

中等专业学校教材

热工学

杭州化工学校 上海市化工学校 合編

化学工业出版社

中等专业学校教材

热 工 学

杭州化工学校 上海市化工学校合編

化学工业出版社

本书是根据1964年修訂的教学大綱而編成的，除緒論外，全书分“工程热力学”与“鍋炉设备及热机学”两大篇。前一篇包括工质及其基本状态参数、理想气体的基本定律、混合气体、气体的比热、热力学第一定律、气体的热力过程、热力学第二定律、水蒸汽等八章，后一篇包括鍋炉设备、蒸汽机及內燃机三章。可作为中等专业学校化工机械装备专业的試用教科书，也可供作其他专业同性质課程的教学参考书之用。

中等专业学校教材

热 工 学

杭州化工学校
上海市化工学校 合編

* * *

化学工业出版社出版 (北京安定門外和平門七区八号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 120 号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

开本: 850 × 1168 毫米 ^{1/32}	1966年1月北京第1版
印张: 4 ^{13/16} 插頁: 2	1966年1月北京第1版第1次印刷
字数: 120,000	印数: 1—5,041
定价: (科四) 0.90 元	书号: K15063·1025

前 言

本教材是根据1964年在大連召开的教材編审小組會議上修訂的热工学教学大綱編写而成，适用于中等专业学校化工机械装备专业。內容分两篇：第一篇工程热力学，第二篇鍋炉設備及热机学。工程热力学与热机学由杭州化工学校教师林材同志編写；鍋炉設備由上海市化工学校教师黃世桥同志編写。初稿曾于1964年修訂大綱的同时作过第一次討論和修改，并由吉林化工学校与上海市化工学校进行試用，1965年夏在北京召开的教材編审小組会上又根据試用及审閱人审閱意見对教材作了第二次討論和修改。本书的审閱人是大连化工学校石殿臣同志。

在編写过程中主要参考了李特文編的工程热力学（龙门联合书局，1956），清华大学热工教研組編的热工学（人民教育出版社，1963）与同济大学热工教研組編的热工学（人民教育出版社，1960），并結合专业特点力求少而精、重点突出。用較多篇幅講述了本課程的基本理論工程热力学部分。至于鍋炉設備与热机部分則較之以上所列参考书有所删減，传热学因已在其他課程講述，本教材沒有編入。

由于水平所限，不論內容和叙述方面，都可能还有不妥当或錯誤之处，希望使用本教材的同志們和同學們多多提出批評意見，以便再版时修訂改正。

編 者

1965年8月

目 录

前言

緒論	1
----------	---

第一篇 工程热力学

引言	4
----------	---

第一章 工质及其基本状态参数	4
----------------------	---

§ 1—1 温度	5
----------------	---

§ 1—2 压力	6
----------------	---

§ 1—3 比容	9
----------------	---

第二章 理想气体的基本定律	11
---------------------	----

§ 2—1 理想气体的概念	11
---------------------	----

§ 2—2 理想气体状态方程式	12
-----------------------	----

§ 2—3 理想气体定律	13
--------------------	----

§ 2—4 莫尔、莫尔容积及气体常数 R 的计算	15
----------------------------------	----

第三章 混合气体	19
----------------	----

§ 3—1 分压力与分容积	19
---------------------	----

§ 3—2 混合气体的组成	21
---------------------	----

§ 3—3 混合气体的折合分子量与气体常数	22
-----------------------------	----

§ 3—4 分压力的计算	24
--------------------	----

§ 3—5 混合气体的计算公式表	24
------------------------	----

第四章 气体的比热	28
-----------------	----

§ 4—1 比热的一般概念	28
---------------------	----

§ 4—2 真实比热与平均比热	29
-----------------------	----

§ 4—3 热量的计算	31
-------------------	----

§ 4—4 混合气体的比热	34
---------------------	----

第五章 热力学第一定律、压容图	36
-----------------------	----

§ 5—1 气体的内能	37
-------------------	----

§ 5—2 过程功、压容图	37
---------------------	----

§ 5—3 热与功的当量原理	39
----------------------	----

§ 5—4 热力学第一定律	40
---------------------	----

第六章 气体的热力过程	42
§ 6—1 热力过程的基本概念	42
§ 6—2 定容过程	43
§ 6—3 定压过程, 焓	45
§ 6—4 等温过程	47
§ 6—5 绝热过程	48
§ 6—6 多变过程	52
第七章 热力学第二定律, 熵图	57
§ 7—1 循环	57
§ 7—2 卡诺循环	59
§ 7—3 热力学第二定律	61
§ 7—4 熵、熵图	62
§ 7—5 在熵图上的过程线	64
§ 7—6 在熵图上循环热效率的分析	65
§ 7—7 在熵图上诸热力过程的热力分析	67
第八章 水蒸汽	69
§ 8—1 蒸汽的基本概念	69
§ 8—2 水蒸汽的产生过程, 水蒸汽的压容图	71
§ 8—3 水蒸汽的状态参数, 水蒸汽表	73
§ 8—4 水蒸汽的焓熵图	77
§ 8—5 水蒸汽的热力过程	81
§ 8—6 水蒸汽的熵图	84
§ 8—7 蒸汽动力厂的简单循环——郎肯循环	86
§ 8—8 气体与蒸汽的流动过程, 节流现象	89

第二篇 锅炉设备及热力学

引言	94
第九章 锅炉设备	95
§ 9—1 锅炉设备的一般介绍	95
一、锅炉设备的基本组成和锅炉附件	95
二、锅炉设备的基本特性	101
§ 9—2 燃料与燃烧	103

一、燃料及其分类	103
二、煤的組成	104
三、煤的发热量	104
四、煤的分类及选用	105
五、燃料的燃烧过程	106
§ 9—3 炉子	109
一、人工操作炉	109
二、机械抛煤炉	111
三、鏈篋炉	112
四、悬燃炉	113
§ 9—4 鍋炉的型式	114
一、火筒鍋炉	114
二、火管鍋炉	116
三、火筒——火管組合鍋炉	116
四、直管式水管鍋炉	117
五、弯管式水管鍋炉	118
§ 9—5 小型鍋炉的运行和安全	120
第十章 蒸汽机	121
§ 10—1 蒸汽机的基本构造及其工作原理	121
§ 10—2 蒸汽机的理論示功图和实际示功图	123
§ 10—3 蒸汽机中的热損失及其改进方法	126
§ 10—4 蒸汽机的配汽机构	127
§ 10—5 蒸汽机的功率、效率和汽耗率	130
§ 10—6 蒸汽机的調节机构	135
第十一章 內燃机	137
§ 11—1 內燃机的一般概念	137
§ 11—2 內燃机的工作原理	138
§ 11—3 內燃机的示功图	141
結束語	144
附录: 表 1 飽和蒸汽(变数为温度)	145
表 2 飽和蒸汽(变数为压力)	147
表 3 过热蒸汽与水	插表
附图 水蒸汽的 $i-s$ 图线	插图

緒 論

“热工学”是“热力学工程”的简称，它是由“工程热力学”、“传热学”与“热机学”三部分組成。

自然界中存在着各种形式的能，如机械能、热能、电能、原子能等等。但应用这些能源来为人类的生产与生活服务的先后則各有不同。其中如水力、风力等机械能早已为人们在生产活动中所利用，而原子能則直至最近年代才为人们所掌握。

人们利用热能有两种不同方式，一种是直接用它来加热取暖，另一种是先将它轉化为机械能而后作为动力使用。我国盛传的燧人氏钻木取火，正說明了加热取暖的开始，至于作动力使用則是出現蒸汽机以后才有的事。

各种能之間的相互轉換，必按一定規律进行。研究热能与其他各种能量之間相互轉換規律的科学，称为热力学，而“工程热力学”則只研究热能与机械能之間的轉換規律，是热力学的一重要部分。“热机学”研究的是把热能轉化为机械能的实际设备的知识，至于“传热学”則是研究热的传递規律。“工程热力学”与“传热学”构成了热工学的理論基础，“热机学”是它的具体应用。

在化工企业中，热的利用极其广泛。很多工艺过程都要利用蒸汽来进行加热，因此掌握蒸汽的性质以及熟悉产生蒸汽的鍋炉設備就非常必要。此外化工厂中普遍的使用着压缩机和制冷技术，要懂得它們的工作原理，必須掌握热能和机械能的轉換規律。因此要求我們必須純熟地掌握“工程热力学”的基本內容。作为动力設備，化工厂中亦常使用着蒸汽泵以及各种形式的蒸汽机，所以我們对这种热机应具有一定的必要知识。除蒸汽机外，热机还

包括有汽輪机、內燃机以及燃气輪机等。汽輪机及燃气輪机，在化工厂中应用較少，故不予講述，本书仅对內燃机作簡單介紹。

“热工学”这門科学，到目前为止，只有約二百多年的历史。在此以前，人們只知道利用热能，但不能正确的理解热能。直至十八世紀中叶，分子运动学說出現后才給热能以科学的解释。其后，人們对热現象与热机的使用曾作过无数次的观察研究，最后总结出热力学第一定律与热力学第二定律，才奠定了工程热力学的理論基础。

当十八世紀中叶，蒸汽机付之使用，大大的推动了生产力，促进了当时的产业革命。十九世紀中叶出現了高速轉动的汽輪机，促进了电力工业的发展。与此同时，內燃机亦获得了迅速地发展，对交通运输事业起了极大的促进作用。十九世紀末，由于工业上解决了耐高溫的金属材料，于是又出現了燃气輪机。二十世紀五十年代以来，原子能的利用已付之实践，这样便把热工事业推向了更新的阶段。

我国是一个文明古国，很早就有些热工方面的雛型发明，像走馬灯、爆竹等。然而这些成就在当时的封建社会中是不可能得到重視与发展的，尤其是經历了帝国主义压迫与国民党的黑暗統治，使我国的热工事业远远落在欧美一些国家的后面。解放以后由于党中央与毛主席的正确领导，热工事业与其他部門一样，从无到有，逐年有所发展。特别是自1958年全国工农业大发展以来，蒸汽动力設備制造工业更有了飞跃地发展。在鍋炉方面，目前已制成蒸发量为230吨/小时和蒸汽参数为 540°C 与压力为100表气压的大型高压鍋炉，并正在制造蒸发量更大、蒸汽参数更高的大型鍋炉。在汽輪机方面，1955年才能自制6000瓩汽輪机，1958年就已能自制12000瓩和25000瓩的汽輪机，現已成批投入生产。50000千瓦与功率还要大的汽輪机也正在进行制造中。解放前，我国根本不会制造汽車和拖拉机，而今天，有名的国产“解放牌”汽車已經在祖国遍地馳騁；适合于我国南北耕地的各种牌号国产

拖拉机，已能成批生产。其他交通运输工具也一样，例如，1957年制成2960馬力的“和平号”蒸汽機車和2400馬力的单流式船用蒸汽机；大馬力的內燃機車、船用內燃机和船用汽輪机也都正在制造。此外，飞机制造工业在我国也早已建立，而最近在我国西部地区又成功地爆炸了两顆原子弹。我国掌握了原子能的利用，无疑将对全世界人民反帝和保卫和平的事业起到有力的保証作用。由此可見，我国的热工事业已經有了巩固基础，相信在今后社会主义建設新高潮中，热机的生产和使用都将成倍地增长，而热工方面的基本知识也将日益成为更多人需要的知识。

第一篇 工程热力学

引 言

热力学是一门研究热能与其它各种能之间相互转换的科学。工程热力学是热力学的一部分，它研究的对象仅限于热能与机械能之间的转换规律。

气态物质的分子，是不断地而且不规则地在运动着。分子的不规则运动叫做热运动；它们的运动能量便称为热能，而一般物体的运动能量，称为机械能。研究热能与机械能之间的转换规律，便是工程热力学的基本内容。

通常是用热量来度量以热的方式来传递的能量，犹之用功来度量机械能的传递一样。热量常用符号 Q 表示，单位是仟卡。所谓一仟卡是指一公斤的蒸馏水在标准大气压下，从 19.5°C 加热到 20.5°C 所需要的热量。

第一章 工质及其基本状态参数

在热机中要实现热能转变为机械能的过程，必须借助于某种媒介物，这种媒介物在热工中常称为工质。工质的最基本条件是受热后有显著的膨胀性，当其膨胀时，便施功于外界，因而得到机械能。最适宜于充当工质的是气体或蒸汽，因为它们具有最大的膨胀能力，如蒸汽动力设备中，便以蒸汽充当工质；内燃机中，

便以燃气充当工质。因此，工程热力学所研究的工质通常仅限于气体和水蒸汽两种。

描述物质每一聚集状态下的特征所采用的物理量，叫做物质的状态参数。状态参数中只要有一个量发生变化，就意味着物质的状态在改变。气体的状态一般可用温度、压力、比容这三个参数来描述，这三个量称为气体的基本状态参数。

§ 1-1 温 度

根据气体分子运动学说的概念，温度是物质分子直线运动平均动能的度量。组成物质的分子数目很多，每个分子都用不同的速度在运动着。设分子数目为 n ，用 $w_1, w_2, \dots, w_n$ 分别表示各个分子的直线运动速度，则由下式所代表的速度值，称为气体分子的均方根速度：

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

所谓分子直线运动的平均动能，是指用这个均方根速度来计算得的一个分子的直线运动的动能，即 $\frac{m \cdot w^2}{2}$ （式中 m 是一个分子的质量）。而气体的温度则正比例于这个量，即：

$$\frac{m \cdot w^2}{2} = B \cdot T \quad (1-2)$$

式中 B 为比例常数。平均动能愈大，表示气体的温度愈高；反之，平均动能愈小，表示气体的温度愈低。

如果两种温度不同的物体相接触，则由于相接触的分子相互碰撞结果，能量就由较大的传递给较小的，直到相等为止。这便说明了：热量是由高温物体传向低温物体，而且最后两物体的温度达到平衡。

因为不能简便地测出分子运动的平均动能，故不能利用(1-2)式来制造温度计。为了测定物质的温度，就必须利用一些直接

与温度有关的物性。例如：利用物质的热胀冷缩性质，就制成了气体压力式温度计、液体膨胀式与固体膨胀式温度计，水银温度计是其中最普通使用的一种。此外，利用了其它物质性质制成的温度计，尚有电阻温度计、热电偶温度计、与光学温度计等。

表示温度高低的标记谓之温标。具体地说，它包括参考点的选择、测量单位的大小等等。工程上常采用国际百度温标，以符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。在这种温标中，把在一个标准大气压下冰的熔点取作零度，在相同气压下水的沸点作为100度。如在 0°C 与 100°C 之间给予一百等分，则每一等分称为一度 $^{\circ}\text{C}$ 。在热力学研究中，常采取另一种所谓绝对温标，以符号 $^{\circ}\text{K}$ 表示。绝对温标中每一度的大小与百度温标完全一样，可是起点不同，它的零度却在冰的熔点以下273.16度（在工程计算中常舍去小数点后的数字，用273度已够准确）。这种状态实际上是达不到的，因而实际计算中就不会出现负值，所以作为状态参数，就采用绝对温标，而不采用百度温标。以 T 表示绝对温度， t 表示百度温度，则两者之间的关系是：

$$T = t + 273^{\circ} \quad (1-3)$$

§1-2 压 力

在盛装气体的容器中，大量的气体分子不断地在运动着，并不断地撞击器壁，结果形成了气体对器壁作用的力。所谓压力是指每单位面积上所作用的力，其方向是垂直于器壁，一般用符号 p 来表示。

物理学上，压力的单位用标准大气压或称物理大气压（指在纬度 45° 海平面上的大气平均压力）。

工程上，压力的单位则常用公斤/米²，在实际中应用较多的是公斤/厘米²，并称1公斤/厘米²的压力为一工程大气压，一工程大气压非常接近于一个标准大气压力。

因：1标准大气压 = 1.0333 公斤/厘米² = 1.0333×10^4 公斤/米²，

1 工程大气压 = 1 公斤/厘米² = 1×10^4 公斤/米²。

故：1 标准大气压 = 1.0333 工程大气压。

在以后的叙述中，除非特别指明外，一般所称的大气压是指工程大气压。

气体压力也可以用当某种液体施于底面上的压力与气体压力相等时的液柱高度来表示。设液体的重度(单位体积的重量)为 r ，液柱的底面积为 f ，高度为 h ，则液柱的重力为 $h \cdot f \cdot r$ ，于是作用在底面上每单位面积上的力(即压力) p 与液柱高度 h 间的关系是：

$$p = \frac{h \cdot f \cdot r}{f} = h \cdot r \quad (1-4)$$

例题1—1 通常用来表示液柱压力的液体是水与汞，水的重度为 1000 公斤/米³，汞的重度为 13595 公斤/米³，则相当于一个工程大气压的水柱与汞柱高度各是多少？

解： 应用公式 (1-2)，相当于 1 工程大气压的水柱与汞柱分别为：

$$1 \text{ 工程大气压} = h_{\text{水}} = \frac{p}{r_{\text{水}}} = \frac{10000 \text{ 公斤/米}^2}{1000 \text{ 公斤/米}^3} = 10 \text{ 米水柱。}$$

$$1 \text{ 工程大气压} = h_{\text{汞}} = \frac{p}{r_{\text{汞}}} = \frac{10000 \text{ 公斤/米}^2}{13595 \text{ 公斤/米}^3} = 0.736 \text{ 米汞}$$

柱 = 736 毫米汞柱。同理，可得：

$$1 \text{ 物理大气压} = 10.33 \text{ 米水柱} = 0.76 \text{ 米汞柱} = 760 \text{ 毫米汞柱。}$$

绝对压力、表压力、真空度 为了测量容器中气体的压力，可用两端开口的 U 形管，管内装盛液体，一端与容器相连，另一端通大气。依容器内气体压力的不同，U 形管左右两支中的液面保持有一定的高度差 h 。图 1—1 表示容器中气体的压力比当时大气压力(用 $p_{\text{大气}}$ 表示)高出液柱 h_1 ，这种高出大气压力的值称为气体的**表压力**，用 $p_{\text{表}}$ (或 $h_{\text{表}}$) 表示。气体本身的压力则称为**绝对压力**，用 $p_{\text{绝}}$ (一般用 p) 表示。于是：

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{表}} + p_{\text{大气}} \quad (1-5)$$

在图 1—2 中，表示容器中气体的压力低于当时大气压力 h_2 液柱，这种低于大气压力的值，称为气体的真空度，用 $p_{\text{真}}$ （或 $h_{\text{真}}$ ）表示，于是气体的绝对压力为：

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大气}} - p_{\text{真}} \quad (1-6)$$

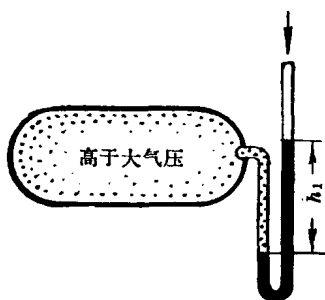


图 1—1 表压力的图示

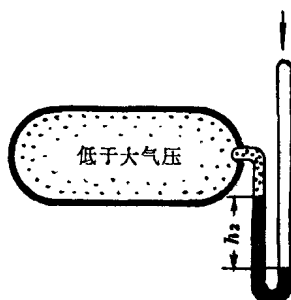


图 1—2 真空度的图示

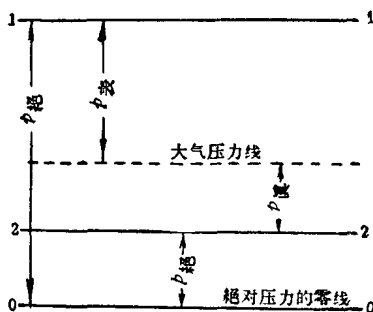


图 1—3 三种压力的关系图示

在工厂里，习惯上把表压称为正压，把真空度称为负压。

三种压力之间的关系，可用图 1—3 示出，图中 0—0 线表示绝对压力为零的线，虚线表示大气压力，1—1 表示高出大气压力的绝对压力线，其与虚线之间的高度差便是表压力 $p_{\text{表}}$ 。2—2 表示低于大气压力的绝对压力线，其与虚线之间的高度差便是真

空度 $p_{\text{真}}$ 。

測定氣體壓力的儀器稱壓力表，除上述的U形管外，通常採用的是彈簧式壓力表。前者用於測定較低的氣體壓力，後者用於測定較高的氣體壓力。但不論那種，都只能測出氣體的表壓力或真空度，要知道氣體的絕對壓力，尚須有一測定大氣壓力的氣壓計。在運用公式（1—5）與（1—6）時，應注意要統一三項的單位，一般計算較大的壓力時，用工程大氣壓作單位，計算較小的壓力時，用液柱高度作單位。在工程上，遇到較大的絕對壓力時，常把大氣壓力近似取作一個工程大氣壓，對精確度的影響不大。

例題1—2 設蒸汽鍋爐的汽鍋中蒸汽的壓力由壓力表指出是2.5個工程大氣壓，當時氣壓表的讀數是700毫米汞柱，求汽鍋中蒸汽的絕對壓力。

解：本題計算，宜用工程大氣壓為單位，先把氣壓表的汞柱數化為工程大氣壓，然後運用公式（1—5）得出蒸汽的絕對壓力為：

$$p_{\text{絕}} = p_{\text{表}} + p_{\text{大氣}} = 2.5 + \frac{700}{736} = 3.45 \text{ 工程大氣壓。}$$

例題1—3 冷凝器上的真空表指出的真空度為650毫米汞柱，當時氣壓表的讀數是745毫米汞柱，試計算冷凝器中的絕對壓力？

解：本題中氣體壓力較小，計算中宜採用液柱作單位，可直接運用公式（1—6）算得氣體的絕對壓力為：

$$\begin{aligned} p_{\text{絕}} &= p_{\text{大氣}} - p_{\text{真}} = 745 - 650 = 95 \text{ 毫米汞柱} = \frac{95}{736} \text{ 工程大氣壓} \\ &= 0.13 \text{ 工程大氣壓。} \end{aligned}$$

§ 1—3 比 容

單位重量的氣體所具有的容積，稱為氣體的比容，以符號 v 表示，單位是米³/公斤。設 G 公斤氣體的容積為 V 立方米，則該氣體的比容為：

$$v = \frac{V}{G} \text{米}^3/\text{公斤}$$

单位容积中气体的重量，称为气体的重度，以 r 表示，则：

$$r = \frac{G}{V} \text{公斤}/\text{米}^3$$

比容与重度互为倒数，即 $r \cdot v = 1$ ，实际上是说明同一个内容的状态参数。

在叙述气体的比容或重度时，必须说明气体所处的状态。因同一气体，在不同的压力与温度条件下就有不同数值的比容或重度。在热工学中常提到处于标准状态的气体，所谓标准状态是：压力是一物理大气压，温度是 0°C 时气体所处的状态，这时的比容与重度分别以 $v_{\text{标}}$ 与 $r_{\text{标}}$ 表示之。

计 算 题

1—1 某容器的容积为 0.6米^3 ，中储 0.72公斤 的空气，求这时空气的比容与重度。

1—2 气体的温度为 20°C ，折合绝对温度为多少？绝对温度为 219°K 的气体，以百度温标表示时为多少？

1—3 一真空装置上的真空表读数为 120毫米汞柱 ，当时气压计的读数为 770毫米汞柱 ，试求气体的绝对压力为多少汞柱？合多少水柱？合多少工程大气压？

1—4 装在蒸汽锅炉上的压力表指出压力为 4个工程大气压 ，当时气压计读数是 750毫米汞柱 ，过一些时，因气候突变，气压计读数降低为 600毫米汞柱 ，若锅内蒸汽压力没有改变，问这时压力表的读数应为多少？

1—5 运用液柱与压力换算关系式，试计算相当于 $1 \text{公斤}/\text{米}^2$ 压力的水柱高度为多少？相当于 1毫米汞柱 的水柱高度是多少？