

19265



研究生教材

对流传热传质分析

王启杰 编著

西安交通大学出版社

研究生教材

对流传热传质分析

王 启 杰 编著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了对流传热传质的基本原理、数学模型、解析和数值分析方法及其在工程实践中的应用。全书共分12章，分别论述了层流和紊流外部边界层及管槽内部的各种传热传质问题、自由紊流换热、高速流动换热、变物性影响、内部和外部自然对流传热传质、传质简化理论及伴随有化学变化时的质量传递。

本书作者在多年研究生教学实践及科研工作的基础上，参阅了国内外大量文献，择其精华，写成了这本教材。本书的特点是：在阐述数学模型的同时，辅以清晰的物理概念和物理模型，使读者加深对现象本质的理解；充分反映这一学科领域的新分支及最新研究成果；每章附有足够的习题，帮助读者巩固所学内容，分析工程问题。

本书可供动力、能源、化工、核反应堆工程、航天航空、冶金、建筑等类专业的研究生使用。也可供这些部门从事对流传热传质的科学研究人员和工程技术人员参考。

对 流 传 热 传 质 分 析

王启杰 编著

责任编辑 潘瑞麟

*

西安交通大学出版社出版

(邮 政 编 码 : 710049)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 20.5 插页 2 字数: 524 千字

1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

印数: 1—1500

ISBN 7-5605-0409-4/TK·39

定价: 6.60 元

研究生教材总序

研究生教育是我国高等教育的最高层次,是为国家培养高层次的人才。他们必须在本门学科中掌握坚实的基础理论和系统的专门知识,以及从事科学研究工作或担负专门技术工作的能力。这些要求具体体现在研究生的学位课程和学位论文中。

认真建设好研究生学位课程是研究生培养中的重要环节。为此,我们组织出版这套研究生教材,以满足当前研究生教学,主要是公共课和一批新型的学位课程的教学需要。教材作者都是多年从事研究生教学工作,有着丰富教学和科学研究经验的教师。

这套教材首先着眼于研究生未来工作和高技术发展的需要,充分反映国内外的最新学术动态,使研究生学习之后,能迅速接近当代科技发展的前沿,以适应“四化”建设的要求;其次,也注意到研究生公共课程和学位课程应有它最稳定、最基本的内容。这是研究生掌握坚实的基础理论和系统的专门知识所必需的。因此,在研究生教材中仍应强调突出重点,突出基本原理和基本内容,以保持学位课程的相对稳定性和系统性,内容有足够的深度,而且对本门课程有较大的覆盖面。

这套研究生教材虽然从选题、大纲、组织编写到编辑出版,都经过了认真的调查论证和细致的定稿工作,但毕竟是第一次编辑这样高层次的教材系列,水平和经验都感不足,缺点与错误在所难免。希望通过反复的教学实践,广泛听取校内外专家学者和使用者的意见,使其不断改进和完善。

西安交通大学研究生院

西安交通大学出版社

1986年12月

作 者 的 话

本书是根据作者多年来在西安交通大学为研究生开设“对流传热传质”课程的讲稿经整理、修改、补充而写成的。

对流传热与传质是传热与传质学科的一个重要分支,在国民经济与国防建设中有着重要的作用。宇航、能量的生产、转换与贮存、核能工程、化工与炼油过程、制冷与低温技术、制造与加工过程、材料提纯科学、超大规模集成电路芯片冷却、建筑物热设计、环境控制和保护、大气和海洋的环流、生物细胞和器官的冷冻保存、乃至肿瘤的早期诊断等等都对对流传热与传质密切相关。这使得对流传热与传质的研究异常活跃与迅速,每年均有数以千计的论文发表。本书作为一本研究生教材,旨在较系统地阐述对流传热传质的基本原理、数学模型、经典的解析和数值分析方法。本书特别注意在讲清数学模型的同时,辅以清晰的物理概念和物理模型。为了适应对流传热传质研究工作的迅速发展,本书适当反映了这一领域中国际上最新的研究成果,引用的文献资料直到 1989 年,使读者在学完本书后能较顺利地阅读国内外刊物上的有关文献。本书也以少量篇幅反映作者近年来研究工作的成果。书中每章后有适当数目的习题,本书共有典型性习题 104 题。它们涉及工程实际的面极广,旨在培养学生分析和解决实际问题的能力。为了便于读者查阅,书末附有索引。

本书所包括的内容可供 40~60 学时的“对流传热传质”课程讲授使用。对于已经学过“粘性流体力学”这门课程的读者,第一章、第六章的大部分内容及第三章、第四章、第五章的一部分内容均可作为深入理解处理。这些内容对于未学过该门课程的读者则是必要的。学时较少时,第三章的 § 3.7, § 3.8,第七章的

§ 7.13, § 7.14, 第八章、第九章的 § 9.5, 第十一章的 § 11.6, § 11.7 及 § 11.8 均可不讲。

在本书即将完稿时,作者深深感谢曾经指导、帮助与鼓励过作者的师友和学生。首先,作者对在美国明尼苏达大学期间戈尔茨坦(R. J. Goldstein)教授给予的指点和帮助表示感谢。作者对西安交通大学陈钟頔教授给予的关心、支持和鼓励及对本书的编写大纲和初稿提出的宝贵意见表示衷心的感谢,这些意见使本书增色不少。清华大学热能工程系任泽霈教授认真地审阅了全书,提出了不少有益的建议和意见,他的严谨治学态度使作者深受教益,他的建议和意见使本书质量有了显著提高。西安交通大学热工教研室的同仁与研究生及本书责任编辑潘瑞麟副编审和朱兆雪副总编都给予作者以支持、鼓励及帮助,这里作者向他们一并致谢。在书稿的完成工作中作者的研究生徐国平同志协助做了许多辅助工作,作者表示谢意。

在编写过程中作者深感知识的不足,各种缺点甚至错误在所难免,作者恳切地期待来自各个方面的建议与批评,以使本书质量不断提高。

王启杰

1990年12月

主要符号表

a	分子热扩散率(导温系数), m^2/s
a_i	紊流热扩散率, m^2/s
B	势函数; 体积力
B_D	传质势函数
B_s	传热势函数
Bi	毕渥准则
b	平行平板间宽度或半宽度, m
C	组分的摩尔浓度, mol/m^3
C_f	局部摩擦系数
$C_{f, \omega}$	在相同雷诺数下相应于圆管的局部摩擦系数
c_p	定压比热, $\text{J}/(\text{kgK})$
c_{∞}	当地音速, m/s
D	质扩散率(质扩散系数), m^2/s
De	迪安准则
d	圆管直径, m
d_e	当量直径, m
Ec	埃克特准则
e	单位质量流体携带的总能量, J/kg ; 偏心距, m
F	面积, 表面积, m^2
f	横截面积, m^2 ; 局部摩擦因子; 无量纲流函数
f_{ω}	在相同雷诺数下相应于圆管的局部摩擦因子
G	质流量; kg/s ; 质流密度, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$
Gr	格拉晓夫准则
Gr_m	传质格拉晓夫准则
Gr_z	格雷茨准则
g	重力加速度, m/s^2 ; 传递系数

g_D	传质传递系数, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$
g_s	传热传递系数, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$
H	焓, 混合物焓, J/kg ; 边界层位移厚度和动量厚度的比值
h	对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
h_D	传质系数, m/s
i^*	流体的理想绝热滞止焓, J/kg
J	扩散的质流率, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; 紊流强度
K	紊流动能, J/kg ; 射流强度; 总热能
k	导热系数, $\text{W}/(\text{mK})$
k_t	紊流导热系数, $\text{W}/(\text{mK})$
L	从进口开始计算的距离, m ; 平壁或管的长度, m
Le	路易斯准则
l	距离, m ; 紊流的混合长度
M	混合物分子量
Ma	马赫准则
m	质量份额浓度, kg/kg
\dot{m}	质量流量; 壁面法向质流率 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$
Nu	努塞尔准则
n_α	元素 α 的质量份额
$n_{\alpha,j}$	j 组分中元素 α 的质量份额, $(\text{kg})_\alpha/(\text{kg})_j$
P	压强, N/m^2 ; 通用变量
Pr	普朗特准则
Pr_t	紊流普朗特准则
p	压强, N/m^2
P^+	无量纲压强
Q	热流量, W
\dot{Q}	热流量, W
q	热流密度, W/m^2
q''	分子传递热流, W/m^2

q'	紊流附加热流, W/m^2
q_w	壁面热流密度, W/m^2
\dot{q}	容积热流密度, W/m^3
R	圆柱坐标的径向距离(有时用 r), m ; 半径, m ; 气体常数, $J/(kmolK)$
Ra	瑞利准则
Re	雷诺准则
Re_{cr}	临界雷诺准则
r	圆柱坐标的径向距离(有时用 R), m ; 半径, m ; 温度恢复系数; 容积质流密度, kg/m^3
Sc	施密特准则
Sh	薛伍德准则
St	斯坦顿准则
s	化学反应时燃料和氧化剂的比例; 周边
\dot{S}	容积热流密度, W/m^3
T	绝对温度, K
T_{aw}	绝热壁温, K
T^*	理想绝热滞止温度, K
t	温度, $^{\circ}C$
t_f	流体温度, $K, ^{\circ}C$
t_w	壁面温度, $K, ^{\circ}C$
t_{∞}	边界层外的主流温度, $K, ^{\circ}C$; 来流温度, $K, ^{\circ}C$
t^+	无量纲温度
U	边界层外的主流(位流)速度, m/s ; 内能, J/kg , 润湿周长, m
u	速度向量在 x 方向上的分量, m/s
u_{av}	管内流动的平均速度, m/s
u_c	管中心线速度, m/s
u_s	摩擦速度, m/s

u_{∞}	来流速度, m/s; 纵向绕流平壁时边界层外的位流速度
u^+	无量纲速度
V	容积; m^3
v	速度向量在 y 方向上的分量, m/s
v_r	速度向量在径向的分量, m/s
v_w	壁面喷注(抽吸)速度, m/s
\dot{W}	功, W
w	速度向量在 z 方向上的分量, m/s; 周边长度
x	空间坐标; 沿壁面的距离, m
x^+	无量纲距离
y	空间坐标, 离壁面的距离, m
y^+	无量纲距离
z	空间坐标

希腊字母符号

β	楔夹角; 容积膨胀系数, K^{-1}
β_m	传质的容积膨胀系数, m^3/kg
$\beta_i(m, n)$	贝塔函数
$\beta_r(m, n)$	不完全贝塔函数
$\Gamma(n)$	伽马函数
Δ_l	当量导热厚度
γ	比热之比, c_p/c_v
δ	边界层厚度, m
δ^*	排挤(位移)厚度, m
δ_m^*	动量损失厚度, m
$\delta_{T, H}^*$	焓厚度, m
$\delta_{T, c}^*$	传导厚度, m
ϵ	紊流动能的粘性耗散, W/kg
η	相似变量, 无量纲距离

θ	无量纲过剩温度; 倾斜角
θ_w	无量纲绝热壁温
λ	本征值
μ	(动力)粘性系数, kg/(ms)
ν	(运动)粘性系数, 分子动量扩散系数, m ² /s
ν_t	紊流动量扩散系数, m ² /s
ξ	无量纲距离, 无量纲变量
ρ	密度, kg/m ³
σ	应力, N/m ²
τ	表面应力, N/m ² ; 时间, s
τ^m	分子粘性剪应力, N/m ²
τ^t	紊流附加剪应力, N/m ²
τ_w	壁面剪应力, N/m ²
Φ	粘性耗散函数
φ	空间角坐标
ψ	流函数, m ² /s
Ω	角速度

角 标

A	A 组分
A, B	A 组分向 B 组分
av	平均
aw	绝热壁状态
c	管中心线
$cond$	导热
$conv$	对流
cr	临界值
e	当量
f	流体

<i>i</i>	圆环内表面
<i>ii</i>	圆环内表面单独加热时的内表面
<i>in</i>	管进口状态
<i>j</i>	混合物中某一组分
<i>m</i>	层流状态
<i>o</i>	圆环外表面
<i>oo</i>	圆环外表面单独加热时的外表面
<i>q</i>	均匀壁面热流条件
<i>ref</i>	按参考温度确定流体的物性参数
<i>T</i>	均匀壁面温度条件
<i>t</i>	紊流状态
<i>w</i>	壁面
<i>x</i>	和距离有关的局部量;物理量在坐标 <i>x</i> 上的分量
<i>y</i>	和距离有关的局部量;物理量在坐标 <i>y</i> 上分量
<i>z</i>	物理量在坐标 <i>z</i> 上的分量
<i>a</i>	化合物的某一元素
<i>o-x</i>	距离 <i>o-x</i> 的平均值
∞	纵向绕流平壁时边界层外状态;来流状态

目 录

作者的话

主要符号表

第一章 质量、动量和能量守恒方程

- § 1.1 连续方程 (1)
- § 1.2 动量方程 (3)
- § 1.3 能量方程 (10)
- § 1.4 质量组分方程 (16)
- § 1.5 考虑组分扩散的多组分粘性流体能量方程 (23)
- § 1.6 状态方程 (23)
- § 1.7 熵方程 (25)
- § 1.8 适定问题 (26)

习 题

参考文献

第二章 边界层方程

- § 2.1 粘性流体的匹配渐近展开理论 (32)
- § 2.2 边界层方程的数学和物理性质 (43)
- § 2.3 边界层微分方程的边界条件 (45)
- § 2.4 旋转对称和轴对称边界层 (47)
- § 2.5 圆管内的边界层方程 (49)
- § 2.6 求解边界层方程的经典方法——仿射相似 (52)
- § 2.7 边界层积分方程 (67)

习 题

参考文献

第三章 非耦合外部层流边界层的换热和传质

§ 3.1	纵向绕流平壁的换热	(69)
§ 3.2	纵向绕流楔形物体的换热	(82)
§ 3.3	轴对称流动滞止区域的换热	(98)
§ 3.4	壁面有抽吸和喷注时的换热	(104)
§ 3.5	局部相似解和局部不相似解	(111)
§ 3.6	纵向绕流平壁的传质	(119)
§ 3.7	二维层流热射流的相似解	(125)
§ 3.8	两股不同温度流体间的层流混合层	(132)

习 题

参考文献

第四章 边界层积分方程的解法

§ 4.1	速度边界层的排挤(位移)厚度和动量 损失厚度	(142)
§ 4.2	热边界层的焓厚度和传导厚度	(145)
§ 4.3	$v_w \neq 0$ 时的边界层动量积分和能量积 分方程	(148)
§ 4.4	纵向绕流有未加热起始段平壁的换热	(153)
§ 4.5	用积分方程求解时的几个问题	(159)
§ 4.6	纵向绕流壁温任意变化平壁的换热	(164)
§ 4.7	纵向绕流热流密度任意变化平壁的换热	(171)
§ 4.8	纵向绕流有不传质起始段平壁的传质	(172)

习 题

参考文献

第五章 通道内非耦合层流的换热和传质

§ 5.1	流动的起始段和充分发展段	(179)
§ 5.2	热起始段和充分发展段	(199)
§ 5.3	圆管内层流充分发展段的换热	(207)
§ 5.4	非圆截面通道内层流充分发展段的换热	(221)
§ 5.5	圆管热起始段的换热	(233)

§ 5.6	非圆截面通道热起始段的换热	(246)
§ 5.7	流体流动和换热同时发展	(249)
§ 5.8	圆管内层流传质	(256)

习 题

参考文献

第六章 紊流基础

§ 6.1	从层流向紊流的过渡	(267)
§ 6.2	紊流结构及描述方法	(274)
§ 6.3	时均化法则	(276)
§ 6.4	时间平均守恒方程	(280)
§ 6.5	雷诺应力和雷诺热流方程	(287)
§ 6.6	紊动能方程(K 方程)和耗散方程(ϵ 方程).....	(291)
§ 6.7	紊流动量扩散系数、紊流热扩散系数及 紊流质量扩散系数	(300)
§ 6.8	普朗特混合长度假设	(304)
§ 6.9	紊流模型简介	(308)
§ 6.10	紊流边界层结构及通用速度分布.....	(315)
§ 6.11	紊流边界层厚度和壁面摩擦系数.....	(323)
§ 6.12	紊流边界层的通用温度分布和紊流 普朗特数.....	(328)

习 题

参考文献

第七章 壁面紊流流动和换热

§ 7.1	纵向绕流平壁的紊流换热	(338)
§ 7.2	纵向绕流有未加热起始段平壁的紊流换热 ...	(345)
§ 7.3	任意压力梯度和壁温变化时纵向绕流轴 对称物体的紊流换热	(350)
§ 7.4	壁面有抽吸和喷注时的紊流边界层换热.....	(352)
§ 7.5	圆管内紊流充分发展段的速度分布和紊	

流动量扩散系数	(355)
§ 7.6 壁面均匀热流时圆管内紊流充分发展段的温度分布和换热	(358)
§ 7.7 高 Pr 数和低 Pr 数流体在圆管内紊流充分发展段的换热	(363)
§ 7.8 周向热流不均匀时圆管内紊流充分发展段的换热	(367)
§ 7.9 壁面均匀温度时圆管内紊流充分发展段的换热	(369)
§ 7.10 圆管内紊流充分发展段的经验准则式	(370)
§ 7.11 非圆形截面通道紊流充分发展段的换热	(372)
§ 7.12 圆管热起始段的紊流换热	(377)
§ 7.13 粗糙壁面上的紊流流动和换热	(383)
§ 7.14 弯曲管道和旋转管道中的流动和换热	(388)

习 题

参考文献

第八章 自由紊流流动和换热

§ 8.1 自由剪切层流动	(402)
§ 8.2 热射流	(407)
§ 8.3 热尾流	(412)
§ 8.4 两股不同温度流体间的紊流混合层	(422)

习 题

参考文献

第九章 高速流动下的换热

§ 9.1 考虑粘性耗散的库埃特流动	(429)
§ 9.2 考虑粘性耗散的泊肃叶流动	(434)
§ 9.3 理想绝热滞止温度和温度恢复系数	(437)
§ 9.4 考虑粘性耗散的纵向绕流平壁换热	(442)
§ 9.5 考虑粘性耗散的可压缩层流边界层换热	(450)

习 题

参考文献

第十章 物性随温度变化对换热的影响

§ 10.1 变物性修正..... (460)

§ 10.2 液体、气体在圆管内的层流变物性流动
和换热..... (463)

§ 10.3 气体绕流平壁的层流变物性解..... (464)

习 题

参考文献

第十一章 自然对流换热与传质

§ 11.1 自然对流边界层方程..... (471)

§ 11.2 竖直平壁和圆柱上常物性层流自然对流
换热的相似解..... (474)

§ 11.3 层流自然对流换热的通用近似解法..... (491)

§ 11.4 浓度差引起的自然对流传质..... (496)

§ 11.5 竖直平壁上的层流混合对流换热..... (499)

§ 11.6 复杂形状物体的自然对流换热..... (505)

§ 11.7 自然对流通道的流动和换热..... (518)

§ 11.8 封闭腔内自然对流换热..... (523)

§ 11.9 紊流自然对流换热..... (535)

习 题

参考文献

第十二章 质量传递

§ 12.1 质量传递中主要变量的意义..... (548)

§ 12.2 斐克定律在多组分混合物中的应用..... (549)

§ 12.3 化学元素 α 的扩散方程..... (551)

§ 12.4 传热传质边界层微分方程组的简化
及其通用“标准形式”..... (552)

§ 12.5 传递系数和势函数..... (559)