

高等学校教材

冶金传输基础

鲁德洋 主编

西北工业大学出版社

高等学校教材

冶金传输基础

鲁德洋 主编

鲁德洋 喻秋平 编

西北工业大学出版社

1991年1月 西安

内 容 简 介

本书系统而全面地从动量、热量及质量传输观点阐述了流体流动过程、传热过程以及传质过程的基本理论，并介绍了它们在工程实践中的主要应用。全书共分三篇，每篇均安排了习题，书末附录中也给出了为计算所需的常用物质的物理性质数值及各种单位制的换算。本书既可作为高等院校冶金、材料科学与工程等专业学生的教材，也可供从事此类专业的工程技术人员参考。

高等学校教材

冶金传输基础

主 编 鲁德洋

责任编辑 雷 鹏

责任校对 郭生儒

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路 127 号)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0148-6/TB·3(课)

*

开本 787×1092 毫米 1/16 18.75 印张 448 千字

1991 年 1 月第 1 版 1991 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—1 500 册

定价: 4.89 元

编者的话

60408/32 04

本教材是根据航空航天工业部航空高等院校教材会议制定的、为建立“冶金过程中动量、热量和质量传输”新体系的教学计划而编写的，取名为《冶金传输基础》。全书按上述3个部分共由3篇14章编写而成，适合60学时讲授。

长期以来，由于人们未能用传输的观点对冶金过程中的许多现象进行综合分析研究，因此，对这些现象也就不能做出深入的分析。大量事实表明，冶金过程中的三种传输是相互关联、相互制约和相互影响的，这样它就使问题变得相当复杂。所以，培养材料科学与工程专业的学生用动量、热量和质量传输的观点综合分析冶金过程中的各种现象就成了本教材的主要目的。从这个意义上讲，它比以往单独设置的“流体力学”、“传热学”课程要更科学、更合理得多。

在编写过程中，我们力求反映以下几点：

1. 每篇、章开始时，首先提出一般物理学中熟识的概念，然后引导到本课程的中心主题上。例如，第一篇中，在沿用一般力学观点讨论流体性质（如粘度）和作用在流体上的力及产生流体运动的基础上，提出用动量传输原理对它们作进一步的分析；

2. 注意反映近代分析研究和实验的辅助方法——相似原理，并对量纲分析法予以专门介绍，以便在处理工程问题时能正确合理地使用它们；

3. 书中的数学分析建立在高等数学微积分基础上，偏微分方程的求解主要采用分离变量法，避免了过深的数学要求，数学解析的步骤既交待清楚，又注意说明演算结果的物理含义；

4. 加强理论的同时也注意了实际运用，书中附有必要的图表数据和例题，每章末都附有习题，借助例题和习题得以受到启发和实际运用。

本书既可作为高等工业院校冶金、材料科学与工程等专业学生的教材，也可供从事此类专业的工程技术人员参考。

本书由鲁德洋任主编，第一篇和第三篇由鲁德洋编写，第二篇由喻秋平编写。全书由西安交通大学苏俊义教授审阅，对选材内容和体系安排，他也提出不少宝贵而中肯的修改意见，编者谨致衷心的感谢。张苏同志担负了本书绝大部分的绘图工作，我们在此也一并表示谢意。

由于编者水平有限，本书中的缺点和错误之处在所难免，恳望读者批评指正。

编者

1990年2月

主要符号一览表

a	体积分数; 加速度	L	特征长度
A	面积	m	质量
b	蓄热系数	M	质量; 分子量; 动量
B	宽度	Ma	马赫数
Bi	毕奥准则	n	法向距离; 分子浓度
c	比热; 光速; 音速	N	原子流
C	相似常数; 克分子浓度	Ne	牛顿相似准则
\bar{C}	平均浓度	N_f	沿程损失功率
d	直径; 分子直径; 分子的碰撞直径	Nu	努塞耳特准则
D	直径; 扩散系数	p	压强; 压力; 真空度
D^*	自扩散系数	\bar{p}	时均压力
\bar{D}	互扩散系数	P	压力; 渗透率
D_0	频率因子	Pe	佩克利特准则
e	能量; 总发射能力	Pr	普蓝特准则
E	比能; 辐射能量; 弹性模量	q	比热流量(热流率)
Eu	欧拉数	Q	流量; 抽气量; 活化能; 热流量
F	力	r	径向距离; 半径; 气体容积百分数
F_{ij}	视角因数	R	气体常数; 表面力; 质量力; 冲击力; 半径; 水力半径; 电阻
Fo	傅里叶准则	Re	雷诺数
Fr	弗劳德数	S	比重; 表面积; 溶解度
g	重力加速度	Sc	施密特数
G	重力; 重量; 总辐照强度	Sh	舍伍德数
Gr	格拉肖夫准则	S_p	真空泵抽速
h	高度; 换热系数; 普朗克常数	t	时间
h'_w	摩擦阻力损失	T	绝对温度; 摩擦力; 周期
h_f	局部阻力损失	T_0	初始温度
H	水头; 淬灭强度; 单位质量热函	u	速度
H_f	熔化潜热量	U	速度; 势函数; 力函数; 内能
I	惯性力; 电流强度; 辐射强度	\bar{U}	平均速度
j	克分子流率	v	速度; 比容
J	惯性矩; 总辐射强度	V	速度; 流体体积; 电位
k	绝热指数; 导热系数; 传质系数	\bar{V}	平均速度
Kn	克努森数	w_R	内摩擦所做的功
l	长度		

W	质量力; 质量流率	ζ	局部阻力系数
We	韦伯数	η	动力粘度
x	距离; 湿周	θ	角度
X	距离; 质量力; 气体的摩尔百分数	Θ	单位质量力
y	距离	k_B	玻尔兹曼常数
Y	距离; 质量力; 厚度	λ	沿程阻力系数; 辐射波长; 气体平均自由行程
z	距离	Λ	分子平均自由长度
Z	距离; 质量力; 位能	ν	运动粘度; 动量扩散系数
α	能量系数; 热扩散系数; 吸收率; 角度	ρ	密度; 质量浓度; 反射率
β	动量修正系数; 体积膨胀系数; 角度	σ	正应力; 表面张力系数; 斯忒藩-玻尔兹曼常数
γ	重度; 摩尔分量	τ	剪应力; 透射率; 曲折度
Γ	风机效率; 物质流速率	φ	角度
δ	附面层厚度; 厚度	ω	角速度; 孔隙度
Δ	绝对粗糙度; 间隙	Ω	立体角
ε	发射率		

目 录

第一篇 流体力学

第一章 流体的物理性质	2
§ 1-1 流体的概念及连续介质模型	2
§ 1-2 流体的密度和重度	3
§ 1-3 流体的压缩性和膨胀性	5
§ 1-4 流体的粘性和内摩擦	8
§ 1-5 牛顿流体与非牛顿流体	13
习题.....	14
第二章 流体静力学	15
§ 2-1 作用在流体上的力	15
§ 2-2 流体静压力及其特性	16
§ 2-3 流体平衡微分方程及等压面	18
§ 2-4 流体静压力基本方程	21
§ 2-5 平面上的流体总压力	25
§ 2-6 曲面上的流体总压力、浮力原理	28
§ 2-7 旋转体系中流体的相对平衡	32
§ 2-8 流体静压力的测量原理	34
习题.....	36
第三章 流体动力学	40
§ 3-1 流体运动的描述	40
§ 3-2 连续性方程	46
§ 3-3 理想流体的运动方程	49
§ 3-4 实际流体的运动方程	52
§ 3-5 理想流体和实际流体的伯努利方程	58
§ 3-6 伯努利方程的应用	66
§ 3-7 稳定流的动量方程及其应用	72
习题.....	75
第四章 流体运动的相似原理和量纲分析基础	78
§ 4-1 物理现象相似概念	78

§ 4-2 流体动力学中的一些相似准则	81
§ 4-3 量纲分析基础	85
习题	87
第五章 流动阻力及能量损失	89
§ 5-1 流动状态及阻力分类	89
§ 5-2 圆管中层流运动规律、达西公式	94
§ 5-3 流体在平行平板间的层流运动	97
§ 5-4 流体在圆管中的紊流运动	101
§ 5-5 沿程阻力系数 λ 值的确定	106
§ 5-6 局部阻力	109
习题	115
第六章 流动的产生和真空的获得	116
§ 6-1 泵	116
§ 6-2 通风机和鼓风机	118
§ 6-3 高速喷射器	121
§ 6-4 真空的获得	124
习题	128

第二篇 能量传输

第七章 传热的基本形式	132
§ 7-1 导热的傅里叶定律	132
§ 7-2 导热系数	133
§ 7-3 热对流	138
§ 7-4 热辐射	139
习题	140
第八章 导热	141
§ 8-1 导热的基本概念	141
§ 8-2 导热微分方程	142
§ 8-3 三种简单形状物体的一维稳态导热	144
§ 8-4 复合平板、复合圆管导热	147
§ 8-5 二维稳态导热	151
§ 8-6 一维非稳态导热方程	154
§ 8-7 简单的多维非稳态导热	161
§ 8-8 半无限大固体的一维非稳态导热	164

§ 8-9 考虑相变的热传导过程	165
习题	168
第九章 对流换热	171
§ 9-1 对流换热的基本概念	171
§ 9-2 内部流动的强迫对流换热	172
§ 9-3 外部流动的强迫对流换热——平板上的层流	176
§ 9-4 在竖直平板附近的自然对流换热	179
§ 9-5 流体的能量方程	182
§ 9-6 紊流对流换热	183
§ 9-7 沸腾相变换热的定性分析	185
习题	187
第十章 热辐射换热	189
§ 10-1 基本特性	189
§ 10-2 黑体的表面辐射	190
§ 10-3 灰体表面辐射	193
§ 10-4 两无限大平行平板间的辐射热交换	194
§ 10-5 视角因素	196
§ 10-6 与对流相结合的辐射	201
§ 10-7 表面有辐射的瞬变导热	203
习题	205
第十一章 换热设备与炉内换热过程	207
§ 11-1 换热器的分类	207
§ 11-2 单流程换热器的分析	209
§ 11-3 静止填料层床式冶金炉的初步传热分析	214
习题	228

第三篇 传 质

第十二章 菲克扩散定律和物质的扩散系数	230
§ 12-1 物质流的定义——菲克扩散第一定律	230
§ 12-2 固体中的扩散系数	231
§ 12-3 固态非金属中的扩散系数	236
§ 12-4 液体中的扩散系数	236
§ 12-5 气体中的扩散系数	240
§ 12-6 通过多孔介质的扩散系数	242
习题	245

第十三章 固体中的扩散	246
§ 13-1 稳态扩散	246
§ 13-2 非稳态扩散	249
§ 13-3 有界体系的解	254
习题	257
第十四章 流体中的传质	259
§ 14-1 通过一静止气膜的扩散	259
§ 14-2 进入一运动气流的扩散	261
§ 14-3 进入一下降液膜的扩散	263
§ 14-4 传质系数	265
§ 14-5 具有对流的一般扩散方程	268
习题	271
附 录	272
附录 I 常用的物理常数	272
附录 II 各种物质的密度和热学性能	272
附录 III 一些金属的热学性能	284
附录 IV 金属材料管壁的绝对粗糙度 Δ 值	285
附录 V 非金属材料管壁的绝对粗糙度 Δ 值	286
主要参考书	287

第一篇 流体力学

本篇主要研究各种条件下的流体、流体的内在性质和流动特性，以及能对其加以控制并用以获得预想结果的方法。大多数冶金过程都从不同的侧面涉及到流体的问题。例如，连铸机结晶器内的流体流动就是一个典型的液体流动问题，即限制射流与周围环境相互作用的问题。逐步积累起来的有关这种限制射流中流体流场的认识，特别是有关几何形状和喷嘴结构对流场影响的知识，已经大量地被应用到连铸系统的设计工作中。还可以举出以下例子来说明液体流动现象在冶金过程中所起的作用：气-固体系可以包括高炉、矿物烧结和焙烧；气-液体系则包括真空脱气和吹氩搅拌；液-固体系包括金属精炼末期脱氧剂和合金的熔化以及凝固时的流体流动现象；液-液体系则包括各种渣-金属间反应以及夹杂物的聚集和上浮等。

上述体系中的各种问题，可以划分为两大类：第一类问题是研究系统内参数间的整体关系。例如，流量与压差的关系，钢包钢液流尽所需要的时间等。在大多数情况下，只要应用那些常用的质量、能量和动量平衡原理，就能迅速地完成这些计算。处理这类问题的数学方法也比较简单，一般只包括代数运算和简单的微分方程。第二类问题则是研究系统内部更加详细的情况。例如研究速度分布而不是体积流量，研究紊流能量的耗散模型而不是总能量损失等。对这类问题的求解则需要诸如非线性偏微分方程的数值解这种比较高深的数学运算。虽然流体力学已相当完善地建立了用公式阐述和解决它的有效方法，但是把它们应用于冶金过程中，还是一项新的任务。由于流体运动在冶金系统中起着重要的作用，故流体力学应用到冶金过程是应当值得重视的。

本篇首先向读者介绍某些基本概念，然后由总体平衡建立简单的微分方程，进而在第三章中推导流体流动的微分方程。由于包括流体流动在内的大多数冶金过程中所遇到的都是紊流流动，故在第五章中讨论了紊流的物理特性，并介绍运动物体的阻力计算法。第六章中简要叙述如何获得流体流动以及如何度量流体的流动，并介绍一些设备的基本特性和用途。最后，因为在关于研究流体运动的一些现象中常包含有许多复杂的因素，要准确地表示出作用在已知流体质点的各种力，往往是很困难的。所以，模型实验研究就成了流体力学实验中常用的一种方法。而模型中发生的现象只有与在原型中发生的现象相似时，在模型上实验的结果，才有可能用于原型上去。这种说明相似方法的基本原理——相似原理——乃是研究支配相似系统的性质以及如何用模型实验解决实际问题的科学，是实验和分析研究的辅助方法。而从形式推理出发，建立包括有关物理量在内的、描述给定现象的方程的量纲分析也是解决流体力学和传热学的一个很重要的数学方法，因此，一并放在本篇加以叙述。

第一章 流体的物理性质

§ 1-1 流体的概念及连续介质模型

一、流体的概念

流体可以用分子间的空隙与分子的活动来描述。在流体中，分子之间的空隙比在固体中的大；分子运动的范围，也比在固体中的运动范围大；而且，分子的移动与转动为其主要的运动形式。在固体中，分子绕固定位置振动则是主要的。若对一种固体进行加热，增加分子运动的能量，开始是少数分子有较大的振幅而迁移位置。继续加热，分子运动更加剧烈，相互间的约束则逐渐减弱，更多的分子迁移了位置。最后，所有的分子都迁移位置。这样原来有规则的结构被破坏，以溶解的方式表现出固体状态转化为流体状态。

在力学中，常根据应力理论给流体下定义。认为一种物质在静力平衡时，不能容受切力或剪力，这种物质就是流体。因而，依照应力作用的特点，可以将物体区分为两种状态：固体与流体。

流体一般分为两类：液体与气体。

液体具有一定的体积，与盛装液体的容器大小无关，可以有自由面。液体的分子距和分子的有效直径差不多是相等的，当对液体加压时，由于分子距稍有缩小而出现强大的分子斥力来抵抗外压力。这就是说，液体的分子距很难缩小，而可以认为液体具有一定的体积，因此通常称液体为不可压缩流体。又由于分子引力的作用，液体有力求自身表面积收缩到最小的特性，所以一定量的液体在大容器内只能占据其一定的体积，而在上部形成自由分界面。

气体则是要膨胀充满其所占的空间的。气体的显著特点是其分子间距大，例如常温常压下空气的分子距为 $3.3 \times 10^{-7} \text{cm}$ ，其分子有效直径的数量级为 $3.5 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。可见分子距比分子有效直径大得多。这样，当分子距离小很多时，才会出现分子斥力。因此，通常称气体为可压缩流体。又因为分子距很大，分子引力很小，而分子热运动起决定性的作用，这就规定了气体既没有一定形状也没有一定体积。因而某一定量气体在较大容器内，由于分子的剧烈运动使气体均匀充满容器，而不能形成自由表面。

需要指出的是，当所研究的问题没有涉及到压缩性时，所建立的流体力学规律对液体与气体都适用。当涉及压缩性时，就必须对它们分别处理。但在工程中，气体的压力和温度变化不大，气流速度远小于音速时，可以忽略气体的压缩性，这时气流与液流的规律，在质的方面是相同的，只是在量的方面有区别。因此，液体运动的基本理论，对于上述气流来说也是完全适用的。

二、连续介质模型

流体都是由分子组成的，它们的性质和运动也都是与分子的状态密切相关的。但是在大多数情况下，特别在工程实际问题所涉及系统中，其尺寸与流体分子距离及分子运动的自由行程相比，则是非常大的。这时我们不必讨论流体个别分子的微观性质，而只要研究其大

量分子的形态及平均统计的宏观性质。1753年欧拉 (Euler) 首先采用了“连续介质”作为宏观流体模型：将真正的流体看成是由无限多个流体质点所组成的密集而无间隙的连续介质，也叫做流体连续性的基本假设。若不考虑个别分子，便可以把流体看成是由无数质点组成的连续介质 (Continuous Medium)。就是说，质点是组成流体的最小单位，质点与质点之间不存在空隙。

流体既被看成是连续介质，则反映宏观流体的各种物理量 (如压力、速度和密度等)，就都是空间坐标的连续函数。因此，在以后的讨论中都可以引用连续函数的解析方法，来研究流体处于平衡和运动状态下的有关物理参数之间的数量关系。本书所提到的流体，均指连续介质。

当然，流体连续性的基本假设，只是相对的。例如在研究稀薄气体流动问题时，这种经典流体动力学的连续性近似将不再适用了，应以统计力学和运动理论的微观近似来代替。此外，对流体的某些宏观特性 (如粘性和表面张力等)，也需要从微观分子运动的角度来说明其产生的原因。

下面，我们来研究与力学有关的流体的主要物理性质。

§ 1-2 流体的密度和重度

流体和其它物质一样，具有质量和重量。

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度，用 ρ 来表示。

如果在流体中任意点处的密度均相同，则该流体为均匀流体。均匀流体的密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度 (kg/m^3)；

M ——流体的质量 (kg)；

V ——流体的体积 (m^3)。

对于非均匀流体，因为各点处的密度不同，所以按式 (1-1) 计算的只是流体的平均密度。某一点处的密度应为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

式中 dm ——所取某微元体的质量 (kg)；

dV ——质量为 dm 的微元体的体积 (m^3)。

流体的比容指的是单位质量的流体所占有的体积，用 v 表示。显然，它与密度互为倒数，即

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

液体的比重 S 是指某液体的密度 ρ_f 与标准大气压力下、 4°C 的纯水的密度 ρ_s 的比值。它是无因次量，即

$$S = \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (1-4)$$

至于气体的比重，是指某气体的密度与在特定的温度和压力下氢气或者空气的密度的比值，它没有统一的规定，必须视给定的条件而定。

单位体积的流体所具有的重量，即作用在单位体积流体上的重力称为流体的重度，用 γ 表示。

均匀流体的重度

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-5)$$

式中 γ ——流体的重度(N/m³);

G ——流体的重量(N);

V ——流体的体积(m³).

对于各点处的重度不同的非均匀流体，按式(1-5)计算的只是流体的平均重度。某一点处的重度应为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-6)$$

式中 dG ——流体中某微元体的重量(N);

dV ——流体中某微元体的体积(m³).

在地球重力场的条件下，流体的密度和重度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-7)$$

式中 g 为当地的重力加速度(m/s²).

几种常见的液体的物理性质见表 1-1.

表 1-1 几种常见液体在标准大气压力下的物理性质

液 体	温 度 ℃	密 度 ρ	比 重 S	粘 度 $\mu \times 10^4$ N·s/m ²	表面张力 σ N/m	蒸发压力 P_v kN/m ²	弹性模数 $E_v \times 10^{-6}$ N/m ²
苯	20	895	0.90	6.5	0.029	10.0	1 030
四氯化碳	20	1 588	1.59	9.7	0.026	12.1	1 100
原 油	20	856	0.86	72	0.03	—	—
汽 油	20	678	0.68	2.9	—	55	—
甘 油	20	1 258	1.26	14 900	0.063	0.000 014	4 350
氢	-257	72	0.072	0.21	0.003	21.4	—
煤 油	20	808	0.81	19.2	0.025	3.20	—
氧	-195	1 206	1.21	2.8	0.015	21.4	—
水 银	20	13 550	13.56	15.6	0.51	0.000 17	26 200
水	20	998	1.00	10.1	0.073	2.34	2 070

【例 1-1】 若水的重度是 9.81kN/m³，水银的比重为 13.55，求水的密度以及水银

的重度和密度。

解 水的密度 $\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{9.81}{9.81} = 1.00 \text{ t/m}^3$; 水银的重度 $\gamma = S\gamma = 13.55 \times 9.81 = 132.93 \text{ kN/m}^3$; 水银的密度 $\rho = S\rho = 13.55 \times 1.00 = 13.55 \text{ t/m}^3$ 。

对由几种气体组成的混合气体的重度可按下式计算

$$\gamma = \gamma_1 a_1 + \gamma_2 a_2 + \dots + \gamma_n a_n \quad \text{N/m}^3 \quad (1-8)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——混合气体中各组分气体的重度 (N/m^3);

a_1, a_2, \dots, a_n ——混合气体中各组分气体所占的体积分数, 它们的总和应等于1。

或

$$\gamma = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n G_i \quad \text{N/m}^3 \quad (1-9)$$

式中 G_i ——混合气体中组分气体各自的重量 (N);

V ——混合气体的总体积 (m^3)。

§ 1-3 流体的压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压力增加时, 流体所占有的体积将缩小, 这种特性称为流体的压缩性。通常用体积压缩系数 β_p 来表示。 β_p 指的是在温度不变时, 压力每增加一个单位, 单位体积流体的体积变化量, 即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \left(\frac{\Delta V}{\Delta P} \right)_T \quad \text{m}^2/\text{N} \quad (1-10)$$

负号表示压力增加时体积缩小。

式中 ΔP ——压力增高量 (N/m^2);

ΔV ——体积的变化量 (m^3);

V ——流体原来的体积 (m^3)。

0℃ 时水的压缩系数见表 1-2。

表 1-2

压力 $\times 10^5 \text{ Pa}$	4.90	9.81	19.61	39.23	78.45
压缩系数 $\beta_p \times 10^{-9} \frac{1}{\text{Pa}}$	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

温度变化时, 流体的体积也随之变化。温度升高, 体积膨胀, 这种特性称为流体的膨胀性, 用温度膨胀系数 β_t 来表示。 β_t 是指当压力保持不变、温度升高 1K 时, 单位体积流体的体积增加量。即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \left(\frac{\Delta V}{\Delta T} \right)_p \quad (1-11)$$

式中 β_t —— 流体的温度膨胀系数 (1/K);

ΔT —— 流体温度的增加值(K).

水的温度膨胀系数 β_t 值见表 1-3.

表 1-3

压力 \ 温度 K $\times 10^5 \text{ Pa}$	274—283	283—293	313—323	333—343	363—373
0.981	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
98.1	0.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
196.2	0.72×10^{-4}	1.83×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.39×10^{-4}	—

由表 1-2 和 1-3 可以看出, 水的压缩系数和膨胀系数很小, 其它的液体也有类似的特性. 所以, 工程上一般不考虑它们的压缩性或膨胀性. 但当压力、温度的变化比较大时 (如在高压锅炉中), 就必须考虑它们了.

对于气体, 它不同于液体, 压力和温度的改变对气体密度或重度的变化影响很大. 在热力学中是用气体状态方程来描述它们之间的关系的. 理想气体的状态方程式为

$$p\nu = RT \quad (1-12)$$

对空气来说, $R = 287(\text{N} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{K}))$.

式(1-12)也可写成

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-13)$$

或

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{RT}{g} \quad (1-14)$$

当气体温度不变时, 式(1-12)至(1-14)变为

$$\left. \begin{aligned} p\nu &= \text{常数}, & \text{即 } p_1\nu_1 &= p_2\nu_2 \\ p/\rho &= \text{常数}, & \text{即 } p_1/\rho_1 &= p_2/\rho_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式(1-15)表明: 在温度不变时, 单位质量理想气体的体积和压力成反比, 而它的密度与压力成正比, 此即波义耳(Boyle)定律.

当气体的压力保持不变时, 式(1-12)至(1-14)可写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\nu}{T} &= \text{常数}, & \text{即 } \frac{\nu_1}{T_1} &= \frac{\nu_2}{T_2} \\ \gamma T &= \text{常数}, & \text{即 } \gamma_1 T_1 &= \gamma_2 T_2 \\ \rho T &= \text{常数}, & \text{即 } \rho_1 T_1 &= \rho_2 T_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

如果单位质量气体在 273K 时的体积为 V_0 , 温度升高 ΔT K 后其体积为 V_t , 则有

$$\begin{aligned} \frac{V_0}{273} &= \frac{V_t}{273 + \Delta T} \\ V_t &= V_0 \frac{273 + \Delta T}{273} \end{aligned} \quad (1-17)$$

根据膨胀系数的定义

$$V_t = V_0 + \Delta V = V_0 + V_0 \beta_t \Delta T = V_0 (1 + \beta_t \Delta T) \quad (1-18)$$

将式(1-18)代入式(1-17)可得

$$\beta_t = \frac{1}{273K}$$

由此可见,在压力不变时,一定质量气体的体积随温度升高而膨胀,温度每升高1K,体积便增加273K时体积的 $\frac{1}{273}$ 。此即盖·吕萨克定律。

若气体的变化过程既不向外散热,又没有热量输入,即绝热过程,由热力学可得

$$p v^k = \text{常数} \quad (1-19)$$

将式(1-19)与式(1-12)联立可得

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-20)$$

式中 T_1, T_2 ——变化前后的温度(K);

v_1, v_2 ——变化前后的比容(m^3/kg);

p_1, p_2 ——变化前后的压力(N/m^2);

k ——绝热指数, $k = C_p / C_v$ 。

对于空气和多原子气体,在通常温度下,可取 $k = 1.4$ 。常见气体的一些物理性质见表 1-4。

表 1-4 几种常见气体在标准海平面和 20℃ 时的物理性质

气 体	化学符号	分子量	密 度 ρ kg/m ³	粘 度 $\mu \times 10^5$ $\frac{N \cdot s}{m^2}$	气体常数 R $\frac{N \cdot m}{kg \cdot K}$	比 热 C_p $\frac{N \cdot m}{kg \cdot K}$	比 热 C_v	绝热系数 $k = C_p / C_v$
空 气		29.0	1.205	1.80	287	1 003	716	1.40
二氧化碳	CO ₂	44.0	1.84	1.48	188	858	670	1.28
一氧化碳	CO	28.0	1.16	1.82	297	1 040	743	1.40
氦	He	4.0	0.166	1.97	2 077	5 220	3 143	1.66
氢	H ₂	2.02	0.083 9	0.90	4 120	14 450	10 330	1.40
甲 烷	CH ₄	16.0	0.668	1.34	520	2 250	1 730	1.30
氮	N ₂	28.0	1.16	1.76	297	1 040	743	1.40
氧	O ₂	32.0	1.33	2.00	260	909	649	1.40
水蒸气	H ₂ O	18.0	0.747	1.01	462	18 620	1 400	1.33

需要指出:在一般情况下,流体的压缩系数和膨胀系数都很小。对于能够忽略其压缩性的流体称为不可压缩流体。不可压缩流体的密度和重度均可看作常数。反之,对于压缩系数和膨胀系数比较大,不能被忽略,或密度和重度不能看成常数的流体称为可压缩流体。