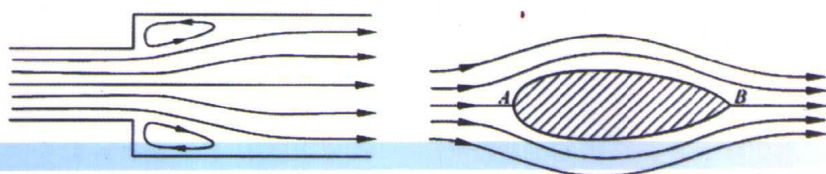




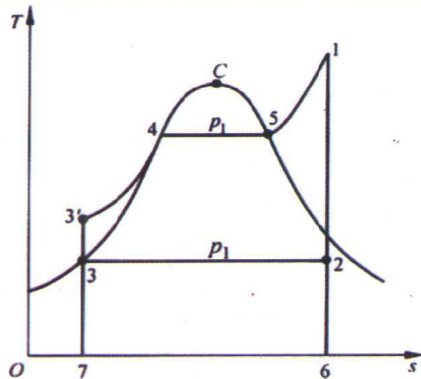
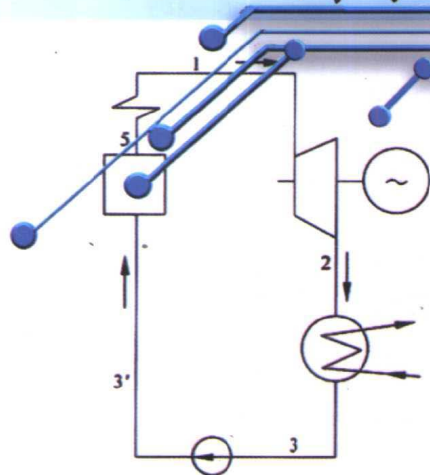
陈礼 吴勇华 编著



流体力学与热工基础

机电类系列教材

高等职业教育



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

高等职业教育机电类系列教材

流体力学与热工基础

陈 礼 吴勇华 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

从高等职业技术教育的特点出发,制冷工程专业通常把传统的热力学、流体力学和传热学的相关部分优化组合成为一门综合性的专业基础课。《流体力学与热工基础》是为这门课程编写的教材。本书内容包含了上述三大部分,每一部分的内容力求精练。工程热力学篇包括基本概念、热力学基本定律、水蒸气、制冷循环和湿空气。流体力学篇包括静力学基础、流体动力学基本方程以及能量损失和管路计算。传热学篇介绍导热、对流、辐射和传热过程与换热器。对流换热着重介绍在相似理论指导下利用特征数关联式对换热过程进行计算。

本书由重庆大学博士导师曾丹苓教授主审。

本书可作为高职高专制冷工程、热能工程等相关专业教材,学时数约 90~100。亦可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学与热工基础/陈礼等编著. —北京:清华大学出版社,2002

高等职业教育机电类系列教材

ISBN 7-302-05608-0

I. 流… II. 陈… III. ①流体力学—高等学校;技术学校—教材②热工学—高等学校;技术学校—教材 IV. ①O35 ②TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 043222 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京密云胶印厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:336千字

版次:2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-05608-0/TK·27

印数:0001~5000

定 价:19.80 元

序

随着经济的发展和科技的进步,人民的物质生活、文化生活水平不断提高,冰箱与空调大量进入寻常百姓家。现代化的工农业生产和科学研究也广泛使用了环境控制系统。制冷设备已经成为现代社会中人类生活和工作必不可少的装置,从而推动了制冷工业的迅速发展。

制冷企业对工程技术人员和管理人员提出了更高的要求。既懂理论又能使理论与实践相结合,解决生产第一线实际问题的技术应用性专门人才倍受企业的青睐。为满足社会的需求,为适应经济的发展,高等职业技术教育应运而生、蓬勃发展。高等职业技术教育的教材建设就显得十分重要,十分紧迫。顺德职业技术学院陈礼教授在这方面进行了积极而有益的探索,他主编的《流体力学与热工基础》是高等职业教育制冷工程专业有价值的基础理论教材。

制冷专业的基础理论包括工程热力学、流体力学和传热学三部分内容。目前,国内各高校使用的教材版本虽多,但大多是为本科教育编写的,分为三门课程。一方面总学时数偏多,另一方面偏重于学科教育,不能满足高职教育的需要。陈礼教授从传统的三门课程中精心选择出所需内容,优化组合而成这本教材,既满足了高职制冷工程专业教学的需要,又是一种具有创新意义的尝试。

《流体力学与热工基础》从内容到编写有如下特色:

1. 全书编写目标明确,内容的选取和编排既满足了专业的需要又体现了高职教育的特点;既包括了应有的理论知识,为专业课学习打下基础,又能满足一般的工程应用。能够较好地适应高职制冷工程专业的教学需要。

2. 书中对部分微分方程的建立,部分公式的繁琐推导着墨不多,偏重于对基本概念、基本理论和基本计算的理解和应用。与此同时,全书保持了清晰的思路,简略的线条和较强的系统性。与本科教材相比,有别开生面、清新朴实的感觉。

3. 全书以工程应用为主线,理论阐述简明扼要,每一部分理论之后都有联系工程实际的例题,使读者能学以致用,理论联系实际,同时加深对理论的理解。

4. 内容丰富,有较强的针对性和实用性。比如对流换热部分编入了较多的、有实用价值的相似特征数关联式,能够满足一般的工程计算。附录中收集了较多的数据,以供读者参考。

ABD67/67

5. 全书选材精练,分量适度,内容阐述正确,结构严谨,行文流畅,通俗易懂,除可作教材之外,对从事制冷工程、热能工程的工程技术人员也有重要的参考价值。

高等职业技术教育在我国兴起的时间还不长,高职教育教材建设的任务依然非常繁重,《流体力学与热工基础》在高职教育教材建设方面迈出了可喜的一步。我们衷心祝愿高等职业技术教育繁荣昌盛,也期待着更多的优秀教材面世。

重庆市制冷学会理事长 童明伟
重庆大学教授,博士导师

2001年11月15日

前 言

高等职业技术教育旨在培养生产第一线的高等技术应用性专门人才,这种人才应具有较强的应用多种知识和技能解决现场实际问题的能力。高等职业技术教育的课程设置有教材编写应体现上述特色,从而为实现培养目标服务。为此,2000年4月深圳职业技术学院和清华大学出版社在深圳联合召开了教材研讨会。会上确定了这本教材的编写计划,讨论了编写大纲。

不少职业技术学院的制冷工程专业根据各自的培养目标,在优化人才知识、能力和素质的三维结构,构建教学内容和课程体系的时候,不约而同地设置了“流体力学与热工基础”这一门综合性的专业基础课。正是为了满足和适应这门课程的需要而编写了这本教材。本书从传统的工程热力学、流体力学和传热学三门课程中精选出一部分内容,按照人的认识规律,在力求体现教学的科学性、自然适应性、可接受性、连贯性和循序渐进性的前提下优化组合而成。

在内容的选取方面注重了三个方面的结合:理论知识必需够用的原则与人才可持续发展能力培养的结合,基本理论、基本概念、基本方法与技术应用能力培养的结合,制冷工程与热能工程专业需要的结合。

因此,本书选择的基本内容不仅可以满足专业课学习和工程应用的需要,也有利于人才进一步的发展。各部分在简明阐述理论要点的基础上,通过较多的实例说明了理论的工程应用。使读者能真正做到学以致用,理论联系实际,并且加深对理论的理解。

工程热力学部分不仅包括了制冷循环,也包括了热能动力装置循环,从而扩大了本书的使用范围。

本书简化了部分繁琐的推导,着重于对知识的理解和应用。为此,对流换热部分介绍了相似理论的基本概念及其对实验研究的指导意义,并深入到物理现象的相似特征数和相似现象的特征数关联式。介绍了一些主要的、工程中应用较为广泛的特征数关联式,以便对典型的对流换热现象进行计算。对特征数关联式的归纳和产生未作重点介绍。这是体现本书思想和特点的一个例子。根据同样的指导思想,其他内容也力图体现针对性和实用性。

本书采用我国法定计量单位。各部分采用的物理量名称和符号遵照国家标准的统一规定。

本书适用学时为90~100,少课时的教学可根据需要删去部分内容。本书供高职制冷工程专业和热能工程专业使用,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书由顺德职业技术学院陈礼教授和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,陈礼对工程热力学篇的初稿进行了修改,并编写了流体力学篇和传热学篇。全书的统稿和修改定稿由陈礼完成。

本书书稿由重庆大学博士生导师曾丹荃教授主审,作者在此表示衷心的感谢。

本书的编写和出版工作得到了清华大学出版社和顺德职业技术学院许多朋友的支持和帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,谬误疏漏之处在所难免,敬请批评指正。

作者

2001. 11. 11 于广东顺德

主要符号

英文字母

a	热扩散率, m^2/s	p_e	表压, Pa
A	面积, m^2	p_v	真空度, Pa; 水蒸气分压力, Pa
c	比热容, $J/(kg \cdot K)$	p_s	饱和压力, Pa
c_f	流体速度, m/s	p_l	压力损失, Pa
c_p	比定压热容, $J/(kg \cdot K)$	q	比热量, J/kg ; 热流密度, W/m^2
c_v	比定容热容, $J/(kg \cdot K)$	q_m	质量流量, kg/s
C_m	摩尔热容, $J/(mol \cdot K)$	q_v	体积流量, m^3/s
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $J/(mol \cdot K)$	Q	热量, J
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $J/(mol \cdot K)$	r	半径, m ; 气化潜热, J/kg
d	直径, m ; 含湿量, kg/kg (干空气)	R	通用气体常数, $J/(mol \cdot K)$; 半径, 水力半径, m ; 热阻, K/W
d_e	当量直径	s	比熵, $J/(kg \cdot K)$; 管间节距, m
e	比总能量, J/kg	S	熵, J/K
E	总能量, J ; 辐射力, W/m^2	S_h	液体管道阻抗, s^2/m^5
E_b	黑体辐射力, W/m^2	S_p	气体管道阻抗, kg/m^7
E_k	宏观动能, J	t	摄氏温度, $^{\circ}C$
E_p	宏观位能, J	t_d	露点温度, $^{\circ}C$
g	重力加速度, m/s^2	t_w	湿球温度, $^{\circ}C$
G	辐射能, J	t_s	饱和温度, $^{\circ}C$
G_p	反射辐射能, J	T	热力学温度, K
G_a	吸收辐射能, J	u	比热力学能, J/kg ; 速度, m/s
G_r	透射辐射能, J	U	热力学能, J
h	比焓, J/kg ; 表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; 深度, m	v	比体积, m^3/kg ; 速度, 平均速度, m/s
h_l	水头损失, m	V	体积, m^3
h_f	沿程水头损失, m	V_m	摩尔体积, m^3/mol
h_m	局部水头损失, m	w	比膨胀功, J/kg
H	焓, J ; 高度, m ; 流体机械输入或输出能量水头, m	w_s	比轴功, J/kg
J	有效辐射, W/m^2	W	膨胀功, J
K	传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; 管壁粗糙高度, 当量糙粒高度, m	W_s	轴功, J
l	长度, m ; 特征长度, m	x	干度; 笛卡儿坐标
m	质量, kg	x_i	混合物组元 i 的摩尔分数
M	摩尔质量, kg/mol	X	角系数
n	多变指数	y, z	笛卡儿坐标
p	压力, Pa		
p_b	大气压力, Pa		

希腊字母

α	体胀系数, K^{-1} ; 动能修正系数; 吸收率
β	压缩率, m^2/N

χ	湿周	σ	斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 5.67×10^{-8}
δ	厚度, m		$W/(m^2 \cdot K^4)$
ϵ	压缩比; 制冷系数; 热度	τ	切应力
ϵ'	供热系数	ζ	局部阻力系数
φ	相对湿度		
Φ	热流量, W		特征数
Φ_l	单位长度圆筒壁传递的热流量, W/m		
γ	比热容比	$Gr = \frac{g\alpha\Delta tl^3}{\nu^2}$	格拉晓夫数
η	效率; [动力]粘度, Pa·s	$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$	伽里略数
η_r	肋片效率	$Nu = \frac{hl}{\lambda}$	努塞尔数
κ	绝热指数	$Pr = \frac{\nu}{a}$	普朗特数
λ	热导率, W/(m·K); 沿程阻力系数	$Re = \frac{ul}{\nu}$	雷诺数
ν	运动粘度, m ² /s		
θ	管道扩张角; 阀门转角		
ρ	密度, kg/m ³		

目 录

第一篇 工程热力学

第 1 章 基本概念	1
1.1 热能与机械能的相互转换	1
1.2 工质热力状态、状态参数及热力过程	3
1.3 气体的比热容	11
思考题	13
习题	13
第 2 章 热力学基本定律	14
2.1 热力学第一定律	14
2.2 开口系统稳定流动能量方程式	16
2.3 理想气体的热力过程	20
2.4 热力学第二定律	24
思考题	30
习题	31
第 3 章 水蒸气	32
3.1 水蒸气定压发生过程	32
3.2 蒸汽图表及应用	35
3.3 蒸汽动力循环	38
思考题	42
习题	43
第 4 章 制冷循环	44
4.1 蒸气压缩制冷循环	44
4.2 吸收式制冷循环	47
4.3 热泵循环	48
思考题	49
习题	49

第 5 章 湿空气	51
5.1 湿空气及其性质	51
5.2 湿空气的热力过程	58
思考题	61
习题	61

第二篇 流体力学

第 6 章 流体性质及静力学基本知识	62
6.1 流体的主要力学性质	62
6.2 流体静压力的分布规律	66
思考题	70
习题	70
第 7 章 一元流体动力学基础	74
7.1 一元流体动力学基本概念	74
7.2 流体动力学基本方程	77
7.3 基本方程式的应用	82
思考题	89
习题	89
第 8 章 能量损失与管路计算	93
8.1 沿程损失和局部损失	93
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	96
8.4 局部损失计算	105
8.5 管路计算	113
思考题	119
习题	120

第三篇 传热学

第 9 章 导热	124
9.1 导热的基本定律	124
9.2 平壁的稳定导热	127
9.3 圆筒壁的稳定导热	131
思考题	134
习题	135

第 10 章 对流换热	137
10.1 对流换热及牛顿公式	137
10.2 相似理论	140
10.3 流体强制对流换热	144
10.4 流体外掠物体强制对流换热	149
10.5 自然对流换热	155
10.6 凝结和沸腾换热	156
思考题	161
习题	162
第 11 章 辐射换热	163
11.1 热辐射的基本概念	163
11.2 物体表面间的辐射换热	166
思考题	174
习题	175
第 12 章 传热过程与换热器	176
12.1 传热过程与强化传热	176
12.2 换热器	184
思考题	192
习题	192
参考文献	194
附录	195
附表 1 常用气体的平均比定压热容 c_p / $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	195
附表 2 常用气体的平均比定容热容 c_v / $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	196
附表 3 饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按温度排列)	197
附表 4 未饱和水与过热水蒸气的热力性质	200
附表 5 氨(NH_3)饱和液与饱和蒸气的热力性质	207
附表 6 氟利昂 12(CCl_2F_2)饱和液与饱和蒸气的热力性质	209
附表 7 HFC 134a 饱和液与饱和蒸气的热力性质(按温度排列)	209
附表 8 金属材料的密度、比热容和热导率	211
附表 9 保温、建筑及其他材料的密度和热导率	213
附表 10 几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	214
附表 11 干空气的热物理性质($p=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)	215
附表 12 大气压($p=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)下烟气的热物理性质	216

附表 13	饱和水的热物理性质	217
附表 14	干饱和水蒸气的热物理性质	218
附表 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
附表 16	大气压($p=1.01325\times 10^5$ Pa)下过热水蒸气的热物理性质	219
附表 17	物体表面热辐射的发射率	220

第一篇 工程热力学

第1章 基本概念

1.1 热能与机械能的相互转换

1.1.1 热能与机械能的相互转换

众所周知,现代化工农业生产、现代科学技术以及人们的日常生活,要求有充足而经济的动力供应。自然界中可大量产生动力的主要能源有:风能、水能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。在这些能源中,除风能和水能可以向人们直接提供机械能外,其他各种能源往往只能直接或间接地(通过燃烧、核反应)提供热能。热能的应用甚为普遍和重要,热能大多数是由煤、石油、天然气等燃料通过燃烧产生的化学能转变而来的。

热能的利用,可分为两种基本方式,一种是热能的直接利用,即将热能用于直接加热,如冶炼、蒸发、烘干、采暖等。这些直接加热过程,必须在加热设备或热交换器中进行。另一种是热能的间接利用,即将热能转变为其他形式的能量,如通过热机(蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等)将热能转变为机械能、或者进一步转变为电能或其他形式的能量,然后加以利用。例如,锅炉生产的高温高压蒸汽所携带的热能,通过汽轮机转换为机械能,而后带动发电机,输出电能。但是,在实现能量转换的过程中,总有很大份额的热能损失,或者说热机的热效率较低。为了合理而有效地实现热能与其他形式的能量转换,就必须对能量转换规律,对空气、水蒸气和湿空气等的热力性质加以研究,对不同的热力过程和热力循环进行分析、计算,探讨提高转换效率的有利条件和途径。这就是工程热力学所要论述的主要内容。

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观点出发,研究热能与机械能之间相互转换规律的学科。它从理论上阐明提高热机热效率的方法和途径。

热能转变为机械能必须借助一套设备和某种载能物质。这个设备就是通常所说的热机,而载能物质便是工质。工质在热机内工作,必须具备良好的膨胀性和流动性。同时具备良好的膨胀性和流动性的,不是固体,也不是液体,而是气体(如空气、蒸汽等)。因此,热机中的工质一般都是气态物质。但在应用蒸汽作为工质时也会涉及到液体。

在研究热能与机械能之间转换规律时,应先建立以热力系统为中心的一些基本概念和状态参量,然后着重阐述热力学第一定律和热力学第二定律。根据这两条基本定律,结

合物质的性质,分析各种热力过程中物质状态变化及能量转换规律,分析热力循环的经济性,指出提高热工设备热效率的途径。

1.1.2 热力学系统

根据研究工作的需要,选取某一范围内的物质或某特定的空间作为研究对象,以研究其热力学规律,这种研究对象称为热力学系统,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(如图 1-1(a)中取气体工质为系统时,气缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的界面),也可以是假想的(如图 1-1(b)中进口截面与出口截面便是假想的界面);可以是固定不变的,也可以是变动的(如图 1-1(a)中当活塞移动时界面发生变化)。

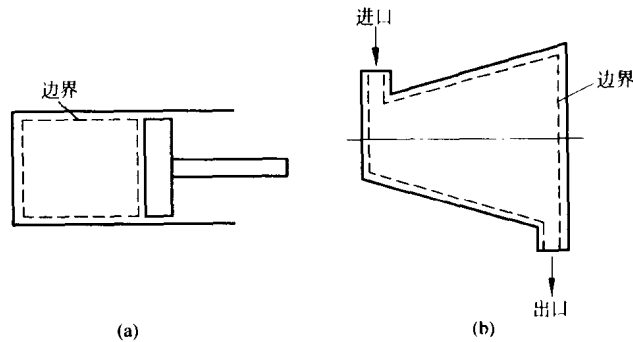


图 1-1 热力学系统

(a) 闭口系统; (b) 开口系统

一般说来,系统与外界总是处于相互作用之中,彼此之间可以进行能量和质量交换,也可以不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:

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。

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。

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。

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看作是绝热系统或孤立系统。

另外还有一些特殊的系统,如具有无限大热容量的系统,它们在放出或吸收有限热量时不改变系统自身的温度,称之为**热源或热库**,例如高温热源、低温热源等。

1.2 工质热力状态、状态参数及热力过程

1.2.1 工质热力状态及状态参数

1. 工质热力状态

热力状态是指在某一瞬时,系统的某种宏观物理状态。所谓**平衡状态**,是指在不受外界影响的条件下,系统的宏观性质不随时间改变的状态。系统的平衡包括系统各部分之间没有热量传递的热平衡,和没有相对位移的力平衡。此时系统中的温度、压力处处相等。“平衡状态”是热力学的一个重要概念,是经典热力学研究的依据之一。本教材除特殊说明外,仅讨论平衡状态。

一个封闭容器系统,中间用隔板分成两部分。其中一部分充满温度为 T_1 、压力为 p_1 的二氧化氮气体。另一部分充满温度为 T_2 、压力为 p_2 的空气。抽去隔板,两部分的气体立即相互混合。直到各处温度、压力和成分均匀一致为止。此后,如无外界影响,容器中的气体始终保持这一状态。这时的系统处于平衡状态。

应该指出,所谓无外界影响,是指外界对系统不作功,也不传热。无外界影响和不随时间变化是平衡状态不可少的两个基本条件。

又如,一个有槽盖的水槽在室温为 30°C 时,水温稳定在 50°C 。由于水槽不断地向外界散发热量,槽里的电热器也在不断地补充所散发的热量,这时槽温不随时间变化。这样一个系统与外界不断交换热量的动平衡不能称为热平衡状态。

2. 状态参数

用来描述系统平衡状态的宏观物理量称为**状态参数**或**状态参量**。热力学常用状态参数有温度、压力、比体积、热力学能、焓、熵等。而温度、压力、比体积称为**基本状态参数**。当系统处于平衡状态时,状态参数具有确定的数值。因此,可用状态参数对系统平衡状态进行描述。如果系统处于非平衡状态则系统各部分呈现出不同的特征,状态参数难以确定。

3. 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,它们之间就不再有热量传递,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 。热力学温标是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°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°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,以符号 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 , $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上 Pa 的单位太小,常采用 MPa 。

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_c 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

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

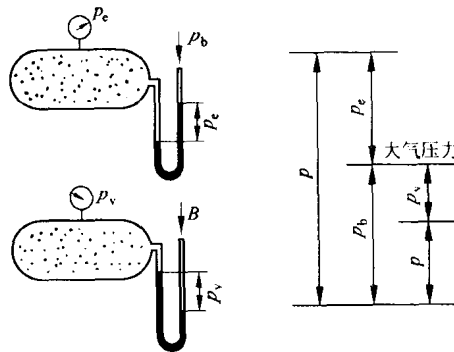


图 1-2 各种压力关系图

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。

例题 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 已知两系统表压力分别为

$$p_{c1} = 0.015 \text{ MPa} \quad p_{c2} = 1.5 \text{ MPa}$$

气压计读数为