

译 者 序

热管，从它问世至今仅有近二十年历史。在这短短的时间内，其应用范围已从宇航事业迅速发展到一般工业，进而扩展到日常生活领域。其发展速度之快、应用范围之广，已超出人们原来的想像。热管一词的概念也超出了原来所指典型热管的含义。

近来，译者经常遇到从事各行各业的工程技术人员和科技工作者询问热管方面的书籍。而目前已出版的又较少，尤其关于热管应用方面的书籍更少。出于热管工作者的责任感，译者着手翻译了这本书。

本书的第一、二章内容主要由大学教授执笔，第三章由实践经验丰富的有关专家执笔。他们在日本和国际热管界十分活跃。因此，本书涉及的应用领域十分广泛，并介绍了大量应用实例和计算公式，其数据多为实测值。可以说较全面地反映了近年来日本和其他国家热管应用的基本状况。译者希望这本书在热管技术的研究和推广应用中起到应有作用。

在翻译中，对原书与热管无关的章节作了适当地删减。

由于译者水平所限，加之本书涉及内容很广，译文中难免有不妥甚至错误之处，敬希读者批评指教。

译 者

序 言

近来，“热管”这个名称所见所闻日渐增多。由于人们认识到热管优良的传热特性，所以其应用也日益广泛。

自从1973年发生所谓“石油危机”以来，不论东方或西方国家，“节省资源和节约能量”成了最重要的课题。即要充分利用有限的天然资源，为将来着想，要保存贵重资源。甚至中东的产油国也在努力节省现有能源并开发新能源。对于大部分能源依赖进口的日本，在政策和技术方面对本课题均给予高度重视。日本关于新能源技术的开发，从1974年开始实行国家计划（日光计划）直到现在。目标是以太阳能、地热能、煤能、氢能的开发、输送、利用和贮藏为重点。其中，在太阳能和地热能的开发技术方面，正在考虑热管的应用。另外，在企业界也正在大力推行节能计划（月光计划），在废气的热回收中多采用热管式换热器。目前，日本热管的年产值约10亿日元。

热管国际会议曾开过三次（第一次，1973年在西德；第二次，1976年在意大利；第三次，1978年在美国），世界各国的学者发表了许多篇论文。第四次热管国际会议预定今年（1981年）9月在英国召开。在日本，向特许厅申请与热管有关的专利和实用新方案件数也逐年增多，已公告和公开的有900多件。但是，若认为热管应用的开发已近尾声，还为时过早。今后，各种专家在各方面充分利用热管特性，开发新的应用领域并推广普及，热管技术的发展必将进入全盛时期。就象在各部门作为装配标准件的螺钉螺母那样，我们相信，在传热技术中热管作为常用零件的时代也为期不远了。

热管这一概念是美国俄亥俄州G. M公司的高格勒(R. S. Gaugler)首先提出来的，这篇美国专利No. 2350348“传热元件”（1942年12月2日申请，1944年6月6日登记）是关于热管的第一篇

文献。高格勒设想将热管用于冷冻机，但这一发明当时在美国未能实现。

1963年美国原子能委员会 (AEC) 申请的美国专利 No. 3229759 “蒸发-冷凝传热元件” 的说明书中首先使用了“热管”这一名称。该专利的发明者是格罗弗 (G. M. Grover)，于1963年12月2日申请，1966年1月18日登记。当时，格罗弗在新墨西哥州洛斯-阿拉莫斯 (LOS Alamos) 研究所主持人造卫星用热管的研究，并将研究成果在学会刊物上发表。在1967年发射的“Atlas-Agena”号人造卫星上，首次进行了该研究所研制的热管无重力试验。随后，在1968年发射的“GEOS-B”号人造卫星上，为了控制电子通讯装置的温度，使用了长短两根热管。

此后，由于该研究所科特 (T. P. Cotter) 等人进行了大量研究工作，热管的理论分析得到长足进展。

比美国稍迟一些，英国和意大利的原子能研究所均开始研制用于热离子发电机的高温热管，其使用温度为1600~1800℃和1000℃。

如上所述，初期研制的热管用于人造卫星、宇宙飞船或热离子发电机，到1970年左右，开始用于工业机械的散热或温度均衡。目前，已在电器设备的散热、金属模具的冷却、空调、换热器、等温炉和家用电器等方面的开发和应用。

我们早就注意到热管独特的传热特性，各自在不同领域里着手研究。为促进相互交流，于1976年成立了“热管研究会”，一直进行多种活动，如研究规划的探讨、研究成果的发表、情报交流、外国文献的翻译以及互相协作等。另外，考虑到读者对本书编辑伊藤谨司的译著《热管》(P. D. Dunn 和 D. A. Reay 合著的“*Heat Pipes*”一书译成日文，由日本学献社出版) 的反映，也了解到热管应用讲习班参加者的迫切要求；同时，随着热管需求量的增加和企业的扩大，还考虑到不少工程技术人员对热管应用技术指导材料的索求，我们认为有必要将热管应用的现状及其发展新动向归纳成书籍形式出版。基于这一想法，编写了本书。内容以热管的应用为重

点，力图有助于读者进行热管应用的研究。若能起到一定的参考作用，编者将感到不胜欣喜。

本书共分三章，第一章叙述了热管的工作原理、特性以及热管管内的流体流动和热流动基础。第二章汇总了热管使用者应掌握的传热学基本知识。第三章为本书主题，即热管在广泛领域里的应用实例。编写中，尽可能请了各有关部门有实践经验的工程技术人员执笔。欲了解热管使用方法的读者，请首先阅读第三章。到需要研制热管阶段时，请参考第一章和第二章将颇有效益。

编者 池田義雄
伊藤謹司
槌田昭

目 录

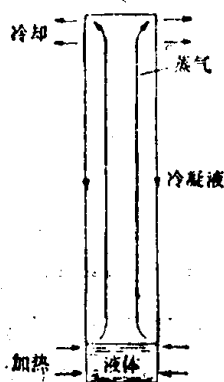
第一章 热管基础	1
1. 热管的结构和工作原理	2
1.1 结构	2
1.2 工作原理	5
2. 热管的性能和特点	10
2.1 特点	10
2.2 标准热管的性能	13
2.3 可控热管	32
2.4 特殊热管	41
3. 热管的制造和检验	47
3.1 制造方法	47
3.2 单管试验	51
4. 可靠性和寿命试验	52
4.1 相容性	52
4.2 寿命试验	53
第二章 热管应用基础	55
5. 热管的应用概况	55
5.1 应用形式	55
5.2 应用方法	57
6. 热管应用的传热基础	58
6.1 与固体接触时的热交换	59
6.2 与流体接触时的热交换	67
6.3 辐射换热	95
7. 换热器	106
7.1 性能	106
7.2 热能的有效利用	121
7.3 换热器的寿命和材料	124

8. 自然能量	128
8.1 太阳能	128
8.2 地热	132
8.3 海洋热	134
8.4 低温差热源的有效利用	134
9. 煤的气化和液化	137
10. 设计实例	138
10.1 气-气小型换热器设计	138
10.2 电子元件的散热	144
10.3 IC (集成电路) 的散热	151
10.4 注射成型金属模具的冷却	153
第三章 热管的应用	158
11. 废热利用	158
11.1 空气预热器	158
11.2 给水预热器	161
11.3 加热炉	168
11.4 热机	178
12. 金属模冷却	182
12.1 塑料金属模具	183
12.2 压铸金属模具	189
12.3 玻璃金属模具	191
13. 电子设备	193
13.1 落地式通讯装置架	195
13.2 通讯中继器用密封箱体	198
13.3 密闭壳体	201
13.4 半导体元件	203
13.5 印刷线路板上半导体集成电路的冷却 (OR 交换器)	207
13.6 在电子设备中采用热管时的注意事项和今后动向	210
14. 电机电器	211
14.1 旋转电机 (电动机、发电机)	211
14.2 开关设备	212
14.3 变压器	214
15. 音响设备	216

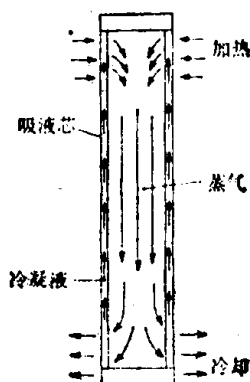
15.1 放大器	216
15.2 扬声音	222
16. 太阳能集热器	224
17. 地热	228
17.1 阿拉斯加输油管线	228
17.2 利用地热的融雪装置	230
17.3 取热与地下水的制冷利用	234
18. 空调	235
18.1 建筑物空调(冷、暖房)	235
18.2 汽车内的取暖与冷却	240
19. 车辆中的应用	241
19.1 制动器的冷却	241
19.2 润滑油、液力变矩器油的冷却	242
19.3 自动阻气门	243
20. 工业用机械设备	246
20.1 除油垢	246
20.2 钻头、切削工具	248
20.3 轧滚、滚筒	248
20.4 包装机械	250
20.5 均热炉	255
21. 家庭用品	255
21.1 烤肉棒	256
21.2 烤肉盘	256
21.3 烹调器具	257
21.4 黄油刀	259
21.5 家用热水、暖风供给装置	259
21.6 家用废热回收装置	260
22. 医疗器械	261
23. 空间飞行器	265
23.1 宇宙飞船	265
23.2 热离子发电装置	270

第一章 热管基础

热管的原理并不是近年才提出来的。如图1-1(a)所示的结构，装入少量液体的真空密封管子，通常称作热虹吸管。管子的下端加热时，下端的液体蒸发，以高速向上部移动，当与温度较弱的上端管壁接触后，冷凝成液体。液体靠重力作用沿管子内壁流回下端蒸发段。这种循环（如图1-2）是自动进行的。由管子下端向上端连续不断地传递热量。由于液体的蒸发潜热大，蒸气的流动阻力小，所以能够自温差较小的下端至上端传递大量热量。即这种装置的有效导热系数非常大。



(a) 热虹吸管



(b) 热管

图 1-1 热虹吸管和热管

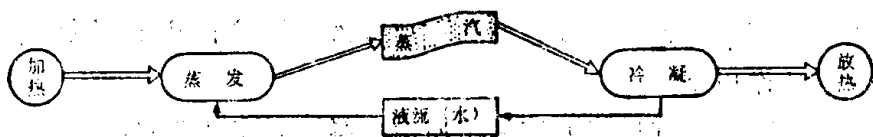


图 1-2

热虹吸管早就在使用，也采用过除水以外的各种工质。但是，其致命的弱点是蒸发段必须位于下端，同时不能在无重力场的状态下使用。这是因为冷凝液必须借助重力作用才能回流到蒸发段。于是采用吸液芯的毛细结构，利用毛细作用使冷凝液回流，从而解决了这一难题。这种结构即称作热管。如图1-1(b)所示。

1. 热管的结构和工作原理

1.1 结构

热管的主要部分如图1-3所示。图1-3(a)为纵断面图，(b)为横断面图。热管主要由密封管子、吸液芯及蒸气通道三部分组成。

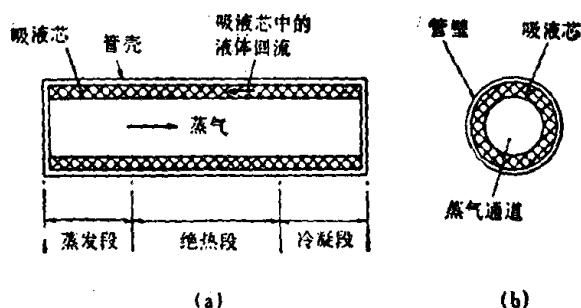


图 1-3 热管的主要部分

热管沿轴向分为蒸发段、绝热段和冷凝段。蒸发段的作用是，使热量从管外热源传给管内的液相工质，并使其蒸发。冷凝段的作用是，使气相工质冷凝，并把热量传给管外的冷源。绝热段的作用是，当热源和冷源隔开时，使管内工质和外界不作热量传递。

均质吸液芯由金属网、泡沫材料、毛毡、纤维或烧结金属等多孔物质组成。但也有只在管壳内壁开沟槽、装设干道管（液相工质专用的小阻力通道），以及它们和均质吸液芯组成的组合式吸液芯。吸液芯的作用是：

- (1) 靠毛细作用使液相工质由冷凝段回流到蒸发段。
- (2) 在蒸发段使液相工质沿径向均匀分布。图1-4所示为各

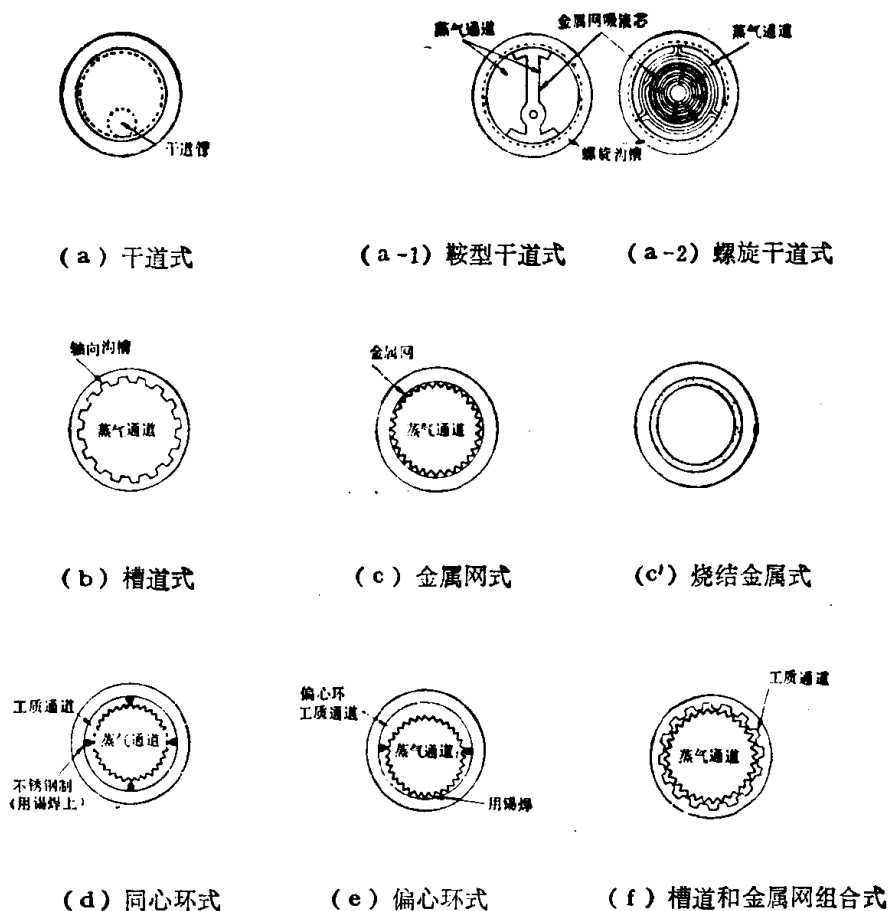


图 1-4 热管吸液芯的各种断面形状

种吸液芯结构。

在管壳中装入吸液芯后，管内抽高真空，充入液相工质，不允许泄漏。并且要求管壳强度能承受管内外压差。

表1-1所列为热管各部分材料。表1-2所列为目前所用主要工质的使用温度范围。

管壳形状一般为圆形，但也不一定必须是圆管，其断面可为任意形状。充入的工质用单一介质，液体靠毛细力回流，称此为标准热管。但是，热管这个词也可用于液体回流不靠毛细力，而利用其它力（例如离心力等）的结构。

表 1-1 热管各部分材料

液相工质	氨, 氮, 氩, 水, 甲醇, 乙醇, 丙酮, 氟利昂11, 钠, 钾, 锂等
吸液芯	金属网(铜, 镍, 不锈钢), 烧结金属, 泡沫材料, 金属毡, 陶瓷毡等
管 壳	铜, 铝, 不锈钢, 镍, 钨, 钼等

表 1-2 热管工质
(表中仅列出其使用温度范围)

工 质	熔 点 [°C]	沸点(大气压下) [°C]	使用温度范围 [°C]
氨	-272	-269	-271~-269
氮	-210	-196	-203~-160
氩	-78	-33	-60~100
氟利昂11	-111	24	-40~120
戊烷	-130	28	-20~120
氟利昂113	-35	48	-10~100
丙酮	-95	57	0~120
甲醇	-98	64	10~130
FlutecPP ₂ ①	-50	75	10~160
乙醇	-112	78	0~130
庚烷	-90	98	0~150
水	0	100	30~200
FlutecPP ₉ ①	-70	160	0~225
Thermex②	12	257	150~395
水银	-39	361	250~650
铯	29	670	450~900
钾	62	774	500~1000
钠	98	892	600~1200
锂	179	1340	1000~1800
银	960	2212	1800~2300

① 用于要求电绝缘的场合。

② 为联苯与苯醚的低共熔混合物。——译者

表 1-3 冷凝液回流方法

重 力	热虹吸管	静电力	电流体动力热管
毛细力	标准热管	磁 力	磁流体动力热管
离心力	旋转式热管	渗透力	渗透式热管

冷凝液返回蒸发段的各种方法如表 1-3 所示。

1.2 工作原理

热管的工作原理类似于热虹吸管，其不同点就在于工质的回流用毛细力代替重力。如图 1-5 所示。

(1) 将外部热源的热量传至蒸发段，通过管壁和浸满工质吸液芯的热传导使工质的温度上升。

(2) 液体的温度上升，液面蒸发，直至达到饱和蒸气压。此时热量以潜热方式传给蒸气。

(3) 液体的饱和蒸气压随着液体温度上升而升高。蒸气通过蒸气通道流向低压部分，即流向温度较低的冷凝段。

(4) 蒸气在冷凝段的气液界面上冷凝，放出潜热。

(5) 放出的热量从气液界面通过充满工质的吸液芯和管壁的热传导，由管子的外表面传给冷源。

(6) 冷凝的液体通过吸液芯靠毛细力回流到蒸发段，完成一个循环。

因此，如果工质不能回流，将会引起蒸发段烧干，热管即停止工作。

蒸气和液体表面之间的压力平衡取决于毛细压力。工质向蒸发段回流，是由冷凝段和蒸发段之间的毛细压差所决定。

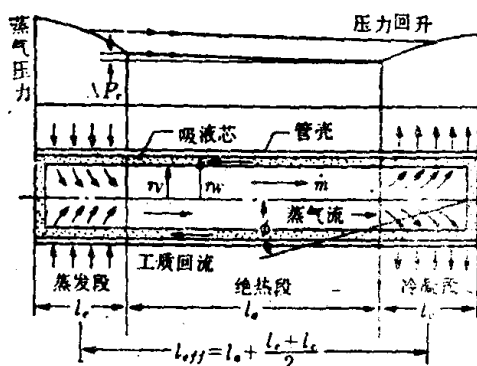


图 1-5 标准热管的工作图
(靠毛细力回流)

1.2.1 毛细压力

在液槽中竖立一根细玻璃管，液体浸润^①玻璃管时(如图1-6)，

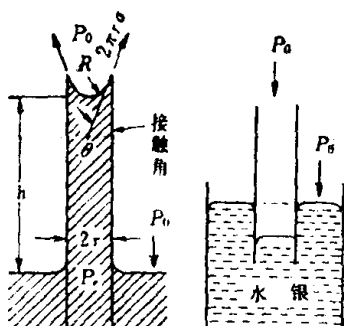


图 1-6 在液体中竖立的细管

管内的液面上升，且形成凹面形状，这一现象称作毛细现象。当液体不浸润玻璃管时(如水银)，则液面呈凸面形状，且下降。这是由于液体表面张力的作用所致。一般来说，在气液界面形成凹面时，两面的压差 ΔP 可用拉普拉斯-扬公式计算。

$$\Delta P = \sigma_1 \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1-1)$$

式中 σ_1 ——液体的表面张力，[kgf/m]；

R_1, R_2 ——曲面的主曲率半径，[m]。

液体可上升至相当于压差等于 $\rho_l \cdot g \cdot h$ 的高度。式中 ρ_l 为液体密度， h 为上升高度， g 为重力加速度。对于圆形管， $R_1 = R_2 = R$ ，则

$$\Delta P = \frac{2\sigma_1}{R} \quad (1-2)$$

假定圆管的半径为 r ，液体和圆管的接触角为 θ ，凹面一侧的蒸汽压为 P_v ，凸面一侧的液体压力为 P_l ，由 $r = R \cdot \cos \theta$ 可得到

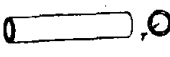
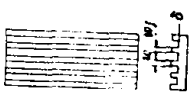
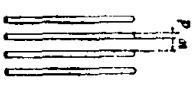
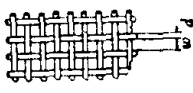
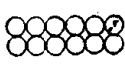
$$\Delta P = P_v - P_l = 2\sigma_1 \cos \theta / r \quad (1-3)$$

因此，当 $\theta = 0$ ，即 $r = R$ 时，可得到最大毛细压力。

图1-7所示为吸液芯气液界面的状态。假定吸液芯小孔的有效半

^① 浸润：液体从固体表面推开气体的现象称作浸润性。即固体表面和液体表面的附着现象。从能量角度分析，固-气界面的张力 σ_s 和固-液界面的张力 σ_l 之差 ($\sigma_s - \sigma_l$) 为浸润自由能的减少，即浸润的亲合力。浸润性一般由接触角 θ 的大小决定。 θ 小时，液体易于浸润固体表面。 θ 大时，则不易浸润固体表面。 θ 和 $\sigma_s - \sigma_l$ 之间的关系为 $\sigma_l \cdot \cos \theta = \sigma_s - \sigma_l$ (σ_l 为液体的表面张力)。就同一液体而言， $\cos \theta$ 和 $\sigma_s - \sigma_l$ 是正比关系。

表 1-4 吸液芯结构的有效毛细孔半径 r_c 。

吸液芯结构	r_c 的表达式	形 状
圆 筒	$r_c = r$	
矩形槽道	$r_c = w$ w —槽道宽度	
三角形槽道	$r_c = \frac{w}{\cos \beta}$ w —槽道宽度 β —半顶角	
平 纹	$r_c = w$ w —网丝间距	
网 状	$r_c = \frac{w+d}{2}$ w —网丝间距 d —网丝直径	
填充球	$r_c = 0.41r_s$ r_s —球半径	

注：最大毛细压力 $P_{cm} = 2\sigma/r_c$

径为 r ，在蒸发段（脚码 e ）和冷凝段（脚码 c ）毛细压力分别为 $\Delta P'_e$ 和 $\Delta P'_c$ ，其压差为 ΔP_c 时，则

$$\Delta P = \Delta P'_e - \Delta P'_c = 2\sigma_l \left(\frac{\cos \theta_e}{r_e} - \frac{\cos \theta_c}{r_c} \right) \quad (1-4)$$

当 $\cos \theta_e = 1$ ，且 $\cos \theta_c = 0$ 时， ΔP_c 最大，

表 1-5 吸液芯毛细孔的尺寸和渗透率

材料和网孔尺寸	毛细提升高度 [cm] ①	毛细孔半径 [cm]	渗透率 [m ²]	空隙率 [%]
玻璃纤维	25.4	—	0.061×10^{-11}	—
玻璃纤维编织套	22.0	—	0.104×10^{-10}	—
玻璃布	—	—	0.86×10^{-10}	—
玻璃布	—	—	1.00×10^{-10}	—
蒙乃尔珠层				
30~40	14.6	0.052 ②	4.15×10^{-10}	40
70~80	39.5	0.019 ②	0.78×10^{-10}	40
100~140	64.6	0.013 ②	0.38×10^{-10}	40
140~200	75.0	0.009	0.11×10^{-10}	40
金属毡				
FM1006	10.0	0.004	1.55×10^{-10}	—
FM1205	—	0.008	2.54×10^{-10}	—
镍粉末				
200 μ	24.6	0.038	0.027×10^{-10}	—
500 μ	>10.0	0.004	0.081×10^{-11}	—
镍纤维				
直径0.01[mm]	>40.0	0.001	0.015×10^{-11}	68.9
镍毡	—	0.017	6.0×10^{-10}	89
泡沫状镍 Ampornik220.5	—	0.023	3.8×10^{-9}	96
泡沫状铜 Ampornik220.5	—	0.021	1.9×10^{-9}	91
烧结铜粉末	156.8	0.0009	1.74×10^{-11}	52
烧结铜粉末				
45~56 μ	—	0.0009	—	23.7
100~125 μ	—	0.0021	—	30.5
150~200 μ	—	0.0037	—	35
镍网 50目	4.8	—	—	62.5
50目	—	0.0305	6.635×10^{-10}	—
铜网 60目	3.0	—	8.4×10^{-10}	—
镍网 60目	—	0.009	—	—
100目	—	0.0131	1.523×10^{-10}	—
100目	—	—	2.48×10^{-10}	—
120目	5.4	—	6.00×10^{-10}	—
120目 ③	7.9	0.019	3.50×10^{-10}	—

续表

材料和网孔尺寸	毛细提升高度 [cm] ①	毛细孔半径 [cm]	渗透率 [m ²]	空隙率 [%]
二层镍网120目	—	—	1.35×10^{-10}	—
120目	—	0.0102	—	—
不锈钢网180目(22℃)	8.0	—	0.5×10^{-10}	—
二层不锈钢网				
180目(22℃)	9.0	—	0.65×10^{-10}	—
200目	—	0.0061	0.771×10^{-10}	—
200目	—	—	0.520×10^{-10}	—
镍网 200目	23.4	0.004	0.62×10^{-10}	68.9
二层镍网200目	—	—	0.81×10^{-10}	—
磷青铜网200目	—	0.003	0.46×10^{-10}	67
二层钛网200目	—	0.0015	—	67
四层钛网200目	—	0.0015	—	68.4
250目	—	—	0.302×10^{-10}	—
二层镍网③ 250目	—	0.002	—	66.4
四层镍网③ 200目	—	0.002	—	66.5
镍网③ 325目	—	0.0032	—	—
磷青铜网	—	0.0021	0.296×10^{-10}	67
不锈钢网(平纹)80目④	—	0.013	2.57×10^{-10}	—
90目④	—	0.011	1.28×10^{-10}	—
120目④	—	0.008	0.79×10^{-10}	—
250目	—	0.0051	—	—
270目	—	0.0041	—	—
400目	—	0.0029	—	—
450目	—	0.0029	—	—

① 若未注明时,则为对水的实测值。

② 颗粒直径。

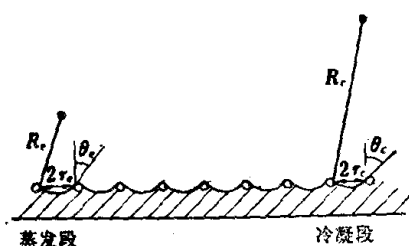
③ 氧化物。

④ 翘曲方向的渗透率(实测值)。

$$\Delta P_{\text{cmax}} = \frac{2\sigma_1}{r_c} \quad (1-5)$$

即当蒸发段处于半球状凹面,冷凝段处于平面时,可得到最大毛细压力。在蒸发段,由于工质蒸发,液面形成凹面。在冷凝段,

由于蒸气冷凝，液体不断得到补充而形成近似于平面，从而达到近



似于式 (1-5) 的条件 的状态。

表 1-4 列出各种形状的吸液芯求其有效毛细孔半径的公式。表 1-5 列出了毛细压力的实测值。

图 1-7 蒸发段和冷凝段的吸液芯和毛细孔参数

1.2.2 工作条件

当明确了有关毛细压力的性质之后，应考虑热管能够运行的条件。如前所述，在热管内部有蒸气的流动，以及冷凝液相工质的回流。若假设蒸气流的压力损失为 ΔP_v ，液相工质流动的压力损失为 ΔP_l ，还要考虑到重力对液体流动的影响 ΔP_g ，则必须使吸液芯毛细压力 $\Delta P_{c, \max}$ 满足下式。

$$\Delta P_{c, \max} \geq \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_g \quad (1-6)$$

上式即为热管工作的基本条件。

2. 热管的性能和特点

2.1 特点

热管的导热率，由其结构和工作原理可知，与以往固体的热传导相比，有以下几个优点。

(1) 优良的导热性 (图2-1)

由于热管是以潜热形成进行传热的，所以和银、铜、铝等金属相比，单位重量的热管可多传递几个数量级的热量。

(2) 等温性

由于饱和蒸气压力决定于温度，所以局部温度下降时，该处即有大量蒸气冷凝，以保持一定温度。

(3) 优良的热响应性 (图2-2)

蒸气速度以近似于该温度下的音速进行移动。

(4) 可将加热部分和放热部分隔开

由于热管可在低温差下向较远的距离传递热量，所以有利于在