

交通系统中等专业学校试用教材

热工理论基础

(轮机管理专业用)

集美航海专科学校 武汉河运专科学校 编

苏祖恩主编

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书共分二篇十二章。第一篇工程热力学,主要内容为气体性质、热力学基本定律、气体的热力过程、压气机中的热力过程、内燃机的理想循环、气体的流动、蒸气的性质、蒸气的热力循环,以及湿空气等。第二篇传热学基础,着重叙述了导热、对流换热、热辐射以及传热与换热器等。

本书为交通系统中等专业学校轮机管理专业(85~100学时)试用教材,也可供其它中等专业学校动力类专业的师生及轮机管理人员参考。

交通系统中等专业学校试用教材

热工理论基础

(轮机管理专业用)

集美航海专科学校 编
武汉河运专科学校

苏祖恩 主编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第006号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 19 插页: 1 字数: 464千

1980年12月 第1版

1980年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—12,000册 定价: 1.60元

前 言

本书是根据交通部中等专业学校海洋船舶轮机管理专业“热工理论基础”教学大纲编写的试用教材。

本书着重讨论有关海洋船舶机舱的热力设备中,热能转化为机械能的规律和方法以及热能传递的规律和方法,并分析提高其转化效率的途径,从而为学习海洋船舶轮机管理专业课程打下基础。书中对基本概念、定理、多有结合工程实际较详细的讨论,以使读者能从中建立起明确的概念,较好地掌握基本原理,并进一步培养对工程实际问题进行热力分析的能力。书中每章除例题外还附有大量的思考题及习题,这是为了帮助读者增强分析问题及解决问题的能力。

本书初稿承大连海运学校龚长元同志、青岛海运学校梁桢忠同志提供不少宝贵意见,龚长元同志并负责全书的审稿工作,谨此表示感谢。

本书由集美航海专科学校苏祖恩主编,并编写第一篇工程热力学及第二篇传热学基础的部分章节(第十章第二节中的二、三及第十章中的第四节);武汉河运专科学校温兆振编写第二篇传热学基础的其他部分。

鉴于编者的理论水平及实践经验有限,加之时间匆促,书中定有不足之处,恳切希望读者指正。

绪 论

热工理论基础是由工程热力学及传热学这两门学科组成的。工程热力学是热力学最早发展起来的一个分支。热力学是研究伴有热效应的物理及化学现象的规律的科学,也就是研究热能与其他各种能之间变换规律的科学。工程热力学虽然也是把热力学第一定律和第二定律作为它的基础,但研究对象仅限于热能转化为机械能的规律、方法及提高转化效率的途径。传热学是关于热的传递过程科学,它的研究对象为热的传递规律、方法及提高传热效果的途径,以及为了工程实际的需要,力求换热的削弱以减少热损失或改善劳动条件。

热力学的研究方法是宏观的方法,是以归纳无数事实所得到的热力学第一定律和第二定律这两个基本定律作为分析和推理的基础,并通过物体或某部分物质的诸如压力、温度、容积等外在表现和受热、冷却、膨胀或收缩等整体行为,从能量的收支平衡着眼,来进行物体宏观现象和宏观过程的研究。

在生产实践中,功很容易转变为热。比如移动一个重物,即在对重物做功的过程,由于摩擦的关系,就使得所做的功有一部分转化为热。但在逆转过程中,若想将热复变为功,就很不容易,即必须利用一定的设备才能达到目的。一切将热能转变为机械能的机械统称为热机。从燃料燃烧中得到热能,以及利用热能得到动力的整套设备,包括燃烧设备(如锅炉、燃气轮机装置的燃烧室等)、热机和一切辅助设备统称为热能动力装置。热能动力装置由于燃料性质,燃烧设备不同,以及其他因素的影响,可分为蒸汽动力装置及内燃动力装置两大类。热机可分为内燃机、蒸汽机、汽轮机、燃气轮机及喷射推进式发动机等。

在海洋船舶上,广泛应用柴油机、汽轮机作为动力机。燃料的化学能通过船舶锅炉中燃烧变为烟气的热能,然后传热给水及水蒸汽,再把水蒸汽的热能通过汽轮机变为机械能。在柴油机中则是先把燃料的化学能在气缸内燃烧成燃气的热能,再把热能转变为机械能做为带动轮船螺旋桨或发电机的动力。工程热力学主要讨论的就是在动力装置中热能转变为机械能的过程。在海洋船舶上,除热力发动机以外,还有许多热力设备,比如制冷、取暖以及空气调节、造水装置等。对这些热力设备及热力发动机,如何保证它们的安全和经济地运行,有时为了满足生产的需要又如何对它们进行技术改进和重新设计呢?这就要求轮机管理人员必须了解热能在轮机中转变为机械能的规律性,热能在各热力设备中进行传递的规律性,以及影响热机的热效率与影响热力设备热量传递的因素,从中找出影响的主要因素及其解决办法。而热工理论基础则给以上工作提供了理论分析及计算的方法。

热工理论基础是船舶内燃机、锅炉、汽轮机、船舶辅机等专业课的主要理论基础课。学习与应用本门知识时,要认识到热工理论基础的一些理论和定律的产生都是来自劳动人民在长期生产实践中得到的经验总结。因此,我们运用这些理论与定律去解决生产实际中的问题,可得到正确的结果。但对具体事物的理论分析,还要采用科学的抽象、概括简化,或理想化的方法才能收到预期的效果。

目 录

绪 论

第一篇 工程热力学

第一章 气体性质	1
第一节 工质、理想气体与实际气体	1
第二节 工质的热力状态及其基本参数	1
第三节 理想气体状态方程式	5
第四节 热量和气体的比热	11
第五节 应用比热计算热量的方法	14
第六节 实际气体的状态方程式	16
第七节 混合气体	18
第二章 热力学基本定律	25
第一节 能量守恒与转换定律	25
第二节 热力学第一定律和当量原理	25
第三节 热力学第一定律的解析式	26
第四节 稳定流动能量方程式, 焓	30
第五节 稳定流动能量方程式的应用	32
第六节 热力学第二定律	34
第七节 熵和温熵图	37
第八节 卡诺循环	38
第九节 逆向卡诺循环—制冷装置的理想循环	40
第三章 气体的热力过程	44
第一节 热力过程	44
第二节 定容过程	47
第三节 定压过程	48
第四节 定温过程	50
第五节 绝热过程	51
第六节 多变过程	54
第七节 多变过程的普遍意义	57
第八节 可逆过程中理想气体熵的计算	61
第九节 热力过程在温熵图上的表示法	63
第四章 压气机中的热力过程	70
第一节 单级活塞式压气机的工作原理	70
第二节 单级活塞式压气机所需的功	72
第三节 压气机余隙容积的影响	75

第四节	实际压气机的示功图	77
第五节	多级压缩的应用	78
第六节	叶轮式压气机的压气过程	81
第五章	内燃机的理想循环	85
第一节	研究热机理想循环的方法	85
第二节	定容加热理想循环—奥托循环	86
第三节	定压加热理想循环—狄塞尔循环	89
第四节	混合加热理想循环—萨巴特循环	91
第五节	活塞式内燃机各种循环的比较	96
第六节	二冲程内燃机循环	100
第七节	提高船舶柴油机功率的途径	101
第八节	增压式柴油机及其循环	102
第九节	燃气轮机装置的理想循环	106
第六章	气体的流动	114
第一节	稳定流动的基本方程式	114
第二节	促使气体流速改变的条件	117
第三节	气流通过喷管的流速	120
第四节	气流通过喷管的流量	123
第五节	喷管的设计计算基础	127
第六节	绝热节流和焦耳—汤姆逊效应	130
第七章	蒸气的性质和蒸气的热力循环	133
第一节	蒸气的概念	133
第二节	水蒸汽的饱和状态	134
第三节	蒸汽的形成	135
第四节	蒸汽状态的确定、蒸汽表	141
第五节	蒸汽的焓熵图 ($i-s$ 图) 和冷剂的压焓图 ($p-i$ 图)	144
第六节	蒸汽的基本热力过程	149
第七节	水蒸汽的绝热节流过程	151
第八节	水蒸汽的喷管计算	154
第九节	蒸汽动力装置的基本热力循环—朗肯循环	156
第十节	蒸汽动力装置的回热循环	159
第十一节	压缩蒸气制冷循环	162
第十二节	喷射式制冷装置及吸收式制冷装置	168
第八章	湿空气	173
第一节	湿空气中水蒸汽的状态及基本定义	174
第二节	湿空气的绝对湿度和相对湿度	175
第三节	湿空气的参数	179
第四节	湿空气的焓-湿图 ($I-d$ 图)	181
第五节	干燥过程	184
第六节	空调设备的典型过程及其在 $I-d$ 图上的表示	186

第二篇 传热学基础

概 说	190
第九章 导热	190
第一节 导热的基本概念	190
第二节 傅立叶定律	192
第三节 平壁的导热	193
第四节 圆筒壁的导热	196
第十章 对流换热	199
第一节 对流和对流换热	199
第二节 影响对流换热的因素	199
第三节 对流换热公式和放热系数	203
第四节 相似理论基础	204
第五节 流体受迫运动时的放热	211
第六节 流体自由运动时的放热	215
第七节 流体集态改变时的放热	216
第十一章 热辐射	220
第一节 热辐射的基本概念	220
第二节 热辐射的基本定律	222
第三节 物体之间的辐射热交换	225
第四节 气体的热辐射	230
第十二章 传热与换热器	232
第一节 复杂换热	232
第二节 传热	233
第三节 传热的增强与削弱	238
第四节 换热器	241
附 录	247
附表一 气体的平均定压莫尔比热表	247
附表二 气体的平均定压重量比热表	247
附表三 气体的平均定压容积比热表	248
附表四 气体的平均比热 (直线关系式)	249
附表五 饱和水和饱和蒸汽性质表 (按压力排列)	250
附表六 饱和水和饱和蒸汽性质表 (按温度排列)	253
附表七 水和过热蒸汽性质表	255
附表八 湿空气的热力性质表	281
附表九 F12饱和和蒸气性质表	285
附表十 氨 (NH ₃) 的饱和和蒸气性质表	288
附图一 水蒸汽的焓-熵图 (莫里尔焓-熵图)	插页
附图二 氨的温-熵图	291
附图三 F12 的压-焓图	292
附图四 湿空气的焓-湿图 (适用于大气压力为 760 毫米汞柱)	293

第一篇 工程热力学

第一章 气体性质

第一节 工质、理想气体与实际气体

实现热能和机械能相互转化的媒介物叫做“工质”。例如内燃机利用燃料与空气的混合物燃烧获得高温、高压的燃气推动活塞而作功，汽轮机利用高温、高压的蒸汽推动它的叶轮而作功。而燃气和蒸汽就是内燃机和汽轮机用以作功的工质。由此可见，热机中所用的工质一般都是气态物质，因为只有气态物质才有显著的膨胀能力。

气态物质据它们离液态的远近又分为两大类，即气体与蒸气。气态物质的分子在作不断的热运动（平移、旋转与振动），其分子数量是巨大的，运动是不规则的，分子沿各方向运动的机会是均等的，且没有任何一个方向上气体分子的运动比其他方向更为显著。又压力到处相等，密度到处相等。此外，分子具有一定的体积，相互之间也具有作用力。因此，气体的性质是很复杂的，很难找出气体分子运动的规律。为了使分析得以进一步深入，在热力学上提出了理想气体这一概念。理想气体是一种实际上不存在的假想气体，其分子是些弹性的、本身不占有体积的质点，而且分子间没有吸引力。在这两个假设条件下，气体的分子运动规律就可以大大简化，并得出一简单的数学关系式。实际上距离液态较远的气体，其分子虽占有容积，但相对于分子所活动的空间来说是很小的；虽然分子之间存在吸引力，但因分子本身的质量很小，且分子的平均距离相对于分子的质量来说是很大的，从而使得吸引力微不足道。因此这种气体就可以简化为理想气体。例如在通常温度和压力下的氢、氧、氮、空气等气体均可当为理想气体来看待。至于蒸气，它是接近于液态的气体，其分子本身的容积占全部容积的比例远比氢、氧、氮等为大，而且随着分子间平均距离的减小，内聚力也急剧增大，因此分子所占有的体积与分子间的吸引力均不能忽略不计。又如在蒸汽锅炉中所得到的水蒸汽以及制冷装置中所用的工质（如氨、氟利昂-12）等均不能当作理想气体看待。

严格地说，只有理想气体才能服从物理学上的波义耳—马略特定律和盖·吕萨克定律、查理定律，而实际气体则要求对理想气体的公式加上某些修正系数。由于在绝大多数的实际问题中，常允许有相当的误差，因而这些修正系数也就往往可被忽略不计。所以在本章里讨论的虽然都是理想气体定律，但它对于氢、氧、氮、空气等实际气体仍然适用。对于蒸气，因其性质同理想气体相差很大而不能理想气体的公式计算。由于其分子运动的规律极为复杂，不能以简单的数学式子表示，在工程中常将其性质列成备查的图表。

第二节 工质的热力状态及其基本参数

热机的运转，是由于气态工质在特定条件下，在不断地改变它的热力状态，执行着某一

具体的热功转换过程，即所谓“热力过程”。显然，要想分析热力过程进行的情况，必须首先能够正确地描写工质的热力状态。这里，提出“热力状态”这个名词，是为严格区别于同时描写工质的诸如位置、流动速度等宏观机械状态以及牵涉电磁、声、光、化学等作用的广义状态。在工程热力学里，热力状态往往被简称为“状态”。在给定状态下，表明工质物理特性所用的各个量，称为“状态参数”。工质的绝对压力、温度和每单位重量所占的容积——“比容”等物理量，可以用来说明工质在热机中（例如内燃机气缸里）所处的热力状态。它们的值标志着工质热力状态的具体特征，叫做“热力状态参数”或简称热力状态的“参数”。对应于工质的每一个状态，各参数都有一定的数值，只要知道一个状态参数的值有了改变，就可以断定工质的状态发生了变化。

在热力学中常常用到“平衡状态”的概念。所谓平衡状态，就是指在没有外界作用情况下，可以长久保持的状态。此时组成热力系统的各部分之间没有热量的传递，也没有相对位移，亦即系统处于热的平衡和力的平衡。气体在平衡状态下，各部分的状态均匀一致，每种状态参数只有一个数值。

在工程热力学中，绝对压力 p 、温度 T 和比容 v 是三个可以用仪表测量的物理量，而且有着容易被理解的物理意义。所以成为描写工质热力状态最常用的“基本热力状态参数”，简称“基本参数”。另外还有内能 u 、焓 i 、熵 S 等参数，以后将陆续介绍。这里先讨论这三个基本热力状态参数。

一、压 力

单位面积（容器壁面上）所受到的垂直作用力称为“压力”。用“ p ”表示。分子运动学说把气体的压力看作是分子撞击容器内壁的结果。由于气体的分子数目极多，撞击频繁，以致我们无法知道每次撞击的情况，而只能观察全部撞击的结果，所以气体的压力是标志大量分子在一段时间内撞击容器壁的平均总结果。而压力的方向是垂直于容器内壁的。

在采用国际制单位中，压力的单位是“帕斯卡”，其代号用“帕”或“Pa”表示。1帕就是在1米²的面积上作用1牛顿的力。1帕 = 1牛/米²。

在采用工程单位时，压力的单位用公斤力/米²。因为这个单位太小，在工程上多以公斤力/厘米²做为常用单位。

$$1 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 9.8 \times 10^4 \text{ 牛/米}^2 = 9.8 \times 10^4 \text{ 帕}$$

在物理学中我们知道：

$$p = H \cdot \gamma \quad \text{或} \quad H = \frac{p}{\gamma}$$

式中， H 为液柱高；

γ 为液体重度。

所以压力的单位也可以用液柱的高度 H 表示（常用汞柱和水柱的高度表示）。

水的重度 = 1000公斤/米³，汞的重度 = 13595公斤/米³（0°C时），

所以

$$1 \text{ 米水柱} = 10^3 \text{ 公斤力/米}^2;$$

$$1 \text{ 毫米水柱} = 1 \text{ 公斤力/米}^2;$$

$$1 \text{ 毫米汞柱} = 13.6 \text{ 公斤力/米}^2.$$

英美等国习惯采用磅/英寸²做压力单位，我国少数旧设备上也有沿用。其换算关系为

$$1 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 14.2 \text{ 磅/英寸}^2.$$

压力也有用大气压做单位，物理学上把北纬45°海平面上常年平均气压定做“标准大气压”，或称为“物理大气压”，用符号“ $B_{\text{标}}$ ”表示。其值为760毫米汞柱（0°C时），换算成工程单位，可得

$$B_{\text{标}} = 0.76 \times 13595 = 10332 \text{ 公斤力/米}^2 = 1.033 \text{ 公斤力/厘米}^2$$

也相当于10.332米水柱。

工程上常用的单位为公斤力/厘米²，因为与大气压力相近，称为“工程大气压”，或简称“气压”。在工程上，如不特别说明为物理大气压，或标准大气压时，一般都指工程大气压。

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 10000 \text{ 公斤力/米}^2$$

$$= 735.6 \text{ 毫米汞柱} = 10 \text{ 米水柱}$$

$$= 9.8 \times 10^4 \text{ 帕}$$

工程大气压和物理大气压都是度量压力的单位，并不是真正的大气压力。这些单位之间的关系如下，

$$1 \text{ 气压} = 1 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 10^4 \text{ 公斤力/米}^2 = 735.6 \text{ 毫米}$$

$$\text{汞柱} = 29 \text{ 英寸汞柱} = 10 \text{ 米水柱} = 14.22 \text{ 磅/英寸}$$

用字母符号表示上式，可写为：

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 10^4 \text{ kgf/m}^2 = 735.6 \text{ mmHg} = 29 \text{ inHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O} \\ = 14.22 \text{ lb/in}^2. \text{ 有些压力表上 } \text{lb/in}^2 \text{ 用 } \text{in}^2 \text{ 表示。}$$

上述这几种压力单位，在工程上各有其适用的场合。例如柴油机中燃油燃烧时的爆发压力一般为50~80气压，而不能用毫米汞柱或毫米水柱表示。又如通风机进、出口的空气，其压差不大，仅有几十到几百毫米水柱，就不能用多少气压表示。

说明容器内工质的压力，实际上可有两种不同的方法：一种是直接指明工质施于器壁上的压力的实际数值，叫做“绝对压力”，记作 p ；另一种是指明用压力表测量这一压力时压力表的读数，叫做“表压力”记作 $p_{\text{表}}$ 。参看图1-1a，表压力是绝对压力高出于当时当地的大气压力 B 的数值，或

$$p = B + p_{\text{表}} \quad (1-1)$$

例如，图中U形管压力表的读数设为0.5气压，而当时当地的大气压力计上所读出的大气压力是758毫米汞柱，则容器内工质的绝对压力就应该

$$\text{是 } 0.5 + \frac{758}{735.6} = 0.5 + 1.03 \\ = 1.53 \text{ 气压。}$$

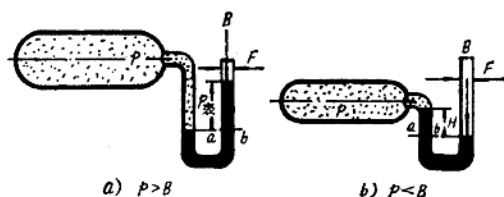


图1-1 表压力概念的示意图

当容器内工质的绝对压力比大气压力还低时，表压力就应该是负值，这时，只取它的数值，称之为“真空”，并记作 H ，或

$$p = B - H \quad (1-2)$$

参看图1-1b，设U形管压力表上的读数表明容器内的压力比当时当地的大气压力低15毫米汞柱，则称容器内有15毫米汞柱的“真空”。

有时用百分数表示真空的大小，称为“真空度”。真空 H 与大气压力 B 的比值称为真空度，即

$$\text{真空度} = \frac{H}{B} \times 100\%$$

例1-1 某轮空调设备中通风机排出管处U形压力计测得 $h = 250$ 毫米水柱，设当地大气压力 $B = 758$ 毫米汞柱，求排出管中空气的绝对压力 p 是多少（以气压表示）？

解：按照公式（1-1）：

$$\begin{aligned} p &= B + p_{\text{表}} = \frac{758}{735.6} + \frac{250}{10000} = 1.03 + 0.025 \\ &= 1.055 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 1.055 \text{ 气压} \end{aligned}$$

例1-2 在例1-1所说的通风机吸入管上安装的U形压力计测得的真空为100毫米水柱，设 $B = 758$ 毫米汞柱，求吸入管内空气的绝对压力 p 是多少气压？真空度是多少？

$$\begin{aligned} \text{解：} \quad p &= B - H = \frac{758}{735.6} - \frac{100}{10000} = 1.03 - 0.01 \\ &= 1.02 \text{ 气压} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{真空度} &= \frac{H}{B} \times 100\% \\ &= \frac{0.01}{1.03} \times 100\% = 0.97\% \end{aligned}$$

作为气体热力状态参数的 p 是指绝对压力。 $p_{\text{表}}$ 及 H 仅仅是压力表及真空表的读数，都只是相对于当时当地的大气压力而言的。绝对压力是工质真正作用在容器内壁的实际数值。在工程上当所测的压力为几公斤力/厘米²以上时，通常可近似取 $B = 1$ 公斤力/厘米²。而当所测的压力为几十至几百毫米水柱时，则必须用气压计测得的大气压力 B 的实际数值以计算其绝对压力 p 。

二、温 度

“温度”表示工质冷热的程度。根据分子运动理论，温度是物质分子运动的平均移动动能的度量，这种关系是完全符合通常所观察到的现象，并且也符合于热现象。如有两个具有不同的分子运动的平均移动动能的物体相接触，则由于接触面分子互相碰撞的结果，能量就由具有分子运动平均动能较大的物体传给平均动能较小的物体，直到两物体的平均动能相等为止。换句话说，就是高温物体把热量传给低温物体，直到两者温度相等时传热才停止。因此可以认为温度乃是物质内部分子平移运动的平均动能的标志。它们之间的关系如下：

$$\frac{m\omega^2}{2} = BT \quad (1-3)$$

式中： T 是绝对温度， m 是一个分子的质量， ω 是分子平移运动的均方根速度， B 是比例常数。如以 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ……代表理想气体各个分子的平移运动速度，于是各速度的均方根值为

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \dots + \omega_n^2}{n}}$$

式中： n 代表第 n 个分子。

温度的概念是人们从对物体冷热程度的感觉中产生的，所以温度是定量反映物体冷热程度的物理量。要想定量地确定温度，必须对不同的温度给以具体的数量的标志。温度的数值的

表示方法叫做“温标”，各种各样的温度计的数值都是由温标决定的，可以说温标就是温度的标尺。为了使温度测量统一，必须建立统一的国际温标。根据1968年对国际实用温标的规定，以热力学温标作为最基本的温标，一切温度的测量最终都应以热力学温标为准。在热力学温标中，热力学温度是基本温度。在国际单位制中，热力学温度的符号为 T ，它的单位是开尔文，中文代号是开，国际代号是K。还有一种常用的温度是摄氏温度，符号为 t ，摄氏温度的单位是摄氏度，国际代号是 $^{\circ}\text{C}$ ，规定在标准气压下（760毫米汞柱），冰的融点和水的沸点为 0°C 和 100°C 。在这两个点之间温度变化的标尺均匀地分为一百等分，每一等分为1摄氏度。热力学温标与摄氏温标采用相同的间隔，但起点不同。热力学温度与摄氏温度之间的关系是

$$T = (t + 273.15)\text{K} \quad (1-4)$$

式中273.15是冰点的热力学温度，冰点的摄氏温度就是 0°C ，在工程计算中273.15采用273已够准确。

英美等国习惯采用的温度为华氏温度，华氏温度的单位是华氏度，国际代号是 $^{\circ}\text{F}$ ，规定在标准气压下，冰的融点和水的沸点为 32°F 和 212°F 。我国少数旧设备上仍沿用这种单位。华氏温度和摄氏温度之间的关系如下：

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \times t^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}$$

三、比 容

单位重量工质所占的容积，称为“比容”。在工程单位中，比容的单位用 $\text{米}^3/\text{公斤}$ 。如 G 公斤工质占有 V 米 3 的容积，则比容

$$v = \frac{V}{G} \text{米}^3/\text{公斤} \quad (1-5)$$

反之，单位容积物体的重量称为重度，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{公斤力/米}^3 \quad (1-6)$$

显然， v 与 γ 是互成倒数的，即 $v \times \gamma = 1$ ，它们不是互相独立的参数，可以任意选用其中之一（通常用 v 作为独立参数）。

在国际单位制中比容 v 的单位用 $\text{米}^3/\text{公斤质量}$ ，如用 $\text{米}^3/\text{牛顿}$ ，则重度 γ 的单位为 牛顿/米^3 。其换算关系为：

$$1 \text{ 米}^3/\text{公斤力} = 0.102 \text{ 米}^3/\text{牛}$$

$$1 \text{ 公斤力/米}^3 = 9.8 \text{ 牛/米}^3$$

第三节 理想气体状态方程式

一、理想气体状态方程式

在建立分子运动学说以前，人们已对气体的基本状态参数之间的关系作过大量实验研究，建立了一些经验定律，如波义耳—马略特定律、盖·吕萨克定律和查理定律。

这三个定律所反映关于气体的三个基本状态参数 p 、 v 、 T 之间的关系，我们在日常生活和实际工作中是常遇到的。

例如：船上日用的海水压力柜或淡水压力柜中充有压缩空气，当水泵向水柜充水时，空气被压缩，使压力升高、比容减少，此时空气的温度可以近似看作是不变的。“在温度不变条件下，气体的压力和比容成反比”，即当 $T_1 = T_2$ 时

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

或

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (1-7)$$

这定律是经过大量的实验所证实，亦称为“波义耳—马略特定律”。

自行车的内胎在炎热夏天的日光照射下，常常易“放炮”（爆裂），这是因为自行车内胎内的空气（表压力约为4公斤力/厘米²）受日光照射而被加热，使温度升高，而空气容积受外胎的限制可以看作是不变的，即比容 v 不变。因此内胎中的空气压力随温度升高而增高，当压力大于外胎所不许可的压力时，外胎破裂，内胎就在破裂处被空气鼓开而爆裂。再如，船上气焊用的氧气瓶上写有“不得近火”字样，也是因为一定重量的高压氧气储藏在氧气瓶中的容积一定。当氧气瓶靠近高温物体时，瓶内的氧气被加热，温度上升，因而压力也要上升。当压力上升到超过氧气瓶的强度时就有爆炸的危险。经大量实验证明：“在比容不变的条件下，气体的压力和绝对温度成正比”。即 $v_1 = v_2$ 时

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-8)$$

此定律亦称“查理定律”。

在多级空气压缩机上装置的中间空气冷却器中，虽然压缩空气的压力近似不变，但由于空气被冷却水冷却，空气温度降低，比容也成比例地减少。大量的实验证明：“在压力不变的条件下，气体的比容和绝对温度成正比。”即 $p_1 = p_2$ 时

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-9)$$

此实验定律亦称“盖·吕萨克定律”。

以上三个实验定律都是在特殊条件下的规律，进一步联合上述三个实验定律，可以得出在一般情况下的规律。首先温度保持不变，比容由 v_1 变到某中间状态 v_m 则

$$p_1 v_1 = p_2 v_m \quad (a)$$

然后，压力保持不变，容积由 v_m 变到 v_2 ，则

$$\frac{v_m}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (b)$$

由式(a)、(b)消去 v_m 即得

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \text{常数}$$

上式的常数与状态无关，只决定于气体的性质。设以 R 表示这常数，得

$$pv = RT \quad (1-10)$$

R 叫做“气体常数”，单位是公斤力·米/公斤·度（各种气体均有一定的 R 值），空气的 $R = 29.3$ 公斤力·米/公斤·度。对于柴油机燃气的 R 可近似采用空气的 R 。氧的 $R = 26.5$ 公斤力·米/公斤·度，氢的 $R = 424$ 公斤力·米/公斤·度，氮的 $R = 30.3$ 公斤力·米/公斤·度，二氧化碳的 $R = 19.3$ 公斤力·米/公斤·度。上式可表明理想气体在任一平衡状态时 p 、 v 、 T 之间的关系，叫做“理想气体的状态方程式”，也叫理想气体特性方程式，有时还被叫做克拉

贝隆方程式。它的主要作用是根据任意两个已知的参数，可以计算第三个参数。所以三个状态参数中，只有两个是独立变量。在以后的讨论中，我们将同样看到，所有6个状态参数中，只可能有两个是独立变数，其他都是这两个独立变数的因变数。因此只要确定任意两个独立参数，其他状态参数也就被固定，也就是说两个独立状态参数即可确定气体的热力状态。

在应用状态方程时应注意各量的单位： p —公斤力/米²， v —米³/公斤， T —K， R —公斤力·米/公斤·度。

对于 G 公斤气体，则 $p \cdot Gv = GRT$ ，即

$$pV = GRT \quad (1-11)$$

根据上式，当 p 、 V 、 T 均已知时，可用以计算气体的重量 G 。

二、气体分子运动论的压力公式

理想气体的几个经验定律也可以从气体分子运动理论中推导出来。在物理学中根据分子运动理论，并根据理想气体上述的两个假定，可以导出“气体分子运动理论的基本方程式”（压力公式），其式如下：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\omega^2}{2} \quad (1-12)$$

式中 n 为1米³气体中的分子数， m 表示每个分子的质量， ω 表示均方根速度，因此 $\frac{m\omega^2}{2}$ 是气

体分子的平均移动动能，而 $n \frac{m\omega^2}{2}$ 则是1米³中气体全部分子的移动动能。

这一方程式的价值在于把宏观量 p 和微观量 m 、 ω 等联系起来。它说明了众多分子撞击器壁的总结果与分子运动之间的关系。上式表明气体的压力在数值上等于包含在单位容积中的气体分子的平均移动动能的三分之二。

假设1公斤气体的分子数是 N 个，则

$$n = \frac{N}{v}$$

以此式代入(1-12)式得

$$pv = \frac{2}{3} N \frac{m\omega^2}{2} \quad (1-13)$$

按照分子运动理论，分子移动的平均动能是和气体的绝对温度成正比的，如式(1-3)所示，即

$$\frac{m\omega^2}{2} = BT$$

式中 B 为一比例常数，因此将上式代入(1-13)式，得：

$$pv = \frac{2}{3} NBT$$

式中常数 N 、 B 与状态无关，只决定于气体的性质。设以 $R = \frac{2}{3} NB$ 代入上式，得

$$pv = RT$$

这就是前面所推出的理想气体状态方程式。我们可以很方便的把它简化为波义耳—马略特定律、盖·吕萨克定律和查理定律。这三个定律本是以宏观的方法通过实验总结出的结果。这里的分子运动理论乃是从物质内部结构出发，即用微观方法推论得出的。两种方法所得的结果是不矛盾的。分子运动理论给实验定律以理论根据和发展，而经验定律反过来印证了分子运动理论的正确性。

例1-3 气焊用的氧气瓶上为什么写有“不得近火”的字样？这是因为氧气瓶的保险塞是用易熔合金封住的，当瓶内氧气温度达到 105°C 时，易熔塞被熔化，氧气从保险塞逸出，保证氧气瓶不因氧气压力过高而爆炸。若已知在室温 20°C 时，充足氧气的气瓶其压力表上的读数为150公斤力/厘米²，试问，瓶内氧气温度达 105°C 时，压力表上的氧气压力能上升到多大？

解：由于氧气瓶的规格，其容积 V 为40公升，充入氧气量 G 公斤已定，因此，比容 $v = \frac{V}{G}$ 不变。温度变化而引起压力的变化可用公式(1-8)计算。

室温 20°C ，用绝对温度来表示为

$$T_1 = t_1 + 273 = 20 + 273 = 293\text{K}$$

此时氧气瓶的绝对压力 p_1 为（取 $B = 1$ 公斤力/厘米²）

$$p_1 = 150 + 1 = 151\text{公斤力/厘米}^2$$

当温度上升到 105°C 时，用绝对温度来表示为

$$T_2 = t_2 + 273 = 105 + 273 = 378\text{K}$$

代入式(1-8)得：

$$\frac{p_2}{151} = \frac{378}{293}$$

$$p_2 = \frac{151 \times 378}{293} = 194.8\text{公斤力/厘米}^2$$

所以，氧气瓶内氧气的绝对压力 p_2 为194.8公斤力/厘米²，表压力为193.8公斤力/厘米²。

例1-4 某柴油机废气涡轮增压器出口的增压空气，用压力表测得压力为1公斤力/厘米²，温度为 76°C 。经过中间冷却器，此增压空气在等压下冷却为 40°C 。试求增压空气在增压器出口和经过中间冷却器等压冷却后的比容各为多少？

解：先求增压器出口空气的比容，按照气体状态方程式

$$pv = RT \quad \text{或} \quad v = \frac{RT}{p}$$

因为是空气

$$R = 29.3 \text{ 公斤力} \cdot \text{米/公斤} \cdot \text{度}$$

此时的温度为 76°C ，使用此公式，应化为绝对温度

$$T = 76 + 273 = 349\text{K}$$

此时的表压力为1公斤力/厘米²，使用上式，应换算为绝对压力，并取大气压力 $B = 1$ 公斤力/厘米²，而且在使用此公式时，压力的单位为公斤力/米²，还要把单位换算一致，所以

$$p = 1 + 1 = 2\text{公斤力/厘米}^2 = 2 \times 10^4\text{公斤力/米}^2$$

这样，可得比容

$$\nu = \frac{RT}{p} = \frac{29.3 \times 349}{2 \times 10^4} = 0.51 \text{米}^3/\text{公斤}$$

再经过中间冷却器后，空气的比容变为 ν_2 ，因为是等压冷却，按照公式(1-9)可得，

$$\frac{\nu_2}{\nu} = \frac{T_2}{T} \quad \text{或} \quad \nu_2 = \nu \frac{T_2}{T}$$

$$T_2 = 40 + 273 = 313\text{K}$$

$$\nu_2 = 0.51 \times \frac{313}{349} = 0.46 \text{米}^3/\text{公斤}$$

对于G公斤气体，按照公式(1-11)

$$pV = GRT$$

当已知一容器的容积为V、压力为p、温度为T时，便可求该容器内储存的气体重量。例如，

氧气瓶的容积 $V = 40 \text{升} = \frac{40}{1000} \text{米}^3$ ，压力(充满氧气时) $p = 151 \text{公斤力/厘米}^2 = 151 \times 10^4 \text{公斤力/米}^2$ ，温度 $T = 20 + 273 = 293\text{K}$ ，气体常数 $R = 26.5 \text{公斤力} \cdot \text{米/公斤} \cdot \text{度}$ ，则按上式可求得储存于氧气瓶中氧气的重量为

$$G = \frac{pV}{RT} = \frac{151 \times 10^4 \times \frac{40}{1000}}{26.5 \times 293} = 7.8 \text{公斤}$$

三、通用气体常数

气体状态方程式中气体常数R的数值随气体的性质而异，在应用此式时，必须预先知道该气体的R值。为避免这一困难，可以阿佛加德罗定律导出普遍适用于各种气体的通用气体常数。

阿佛加德罗定律指出：“同温度同压力下，同体积的各种气体具有相同的分子数”。从它可以推知：在同温度同压力下，各种气体的重量之比等于分子量之比。重量是1米³气体的重量，亦即1米³中所有气体分子的重量，所以 $\gamma = mgn$ 。对于两种不同的气体，

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{n_1 m_1 g}{n_2 m_2 g} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

式中 μ 表示分子量。考虑到比容和重量互成倒数，可得

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1}$$

所以

$$\mu_1 \nu_1 = \mu_2 \nu_2 \quad (1-14)$$

上式表明，同温度同压力之下，1公斤分子量的各种理想气体，其容积都相等。

由于1公斤分子量的气体具有这一特点，所以把公斤分子量作为气体的计算单位有很多便利。1公斤分子量又叫1莫尔。莫尔数用k表示，则

$$k = \frac{G}{\mu} \quad (1-15)$$

一切理想气体，当p、T相等时， $\mu\nu$ 都相等。我们把 $\mu\nu$ 叫做莫尔容积。在标准状态下(0°C, 760毫米汞柱压力下)各种气体的莫尔容积都等于22.4米³，即

$$\mu\nu = 22.4 \text{标准米}^3/\text{莫尔} \quad (1-16)$$

根据上式可以求得各种气体在标准状态下的重 γ 度和比容 $v_{\text{标}}$ 。

标准米³也常被用作气体的一种计量单位，它表示在标准状态下占据1米³容积的气体。

三种常用的计量气体的单位间关系如下式所示：1莫尔气体的量 = μ 公斤气体的量

$$= 22.4 \text{ 标准米}^3 \text{ 气体的量}$$

从式(1-14)可以推知各种气体的 μR 是相等的。任取两种气体，各引用理想气体状态方程式(1-10)，得

$$p_1 \mu_1 v_1 = \mu_1 R_1 T_1$$

和

$$p_2 \mu_2 v_2 = \mu_2 R_2 T_2$$

既然当 p 、 T 相应相等时， $\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2$ ，故可知 $\mu_1 R_1 = \mu_2 R_2$ 。再则， μ 和 R 都是与状态无关的常数，故 μR 是既和状态无关，也和气体性质无关的普适恒量。 μR 叫做“莫尔气体常数”，或“通用气体常数”。其数值可从任一气体、任一状态下的参数确定。若取标准状态下的参数

$$\mu R = \frac{p \mu v}{T} = \frac{1.033 \times 10^4 \times 22.4}{273} = 848 \text{ 公斤力} \cdot \text{米} / \text{莫尔} \cdot \text{度}$$

从通用气体常数可以求得任一气体的气体常数 R

$$R = \frac{848}{\mu} \text{ 公斤力} / \text{米}^3 / \text{公斤} \cdot \text{度} \quad (1-17)$$

对于1莫尔的气体，状态方程式可写成

$$p \mu v = 848 T \quad (1-18)$$

例1-5 某送风机出口处风压表的读数为400毫米水柱，温度为50°C，当地气压读数为755毫米汞柱，求此处空气的比容。已知空气的分子量为28.9。

解：理想气体的状态方程式为 $p v = R T$

所以

$$v = \frac{R T}{p}$$

送风机的出口风压表读数为400毫米水柱，那么它的绝对压力

$$p = p_{\text{表}} + B$$

$$p_{\text{表}} = \frac{400}{10^4} \text{ 公斤力} / \text{厘米}^2 = 0.04 \text{ 公斤力} / \text{厘米}^2$$

当地大气压化为工程气压

$$B = \frac{755}{735.6} \text{ 公斤力} / \text{厘米}^2 = 1.03 \text{ 公斤力} / \text{厘米}^2$$

$$p = 0.04 + 1.03 = 1.07 \text{ 公斤力} / \text{厘米}^2$$

$$= 1.07 \times 10^4 \text{ 公斤力} / \text{米}^2$$

$$T = t + 273 = 50 + 273 = 323 \text{ K}$$

$$R = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{28.9} = 29.3 \text{ 公斤力} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度}$$

$$v = \frac{R T}{p} = \frac{29.3 \times 323}{1.07 \times 10^4} = 0.885 \text{ 米}^3 / \text{公斤}$$

即此处空气的比容为0.885米³/公斤。

例1-6 燃烧1公斤煤需要10公斤空气，若每小时燃烧100公斤煤，需要多少标准立方米