



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 固体火箭发动机 气体动力学

Gas Dynamics in Solid Rocket Engine

武晓松 陈军 王栋 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 固体火箭发动机气体动力学

武晓松 陈军 王栋 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要介绍可压缩流体流动的基本理论和应用。内容包括气体动力学的基础知识,气体动力学控制方程组,一维定常流动基础,固体火箭发动机中的一维定常流动和激波、膨胀波与燃烧波等。书中适当增加了有关工程热力学的基础知识,并在讲述一般定常管流知识的基础上,充分考虑固体火箭发动机工作过程的特点,扩充了与固体火箭发动机密切相关的内容。

本书可作为高等院校武器系统与发射工程专业的教材使用,也可作为相关专业或工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

固体火箭发动机气体动力学/武晓松等编著. —北京:  
国防工业出版社, 2005. 8  
ISBN 7-118-04034-7

I. 固... II. 武... III. 火箭发动机—气体动力学  
IV. V430

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 078631 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13 290 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 27.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

# 前 言

固体火箭发动机气体动力学是武器系统与发射工程专业及相关专业的专业基础课,是固体火箭发动机原理的预备课程。本书是依据新的专业目录、培养目标和业务范围,为适应国防现代化建设和培养武器系统与发射工程专业技术人才的需要,在多年教学和实践的基础上编写成的。

本书主要讲述气体动力学的基础知识,一般流动的控制方程组,一维定常流动基础,固体火箭发动机中的一维定常流动,激波、膨胀波与燃烧波等。与普通《气体动力学》教材的主要区别是,在讲述变截面、摩擦、换热及质量加入等一般定常管流知识的基础上,充分考虑固体火箭发动机工作过程的特点,适当扩充了与固体火箭发动机密切相关的内容,使学生在学习时能与有关专业知识联系起来,为学习《固体火箭发动机原理》打下坚实的理论基础。书中各章均编排了大量例题和一定数量的习题,以帮助读者提高运用基本理论解决实际问题的能力。

本书由武晓松、陈军、王栋合编。全书共分五章,其中第一章由王栋编写,第二章和第三章由武晓松编写,第四章和第五章由陈军编写。本书由武晓松主编,孙思诚审阅。在编写和审定的过程中,编者的许多同事曾给予热情的帮助,历届学生也提出过许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005年3月

# 主要符号表

$a$ ——声速(m/s)	$N$ ——任意质量的广延量
$c$ ——比热容(J/(kg·K))	$Q$ ——任意质量的加热量(J)
$c_v$ ——质量定容热容(J/(kg·K))	$R$ ——理想气体的气体常数(J/kg·K)
$c_p$ ——质量定压热容(J/(kg·K))	$S$ ——任意质量的熵(J/K)
$e$ ——质量储能(J/kg)	$T$ ——温度(K)
$f$ ——范宁摩擦系数	$T_0$ ——滞止温度或总温(K)
$h$ ——质量焓(J/kg)	$U$ ——任意质量的内能(J)
$h_0$ ——单位质量气体的滞止焓或总焓 (J/kg)	$V$ ——速度(m/s)
$m$ ——质量(kg)	$W$ ——任意质量的功(J)
$\dot{m}$ ——质量流率(kg/s)	$A$ ——面积矢量
$n$ ——单位质量的广延量	$B$ ——单位质量流体的彻体力
$p$ ——压强(N/m <sup>2</sup> 或 Pa)	$V$ ——速度矢量
$p_0$ ——滞止压强或总压(N/m <sup>2</sup> 或 Pa)	$\delta$ ——流动偏转角(°)
$q$ ——单位质量的加热量(J/kg)	$\rho$ ——密度(kg/m <sup>3</sup> )
$s$ ——质量熵(J/(kg·K))	$\gamma$ ——比热比
$t$ ——时间(s)	$\lambda$ ——速度系数
$u$ ——质量内能(J/kg)	$\mu$ ——动力黏度(N·s/m <sup>2</sup> 或 Pa·s)
$v$ ——质量体积,即密度的倒数 $\frac{1}{\rho}$ (m <sup>3</sup> /kg)	$\nu$ ——普朗特—迈耶角(°)
$w$ ——单位质量的功(J/kg)	$\epsilon$ ——斜激波的波角(°)
$A$ ——控制面的面积或截面面积(m <sup>2</sup> )	$\Omega$ ——控制体体积(m <sup>3</sup> )
$E$ ——体系的储能(J)	下标:
$F$ ——作用力(N)	数字 1, 2, ...——表示状态或截面
$F_t$ ——流体黏性引起的剪切力或摩擦力(N)	t——拉瓦尔喷管的喉部
$L$ ——等截面摩擦管的管长(m)	e——拉瓦尔喷管的出口
$Ma$ ——马赫数	上标:
	符号上加“.”——表示单位时间的量
	*——表示临界状态

# 目 录

第一章 气体动力学基础知识.....	1
1.1 气体的基本性质 .....	1
1.1.1 气体的黏性 .....	2
1.1.2 气体的导热性 .....	4
1.2 气体的连续介质假设 .....	5
1.2.1 连续介质假设 .....	5
1.2.2 连续介质一点处的密度 .....	6
1.2.3 连续介质一点处的速度 .....	7
1.3 热力学基本概念与基础知识 .....	7
1.3.1 平衡状态、状态参数与简单热力学系统 .....	8
1.3.2 可逆过程与不可逆过程 .....	8
1.3.3 功与热量 .....	9
1.3.4 系统的内能与储能 .....	11
1.3.5 热力学第一定律 .....	12
1.3.6 流动功与焓 .....	12
1.3.7 比热容与比热比 .....	13
1.3.8 热力学第二定律与熵 .....	14
1.4 理想气体的热力学性质 .....	16
1.4.1 热状态方程 .....	16
1.4.2 量热状态方程 .....	16
1.4.3 理想气体的比热容关系式 .....	17
1.4.4 理想气体的焓 .....	17
1.4.5 理想气体的熵方程 .....	18
1.5 气体动力学的基本概念 .....	18
1.5.1 体系与控制体 .....	19
1.5.2 研究流体流动的拉格朗日方法 .....	20
1.5.3 研究流体流动的欧拉方法 .....	21
1.5.4 流体运动的分类 .....	21
1.5.5 迹线、流线与流管 .....	22

1.5.6	广延量与强度量 .....	25
1.5.7	作用在流体上的外力 .....	26
1.5.8	气体中的扰动 .....	27
1.5.9	绝对坐标系与相对坐标系 .....	27
习题	.....	29
<b>第二章</b>	<b>气体动力学控制方程组 .....</b>	<b>30</b>
2.1	拉格朗日方法与欧拉方法的关系 .....	30
2.1.1	体系与控制体的选取 .....	30
2.1.2	时间变化率之间的关系 .....	31
2.1.3	时间变化率的积分形式 .....	31
2.1.4	时间变化率的微分形式 .....	34
2.2	连续方程 .....	34
2.2.1	连续方程的积分形式 .....	34
2.2.2	连续方程的微分形式 .....	34
2.2.3	定常流动的连续方程 .....	35
2.3	动量方程 .....	36
2.3.1	动量方程的矢量积分形式 .....	36
2.3.2	动量方程的分量积分形式 .....	37
2.3.3	动量方程的微分形式 .....	37
2.4	能量方程 .....	40
2.4.1	能量方程的积分形式 .....	41
2.4.2	能量方程的微分形式 .....	42
2.5	熵方程 .....	44
<b>第三章</b>	<b>一维定常流动基础 .....</b>	<b>45</b>
3.1	引言 .....	45
3.1.1	流动定常假设 .....	45
3.1.2	一维流动假设 .....	45
3.2	一维定常流动的控制方程组 .....	48
3.2.1	连续方程 .....	49
3.2.2	动量方程 .....	49
3.2.3	能量方程 .....	55
3.2.4	熵方程 .....	56
3.3	声速与马赫数 .....	59
3.3.1	声速公式 .....	59
3.3.2	马赫数 .....	60
3.3.3	小压强扰动在可压缩流体中的传播 .....	61
3.4	理想气体一维定常流的控制方程组 .....	64

3.4.1	理想气体一维定常流的连续方程 .....	64
3.4.2	理想气体一维定常流的动量方程 .....	64
3.4.3	理想气体一维定常绝热流的能量方程 .....	65
3.5	流动的滞止状态 .....	65
3.5.1	滞止状态的定义 .....	65
3.5.2	滞止焓(或总焓) .....	66
3.5.3	滞止温度(或总温)与滞止声速 .....	67
3.5.4	滞止压强(或总压)与滞止密度 .....	68
3.5.5	用滞止参数表示的连续方程 .....	68
3.5.6	用滞止参数表示的熵增 .....	69
3.5.7	流体的可压缩性 .....	70
3.6	最大等熵膨胀状态和临界状态 .....	72
3.6.1	最大等熵膨胀状态 .....	72
3.6.2	临界状态 .....	72
3.7	速度系数与气体动力学函数 .....	77
3.7.1	速度系数 .....	77
3.7.2	气体动力学函数 .....	79
	习题 .....	80
<b>第四章</b>	<b>固体火箭发动机中的一维定常流动 .....</b>	<b>82</b>
4.1	变截面一维定常等熵流动 .....	82
4.1.1	变截面一维定常等熵流动的控制方程组 .....	82
4.1.2	截面积变化对流动特性的影响 .....	83
4.1.3	变截面一维定常等熵流动的极限状态——壅塞状态及临界截面 .....	86
4.1.4	变截面一维定常等熵流动的计算 .....	89
4.1.5	先收敛后扩张的管道——拉瓦尔喷管 .....	90
4.1.6	外界反压对拉瓦尔喷管流动的影响——力学条件 .....	92
4.1.7	拉瓦尔喷管的性能参数计算 .....	94
4.1.8	拉瓦尔喷管中的流动损失 .....	99
4.2	有摩擦的一维定常绝热流动 .....	103
4.2.1	简单摩擦管流的控制方程组 .....	103
4.2.2	简单摩擦管流中任意截面上的参数变化 .....	104
4.2.3	摩擦对流动参数的影响 .....	105
4.2.4	简单摩擦管流的极限状态——摩擦壅塞 .....	107
4.2.5	简单摩擦管流临界管长 $L^*$ 的确定 .....	109
4.2.6	固体火箭发动机长尾管内的流动 .....	110
4.3	具有传热的一维定常流动 .....	115
4.3.1	简单换热管流的控制方程组 .....	115



4.3.2	简单换热管流任意截面上的参数变化 .....	116
4.3.3	传热对流动参数的影响 .....	117
4.3.4	简单换热管流的极限状态——加热壅塞与临界加热量 .....	120
4.3.5	等截面加热管流计算 .....	122
4.4	有质量加入的一维定常流动 .....	125
4.4.1	有质量加入的一维定常流动控制方程组 .....	125
4.4.2	质量加入对流动参数的影响 .....	127
4.4.3	简单加质流动的极限状态——加质壅塞与临界质量流率 .....	129
4.4.4	垂直于主流的加质流动及其求解 .....	129
4.4.5	加质流动在固体火箭发动机中的应用 .....	132
4.5	广义一维定常流动 .....	134
4.5.1	广义一维定常流动的控制方程组 .....	135
4.5.2	驱动力对理想气体广义一维定常流动的影响 .....	136
4.5.3	理想气体广义一维定常流动参数的求解 .....	137
4.5.4	理想气体广义一维定常流动的一般特征 .....	140
	习题 .....	142
<b>第五章</b>	<b>激波、膨胀波与燃烧波 .....</b>	<b>144</b>
5.1	正激波 .....	145
5.1.1	正激波的控制方程组 .....	145
5.1.2	理想气体的正激波 .....	147
5.1.3	理想气体正激波的兰金—于戈尼奥方程 .....	150
5.1.4	理想气体正激波的普朗特速度方程 .....	151
5.1.5	激波阻力 .....	152
5.2	拉瓦尔喷管中的流动与正激波 .....	158
5.2.1	喷管内产生激波的临界条件 .....	159
5.2.2	正激波在喷管内的位置 .....	164
5.3	斜激波 .....	168
5.3.1	控制方程组 .....	169
5.3.2	理想气体中的斜激波 .....	171
5.3.3	斜激波波角 $\epsilon$ 与流动偏转角 $\delta$ 的关系 .....	172
5.3.4	斜激波的强度与最大流动偏转角 .....	172
5.3.5	激波的反射与相交 .....	175
5.4	膨胀波 .....	179
5.4.1	普朗特—迈耶流动的控制方程 .....	180
5.4.2	理想气体中的膨胀波 .....	181
5.4.3	普朗特—迈耶流动的计算 .....	182
5.4.4	普朗特—迈耶角的最大值 .....	183

5.4.5 绕多个凸角和凸面的普朗特—迈耶流动 .....	184
5.5 燃烧波 .....	187
5.5.1 燃烧波的控制方程组 .....	188
5.5.2 燃烧波的基本方程 .....	189
5.5.3 燃烧波的基本特征 .....	190
习题 .....	194
参考文献 .....	196

# 第一章 气体动力学基础知识

流体包括液体和气体两类,它们无一定形状,容易流动变形。气体在压力作用下其体积很容易改变,又称为可压缩流体(Compressible Fluid)。

气体动力学(Gas Dynamics)是研究可压缩流体流动的一门学科,它是更一般的学科——流体动力学的一个分支。气体动力学研究气体流动的起因、运动规律以及和物体之间的相互作用。气体的流动可以在物体内部进行,称为内流(Internal Flows),如一般管道流动、火箭发动机燃烧室和喷管内的流动等;也可以在物体外部流过,称为外流(External Flows),如空气绕飞机与火箭外部的流动等。气体与物体相互作用的结果可以产生阻力、升力、推力或者轴功的交换。此外,当气体与其流过的物体具有不同温度时,两者之间还存在热量交换。虽然气体的流动形式以及气体与物体的相互作用多种多样,但它们都服从如下的基本定律:

- (1)质量守恒定律(The Law of the Conservation of Mass);
- (2)牛顿第二运动定律(Newton's Second Law of Motion);
- (3)热力学第一定律(The First Law of Thermodynamics);
- (4)热力学第二定律(The Second Law of Thermodynamics)。

因此,气体动力学综合了力学、热力学等学科的一些基本概念和原理;当流动中含有化学反应时,还需要应用化学动力学方面的知识。上述4个基本定律既不以所研究的流体性质为转移,也与具体的流动过程无关,但是使用基本定律描述某种具体流体的流动时,必须考虑该流体的热力学性质,它可以以热力学性质表或经验方程给出,也可以通过理想化模型(如理想气体)来得到。

固体火箭发动机是一种热动力装置,其工作过程包含着不同形式能量之间的转换。固体火箭发动机是依靠固体推进剂燃烧产生高温高压气体(称为燃气)来工作的,所以固体火箭发动机的工作包含燃烧和流动两个过程,而燃气的流动过程是更基本的。固体火箭发动机的燃气流动是十分复杂的过程,在装药通道内流动的燃气流伴随着装药表面新产生燃气的不断添加(质量添加流动),燃气在喷管中膨胀加速,并以超声速从喷管中喷出,以此产生反作用力来推动火箭飞行。

固体火箭发动机气体动力学的任务是研究固体火箭推进剂燃烧后生成的燃气在火箭发动机中的流动规律,包括燃烧室中的质量添加流动、喷管中的变截面流动以及长尾管中的摩擦流动等,为火箭发动机工作性能参数的计算提供理论工具。

## 1.1 气体的基本性质

气体是一种密度可以发生很大变化的可压缩流体,在剪切力作用下能够产生连续变

形趋于流动。气体与液体的区别是很明显的。液体占有一定大小的固定容积,在外力的作用下其密度基本保持不变,即使当外力很大时密度的变化也是很小的,因此通常将液体当成不可压缩流体(Incompressible Fluid)。而气体则不同,它总是充满所给定的容积,外力很容易改变其密度,气体的流动通常伴随着密度变化。在有些情况下,流动中的气体的密度只发生很小的变化,忽略此变化不致引起显著误差,这时,虽然气体本质上是一种可压缩流体,但在这种情况下也可以将其当成不可压缩流体来处理。

根据分子运动论,分子总是在不断进行无规则的热运动,不同流动区域的分子所携带的能量、动量以及质量是不同的。因此,由于分子在不同流动区域的交换将导致气体动量、能量和质量的迁移,这种特性称为流体的输运性质。下面简要介绍气体的黏性(Viscosity)和导热性(Thermal Conductivity)。

### 1.1.1 气体的黏性

黏性是真实流体的一个重要输运性质,定义为流体在经受剪切(切向)力时发生形变以反抗外加剪切力的能力,这种反抗能力只在运动流体相邻流层间存在相对运动时才表现出来。为了理解这一概念,我们用一个能突出表现空气黏性的实例来说明。如图 1-1 所示,将一个无限薄的平板放置在风洞中,板面平行于气流方向,图中给出了用风速仪测量的平板附近沿法线方向上的气流速度分布。可以看出,在板面上气流速度为零,越向外速度越大,且直到离开板面一定距离  $\delta$  处,速度才与来流速度  $V_{\infty}$  没有显著差别。平板附近的这种速度分布正是空气的黏性造成的,黏性使平板上的流体层完全贴附在静止的板面上,这种与板面完全没有相对速度的情况称为无滑移条件(No-Slip Condition)。稍外的一层空气受到气体层与气体层之间的摩擦作用,被板面上的那层静止空气所牵制,其速度也是下降到了接近于零,但由于它已离开板面一个极小的距离,速度比零要稍大些。黏性的牵制作用就这样一层一层的向外传递,因此,离开板面越远,气流速度越大。从速度的梯度变化来说,越靠近平板板面,速度梯度越大,随着离开板面距离的增加速度梯度逐渐减小。

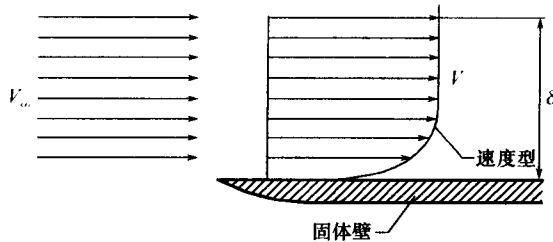


图 1-1 平板附面层实验

根据速度测量结果,在离开板面距离  $\delta$  处,空气速度已经非常接近于来流速度  $V_{\infty}$ 。与平板的长度相比, $\delta$  是个极微小的量,若平板长度以米计,则  $\delta$  只有几毫米至几十毫米而已。这就是说,气体黏性的影响范围是非常小的。通常将紧靠物体表面附近、厚度为  $\delta$  的这层流体称为附面层或边界层(Boundary Layer)。严格地说,只有在离开物面无限远处,气流速度才会等于来流速度,流动才不再受到平板的影响,但在实际应用中,一般将  $V = 99\% V_{\infty}$  作为附面层的边界。

从分子运动论的观点看,可以认为黏性是由于具有不同速度的相邻流体层之间的分子交换而产生的动量迁移的结果,是分子热运动引起的动量输运。

为了确定流体的摩擦力(由黏性引起的剪切力),考虑两个距离为  $n$ 、长度和宽度足够大、面积均为  $A$  的相互平行的平板,平板间充满了某种黏性流体,如图 1-2 所示。在上层板上加一切向力  $F_t$ ,使该平板以某速度  $V$  向右运动,而下层板则保持静止。由于黏性,下层板上的流体速度为零,上层板上的流体速度为  $V$ 。如果两板间的距离  $n$  很小,速度  $V$  也不是很大,则可以认为两板间的速度分布是线性的。实验表明,摩擦应力  $F_t/A$  与速度  $V$  成正比,与两板间的距离  $n$  成反比,即

$$\tau = \frac{F_t}{A} = \mu \frac{V}{n}$$

式中  $\mu$ ——与流体性质有关的比例系数,称为动力黏度(Dynamic Viscosity),简称黏度(Coefficient of Viscosity);

$V/n$ ——流体发生变形的剪切率。

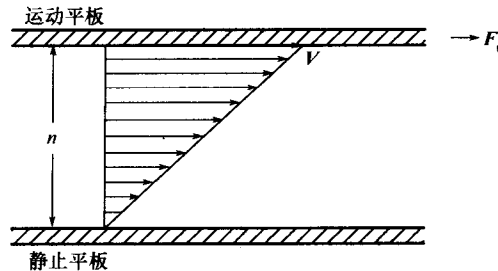


图 1-2 黏性流体中的切变

所以,对两平板间的任意两流体层之间的摩擦应力可以写成

$$\tau = \mu \frac{\Delta V}{\Delta n}$$

如果流体层之间的速度变化不是线性的,则应将摩擦应力改写为

$$\tau = \mu \frac{dV}{dn} \quad (1-1-1)$$

式中  $dV/dn$ ——应为物面法向上或流动方向法向上的速度梯度。

上式即为牛顿内摩擦定律(Newton's Equation of Viscosity)的数学表达式,凡是遵循该定律的流体称为牛顿流体(Newtonian Fluid),如气体、水、滑油等。不服从牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体(Non-Newtonian Fluid),如血浆、泥浆、油漆、悬浮液以及接近凝固温度的石油产品等都是非牛顿流体。此外,牛顿内摩擦定律只适用于层流状态的流动。

一般流体的黏度主要取决于温度,而与压强的关系不大。液体的黏度随温度的增加而减小,气体则相反。气体的黏度只在远离临界压强的范围内才与压强无关。实验表明,气体的黏度随温度变化的关系可以近似写成

$$\mu \approx \mu_0 \left( \frac{T}{T_c} \right)^{1.5} \frac{T_c + T_s}{T + T_s} \quad (1-1-2)$$

称为萨瑟兰(Sutherland)公式。

式中  $\mu_0$ ——1 个大气压下、0℃时的黏度；  
 $T_s$ ——萨瑟兰常数，与气体性质有关；  
 $T_c = 273.16\text{K}$ 。

表 1-1 给出了几种气体在不同温度时的黏度和萨瑟兰常数。

表 1-1 几种气体在不同温度时的黏度和萨瑟兰常数(1 个大气压)

气体	黏度 $\mu \times 10^6 / (\text{Pa}\cdot\text{s})$						萨瑟兰常数 $T_s / \text{K}$
	温度 $T / \text{℃}$						
	0	20	40	60	80	100	
空气	17.161	18.239	19.220	20.102	20.985	21.769	124
氮气	16.606	17.484	18.357	19.259	20.004	20.828	104
氧气	19.200	20.259	21.308	22.358	23.407	24.407	125
氢气	8.404	8.806	9.178	9.590	9.963	10.306	71
甲烷	10.198	10.806	11.502	12.140	12.699	13.307	164
一氧化碳	16.807	17.680	18.553	19.151	20.240	21.024	100
二氧化碳	13.807	14.699	15.699	16.700	17.553	18.455	254
水蒸气	8.933	9.669	10.404	11.130	11.875	12.601	961

除了动力黏度  $\mu$  外，在气体动力学中还常用到  $\mu$  与密度  $\rho$  的比值，称为运动黏度 (Kinematic Viscosity)，用  $\nu$  表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-1-3)$$

### 1.1.2 气体的导热性

气体分子本身的无规则热运动除了可以输运动量而导致气体的黏性外，当流动的流体中存在温度梯度时，气体分子的随机运动还可以将温度较高的分子迁移到温度较低的区域，将温度较低分子迁移到温度较高的区域，其结果是使不同区域的气体温度趋于相等。气体的这种将热量从高温区域输运到低温区域的性质称为导热性。

实验表明，热量总是沿着温度梯度的反方向从高温处传向低温处，且单位时间内通过单位面积所传递的热量满足

$$\dot{Q} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-1-4)$$

式中  $\dot{Q}$ ——单位时间内通过单位面积传递的热量，负号表示热量传递的方向与温度梯度  $\frac{\partial T}{\partial n}$  的方向相反；

$\kappa$ ——热导率(导热系数)。

上式称为傅里叶(Fourier)导热定律。

和气体的黏度一样，气体的导热系数也是随温度的升高而增大，且同样可用萨瑟兰公式近似，但萨瑟兰常数  $T_s$  的取值不同。

## 1.2 气体的连续介质假设

### 1.2.1 连续介质假设

从微观上看,气体是由大量不连续的微小粒子(分子、原子)组成的,气体内部存在空隙,是非密实的或者说不连续的,并且每个粒子都在进行着不规则的热运动,粒子与粒子之间通过碰撞交换动量和能量,使得表征气体属性与状态的各种物理量在空间和时间上是不均匀的、离散的和随机的。但是,在宏观上,人们观察到的或通过仪器测量到的气体结构与运动却明显地呈现出均匀性、连续性和确定性。由此可见,气体粒子的微观运动与气体宏观运动是截然不同的,但它们又是和谐统一的。气体动力学是研究气体宏观运动规律的学科,如果考虑每个微观粒子的运动,然后再运用统计物理的方法获得宏观物理量的平均值,那将是非常繁琐的。所以,气体动力学通常用连续介质的模型来简化真实气体的微观结构,这就是欧拉(Euler)于1753年提出的连续介质假设(Continuum Postulate),它是气体动力学的根本性假设和基础。

连续介质假设认为,气体是连续介质,它充满所给定的全部体积,粒子之间不存在自由间隙,没有真空,也没有粒子的热运动。所以,在研究气体的宏观运动时,不必考虑单个粒子的瞬时状态和行为,而只需要研究描述气体宏观状态的物理量,如温度、压强、速度等。根据连续介质假设,气体的这些物理量在每个空间点和每个时刻都具有确定的值,并且都是空间和时间的连续函数(在激波问题中,不考虑激波厚度时物理参数有间断)。

可以从以下两个方面来理解气体的连续介质假设。一方面,连续介质假设要求气体的宏观运动所涉及到的每一个气体微团都必须包含有极大量的粒子,它们的统计平均性质代表了该微团气体的宏观性质。事实上这一要求是很容易满足的,例如,在标准状态下,每立方厘米体积所包含的气体分子数约为  $2.7 \times 10^{19}$  个,即使在  $10^{-9} \text{cm}^3$  体积内也还有  $2.7 \times 10^{10}$  个气体分子,而这样的体积在宏观上是非常小的。另一方面,连续介质假设要求所考虑的气体微团或气体中的物体的特征尺寸与组成气体的分子之间的距离相比是非常大的,气体中的每一个非常小的变化都能够影响到很大的分子,即要求气体流动的特征尺寸应远大于气体分子的平均自由程。由此可以定义如下的无量纲判据

$$K_n = \frac{l}{L} \quad (1-2-1)$$

称为克努森数(Knudsen Number)。

式中  $l$ ——分子平均自由程,是单个分子在与其他分子碰撞前所能运动距离的平均值;

$L$ ——与研究空间有关的特征尺寸(如火箭发动机喷管流动的喷喉直径、弹丸外部绕流的弹长或弹径等)。

根据分子运动论知

$$l = 1.255 \sqrt{\gamma} \frac{\nu}{a}$$

式中  $\gamma$ ——比热比;

$\nu$ ——运动黏度;

$a$ ——声速(Acoustic Speed or Sonic Speed)。将上式代入式(1-2-1),可以把克努森

数进一步改写成

$$K_n = 1.255 \sqrt{\gamma} \frac{\nu}{aL} = 1.255 \sqrt{\gamma} \frac{Ma}{Re} \quad (1-2-2)$$

式中  $Ma$ ——马赫数(Mach Number);  
 $Re$ ——雷诺数(Reynolds Number)。

它们的定义分别为

$$Ma = \frac{V}{a}, Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (1-2-3)$$

式中  $V$ ——气体流动速度。

连续介质假设只适用于  $K_n < 0.01$  的流动,这在通常情况下都是满足的。当  $K_n \geq 0.01$  时,连续介质假设不再成立。例如,在高空大气中,空气的密度非常低,以至于分子的平均自由程可以与所研究物体的特征尺寸相比拟,不能再视作连续介质,而只能用稀薄气体动力学来研究。

连续介质假设也不能适用于激波内部的流动,因为激波的厚度与分子平均自由程是同量级的。所以,在研究激波流动时均将激波处理成间断,而不考虑其内部的流动情况。

### 1.2.2 连续介质一点处的密度

密度是气体的一个重要属性,它是空间坐标和时间的函数,即

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (1-2-4)$$

根据连续介质假设,密度可以按如下方式来定义。

在连续介质充满的空间中,任一点  $P$  在给定时刻的密度可以围绕该点取一个介质微团,其体积为  $\delta\Omega$ (为了与流速符号  $V$  区别开来,体积均用  $\Omega$  表示,但质量体积仍用小写的英文字母  $v$  表示),所包含分子的全部质量为  $\delta m$ ,如图 1-3 所示。则微团的平均密度为

$$\bar{\rho} = \frac{\delta m}{\delta\Omega}$$

现在要求体积  $\delta\Omega$  围绕  $P$  点逐渐缩小。随着  $\delta\Omega$  的不断缩小,其内的介质物理属性越来越均匀,平均密度逐渐趋向于一个稳定值,此时的体积称为极限体积,用  $\delta\Omega_{\min}$  表示。当微团的体积进一步减小时,由于介质分子进出该体积的不平衡将导致平均密度随时间的较大波动,因此体积不能再减小。于是,对应于极限体积  $\delta\Omega_{\min}$  的平均密度就可以定义为  $P$  点处的连续介质密度(见图 1-4),即

$$\rho = \lim_{\delta\Omega \rightarrow \delta\Omega_{\min}} \frac{\delta m}{\delta\Omega} \quad (1-2-5)$$

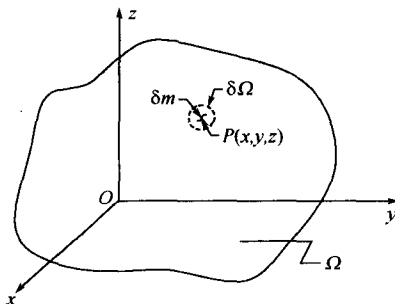


图 1-3 连续介质中的微团体积与质量

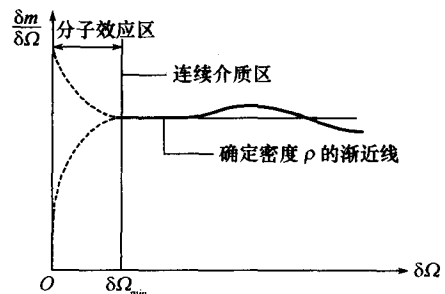


图 1-4 连续介质中的一点处的密度



由此可见,  $\delta\Omega_{\min}$  是保证连续介质假设成立的最小体积。极限体积比所研究物体的特征尺寸小得多, 因此在流动中可以看成一个性质均匀的空间点; 但它又远大于分子的平均自由程, 所包含的分子数目多得足以使单个分子的行为无法显现, 而只能表现出该体积内所有分子的平均性质, 使密度的统计平均值具有确切的含义。从这个意义上说, 连续介质中的空间点不能理解为数学上几何点的概念, 而是指可以与极限体积相比拟的气体微团, 连续介质正是由无数个连续的微团所组成的。为了方便起见, 本书仍将式(1-2-5)写成微分的形式, 即

$$\rho = \frac{dm}{d\Omega} \quad (1-2-6)$$

但应记住, 这种微分是以满足连续介质假设为前提的。

### 1.2.3 连续介质一点处的速度

和密度一样, 连续介质的速度也是空间和时间的连续函数, 可表示成

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(x, y, z, t) \quad (1-2-7)$$

根据连续介质假设, 某点  $P$  的流动速度可以定义为包含该点的极限体积  $\delta\Omega_{\min}$  中所有分子速度的平均值。假设极限体积中有  $n$  个分子, 第  $i$  个分子的质量为  $m_i$ , 速度为  $\mathbf{V}_i$ , 则  $P$  点的速度为

$$\mathbf{V} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{V}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1-2-8)$$

显然, 这个速度不同于  $P$  点处分子的瞬时速度。

连续介质中一点处的密度和速度的定义是非常有用的概念, 是对连续介质假设实质的进一步说明。按照同样的道理, 可以建立连续介质中一点处的压强、温度等概念, 此处不再赘述。

## 1.3 热力学基本概念与基础知识

热力学是研究热能与其他形式能量之间的转换以及能量转换与物质性质之间关系的学科, 工程热力学是热力学的一个分支, 它着重研究与热能工程有关的热能与机械能相互转换的规律。热力学与气体动力学有着密不可分的关系, 为便于学习, 本书简要介绍有关热力学的基本概念和基础知识。

热力学是通过对有关物质的状态变化进行宏观分析来研究能量转换过程的。为便于研究, 选取某些确定的物质或某个确定空间中的物质作为主要研究对象, 并称它为热力学系统, 简称系统; 而热力学系统之外和能量转换有关的一切其他物质统称为外界或环境; 热力学系统与外界之间的分界面称为边界。根据具体问题的不同, 边界可以是实际存在的, 也可以是假想的; 可以是固定的, 也可以是能移动的。当热力学系统和外界间发生相互作用时, 必然有能量和质量穿越边界, 因而可以在边界上判定系统和外界间传递能量和质量的形式及数量。在边界上既能传递能量也能传递质量的系统称为开口系统; 只能传递能