

TK17
6044

高等学校教材



热管在热能工程中应用

浙 江 大 学 吴存真
西安交通大学 刘光铎 合编

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书以介绍重力热管在热能工程中的应用为主,系统地论述了热管的特性、传热过程和流动过程、热管内部的传热极限等基础理论,最后介绍了热管和热管换热器的设计。

本书为高等学校热动类专业大学本科生选修课的教材,也可供从事能源与热能动力工程的工程技术人员参考。

高等学校教材
热管在热能工程中的应用

浙江大学 暴存真 合编
西安交通大学 刘光铨

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

河北省三河市印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 10印张 221千字

1993年10月第一版 1993年10月北京第一次印刷

印数:0001—2,400 册

ISBN7-120-01824-8/TK·276

定价4.70元

前 言

热管是一种新型高效的换热元件，自60年代问世以来，发展很快，已应用于宇航和国民经济的不少领域中。在热能工程中，重力热管应用更为广泛，特别是在低品位工业余热回收中，热管换热器有其独特的优点。目前由于“热管”的出版物多属论文和学术专著，为满足大学本科生的教学需要，作者在浙江大学、西安交通大学“热管”教学的基础上编写了此书。

全书共分两大部分：第一部分（二、三、四章）为热管的基础理论；第二部分（五、六章）为热管的应用及热管换热器的设计。

本书第一、二、五、六章及附录由浙江大学吴存真编写，第三、四章由西安交通大学刘光铎编写，全书由吴存真统稿，由重庆大学陈远国教授审稿。陈远国教授对书稿提出了许多宝贵意见，在此致以深切的谢意。

由于水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1992年10月

主要符号

A	面积	m^2	λ	导热系数	$W/(m \cdot K)$
B	宽度	m	μ	[动力]粘度	$Pa \cdot s$
c_p	定压比热	$kJ/(kg \cdot K)$	ν	运动粘度	m^2/s
d	直径	m	ξ	热损失系数	
f	摩擦系数		ρ	密度	kg/m^3
k	传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$	σ	表面张力	N/m
K	渗透率	m^2	$[\sigma]$	许用应力	Pa
L^+	长度比		τ	切应力(剪应力)	Pa
L	热管换热器深度	m	下角标		
l	热管长度	m	1	热流体, 加热段	
M	费用	元	2	冷流体, 放热段	
N	热管支数	支	0	标准的	
p	压力	Pa	a	绝热的	
P	功率	kW	b	沸腾的, 沸点的	
q_v	体积流量	m^3/h	c	凝结段, 放热段, 毛细的, 冷源	
q_m	质量流量	kg/h	d	干涸的	
Q	热流量	kW	e	蒸发段, 加热段, 携带的, 热源, 有效	
R	热阻	$^{\circ}C/W$	eff	有效	
r	半径	m	f	肋片, 流体	
	液体汽化潜热	kJ/kg	g	气体	
$T(t)$	温度	$K(^{\circ}C)$	i	内部的	
U	水当量 $q_m c_p$	$kJ/(h \cdot K)$	l	液体	
u	速度	m/s	L	纵向(顺流动深度方向)	
ρu	质量流速	$kg/(m^2 \cdot s)$	o	外部的	
V^+	充液率		s	固体的, 饱和的, 声速的, 丝网的	
y	回收年限	a	t, T	总的, 横向的	
z	管排数		v	蒸汽的	
α	放热系数	$W/(m^2 \cdot K)$	w	壁的	
β	肋化系数		上角标		
γ	比热比 c_p/c_v		'	进口	
δ	厚度	m	"	出口	
ε	污染系数, 空隙率		l	末排的	
η	效率		f	首排的	
θ	倾角	$(^{\circ})$	s	单支的	

目 录

前言

主要符号

第一章 概述	1
第一节 热管发展简史	1
第二节 热管的工作原理	3
第三节 热管的分类	4
第四节 重力热管	5
参考文献	8
第二章 热管的特性及流动、传热过程	9
第一节 热管的特性	9
第二节 热管内部的工质流动过程	13
第三节 热管的传热过程	17
思考题与习题	27
参考文献	28
第三章 热管内部的传热极限	29
第一节 毛细传热极限	29
第二节 声速传热极限	34
第三节 携带传热极限	38
第四节 沸腾传热极限	42
第五节 下润传热极限	48
思考题与习题	50
参考文献	52
第四章 热管的设计	54
第一节 热管工作湿度的设计	54
第二节 热管工作流体的选择	57
第三节 热管壳体材质与工质的相容性	59
第四节 热管形状与结构的设计	65
第五节 热管工质充装量	74
第六节 热管设计举例	77
思考题与习题	82
参考文献	83
第五章 热管在热能工程中的应用	85
第一节 概述	85
第二节 热管换热器的基本结构	86

第三节 低品位余热利用的理想换热元件	87
第四节 热管在电站锅炉中的应用	94
第五节 热管在工业锅炉及窑炉中的应用	97
第六节 热管在热能工程中其它方面的应用	102
第七节 热管应用中的限制条件	103
思考题与习题	104
参考文献	105
第六章 热管换热器的设计	106
第一节 热管换热器设计的依据与条件	106
第二节 热管换热器主要参数的选择	106
第三节 气-气热管换热器的设计计算	114
第四节 热管换热器设计举例	126
第五节 热管换热器的优化设计	137
习题	138
参考文献	138
附录I 饱和水的热物理性质	140
附录II 饱和水蒸气的热物理性质	142
附录III 干空气的热物理性质($p=1.01\times 10^5\text{Pa}$)	144
附录IV 大气压力($p=1.01\times 10^5\text{Pa}$)下烟气的热物理性质	145
附录V 常用管壳材料的物理性质	146
附录VI 常用工质的热物理性质	148
附录VII 双曲线函数值	152

第一章 概 述

热管是一种新型、高效的传热元件。

世界上最早的一项热管专利是1944年由美国俄亥俄通用发动机公司的高格勒(R.S. Gaugler)以不太引人注目的“传热器件”的名称提出来的(美国专利 No2350348)^[1-1]。这项专利首次提出了有吸液芯的标准热管,或称现代热管的原理,首次提出可以将热量由上而下(依靠吸液芯克服重力回流冷凝液)进行相变传热。但是尚未提出“热管”的名称。由于当时的战争形势,这项专利的先进思想被埋没了20年之久。直至1963年美国格罗弗(G.M. Grover)独立发明了高效导热装置,采用丝网式吸液芯,用不锈钢作外壳,钠作为工质;正式提出以热管为名,并申请了美国专利(No3229759)。格罗弗因而被称为现代热管之父。在空间技术迅速发展的有利形势下,这项发明在美国洛斯——阿拉莫斯(Los Alamos)实验室完成了从设想到实验的全过程,并进行了初步的理论分析;次年,在美国《应用物理》杂志上发表了论文及实验结果^[1-2],引起了人们广泛的兴趣及重视,热管的研究与应用开始蓬勃地发展起来。由于从它命名至今才30年,所以说它是一种新型的传热元件。

为什么说热管是一种高效的传热元件呢?1964年格罗弗在《应用物理》杂志上发表的论文中指出:“在某些应用范围内,热管可以看成一种最佳组合的工程结构,它相当于导热系数大大超过任何已知金属的一种物体。”以后的实践证明,在一定条件下,热管的当量导热系数 λ_{eq} 可以达到已知金属的 $10^3 \sim 10^4$ 倍,有人将它称之为“超导热体”。所以说热管是一种高效传热元件。

这种新型、高效的换热元件——热管,由于其先进巧妙的构思和良好的换热性能,在应用中已崭露头角,具有强大的生命力,引起了科技界的极大兴趣及研究热情。所以使从事热工及能源工作的工程技术人员了解这一新技术很有必要。

第一节 热管发展简史

热管从它正式命名至今还只有30年,但它的前身——热虹吸管却已有了100多年的历史。为了对热管的发展与现状有一个较完整的了解,简单地介绍一下它的整个发展史。

热管发展的第一个阶段为简单的两相热虹吸管——帕金斯管(perkins tube)阶段,时间为1836~1942年,1836年雅各布·帕金斯(J. Perkins)发明了帕金斯管,这是一种两端封闭、其中充有少量水的管子。工作时管子一端插在高温烟气或火中,另一端插在水中,依靠其内部工质——水的沸腾和凝结传递热量。由于管内空气未抽除,所以传热性能较差。1863年帕金斯管得到了工业应用,用于法国的一台机车锅炉及其火箱过热器中;1867年用于英国军队的移动式面包烤炉中。1892年J. Perkins的孙子L. P. Perkins和W. E.

Buck联合申请改进帕金斯管的专利,指出:“抽除管内空气可有效地改进其工作性能,并对提高管子的传热极限提出了不少改进意见,建议可用这种改进的帕金斯管即两相闭式热虹吸管来回收烟气余热加热空气”。1930年以后,在英国、前苏联、捷克及其它国家,热管在面包烤炉上得到了广泛的应用,有些管子一直可靠地工作到现在。1929年提出了肋化管壁以改进换热的设想。

第二个阶段为60年代至70年代,是现代热管原理及概念的提出及在空间飞行中的成功应用阶段,同时二相闭式热虹吸管亦被称之为重力热管,应用也更为广泛。1942~1944年高格勒(R.S.Gaugler)提出了现代热管的工作原理,用毛细吸液芯回流凝结液;1962年美国已有人预言蒸发器-凝结器毛细力泵原理将在空间系统中得到应用。1963年美国格罗弗(G.M.Grover)发明了用不锈钢作为外壳,采用丝网吸液芯和以钠作为工质的高效导热装置并命名为“热管”。从1964年开始,美国洛斯-阿拉莫斯科学实验室在格罗弗领导下开展了大量热管研究工作。1967年热管首次空间试验成功。美国首次用热管进行卫星的温度控制,即GEOS-B卫星热管系统,共运行145天,使用效果良好;在阿特拉斯火箭周围全部布满了热管,借助这些热管使火箭容器和美国“天空实验室”轨道站的起居舱保持了均温,防止了宇宙飞行器进入大气层时外壳被强烈加热。

在此期间,重力热管的应用范围进一步扩大。前苏联首次在200t/h锅炉上安装重力热管空气预热器。捷克的斯可达工厂从1965年开始制造重力热管换热器,用作锅炉的空气预热器。除此之外,英国、日本、德国等国也开始了热管的研制工作。

第三个阶段为70年代以后,在空间应用热管成功的基础上,热管在地面上的应用也蓬勃地开展起来了。地面应用最多的是用于工业余热回收及空调低温余热回收的热管换热器。这类换热器已系列化、商品化生产。如美国的Q-Dot公司与休斯飞机公司都有自己的产品系列。热管应用已涉及到94种行业,单管型热管换热器的余热回收量已达 10^4 kW级,单管长度长达7~10m,在大型电厂锅炉中用作前置式空气预热器。分离型热管换热器的余热回收量更大,较多用于冶金、化工等行业。

在此期间,美国在阿拉斯加州永久冻土带输油管道的重力热管保护系统是最大的一项应用热管的工程,使用了114000支热管和21m长的热管,在热管数和长度方面都是创纪录的。此外,一些特殊热管的研究工作也有了很大进展,如可变热导热管、旋转热管、微型热管及超长热管等。总之,这一切都预示着热管将会有更广阔的发展前景。

与世界各国的热管发展情况一样,我国于1970年即开始对有吸液芯的热管进行研究,1972年我国第一支钠热管研制成功,1980年我国第一台槽道式吸液芯热管换热器投入运行。至80年代初我国从事热管研究的科研单位及大专院校已遍及全国。

在地面应用方面,与国际相比我国的热管科研工作有下列几个特点:

(1) 研究的重点是热管在节能及余热利用方面的应用,比应用较多的日本还多。

(2) 由于回收低品位余热,热管成本低,所以对碳钢-水热管的研究有了不同程度的突破,对碳钢与水相容性的研究已达相当高的水平。目前,国内使用的余热回收换热器绝大多数均为碳钢-水热管,运行情况令人满意。

(3) 应用研究多,基础理论研究少;重力热管研究应用多,吸液芯热管研究应

用少。

第二节 热管的工作原理

热管的典型结构如图1-1所示。它以一种封闭的管子或筒体作为热管壳体,形状可以是各种各样的,其内表面镶套着多孔毛细吸液芯,待壳体抽成真空后充入适量的工作介质(液体),密封壳体即成热管。

一、热管的工作过程

当热源向蒸发段(又称吸热段)供热时,工质液体自热源吸热汽化,蒸汽在压差的作用下高速流向凝结段(又称放热段),在凝结段向冷源放出汽化潜热而凝结成液体,凝结液在毛细吸液芯抽吸力的

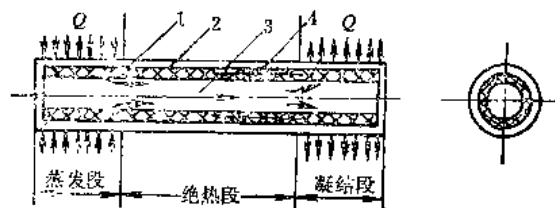


图 1-1 热管的结构

作用下,从凝结段返回蒸发段,完成一个循环。如此循环不停,热源的热量 Q 就不断地由热管的一端传至另一端,放给冷源。如图1-1所示,当热管正常工作时,其内部进行着工质液体的蒸发、蒸汽的流动、蒸汽的凝结和凝结液的回流等四个工作过程,这四个过程构成了热管工作的闭合循环。

在热管的工作循环中,包含了两个相变过程:工作液体的蒸发和蒸汽的凝结。这两个过程分别在蒸发段与凝结段进行,如忽略蒸汽流动所需的微小压差,则热管内部应处于一个相平衡状态,而工质的相变过程具有极严格的饱和压力与饱和温度间的依变关系,所以理论上热管两端的温度是相等的。但由于蒸汽的流动必须有压力差的推动,尽管微小的压差亦将推动蒸汽由蒸发段向凝结段流动,也不可避免地使蒸发段与凝结段间存在一定温差。在大多数热管中,这个与工作介质循环有关的温差和其它传热方式相应的温差相比是很小的,即它能在低温差下传递热量。

由上述可知,热管是借助于工质的相变过程,通过工质携带相变潜热来传递热量的。与通过物质显热的增减来传热相比,热管传热能力就非常大,如1kg水在常压下的汽化潜热量2257.1kJ/kg,几乎相当于5.4kg水从0℃加热到100℃水所需的总热量。所以说,热管能在小温差下具有很大的传热能力。

二、热管的组成

热管由热管壳体、工作介质、毛细吸液芯三部分组成,如图1-1所示。

(1) 热管壳体 热管壳体是一个能承受压力的、完全密封的容器,它的几何形状没有特殊的要求,一般情况下为圆管形。热管在工作时壳体往往需承受一定的压力,但热管在制作时需预先建立很高的真空,一般为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa。所以热管壳体的任何一道焊缝都要经得起高真空检漏及一定压力的严格考验。热管壳体一般用金属材料制成。

(2) 工作介质 工作介质在热管工作时起载热、输热的作用,依靠其相变过程来完成热管的工作循环;壳体內的工质汽液两相共存,液态工质储存在多孔的吸液芯层內,汽态工质则充满热管的内部空腔;由于热管制作时的真空很高,所以除非是温度比工作液凝

固点还低，热管内汽液两相共存的工作介质通常是饱和的。

(3) 毛细吸液芯 毛细吸液芯紧贴于壳体内壁，是液态工质的栖身之地。它的作用是：①沿径向分配液态工质，使其在吸液芯中均匀而稳定地保持一层薄薄的液膜；②产生毛细抽吸力并提供通道使凝结液沿轴向回流。所以，吸液芯是凝结液回流的动力和可靠通道。

三、热管的三个工作段

从热管与外界的传热状态来看，沿其壳体轴向可分为三个工作段：

(1) 蒸发段 热管从热源吸取热量的工作段。在这一区段中工质由于吸热而蒸发，所以从热管内部工作过程来分析为蒸发段；从与外界热交换情况来分析为加热段。

(2) 绝热段 热管与外界没有热交换的工作段。工质蒸汽携带汽化潜热流过这一段，从内部工作过程来分析也叫传输段。

(3) 凝结段 热管向冷源放出热量的工作段。在这一区段中工质蒸汽向冷源放出相变潜热而凝结成为液体，所以从热管内部工作过程来分析为凝结段，亦称冷凝段；从与外界热交换情况来分析又称放热段。

应当指出，在热管三个工作段中，蒸发段与凝结段是必不可少的，而绝热段视设计需要可有可无，在实际应用的热管结构中，没有绝热段的情况是常常会遇到的。

第三节 热管的分类

随着热管技术的发展，热管的应用范围不断扩大，各种类型的热管相继问世。为使人们对各种类型的热管有个初步的了解，大致分类如下。

一、按热管工质的温度分

热管可分成高温、中温和低温三种。

(1) 高温热管 工质温度在500℃以上的热管，所用工质为银、铯、钠、汞、钾和铯等。由于这种热管成本高昂，所以均用于一些有特殊要求的场合，如在热离子发电装置中的应用、工业炉的高温烟气余热利用、高温恒温黑体炉及硬模铸造方面的应用等。

(2) 中温热管 工质温度为100~500℃的热管，常用工质为水、导热姆等。其中水是最理想的工质，它性能优良，价格便宜，易于得到，但最高使用工作温度不能高于310℃。而在300~500℃温度范围内尚缺理想工质，所以对砷、硫及多组元工质的研究工作各国均正在进行之中。这种热管大部分用于工业余热的回收。

(3) 低温热管 工质温度低于100℃的热管，所用工质多为低沸点的工质，如氨、乙醇、各类氟里昂等。这种热管常用于空调及低温余热回收、电子器件及轴承散热。

除此以外，尚有深低温热管，由于在热能工程中较少用到，故从略。

二、按热管回流凝结液的方式分

(1) 借助毛细力回流凝结液的热管，称为标准热管，简称热管。

(2) 借助重力回流凝结液的热管，称为重力热管，又可称为二相热虹吸管。

(3) 借助离心力回流凝结液的热管，称为旋转热管。

(4) 借助静电力回流凝结液的热管, 称为电流体动力热管。

(5) 借助磁体力回流凝结液的热管, 称为磁流体动力热管。

(6) 借助渗透力回流凝结液的热管, 称为渗透热管。

三、按热管的尺寸分

热管可分成长热管、一般热管和微型热管三种。

(1) 长热管为 $l/d_o \gg 1$ 的热管(l 为管长, d_o 为热管外径)。长热管运行具有独特之处, 如传热特性及传热极限等。

(2) 微型热管 内径非常小的热管, 目前已有内径 d_i 为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的微型热管。在这种情况下, 表面张力与使凝结液回流的驱动力的相互影响, 对保证热管的正常工作就有特殊的意义。

(3) 一般热管 尺寸介于二者之间的热管为一般热管。

四、按热管的结构分

热管可分成单管型、回路型、平板型、挠性四种。

(1) 单管型热管 蒸发段、绝热段和凝结段均在同一根管内。这是最常用的一种热管。

(2) 回路型热管 在冷热源间有一定的距离时, 热管的蒸发段与凝结段间需用较长的连接管连起来。这种型式常用于重力热管中, 如组成换热器即分离型热管换热器。

(3) 平板型热管 平板型热管的吸液芯能把液态工质沿较大的平面分布开, 从而造成一个近于等温的平板, 消除局部加热所产生的热点。也可用来制造一种极有效的散热器, 用以冷却安装在其上的发热部件。

(4) 挠性热管 挠性热管是在热管蒸发段和凝结段之间加一段可弯曲的波纹管或塑料管段, 以适应热管能在有振动源或难于组装不能使用刚性热管的情况。

五、特殊热管

(1) 可变热导热管 采用一定的方法使热管的热导率随着热源或冷源的条件改变而改变, 从而达到恒定热管某部分温度的目的。可变热导热管也称为可控热管。此种热管已日益广泛地被应用于温度控制技术中。

(2) 等温炉、黑体炉中使用的均温热管 利用热管的等温性, 可使整个炉体的温度差控制在 0.1°C 范围之内。

(3) 多组分工质热管 利用各组分工质的不同性质, 拓宽热管的工作范围, 改善热管的工作性能。

综上所述, 从不同观点出发热管可分成许许多多的类型, 但其中特别值得指出的是依靠重力回流凝结液的重力热管, 它在除太空(无重力场)应用外的许多领域内, 特别在热能工程中有极广泛的应用。

第四节 重力热管

正如上节所述, 在管壳内壁不放置毛细吸液芯, 依靠重力回流凝结液的热管称为重力

热管（或两相热虹吸管）。其工作原理如图1-2所示，重力热管的工作介质积蓄在热管的底部，蒸发段处于热管下半部，凝结段在热管的上半部，绝热段在中间。工质在蒸发段吸取了热源供给的热量后蒸发，蒸汽向上流动，通过绝热段后，在凝结段将汽化潜热交给冷源而凝结成液体，凝结液由于重力的作用回流到下半部蒸发段完成一个工作循环。借助于工质连续不断的循环，将下半部热源的热量源源不断地传递到上半部的冷源。

与具有毛细吸液芯的标准热管相比较，重力热管不是靠毛细吸液芯而是靠重力回流凝结液，这就决定了重力热管的工作条件必须使凝结段高于蒸发段（图1-2），可以垂直放置，也可与水平成一倾角放置与多孔物质的毛细抽吸力相比，用重力回流凝结液工作更加可靠。

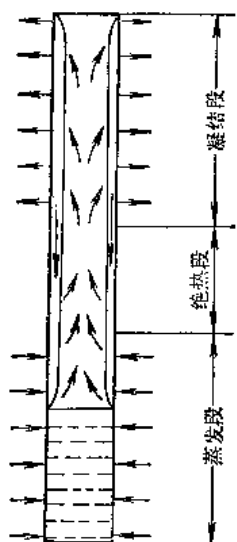


图 1-2 重力热管工作原理

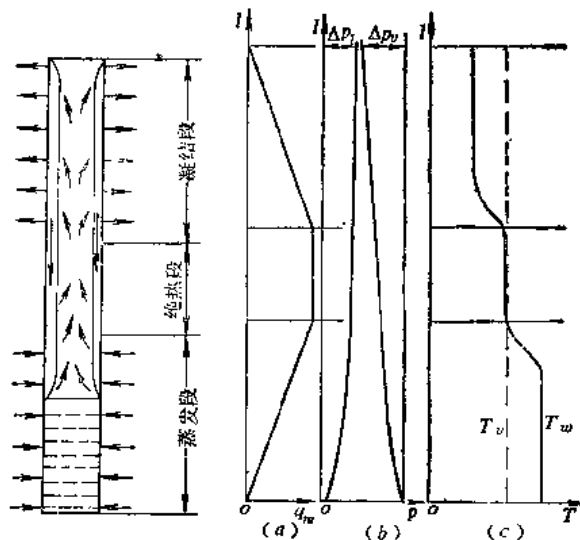


图 1-3 重力热管质量流速、压力和温度的分布
(a) 质量流速分布；(b) 压力分布；(c) 温度分布

如假设热管中工质沿蒸发段的蒸发率是均匀的，沿凝结段的凝结率也是均匀的，则其质量流量 q_m 、压力 p 和温度 T 的分布如图1-3(a)、(b)、(c)所示。

由于重力热管不需要毛细吸液芯，所以结构简单，制造成本低廉，适用于地面上的应用。目前已成功地应用于电子器件冷却、余热回收、太阳能开发、永久冻土层的稳定及地热利用等方面。可以预料，重力热管在地面各种应用，特别是能源的开发及合理利用方面具有广阔的前景。因此，本书所涉及的内容除有特殊说明外，一般均指重力热管。

在工程实践中往往还会遇到另一种既借助吸液芯（如槽道），又同时借助重力回流凝结液的热管，称为重力辅助热管。它往往应用于蒸发段与凝结段之间垂直距离较小的情况（热管与水平倾角较小时），以保证热管可靠工作。

重力热管可分为下列三种型式：

(1) 闭式重力热管 如图1-2所示，热管管壳为单管型且密闭称闭式重力热管。按工质工作状态不同又可分为单相闭式重力热管与两相闭式重力热管。因绝大部分重力热管均为两相闭式重力热管，所以一般无特殊说明重力热管即指两相闭式重力热管。

(2) 开式重力热管 由于重力场的特殊性，除常规热管的封闭型式外，还可以有与外界相通、壳体不封闭的开式重力热管。按其工质所处状态不同又可分单相开式重力热管

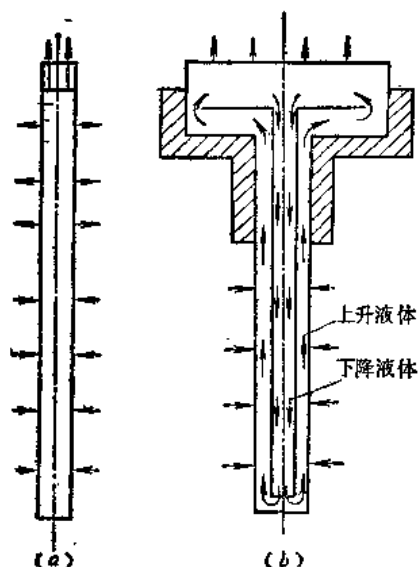


图 1-4 单相开式重力热管

(a)单管式; (b)套管式

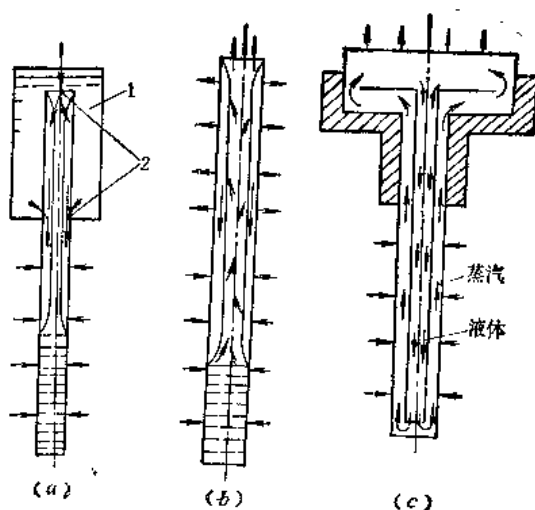


图 1-5 两相开式重力热管

(a)小孔型; (b)单管型; (c)套管型

1—水套; 2—小孔

与两相开式重力热管。如图 1-4 所示，单相开式重力热管可有单管式和套管式两种。如图 1-5 所示，两相开式重力热管可有小孔型、单管型及套管型三种。

单相开式重力热管，由于没有出现相变过程，所以其传热性能较差，严格讲不属于热管而是一种单相的热虹吸管。

两相开式重力热管，由于工质蒸发后向上流动可以把管内的不凝性气体排出热管，其凝结过程不受不凝性气体的影响，所以制造中管壳不需要特殊处理，从而降低了热管的制造成本。但由于部分蒸汽从开口处逸出，改变了换热方式，所以其换热能力会略小于同样条件下的闭式重力热管。

(3) 回路型(分离型)热管 其结构如图 1-6 所示，蒸发段与凝结段被分开，专门的汽液导管连通两个工作段，形成工质的闭合循环回路，凝结液仍借助于重力回流。这种热管有它独特的优点。几组回路便可组成换热器，即分离型热管换热器，将在第五章中详细叙述。

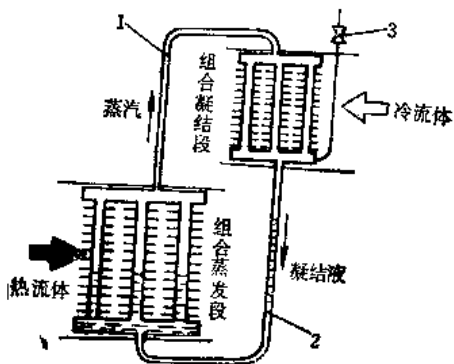


图 1-6 回路型(分离型)热管

1—汽导管; 2—液导管; 3—排气阀

参 考 文 献

- [1.1] Gaugler, R.S., Heat Transfer Device, US Patent Application, Dec. 21, 1942, Published US Patent No. 2350348, June 6, 1944.
- [1.2] Grover, G.M., Cotter, T.P., Erickson, G.F., Structures of Very High Thermal Conductance, J. APP. Phys. Vol. 35, P1990, 1964.
- [1.3] [英]P.D. 邓恩, D.A. 雷伊著, 周海云译, 热管, 国防工业出版社, 1982。
- [1.4] 靳明聪、陈远国, 热管及热管换热器, 重庆大学出版社, 1986。
- [1.5] 雷亨顺, 暖通空调中的热管——应用与制作, 中国建筑工业出版社, 1981。
- [1.6] 马同泽、侯增祺等, 热管, 科学出版社, 1983。
- [1.7] 庄骏、徐通明、石寿椿, 热管与热管换热器, 上海交通大学出版社, 1989。
- [1.8] 李亭寒、华诚生编, 热管设计与应用, 化学工业出版社, 1987。
- [1.9] 屠传经、洪荣华等, 重力热管式换热器及其在余热利用中的应用, 浙江大学出版社, 1989。
- [1.10] [美]S.W. 纪著, 蒋章焰译, 热管理论与实用, 科学出版社, 1981。

第二章 热管的特性及流动、传热过程

第一节 热管的特性

热管具有许多特性，它的应用正是以这些特性为基础的，所以只有理解了它的特性，才能真正、恰如其分地使用它。

一、良好的导热性

热管的基本工作原理表明，热管的导热是借助于饱和工质的汽化与凝结换热而实现的。这是一种相变换热亦即潜热交换过程，不仅传热强度很大，而且传热量亦可以很大。所以，热管的传热与一般固体以显热改变的方式传热有着质的不同，后者是通过自由电子的运动，分子的热运动而传递热量的，在数量上热管可以比一般固体导热大几个数量级，热管的导热能力决非一般导热器件或材料所能比拟的。

例如，设有一根直径 $d_s=20\text{mm}$ 、长 $l=1\text{m}$ 的紫铜棒，在其一端 200mm 长度内对它加热，而从另一端 200mm 的长度内对外放热，紫铜棒的其余部分完全绝热，如图2-1(a)所示。假如导热量 $Q=1000\text{W}$ ，铜的导热系数 $\lambda_{\text{cu}}=386\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，取有效长度 $l_{\text{eff}}=0.8\text{m}$ ，则由计算可得铜棒A-B两点间外壁的温差应为

$$\Delta t_{A-B} = \frac{Q l_{\text{eff}}}{A \lambda_{\text{cu}}} = 6598 (^\circ\text{C})$$

式中 A ——铜棒横截面积， m^2 。

这样大的温差在现实中显然是不可能的，这说明其热阻之大。这样尺寸的铜棒在 0.8m 距离传递 1000W 的热量是不可能的。

如把上述铜棒换成一支相同外径的铜-水热管，所有的其它条件完全相同，如图2-1(b)所示。根据实验可知，在导热量为 1000W 时，A-B两点间外壁的温差 Δt_{A-B} 最大为 15°C 左右，即此热管的当量导热系数 λ_{eff} 为

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{Q l_{\text{eff}}}{A \Delta t_{A-B}} = 169797 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$

式中 A ——热管当量横截面积，它等于同直径铜棒横截面积， m^2 。

则

$$\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{cu}}} = \frac{169797}{386} = 440$$

这就是说，在这种情况下，热管的导热能力是铜的440倍，即在相同的几何条件、相同的温差下，热管的导热量是实心铜棒的440倍。假如导热量和导热距离进一步增大，外径进一步缩小，这个导热系数之比还会进一步增大，甚至可达成千上万的数量级。所以，相对于超（电）导而言，有人把热管这种良好的导热性称之为“超导热性”。

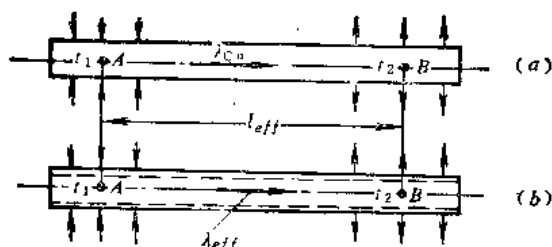


图 2-1 热管与实心铜棒导热性能的比较
(a) 铜棒; (b) 热管

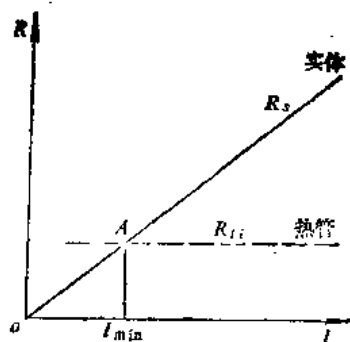


图 2-2 铜棒、热管的热阻随长度的变化
 R_{ti} —热管内部总热阻; R_s —铜棒导热热阻

为了更清楚地说明这一问题, 可从图 2-2 分析知, 外形尺寸完全相同、热流密度一致的铜棒与热管相比较, 它们的热阻 R 随长度 l 的变化情况, 只要长度 l 超过一个最小长度 l_{min} (是一个很小的数值), 长度越大, 热管的热阻比铜棒的热阻小得越多, 使用热管的优越性越大。

由于热管具有导热性能好、传热量大的特点, 在工程实践中, 如导热环节成为强化传热的关键时, 则使用热管将会使传热效果大为改进, 如航天技术中的温度控制, 电子器件及铸模的冷却等。

二、理想的等温性

在热管正常工作时, 无论是蒸发段还是凝结段, 工质均处于饱和状态, 其饱和温度与饱和压力间必须符合克劳修斯-克拉贝龙方程^[4.1] (Clausius-Clapeyron Equation)

$$dt = \frac{t_v}{p_v r} dp$$

蒸发段与凝结段间只存在使蒸汽流动的极为微小的压差 dp 。由上式可知, 由于 dp 极小, 所以相应的 dt 也必然很小, 即热管蒸发段与凝结段间的温差极小。热管是一个十分理想的等温元件, 这一特性称之为热管的等温性。

利用热管的等温性, 可以制成各种形式的热管等温炉及黑体炉, 如文献[2.2]介绍热管等温炉的轴向及径向温度偏差可小于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。对于以等温为目的的热管, 由于两端温差随传输功率的增加而增大, 所以其传输功率应尽量减至最小, 以使蒸发段、凝结段间的 $dp \rightarrow 0$, 而达到 $dt \rightarrow 0$ 的目的, 保持热管蒸汽空间温度的均一性。

由于热管在正常工作时必须有蒸汽从蒸发段流向凝结段, 蒸汽的流动又必须具有压力差的推动, 尽管微小的压力差亦将驱使蒸汽向凝结段流动, 不可避免地使蒸发段与凝结段间存在一定温差。当然, 在热管中, 与工作介质循环有关的这一温差和其它传导方式相应的温差相比是很小的, 但一支最理想的热管也绝不可能是完全等温的。

三、热流密度的可调性

除上述两特性外, 热管还可以在很大范围内调整加热段与放热段的热流密度, 也就是说热管可以把分散的热流加以集中, 反之亦然, 把集中的热流加以分散。

现在分析一支没有绝热段的热管的传热情况,如图2-3所示。由于热管在正常稳定工作时本身不产生热量,也不消耗、积蓄热量,所以蒸发段吸收的热量 Q_e 与凝结段放出的热量 Q_c 应相等,即 $Q_e=Q_c=Q$ 。

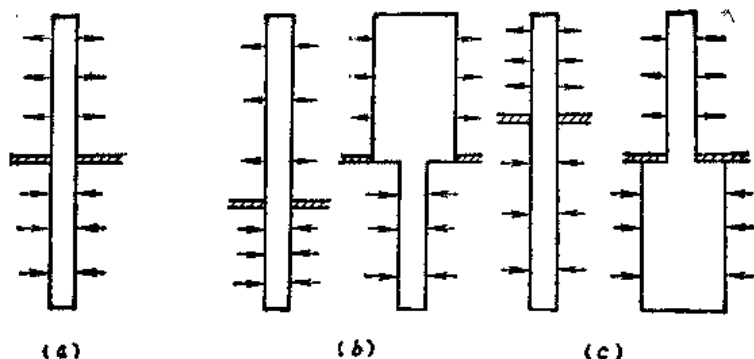


图 2-3 热管蒸发段与凝结段外表面积变化形式
(a) $A_e = A_c$; (b) $A_e < A_c$; (c) $A_e > A_c$

设蒸发段、凝结段与热源、冷源换热的外表面积为 A_e 与 A_c ,则蒸发段与凝结段的热流密度 q_e 和 q_c 为

$$q_e = \frac{Q_e}{A_e} = \frac{Q}{A_e}; \quad q_c = \frac{Q_c}{A_c} = \frac{Q}{A_c}$$

可以通过改变热管蒸发段与凝结段的外表面积 A_e 、 A_c 来调节这两个工作段的热流密度。

若使蒸发段与凝结段外表面积相等 $A_e = A_c$,如图2-3(a)所示,则两段的热流密度也相等,即 $q_e = q_c$ 。

若使蒸发段的外表面积 A_e 小于凝结段的外表面积 A_c ,即 $A_e < A_c$,如图2-3(b)所示,则蒸发段热流密度 q_e 大于凝结段热流密度 q_c ,即 $q_e > q_c$ 。

若蒸发段的外表面积 A_e 大于凝结段的外表面积 A_c ,即 $A_e > A_c$,如图2-3(c)所示,则蒸发段的热流密度 q_e 小于凝结段的热流密度 q_c ,即 $q_e < q_c$ 。

改变热流密度到底有什么现实意义呢?

首先,可利用热管把集中的热流分散处理,作为优良的散热设备使用。如有些电子元件工作时,元件的发热强度可使热流密度高达 $500\text{W}/\text{cm}^2$,很不容易有效地散热;利用热管散热器可以将热流分散到 $5\text{W}/\text{cm}^2$ 的低密度面对空气散热,即可以用风冷解决以往必须用水冷解决的问题。所以热管可用来解决电子计算机元件、大型集成电路板中的发热元件和变压器等的散热问题。

其次,可利用热管把分散的热流集中使用。如可以用较大的吸收面积 A_e 把分散的热能以低热流密度 q_e 收集起来,让它从较小的放热面积 A_c 以高热流密度 q_c 提供用户使用。利用这一特性,已研制出高功率密度的热离子换能器、热管温差电池,以及热管式太阳能