



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

传 热 学

(第二版)

戴锅生 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

传 热 学

(第二版)

戴锅生 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112 号

图书在版编目(CIP)数据

传热学/戴锅生编. —2版. —北京:高等教育出版社,1999.9
ISBN 7-04-007668-3

I. 传… II. 戴… III. 传热学-高等学校-教材 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 23293 号

传热学(第二版)

戴锅生 编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

版 次 1991 年 3 月第 1 版

1999 年 9 月第 2 版

开 本 787×960 1/16

印 次 1999 年 9 月第 1 次印刷

印 张 22.75

定 价 23.90 元

字 数 420 000

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究



内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪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”项目的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和教育部热工课程“九五”规划教材,也是普通高等教育“九五”国家教委重点教材。

本书体系和编排符合 21 世纪培养人才的要求;内容与工程实际的联系更加密切,注重学生能力的培养;思考题具有知识性、趣味性和实用性;图文并茂,便于自学。全书共 10 章,包括导热、对流传热、辐射传热、总传热过程和换热器等。最后“工程应用实例”一章,在更高层次上剖析了某些典型的工程传热问题,介绍了传热学在高科技领域中的应用。

本书按 30~55 学时编写,各部分内容基本独立,可按需要选择。本书可作为能源动力类、土建类、交通运输类、航空航天类、机械类、武器类、化工制药类、轻工纺织食品类、环境与安全类、电气信息类等专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

第二版前言

世纪之交,深化教学改革,培养适应 21 世纪需要的高质量人才,已成为全国尤其是教育界普遍关注的大事。在这一大好形势下,为了使本书能适应新形势的需要,作者认真学习了教育部的有关文件,明确了教材修订的指导思想,在广泛征求意见,认真总结教育部面向 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”项目研究成果的基础上,根据原国家教委 1996 年颁布的《传热学课程教学基本要求》完成了本书的修订工作。因此,本书既是作者长期从事教学研究和改革的结果,也是广大热工教师集体智慧的产物。

修订后本教材有以下特点:

1. 教材体系和编排新颖。本书采用先概述,后分述,再综合,最后用工程应用实例进行专题论述的编写方式,这既可深化读者对理论本身的理解和掌握,又拓宽了读者的知识面,使他们得到更多的启迪,在更高认知层次上提高自己的能力。各章节具体内容的安排也富有时代的气息,删去了已陈旧的内容,介绍了传热学近期正在探索的新课题(如微通道传热和多孔介质传热等)。

2. 精选内容,使教材内容与工程实际的联系更加密切。本书删去了与先修课程重复的内容(如流体连续性方程和动量微分方程的推导等)及部分繁琐的数学推导(如内部热阻不可忽略时分析解的推导和角系数的推导等),增加了与工程实际联系密切的内容(如何时加肋对传热有利和工程中传热系数计算式的演变方法等),使本书实用性更强。

3. 保持原有教材特色,采用启发式,强调思路分析,注重思维方式的培养。本书采用提出问题、分析问题和解决问题的启发式方式,例题特别注意思路分析,让读者逐步掌握解题的规律和技巧。例题后的“讨论”是解题小结,强调解题需注意的问题,并留有一些问题让读者自己去思考、去解答。这更有利于学生分析问题和解决问题能力的提高,也给学生创新思维开辟了一定的空间。

4. 注重学生科研能力的培养。学生不仅是现有科学成果的继承者,更应是新成果的创造者,这就要求学生在校期间的科研能力得到一定的培养。为培养学生对传热学问题的研究能力,本书在绪论中全面介绍了传热学的研究方法,在介绍具体内容时有意识地引导学生认识求解传热学问题的全过程:现象→建模→求解→应用。书中还引导学生全面、辩证地分析问题,以求事半功倍。

5. 思考题具有知识性、趣味性、实用性。大部分思考题来自日常生活和工

程实际,并与教材内容密切配合。修订时又增添了一些综合性的思考题,以进一步提高学生综合分析问题的能力。

6. 适合学生自学。在当今知识“爆炸”的时代,很多知识需要学生自己去学习,去认识,因此培养学生自学能力显得更加重要,是提高学生素质不可缺少的手段。为了使教材适合学生自学,编写时力求深入浅出,通俗易懂。此外,在形式上也注意便于学生自学,例如各章后有小结,以多种形式归纳各章的内容,指出重点和难点,列出学习要求以便学生自查。

本书采用我国法定计量单位。

本书按 30~55 学时编写,可作为能源动力类、土建类、交通运输类和航空航天类、机械类、材料类、武器类、化工制药类、轻工纺织食品类、环境科学类、林业工程类、电气信息类、生物科学类、生物工程类、地矿类等各专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。对于学时数较少的专业,除带*号的内容可以不讲外,还可视专业性质和学时数少讲或不讲下列内容,而不会影响本课程的系统性。这些内容为非稳态导热、导热问题数值解基础、试算法、凝结和沸腾传热、多个灰体表面间的辐射传热、气体辐射及其与包壁间的辐射传热、换热器分类和保温隔热技术等。

本书主审人北京工业大学甘永平教授仔细审阅了书稿,提出了许多宝贵意见和建议,并提供了部分最新资料供进一步修改参考。教育部热工课程教学指导委员会于 1998 年 10 月在南宁召开审稿会,参加审稿会的哈尔滨工业大学、吉林工业大学、东北电力学院、太原重型机械学院、清华大学、北京工业大学、天津大学、西安交通大学、中国科技大学、上海交通大学、华中理工大学、浙江大学、重庆大学、华南理工大学和广西大学的代表对书稿进行了认真审阅,提出了许多中肯的意见,使本书的质量得到进一步提高。另外,在书稿的编写过程中还得到了兄弟院校和我校老师的关心和帮助。对此,在这里一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。来信请寄:210096,南京市东南大学动力工程系戴锅生。

编者

1998-12

主要符号表

一、物理量

A	传热面积,横截面积,表面积, m^2
A_s	可见面积,球面面积, m^2
A_v	纵截面积, m^2
a	热扩散率, m^2/s ;加速度, m/s^2
b	宽度, m
C	热容流量, $\text{J}/(\text{K}\cdot\text{s})$;辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$;修正系数
c	比热容(或质量热容), $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
c_f	范宁摩擦系数
D 或 d	直径, m
E	能量, J ;辐射力, W/m^2
E_λ	光谱辐射力, W/m^3
F	力, N ;辐射函数
f	频率, Hz ;摩擦因子(或阻力系数)
G	投射辐射, W/m^2
g	重力加速度, m/s^2
H	焓, J ;高度, m
h	表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;比焓, J/kg
h_c	(表面)对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
h_r	(表面)辐射传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
I	电流, A
J	有效辐射, W/m^2
j	传热因子
K	总传热系数(简称传热系数), $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
k	减弱系数, m^{-1}
L	定向辐射度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
L_e	定向发射辐射度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
L_r	定向反射辐射度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
l	长度,厚度之半, m
l_c	特征长度, m

m	质量, kg
$\dot{m}$	质流密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
P	功率, W; 周长, 湿周, m; 总压力, N
p	压力, Pa
Q	热量或辐射能, J
q	热流密度(或面积热流量), W/m^2
$\dot{m}_m$	质量流量, kg/s
$\dot{q}_V$	体积流量, m^3/s
R	半径, m; 热阻, K/W ; 电阻, Ω
r	半径, 距离, m; 汽化潜热, J/kg ; 面积热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
r_f	污垢系数(或面污垢热阻), $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
S	导热形状因子
s	管节距, m; 平均射线行程, m
T	热力学温度, K; 周期, s
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
t_c	特征温度, $^{\circ}\text{C}$
U	热力学能, J; 电位差, V
u	比热力学能, J/kg ; 速度, m/s
V	体积, m^3 ; 电位, V
v	比体积(或质量体积), m^3/kg ; 速度, m/s
v_c	特征速度, m/s
W	功, J; 重量, N
w	速度, m/s
X	角系数; 无量纲坐标
x, y, z	笛卡尔坐标
α	吸收比; 平面角, rad 或 $(^{\circ})$
$\alpha(\lambda)$	光谱吸收比
α_V	体膨胀系数, K^{-1}
β	肋化系数; 平面角, rad 或 $(^{\circ})$
Δ	差值
δ	厚度, m; 相对误差
ϵ	发射率; 换热器效能; 灰污系数
$\epsilon(\lambda)$	光谱发射率
η	(动力)粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; 效率, %
Θ	无量纲过余温度
θ	过余温度, K 或 $^{\circ}\text{C}$; 平面角, 润湿角, rad 或 $(^{\circ})$
λ	波长, m; 热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ν	运动粘度, m^2/s

ρ 密度, kg/m^3 ; 电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; 反射比

$\rho(\lambda)$ 光谱反射比

σ 斯忒藩-玻耳兹曼常量, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; 表面张力, N/m

τ 时间, s ; 切应力, Pa ; 透射比

τ_r 时间常数, s

τ_c 特征时间间隔, s

$\tau(\lambda)$ 光谱透射比

Φ 热流量, W

Φ_l 线热流量, W/m

Φ 内热源强度, W/m^3

φ 平面角, rad 或 $(^\circ)$

φ_B 组分 B 的体积分数

ψ 温差修正系数

Ω 立体角, sr

二、特征数

$Bi = \frac{hl_c}{\lambda_s}$ ——毕渥(Biot)数

$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v_c^2}$ ——欧拉(Euler)数

$Fo = \frac{a\tau_c}{l_c^2}$ ——傅里叶(Fourier)数

$Gr = \frac{g\alpha_v \Delta t l_c^3}{\nu^2}$ ——格拉晓夫(Grashof)数

$Nu = \frac{hl_c}{\lambda_f}$ ——努塞尔(Nusselt)数

$Pe = Re \cdot Pr = \frac{v_c l_c}{a}$ ——贝克莱(Peclet)数

$Re = \frac{v_c l_c}{\nu}$ ——雷诺(Reynolds)数

$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{h}{\rho v_c c_p}$ ——斯坦顿(Stanton)数

$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta c_p}{\lambda_f}$ ——普朗特(Prandtl)数

责任编辑	肖银玲
封面设计	张楠
责任绘图	李维平
版式设计	马静如
责任校对	康晓燕
责任印制	宋克学

目 录

主要符号表	(1)
第一章 绪论	(1)
1-1 传热学的研究对象和任务	(1)
1-2 热量传递的三种基本方式	(2)
1-3 总传热过程	(6)
1-4 传热学的研究方法	(9)
思考题	(10)
习题	(12)
参考文献	(14)
第二章 导热基本定律和稳态导热	(15)
2-1 导热基本定律和热导率	(15)
2-2 导热微分方程和定解条件	(22)
2-3 一维稳态导热	(28)
2-4 延伸体的稳态导热	(37)
2-5 接触热阻简介	(49)
思考题	(52)
习题	(53)
参考文献	(56)
第三章 非稳态导热	(58)
3-1 概述	(58)
3-2 集总参数法	(59)
3-3 内部热阻不可忽略的物体在第三类边界条件下的 非稳态导热和诺谟图	(66)
思考题	(79)
习题	(81)
参考文献	(82)
第四章 导热问题数值解基础	(84)
4-1 离散化和差商	(84)
4-2 稳态导热问题的数值计算	(87)

4-3 非稳态导热问题的数值计算	(93)
思考题	(100)
习题	(101)
参考文献	(103)
第五章 对流传热原理	(105)
5-1 对流传热概述	(105)
5-2 流动边界层和热边界层	(108)
5-3 边界层对流传热微分方程组	(110)
5-4 相似原理简介	(114)
5-5 特征数实验关联式的确定和选用	(116)
思考题	(124)
习题	(125)
参考文献	(127)
第六章 单相流体对流传热特征数关联式	(129)
6-1 管内强迫对流传热	(129)
6-2 外掠物体时的强迫对流传热	(139)
6-3 自然对流传热	(152)
思考题	(163)
习题	(164)
参考文献	(166)
第七章 凝结和沸腾传热	(168)
7-1 凝结传热	(168)
7-2 沸腾传热	(176)
思考题	(185)
习题	(185)
参考文献	(186)
第八章 辐射传热	(188)
8-1 热辐射的基本概念	(188)
8-2 黑体辐射的基本定律	(193)
8-3 实际物体和灰体的辐射	(198)
8-4 角系数	(206)
8-5 封闭系统中灰体表面间的辐射传热	(212)
8-6 气体辐射及其与包壁间的辐射传热	(225)
8-7 表面传热和表面传热系数	(235)
思考题	(239)

习题	(242)
参考文献	(248)
第九章 传热过程和换热器	(250)
9-1 传热过程的分析和计算	(250)
9-2 换热器的分类和平均传热温差	(264)
9-3 平均传热温差法热计算	(274)
* 9-4 效能-传热单元数法热计算	(279)
9-5 传热的增强	(282)
9-6 保温隔热技术	(285)
思考题	(288)
习题	(289)
参考文献	(293)
*第十章 工程应用实例	(294)
10-1 热管及其应用	(294)
10-2 远红外加热和微波加热	(298)
10-3 生物医学	(301)
10-4 建筑火灾	(302)
10-5 传热过程分热阻的测定——威尔逊图解法	(304)
10-6 太阳能热水器	(305)
10-7 新型空冷传热元件	(309)
10-8 换热器设计计算示例	(311)
参考文献	(314)
附录	(316)
附录1 常用单位换算表	(316)
附录2 金属材料的密度、比热容和热导率	(317)
附录3 耐火材料、保温材料和其他材料的密度、最高使用温度 和热导率	(319)
附录4 大气压力($p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)下干空气的热物理性质	(320)
附录5 大气压力($p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)下烟气的热物理性质	(321)
附录6 大气压力($p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)下过热水蒸气的 热物理性质	(321)
附录7 饱和水的热物理性质	(322)
附录8 干饱和水蒸气的热物理性质	(323)
附录9 几种饱和液体的热物理性质	(325)
附录10 生物材料的热物理性质	(327)

附录11	常用材料的表面发射率	(328)
附录12	常用换热器传热系数的大致范围	(330)
附录13	边界层对流传热微分方程组的无量纲化	(331)
附录14	常用特征数的定义式及其物理意义	(332)
附录15	竖壁层流膜状凝结传热系数的分析解	(334)
参考文献		(336)
习题答案和提示		(337)

第一章 绪 论

1-1 传热学的研究对象和任务

传热学是工程热物理的一个分支,是研究热量传递规律的学科,它和工程热力学都是研究热现象的理论基础。

工程热力学第二定律指出,热量只能自发地由高温处传到低温处。因此,哪里有温度差,哪里就有热量传递。自然界和工程中普遍存在温度差,所以传热是日常生活和工程中一种非常普遍的现象。随着现代工业的发展,传热学几乎渗透到工业中的各个领域,同时也对农、林、医、生物、气象和信息等的发展起着日益重要的作用。目前,传热学在传统工业(机械、电机、土建和化工等)的改造和新兴尖端工业(航空、原子能、宇航、电子、材料和生物工程等)的迅猛发展中扮演着重要角色,在未来超高集成化的电子器件冷却的强化传热、航天飞机的研制以及生物工程的热湿环境控制等高科技领域中也起十分重要的作用。因此,传热学课程对于能源动力类热能与动力工程专业和核工程与核技术专业,土建类建筑环境与设备工程专业,航空航天类飞行器设计与工程专业、飞行器动力工程专业、飞行器环境与生命保障工程专业,交通运输类轮机工程专业和油气储运工程专业等尤为重要,它已成为这些专业的一门主干技术基础课程。对于机械类、材料类、武器类、环境科学类、生物科学类、生物工程类、林业工程类、电气信息类、化工制药类、轻工纺织食品类和地矿类专业,传热学课程与它们的关系也很密切。

工程中传热问题可分为两种类型。一类是计算传递的热流量,并且有时力求增强传热,有时则力求削弱传热。例如:汽车发动机中循环使用的冷却水在散热器中放出热量,为了使散热器紧凑、效率高,必须研制新型的空冷传热元件来增强传热;为了使热力设备和管道减少散热损失,必须外加保温隔热层以削弱传热。另一类是确定物体各点的温度,以便进行某些现象的判断、温度控制和其他计算(如热应力和热变形计算等)。例如,确定锅炉汽包和内燃机活塞的温度分布就属于这一类,军事上和医学上分别利用红外辐射仪测得的温度分布来判断军事目标和诊断乳腺癌等恶性肿瘤也属于这一类。要解决这些传热问题,必须具备比较宽广和巩固的热量传递规律的基本知识,具备分析工程传热问题的

基本能力,掌握计算工程传热问题的基本方法,具有相应的计算能力,掌握热工参数的测量方法,并具有初步的实验技能。这就是学习本课程的目的和要求。

热量传递过程分为稳态过程和非稳态过程两大类。凡物体中各点温度不随时间而改变的热量传递过程称为稳态热传递过程,反之则称为非稳态热传递过程。各种设备在持续稳定运行时的热传递过程属于稳态过程,而在起动、停机和工况改变时的热传递过程则属于非稳态过程。大多数设备都可认为在稳定运行条件下工作。有些设备虽在非稳定条件下运行,但作适当处理和简化,也能近似地视为稳态热传递过程,例如内燃机气缸壁和蓄热式换热器传热等是非稳态传热,但按周期的平均值计算^[1]或稍加修正^[2],则可按稳态传热计算。本书主要介绍稳态热传递过程,只在第三章和第四章介绍非稳态导热。一般情况下,不加说明时都指稳态热传递过程。

1-2 热量传递的三种基本方式

图 1-1 表示裸露热水管道的热传递过程。图中,热量先由热水传给管壁内侧表面,再由管壁内侧表面传给管壁外侧表面,最后由管壁外侧表面传给周围环境(周围空气和其他物体)。还可以列举许多例子,但仔细分析各种热量传递过程可以看出,热量传递有三种基本方式:热传导、热对流和热辐射。实际的热量传递过程往往是由两种或三种基本传热方式组成的。为方便起见,下面将这三种基本传热方式分别介绍。

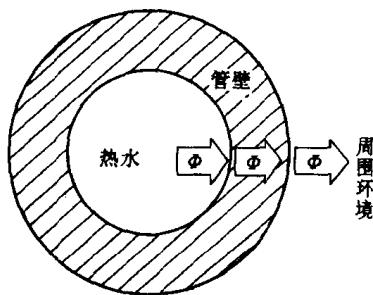


图 1-1 热水管道的热传递过程

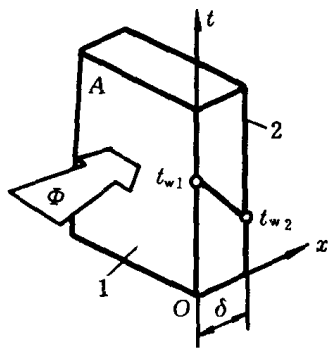


图 1-2 通过平壁的导热

一、热传导

当物体内有温度差或两个不同温度的物体接触时,在物体各部分之间不发生相对位移的情况下,物质微粒(分子、原子或自由电子)的热运动传递了热量,

这种现象被称为热传导,简称导热。图1-1中热量从管壁内表面传递到外表面就是依靠导热。

下面来分析一种最简单的导热问题。设有如图1-2所示的一块大平壁,壁厚为 δ ,一侧表面面积为 A ,两侧表面分别维持均匀恒定温度 t_{w1} 和 t_{w2} 。实践表明,单位时间内从表面1传导到表面2的热量 Φ (热流量)与导热面积 A 和导热温差($t_{w1} - t_{w2}$)成正比,与厚度 δ 成反比^①。写成等式为

$$\Phi = \lambda A \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-1a)$$

或
$$\Phi = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1-1b)$$

式中: λ ——比例系数,称为热导率或导热系数,单位为 $W/(m \cdot K)$ 。

Δt ——导热温差, $^{\circ}C$ 或 K ^②。

热导率 λ 反映材料导热能力的大小,有关热导率的介绍详见2-1节。

二、热对流

流体中,温度不同的各部分之间发生相对位移时所引起的热量传递过程叫热对流。流体各部分之间由于密度差而引起的相对运动称为自然对流;而由于机械(泵或风机等)的作用或其它压差而引起的相对运动称为强迫对流(或受迫对流)。

实际上,热对流同时伴随着导热,构成复杂的热量传递过程。工程上经常遇到的流体流过固体壁时的热传递过程,就是热对流和导热联合作用的热量传递过程,称为表面对流传热,简称对流传热^③。

当温度为 t_f 的流体流过温度为 t_w ($t_w \neq t_f$)、面积为 A 的固体壁(见图1-3)时,对流传热的热流量 Φ_c 常写成与面积 A 、流体和壁面的温差 Δt 成正比的形式,即写成

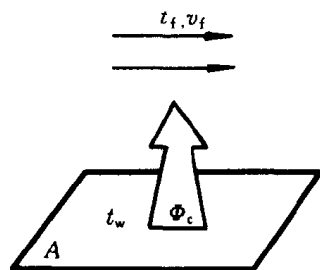


图1-3 流体与固体壁面的对流传热

$$\Phi_c = h_c A \Delta t \quad (1-2)$$

这就是牛顿冷却公式。工程上取 Φ_c 为正值。流体被加热($t_w > t_f$)时,取 $\Delta t =$

① 本书所用物理量的符号和单位详见文献[3]。GB 3101—93规定,物理量符号代表量值,即不仅表示数值大小还包含物理量的单位,所以本书在用物理量符号写出的物理量表达式不再添加单位。

② 由于 $\Delta t = \Delta T$,所以 Δt 的单位也可用 K ,下同。

③ 习惯上对流传热称为对流换热、对流放热和对流给热。