

热管与热管换热器设计基础

黄问盈 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1995年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是一本热管应用技术的专著,主要介绍了热管、热管换热器和热管技术的应用和发展,最后还在附录中收录了热管设计计算的常用数据资料。

本书可供从事节能、热力、温度调节和余热回收等工作的科技人员及大专院校师生参考。

热管与热管换热器设计基础

黄国益 编著

中国铁道出版社出版

北京市东单三条14号

责任编辑 金勇杰 封面设计 薛小芹

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本:787×1092毫米 1/32 印张:4.875 字数:106千

1995年11月 第1版 第1次印刷

印数:1—1500册

ISBN7-113-02067-4/TH·53 定价:5.20元

前 言

提高能源的使用效率往往是一个国家或地区经济发展战略的重要目标之一。为了人类自身更好地生存和发展,基于当今世界能源存储与消耗形势以及环境保护等方面的迫切要求,节能问题更显突出。节约能源甚至被喻为继煤炭、石油、天然气和水电之后的“第五常规能源”。因此,有效可靠、经济实用的节能技术越来越受到青睐,热管换热器就是节能技术中可供优选的方案之一。

由于热管元件不仅传热性能优异,而且具有多种特殊功能,使热管问世不久,就获得颇为广泛的应用。即使在尺寸受限、条件苛刻或其它环境特殊的一些特定场合,传统的换热方式和手段通常无法应用或者事倍功半,甚至难以奏效,但是热管技术往往都能灵活运用,因而崭露头角。可以毫不夸张地说,从空间到地面,从军工到民用,凡是需要热量交换的场合,热管技术总有用武之地,铁路行业自然也不例外。

基于热管技术数十年的进展,借鉴国内外有关书刊,结合作者的工作实践与体会,将这本书奉献给读者。本书重在实用,力求简明,避免过多的理论分析和探索,着重介绍热管技术的实用设计计算原则和方法,并配合计算示例,还将必要的资料和数据列入附录,以利读者参考应用。

考虑到一个系统从设计、试验、制造或施工、到运用、维修和管理是一个全过程,其体现出的科学的可靠性技术与严格的管理制度是一项技术(一项工程或一个产品)的质量保证和基础,而设计计算问题只是其中的一个重要环节,热管技术的应用与扩展亦是如此,为此本书还简要涉及热管的制造与试

验以及热管换热器的总体设计等方面内容。

本书出版得到铁路科技图书出版基金评审委员会的大力支持与资助,承蒙齐起生与林连照两位同志详细审阅原稿并提出宝贵具体意见,本书还得到李立美同志的支持和帮助,在此一并致意,深表谢忱。

因本人水平所限,不妥甚或谬误之处,敬请读者批评指正。

作 者

一九九四年底

目 录

第一章 热 管	1
第一节 热管进展简介.....	1
第二节 热管原理.....	2
第三节 热管的工作特性及限制.....	5
第四节 简单重力热管及其传热强化.....	8
第五节 热管的工作介质	13
第六节 热管的吸液芯	17
第七节 热管的充液量	18
第八节 管壳选择原则与热管材料组合的 相容性	19
第九节 热管元件的设计原则	23
第十节 热管的制造与试验	29
第二章 热管换热器	38
第一节 热管换热器简介	38
第二节 热管换热器的几何参数	41
第三节 迎风流速及热流体出口温度的选定	51
第四节 热管管束的换热计算	53
第五节 流体横掠管束的阻力	58
第六节 热管换热器的热力计算	63
第七节 热管换热器热力计算示例	83
第八节 热管换热器“离散型”设计原理	89
第九节 热管换热器的结构设计问题	97
第十节 分离型热管换热器.....	101
第三章 热管技术的应用与扩展	107

第一节	热管技术的应用	107
第二节	热管技术的扩展	113
附录 A	热管用主要工作介质的热物性	118
附录 B	干空气的热物性	128
附录 C	在大气压力 ($p=101.3\text{kPa}$) 下烟气的 热物性	130
附录 D	饱和水的热物性	131
附录 E	干饱和水蒸汽的热物性	133
附录 F	几种常用材料的拉伸强度极限	135
附录 G	主要物理量的单位换算关系	136
附录 H	本书采用主要符号表	139
主要参考文献		149

第一章 热 管

第一节 热管进展简介

1942年,美国的 R. S. Gangler 首次提出了热管的构想,申请并获得了专利,但因未能付诸实践而影响甚微。直到 60 年代初美国 Los Alamos 科学实验室的 G. M. Grover 及其合作者 T. P. Cotter 与 G. F. Erikson 独立地重新发明这种高效传热元件并定名为 Heat Pipe,热管的构思才得以实现。G. M. Grover 等人首先制成高温钠热管并进行了性能测试,其结果于 1964 年发表。三十年来,美、德、意、英、法、原苏联和日本等国相继对热管的理论和应用开展了大量的试验研究,有些已形成系列商业产品。热管技术首先在卫星的温度控制上使用,随即在电子、电机的散热冷却和余热利用等诸方面得到普遍应用。目前,在世界范围内,从空间到地面,从军工到民用,在航天、航空、电子、电机、核工业、热工、建筑、医疗、温度调节、余热回收以及太阳能与地热利用等方面已有数以百万计的热管正在运行中。

我国于 70 年代初开始对热管技术进行探索和研究。1972 年我国第一根钠热管成功地投入运行,嗣后从航天技术到民用工业,热管技术都取得进展并获得应用。有关科研单位和高等院校在热管技术的应用和基础研究方面做了大量工作,对低温、中温和高温热管都进行了研制和性能研究,使热管在空间技术、电子电器、能源工程等多方面获得应用。热管换热器做为余热回收利用的有效手段在我国已大量使用,我国对广

泛使用的简单重力热管(热虹吸)的理论和实践都进行了大量探索并取得成效。我国铁路已于 1981 年在蒸汽机车余热回收利用中首次应用了热管技术。

从总体而言,热管技术的理论与实验仍在深化,众多领域的应用仍在扩展,不同功能的各型热管的出现使热管技术的应用日趋向纵深方向发展。热管向小型微型化和大型超大型化两极延伸以及适应某些特种用途所需的进展,尤其是当今世界受到普遍关注的节能迫切需求,使热管技术更加受到青睐,从而更加促进了相关技术的发展。

第二节 热管原理

标准热管可简单定义为:利用蓄热介质毛细力循环作用的一种换热元件。

随着热管技术的进展,更通用更广义的热管定义是:一个封闭的依靠工质相变传热的元件。

图 1—1 为标准热管结构示意图,图 1—2 为标准热管作用示意图。

标准热管由容器壁(管壳)、吸液芯及工作介质三部分组成。热管沿轴

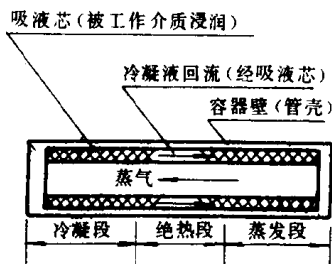
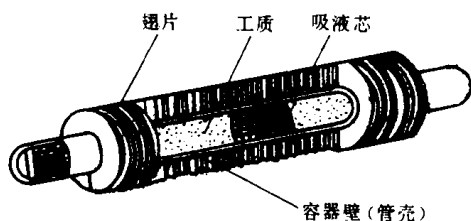


图 1—1 标准热管结构示意图

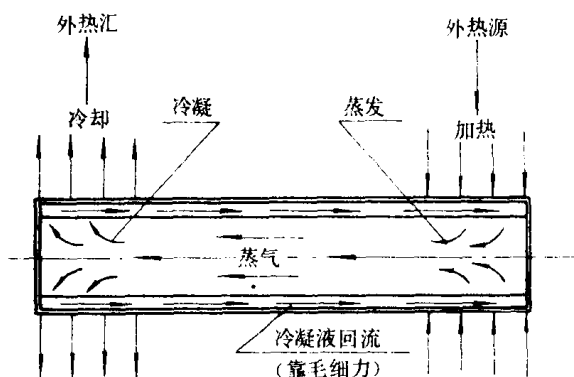


图 1—2 标准热管作用示意图

向可分为蒸发段、绝热段和冷凝段等三个工作段。管内介质在高度真空($10^{-3} \sim 10^{-4} \text{Pa}$)下极易沸腾(深冷热管的工作介质如氨、氮等在常温下已处于蒸发状态)。管内介质(液态)在蒸发段吸收外热源的热量而蒸发,形成蒸气(气态)向冷凝段流动,到冷凝段又被冷凝为液体而向外热汇传出潜热,被冷凝的液体通过吸液芯的毛细作用回流到蒸发段又再次被加热蒸发,如此反复循环,只要介质的通路畅通,能保持足够的毛细压力,这种循环就会继续下去。从管内液体的沸腾吸热到蒸气的冷凝放热,工作介质由液态—气态—液态构成闭路循环,这样就可借助介质的相变来进行热量的转移。因为以气化潜热方式所传递的热量,大大超过了以显热方式传递的热量,所以热管所能传递的热量比同尺寸的金属棒所能传递的热量要超出几个数量级,因此它是一种高效的换热元件。

综上所述,热管传热的六个连续过程是:(1)吸热;(2)蒸发;(3)蒸气输送;(4)冷凝;(5)放热;(6)液体回流。它们相互衔接并连续进行,而工作介质构成闭合循环。

热管的主要特点有:

(1)热阻小,传热快,传热量大

例如工作温度 1000K 时的钠热管,相当导热系数的数量级可达 $10^6 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,而其管壳材料(镍铬钢)的导热系数为 $25 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,前者为后者的 40000 倍。又如气—气换热器中热管的传热系数为光管的 10 倍以上,为翅片管的 6 倍以上。

(2)均温性能好

热管工作时,蒸发段产生的蒸气高速流向冷凝段而压降甚微,故管壳内接近等压。由此热管内两端蒸气温差很小,一般只有 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ 。这个特点可用以研制均温炉,使温差 $\leq 0.1^\circ\text{C}$ 。

(3)传热方向可逆,热流密度可变

热管处于失重状态或水平放置时,任一端受热即成蒸发段,另一端对外散热即成冷凝段,反之亦然,这种传热方向的可逆性可用以制造热管空调余热利用装置。冬天,室内温度高于室外,室内热气排出,热管吸热,将热量传给室外进来的新鲜空气;夏天,室外热空气吸入,将热量传给室内排出的空气,进入的新鲜空气得以冷却。

热流密度可通过改变蒸发段及冷凝段的换热表面积(如改变壳体的直径或长度,或加翅片扩展表面积)的方式改变,这种特性可用于集中热流分散处理,也可用于分散热流集中使用。

(4)应用温度范围广,适应性强

目前,热管能适应的温度范围可达 $-200 \sim 2000^\circ\text{C}$ (因工作介质与管壳材料等而异)。热管应用不仅不受热源类型的限制,其蒸发段和冷凝段还可制成各种形状,也可制成柔性热管。

此外,热管可以满足一些特殊要求,如单向传热——热二极管可以保护输油管道的永久冻土层;可控热管(可变热导热管)中的可控充气热管使工作温度基本不变;热管温度开关可使工作温度高于介质的凝固点时,热管投入运行,反之,则热管停止工作。

(5)热源和热汇分开,冷热流不相混杂。工作循环不需要辅助动力。

(6)结构简单,质量轻,体积小,工作可靠。

第三节 热管的工作特性及限制

热管的工作特性示意图见图 1—3,蒸发段与冷凝段温差 Δt 很小时,就能传递很大的热量,如图 1—3 中实线所示。

尽管热管具有极好的传热性能,但也受到一定限制(参见图 1—4 所示的各种极限),即工质流动过程的限制。达到某些极限后,工质不能连续流动,例如介质冷凝后的回流量不能满足蒸发段的蒸发量

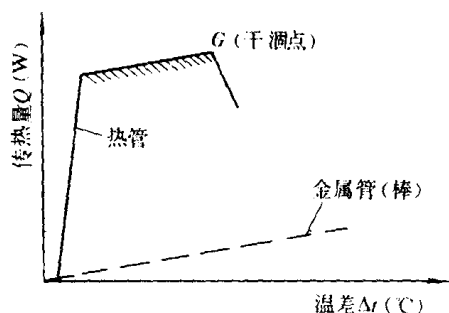


图 1—3 热管的工作特性示意图

时,就会造成循环障碍,即使温差加大,热流量也增加甚微,甚至不会增加,如图 1—3 中的阴影线。当工作介质的循环中断,蒸发段液体耗尽时就形成干涸点,见图 1—3 中 G 点。热管发生干涸后,如果热源温度向上浮动,管壳温度会急剧上升并可能烧毁;如果热源温度稳定而不过高,热管达到干涸点后,就

简单地停止工作而失效,这时的失效热管只能像一支普通的金属管(棒)一样导热,如图 1—3 中的虚线所示,其传递的热量大大低于正常工作的热管。

热管的工作限制示意图见图 1—4。

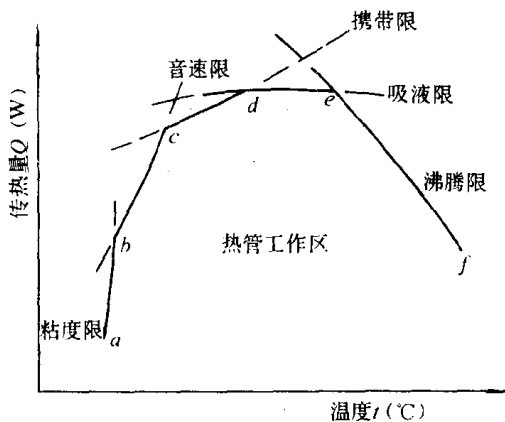


图 1—4 热管传热的工作限制示意图

热管只能在 $abcdef$ 的实线范围以下工作。温度较低时,受到介质粘滞力的限制,称为粘度限,如图 1—4 中的 ab 线,粘度限是对液态金属的介质而言。在热管蒸发段,蒸气温度上升,密度下降,速度增高,当蒸气在蒸发段出口达到音速时,就造成阻塞,如同收缩喷管喉部达到音速时一样,这时即使降低汇温,增加散热率,热流量也不会增加,只能降低冷凝段温度,形成超音速蒸气,这种限制称为音速限,如图 1—4 中 bc 线。热管中蒸气与液体的流向相反,存在剪切力,当蒸气速度足够高时,就可将液滴从液体界面拉下带往冷凝段,这时可频繁地听到液滴撞击声,蒸发段介质过早耗尽,中断循环,这种限制称为携带限,见图中 cd 线。要使热管连续工作,热管中吸液芯

不能烧干,以保证液体回流,使吸液芯内毛细作用能保证液体供给,这种限制称为吸液限,如图中 de 线。因蒸发段液体压力小于液气分界面的饱和蒸气压力(相差毛细压力),故蒸发段吸液芯内可能产生气泡,这种泡核沸腾造成热点并阻碍液体循环,这种限制称为沸腾限,如图中 ef 线。

要保证热管正常运行,不受吸液限制,热管毛细压力头 Δp_c 必须大于等于热管的总压降,即:

$$\Delta p_c \geq \Delta p_l + \Delta p_v + \Delta p_g \quad (1-1)$$

式中 Δp_l ——液体从冷凝段回流至蒸发段的压降;

Δp_v ——蒸气自蒸发段流向冷凝段所需压差;

Δp_g ——重力压头。

重力压头可正可负,或为零值(水平热管)。如重力压头为负值,即蒸发段处于冷凝段之下,则为重力辅助式热管。如此时取消吸液芯,液体回流全靠重力作用,则为简单重力热管(或称两相闭式热虹吸管,简称热虹吸),如图 1-5。

此时

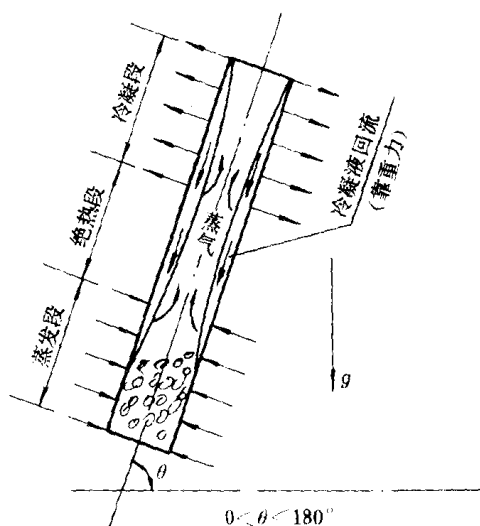


图 1-5 简单重力热管(热虹吸)示意图

$$\Delta p_g \geq \Delta p_l + \Delta p_v \quad (1-2)$$

可见简单重力热管不能在失重(零重力)状态或水平位置工作。

根据冷凝后液体回流的方式区分,除标准热管(靠吸液芯毛细作用回流)和简单重力热管(靠重力回流)外,还有旋转热管(靠离心力,见图 1—6)以及电力液或磁液力热管(靠电力液或磁液力)和渗析热管(靠渗透力)等。

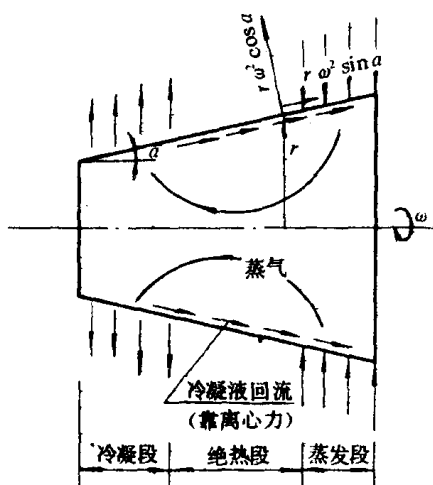


图 1—6 旋转热管示意图

第四节 简单重力热管及其传热强化

简单重力热管(热虹吸)的管壳内壁无吸液芯,必须将冷凝段置于蒸发段之上,保持足够的重力压头方能运行。

简单重力热管的工作见图 1—7 示意。

蒸发段吸收外热源的热量,工质蒸发为蒸气,向上升腾到冷凝段向外热汇传出潜热,工质冷凝形成附壁液膜,因重力作用沿内壁下流,回流到蒸发段,又再次被气化,构成循环。一般简单重力热管的充液量较大,除冷凝液体在内壁形成下降液膜外,尚有部分积存蒸发段底部,形成液池,见图 1—7(a)。观察表明,随热流密度的不同,蒸发段下降液膜流动分为连续稳定的液膜和稳定的溪流(液膜分裂)及不稳定溪流的波状膜,波状膜中有时还存在泡核。表面蒸发的连续稳定的下降液膜对简单重力热管工作有利。一般在蒸发段同时存在下降液膜

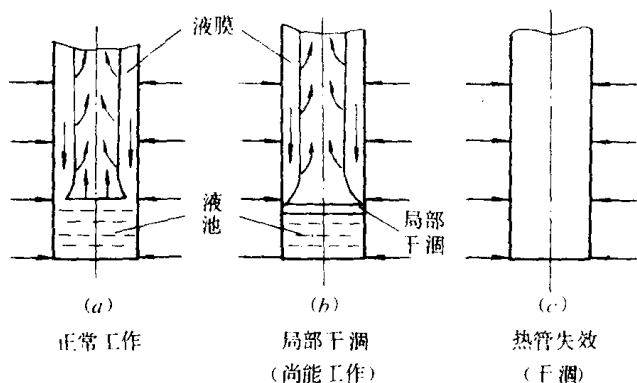


图 1—7 简单重力热管不同工作情况(蒸发段)

和气液两相混合的液池,二者传热蒸发机理不同。

简单重力热管的工作限制可能有:音速限、携带限、沸腾限和干涸限等。由于热流量增加,液膜蒸发加快,下降液膜蒸发量过大时,可能在到达液池前就已干涸,见图 1—7(b)。这时局部壁温上升,但热管尚能运行,下降液膜厚度为零时对应的热流量即为干涸限。充液量过小时,热流稍有增加,工质循环量加大,蒸发段底部就可能干涸而不能工作,见图 1—7(c)。

简单重力热管因其结构简单、成本低廉、工作可靠和传热性能优良而在民用工业中的余热回收、电子设备冷却以及地热和太阳能的开发利用等领域获得广泛应用,受到国内外普遍关注。

重力热管的有利倾角(轴线与水平线夹角)可参见图 1—8 及图 1—9。后者是大型水热管(长 5.48m)的试验结果,虽然有所差别,但总体可见,重力热管倾角至少要超过

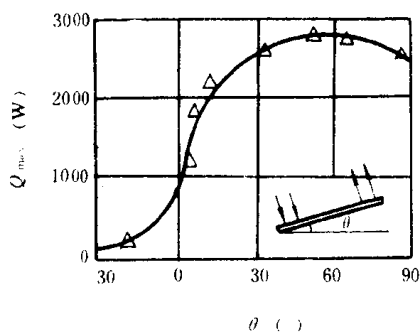


图 1—8 重力热管最大轴向热流量
与倾角的关系曲线

10°以上,以 20°~60°为宜。

随着余热回收量的增大和低温余热的利用,以及小温差新能源开发等都要求提高换热元件的单管热流量,相应要求增加长度,由此蒸发薄膜和冷凝液膜增厚,两段热阻增加。

为了降低热阻,可采取各种强化传热措

施,重庆大学就进行了很有借鉴意义的探索^[5],如:

(1) 设置开孔抑泡管

在蒸发段设置开孔抑泡管(见图 1—10),与热管同心而与热管内壁间隙约为 1mm。

开孔抑泡管使蒸发段回流液膜及下底液池形成环隙沸腾,抑泡管的开孔是供蒸气逸出,气泡在蒸发段壁面形成后,因抑泡管的抑制

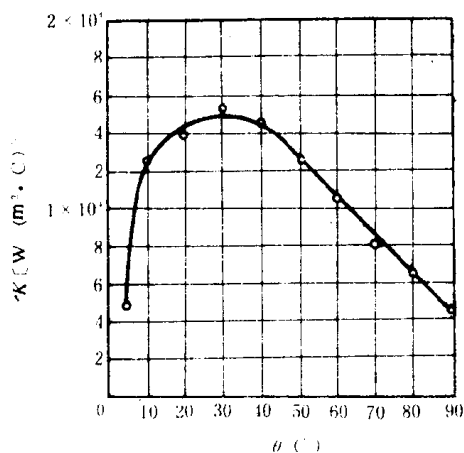


图 1—9 重力热管总传热系数与
倾角的关系曲线

工作介质:水;充液率 15%;热流量 3.34kW。

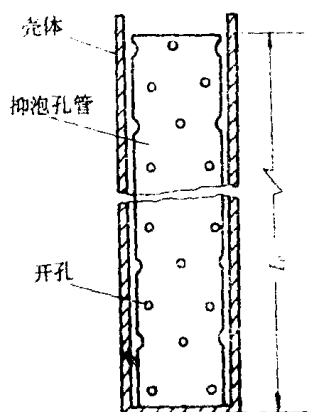


图 1-10 蒸发段的开孔抑泡管

作用不能很快脱离而是继续扩大,从而加大了泡底微层液膜面积和延长了微层蒸发时间,使蒸发段的传热得以强化。试验表明,加装开孔抑泡管后,可降低传热温差,提高平均沸腾传热系数 1~3 倍(工质为水)、1~2 倍(工质为甲醇)。此外还可避免液膜沉降过程中出现不连续的甚至是波状的溪流。

(2) 设置溢流环同心导管
在冷凝段设置溢流环同心

导管(见图 1-11),溢流环同心导管由中心导气管及套于其上的等距排列的若干溢流环组成。溢流环下部的导管处沿圆周方向等距开有若干气孔,以备工质蒸气进入,导气管下方为喇叭状馈液环。工质蒸气经导管气孔进入各凝结元段冷凝,液体经溢流环导流到中心导管的外壁,沿环缝顺流而下,至馈液环处又导向汇流到绝热段内壁再往下回流。

由于被溢流环分成的各冷凝元段的冷凝液体能各自独立流出,所以有效地减小了冷凝液膜的厚度,冷凝温差及冷凝段热阻也得以降

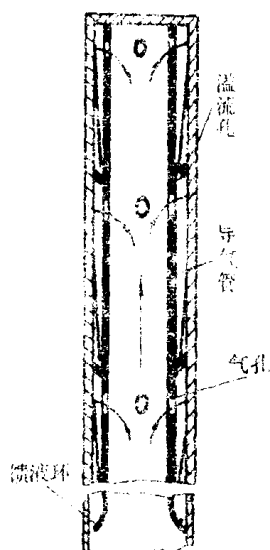


图 1-11 冷凝段的溢流环同心导管