壳内表面上多孔的毛细材料来输送液体。而（2）是由凹槽和缝隙中的毛细作用来输送液体。

（3）长径比很小，这种热管常常被称之为“蒸汽室”或“蒸汽室散热片”。（4）和普通的热管不同之处在于它把液体和蒸汽的流动通道机械的分开了，它的好处在于吸液芯结构避免受蒸汽流冲刷，液体回流也可避免受反向蒸汽流的影响。（5）能

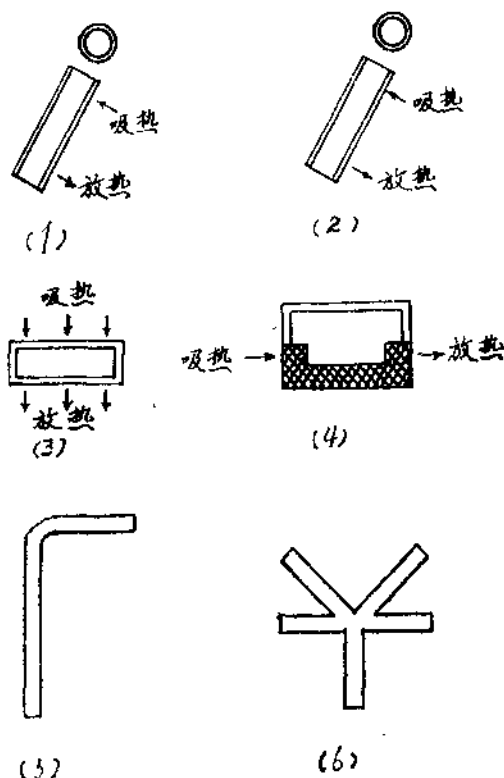


图4 热管的几种典型几何形状

沿一个九十度的弯头高效地输送热量。(6)是一个五叉形的,它可以根据需要用其中任意几个叉作为蒸发段,另外几个叉作为冷凝段。还有各种各样几何形状的热管。如平板形的,象钟表发条那样卷成一盘的,周围加了若干散热肋片的……,还有一种挠性热管,在蒸发段和冷凝段之间是一段挠性结构,其管壳是挠性材料制成的,吸液芯用布满整个挠性结构的盘簧固定在管壳上。它可用于弯角和抗振动场合。有一些研究人员制成了一种所谓径向热管,它由两个同心圆筒组成,圆筒内连以幅条。外筒的内表面、内筒的外表面及幅条附着吸液芯结构。它可以把热能从热源输送给一个同心的热汇。

上述各种几何形状远不能包括热管全部可能采用的形状和结构。仅仅可以说明热管可以通过各种形状变化来适应多种传热条件。此外,热管不仅可通过改变形状,还可以通过改变长度来适应需要。例如,最小的热管只有十几厘米;而稍长的,已知的就有12.2米、20米的。目前世界上已经造出的最长的热管为30.5米。实验证明,制造更长的热管是没有物理极限的,只要需要,可以造到300米甚至更长。

如按其使用温度来划分,热管还可以分为超低温热管( $T < -73.3^{\circ}\text{C}$ )、低温热管( $-73.3^{\circ}\text{C} < T < 276.87^{\circ}\text{C}$ )、中温热管( $276.87^{\circ}\text{C} < T < 476.87^{\circ}\text{C}$ )、高温热管( $T > 476.87^{\circ}\text{C}$ )等四种。热管究竟适用于哪种温度场合,和它所采用的工质液体密切相关。

如果把各种不同的物质作为工质或与液体工质配合使用,则又可获得若干不同类型的热管。

如有一种双流体热管,即在同一根热管中同时充填两种液体作为工质即主工质和辅助工质。当热管处于低热负荷时,主工质液体达不到沸点不能汽化。而选用的辅助工质此时却可以沸腾蒸发,因而可以使热管维持正常运行。

如果在热管中导入一种不凝气体如惰性气体,则可得到一种崭新的、用途极广的热管。通常是有—储气器与热管相连,当蒸汽向冷凝段流动时,惰性气体被推到冷凝段一端,使此处停止传热,这样便减少了热量的散发。例如,当热源温度下降时,管内蒸汽温度亦即下降并引起蒸汽压力下降,蒸汽压力下降又导致惰性气体体积膨大,气体膨大导致冷凝段面积缩小而使散热量变小。反之当热源温度升高时又使冷凝段面积扩大散热量增大。就这样,热管依靠加入的不凝气体自动地、极其精确地调节管内的温度。这种热管被称为可变热导体热管、充气可调热管或恒温热管。

如果热管中充入电介质液体或电介质气体,那么,这时热管就不仅是一个传热装置,而且是一个很好的电绝缘体了。

### 3. 热管的优点

热管这种装置,它在相同效力下可用于冷却、冷冻,还可用于加热煮沸、熔化以及温度控制。它效率高,用途广,这是因为它和传统的热传导方式及装置相比有如下一些优点:

(1) 体积小、重量轻、结构简单,无需配装泵、马达之类的可动部件,因而无需维修。也无需施加进行输热工作的辅助能量。

(2) 有极高的热传导性。如一个长61厘米、直径2.54厘米的热管,在 $981^{\circ}\text{C}$ 下每小时能传递12500英热单位,而两端的温差仅 $7.7^{\circ}\text{C}$ 。这是相同大小的固体银棒的效率的1000倍。基于这个特点,热管获得了“热的超导体”的美称。

(3) 热管的适用温度范围极广。目前可在 $-200^{\circ}\text{C} \sim 2200^{\circ}\text{C}$ 范围内使用, 而且可用于有毒、有污染的恶劣环境。

(4) 可靠性好。只要材料选择和制作工艺适当, 热管寿命可维持很久, 能够节省大量更新和维修费用。如在Basiulis所列举的一次寿命试验中, 一些热管的连续工作时间达到了7万个小时, 还有1000多个热管使用了4年以上的时间而没有出现任何故障。对于阿拉斯加石油管线的热管进行的长达4个月的高温加速试验, 证明其寿命可达30年, 完全适用于使用时间为30年的阿拉斯加输油管线。

#### 4. 热管的发展简史

简略地回溯一下热管的发展史, 对我们认识、掌握、研究并应用这种新型传热装置, 无疑都是很有好处的。

第一个发明热管的是美国通用汽车公司的 R.S. Gaugler, 他于1944年的一份专利中提出了这种概念, 但没能付诸实践。他还正确地观察到热管中导入不凝惰性气体的作用, 阐发了这种“缓冲”气团的控制热传导的作用。这个作用后来成为热管大大发展的一个重要原因, 并为热管的应用开辟了一个重要领域。此后二十多年的时间里, 热管技术一直如石沉海, 再无声息。

六十年代飞速发展的宇宙空间技术对新型高速高效传热装置的迫切需求, 导致了热管技术的再生。

1962年, L. Trefethen在他的一项宇宙空间项目中又提出了对热管的应用。1963年, T. Wyatt在卫星的稳定系统中又单独提出了这个概念。

但今天的热管, 确切地说是洛斯·阿拉莫斯科学实验室的George Groover在1963年重新发现并定名为“热管”的。1964年6月他第一次在公开文献中阐发了毛细吸液芯结构热管的概念和它的杰出的传热性能。

此后, 广泛的研制工作开始了。美国无线电公司与宇宙航行局和原子能委员会合作, 制定了60多种设计方案, 制造了几千个热管。与此同时, 许多厂商纷纷配合宇宙空间项目研制了大量的毛细吸液芯传热装置。Jet Propulsion 实验室的劳伯为无人飞船装了一个氟里昂蒸发沸腾炉, 在失重的条件下运用毛细啁送原理使冷凝液返回蒸发段。其后, Haller研制了重力为零时用毛细吸液芯使液体流动的肋片—管式散热器。卡佐夫研制了用于宇宙飞行器温控系统和电路冷却用的热管, 并对有关热管的理论、吸液芯结构设计及性能研究等问题进行了卓有成效的探索。Langley研究中心研制了第一个干道吸液芯结构。对于丝网干道和螺纹干道吸液芯的最初的研究为其后几年的高性能热管的发展扫清了道路。

1963年~1968年这个期间, 对热管的研究着重于其极高的传热性能, 多数初次应用都属于高温范畴的, 包括核反应堆、宇宙空间项目用的放射性同位素动力装置、热离子发电机和热电发电机等。这些项目侧重于使热管具备高温性能。而对于热管的各种工作形式或其它特殊功能几乎没有触及。直到1968年5月, Eastman在“Scientific American”杂志上披露了热管的几个特性之后, 研究工作才集中到热管的四个特性方面来: (1) 极高的热传导性, 它是导热金属的几百甚至上千倍。(2) 可把热源和热汇分隔在一定距离之外。(3) “温度展平”即可在一个相当大的表面积内维持均匀的温度环境。(4) 热流量变换器。热流可

被浓集或疏散。即在一个小面积内加上大流量热量而可在一个大面积内以低流量传输出去，反之亦然。

在1967~1970年这个时期，对适用于电子器件冷却、卫星上的环境控制的低温（-17.7~93℃）热管的研制有所增加。在这些应用中，必须主动切实地控制热管的导热率才能获得合宜的温度范围。研究了许多控制热传导的方法，现择其主要者归纳如下：

（1）冷凝段工质过量淹没

（2）蒸汽流调节

（3）液流控制

（4）气体控制

—使用加热器控制的储气室

—用液体在储气室下方控制

（5）热二极管

（6）相变材料储热器

其中第（4）气体控制即用不凝气体实现控制最为引人注目。

1972年8月，制成了第一个气体可控可变热传导率热管，用于天文轨道观测卫星。该热管在热源变化范围为15~35瓦时可使板式数据处理电子装置保持在 $18.2 \pm 1.4^\circ\text{C}$ 水平上。而先前的控制方法所获得的温变范围为 $-17.7 \sim 60^\circ\text{C}$ 。

研制工作继续深入，对温变范围的兴趣逐渐从大约1650℃降到了零度以下。超低温热管带来了特殊问题。因为它所采用的液化气体并非优良传热工质。美国空军早期研制的超低温热管工作性能是很低的，受重力场影响很厉害，用普通的吸液芯结构不能有效地工作。从1970年起进行的更深入的研究，引人注目地从理论和实际技术上改进了超低温热管技术。轴向槽吸液芯和压力脚送干道使热流通能力提高了大约10倍。

热管最初是为了适应宇宙空间技术需求而逐步发展起来的。从1968年起，民用工业也以日益增长的兴趣和速度开始了对热管的研究、设计和应用。

美国较早地开始了热管的研制工作。目前苏联、西欧和日本等国家都已投入了很大的力量进行研制并已在各方面进行应用。近几年来，我国也进行了卓有成效的研制和利用。

## 二、热管材料的选择及有关问题

### 1. 热管材料的相容性问题

热管能否长期使用，决定性的因素是所用材料（包括管壳、吸液芯材料和工质）之间的相容性问题。一般说来，选择材料不适当会出现不凝气体。对于高温液态金属充填的热管来说，选择材料不适当还会促成吸液芯结构的腐蚀和溶解。

例如，施瓦茨在实验中从一些水——不锈钢热管中发现有不凝气体存在。经分析证明不凝气体中氢占97%以上。他认为这是不锈钢中的铁与水之间发生化学反应而生成的。他提出了可以避免产生不凝气体的两个办法：其一是选择一种热管，它的所有金属成分在电动序中都处于氢之下。其二是如果金属的电化学势在氢之上，则不用水而用不起反应的工质。为了证实这种想法，制成了一根氢——不锈钢热管，它连续工作了三个月，没有不凝气体出现。



德弗拉尔报导了一个一根水——不锈钢热管成功地工作了3千小时而没有产生不凝气体的事例。他是把不锈钢管和丝网先放在丙酮中去油污，浸洗使其表面光洁，然后把它放到高真空炉中于600℃下脱气。这个事例说明：对于水——不锈钢这种具体情况，氢的形成主要地受材料处理工艺的影响，而材料本身影响较小。

热管在高温下工作时，碰到的相容性问题最为严重。洛斯·阿拉莫斯科学实验室花了很大气力研究这个问题。他们选择钽作为管壳和吸液芯材料，用银作工质制成了一根热管。这根热管在1900℃下工作了100小时后进行解剖检查，发现在冷凝段吸液芯几乎没有了，而蒸发段吸液芯为钽所阻塞。他们把这归因于吸液芯被工质所溶解。在冷凝段溶解在工质里的少量结构材料被输运到蒸发段，在那里工质蒸发而携带的结构材料就沉积下来。另外一根钨——钨热管在1900℃下工作75小时后，也发生了吸液芯材料溶解的问题。后来的试验证明银——钨热管在高温下工作有很大潜力。这个热管工作了1千多个小时性能没有显著恶化。

简单说来，对于低温热管，选择材料时要避免可能发生化学反应生成不凝气体的任何组合。同时，清洗工艺和材料处理工艺也在很大程度上决定了热管的相容性问题。对于高温热管，必须考虑是否会形成金属化合物，还要考虑一种金属在另一种金属中的溶解度。

下列两表是热管由于相容性问题而可能产生的问题及若干种材料间相容与不相容情况。

表一 由材料相容性引起的问题及其相应原因

| 问 题     | 原 因                                                                                                                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 等 温 恶 化 | <p>从管壁、吸液芯材料和工质中析出气体</p> <p>由于化学和电化学反应产生气体</p> <p>工质分解形成不凝气体</p>                                                   |
| 热传导率恶化  | <p>固体微粒堵塞吸液芯</p> <p>干道槽中出现气泡使液流中断</p> <p>由于化学反应产生气状或液状生成物沾污毛细结构，使其湿润性能恶化</p> <p>由于溶解反应生成物导致工质粘度增大，毛细结构溶解抑制液体传导</p> |
| 管 型 损 坏 | <p>管材的化学腐蚀（穿孔）</p> <p>管壁材质被工质溶解</p> <p>氧化腐蚀（在管壳内部）</p>                                                             |

表二

部分热管结构材料与工质相容与否情况

| 工 质<br>结 构 材 料 | 氮 | 甲烷 | 氨 | 甲醇     | 乙醇 | 丙酮     | 水                   | 导热※,<br>姆 A 水银 | 铯 | 钾 | 钠 | 铷 | 银 |
|----------------|---|----|---|--------|----|--------|---------------------|----------------|---|---|---|---|---|
| 铝 与 铝 合 金      | ○ | ○  | ○ | ※<br>× | ×  | ※<br>○ | ×                   |                |   |   |   |   |   |
| 黄 铜            |   |    |   | ○      | ○  | ○      | ○                   |                |   |   |   |   |   |
| 铜              |   |    |   | ○      | ○  | ○      | ○                   | ○              |   |   |   |   |   |
| 结 构 钢          |   |    | ○ | ○      | ○  |        |                     | ○              |   |   |   |   |   |
| 不 锈 钢          | ○ | ○  | ○ | ○      | ○  | ○      | ※ <sub>2</sub><br>× | ○              | ○ | ○ | ○ |   |   |
| 因 科 镍 合 金      |   |    |   |        |    |        | ○                   | ×              |   |   | ○ |   |   |
| 镍              |   |    | ○ | ○      | ○  |        |                     |                |   |   |   |   |   |
| 铁              |   |    | ○ | ○      | ○  |        |                     |                |   |   |   |   |   |
| 钛              |   |    |   |        |    |        | ○                   | ×              | ○ | ○ | × | × |   |
| 铌、锆 ( 铌 1 % )  |   |    |   |        |    |        |                     | ×              | ○ |   | ○ | ○ |   |
| 钼              |   |    |   |        |    |        |                     | ×              |   |   |   | ○ |   |
| 钽              |   |    |   |        |    |        |                     | ×              |   |   |   | ○ | ○ |
| 铪              |   |    |   |        |    |        |                     |                |   |   |   |   | × |
| 钨              |   |    |   |        |    |        |                     |                |   |   |   |   | ○ |
| 铯 ( 钨 26 % )   |   |    |   |        |    |        |                     |                |   |   |   |   | ○ |

注：○为相容 ×为不容 ※ 无水工质 ※<sub>2</sub>会生成氢气 ※<sub>3</sub>含0.02%镁、0.001%钛

## 2. 管 壳

对管壳的基本要求就是在整个工作压力范围内不泄漏并有足够的使用寿命。它可用普通的制造技术而制得。例如，用在棒上钻孔的办法制造圆筒形管壳，还可用铸造、薄件缝焊以及在心轴上进行化学蒸汽沉积然后再把芯棒溶掉等许多方法制造。制造方法由所选材料及热管形状决定。

选择管壳材料，必须考虑它与吸液芯材料、工质的化学相容性。

在管壳加工过程中必须注意诸如加工过程中使用的工夹具上可能有极少量金属残留在管壳里的问题，否则会造成金属互化物腐蚀而使热管寿命缩短。

### 3. 吸液芯

吸液芯在热管中起一个毛细泵的作用。冷凝液在它的毛细啣送力的作用下回流到蒸发段。这就要求工质与吸液芯之间产生的表面张力大到足以克服管内的全部粘滞压降和其它压降,维持流体循环,热管通常会在蒸发段高于冷凝段的重力场中工作,所以吸液芯应具备能使工质提升高度大于蒸发段和冷凝段两段之间高差的能力。这两个要求看来是矛盾的,因为为了使吸液芯内粘滞力最小希望扩大毛细孔尺寸,而另一方面为了提供足够的毛细啣送力和最大提升高度又需要缩小毛细孔尺寸。这样就必须使其达到最佳化。

吸液芯的种类很多,在此我们姑且把它分为丝网吸液芯和组合式吸液芯两种。

丝网吸液芯亦称均匀吸液芯是最原始的一种,它是由织物、玻璃纤维、多孔金属和金属丝网制成的。图 5 (a) 即是这样一种,吸液芯均匀地附在热管内壁上,保证芯与内壁接触良好。好的接触有助于工质与管壁间有足够高的传热率。(b) 是直接热在热管内壁上开许多与轴向平行的沟槽,它的优点是结构稳定,毛细孔尺寸容易控制。(c) 是在沟槽上再铺一层网,它的优点是能减少被蒸汽带走的在吸液芯中流动的液体。更重要的是,很小的网孔可获得很高的毛细啣送力,而同时又不显著地增加沟槽的流阻。实验证明 (b)、(c) 两种结构使热管的效能提高了三倍。(d) 是在 (a) 基础上再加一层丝网。(e) 是在 (d) 的两层网之间加一间隔物(可以是顺流方向放置的细丝)。(f) 则是采用折皱网,(g) 与 (c) 相类似,但它覆盖的不是丝网而是采用了多孔金属。(h) 是干道式吸液芯,它为液体向蒸发段回流提供了低流阻通道。

热管所用的工质,应具备以下性质:

(1) 表面张力高,湿润性能好,以提供足够的毛细啣送力。

(2) 粘度低。

(3) 蒸发潜热高以利于传热。

(4) 导热系数高以利于在工质、壁、吸液芯之间换热。

(5) 密度高以减少流动阻力。

(6) 化学稳定性好。

表 3 可帮助选择不同情况下适于使用的工质。

热管工作者对各种各样的流体,从超低温冷冻流体到高温液态金属进行了广泛的使用研究。在绝大多数热管实验中,要么是在高温研究中使用液态金属,要么是在低温和中温实验

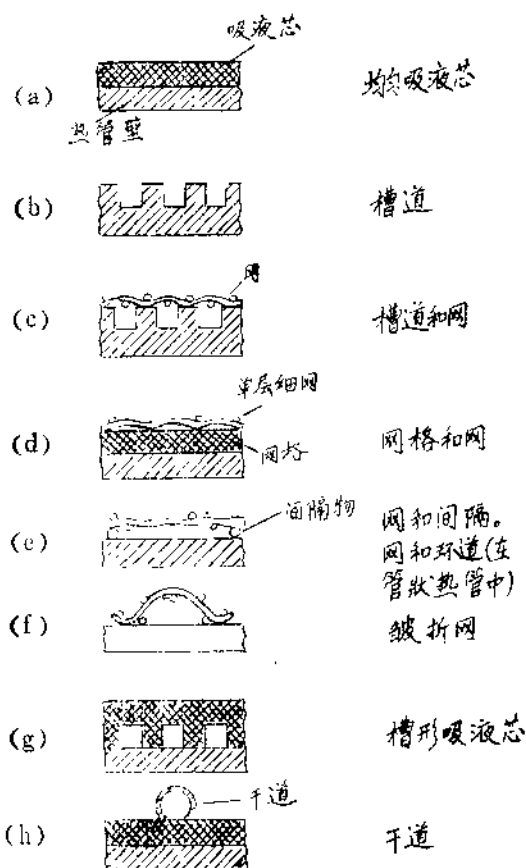


图 5

中使用相当普通的流体，如水和酒精。在200—350℃这个中温范围内，有人建议用水银较为适合，并在水银中加进少量钛和锰以改善其湿润特性。热管究竟选择何种流体应视其具体的应用场合而定。这个问题的一般性结论是：对于高温高热流量热管来说，液态金属由于它们的蒸气压特性、高的表面张力以及高的潜热肯定要比非金属液体好。低温工作的杰出流体似乎是水，主要因为它有较高的表面张力和潜热。

表三 一些工质的物理性质（一个大气压）

| 工 质 | 融 点<br>℃ | 沸 点<br>℃ | 密 度<br>公斤/米 <sup>3</sup> | 潜 热<br>千焦耳/公斤 |
|-----|----------|----------|--------------------------|---------------|
| 氨   | -77      | -33      | 682                      | 1370          |
| 水   | 0        | 100      | 1000                     | 2256          |
| 铯   | 29       | 705      | 1794                     | 612           |
| 钾   | 64       | 760      | 819                      | 2077          |
| 钠   | 98       | 883      | 929                      | 4210          |
| 锂   | 179      | 1317     | 509                      | 19631         |
| 铅   | 327      | 1737     | 10492                    | 858           |
| 铟   | 156      | 2087     | 6984                     | 1963          |
| 银   | 960      | 2212     | 9291                     | 2326          |

为了避免腐蚀和产生不凝气体，选择工质要注意它与结构材料的相容性问题，这在前面已经讲述了。还应注意的一个问题是，对于适用的工质应注意纯净化，如水应蒸馏多次。如果质地不纯，则在使用中比工质更易挥发的杂质就会跑到凝结段而覆盖住传热面积，从而影响传热。还有些挥发性杂质会集中在蒸发段吸液芯中影响液体循环和传热。在制造过程中，常常用直接真空蒸馏的方法充填工质，以减少工质中杂质的含量。

## 5. 制造工序

清洗：为了保证热管的正常运行，应对结构材料进行严格的清洗，然后在无尘、无油环境中干燥。

组装：把干燥的吸液芯装入管壳使之贴近内壁面，然后加上封头进行焊接。焊接应采用氩弧焊，焊缝内外两侧均需用氩气保护以免氧化。对焊缝应进行真空检漏，漏气率应低于 $10^{-8}$ 毛—升/秒。

除气：组装后整个部件在高温下进行真空除气，以排除金属中含有的气体，如氢氧等。除气应在除气真空炉中进行。在整个除气过程中真空度不应低于 $5 \times 10^{-6}$ 毫米汞柱。为此必须控制升温速度，并应在部件冷却之前不应停止抽真空以免部件氧化。

工质充填：工质充填均应在真空条件下，充液方式可采用直接蒸馏法。充液量多少是热管能否正常运行的一个重要条件。工质过量会使热管参数变坏，因为显然普通液体工质导热率低于结构金属。工质量如果不足会造成蒸发段某一部分干涸。

### 三、热管的应用

热管技术十几年的开发历史证明，热管之所以能在短时间内迅速地在从空间到地面这样广泛的范围内得到应用，主要是它具备以下几个独特的特点：（1）极高的传热率，（2）温度展平，（3）源汇分隔，（4）热通量变换，（5）产生恒定热通量。对热管的利用，从理论上说来就是对热管的这五个特性的利用。本文为了使读者掌握并运用这些特性，分别进行讨论并举例说明：

1. 极高的传热率。如一根直径25毫米长700毫米的热管可以传输11千瓦的热量。如用铜棒传输同样的热量，则直径将达2.7米，重量将达40吨。能大量传热的能力使热管获得了许多用途。如各种场合的冷却，效率高速度快是任何其它传热装置所不能比拟的。

2. 温度展平。热管能使温度变均匀，用它来保持所要求的恒温环境是非常合适的。这一点可用在宇宙飞船的热控制上。由于飞船的非均匀加热，宇宙飞船表面上可能发生很大的温度变化，这些温度变化可能给飞船造成很多问题，包括不希望有的热应力。采用一些环形热管绕在飞船周围，使温度分布达到必要的均衡。环形热管的蒸发段面向太阳，冷凝段背向太阳。结果，飞船的温度变化从275°K减少到44°K。

3. 源汇分隔。热管的另一种用途是可以把热源和热汇隔开。飞船中的热源，例如电子元件，位于飞船里面，这样热源的废热必须经过一段相当的距离才能排出飞船到太空中。然而要在较低温度下散掉同样的热量需要的辐射器面积大，所以在源与辐射器之间任何温降都可能导致很大的重量增加。热管重量轻、接近等温，适于解决这个问题。美国无线电公司研制了一个空间辐射器，由100根热管组成，总重不足12磅，能在771℃时排出5万瓦热能。

4. 热通量变换。从一根热管加进和输出的热量可在不同的热流面积内实现。这个热通量变换能力促使热离子专家们作出这样的设计：把放射性同位素的低热通量转化为热离子换能器工作所必需的足够高的热通量。利弗制成了一个热通量浓集比为10:1的热管热通量变换器。在放射性同位素发出的热通量密度为25瓦/厘米<sup>2</sup>时，其输出热通量密度达到了250瓦/厘米<sup>2</sup>，完全满足了热离子换能器的要求。

5. 产生恒定热通量。热管还可以“展平”不稳定热源供给的热通量变化。美国无线电公司研制了一种热管，它可在热输入量变化8倍甚至更高的情况下保持同一热输出量。这个热管的冷凝段与一个不凝气体罐相连，当热输入量发生变化时，导致热管工作压力变化，冷凝段中被不凝气体占据的长度也随之变化，从而在某个冷凝段长度上保持一个恒定的热输出量。

西德的Brast曾列表介绍以上各点特性不同温度范围的部分应用实例：

| 温度范围 | 极高的传热性         | 温度均匀<br>(等温室)       | 热通量变换器                  | 产生恒定热通量                |
|------|----------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| 超低温  | ▲ 用于液态氢        |                     |                         |                        |
|      | ▲ 干道热管的研制      | ▲ 热传导性和热流通量的测量      | ▲ 热交换器<br>▲ 电子组件的冷却     | ▲ 可变热传导热管              |
| 低温   |                |                     | ▲ 太阳能加热装置: 海水淡化<br>房屋采暖 | 主动式<br>被动式             |
|      |                |                     | ▲ 旋转装置: 异步电机<br>蒸气涡轮    | ▲ 燃料蒸发器<br>▲ 恒温器       |
|      |                |                     | ▲ 冷却电流断路器               |                        |
| 中温   | 吸液芯结构的研制       |                     | ▲ 用旋转热管拉伸塑料丝            |                        |
|      | ▲ 用热管加热的虹吸管    | ▲ 等温插件同心热管<br>高压热管  | ▲ 用热管传热的斯特灵发动机          | ▲ 补偿装置<br>等温炉          |
| 高温   | ▲ 用于高性能热管的毛细结构 | ▲ 等温炉<br>烘箱<br>共轴热管 |                         | ▲ 热传导性的测量<br>▲ 吸液芯煮沸装置 |

对于热管在工业实际当中的应用,分以下十点进行介绍:

### 1. 回收热量

热管可以通过有效地回收热量来帮助人们节省燃料,克服能源不足的困难。许多固体燃料或液体燃料的炉子,其燃料发热值不能得到充分的利用,有25—30%的热量都从烟囱中白白跑掉了。Isothermics公司利用热管制成了一种热回收装置(如图6),它可以从烟道气中每小时回收7000—1000英热单位的热量,提高加热效率10%。在工业上,格罗弗也发明了用于工业炉的热回收装置,可使60—80%废热直接返回炉中。通过回收废热可以在不增加燃料消耗的情况下扩大生产。进一步说,第一年从废热回收节省下来的费用可足以偿付安装热管热回收系统的费用。目前,这种热回收系统已在铸造(见图7)、橡胶硫化、油漆干燥炉、食品烘干、洗衣粉喷雾干燥等工业部门得到了广泛利用。

热管热回收装置在空调、采暖和通风系统中的应用已经为一些工业和民用建筑设施,节省了大量费用。热管热交换器无论冬夏都可使用。冬天,把热量从烟道气中传给新鲜冷空气

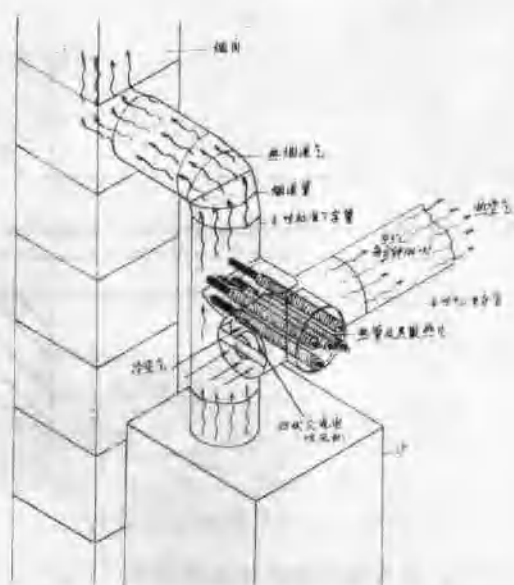


图 6 热管热回收装置图

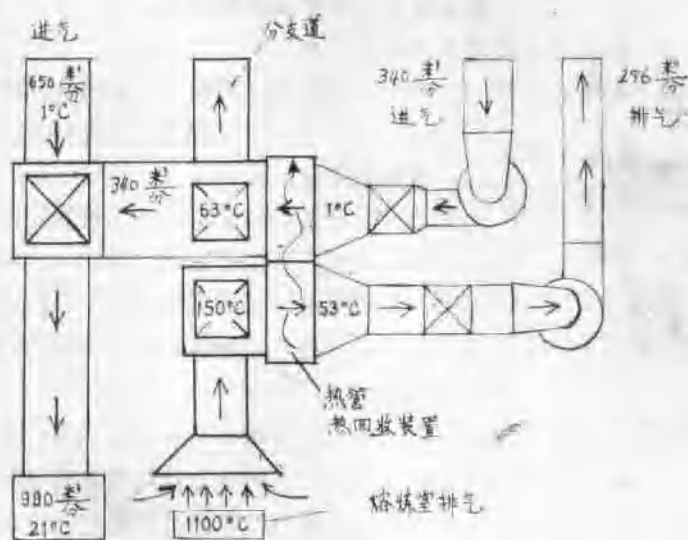


图 7 铸造业中采用热管热回收装置

气。夏天，使热空气进入主调机之前得到预冷处理。如加上密封隔板来分离气流则可保证新鲜空气不受污染，这对于学校、医院这样的部门说来是很有必要的。采用热管热回收装置可导致允许采用功率比原来低20—30%的空调系统。

## 2. 热管用于机械工业

图 8 为吸液芯热管冷却刀具。刀刃发热为热管蒸气带走。整个刀体温度升高 向 环境扩

散。

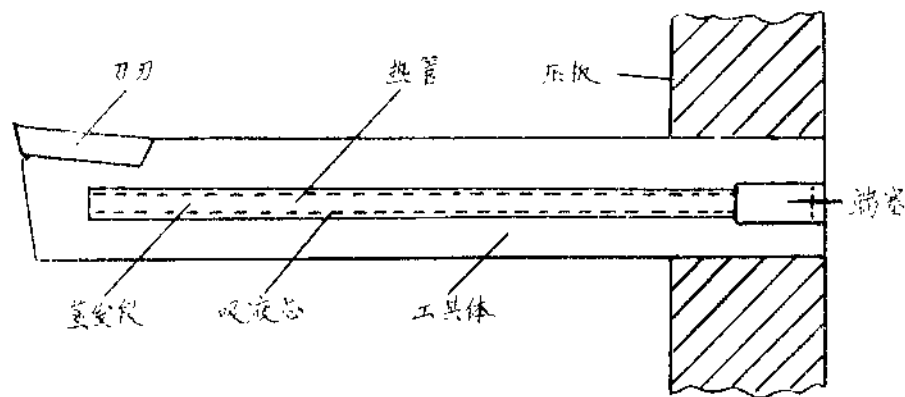


图 8 用热管冷却刀具

图 9 为旋转热管冷却钻头，钻头发热使热管液膜沸腾汽化，蒸汽使整个钻杆温度升高向外界散热。这样刀头和钻头散热迅速，切削速度快，工件表面质量好，刀头和钻头寿命长。

美国一项专利将热管用于冷却刹车和离合器，热量自摩擦面通过热管传到外界散失，这种刹车体积小，重量轻，容量大。

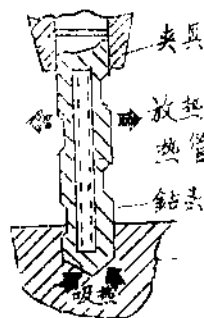


图 9 用旋转热管冷却钻头

以里尔姆霍兹共振器为基础的脉动燃烧加热器，结构紧凑，加热功率大，但在燃烧液体燃料时，燃料——空气混合时出现燃料小滴、室壁结焦，使废气中一氧化碳增加，这时每50小时就要清洗燃烧室。采用钾热管混合室，将燃烧室热量传到混合室，使混合室温度增到  $450^{\circ}\text{C}$ ，燃料与空气混合良好，燃烧完全。实验工作 500 小时后，脉动燃烧加热器仍正常运行，提高工效10倍以上。类似的汽油发动机也可用热管来改善混合气体形成。

热管还可为新型的没有污染的斯特灵发动机汽车提供有效的传热系统。斯特灵发动机汽车将是一种象电气汽车那样既没有污染也没有噪音的汽车。但这种汽车比电气汽车的行程更远，性能更好。斯特灵发动机可以不烧燃料而利用贮存的热能。贮存的热量通过热管有效地传给斯特灵发动机。这种发动机目前仍处于实验阶段。

### 3. 热管用于冷却电机、电器和电子装置

电机转子与定子绕组的发热是限制电机输出功率的决定性因素，转子和定子不得超过某一允许温度值，否则会出现过热烧毁的严重后果。采用热管冷却，可以使定子、转子发热区到冷源（环境）的导热热阻大大减小。下面介绍一个实例。图10所示为一采用于旋转热管冷却的三相异步电机，其额定功率为17瓩。这台电机机轴直径为普通系列电机的1.5倍，转子



上无轴向槽，机轴（即为热管管壳）内孔直径为61毫米，伸到机壳外的冷凝段为60毫米，轴端延长了130毫米。采用蒸馏水作工质。风机使冷却空气以15—20米/秒速度流过冷凝段表面。试验结果表明，采用旋转热管可以使定子绕组的平均温升降低20—25℃（相对值为18—22%），转子降低72—83℃（43—49%）。如把热管内充水量从60厘米<sup>3</sup>减少到30厘米<sup>3</sup>，定子绕组温度还可进一步下降5℃，转子槽部下降11℃。计算可证明，转子发热的70%（400—500瓦）是经过轴端冷凝段散走的。此外，热管还使电机有效工作部分温度分布均匀。采用旋转热管冷却电机，可使电机在保持绕组绝缘耐热性能条件下提高功率20—25%。

图10 旋转热管冷却异步电机

电器开关用热管作为传热元件也可取得良好效果。把热管置于电流断路器内，将热从接触区的断路器端部接线板外传出。每根热管在两端温差 $20^{\circ}\text{C}$ 时能传输100瓦的热量。未装热管时，触头通过9.2千安的情况下(电压为23千伏)，接触处热点温度为 $61^{\circ}\text{C}$ ，接线板温度升高 $20^{\circ}\text{C}$ 。断路器装上4根热管后，在12千安下，接触处热点温度为 $59^{\circ}\text{C}$ ，接线板温度升高 $30^{\circ}\text{C}$ 。由此可见，在这种成本很高的设备内，采用几根热管就导致连续电流容量增加约30%。热管由于冷却电力电容器，可以大大改善能量储存，缩减电容器体积与重量，提高工作可靠性。

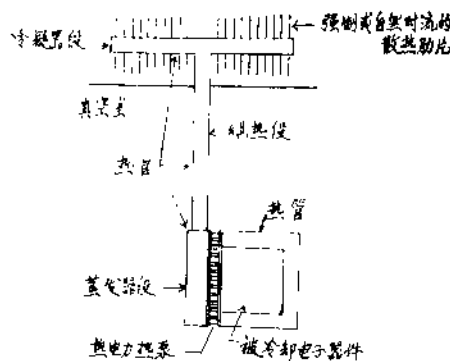


图11 采用热管冷却电子装置