



TSINGHUA UNIVERSITY

热流体力学

过增元 著

清华大学出版社

7K12

334.34

热 流 体 学

过增元 著



清华大学出版社

内 容 简 介

热流体力学是一门涉及传热学、流体力学和热力学的新交叉学科。该学科重点放在系统地深入地研究热过程对流动过程影响的规律,从而提出了一些新的概念和揭示了一些新的物理现象。在此基础上形成的热控制技术可望广泛应用于能源、动力、材料、航空航天、环境、电子器件等领域。

本书共分四篇十二章。第一篇的第一、二章作为基础知识讨论了流动对传热过程的影响及其物理机制;第二篇的第三至第七章介绍加热引起的阻力和绕流现象及其工程应用;第三篇的第八章至第十章讨论了热过程对流体运动的起始和稳定性的影响;第四篇的第十一、十二章则讨论了流动和传热过程的热力学第二定律分析和换热器的热优化问题。

本书可供能源、动力、航空航天等领域的科技人员参考,也可作为工程热物理和有关专业的研究生教材。

(京)新登字 158 号

热 流 体 学

过增元 著

☆

清华大学出版社出版

北京·清华园

中国科学院印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: $10\frac{1}{8}$ 字数: 263 千字

1992 年 2 月第 1 版 1992 年 2 月第 1 次印刷

印数: 0001—4000

ISBN 7-302-00923-6/TK·18

定价: 4.80 元

7

光华基金会为支持学术专著
和研究生教材的出版，给予我社
资助，本书即为由光华基金会资
助出版的专著之一。

序

工程上经常遇到各种各样流体的流动和传热问题。由于可流动性本是流体固有性质之一，常把流体流动的研究归之于流体力学的范畴，看作是研究和发展对流传热的基础。这从本质上忽视了对流传热可能对流动产生的反作用，从而在当代流体力学中促成了研究因传热引起流体温度变化的非恒温流体力学分支。然而，科学技术的实践发现，存在着流体流动和传热的相互作用，特别是流体具有核反应、离子反应、化学和物理化学等内热源时，可以对外出现热交换而仍保持特殊的恒温流动，突出地表明了流体的流动过程和热过程可有相互的影响，并同时涉及到能量形式转变的热力学问题。于是，在国际学术界酝酿着形成一门新的边缘性组合学科“热流体学”，将流体的流动、传热和能量转换作为耦合的整体行为来研究，并且在 1984 年于夏威夷正式成立了推动国际协作应用研究的“环太平洋热流体工程中心”(Pacific Centre for Thermal-Fluid Engineering)。

清华大学过增元教授近年来一直致力于热过程对流体流动反作用的研究，用新的观点比较系统地深入揭示出一些热流体流动的新特性，更新并发展了“热阻力”概念和含义，提出了“热绕流”现象和“热驱动”特性，探讨了热流体流动边界层的“稳定性”问题，可望创新某些热控制技术，先后被邀请在 1986 年于旧金山召开的第 8 届和 1990 年于耶路撒冷召开的第 9 届国际传热大会上作专题主旨报告，由于论点清晰和体系新颖而深受赞赏。这几年，过增元教授系统地整理了这些进展，为清华大学研究生开设了讲座，并在兄弟院校应邀讲学。正是在这种反复提炼的讲稿基础上撰写成本

• i •

书,可供能源、动力、化工、航天、材料、信息等领域的热物理研究和设计运行工作者参阅。

在书稿付印、即将问世之际,谨为之略书数语,算是简单的推荐介绍。自然,新体系的最终成型和充实总要经历一段发展的过程,本书难免存在着某些尚待推敲或不足之处,但总可以期望它起抛砖引玉和诱导启发的有益作用。

王 补 宣

1991年9月于清华大学

前 言

各种学科之间的交叉,大批边缘学科的涌现,是当代科学技术发展的大趋势。同是由物理学科分化出来的子学科:热力学,传热学和流体力学,在过去的年代中应社会的需要而获得了系统的纵深发展。但是各个学科的发展越深入,触角伸得越长,相互触及和扭结的机会就越多。著名的德国物理学家普朗克说过:“科学是内在的统一体,它被分解为单独的部门不是由于事物的本质,而是由于人类认识能力的局限性。”本书作者着重讨论和研究了热力学、传热学和流体力学中相互耦合和相互促进的部分,在新的层次上进行综合,并期望能逐步发展成为一个新的分支学科,但又并非完全替代或概括热力学、传热学和流体力学。当然,综合并不是简单的叠加,它意味着再创造,应该有突破和新生。本书中提出了一些新的现象、新的观点和原理与读者们研讨。

流体力学是对流换热的基础,这无论在大学教学中或在科学研究中已为大家所公认。对很多流动过程和热过程同时存在的问题,如果暂不考虑物性随温度的变化,通过求解连续方程和动量方程就可获得流场的图案,在此基础上再求解能量方程而获得温度场和传热关系式。也就是说,流场(当然还有边界条件)决定了温度场。当物性变化不能忽略时,则可对常物性结果进行修正。但是,还存在着一些现象:在流动过程和热过程同时存在的问题中,热现象起着重要的、甚至决定性的作用。热流体学就是系统地研究热过程对流动过程的影响和作用的,特别着重讨论这种作用的物理机制及其规律性的东西。传统的传热学和流体力学通常应用热力学第一定律得到能量守恒方程,在热流体学中将引入热力学

第二定律的定量分析。它对传热和流动过程的本质认识,以及流体机械和传热设备中可用能的优化分析起着极为重要的作用。

本书内容的另一特点是,很多材料来自于近期的科学研究成果和论文,其中包括作者和同事们的研究工作。因此展现在读者面前的并不是一幅封闭的、完善无缺的知识系统图案,从而可以充分发挥读者的主观能动性,在知识的汪洋大海中与作者一起去追求、探索和开拓。

本书是为工程热物理、热工、暖通、化工、能源、环境等专业的研究工作者和研究生而写的。但作者希望对上述专业有关的读者也是有价值的。与其它许多书籍和教材不同之处在于更强调现象的物理机制的分析和讨论,而不过多地去追求数学上的完美。热流体学的预备知识是:热力学,传热学和流体力学。

第一篇的第一章和第二章是作为基础知识以及与热流体学内容的对比而出现的,主要是简要地描述了流动过程对传热过程的影响。在第二篇中提出和讨论了热阻力和热绕流现象及其应用。第三章的一维无粘加热管流是作为讨论热阻力的预备知识,在很多教科书中都能找到。而第四章到第七章的内容几乎都是取材于科学研究的论文。第四章是热阻力现象概念的提出和一些基本关系的建立。第五章和第六章讨论一些特定问题中的热阻力,以证实热阻力现象的普遍存在和加深对热阻力现象的认识。第七章则提出和描述了热绕流现象,这是与热阻力现象有联系又有区别的热过程对流动过程的另一类作用。第三篇是热驱动流和热稳定性,这是指热现象是流体流动的起因,即是热控制的流动。第八章是讨论重力场中的热驱动流,与其它描述自然对流书籍的不同之处在于着重讨论驱动力与流动形态的关系。第九章是非重力场中的热驱动流,这也是其它书籍中一般不涉及到的。第四篇是讨论流动和传热系统中热力学第二定律的定量分析及其在热优化中的应用。第十章热稳定性,着重讨论由热引起的流体动力学不稳定

性以及带来的后果。第十一章粘性流动和对流换热中的熵产生(包括熵产生的基础知识)以及第十二章换热设备中的熵产分析和热优化则着重在传热学、流体力学传统分析的基础上引进热力学第二定律的定量分析,并特别讨论了它们在流动和传热系统的热优化设计中的应用。

最后有一点要说明的是,国外也出版过题为热流体力学的教科书,它们为数很少,如 Pefley^[7] 和 Reynolds^[12] 的著作。它们实际上只是流体力学教科书,其中增加了一些传热的内容而已。因此,本书从系统到内容都和它们完全不同。

在本书完稿之际,作者要衷心感谢传热界前辈王补宣教授、葛绍岩教授、杨世铭教授和孙仁洽教授等的鼓励和支持,特别要感谢的是作者的导师王补宣教授,正是他在八年前就提出了传热对流动过程影响的研究方向,以及多年来在他的指导和帮助下才能有今天的初步成果。作者还要感谢有关同仁和研究生们,没有他们的真诚合作和帮助,目前成果的取得也是无法想象的。当然,作者不会忘记妻子的支持,这决不仅限于她长期来承担了几乎全部的家务工作。最后,衷心感谢国家自然科学基金会和清华大学给予的研究经费资助。

符 号 表

α	导温系数, m^2/s
a	半径, m
a	声速, m/s
a	加速度, m/s^2
A	截面积, m^2
b	通道半宽, m
b	可用性函数, J/kg
c_p	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_f	摩擦阻力系数
c_t	热阻力系数
$c_{t,\text{tot}}$	总阻力系数
C	水当量比
d	间距, 滴径, m
D	直径, 管径, m
E	系统能量, J
f	摩擦因子, 无因次流函数
f	力, N
F	无因次力
F	冲量函数, $\text{N} \cdot \text{s}$
F	不可压流流函数, m^2/s
g	重力加速度, m/s^2
G	质量流量, kg/s
h	对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

k	高度, m
h	比焓, J/kg
H	高度, m
H	焓, J
I	电流, A
j	粒子流密度, 粒子/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
j	电流密度, A/ m^2
k	波数,
K	热泳系数
K	总传热系数, W/($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
l	长度, m
L	管长, m
L	无因次通道高度
m	无因次压力梯度, 斜率
m	质量, kg
$\dot{m}$	质量速度, kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
$\dot{m}'$	单位通道宽中质量流量, kg/($\text{m} \cdot \text{s}$)
M	气体分子量, kg
$\dot{M}$	无因次质量流量
n	无因次浓度
N	粒子浓度, 粒子/ m^3
p	压力, Pa
P	无因次压力
q	热流密度, W/ m^2
$\dot{q}$	热源强度, W/ m^3
Q	热流量, W
Q	无因次加热量
r	半径, m

• x •

R	通道半径, 粒子半径, m
s	比焓 J/(kg · K)
S	熵 J/K
t	时间, s
T	温度, K
$u, v, w,$	在 x, y, z 坐标方向的速度分量, m/s
U	速度, m/s
U	无因次速度
U	内能, J
v	比容, m ³ /kg
V	速度, m/s
V	无因次速度
w	偏心因子
w	振幅, m
W	板宽, m
W	功, J
$\dot{W}$	功率, W
X, Y	无因次坐标
Z	压缩因子
α	系数
β	楔角
β	体膨胀系数, 1/K
γ	绝热指数
γ	间隙比
δ	厚度, 边界层厚度, m
ε	换热器效能
ε	激光散斑位移量, m
ν_m	紊流粘性系数, N · m/s ²

η	无因次坐标
η	热力学效率
θ	无因次温度
λ	导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$
$\bar{\lambda}$	平均自由程, m
μ	动力粘度, $Pa \cdot s$
ν	运动粘度 m^2/s
ξ	流量比
ρ	密度, kg/m^3
σ	表面张力, N/m
τ	剪应力, N/m^2
τ	温度比
ϕ	无因次流函数, 温差场不均匀因子
ϕ	耗散函数, W/m^3
ψ	流函数, m^2/s
ω	频率, $1/s$
ω	无因次角速度
Ω	角速度, rad/s

下标

a	绝热, 上部
b	背部, 下部
c	常物性, 可压缩、冷
c_r	临界
d	下游
e	外流、当量、喉部
f	流体、摩擦
g	气体
gen	产生

h	水力当量、热
l	液体
m	平均,最大,动量
r	径向
s	等熵
s/h	轴
u	上游
v	变物性的
w	壁面
x	沿 x 方向
∞	来流
θ	角向

无因次准则

$$\text{Bo} = \frac{\rho g L D}{\sigma} \text{——蓬德 (Bonder) 数}$$

$$\text{Cr} = \frac{\nu \lambda}{\sigma d} \text{——克列斯佩兴 (Crispation) 数}$$

$$\text{Fr} = U \left(\frac{g h \Delta \rho}{\rho_{\infty}} \right)^{\frac{1}{4}} \text{——弗洛德 (Froude) 数}$$

$$\text{Gr} = \frac{\beta g \Delta \tau l^3}{\nu^2} \text{——葛拉晓夫数}$$

$$\text{He} = \frac{s}{c_p T_o} \text{——加热数}$$

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{R} \text{——努曾数}$$

$$M = \frac{v}{a} \text{——马赫数}$$

$$\text{Ma} = \left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \frac{\Delta T L}{\mu a} \text{——马拉高尼 (Maragorni) 数}$$

$$\text{Nu} = \frac{hl}{\lambda} \text{——努谢尔特数}$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \text{——普朗特数}$$

$$\text{Ra} = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu \alpha} \text{——瑞利数}$$

$$\text{Re} = \frac{ul}{\nu} \text{——雷诺数}$$

$$\text{St} = \frac{h}{\rho c_p u} \text{——斯坦顿数}$$

$$\text{Sh} = \frac{jl}{\nu KN} \text{——希乌特 (Sherwood) 数}$$

目 录

序.....	i
前言.....	iii
符号表.....	x

第一篇 基础知识

第一章 常物性流动对传热的影响.....	1
1.1 引言	1
1.2 外流传热关系分析	1
1.3 内流传热关系分析	8
1.4 “新传热学”简介及其合理内核	16
第二章 变物性对流换热.....	21
2.1 引言	21
2.2 Falkner-Skan 变换和 Illingworth-Stewartson 变换	22
2.3 常物性结果的修正	36

第二篇 热阻力和热绕流

第三章 一维加热(或冷却)无粘管流.....	42
3.1 引言	42
3.2 完全气体的单纯加热关系式	44
3.3 纯滞止温度 T_0 变化时的壅塞效应	50
3.4 换热和摩擦联合作用的一维管流	53
第四章 热阻力的基本概念.....	58
4.1 引言	58
4.2 热阻力的概念及其物理机制	58
4.3 加热(或冷却)对一维无粘管流的影响	60

4.4	热阻力系数	69
4.5	粘性阻力与热阻力的联合作用	74
4.6	热阻塞现象的实验验证	83
第五章	通道自然对流中的热阻力	87
5.1	引言	87
5.2	竖板通道自然对流的抽吸流量	87
5.3	竖板通道自然对流的热阻力和临界热流	95
第六章	其它加热流动系统中的热阻力问题	118
6.1	引言	118
6.2	超音速通道流中的热阻力	118
6.3	两相受迫对流沸腾中的热阻力	136
第七章	热绕流	145
7.1	引言	145
7.2	热绕流现象的物理机制	146
7.3	虚质量源	147
7.4	热绕流的近似解	153
7.5	热偶极子	157
7.6	内流问题中的热绕流	160
7.7	热绕流实验	165
7.8	热绕流现象的某些实例	167
7.9	气固两相流中的热泳和热绕流	173
7.10	运动流体的热斥冷吸原理	176

第三篇 热驱动与热稳定性

第八章	重力场中的热驱动	178
8.1	引言	178
8.2	热驱动的分类	179
8.3	Benard 对流	181
8.4	铅垂流体层中的热驱动	185
8.5	大空间中的热驱动	188