

清华大学学术专著

动力论及其在传热与流动 研究中的应用

陈熙

清华大学出版社



清华大学学术专著

动力论及其在传热与流动
研究中的应用

陈 熙

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书以论述动力论及其在传热与流动研究中的应用为特点。全书分为两大部分,前5章为动力论基础知识及其在非电离气体传热与流动问题研究中的应用;后一部分即第6章则专门讨论在高温部分电离气体或热等离子体条件下的应用,主要反映著者十多年来的研究成果。书中分别对自由分子流区、温度跳跃或速度滑移区以及过渡区的传热与流动问题专门作了讨论。

本书可供广大的传热学与流体力学工作者学习动力论处理方法之用,也可作为工程热物理、流体力学等学科的研究生与高年级大学生课程的参考教材。对气体分子动力论有兴趣的物理学工作者也会发现本书有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

动力论及其在传热与流动研究中的应用/陈熙著. —北京:清华大学出版社, 1996

ISBN 7-302-01951-7

I. 动… II. 陈… III. ①动力论-研究②动力论-应用-传热-研究③动力论-应用-流动(力学)-研究 O0313②TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 1044 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)

印刷者:北京人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 14.75 字数: 406 千字

版 次: 1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01951-7/TK·22

印 数: 0001—1000

定 价: 28.00 元

ABSTRACT

This book is concerned with the kinetic theory of gases and its applications to the studies of heat transfer and fluid flow. It is roughly divided into two parts. The first part contains Chapter 1 through Chapter 5. This part is concerned with the fundamentals of the kinetic theory of gases (Chapter 2) and its applications to the studies of heat transfer and fluid flow under conditions of ordinary temperature gases. Chapters 3, 4, 5 are devoted to the free-molecule regime, the temperature-jump and velocity-slip regime and the transition regime, respectively. The second part or Chapter 6 of this book is concerned with the applications of the kinetic theory to the study of heat transfer and fluid flow under conditions of partially ionized high-temperature gases. This second part reflects the recent research results of the author himself.

This book has been written for those readers who are working in the field of heat transfer and fluid mechanics and are interested in the kinetic theory approaches. It can also be useful for students in the field of thermal science and fluid mechanics and for physicists who are concerned about the kinetic theory of gases.

前 言

本书论述动力论及其在传热与流动问题研究中的应用。全书分为两部分,前5章为动力论基础知识及其在非电离气体传热与流动问题研究方面的应用,第6章则专门讨论在电离气体情况下的应用。

目前国内出版的物理学书籍的动力论部分很少涉及传热与流动方面的内容,而传热学与流体力学书籍绝大多数以连续介质为基础,很少涉及动力论处理方法。在许多实际传热与流动问题中,如在一些涉及低气压、小物体尺度、高气体温度的问题中,Knudsen数(定义为气体粒子的平均自由程长度与物体的特征尺度之比)可能达到相当大的数值,以致需要采用动力论的处理方法(对自由分子流区与过渡区),或者需要用到基于动力论分析所建立的边界条件(对温度跳跃或速度滑移区)。几十年来,已有大量的理论与实验研究结果发表,散见于各种学术期刊、会议文集与书籍中。归纳整理这些研究结果,显然是件有意义的工作,本书对此作了初步的尝试。考虑到大多数传热学与流体力学工作者不太熟悉动力论处理方法,也很少有人开设有关内容的大学生或研究生课程,本书前5章的许多推导尽量写得详细一些,以使仅具有普通物理学课程中分子动力论知识的读者,通过自学就能掌握有关的内容。前5章也可作为高年级大学生及研究生选修课程的参考教材。

本书第6章讨论动力论处理方法在高温部分电离气体条件下传热与流动问题研究中的应用,主要反映了我们十多年来所得到的一些研究结果。这些研究曾得到国家教委和国家自然科学基金委员会的资助;一些研究生和本科生(陈小明、邱健勇、陶新、苏炳志、何评、吕志鹏、俞岚等)参加了部分研究并做出了积极的贡献,在此一并致谢。该章的内容和著者的前一本书《高温电离气体的传热与流

动》(科学出版社, 1993)在自由分子流区颗粒阻力与热泳力表达式等方面有所不同, 主要因为这里进一步考虑了受带电颗粒吸引(对于离子)或排斥(对于电子)作用、并与颗粒表面碰撞的离子或电子对颗粒的反作用力。

作者要感谢美国明尼苏达大学航空工程与力学系的 A. S. Berman 教授与机械工程系的 E. Pfender 教授。从他们那里学习到的传热与流动问题动力论处理方法与热等离子体条件下流动与传热问题的处理方法, 促进了我们研究工作的开展, 从而使本书的写作成为可能。

本书的出版得到了“清华大学学术专著出版基金”的资助, 得到了中国科学院院士、中国科学院力学研究所吴承康研究员, 清华大学工程力学系傅维镡教授、朱文浩教授的关心与支持, 对此作者也表示衷心的感谢。

陈 熙

1994 年 10 月 1 日于清华园

主要符号表

a	热协调系数;分子直径(m);声速(m/s)
A	面积(m^2)
B	磁感强度(T)
C_D	阻力系数
c_p, c_v	定压比热容,定容比热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
d	直径(m)
D	扩散系数(m^2/s)
e	电子电荷($=1.602\times 10^{-19}\text{C}$)
$e_{\text{内能}}$	气体分子的内能(J)
E	电场强度(V/m)
E_i	电离能(eV, J)
E_i, E_r	入射分子携带的能量(W),反射分子携带的能量(W)
f	速度分布函数;动量协调系数
f^-, f^+	入射与反射分子的速度分布函数
f_v	蒸汽分子的速度分布函数
f_j	第 j 种组分的质量分数($=\rho_j/\rho$);第 j 种组分 气体粒子的速度分布函数
F_D, F_L	阻力(N),升力(N)
F_P, F_T	光泳力(N),热泳力(N)
g	相对速度(m/s);重力加速度(m/s^2)
h	比焓(J/kg)
i_n	函数, $i_n(\beta) = \int_0^\infty x^n e^{-\beta x^2} dx$

I_0, I_1	零阶与一阶变形的 Bessel 函数
$\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$	x, y 与 z 向单位向量
$\vec{I}$	单位张量
J	碰撞积分; Jacobi 行列式
k	Boltzmann 常数 ($=1.381 \times 10^{-23} \text{ (J/(kg} \cdot \text{K))}$)
K_v	蒸发常数 (自由分子区, m/s)
L	特征长度 (m); 管长 (m)
L_v	蒸发潜热 (J/kg)
m	气体粒子的质量 (kg)
$\dot{m}$	质量流量 (kg/s)
n	气体粒子的数密度 (m^{-3})
$\hat{n}$	单位法线向量
p	热力学压力 (N/m^2); 物体表面压力 (N/m^2)
$p(\theta)$	方向分布几率函数
P	表面或空间任意点
$\vec{P}$	压力张量
q, q	热流向量 (W/m^2), 热流密度 (W/m^2)
q^*	气体内部存在的热流 (W/m^2)
Q	总热流 (W); 体积流量 (m^3/s)
Q_{ij}	碰撞截面 (m^2)
r, θ, z	柱坐标
r, θ, φ	球坐标
R	半径 (m); 气体常数 ($=k/m, \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$)
S_o	速率比 ($=U_\infty / \sqrt{2kT/m}$)
S	热传导势, $S = \int_{T_0}^T \kappa dT$
$\dot{S}$	应变率张量
t	时间 (s)

T	温度 (K)
T'	表面视在温度 (K)
T_g, T_s	表面跳跃后的温度 (K)
u_s, U_g	表面滑移速度 (m/s)
U, U_∞	宏观速度向量 (m/s) ·
U_j	第 j 种组分粒子的漂移速度 (m/s)
U_r	单位体积辐射功率 (W/m^3)
$\mathbf{v}, \mathbf{v}'$	速度向量 (m/s), 相对速度向量 (m/s)
$v, \bar{v}$	运动速率 (m/s), 平均运动速率 (m/s)
v_s	速度向量在 (r, θ) 截面上的投影 (m/s)
W_s	逸出功 (eV, J)
x_j	第 j 种组分粒子的摩尔分数 ($=n_j/n$)
z, z^*	跳跃距离 (m)

希腊字母

α	非金属颗粒上浮动电位不均匀分布系数; 角度
β	最可几速度的倒数的平方, 即 $[\sqrt{2kT/m}]^{-2}$, (s/m); 角度
γ	比热比 ($=c_p/c_v$)
Γ	通量
γ_i	离子轰击效率系数
δ	稀薄程度参数 ($\sim Kn^{-1}$); 边界层厚度 (m)
∇T	温度梯度 (K/m)
ϵ	黑度系数; 介电常数 (F/m)
ζ, η, ξ	无量纲量
θ	角度
κ	热导率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
λ, λ^*	平均自由程长度 (m)
μ	动力粘度 ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)

μ_e, μ_i	电子、离子迁移率($\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)
ν	运动粘度 (m^2/s)
ρ	密度 (kg/m^3)
σ	Stefan-Boltzmann 常数($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$); 表面处漫反射分子分数; 微分碰撞截面 (m^2)
σ	电导率($\text{A}/(\text{V}\cdot\text{m})$)
τ	切应力 (N/m^2)
$\overline{\tau}$	切应力张量
φ	浮动电位的绝对值 (V); 扰动项
Φ_i^-, Φ_i^+	入射与反射分子的内部能量 (J)
ψ	粒子通量 ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
ω	角频率 (s^{-1})

下角标

0	基准点; 无相对速度情形
∞	远离表面处
a	原子
c	连续介质区
e	电子
fm	自由分子区
g	跳跃后的值, Knudsen 层外缘处
h	重粒子
i	离子; 入射
j	第 j 种组分
M	金属; Maxwell 型
N	非金属
p	颗粒; 光泳
r	径向分量; 辐射; 反射
s	基于热传导势定义的; 表面视在值

T	热泳
T_e	热电子发射
v	蒸汽；蒸发条件下
w	壁面处
x, y, z	x, y 与 z 向分量

上标

— 平均值

上角标

—	入射分子的
+	反射分子的
*	等离子体中；气体内部； $(r+\lambda^*)$ 处

特征数

Kn, Kn^*	Knudsen 数，等离子体条件下的 Knudsen 数
Ma	Mach 数
Nu	Nusselt 数 $(=qL/(\Delta T \cdot \kappa))$; $Nu_s = q(2R)/(S_\infty - S_w)$
Pr	Prandtl 数 $(=\mu c_p/\kappa)$
St	Stanton 数 $(=Nu/Re \cdot Pr)$

目 录

前言	(3)
主要符号表	(15)
第 1 章 引论	(1)
1.1 传热与流动区域的划分 Knudsen 数	(1)
1.2 不同传热与流动区域理论处理方法简介	(4)
1.2.1 连续介质区 ($Kn < 10^{-3}$)	(5)
1.2.2 温度跳跃区 ($10^{-3} < Kn < 10^{-1}$)	(6)
1.2.3 自由分子区 ($10^1 < Kn$)	(10)
1.2.4 过渡区 ($10^{-1} < Kn < 10^1$)	(14)
1.3 动力论的应用背景与本书内容安排	(18)
参考文献	(20)
第 2 章 气体动力论基础	(23)
2.1 分子之间的作用力	(23)
2.2 平均自由程长度	(25)
2.3 平衡气体中分子的方向分布	(28)
2.4 分子的通量或分子与单位面积表面的碰撞频率	(29)
2.5 气体的压力、比热容与比热比	(30)
2.6 基于平均自由程概念的输运过程的简单理论	(32)
2.7 气体中电子的输运	(36)
2.8 气体分子的速度分布函数 分子速度 函数的平均值	(39)
2.9 平衡气体分子的 Maxwell 速度分布函数	(41)
2.10 流动气体中分子的速度分布函数及速度 函数的平均值	(49)

2.11	与分子相对速度有关的物理量的通量	
	压力张量、应力张量、压力及热流向量	(51)
2.12	简化形式的 Boltzmann 方程	(58)
2.13	Maxwell 变化方程 守恒关系式	(67)
	参考文献	(74)

第3章 自由分子流区的传热与流动

3.1	引言	(77)
3.2	镜反射与漫反射	(79)
3.3	漫反射分子的方向分布	(84)
3.4	通过小孔的自由分子流动	(86)
3.5	长圆管中的自由分子流动	(92)
3.6	非定常自由分子流问题: Rayleigh 问题	(100)
3.7	自由分子区气体与表面间的能量交换	(106)
3.8	气体夹层的传热	(109)
	3.8.1 同心圆柱	(111)
	3.8.2 同心球	(114)
3.9	流动气体中物体的传热	(117)
	3.9.1 薄平板	(125)
	3.9.2 圆柱体	(126)
	3.9.3 圆球	(132)
3.10	流动气体中物体的阻力	(134)
	3.10.1 薄平板	(140)
	3.10.2 圆柱体	(143)
	3.10.3 圆球	(145)
	3.10.4 蒸发对球阻力的影响	(147)
3.11	镜反射情况下物体的阻力	(151)
3.12	作用于物体的热泳力	(156)
	3.12.1 薄平板	(162)
	3.12.2 圆柱体	(163)

3.12.3	圆球	(164)
3.12.4	蒸发对球形颗粒热泳力的影响	(166)
3.13	作用于颗粒的光泳力	(172)
3.14	自由分子流中物体的热平衡温度	(178)
3.14.1	无辐射热交换情形下物体的热平衡 温度	(178)
3.14.2	有辐射热交换情形下物体的热平衡 温度	(182)
	参考文献	(185)
第4章	温度跳跃与速度滑移区的传热与流动	(187)
4.1	引言	(187)
4.2	表面处的滑移速度	(188)
4.3	表面处的温度跳跃	(194)
4.4	圆管中的层流流动与传热	(203)
4.5	圆球的阻力	(211)
4.6	作用于小球的热泳力	(218)
4.7	作用于球形颗粒的光泳力	(225)
4.8	气体夹层的热传导	(231)
4.9	小球的传热	(233)
	参考文献	(235)
第5章	过渡区的传热与流动	(237)
5.1	引言	(237)
5.2	气体夹层中的热传导	(241)
5.2.1	平行板	(241)
5.2.2	同心圆柱	(248)
5.2.3	同心球	(260)
5.3	通道中的流动	(269)
5.3.1	平行板通道中的流动	(269)
5.3.2	圆管中的流动	(275)

5.4	小球的传热	(278)
5.5	小球的阻力	(283)
5.6	Sherman 内插公式	(292)
	参考文献	(295)
第6章	高温部分电离气体的传热与流动	(297)
6.1	高温部分电离气体传热与流动的特点	(297)
6.2	自由分子流区颗粒的阻力与传热	(304)
6.2.1	气体粒子的通量	(306)
6.2.2	颗粒表面的浮动电位	(309)
6.2.3	颗粒的阻力: 未蒸发情形	(315)
6.2.4	颗粒的传热	(329)
6.2.5	蒸发颗粒的阻力	(340)
6.2.6	典型计算结果与讨论	(346)
6.3	自由分子流区颗粒所受的热泳力	(366)
6.3.1	气体粒子的通量	(368)
6.3.2	颗粒表面的浮动电位	(370)
6.3.3	作用于未蒸发颗粒的热泳力	(371)
6.3.4	作用于蒸发颗粒的热泳力	(388)
6.4	温度跳跃区颗粒的传热与阻力	(403)
6.4.1	Knudsen 数对颗粒传热的影响: 无对 流情形	(403)
6.4.2	Knudsen 数对颗粒传热与阻力的影响: 有对 流情形	(418)
	参考文献	(432)
附录1	常用物理常数	(436)
附录2	常用函数与积分	(437)
附录3	氩等离子体组分与热物理性质	(439)
	内容索引	(441)

CONTENTS

Preface	(3)
List of Main Symbols	(15)
Chapter 1 Introduction	(1)
1.1 Heat transfer and flow regimes. Knudsen number	(1)
1.2 Introduction to the theoretical approaches used for different heat transfer and flow regimes	(4)
1.2.1 Continuum regime ($Kn < 10^{-3}$)	(5)
1.2.2 Temperature jump regime ($10^{-3} < Kn < 10^{-1}$)	(6)
1.2.3 Free-molecule regime ($10^1 < Kn$)	(10)
1.2.4 Transition regime ($10^{-1} < Kn < 10^1$)	(14)
1.3 Application background of the kinetic theory and the text arrangement of this book	(18)
References	(20)
Chapter 2 Fundamentals of Kinetic Theory of Gases	(23)
2.1 Intermolecular forces	(23)
2.2 Mean free path length	(25)
2.3 Directional distribution of molecules in an equilibrium gas	(28)
2.4 Molecule flux or the collision frequency between molecules and unit surface area	(29)
2.5 Gas pressure, specific heat capacity and specific heat ratio	(30)

2. 6	Elementary theory of transport processes based on the concept of mean free path length	(32)
2. 7	Transport of electrons in a gas	(36)
2. 8	Velocity distribution function of gas molecules. Averaged values of velocity-dependent physical quantities	(39)
2. 9	Maxwellian velocity distribution function of molecules in an equilibrium gas	(41)
2. 10	Velocity distribution function of molecules in a flowing gas and averaged values of velocity-dependent physical quantities	(49)
2. 11	Flux of a relative-velocity-dependent physical quantity. Pressure tensor, stress tensor, pressure and heat flux vector	(51)
2. 12	Boltzmann equation in a simplified form	(58)
2. 13	Maxwellian variation equation. Conservation equations	(67)
	References	(74)

Chapter 3 Heat Transfer and Gas flow for the Free-Molecule

	Regime	(77)
3. 1	Introduction	(77)
3. 2	Specular reflection and diffuse reflection	(79)
3. 3	Directional distribution of diffusely reflected molecules	(84)
3. 4	Free-molecule flow through a small hole	(86)
3. 5	Free-molecule flow through a long tube	(92)
3. 6	Unsteady free-molecule flow: Rayleigh problem	(100)
3. 7	Energy transfer between a gas and a surface	