



面向 21 世纪课程教材  
普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 传热学

第三版 杨世铭 陶文铨 编著

# Heat Transfer

HIGHER EDUCATION PRESS

高等教育出版社

面向 21 世纪课程教材  
普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 传 热 学

(第三版)

杨世铭 陶文铨 编著

高等教育出版社

(京)112号

**图书在版编目(CIP)数据**

传热学 / 杨世铭, 陶文铨编著. —3版, —北京: 高等教育出版社, 1998

高等学校教材

ISBN 7-04-006693-9

I. 传… II. ①杨… ②陶… III. 传热学-高等学校-教材 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 29699 号

\*

高等教育出版社出版

北京沙滩后街 55 号

邮政编码:100009 传真:64014048 电话:64054588

新华书店总店北京发行所发行

北京民族印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/18 印张 29 字数 540 000

1980 年 10 月第 1 版

1998 年 12 月第 3 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

印数 0 001—12 497

定价 23.50 元

凡购买高等教育出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页等  
质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换

版权所有,不得翻印

TK124  
47-3

402661

## 内 容 提 要

本书是在参照《传热学课程教学基本要求》(修订版),广泛征求各校使用意见和建议,深入开展教育部下达的“面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革”计划中“热工课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目研究的基础上修订而成的。

本书根据我国“科教兴国”国策和科学技术发展对我国高等教育提出的要求,以及世界各国传热学课程教学的发展趋势,前瞻性地把握了科学技术发展、教学手段改革对传热学课程教学的影响和促进,在课程的体系结构和教学内容方面做了较大改进和探讨,加强了学生开创精神、解决工程问题能力的培养,以适应 21 世纪的挑战。全书共 10 章,包括导热、对流换热、辐射换热、传热过程和换热器等内容,并特别增加了“几个专题”一章,以开扩学生视野。全书有极其丰富的习题,以适应教学需要;有详尽的参考文献,供学生深入学习、研究时参考。

作为普通高等教育“九五”国家级重点教材,本书在编写、审稿、编辑加工和装帧设计等方面均做了深入细致的工作,质量上乘,可作为能源动力类、化工制药类、航空航天类、环境与安全类、交通运输类、武器类及土建类等大类专业的教材或教学参考书,亦可供有关工程技术人员参考。

## 第三版前言

本书自 1980 年问世以来受到广大读者的欢迎,国内高等工业院校纷纷采用作为教材。初版及第二版先后共印刷 20 次,发行量达 16 万册。为了使教材能更好地适应 21 世纪的高等工程教育,1995 年决定改版修订,陶文铨教授参与了本版的全面修订工作。1996 年 6 月国家教委“面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划”中列入了“热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践”的项目,促进了热工系列课程改革工作的开展,也使我们更加明确了修订的指导思想。我们一方面对国外的最新传热学教材进行了剖析,同时在 1996 年 8 月做了一次全国性的问卷调查。从所收到的调查表来看,广大教师在肯定了第二版的成绩与优点的同时,也提出了许多宝贵的修改意见。本版的修订过程历经了两年多的时间。它的产生,既是作者长期从事传热学的教学、课程改革、科学研究的结晶,也溶入了全国广大热工教师的宝贵意见,同时也是面向 21 世纪“热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践”研究项目的一项重要研究成果。

本书第三版的主要特点表现在以下诸方面。

1. 现代化的教材不仅要求不断更新教学内容,而且在教材的体系及编排结构上也要符合时代的要求。在这一方面本版做了以下改革:(1) 随着计算机的迅速发展及应用的普及,热物理问题的数值模拟方法已越来越显示出其重要的作用。为适应这一形势,本版把导热问题的数值计算列为专章,着重从数值计算的原理与方法方面加强对学生应用能力的培养。同时考虑到现阶段我国工科大学生应用计算机及编程的能力已比本书初版时有很大的提高,书中不再附以用 FORTRAN 语言编写的算例程序。(2) 本版把全书的内容分为带共同性的基础部分(第 1~9 章)及专题部分(第 10 章),以利于教师根据实际情况进行取舍,同时也为教师的教学提供了一定的自由度:教师可以把自己从事某一传热问题研究的成果用专题的形式向学生作适当的介绍。(3) 本书第二版在详细地论述了导热、对流换热及辐射换热后,只以传热过程及换热器作为传热问题综合分析的落脚点,本版还从实际工程传热问题中筛选了三个例子列出专节进行介绍,使读者在第一章简单综合的基础上能在更高认知的层次上来进行综合。(4) 在对流及辐射两部分做了结构上的调整:在对流部分第一节中加入了对流换热的分类树,并且介绍了对流换热的研究方法,使读者对各种形式的换热及不同的研究方法有一个总体的了解,以免产生头绪纷乱的感觉;辐射部分分成了基本定律、表面性质及辐射换热计算两章,以便于组织教学。

2. 根据科学技术的发展更新教材内容,既是教学内容与课程体系改革的重要方面,也是不断提高教材质量的长期努力方向。本版一方面对传热

学的经典内容加以精选,删去了与先修课程重复的部分以及一些虽在历史上起过作用但在现代教材中可以精简的部分;另一方面充实了一些必要的或新的内容。删去的内容有流体动量守恒方程、质量守恒方程的推导,火焰辐射,一维非稳态导热的分析解等;增加的内容有一维半无限大物体的非稳态导热、影响沸腾换热的因素及大容器和管内湍流换热的新计算式。同时,作者还注意到应用新的研究成果对一些经典内容作创新处理,例如引入了作者自己的研究成果——大空间自然对流换热计算式及过渡区判据;引入了一维非稳态导热正规状况阶段的计算式以代替传统的海斯勒图。关于固体表面间辐射换热计算的封闭腔模型的论述也溶入了作者的研究成果。本版还增加了传热学发展史一节。这部分内容对读者了解传热学与生产技术发展之间的联系,从而进一步树立历史唯物主义的观点有所裨益。

3. 我们认识到,在教育思想方面,传热学课程的教学应当从以往的单纯地为后续专业课服务而转变到着重培养学生的素质与能力方面来。重视能力的培养是传热学课程理论联系实际的核心问题。因此,作者在教材内容的组织与表达方面十分注意对学生综合分析能力及解决问题能力的培养,有意识地利用基本内容中的典型范例,如肋片温度场的分析、温度计测温套管误差的确定、水冷壁管角系数的求解、对数平均温差计算式的推导等,把合理简化、抽象建模及求解的数学原理等关键环节交代清楚,以利于培养读者应用基本理论求解实际问题的能力。作者还认为,习题的选取与编排也能在这方面起到重要作用,为此本版也做了切实的改进。习题数量从 384 题增加到 554 题,每章习题大致按内容分类,并都包括有综合分析题;每类题目又大致按难易程度排列,利于读者选做。其中相当一部分综合分析题是从实际工程问题中或科学研究中提炼出来的,对培养学生的能力会起到积极的作用。

4. 传热学是一门应用性极强的基础课程,同时热传递现象的理论分析又涉及到许多数学理论与方法,如导热微分方程是数理方程课程中所援引的三大偏微分方程之一,而对流换热问题的理论解正是目前许多科学工作者所孜孜以求的难题。对于学习本课程的大多数学生而言,毕业后要面向国民经济主战场,到工农业生产实践中去解决实际问题,因而在课程学习过程中培养学生的工程观点显得十分重要。本版在这方面也做了认真的考虑。在介绍传热问题的数学描述时,注意其物理与工程的背景。除在各章中增加了工程应用的论述及有工程背景的习题外,还注重引导学生从辩证的观点来看待传热学发展过程中建立起来的特征数方程。针对实验点与方程之间的一定离散度,指出认识一个复杂的物理现象往往要经历长时间的探索,特征数方程会不断有所发展,而当前实验点与方程间的离散程度反映了现有的认识水平。本版通过多次举例指出,对同一问题用不同的公式计算,只要都在实验的验证范围和工程允许的误差范围之内,都能满足工程需

要。工程观点要求全面地考虑问题。本版通过阐述强化换热与增加阻力间的辩证关系等加强了克服片面性的论述。关于导热微分方程应用范围的说明又是一例。一方面指出它是基于热量传递的速度是无限大的这一假定的,因而不适用于微时间的导热过程;另一方面又通过计算实例说明对于一般工程问题该方程得出的结果已足够准确,可以满足工程的需要。

5. 尊重学生自主学习精神,重视学生在学习过程中的主体地位,不把他们单纯地作为传授知识的对象而启发他们学习的主动性,给他们留下思维的空间从而进一步培养创新的思维能力,这是我们在修订过程中又一个重要的指导思想。创造性思维能力的培养是一个过程,需要在各门课程的学习过程中逐步得到训练。为此我们做了以下的安排:在每个例题后都增加了讨论,以培养学生举一反三、触类旁通的能力;在每章后都有思考题,不仅包含了该章主要概念的复习,而且也纳入了相当一部分需要读者深入思考才能得出结果的问题;在综合性习题中收集了一些没有确定答案或文献中常常引起混淆的问题;在正文的相应部分介绍了传热学的发展前沿内容,如微尺度传热,使部分学有余力的读者有问题可思考,有内容可研究;在本书的结尾概述了传热学在各个工程与技术领域中应用的概况及当前存在的问题,更给读者开辟了广阔思考空间。

我们愿借此机会感谢本版主审人清华大学任泽需教授对书稿提出的十分宝贵的意见,并感谢参加1997年11月广州审稿会的西安交通大学、清华大学、天津大学、华南理工大学、东南大学、华中理工大学、上海交通大学、北京科技大学、太原重型机械学院及重庆大学的代表所提出的许多建设性的意见。我们感谢特约审稿人上海交通大学孔祥谦教授、东南大学戴锅生教授和热工课程教学指导委员会审稿人——课委会委员天津大学赵镇南副教授所提出的详尽中肯的意见。西安交通大学王秋旺副教授、赵长颖博士、成昌锐和王良研究生提供了本版习题的部分解答,何茂刚博士提供了一部分制冷工质的热物性数据。此外,第二版使用期间我们收到了许多教师和同学的书面意见,对书稿质量的提高也起了很大的作用。在此我们谨向爱护本书、为提高本书质量做出贡献的同志们表示衷心的感谢。

限于水平,虽经努力,书中错误与不妥之处仍在所难免,诚恳欢迎读者批评指正。

杨世铭 陶文铨

1998-09

## 主要符号表

$a$	热扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$
$A$	表面积, $\text{m}^2$
$A_c$	截面积, $\text{m}^2$
$b$	宽度, $\text{m}$
$c$	比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ; 光速, $\text{m}/\text{s}$
$c_B$	组分 B 的物质的量浓度, $\text{mol}/\text{m}^3$
$c_f$	范宁摩擦系数
$c_p$	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$c_1$	第一辐射常量, $\text{W}\cdot\text{m}^2$
$c_2$	第二辐射常量, $\text{m}\cdot\text{K}$
$d$	直径, $\text{m}$
$D$	扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$
$E$	辐射力, $\text{W}/\text{m}^2$
$E_\lambda$	光谱辐射力, $\text{W}/\text{m}^3$
$f$	达尔西阻力系数; 频率, $\text{Hz}$
$F$	力, $\text{N}$
$g$	重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$
$G$	投入辐射, $\text{W}/\text{m}^2$
$h$	对流换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
$H$	焓, $\text{J}$ ; 高度, $\text{m}$
$I$	电流, $\text{A}$
$j$	传热因子
$J$	有效辐射, $\text{W}/\text{m}^2$ ; 电流密度, $\text{A}/\text{m}^2$
$k$	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
$L$	定向辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
$l$	长度, $\text{m}$
$M$	质量通量密度, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
$M_r$	相对分子质量
$n$	物质的量, $\text{mol}$ ; 折射率
$N$	物质的量通量密度, $\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$



$p$	压力, Pa
$P$	功率, W; 周长, m
$q$	热流密度, W/m <sup>2</sup>
$q_m$	质量流量, kg/s
$q_V$	体积流量, m <sup>3</sup> /s
$Q$	热量, J
$r$	半径, m; 汽化潜热, J/kg
$R$	热阻, K/W; 摩尔气体常数, J/(mol·K); 电阻, $\Omega$
$R_A$	面积热阻, m <sup>2</sup> ·K/W
$s$	程长, m; 管间距, m
$S$	形状因子
$t$	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
$T$	热力学温度, K; 周期, s
$u$	比热力学能, J/kg; 速度, m/s
$U$	热力学能, J; 电位差, V
$v$	比体积, m <sup>3</sup> /kg; 速度, m/s
$V$	体积, m <sup>3</sup> ; 电位, V
$w$	速度, m/s
$w_B$	组分 B 的质量分数
$W$	功, J
$x$	笛卡尔坐标, m; 干度
$x_B$	组分 B 的摩尔分数
$X$	角系数; 无量纲坐标
$y$	笛卡尔坐标, m
$z$	笛卡尔坐标, m
$\alpha$	体胀系数, K <sup>-1</sup> ; 吸收比; 衰减系数, m <sup>-1</sup>
$\alpha(\lambda)$	光谱吸收比
$\beta$	肋化系数
$\gamma$	表面张力, N/m
$\delta$	厚度, m
$\varepsilon$	发射率; 换热器效能
$\varepsilon(\lambda)$	光谱发射率
$\eta$	(动力)粘度, Pa·s; 效率
$\theta$	过剩温度, $^{\circ}\text{C}$ 或 K; 平面角, rad
$\Theta$	无量纲过剩温度
$\lambda$	波长, m 或 $\mu\text{m}$ ; 导热系数, W/(m·K)

$\nu$	运动粘度, $\text{m}^2/\text{s}$
$\rho$	密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 反射比; 电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$
$\rho_B$	组分 B 的质量浓度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho(\lambda)$	光谱反射比
$\sigma$	斯忒藩-玻耳兹曼常量, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
$\tau$	时间, $\text{s}$ ; 透射比
$\tau_c$	时间常数, $\text{s}$
$\tau(\lambda)$	光谱透射比
$\Phi$	热流量, $\text{W}$
$\varphi_B$	组分 B 的体积分数
$\psi$	对数平均温差修正系数
$\Omega$	立体角, $\text{sr}$
$Bi$	毕渥数, $hl/\lambda$ ( $\lambda$ 为固体的导热系数)
$Eu$	欧拉数, $\Delta p/\rho v^2$
$Fo$	傅里叶数, $a\tau/l^2$
$Gr$	格拉晓夫数, $gl^3\alpha\Delta T/\nu^2$
$Le$	路易斯数, $a/D$
$Nu$	努塞尔数, $hl/\lambda$ ( $\lambda$ 为流体的导热系数)
$Pe$	贝克来数, $vl/a$
$Pr$	普朗特数, $\nu/a$
$Re$	雷诺数, $vl/\nu$
$Ra$	瑞利数, $gl^3\alpha\Delta T/(a\nu)$
$St$	斯坦登数, $h/(\rho v c_p)$
$Sc$	施密特数, $\nu/D$

责任编辑 李心桂  
封面设计 刘晓翔  
责任绘图 吴文信  
版式设计 焦东立  
责任校对 康晓燕  
责任印制 陈伟光

# 目 录

## 主要符号表(1)

## 第一章 绪论(1)

- 2 1-1 热量传递的三种基本方式
- 8 1-2 传热过程和传热系数
- 11 1-3 传热学发展简史
- 14 思考题
- 15 习题
- 19 参考文献

## 第二章 导热基本定律及稳态导热(20)

- 20 2-1 导热基本定律
- 25 2-2 导热微分方程式及定解条件
- 28 2-3 通过平壁、圆筒壁、球壳和其他变截面物体的导热
- 36 2-4 通过肋片的导热
- 44 2-5 具有内热源的导热及多维导热
- 49 思考题
- 50 习题
- 61 参考文献

## 第三章 非稳态导热(63)

- 63 3-1 非稳态导热的基本概念
- 66 3-2 集总参数法的简化分析
- 71 3-3 一维非稳态导热的分析解
- 80 3-4 二维及三维非稳态导热问题的求解
- 85 3-5 半无限大物体的非稳态导热
- 90 思考题
- 91 习题
- 99 参考文献

## 第四章 导热问题的数值解法(101)

- 101 4-1 导热问题数值求解的基本思想及内节点离散方程的建立
- 105 4-2 边界节点离散方程的建立及代数方程的求解
- 111 4-3 非稳态导热问题的数值解法
- 116 4-4 导热问题数值计算实例
- 120 思考题
- 120 习题
- 129 参考文献

## 第五章 对流换热(130)

130	5-1	对流换热概说
134	5-2	对流换热问题的数学描写
138	5-3	对流换热的边界层微分方程组
143	5-4	边界层积分方程组的求解及比拟理论
150	5-5	相似原理及量纲分析
157	5-6	相似原理的应用
162	5-7	内部流动强制对流换热实验关联式
171	5-8	外部流动强制对流换热实验关联式
178	5-9	自然对流换热及其实验关联式
190		思考题
191		习题
202		参考文献

## 第六章 凝结与沸腾换热(205)

205	6-1	凝结换热现象
207	6-2	膜状凝结分析解及实验关联式
212	6-3	影响膜状凝结的因素
215	6-4	沸腾换热现象
221	6-5	沸腾换热计算式
227	6-6	影响沸腾换热的因素
229		思考题
229		习题
237		参考文献

## 第七章 热辐射基本定律及物体的辐射特性(239)

239	7-1	热辐射的基本概念
243	7-2	黑体辐射基本定律
250	7-3	实际固体和液体的辐射特性
255	7-4	实际物体的吸收比与基尔霍夫定律
260		思考题
260		习题
265		参考文献

## 第八章 辐射换热的计算(266)

266	8-1	角系数的定义、性质及计算
274	8-2	被透热介质隔开的两固体表面间的辐射换热
279	8-3	多表面系统辐射换热的计算
287	8-4	辐射换热的强化与削弱
291	8-5	气体辐射
300		思考题
301		习题
311		参考文献

**第九章 传热过程分析与换热器热计算(313)**

- |     |                  |
|-----|------------------|
| 313 | 9-1 传热过程的分析和计算   |
| 320 | 9-2 换热器的型式及平均温差  |
| 332 | 9-3 换热器的热计算      |
| 344 | 9-4 传热的强化和隔热保温技术 |
| 350 | 9-5 传热问题的综合分析    |
| 355 | 思考题              |
| 355 | 习题               |
| 368 | 参考文献             |

**第十章 几个专题(371)**

- |     |                     |
|-----|---------------------|
| 371 | 10-1 太阳能利用中的传热问题    |
| 376 | 10-2 热管及其应用         |
| 379 | 10-3 射流冲击换热         |
| 382 | 10-4 传质过程简介         |
| 392 | 10-5 传热学在科学技术领域中的应用 |
| 399 | 思考题                 |
| 399 | 习题                  |
| 408 | 参考文献                |

**附录(411)**

- |     |   |
|-----|---|
| 411 | 附录 1 常用单位换算表  |
| 412 | 附录 2 无限长圆柱与球的非稳态导热线图  |
| 416 | 附录 3 流体外掠平板对流换热边界层积分方程求解过程  |
| 419 | 附录 4 膜状凝结分析解推导过程  |
| 420 | 附录 5 金属材料的密度、比热容和导热系数   |
| 422 | 附录 6 保温、建筑及其他材料的密度和导热系数   |
| 423 | 附录 7 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系   |
| 424 | 附录 8 干空气的热物理性质( $p=1.013\ 25\times 10^5\ \text{Pa}$ )                           |
| 425 | 附录 9 大气压力( $p=1.013\ 25\times 10^5\ \text{Pa}$ )下烟气的热物理性质                       |
| 425 | 附录 10 饱和水的热物理性质   |
| 427 | 附录 11 干饱和水蒸气的热物理性质  |
| 429 | 附录 12 液态金属的热物理性质  |
| 430 | 附录 13 几种饱和液体的热物理性质  |
| 432 | 附录 14 大气压力( $p=1.013\ 25\times 10^5\ \text{Pa}$ )下过热水蒸气的热物理性质                   |
| 432 | 附录 15 气体和蒸气在空气中的质扩散率<br>( $25^\circ\text{C}, 1.013\ 25\times 10^5\ \text{Pa}$ ) |
| 433 | 附录 16 第一类贝塞尔函数选摘  |
| 433 | 附录 17 误差函数选摘  |

**部分习题答案(434)****索引(441)**

# 第一章 绪 论

传热学是研究热量传递规律的科学。

凡是有温度差的地方,就有热量自发地从高温物体传向低温物体,或从物体的高温部分传向低温部分。由于自然界和生产技术中几乎到处存在着温度差,所以热量传递就成为自然界和生产技术中一种非常普遍的现象。

传热学在生产技术领域中的应用十分广泛。在能源动力、化工制药、材料冶金、机械制造、电气电信、建筑工程、交通运输、航空航天、纺织印染、农业林业、生物工程、环境保护和气象预报等部门中存在大量的热量传递问题,而且常常还起着关键作用。例如,随着大规模集成电路集成密度的不断提高,电子器件的冷却问题越来越突出。20世纪70年代每平方厘米集成电路芯片的功率最高约为10 W,20世纪80年代增加到20~30 W,而进入20世纪90年代后这一数字则上升到 $10^2$  W的量级。芯片产生的这些热量如果不及时散出,将使芯片温度升高而影响到电子器件的寿命及工作的可靠性,因而电子器件的有效散热方式已成为获得新一代产品的关键问题之一。又如,航天飞行器在重返地球时以当地音速的15~20倍的极高速度进入大气层,在航天器表面附近发生剧烈的摩擦加热现象,致使气流局部温度高达5 000~15 000 K。为保证航天器安全飞行,有效的冷却及隔热方法的研究就成为其关键问题。实际上,近20年来,现代科学技术的进步,特别是高参数大容量发电机组的发展,原子能、太阳能、地热能等新能源的开发利用,航天技术的飞速发展,超导、大规模集成电路、微型机械和生物工程等一系列现代科学技术的巨大进步推动了传热学学科的迅速发展,它的理论体系日趋完善,内容不断充实,已经成为现代技术科学中充满活力的主要基础学科之一。

就物体温度与时间的依变关系而言,热量传递过程可区分为稳态过程(又称定常过程)与非稳态过程(又称非定常过程)两大类。凡是物体中各点温度不随时间而改变的热传递过程均称为稳态热传递过程,反之则称为非稳态热传递过程。各种热力设备在持续不变的工况下运行时的热传递过程属于稳态过程,而在起动、停机、变工况时所经历的热传递过程则为非稳态过程。各种热力设备的设计往往是以额定功率下持续不变工况的运行作为主要依据的,所以稳态过程的分析讨论在本书中占有大量篇幅。本书除第三章讨论非稳态导热问题外,其他各章主要讨论稳态热传递过程。

采用高等数学方法分析热传递过程,一般要假定所研究的对象是一个

连续体,即认为所研究的对象内各点上的温度、密度、速度等都是空间坐标的连续函数。实际上,只要被研究物体的几何尺度远大于分子的平均自由行程,连续体的假定即可成立<sup>[1]</sup>。就本书涉及的内容而言,连续体的假定都是成立的。连续体假定不成立时传热问题的求解方法可参见文献<sup>[2]</sup>。

在这一章里将扼要介绍热量传递的三种基本方式,及由这些方式组合而成的传热过程,并给出它们各自最基本的计算关系式。其目的在于沟通与普通物理学基础的联系,使读者对传热学构成的概貌有所了解,为以后分章深入学习创造条件。为使读者对传热学与生产技术发展之间的关系有所了解,本章最后介绍了传热学的发展简史。本书的第二章到第八章将对热量传递的三种基本方式的规律进行深入的讨论。在此基础上,第九章将把这些知识综合起来,进一步分析一些复杂的热量传递问题。考虑到最近十余年中传热学在研究的深、广度及应用领域方面的迅速发展,为拓宽读者对热传递过程理解的视野,增进对传热学近期发展的了解,除了在第二到第九章中对有关内容作适当介绍外,本书第十章还对一些专题进行了讨论。

本书采用我国法定计量单位,其与工程单位之间的换算关系在本书的附录中给出。

## 1-1 热量传递的三种基本方式

热量传递有三种基本方式:导热、对流和热辐射。

### 1. 导热

物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热(或称热传导)。例如,固体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分,以及温度较高的固体把热量传递给与之接触的温度较低的另一固体都是导热现象。

从微观角度来看,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所不同的。气体中,导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。众所周知,气体的温度越高,其分子的运动动能越大。不同能量水平的分子相互碰撞的结果,使热量从高温处传到低温处。导电固体中有相当多的自由电子,它们在晶格之间像气体分子那样运动。自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。在非导电固体中,导热是通过晶格结构的振动,即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。晶格结构振动的传递在文献中常称为弹性波<sup>[3]</sup>。至于液体中的导热机理,还存在着不同的观点。有一种观点认为定性上类似于气体,只是情况更复杂,因为液体分子间的距离比较近,分子间的作用力对碰撞过程的影响远比气体大<sup>[4]</sup>。另一种观点则



认为液体的导热机理类似于非导电固体,主要靠弹性波的作用<sup>[5,6]</sup>。导热微观机理的进一步论述已超出本书的范围,有兴趣的读者可参阅热物性学专著——文献[7]。本书以后的论述仅限于导热现象的宏观规律。

通过对实践经验的提炼,导热现象的规律已经总结为傅里叶定律<sup>①</sup>。考察如图 1-1 所示的两个表面均维持均匀温度的平板的导热。这是个一维导热问题。对于  $x$  方向上任意一个厚度为  $dx$  的微元层来说,根据傅里叶定律,单位时间内通过该层的导热热量与当地的温度变化率及平板面积  $A$  成正比,即

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (1-1)^{\text{②}}$$

式中,  $\lambda$  是比例系数,称为热导率,又称导热系数,负号表示热量传递的方向同温度升高的方向相反。

单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量,记为  $\Phi$ ,单位为  $W$ 。单位时间内通过单位面积的热流量称为热流密度(或称面积热流量),记为  $q$ ,单位为  $W/m^2$ 。当物体的温度仅在  $x$  方向发生变化时,按照傅里叶定律,热流密度的表示式为

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1-2)$$

傅里叶定律又称导热基本定律。式(1-1)和(1-2)是一维稳态导热时傅里叶定律的数学表达式。由式(1-2)可见,当温度  $t$  沿  $x$  方向增加时  $\frac{dt}{dx} > 0$ ,而  $q < 0$ ,说明此时热量沿  $x$  减小的方向传递;反之,当  $\frac{dt}{dx} < 0$  时  $q > 0$ ,此时热量则沿  $x$  增加的方向传递。傅里叶定律更完备的矢量表达式将在第二章中讨论。

导热系数是表征材料导热性能优劣的参数,即是一种物性参数,其单位为  $W/(m \cdot K)$ 。不同材料的导热系数值不同,即使是同一种材料,导热系数值还与温度等因素有关,在第二章中将作进一步讨论。这里仅指出:金属材料的导热系数最高,良导体,如银和铜,也是良导热体;液体次之;气体最小。

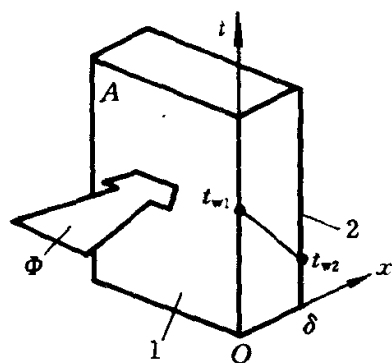


图 1-1 通过平板的一维导热

① 傅里叶(J. B. J. Fourier), 1768~1830, 法国物理学家, 因提出导热基本定律及求解导热微分方程的无穷级数(傅里叶级数)而著名。

② 本书采用我国法定计量单位。按 GB 3101—93 的规定, 物理量的符号代表其量值, 即数值 × 单位。例如, 式(1-1)所示  $\Phi$  的单位为  $W$ (基本单位), 单位“ $W$ ”已稳含在符号  $\Phi$  中。据此, 本书以后所有用物理量的符号表示的表达式——量方程式, 对于物理量的单位都应这样理解。