

动量、热量、质量传输原理

高家锐 主编

702139



重庆大学出版社

动量、热量、质量传输原理

高 家 锐 主 编

重 庆 大 学 出 版 社

内 容 提 要

《动量、热量、质量传输原理》是用于冶金专业的新教材。全书分三篇，系统、全面地介绍了动量传输、热量传输和质量传输的理论及其在冶金上的应用。书中有不少例题，每篇之后附有必要的习题。常用基本参数列于书后附录中，并列有参考书目供读者参考。

本书可供高等学校冶金专业作教材使用，也可供冶金工程技术人员及相关学科工程技术人员参考。

动量、热量、质量传输原理

高家锐 主编

责任编辑 宗联枝

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆印制一厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：25 字数：643 千

1987 年 12 月第 1 版 1987 年 12 月第 1 次印刷

印数：1—3000

标准书号：ISBN 7-5624-0072-5 统一书号：15408·40
TB·1 定 价：3.75 元

前 言

随着科学技术的发展,工程专业的基础学科日益扩大,在冶金、化工、机械、动力及建筑等技术领域,均涉及传输工程问题。六十年代以后,国外许多大专院校的工程专业相继开设了有关《传输现象》的课程,传输理论已成为与力学、热力学及电磁学等具有同等重要的工程技术基础课程。

为适应“四化”建设需要,加强专业基础理论,我们于1980年参照国外有关教材[1][2]制定了《传输原理》课程的教学大纲,编写了《传输原理讲义》,并在重庆大学钢铁冶金专业试用。而后根据教学实践作了进一步修改,对内容和章节体系作了适当的增删和调整,于1984年编印了《传输原理》教材。该书为武汉钢铁学院、华东冶金学院、包头钢铁学院等兄弟院校选作教材,武汉钢铁学院魏植华教授对该教材提出了不少宝贵的意见。在此,谨对魏教授表示真诚的感谢。在该教材的基础上,对内容和体系作了进一步改进和完善编出本书。

传输现象(TRANSPORT PHENOMENA)为流体动力过程、传热过程及传质过程的统称,也称为传递理论或速率过程。由于三种传输过程的类似统一性,传输理论已成为一门独立的学科,出现于工程技术科学的理论系统。传输理论的基本内容和有关的解析方法,源于流体力学、传热学和物质传递较为成熟的学科领域。因此,在本书编写中,着重探讨了关于内容的“移植”问题。从冶金中的物理过程和一般工程技术专业中有关传输过程的基础理论出发,决定教材内容的深广度和系统结构,将各类传输过程的基本理论和应用计算恰当地纳入传输过程的类似统一系统。

考虑到学习本课程的对象所具有相关基础知识(如流体力学和传热学)的不同情况,虽然三种传输过程具有类似的基本概念、运动规律和解析方法,但为便于对各过程的阐述和使读者易于接受,本书仍按三种传输过程分篇编写。同时,从传输理论系统的整体性出发,本书各篇章内容前后联系,循序渐进。作为工程技术基础理论课的教材,本书可按编写系统进行“纵向”讲授,对具有三传基本知识的学习对象,也可按三种传输过程的类似系统进行“横向”讲授,后者对研究生更宜采用。

传输理论是一门数理解析较重的课程,在本书内容的阐述和解析方法上,着眼于物理概念和数学表达的统一,并突出物理性课程的特点。为适合不同数学基础的读者,对有关说明物理过程的数学解析列出了必要的推导。本书的内容对具有微积分运算基础的读者,均能理解和掌握。书中对涉及工程数学的某些个别问题,均有较为详细的解析推导。在讲授本课时,可根据学习对象的数学基础对解析过程进行取舍。

为便于对基本理论的理解和对必要的应用计算方法的掌握,本书各章附有必要的例题和一定数量的习题。

本书使用国际(SI)单位制,并附有单位换算表。

本书可作为高等工科院校冶金及其他有关专业大学生或研究生教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

本书第一、二、三、四、五、八章由高家锐编写,第六、七、九章由刘成全编写,第十、十一、十五、十六、十七、十八、十九章由杨绍基编写,第十二、十三、十四章由赵郁芬编写,第廿、廿一、廿二、廿三章由钱国堂编写。全书习题均由梁小平整理验算。本书由高家锐主编。

限于我们的理论和业务水平,本书缺点和错误当不可免,敬请读者不吝赐教。

编者 1987年5月

符 号 说 明

A 面积 m^2	T 绝对温度 K	p 压力 (压强) N/m^2
B 宽度 m	U 速度 m/s	q 热通量 W/m^2
C 辐射系数 $W/m^2 \cdot K^4$; 摩尔浓度 mol/m^3	V 体积 m^3 ; 体积流量 m^3/s	r 半径 m; 反射率 速度常数
D 直径 m; 扩散系数 m^2/s	W 动量传输量 $\frac{N \cdot S}{s}$ 水当量 $W/^\circ C$	s 厚度 m; 比表面积 m^2/m^3 ; 平均射线行程 m; 拉氏变数
E 动能 J; 辐射能力 W/m^2	X 函数	t 摄氏温度 $^\circ C$
F 作用力 N	Y 函数	u 速度 m/s
G 重力 N; 重量流量 N/s ; 动量矩 $N \cdot m$	Z 函数; 高度 m	v 体积 m^3 ; 比容 m^3/kg
H 高度 m	a 热量传输系数 m^2/s ; 吸收率; 面积 m^2 ; 加速度 m/s^2	w 对流动量通量 $\frac{N \cdot S}{m^2 \cdot s}$
I 辐射强度 W/m^3	b 宽度 m	x 坐标
J 功, 能 J	c 比热 $J/kg \cdot ^\circ C$	y 坐标
K 绝热指数; 紊流动能 阻力系数; 传热系数 $W/m^2 \cdot ^\circ C$; 平衡常数	d 直径 m; 透过率	z 坐标
L 长度 m; 拉氏变换记符	e 自然对数的底	α 角度; 流量系数 传热系数
M 质量 kg; 质量流量 kg/s ; 分子量 马赫数	f 函数记符; 作用力 N	β 角度; 膨胀系数 $1/^\circ C$; 本征值
N 质量流量 kg/s ; 质量传输量 kg/s ; 紊流动能耗散速度;	g 重力加速度 m/s^2	γ 角度; 重度 N/m^3
O 原点; 极点	h 高度 m; 阻力损失 J/m^3 或 J/kg ; J/N ; 潜热 J/kg	δ 厚度 m; 附面层厚度 m
P 压力 (压强) N/m^2	i 矢量	ϵ 动能耗散率; 黑度; 相对摩尔浓度
Q 体积流量 m^3/s ; 热量 J; 热量传输量 W	j 矢量; J 因子	η 效率; 减弱系数
R 气体常数 $J/kg \cdot K$; 半径 m; 热阻 $m^2 \cdot ^\circ C/W$	k 矢量; 紊流动能; 传质系数 m/s , 或 $kg/m^2 \cdot s$; $mol/m^2 \cdot s$	θ 角度; 过剩温度
S 周长, 厚度 m; 表面积 m^2 ; 总阻力 N; 旋流强度	l 长度 m; 气体分子平均自由行程 m; 普朗特混合长度 m	λ 形状系数; 导热系数 $W/m \cdot ^\circ C$; 波长 m
	m 质量 kg	μ 动力粘度 $kg/m \cdot s$
	n 法向; 传质通量 $kg/m^2 \cdot s$ 或 $mol/m^2 \cdot s$	ν 运动粘度或热量传输系数 m^2/s
	o 原点	ξ 涡量; 摩阻系数

ρ 密度 kg/m^3, 质量浓度 kg/m^3 σ 辐射常数 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ τ 时间 s, 应力 N/m^2, 粘性动量通量 $\frac{\text{N} \cdot \text{S}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ Φ 势函数; 函数; 角度系数 φ 角度 ψ 流函数, 函数 Ω 曲面面积; m^2, 紊流动能生成速度 B 数量级符号 $Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$ 阿基米德准数 $Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$ 毕欧准数	$Bi' = \frac{kL}{D}$ 传质毕欧准数 $Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2}$ 欧拉准数 $Fo = \frac{\alpha \tau}{L^2}$ 傅立叶准数 $Fo' = \frac{D\tau}{L^2}$ 传质傅立叶准数 $Fr = \frac{u^2}{gL}$ 弗鲁德准数 $Ga = \frac{gL^3}{\nu^2}$ 伽利略准数 $Gr = \frac{\beta g L^3}{\nu^2} \Delta t$ 格拉晓夫准数 $Ho = \frac{u\tau}{L}$ 谐时准数 $Le = \frac{a}{D}$ 刘易斯准数 $M = \frac{u}{u_s}$ 马赫数	$Ne = \frac{f\tau}{m\lambda}$ 牛顿准数 $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ 努塞尔特准数 $Pe = Re \cdot Pr = \frac{uL}{a}$ 皮克列准数 $Pr = \frac{\nu}{a}$ 普朗特准数 $Re = \frac{uL}{\nu}$ 雷诺准数 $Sc = \frac{\nu}{D}$ 施密特准数 $Sh = \frac{kL}{D}$ 谢伍德准数 $St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{a}{\rho u c_p}$ 史坦顿准数 $St' = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{k}{u}$ 传质史坦顿准数
---	--	--

单位换算表

力单位换算

牛 (N)	公斤力 (kgf)	达因 (g·cm/s ²)
1	0.102	10 ⁵
9.80665	1	9.80665×10 ⁵
10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁶	1

压力和应力单位换算

帕 (Pa) (N/m ²)	巴 (bar)	工程大气压 (kgf/cm ²)	标准大气压	毫米水柱 (mm H ₂ O)	毫米汞柱 (mm Hg)
1	10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁵	0.98067×10 ⁻⁵	0.102	0.0075
10 ⁵	1	1.02	0.98067	10197	750.1
9.8067×10 ⁴	0.9807	1	0.9678	10000	735.6
1.0133×10 ⁵	1.0133	1.0332	1	10332	760.0
9.8067	9.8067×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁴	9.6781×10 ⁻⁵	1	0.0736
133.32	1.3322×10 ⁻⁵	0.00136	0.00132	13.6	1

功、能和热量单位换算

焦耳 (J)	公斤力·米 (kgf·m)	千瓦·小时 (kW·h)	千卡 (kcal)	英热单位 (BTU)
1	0.102	2.778×10 ⁻⁷	2.39×10 ⁻⁴	9.48×10 ⁻⁴
9.807	1	2.724×10 ⁻⁶	2.342×10 ⁻³	9.295×10 ⁻³
3.6×10 ⁶	3.671×10 ⁵	1	8.598×10 ²	3.412×10 ³
4.187×10 ³	4.269×10 ²	1.163×10 ⁻³	1	3.968
1.055×10 ³	1.076×10 ²	2.931×10 ⁻⁴	0.252	1

粘度单位换算

运动粘度			动力粘度		
米 ² /秒 (m ² /s)	斯托克斯 (cm ² /s)	米 ² /时 (m ² /h)	牛顿·秒/米 ² (N·s/m ²)	公斤力·秒/米 ² (kgf·s/m ²)	公斤力·时/米 ² (kgf·h/m ²)
1	10 ⁴	3600	1	0.102	0.283×10 ⁻⁴
10 ⁻⁴	1	0.36	9.81	1	2.78×10 ⁻⁴
2.778×10 ⁻⁴	2.778	1	3.53×10 ⁴	3600	1

注：运动粘度 ν 和动力粘度 μ 的关系为 $\mu = \nu\rho$ ，其中 ρ 为密度。

目 录

第一篇 动 量 传 输

引 言

第一章 流体及其物理性质	3
§1-1 流体的特性	3
§1-2 流体的密度和重度	3
§1-3 流体的压缩性和膨胀性	4
§1-4 流体的作用力、能量和动量	6
第二章 流体运动的基本特征	8
§2-1 流体流动的起因	8
§2-2 连续介质及质点	8
§2-3 流体微团及控制体	9
§2-4 流场特征及分类	10
§2-5 梯度、散度及旋度	11
§2-6 流线及流函数	15
§2-7 势流及势函数	18
§2-8 流体的流动性质	21
§2-9 附面层概念	25
第三章 动量传输基本定律	29
§3-1 流体的粘性及牛顿粘性定律	29
§3-2 流体质量平衡方程——连续性方程	34
§3-3 粘性流体动量平衡方程 (纳维-斯托克斯方程)	35
§3-4 柱坐标质量及动量平衡方程	40
§3-5 理想流体动量平衡方程——欧拉方程	41
§3-6 伯努利方程	42
§3-7 流体的静力平衡	47
§3-8 紊流动量传输的基本方程	49
第四章 流体动量传输中的阻力	52
§4-1 不可压缩流体的管流摩阻	52
§4-2 管流局部阻力损失	60
§4-3 简单管流系统计算	63
§4-4 平板绕流摩阻	66
§4-5 球体及其它形状物体的绕流摩阻	73
第五章 流体的流出	78

§5-1 溢流液膜沿斜面下降.....	78
§5-2 液体自盛桶下部孔口的流出.....	80
§5-3 不可压缩气体自孔口及管嘴的流出.....	83
§5-4 压缩性气体自孔口的流出.....	85
§5-5 流体流量的测量.....	93
第六章 射流	97
§6-1 自由射流.....	97
§6-2 旋转射流.....	102
§6-3 半限制射流.....	107
§6-4 射流间的相互作用.....	110
第七章 气液两相流体力学	113
§7-1 气体喷向液体表面的流动.....	113
§7-2 气体喷入液体内部的流动.....	117
第八章 气固两相流动	123
§8-1 气体通过固定料层的流动.....	123
§8-2 气体通过流化料层的流动.....	130
§8-3 气动输送过程.....	134
第九章 相似原理及因次分析	138
§9-1 相似理论基础.....	138
§9-2 因次分析及 π 定理.....	143
§9-3 相似模型法.....	147
第一篇 习 题	152

第二篇 热 量 传 输

引 言

第十章 热量传输的基本定律	165
§10-1 热量传输的基本概念.....	165
§10-2 傅立叶导热定律.....	167
§10-3 傅立叶-克希霍夫导热微分方程.....	171
第十一章 定态导热	174
§11-1 定态导热的温度场和导热量.....	174
§11-2 平均导热面积与壁内温度的实际分布线.....	177
第十二章 强制对流传热	181
§12-1 概述.....	181
§12-2 流体流过平板时的对流传热.....	183
§12-3 管内流动时的对流传热.....	190
§12-4 流体外绕物体时的对流传热.....	205
第十三章 自然对流传热	210

§13-1	自然对流传热的基本特点	210
§13-2	大空间垂直平板层流自然对流传热	211
§13-3	自然对流传热的经验式	212
§13-4	自然对流和强制对流的混合对流传热	216
第十四章	辐射传热	218
§14-1	辐射传热的基本概念	218
§14-2	绝对黑体的辐射定律	220
§14-3	灰体的辐射	222
§14-4	固体表面间的辐射传热	224
§14-5	气体的辐射与吸收	235
§14-6	气体与固体表面间的辐射传热	240
§14-7	火焰炉中的辐射传热	241
第十五章	综合传热	246
§15-1	辐射和对流的综合传热	246
§15-2	通过间壁的传热	247
§15-3	蓄热室原理及计算	254
第十六章	气固两相流的传热	258
§16-1	固定料层的传热	258
§16-2	流化料层的传热	263
第十七章	不定态导热	266
§17-1	不定态导热的基本概念	266
§17-2	薄材在恒温介质中的加热或冷却	268
§17-3	表面温度为常数的有限厚物体的不定态导热	270
§17-4	介质温度为常数时的有限厚物体的不定态导热	274
§17-5	表面温度为常数的半无限厚大平板的不定态导热	282
§17-6	多维体系的不定态导热	285
第十八章	导热的有限差分计算	287
§18-1	有限差分法的基本概念	287
§18-2	二维定态导热的差分计算	289
§18-3	不定态导热的差分计算	294
第十九章	凝固传热	302
§19-1	砂模铸造时的凝固传热	302
§19-2	金属模铸造时的凝固传热	305
§19-3	凝固传热的积分解法	313
§19-4	连续浇铸时的凝固传热	315
第二篇 习 题		321

第三篇 质 量 传 输

引 言

第二十章 质量传输基本定律	329
§20-1 质量传输的基本概念.....	329
§20-2 扩散传质基本定律.....	333
§20-3 元体质量平衡方程式 (带扩散的连续性方程式)	342
第二十一章 扩散传质	344
§21-1 定态扩散传质.....	344
§21-2 不定态扩散传质.....	348
§21-3 纯金属偶的互扩散.....	357
第二十二章 对流传质	360
§22-1 对流传质的基本概念.....	360
§22-2 流体流过物体表面时的对流传质.....	364
§22-3 静止气层扩散时的对流传质.....	371
§22-4 流动气膜中的扩散传质.....	375
§22-5 沿器壁下落液膜中的扩散传质.....	378
§22-6 动量、热量和质量传输类比.....	381
第二十三章 相间定态传质	385
§23-1 双膜理论及相间传质.....	385
§23-2 “气-固”相间的综合扩散传质.....	388
§23-3 蒸发 (气化) 条件下的综合传质.....	390
第三篇 习 题	394
附录 1 常用耐火、保温材料的导热系数	395
附录 2 某些金属材料的热物理性质	396
附录 3 干空气的物理性质	397
附录 4 大气压下一种烟气的热物理性质	398
附录 5 饱和水的热物理性质	398
附录 6 饱和水蒸气的热物理性质	399
附录 7 常见材料表面的黑度 ε (ε_n)	400
参考文献	401

第一篇 动量传输

引言

动量传输以流体在流动条件下的动量传递过程为主要研究对象，是传输理论体系的基础和重要组成。“动量对时间的变化率与作用力成正比”，由牛顿第二定律所指出的这一动量与作用力相统一的规律，说明了流体的动量传输与其作用力平衡相一致的特征。动量传输理论属于流体动力学范畴。

动量传输所研究的内容和相应的解析方法，虽均移植自流体力学，但基于动量、热量及质量传输过程的类似统一性和传输理论系统的整体性，而以动量的传输做为讨论问题的出发点，将作用力的平衡过程统一于动量的传输之中。

对于动量、热量及质量的这三种类似的传输过程，根据过程的起因和进行的条件均可分为两类，即物性传输与对流传输。物性动量传输是由流体分子（微观）运动所产生的粘性作用，是在流体运动或变形的条件下进行的。这种传输过程产生的原因为流体固有的粘性，故称为物性或粘性动量传输。对流动量传输是流体在流动条件下，由质点的位移、在质量（宏观）对流的基础上进行的传输过程；对流动量传输决定于流体的质量（密度）及其流动速度。显然，粘性流体在进行对流动量传输过程中，同时存在着物性动量传输过程。

对于流体的动量传输以及后两篇将要讨论的热量和质量传输均以其宏观过程为研究对象，不涉及物体的分子结构和分子运动问题。由分子运动而构成的物性传输过程，仅视为物体的传输性能而不深涉其机理。在研究流体动量传输的宏观过程中，将流体视为连续介质，取流体的质点或微团做为最小的解析对象。

流体的动量传递过程是在流体运动条件下进行的，因此动量传输尚与流体的运动特征有关，如流场的特征、流体的流动性质等。此外，在动量传输中还涉及流体的一些物理性质问题。

第一章 流体及其物理性质

§1-1 流体的特性

自然界中能够流动的物体，如液体及气体，一般地统称为流体。与固体比较，流体的分子平均间距较大、排列松散，分子间的引力较小而运动强烈。因而具有易于变形和流动的特征。

气体的分子间距，远大于液体，更易于自由运动，因而气体也就更易于变形和流动。气体分子的自由运动使之能充满整个容器空间。液体由其分子间距小，分子间引力较大，具有力求使自身表面收缩到最小的特征，故在容器中只占据一定空间，而且有一定的自由液面。

液体的分子间距远较气体的为小，当液体受压时会产生明显的抗力；由于液体分子间距难于缩小，受压时密度不易变化，通常认为液体为不可压缩性流体。相反，气体在受压时其密度变化较大，则认为气体为可压缩性流体。在动量传输解析中，当由压力作用所引起的密度变化可以忽略不计时，气体也可假设为不可压缩性的流体。

§1-2 流体的密度和重度

流体与任何物体一样，具有质量和重量。单位体积流体所具有的质量，称为流体的密度，以 ρ 表示。对于质量分布不均的流体，某一点处密度的定义式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-1)$$

式中

Δm ——某微元体流体的质量 kg ； V ——流体微元体体积 m^3 。

对于质量分布均匀的流体，(1-1)式可写为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-2)$$

式中

m ——流体的质量 kg ； V ——流体的体积 m^3 。

相反，单位质量流体所占有的体积，称为流体的比容，以 v 表示。显然，比容与密度呈倒数关系，即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-3)$$

在地心引力的作用下，任何物体受重力作用而均具有重量。单位体积流体所具有的重量，称为流体的重度，以 γ 表示。对于均质流体其重度的定义式为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad \text{N/m}^3 \quad (1-4)$$

式中

G ——流体的重量 N ; m ——流体的质量 kg ; g ——重力加速度 m/s^2 ; V ——流体的体积 m^3 。

几种常见流体的密度和重度见表(1-1)。

表(1-1) 常见流体的密度和重度

流 体 名 称	温 度 ($^{\circ}C$)	密 度 (kg/m^3)	重 度 (N/m^3)	流 体 名 称	温 度 ($^{\circ}C$)	密 度 (kg/m^3)	重 度 (N/m^3)
蒸馏水	4	1000	9810	氧	0	1.429	14.02
水 银	0	13600	133400	氮	0	1.251	12.28
酒 精	15	790~800	7750~7840	氢	0	0.0899	0.881
石 油	15	880~890	8630~8730	一氧化碳	0	1.250	12.27
液态铁	1200	7000	68600	二氧化碳	0	1.976	19.40
液态铝	720~810	2600	25500	二氧化硫	0	2.927	29.10
空 气	0	1.293	12.68	甲 烷	0	0.716	7.02

例(1-1) 已知水的密度 $\rho=1000kg/m^3$, 空气的密度 $\rho=1.293kg/m^3$, 试计算水及空气的重度。

解: 按(1-4)式, $g=9.81m/s^2$

$$\gamma_{\text{水}}=1000 \times 9.81=9.81 \times 10^3 N/m^3$$

$$\gamma_{\text{空}}=1.293 \times 9.81=12.68 N/m^3$$

例(1-2) 从上题知水的重度 $\gamma_{\text{水}}=9.81 \times 10^3 N/m^3$, 又知水银的比重为13.55 (指对4 $^{\circ}C$ 水的密度比值)。求水银的密度和重度。

解: 从上题知水的密度为 $\rho_{\text{水}}=1000kg/m^3$, 即水银的密度为

$$\rho_{\text{水银}}=1000 \times 13.55=13.55 \times 10^3 kg/m^3,$$

水银的重度按(1-4)式为

$$\gamma_{\text{水银}}=13.55 \times 10^3 \times 9.81=132.93 \times 10^3 N/m^3。$$

§ 1-3 流体的压缩性和膨胀性

流体的体积随所受压力的增加而减小, 随温度的升高而增大, 或相反过程。这就是流体的压缩性和膨胀性。

液体的压缩性和膨胀性不显著, 在工程上一般多将其视为不可压缩流体。气体的压缩率和膨胀率均较大, 而不可忽略。但当压力及温度变化较小, 引起的压缩及膨胀可不计时, 也可视为不可压缩流体。

气体在等温压缩时的关系如下:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad \text{或} \quad v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (1-5)$$

式中 p_1, p_2 ——两种状态下气体的压力 (压强) N/m^2 ,

v_1, v_2 ——两种状态下气体的比容 m^3/kg 。

由(1-3)式及(1-5)式有

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (1-6)$$

式中 ρ_1, ρ_2 ——两种状态下气体的密度 kg/m^3 。

气体在恒压膨胀时的关系如下：

$$v_1 T_2 = v_2 T_1 \text{ 或 } v_2 = v_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (1-7)$$

式中 T_1, T_2 ——两种状态下气体的绝对温度 K。

对温度为 $t^\circ\text{C}$ 的状态与标准状态比较时，(1-7)式为

$$v_t = v_0 (1 + \beta t) \quad (1-8)$$

式中 v_t, v_0 ——气体在 $t^\circ\text{C}$ 及标准状态下的比容 m^3/kg ；

$$\beta = \frac{1}{273} \text{——气体的膨胀系数。}$$

同样(1-3)式有

$$\rho_t = \rho_0 / (1 + \beta t) \quad (1-9)$$

将(1-7)式中的比容用气体的体积或气体的体积流量代之，则气体通过一定截面流过的体积流量和平均流速随温度的变化关系为

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) \quad (1-10)$$

$$u_t = u_0 (1 + \beta t) \quad (1-11)$$

式中 V_t, V_0 ——气体在 $t^\circ\text{C}$ 及标准状态下的体积流量 m^3/s ；

u_t, u_0 ——气体在 $t^\circ\text{C}$ 及标准状态下的流速 m/s 。

气体同时受压力和温度作用而压缩或膨胀时，气体的状态方程如下：

$$pv = RT \quad (1-12)$$

式中 R ——气体常数 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 。

气体在绝热条件下压力与比容的关系为

$$pv^K = p_1 v_1^K \text{ 或 } v = v_1 \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (1-13)$$

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (1-14)$$

式中 $K = \frac{c_p}{c_v}$ ——气体的绝热指数，其中 c_p 及 c_v 为恒压比热和恒容比热。

各种常见气体的气体常数及绝热指数见表(1-2)。

表(1-2) 气体常数及绝热指数

气体种类	气体常数, R ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	绝热指数 K	气体种类	气体常数, R ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	绝热指数 K
空气	287.03	1.402	二氧化碳	188.92	1.29
氧	259.83	1.402	甲烷	518.25	1.31
氮	296.8	1.401	水蒸汽	462	1.33
氢	4120	1.406	氩	208.13	1.67
一氧化碳	296.83	1.401	氨	2077	1.66

§ 1-4 流体的作用力、能量和动量

作用在流体上的力可分为两大类，即表面力和体积力。

表面力是指作用在流体表面上的力。流体的表面一般指的是流体与固体和液体与气体间的界面。其中也包括流体内部流层之间的界面。表面力不只作用在表面上，其大小还与表面积成比例。表面力是流体分子运动的结果。

表面力的一种为压力（压强）。压力一般表现为流体对容器器壁的作用力，从平衡的观点看也是器壁对流体表面的作用力。由于压力产生于分子运动，静止状态的流体也存在有表面力，故又称为静压力。流体的压力一般是指单位面积上的作用力，故又称为静压强。显然，流动状态下的流体仍然存在有压力的作用。

流体的静压力有两个基本特征：其一为流体的压力作用方向与作用面垂直，并由外向里指向作用面。从流体中取出任意体积时，其表面上的压力均具有此种特征。其二是流体中任意点上的压力在各方向均等，而且可传向各方。压力在流体内部传递中，如不存在其他因素的影响，则其值不变。

表面力的另一种为切力，即是由流体粘性所构成的粘性力。在流动流体与固体的界面上，以及其内部不同速度的流层间，均会有粘性力的表现。流体粘性力的作用方向与作用面相平行。粘性力也是指单位面积上的作用力，其总量与面积的大小成比例。

流体的体积力是作用在流体内部每个质点上的作用力，其大小与流体的质量成比例，故又称为质量力。属于质量力的有：决定于流体质量和重力加速度的重力，和决定于流体质量及流动加速度的惯性力。

流体所具有的能量，与重力、惯性力及压力相对应：有位能（或势能）、动能及静能（压力能）。

在流体运动中，存在着不同形式的作用力和能量，它们处于一定的平衡状态，并可进行相互之间的转换。这些作用力和能量尽管它们的物理含意有所不同，但从其量纲或简单物理量的分析比较中，可看出它们之间的内在联系和在不同条件下的表现形式。

流体在运动中的三种基本能量为：

$$\left. \begin{array}{l} 1. \text{ 位能——} Mgh \quad \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J} \right) \\ 2. \text{ 动能——} \frac{1}{2} Mu^2 \quad \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J} \right) \\ 3. \text{ 静能——} pV \quad \left(\text{Pa} \cdot \text{m}^3 = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3 = \text{J} \right) \end{array} \right\} \quad (1-2-1)$$

式中 M ——流体的质量 kg ； g ——重力加速度 m/s^2 ； h ——从基准面算起的高度 m ；
 u ——流体的流速 m/s ； p ——流体的压力（压强） Pa 或 N/m^2 ； V ——流体的体积 m^3 。

流体在运动中具有以下相应的作用力。