

前

言

当前能源紧张已引起了世界范围内的重视，节约能源已是当务之急。赵紫阳总理在政府工作报告中指出：能源和交通是我国发展国民经济的薄弱环节。为此，近几年来在各个领域中已经加强了对能源工作的领导和研究。

铁道蒸汽机车仍承担着国民经济运输任务的60%，其热效率只不过8.5%，而其排出的废汽热损失要占40%，排出烟气热损失约占10~20%，因此，研究回收利用这大量的余热，对节约能源、提高机车热效率，都有重要的意义。面临这一现实，我们从一九八一年五月份，开始了蒸汽机车应用热管的研究工作，并结合冶金企业内部机车上进行研究实践，前后经历四年时间，三个方案的实施改进。一九八五年五月，我们聘请铁道科学院对改造后的上游型910号机车，进行了热工对比测试，一九八五年十二月十日由冶金部、铁道部、铁道科学院、机车制造厂、大型钢铁公司、沈阳热管研究所等二十多个单位的专家科技人员组织的鉴定会上，对济南钢铁厂研制的“上游型机车应用热管换热器回收烟气余热予热给水装置”进行审查并通过了技术鉴定，宣告这一研究首次在国内获得成功。

为了总结和推广这一研究成果，并供对热管应用于蒸汽机车研究的同志参考，我们粗浅的将热管理论及几年来我们实践的总结，编写了这份材料，由于水平所限，衷心希望同行们指教批评。

编者 张昭丰

1986年8月于济南

热管及其在蒸汽机车上应用的 研 究 与 实 践

第一章	热管发展简史	1
第二章	热管的工作原理及特点	2
1.	什么是热管	2
2.	热管的工作原理	2
3.	热管的特点	3
第三章	热管的分类及应用	5
1.	热管的分类	5
2.	热管的应用	7
3.	热管换热器的优缺点	10
4.	热管技术的发展趋势	13
第四章	重力式热管	15
1.	重力式热管的工作原理及轴向传热率	15
2.	重力式热管的设计制造	16
3.	重力式热管在余热回收中的应用	17
4.	结 论	18
第五章	热管技术应用于蒸汽机车回收余热的研究	19
一	概况	19
二	蒸汽机车应用热管回收余热的主要型式	20
三	结论	21
第六章	热管应用于上游蒸汽机车回收烟气余热予热给水的研究与实践	22
一	研制报告	22
二	试验报告	31
三	使用报告	69
四	上游型机车热管予热给水装置的使用保养、故障处理及检修方面的参考资料	70
五	展望	77

第一章 热管发展简史

热管的构思是在1942年提出来的。第一根热管是于1961年制造出来的, 60年代的热管主要用于电子和宇航等的冷却, 到70年代初期热管已在很多部门得到应用, 随着70年代初科学技术的迅猛发展, 产品质量的提高和工艺过程的改进, 为热管的应用提供了广泛的途径。1973年以后资本主义世界连续出现石油危机以后, 热管做为换热器应用又有了迅速发展, 尤其在回收低温余热方面更显示出它的优越性, 近几年在医学、农业等方面也初步得到应用。1973、1976、1978及1981年召开了四届国际热管会议, 促使热管这项传热技术领域内的新技术得到迅速发展, 目前热管及其技术的应用几乎已普及到各个领域, 热管理论的发展日臻完善, 热管的制造工艺日趋成熟, 各种商品热管的生产日益增多, 是正处在发展势头上的应用技术。

热管技术在几年中也受到我国一些科研和生产技术部门的重视; 开展了初步研究, 其中突出的在固定锅炉上回收余热方面取得了较好的成绩, 在炼铁高炉使用的热风炉及工业窑炉等方面, 也开始有所应用。1981年以后我国已开始探讨研究将热管技术应用到铁道蒸汽机车上回收烟气余热, 进行空气予热和给水予热, 取得了一定的进展; 但是还应看到: 截止目前热管技术在我国的发展应用还是非常落后的, 还没有被重视研究, 就回收余热这一范畴来说, 还有很多空白, 大量的废汽、烟气中的余热被可惜的排掉了, 这与当前能源紧限的局面是极不相称的, 我们必须加强这一技术领域的研究, 让热管技术为节约能源, 为四化做出更大的贡献。

第二章 热管的工作原理及特性

1. 什么是热管

“热管”是高效传递热量的元件，或者说是一个密闭的经过气液相变化和循环流动而传递热量的高效传递热量的元件。以水做工质的热管，在 150°C 下运行，其导热率为铜的几百倍。热管的传热能力非常高，以锂做工质，在 1500°C 下运行的热管，轴向热通量可达 $10\sim 20$ 千瓦/厘米²之高。

2. 热管的工作原理

简单的热管如图1，这种热管称为热虹吸管或重力式热管。它是由金属外壳和纯工作液组成。将这种热管垂直放置并于下端加热和于上部冷却，则加热段的下部工作液沸腾(吸热)

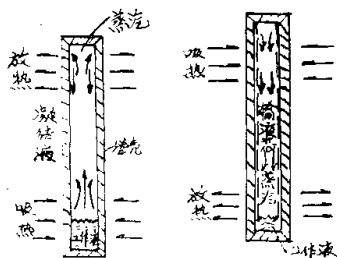


图1

图2

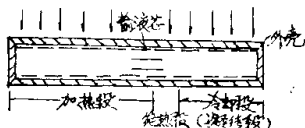


图3

变为蒸汽，蒸汽上升到上部，受冷却后凝结变为液体(放热)，凝结的液体由于重力沿热管内壁流下，然后再于下部受热沸腾和蒸汽于上部凝结，这样热管便把热量以加热流体传到冷却的冷流体。

若将热管内装设可以将液体吸上去的所谓输液芯，则可以将加热段设在上面，冷却端设在下面，如图2，这种热管称为有输液式热管，它依靠虹吸力进行工作液的循环流动。

图3是有输液芯热管的一般形式。它分为三个部份：加热段、绝热段和冷却段。热量通过热管从加热段的热流体(如烟气)传到冷却段的冷流体(如空气)，在这种热管中凝结液反回到加热段是靠虹吸力。如果没有输液芯则凝结的工作液不能反回到加热段，因此，热管的加热管高于冷却段或加热段与冷却段成水平布置时，必须应用有输液芯式热管。而重力式热管(图1)必须应用在加热段低于冷却段的条件上面。简而言之，热管传热的六个连续过

程是：（1）吸热（2）蒸发（3）蒸汽输送（4）冷凝（5）放热（6）液体回流，上述六个过程互相衔接连续进行。

3. 热管的特点

热管是一个中间传送热量的元件，它具有以下特点：

（1）热管是利用工作液的沸腾（吸热）与凝结（放热）的连续过程进行传送热量，即热管是利用工作液发生相变（由液到汽和由汽到液）并以潜热（液体沸腾吸的热量或蒸汽凝结放的热量）的形式进行传送热量。因此，热管内的压力温度有一一相应的关系（如水一个大气压下100℃沸腾），但热管内压力与和压力相对应的温度是多少？则由热管加热段的吸热量与冷却段的冷却量比值来确定。它是一个随加热与冷却条件而定的量。但是从热管内压力应有个合适值出发，不同的工作液有不同的工作温度范围，表1是常用工作液的工作范围”

表1 常用工作液的工作温度范围与压力值

工作液	熔点〔℃〕	大气压下 沸点值〔℃〕	工作温度范围〔℃〕	压力值 公斤/厘米 ²
氢	-272	-260	-271~269	0.06~2.23
氮	-210	-196	-203~160	0.49~19.4
氧	-78	-33	-60~100	0.27~63.2
R-11	-111	24	-60~120	0.02~13.24
戊烷	-130	28	-20~120	0.10~13.85
R-113	-35	48	-10~100	0.09~7.5
丙酮	-95	57	0~120	0.10~6.7
甲醇	-98	64	10~130	0.10~7.86
酒精	-112	78	0~130	0.025~4.3
庚烷	-90	98	0~150	0.02~5.2
水	0	100	30~200	0.06~16.2
导热油	12	257	150~395	0.05~10.92
水银	-39	361	250~650	0.18~35
铯	29	6706	450~900	0.05~4.2
钾	62	774	500~1000	0.05~4.5
钠	98	892	600~1200	0.04~9.59
铪	179	1340	1000~1800	0.07~10.5
银	960	2212	1800~2300	约0.05~6.0

（2）由于热管外壳、输液芯和工作液之间有可能产生H₂、CO等所谓的“不凝结气体或制造时漏入空气，则这些气体一般集中在冷却段上部，减短了冷却段长度，使热管传送热量减少，甚至使热管无法工作，因此需把外壳，输液芯和工作液选择好，否则就会出现“不凝结气体”。外壳、输液芯和工作液互不腐蚀又不产生不凝结气体的性质叫相容性。所以热管的外壳、输液芯和工作液的选择要统一考虑，而不能随便使用。表2是有关相容性的经验资料。

表 2

输 液 芯 外 壳 材 料	工 作 液					
	水	乙醇	氨	甲醇	导热油-A	导热油-B
铜	Ru	Ru	RN	Ru	Ru	Ru
铝	CNG	RL	Ru	RN	UK	NR
不锈钢	TNG	PC	Ru	GNT	Ru	Ru
镍	PC	PC	Ru	RL	Ru	RL
纤维	Ru	Ru	Ru	Ru	Ru	Ru

表 2 中: Ru为过去有成功的经验

RL为文献上推荐的

PC为有相容性的可能

NR为不推荐的

UK为不清楚的

CNG为在全部温度内发生不凝结气体

GNT为在有氧气时增高温度发生不凝结气体

(3) 热管元件需要有专门的制造工艺要求, 由于热管内不应存在气体和不应在工作时发生不凝结气体, 因此要求在制造时有专门的工艺与要求。热管元件的制造要求达到排除原有的气体, 热管内维持足够的真空度和造成充分的凝结液回流、分布以及良好的外部换热条件。为此, 热管在制造中应有: 清洗、除气、纯化工作液、抽真空、注液、封口、检漏和外部加肋等步骤, 为完成这些步骤, 热管制造工艺有两种方法。第一种方法即所谓冷真空法, 它是在常温或低温下用真空泵抽成真空, 注液和封口, 用冷真空法生产的热管内部可保持 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ (毫米水银柱), 但这种方法即耗电又难于大量生产, 制造技术也要求较严。第二种方法是热真空法是利用受热后排气、纯化, 这种方法成品率较低, 但也可以达到 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 毫米水银柱的真空度。可是热真空法不需添置新设备, 消耗能量少。生产的热管除特殊要求外完全可用于生产, 只是此法仅能生产工作液为水的热管。冷真空法不受限制是正规方法, 热真空法只限于水热管。

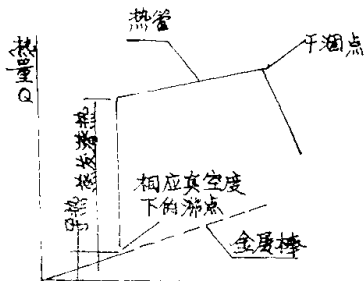


图 4 热管工作特性示意

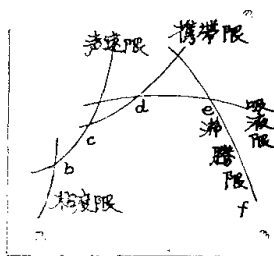


图 5 热管传热的工作限示意

第三章 热管的分类及应用

一、热管的分类

热管的种类及型式有很多种，可以有几个分类方法。例如有按形式分为：管式、板式、旋转式等；有按动作原理分为：重力式、虹吸式、渗式等；有按工作液、外壳种类分为：铜水、不锈钢、疏式热管等。下面以形式和功用来分，可分为：

1. 一般的圆式热管

这种热管数量多，应用也广泛。其工作原理如图 6，这类热管可平放也可直放或倾斜放。有的在直放或倾斜放置时也可没有输液芯，成为重力式热管。

2. 平板式热管

形状如图 7。它的特点是加热段与冷却段表面是平行的。

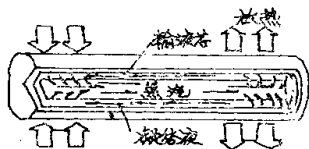


图 6

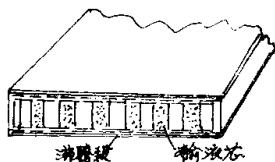


图 7

3. 挠性热管

挠性热管是沸腾段和冷却段可根据具体条件变化角度，如图 8。沸腾段和冷却段的表面可以是圆形、平形等。

4. 渗透式热管

在热管内放置一个半透过滤，利用蒸汽与溶液某物质浓度差产生渗透力，造成凝结液返回沸腾段的动力增加，可提高热管工作能力，其工作原理如图 9。



图 8

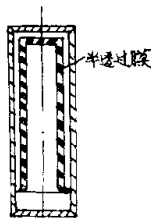


图 9

5. 中渗透式热管

热管内设置两个多孔电极，并加上正负电压，蒸汽在电压作用下加速了流动，增加热管传递热量的能力，如图10。

6. 电流体力热管

图11是利用电压差对介电流体的作用，促使工作液返回的电流体力热管，这种热管工作液返回快，可较大的增加传递热量的能力。



图 10



图 11

7. 反重力热管

在加热段位于冷却段上面位置时，于下部凝结的工作往往需要较大的动力将工作液升到上面的加热段。电流体力热管、电渗透力热管等都可以构成反重力式热管，但动力往往不够，因此需要专门的加些设备，达到有足够的动力使工作液上升到上部。图12是辅助电加热式反重力式热管例。

8. 热二极管

热二极管就是热管做单向传热元件用，它的工作原理如图13。

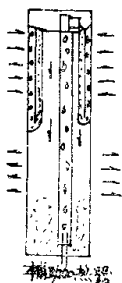


图 12

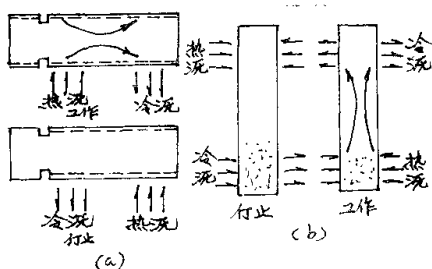


图 13

9. 热开关

图14是热开关原理图。它的目的是控制热源与冷源的温度或热流。

10. 变导热管

变导热管多做控制元件用，其控制原理如图15。

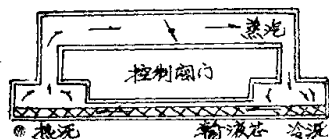


图 14

10. 变导热管

变导热管多做控制元件用，其控制原理如图15。

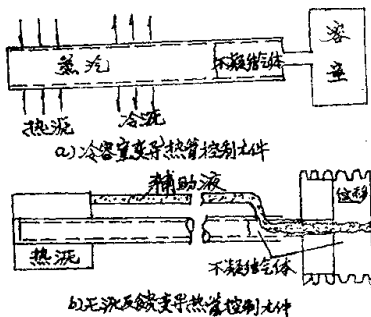


图 15

11. 旋转式热管

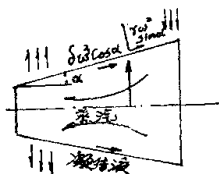


图 16

旋转式热管是热管本身旋转，其工作原理如图16。旋转式热管需做成锥形，凝结段半径(r_0)小于沸腾段半径，凝结段内凝结的工作液受旋转的离心力的合力($\gamma v^2 \sin \alpha$)作用，可加速返回，提高热管传递热量的能力。

除上述所列十一种热管外，尚有化学式热管、蓄热式热管、绝热式热管、流态床和移动式热管等型式，有些还与条件有关。

二、热管的应用

热管的应用可以说是非常广泛的，很难全部都述及，这里只介绍一些主要方面。

1. 做为高效冷却元件及装置

热管在这方面的应用非常多，尤其在地方有困难的时候，更显得重要。电子、电机、变压器、闸车刀、轴承、电池、电器、微波管等需要快速冷却（高冷却率）的地方热管可以起很重要的作用。图17是应用平板热管冷却电子元件例，应用热管冷却后电子元件温度均匀，性能良好。图18是利用旋转式热管冷却电机，可使功率增加10~15%，而绕组没有升温。

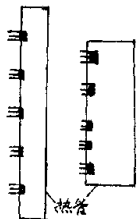


图17

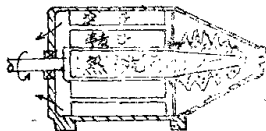


图18

2. 做为能量收集与传热装置

做为换热器、集热器也是热管应用较多的一个领域，几乎在需要进行换热的地方都可用热管换热器。图19是太阳能热管换热器。图20是大型余热换热器。

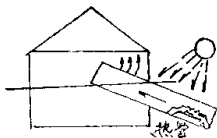


图19

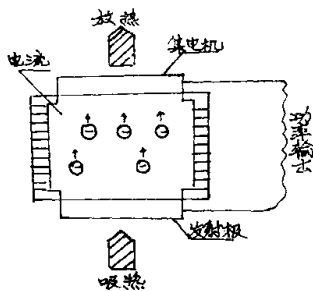


图21

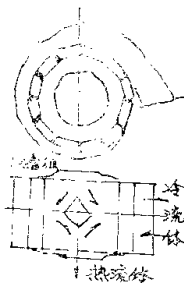


图20

3. 做为高温传热元件

对原子能、太阳炉、热离子等高温元件，利用一般换热器困难，这时热管显得重要。图21是热离子发电装置，它的温度为1600℃，将热管设置在侧面即吸热又提高热离子发电装置的效率。

4. 做为冷却温度提高产品质量

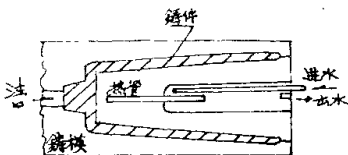


图22

热管冷却效果好又使被冷却件温度均匀，因此在铸造、塑料加工、烘烤食品加工等处，应用热管可提高产品质量。图22是难于提高浇铸质量的铸件用热管冷却可提高质量和产量。

5. 做为低温、冷却装置

在冷冻、冷藏和低温手术刀等方面利用热管也是很有前途的。

6. 做为温度（压力）和热量的控制装置

在人造卫星、宇航设备等需要精密控温（控压）和控热量的地方，而条件困难，这时热管做为控制装置可收到很好的效果。图23是利用变导热管控制卫星表面温度的系统。图24是利用热管后卫星南北壁表面的控制结果。

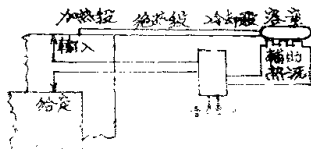


图23

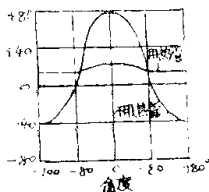


图24

7. 做热量的传递元件

将发生或收集的热从不易散热的地方传出来，在外面冷却也是非常需要的。对电子、地热、太阳能等都需要将热量传出来，这时热管很有用又方便。

8. 做为加热、供暖装置

在需要加热、供暖、烘干等方面，热管容易布置，尤其在小型供暖上更为有利。

9. 做为光学装置的部件

光学装置如激光发生器用热管对集光和效率都有改进。

10. 做为恒温炉

热管可以做为恒温炉。热管做的黑体炉，它的恒温效果高出一一般黑体炉2~4倍。

11. 做为热物性测量装置

由于热管恒温性好，传递热量特性好，利用这些特性，热管可做为测温，测传热系数的装置。

12. 做为人工黑体

热管做为黑体，它可达到黑度为 0.9998 ± 0.0004 ，这是人工黑体中最接近1的黑体。

13. 作为发动机的汽化装置

利用这种装置内燃机容易实现循环，这种内燃机效率高，噪音小、省油。

14. 作为热单向流元件

热管作为热二极管在工业上也很有用，在这方面用于北美油田输油管的单向传热上，热管放在支柱上，油管的热只向空气传热，而不向下传。在北美输油线上共使用10万支热管，运行已达十多年，从空中照相（红外成相）效果良好。

15. 作为防水融雪用

在铁路道岔、高速公路转弯处冬季可用热管防止结冰或融雪；这时利用地下热将热管加热段放在下面，冷却段放在上面。热管将地下热传到上面将水、雪融化，保证行车安全。

16. 作为生理模拟元件

热管的吸热、放热、凝结液回流，蒸汽流等可模拟人体汗腺内水份和蒸汽（汗）的流动。

上面是热管应用的几个例子。实际上热管的应用范围要比上面例子广的多，而且将会有不断的、更大的发展。

三、热管换热器的优缺点

热管换热器是由许多热管元件所成，各热管元件是分开的，换热器的热管元件可多可少，由换热量的决定。由于热和冷流体在热管元件外部流动，因此，热、冷流体的种类一般不受限制。图24和图25是气—气式热管换热器和气—液重力式热管换热器。

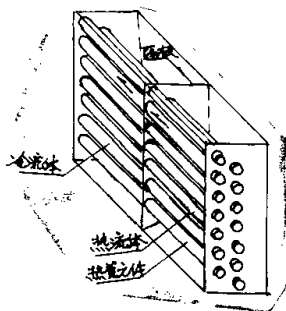


图25

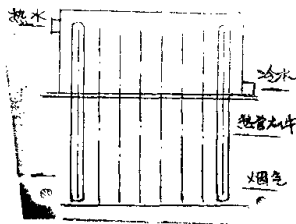


图26

根据热管换热器和现用的换热器情况作对比，热管换热器具有下面优点或特性。

1. 可提高传热系数

由于热管内依靠沸腾和凝结换热，从沸腾段到凝结段的传送热量近于一个超导热元件，

因此，热管里面为提高传热系数创造了充分的条件，而又因为热管是分离布置的，容易创造增加外部传热的条件，同时对管壁比较薄（1.5~2.5mm）。所以，热管换热器的传热系数大于现用的一般换热器，即现用换热器的传热系数（ $K_{\text{换}}$ ）为：

$$K_{\text{换}} = \frac{1}{\frac{1}{d_{\text{换}}} + \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{\text{换}} + \frac{1}{d_{\text{换}2}}}$$

热管换热器的传热系数（ $K_{\text{管}}$ ）为：

$$K_{\text{管}} = \frac{1}{\frac{1}{d_{\text{管}1}} + \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{\text{管}} + \frac{1}{d_{\text{管}2}}}$$

因为： $\left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{\text{管}} < \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{\text{换}}$ 和 $\frac{1}{d_{\text{管}1}} < \frac{1}{d_{\text{换}2}}$

所以 $K_{\text{管}} > K_{\text{换}}$

热管换热器的传热系数可高于现用换热器的传热系数，还因为热管元件是分开放置，不象一般换热器在管内流动和存在流体在各管内的分布不均的问题，因此每根热管的平均传热系数要较高的高于现用换热器的平均传热系数，所以使整个热管换热器的平均传热系数可较多的高于现用换热器的传热系数。结果在相同换热量的条件下，热管换热器可省材料及结构紧凑。

2. 热管能够以较小的温差条件回收适量余热

由于热管内部的传送热量可近于超导热体，又由于上项热管换热器的传热系数可高于现用的换热器，因此可以以较小的温差回收相同的热量。对余热回收来说温差小，说明回收的余热更有用。例如：10〔吨/时〕×100〔℃〕的热量的有用价值远小于1〔吨/时〕×1000〔℃〕的相同热量的有用价值。

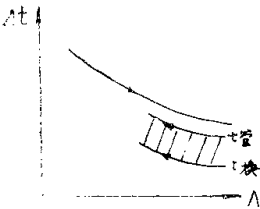


图27

图27表示热管换热管（ $t_{\text{管}}$ ）和现用换热管（ $t_{\text{换}}$ ）的温度差有不同，则斜线表示可用能的增高量，这时间收热量相同时，

$$Q = A_{\text{换}} \cdot K_{\text{换}} (\Delta t_{\text{换}}) = A_{\text{管}} \cdot K_{\text{管}} (\Delta t_{\text{管}})$$

∵ $K_{\text{管}} > K_{\text{换}}$ ，在 $A_{\text{管}} = A_{\text{换}}$ 和 Q 相同下：

$$(\Delta t)_{\text{管}} < (\Delta t)_{\text{换}}$$

但同样 Q 的有用价值提高了。

3. 热管可以造成等温带

由于热管内部温度各处相差很小（因为处在同样压力下相变状态），所以热管的加热段和冷却段都可以形成很好的等温带，这是现用的换热器很难能达到的。这一特点对于许多工艺生产显得异常重要，当然这时热管主要不是用它的传递热量的特点，而是利用它能够形成恒温的特点。

4. 热管传递热量的能力高

由于热管内借助沸腾与凝结传热，即以潜热的形式传送热量，因此从传送热量能力上它远远高于导热性能好的铜管。图28是热管与铜管导热性能的对比。由图可见热管高出铜管

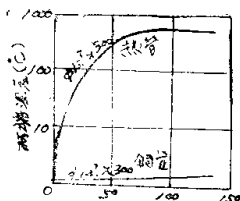


图 28

几百倍。不仅如此，由于热管的构造简单，容易装设，因此在一些受地方限制无法或很难设置其它换热元件时，利用热管可很容易将热量传出来（如电子等元件），同时热管也可以将热量传送很远。并且近来将潜热形式和化学反应热形式结合在一起作成化学式热管。它在输送热量能力上远远超过输热管道，如图29示。

5. 可减轻低温腐蚀

热管内部温度是由加热段和冷却段的换热条件所确定。因此可以通过调节长度比等改变热管内部温度（在热

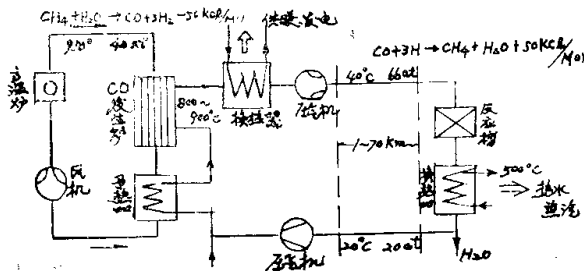


图 29

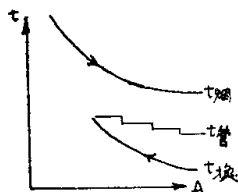


图 30

、冷流体温度之间），同时热管外部温度均匀。因此可较现用的换热器减少低温腐蚀。其情况如图30示。

6. 热管可作单向传送热量元件

有输液芯的热管、加设专门装置无输液芯的重力式热管都起单向传热的作用。如前图13示

7. 热管可以自由换向和热开关

有输液芯热管本身就可以自由换向，例如作为平炉等换向换热器，热管内装设机械可以移动设备，也作为输送热量的开关。

8. 热管可作为热控制元件

将不凝结气体放在管内，当热管工作时不凝结气体集中到凝结段。利用不凝结气体的可压缩与膨胀的特性，可利用凝结段长度（换热面积）来调节传热量或加热段温度。如前图15示。

9. 热、冷流体不会互相泄露，能提高热、冷流体质量。

10. 热管换热器还具备：

- (1) 一般不需动力，耗电较少；
- (2) 安全可靠；

- (3) 一般不需维修；
- (4) 热管元件可卸换；
- (5) 流动阻力较小。

以上特点是热管换热器和一般换热器比较出来的，也可以说是热管换热器的优点。另外，热管换热器也有一些缺点和待解决的问题。这些问题主要有：

(1) 热管元件的质量和特性不易整齐，不用说热真空法就是冷真空法也很难使热管元件质量整齐，因此由许多热管组成的热管有特性不够均匀、热量分配不均的缺点。这是在设计热管换热器时应考虑的问题。

(2) 热管内容积小，外部加热与冷却条件发生变化时，管内压力变化速度大，因此容易烧毁和发生事故。

(3) 热管换热器的容积不容易过分提高，一方面热管元件的个数不能太多，排数也不能超过十排左右。因此在大型热管换热器里热管元件的排列要经过仔细考虑。

(4) 热管工作范围受工作液限制，对某一具体工作液，由于受压力限制，其温度范围比较窄（见表1）。因此对回收余热或在温度变化范围广的条件下，可有几种不同工作液的热管，因此管理上不太方便。

四、热管技术的发展趋势

热管技术在国外正处于发展的阶段上，综合分析热管技术及有关学科情况，可归纳为以下几个趋势和问题。

1. 关于进一步扩大范围的问题

热管要得到进一步扩大，应解决好管壳材料与工作液配合的问题。因为管壳材料的选择是由外部条件（烟气成分等）确定的，两者有时符合和容性有时不相符合。为此热管进一步扩大应用范围主要是决定于相容性的研究，这方面的科学基础是物理化学体系，即对相容性的研究结果如何将决定热管的进一步发展前景。这方面在国外已经或正在下功夫，但这个问题还需做大量工作。而主要问题是在400℃以上（工作液温度）的热管。

2. 关于近一步增加热管的换热系数问题

热管传热系数能否得到很大增加，即较其它换热器有更明显的优越性，要看热管加热外表面与热介质的换热系数和冷却段外表面与冷介质的换热系数。为了提高这个换热系数。近来在强化对流换热上也有不少研究，这方面是传热学的学科体系。近来的主要工作有：

(1) 增设外表面的各种效果好的筋或翼；

(2) 利用电场、超声场和振动增强对流换热和提高对流换热系数；

(3) 改变速度场，破坏温度边界层的实验，以增加对流换热系数。

(4) 利用喷流、混合流等增加对流换热系数。强化对流换热的研究有很大发展，估计这方面成果将推动热管技术的发展。即增加热管的传热系数使热管在与其它换热器的竞争中处于更有利的地位。

3. 关于安全可靠和性能灵敏的问题

由于热管内压力较低，因此因压力过高而破坏的热管安全问题是不大的。即热管的安全、可靠和灵敏等问题，主要是热管的凝结液回流是否及时，分布是否良好的问题。尤其在

平放和反重力热管内更成为主要问题。所以对热管内输液芯的型式、性能的研究也是近几年来研究得很多的一个方面。如何根据具体情况（工作液、热负荷、几何尺寸、布置方式等）选择或制造合适的输液芯对热管的安全与可靠等是很重要的。这方面的进步估计也会很快。

4. 关于经济性问题

热管尤其是利用余热的热管换热器成本或成本回收年限非常重要。这方面主要是外壳利用价格便宜的铝碳钢等，工作液还要用提纯成本低的水等但还要解决不产生和少产生不凝结气体，这方面研究是近几年国外普遍注意的，它主要有以下几个方面的研究：

- （1）普碳与水产生不凝结气体的种类、数量和条件；
- （2）内表面喷镀、处理、复合；
- （3）热管内放置吸收不凝结气体的物质；
- （4）寻找价廉而又有相容性和良好性能的工作液；
- （5）简单、紧凑、高效换热器的定型与计算。

上面是热管今后的发展趋势。总的来说还需要做大量工作，但有很大的发展前途与可能，有些还需要有一段时间，不过热管及其技术的获得发展与得到越来越多的应用是确定无疑的。

第四章 重力式热管

热管的种类很多，但其中重力式热管具有结构简单、制造方便、造价低廉、便于推广应用，在我们现有技术经济条件下，特别具有实用意义。尤其在工业余热回收和太阳能、地热等新能源的开发利用方面，将有广阔的前途。

一、重力式热管的工作原理及轴向传热率

重力式热管是热管中间最简单的一种，它便于在设备简陋、技术条件较差的情况下进行制作，不需要复杂的工艺，因而在工业余热回收中普遍被采用。我们研究在铁道蒸汽机车上回收烟气余热予热给水装置也是采用了重力式热管。

重力式热管是由管壳和传热工质组成。如图31所示。

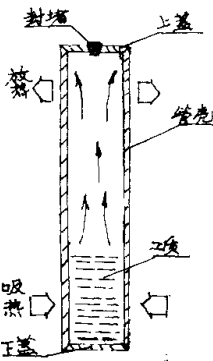


图31

热管之所以具有良好的传热性能，是由它特殊的内部构造决定的。我们知道物体在蒸发冷凝过程中所吸或放出的潜热通常都是很大的，比如在常温下把一公斤水气化成同温度的蒸汽，则需要吸收80大卡左右的热量，同样若把它冷凝则会得到同样大的热量，因此利用传热介质的蒸发冷凝过程传递热量要比传导、对流、辐射等方式传递热量要优越的多。人们早已利用这种原理制成了冷冻机、热泵等冷暖设备，热管也是利用这一原理制成的，只不过把这一原理运用得更加巧妙罢了。热管的内腔是抽真空的，里面装有适量的水、酒精之类传热工质。当热管的一端受热时，工质受热迅速汽化，靠蒸汽压差上升，到管子的另一端被冷却，放出潜热凝结成液珠，在重力作用下又回流到受热端，重新受热蒸发，形成一个连续的质量循环。这样和变过促和重力作用巧妙结合就形成了不需任何外加动力就可高效工作的重力式热管了。

如上所述，热管是一种密闭的蒸发冷凝系统，它的轴向传热率主要由传热工质的汽化潜热值和管腔内质量来决定，

即：

$$Q=L \cdot m$$

式中Q为轴向传热率，L为传热工质的汽化潜热值，m为质量流量，上式可改写为：

$$Q=\pi R^2 \cdot \rho LV$$

式中R为热管直径，ρ为工质蒸汽密度，V为工质蒸汽的流速。

当热管的尺寸和工质选定后，热管的传热率将决定于工质蒸汽的流速，工质蒸汽流速又决定于热端与冷端的温差，温度越大流速也越大。当蒸汽流速达到声速时，在冷凝段入口处会出现阻塞现象，使流动受到限制，温差再增加也不会提高热管的传热率，因此热管的最大