

# 流体力学与 热工基础

(第2版)

陈 礼 编著

清华大学出版社



# 流体力学与 热工基础

(第2版)

陈 礼 编著

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

《流体力学与热工基础》内容涉及工程热力学、流体力学及传热学三大部分。工程热力学篇包括热力学基本概念、基本定律、水蒸气、蒸汽动力循环、制冷循环和湿空气。流体力学篇包括流体静力学与动力学基础、能量损失与管路计算基础。传热学篇介绍导热、对流换热、辐射换热、传热过程与换热器。对流换热重点介绍在相似理论指导下合理使用特征数关联式计算待定特征数及表面传热系数。

根据高职教育教学的研究与实践,本书对如何适应高职学生特点进行了有益的探索与尝试,并在撰写方面形成一定特色。

本书可作为高职高专制冷空调技术及热能动力专业教材,学时数为90~100,亦可供相关专业的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学与热工基础/陈礼编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2012.5

ISBN 978-7-302-28117-7

I. ①流… II. ①陈… III. ①流体力学—高等职业教育—教材 ②热工学—高等职业教育—教材  
IV. ①O35 ②TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 033570 号

责任编辑:杨倩 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.75 字 数:351千字

版 次:2002年8月第1版 2012年5月第2版 印 次:2012年5月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.00元

产品编号:044682-01

# 前言

## FOREWORD

高职教育的核心是培养学生胜任岗位群工作的职业能力,而必要的知识是能力训练的基础,是提升能力的养分。因此,专业基础课在专业教育中占有重要地位。

高职高专制冷空调技术与热能动力专业在优化教学内容、构建课程体系的时候一般都设置了“流体力学与热工基础”这门综合性的专业基础课,涉及传统的工程热力学、流体力学及传热学三门课程的相关内容。为此,清华大学出版社于2002年出版了高职高专教材《流体力学与热工基础》。到2011年2月,此书共印刷了6次。为满足需求,适应发展,特将此书修订后再版。

教材要体现课程改革的思路与成果。高职高专教材在注重内容对专业课及能力需求的针对性的同时,要特别注重撰写风格对学生特点的适应性。

再版教材的调整与修改集中在热力学及流体力学部分,要点如下。

(1) 对概念较多的章节,如“热力学基本概念”及“湿空气”等做了进一步的梳理,使条理和层次更为清晰。

(2) “蒸汽动力循环”单独列为一章,但又将两次回热循环改为一次回热循环。既注意了教材的适用范围,又简化了问题、突出了本质。

(3) “孤立系统的熵增”引入了熵流和熵产。感觉只有这样才能将闭口系统的熵变解释清楚。

(4) “制冷循环”删除了循环在  $T-s$  图上的表述,直接从制冷剂的压焓图入手,利用压焓图介绍蒸气压缩制冷循环的过程和原理,更加简单明了。

(5) 原“流体性质及基本知识”及“一元流体动力学基础”合并为“流体静力学及动力学基础”一章,从流体机械能守恒引出静压力分布和稳定流能量方程,突出了重点,逻辑性好像也更强一些。

(6) 对流换热的相似理论部分作了调整。在抓住本质的基础上层层递进,最后落实到特征数关联式的意义、作用及推广应用。文字描述更加简略,但概念更为清晰,逻辑性也更强,相信更容易理解和掌握。

(7) 增加了重点内容的例题,删减了非重点部分的例题。全书依然保持简洁与深入浅出的特点。

(8) 附录部分增加了1个附表和3个附图,使用起来更为方便。

再版教材仍采用我国法定计量单位,物理量名称和符号符合国家标准的统一规定。

本书可供高职高专制冷与空调技术及热能动力专业使用,适用学时数为90~100。亦可供相关专业的工程技术人员参考。

本书2002年版由顺德职业技术学院陈礼教授与五邑大学吴勇华副教授合编,陈礼教授主编,吴勇华副教授编写了工程热力学篇的初稿,陈礼教授对该篇初稿作了较大的修改,同时完成了流体力学篇、传热学篇的编写及全书的统稿工作。再版教材的修订由陈礼教授承担并完成。

编者对五邑大学吴勇华副教授在2002年版编写中所做的工作表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,谬误与疏漏之处敬请批评指正,在此先表谢意。

编 者

2011年11月

# 主要符号

## 英文字母

$a$	热扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$
$A$	面积, $\text{m}^2$
$c$	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_f$	流体速度, $\text{m}/\text{s}$
$c_p$	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_v$	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C_m$	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$d$	直径, $\text{m}$ ; 含湿量, $\text{kg}/\text{kg}$ (干空气)
$d_e$	当量直径
$e$	比总能量, $\text{J}/\text{kg}$
$E$	总能量, $\text{J}$ ; 辐射力, $\text{W}/\text{m}^2$
$E_b$	黑体辐射力, $\text{W}/\text{m}^2$
$E_k$	宏观动能, $\text{J}$
$E_p$	宏观位能, $\text{J}$
$g$	重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$
$G$	辐射能, $\text{J}$
$G_p$	反射辐射能, $\text{J}$
$G_a$	吸收辐射能, $\text{J}$
$G_t$	透射辐射能, $\text{J}$
$h$	比焓, $\text{J}/\text{kg}$ ; 表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 深度, $\text{m}$
$h_l$	水头损失, $\text{m}$
$h_f$	沿程水头损失, $\text{m}$
$h_m$	局部水头损失, $\text{m}$
$H$	焓, $\text{J}$ ; 高度, $\text{m}$ ; 流体机械输入或输出能量水头, $\text{m}$
$J$	有效辐射, $\text{W}/\text{m}^2$
$K$	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 管壁粗糙高度, 当量糙粒高度, $\text{m}$
$l$	长度, $\text{m}$ ; 特征长度, $\text{m}$
$m$	质量, $\text{kg}$
$M$	摩尔质量, $\text{kg}/\text{mol}$
$n$	多变指数
$p$	压力, $\text{Pa}$
$p_b$	大气压力, $\text{Pa}$

$p_e$	表压力, $\text{Pa}$
$p_v$	真空度, $\text{Pa}$ ; 水蒸气分压力, $\text{Pa}$
$p_s$	饱和压力, $\text{Pa}$
$p_l$	压力损失, $\text{Pa}$
$q$	比热量, $\text{J}/\text{kg}$ ; 热流密度, $\text{W}/\text{m}^2$
$q_m$	质量流量, $\text{kg}/\text{s}$
$q_v$	体积流量, $\text{m}^3/\text{s}$
$Q$	热量, $\text{J}$
$r$	半径, $\text{m}$ ; 汽化潜热, $\text{J}/\text{kg}$
$R$	通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ; 半径, 水力半径, $\text{m}$ ; 热阻, $\text{K}/\text{W}$
$s$	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 管间节距, $\text{m}$
$S$	熵, $\text{J}/\text{K}$
$S_h$	液体管道阻抗, $\text{s}^2/\text{m}^5$
$S_g$	气体管道阻抗, $\text{kg}/\text{m}^7$
$t$	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
$t_d$	露点温度, $^{\circ}\text{C}$
$t_w$	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
$t_s$	饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
$T$	热力学温度, $\text{K}$
$u$	比热力学能, $\text{J}/\text{kg}$ ; 速度, $\text{m}/\text{s}$
$U$	热力学能, $\text{J}$
$v$	比体积, $\text{m}^3/\text{kg}$ ; 速度, 平均速度, $\text{m}/\text{s}$
$V$	体积, $\text{m}^3$
$V_m$	摩尔体积, $\text{m}^3/\text{mol}$
$w$	比膨胀功, $\text{J}/\text{kg}$
$w_s$	比轴功, $\text{J}/\text{kg}$
$W$	膨胀功, $\text{J}$
$W_s$	轴功, $\text{J}$
$x$	干度; 笛卡儿坐标
$X$	角系数
$y, z$	笛卡儿坐标

## 希腊字母

$\alpha$	体胀系数, $1/\text{K}$ ; 动能修正系数; 吸收率
$\beta$	压缩率, $\text{m}^2/\text{N}$
$\chi$	湿周



$\delta$	厚度, m
$\varepsilon$	压缩比; 制冷系数; 发射率
$\varepsilon'$	供热系数
$\varphi$	相对湿度
$\Phi$	热流量, W
$\Phi_l$	单位长度圆筒壁传递的热流量, W/m
$\gamma$	比热容比
$\eta$	效率; [动力]粘度, Pa·s
$\eta_f$	肋片效率
$\kappa$	绝热指数
$\lambda$	热导率, W/(m·K); 沿程阻力系数
$\nu$	运动粘度, m <sup>2</sup> /s
$\theta$	管道扩张角; 阀门转角
$\rho$	密度, kg/m <sup>3</sup>

$\sigma$	斯蒂芬-玻耳兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8}$ W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$\tau$	切应力
$\zeta$	局部阻力系数

### 特征数

$Gr = \frac{g\alpha\Delta tl^3}{\nu^2}$	格拉晓夫数
$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$	伽利略数
$Nu = \frac{hl}{\lambda}$	努塞尔特数
$Pr = \frac{\nu}{a}$	普朗特数
$Re = \frac{vl}{\nu}$	雷诺数

# 目录

## CONTENTS

### 第一篇 工程热力学

<b>第 1 章 热力学基本概念</b> .....	3
1.1 工质与热源 .....	3
1.2 热力系统 .....	3
1.3 热力状态与状态参数 .....	4
1.4 理想气体状态方程 .....	6
1.5 准平衡过程与可逆过程 .....	8
1.6 功量和热量.....	10
1.7 气体的比热容.....	11
思考题 .....	14
习题 .....	14
<b>第 2 章 热力学基本定律</b> .....	15
2.1 热力学第一定律.....	15
2.2 开口系统稳定流动能量方程式.....	18
2.3 理想气体的热力过程.....	22
2.4 热力学第二定律.....	27
2.5 孤立系统的熵增原理.....	31
思考题 .....	33
习题 .....	34
<b>第 3 章 水蒸气</b> .....	36
3.1 水蒸气的产生过程.....	36
3.2 蒸汽图表及其应用.....	39
思考题 .....	42



习题 .....	43
<b>第4章 蒸汽动力循环 .....</b>	<b>44</b>
4.1 朗肯循环.....	44
4.2 回热循环.....	46
4.3 再热循环.....	49
思考题 .....	50
习题 .....	50
<b>第5章 制冷循环 .....</b>	<b>51</b>
5.1 蒸气压缩制冷循环.....	51
5.2 热泵循环.....	55
5.3 吸收式制冷循环.....	56
思考题 .....	57
习题 .....	57
<b>第6章 湿空气 .....</b>	<b>58</b>
6.1 湿空气的性质.....	58
6.2 湿空气的焓湿图.....	62
6.3 湿空气的热力过程.....	64
思考题 .....	67
习题 .....	67

## 第二篇 流体力学

<b>第7章 流体静力学与动力学基础 .....</b>	<b>71</b>
7.1 流体的主要物理性质.....	71
7.2 流体的机械能守恒.....	74
7.3 流体静压力分布规律.....	76
7.4 流体动力学基本方程.....	79
7.5 基本方程式的应用.....	85
思考题 .....	89
习题 .....	89
<b>第8章 能量损失与管路计算基础 .....</b>	<b>92</b>
8.1 沿程损失和局部损失.....	92
8.2 两种流态与圆管内的流动.....	94
8.3 圆管的沿程损失计算.....	95
8.4 局部损失计算 .....	104

8.5 管路计算基础 .....	111
思考题 .....	115
习题 .....	116

### 第三篇 传 热 学

<b>第 9 章 导热</b> .....	121
9.1 导热的基本定律 .....	121
9.2 平壁的稳定导热 .....	124
9.3 圆筒壁的稳定导热 .....	128
思考题 .....	131
习题 .....	131
<b>第 10 章 对流换热</b> .....	134
10.1 对流换热及牛顿公式 .....	134
10.2 相似理论 .....	137
10.3 强制对流换热 .....	141
10.4 流体外掠物体强制对流换热 .....	146
10.5 自然对流换热 .....	152
10.6 凝结和沸腾换热 .....	154
思考题 .....	159
习题 .....	159
<b>第 11 章 辐射换热</b> .....	161
11.1 热辐射的基本概念 .....	161
11.2 物体表面间的辐射换热 .....	163
思考题 .....	171
习题 .....	172
<b>第 12 章 传热过程与换热器</b> .....	173
12.1 传热过程与强化传热 .....	173
12.2 换热器 .....	181
思考题 .....	189
习题 .....	190
<b>附录 A</b> .....	192
表 A-1 常用气体的平均比定压热容 $c_p  _{t_0}^t$ .....	192
表 A-2 常用气体的平均比定容热容 $c_v  _{t_0}^t$ .....	193

表 A-3	饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按温度排列)	194
表 A-4	饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按压力排列)	197
表 A-5	未饱和水与过热水蒸气的热力性质	201
表 A-6	氨(NH <sub>3</sub> )饱和液与饱和蒸气的热力性质	208
表 A-7	氟利昂12(CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )饱和液与饱和蒸气的热力性质	210
表 A-8	HFC134a 饱和液与饱和蒸气的热力性质(按温度排列)	210
表 A-9	金属材料的密度、比热容和热导率	212
表 A-10	保温、建筑及其他材料的密度和热导率	214
表 A-11	几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	215
表 A-12	干空气的热物理性质( $p=1.01325 \times 10^5$ Pa)	216
表 A-13	饱和水的热物理性质	217
表 A-14	干饱和水蒸气的热物理性质	218
表 A-15	一些气体的摩尔质量、气体常数、低压下的比热容和摩尔热容	219
表 A-16	大气压( $p=1.01325 \times 10^5$ Pa)下过热水蒸气的热物理性质	219
表 A-17	物体表面热辐射的发射率	220
表 A-18	大气压( $p=1.01325 \times 10^5$ Pa)下烟气的热物理性质	221
图 A-1	湿空气的 $h-d$ 图(压力 $p=0.1$ MPa)	222
图 A-2	氨(R717)压焓图	223
图 A-3	R12 压焓图	224
参考文献		225

# 第一篇

## 工程热力学

自然界的能源中热能的利用最为普遍。热能是指煤、石油、天然气等燃料燃烧产生的热所具有的能量。据统计,目前我国利用的能源中热能占了90%以上。世界上其他国家也平均超过了85%,可见热能的利用多么普遍。

热能最直接的应用是加热,利用燃料燃烧产生的热来做饭、取暖、烘干、烧制陶瓷砖瓦、冶炼等。这是热能利用的初级阶段,也是早期热能利用的唯一途径。热能的直接利用目前也依然存在。

热能的间接利用是提供动力。蒸汽机的出现开创了热能利用的新纪元:通过蒸汽机将热能转换为机械能以推动机器、汽车、火车、轮船。热能转换提供的动力代替了人力、畜力,极大地促进了生产力的发展。人类从此进入了工业化时代。对于工业生产,热能的动力利用是一种价值更高、前景更为广阔的利用途径。这是热能利用的高级阶段。

热能转换产生的机械能拖动发电机又可产生电能,电能的生产主要借助于热能的动力利用。

人类社会发展的历史与热能的利用息息相关。目前,实现热能与机械能转换的热机,已从蒸汽机发展到蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机以及喷气发动机等,热能转换的效率得到提升,热能动力利用的价值也就更大。

制冷装置,如空调、冰箱,其工作过程与热机相反。最常见的蒸气压缩制冷装置以消耗机械能为代价,将热量从低温热源转移到高温热源,以实现人工制冷。制冷过程涉及机械能向热能的转换。

热能动力利用的核心是能量形式的转变。因此,能量转换的规律受到普遍的关注。热力学从而得到快速发展。热能的动力利用与热力学实际上是相互促进,共同发展的。另一个受到关注的问题是热机的效率。无论何种热机,在实现热能与机械能的转变过程中总有较大份额的能量不能利用而被损失掉,热机的热效率也就不高。早期蒸汽机的热效率只有1%~2%,现代燃气轮机的热效率也不过40%左右。

为了有效地实现热能与机械能的转换,提高热机的热效率,就必须熟悉、掌握和研究能量转换的规律。

热力学是研究与热现象有关的能量转换规律的一门科学,工程热力学是从工程的角度出发,分析和研究热能与机械能之间相互转换的学科。

工程热力学的主要内容包括基本概念、基本定律,如系统、参数,热力学第一定律与第二定律。这些内容是工程热力学的理论基础。而热能与机械能的转换是通过工作介质在热机或制冷装置中的状态变化过程,以及由若干过程组成的循环来实现的。因此,工作介质的性质、状态变化过程和循环的分析与热力计算也是工程热力学研究的重要内容。

工程热力学采用宏观研究方法,不涉及工质的微观结构和微观行为。工程热力学也经常采用抽象、概括、理想化和简化的方法。比如将空气、锅炉烟气、内燃机燃气视为理想气体,简化了计算又维持了工程计算的精度。简化与抽象的实质是突出主要矛盾,忽略次要因素,从而更全面、更深刻地反映客观规律。学习热力学要能适应这种方法。

# 热力学基本概念

## 1.1 工质与热源

电能生产过程中热能首先转换为机械能,再转换为电能。热能与机械能的转换以水蒸气为媒介。水蒸气是热能的载体,水蒸气在汽轮机中膨胀做功,驱动汽轮机,实现了热能与机械能的转换。制冷装置的能量转换也要借助氨、氟利昂等制冷剂。热能与机械能相互转换所借助的媒介物质称为工质。工质必须具有良好的流动性和与其工作相适应的热力性能。

具有无限大热容量的系统在热力学中称为热源。无限大热容量是指在放出或吸收有限热量时工质温度没有明显的变化。根据温度的高低,热源又可分为高温热源和低温热源。夏天室内温度较室外温度低,室内称为低温热源,室外称为高温热源;冬天则刚好相反。

## 1.2 热力系统

根据研究工作的需要,选取某一范围内的工质作为研究对象,以研究其热力学规律,这种研究对象称为热力系统,简称系统,如图 1-1 所示。系统是为了研究的需要而人为定义的。系统之外的物体统称为外界或环境。系统与外界的分界面称为边界或界面。系统与外界之间的分界面可以是真实的,也可以是假想的。图 1-1(a)中取气体工质为系统时,汽缸内壁和活塞内壁是真实存在的界面;图 1-1(b)中进口截面与出口截面便是假想的界面。界面可以是固定不变的,也可以是变动的,图 1-1(a)中当活塞移动时发生变化的界面是变动的。

一般来说,系统与外界总是处于相互作用之中,彼此之间可能进行能量和质量交换,按系统与外界进行能量和质量交换的情况可将系统分为以下几种。

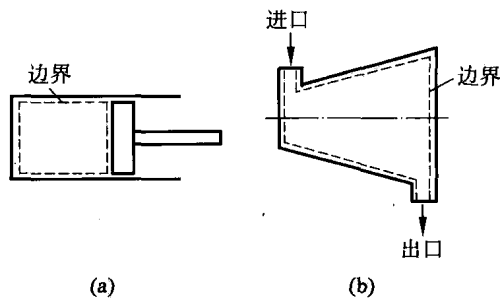


图 1-1 热力系统

(a) 闭口系统; (b) 开口系统

(1) **闭口系统** 系统与外界无物质交换,或者说没有物质穿过边界,系统内的物质总量保持恒定不变。图 1-1(a)所示就是闭口系统。

(2) **开口系统** 系统与外界有物质交换,或者说有物质穿过边界,系统内的物质总量可以保持恒定或发生变化。图 1-1(b)所示为开口系统,运行中工质不断地流进流出。

(3) **绝热系统** 系统与外界无热量交换,但可以有功量和质量等交换。

(4) **孤立系统** 系统与外界既无能量(包括功量和热量)交换又无质量交换。

自然界中的物质都是相互联系、相互制约和相互作用的,绝对的绝热系统和孤立系统并不存在。但若系统与外界的热量、功量、质量的交换甚小,其影响可忽略不计,就可以将这样的系统视为绝热系统或孤立系统。

## 1.3 热力状态与状态参数

### 1.3.1 工质热力状态

**热力状态**是指某一瞬间系统工质所呈现的宏观物理状况,热力状态又简称为**状态**。状态通过物理量的描述而变得形象、具体。用以描述工质状态的宏观物理量称为**状态参数**。主要的状态参数是温度、压力和比体积。

最值得关注的状态是平衡状态。所谓**平衡状态**是指在**没有外界作用(重力场除外)**的条件下,系统的**状态参数不随时间而改变的状态**。无外界作用是指系统与外界没有热和功的交换。而系统的平衡包括力平衡和热平衡两个方面。系统处于力平衡时,各部分工质压力相等,不发生相对位移。系统处于热平衡时各部分工质之间没有热量传递,温度均匀一致。于是工质内部就有统一而确定的温度、压力和其他状态参数。只有处于平衡状态时状态参数才能确定且有意义。当系统处于非平衡态时,工质各部分温度、压力不等,无法用统一的参数进行描述。

### 1.3.2 基本状态参数

热力学常用的状态参数有温度、压力、比体积、焓、熵等。而温度、压力和比体积是三个可以直接测量的物理量,称为**基本状态参数**。

#### 1. 温度

**温度**是物体冷热程度的标志。按分子热运动学说,对于气态工质,温度是气体大量分子平均移动动能的量度。气体分子平均移动动能大,温度就高;反之则低。

当两个温度不同的物体相互接触,它们之间将发生热量传递,经过一段时间后,两者温度相等就不再有热量传递,达到一个共同的热平衡状态。温度概念的建立以及温度的测定都是以热平衡为依据的。当温度计与被测物体达到热平衡时,温度计指示的温度就是被测物体的温度。

衡量温度的标尺叫**温标**。在国际单位制中,温度测量采用热力学温标,所确定的温度称

为热力学温度,其符号为  $T$ ,单位为 K。热力学温标取水的三相点为基本定点,并定义其温度为 273.16K。1K 等于水的三相点热力学温度的  $1/273.16$ 。

与热力学温标并用的还有摄氏温标,所确定的温度称为摄氏温度,符号为  $t$ ,单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标每  $1^{\circ}\text{C}$  与热力学温标每 1K 的大小相等,但两者的起始点不同,摄氏温标的  $0^{\circ}\text{C}$  是在一个物理大气压下纯水的冰点,其热力学温度为 273.15K,比水的三相点的热力学温度低 0.01K。

摄氏温度与热力学温度之间的关系为

$$T = 273.15 + t \quad (1-1)$$

## 2. 压力

垂直作用在单位面积上的力称为压力,用符号  $p$  表示。按分子热运动学说,气体的压力是气体的大量分子向容器壁面撞击所产生的平均结果。若气体作用在面积为  $A$  的容器壁面上的垂直作用力为  $F$ ,那么该壁面上的压力为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-2)$$

在国际单位制中,压力的单位为 Pa,  $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。而  $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ , kg 为质量单位。工程上 Pa 的单位太小,常采用 kPa 和 MPa,它们之间的换算关系为

$$1\text{kPa} = 10^3\text{Pa}$$

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

工程中有时也用到其他单位制的压力单位,如 bar(巴)、mmH<sub>2</sub>O、mmHg、atm(标准大气压)、at(工程大气压)等。它们之间的换算关系为

$$1\text{mmH}_2\text{O} = 9.81\text{Pa}$$

$$1\text{mmHg} = 133.3\text{Pa}$$

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa} = 0.1\text{MPa}$$

$$1\text{at} = 0.981\text{bar} = 735.6\text{mmHg}$$

$$1\text{atm} = 1.01325\text{bar} = 1.0332\text{at} = 760\text{mmHg}$$

压力通常用各种压力计来测定。而压力计本身处于大气压力  $p_b$  作用下,如图 1-2 所示。当容器内气体的压力大于大气压力  $p_b$  时,压力计测得的压力是容器内的压力与外界大气压力  $p_b$  的差值,是一个相对压力,称为表压力,用符号  $p_e$  表示。而容器内工质的实际压力称为绝对压力,用符号  $p$  表示,则表压力应为

$$p_e = p - p_b \quad (1-3)$$

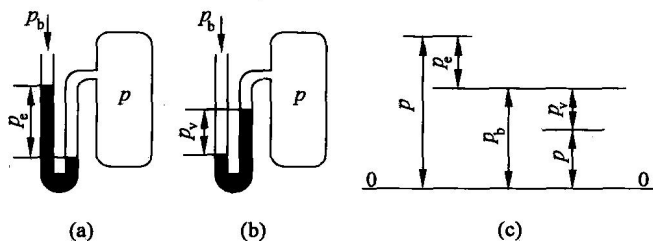


图 1-2 各种压力关系图



当容器内气体实际压力低于大气压力  $p_b$  时,压力计上测得的压力称为真空度,用  $p_v$  表示,则

$$p_v = p_b - p \quad (1-4)$$

在工程计算中,为简便起见,常把大气压力  $p_b$  近似地当作 0.1MPa 来处理,这在计算较高压力时误差很小。但在计算低压力时,特别是在计算真空度时,就会引起较大误差。

**例 1-1** 已知两系统内表压力分别为 0.015MPa 和 1.5MPa,当时气压计的读数为 101325Pa,试计算两系统的绝对压力。

**解** 已知两系统的表压力分别为

$$p_{e1} = 0.015\text{MPa}, \quad p_{e2} = 1.5\text{MPa}$$

气压计读数为

$$p_b = 0.1013\text{MPa}$$

所以两系统的绝对压力分别为

$$p_1 = p_{e1} + p_b = 0.1163(\text{MPa})$$

$$p_2 = p_{e2} + p_b = 1.6013(\text{MPa})$$

### 3. 比体积与密度

比体积指单位质量的工质所占有的体积,用符号  $v$  表示,单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。若质量为  $m$  的气体,占有的体积为  $V$ ,则比体积为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

单位体积物质的质量称为密度,用符号  $\rho$  表示,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。若体积为  $V$  的气体,具有的质量为  $m$ ,则密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

显然,比体积和密度互为倒数,即

$$\rho v = 1 \quad (1-7)$$

## 1.4 理想气体状态方程

系统的平衡状态用状态参数来描述,表示基本状态参量之间函数关系的方程称为状态方程。

某些气体在质量为定值的情况下,三个基本状态参量之间的关系可由物理学的玻意耳-马利奥特定律、盖·吕萨克定律和查理定律说明。综合这些定律可以得到如下关系式:

$$pv = R_g T \quad (1-8)$$

式中,  $p$  ——气体的绝对压力, Pa;

$T$  ——气体的热力学温度, K;

$v$  ——气体的比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$R_g$  ——气体常数,与气体的性质有关,而与气体的状态无关。对于同一种气体,  $R_g$  为一个常数,不同气体的气体常数值不同。其单位为  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

上式仅适用于 1kg 质量的气体。状态参量满足上式的气体称为理想气体,式(1-8)称