



国产20万千瓦机组培训班讲义

# 热工学基础

谷应鸣

试验所

214

94

水利电力部生产司

# 前 言

我国电力工业发展已进入大机组、高参数、高度自动化的时代和单元集中控制的运行方式。“七五”期间，国产二十万千瓦汽轮发电机组将成为我国电厂中的主力机组之一，为了提高二十万千瓦机组电厂的机、炉运行值班人员素质和技术水平。自一九七九年起委托西安电力学校举办国产二十万千瓦机组运行培训班，并编写了教材，经过多次学习班试用反映良好，在试用教材的基础上经过整理、补充和修订，编写成《国产二十万千瓦机、炉运行培训讲义》。以满足二十万千瓦机组运行人员的培训和广大电力职工自学需要。也可供技校和中专师生参考。这套书包括《热工学基础》、《电厂金属材料》、《汽轮机调节》、《汽轮机运行》、《汽轮机设备》、《汽轮机辅助设备及热力系统》、《锅炉燃烧原理及设备》、《锅炉蒸发原理、设备，锅炉运行》、《热力过程自动化》、《锅炉自动控制系统》等。

西安电力学校有关同志为编写这套讲义付出了辛勤劳动，在此仅致谢意。

水利电力部生产司

一九八六年三月二十日

# 目 录

绪论	1
第一章 理想气体的状态方程式	3
1—1 工质的状态参数	3
1—2 理想气体的状态方程式	7
1—3 混合气体	10
第二章 理想气体的比热	15
2—1 比热的基本概念	15
2—2 用比热计算热量	16
2—3 混合气体的比热	19
第三章 热力学第一定律及理想气体的热力过程	21
3—1 气体的膨胀功	21
3—2 热力学第一定律	23
3—3 理想气体的基本热力过程	24
第四章 热力循环及热力学第二定律	33
4—1 热力循环的基本概念	33
4—2 卡诺循环	34
4—3 热力学第二定律	35
第五章 水蒸汽	38
5—1 水蒸汽的等压发生过程	38
5—2 水蒸汽图表的应用	41
5—3 水蒸汽的热力过程	44
第六章 气体和蒸汽的流动	47
6—1 稳定流动的基本方程式	47
6—2 蒸汽在喷管中的流动	49

6—3 蒸汽的节流	55
第七章 蒸汽动力装置循环	58
7—1 朗肯循环	58
7—2 再热循环	62
7—3 回热循环	63
7—4 电热合供循环	65
第八章 传热学基本知识	67
8—1 热交换的基本方式	67
8—2 经过壁的导热	68
8—3 对流换热	71
8—4 热辐射	73
8—5 通过壁的传热	76
8—6 热交换器	78
附表1 气体的平均定压比热 $C_p$	82
附表2 气体的平均定容比热 $C_v$	84
附表3 气体的平均定压容积比热 $C_p'$	86
附表4 气体的平均定容容积比热 $C_v'$	88
附表5 饱和水蒸汽表(依温度为变数排列)SI制	90
附表6 饱和水蒸汽表(依压力为变数排列)SI制	92
附表7 水和过热水蒸汽表SI制	96
附图 水蒸汽的焓—熵图	

## 绪 论

热工基础的内容包括《工程热力学》及《传热学》两部分。《工程热力学》研究热能与机械功间的转换规律，是一切热机工作的理论基础；《传热学》研究由于温差引起的热传递过程的规律，也是热力设备设计、运行、维护的理论基础。

自然能源有热能、水能、风能、太阳辐射能以及原子能等。目前，人类应用最广泛的要算热能。因为它在应用过程中受到的限制条件较少。人类应用热能的方式分为直接利用和间接利用两种，各种各样的热交换设备就是直接利用热能的设备；各种热力发动机中热能转变为机械功的过程就是间接利用热能的情况。热力设备及热机的大量应用促进了热工理论的发展。热工理论的发展又反过来提高了热力设备及热机的性能及效率。对我们来说，学习热工基础一是为学习专业课打基础，也为了今后的提高学习打基础。

为了对《热工基础》有一个概括的了解，需要先介绍一些热工基础的基本概念。为了叙述的方便及具体，我们结合火力发电厂的生产过程来介绍。

图0—1是火力发电厂生产过程的简化系统图。图中每个数字代表一个生产设备。其中锅炉设备的任务是使水吸收燃料燃烧时放出的热量，产生具有一定的压力和温度的蒸汽。这种具有一定压力和温度的蒸汽被送入汽轮机。蒸汽在流经汽轮机时，先在汽轮机的喷管部分降低压力和温度，提高流动速度，然后用这种高速汽流冲动汽轮机的转子使其旋转。汽轮机旋转时就带动同一轴上的发电机旋转而发出电来。在汽轮机中工作过后的蒸汽（又叫乏汽），在凝汽器中放热凝结成水，再由水泵提高压力送回锅炉继续工作。

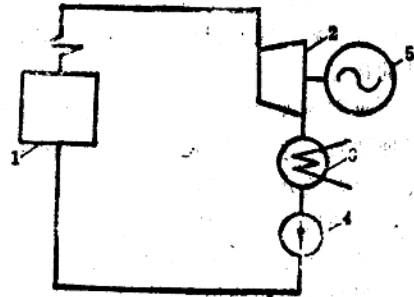


图 0—1 火力发电厂的生产过程简化系统图

1—炉锅； 2—汽轮机； 3—凝汽器；  
4—水泵； 5—发电机

从以上的叙述中可以看出，火力发电厂生产过程的实质，是在实现我们所要求的能量转变。即在锅炉设备的工作过程中把燃料的化学能转变成蒸汽的热能；在汽轮机的工作过程中，把蒸汽的热能转变成汽轮机轴的机械能；在发电机的工作过程中，把机械能转变成电能。这些转变连起来就是：

燃料化学能 → 热能 → 机械能 → 电能。

在上述的转变中，热能转变为机械能的过程，是发电厂的主要过程，也是《工程热力学》的研究对象。现在让我们来仔细分析一下，看看这一转变过程有些什么特点，从而找出研究的具体内容。结合以上所述的实际工作情况我们可以看出，在实现这一转

变时，必须有下述条件：

第一、在实现这一转变时，总要有一种工作物质，借助于这种工作物质在热机中的膨胀而作功。这种工作物质简称为“工质”。工质均是气体，如汽轮机的工质是水蒸汽，内燃机的工质则为燃料燃烧生成的气体。在研究工质的性质时，总是先研究一种忽略了气体分子间作用力与分子本身大小的简单气体，这种简单气体就是所谓的“理想气体”，然后再研究实际气体。今后我们把碰到的不易液化的气体，可当作理想气体，如空气等。

第二、为了使工质在热机中作功，工质应按照我们的要求进行状态的变化。例如进入汽轮机的蒸汽，是从锅炉送来的压力、温度较高的蒸汽；在工作时，蒸汽的压力和温度要降低，这样才能获得冲动汽轮机转子的流动速度，才能获得对外作功的力量。我们把工质发生了状态变化，叫做工质进行了一个“热力过程”。

第三、为了使热机的工作连续地不间断地进行，热机中工质的状态变化过程也必须连续地不间断地重复进行。这就要求热力系统中任何部分的工作不能有停顿。工质在热力系统中各个部分的一个连一个的状态变化，形成了一个状态变化的封闭过程，这叫做工质完成了一个“热力循环”。

我们把上边的内容小结一下：火力发电厂的生产过程实质是实现能量形式的转变，从这种转变中获得电能。为了连续地实现这种转变，通常采用水蒸汽做为工质，使其在热力设备中不断地进行热力循环。

《工程热力学》就是不同热力设备的具体情况通过工质性质、热力过程、热力循环的研究了解热能与机械功的转换规律，找出转换过程的最有利条件，找出提高转换经济性的途径。

研究热现象时，完全从直接观察的宏观现象出发来描述、解释热现象和有关物质的物理性质，这是宏观的方法，又叫做热力学的方法。

由大量分子运动的统计平均值来描述解释热现象和有关物质的物理性质是微观方法，又叫做统计物理学的方法。

热力学方法较统计物理学方法直观、简单，这是我们所用的方法，个别地方为了说明宏观热现象的物理实质，也引用一些统计物理学方法的结果。

在分析热力学问题时，按研究任务的具体要求，选取某一定范围内的物质作为研究对象，这研究对象叫做热力系统。例如给工质加热的热源和放热的冷源，都可看做是热容无穷大的热力系统。根据热力系统和系统外有无质量的交换，热力系统分为闭口及开口系统。如果热力系统和外界无热量的交换，就叫做绝热系统。

根据我国国务院颁布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，确定了以国际单位制（SI）单位为基础的我国法定计量单位，这是本教材所采用单位，为了照顾电厂中现在还实行的工程单位，教材在有关地方也谈到了工程单位制的单位。

# 第一章 理想气体的状态方程式

## 内 容 提 要

本章首先介绍描述气体状态的六个状态参数的概念、单位及有关问题，然后介绍理想气体的状态方程式，最后介绍混合气体的概念和计算。本章的内容是后边各章的基础。

### 1—1 工 质 的 状 态 参 数

已经知道热机的工作是离开工质的。而热机的做功过程是借助于工质在热机中的状态变化来实现的，将来计算功的大小，必然涉及状态变化的情况和程度，因此，在我们研究工质的性质时，首先应该解决如何描述工质的状态这个问题。

工质的状态，我们是用工质的压力、温度、比容……等这些物理量来确定的。我们把这些说明工质状态特征的物理量叫做工质的状态参数。这就是说，工质有了一组确定的状态参数，标志着工质处于一个确定的状态。如果工质确定状态所对应的状态参数中有一个或几个发生了变化，那就意味着工质的状态发生了相应的变化。

这一节，我们将介绍压力、温度、比容、内能、焓和熵等几个状态参数。

#### 一、压力

压力即工质（气体）对器壁单位面积上的作用力。以符号 $p$ 表示。压力的产生是气体分子作不规则运动时频繁地撞击容器壁的结果。

气体的分子运动论指出，气体分子运动和压力的关系为

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \omega^2}{2} \quad (1-1)$$

式中

$p$ ——压力；

$n$ ——单位容积的分子数；

$m_0$ ——分子的质量；

$\omega$ ——分子的均方根移动速度，如分子的个数为 $N$ ，各个分子的移动速度分别为 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、……、 $\omega_N$ 则

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_N^2}{N}}$$

式(1-1)说明：气体的压力在数值上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。

压力的大小可用单位面积上作用力的大小或液柱的高度来表示。

在国际单位制(SI)中，力的单位是牛顿(N)，面积的单位是平方米( $m^2$ )，因此压力

的单位是牛顿/米<sup>2</sup>，这个压力单位叫做帕斯卡，简称帕(Pa)，即

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$$

因帕的单位较小，在工程中常用“巴”(bar)作单位

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

把Pa及bar折合成水或水银柱高度表示，有如下的换算关系

$$1\text{Pa} = 750.06 \times 10^{-6}\text{mmHg} = 0.102\text{mmH}_2\text{O}$$

$$1\text{bar} = 750.06\text{mmHg} = 10.1972\text{mH}_2\text{O}$$

在电厂中尚未改用国际单位制之前，用的还是工程单位制，在工程单位制中力的单位是“公斤力”(kgf)，面积单位还是平方米，规定每平方米面积上受一万公斤的力叫一个工程压力，即

$$1\text{工程压力} = 1\text{kgf/cm}^2 = 10^4\text{kgf/m}^2$$

折合成液柱的高度为

$$1\text{工程压力} = 735.6\text{mmHg} = 10\text{mH}_2\text{O}$$

国际单位制与工程单位制的换算关系为：

$$1\text{工程压力} = 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$$

当利用压力表测量工质的压力时，由于压力表本身的特点，压力表的指示数并不是工质的真实压力，而是工质的真实压力与大气压力的差值。为了区分，我们把工质的真实压力值叫做工质的绝对压力 $P_{\text{绝}}$ 。至于压力表上的指示值则有两种情形，图1—1表示的是第一种情形，这时容器中工质的压力( $P_{\text{绝}}$ )大于大气压力，这时压力表上的指示值是工质压力大于大气压力的数值，这个指示值叫做工质的表压力 $P_{\text{表}}$ ， $P_{\text{绝}}$ 、 $P_{\text{表}}$ 及大气压力 $B$ 之间的关系如下：

$$P_{\text{表}} = P_{\text{绝}} - B \quad (1-2)$$

图1—2所示是第二种情形，这时容器中工质的压力小于大气压力，这时表上的指示值是工质压力小于大气压力的数值，叫做工质的真空度。即

$$H = B - P_{\text{绝}} \quad (1-3)$$

式中  $H$ ——真空度。

因大气压力 $B$ 是随时间、地点而变的，在绝对压力( $P_{\text{绝}}$ )一定时，表压力( $P_{\text{表}}$ )及真空度( $H$ )要随 $B$ 的变化而变化，故在今后的计算中均用绝对压力。

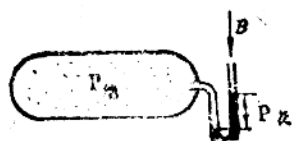


图 1—1绝对压力与表压力的关系

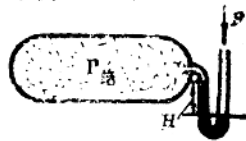


图 1—2绝对压力与真空度的关系



例 1—1 某电厂锅炉汽包压力表的指示值为98bar，周围大气压力为740mmHg，求汽包内的绝对压力。

解，

由公式(1—2)知

$$P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + B$$

根据压力的换算关系

$$P_{\text{绝}} = 98 + \frac{740}{750.06} = 98.99\text{bar}$$

在一般计算中，如果题内未给出大气压力的数值，往往近似取

$$B = 1\text{bar}$$

这时

$$P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + B \approx 98 + 1 = 99\text{bar}$$

例 1—2 某电厂汽轮机凝汽器的真空度为700mmHg，当地当时的大气压力B=750mmHg，求凝汽器内的绝对压力。

解：按式(1—3)

$$P_{\text{绝}} = B - H = 750 - 700 = 50\text{mmHg}$$

折合成Pa为

$$P_{\text{绝}} = \frac{50}{750.06 \times 10^{-3}} = 6666.13\text{Pa}$$

折合成工程压力则为

$$P_{\text{绝}} = \frac{50}{735.6} = 0.068 \text{ 工程压力}$$

## 二、温度

温度表示物体的冷热程度。按分子运动论知温度的高低是气体分子的平均移动动能的反映，它们的关系是

$$\frac{m_0 \omega^2}{2} = CT \quad (1-4)$$

其中 T——热力学温度；

C——比例系数；

$\frac{m_0 \omega^2}{2}$ ——分子的平均移动动能。

即温度的高低表示气体分子平均移动动能的大小。

温度的数值表示法叫做温标，在国际单位制中，热力学温标是基本温标。用T表示，其单位为开尔文或简称为开(K)。热力学温标取水的三相点的温度为单一的基准点，规定水的三相点温度为273.16K，并规定单位开尔文为水的三相点温度的1/273.16。

在实用中，除热力学温标外也使用摄氏温标，规定

$$1^\circ\text{C} = 1\text{K}$$

$$t^{\circ}\text{C} = \text{TK} - 273.15 \quad (1-5)$$

### 三、比容、密度

单位质量的气体所占容积的大小，叫做比容，其单位为 $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

设质量为 $m(\text{kg})$ 的气体占有容积 $V(\text{m}^3)$ 则其比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-6)$$

单位容积内气体的质量，叫做密度，以符号 $\rho$ 表示，其单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ，故可写出

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-7)$$

合并式(1-6)与式(1-7)可得

$$v\rho = 1 \quad (1-8)$$

所以比容和密度二者之中任知一个即可根据上式计算第二个，它们实质上是一个说明气体物理性质的参数。

### 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动能。内动能的大小决定于温度。气体分子之间还存在着吸引力，因此除了内动能以外，还具有用以克服分子间吸引力的位能，叫做气体的内位能。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，内能决定于气体的状态，所以内能也是气体的一个状态参数。通常用符号 $u$ 来表示质量为 $1\text{kg}$ 气体的内能，它的单位是焦/千克( $\text{J}/\text{kg}$ )或千焦/千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ )。质量为 $m\text{kg}$ 气体的内能用 $U$ 表示。

### 五、气体的焓

在热力计算中，常遇到一组数

$$u + pv$$

为方便起见，就令

$$h = u + pv \quad (1-9)$$

式中 $u$ 为气体的内能，而 $p$ 及 $v$ 是与所取内能数值相同状态气体的压力与比容。

在式(1-9)右边每个量均由气体的状态所决定，可知 $h$ 也必是一个状态参数，这个参数叫做焓。

### 六、熵

熵是一个导出的状态参数，它是通过其它可以测量的数值间接计算出来的。我们把给一公斤工质加入的热量与加热当时绝对温度的比值叫做工质在这个加热过程中的熵的增加量。

例如 $1\text{kg}$ 工质，在温度 $T$ 保持不变的情况下，加入了 $q$ 焦耳的热量，那末：

$$\frac{q}{T}$$

这个比值就是在这一加热中工质熵的增加量。我们用 $s$ 表示工质的熵，用 $\Delta s$ 表示熵

的增加量 $s_2 - s_1$ ，则这一等温加热例子中各量的关系就可写为

$$\Delta s = \frac{q}{T} \quad (1-10)$$

式中  $s$ ——熵， $J/(kg \cdot K)$ ；  
 $q$ —— $1\text{kg}$ 工质所获得热量， $J/kg$ ；  
 $T$ ——工质在获得热量时的温度， $K$ 。

如果加热过程不是等温情况，熵的定义仍如上述。这时熵的增量的计算可以这样来进行：即把整个加热过程分割成很多很多小的加热阶段，在每一个小加热阶段中，加入的热量是很少的，因而温度的变化也就很小。加热阶段分割得愈多，在小加热阶段中温度的变化就愈小。当把整个加热过程分割成无穷多个小加热阶段时，这时每个小加热阶段都可看成是在等温下进行的加热。这样在求得了每个小加热阶段工质熵的增量后，再把每个小加热阶段熵的增量相加，就是整个加热过程熵的增量。具体计算公式可写为

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-11)$$

式中 $ds$ 与 $dq$ 是指无穷小过程中熵的增量与加给工质的热量。

从上述熵的定义我们不难想到：给工质加热，工质的熵增加；从工质取出热，工质的熵减小；不加热也不取出热量，工质的熵保持不变。所以可以反过来用熵的变化来判断过程是加入还是取出热量。

## 1-2 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”。

现在利用

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \omega^2}{2}$$

$$\frac{m_0 \omega^2}{2} = CT$$

两个公式来推理想气体的状态方程式，根据上两式当理想气体处于状态“1”时有

$$p_1 v_1 = \frac{2}{3} n' C T_1$$

式中  $n'$  —— 1kg 气体的分子数  
处于状态“2”时有

$$p_2 v_2 = \frac{2}{3} n' C T_2$$

上两式相除得

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

用话来说，理想气体在不同状态，压力与比容的乘积比上温度这一数组的值是一个常数，如以  $R$  代表此常数，则得

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

或写成

$$p v = R T \quad (1-12)$$

式中

$p$  —— 理想气体的绝对压力， $P_a$ ;

$v$  —— 理想气体的比容， $m^3/kg$ ;

$T$  —— 理想气体的绝对温度， $K$ ;

$R$  —— 气体常数， $J/kg \cdot K$ 。

式(1-12)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(1-12)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。

如果气体的质量为  $m$ kg，则式(1-12)可写成

$$p m v = m R T$$

$$p V = m R T$$

(1-13)

式中

$V = m v$  ——  $m$ kg 气体的容积， $m^3$ ;

由公式的推导过程可以看出，气体常数不随状态变化，但对不同的气体却有不同的气体常数。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。

为了给出气体常数  $R$  的计算公式，要用到两方面的知识，第一：即然气体常数  $R$  不随气体的状态而变，那末不管在任何状态计算出的气体常数  $R$  都是一样的。我们现在就按所谓标准状态下气体的一些关系来计算气体常数  $R$ 。标准状态是指压力为  $101325 Pa$ ，温度为  $273.15 K$  的状态。第二：根据阿弗加德罗定律可知：在标准状态下任何气体的千摩尔容积都是  $22.4 m^3$ 。气体中所包含的分子数与  $0.012 kg$  碳-12 的原子数相等时气体的量称为 1 摩尔。国际代号为  $mol$ 。常用千摩尔为单位。1 千摩尔气体的质量称为千摩尔质量，其单位为  $kg/kmol$ 。按定义可知千摩尔质量的数值即等于分子量。例如氧气的分子量是 32，则其千摩尔质量也是  $32 kg/kmol$ ；氮气的分子量为 28，则其千摩尔质量即为  $28 kg/kmol$ 。

如果用  $\mu$  代表气体的分子量，将式(1-12)等号两边各乘以  $\mu$  则得

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

式中， $\mu\nu$ 正是气体的千摩尔容积，如果把此式应用于标准状态，此时 $p = 101325\text{Pa}$ ， $T = 273.15\text{K}$ ， $\mu\nu = 22.4\text{m}^3/\text{kmol}$ ，把这些数字代入上式，可得

$$\mu R = 8314.3 \quad \text{J/kmol}\cdot\text{K}$$

或

$$R = \frac{8314.3}{\mu} \quad \text{J/kg}\cdot\text{K} \quad (1-14)$$

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 $p = 0.245\text{MPa}$ （表压）及 $t = 60^\circ\text{C}$ 时占有容积 $4.5\text{m}^3$ ，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当做标准状态，则

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

把已知数代入

$$V_2 = \frac{(0.245 + 0.1) \times 4.5}{(273 + 60)} \times \frac{273}{0.101325} = 12.56\text{m}^3$$

即此气体在标准状态的容积为 $12.56\text{m}^3$ 。

例 1-4  $110\text{kg}$ 的二氧化碳，绝对压力为 $7\text{bar}$ ，温度为 $1000\text{K}$ ，求占有的容积和千摩尔容积。

解：按理想气体的状态方程式有

$$V = \frac{mRT}{p}$$

其中

$$R = \frac{8314.3}{\mu} = \frac{8314.3}{44}$$

所以

$$V = \frac{110 \times 8314.3 \times 1000}{7 \times 10^5 \times 44} = 29.7\text{m}^3$$

千摩尔容积为

$$(\mu\nu) = \frac{V}{M} = \frac{29.7}{110} \times 44 = 11.88\text{m}^3/\text{kmol}$$

例 1-5 压缩空气的储气罐的容积为 $0.3\text{m}^3$ ，罐内空气的压力为 $1\text{MPa}$ ，室温为 $20^\circ\text{C}$ 。已知空气的气体常数为 $287.1\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，求罐内空气的质量。若用去一部分压缩空气后，罐内空气的压力降为 $0.9\text{MPa}$ ，求用去多少空气。

解：在上述压力和温度下，空气作为理想气体，由理想气体的状态方程式

$$pV = mRT$$

知

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{1 \times 10^6 \times 0.3}{287.1 \times 293} = 3.56 \text{ kg}$$

此为罐内原有的空气量。按同一公式可计算用去一部分空气后剩余的空气量

$$m' = \frac{p'V}{RT} = \frac{0.9 \times 10^6 \times 0.3}{287.1 \times 293} = 3.2 \text{ kg}$$

所以用去空气量为

$$\Delta m' = m - m' = 3.56 - 3.2 = 0.36 \text{ kg}$$

### 1—3 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“+”号代表第一种成分分子，“○”代表第二种成分分子。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：

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 $P_1$ ，在第二种气体的压力为 $P_2$ ，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

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1-15)$$

式中

$P$ ——混合气体的压力；

$P_i$ ——某组成气体的分压力。

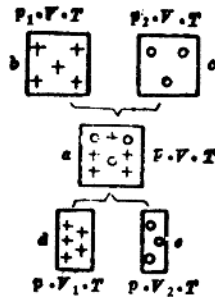


图 1—3 分压力及分容积的示意图

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

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1-16)$$

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) 各组成气体的质量—— $m_1, m_2, \dots, m_n$  kg

(2) 在任何共同的状态下(如标准状态下)各组成气体的容积—— $V_1, V_2, \dots, V_n$  米<sup>3</sup>。

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

此外，计算中更多应用的是给出混合气体的相对成分说明混合气体的组成情况。

某组成气体的质量 $m_i$ 与混合气体的总质量 $m$ 的比值称为混合气体中该成分的质量百分数(或相对质量)，以 $g_i$ 表示。

$$g_1 = \frac{m_1}{m}, \quad g_2 = \frac{m_2}{m}, \quad \dots, \quad g_i = \frac{m_i}{m} \quad (1-17)$$

所有重量百分数的和是

$$\sum_{i=1}^n g_i = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m} = 1$$

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。

$$r_1 = \frac{V_1}{V}, \quad r_2 = \frac{V_2}{V}, \quad \dots, \quad r_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-18)$$

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，这种假想气体的总质量和分子数，恰好同混合气体的总质量及分子数相等。这样，在求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

以及质量的计算问题。

混合气体的计算公式，见表1—1

表1—1 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
$g_i$	$r_i = \frac{g_i}{\mu_i} / \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}$	$\gamma = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i}}$ $v = \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\gamma_i}$	$\mu = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R = \sum_{i=1}^n g_i R_i$	$p_i = g_i p \frac{R_i}{R}$
$r_i$	$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$	$\gamma = \sum_{i=1}^n r_i \gamma_i$ $\mu = \frac{1}{\sum_{i=1}^n r_i \gamma_i}$	$\mu = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i$	$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R_i}}$	$p_i = r_i p$

例 1—6 在2kg空气中有氧0.464kg，氮1.536kg，求空气的气体常数。

解 氧和氮的质量成分为：

$$g_{O_2} = \frac{0.464}{0.464 + 1.536} = 0.232$$

$$g_{N_2} = \frac{1.536}{0.464 + 1.536} = 0.768$$

代入按相对质量计算平均分子量的公式

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} \\ &= \frac{1}{\frac{0.232}{32} + \frac{0.768}{28.01}} = 28.8 \end{aligned}$$

所以空气的气体常数为

$$R = \frac{8314}{28.8} = 288.3 \quad \text{J/(kgK)}$$

如果考虑到空气中少量的其它成分，则空气的平均分子量应为28.97，气体常数应为287J/(kgK)，以后计算空气时，可直接利用这些数进行计算。



例 1—7 若上例中的空气温度为127℃，占有容积为1m<sup>3</sup>，求氧气和氮气分压力。

解 根据相对质量计算分压力的公式为

$$p_i = g_i p \frac{R_i}{R}$$

式中  $p_i, g_i, R_i$ ——某成分气体的分压力、相对质量、气体常数；

$p, R$ ——混合气体的压力、气体常数。

利用状态方程式先来计算混合气体的压力

$$p = \frac{mRT}{V} = \frac{2 \times 288.3 \times (273 + 127)}{1}$$
$$= 230640 \text{ Pa}$$

氧气和氮气的气体常数分别为

$$R_{O_2} = \frac{8314}{32} = 259.8 \text{ J/(kgK)}$$

$$R_{N_2} = \frac{8314}{28} = 296.9 \text{ J/(kgK)}$$

所以氧气与氮气的分压力为

$$p_{O_2} = 230640 \times 0.232 \times \frac{259.8}{288.3} = 48219 \text{ Pa}$$

$$p_{N_2} = 230640 \times 0.768 \times \frac{296.9}{288.3} = 182415 \text{ Pa}$$

### 思 考 题

1. 为什么说只有平衡态才能用状态参数描述？怎样的状态叫做平衡态？
2. 如果容器中气体的压力不变，但在不同的地点或在不同的时间测定，压力表上的读数会改变吗？
3. 绝对压力、表压力、真空度都是状态参数吗？
4. 理想气体的状态方程式有什么用？采用国际单位制时，方程式中各量的单位是什么？如采用工程单位制，方程式中各量的单位又是什么？
5. 气体常数R与状态、气体的种类各是什么关系？按  $R = \frac{8314.3}{\mu}$  计算出的R的单位是什么？
6. 混合气体成分的分压力、分容积各是什么意思？与混合气体的压力、容积各是什么关系？如果某种成分处于分压力与分容积二种不同的状态，它们参数间有什么关系？
7. 为什么引入混合气体平均分子量的概念？空气的平均分子量一般为多大？

### 习 题

1—1 如果气压计读数为750mmHg，试完成以下计算；