

热管技术与应用

RE
GUAN
JI
SHU
YU
YING
YONG

郎 遼
乔中复 编 著
尚国森



辽宁科学技术出版社

热管技术与应用

Reguan Jishu Yu Yingyong

郎 遼

乔中复 编著

尚国森

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行 朝阳六六七厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: $11 \frac{3}{8}$ 字数: 252,000

1984年9月第1版 1984年9月第1次印刷

责任编辑: 王静一 责任校对: 李秀芝

封面设计: 曹太文

印数: 1—4,600

统一书号: 15288·99 定价: 1.55元

前 言

利用密闭容器内发生的物理相变或化学反应以增强传热效果的想法,早在四十年代就提出来了,而第一个应用于实际的高效传热元件,即热管是1964年才制造出来。由于热管有优越的传热性能和良好的适应性能,所以问世不久便在电子、宇航等领域内得到应用。到七十年代,热管及其应用技术已遍及许多领域,由于它在回收余热、预热空气和给水等节能领域中得到了广泛应用,因而对人们有着极大的吸引力和广阔的发展前途,先后于1973、1976和1978年在西德、意大利和美国召开了三次国际性热管专业会议,它已初步形成为一门新的技术学科。

在我国七十年代初,重庆大学和中国科学院力学研究所制造出热管,1976年沈阳市做成了热管元件,并把它应用于油冷却器上。1980年丹东市利用简便的方法生产出碳钢·水热管换热器,并在十几个工厂里使用,收到了较好的节能效果、对推动热管换热器在节能中的应用起了重要作用,得到了国内各地的关注,迫切要求普及热管的基本知识,以便使热管及其技术得到进一步的应用与发展。

本书是作者从事热管研制和应用工作的经验总结,是在热管技术培训班的讲稿基础上编写成的,着重介绍了重力式

热管和热管换热器。书中对热管的基本理论、性能、制造和应用，以及对热管换热器的设计和计算都作了较为系统的叙述。另外，附录中列有设计、制造和运行所必须的数据、资料和公式等。

由于热管是一门新的技术，我们的水平有限，书中难免会有缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

作 者

一九八三年十一月

目 录

前言

第一章 概论	1
§ 1—1 热管的工作原理	1
§ 1—2 热管的特点	7
§ 1—3 热管技术的发展趋势	19
第二章 热管元件的工作特性	27
§ 2—1 热流极限	27
§ 2—2 流动阻力	36
§ 2—3 热阻	40
§ 2—4 相容性	49
§ 2—5 重力式热管	67
第三章 热管元件的类型和计算	73
§ 3—1 热管元件的类型	73
§ 3—2 热管元件的计算	97
第四章 热管元件的制造	110
§ 4—1 制造热管元件的设备、仪器和工具	110
§ 4—2 热管材料和工作液的选择	112
§ 4—3 热管的制造工艺	133
§ 4—4 热管寿命试验	147

§ 4—5 热管的安全问题	148
第五章 热管换热器	152
§ 5—1 热管换热器性能	152
§ 5—2 热管换热器的设计	161
§ 5—3 气-气式热管换热器的设计 ..	197
§ 5—4 气-液式热管换热器的设计	216
第六章 热管技术的应用	226
§ 6—1 热管换热器的应用	226
§ 6—2 热管技术的应用	243
附录 I 单位换算	267
附表 1 压力	267
附表 2 功、热量和能量	268
附表 3 功率	269
附表 4 动力粘性系数	270
附表 5 运动粘性系数	270
附录 II 工作液物性值	270
附录 III 物质的传热学物性值	280
附表 6 外壳材料的黑度	280
附表 7 气态物质的传热学物性	286
附表 8 液态物质的传热学物性	293
附表 9 液态金属的传热学物性	298
附表 10 金属的传热学物性	299
附表 11 非金属物质的传热学物性	300
附录 IV 气体的热力学物性	302
附表 12 气体的热力性质	302

附表13	气体的平均定压比热容	304
附表14	气体的平均定容比热容	306
附表15	水和过热水蒸汽的定压比热容	308
附表16	水和水蒸汽在饱和界限上的定压比热容	313
附录 V	热管换热器常用公式	314
附录 VI	对流换热系数计算公式	324
附录 VII	换热表面的污垢系数	334
附录 VIII	管群和换热器的流动阻力	336
附录 IX	日本商品热管换热器举例	340
参考文献		352

第一章 概 论

§ 1—1 热管的工作原理

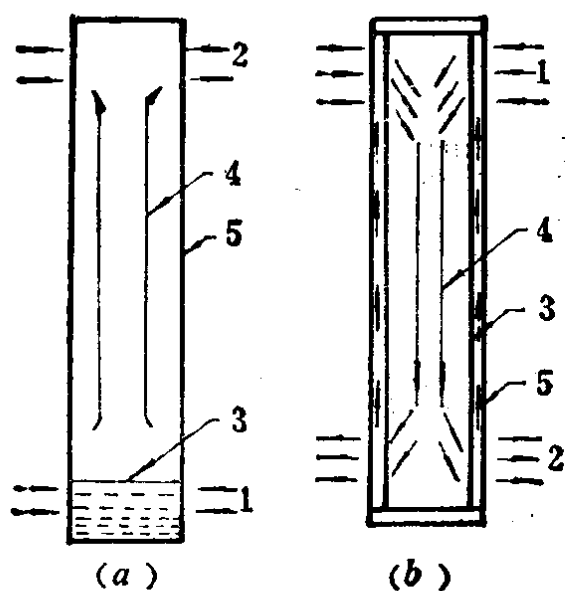
热管是一种利用封闭在管内的工作物质反复进行物理相变或化学反应来传送热量的一种换热装置。单个热管，称为热管元件或简称为热管；将由许多热管元件组成的换热器，称为热管换热器；而将热管元件和热管换热器的应用技术，称为热管技术。

尽管热管的种类很多，但根据热管的工作原理，按工作液的变化，可分为两大类，物理热管和化学热管。

一、物理热管

物理热管是利用工作液的物理相变（沸腾、凝结）传送热量。图 1—1 是两种简单的物理热管的工作原理，图中的 (a) 称为重力式热管或热虹吸管。通常将热管内装入的液体称为工作液（或称工质）。在管下部的工作液受外部热流体的加热后吸收热量沸腾变为汽相，由于汽相的比重轻便上升，遇到较冷的管壁便凝结为液体，凝结的液体沿管内壁又流回下部，然后再沸腾变为汽相反复地进行上述的各过程，不断地将底部热量传送到上部。

工作液在热管内从液体变为蒸汽的区域，称为沸腾段（或称为蒸发段），热流体在外部加热的区域，称为加热段，



1—热流体；2—冷流体；3—工作液；
4—蒸汽；5—外壳

图 1—1

沸腾段虽应与加热段相对应，但也可有不同长度。工作液在热管内从蒸汽变为液体的区域，称为凝结段，冷流体在外面冷却的区域，称为冷却段。凝结段和冷却段的关系也如沸腾段与加热段的关系一样。

图 1—1 中的 (b) 与 (a) 的不同点是，在热管内壁的四

周或管中心处设置有输液芯（又有称为管芯或吸液芯）。输液芯的作用是，利用它与工作液的表面张力所产生的毛吸力将工作液从凝结段输送到沸腾段，因而设有输液芯的热管不一定都象图 1—1 那样的垂直布置，即加热段或沸腾段不一定要低于冷却段或凝结段。输液芯的形式有，单层或双层丝网、多孔物质、细管线等。输液芯的作用除将工作液输送到沸腾段外，还起到将工作液均匀地分布在沸腾段各处的作用。

热管除必须有加热段与冷却段外，还一定要有一个介于加热段与冷却段中间的绝热段。绝热段是既不受外界加热也不受外界冷却的区域，或者说既不发生沸腾也不发生凝结的区域。但它可长可短，这也是热管的一个特点。

为了使热管工作得可靠和具有优越的换热性能，热管还要满足与达到下列要求：

1. 热管的外壳、输液芯要经过清洗与除气，工作液应

是纯度高的液体或液体的混合物。

2. 外壳、输液芯和工作液要经过选择，使工作液与外壳、输液芯具有相容性（详见第二章）或者有弥补不相容性的某些措施。

相容性是指工作液与外壳、输液芯之间不发生腐蚀等化学作用，尤其不产生不凝结气体。这里所说的不凝结气体，是指在热管工作温度范围内，不能凝结为液体的气体，如钢水热管中产生的氢气。

3. 热管制成后，内部的压力应处在负压或真空状态（对沸点高于常温的工作液，如水），真空压力与常温（室温）下工作液的饱和压力有关，例如，纯水在 10°C *条件下，其真空压力为 0.0125 公斤/厘米²。

4. 热管内、外表面，应设有强化传热与改善流动的措施（如沟、槽、肋片等），在考虑措施时应结合应用的具体条件一起考虑。

5. 热管必须密闭并有承受一定压力的强度。

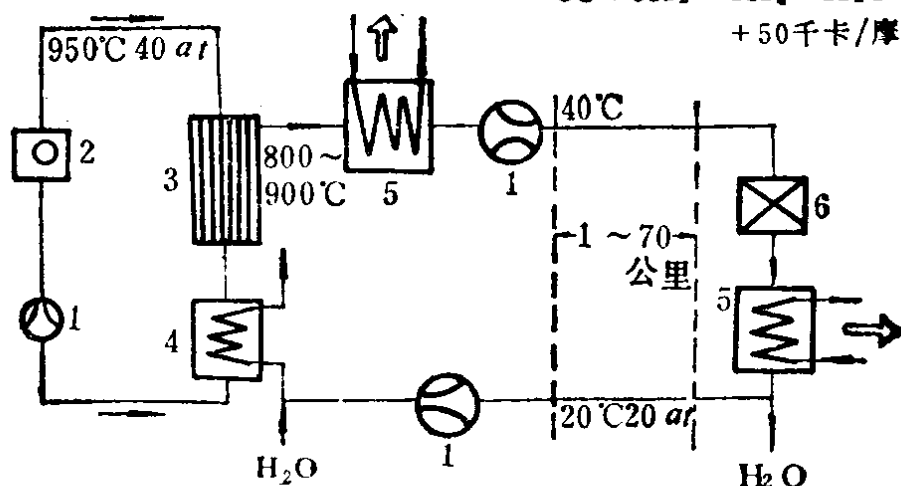
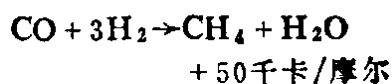
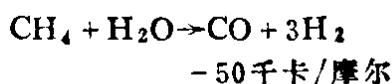
上面的要求是针对物理热管而言，由于物理热管占应用热管中的绝大部分，下面所叙述的大多是指物理热管而言。

二、化学热管

化学热管是利用工作物质化合与分解反应传送热量，它是一个比较复杂的系统，图 1—2 是利用化学热管进行传送热量的系统。此系统的工作物质是 CH_4 和 H_2O ，其工作原理为：

* 本书用 $^{\circ}\text{C}$ 表示摄氏温度，用 K 表示绝对温度，其他单位均用中文表示。各单位的符号和换算关系列于附录 I。

1. 在吸热端热管吸收40气压 (at) 950℃ 外部高温热源的热量，发生吸热分解反应为



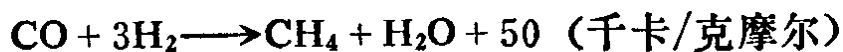
1—风机；2—高温炉；3—CO 发生炉；4—预热器；
5—换热器；6—反应器

图 1—2

由于热管内工作液 (CH_4 和 H_2O) 分解为 CO 和 H_2 ，在分解时将热量吸入到分解物中，因此，热管内部的温度并不增高。

2. 因热管内的工作液为高纯度物质，故分解物 CO 和 H_2 的成分稳定，并且在常温下输送到放热端（用户）。

3. 在放热端， CO 和 H_2 在催化条件下，进行放热反应。



由于化合后放热，使放热端处温度增高到800~1000℃，因此用户可利用放热端的高温热生产出500~600℃的水蒸汽。

4. 热管放热端的热量被用户利用后，CH₄与H₂O变为中压低温状态送回吸热端，从而完成了传送热量的一次循环。化学热管可连续地完成上述的传送热量的循环。

图1—2所示的化学热管系统，是将原子能电厂的余热送到远离70公里以外的城市用户的系统图。由于传送过程中温度只有40℃左右，故省去了热绝缘设备，并减少了大量的热损失和防热膨胀装置，与其他传送热量方式相比可节省大量的投资。

表1—1列出了一些能够在化学热管中做工作物质的名称及其主要参数。

表1—1 在化学热管中利用的化学反应

反 应 式		反应温度	298度(K)下的焓差(ΔH°)		
分解物	化合物	(K)	工作液的 ΔH° (千卡/克摩尔)	反应物的 ΔH° (千卡/克摩尔)	反应物的 ΔH° (千卡/米 ³)
CO + 3H ₂	CH ₄ + H ₂ O	700~1200	59.8	1760	662
2CO + 2H ₂	CH ₄ + CO ₂	700~1200	59.1	1340	660
C ₈ H ₂ + 5H ₂	C ₈ H ₁₂	500~750	49.5	590	552
C ₇ H ₈ + 3H ₂	C ₇ H ₁₄	450~700	51.0	520	759
C ₁₀ H ₈ + 5H ₂	C ₁₀ H ₁₈	450~700	75.0	540	970
C ₂ H ₄ + HCl	C ₂ H ₅ Cl	420~700	13.4	210	300
CO + Cl ₂	COCl ₂	580~1000	26.9	270	600

三、热管的分类

由于热管的用途、种类和型式较多，再加上热管在结构上、材质上和工作液等方面各有独特之处，故对热管的分类

也很多，比较符合科学与实用的分类方法有以下几种。

1. 按工作温度范围划分

热管的工作温度，指热管内部的蒸汽温度，此温度既与工作液种类有关又与外界条件有关。因此，按工作温度划分是符合科学的划分方法。热管工作温度在 $-270\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的称为低温热管，工作温度在 $0\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的称为常温热管，工作温度在 $200\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的称为中温热管，超过 600°C 的称为高温热管。必须注意，热管的划分方法与现用换热器的温度划分方法有很大的不同。

2. 按凝结液回流方式划分

凝结液回流是热管工作的重要环节，回流不仅与热管性能有关，而且还与热管的布置和结构有关。因此，按凝结液回流及回流所需动力来划分热管，才能反映出热管的特性，也是符合科学的划分方法。

3. 按工作物质的变化方式划分

按工作物质的变化，将热管分为物理和化学两大类，从大的方面区分工作原理很有用途，使人们从名称上即可了解工作原理。

4. 按工作液与外壳的组合方式划分

按工作液与外壳的组合方式来划分热管，是一种习惯的划分方法。例如铜·水、钢·氨等热管。这种划分方法便于制造厂与用户使用。

5. 按功用划分

按功用划分也是一种习惯的划分法，如制冷、控制、传递热量等。

表1—2列出上述五种划分法的概况，由于热管尚处在发展中，故划分法也在不断地改进。

表 1—2

热管划分法

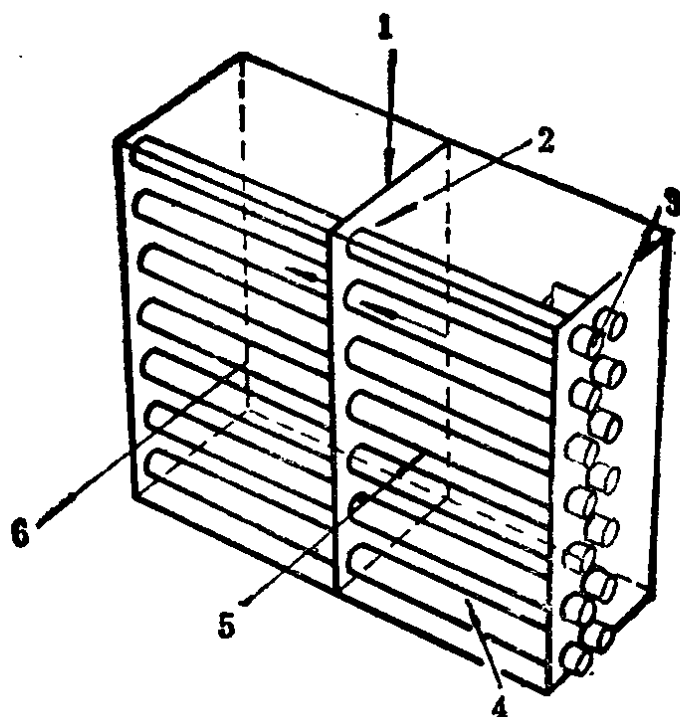
划分方法	具 体 的 分 类						
按工作温度	低温热管 (-270~0℃)	常温热管 (0~200℃)	中温热管 (200~600℃)	高温热管 (600℃以上)			
按凝结液回流	输液芯热管 (毛吸力)	重力式热管 (地心引力)	旋转式热管 (离心力)	电场式热管 (电场力)	渗透式热管 (渗透力)		
按学科原理	物 理 热 管 (物理上的相变)			化 学 热 管 (化学上的反应)			
按工作液与外壳的组合	铜·水热管	铜·氨热管	不锈钢·钠热管	钢铜复合·水热管	铝·丙酮热管	钢镀铜·水热管	
按功用	传送热量的热管	热二极管	热开关	热控制用热管	仿真热管	量器热管	制冷热管

§ 1—2 热管的特点

热管和由热管组成的热管换热器与其他类型的换热器相比都有哪些特点，这是分析和使用热管时必须涉及的问题，也是必须弄清的问题，尤其对新型式的换热设备更应如此。热管和热管换热器具有以下的特点。

一、可提高传热系数

在工业用换热器中，传热系数 K (千卡/米²时度)是个重要的经济技术指标。增高传热系数值意味着减小换热器体积和减少消耗的材料与动力。为便于比较，选用图 1—3 的热管换热器和图 1—4 的壳管式换热器进行对比。壳管式换热器是



1—隔板；2—密封；3—管头；4—热管元件；
5—热流体；6—冷流体

图 1—3

目前用得较多的一种换热器。

热管换热器可提高传热系数的原因：

1. 热管换热器的加热段与冷却段的外表面均能设置肋片等强化传热的装置，但壳管式换热器有一侧为管内表面，很难设置肋片。若用 K_{Tr} 表示壳管式换热器的传热系数， K_{HP} 表示热管的传热系数，则在其他条件（换热系数 α_1 与 α_2 、壁厚 δ 、壁的导热系数 λ 、圆管内外表面积 A_1 与 A_2 ）相同时，由于加肋片后热管换热表面积变为 A_f ，所以 K_{HP} 和 K_{Tr} 分别变为：

$$K_{HP} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{A_1}{A_f} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{A_2}{A_f}}$$

$$K_{Tr} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{A_1}{A_f} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2} A_2}$$

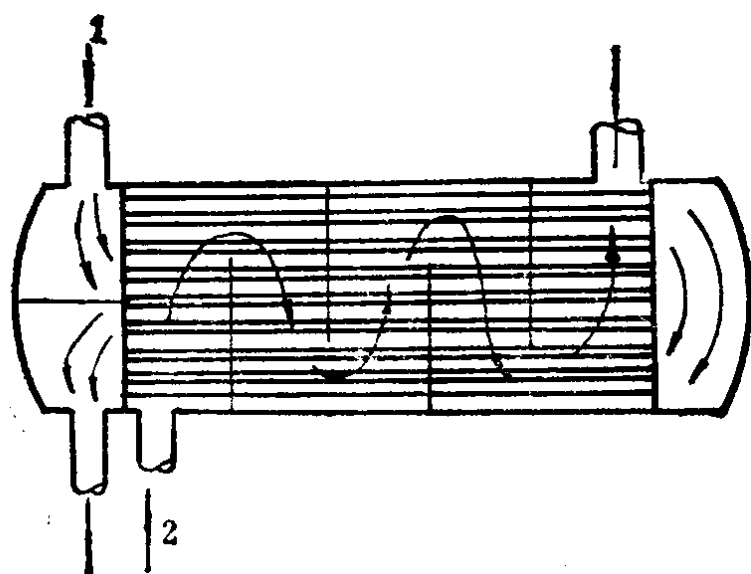
因为 $A_f > A_2$ 和 $\frac{1}{\alpha_2} \frac{A_2}{A_f} < \frac{1}{\alpha_2} A_2$

故 $K_{HP} > K_{Tr}$ 。

2. 热管换热器的冷流体和热流体都是横向流过管束，而壳管式换热器只能有一种流体横向流过管束。由于横向流过管束的换热系数(α)，较纵向流过管束为高，故：

$$K_{HP} > K_{Tr}$$

3. 壳管式换热器的管内流动要有几个管并联流道如图1—4。而管外流动又有多次转向，前者必有流量分布不均，后者必有流路分布不均。热管换热器不能说完全消除了这种不均匀性，但至少减轻了这种不均匀性，从而使 K_{HP} 更大于 K_{Tr} 。



1—热流体； 2—冷流体

图 1—4

4. 壳管式换热器的管内流动的边界层较厚，热阻较大。热管换热器因无管内流动，故边界层较薄，热阻小，这

也使 K_{HP} 大于 K_{Tr} 。

上述四个主要原因，都使 K_{HP} 大于 K_{Tr} ，至于大多少则与条件有关。

二、适用于各种温度范围

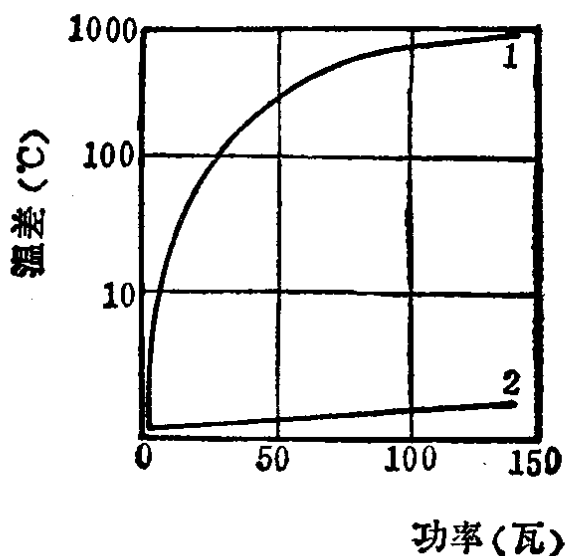
热管的工作温度是由工作液和内外换热条件决定，而工作液又可选择不同种类的液体，因此在 $-270\sim 2300^{\circ}\text{C}$ 之间都可使用热管换热器。这虽然不是指一种工作液和外壳的组合而言，但应用的工作范围已较其他种换热器广泛得多。

三、传送热量的能力大

传送热量，是指从沸腾段到凝结段所传送的热量值。这种传送在物理热管中是靠传送潜热的方式进行的。因此远远地大于靠(导热、流体流动等)其他方式所能传送的能力。例如，外径相同的热管与铜棒，尽管铜的导热系数仅次于银，但热管的传送热量约为铜棒的几百倍。图1—5是尺寸相同($\phi 12.7 \times 300$ 毫米)

的热管和铜棒的传送热量的对比，由图可以看出：热管较铜棒的传送热量高得多。

热管因传送热量能力大，所以适用于电子、电器和刀具等发热设备的冷却。因为这类设备需要在较短时间内将热量传



1—铜棒；2—热管

图1—5