

对流传热

任泽霖 编著

高等教育出版社



ISBN 7-04-006194-5



9 787040 061949 >

定价 14.90 元

对流换热

任泽霖 编著

高等教育出版社

(京) 112 号

图书在版编目(CIP)数据

对流换热/任泽霈编著. —北京:高等教育出版社, 1998. 3

ISBN 7-04-006194-5

I. 对… II. 任… III. 对流传热 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 04454 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

高等教育出版社发行

国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 220 000

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

印数 0 001—1 588

定价 14.90 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

内 容 简 介

本书是作者在总结多年教学和科研工作的基础上写成的。书中系统地介绍了对流换热问题的基本原理、数学模型及各种求解方法。全书叙述深入浅出，物理概念的阐明与数学分析的推导相结合，并突出了分析问题和解决问题的方法。在内容取材上，除系统地扩展、深化大学本科传热学教材的内容外，对一些较新的内容也作了适当的反映。为了便于读者进一步学习，书中列有大量参考文献。全书共十章，按基本概念和守恒方程组、边界层分析、单相介质强制对流换热，包括层流和湍流的内部问题和外部问题、自然对流换热、凝结换热和沸腾换热分章叙述。考虑到湍流模型的发展和研究工作的需要，专辟湍流基础一章，使湍流换热的分析稍为深入一步。

本书可作为热能工程、制冷与低温技术等热能核能类各专业及其他有关专业的研究生、高年级大学生的教材或教学参考书，也可供有关科技人员参考。

前言

对流换热是运动着的流体与所接触的固体壁面处于不同温度时发生的热量传递过程。它在广泛的工程领域,例如动力、核能、冶金、化工、轻工、航空航天和机械制造等部门都会遇到。科学技术的高速发展不断提出许多新的课题,推动着对流换热研究的进展。计算机的应用和发展为分析对流换热问题提供了新的有效手段。在当代科学技术中,作为传热学一个重要组成部分的对流换热,是十分活跃的工程基础学科之一。

对对流换热现象的清晰理解是分析研究问题的出发点。基于科学的普遍规律(共性)和特殊规律(个性)建立的数学物理模型(即数学模型)是该现象的数学描述。解决对流换热问题的方法主要是分析解法(包括近似的分析解法)、数值实验方法和实验方法,这些方法是相辅相成的。近百年来,对流换热的研究已从个别现象实验数据的汇集进展为比较完整的理论体系,这就要求科技工作者不仅要深入地理解所研究问题的物理特点,而且还要能用数学的方法来描述和解决一些问题。因此,本书注重物理概念的叙述和建立数学模型的方法,在讨论数学模型的同时辅以清晰的物理概念,但重点放在解决问题的思路 and 具体方法上。此外,在介绍分析解的同时紧密联系实际,给出工程计算的公式。对近年来文献报导的一些研究成果,本书也作了适当的反映,使内容更系统完整,以利于读者参考学习。

本书针对无相变和有相变的对流换热问题进行了分析和阐述,内容涉及层流和湍流时对流换热的内部问题和外部问题,包括边界层类型和非边界层类型、耦合和非耦合的流动和换热问题,以及有相变的沸腾和凝结换热问题。尽管希望能以有限的篇幅介绍较多和较新的内容,由于本书是热能核能类各专业和机械

类动力机械专业高年级大学生选修课和研究生课的教学用书，对流换热的一些特殊问题并未包括在内。

本书写作时，认为读者已掌握了工程热力学、流体力学和数学物理方程的基础知识。为了保持内容的严谨、科学和系统，本书仍保留了少量必要的粘性流体力学的内容，它将有助于读者进一步理解换热现象的机理和提高对比分析的能力。为了突出基本原理、物理概念和对流换热本身的内容，在建立数学模型和分析求解时未采用张量分析方法。一些繁复的推导过程给出于附录中，供读者参考，讲授时可视具体情况做局部精简和增添处理。

本书是根据多年来为我校大学生和研究生讲授传热学课程的教学实践经提炼加工写成的。在编写过程中，曾得到系和教研组同事的鼓励和支持，在此表示衷心的感谢。最后，还要感谢我的妻子，没有她的支持，本书是难以完成的。

限于作者水平，书中不足和错误之处在所难免，恳切希望读者批评和指正。

任泽霈

1995年12月于清华大学

主 要 符 号 表

A	面积, 表面积, m^2
a	热扩散率(导温系数), m^2/s
a_t	湍流热扩散率, m^2/s
c_p	比定压热容或称质量定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
D_d	气泡脱离直径, m
d	圆管直径, m
d_e	当量直径, m
u	质量内能, 或称质量热力学能、比热力学能(比内能), J/kg
e^0	单位质量流体携带的总能量, J/kg
F	单位容积的体积力, N/m^3
f	无量纲流函数; 管内沿程阻力系数
f_w	壁面摩擦系数
g	重力加速度, m/s^2
h	比焓或称质量焓, J/kg ; 表面传热系数(对流换热系数) ^① , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
K	湍流脉动系数, J/kg
L	长度, m
l	湍流混合长度, m
p	压力, Pa
q	热流密度或称面积热流量, W/m^2

① 本符号表中热学量的符号和名称, 均依据我国最新标准GB 3102.3—93。因为热学量的符号和名称在我国最新标准GB 3102.3—93中有较大变化, 为便于读者阅读, 用括号注出了GB 3102.3—86中的名称或习惯上使用的名称。

q_m	单位面积的质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 单位宽度壁上凝结液的质量流量, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
q_i	湍流热流密度, W/m^2
R	圆柱坐标系的无量纲径向距离, 气泡半径, m
r	圆柱坐标系的径向距离, m ; 汽化潜热, J/kg
r^+	无量纲坐标
T	热力学温度, K
T_r	定性热力学温度, K
T^+	湍流的无量纲温度
t	摄氏温度, $^\circ\text{C}$
U	x 方向上的无量纲速度分量
u	速度矢量在 x 方向上的分量, m/s
u^*	摩擦速度, m/s
u^+	无量纲速度
V	y 方向上的无量纲速度分量
v	速度矢量在 y 方向上的分量, m/s
v_b	气泡增长速度, m/s
v_r	速度矢量在 r 方向上的分量, m/s
W	z 方向上的无量纲速度分量
w	速度矢量在 z 方向上的分量, m/s
X	无量纲空间坐标
x	空间坐标; x 方向沿壁面的距离, m ; 蒸汽干度
Y	无量纲空间坐标
y	空间坐标; y 方向沿壁面的距离, m
y^+	湍流的无量纲坐标
Z	无量纲空间坐标
z	空间坐标

希腊字母符号

α_v	体胀系数, K^{-1}
β	楔形物体的夹角
δ	流动边界层厚度, m
δ_t	温度边界层厚度, m
δ_1	边界层位移厚度, m
δ_2	边界层动量厚度, m
ε	湍流动能的粘性耗散, m^2/s^3
η	相似变量; 无量纲距离
Θ	无量纲温度
θ	过剩温度, K或 $^{\circ}C$; 倾斜角; 接触角
λ	热导率或称导热系数, $W/(m \cdot K)$
μ	动力粘度, $Pa \cdot s$
ν	运动粘度, m^2/s
ν_t	湍流动量扩散率, m^2/s
ρ	密度或称体积质量, kg/m^3
σ	表面张力, N/m
τ	表面粘性应力, Pa (即 N/m^2); 时间, s
τ_t	湍流应力(雷诺应力), Pa
τ_w	壁面粘性切应力, Pa
Φ	粘性耗散函数, W/m^3 ; 热流量, W
ψ	流函数, m^2/s

下 标

b	气泡
cl	管中心线
cond	导热
conv	热对流

目 录

主要符号表	1
第一章 对流换热的基本方程	1
1-1 对流换热概述	1
1-2 连续性方程	5
1-3 动量方程	7
1-4 能量方程	12
1-5 定解条件	20
参考文献	22
习题	22
第二章 边界层分析	24
2-1 流动边界层和热边界层	24
2-2 边界层连续性方程	28
2-3 边界层动量方程	29
2-4 边界层能量方程	32
参考文献	36
习题	36
第三章 层流边界层的流动和换热	38
3-1 外掠平壁层流边界层流动和换热的相似解	38
3-1-1 外掠平壁层流边界层流动的相似解	38
3-1-2 外掠平壁层流边界层换热的相似解	44
3-2 外掠楔形体层流边界层流动和换热的相似解	50
3-2-1 外掠楔形体层流边界层流动的相似解	50
3-2-2 外掠楔形体层流边界层换热的相似解	54
3-3 层流边界层的积分方程	58
3-3-1 边界层动量积分方程	58
3-3-2 边界层能量积分方程	62

3-4 外掠平壁层流边界层流动和换热的近似解	64
3-4-1 边界层动量积分方程近似解	64
3-4-2 边界层能量积分方程近似解, $Pr \gg 1$	66
3-4-3 边界层能量积分方程近似解, $Pr \ll 1$	69
3-5 变物性流体外掠平壁层流边界层流动和换热	71
参考文献	73
习题	75
第四章 管槽内的层流流动和换热	76
4-1 热入口段和充分发展段	76
4-2 管槽内流动和热充分发展段的层流换热	80
4-2-1 流动充分发展的速度分布	80
4-2-2 流动和热充分发展时的换热	82
4-3 常壁温时管内热入口段的层流换热	85
4-4 常热流时管内热入口段的层流换热	92
4-5 圆管内混合入口段的层流换热	98
4-6 变物性流体内层流换热	100
参考文献	103
习题	104
第五章 湍流基础	106
5-1 湍流的基本概念	106
5-2 湍流的基本方程	108
5-3 湍流的半经验理论	113
5-3-1 湍流应力和湍流热流密度	113
5-3-2 普朗特混合长度理论	114
5-4 湍流模型简述	118
5-4-1 湍流的一方程模型	118
5-4-2 湍流的二方程模型	121
参考文献	122
第六章 湍流边界层的流动和换热	125

6-1 湍流边界层的流动	125
6-2 外掠平壁湍流边界层流动的近似解	130
6-3 外掠平壁湍流边界层换热	134
参考文献	143
习题	144
第七章 管内湍流的流动和换热	146
7-1 管内湍流的流动	146
7-2 常热流时管内流动和热充分发展的湍流换热	152
7-2-1 $0.5 < Pr < 30$ 的流体流动和热充分发展的换热	152
7-2-2 $Pr \gg 1$ 的流体流动和热充分发展的换热	157
7-2-3 $Pr \ll 1$ 的流体流动和热充分发展的换热	161
7-3 常壁温时管内流动和热充分发展的湍流换热	162
7-4 管内热入口段的湍流换热	164
参考文献	170
习题	172
第八章 自然对流换热	173
8-1 自然对流层流边界层微分方程组	173
8-2 竖壁自然对流层流流动和换热的相似解	175
8-2-1 常壁温竖壁层流自然对流换热	175
8-2-2 常热流竖壁层流自然对流换热	180
8-3 竖壁自然对流层流流动和换热的近似解	182
8-4 自然对流湍流流动和换热的近似解	185
8-5 其它形状物体自然对流换热计算	189
参考文献	191
习题	194
第九章 凝结换热	196
9-1 层流膜状凝结换热理论解	196
9-1-1 努谢尔特膜状凝结换热理论	196
9-1-2 对努谢尔特膜状凝结理论的修正	200

9-2 竖壁层流膜状凝结的相似解	202
9-3 竖壁湍流膜状凝结换热计算	208
9-4 横管膜状凝结换热理论解	211
9-5 管内凝结换热	214
参考文献	217
习题	218
第十章 沸腾换热	219
10-1 大容器沸腾换热曲线	220
10-2 气泡成长过程分析	222
10-2-1 气泡形成的条件	222
10-2-2 固体表面上气泡的形成	226
10-2-3 气泡的增长速度	228
10-2-4 气泡的脱离直径和频率	232
10-3 大容器沸腾换热计算	233
10-3-1 核态沸腾换热计算	233
10-3-2 临界热流密度的计算	237
10-4 管内两相流动和对流沸腾	239
10-4-1 竖管内两相流流动和换热	239
10-4-2 流动沸腾换热分区图	241
10-4-3 水平管内两相流流动和换热	242
10-5 管内流动沸腾换热计算	243
参考文献	251
习题	254
附录	256
附录1 圆柱坐标系	256
附录2 K 方程的推导	257
附录3 相似准则	263
附录4	264
附表1 干空气的热物理性质 ($p=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)	264

附表2 饱和水的热物理性质	265
附表3 干饱和和水蒸气的热物理性质	267
附表4 液态金属的热物理性质	269
附表5 几种饱和液体的热物理性质	270

第一章 对流换热的基本方程

1-1 对流换热概述

热对流，是指流体中温度不同的各部分之间，发生宏观相对运动和相互掺混所引起的热量传递现象。热对流只发生在运动着的流体中。当流体作宏观运动时，流体微观粒子的热运动引起的导热热量传递也始终存在，因此热对流必然与导热同时发生。也就是说，流体微团的运动和微观粒子的热运动所引起的两种形式的热量传递是相伴而进行的。

在工程应用中，最有实际意义的是运动着的流体与所接触的固体壁面处于不同温度时，发生在它们之间的热量交换，称为对流换热。值得注意的是，对流换热不同于热对流，它是热对流和导热综合作用的结果。当流体沿固体壁面流动时，由于粘性的作用，靠近壁面处流体的速度逐渐降低，而在贴壁处流体的速度为零。在该处，壁面与流体间的热量交换只依靠导热的作用。随着流体掠过并离开壁面距离的增加，热对流开始起作用。可见，对流换热是综合地依靠热对流和导热两种热量传递过程实现的。因为对流换热的热量传递与流体的宏观相对运动不可分割地联系在一起，所以流体运动发生的原因、流动的状态、流体的种类和热物性、固体壁面的几何形状和尺寸等都会影响换热过程。因此，对流换热是一个极为复杂的过程，它取决于很多因素。

就流体运动发生的原因而言，对流换热可分为自然对流换热和强制对流换热两大类。自然对流是流体各部分温度不同而产生的密度差所形成的浮升力引起的流动；强制对流是在外力作用（包括工程上常见的泵或风机的作用）下所产生的流动。例如，各种热工设备的外壳和暖气片表面附近的空气因受热而产生的流动是自然对流，而冷凝器管内冷却水的流动是由水泵驱动的强制对流。若两类对流运动并存，还会出现复杂的混合对流。由于流体