



节能减排丛书



热管节能技术

张红 杨峻 庄骏 编著



化学工业出版社



节能减排丛书

热管节能技术

张红 杨峻 庄骏 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

热管因其优越的传热性能和技术特性而被广泛应用于节能领域。本书介绍了热管技术的发展概况,详细阐述了热管换热器的设计、热管技术在石油化工及其他化学工业节能中的应用、在钢铁及有色金属工业节能中的应用、在动力工业节能中的应用、在建材工业节能中的应用、在可再生能源中的应用及其在其他工业节能中的应用等并列有设计和应用实例。

本书可供涉及节能减排相关行业的企业技术人员、管理人员使用,也可供从事节能减排技术开发、推广的专业人员及相关专业大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

热管节能技术/张红,杨峻,庄骏编著. —北京:
化学工业出版社, 2009.5
(节能减排丛书)
ISBN 978-7-122-05024-3

I. 热… II. ①张…②杨…③庄… III. 热管-
节能-技术 IV. TK172.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 034336 号

责任编辑: 郑叶琳
责任校对: 郑捷

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京云浩印刷有限责任公司
720mm×1000mm 1/16 印张 14½ 字数 242 千字 2009 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

改革开放以来，在党中央、国务院的领导下，我国经济建设、政治建设、文化建设、社会建设取得了举世瞩目的成就，人民生活快速步入小康水平。但伴随着经济的快速发展，资源匮乏、环境污染日益凸显，经济发展与资源环境的矛盾日趋尖锐。当前我国正处于工业化和城市化加速发展的阶段，经济总量已居世界前列，对资源的需求进一步增加。与此同时，靠大量消耗资源支撑的粗放经济增长模式使资源约束矛盾更加突出，环境形势十分严峻。各种污染物排放大大超过了环境承载能力，环境压力持续加大。各类生态系统整体功能下降，生态恶化的趋势没有得到有效遏制，水、大气、土壤等污染十分突出，生态破坏范围不断扩大，严重阻碍了经济社会的全面、协调、可持续发展。而这种状况与经济结构不合理、经济增长方式粗放密切相关。加快调整经济结构，转变经济增长方式，搞好节能减排，是实现经济社会全面、协调、可持续发展的迫切要求。

党的十七大提出要建设资源节约型、环境友好型社会，这是全面建设小康社会的基本目标，也是一项带有全局性的战略任务。“十一五”规划提出单位 GDP 能耗和主要污染物排放总量比“十五”期末分别降低 20% 左右、10% 的约束性指标，这是贯彻科学发展观，构建社会主义和谐社会的重大举措，是建设资源节约型、环境友好型社会的重要任务，是推进经济结构调整、转变经济增长方式的客观要求，也是提高人民生活质量、维护中华民族长远利益的必然选择。实践已经证明并将继续证明，只有坚持节约发展、清洁发展、可持续发展，才能实现国民经济又好又快发展。

近年来，温室气体排放引起的全球气候变暖备受国际社会广泛关注。加强节能减排工作，已经成为各国应对全球气候变化的紧迫任务和重要手段。节能减排蕴含着发展理念、发展道路、发展模式的创新和提升，是应对资源短缺和环境容量有限挑战的必然选择。节能减排工作必须从现在做起，从重点领域、重点行业 and 重点企业抓起，把加强技术改造与淘汰落后生产能力结合起来。节能减排的途径主要有三个方面：一是厉行节约；二是调整产品和产业结构；三是大力推广节能减排技术。国家节能减排手段主要包括运用经济手段、法律手段、行政手段，

建立健全节能减排的体制和机制；企业要在节能减排的体制机制的保证和作用下，综合运用管理手段和技术手段，达到节能减排目的。

为推动党和国家节能减排政策的落实，化学工业出版社组织编写了这套《节能减排丛书》，对高耗能、高排放行业的实用节能减排技术进行了系统阐述，拓宽了节能减排的思路，为企业节能减排提供具体的技术指导，有助于企业加快技术创新和技术进步，实现清洁生产，从而最终实现经济社会的全面、协调、可持续发展。

节能减排是一项长期的、艰巨的重大任务，需要全社会的共同努力和支持，应该成为国家、企事业单位和每个公民的自觉行为。我们要坚持不懈，时刻不忘节能减排工作，为我们、也为子孙后代永远保护好人类共有的美好家园。

欧新黔

2008年7月

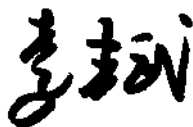
石油和化学工业作为为人类提供物质消费的重要基础产业，为世界经济发展做出了巨大的贡献，并在世界经济贸易中占有十分重要的地位。石油和化学工业在世界范围的投资、贸易和生产要素配置，使全球日益形成相互依存、彼此互补的完整产业链，构造出利益互补和生产者与消费者共赢的世界石油化工大格局。就我国来说，石油和化学工业是国民经济的重要支柱产业，为我国的经济发展做出了巨大贡献。

对石油和化学工业来说，石油、天然气、煤炭等能源既是燃料、动力，又是生产用的原材料。石油和化学工业是能源消耗和废弃物产生的大户，每年能源消费量约占全国消费量的 17%，废水、废气和固体废物排放量分别占全国工业“三废”排放的 21.9%、11% 和 8.4%。因此，节能减排是石油和化学工业可持续发展的必由之路。“十一五”及未来期间，我国的石油和化学工业将获得新的发展机遇，但资源和环境的压力也更大。石油和化学工业要坚决贯彻“节能优先、效率为本、煤为基础、多元发展、优化结构、保护环境、立足国内、对外开放”的 32 字方针，以保证国民经济和社会发展的需求。“十一五”也对石油和化学工业的发展提出了明确的目标：单位生产总值能源消耗降低 20%、单位工业增加值用水量降低 30%、工业固体废物综合利用率提高到 60%、主要污染物排放总量减少 10%。这就要求我们做到以下四点：一是全行业要把思想认识统一到中央的决策和部署上来，真正把节能减排工作作为行业和企业的第一等大事来抓。二是要摸清能源消耗和污染排放的具体情况，制订切实可行的行业节能减排的工作方案。三是要找准工作的切入点，例如技术进步、人才培养、经验推广等。四是要借鉴国外经验，更好地发挥节能减排的市场作用。

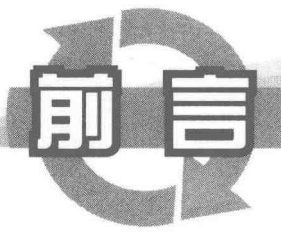
通过技术进步实现节能减排是当前工作的关键。研究分析显示，技术进步对节能贡献率达到 40%~60%。要提高能源利用效率，缩小与国际先进水平的差距，必须依靠科技进步，不断增强自主创新能力。要通过节能技术进步，推进以企业为主体的自主创新体系和创新型行业的建设。同时，要按照走新型工业化道路的要求，大力开发和推广节能减排的先进实用技术，重点是能源节约和替代技

术、能量梯级利用技术、延长产业链和相关产业链接技术等等。化学工业出版社组织编写这套《节能减排丛书》，正是为了贯彻国家节能减排政策，指导企业进行节能减排技术改造。这套丛书立足于通过技术进步实现节能减排，详细介绍了相关行业已经成熟的节能减排技术，充分展现了符合现代发展理念的节能减排新技术，借鉴了许多国外的节能应用实例，必将为众多企业的节能减排工作提供广阔的视野和具体的技术指导。这套丛书涉及石化、冶金、交通、电力、轻工等多个行业，其中有炼油、烧碱、硫酸、化肥、炭黑、电石等多个分册涉及到石化行业。这套丛书的出版，必将有助于企业加快技术创新和技术进步的步伐。

节能减排工作需要全社会付出努力，并成为全社会的自觉行动。化学工业出版社组织编写的这套《节能减排丛书》，就是这种努力的一部分；为本丛书撰稿的专家学者以无私奉献的精神，付出了辛勤劳动，也是这种努力的一部分。出版社与作者值得尊敬的这些努力，必将有效促进节能减排先进技术的开发推广，进而推进石油和化学工业节能减排目标的更快、更好实现。

A stylized, calligraphic signature in black ink, likely reading '李锐' (Li Rui), positioned above the date.

2008 年 7 月



前言

自1980年第一台热管空气预热器在我国石油化工行业应用成功,热管技术在各个工业领域的应用日益深入。在我国科技界和工程界的共同努力下,我国热管技术在工业中的应用在国际上处于领先地位,不仅在余热回收、节能方面取得了显著效果,而且在航空航天领域、传统传热传质设备更新改造及电子元器件冷却等方面显示出强大的生命力。

国家提出:“十一五”期间建设资源节约型、环境友好型社会,实现单位生产总值能源消耗下降20%的目标。特别针对高能耗行业,如电解铝、铁合金、电石、烧碱、水泥、钢铁等,是开展节能减排工作的重点行业。热管技术作为高效传热技术之一,在节能减排中必将发挥越来越重要的作用。

本书将简要介绍热管技术的基本原理和特性、热管换热器的设计方法;重点介绍多年来我国热管技术的开发研究成果;系统介绍热管技术的应用原理及其应用实例,范围涉及化工、石油、钢铁冶金、动力、建材等工业领域,以及热管技术在航天领域的新进展和热管技术在可再生能源领域的应用。书中的工程应用实例相当一部分已经过长时间的工业运行的考验,具有推广价值。其中的碳钢-水热管换热器,高温热管气-气换热器等研究应用均处于国际领先水平,也反映了我国热管技术研究开发及应用的特色。

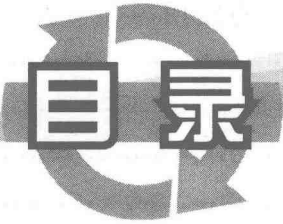
热管技术的工业化应用成果,凝结了热管技术开拓者、研究者和实践者的心血,各领域的工程技术人员在了解热管技术真谛和工业应用成果后,结合各自行业工艺流程的具体情况,充分发挥热管技术的特性和优越性,并将其灵活应用,定会创造出新的应用成果,为节能减排贡献力量。本书部分内容作为大学本科高年級的选修教材已使用多年,因而本书也可作为有关专业的教学参考用书。

本书中的应用实例大多来自于国家热管技术推广中心南京圣诺热管有限公司。全书在编写过程中得到了王中贤博士、陶汉中博士,博士研究生许辉、战栋栋等给予的大力帮助,谨此向他们致以深深的谢意。

由于编著者水平所限,疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编著者

2009年3月于南京



目录

1 绪论	1
1.1 热管节能技术概述	1
1.2 热管的发展及现状	2
1.3 热管工作原理	4
1.4 热管的基本特性	5
1.5 热管的分类	6
1.6 热管的相容性及寿命	6
1.7 热管技术特性	8
参考文献	11
2 热管换热器的设计	13
2.1 热管设计	13
2.1.1 工作液体的选择	13
2.1.2 吸液芯的选择	15
2.1.3 管壳材料的选择	16
2.1.4 设计计算	17
2.1.5 设计举例	22
2.2 热管换热器的类型与结构	26
2.2.1 整体式热管换热器	27
2.2.2 分离式热管换热器	28
2.2.3 回转式热管换热器	29
2.2.4 组合式热管换热器	29
2.3 热管换热器设计计算	29
2.3.1 常规设计计算法	31
2.3.2 离散型计算法	48
2.3.3 定壁温计算法	51
参考文献	53

3 热管技术在石油化工及其他化学工业节能中的应用	54
3.1 热管技术在石油化工工业节能中的应用	54
3.1.1 热管裂解炉	55
3.1.2 热管乙苯脱氢反应器	57
3.1.3 环己醇脱氢化学反应器	59
3.1.4 热管氧化反应器	65
3.1.5 催化裂化再生取热器	68
3.1.6 热管化学反应釜	69
3.1.7 苯酐热熔冷凝箱	70
3.1.8 加热炉余热回收	71
3.2 热管技术在硫酸工业节能中的应用	78
3.2.1 沸腾焙烧炉沸腾层内的余热回收	79
3.2.2 沸腾焙烧炉矿渣余热回收	80
3.2.3 SO_2 炉气余热回收	81
3.2.4 SO_3 气体冷却器	85
3.2.5 热管 SO_2 转化器	86
3.2.6 热管开工预热器	89
3.2.7 硫酸生产余热回收用热管省煤器	90
3.3 热管技术在盐酸、硝酸工业节能中的应用	94
3.3.1 盐酸合成炉余热回收	94
3.3.2 氨氧化炉热管蒸汽发生器	95
3.4 热管技术在合成氨工业节能中的应用	96
3.4.1 上、下行煤气余热回收	97
3.4.2 吹风气余热回收	101
3.4.3 一段转化炉空气预热器	103
3.4.4 变换工段气-气换热器	106
3.4.5 二段转化炉高温高压蒸汽发生器	107
3.4.6 绝热化学反应器级间热管换热器	109
3.4.7 连续富氧造气热管蒸汽发生器	110
3.4.8 热管电加热器	111
3.4.9 化工废弃物焚烧热管废热锅炉	112

参考文献	113
4 热管技术在钢铁及有色金属工业节能中的应用	116
4.1 热管技术在高炉热风炉节能中的应用	116
4.2 热管技术在电炉炼钢余热回收中的应用	118
4.3 热管技术在烧结工序节能中的应用	120
4.4 热管技术在加热炉、均热炉中的应用	124
4.4.1 坯件加热炉热管空气预热器	124
4.4.2 线材退火炉	125
4.4.3 轧钢连续加热炉	125
参考文献	129
5 热管技术在动力工业节能中的应用	130
5.1 热管技术在锅炉节能中的应用	130
5.1.1 油、气混烧电站锅炉空气预热器	133
5.1.2 劣质煤料锅炉空气预热器	133
5.1.3 热管技术在工业锅炉中的应用	135
5.1.4 电站锅炉配套低温段余热回收热管换热器	139
5.2 热管技术在烟气脱硫中的应用	141
5.2.1 整体式热管气-气换热器	141
5.2.2 分离式热管气-气换热器	144
5.2.3 套管式热管烟气降温器	144
5.2.4 热电厂 220t/h 全烧高炉煤气锅炉分离式热管煤气预热器	146
参考文献	147
6 热管技术在建材工业节能中的应用	148
6.1 热管技术在喷雾干燥热风炉中的应用	148
6.1.1 高岭土喷雾干燥热风炉	148
6.1.2 十二醇硫酸钠喷雾干燥	149
6.2 热管技术在玻璃窑炉节能中的应用	151
6.3 热管技术在陶瓷窑炉节能中的应用	153
6.3.1 隧道窑烟道气余热利用	153
6.3.2 电瓷厂隧道窑冷却带余热利用	154
6.3.3 倒焰窑烟道气余热利用	155

参考文献.....	155
7 热管技术在其他工业节能中的应用	156
7.1 热管技术在纺织工业节能中的应用	156
7.1.1 热定型机余热的回收利用	156
7.1.2 浆纱机的余热回收	156
7.2 热管式新风换热器	158
7.3 热管技术在核电工程中的应用	160
7.3.1 热管技术在空间核电源中的应用	161
7.3.2 热管用于核废料的冷却	163
7.3.3 事故情况下的安全壳体保护	164
7.3.4 热管蒸汽发生器	166
7.4 热管技术在航空航天中的应用	167
7.4.1 等温蜂窝板	168
7.4.2 超音速热管机翼	169
7.4.3 热管技术在航天领域的新进展	170
参考文献.....	173
8 热管技术在可再生能源中的应用	175
8.1 热管在太阳能中的应用	175
8.2 热管太阳能热水器	175
8.2.1 平板式热管太阳能热水器	175
8.2.2 热管真空管式太阳能热水器	176
8.3 热管太阳灶	178
8.4 太阳能热发电	180
8.4.1 槽式聚焦-朗肯循环系统	180
8.4.2 碟形聚焦-钠热管-斯特林发电机系统	181
8.5 热管技术在生物质能开发中的应用	183
参考文献.....	185
附录	187
附录 I 法定计量单位.....	187
附录 II 常用物理量的单位制及其换算.....	189
附录 III 工质物理性质数据表.....	192

附录Ⅳ	干空气的物理性质·····	209
附录Ⅴ	在大气压 ($p=1.01\times10^5\text{Pa}$) 下烟气的物理性质 ·····	210
附录Ⅵ	饱和水的物理性质·····	210
附录Ⅶ	干饱和水蒸气的物理性质·····	212
附录Ⅷ	钢管许用应力·····	213
附录Ⅸ	免作冲击试验的钢管最低设计温度·····	216

绪论

1.1 热管节能技术概述

热管作为高效传热元件，因优越的传热性能和技术特性，在工程中的应用日益普及，不仅在余热回收、节能方面取得了显著效果，而且在传统的传热传质设备更新改造及电子元器件冷却等方面显示出强大的生命力。作为应用于工业节能领域的热管技术，不仅涉及热管技术本身，而且与各工业领域的工艺过程、设备状况及控制管理系统都密切相关。国家关于国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要明确指出：“十一五”期间实现单位生产总值能源消耗下降 20% 的目标。针对高能耗行业，如电解铝、铁合金、电石、烧碱、水泥、钢铁等，是开展节能减排工作的重点行业。为此，本书不仅介绍热管技术的原理，而且重点介绍热管节能技术的应用实例，范围涉及化工、石油化工、建材、轻纺、冶金、动力工程等工业领域。

热管技术之所以能广泛应用于节能领域，是因为与常规换热技术相比，具有如下的重要特点。

(1) 热管换热设备较常规设备更安全、可靠，可长期连续运行 这一特点对连续性生产的工程，如化工、冶金、动力等部门具有特别重要的意义。常规换热设备一般都是间壁换热，冷热流体分别在器壁的两侧流过，如管壁或器壁有泄漏，则将造成停产损失。由热管组成的换热设备，则是二次间壁换热，即热流要通过热管的蒸发段管壁和冷凝段管壁才能传到冷流体，热管一般不可能在蒸发段和冷凝段同时破坏，所以大大增强了设备运行的可靠性。

(2) 热管管壁的温度可调性 热管管壁的温度可以调节在低温余热回收或热交换中是相当重要的，因为可以通过适当的热流变换把热管管壁温度调整在低温流体的露点以上，从而可防止露点腐蚀，保证设备的长期运行。这在电站锅炉尾部的空气预热方面应用得特别成功，设置在锅炉尾部的热管空气预热器，由于能调整管壁温度不仅能防止烟气结露，而且也避免了烟灰在管壁上的黏结，保证锅炉长期运行，并提高了锅炉效率。

(3) 冷、热段结构和位置布置灵活 由热管组成的换热设备的受热部分和放热部分结构设计和位置布置非常灵活,可适应于各种复杂的场合。由于结构紧凑占地空间小,因此特别适合于工程改造及地面空间狭小和设备拥挤的场合,且维修工作量小。

(4) 效率高 热管换热设备效率高,节能效果显著。

1.2 热管的发展及现状

在众多的传热元件中,热管是人们所知的最有效的传热元件之一,它可将大量热量通过其很小的截面积远距离地传输而无需外加动力。热管的原理首先是由美国俄亥俄州通用发动机公司(The General Motors Corporation, Ohio, U. S. A)的 R. S. Gaugler 于 1944 年在美国专利(US2350348)中提出的^[1]。1962 年 L. Trefethen^[2]再次提出类似于 Gaugler 的传热元件用于宇宙飞船,但因这种建议并未经过实验证明,亦未能付诸实施。1963 年美国 Los Alamos 国家实验室的 G. M. Grover^[3]重新独立发明了类似于 Gaugler 提出的传热元件,并进行了性能测试实验,在美国《应用物理》杂志上公开发表了第一篇论文,并正式将此传热元件命名为热管“Heat Pipe”,指出它的导热率已远远超过任何一种已知的金属,给出了以钠为工作液体,不锈钢为壳体,内部装有丝网吸液芯的热管的实验结果。美国 Los Alamos 国家实验室在热管理论以及热管在空间技术方面的应用研究一直处于领先地位。1965 年 Cotter 首次提出了较完整的热管理论^[4],为以后的热管理论的研究工作奠定了基础。1967 年一根不锈钢-水热管首次被送入地球卫星轨道并运行成功^[5],从此吸引了很多科学技术工作人员从事热管研究,联邦德国、意大利、荷兰、英国、前苏联、法国及日本等国均开展了大量的研究工作,使得热管技术得以很快发展。

Katzoff^[6]于 1966 年发明了有干道的热管。干道的作用是为了给从冷凝段回到蒸发段的液体提供一个压力降较小的通道,大大提高了热管的传输能力。

1969 年前苏联和日本的有关杂志均发表了热管应用研究方面的文章。在日本的文章中已有描述带翅片热管束的空气加热器,在能源日趋紧张的情况下,可用来回收工业排气中的热能。同时 Turner 和 Bienert^[6]提出了用可变导热管来实现恒温控制。Gray^[7]研究了一种新型热管——旋转热管,这些发明都是热管技术的重大进展。

1970 年在美国出现了供应商品热管的部门,热管的应用从宇航扩大到了地

面。在热管发展史上值得一提的是在横穿阿拉斯加输油管线工程中,应用热管作为管线的支撑,以保证输油管线顺利穿越地面的永冻层。该工程共使用了112000余根热管,单根热管的长度为 $9\sim 23\text{m}$ ^[8]。2006年我国将该技术^[9]成功应用于青藏铁路冻土路基的加固取得了良好的效果。

1974年以后,热管在节约能源和新能源开发方面的研究得到了充分的重视,用热管组成换热器来回收废热,并将其用于工业以节约能源。美国和日本在这方面取得了显著进展。我国在1976年至1986年期间进行了大规模的工业应用开发研究,并实现了热管换热器产业化。

1980年美国Q-Dot公司生产了热管废热锅炉^[10],日本帝人工程公司也成功地用热管做成锅炉给水预热器,解决了排烟的露点腐蚀问题^[11]。之后,各国的热管换热器研制工作迅猛展开,回转式、分离式等新的结构形式相继出现,并日趋工业化、大型化。

1984年Cotter较完整地提出了微型热管的理论及展望^[12],为微型热管的研究与应用奠定了理论基础。毛细泵回路(capillary pumped loops, CPL)和回路热管系统(loop heat pipe systems, LHP)以其结构灵活、应用面广及在很小温差下可远距离传递较常规热管更大的热量的特点,引起了整个热管界的普遍关注,成为理论研究和应用研究的热点。

20世纪70年代以来,热管技术飞速发展,各国的科研机构、高等院校、公司及厂矿均开展了多方面的开发、应用研究,国际间、地区间及各国自身的热管技术交流活动日益频繁,1973年在德国斯图加特(Stuttgart)召开了第一届国际热管会议,至今已召开十四届。除此之外,中日双方从1985年至1994年分别召开了四届双边及多边热管技术研讨会,1996年在澳大利亚墨尔本(Melbourne)召开的多边会议正式发展为国际热管技术研讨会,至今已召开过八次。

我国自20世纪70年代开始,开展了热管的传热性能研究以及热管在电子器件冷却及空间飞行器方面的应用研究。由于我国是一个发展中的国家,能源的综合利用水平较低,因此自20世纪80年代初我国的热管研究及开发的重点转向节能及能源的合理利用^[13],相继开发了热管气-气换热器、热管余热锅炉、高温热管蒸汽发生器、高温热管热风炉等各类热管产品^[14]。由于碳钢-水两相闭式热虹吸管的结构简单、价格低廉、制造方便,易于在工业中推广应用,碳钢-水相容性的基本解决,使得此类热管得以广泛应用。我国的热管技术工业化应用的开发研究发展迅速,学术交流活动也十分活跃,从1983年起已先后召开了十一届全国性的热管会议。

随着科学技术水平的不断提高,热管研究和应用的领域也将不断拓宽。新能源的开发,电子装置芯片冷却、笔记本电脑 CPU 冷却以及大功率晶体管、可控硅元件、电路控制板等的冷却,化工、动力、冶金、玻璃、轻工、陶瓷等领域的高效传热传质设备的开发,都将促进热管技术的进一步发展。

1.3 热管工作原理

热管的基本工作原理如图 1-1 所示,典型的热管由管壳、吸液芯和端盖组成,将管内抽成 $1.3 \times (10^{-1} \sim 10^{-4})$ Pa 的负压后充以适量的工作液体,使紧贴管内壁的吸液芯毛细多孔材料中充满液体后加以密封。管的一端为蒸发段(加热段),另一端为冷凝段(冷却段),根据应用需要在两段中间可布置绝热段。当热管的一端受热时毛细芯中的液体蒸发汽化,蒸汽在微小的压差下流向另一端放出热量凝结成液体,液体再沿多孔材料靠毛细力的作用流回蒸发段。如此循环不已,热量由热管的一端传至另一端。热管在实现这一热量转移的过程中,包含了以下六个相互关联的主要过程:

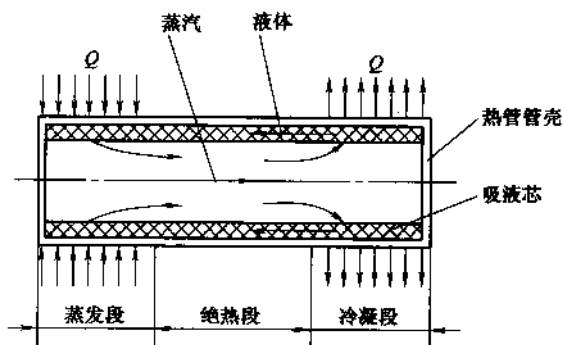


图 1-1 热管工作原理示意图

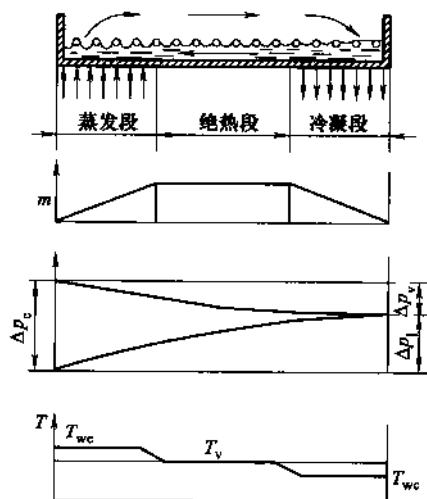


图 1-2 热管管内汽-液分界面形状、蒸汽质量流量、压力和温度沿管长的变化示意图

- ① 热量从热源通过热管管壁和充满工作液体的吸液芯传递到液-汽分界面;
- ② 液体在蒸发段内的液-汽分界面上蒸发;
- ③ 蒸汽腔内的蒸汽从蒸发段流到冷凝段;
- ④ 蒸汽在冷凝段内的汽-液分界面上凝结;