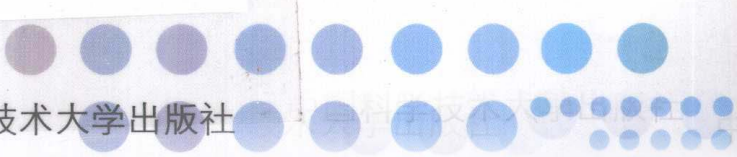


第2版

气动热力学

QIDONG RELIXUE

卞荫贵 徐立功 编著



中国科学技术大学出版社

气 动 热 力 学

(第 2 版)

卞荫贵 徐立功 编著

中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

气动热力学/卞荫贵,徐立功编著.—2版.—合肥:中国科学技术大学出版社,
2011.6

ISBN 978-7-312-02822-9

I. 气… II. ①卞…②徐… III. 空气动力学:热力学 IV. V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 051126 号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址:安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址:<http://press.ustc.edu.cn>

合肥义兴印务有限责任公司印刷

全国新华书店经销

开本:710 mm×960 mm 1/16 印张:22 字数:400 千

1997 年 10 月第 1 版 2011 年 6 月第 2 版 2011 年 6 月第 2 次印刷

定价:38.00 元

再版前言

本书自 1997 年初版以来,一直被用作有关高校空气动力学、热学专业研究生或本科生的教材,同时也是航天航空等相关领域科技工作者非常有用的参考资料. 本书概念清晰,在内容选择上特色鲜明,系统性强,因此得到多方面的好评,1999 年获教育部科技进步三等奖和第二届安徽省图书奖三等奖.

为满足使用者的需求,中国科学技术大学出版社决定再版本书. 利用本次再版的机会,编者不仅纠正了原版中的某些印刷错误,而且根据教学过程中发现的问题及相关科技人员在实际应用中的需要,补充了部分章节的内容. 例如,对 6.3.3 节作了修正和补充;在第 8 章中补充了湍流传热的近似计算方法等.

本书初版编者之一卞荫贵先生是 20 世纪 50 年代从美国回来参加新中国建设的老一辈科学家,他作风严谨,德高望重. 虽然在编写本书稿的时候,他已近 80 高龄,但还是那么认真细致,一丝不苟,非常令人感动. 如今他已远离我们而去,他的这种精神永远活在我们心中. 本书的再版是对卞荫贵先生的最好纪念.

尽管很认真地、努力地修正错误,但由于本人学识和经验方面的不足,书中难免还有不妥之处,敬请指正.

编著者

2010 年 12 月

前 言

高超声速气动力学及传热问题,近一二十年来所以能重新引起专家们的兴趣,缘于航天事业是当前国际上高科技发展的重点领域之一.纵观航天飞行器的发展进程,自20世纪60年代以来,载人和不载人的高超声速飞行已成为现实.1961年,原苏联加加林少校驾驶的世界上第一艘宇宙飞船“东方一号”,其速度为 $M=25$ ($V=8.7\text{ km/s}$),绕地球一圈费时仅108分钟;1969年美国发射的Appolo登月飞行器, $M=36$ ($V=12\text{ km/s}$).一些返回卫星和航天飞行器再入大气层时,高程为60~90 km,速度 $M=20\sim30$ 已属寻常.近来,美、俄、欧洲和日本等正致力于实施一系列对月球、火星等的太空探测,并且雄心勃勃地对能够重复使用单级入轨火箭和水平起降的空天飞机筹划跨世纪的远景目标.这一切对气动工作者来说,既是莫大的鼓舞,更是强有力的挑战.高超声速飞行器和通常的超声速飞机在气动设计上有着根本性的区别.前者是以高(超声)速、高温和高马赫数为其特征.然而“高速”一词因为没有相应的参考尺度为基准,涵义并不确切,人们对高超声速的定义虽然说法不一,但多数人认为应在 $M=5$ 以上.

本书的重要内容是揭示和分析高温引起的气流变化.气体在高温下,内部自由度被激发,会发生离解甚至电离,变成多组元的反应气体,因此,阅读本书时,需要了解下列基础理论知识.

一、多组元气体的输运机理

混合气体中的组元分子之间相互碰撞,会产生质量、动量和能量的交换,同时由于气体处于运动的非平衡态,存在着浓度、速度和温度的梯度,从而形成气体的输运过程.在低速情况下,人们比较熟悉的有菲克定律的质量扩散流、牛顿公式的剪切应力以及傅立叶的热流公式.但在高温下,输运机理和对应的输运系数(如扩散系数、黏性系数以及热传导系数)的计算,比单一气体的要复杂得多,只有借助于分子运动论来解决.而分子运动论是统计力学的前身.

二、高温气体热效应

1. 高温气体热力学特性

热学理论包含两大方面:其一是宏观理论的热力学.它所研究的对象是气体的宏观特性,而不考虑微观分子的现象和结构,也不能从理论上计算气体的宏观特性如内能、比热等.但对于一些热力学宏观量之间的关系,热力学能给出系统的、完整的内容,如完全气体的状态方程、混合气体成分的确定以及热力学第一、第二定律等.

2. 反应气体的化学热力学

化学热力学是热力学研究有关化学反应的内容的一个分支,主要包括化学反应速率方程、计量系数关系式、化学反应的熵增、化学平衡条件及质量作用定律等.

3. 气体微观结构的统计热力学性能

热学理论分析的另一方面是微观的统计理论.统计理论应用很广,它能把原子结构与气体的热力学宏观特性联系起来,所以有的作者用统计热力学这样的名词来体现其实际内涵.统计热力学主要研究气体的微观性能(如用玻尔兹曼分布给出分子内部各自由度的配分函数)、混合气体的平衡常数、振动速率方程等,并用它计算气体热力学特性(如单一组元气体的内能、焓、比热等).

总之,高超声速气动力学因高温起着重要作用,而高温热效应尤为突出,故本书取名为《气动热力学》.

全书共8章.前3章是上述内容的具体展现;第4章为高温气体的冻结、平衡和非平衡无黏流动;第5章和第6章为高温气体的黏性流动,较全面地讨论了高温化学反应气体层流边界层理论中的分析计算方法;第7章为辐射气体动力学和高速飞行器表面温度计算方法及防热措施;第8章为化学反应气体的湍流理论.第5, 6, 8章由卞荫贵执笔,第1~4, 7章和习题由徐立功执笔.

编 著 者

1996年6月

主要符号表

A	化学亲和力, 见式(2. 5. 24)
a	声速
B	$(\rho v)_w / [(\rho u)_e C_M]$, 引射参数, 见式(7. 5. 38)
B_1	$(\rho v)_w / [(\rho u)_e St]$, 引射参数, 见式(7. 5. 39)
B_{10}	$(\rho v)_w / [(\rho u)_e St^0]$, 引射参数, 见式(7. 5. 40)
C	分子速度
C_D	阻力系数
C_L	升力系数
C_M	传质系数, 见式(5. 5. 16)
C_f	$\tau_w / \left(\frac{1}{2} \rho_e u_e^2 \right)$, 局部摩阻系数
c_p	单位质量定压比热
c_{pf}	$\sum Y_i c_{pi}$, 混合气体冻结比热
c_v	单位质量定容比热
d	分子直径
D	阻力
D_{ij}	多成分扩散系数
$\mathcal{D}_{ij}$	二元扩散系数
$\mathcal{D}_i$	等扩散系数
Dm	达姆柯勒数
D_i^T	i 组元热扩散系数
E	系统的内能
e	$\sum Y_i e_i$, 单位质量混合气体的内能
e_i	单位质量 i 组元的内能

f	速度分布函数
$f(\eta)$	无量纲流函数
G	$H-TS$, 系统的吉布斯自由焓
g	h_s/h_{se} , 无量纲总焓; 单位质量自由焓
g_f	h_{sf}/h_{sfe} , 无量纲冻结总焓
H	$E+pV$, 系统的静焓
h	$\sum_i Y_i h_i$, 单位质量混合气体的静焓; 普朗克常数
h_i	$\int_0^T c_{p_i} dT + h_i^0$, i 组元气体静焓
h_i^0	i 组元生成焓
h_{iT}	$\int_0^T c_{p_i} dT$, i 组元冻结焓
h_s	$h + \frac{1}{2}u^2$, 单位质量气体总焓
h_f	$\sum_i Y_i h_{if}$, 混合气体冻结焓
h_{sf}	$h_f + \frac{1}{2}u^2$, 单位质量冻结总焓
I_ν	辐射强度
J	单位时间单位体积辐射能
J_q	能量输运通量
J_u	动量输运通量
J_α	质量输运通量
Kn	克努森(Knuslen)数
$K_p(T)$	压力平衡常数
k	玻尔兹曼常数
k_w	表面催化速率常数
k_+	正向反应速率常数
k_-	逆向反应速率常数
l	$\rho\mu/(\rho\mu)_{re}$, 黏性因子, 见式(6.2.8)
$\bar{l}$	平均自由程
L	升力
Le	$Pr/Sc = \rho\mathcal{D}_i c_p/\lambda$, 路易斯数
Le_f	$\rho\mathcal{D}_i c_{pf}/\lambda_f$, 冻结路易斯数

Le^T	$\mathcal{D}_i^T c_{pf}/\lambda_f$, 冻结热路易斯数
L_v	蒸发热; 升华热
m	分子质量
M	摩尔质量或分子量; 马赫数
$\bar{M}$	平均摩尔质量或平均分子量
$\mathcal{M}$	系统总质量
N	系统总粒子数
N_A	阿伏伽德罗常数
n	N/V , 粒子数密度
Nu	局部努赛尔数
$\mathcal{N}$	系统总摩尔数
$\mathcal{N}_i$	i 组元摩尔数
p	压力
p_i	i 组元分压
Pr	$c_p \mu / \lambda$, 普朗特数
Pr_f	冻结普朗特数
q_b	表面总热通量
q_R	辐射热通量
q_w	边界层壁面热通量
q_v	单位频率辐射通量
Q	配分函数
r	恢复因子
R_b	头部半径
Re_x	$\rho_e u_e x / \mu_e$, 局部雷诺数
R_i	$\hat{R}/M_i = k/m_i$, i 组元特定气体常数
$\hat{R}$	通用气体常数
s	单位质量熵
S	系统的熵
Sc	$\mu / \rho \mathcal{D}_i$, 施密特数
St	$-q_w / (\rho_e u_e \Delta h)$, 局部斯坦顿数
t	时间
T	温度

气动热力学

v	$1/\rho$, 比容
v_{ia}	i 组元流体速度矢
v_a	流体质量平均速度矢
V	体积; 速度
$\mathcal{V}$	摩尔体积
$\dot{\omega}_i$	i 组元质量生成率
W	重力
x_a	(x, y, z) , 坐标系
X_i	i 组元摩尔比数(浓度)
Y_i	i 组元质量比数(浓度)
Z	压缩因子
α	离解度; 表面材料吸收系数; 摩尔密度
β	压力梯度因子, 见式(6. 2. 8)
γ	绝热指数; 比热比
δ	速度边界层厚度
δ_c	浓度边界层厚度
δ_T	温度边界层厚度
ϵ	分子能量
ζ	气相反应达姆柯勒数
ζ_w	壁面反应达姆柯勒数
η_i	i 组元摩尔-质量比数
η	摩尔-质量比数
θ	碰撞频率; 折转角
λ	热传导系数
λ_f	混合气体热传导系数
μ	黏性系数; 马赫角
ν	运动黏性系数; 化学反应计量系数
ξ	反应度
ξ, η	相似坐标
ρ	质量密度
σ	面积; 碰撞截面
τ	体积; 剪切应力
τ_v	光学厚度

ψ	流函数
Ω	涡量 $= \nabla \times V$
$\Omega^{(e,s)}$	碰撞积分

上 标

$—$	平均量;雷诺平均
$\sim$	法富尔平均
$*$	平衡条件;喷管喉部条件
$'$	脉动量
$''$	法富尔脉动量
$^{\circ}$	无质量引射条件

下 标

e	边界层外缘
f	冻结条件
i	i 组元
w	壁面条件
o	滞止条件
∞	自由流条件
n	法向
t	切向
re	参考条件
s	驻点条件

目 次

再版前言	(i)
前言	(iii)
主要符号表	(1)
第 1 章 高超声速流动的概念和输运机理	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 高超声速流动的概念	(2)
1.2.1 高超声速流动的定义	(2)
1.2.2 高超声速气动热力学的重要性	(8)
1.2.3 高超声速飞行轨道和高度-速度图	(12)
1.2.4 高超声速飞行器为什么采用钝前缘	(14)
1.3 高温气流中的输运机理	(17)
1.3.1 气体分子运动论基础	(17)
1.3.2 高温气体的输运特性和扩散质量流	(21)
1.4 传热的形式	(29)
1.4.1 热传导	(30)
1.4.2 对流传热	(30)
1.4.3 扩散传热	(31)
1.4.4 辐射传热	(31)
1.4.5 总热传导系数	(32)
1.5 高温空气的输运特性	(33)
第 2 章 高温气体的热力学和化学热力学特性	(36)

2.1	引言	(36)
2.2	高温气体的热力学特性	(36)
2.2.1	真实气体与完全气体	(36)
2.2.2	完全气体状态方程	(37)
2.2.3	混合气体的成分	(41)
2.2.4	气体的分类	(43)
2.3	热力学第一定律	(46)
2.4	热力学第二定律	(49)
2.5	高温气体的化学热力学特性	(51)
2.5.1	化学反应的质量守恒方程	(51)
2.5.2	吉布斯自由能和化学反应中的熵增	(53)
2.5.3	化学平衡条件	(55)
2.5.4	平衡化学反应混合气体的成分	(55)
2.5.5	化学反应热	(58)
第3章	高温气体的统计理论和非平衡效应	(60)
3.1	引言	(60)
3.2	统计热力学的基本理论	(61)
3.2.1	分子的能量模式	(61)
3.2.2	系统的微观状态数	(66)
3.2.3	最可几宏观态	(68)
3.2.4	玻尔兹曼分布	(69)
3.2.5	用配分函数计算热力学特性	(70)
3.2.6	配分函数 $Q(V, T)$	(74)
3.3	平衡化学反应气体的热力学特性	(77)
3.3.1	单组元气体的热力学特性	(77)
3.3.2	平衡常数的计算	(80)
3.3.3	多组元平衡化学反应气体的热力学特性	(83)
3.4	高温空气的平衡热力学特性	(86)
3.4.1	高温空气中的化学反应	(86)
3.4.2	高温空气平衡成分的计算	(88)

3.4.3 高温平衡空气的特性	(90)
3.5 高温气体的振动和化学非平衡	(104)
3.5.1 振动松弛过程和振动速率方程	(105)
3.5.2 化学非平衡和反应速率方程	(109)
3.5.3 高温空气和氢-空气混合气体中的化学非平衡	(113)
第4章 高温无黏冻结、平衡和非平衡流动	(119)
4.1 引言	(119)
4.2 高温无黏冻结流动	(121)
4.2.1 无黏冻结流动的热力学特性	(121)
4.2.2 无黏冻结流与平衡流的比较	(123)
4.3 高温无黏平衡流动	(125)
4.3.1 高温无黏平衡流动的控制方程	(125)
4.3.2 平衡正激波和斜激波	(126)
4.3.3 平衡一维喷管流动	(133)
4.3.4 平衡比热和平衡声速	(138)
4.3.5 平衡普朗特-迈耶膨胀流动	(142)
4.3.6 圆锥平衡流动	(144)
4.3.7 钝体平衡流动	(148)
4.4 高温无黏非平衡流动	(150)
4.4.1 高温无黏非平衡流动的控制方程组	(150)
4.4.2 非平衡正激波和斜激波	(153)
4.4.3 非平衡一维喷管流动	(159)
4.4.4 钝体非平衡流动	(162)
4.4.5 非平衡流动的特征线法	(166)
第5章 黏性气动热力学的基本方程和边界条件	(171)
5.1 引言	(171)
5.2 多组元混合气体中的输运特性	(171)
5.2.1 质量输运	(172)
5.2.2 动量输运	(175)
5.2.3 能量输运	(175)

5.3 高温气体输运系数	(177)
5.3.1 碰撞截面	(178)
5.3.2 输运系数计算公式	(179)
5.4 黏性多组元反应气体基本方程	(181)
5.4.1 基本方程组	(181)
5.4.2 边界层方程组	(183)
5.5 壁面催化反应及有关参数	(186)
5.5.1 壁面催化反应	(186)
5.5.2 表面无量纲参数	(190)
第6章 离解气体层流边界层解法	(192)
6.1 引言	(192)
6.2 边界层方程的相似变换	(192)
6.2.1 相似坐标	(192)
6.2.2 用 ξ, η 坐标表示的边界层方程	(193)
6.2.3 离解空气的二元模型	(196)
6.3 离解空气驻点传热	(199)
6.3.1 驻点条件	(199)
6.3.2 平衡边界层驻点传热	(200)
6.3.3 冻结边界层驻点传热	(203)
6.3.4 非平衡边界层驻点传热有限差分解	(210)
6.4 离解空气非驻点传热	(213)
6.4.1 “局部相似解”的概念	(213)
6.4.2 局部相似解的热流分布公式	(214)
6.4.3 平板和圆锥表面上的热流分布	(216)
6.4.4 钝体表面的热流分布	(217)
6.5 非相似边界层方程的数值解法	(224)
6.5.1 有限差分解法	(224)
6.5.2 积分关系法	(228)
6.5.3 积分-矩阵法	(230)
第7章 辐射气体动力学和表面温度	(234)

7.1 引言	(234)
7.2 辐射热通量的计算方法	(235)
7.2.1 辐射强度和辐射热通量	(235)
7.2.2 辐射传热方程	(237)
7.2.3 辐射传热方程的解	(238)
7.3 再入飞行体辐射流场的计算	(244)
7.4 高温气流与表面材料的相互作用	(247)
7.4.1 热防护措施	(247)
7.4.2 质量引射边界层的表面相容条件	(249)
7.5 质量引射层流边界层	(252)
7.5.1 质量引射层流边界层方程组	(252)
7.5.2 质量引射冻结边界层	(253)
7.5.3 催化壁面冻结边界层	(258)
7.5.4 有气相反应面的冻结引射边界层	(270)
7.6 表面温度的计算方法	(274)
7.6.1 材料内部的传热过程	(274)
7.6.2 烧蚀表面的质量相容关系	(281)
7.6.3 表面温度的确定	(286)
第8章 湍流反应流	(288)
8.1 引言	(288)
8.2 用法富尔平均的基本方程	(289)
8.2.1 法富尔平均	(289)
8.2.2 基本方程	(290)
8.2.3 边界层方程	(292)
8.2.4 封闭问题	(297)
8.3 湍流模式	(298)
8.3.1 湍流模式概述	(298)
8.3.2 雷诺应力方程(二阶矩模式)	(299)
8.3.3 k - ϵ 二方程模式及代数应力模式	(301)
8.3.4 低马赫数近似	(304)

8.4 概率密度函数方法	(305)
8.4.1 概率密度函数(pdf)	(305)
8.4.2 守恒标量	(308)
8.4.3 守恒标量——快速反应的 pdf 解法	(310)
8.4.4 随机函数的有关知识	(312)
8.4.5 建立概率密度函数的输运方程	(315)
8.5 离解气体湍流边界层传热	(316)
习题	(319)
附表 地球标准大气层表	(325)
参考文献	(328)