

热工基础与热力设备

谷应鸣 李骥 陈绍伯 李大志 常石明

水利电力出版社

热工基础与热力设备

谷应鸣 李强 陈绍伯 李大志 常石明

(水利电力工业出版社重印)

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20.75印张 437千字 3插页

1982年1月第一版

1984年6月新一版 1984年6月北京第一次印刷

印数 00001—16550册 定价 1.80元

书号 15143·5391

前 言

本书是为满足学校教学和电力企业单位培训工作的需要而编写的一本教材。主要内容包括热工学基础、水力学基础、锅炉设备以及汽轮机设备和热力系统等四篇。

本书取材力求反映我国目前电厂的实际情况；同时考虑了学校教学特点和电力企业培训工作的需要，加强了基础理论及运行部分的内容。

为了避免篇幅过大，在编写中尽量突出典型设备的阐述，部分内容采用小字排印，供选择和参考。此外，书中还编选了一定数量的例题和习题。在使用本书时，可根据需要，增删某些内容。

本书承王大振、郑宝珠、王树森和楼维时等同志审阅；此外，王景龙、姜树君、于新荣、龙廷云、张国英、钟景林等同志对本书的编写也提出了许多宝贵意见，在此一并表示谢意。

恳切希望对本书的缺点及错误提出批评指正。

一九八一年六月

目 录

前 言

绪 论	1
-----------	---

第一篇 热 工 学 基 础

第一章 工质及理想气体的计算	2
----------------------	---

1-1 工质、理想气体和实际气体	2
1-2 工质的状态参数	2
1-3 平衡状态及理想气体的状态方程式	6
1-4 混合气体	8

第二章 热力学基本定律	11
-------------------	----

2-1 用比热计算热量	11
2-2 气体的膨胀功	16
2-3 用图线表示热力过程	17
2-4 热力学第一定律的分析式	17
2-5 基本热力过程	18
2-6 卡诺循环	25
2-7 热力学第二定律	27

第三章 水蒸汽及蒸汽动力装置循环	29
------------------------	----

3-1 水蒸汽的发生过程	29
3-2 水蒸汽图表的应用	31
3-3 蒸汽在喷管中的流动简介	35
3-4 蒸汽的节流	37
3-5 朗肯循环	39
3-6 再热循环	43
3-7 回热循环	44
3-8 电热合供循环	45

第四章 传热学基本知识	47
-------------------	----

4-1 热交换的基本方式	47
4-2 经过壁的导热	47
4-3 对流换热	49
4-4 热辐射	51
4-5 通过壁的传热	54
4-6 热交换器	56

第二篇 水力学基础

第五章 水静力学	59
5-1 液体的主要物理性质	59
5-2 水静压力及其特性	64
5-3 水静压力基本方程式	65
5-4 水静力学基本方程式的应用	67
第六章 水动力学	75
6-1 水动力学的几个基本概念	75
6-2 稳定流动的连续性方程式	78
6-3 稳定流动的能量方程式	79
6-4 能量方程式的应用条件及应用举例	82
第七章 水力阻力和水头损失	88
7-1 水力阻力和水头损失的分类	88
7-2 层流、紊流和雷诺数	89
7-3 沿程水头损失的计算	94
7-4 局部水头损失的计算	98
第八章 电厂常用水泵与风机的基本构造及工作原理	101
8-1 电厂常用水泵与风机的作用及分类	101
8-2 水泵的基本构造及工作原理	103
8-3 风机的基本构造及工作原理	110

第三篇 锅炉设备

第九章 锅炉设备的一般概念	112
9-1 发电厂锅炉的作用、组成及工作过程	112
9-2 锅炉设备的基本特性	115
9-3 锅炉的分类和型号	115
第十章 燃料和燃料的燃烧	116
10-1 概述	116
10-2 煤	117
10-3 燃油	122
10-4 燃料燃烧的化学反应	122
10-5 燃料燃烧的空气量	123
10-6 烟气的组成及计算	124
第十一章 锅炉燃烧设备	127
11-1 燃料燃烧的一般过程	127
11-2 煤粉喷燃器的结构及特性	128
11-3 炉膛	132
11-4 油的燃烧特点及燃油设备	137

第十二章 制粉设备	142
12-1 概述	142
12-2 磨煤机	143
12-3 制粉系统	145
12-4 制粉系统的主要辅助设备	148
第十三章 锅炉蒸发设备	153
13-1 锅炉蒸发设备	153
13-2 自然循环的基本原理	159
13-3 直流锅炉简介	161
13-4 复合循环锅炉简介	163
第十四章 过热器、再热器、省煤器、空气预热器	164
14-1 过热器与再热器	164
14-2 省煤器	175
14-3 空气预热器	178
第十五章 典型锅炉	187
15-1 HG-670/140-1型超高压再热锅炉	187
15-2 HG-410/100-1型高压锅炉	189
15-3 SG-1000/170-555/555型直流锅炉	191
第十六章 锅炉热平衡	195
16-1 概述及热平衡方程	195
16-2 送入锅炉的热量 (Q_r)	196
16-3 机械不完全燃烧热损失 (q_4)	197
16-4 化学不完全燃烧热损失 (q_3)	198
16-5 排烟热损失 (q_2)	198
16-6 散热损失 (q_5)	199
16-7 灰渣物理热损失 (q_6)	200
16-8 锅炉总有效吸热量和效率	200
第十七章 锅炉运行	201
17-1 锅炉正常运行的参数调节	201
17-2 锅炉工况变动对参数调节的影响	205
17-3 锅炉燃烧调节	208
17-4 直流锅炉参数调节特点	211
17-5 锅炉起动和停用	212
17-6 制粉系统的运行	220
17-7 锅炉事故的危害及常见事故的处理要点	223

第四篇 汽轮机设备及热力系统

第十八章 汽轮机的工作原理	227
18-1 汽轮机设备的一般概念	227
18-2 级的热力过程	230

18-3 多级汽轮机	236
第十九章 汽轮机的结构	239
19-1 汽轮机主要零部件的结构	239
19-2 典型汽轮机结构示例	253
第二十章 汽轮机调节	255
20-1 汽轮机调节的任务及基本原理	255
20-2 调节系统的静特性及同步器	258
20-3 汽轮机的油系统	262
20-4 汽轮机的保护装置	265
20-5 凝汽式汽轮机调节系统举例	270
20-6 再热式汽轮机调节	272
第二十一章 汽轮机的辅助设备及热力系统	275
21-1 凝汽设备	275
21-2 回热加热设备	281
21-3 热力系统	287
第二十二章 汽轮机的运行	294
22-1 汽轮机的起动	294
22-2 汽轮机的正常运行与维护	304
22-3 汽轮机的停机	306
22-4 汽轮机的事故及处理	308
附表一 饱和水和饱和蒸汽性质表（按温度排列）	311
附表二 饱和水和饱和蒸汽性质表（按压力排列）	312
附表三 水和过热蒸汽性质表	314
附 图 焓—熵图（$i-s$图）	

绪 论

由于电力在生产、传输、控制、使用等方面具有非常显著的优越性，因此，它已成为现代人们生产及生活中使用的主要动力及能源。

现代主要的发电方式有：利用燃料热能的热力发电；利用水流能量的水力发电以及利用原子核反应热能的原子能发电。

发电厂利用各种自然能源（例如燃料热能、水能、风能、太阳辐射能以及原子能等）在相应的设备中进行能量转换而发出电力。热力发电厂的生产过程如图0-1所示。燃料在锅炉1的炉膛中燃烧并放出热能；锅炉受热面将此热能传给水，水受热而蒸发，变成具有一定压力和温度的蒸汽；蒸汽携带着热能进入汽轮机2，在汽轮机的喷管中，蒸汽的压力降低，速度提高，利用蒸汽所获得的很大的动能，冲动汽轮机的叶栅，使汽轮机转子旋转；汽轮机带动发电机3一起旋转而发出电力。

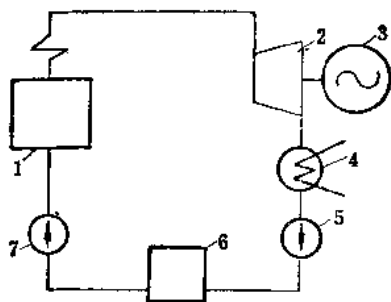


图 0-1 热力发电厂的生产过程

可以看出，热力发电厂就其能量转换来说，可以分为两大部分，即从燃料的化学能转变为机械能的部分以及从机械能转变为电能的部分。前一部分称为热力发电厂的热力部分（或动力部分），后一部分称为热力发电厂的电气部分。热力部分包括锅炉、汽轮机及其附属设备与热力系统，这些设备就是通常所说的热力设备。

本书就是讲述热力发电厂的热力部分，包括热工学基础，水力学基础，锅炉设备及汽轮机设备。前两部分为热力设备的基础理论，研究热能与机械能的转换、热量的传递、液体平衡和运动等规律；后两部分讨论锅炉和汽轮机及其主要附属设备的工作原理、结构、连接系统和运行。

我国的电力工业及热力工业解放后从无到有，从小到大，得到了很大发展。近年来，我国在相继制成5万和10万千瓦汽轮发电机组后，又制成并投产了配400吨/时锅炉的12.5万千瓦超高压再热机组，配670吨/时锅炉的20万千瓦超高压再热机组，配1000吨/时锅炉的30万千瓦亚临界压力再热机组。目前更大容量的机组正在设计制造中。

随着工农业生产的发展，整个国民经济对电力及热能的需求量必然会愈来愈多。因此，在我国实现现代化的过程中，电力工业及动力工业必将获得更大的发展。

第一篇 热工学基础

热工学基础包括工程热力学及传热学两部分内容。工程热力学研究热能和机械能间的转变规律；传热学研究热量的传递规律。将热能转变为机械能是火力发电厂动力部分的主要生产过程，而热量传递则是火力发电厂动力部分所有设备中都要遇到的工作过程。

第一章 工质及理想气体的计算

1-1 工质、理想气体和实际气体

将热能变为机械功的设备叫做“热机”，例如蒸汽机、汽轮机、内燃机等。在热机中，热能转变为机械功必须借助某种工作物质，依靠它在热机中的状态变化（如膨胀）而获得功，这种工作物质简称“工质”。为了在工质膨胀中获得较多的功，工质应具有良好的膨胀性；在热机的不断工作中，为了使工质易于流入与排出，还要求工质具有良好的流动性。因此，在物质的三态中，气体最适于作为工质。目前火力发电主要以水蒸汽作为工质。下边将讨论作为工质的气体的性质。

在研究气体的性质时，为了简化问题，需要把实际气体进行简化。我们知道，实际气体是由体积微小的分子组成，各分子之间存在着吸引力。所谓对实际气体进行简化，就是认为，气体的分子是不占体积的质点，分子间不存在作用力。这种分子间没有吸引力、分子本身为没有大小的质点的气体，叫做“理想气体”。实际上这种理想气体是不存在的，但在常见状态下，很多实际气体（如氧、氮、氢、一氧化碳、二氧化碳等）其分子间的距离较大，因而分子间的吸引力，分子本身的大小都相对很小，在工程计算所要求的精确度范围内，可以当作理想气体。换言之，所谓理想气体，可以理解为在自然界中实际存在的分子间吸引力和分子本身体积可以忽略不计的每一种气体。由此可知，气体距液体状态愈远（也就是气体变为液体愈难），则愈接近于理想气体。

水蒸汽作为热机的工质时，其状态非常接近于液体状态，在这种情况下，分子间的吸引力及分子本身的大小已不能再忽略，应作为实际气体来处理。

本章及第二章主要讨论理想气体的性质，关于水蒸汽的性质将在第三章中叙述。

1-2 工质的状态参数

研究气体的性质，必须首先解决如何表示气体的状态这个问题。

气体的状态是用气体的压力、温度、比容等物理量来表征的，这些用以说明气体状态特征的物理量就叫做工质的“状态参数”。就是说，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。

这一节将介绍如下的状态参数：压力、温度、比容、内能、焓、熵。其中前三个参数习惯上叫做基本状态参数，后三个叫做导出参数。

一、压力

由于容器中气体的分子运动对器壁的不断碰撞，给予器壁一个作用力，压力就是指气体对器壁单位面积上的作用力。压力的大小可用单位面积上作用力的大小或液柱高度来表示，如公斤/厘米²、毫米汞柱，毫米水柱等。此外，电厂中还常用“工程大气压”这个单位。

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10^4 \text{ 公斤/米}^2$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 735.6 \text{ 毫米汞柱} = 10 \text{ 米水柱}$$

这些不同的压力单位，用在不同的场合。如锅炉的蒸汽压力比较高，就用工程大气压作单位，锅炉炉膛中的压力较低，一般就用毫米水柱作单位。

利用表计测量气体的压力时，由于表计本身的特点，表上的指示数并不是气体的真实压力，而是气体的真实压力与大气压力的差值。为了区分，把气体的真实压力叫做工质的“绝对压力”（以 p_j 表示）。至于表上的指示数则有下面的两种情况，图1-1所示为第一种情况，图中的U形管为测量压力的表计，这时气体的压力（ p_j ）高于大气的压力（ B ），压力表上的指示数（ p_b ）是气体压力高于大气压力的数值，叫做“表压力”。即

$$p_b = p_j - B \quad (1-1)$$



图 1-1 气体的表压力

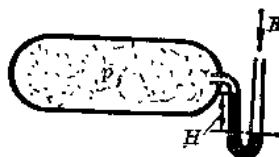


图 1-2 气体的真空度

图1-2所示为第二种情况，这时气体的压力低于大气压力，表上的指示数（ H ）是比大气压力低的数值，叫做“真空度”。即

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

在工质的绝对压力一定时，随着测量地点及时间的不同，测出的气体表压力或真空度就会有不同的数值，所以在绝对压力、表压力、真空度这三个数值中只有绝对压力能说明工质的状态，以后均用绝对压力的数值进行计算。

在国际单位制中使用的一种压力单位是“牛顿/米²”，叫做“帕斯卡（ P_a ）”，因为帕斯卡的压力单位太小，为照顾原有习惯，还采用“巴（ bar ）”作为压力单位。规定

$$1 \text{ 巴} = 10^5 \text{ 牛顿/米}^2$$

所以有

$$1 \text{ 巴} = 10^5 \text{ 帕斯卡}$$

压力单位的换算关系列于表1-1，供使用时参考。

例1-1 某电厂锅炉汽包压力表指示为39公斤/厘米²，周围大气压力为740毫米汞柱，求其绝对压力。

表 1-1 压 力 单 位 换 算 表

数 值	物理大气压	工程大气压	巴(bar)	毫米汞柱	帕斯卡(Pa)
1 物理大气压	1	1.03323	1.01325	760.000	101325
1 工程大气压	0.967841	1	0.980665	735.559	98066.5
1 巴(bar)	0.986923	1.01972	1	750.062	10 ⁵
毫米汞柱	1.31578×10^{-3}	1.35951×10^{-3}	1.33322×10^{-3}	1	133.322
1 帕斯卡(Pa)	0.986923×10^{-5}	1.01972×10^{-5}	10 ⁻⁵	75×10^{-4}	1

解:

已知

$$p_j = p_b + B$$

$$p_b = 39 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$$B = \frac{740}{735.6} = 1.01 \text{ 公斤/厘米}^2$$

所以

$$p_j = p_b + B = 39 + 1.01 = 40.01 \text{ 公斤/厘米}^2$$

在一般计算中, 往往近似取 $B = 1 \text{ 公斤/厘米}^2$

这时

$$p_j = p_b + B = 39 + 1 = 40 \text{ 公斤/厘米}^2$$

例1-2 某电厂汽轮机凝汽器的真空度为700毫米汞柱, 当时当地的大气压力 $B = 750$ 毫米汞柱, 求凝汽器的绝对压力。

解:

$$p_j = B - H = 750 - 700 = 50 \text{ 毫米汞柱}$$

如折合成工程压力, 则凝汽器的绝对压力

$$p_j = \frac{50}{735.6} = 0.07 \text{ 工程大气压}$$

二、温度

温度表示物体的冷热程度, 它反映了分子平均移动动能的大小。在工程上一般都用摄氏温标与绝对温标来度量温度。摄氏温标把压力在760毫米汞柱时水的冰点定为零度, 水的沸点定为一百度。用“ t ”表示摄氏温度, 单位用“ $^{\circ}\text{C}$ ”表示。在热工计算中还经常使用绝对温标, “ T ”表示绝对温标的温度, “ K ”表示单位。绝对温标与摄氏温标分度是相同的, 但绝对温度把水的三相点温度(比 0°C 高 0.01°C)取为 273.16K , 也就是说, 它的零度在水的三相点下 273.16K 。由上可知, 绝对温标与摄氏温标的关系为

$$T = t + 273.15 \quad (1-3)$$

式中 T ——绝对温度, K , t ——摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

在工程计算中通常取

$$T = t + 273$$

已足够准确。

三、比容

一公斤重的工质(气体)所占容积的大小, 称为工质的比容。其单位为 $\text{米}^3/\text{公斤}$ 。

一立方米容积中工质的重量称为比重。单位为公斤/米³。

设 G 公斤工质所占容积为 V 米³，则其比容为

$$v = \frac{V}{G}$$

比重为

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

或

$$v\gamma = 1 \quad (1-4)$$

式中 v ——比容，米³/公斤；

γ ——比重，公斤/米³；

G ——气体的总重量，公斤；

V ——气体的总容积，米³。

四、气体的内能

组成气体的分子，处在不断的紊乱运动中，其运动的方式有：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，叫做气体的“内动能”。内动能的大小取决于温度的高低。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动能以外，还具有由于分子间引力而引起的位能，此位能叫做“内位能”。内位能随气体的比容或压力而变。

内动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

$$u = f(T, v)$$

可知，内能也是气体的状态参数。

因理想气体分子间不存在吸引力，其内能仅包括内动能一项，故内能为温度的单值函数，即

$$u = f(T)$$

五、气体的焓

在热力学计算中，常遇到这样一组数

$$u + A p v$$

式中 u 为工质的内能，而 p 及 v 是跟内能相同状态下的压力和比容， A 为把功的单位（公斤·米）换算为热量单位（大卡）的换算系数，其数值为 $A = \frac{1}{427}$ 大卡/公斤·米。

为方便起见，就用 i 代表这一组数，即

$$i = u + A p v \quad (1-5)$$

在上式中，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”。

六、气体的熵

熵是一个导出的状态参数，它是通过其它可以测量的参数间接计算出来的。

我们把给一公斤工质加入的热量同加热工质当时的绝对温度的比值叫做工质在这个加热过程中熵的增加量。即

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

当加热过程由状态 1 到状态 2 时

$$\Delta s = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad (1-6)$$

式中 s —— 熵, 大卡/公斤·K;

q —— 加给一公斤工质的热量, 大卡/公斤;

T —— 加热工质当时的绝对温度, K。

1-3 平衡状态及理想气体的状态方程式

一、平衡状态

所谓气体的状态, 实际上都是指平衡状态而言, 而气体的平衡状态, 就是指在没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, 可以认为其各部分具有相同的压力、温度及比容。所以只有气体处于平衡状态时, 才可以用一组参数加以描述。

二、理想气体的状态方程式

当气体处于平衡状态时, 气体的状态参数绝对压力 (p)、温度 (T) 与比容 (v) 之间存在着一定的关系。可表示为

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

这个说明气体每一状态下 p 、 v 、 T 之间关系的方程式叫做“状态方程式”。

经许多物理学家对理想气体的状态变化作了详细的观察和实验, 建立了一系列的理想气体定律。对于一定重量的理想气体, 在状态变化时, 如果温度维持不变, 其容积与压力成反比, 这就是波义耳-马略特定律; 如果气体的容积维持不变, 其压力与绝对温度成正比, 这就是查理定律; 如果气体的压力维持不变, 则其容积与绝对温度成正比, 这就是盖-吕萨克定律。如果气体在状态变化时, 温度、压力、容积同时发生变化, 则把上述三个定律综合起来, 可得如下的关系式

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

式中注脚“1”及“2”代表变化前后的两种状态。

或
$$\frac{pv}{T} = \text{常数}$$

如以 R 代表上式中的常数, 则得

$$pv = RT \quad (1-7)$$

式中 p —— 理想气体的绝对压力, 公斤/米²;

v —— 理想气体的比容, 米³/公斤;

T —— 理想气体的绝对温度, K;

R ——气体常数, 公斤·米/公斤·K。

式(1-7)称为理想气体的状态方程式。它给出了理想气体处于某一状态时 p 、 v 、 T 之间的关系, 在知道了 R 之后, 给出 p 、 v 、 T 三个参数中的任意两个, 便可以根据式(1-7)求出第三个。由此也可以看出, 气体的 p 、 v 、 T 三个参数只有两个是独立的, 只要给定三个参数中的任意两个, 气体的状态就被确定了。

如果气体的重量为 G 公斤, 则式(1-7)可写成

$$pV = GRT \quad (1-8)$$

式中 $V = G \cdot v$ —— G 公斤气体的容积, 米^3 。

由公式的推导过程不难看出: 气体常数不随状态变化, 但对不同的气体却有不同气体常数。例如空气的 $R = 29.3$ 公斤·米/公斤·K, 氧气的 $R = 26.5$ 公斤·米/公斤·K, 氮气的 $R = 30.3$ 公斤·米/公斤·K。

为了利用状态方程式进行计算, 首先须给出气体常数 R 的求法。根据阿弗加德罗定律可知: 在标准状态下 ($p = 760$ 毫米汞柱, $t = 0^\circ\text{C}$), 不同气体一公斤分子(也叫一摩尔)的容积都是 22.4 米^3 。

如果用 μ 代表气体的分子量, 将式(1-7)等号两边各乘以 μ 则得

$$p(\mu v) = (\mu R)T$$

式中, μv 正是气体一摩尔的容积, 如果把此式应用于标准状态, 此时 $p = 1.0332$ 公斤/米², $T = 273\text{K}$, $\mu v = 22.4 \text{ 米}^3/\text{摩尔}$, 把这些数字代入上式, 可得

$$\mu R = 848$$

或

$$R = \frac{848}{\mu} \quad (1-9)$$

利用这一公式, 在知道某种气体的分子量后, 就可以计算这种气体的气体常数。

例 1-3 设气体在 $p = 2.5$ 气压(表压)及 $t = 60^\circ\text{C}$ 时占有容积 4.5 米^3 , 求它在标准状态下的容积。

解 根据两状态之间的关系式

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

若把状态 2 当作标准状态, 则

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{T_1} \cdot \frac{T_2}{p_2}$$

把已知数代入

$$V_2 = \frac{(2.5+1) \times 4.5}{(273+60)} \times \frac{273}{1.0332} = 12.5 \text{ 米}^3$$

即此气体在标准状态的容积为 12.5 米^3 。

例 1-4 求氧气在 $p = 3$ 气压(绝对), $t = 70^\circ\text{C}$ 时的比容。

解: 根据理想气体的状态方程式

$$pv = RT$$

得

$$v = \frac{RT}{p}$$

其中

$$R = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{32} = 26.5$$

把已知数代入上式

$$v = \frac{26.5 \times (273 + 70)}{3 \times 10^4} = 0.30 \text{ 米}^3/\text{公斤}$$

例 1-5 由送风机送到锅炉炉膛的空气量在 $t = 300^\circ\text{C}$ 、 $p = 155$ 毫米水柱（表压）时为 102000 米³/小时，锅炉房的大气压力 $B = 755$ 毫米汞柱，求送风量为多少公斤/时？

解：根据公式

$$pV = GRT$$

则

$$G = \frac{pV}{RT}$$

空气的 $R = 29.3$ （见下节混合气体）

$$\text{所以 } G = \frac{\left(\frac{155}{10000} + \frac{755}{735.6} \right) \times 10^4 \times 102000}{29.3 \times (273 + 300)} = 63298 \text{ 公斤/时}$$

1-4 混 合 气 体

在热力工程中也经常遇到混合气体（如空气、燃气等）。这些混合气体是由数种不同且相互间不起化学作用的理想气体所组成的混合物。当组成混合气体的各成分都作为理想气体时，混合气体也可按理想气体进行计算。

进行混合气体的计算，常用到如下的一些基本概念。

一、混合气体各组成气体的分压力、分容积

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 1-3a），图中“+”号代表第一种成分的分子，“○”代表第二种成分的分子。在温度不变的情况下，假定把两种成分人为地分开，其具体分法有两种：

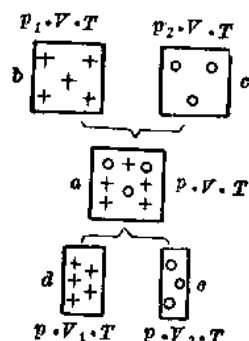


图 1-3 分压力及分容积的示意图

下，假定把两种成分人为地分开，其具体分法有两种：

第一种方法：分别给予每一种成分以原混合气体的容积 V ，这时若在分开后第一种气体内的压力为 p_1 ，在第二种气体内压力为 p_2 ，这些压力称为各组成气体的分压力（图 1-3b、c）。

第二种方法：分别使每一种成分具有原混合气体的压力 p ，这时第一种气体的容积为 V_1 ，第二种气体的容积为 V_2 ，这些容积称为组成气体的分容积（图 1-3d、e）。

根据实验结果得知，混合气体的压力等于各组成气体的分压力之和。即

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1-10)$$

式中 p —— 混合气体的压力，

p_i —— 某组成气体的分压力。

上边的这一关系叫做“道尔顿定律”。根据这一定律不难推出混合气体的容积等于各组成气体分容积之和。即

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1-11)$$

式中 V ——混合气体的容积；

V_i ——某成分气体的分容积。

二、混合气体组成的表示法

通常用下列方式给出混合气体的绝对成分：

(1) 各组成气体的重量—— $G_1, G_2, \dots, G_i$ 公斤。

(2) 在任何共同的 p 及 T 下(如标准状态下)各组成气体的分容积—— $V_1, V_2, \dots, V_i$ 米³。

(3) 各组成气体的摩尔数—— $M_1, M_2, \dots, M_i$ 摩尔。

此外, 计算中更多应用的是给出混合气体相对成分的方法, 即重量百分数和容积百分数。

某组成气体的重量 G_i 与混合气体的总重量 G 的比值称为混合气体中该成分的重量百分数(或相对重量), 以 g_i 表示。

$$g_1 = \frac{G_1}{G}, g_2 = \frac{G_2}{G}, \dots, g_i = \frac{G_i}{G} \quad (1-12)$$

所有重量百分数的和是

$$\sum_{i=1}^n g_i = \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_n}{G} = 1$$

某组成气体的分容积 V_i 与混合气体的容积 V 的比值称为混合气体中该成分的容积百分数(或相对容积), 以 r_i 表示。

$$r_1 = \frac{V_1}{V}, r_2 = \frac{V_2}{V}, \dots, r_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-13)$$

所有容积百分数的和是

$$\sum_{i=1}^n r_i = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{V} = 1$$

三、混合气体的平均分子量

在混合气体中同时存在多种气体分子, 不能只用一个数值来表示各种分子的分子量。但是, 为了计算上的方便, 可以假想一种单纯的气体用以代替混合气体, 这种假想气体的总重量和分子数, 恰好同混合气体的总重量及分子数相等。这样, 在对混合气体进行计算时, 就可以把它当作这种假想的单纯气体。而这种假想的单纯气体的分子量就是所谓混合气体的“平均分子量”(或叫做折合分子量)。

有了以上混合气体的一些基本概念, 就可以根据其组成情况(g_i 或 r_i)进行计算。在求得混合气体的气体常数 R 之后, 可根据理想气体的状态方程式解决混合气体的参数以及重量的计算问题。

混合气体的计算公式, 见表1-2。

表 1-2

混 合 气 体 计 算 公 式 表

组成成分	成分换算	混合气体的 比重与比容	平均分子量	气体常数	分 压 力
g_i	$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$\gamma = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i}}$ $v = \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i}$	$\mu = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R = \sum_{i=1}^n g_i R_i$	$p_i = g_i p \frac{R_i}{R}$
r_i	$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$	$\gamma = \sum_{i=1}^n r_i \gamma_i$ $v = \frac{1}{\sum_{i=1}^n r_i \gamma_i}$	$\mu = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i$	$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R_i}}$	$p_i = r_i p$

例 1-6 空气的相对重量成分为: $g_{N_2} = 0.768$, $g_{O_2} = 0.232$, 求空气的平均分子量及其气体常数。

解: 由表1-2中查得公式并代入已知数字, 得

$$\mu_{\text{空气}} = \frac{1}{\frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}} + \frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}} = \frac{1}{\frac{0.768}{28} + \frac{0.232}{32}} = 28.9$$

所以

$$R_{\text{空气}} = \frac{848}{\mu_{\text{空气}}} = \frac{848}{28.9} = 29.3 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{K}$$

例 1-7 空气组成的相对容积数为 $r_{N_2} = 79\%$, $r_{O_2} = 21\%$, 若空气的压力近似看作 1 公斤/厘米², 求氮 (N_2) 和氧 (O_2) 的分压力。

解: 由表1-2中知

$$p_i = pr_i$$

所以 N_2 的分压力为

$$p_{N_2} = pr_{N_2} = 1 \times 79\% = 0.79 \text{ 公斤} / \text{厘米}^2$$

氧的分压力为

$$p_{O_2} = pr_{O_2} = 1 \times 21\% = 0.21 \text{ 公斤} / \text{厘米}^2$$

习 题

1-1 实验室的大气压力计 (通常简称气压表) 读数为 756 毫米汞柱, 试分别换算为公斤/厘米²、工程大气压、物理大气压。

1-2 汽轮机凝汽器的真空度为 730 毫米汞柱, 大气压力为 750 毫米汞柱, 求凝汽器的绝对压力是多少工程大气压?

1-3 烟气在炉内某处的温度为 $t_1 = 1100^\circ\text{C}$, 在烟囱出口处的温度为 $t_2 = 200^\circ\text{C}$, 假定