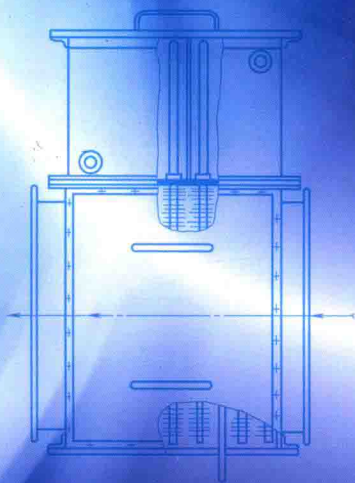
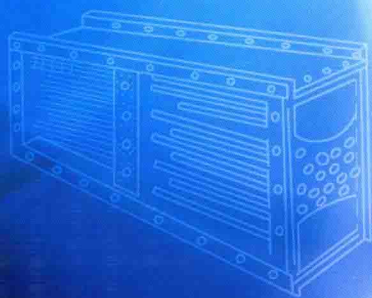


REGUAN HUANREQI
JIEJING JIANPAI JISHU

热管换热器 节能减排技术

● 方 彬 王凤兰 编著



化学工业出版社

REGUAN HUANREQI
JIENENG JIANPAI JISHU

热管换热器 节能减排技术

◎ 方 彬 王凤兰 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要讲述热管与热管换热器的工作原理、构造原理、基本理论、设计计算方法、设计计算的实例以及在工业热力设备节能减排中的应用技术,同时简要介绍了工业常用的重力式热管的加工制造过程。本书还着重讲述了各种锅炉、窑炉和化肥厂造气炉等的排烟余热回收节能减排热管及其热管换热器。

本书可供高等院校热工类专业的本科生、研究生学习使用,也可供从事传热、热工类节能减排的工程技术人员、管理人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

热管换热器节能减排技术/方彬,王凤兰编著. —北京:
化学工业出版社, 2015.4
ISBN 978-7-122-23054-6

I. ①热… II. ①方…②王… III. ①换热器-节能
IV. ①TK172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 034075 号

责任编辑:董琳

文字编辑:刘砚哲

责任校对:宋玮

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京振南印刷有限公司

装订:三河市宇新装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张6½ 字数170千字

2015年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:35.00元

版权所有 违者必究

前言

热管作为节能减排技术已经逐渐被我国广大的工程技术人员所熟知和重视。热管可应用于航天、电子器件、电机、电器、太阳能的利用、轻工、化工、机械等方面。热管技术的研究工作和在工业上的应用进展很快。特别在国家号召节能减排以来，热管技术在锅炉、窑炉、化肥厂造气炉等节能减排的应用越来越多，在为国家节能减排起着积极的作用。

热管这个概念和它的工作原理是在 1964 年首次由美国的洛斯阿拉莫斯科学实验室提出来的。热管是一个能在小的温度梯度下，把热量从一处传递到另一处的高效率的传热元件。它诞生不久就得到广泛的应用和迅速的发展。自 1971 年以来，乔治·华盛顿大学每年组织一期“热管技术与应用”的研究班。这个研究班吸引了众多的工程师和大学教师，使他们有机会了解热管这一技术及其在各方面的应用和发展情况。

当前，我国对热管的研究和应用也越来越广泛。在工业热力设备节能减排中，热管换热器的研究工作发展也很迅速。各种锅炉和窑炉、化肥厂造气炉等排烟余热回收热管换热器的数量增长很快，不仅在低温（ $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ）排烟中进行余热回收节能减排，而且在中温（ $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ ）以及高温排烟中也应用了热管技术进行余热回收节能减排。在应用中对一些关键性技术问题，例如积灰、磨损、腐蚀和减少二氧化碳与二氧化硫的排放等问题，都进行了实验研究，并取得了实验数据和满意的实验结果。

由于工业的发展，大量二氧化碳和二氧化硫排放，使世界气候变暖，空气质量恶化，引起我国乃至全世界的重视。我国首先对节

能减排做出严格规定，热管节能减排及热管换热器技术在节能减排中发挥了关键作用。几十年来方彬与王凤兰老师经常到热管制造厂和热管换热器应用场所为技术人员举办研修提高班，讲解热管工作原理及其技术等，同时感到各大学有关节能专业师生的教材和职工研修班的教材不足，因此编著本书。

全书共分为七章，归纳为三部分内容：一是热管的工作原理，热管的构造原理与热管的基本理论；二是热管换热器的分类与热管换热器的设计计算；三是气-气式热管换热器、气-液式热管换热器与气-汽式热管换热器在节能减排中的应用实例，并对重力式热管的制造工艺过程进行了介绍。

由于时间和编著者水平有限，本书难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

2015 年 3 月

目 录

第一章	热管的工作原理	1
第一节	热管的简述	1
第二节	热管的结构原理	3
第三节	热管的工作原理	6
第四节	热管的特点	9
第二章	热管的构造原理	14
第一节	工质	14
第二节	管芯	15
第三节	管壳	16
第四节	相容性	17
第三章	热管的基本理论	20
第一节	热管的工作极限	20
第二节	黏性限	22
第三节	音速限	22
第四节	携带限	24
第五节	毛细限（吸液限）	25
第六节	沸腾限	26
第七节	热管内的压力分布	27
第四章	热管换热器的分类	30
第一节	气-气热管换热器	31

第二节	气-液热管换热器	33
第三节	热管换热器的结构	36
第四节	热管换热器的长度比	38
第五节	热管的管径	44

第五章 热管换热器的设计计算 49

第一节	热管的热阻	50
第二节	传热系数	56
第三节	翅片效率和翅化比	58
第四节	气体绕流翅片管束时的放热系数和阻力	64
第五节	流体绕流光管管束时的放热系数和阻力	67
第六节	管束的外部沸腾换热	70
第七节	热管的工作温度	73
第八节	传热平均温差	76
第九节	露点腐蚀和管壁温度的计算	78

第六章 热管换热器的设计实例 80

第一节	气-气型热管换热器的设计实例	80
第二节	气-液型热管换热器的设计实例	106
第三节	气-汽型热管换热器的设计实例	126

第七章 热管换热器的应用 134

第一节	应用热管节能减排	134
第二节	热管在蒸汽机车上的应用	142
第三节	小化肥厂热管余热回收的应用	153
第四节	小氮肥厂热管余热锅炉的应用	154
第五节	小氮肥厂热管余热回收装置的应用	157
第六节	热管换热器在隧道窑上的应用	160
第七节	热管换热器在小锅炉上的应用	166
第八节	热管省煤器的应用	175
第九节	重力式热管的制造工艺过程	178

第十节 利用旋压余热排空制造热管的方法	183
第十一节 镍基钎焊热管换热器的特点及应用	185

附录	187
-----------	------------

附录 1 单位换算	187
附录 2 干空气的热物理性质	189
附录 3 在大气压力下烟气的热物理性质	190
附录 4 饱和水的热物理性质	191
附录 5 干饱和水蒸气的热物理性质	192
附录 6 其他热管工质的热物理性质	193
附录 7 双曲线函数值	194

参考文献	195
-------------	------------

第一章 热管的工作原理

随着科学技术的发展，工程需用的设备和仪器等越来越多。其中一些设备和仪器是同热能有关的，并且要求能对热能进行输送和转移。因此，把热能高效地从一处输送到另一处，或者说把热能高效地从一物体输送到另一个物体的研究工作，显得越来越重要。尤其是在能源紧张的情况下，这方面的研究工作不仅重要，而且有着更深远的意义。作为传热元件就其种类来说目前已经不少了，但是作为高效的传热元件，目前确实为数不多。而热管则是一种高效的传热元件，它还具有许多特殊的用途和性能。这一章扼要地叙述热管的基本工作原理及其特点。在叙述热管的工作原理之前，首先介绍一下什么是热管。

第一节 热管的简述

一般来说，热管就是把普通的管子（如各种金属管等）抽成真空，注入工作液体，然后封住口，使其能够把热能从其一端输送到另一端。早期对热管概念的叙述是在 1962 年，特雷费森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传热装置。这个装置是由一根空心管组成，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。这段话不仅是对热管概念的一个深刻描述，而且也是一个发明创造。可是这一发明，由于没有及时用实验来证实，结果被悄悄地放置在公司的档案中。

1964 年洛斯阿拉莫斯科学实验室的格罗费等人独立地重新提出了类似以前提出的传热装置，并给它一个新的称呼叫做热管。接着有人给热管下了一个定义：在一个密闭结构中装有若干工质，借助于液体的蒸发、蒸气的输送和冷凝、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，这样一种结构就构成热管。

现在，我们制造的热管，一般都是采用各种密封金属管子的结构，管中装有若干工质，但在装工质以前必须在密封的管子中形成真空，这可采用真空泵抽，或是用煮沸法形成真空。工质在输送热能之前要由液态变为气态，否则是不能输送热能的。工质把热能从热管的一端输送到另一端之后，工质重新冷凝成液态，然后靠毛细作用使冷凝液从冷凝段返回到蒸发段，这对于处在水平工作位置 and 与水平成很小夹角以及冷凝段在加热段下面的热管来说是必要的。但对处于垂直工作位置的热管或者处于与水平位置夹角比较大的热管来说可以没有毛细结构，这时热管内工质的回流就要靠重力回流了，如图 1-1 (a) 所示。目前我国余热利用节能减排中应用的热管大部分是这种热管。虽然没有毛细结构的热管在工质回流和工质回流的均匀性等方面远不如有毛细结构的热管，但是在热管的制造工艺性和热管的制造成本等方面却比有毛细结构的热管要优越得多。图 1-1 (b) 与 (a) 的不同点是在热管的内壁四周上设有叫作输液

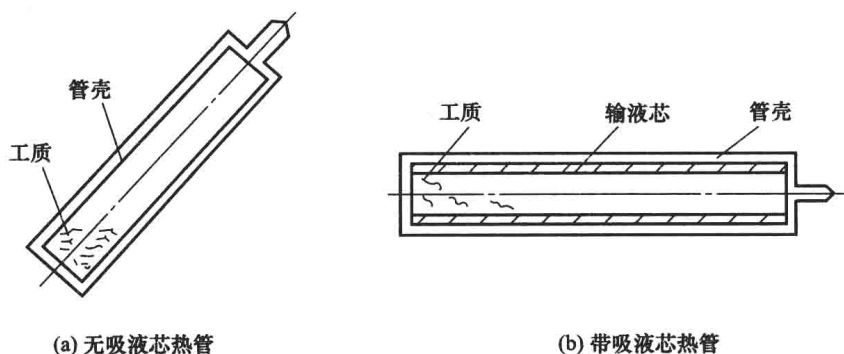


图 1-1 热管

芯（也叫吸液芯）的构造，这种热管的工作液体的回流依靠输液芯，工作不受位置的限制。

第二节 热管的结构原理

热管从纵向来看可以分为三段，即蒸发段、绝热段和冷凝段，如图 1-2 所示。有时也把热管的加热段叫做蒸发器，冷凝段叫做凝结器，绝热段叫做传送段。传送段作为流体的通道，把蒸发器（热源）与凝结器（冷源）分隔开。热管的绝热段的长度可以很长，也可以很短；其材料可以与管壳一样，也可以不一样；可以是刚性的，也可以是柔性的。这样使热管能适应布置任意需要的几何形状，这样的热管称为分离式热管。但是，工业上节能热管和余热利用热管的绝热段是比较短的，只是管壳的一小段。但是，这很短的一段绝热段仍然把加热段与冷凝段分隔开，而且在此处还得把通过加热段的热流体与通过冷凝段的冷流体分隔开。所以，热管的密封环都放在绝热段里，显然，热管膨胀的相对死点也应该在这里。

从热管的径向方向来看也可以将热管分为三个组成部分，即管壳、吸液芯和蒸气空间。对一般热管来说，热流体从热源来至热管总要先经过管壳。如果把热管传送能量的过程假设成一条热流线的話，那么这条热流线的途径一定是先经过管壳、吸液芯、蒸气空间，然后再由蒸气空间经吸液芯和管壳离开热管。在气-气热管换热器中的热管为了增加其换热能力一般都是带有翅片的，如图 1-2 所示。下面分别叙述一下热管的各组成部分及其作用。

一、管壳

管壳通常做容器，容器的机械作用是封闭热管中的工作流体，并且增加结构的刚性。因为管壳内的工作压力与管壳外的环境压力之间相差很大，因此，管壳必须能承受压力差而不至于变形或破裂。管壳除了承受压力差之外还是热流体的一段必经之路。因此，

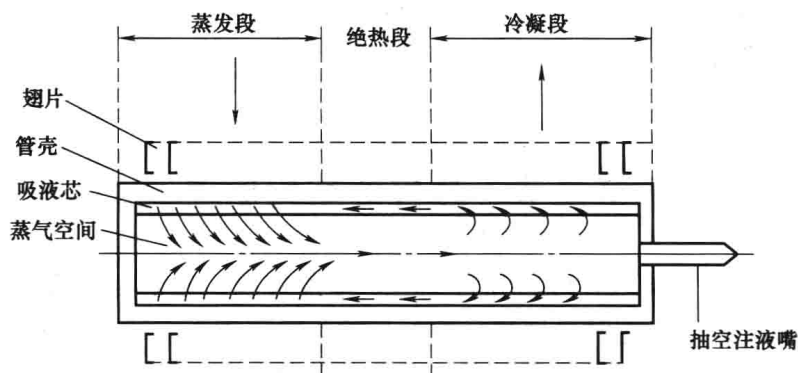


图 1-2 热管的结构原理

管壳热阻的大小也是影响传热的重要一环。从承受压力差的角度而言，要求管壳壁厚一些好；而从传热的角度而言，要求管壳壁薄一些好。

目前，热管采用金属圆管，一般外径的范围为 $\phi 25 \sim 42\text{mm}$ ，管壳壁厚为 $1.5 \sim 3\text{mm}$ 。用相应尺寸的端盖通过焊接封住管子的两端。平时要防止空气漏入管内，以免管内的真空遭到破坏。热管工作时，管内要产生很高的温度，即工质的饱和蒸气温度，相应要产生很高的压力，即工质的饱和蒸气压力，饱和蒸气压力与饱和蒸气温度是以一定的关系联系着的。如以水为工质的热管，在管内温度为 250°C 时，其相应的压力为 40.56kgf/cm^2 ，这么高的压力就要由管壳来承受了。管壳材料要根据热管使用的温度范围和工作液体的性质来综合考虑加以选定，一般管壳的材料有铝、铜、钢和不锈钢等。

目前在工业上节能常用的低温、中温范围以水为工质的热管，其管壳一般常用钢-铜复合管。这里，铜做衬套，它一般有两个用途：①用铜作衬套把工质水和管壳钢分隔开来，因为铜与水是化学相容的，而水与钢是化学不相容的；②在以铜作衬套的内壁上拉毛细结构槽道比较方便。如在较低环境温度工作的热管其管材可以选为全铜管材，但这时热管管壳的温度一般不超过 220°C 。如热管工作的环境温度再低时，可以选用铝作为管壳材料。如在以水为工质

的工作液体中加入了缓蚀剂,可以使这种水溶液与钢长期在高温接触下不起或基本不起化学反应,不产生或基本不产生不凝气体。这时可以选无缝碳钢管作为管壳材料,这可使热管的重量和造价等指标有所下降。如热管的环境工作温度很高,这时不仅工质要换,而相应的管壳材料也要换。如钠热管,其工质为钠,这时的管壳材料就要采用不锈钢了。管壳的材质、薄厚的选择不仅要承受压力、减小热阻,还要从价格的高低加以综合考虑,对一般工业上应用的热管换热器来说,其成本的高低也是非常重要的,这几方面总是有矛盾的。因此,需要选择一个相对满意的厚度和材质。对有翅片热管的强度的薄弱环节不是在中间,而是在两端盖的焊接处。因此,管壳可以选得薄一些,在两端盖焊接处可以设法加强。

二、吸液芯

带吸液芯的热管内工质的流动是利用毛细结构来保证的。对吸液芯的主要要求是要起到一个毛细泵的作用。在热管管壳内壁安放金属丝网、多孔金属,以及在内壁上拉上槽(轴向槽或周向槽道等),都能起到一个毛细泵的作用,都能将工质从冷凝段输送到蒸发段。如以多孔物质作为吸液芯,吸液芯内被许多任意相互连接的细小毛细管通路所充满。吸液芯通常是紧贴或者挤压在容器内壁上,利用液体的表面张力从凝结段将液体送回到加热段。如吸液芯是由低热导率的工质浸透,吸液芯与流体层通常在热流线路路上出现较大的阻力。因此,在选择吸液芯时,考虑导热性质及流体的传输性质是必要的。

三、蒸气空间

热管内蒸气空间是作为蒸气输送能量的通道。蒸气是否能在蒸气通道中高效率地传递能量呢?一般来说是没有问题的。但是,进一步说也有许多因素影响着蒸气的流动,影响着蒸气对热能的输送。在蒸气空间里蒸气的流动是一个复杂的流动。热管里面工作液体的流动是很复杂的双相流动。

四、翅片

一般在工业上应用的热管，特别是气-气换热器热管无论是加热段或冷凝段，在管壳的外表面都绕上翅片或串上翅片，这样做是为了增加热管的传热能力。一般加上中等高度的翅片，热管的翅化比，即翅片表面积与光管外表面积之比值，一般在 6~10 之间。这样就可以大大提高热管的传热能力。

一般取：翅片高 12.5mm，翅片厚度 0.5~1.0mm，翅片间距 3~20mm，材质为 08 号钢。

第三节 热管的工作原理

热管是一个封闭容器，从封闭容器内抽出不凝结气体，形成真空，为了使热管能够很快地启动和很好地工作，要求管内始终保持一定的真空度，装有一定量的能够汽化的液体，并装有起毛细作用的吸液芯结构。管内工作液体在加热段吸热沸腾后汽化，蒸气带着大量的热能进入冷凝段，然后进行凝结放热，把大量的热能传递给了冷凝段的冷流体。工质完成了把能量从加热段输送到冷凝段之后，以液态形式在吸液芯结构毛细泵的抽吸作用下，重新返回到加热段。重复这一过程，形成循环，使热管连续不断地工作，不断地传递热能，这就是热管的工作原理。把这样一个传递热能的过程，用一条假想的热流线表示，如图 1-3 所示。

热管中工质传递热能的过程是通过工质的相变过程进行的。加热段热流体包含了大量的热能（如各种炉的排烟，这种热流体中就包含了大量的热能），这些热能在传递给工质时是通过工质的相变进行的。工质由液态逐渐吸热，当吸入一定量的热能时就变为气态。工质由液态变为气态一定要吸热，而吸收的热量往往很多。工质由液态变为气态所吸收的热量叫做汽化潜热。工质就是把汽化潜热这部分热能输送到了冷凝段。由于工质被冷却，工

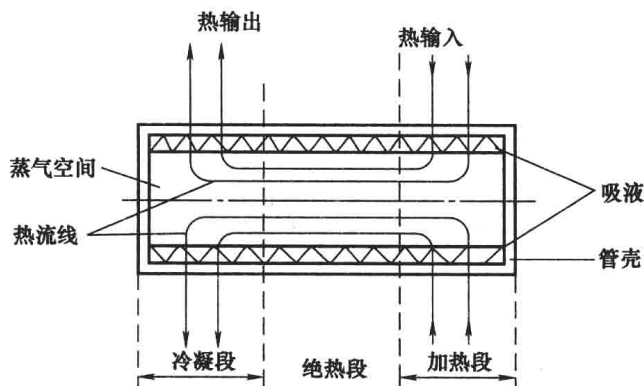


图 1-3 热管工作原理图

质由气态又变成为液态，同时向冷流体（如冷却介质空气或水）放出凝结潜热。

热管之所以能够进行高效率的传递热能，成为一个高效率的传热元件，就在于它利用了工程热力学和传热学中相变潜热的吸收和释放两个最强烈的过程。热管的工作利用相变吸、放潜热的机理和毛细泵或重力引起工作流体的循环进行输送热能，这就构成了热管工作原理的核心。

由于工质的汽化潜热量与凝结潜热量一致，又由于过程的进行中被认为是理想的，与外界无热量交换，所以，反映在热管两端温度上也是一致的，即热管等温性是非常好的。工质的汽化和凝结的过程都是在蒸气空间中进行的，在这个空间中工质所处的状态为饱和状态，而饱和蒸气温度与饱和蒸气压力之间不是独立的，二者之间是有对应关系的，这一点对热管的工作和设计以及实验都是非常重要的。由于饱和温度和饱和压力有这样一个关系，又由于工质由加热段到冷却段之间温度变化很小，就决定了热管蒸气空间中的压力变化也是很小的。因此，毛细结构中的工作液体很小的表面张力或管中少量工作流体的重力就能克服热管工作中所产生的压力差。这一点与锅炉中工质的循环有根本的不同。锅炉中工质的循环是用机械泵进行强迫循环，而且还需要补充工质。热管中的工质根本不用

机械泵循环，也不需要补充。

热管内工作流体的连续循环是依靠工作液体的表面张力。这种独特的传质方式既使热管获得了独特的成效，又成为热管正常工作的主要障碍之一。对热管内壁装有多孔的毛细管结构物，必须使之浸透工作流体。为此，必须有足够量的工作流体注入管内，使流体充满所有毛细管结构的毛孔。工作流体稍微过量不会影响热管的正常工作。相反，要是工作流体的量不充足，不能把所有的毛细管结构的毛孔充满，则有可能成为热管破坏的原因之一。要使毛细结构能保证工作流体的循环，它必须足以克服系统的黏性的动力学损失，必须补偿反向的重力作用。

在热管的整个工作过程中，流体动力学是很重要的。传热理论则提供了通过热管各部件，如管壳、吸液芯和工作流体以及热管与热源和冷源界面输入和输出热能的依据。因此，对设计、实验以及运行热管及其换热器的技术人员来说熟悉基本的流体力学和传热学及工程热力学的知识是必需的。

为了使上述热管工作性能好，除理论上讨论和保证外，还必须作到下列几点。

① 热管在工作期间不产生腐蚀和在热管工作温度条件下不出现不凝结气体。为了保证这一点，管壳、吸液芯和工作流体三者应当经过严格的选择，必须保证三者之间必须是化学相容的。

② 热管内一般应设有加强换热的毛细结构，如各种吸液芯或沟、槽等。

③ 热管外面一般应设有翅片来加强热管的换热能力。

④ 热管的管壳和吸液芯应当经过严格的清洗，如酸洗、碱洗和水洗等，并对管壳和吸液芯要除气。工作流体应该是高纯度的。

⑤ 热管在工作前，内部应保持真空状态，保证具有一定的真空度。

⑥ 热管管壳应保证具有一定的强度，热管在工作时要承受一定的高压而不漏泄。

第四节 热管的特点

热管是一种新型的传热元件，无论什么形式的热管都是一个换热元件或利用换热进行控制或开关的元件。除了控制或开关用的热管元件之外，热管的绝大多数是换热元件。热管作为换热元件与其他形式的换热元件相比有如下几方面的特点及优缺点。

一、传热系数高

热管的热传导能力强就是因为热管的热导率高。

对于传热元件来说，传热系数 K 是个重要的技术经济指标。在气-气换热的情况下，我们可以拿热管与常用的传热元件——光管和翅片管进行比较，可以在相同的传热面积和传热温差下，比较它们之间的传热系数与传热量的大小。在这种情况下对上述三种换热元件的传热系数进行了计算，并将计算结果列入表 1-1 中。

表 1-1 气-气换热情况下三管传热系数的比较

传 热 元 件	传热系数 $K/[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$
光管	20
翅片管	37.4
热管	268.8

通过表 1-1 中数值的比较可以看出：在气-气换热的情况下，热管最优，其传热系数为光管的 10 倍以上，为翅片管的 6 倍以上。

二、传递热量大

热管传递的热量，是指管内加热段液体吸热变为蒸气的汽化潜热量，到凝结段蒸气又变为液体放出的潜热量。这种吸收或放出的潜热量是相当大的，比不是靠相变吸收或放出热量的元件要大得多。

热管在轴向传递热量的大小可和同尺寸的铜棒传递热量（导