



中国科学技术
经·典·文·库

工程传热传质学 (上册)

(第二版)

王补宣 著



科学出版社

中国科学技术经典文库

工程传热传质学(上册)

(第二版)

王补宣 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是为满足研究生培养需要而撰写的,全书共16章,分上、下两册。

上册为第1~7章。第1章为全书总纲性导论,第2~7章系统地深入阐明传热基本方式的导热、辐射传热和对流传热,包括对流分析的理论基础。注重明确的物理概念,并且严格地由过程的物理模型建立起相应的数学模型,着重启示工程应用、分析研究的基本观点和演习数理方程的解法。

下册为第8~16章。第8~15章主要介绍自然对流受迫对流换热,相变传热传质,多孔介质热、湿迁移,换热器的热计算,高速气流与稀薄气体的传热传质,微尺度传热传质。第16章对现代传热领域中一些专题进行介绍,着重考虑传热基本方式有机组合的分析原理。前后呼应,力求达到全书风格的统一。注意求实地介绍当前高新技术发展中的前沿性研究动态,以开阔视野。

本书可供从事传热传质研究和高新技术开发研究的工程设计人员参考,也可供高等院校师生,从事交叉学科领域及需要充实传热传质基础知识及其运用者参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程传热传质学.上册/王补宣著.—2版.—北京:科学出版社,2015.4
(中国科学技术经典文库)

ISBN 978-7-03-044158-4

I. ①工… II. ①王… III. ①工程传热学 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第080841号

责任编辑:刘宝莉 张艳芬 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1982年8月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年5月第 二 版 印张:22 1/4

2015年5月第三次印刷 字数:436 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

改革开放后,邓小平同志提出科学技术是第一生产力。我国在国际竞争中不断解放思想,自强不息地改变落后被动的处境,面对工业化、农业现代化、城市化和信息化取得持续的进展,激发了社会经济发展的巨变。进入 21 世纪后,出现了争夺能源资源和全球气候变换的生存环境危机。在和平崛起中建设和谐社会,我国必须转型采取低能耗、低污染、低排放、节约自然资源的低碳经济和可持续发展模式。全球范围内掀起了“能源与环境技术”(EET)的新竞争热潮。近几十年来,工程传热传质学的基础性探索和高技术创新开发萌生出一些新的动向。例如,设备的小型化和微型化引起微尺度传热传质研究的迅猛展开;利用可视化技术的进展深化对传热传质过程细观层次的观测与模拟计算;热管理和控制的精致化促发了溶液和胶体传质和传热的研究等。

第一版(下册)(1998 年版)前言重申全书是为适应我国研究生培养的需要,也为从事传热传质研究的科学工作者和涉及传热传质新技术开发研究的工程技术人员启示思路而撰写,书名取为《工程传热传质学》。与第一版相比,第二版不仅做了通常的修改和增删,包括文字的精炼化,还与时俱进地反映了 15 年来新的发展动向与进展,展示清华团队和同事们的研究成果。对第一版第 10 章以后的各章顺序作了调整,将参考文献分章专列。在基本不增加篇幅的前提下提高了全书的科学启示性和前瞻性。列入讨论的演算示例为 46 例。

第二版分为上、下两册,上册为第 1~7 章,下册为第 8~16 章。清华大学化学系王如骥教授参与了第二版的策划和校改,并承科学出版社工程技术分社刘宝莉同志予以鼓励协作,谨一并表示感谢。稿成时,正值清华大学热工学教研室建立 60 周年,创办工理结合的热物理专业(后改称“工程热物理”专业)55 周年和成立热能工程与热物理研究所 28 周年。本书收进了更多清华团队研究和探索的成果,以表我对共同奋进集体的深切眷恋。

恳切期望同行、学者不吝指正,以使本书在不断修订中充实提高,对我国现代化建设有所贡献。

王补宣

第一版(上册)前言

传热是一种最常见的自然现象。几乎所有的工程领域都会遇到一些在特定条件下的传热问题,包括有传质同时发生的复杂传热问题。现代科学技术突飞猛进,像核动力的大型化、空间技术的深入发展、电子器件的微型化与密集化、环境污染的治理、低温超导、磁流体发电、红外和激光等新技术的应用等,要求传热分析细致化和传热计算精准化。20世纪70年代出现的能源危机,加快了对新能源开发利用的步伐,给传热传质的研究以新的推动。传热传质的应用研究还正在渗入到农业、生物、医学、地质、气象等更为广泛的领域。与此同时,电子计算机的日益普及,计算方法和测试技术的不断改进,充实了传热传质研究的手段,使传热传质学成为当代技术科学中比较活跃的主要基础学科之一。

本书是为了适应研究生扩大培养的需要而编写,在总的深度和广度上都已远超出国内现有高等学校《传热学》教科书的要求。本书将深入地阐明传热传质学的基础理论,注重明确的物理概念。并且严格遵循过程的物理模型,建立相应的数学模型,着重启示工程应用和分析研究的基本观点和方法,根据著者三十多年来从事传热学教学和科研实践所积累的经验 and 体会,尽可能以有限的篇幅提供较新的研究报道和有关的资料线索。希望本书能对从事传热和涉及传热传质的新技术研究与工程设计人员起工作参考书的作用。根据这种编写的意图,本书取名为《工程传热传质学》。

按照教育学的原则,本书采用“由浅入深,循序渐进”的编列方式,注意预留伏笔,前呼后应,相互补充。讲解力求深入浅出,顺理成章,包括指明某些尚待研究的趋向和设想,但又保持科学严谨性,而不是牵强附会。凡在通常教科书里所易见的,尽量避免简单的重复。所收编的例题,也主要限于能用来阐明较深入的典型分析示例。本书用脚注指出所引资料的来源或介绍可以参阅的有关资料,并不想提供全部重要的参考文献。近年来,国际上公开发表的传热传质方面的文献每年已超过一万篇,可以从国际传热传质杂志(IJHMT,月刊)上找到对前一年文献的综述和主要文献的目录。

除了第1章作为全书导论,最后一章扼要介绍一些比较重要的个别专题以外,本书基本上遵循传统的体系,分别讨论导热理论(第2章至第4章)、热辐射理论(第5章至第6章)和对流换热理论(第7章至第9章)。但在具体编排上,努力做到加强前后的连贯性,防止截然的割裂开来。例如,早在第3章就提出了导热积分

方程近似解,第4章用以解半无限大物体的不稳定导热,这为对流换热边界层理论的讲解作了预先的准备。再例如,第7章的篇幅相对比较庞大,不仅引述了所必需的流体动力学基础,还结合不可压流体顺平板流动时的对流传热分析,着重阐述层流与湍流边界层理论,具体指明热量传递与动量传递的比拟理论,以及相似原理和量纲分析的实际意义,为后面的有关各章奠定牢固的理论基础。本书把凝固和熔化、亦即具有移动边界面的固体导热与沸腾和凝结合并成第10章(“有相变时传热”)。紧接着讨论换热器的计算(第11章),以及回热器与固定床和流化床的传热(第12章)。把多孔固体的传质冷却(发散和发汗冷却)也放在第12章里处理。高速气流与稀薄气体的传热,本可以归属于比较特殊的个别专题,却被单列成第13章,同时介绍宇宙飞行器重回大气层的传热和烧蚀过程的分析。然后集中讨论传质(第14章),确立传热、传质、动量传递三者之间相互比拟的联系,对自然环境中的蒸发过程和工业上的加湿和减湿过程都作了适当的论述。

本书对数值解法已给予足够的重视,可是对电子计算机作为计算工具的使用,只提供参考资料,未写进专用的计算机程序。著者认为:计算机的算法语言还未统一,每种计算装置的输入设备、输出设备和子程序能力也不尽相同,受全书篇幅的限制,与其介绍计算机的程序编制方法,不如多讲点传热传质的本门知识和基本分析方法。同样的理由,本书只引用数学知识,避免或者尽量少牵涉对整体来说尚非必要的那些比较特殊的数学内容,例如拉普拉斯变换和变分法等。传热传质学的不少方面、包括实验方法在内都能编写成为专著,本书没有打算要囊括一切地全部包罗进去。

本书坚持理论和实际相结合,强调理论的发展要接受实践的检验,务求不抱成见地正确对待精确和近似的分析解、数值解、图解、模拟解、经验公式和工程图表的使用。全书统一使用国际单位制(SI),但温度容许同时使用摄氏温度($^{\circ}\text{C}$),而压力暂先沿用工程上所习惯采用的[巴]和[气压]。

本书在编写过程中,曾得到同事们和许多同行的鼓励和支持,也得到了科学出版社编辑同志的帮助和协作。试用初稿的研究生还曾提出过不少可取的意见和建议。对所有这些同志,著者愿在此一并向他们表示诚挚的谢意。编写这样的一本内容广泛而又要求比较系统深入的书,缺点和谬误在所难免。恳切地希望使用本书的同志们对所发现的缺陷不吝指正,让本书能在不断修改和充实提高的过程中发挥作用,对我国现代化进程有所贡献。

王补宣

于清华大学热能工程系

1980年9月

目 录

第二版前言

第一版(上册)前言

第 1 章 导论	1
§ 1-1 传热传质学的研究对象和方法	1
§ 1-2 传热的基本方式	3
§ 1-3 导热的基本定律和导热系数	6
§ 1-4 对流换热和放热系数	12
§ 1-5 热辐射的基本定律和辐射换热	15
§ 1-6 稳定传热与电路模拟分析法	21
§ 1-7 传质与质扩散系数	23
§ 1-8 单位制	25
参考文献	27
第 2 章 导热理论及其在一维稳定导热解析中的应用	29
§ 2-1 导热微分方程	29
§ 2-2 导热过程的单值性条件	34
§ 2-3 直角坐标的一维稳定导热	36
§ 2-4 圆柱坐标的一维稳定导热	43
§ 2-5 球坐标的一维稳定导热	50
§ 2-6 有内热源的一维稳定导热	52
§ 2-7 枢轴的稳定导热	62
§ 2-8 肋壁的稳定导热	66
§ 2-9 接触热阻	75
参考文献	77
第 3 章 二维和三维稳定导热	79
§ 3-1 分析方法概述	79
§ 3-2 解析法	80
§ 3-3 虚拟热源和映象法	87

§ 3-4 图解法	92
§ 3-5 数值解法	95
§ 3-6 模拟法	105
§ 3-7 导热形状因子	107
参考文献	109
第 4 章 不稳定导热	111
§ 4-1 内部热阻可被忽略时的不稳定导热	111
§ 4-2 大平板的不稳定导热	121
§ 4-3 半无限大物体的不稳定导热	127
§ 4-4 不稳定导热图表	134
§ 4-5 周期性的受热或冷却	143
§ 4-6 不稳定导热的数值解法	149
§ 4-7 不稳定导热的图解法	154
§ 4-8 不稳定导热的热源解法	158
§ 4-9 移动热源的动坐标转换法	167
参考文献	173
第 5 章 热辐射性质	175
§ 5-1 热辐射的物理基础	175
§ 5-2 固体和液体的热辐射性质	183
§ 5-3 气体热辐射性质	188
§ 5-4 火焰辐射	198
§ 5-5 自然环境中的热辐射	200
参考文献	208
第 6 章 辐射传热	211
§ 6-1 由透明介质隔开的固体之间的辐射换热	211
§ 6-2 角系数	222
§ 6-3 辐射传热的网络模拟法	232
§ 6-4 遮热板	236
§ 6-5 正反射表面之间的辐射换热	239
§ 6-6 通过吸收和透射性介质的辐射换热	244
§ 6-7 辐射放热系数和辐射导热系数	250

§ 6-8 平衡温度	251
§ 6-9 辐射能的传递方程	255
参考文献	259
第 7 章 对流传热原理	260
§ 7-1 对流换热的物理基础	260
§ 7-2 流体运动的基本方程	277
§ 7-3 不可压流体沿平板边界层层流放热的精确解法	286
§ 7-4 边界层近似分析解法	299
§ 7-5 湍流时热量传递与动量传递的比拟	310
§ 7-6 不可压流体沿平板边界层湍流时的放热	316
§ 7-7 湍流传热理论的进展	321
§ 7-8 量纲分析和相似原理	329
参考文献	336
索引	339

第 1 章 导 论

§ 1-1 传热传质学的研究对象和方法

传热传质学是研究由于有温度差异所引起的能量传递过程、包括有“相变”时的相际传递和多组分物系因组分分布不均匀的浓度差异伴随发生物质迁移现象的一门科学。

差异就是矛盾,当物体内部或物系之间出现温度差异,或者温度不相同的物体彼此接触时,就有了相对比较“热”和“冷”的矛盾双方,总会发生热量从温度较高区传往温度较低区的传递过程,常称之为“传热”。所传递的热量,无法直接看到,但所产生的效应是可被观察和测定的。体积不变时的物体得到或传出热量,将引起“内能”的增减,反映为温度的升降,或者产生“相”和凝聚态的变化。自发的传热,永远使对立的冷、热双方各自向自己的反面转化:原先温度比较高的,因传走热量而逐渐被冷却;原先温度比较低的,则因得到热量而逐渐被加热。这样,随着相互之间温度差异的缩小,最终将建立起温度一致的“平衡”状态。如果想维持某部分的温度高于另一部分的温度,就必须从外界不断向温度高的那部分补充所传走的热量,并从温度低的那部分取走所传入的热量。

传热,当然包括热量传递同时,出现能量形式之间转化的更复杂的过程。例如,高速气流对固体表面的“气动加热”效应,电机电器的通电发热,电光源在白炽高温下的辐射热,化学反应总伴随着吸热或者放热等,所传递的热量就来源于机械能、电能、光能、化学能等其他形式的能量转化为内部分子随机“热运动”形式的热能。因此,广义的传热量可被看做是“能量传递学”。而研究热和其他形式能量之间相互转化的科学分支是“热力学”。这表明:传热过程必须遵守热力学第一定律和热力学第二定律这两个自然规律。热力学第一定律所阐明的,是运动不灭、能量守恒和可转化的自然法则,任何传热过程决不能违背能量收支平衡的原则。热力学第二定律指出自然界的总是有条件进行的,传热只能从温度较高处传往温度较低处,引起“熵”增和能量可用性的损失^[1,2]。热力学把传热量和功量(包括机械功、电功等)作为“转移能”而与宏观的位能、动能、内能的作为“储存能”明确区别开来。转移能是由过程前后储存能的改变转化来的。但是,经典热力学只限于研究“平衡态”和保持动平衡的“可逆过程”。而热量传递的过程是温度不平衡的结果,是典型的不可逆过程,必须由另一个学科分支对传热的快慢程度进行定量分析

和计算,这个学科分支就是“传热学”。具体地说,如果不发生能量形式的转化,单纯传热过程的外传热量将是过程前后的内能差与功量的代数和。这种热力学分析,既不涉及传热的机理,也不涉及外传热量所需时间的长短。温差越大,传热越快,引起能量可用性的损失越多。专门研究传热的规律,计算给定条件下的传热速率和“热流量”^①的大小,是传热学的任务。传热学和热力学,是理解各种热物理现象的理论基础,也是创新热利用和热管理技术及其经济性分析的重要依据。

在现代工程设计和运行中,经常遇到有关加热/冷却、蒸发/凝结、熔化/凝固、隔热保温等各种各样的实际问题。例如,热工和化工技术人员在评价锅炉、制冷机、换热器和反应器的设备大小、能力和技术经济指标时,就必须进行详尽的传热分析。一些工作在高温气氛下的部件,如燃气轮机的透平叶片和燃烧室壁,能否在设计工况下长期正常运行,取决于保护金属结构材料的冷却措施是否合适可靠,还需重视热应力和由此引起的形变等问题。许多新兴技术装备,如原子反应堆的堆芯、大功率火箭的喷管、紧密的电子器件、重返地面的宇宙飞行器等,要使设计和运行安全可靠,必须严密控制传热情况以维持合理的预期工作温度。而对连续工作的电机、变压器和轴承,同样要防止因超温过热而损伤设备。在机械制造工艺方面,不仅热加工直接牵涉到温度分布和随时间变动速率的控制问题,精密机床的切削速度也会引起刀具和加工件的发热并影响加工精度和刀具寿命。建筑部门将遇到围护结构的隔热保温、大型混凝土结构在快速浇灌中出现热应力等技术问题。列举的所有传热问题可归纳为两种类型:一类着眼于传热速率的大小及其控制问题,或者增强传热以缩小设备尺寸或提高生产能力,或者削弱传热以避免散热损失或保持设备内部低于周围环境温度;另一类着眼于温度分布及其控制问题。控制传热,必须按照客观规律,分析传热的具体情况,找出有效的控制措施。有关高温部件保护性冷却的进展,使传热与传质紧密地结合起来,传热学逐渐引申为传热传质学。

像其他工程科学一样,工程传热传质学也需要在解决实际问题时作出适当的假定和简化条件。对工程研究来说,通常不可能完全确切地描写实际现象的一切方面,总要扬弃某些次要方面,作出近似化的处理。这可以运用“数量级”分析的方法,暂时先忽略那些影响程度相对很小的因素,使复杂的问题基本得到解决而又保证必要的准确性。当然,在表达这种最后的解答时,一定要强调所依据的假定和近似假设条件。物质的热力学性质和传递性质(或叫“迁移性质”),往往随温度改变,

^① “热流量”这个名词沿用已久,带有浓厚的“热素说”(或“热质说”)的烙印。错误的“热素说”统治了物理学近两个世纪,把热量当做一种没有重量的物质“热素”从温度较高处流向温度较低处,于是,单位时间传递的热量被称为“热流量”。至今通用的热量的计量单位“卡”本身,也就是“热素”(calorie)音译的简称。直到19世纪中叶,才公认传热量是一种转移能,并正式建立起热力学理论。

如果选定适宜的平均值并取作常量处理,传热速率的计算将大为简化,不会引起最终结果的明显误差。例如,固体受热时,体积膨胀所做的功,相对于内能的增加,总可被忽略不计;气体分子的间距虽比固体和液体的都大,除非压力太低,气体过于稀薄,分子相互碰撞的“自由径”长度比起传热分析所考虑对象的几何尺寸来,仍然小到可以看做是“连续”介质。再例如,长期连续运行后,会使锅炉、换热器和反应器的受热面上结垢而削弱传热速率,需要在设计时引进合理的安全系数或预估垢层影响,免得运行一段时间后达不到铭牌出力。这种解决问题的简化和近似,需要从事设计和运行改进的科技人员具有一定的工作经验和细致考虑问题的能力。

自然界到处存在着温度差异,传热是一种非常普遍的自然现象。但是,传热又有它复杂的一面,可以有不同的基本方式;传热速率并不由单一的关系式所决定,而是不同的方式分别受不同物理定律的制约。所以,尽管人们基于对热与冷的现象本质的追究,很早就开始摸索传热的规律性,但传热学单独形成一门系统的科学,却只有一个世纪的历史。理论的基础是实践,又反过来为实践服务。随着科学技术的日新月异,特别在原子能和其他新能源的开发利用、宇宙航行等尖端技术方面不断出现新的传热和隔热等关键问题,促使传热学得到越来越迅速的发展。电子计算机的逐步普及,计算和测试技术的继续改进,也正在丰富传热传质研究的手段,从而加速传热传质研究的进展。

本章作为全书的总纲性导论,在随后几节中将扼要介绍传热的基本方式,给出有关的定义和最基本的概念,以便由浅入深、由简单到复杂,相互联系地分章讨论时,不会看不到全局而损害对整体的考虑。既重视本质性的基础分析,也适当展示应用的发展趋势性,提供相关的资料信息。

§ 1-2 传热的基本方式

在传热文献里,通常认为传热可有三种不同的基本方式:“热传导”、“热对流”和“热辐射”。

“**热传导**”简称“导热”,是指温度不同的各部分物质仅仅由于直接接触,没有相对宏观运动时所发生的能量传递现象。导热是物质的本能。如果追根究底,根据分子运动论,温度是物质热运动激烈程度的衡量,只要物体内部温度分布不均匀,不同地点微观粒子的动能就不会相等,通过气体中分子或原子彼此碰撞、液体和不导电固体(介电质)中弹性波的作用,或者在金属中还依靠自由电子从温度较高区向较低区的扩散而引起能量的传播。

“**热对流**”是指流体(气体或液体)中温度不同部分相互混合的宏观对流运动引起热量传递的现象。流体温度分布不均匀时,也将本能地产生导热。因此,热对流总和流体的导热同时发生,原则上可以看做是流体流动时的导热。工程上最具有

实际意义的是相对运动着的流体与所接触的固体壁面之间的热量交换,一般称为“对流换热”,简称“放热”或“给热”过程。无论“放热”或“给热”都不过是一种技术名词,用来泛指流体与壁面之间温度较高的一方把热量传给温度较低的另一方。此时,流体的运动情况将主要影响热对流作用的有效性。研究对流传热,总离不开流体的导热和流体力学的基础性考虑。

“热辐射”是指物质对外发射波长 $0.1\sim 100\mu\text{m}$ 的“热射线”在空间传递能量的现象。波长从单色紫光的 $0.38\mu\text{m}$ 到单色红光的 $0.76\mu\text{m}$ 的部分热射线是人眼能分辨的可见光,波长超过 $0.76\mu\text{m}$ 的射线是红外线,而波长短于 $0.38\mu\text{m}$ 的则是紫外线。习惯上,“辐射”常被用来概括电磁波的发射,电磁波所承运的能量就称为“辐射能”,是以光速推进、依靠光(量)子传递的能量,可以更形象地把发射电磁波当做对外发射射线的“能束”。热射线承运的辐射能则称为“辐射热”。太阳向地球表面辐射热量,就是典型的热辐射过程。其实,任何可见的物体都在连续向外发射辐射热,温度越高,不仅热辐射越强,而且辐射能量按波长分布的比重将越多地从红外转向可见光部分。例如,工程上最常遇到的是温度低于 1500°C 的热辐射,辐射能量绝大部分集中在红外部分,可见光和紫外部分所占的份额小到可忽略不计。正由于这个缘故,往往把热辐射看做是红外辐射。但是,太阳表面温度高达 6000K 左右,太阳辐射热总量 $1/3$ 集中分布在可见光部分。可见光的辐射可直接观察,所以常用光辐射来对比理解热辐射现象。当热射线穿过空间,落在固体或流体表面时除了一部分能量将被表面反射以外,都将被表面薄层里密集分子所吸收。金属的这个表面薄层厚度只有零点几微米,非导体也不过零点几毫米。玻璃、石英之类的固体和多数液体对于可见光具有一定的透明性,对红外辐射同样表现为强烈的吸收性。可以认为:在一般密实固体内部和液体中不会有辐射热的传播。气体分子的自由径较大,容许热射线在分子之间的空隙里穿行,而热辐射可透过相当厚的气体层。

热辐射不同于导热和热对流,是不接触的传热方式,不依赖常规物质的中间媒介作用,是高度真空中唯一能传递能量的方式。两个不接触的物体表面,或者固体或液体表面与周围气体间的相互辐射和吸收,就构成“辐射换热”或“辐射传热”过程,引起净热量从温度较高的一方向温度较低的另一方转移。

除非存在空气夹层或者气隙,在不透明的密实固体内部只能由导热传递热量。液体和气体各处的温度不一致时,除了流体(液体或气体)层非常薄以外,总会在发生导热的同时,因密度的差异出现“自然对流”。气体中,还可以有热辐射起作用。无论导热、对流换热或辐射换热,都需要有传热温差,这是它们的共性。工程上常遇到的传热过程,往往是导热、热对流和热辐射三种方式的具体组合。例如,对于现代工业企业里最常见的各种换热器,让温度不同的两种流体(气体或液体)在器内流过时,为了防止它们彼此混杂而用固体壁隔开,这样,从进口到出口,热流体传

热给冷流体的结果是热流体被冷却,而冷流体则被加热。在图 1-2-1 示意的热流体传热给冷流体的整个过程中,实际上包含三个串联的阶段:热流体与固体壁面左侧表面之间的对流换热;固体壁内部的导热;固体壁右侧表面与冷流体之间的对流换热。当流体不是液体而是气体时,壁面和气体之间既可以依靠对流换热,还可以因壁面发射和吸收热射线而出现辐射换热。若热流量 Q ^① 不随时间改变,则称换热的工况“稳定”。此时,热流量 Q 也必须沿途成为常量。因为左侧传给壁面的热流量 Q_1 若与右侧从壁面传走的热流量 Q_2 不相等时,固体壁就会蓄积或者损失热量,表现为壁温的升降,从而改变壁和两侧流体之间的温差,不可能保持原有的热流量 Q_1 和 Q_2 稳定不变。

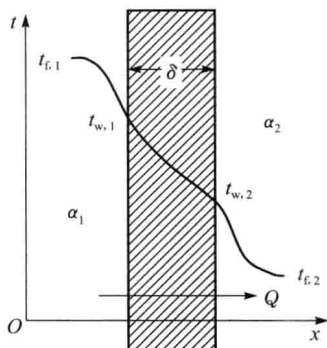


图 1-2-1 通过平壁的稳定传热

分析实际传热问题,不仅需要弄清楚哪些基本方式在起作用,还应搞清传热过程属于“稳定”还是“不稳定”^②。工程传热问题很多属于工况“稳定”的类型。调节换热器的工况,改变热流体/冷流体的进口温度和流量时,或者把热处理件投入炉中加热升温所经历的是不稳定传热过程。这种随时间变动的热现象总是比稳定传热的现象复杂得多。一种特殊的情况是环境温度重复周期性地变化,当每一个周期都与前一个周期或后一个周期的发展过程完全相同时,就称其为“周期性传热”或“准稳定传热”过程。

参看图 1-2-1,经验表明:在稳定工况下,每单位时间通过平壁所传递的“热流量” Q 将正比于平壁两侧流体的温差 $(t_{f,1} - t_{f,2})$ ($^{\circ}\text{C}$) 和平壁表面积 F (m^2), 或

$$Q = kF(t_{f,1} - t_{f,2}) \quad (\text{W}) \quad (1-2-1)$$

式中,比例系数 k 以 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ^③ 计,称为“传热系数”,代表两侧流体温度相差 1°C 时,单位时间每平方米传热面积所能传递的热量。若引进单位面积的“热流密度”(或“热流量”,也可称为“热流强度”) q (W/m^2), 即 $q = Q/F$, 代表每平方米传热面积所负担的热流量,则

$$q = k(t_{f,1} - t_{f,2}) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (1-2-2)$$

换热器所需承担的总热流量 Q 可以看做是换热器的“总热负荷”,而 q 则是“面积热负荷”。很明显,传热系数 k 越大,传热越强烈,换热器能够承担更大的“面积热

① 采用工程单位制时,热量的计量单位为卡(cal)或千卡(kcal), $1\text{cal} = 4.186\text{J}$;热流量 Q 的单位是 W ; $1\text{W} = 1\text{J}/\text{s} \approx 0.24\text{cal}/\text{s}$ (详见 § 1-8)。

② 我国力学界常把“稳定”和“不稳定”命名为“定常”和“不定常”。

③ 采用工程单位制时,热流密度 q 的单位是 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 传热系数 k 的单位是 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。 $1\text{W}/\text{m}^2 = 0.86\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (详见 § 1-8)。

负荷”，具备更大的传热能力。但是， k 值只表征过程进行强弱的数字鉴定，并未揭示出过程的实质。如果两个结构完全相同的换热器，试验的结果指出一个换热器的传热系数 k_1 高于另一个换热器的传热系数 k_2 ，那么仅从这两个数值 k_1 和 k_2 还不能确定第二个换热器工作不好的原因。图 1-2-1 所示意的通过平壁的稳定传热过程实际上有着广泛的代表性，如冬季的室内空气向室外大气的散热、各种工业炉和锅炉炉墙的对外散热等，都是这方面的典型实例。此时，和换热器相反， k 值越大，说明热损失越多，要想维持适宜的室温和炉内温度，就需要增加供热设备的负担。

任何有意义的工程分析，总包含两个方面：定性判断和定量计算。举例来说，要改进换热器的工作，提高它的传热能力，需要具体进行定性分析，判断增大传热速率的各种可能途径，通过定量计算以确定传热速率究竟能增大到多大。事实上，传热系数 k 的大小将取决于两种流体的各自性质和流动情况以及固体壁的材料、形状和大小等许多因素。作出这种影响 k 值的定性和定量分析，必须研究各种不同的传热方式所受控的物理定律和关系式，弄清楚各不同传热方式同时起作用的并联或串联的性质。

§ 1-3 导热的基本定律和导热系数

导热属于接触传热，是连续介质就地传递热量，并无各部分物质之间宏观的相对位移。在密实、不透明的固体内部，只能依靠导热的方式传递热量。导热永远和温度分布不均匀联系在一起，是热运动的扩散传播。

在 (x, y, z) 直角坐标系中，连续介质各个地点在同一时刻 τ 的温度分布，亦即“温度场”最一般的数学表达式为

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (a)$$

温度场不随时间变动时称为“稳定温度场”，由此产生的导热为“稳定导热”。温度只沿 x 一个坐标轴发生变化的“一维”稳定温度场具有最简单的数学表达式： $t = f(x)$ 。 t 为常量时就变成温度均匀一致的平衡态，不会再有导热现象存在。

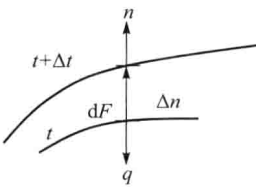


图 1-3-1 温度梯度定义的示意图

任何给定地点的温度不可能在同一时刻 τ 具有一个以上的不同值，所以两个不同温度的等温面或两条等温线绝不会彼此相交。参看图 1-3-1，在等温面上，不存在温度差异，也就不可能有热量的传递。导热只能沿着等温面的法线方向，并且朝着温度降低的方向进行。令

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n}$$

表示 τ 时刻、在某个地点朝着温度增加方向的温度变化率，称为“温度梯度”。如果是稳定温度场，那么温度梯度仅仅决定于地点，不跟随时间而变动。此时

$$\text{grad } t = \frac{dt}{dn}$$

温度梯度是一种沿等温面法线方向、朝着温度增加方向的矢量。负的温度梯度称为“温度降度”，表示朝着温度降低方向的温度变化率。在任意时刻 τ ，均匀连续介质各个地点就地传递的“热流密度” $q(\text{W}/\text{m}^2)$ 正比于当地的温度降度，即

$$q = \lambda(-\text{grad } t) = -\lambda \text{grad } t \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (1-3-1)$$

负号表明导热的方向与温度梯度的方向相反，永远顺着温度降低的方向，如图 1-3-1 所示。式(1-3-1)就是傅里叶^①于 1822 年提出的导热基本定律^[3]——傅里叶定律的数学表达式。式中引进以 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 计量的比例系数 λ ，称为“导热系数”。 λ 是物质的宏观性质，表明物质导热能力的热物理量，代表每单位温度降度所能容许通过的热流密度。稳定导热时，任何地点 q 都决不会随时间发生变化。

实质上，可以认为式(1-3-1)提供了表征物质导热能力的 λ 的定义式。不同物质的 λ 值可以相差很大，从高真空(压力低于 10^{-4}mmHg 时)气体的导热能力将近于零，到天然铜晶体在极低温 -253°C 出现超导性时约为 $1.2 \times 10^4 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。同一种物质的 λ 值则取决于它的化学纯度、物理状态[温度、压力、成分、容积重量(简称容重)、吸湿性等]和结构情况。一般来说，从微观角度，气体分子的间距远比液体和固体的大，分子自由程长，分子的运动又是随机运动，沿给定方向由分子碰撞引起扩散传播能量的宏观能力必然比较小。同样是气体，分子量越小和温度越高时，分子运动速度越快，也就越容易导热。例如，空气在 0°C 和 500°C 时的 λ 值分别为 $0.024 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $0.058 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，而氢的 λ 值相应地为 $0.175 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $0.39 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。氢的导热系数是气体中最高的，几乎是同温度下空气 λ 值的 7 倍。除液态金属之外，液体以水在 120°C 时的导热系数最大，约为 $0.69 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；油类的 λ 值在 $0.1 \sim 0.15 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。液体的 λ 值随温度升高而减小，但 $0 \sim 120^\circ\text{C}$ 的水、甘油是例外。常温下有机液体的 $\lambda \approx 0.175 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，变动范围很少超过 $\pm 20\%$ ^[4]。在液体和不导电固体中，分子密集，能量的传递将依靠弹性振荡， λ 值通常比气体大。不过，在液体和非结晶固体中，这种弹性波的作用多少受分子和原子不规则排列的阻碍。晶体由于增加了晶格振动的传递形式，导热系数比非晶体高。金属，还由于主要依靠分子间自由电子的扩散和碰撞作用，导热系数远高于非金属。

在各种工业用纯金属中，银的导热系数就像它的导电能力一样，是最好的^②，在常温下 $\lambda = 410 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；然后依次为紫铜、黄金和铝，在常温下 λ 值分别为

① J. B. J. Fourier(1768—1830)，也曾音译为傅里叶或富里埃，法国数学物理学家，在 1822 年所著《导热的解析理论》一书中，为了对实际场求解式(1-3-1)，第一次提出了现代数学中所熟知的傅里叶级数。

② G. Wiedeman 和 R. Franz 首先在 1853 年提出假定，经 L. Lorenz 在 1872 年证明：金属的导热系数 λ 正比于同温度 T 下的导电系数 λ_e ，并且 $\lambda/(\lambda_e T)$ 是常数。这个关系式称为“韦德曼-弗朗茨-洛伦茨式”，实测到的 0°C 时不同纯金属的值为 $(22.4 \sim 24.4) \times 10^{-9} \text{V}^2/^\circ\text{C}^2$ 。

385W/(m·°C)、303W/(m·°C)和204W/(m·°C)。加入任何杂质,都将破坏晶格的整齐性而干扰自由电子的运动,使金属导热系数减小。例如,黄铜、钢铁和不锈钢的 λ 值分别降低到88W/(m·°C)、45W/(m·°C)和16W/(m·°C)左右。纯金属的导热系数也和导电系数一样,随着温度升高而有所减小;不过在高温下,除黑色金属以外, λ 值近乎不变。合金和高合金钢则随温度上升而 λ 值增大。金属加工所残留的应力,将造成晶格扭曲而使 λ 值下降。研究物质的导热系数等各种热物理性质在不同状态下的变化规律,包括宏观定值的整理和微观机理的解释,属于仍在发展中的“热物性学”的范畴^①。

固体中, λ 值最小的是保温材料,其次是建筑材料。通常把室温下 $\lambda < 0.2$ W/(m·°C)的材料称为“热绝缘材料”。这些材料和筑炉用的耐火材料,照例都是多孔或纤维性材料,利用空隙中的静止空气得到隔热效果。严格地说,这类材料不再是均匀连续介质,只能有“表观的导热系数”或当做连续介质折算的“当量导热系数” λ 。容重减小时,表示气隙增多, λ 值下降;但容重小到一定程度后,孔隙会连通成沟道,引起空气对流,同时出现内部辐射,反而使表观的导热系数升高。因此,对隔热保温来说,存在着“最佳容重”。毛细多孔体容易吸湿,水分的渗入替代了相当一部分空气,使 λ 值显著升高。例如,干燥的红砖在常温下的 λ 值为0.46 W/(m·°C);在营造状态下,同样是常温,红砖的 λ 值却升高为0.86W/(m·°C)。作为热绝缘材料,应力求保持干燥,避免与潮湿的环境直接接触,常在表面增加防潮保护层。建筑材料、保温材料和耐火材料,往往随温度升高而 λ 值增大,少数例外,如镁砖从200°C时的 $\lambda \approx 3.5$ W/(m·°C)降低到高温范围的 $\lambda \approx 2.4$ W/(m·°C);受湿后, λ 值变大,但水分的影响程度常随含湿量的增加而减小。

注意:式(1-3-1)是从稳定导热的大量实验归纳得出的物理定律,1822年由傅里叶通过数学演绎而被引申到同样适用于非稳态的“瞬态导热”的导热基本定律。这已被广泛证实和使用,详见第4章。但从物理观点来看,温度场突然受到干扰时,在 (x, y, z) 地点, q 的被动变化必滞后于该地点温度降度的变化,重建正常关系需经历弛豫时间 τ_0 ,即

$$\dot{q}(x, y, z, \tau + \tau_0) = -\lambda \text{grad}t(x, y, z, \tau)$$

Cattoneo(1958)和Vernotte(1961)提出了现被公认的、以两人的姓氏首字母命名为“C-V式”^[6]:

$$\tau_0 \frac{\partial \dot{q}}{\partial \tau} + \dot{q}(x, y, z, \tau + \tau_0) = \lambda \text{grad}t(x, y, z, \tau) \quad (1-3-2)$$

式(1-3-2)比式(1-3-1)增加了非傅里叶项 $\tau_0 \frac{\partial \dot{q}}{\partial \tau}$,代表 τ 至 $\tau + \tau_0$ 期间 \dot{q} 的过渡性增

^① 从物质微观结构出发,以量子统计力学为基础,探索物质宏观热物理性质的有效计算方法的学问,也被归纳为力学的一个分支,钱学森^[5]曾称之为“物理力学”。