

# 热管及热管用金属多孔材料

奚正平, 汤慧萍, 朱纪磊, 廖际常

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 热管是一种能快速将热能从一点传至另一点的装置, 由于它具有超常的热传导能力, 而且几乎没有热损耗, 其导热系数为铜的数千倍, 被称作传热超导体。本文简要介绍了热管的工作原理和应用现状, 论述了近年来热管的关键部件—多孔芯体的研究进展。

**关键词:** 热管; 金属多孔材料; 热交换

**中图分类号:** TG 113.22+3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2006)S2-418-05

## 1 前言

自从二次大战之后, 由于工程科学及技术的迅速发展, 对动力的需要大量增加。巨大的动力需要巨大的热能量, 而这热能量必须依赖有效的传热程序来处理。近 20 年来航空及太空工程的发达造成许多高速物体在大气中飞行, 也带来许多热传递方面的问题。例如, 原子能发电炉中产生的大量热能必须要自炉中导出, 才能转变成电能。高速的飞弹及宇宙飞船重返大气层时与空气摩擦会产生极高的温度。如这些高热不及时传出去, 那么原子炉及宇宙飞船就有焚毁的危险。此外, 几乎所有的电器(甚至包括电晶体)在电流通过时会产生热量, 这些热量必须有有效的引导到适当的容纳处才不致于对电器有所损害。因此热传递在近代工程科学中已成为一项非常重要的问题。如今在美国许多大学的机械工程系中热传递都已成为主要的部门之一<sup>[1]</sup>。

热管是一种能快速将热能从一点传至另一点的装置, 由于它具有超常的热传导能力, 而且几乎没有热损耗, 因此它被称作传热超导体, 其导热系数为铜的数千倍<sup>[2,3]</sup>。它首先在 1942 年由 R.S.Gaugler 提出, 但直到 1963 年才由 G.M.Grover 发明出来<sup>[4]</sup>。热管由于其优异的传热特性而广泛用于宇航工业和高科技领域, 成为现代科技不可缺少的材料<sup>[5,6]</sup>, 特别是在空间技术、航天飞行器中的温度平衡, 卫星中的制冷、温度控制和散热设计, 航天器中的冷却调节器, 发射温度下反应器的除热以及消除因发射器和收集器的温度梯度引起的一些麻烦等领域中, 在民用领域, 手提电脑的散热、现代空调冷冻技术等无不用到热管。

本文简要介绍了热管的工作原理和应用, 重点论述了近年来热管的关键部件—多孔芯体的研究进展。

## 2 热管原理

### 2.1 热管传热原理

热传递是热能由高温处传到低温处的现象, 它通常可分为传导、辐射及对流 3 种。另外还有 2 种热传递现象, 就是沸腾热传递和冷凝热传递。热管的传热现象, 并不属于以上热传递中之任何一种, 它是传导、蒸发、对流及冷凝等现象的组合。其导热系数比同体积的任何金属棒高出千倍以上, 因此已引起美国及欧洲从事热传递研究者的极大兴趣<sup>[7]</sup>。

热管原理可以简述为<sup>[8-10]</sup>: 当热管的一端置于较高温处而让另一端在较低温处时, 热首先由高温处穿过金属管壁进入多孔芯体中, 多孔芯体内的的工作液受热开始蒸发。热管在高温处的部分便称之为蒸发部分。蒸发后的汽体聚集在蒸发部分的中空管内, 同时向热管的另一端流动。当汽体到达较冷的另一端时便开始冷凝, 在此时热量就由汽体穿过多孔芯体、工作液及金属管壁而传入较低温部分。因此热管在较低温的部分便称之为冷凝部分。在冷凝部分内原先由蒸发部分蒸发的汽体又凝结成了液体, 这些冷凝后的液体因毛细现象的作用自冷凝部分又流回到蒸发部分, 如此流体循环不息, 热量由高温处便传到了低温处, 这便是热管的传热原理。图 1 为热管的传热原理图。

因为蒸发和冷凝现象在几乎相同的汽压下进行, 管内的温差非常小。如把热管和同体积金属棒的二端置于同样温差之下, 热管的导热系数可以达到金属棒的千倍以上。换句话说, 当同样的热量通过热管和同体

收稿日期: 2006-07-31

作者简介: 奚正平, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231095

积的金属棒时, 热管二端的温差要比金属棒小很多。由于这种特性, 热管常被称为“近等温导热”装置<sup>[11]</sup>。

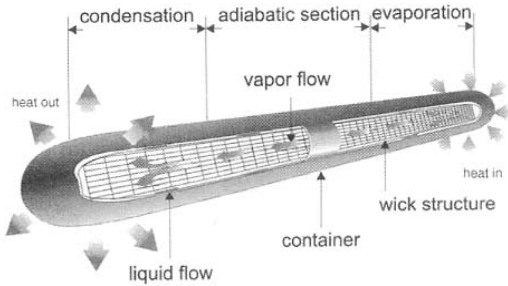


图 1 热管工作原理

Fig.1 Heat transporting principle of heat pipe

## 2.2 热管结构

大致说来, 热管是一根细长、中空、二头封闭的金属管子。外部形状不拘, 在理论上几乎任何形状的设计都是可以的, 其结构依导热率及温度的不同而异。实际使用的热管尺寸根据需从  $\Phi 0.5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  到直径大于  $10\text{ cm}$  长达数米的规格。图 2 为典型的热管换热器结构图。

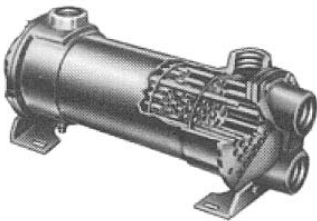


图 2 典型的热管热交换器

Fig.2 Structure of special heat pipe exchanger

热管包含 3 个基本部分: 壳体、工作流体和内装的多孔芯体<sup>[12]</sup>。如图 1 示。

壳体的作用是将工作流体与外界环境分开, 目前已制成的热管壳体材料有黄铜、镍、不锈钢、钛、钨及其它合金。要求壳体材料具有高的比强度和导热性、对工作流体和外界环境的稳定性高、无空隙, 并且易于制造及进行各种加工<sup>[13]</sup>。

热管工作液种类繁多, 它包括钾、钠、铯、铷、锂、铟、水银、水、木酒精、丙酮、冷冻剂 (Freons) 液态氮、液态氦、液态氧及其它一些无机盐等。热管外壳及其工作液的选择视热管的应用情况而定<sup>[14]</sup>。例如在  $1000^\circ\text{C}$  以上的高温时, 热管内部多用钾、钠等液

态金属, 但热管用于  $-190^\circ\text{C}$  时, 则内部多用液态氮等。

工作流体的选择首先应考虑热管使用的温度范围, 在此前提下还要求工作液与芯材及壳体间相容稳定, 具有好的热稳定性、高的潜热和导热性能, 液态和气态的粘度低, 为保证高的毛细管力, 工作液的表面张力应足够高。

热管在结构及原理上最特殊的一点是毛细物 (多孔芯体) 及毛细现象的应用<sup>[15]</sup>。利用工作液体热胀冷缩提供的压差, 在毛细现象的作用下, 使冷凝部分的液体可以不需外力的作用而流回蒸发部分, 这使热管成为一个完全独立而没有活动零件的导热装置, 同时也使热管成为太空中传热的独特装置。因此, 多孔芯体是热管的关键构件之一, 除了利用毛细管作用输送工作流体外, 另一个作用是将流体分散到气化区域周围所有热管能够吸收到热量的地方。

多孔芯体通常由铜、镍、不锈钢、钛等制成, 又称为毛细管灯芯材料, 有带筋管, 也有粉末、丝网、纤维毡等多孔材料。图 3 是两种典型的多孔芯体。

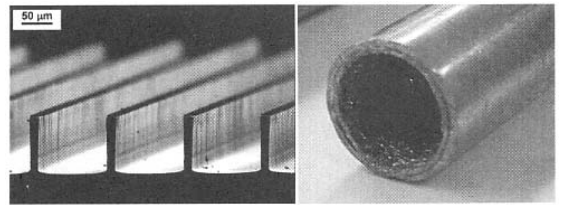


图 3 典型的多孔芯体

Fig.3 Two types of porous wick structure: (a) grooved tube; (b) metal felt wick heat pipes

## 3 多孔芯体的研究进展

多孔芯体的选用要考虑众多因素, 其中一些与工作流体的特性密切相关。多孔芯体通常采用金属泡沫或毡, 以及纤维材料, 比如陶瓷纤维, 但陶瓷纤维有一个明显的缺点: 陶瓷纤维韧性不足, 需要连续的金属网支撑, 陶瓷本身是稳定的, 但支撑用的金属网容易引发问题。

除了芯体的材质外, 另外 2 个因素是: 多孔芯体的孔径和厚度<sup>[16]</sup>。随着芯体孔径的增大, 芯体的最大毛细管力降低, 但其透过性提高; 芯体的传输性能随着厚度的增加而提高。

常用作多孔芯体的材料有<sup>[13,17]</sup>:

① 多孔金属纤维及丝网 (Metallic fibre and Screen Mesh)。金属纤维及丝网是作为常用的热管芯体材料, 用其制作的多孔芯体的价格低、易于加工制造、不易

受飞散/毛细等限制,但内网易因弯曲而变形,影响蒸汽流断截面积,且液体回流较不容易(扩散)。有研究报道,用金属纤维毡装配的热管用于热交换器时,热效率为普通热交换器的 4 倍,用复合丝网作为孔芯时,热效率提高 6 倍。

② 带筋管 (grooved tube)。带筋管有内螺旋带筋管和外螺旋带筋管。其优良传热性能广泛用作电厂锅炉传热管,可使火力发电厂锅炉效率大幅度提高<sup>[18]</sup>。而钛合金带筋管由于具有比强度高,耐腐蚀,可用于飞机上的液压管、空调管、舰船上的凝汽器,以及核反应堆管路系统中使用的热管<sup>[19]</sup>。

带筋管轴向的沟纹可以产生小的毛细管力,可用于水平环境或有重力辅助的环境中的低热量热管。当与金属网连接时,性能会得到提升。其价格便宜,生产容易,且不易受音速限制。但沟渠容易因弯曲而堵塞,从而影响液体回流的效果。

③ 粉末烧结。材料中具有“气道”(通孔)可以增加工作流体的流速。粉末烧结芯材经弯曲或扁平加工后,仍能维持最大的蒸汽流断截面积,并保护及维持液体单向回流。因此较不易受音速/飞散/毛细等限制。缺点是制造较不容易,单价成本较高。

近来,用碳纤维制作芯材引起众多研究者的兴趣,因为碳纤维表面长度方向上有许多细小的沟纹显著提高了材料的毛细管力,而且碳纤维具有很好的化学稳定性。

## 4 热管的应用

从结构上来看,热管具有质量小、外表单纯、无活动零件、与其它仪器连接简单、耐用可靠而无噪音等优点<sup>[20]</sup>;从原理上来看,热管具有高效率及近等温的热传导性能,可用于太空失重状态。这些优点几乎可使热管取代所有的热传导装置。其中它的近等温导热性及在失重状态下的适应力尤其为太空工程界所重视,如在 1965 年秋季,美国太空总署发射的探险者 36 号测地卫星上已经用热管作为传热装置,在 2 个月的卫星运行中,热管的作用保持恒定。

由于热管的诸多独特优点,其应用范围非常广泛;它可用于 $-230^{\circ}\text{C}$ 的低温仪器中,也可用于高达 $1500^{\circ}\text{C}$ 的液态金属反应炉中<sup>[21]</sup>。

(1) 能量转换。当含有高动能的热离子撞击到热管的一端时,热离子的动能变成了热能而传至热管的另一端,此称为热离子转换器,此外,在太空上热管可置于同位素热电机中,使原子能转变成热能,再变成电能,以供给人造卫星及太空船之用。

(2) 热开关。当采用特种的毛细物体及工作液时,

热管的作用范围可在控制之下。例如,当温度低于工作液的冰点或导热量超过热管的导热极限时热管无法作用。换句话说,在外界温度变化很大时,热管仅作用于一定的温度范围之内,在此范围之外热管终止其作用,犹如自动开关一般。热管的这种性能多用于自动控制及低温仪器之中。

(3) “热二极管”(Thermal diode)。当热管采用不同的毛细物时,它具有不同的导热极限,通常粗松的毛细物具有较低的导热极限。如将粗松及细密的毛细物同时置于一个热管的两端,则加热热管的不同端面时便会有不同的传热方向:在热管外界温度变化很大的情形下,如细密毛细物的一端(甲端)在高温内而粗松毛细物的一端(乙端)在低温内时,热量可有效地自甲端传至乙端;反之,当乙端在高温内而甲端在低温内时,乙端由于导热极限的限制无法有效地传热至甲端。综合来说,热由甲端传至乙端易,而由乙端传至甲端难。这种现象有如二极真空管的作用一般。热管的此种功能多用于太空及低温仪器之中。

(4) 温度控制。当热管外界温度变化很大时,其导热量也随之变化,然而热管内部温度的变化却很小,此种热屏蔽(Heat shield)性能及热管的近等温导热性能可用于宇宙飞行服、宇宙飞船及人造卫星的温度调节及控制上。如果采用两种不同的工作液于一个热管中时,热管就会产生两个温度区,这种情形也适合某些特殊的温度控制。

(5) 传热。热管可伸出于发热装置之外,以增加发热装置的散热面积。由于热管的导热量大于同体积的金属棒,它可取代一般散热鳍的金属片而增加其散热量<sup>[22]</sup>。热管的此种功能多用于电子仪器的散热装置及人造卫星上的辐射鳍等。美军曾在越野车辆驱动轮的马达上装上热管,一组装进定子,另一组装进转子。这种设计省却了所有的外部冷却风扇,并且减少了马达活动部分的体积。图 4 为计算机 CPU 用热管散热器。

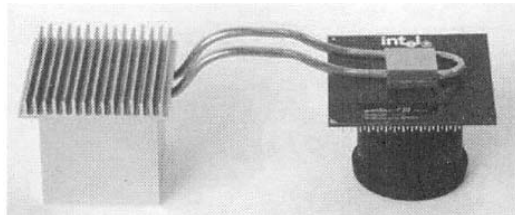


图 4 CPU 热管散热器

Fig.4 CPU cooler used heat pipe

热管已用于铁路、公路的建设与日常维护领域,如美国联邦公路管理局正在设法用热管来使道路免于

结冰<sup>[23]</sup>, 我国的新修建的青藏铁路利用热管技术防止土壤永冻层融化<sup>[24]</sup>。热管的一端埋入道路, 另一端延伸入地下 30 英尺或 40 英尺处, 将天然地热吸上来融解道路的冰雪。但因受成本限制, 只能装设在转弯处、桥梁、陡坡等特别危险的地段。相同的方法也可用来开发接近地表面的地热能源。

(6) 节能。公共建筑规模大, 换气量也大, 对大型建筑, 排气所带走的能量约占总负荷的 30%~40% 左右, 能源回收潜力大。热管技术在建筑节能中具有广阔的应用前景, 主要用于自然通风热(冷)回收和集中排风热(冷)回收<sup>[25]</sup>。热管换热器具备优良的传热性能和灵活的结构形式, 能够在竖管风道自然排风系统得到有效利用。试验表明, 在风道风速 0.5m/s, 热回收效率 50% 的情形下, 其引起的压力损失约为 1Pa<sup>[26]</sup>。

真空管热管集热器具有防干烧、防冻裂、防止热流逆向传递引起的热损失等特点, 使得太阳能热水器在广泛的气候区域得以应用, 热管型集热器成为太阳能集热的一种重要形式<sup>[27]</sup>。

热管应用在空调系统中具有人体感觉更加舒适、节能降噪等优点<sup>[28,29]</sup>。在基本不改变空调器现有配置的基础上, 加上热管换热装置, 组成热管—空调器组合系统, 冬季可回收排风热能, 减少空调器负荷, 达到节能的目的; 夏季可提高空调系统制冷能力和去湿能力, 完全或部分取消再热负荷, 提高舒适度<sup>[30]</sup>。Wu 等人得到的结论为: 系统制冷量提高 20%~32.7%, 在送风相对湿度 < 70% 的条件下, 热管换热器可以替代再热器, 在送风相对湿度 ≥ 70% 的条件下, 可能需要辅助再热<sup>[31]</sup>。Mcfarland 等人指出: 对于标准为温度 22℃、相对湿度 50% 的房间空调工况, 热管—空调器组合系统除湿能力提高 62%, 再热负荷减少 20%, 系统潜能效率提高 90%, 空调器标准使用寿命可达 10 年以上<sup>[32]</sup>。

## 5 结语

热管的第一个商业用途是用于卫星上。由于热管较高的成本和较小的需求, 使得热管进入商业领域的进程非常缓慢。随着高端军用设备和高端电子产品的需求, 30 年来热管技术得到了飞速发展, 并且逐渐被市场所接受。随着热管的普及, 增长的需求降低了热管的制造成本。从 20 世纪 90 年代初, 热管开始被大量用于家用电器。今天, 热管已经被广泛应用于航空航天、军事装备、核能、交通运输、空调制冷制热、物料干燥、太阳能和地热能利用等领域中的高效传热、散热、热量回收等过程, 是许多特定领域中必不可少

的关键部件。

随着热管技术的不断进步, 热管的应用领域会不断拓展。然而热管应用方面的潜力, 还依赖理论方面的研究才能更有效的发挥其作用。许多工程问题还有待系统和深入研究, 其经济性也有待更多的实际工程检验。

## 参考文献 References

- [1] [http://www.hhmz.net/news/3/2005-5-4\\_1144115247.html](http://www.hhmz.net/news/3/2005-5-4_1144115247.html)
- [2] Andrews J et al. *Heat Pipe Technology*[M]. New York: Pergamon Press, 1997
- [3] Zhao Weilin(赵蔚琳) et al. *Petro-Chemical Equipment*(石油化工设备)[J], 2005, 34(4): 40
- [4] Grover G M et al. *J Apply Phys*[J], 1964, 35(6): 1990
- [5] Dunn P D et al. *Heat Pipes(third ed)*[M]. New York: Pergamon Press, 1994
- [6] Zhuang Jun(庄骏) et al. *Heat Pipes Tech & Eng Applications*(热管技术及其工程应用)[M]. Beijing: Chem. Industry Press, 2000
- [7] MN 伊凡诺夫斯基 et al. *Physical Theory of Heat Pipes*(热管的物理原理)[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1991
- [8] Xiao Ping Wu et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 1997, 17(6): 561
- [9] Lukiaobudi A R et al. *Heat Recovery Systems*[J], 1995, 15(5): 481
- [10] Feng Yang et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 2003, 23: 367
- [11] Wang Ru(王如). *Refrigeration & Air-Condition*(制冷与空调)[J], 2002, (8): 5
- [12] Jiang Xipeng(姜锡朋) et al. *China Foundry Machinery & Tech*(中国铸造装备与技术)[J], 2003, 6: 4
- [13] <http://www.cheresources.com/htpipes.shtml>
- [14] Luo Qinghai(罗清海) et al. *Energy Engineering*(能源工程)[J], 2004, (2): 54
- [15] You Hongjun(由宏君). *Sichuan Chemical Industry*(四川化工)[J], 2005, 8(3): 47
- [16] Salem A Said et al. *Int Comm Heat Mass Transfer*[J], 1999, 26(5): 679
- [17] <http://www.p2pays.org/ref/05/04961.pdf>
- [18] Song Tao(宋涛). *Research on New Machine Process of Inside Spin Tubes*(内螺旋管加工新工艺研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1994: 3
- [19] Deng Ju(邓炬) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 1997, (21): 88
- [20] Hussein H M. *Energy Conversion & Management*[J], 2002, 43:

- 2479
- [21] Bbudaiwi I M, Adbou A A. *Int J of Energy Research*[J], 2000, 24: 901
- [22] Qin Na(秦娜). *Refrigeration & Air-Condition*(制冷与空调)[J], 2005, (2): 79
- [23] Xie Ming(谢鸣). *Construction Technology*(施工技术)[J], 1994, 6: 51
- [24] Chen Zhongjie(陈忠杰). *Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery*(制冷空调与电力机械)[J], 2004, (6): 30
- [25] Huang Wensheng(黄文胜) *et al. Energy Engineering*(能源工程)[J], 2004, (01): 60
- [26] Riffat S B, Gan G. *Applied Thermal Engineering*[J], 1997, 17(4): 393
- [27] Hussein H M S. *Energy Conversion & Management*[J], 2002, 43: 2479
- [28] Yu Xia(于霞) *et al. Heating Ventilating & Air Conditioning* (暖通空调)[J], 2004, 17 (3): 39
- [29] Cai Weidong(蔡卫东). *Refrigeration & Air-Condition*(制冷与空调)[J], 2003, 3: 31
- [30] Yu Jianlin(鱼剑琳) *et al. Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 1996, 30(10): 64
- [31] Wu Xiaoping *et al. Applied Thermal Engineering*[J], 1997, 17(6): 561
- [32] Mcfarland J K *et al. ASHRAE Transactions*[J], 1996, 102(1): 132

## Heat Pipes and Porous Metals Used in Heat Pipes

Xi Zhengping, Tang Huiping, Zhu Jilei, Liao Jichang

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** Heat pipe is a interesting components which transfer heat from one point to the another. Heat pipe is called super heat conductor because of its extraordinary heat conductivity without heat wastage. The working principle and application of heat pipes are presented in this paper, and the emphasis on the process of the porous wick of heat pipe is given.

**Key words:** heat pipe; porous metal; heat exchanging

Biography: Xi Zhengping, Ph.D., Professor, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: fys@c-nin.com