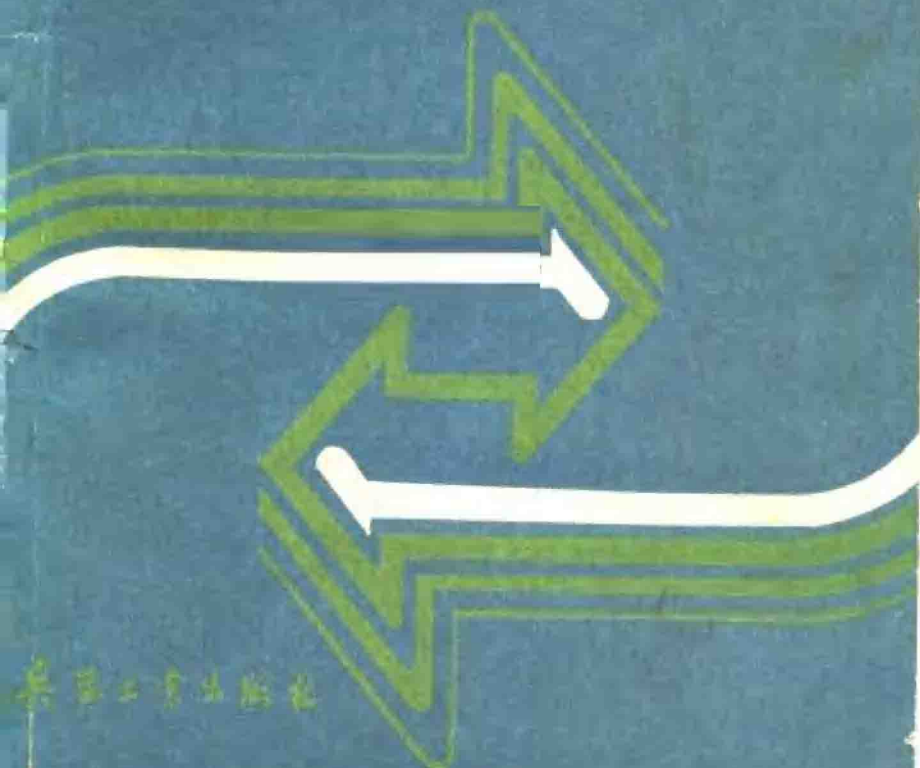


高等学校教材

对流传热分析

戴有为 著



北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书较系统地阐述了对流传热的现代基本理论及其在工程实践中的应用。全书共分十章。前三章介绍对流输运的基本概念和控制方程，着重讨论了边界层输运过程的控制方程。四至八章分别讨论了强迫对流传热中的各类典型问题及在复杂情况下的求解方法。第九章介绍自由对流传热。第十章通过与对流传热的类比，介绍边界层对流传质的解法。每章附有习题。书中附录给出了传热和传质计算中常用的热物性参数表。全书采用国际单位制。

本书可作为高校热工、动力和工程热物理等专业的本科生或研究生教材，也可供航天、航空、兵器、化工和冶金各类专业参考。

对 流 传 热 分 析

戴有为 编著

*

机械工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店北京科技发行所经销

国营五三一印刷厂印装

*

开本：787×1092 1/32 印张：9.125 字数：197千字

1989年2月第1版 1989年2月第1次印刷

印数：1-2000 定价：1.80元

ISBN 7-80038-056 -4/O·6 (课)

Hk40/24

前 言

传热学是工程热物理类和动力工程类各专业的一门主要课程，它可粗分为导热、对流、幅射、伴随有相变的流动传热以及新兴的计算传热五大部分。其中对流传热是工程中最常见且最重要的传热现象。

本书脱胎于编者为研究生和进修教师讲课用的讲义，主要取材于美国斯坦福大学Kays等的“对流传热和传质”、凯萨斯大学Burmeister等的“对流传热”、明尼苏达大学埃克特等的“传热与传质分析”以及编者在伯克利加利福尼亚大学的学习笔记。

本书的读者应先具有传热学原理、流体力学和工程数学的基本知识。考虑到本书的主要对象是工科专业的研究生、教师和工程师们，书中着重论述了对流传热的基本方程及相应的边界层方程，较详细地分析了工程中常见的各类问题的求解以及各种复杂边界条件下的处理方法，例如变壁温、变热流和变几何形状，并讨论了变物性问题的处理方法。期望使本书的读者能较全面地掌握各种对流传热问题的分析方法。本书如作为研究生课的教材，教学时数可安排为54学时。

本书由南京工学院孙仁洽教授主审。在编写过程中，金志明教授给予了指导，宣益民和部教材编审室姚康年同志作了认真的审阅，编者在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误或不当之处，敬请读者批评指正。

1986年11月29日

目 录

符号表	(1)
第一章 绪论	(6)
第二章 基本方程组	
§ 2.1 基本假设	(10)
§ 2.2 连续方程	(12)
§ 2.3 动量方程	(15)
§ 2.4 能量方程	(19)
§ 2.5 传质方程	(24)
第三章 边界层方程组	
§ 3.1 边界层概念	(26)
§ 3.2 边界层微分方程组	(28)
§ 3.3 边界层动量积分方程式	(39)
§ 3.4 边界层能量积分方程式	(46)
习题	(50)
第四章 管内层流	
§ 4.1 充分发展的管流 动量方程的解	(52)
§ 4.2 充分发展的管流 能量方程的解	(61)
§ 4.3 充分发展的管流 非圆管的解	(67)
§ 4.4 圆管热进口段 定壁温	(71)
§ 4.5 圆管热进口段 定热流	(78)
§ 4.6 非圆管热进口段	(84)
§ 4.7 壁面条件沿流程变化的影响	(87)
§ 4.8 动力学进口段和热进口段的综合影响	(94)

习题.....	(95)
第五章 层流边界层	
§ 5.1 平板流动量方程的相似解	(100)
§ 5.2 定壁温平板流的传热	(107)
§ 5.3 楔形流动量方程的相似解	(112)
§ 5.4 定壁温楔形流的传热	(116)
§ 5.5 积分方程法解动量方程	(121)
§ 5.6 积分方程法解能量方程	(126)
习题	(136)
第六章 湍流边界层	
§ 6.1 湍流边界层概述	(139)
§ 6.2 动量方程解 近壁律	(148)
§ 6.3 积分方程法解动量方程	(154)
§ 6.4 定壁温能量方程解 近壁律	(157)
§ 6.5 复杂传热条件的能量方程解	(163)
习题	(169)
第七章 管内湍流	
§ 7.1 动量方程解	(172)
§ 7.2 能量方程解	(176)
§ 7.3 湍流闭合模型	(187)
习题	(193)
第八章 变物性和考虑动能转换时的对流传热	
§ 8.1 变物性修正	(196)
§ 8.2 常物性高速气流边界层	(202)
§ 8.3 变物性高速气流边界层	(212)
习题	(216)

第九章	自由对流边界层	
§ 9.1	边界层方程组	(219)
§ 9.2	定壁温的相似解	(222)
§ 9.3	变壁温的相似解	(227)
§ 9.4	积分方程解法	(230)
§ 9.5	其它几何条件	(235)
	习题	(236)
第十章	边界层传质	
§ 10.1	引言	(238)
§ 10.2	边界层方程组	(240)
§ 10.3	层流边界层解	(249)
§ 10.4	湍流边界层解	(253)
§ 10.5	由传热数据求传质系数	(254)
	习题	(255)
	参考文献和参考书目	(257)
附录A	热物理性质表	(264)
附录B	边界层分析中用到的一些函数的表值	(280)
附录C	三种常见的正交坐标系中∇算子的运算式	(282)

符号表

A	面积
B	传质势函数
b	平行平板间的半宽度
B_n	注流参数
c	定压比热
c_f	摩阻系数
c_j	混合物中 j 组分的定压比热
c_v	定容比热
D	圆管内径
D_n	管道当量直径
D_j	混合物中 j 组分的扩散系数
E	由内能和动能组成的总能量
E_c	埃克特数
F_b	体积力
F_s	表面力
f	无量纲流函数
G	质流量
g	广义的输运系数 力加速度
g^*	壁面 $m \rightarrow 0$ 时的 g
G_r	格拉晓夫数
H	焓
H_s	滞止焓

- h 传热系数
 J 扩散的质流率
 k 导热率; 湍动能
 L 长度
 l 湍流的混合长度
 L_c 路易斯数
 M 马赫数
 m 质量
 \dot{m} 壁面法向质流率
 m_j j 组分的质量分数
 N_u 努塞特数
 n_α 元素 α 的质量分数
 p 压力
 P 第二类守恒量
 P_r 普朗特数
 $P_{r,t}$ 湍流普朗特数
 Q 总热流量
 q 热流(密度)
 q''' 体热源强度
 R 回转体半径
 r 半径; 边界层厚度比 (Δ/δ)
 R_a 瑞利数, G, P_r
 r_c 恢复系数
 R_e 雷诺数
 r^* 内外径之比
 S 截面上的周长

S_c	斯密特数
S_t	斯坦顿数
T	温度
T^*	滞止温度
U	内能
u	x 方向的速度分量
V	体积
v	y 方向的速度分量
v_{cm}	均匀来流速度
W	功
w	z 方向的速度分量
X	x 方向的体积力
x	空间坐标
y	空间坐标
z	空间坐标
α	热扩散系数
β	楔角; 热膨胀系数
Γ	Γ 函数
γ	比热比
ρ_j	组分 j 的质量产生率
Δ	温度边界层厚度
Δ_2	焓厚度
Δ_c	传热厚度
δ	速度边界层厚度
δ_1	位移厚度

δ_2	动量厚度
δ_4	剪切厚度
ε	湍动能耗散函数
ε_H	涡团的热扩散系数
ε_M	涡团的动量扩散系数
η	相似变量
θ	无量纲温度; 角坐标
κ	冯·卡门常数
λ	动量积分方程法中的无量纲参数
μ	粘度
ν	运动粘度
ξ	无量纲距离
ρ	密度
σ	表面应力
τ	表面切应力
Φ	耗散函数
ϕ	柱、球坐标系中的角坐标
ψ	流函数

下标

A	绝热壁面条件时的解
aw	绝热壁面处的值
app	表观值
c	管中心处的值
cp	常物性条件时的值
D	以直径 D 为特征长度
e	管进口处的值

- f 可燃物
- i 圆环内表面; 张量下标
- j 张量下标; 混合物中某组分
- L 以长度 L 为特征长度
- m 管截面上的平均值; 传质计算有关量
- o 氧化剂; 圆环外表面
- p 产物
- R 参考态的值
- r 柱(球)坐标 r 方向的分量
- T 远离壁面处的值
- t 湍流量
- w 壁面处的值
- x 与距离 x 有关的当地值; x 方向分量
- y y 方向分量
- z z 方向分量
- α 化合物中某元素
- ∞ 边界层外的主流中的值

上标

- 时均值
- , 脉动值
- + 无量纲值

第一章 绪 论

1. 引 言

流体与固体表面上的传热和传质是热工和动力等工程问题中的重要而又常见的现象。当流体处于静止状态时，问题简化为单纯由温度梯度控制的导热问题，这类过程通常称为分子输运过程。当流体处于流动状态时，除了存在由温度梯度引起的扩散外，还存在着由流体本身的宏观运动所引起的输运现象。这种同时由分子输运和流体宏观运动引起的能量或质量的输运，统称为对流输运现象。在控制微分方程中，常将单纯由流体宏观运动引起的输运项称为对流项，而把单纯由温度梯度引起的输运项称为扩散项。

当对流输运过程中的流体运动是由外物驱动时（如飞行器周围的流场，各种以流体为工质的机械装置等），称为强迫对流，它是工程传热和传质中最重要且最常见的过程。本书的大部分内容将论及此类输运过程。若流体运动是由某种体力场，如重力场、离心力场或科里奥利力场等引起，则被称为自然对流，它广泛存在于大气流和海洋流现象以及许多动力装置中。本书主要涉及重力场中由温度差产生的浮力所诱发的自然对流。

工程实际中存在的对流输运现象是很复杂的，它常是传热和传质，甚至和化学反应综合在一起的复杂过程，如扩散

火焰，注液冷却表面或烧蚀表面上的传热和传质现象等。然而，描述这些传热、传质过程的控制微分方程可以转化为与纯传热问题的控制微分方程相同的形式。因此，经常可以把传热问题的解推广用于传质，以及综合性问题的求解。

众所周知，热量的传递可通过传导、对流和幅射三种方式进行。通常，这三种方式并存。在大多数的工程实际问题中，当所论体系的温度不太高时，前二者占主导地位，这正是本书的主要讨论范围。

2. 守恒定律

对流输运现象所遵循的基本关系式可分为两大类，即守恒定律和速率关系式。

守恒定律是任何物理现象都必须遵循的基本定律。本书论及的范围，包括总质量守恒、总能量守恒和每种化学元素的质量守恒。各种形式的能量之间可以相互转化；各组分之间也可以相互转化，在无化学反应时，每种组分的质量保持守恒。

一般而言，流体的动量是不守恒的，流体的运动遵循普适的牛顿第二定律，即动量原理。仅当作用在流体介质上的合力和合力矩为零时，流体的动量才守恒。

3. 速率关系式

速率关系式是从各种扩散现象归纳出来的描述各相应的物理量的扩散速率的关系式，如傅里叶定律、菲克定律和牛顿粘性定律。在各向同性介质的扩散过程中，当控制扩散过程的物理量在时、空间的分布梯度不太大时，它们可分别表示

为

$$\text{傅里叶定律} \quad \vec{q} = -k \nabla T \quad (1-1)$$

$$\text{二元菲克定律} \quad \vec{J}_j = -\rho D_j \nabla m_j \quad (1-2)$$

$$\text{牛顿粘性定律} \quad \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1-3)$$

式中 \vec{q} 是热流矢量； T 是温度； k 是导热系数； D_j 是组分 j 的二元扩散系数； ρ 是总密度； \vec{J}_j 是组分 j 的扩散流矢量； m_j 是组分 j 的质量分数； τ_{ij} 是剪切应力张量； μ 是流体粘度； u_i 是流体速度。其中牛顿粘性定律采用了张量表示法。可见，各种物理量的扩散过程遵循一些彼此相似的速率关系式，即扩散过程的输运通量或其相当量与控制扩散过程的相应物理量的梯度成正比，而比例系数则为相应过程的扩散系数。在工程计算中，这些速率关系式普适于层流和湍流。

4. 对流输运过程的基本问题

以传热为例。热量的交换起因于温度差 ΔT ，在工程计算中，常定义一个对流传热系数 h ，则对流传热的热流密度 q 表为

$$q = h \Delta T \quad (1-4)$$

称式 (1-4) 为牛顿对流传热定律。式中， h 取决于所论的体系。在许多工程问题中， q 与温度差 ΔT 近似成正比，因此，由 h 和 ΔT 可以方便地计算热流密度，或由热流密度反求温度差。若 h 是变量，或在非线性问题中， h 可能是温度的函数，仍可以用平均传热系数来计算热流。

在其它物理量的输运过程中也存在着类似的关系。而输运过程的驱动力则是相应的被输运量的势函数。

综上所述，对流输运问题研究的对象是至少有一侧为流体的界面上的输运过程。主要问题是：已知界面上的对流传热系数 h 的变化规律及界面温度和流体温度的变化规律求解界面上热流的变化规律，或已知热流求解温度分布。为了确定这些变化规律，需要求解流场的速度分布和温度分布等。因此本书亦将涉及部分粘性流体力学，尤其是边界层理论的内容。至于传质问题的讨论和求解是和传热问题相类似的。

基于工程分析的实际需要，本书主要涉及定常问题。

第二章 基本方程组

§2.1 基本假设

流体由大量分子所组成，分子之间真空区的尺度远大于分子本身。每个分子无休止地在作不规则的运动，在相互碰撞中交换动量和能量。因此，流体的微观结构和流体分子的运动，无论在时间上和空间上都存在着不均匀性、离散性和随机性，另一方面，人们用仪器测量和用肉眼直接观察到的流体的宏观结构及其运动又呈现出明显的均匀性、连续性和确定性。

本书论及的是流体的宏观的输运现象，沿用流体力学中广泛采用的连续介质假设；认为“流体质点”连续地充满着流体所占有的整个空间；流体质点所具有的宏观物理量（如密度、速度、压力和温度等）满足一切应遵循的物理定律，如质量和能量的守恒定律、牛顿第二定律、热力学的有关定律和状态方程等；流体的输运性质在流体质点上可确切地逐点定义；而流体的某些物理常数和关系式必须由实验来确定。

由于工程问题中的特征尺度比分子结构的特征尺度高许多数量级，流体中个别分子的行为几乎不影响大量分子统计平均后的宏观物理量，因此，在考虑流体的宏观表现时可不必要考虑其分子结构。采用连续介质的假设对研究流体的宏

观表现有足够的精度。除如激波、稀薄气体力学等特殊问题外，这是一个合理的假设。

所谓“流体质点”是指宏观上充分小，微观上充分大的分子团。而真实的流体所占有的空间则可近似地看作由这样的流体质点连续地、无空隙地充满着。根据这个假设，在研究流体的宏观输运问题时，就可以把本来是大量的离散分子的运动处理为连续充满整个空间的流体质点的运动。描述流体运动的物理量和流体的输运性质在每个时、空点上都有确切的定义，从而可以用连续函数来描述流体的运动和各种输运过程。

在工程问题中，通常还假设介质是各向同性的，即各点的物性参数是与方向无关的标量。尽管所探讨的问题类型，所遵循的物理定律和解题的途径原则上并不受此限制，但各向同性的假设可使问题的数学处理得到很大的简化。此外，还必须假设所论的介质处于局部平衡态。尽管这个假设似乎是有些矛盾的，因为输运过程的起因即是介质中各点之间的不平衡，如速率方程所示。只有当存在温度差、浓度差等不平衡现象时，才会有能量或物质的扩散，使不平衡态逐渐转化为平衡态。然而，热力学所定义的温度是仅当介质处于平衡态时才有意义。因此，这里所谓的局部平衡态，是指在连续介质中任一点的周围，宏观上足够小的邻域内处于平衡态。而在任何宏观上有限大的区域内，存在着物理量的不平衡，满足输运过程的速率关系式。

在纯传热问题中，还假设介质的化学组成是空间均匀分布的，且不受输运现象的影响。

利用上述假设，可使对流传热问题的数学处理大为简化。