

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

内 容 提 要

重力热管是一种结构简单、成本低、制造方便的超导热体,由重力热管组成的重力热管式换热器具有结构紧凑、重量轻、传热系数大、流动阻力小及布置灵活等优点,是余热利用的一种理想设备。本书是依据作者多年来从事重力热管及其应用技术研究与实践的经验而编写的。

书中主要介绍了重力热管式换热器的工作原理及设计方法,各种类型的重力热管式换热器在余热利用中的应用技术,重力热管式换热器的性能测试、标准及经济分析等。既包括了基本理论又集有大量的应用实例。

本书内容实用,可供从事工业锅炉、工业窑炉使用管理的 技术人员,从事各种型式换热器设计与制造的技术人员,从事热管 技术的研究人员及有关专业的高校师生阅读。

重力热管式换热器及其在余热利用中的应用

屠传经 王鹏举 洪荣华 编

• • •
浙江大学出版社出版
浙江大学印刷厂印刷
浙江省新华书店发行
• • •

开本787×1092 1/32 印张5.625 字数126.4千字

1989年12月第1版

1989年12月第1次印刷

印数0001—9100

ISBN 7-308-00380-9/TB·006 定价: 2.00 元

前 言

热管被称为“超导热体”，是本世纪40年代才出现的新技术，热管一出现就在航天等领域得到广泛应用。近十年来，重力热管的应用得到了迅速的发展，重力热管是一种结构简单、成本低、传热性能好，其缺点是热量只能由它的下端向上端传递，但在余热利用中，这一缺点是无关紧要的，或者说重力热管在余热回收中是最能发挥其作用的。目前国内叙述热管的技术书籍虽已有几种，但还缺少专门论述重力热管的书籍。

浙江大学能源工程系热能工程研究所（原能源工程研究所）近十年来在重力热管的研究、设计、制造和应用方面进行了大量的工作，与浙江省德清县莫干山节能设备厂组成科研生产联合体，推广应用了400多台各种型式的热管式换热器。浙江省能源研究所多年来也一直开展重力热管的研究与应用工作。因而编者总结了多年的研究工作，编写而成本书，所举的大部分实例，均为自己的工作成果。

本书共分十一章，包括重力热管及重力热管式换热器的原理，重力热管式换热器在余热利用中的各方面应用，重力热管测试、标准及经济性分析三个方面的内容。书中既包括了基本的理论，又有大量的应用实例，适合于各工厂企业从事能源工作的技术人员阅读，也可供大学与能源有关专业的师生阅读。

本书第二、五、六、七、八章由浙江大学屠传经及洪荣

华编写，第九、十、十一章，由浙江省能源研究所王鹏举编写，第一、三、四章由浙江大学朱华编写初稿，全书最后由屠传经，王鹏举统稿。洪荣华兼任莫干山节能设备厂技术厂长及总工程师，为本书提供了大量实例资料及自己的工作成果。

本书由浙江省计经委孙鸿铮高级工程师审稿并提出了很多宝贵的意见，在此深致谢意。

本书得到了浙江省德清县庾村莫干山节能设备厂林桂堂、吕金厅、章旭等厂领导的热情支持与鼓励。

由于水平所限，加之时间仓促，书中不妥和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者 1989.5

目 录

第 章 绪论	1
§1-1 热管的定义及分类.....	1
§1-2 热管的历史.....	3
§1-3 热管的现状.....	5
第二章 重力热管原理	7
§2-1 重力热管的特性.....	3
§2-2 重力热管的充液量.....	11
§2-3 重力热管工质及壳体材料的选择.....	12
§2-4 重力热管内部的传热过程.....	16
§2-5 重力热管的传热极限.....	18
第三章 重力热管式换热器原理	21
§3-1 换热器型式的确定.....	21
§3-2 余热回收量及热平衡计算.....	25
§3-3 热管式换热器的几何参数.....	28
§3-4 热管式换热器的热工计算.....	38
§3-5 热管式换热器的阻力计算.....	46
第四章 重力热管式换热器设计	49
§4-1 设计的原始数据.....	49
§4-2 设计步骤.....	49
§4-3 设计实例之一：2t/h锅炉热管式省煤器的设计计算	50
§4-4 设计实例之二：2t/h锅炉热管式空气预热器的设计 计算.....	56
§4-5 热管式换热器的计算机辅助设计.....	61

第五章 气-液型重力热管式换热器	67
§5-1 气-水型热管式换热器	67
§5-2 气-开水型热管式换热器	80
§5-3 组合装置	85
§5-4 气-油型热管式换热器	90
第六章 气-气型重力热管式换热器	92
§6-1 工业锅炉用气-气型热管式换热器	92
§6-2 工业锅炉用气-气及气-水组合型热管式换热器	97
§6-3 电站锅炉用气-气型热管式换热器	101
§6-4 工业窑炉用气-气型热管式换热器	107
§6-5 工业窑炉用气-气及气-水组合型热管式换热器	111
§6-6 热风炉用气-气型热管式换热器	112
第七章 气-蒸汽型重力热管式换热器	115
§7-1 回收烟气余热的热管式余热蒸汽锅炉	115
§7-2 回收辐射热的热管式余热蒸汽锅炉	126
第八章 其它型式的热管式换热器	127
§8-1 回转型热管式换热器	127
§8-2 开启型热管式换热器	133
§8-3 分离型热管式换热器	135
第九章 热管式换热器的性能测试	141
§9-1 性能测试的必要性及一般步骤	141
§9-2 测试内容	142
§9-3 设计的校核	145
§9-4 测试中应注意的几个问题	145
第十章 重力热管及重力热管式换热器的标准	147
§10-1 重力热管国家标准	147
§10-2 重力热管式换热器国家标准	148
§10-3 重力式热管浙江省标准(浙B/N62—87)	149

第十一章 热管式换热器的经济分析	160
§11-1 概述	160
§11-2 经济评价的主要方法	161
§11-3 现在价值计算的基本公式	165
§11-4 实用计算	166

第一章 绪 论

热管技术是从本世纪六十年代开始才蓬勃发展起来的一门新兴学科，是现代科学技术发展的必然产物。考察热管的诞生与发展史，有助于进一步探索热管的研究方向、开拓热管的应用范围，对更深入地理解科学技术的发展规律也有一定的帮助。

§1-1 热管的定义及分类

热管是依靠其内部工质在一个抽成高真空的封闭壳体中循环相变而传递热量的装置。工质在加热段吸热汽化，到放热段凝结放出热量，并回流到加热段重新吸热，从而将热量从一端传递到另一端（见图1-1）。

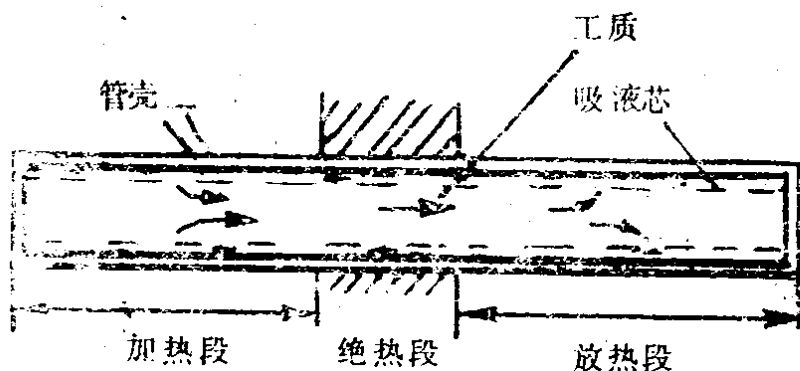
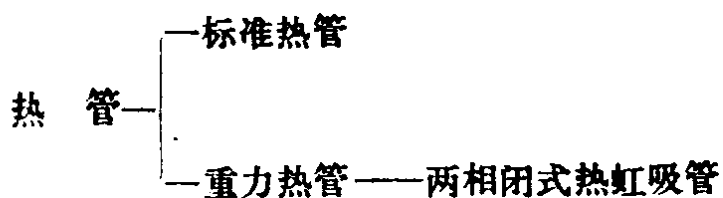


图1-1 标准热管的结构原理

按热管工质回流方式的不同，大致可将热管分成两大类：



一、标准热管

标准热管内部具有毛细吸液芯，工质主要靠吸液芯的毛细作用回流。用这种标准热管可以向任何方向在一定距离内传递热量。这类热管可在失重条件下使用，但成本较高，故地面上不常使用这种热管。

二、重力热管

重力热管，常简称为热管(见图1-2)，学术上为清楚起见，称之为“两相闭式热虹吸管”(Two-Phase Closed Thermosyphon)，它的内部没有毛细吸液芯，工质靠重力回流，热量只能从下方往上方传递，放热段与加热段必须保持一定的位差来保证回流。重力热管结构简单、成本低廉，被广泛应用于工业余热回收。

热管的种类很多，有各种分类方法。单按凝结液回流方式的不同，除前述的标准热管(吸液芯热管)和重力热管以外，还有重力辅助热管、旋转热管、电场式热管、渗透式热管等。另外，按照热管中工质工作的温度不同，还可分为高

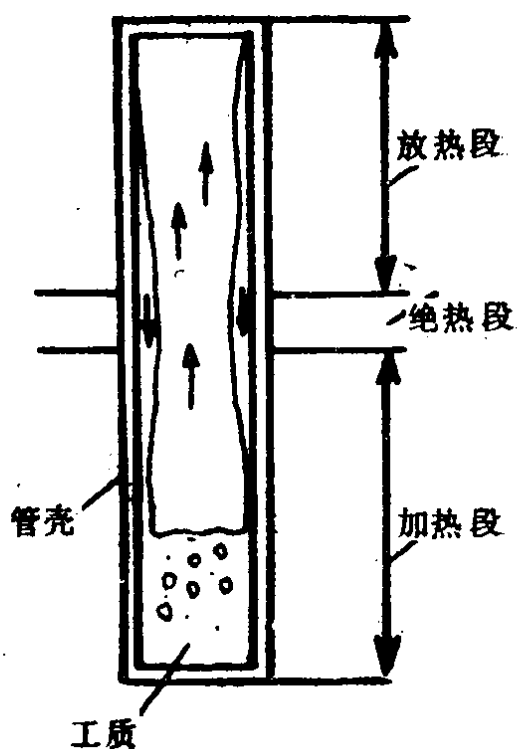


图1-2 重力热管

温热管(500°C 以上)、中温热管($300\sim 500^{\circ}\text{C}$)、常温热管($50\sim 300^{\circ}\text{C}$)、低温热管($-100\sim 50^{\circ}\text{C}$)和深低温热管(-100°C 以下)。按外壳材料及工质的不同组合,可分为钢-水热管、铜-水热管、钢-氨热管、不锈钢-钠热管、铝-丙酮热管等。由于本书着重于讨论有关重力热管的原理及其应用,因此不再赘述其它各种类型的热管。

§1-2 热管的历史^[1]

热管的产生和发展,主要应归功于空间事业的开发以及其本身所具有的高效导热性能。标准热管的原理是在1942年由美国人高格勒(P.S.Gaugler)首次提出,称为“制冷设备的毛细热传递装置”,并取得了美国专利。以后,高格勒又不断改进毛细吸液芯的结构,然而由于受当时科学技术水平的限制,未能得到实用性开发利用。

到了本世纪六十年代初,由于宇航事业发展的需要,类似于标准热管的原理被再次提出,1962年美国人特里弗森(L.Trefethen)指出这个原理可以运用到空间系统中去。1963年美国洛斯—阿拉莫斯(Los Alamos)科学实验室的格罗弗(G.M.Grover)等人重新独立地发明了这种传热装置——高导热率结构,并正式命名为“热管”,申请了美国专利。格罗弗因此被誉为“现代热管之父”。1964年,格罗弗在《应用物理》杂志上发表了第一篇热管论文。从此,热管进入了一个崭新的时代,受到了各国学者的极大重视,引起了各界的广泛兴趣。此后,热管技术的研究和开发方兴未艾。继空间应用以后,又进一步发展了地面应用的研究。七十年代世界性的能源紧张使得热管技术被大量地应用到民用工业上,

出现了热管应用研究的又一个高潮。

工业性的热管应用，尤其是在余热回收领域中大量开发和利用，迫切需要降低热管成本、简化热管结构。因此，重力热管受到了大家的重视。重力热管又称两相闭式热虹吸管，是从珀金斯管(Perkins Tube)发展而来的，它的历史比标准热管长，早在1949年，苏联就发表了有关面包烤炉用加热管的专著。其加热管即两相闭式热虹吸管(改进的珀金斯管)。1950年美国NACA首次发表了利用两相闭式热虹吸管原理对透平叶片进行冷却的研究成果。1959年苏联已经在其发电站的200t/h锅炉上安装了应用两相闭式热虹吸管原理的空气预热器，这是世界上在电站锅炉中最早的此类换热器。直到1963年有了“热管”的名称以后，两相闭式热虹吸管才称为重力热管。

有关重力热管(或称两相闭式热虹吸管)的前身(珀金斯管)的历史一直可以追溯到十八世纪，雅可布·珀金斯(J. Perkins)在1836年发明了珀金斯管(Perkins Tube)，申请了英国专利。它与现代重力热管的结构极其相似，唯一的区别是它管内的空气未抽除。这种珀金斯管在机车锅炉及面包房烤炉中得到应用。1892年雅可布·珀金斯的孙子和布克(W. E. Buck)改进了珀金斯管，并取得了有关专利。他们用加热排气法抽除了管内空气，并提出了珀金斯管的各种可能应用的场所，包括用于高炉及类似装置中，回收烟气余热用来加热空气。以后，盖伊(F. W. Gay)又在1929年对气-气换热的珀金斯管用加肋片的方法强化其外侧换热，并取得美国专利。1900年以后(特别是1930年以后)，在英国、苏联、捷克等国大量生产并应用珀金斯管，主要用于面包烤炉及汽车发动机冷却水散热。由此可见，重力热管用于工业已有很长

的历史。然而，对重力热管的大力推广和专门研究还是在标准热管受到重视以后，即始于六、七十年代。

我国对热管的研究始于1970年，主要研究有吸液芯的标准热管，1972年我国第一根钠热管运行成功，1976年我国发射的人造卫星上采用了热管。我国于1980年已有多台工业余热回收用的重力热管换热器投入运行。自此，打开了我国热管应用与研究的新局面，并取得了可喜的成果。

§1-3 热管的现状

热管研究在全世界已经成为一门新学科，自1973年第一届国际热管会议在西德召开以来，平均每三年一次的国际热管会议在各国轮流召开，至今已在西德、意大利、美国、英国、日本、法国开了六届国际会议。我国于1983年召开了第一届全国热管会议。1984年我国首次派代表出席了在日本召开的第五届国际热管会议，并在会上宣读了论文。1987年在法国召开了第六届国际热管会议，到会的十九个国家中，我国的论文数目已达17篇，跃居第三位。日本的论文数占第一位，美国占第二位。1988年我国召开了第二届热管会议。另外，由世界各国自行举办的各种不定期研讨会，国际性会议，以及我国各高等院校和科研机构组织的各种全国性或地区性会议、交流会、讨论会等均频繁举行，热管的学术交流相当活跃，许多相关学会的年会中也列进了热管的报告内容。

当前，大规模的热管研究已经从空间应用转向工业及民用，从热管的理论性探索阶段转入推广使用及新型热管的开发阶段。热管已经渗透到工业与民用的许多领域。

自七十年代以来，全球性的能源问题，促进了热管在余热回收领域中的应用研究，并取得了极大的成功。世界上已经有难以计数的热管用于余热回收，其中有很大一部分是重力热管。我国有数千台重力热管式换热器正在运行。本书将着重论述重力热管在这一领域中的应用。

第二章 重力热管原理

重力热管(见图1-2)的组成包括:热管壳体、工质。热管壳体是一个完全密封的管状容器。其实,它的几何形状并没有特殊的限制,由于圆管在管状材料中承压能力最强,故壳体一般为细长的圆管形;热管在制作时,壳体内部空腔要保持很高的真空度 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ mmHg,所以热管壳体的任何一道焊缝都必须经得起高真空泄漏的严格检验,以确保完全密封的要求。工作介质是热管工作时的热传输介质,壳体内部的介质处于汽、液两相共存状态,由于热管制作时的初始真空度很高,所以热管内汽液两相共存的工质通常是饱和的,没有也不应有不凝性气体。

当热量自高温热源传入热管时,处于热管加热段内的饱和液体随即吸热汽化变成蒸汽,这一段称作汽化段;蒸汽分子由汽化段经中间传输段流向热管的另一端,蒸汽在这里对冷源放出潜热后重新凝结成为液体,这一段称作凝结段;凝结液经传输段重新回流到汽化段,从而完成了一个循环。显然,根据上述基本工作原理,从热管与外界环境的换热来看,热管可以划分为加热段、绝热段和放热段;从热管内部的工作过程来看,则可以划分为汽化段、传输段和凝结段。不过这两种划分工作区段的方法是彼此对应及完全一致的。热管可以没有绝热段(传输段),仅有加热段和放热段(汽化段和凝结段)。

§2-1 重力热管的特性

重力热管的特性突出表现在优异的导热性、理想的等温性、传热方向的不可逆性及两侧热阻可调节性等几方面。

一、优异的导热性

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和凝结换热而实现的，所以其导热特性与一般常规的固体由于微观粒子热运动的导热有着质的不同，决非一般导热器件或材料所能比拟的，重力热管的有效导热系数可以是同尺寸铜棒的数百倍乃至上千倍。

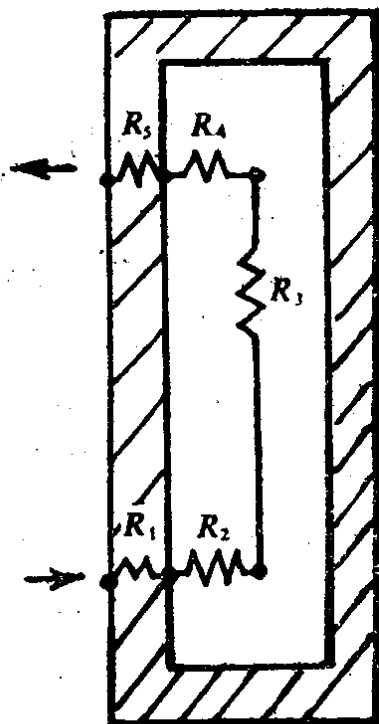


图2-1 热管内各内热阻

热管导热性能的评价用热管内热阻这一指标，重力热管的内热阻 (R_{hp}) 包括汽化段和凝结段的管壁导热热阻、沸腾及凝结换热热阻、蒸汽的流动热阻等。如图 2-1 所示。其中，

R_1 ——加热段管壁导热热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$

$$R_1 = \ln(d_o/d_i) / (2\pi k_w l_1)$$

R_2 ——加热段管内工质沸腾换热热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$

$$R_2 = (h_{ev} A_{1i})^{-1} = (h_{ev} \pi d_i l_1)^{-1}$$

R_3 ——管内蒸汽的流动热阻，一般可忽略不计， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$

R_4 ——放热段管内工质凝结换热热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$

$$R_4 = (h_{cd} A_{2i})^{-1} = (h_{cd} \pi d_i l_2)^{-1}$$

R_5 ——放热段管壁导热热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$

$$R_5 = \ln(d_0/d_i)/(2\pi k_w l_2)$$

以上各式中

l_1 、 l_2 、 l_0 ——分别为加热段、放热段、绝热段长度, m

d_0 、 d_i ——分别为热管外径、内径, m

A_{1i} 、 A_{2i} ——分别为热管加热段、放热段内表面积, m^2

h_{ev} 、 h_{cd} ——分别为管内工质沸腾、凝结换热系数,
 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$

k_w ——管壁导热系数, $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$

重力热管的内热阻为各热阻之和, 即

$$R_{hp} = R_1 + R_2 + R_4 + R_5$$

常用尺寸重力热管内热阻的具体数值取决很多因素, 对于工质为水的热管可以达到 $0.005 \sim 0.01^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 左右, 而一根直径为 25mm 长度为 1m 的铜棒, 其导热热阻也将大于 $5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

由于重力热管内部没有毛细吸液芯, 所以其内热阻比标准热管内热阻还要小。

二、理想的等温性

在热管的内部空腔中, 无论是汽化段或是凝结段, 蒸汽的状态都是饱和的, 由汽化段产生的饱和蒸汽流向凝结段的压降甚微, 对于初始真空良好的热管, 它的两端工质蒸汽温度没有明显的差别, 所以热管是一个十分理想的均温元件。实用中往往仅利用凝结段蒸汽空间温度及凝结段管壁外表面温度的均一性(见图 2-2 所示), 可以制成均温炉, 获得温度

均一的空间。重力热管的等温性能与标准热管的等温性能同样良好。

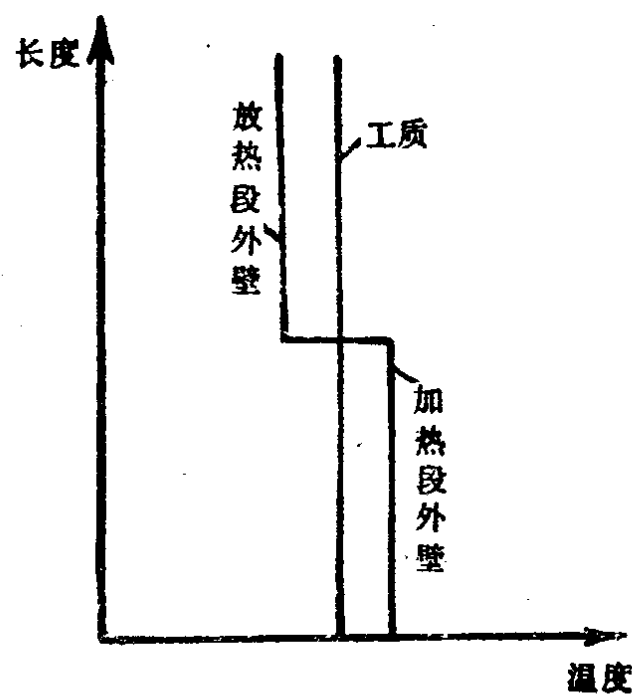


图2-2 热管(无绝热段)内的温度分布

三、传热方向的不可逆性

重力热管工作时一般垂直放置，即重力热管轴线与水平面夹角 θ 为 90° 。加热段在下，而放热段在上，如重力热管倾斜放置，热管也可以工作，但 θ 角必须大于 6° （苏联），以保证凝结液可借重力正常回流，国内一般将最小 θ 角定为 10° 。

捷克斯洛伐克的研究表明：当 θ 角从 90° 减小到 2° 时，传热效率降低10%。其中 θ 角从 90° 减小到 30° 时，效率降低2.5%；从 30° 降低到 2° 时，效率再降低7.5%。各个研究者的具体结果相互间会有一些差别，但重力热管 θ 角变为负值时，热管完全不能工作，这是一个客观规律，或者说它具有传热方向的不可逆性。