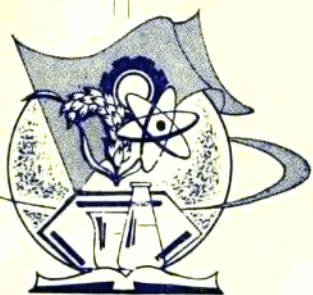


中等专业学校试用教材



热 工 学

福建省化工学校

蔡士垣 编

化学工业出版社

内 容 提 要

本书分为工程热力学、工业锅炉和工业汽轮机三篇，共十八章。讲述了工程热力学的基本理论、工业锅炉和工业汽轮机的结构、工作原理及操作常识。章末均安排有习题，书末备有附录。

本书是根据1982年制订的中等专业学校“热工学教学大纲”编写的，可作为化工中等专业学校化工机械专业的教科书，还可供化工类其它专业师生及有关的工程技术人员参考。

中等专业学校试用教材

热 工 学

福建省化工学校

蔡士垣 编

责任编辑：李建斌

封面设计：许立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

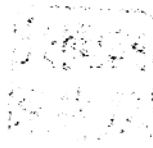
新华书店北京发行所发行

开本787×1092^{1/16} 印张15^{1/4} 插页1 字数371千字 印数1—13,670

1986年6月北京第1版 1986年6月北京第1次印刷

统一书号15063·3844(K-303) 定价 ~~4.50~~元

1.85



前 言

本教材是根据一九八二年十一月化工部中专热工学教材会议审订的四年制80学时“热工学教学大纲”编写的。

全书共分三篇，第一篇工程热力学；第二篇工业锅炉；第三篇工业汽轮机。第一篇主要讲述热力学的基本概念、基本定律以及气体和蒸汽的性质、热力过程和循环、气体和蒸汽的流动等，力图使学生较好地掌握工程热力学的基本理论，并为学习其他有关课程打下必需的理论基础。第二篇及第三篇重点讲述工业锅炉和工业汽轮机的工作原理、构造特点和运行性能，进一步联系化学工程实际，使学生学到必需的生产知识并培养解决实际问题的能力。

本书在编写过程中，注意采用由浅入深、重点深入、难点分散的原则，在章节的安排上作了一定的考虑。为了加深理解所学内容，在章中附有一定数量的例题，章后附有复习思考题和计算题。

书中注有*的章节，根据教学大纲规定，未计入总学时内，由各校根据具体需要安排。

全书采用国际单位制，对工程单位制也作了适当的介绍。

本书由化工部教育司委托北京化工学院吴德钧同志主审，并经一九八四年十二月在北京召开的热工学教材编审小组会议复审通过。

参加审稿会的单位有：湖南化工学校、兰州化工学校、吉林化工学校及太原化工学校。

编者感谢主审人和参加审稿的全体同志对本书的仔细审阅和提出的宝贵意见，并希望能得到读者的批评和指正。

编者

1985年2月

目 录

基本符号

绪论

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念	6
§1-1 工质及其基本状态参数.....	6
§1-2 热力装置及热能转变为机械能的过程.....	11
第二章 气体的性质	13
§2-1 理想气体与实际气体.....	13
§2-2 理想气体状态方程式.....	13
§2-3 气体的比热.....	16
§2-4 热量的计算.....	20
*§2-5 实际气体状态方程式及压缩因子 Z	22
第三章 混合气体	28
§3-1 混合气体的分压力和分容积.....	28
§3-2 混合气体的成分表示法.....	29
§3-3 混合气体的计算.....	31
§3-4 混合气体的比热.....	33
第四章 热力学第一定律	35
§4-1 气体的内能.....	35
§4-2 膨胀功与压容图.....	36
§4-3 热力学第一定律.....	37
§4-4 稳定流动能量方程式、焓.....	38
第五章 气体的热力过程	44
§5-1 热力过程的基本概念.....	44
§5-2 定容过程与理想气体的内能.....	45
§5-3 定压过程与理想气体的焓.....	46
§5-4 等温过程.....	48
§5-5 绝热过程.....	50
§5-6 多变过程.....	53
*§5-7 气体的压缩.....	55
第六章 热力学第二定律	64
§6-1 热力循环.....	64

§6-2	热力学第二定律	66
§6-3	卡诺循环及卡诺定理	66
§6-4	熵与温熵图	70
§6-5	孤立系统熵增原理	76
§6-6	热泵	79
第七章	水蒸汽及蒸汽动力循环	82
§7-1	水蒸汽的基本概念	82
§7-2	定压下水蒸汽的产生过程	84
§7-3	水蒸汽表及水蒸汽的焓熵图	87
§7-4	水蒸汽的基本热力过程	89
§7-5	蒸汽的动力循环	92
§7-6	提高蒸汽动力循环效率的方法	95
第八章	气体与蒸汽的流动	99
§8-1	稳定流动基本方程式	99
§8-2	喷管流动的基本特性	101
§8-3	气体通过喷管的流速和流量	102
§8-4	绝热节流	107
§8-5	绝热滞止	109

第二篇 工业锅炉

第九章	工业锅炉概述	112
§9-1	锅炉设备的组成	112
§9-2	锅炉的特性指标	113
§9-3	工业锅炉的型号	115
第十章	燃料及其燃烧	118
§10-1	燃料及其分类	118
§10-2	煤的组成	120
§10-3	煤的分类及其发热量	124
§10-4	燃料燃烧的计算	127
第十一章	锅炉热平衡	131
§11-1	锅炉热平衡方程式	131
§11-2	锅炉效率	132
§11-3	锅炉的各项热损失	133
§11-4	锅炉的燃料消耗量	136
第十二章	锅炉的燃烧设备——炉子	137
§12-1	燃料在炉内的燃烧过程和炉子的分类	137
§12-2	手烧炉	138
§12-3	链条炉	140
§12-4	振动炉排和往复推动炉排	142

§12-5	抛煤机炉	144
§12-6	悬燃炉	145
§12-7	沸腾炉	146
§12-8	炉子热强度及燃烧情况的判断	147
第十三章	汽锅及辅助受热面	149
§13-1	汽锅型式的发展过程及基本类型	149
§13-2	几种典型锅炉的介绍	150
§13-3	锅炉的辅助受热面	159
§13-4	锅炉的传热过程及水循环	161
第十四章	锅炉的辅助设备 & 锅炉附件	165
§14-1	锅炉的辅助设备	165
§14-2	锅炉附件	169
第十五章	锅炉的给水处理和运行	175
§15-1	天然水的性质及锅炉的水质标准	175
§15-2	锅内水处理	179
§15-3	锅外水处理	180
§15-4	锅炉给水的除氧	184
§15-5	锅炉的运行与安全	186

第三篇 工业汽轮机

第十六章	汽轮机的工作原理及分类	190
§16-1	汽轮机的工作原理	190
§16-2	汽轮机的分类和型号	197
§16-3	汽轮机的功率和效率	200
第十七章	汽轮机的构造及凝汽设备	208
§17-1	汽轮机的主要零部件	208
§17-2	工业汽轮机结构示例	215
§17-3	汽轮机的凝汽设备	219
第十八章	汽轮机的调节及安全装置	223
§18-1	汽轮机调节系统	223
§18-2	汽轮机的保护装置	226
§18-3	汽轮机的油系统	228
§18-4	汽轮机的安全运行	230
附录	233
附表 1	国际单位制与工程单位制的单位换算	233
附表 2	常用气体的某些基本热力性质	234
附表 3	某些常用气体在理想气体状态下的平均定容质量比热	234

附表 4 饱和水与干饱和水蒸汽表 (按温度排列)	235
附表 5 饱和水与干饱和水蒸汽表 (按压力排列)	237
附表 6 未饱和水与过热水蒸汽表	239
参考文献	242

绪 论

一、能源及热能的利用

能源是人类赖以生存的物质基础。能源的开发和利用与人们的生活及人类文明的进程有密切的关系。自然界中蕴藏着各种不同形式的能，如燃料的化学能、水能、风能、原子能、太阳能、地热能等。

目前，世界各国利用得最多的仍然是燃料的化学能。因此，也常把煤炭、石油、天然气等石化燃料及水能、生物能等称为常规能源，而把目前尚应用较少或正处于大力试验研究阶段的能源，如太阳能、地热能、原子能等称为新能源。煤、石油、天然气不仅是燃料动力的能源，也是重要的化学工业原料。

我国是一个能源资源比较丰富的国家。煤已探明的储量为六千五百亿吨，居世界第三位；石油已探明的储量居世界第八位；天然气的储量居世界第十六位。水力资源极为丰富，理论蕴藏量居世界第一位（理论蕴藏量为6.8亿千瓦，其中可供经济开发者约占50%）；铀、钍和其他新能源的资源也比较丰富。但由于我国人口众多，按人口平均数计算，每人能源平均占有量实际上只相当于世界平均数的一半。

解放以来，在党的领导下，我国能源开发的速度比较快，1979年全国能源生产折合标准煤为6.43亿吨，为解放前的27倍。1979年我国能源消费总量为5.86亿吨标准煤，居世界第三位。随着工农业生产的发展和人民生活水平的提高，能源的供求关系将在相当长的时期内处于紧张的状态。

我国的能源消耗情况，与工业发达的国家相比，存在着利用率低、浪费大、经济效益差等问题。1978年能源的总利用率只达到30%。在能源消耗中，工业部门的能源消耗量约占整个国民经济总能源消耗量的65%。1978年工业耗用能源的利用率也只有39%，许多工业产品的耗能费用占产品价格的30~50%。

党的十二次全国代表大会确定，我国经济建设总的奋斗目标是：在不断提高经济效益的前提下，力争到二〇〇〇年使全国工农业总产值翻两番。能源问题已被列为经济发展的三个战略重点之一，四个现代化建设需要大量的能源，因此，增加能源开发，节约能源消耗，已成为国民经济中带有全局性的问题。我国当前的能源方针是，在加强能源开发的同时，大力节约能源的消耗。

供作能源使用的物质，除一部分作为化学工业原料外，其余绝大部分，都要转化为热后被利用。据统计，经过转化为热而被利用的能量，在我国占90%以上，世界许多国家也超过85%。因此，热能的利用和研究，对整个人类的生产和生活有着巨大的意义。

人们对热能的利用，原则上有两种不同的方式，一种是直接利用，即把热能直接用于加热物料；另一种是间接利用，即把热能转化为机械能或者再转化为电能。这两种利用方式，都需要经过一定的热工设备或过程才能实现。

化学工业是一个多行业多品种的国民经济部门，它在我国的工业耗能中占有相当大的比重，每一种重要的化工产品，从原料到成品的整个生产过程中，如燃料的消耗、固体和

流体物料的输送、气体的压缩、固体物料的破碎、混合物的分离、化学反应的进行等，都需要耗用大量的能源。许多生产过程的废液、废气（汽）、废渣，以及成品或半成品也都带有相当多的余热可供利用。

二、热工学的性质、任务和内容

热工学是一门研究热能在工程上有效利用的综合性技术科学，把热能有效又合理地加以利用是这门学科的主要课题。它研究的内容包括：将燃料的化学能转变为热能、机械能的规律和方法；研究参与这些转变的工质的热力性质；以及为实现这些转变的热工设备（锅炉和热机）的工作原理和构造；研究日常生产和生活中热能的有效利用等问题。

在当前的技术工程中，热能的利用极为普遍，是当前耗用能源的主要形式。人们不仅直接把热能用作加热的能源，而且更大量的是通过各种热机（蒸汽机、汽轮机、内燃机、燃气轮机和喷气发动机等）把它转换为另一种形式的能量——机械能或电能。但值得注意的是，在实现能量转换的过程中，总存在着大量的热能损失。因此，为了合理而有效地实现热能与其它形式能量的转换，就必须对能量转换规律，对参与转换过程工质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，以求进一步探讨提高热转换效率的有利途径。

大家知道，凡是存在温度差的地方，就有热量自发地从高温物体传向低温物体。因此，无论在热能的直接利用或间接利用中，都存在着热量的传递，这就促使人们去研究热量传递的规律，以改善传热过程和合理利用热能。

热工学是由热工理论基础和热工设备两大部分所组成。热工理论基础包括工程热力学和传热学，热工设备包括锅炉设备及各种热力发动机。压气机、制冷机和热泵等也是另一类型的热工机械。

化学工程技术人员，在生产过程中广泛接触到各种热工设备和热力机械，也大量接触到热能的利用问题。因此，为了利用好热能，降低产品能耗，就要求化学工程技术人员掌握热工基础理论和热工基本知识。

热工学是化工机械专业学生在进行专业训练的过程中必须学习的一门重要的技术基础课程。本课程根据专业性质的要求及不同课程间的分工，只讲授工程热力学、工业锅炉和工业汽轮机等三个部分，传热学的内容归入化工原理课中。

三、国际单位制

研究一个物理量，必须正确使用它的计量单位。

建国以后一段时期，我国出版的热工书籍大都采用工程单位制。

由于历史条件的不同，世界各国曾使用过和使用着多种不同的计量制度。

由于计量单位的不统一，往往造成一个物理量几种单位并用的情况，使换算复杂，计算麻烦，给经济建设和科技事业带来困难。

随着科学技术的发展和国际交流的日益增多，一九六〇年第十一届国际计量大会决定，采用一种以米制为基础发展起来的国际单位制，其国际代号为（SI），我国简称为国际制，它具有统一性、继承性、科学、合理、精确、实用、简明等优点，受到世界各国的普遍重视，经试用后，到目前为止已有八十多个国家宣布采用。一九七七年五月，国务院

颁布的《中华人民共和国计量管理条例（试行）》已明确规定“要逐步采用国际单位制”。一九八四年二月二十七日，国务院又发布了《关于在我国统一实行法定计量单位制的命令》，决定在采用先进的国际单位制的基础上，进一步统一我国的计量单位。命令要求在一九九〇年前完成向国家法定计量单位的过渡。因此，本书中所涉及的物理量均采用国际单位制。考虑到在过渡期间国内的工程实际情况，对工程单位制也作了适当的介绍。

工程上所用到的众多物理量，通常它们之间都是按一定的规律和关系相互联系着。为了清楚表示各种物理量的单位，人们人为地把它们分为基本量和导出量两种。在一种单位制中，都是首先确定几个彼此独立的简单物理量作为基本量，并给每个基本量规定出一个单位，称为基本单位，它们是构成本单位制的基础。其余的物理量，都可以根据物理关系，由物理量的定义和定律从基本量推导出来，这种由基本量导出的物理量称为导出量，其单位称为导出单位。例如，在国际单位制中，以长度和时间作为基本量，其基本单位分别定为〔米〕和〔秒〕，则速度是个导出量，它的单位〔米/秒〕就是导出单位。

国际单位制中，是以长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量、发光强度这七个物理量作为基本量。它们可以适应各科学技术领域的需要。

在热工学中，常用到的基本量有：长度、质量、时间、热力学温度和物质的量等五个。国际单位制的基本单位和单位符号见表1。

表1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安〔培〕	A
热力学温度	开〔尔文〕	K
物质的量	摩〔尔〕	mol
发光强度	坎〔德拉〕	cd

注：表中单位名称，去掉方括号时为单位名称的全称，去掉方括号及其中的字，即成为单位名称的简称，无方括号的单位名称简称与全称同。圆括号中的名称与它前面的名称是同义词。下同。

表2中给出热工学中常用到的一些物理量的导出单位。

表2 国际单位制中主要热力学量的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	用SI单位表示的表示式
力	牛〔顿〕	N	kg·m/s ²
功、热量、能量	焦〔耳〕	J	N·m
压力、压强	帕〔斯卡〕	Pa	N/m ²
功率	瓦〔特〕	W	J/s
比内能、比焓	焦〔耳〕每千克		J/kg
比热、比焓	焦〔耳〕每千克开〔尔文〕		J/(kg·K)

国际单位制中，力是个导出量，力的单位是一个导出单位。按牛顿第二运动定律：
质量×加速度=力

$$\text{即} \quad 1\text{kg} \times 1\text{m/s}^2 = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

于是得到力的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。国际计量会议给该单位定名为牛顿，单位符号为N。中文简称为牛。

功亦为导出量，功的单位为导出单位，按功的定义，

$$\text{力} \times \text{距离} = \text{功}$$

$$\text{即} \quad 1\text{N} \times 1\text{m} = 1\text{N} \cdot \text{m}$$

故功的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ ，它的专门名称为焦耳，单位符号为J，中文简称为焦。

在工程单位制中，长度、时间和力都是基本量，它的单位为基本单位。长度的单位为米，时间的单位为秒，力的单位为千克力，单位符号为 $\text{kg} \cdot \text{f}$ ，其定义为：在纬度为 45° 的海平面上，即在重力加速度等于 9.80665m/s^2 的地方，千克原器 1kg 所受到的重力为 $1\text{kg} \cdot \text{f}$ 。

工程单位制中，质量为导出量，质量的单位是导出单位。按牛顿第二定律，

$$\frac{\text{力}}{\text{加速度}} = \text{质量}$$

$$\text{即} \quad \frac{1\text{kg} \cdot \text{f}}{1\text{m/s}^2} = 1\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

故质量的单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 。此外，可导出功的单位为 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 。

两种单位制单位间的换算关系，可根据千克力的定义，并按牛顿第二运动定律导出，

$$1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9.80665\text{m/s}^2 = 9.80665\text{N} \approx 9.8\text{N}$$

$$1\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m} = \frac{9.80665}{1\text{m/s}^2} = 9.80665\text{kg} \approx 9.8\text{kg}$$

此外，根据千克力的定义，在标准重力加速度下，具有 $1\text{kg} \cdot \text{f}$ 重量的物质和质量为 1kg 的物质，实际上是等量的。

国际单位制和工程单位制的单位换算表，见附录表1。

在国际单位制中，还规定了一套词头，表示从 10^{-18} 至 10^{18} 因数共十六个，用以构成十进倍数和十进分数单位，见附录表1(4)。

常用的国际单位制词头为： 10^6 称为兆，符号为M； 10^3 称为千，符号为k； 10^{-2} 称为厘，符号为c； 10^{-3} 称为毫，符号为m； 10^{-6} 称为微，符号为 μ 。

第一篇 工程热力学

工程热力学主要是研究热能与机械能相互转换的规律及其在热力工程中的应用。为研究热力设备的工作情况及工作条件提供所必需的理论基础。

热能转变为机械能，必须借助一套设备和借以传递能量的载能物质，即所谓“热机”和“工质”。因此必须研究它们的基本规律和性质。

工程热力学的主要内容包括：热力学第一定律和第二定律、气体和蒸汽的热力性质、热力过程和热力循环等。

工程热力学中，主要应用热力学的宏观研究方法，把组成物质的大量分子、原子等微粒作为一个整体，研究它所表现出来的性质和规律。热力学基本定律，是人类通过对热现象进行直接观测和大量实验所得的理论结果，它的可靠性和对各种情况的普遍适用性，已为实践充分证明。有时为了解释热现象和经验定律的本质，也引用气体分子运动学说和统计物理学的基本观点及研究成果。

象其它学科一样，在工程热力学中也普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。这种科学的抽象，在进行理论研究时特别有用，它能更深刻地反映客观事物的本质。

第一章 基本概念

§ 1-1 工质及其基本状态参数

从物理学中知道，热能和机械能是两种不同形式的能，它们在一定条件下可以互相转化。

在热力过程中，要实现热能的传递和把热能转化为机械能，都要借助于能够携带热能的工作物质才能实现，这种工作物质在热力工程中被称为“工质”。充当工质的最基本条件是：要有好的流动性和受热后有显著的膨胀性。工程中最适于充当工质的是：气体或由液态过渡为气态的蒸汽。如内燃机中的燃气、蒸汽机中的蒸汽。

工质在进行热量传递和能量转换过程中，将发生状态的变化。所谓状态是指工质在某一瞬间所呈现的物理状况。描述工质状态的物理量叫做工质的“状态参数”。如果气体有了一组确定的状态参数，就标志着气体处于一个确定的状态。

在工程热力学中研究工质的状态时，为使问题简化，都是假定工质处于平衡状态，这种平衡不同于简单的机械平衡，而是包括热平衡（即温度平衡）与力平衡（即压力平衡）。工质在平衡状况下，各部分状态均匀一致，每个状态参数只有一个确定的数值。

工程热力学中，常用的状态参数有六个：即温度 T ；压力 P ；比容 v ；内能 u ；焓 h ；熵 s 。其中压力、温度、比容是可以直接或间接用仪器测出的量，并且易于理解其物理意义，是用于描写工质状态最常用的参数，称为基本状态参数。后三个参数，内能 u 、焓 h 、熵 s 是由这几个基本参数导出的称为导出参数，它们将于后述各章中陆续讲到。

一、温 度

温度是表示物体冷热程度的物理量。物体温度的高低确定了热量传递的方向，例如温度高的物体会自发地把热量传递给温度低的物体。根据气体分子运动理论，组成气体的分子总是处于不停的无规则的运动之中，气体温度的高低与大量分子热运动的动能成正比，气体分子热运动的动能愈大，气体的温度就愈高。由于气体各个分子平移运动速度的大小和方向各不相同，它们的动能也不相等，因此需要确定分子运动的平均动能来阐明大量分子热运动的情况。

气体分子平移运动平均速度可取其均方根速度，即

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2}{n}} \quad (1-1)$$

式中 n ——单位容积内气体分子的数目；

$w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ——气体中各个分子平移运动的速度。

气体分子平移运动的平均动能与气体的绝对温度存在着下述的关系：

$$\frac{m\bar{w}^2}{2} = BT \quad (1-2)$$

式中 $\frac{m\bar{w}^2}{2}$ ——分子平移运动的平均动能；

m ——分子的平均质量；

\bar{w}^2 ——分子平移运动的均方根速度；

B ——比例常数；

T ——气体的热力学温度。

由此可见，分子运动学说揭示了物质冷热程度的本质。

工程上测量物体的温度用温度计或其它测温仪表。

众所周知，当两个冷热不同的物体相互接触时，热物体要变冷，冷物体要变热，最后达到两物体冷热程度相同，称为热平衡。处于热平衡的物体，都具有相同的温度。这一事实，是我们用温度计测量物体温度的依据。当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计指示的温度就等于被测物体的温度。

国际上为了统一测定温度的标准，确定了量度温度的标尺称为“温标”。

国际单位制（即SI制）中，以热力学温标作为基本温标。它所定义的温度称为热力学温度，其符号为 T ，单位为开尔文，单位代号为K。

热力学温度也常沿用“绝对温度”的名称，它是以气体分子热运动平均动能趋于零的温度为起点，定为0K，并以水的三相点，即水的固、液、气三态共存时的温度为基本点，并定其温度为273.16K。于是1K就是水三相点热力温度的 $\frac{1}{273.16}$ 。

国际单位制中，容许与热力学温度并用的还有摄氏温度，单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。

绝对温标1K与摄氏温标 1°C 的间隔是完全相同的。在一个标准大气压下，纯水冰点的热力学温度为273.15K，它比水的三相点热力学温度低0.01K。

热力学温度与摄氏温度存在着下述的关系：

$$T = t + 273.15\text{K} \quad (1-3)$$

在不需要精确计算的情况下，可近似地认为，同一物体的绝对温度比摄氏温度大273度，即

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

二、压 力（压强）

装在容器中的大量气体分子，总是处于永远不停的热运动之中，它们除了相互碰撞之外，还不断地和容器壁碰撞。大量分子碰撞器壁的总结果，形成了气体对器壁的压力。根据分子运动论，可从理论上推导出作用于单位面积上的压力与分子浓度及分子平移运动平均动能之间的关系式：

$$P = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{w}^2}{2} \quad (1-4)$$

式中 P ——气体分子作用在单位面积上的绝对压力；

n ——分子浓度，即单位容积内含有气体的分子数；

$n = N/V$ ；

N ——容积为 V 时，容器中气体的分子总数；

$\frac{m\bar{w}^2}{2}$ ——每个分子作平移运动的平均动能。

由式(1-4)可以看出, 气体的压力等于单位容积内所有分子平均动能的三分之二。若单位容积内所含的分子数目愈多, 分子的平均动能愈大, 则气体的压力也就愈大。式(1-4)从气体分子运动论的观点, 阐明了气体压力的本质。

前面提到, 分子平移运动平均动能的大小, 标志着物体温度的高低, 由此揭示了气体压力与温度之间的内在联系, 将式(1-2)代入式(1-4)可得:

$$P = \frac{2}{3}nBT \quad (1-5)$$

工程热力学上, 还常把压力表示为单位面积上所承受的垂直作用力(物理上称为压强), 并以下式计算:

$$P = \frac{F}{f} \quad \text{牛顿/米}^2 (\text{N/m}^2)$$

式中 F ——整个器壁受到的垂直作用力, 单位为牛顿(N);

f ——器壁的总面积, 单位为米²(m²)。

压力的单位N/m²称为帕斯卡, 简称帕, 单位代号为Pa。工程上因[帕]作为单位太小, 常用[兆帕]表示, 符号为MPa。

目前工程中, 压力的单位还常用[巴]和[标准大气压]等。它们与帕的换算关系见表(1-1)。

表 1-1 各种压力单位与帕的换算关系

单位名称	单位代号	与帕的换算关系
巴	bar	1巴=10 ⁵ 帕或0.1兆帕
标准大气压	atm	1标准大气压=101325帕 =1.01325巴
工程大气压	at	1工程大气压=1千克力/厘米 ² =9.80665×10 ⁴ 帕 =0.980665巴
毫米水柱	mmH ₂ O	1毫米水柱=9.80665帕
毫米汞柱	mmHg	1毫米汞柱=133.3224帕

经测定, 在纬度45°海平面上的全年平均大气压力为760mmHg(0℃), 国际上把它规定为标准大气压力, 或者称为物理大气压。工程上为了计算简便, 规定1千克力/厘米²(kgf/cm²)的压力为1工程大气压力。

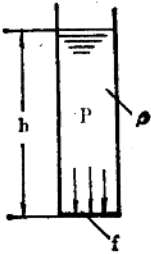


图 1-1 用液柱高度表示压力

应当注意, “标准大气压”和“工程大气压”都是压力的计量单位, 不要与所在地区的实际大气压相混淆。在实际工程中提到的大气压, 除特别指明是物理大气压外, 一般都是指工程大气压。

根据水力学原理可知, 液柱作用在容积底面积 f 上的压力等于液柱的重量(见图1-1)即:

$$Pf = hf\rho g$$

$$h = \frac{P}{\rho g}$$

式中 P 为液柱作用在底面积 f 上的压强； h 为液柱的高度； ρ 为液体的密度； g 为重力加速度。对于已知的液体， ρ 为常数，因而 h 与 P 成正比，所以压力的单位也可以用液柱的高度表示，常用的为汞柱和水柱。

工程上，液柱与压力单位之间的关系如下：

$$1\text{at} = 1\text{kgf/cm}^2 = 10^4\text{kgf/m}^2 = 10^4\text{mmH}_2\text{O} = 735.6\text{mmHg}.$$

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 10332\text{mmH}_2\text{O} = 1.0332\text{at} \text{ 或 } \text{kgf/cm}^2.$$

$$1\text{bar} = 750.062\text{mmHg} = 10197.2\text{mmH}_2\text{O} = 0.986923\text{atm} = 1.01972\text{at}.$$

锅炉及高压容器中，工质的压力往往很高，这些设备中工质的压力单位，通常采用工程大气压。管道及烟道中工质的压力较小，通常用水柱或汞柱高度表示。

工程上测量压力的大小都用压力表，一般常采用弹簧式压力表，当压力不高时，也可用U型管压力计来测定。见图1-2所示。

因为压力表本身都处在大气压力的作用之下，因此所测得的压力值都是工质的真实压力与大气压力间的差数。

工质的真实压力称为“绝对压力”，以 P 表示。大气压力以 B 表示，绝对压力大于大气压力时，压力表指示的压力值称为表压力，用 P_g 表示，则可得到：

$$P = B + P_g$$

当绝对压力低于大气压力时，用真空表测得的数值，即绝对压力低于大气压力的数值，称“真空度”，用 P_v 表示，则可得到：

$$P = B - P_v$$

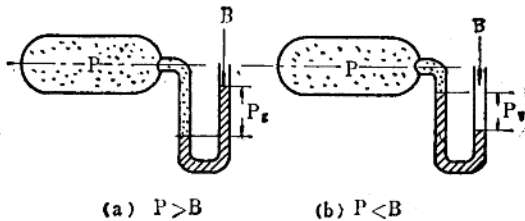


图 1-2 表压力概念示意图

大气压力的值可用气压计测定，其数值随所在地的纬度、高度和气候等条件而有所不同(在当时当地测得的大气压称为“当地大气压”)。

所以，即使绝对压力不变，随着大气压的不同，表压力和真空度也要发生变化。因此，表示工质状态参数的压力，只能用绝对压力。当表压数值越大时，因大气压在绝对压中所占的比例甚小，在工程计算中常简单地把 B 当作 1 个工程大气压来处理。当绝对压力的数值较小时，例如只有 1 个大气压左右或小于 1 个大气压时， B 就不能作此简化。工程上，绝对压力常用单位代号 (ata) 表示，而表压力则用 (atg) 表示。

三、比 容

工质的容积通常因所处的温度和压力的不同而不同，反映定量工质容积大小的状态参数就是比容。比容是指单位质量的工质所占有的容积，以符号 v 表示。其单位为 m^3/kg 。按定义可得：

$$v = V/m \quad \text{米}^3/\text{千克}(\text{m}^3/\text{kg})$$

式中 m 为工质的质量， V 为工质的容积。

单位容积工质所具有的质量称为密度，以符号 ρ 表示，其单位为 kg/m^3 。按定义可得：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad \text{千克}/\text{米}^3(\text{kg}/\text{m}^3)$$

故比容与密度互为倒数。

单位容积内工质的重量称为重度，以符号 γ 表示，其单位为 N/m^3 。按定义可得密度与重度之间的关系为：

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g$$

式中 g 为重力加速度， m/s^2 。

由于工质的比容随温度和压力而变化，实用中往往需要规定某一状况为标准状态。国际上把压力为 1atm ，温度为 0°C （或 273K ）的状态规定为标准状态。习惯把标准状态的压力、温度、比容分别记作 P_0 、 t_0 、 v_0 ，容积记作 V_0 。标准状态即：

$$P_0 = 1\text{atm} = 760\text{mmHg}$$

$$t_0 = 0^\circ\text{C} \text{ 或 } T_0 = 273\text{K}$$

〔例1-1〕 从工程单位制水蒸汽表中查得，水蒸汽在 450°C 、 30atm 时的比容为 $0.10998\text{m}^3/\text{kg}$ ，求在国际单位制中上述各参数的值。

〔解〕 在国际单位制中

$$\text{温度为 } T = t + 273.15 = 450 + 273.15 = 723.15\text{K}$$

$$\begin{aligned} \text{压力为 } P &= 30 \times 98066.5 = 2942000\text{Pa} \\ &= 2.942\text{MPa} \quad (\text{或 } p = 29.42\text{bar}) \end{aligned}$$

$$\text{比容为 } v = 0.10998\text{m}^3/\text{kg}.$$

〔例1-2〕 某热电厂新蒸汽的表压为 100atg ，凝汽器的真空度为 94620Pa ，送风机表压为 145mmHg ，当时气压计读数为 755mmHg 。试问以 Pa 及 bar 为单位的绝对压力为多少？

〔解〕 大气压力 $B = 755 \times 133.322$

$$= 100660\text{Pa} = 1.0066\text{bar}$$

新蒸汽的绝对压力为

$$\begin{aligned} P_1 &= B + P_g = 100660 + 100 \times 98066.5 \\ &= 9907300\text{Pa} = 99.073\text{bar} \end{aligned}$$

凝汽器中蒸汽的绝对压力为

$$\begin{aligned} P_2 &= B - P_v = 100660 - 94620 \\ &= 6040\text{Pa} = 0.0604\text{bar} \end{aligned}$$