

33

中等专业学校教材

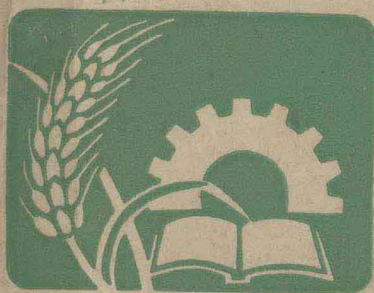
发电厂动力设备

上册

热力发电厂动力设备

(修订本)

西安电力学校热能教研组 编



中国工业出版社

中等专业学校教材



发电厂动力设备

上册

热力发电厂动力设备

(修订本)

西安电力学校热能教研组 编

中国工业出版社

本书分上、下两册。上册为热力发电厂的动力设备，下册为水力发电厂的动力设备。

本书上册“热力发电厂动力设备”于1961年出版第一版，現經修訂，繼續出版。內容仍分为热工学理論基础、鍋炉设备、汽輪机设备及热力发电厂四篇，进行叙述。可供“发电厂电网及其系統”和“电厂化学”两专业做为发电厂动力设备課程的試用教科书。

发电厂动力设备

上册

热力发电厂动力设备

(修訂本)

西安电力学校热能教研組 編

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙10号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张14³/₈·插頁7·字数305,000

1961年7月北京第一版

1966年1月北京第二版·1966年1月北京第四次印刷

印数11,648—14,727·定价(科四)1.60元

*

統一书号：K 15165·165(水电-31)

目 录

緒 論	1
第一篇 热工学理論基础	
第一章 工质及其計算	4
§ 1-1 工质、理想气体和实际气体	4
§ 1-2 气体的状态参数	4
§ 1-3 平衡状态及理想气体的状态方程式	8
§ 1-4 阿佛加德罗定律、气体常数的計算	9
§ 1-5 混合气体	10
第二章 热力学第一定律及热力过程	13
§ 2-1 热力过程、平衡过程与可逆过程	13
§ 2-2 理想气体的比热	13
§ 2-3 气体的功	19
§ 2-4 用图线表示过程—— $p-v$ 图及 $T-s$ 图	20
§ 2-5 热力学第一定律及其分析式	21
§ 2-6 基本热力过程	22
第三章 热力学第二定律及卡諾循环	30
§ 3-1 循环(封闭过程)及其热效率	30
§ 3-2 卡諾循环	31
§ 3-3 热力学第二定律	33
第四章 水蒸汽	34
§ 4-1 在 $p-v$ 图上蒸汽发生的过程	34
§ 4-2 在 $T-s$ 图上蒸汽发生的过程	35
§ 4-3 蒸汽图表	37
§ 4-4 水蒸汽的热力过程	39
§ 4-5 蒸汽的流动	40
§ 4-6 蒸汽的节流	42
§ 4-7 朗肯循环及其热效率	44
第五章 热交換理論基础	46
§ 5-1 热交換的定义及其基本方式	46
§ 5-2 經过壁的热传导	47
§ 5-3 对流放热	48
§ 5-4 放热系数的求法	50
§ 5-5 热輻射	51
§ 5-6 經过壁的传热	53
§ 5-7 热交換器	55
习题	59

第一章	鍋炉設備的一般概念	60
第二章	鍋炉的燃料和燃燒	62
§ 2-1	动力燃料的一般概念	62
§ 2-2	燃料的燃燒	64
第三章	鍋炉机組的热平衡	67
§ 3-1	概述	67
§ 3-2	鍋炉机組的主要热損失	67
§ 3-3	鍋炉机組热效率和燃料消耗量	68
第四章	鍋炉机組的燃燒設備	69
§ 4-1	概述	69
§ 4-2	层燃炉(火床炉)	69
§ 4-3	室燃炉	73
第五章	蒸汽鍋炉	77
§ 5-1	概述	77
§ 5-2	火管鍋炉	78
§ 5-3	水管鍋炉	79
§ 5-4	汽包及其內件	84
第六章	鍋炉的輔助受热面	86
§ 6-1	过热器	86
§ 6-2	省煤器	91
§ 6-3	空气預热器	93
第七章	鍋炉的輔助設備	96
§ 7-1	煤粉制备系統	96
§ 7-2	煤粉制备系統的设备	98
§ 7-3	通风設備	102
§ 7-4	除尘設備	104
§ 7-5	除灰設備	106
第八章	鍋炉的自动調节	109
§ 8-1	自动調节的概念	109
§ 8-2	汽鼓鍋炉的調节任务	110
§ 8-3	汽鼓鍋炉的給水自动調节	110
§ 8-4	汽鼓鍋炉燃燒过程的自动調节	114
第九章	鍋炉的运行	117
§ 9-1	鍋炉升火前的准备工作	117
§ 9-2	升火	117
§ 9-3	并汽	118
§ 9-4	鍋炉正常运行中的監督和安全装置	118
§ 9-5	停炉	119
§ 9-6	鍋炉的事故与維修	119

第三篇 汽 輪 机 設 备

第一章 汽輪机設備的一般概念	121
§ 1-1 汽輪机的优越性及其在现代工业中的地位	121
§ 1-2 汽輪机的发展簡史和現况	122
§ 1-3 汽輪机設備	123
§ 1-4 汽輪机的分类和型号	124
第二章 汽輪机工作的基本原理和热力过程	126
§ 2-1 汽輪机的工作原理和級内热力过程	126
§ 2-2 单級与多級汽輪机	131
第三章 汽輪机的損失和效率	133
§ 3-1 汽輪机的損失	133
§ 3-2 汽輪机的相对效率和絕對效率	136
§ 3-3 汽輪机的汽耗量和汽耗率	138
第四章 汽輪机的构造	138
§ 4-1 汽輪机的主要組成部件	138
§ 4-2 汽輪机整体构造示例	145
第五章 汽輪机的工况和調节	148
§ 5-1 汽輪机的工况概念	148
§ 5-2 汽輪机的蒸汽配給	148
§ 5-3 汽輪机的調速	150
§ 5-4 調速系統的静态特性曲线	155
§ 5-5 汽輪机的变速装置(同步器)	157
§ 5-6 汽輪机的并列运行	158
§ 5-7 汽輪机的油系統	159
§ 5-8 汽輪机的自动超速保險装置	161
第六章 凝汽設備	161
§ 6-1 凝汽設備的功用及其工作的一般情况	161
§ 6-2 凝汽器的构造	162
§ 6-3 凝汽器冷却水量的計算	166
§ 6-4 凝汽器的抽气設備	166
第七章 汽輪机的运行和維護	168
§ 7-1 汽輪机运行工作概述	168
§ 7-2 汽輪机的冷机起动	168
§ 7-3 汽輪机設備运行的观察与維護	171
§ 7-4 汽輪机的正常停車	173
§ 7-5 汽輪机典型事故的处理	174

第四篇 热 力 发 电 厂

第一章 热力发电厂的主要生产程序以及对它的基本要求	176
§ 1-1 热力发电厂的分类	176

VI

§ 1-2 热力发电厂的生产程序和組成	177
§ 1-3 对热力发电厂的基本要求	179
第二章 改进发电厂热力循环的措施	179
§ 2-1 蒸汽参数对循环热效率的影响	179
§ 2-2 蒸汽的中間再过热	182
§ 2-3 給水的回热加热	183
§ 2-4 热化	185
第三章 发电厂的热系統及其設備元件	187
§ 3-1 回热加热系統	187
§ 3-2 对外供热系統	190
§ 3-3 工质的損失及其补充	192
§ 3-4 主管路系統	197
§ 3-5 发电厂热系統举例	198
第四章 发电厂的供水和燃料管理	199
§ 4-1 发电厂的供水及其系統	199
§ 4-2 发电厂的燃料管理	202
第五章 发电厂的主厂房和总平面布置	206
§ 5-1 发电厂的主厂房布置	206
§ 5-2 发电厂厂址的选择及其总平面布置	213
第六章 发电厂的运行管理及主要經濟指标	215
§ 6-1 发电厂运行管理的經濟指标	215
§ 6-2 汽輪发电机和鍋炉之間的負荷經濟分配	217
§ 6-3 全年运行費用和能量成本	219
附录 1 水蒸汽的<i>i-s</i>图	
附录 2 飽和蒸汽(变数为温度)表	
附录 3 水及过热蒸汽表	

緒 論

一、发电厂动力設備的研究对象和主要内容

大家知道，能量是守恒和可以互相轉变的。因此人类可以利用各种自然能源（例如风能、水能、燃料热能、太阳辐射能及原子能等）在相应的設備中进行轉換而获得电能。但就目前广泛利用的自然能源来看，主要是燃料热能和水能。所以发电厂可分为热力发电厂和水力发电厂两大类。

現代的热力发电厂，主要是蒸汽輪机热力发电厂。它的生产过程如图 0-1 所示。燃料（主要是煤）在鍋炉 7的炉膛中燃烧而放出热能，通过鍋炉受热器将此热能传給水，水受热而蒸发，变成具有一定压力和溫度的蒸汽，蒸汽携带着热能进入汽輪机 1，利用它的热能对汽輪机叶栅做功使汽輪机轉子旋轉，把蒸汽的热能变成了汽輪机轉軸上的机械能，汽輪机带动发电机 2一起旋轉，从而获得了电能。

从上面的叙述中可以看出，热力发电厂中就能量轉变过程的阶段来看，可划分为两大部分，从燃料的化学能轉变为汽輪机的机械能的阶段，属于发电厂热力部分的范围；而机械能轉变为电能的阶段，属于电气部分的范围。热力发电厂动力設備所研究的内容是属于热力发电厂热力部分的范围，其中包括燃料化学能轉变为机械能的方法和規律，参加能量轉变的工作物质的性质，所用主要設備的工作原理、构造及简单的运行維護知識等等。

为了便于討論，本书上册分为下列四篇分別研究上述内容：

- 第一篇 热工学理論基础
- 第二篇 鍋炉設備
- 第三篇 汽輪机設備
- 第四篇 热力发电厂

水力发电厂的电能生产过程如图0-2所示。它是把电厂修建在水源附近，利用自然条件或人工方法，造成水面与水輪机之間有一个高度差，这样，作为工作物质的水，对于水輪机來說便儲备着一定的位能，当水从高处流向低处的水輪机时，便把它的位能轉变成流动的动能而对水輪机叶片做功，使水輪机带动发电机一起旋轉而获得电能。

由上述可知，从水的位能轉变为水輪机的机械能的阶段，属于水力发电厂水力部分的范围。所以水力发电厂动力設備所研究的主要内容是属于水力发电厂水力部分的范围，其

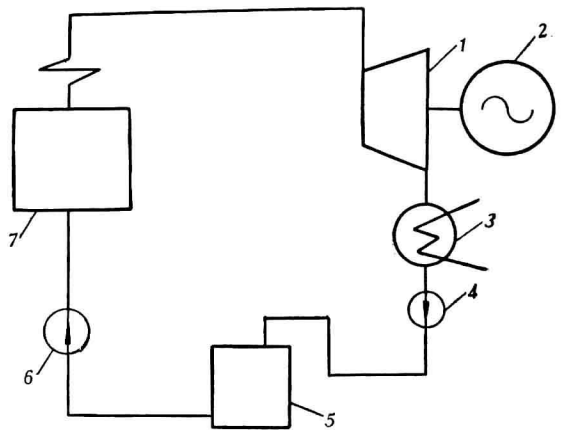


图 0-1 热力发电厂的生产过程

- 1—汽輪机； 2—发电机； 3—凝汽器； 4—凝結水泵；
- 5—水箱； 6—給水泵； 7—鍋炉

中包括水流的能量轉变为水輪机的机械能的方法和規律，所用主要設備和水工建筑物的原理及結構等。本书下册包括下列三篇：

第一篇 水力学基础

第二篇 水力发电站

第三篇 水輪发电機組及其輔屬設備

綜上所述可知，发电厂动力設備所研究的是发电厂最基本的能量轉变过程，学习以后，能使我们了解发电厂的生产过程，并懂得动力和电气两大部分相互之間的密切联系。显然，这些知識对于在发电厂电气部分和发电厂化学部分工作的技术人員來說是不可缺少的。

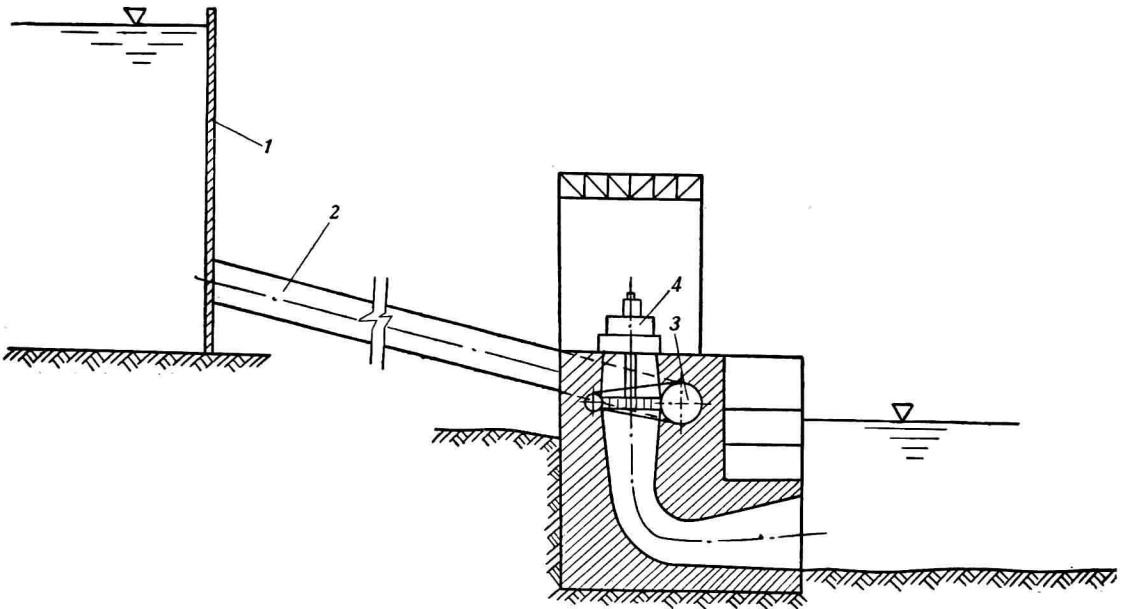


图 0-2 水力发电厂的生产过程

1—水坝； 2—引水管； 3—水輪机； 4—发电机

二、热能、水能的利用及其在国民經济中的重要意义

很早以前，人类就开始利用水力来推动一些简单的机械，以代替人的体力劳动，例如：用水力来磨米、紡紗、带动冶炼場里的风箱、带动矿井里的简单抽水机等等。但是随着生产力的发展，迫切要求有一种不受地区、时间的限制和功率較大的原动机。在十八世紀后半叶终于出现了蒸汽机。热能在生产中的利用，大大地促进了生产力的发展，引起了产业革命。至于水力的利用，一直到二十世紀远距离輸电得到发展的时候，才再一次显示出它的优越性，重新發揮出它的巨大作用。

二十世紀初电力設備出現以后，热能和热力发动机对社会生产力的发展，显示了更大的威力。电能比其它各种能有着許多重要的优点，例如：便于大量生产，易于远距离传送，易于轉变为其它形式的能，易于控制，易于使生产过程实现自动化等等。因此电力工业已成为国民經济中一个先行部門。現代发电厂大部分是以热力或水力作为它的原动力，

所以热能和水能的利用在国民經济中也就占有了很重要的地位。

以热力或水力作为原动力的发电厂各有其优点。热力发电厂的主要优点是受自然条件的限制小，可以把发电厂修建在負荷中心附近，投資較小及修建期短等等；而水力发电厂的主要优点則在于电能成本低，运行維護較簡單等等。如果把热力、水力发电厂都納入一个大电力系統中并列运行，就可以充分發揮它們的优点，为国民經济各部門提供既可靠又經济的电能，这在社会主义制度的国家中是有着极为优越的条件使之迅速实现的。

热能在国民經济的其它部門中，也有着广泛的应用，例如交通运输业、国防工业、輕工业等；而水能的利用也具有很大的綜合意义，随着水电站水工建筑物的修建，同时便可收到防洪、灌溉农田、发展航运等方面的效益。

三、我国的动力工程

我国在原动力的利用方面，早就有过光輝的創造。在三千多年前，我們的祖先就开始利用水輪作原动机来灌溉田地、帶动水磨和水碾等。但由于长期遭受封建制度的束縛及近百余年来帝国主义的侵略，因而这些光輝的創造未能得到进一步发展。

解放前，我国的动力工业水平比較落后，从1872年开始在上海建立第一个发电厂起，到1949年的67年間，总共建設了185万瓩容量的发电設備。解放后，在党的英明领导下，动力工业有了很大的发展，1959年发电設備容量已达到963.5万瓩左右，同时也建立起自己的动力設備制造工业，在热力設備制造方面，已制造出高压410吨/时、230吨/时，中压240吨/时、120吨/时、75吨/时等鍋炉以及配套的高压10万瓩、5万瓩和中压5万瓩、2.5万瓩、1.2万瓩等汽輪机。在水力发电設備制造方面，已制造出7.25万瓩的机組。更大容量、更高参数的动力設備也正在設計、試制中。与此同时，我国动力工程的安装、运行和科学研究力量也有了显著的增长。可以确信，全国人民在党的领导和毛泽东思想的光輝照耀下，自力更生，奋发图强，我国的动力工业和其它部門一样，将不断取得更大的发展。

第一篇 热工学理論基础

热工学理論基础包括工程热力学及传热学两部分。工程热力学研究热能和机械功之間的轉換規律。传热学則研究由于溫度差引起的热能传递的規律。

热能轉化为机械功，可在蒸汽发动机——蒸汽机或汽輪机中进行，也可在內燃机中进行。为了找出热能轉化为机械功（这是热力发电厂电能生产过程的一部分）的最有利条件，工程热力学研究了热能和机械功相互轉化的数量关系及轉化条件，即热力学第一定律和第二定律；轉化中所需的工作物质——气体的性质；实现轉化的措施——热力循环等内容。

生产的发展，使很多技术領域需要传热学的知識。为了减少热机的散热損失，提高热机的效率，同样要用传热学的知識。在传热学中將研究热交換的計算以及加强或减弱热交換的方法。

第一章 工质及其計算

§ 1-1 工质、理想气体和实际气体

在热机中，将热能轉化为机械功时，热能是由**工作物质**（简称**工质**）带入热机的。因为在各种物态中，**气体**状态受热时膨胀能力最大，并且具有很好的流动性，所以气体最适宜于做为工质。

在对气体作理論研究时，首先規定出一种简单形式的气体。所謂简单形式的气体，就是构成这种气体的各分子之間**没有吸引力而分子本身可視為没有容积的质点**，这种假想的气体叫做**理想气体**。在自然界中存在的每一种气体，都是由容积微小的分子所組成的，而各分子之間都有吸引力作用着。虽然如此，研究上述简单形式的气体还是具有很大的实际意义的，因为在常見状态下的实际气体，其分子間的吸引力与分子本身的容积都是很小的。因此，就可以把理想气体这一概念加以推广；所謂理想气体也可以理解为，在自然界中实际存在的分子間的吸引力和分子本身的容积可以忽略不計的每一种气体。由此可知，气体距液体状态愈远（也就是說气体变为液体愈难），則愈接近于理想气体。热工計算中很多气体（如空气、燃气、烟气的等）都可以近似地当做理想气体进行分析与計算。

当蒸汽作为蒸汽原动机的工质或热交换器的热介质时，其状态非常接近于液体状态（蒸汽很容易变为液体）。在这种情况下，分子間的吸引力及分子本身的容积已不能再忽略，应做为**实际气体**进行分析与計算。

§ 1-2 气体的状态参数

气体的状态参数，就是用以說明气体状态特征的物理量。本节将介紹压力、溫度、比容、內能、焓及熵等状态参数。

一、压力 气体的压力，是构成气体的大量分子在紊乱的运动中不断冲击容器壁的结果。气体压力用单位面积上所受垂直方向的力来表示。根据气体分子运动理论，可知气体的压力 p 为：

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

式中 n —— 分子浓度，即单位容积内的分子数， $n = \frac{N}{V}$ ；

$\frac{m\bar{w}^2}{2}$ —— 每个气体分子的平均动能。

上式说明了，气体的压力等于单位容积内气体分子平移运动的平均动能的三分之二。

假如把装有液体两头开口的弯管（U形管）连接到有气体的容器上，则液体在管中的位置将如图1-1或图1-2所示。从图中可以看出：在第一种情形下，容器中气体的压力比大气压力大 l_1 液柱高，这 l_1 液柱的压力叫做**表压力**（有时叫做剩余压力或工作压力），用 $p_{表}$ 来表示；在第二种情形下，容器中气体的压力比大气压力小 l_2 液柱高，这个值叫做**真空度**，用 h 来表示。容器中气体的压力，称为**绝对压力**，用 $p_{绝对}$ 来表示。令 B 表示大气压力，则由图1-1所示的情形可得下列平衡方程式：

$$p_{绝对} = B + p_{表}. \quad (1-2)$$

而由图1-2所示的情形，得：

$$p_{绝对} + h = B,$$

或

$$p_{绝对} = B - h. \quad (1-3)$$

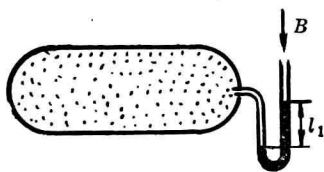


图 1-1

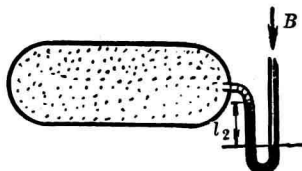


图 1-2

由公式（1-2）与（1-3）可以知道，表压力（用压力表量得的）和真空度（用真空表量得的）是决定绝对压力的辅助数值。而只有绝对压力才是状态参数。

气体压力的大小可用单位面积上所受力的大小来表示，或用液柱的高度来表示。假如用 p 表示单位面积上所受力的大小， H 表示液柱高度， γ 表示液体的比重，则可求出表示压力的各种数值之间的关系。

假如有一直立的液体柱，其底面积为 Ω ，这时很明显作用在这面积上的力等于液体的重量，即

$$F = p\Omega = H\Omega\gamma,$$

或得

$$p = H\gamma. \quad (1-4)$$

在热力工程中，一个工程大气压（简称大气压）定为10,000公斤/米²。用工程大气压

来测量绝对压力时，我们用[绝对大气压]来表示，而压力表读出的压力叫[表大气压]。

由公式(1-4)可以得出，1大气压等于735.6毫米水银柱高(当水银的温度为 0°C 时)或等于10米水柱高(水银的比重 $\gamma_{\text{水银}}=13595$ 公斤/米³，水的比重 $\gamma_{\text{水}}=1000$ 公斤/米³)，即：1工程大气压=1公斤/厘米²=10000公斤/米²=735.6毫米水银柱=10米水柱。

在物理学上，通常采用稍大一点的值作为测量压力的单位，以760毫米的水银柱高度为标准。这种压力，近似于纬度为 45° 地区海平面上大气的平均压力。此种压力单位称为**物理大气压**。

很容易求得：

$$1[\text{物理大气压}]=1.0333[\text{工程大气压}]=10333[\text{公斤/米}^2]=760[\text{毫米水银柱}]=10.333[\text{米水柱}].$$

二、**温度** 物体的温度是它的冷热程度。也就是气体分子平均移动动能的度量标准。两者之间的关系是：

$$\frac{1}{2}mw^2=BT. \quad (1-5)$$

式中 $\frac{mw^2}{2}$ ——分子平均移动动能；

T ——绝对温度；

B ——比例常数。

物体的温度可用温度计测定。当温度计与物体相接触，并等到它们之间达到热平衡状态时，温度计即确定了物体的待测温度。在热力学上采用百度温标来测定温度，这种温标用氢作为测温物质，两个固定点选为：纯净的冰的融点和标准大气压力下的纯净水的沸点。

在百度温标上，冰的融点以 0°C 表示，而沸点则以 100°C 表示。在这两个温度之间采用了一百个刻度。

这种温标上的温度以 $t^{\circ}\text{C}$ 表示。

0°C 以下及 100°C 以上的温度，由百度温标两端的相应延长而获得。

热力学中除了百度温标以外，也采用所谓**绝对温度**的温标，其零度是在百度温标零下 273.15°C 处。

绝对温度以 $T^{\circ}\text{K}$ 表示。

把绝对温度换算为百度温度或进行相反的换算时，可借助于下式进行：

$$\left. \begin{aligned} t &= (T - 273.15)[^{\circ}\text{C}]. \\ T &= (t + 273.15)[^{\circ}\text{K}]. \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

三、**比容** 比容 v 是1公斤的气体所占容积的米³数。比重 γ 表示每1米³气体的重量的公斤数。此二值互为倒数，即：

$$v\gamma=1. \quad (1-7)$$

上面介绍的压力、温度、比容三个状态参数，都可以在试验中用仪表测得，叫做**基本状态参数**。

例题1-1 汽锅中的压力由压力表量出为5.2大气压，气压表读数为780毫米水银柱，求绝对压力。

解 $p_{\text{绝对}}=p_{\text{表}}+B=5.2+\frac{780}{735.6}=6.26[\text{绝对大气压}].$

例题1-2 由真空表测得真空度为120毫米水银柱， $B=770$ 毫米水银柱，问绝对压力为若干？

解 $p_{\text{绝对}} = B - h = 770 - 120 = 650$ [毫米水银柱] 或 $p_{\text{绝对}} = \frac{650}{735.6} = 0.883$ [绝对大气压]。

四、气体的内能 组成气体的分子，处在不断地紊乱运动中，其运动的形式有：分子的直线运动；分子的旋转运动；分子内部原子的振动。这些运动都具有一定的能量，我们叫它为气体的内能。内能是决定于温度的。在实际气体中分子之间还存在着吸引力，因此实际气体除了内能以外，还具有用以克服分子间吸引力的位能，叫做内位能。内位能随气体的比容或压力而变。

内能与内位能组成了气体的内能，通常用 u 来表示 1 公斤气体的内能，它的单位是大卡/公斤。

由上述可知，气体的内能可用两个基本参数来描述，即：

$$u = f(p, T);$$

或

$$u = f_1(T, v); \quad u = f_2(p, v).$$

可知，内能亦为状态参数。

理想气体，仅包括内能一项，所以内能为温度的单值函数，即：

$$u = f(T).$$

通常在计算中，可把标准状态做为计算起点来考虑内能的变化量。

五、气体的焓 在热力学计算中，常遇到一种数值：

$$u + Apv,$$

为方便起见，我们就令

$$i = u + Apv, \quad (1-8)$$

式中 u 为工质的内能，而 p 及 v 是与所取内能数值相同状态下工质的压力和比容。在此式中，每个量均由工质的状态所决定，可知 i 也必是一个状态参数，称为焓。

参看图 1-3。设有参数为 p 、 v 、 u 的工质从管道的左边通过界限 $a-a$ 而不断地流入右边的空间。管道的横断面积为 F 米²。每一公斤工质由左边流入右边时，带进右边的能量应有：工质的内能 u ；由于克服前边工质的阻力所做的“推动功” $pFS = pv$ 以及工质的动能。

由此可知，焓就代表流动中的工质除了它本身的动能以外，在流动方向上向前方传递的总能量。

六、气体的熵 熵是一个导出的状态参数，它是通过其它可以直接测量的数量间接计算出来的。它与热量及温度有如下的关系：

$$ds = \frac{dq}{T},$$

或

$$s = \int \frac{dq}{T} + \text{常数}. \quad (1-9)$$

式中 s —— 熵，大卡/公斤·°K；

q —— 1 公斤气体所获得的热量，大卡/公斤；

T —— 气体在获得热量时的绝对温度，°K。

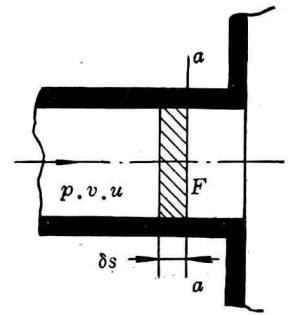


图 1-3 工质流过指定界限时的情况

由式(1-9)得

$$dq = T ds.$$

因为绝对温度 T 值永远为正数, 即 $T > 0$, 所以当气体状态发生变化时, 上式就有下面两种情况:

如熵增加, 即 $ds > 0$, 则 $dq > 0$, 此时表示工质在吸收热量; 如熵减少, 即 $ds < 0$, 则 $dq < 0$, 此时表示工质在放出热量。

因此, 我们可以由熵的变化来判断工质是被加热还是放热。

§ 1-3 平衡状态及理想气体的状态方程式

一、平衡状态

在热力学中常常遇到平衡状态的概念。所谓平衡状态, 就是指在沒有外界作用的情况下可以长久保持的状态。气体在平衡状态时, 其各部分应具有相等的压力、比容及温度。

只有在平衡状态时, 我们才有可能用同一的状态参数 (p 、 v 、 T 等) 来描写整个气体的状态。

二、理想气体的状态方程式

当气体处于平衡状态时, 在确定气体状态的参数 p 、 v 和 T 之间, 存在着一定的关系,

$$f(p, v, T) = 0.$$

这种用于表征气体状态的方程式叫做**气体状态方程式**。

由公式(1-1)及(1-5)已知:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{mw^2}{2},$$

$$\frac{mw^2}{2} = BT.$$

将下式代入上式, 即得

$$p = \frac{2}{3} n \frac{mw^2}{2} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} BT. \quad (1-10)$$

若气体为 1 公斤, 则

$$V = v,$$

$$N = N_0,$$

公式(1-10)即可写成如下形式:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N_0}{v} BT,$$

令

$$\frac{2}{3} N_0 B = R,$$

则得

$$pv = RT. \quad (1-11)$$

对 G 公斤气体:

$$pV = GRT. \quad (1-12)$$

公式(1-11)、(1-12)便是理想气体的状态方程式。

式中 R 称为**气体常数**, 各种气体都有自己的气体常数, 它不随气体的状态变化而改

变。

§ 1-4 阿佛加德罗定律、气体常数的计算

一、阿佛加德罗定律

此定律给出了不同种类的理想气体相互间的关系。十九世纪初，人们通过实验发现，不同的气体在相同的容积、温度与压力下，两种气体中所含的分子数必相等。即：

$$P_1 = P_2 \quad T_1 = T_2 \quad V_1 = V_2 \text{ 时,}$$

则

$$N_1 = N_2 \text{ 或 } n_1 = n_2.$$

式中 N ——分子数；

n ——单位容积内的分子数，称为分子浓度。

因为单位容积气体的重量等于每一分子的重量与所含分子数的乘积，而按照阿佛加德罗定律可知，不同的气体处于相同状态时 ($P_1 = P_2, T_1 = T_2$)，各种气体的比重与该气体的分子量成正比，因此，如用 μ 表示分子量，则对任意两种气体可得下列公式：

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}.$$

若用比容代替比重，则

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1},$$

从而

$$\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2. \quad (1-13)$$

现在我们引入一种新的重量单位，称做摩尔（又称公斤分子），它等于普通的重量单位（公斤）乘以被测量的物质的分子量。即

$$1 \text{ [摩尔]} = \mu \text{ [公斤]}.$$

例如，氧的分子量为32，因此一摩尔氧就是32公斤。

摩尔容积就是一摩尔气体的容积。

有了摩尔及摩尔容积的概念之后，我们可以把按照阿佛加德罗定律推出的公式(1-13)的结论表述如下：在相同的状态下，所有气体的摩尔容积均相等。

现以氧为例，求标准状况下的摩尔容积。在标准状况下，因为

$$T = 273.15 [^\circ\text{K}] \quad p = 1.0333 \text{ [工程大气压]}$$

$$\mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ [公斤]} \quad v_{\text{O}_2} = 0.7 \text{ [标准米}^3 \text{/公斤]},$$

所以

$$\mu_{\text{O}_2} \cdot v_{\text{O}_2} = 32 \times 0.7 = 22.4 \text{ [标准米}^3 \text{/摩尔]}.$$

因为在同一状态下，各种气体一摩尔的容积都相等，所以所有理想气体在标准状况下一摩尔的容积都等于22.4标准米³。

例题1-3 求 CO_2 在标准状态下的比重及比容。

解

$$\mu \cdot v = 22.4 \text{ [标准米}^3 \text{/摩尔]}.$$

$$v = \frac{22.4}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{22.4}{12 + 2 \times 16} = \frac{22.4}{44} = 0.508 \text{ [标准米}^3 \text{/公斤]},$$

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{1}{0.508} = 1.96 \text{ [公斤/标准米}^3 \text{]}.$$

二、气体常数的计算

当应用状态方程式进行计算时，需先计算出气体常数。本节将给出计算气体常数的常

用公式。

已知

$$Pv = RT.$$

得

$$R = \frac{Pv}{T}.$$

因气体常数不随气体的状态而变，所以可由标准状态来求，

$$R = \frac{p_n v_n}{T_n} = \frac{10333 \times 22.4}{273 \times \mu} = \frac{848}{\mu} \text{ [公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度}] \quad (1-14)$$

式中 p_n 、 v_n 、 T_n 的下角字“ n ”表示标准状态。

或

$$\mu R = 848.$$

μR 称为通用气体常数，用于气体数量为一摩尔时，即

$$p\mu v = 848T.$$

可知，对于所有气体而言其 μR 均为 848 公斤·米/摩尔·度。

例题1-4 当气体压力 $p = 2.5$ 大气压（表压）及温度 $t = 60^\circ\text{C}$ 时，占有容积为 4.5 米³，则在标准状态下它的容积将为若干？

解

$$\text{因为 } \frac{pV}{T} = \frac{p_n V_n}{T_n},$$

$$\text{所以 } V_n = \frac{pVT_n}{TP_n},$$

式中 $p_n = 1.0333$ 绝对大气压；

$$T_n = 273^\circ\text{K};$$

$$p = 2.5 + 1 = 3.5 \text{ 绝对大气压};$$

$$T = 60 + 273 = 333^\circ\text{K}.$$

$$V_n = \frac{3.5 \times 4.5 \times 273}{333 \times 1.033} = 12.5 \text{ 米}^3.$$

例题1-5 若 $B = 750$ 毫米水银柱，求 $V = 4$ 米³ 的 CO_2 气体在 $t = 80^\circ\text{C}$ 及 $p = 0.4$ 大气压（表压）时的重量。

解

$$\text{因为 } pV = GRT,$$

$$\text{所以 } G = \frac{pV}{RT} = \frac{\left(0.4 + \frac{750}{735.6}\right) \times 10^4 \times 4}{\frac{848}{44} \times (273 + 80)} = \frac{1.42 \times 10^4 \times 4 \times 44}{848 \times 353} = 8.35 \text{ [公斤]}.$$

§ 1-5 混 合 气 体

在热工学中也广泛地应用由数种不同的且相互不起化学作用的理想气体所组成的混合气体，如空气（由氧 O_2 、氮 N_2 、氩 Ar 及其它各种成分组成）、燃烧产物（由氮 N_2 、氧 O_2 、二氧化碳 CO_2 、水蒸汽 H_2O 及其它各种成分所组成）等等。

在进行混合气体的计算时，为了尽可能利用单纯气体所得出的各种计算公式，必须给出根据混合气体组成成分计算比容、气体常数、比重、平均分子量等的计算公式。

一、混合气体的分压力与分容积

假设在压力 p 、温度 T 时，有以两种成分组成的混合气体，其容积为 V （图1-4a），其中 $[+]$ 号代表第一种成分的分分子， $[O]$ 代表第二种成分的分分子。在温度不变的情况下，假定用人为的方法把两种成分分开，分开的方法可有如下两种：