

中等专业学校教材

# 发电厂动力部分

南京电力学校 俞国泰    武汉电力学校 陆仕镇

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书是根据水利电力部中等专业学校第二轮教材编审出版规划组织编写的，是电力类专业学生学习发电厂生产过程的基本原理和设备的必修教材。

全书包括热工学理论基础、锅炉设备、汽轮机设备、水力发电四篇内容。本书紧紧围绕发电厂能量转换过程取材，着重阐述热工学、水力学的理论基础及有关概念、定律，并介绍了火力发电厂和水力发电厂的有关系统和设备。内容深入浅出，文字通俗易懂，书中附有例题和习题，可供学生学时使用。本书亦可供现场有关技术工人和技术人员参考。

中等专业学校教材

发电厂动力部分

南京电力学校 俞国泰

武汉电力学校 马仕镇

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 16.5印张 371千字 3插页

1987年6月第一版 1987年6月北京第一次印刷

印数00001—23640册 定价2.55元

书号 15143·6366



## 前 言

本书是根据水利电力部中等专业学校第二轮教材编审出版规划组织编写的，作为电力类专业学生学习发电厂生产过程的基本原理和设备的必修教材。对发电厂工人、干部和技术学校学生的学习也具有一定的参考价值。

根据中等专业学校电力类专业的教学大纲要求，本书着重介绍国产设备及其系统，在取材和内容叙述上紧紧围绕能量转换这个中心，按篇章节分别阐明，以增强全书的系统性。在文字的表达上，力求深入浅出，通俗易懂。

本书共分四篇，绪论、第一篇热工学理论基础和第三篇汽轮机设备由南京电力学校俞国泰同志编写，第二篇锅炉设备由南京电力学校汤增欣同志编写，第四篇水力发电由武汉电力学校陆仕镇同志编写。全书由俞国泰同志统稿，由俞国泰同志与陆仕镇同志主编，由沈阳电力学校王大振同志和东北水利水电学校史振声同志主审。本书在编写过程中，得到有关兄弟院校和生产单位的帮助，在此一并表示感谢。

限于编者水平，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1985年10月

# 目 录

前 言

绪 论 ..... 1

## 第一篇 热工学理论基础

第一章 工质及其热力状态	5
第一节 工质、理想气体和实际气体	5
第二节 工质的热力状态和基本状态参数	5
第三节 平衡状态及理想气体的状态方程	8
第二章 热力过程及热力学第一定律	11
第一节 工质的热力过程	11
第二节 内能	12
第三节 功和 $P-v$ 图	13
第四节 热量和 $T-s$ 图	14
第五节 热力学第一定律	16
第六节 基本热力过程	17
第三章 热力循环和热力学第二定律	26
第一节 热力循环	26
第二节 卡诺循环	28
第三节 热力学第二定律	30
第四章 水蒸汽	31
第一节 饱和温度和饱和压力	31
第二节 等压下水蒸汽的形成过程	32
第三节 水蒸汽的 $h-s$ 图	35
第四节 蒸汽动力循环	37
第五节 蒸汽的流动过程	47
第五章 传热学的基本知识	52
第一节 导热	52
第二节 对流换热	53
第三节 热辐射	58
第四节 换热器	61

## 第二篇 锅 炉 设 备

第六章 锅炉设备概述	63
第一节 锅炉的主要指标、分类和型号	63

第二节	锅炉设备的组成及其工作过程 .....	67
第七章	燃料的燃烧及燃烧设备 .....	69
第一节	燃料及煤粉制备 .....	69
第二节	燃料的燃烧及锅炉热平衡 .....	80
第三节	煤粉炉的燃烧设备 .....	86
第八章	锅炉受热面和整体介绍 .....	91
第一节	锅炉的水循环 .....	91
第二节	蒸发设备及蒸汽净化 .....	95
第三节	过热器和再热器 .....	101
第四节	省煤器和空气预热器 .....	104
第五节	典型锅炉介绍 .....	106
第九章	锅炉的主要辅助设备 .....	109
第一节	给水设备 .....	109
第二节	通风设备 .....	110
第三节	除尘设备 .....	111
第四节	除灰设备 .....	113
第五节	锅炉的水处理 .....	115

### 第三篇 汽轮机设备

第十章	汽轮机的工作原理 .....	118
第一节	概述 .....	118
第二节	蒸汽在喷管中的能量转换 .....	124
第三节	蒸汽在动叶中的能量转换 .....	131
第四节	级的最佳速比 .....	133
第五节	多级汽轮机 .....	137
第十一章	汽轮机的调速系统 .....	143
第一节	汽轮机调节的基本概念 .....	143
第二节	调速系统的组成及其静态特性 .....	147
第三节	同步器 .....	153
第四节	超速保护装置 .....	156
第五节	汽轮机供油系统 .....	157
第十二章	汽轮机主要组成部件的结构 .....	158
第一节	汽缸的结构 .....	158
第二节	隔板 .....	159
第三节	转子 .....	160
第四节	汽封 .....	162
第五节	联轴器 .....	163
第六节	轴承 .....	164
第七节	典型机组介绍 .....	166
第十三章	汽轮机的热力系统及其设备 .....	167

第一节	原则性热力系统和全面性热力系统	167
第二节	主蒸汽管路系统	168
第三节	中间再热机组的旁路系统	169
第四节	凝汽设备及供水系统	170
第五节	给水回热系统及其设备	173
第六节	全面性热力系统举例	177

## 第四篇 水力发电

第十四章	水力学基础知识	179
第一节	液体的物理特性	179
第二节	水静力学	180
第三节	水动力学	183
第十五章	水能利用	194
第一节	水力发电概述	194
第二节	水能计算和水电站出力计算公式	195
第三节	水电站的开发方式	197
第四节	水库	201
第五节	水电站的水头	203
第六节	径流调节	204
第七节	保证出力、多年平均发电量、负荷曲线	208
第八节	水电站在电力系统中的作用	211
第九节	水电站装机容量确定	216
第十节	水电站的水库调度	217
第十六章	水电站水工建筑物	219
第一节	水利枢纽	219
第二节	挡水建筑物	222
第三节	泄水建筑物	225
第四节	取水和输水建筑物	226
第五节	前池、调压室	227
第六节	水电站的厂房	229
第十七章	水电站动力设备	235
第一节	水轮机分类和牌号	235
第二节	反击式水轮机的构造	238
第三节	反击式水轮机的工作原理	244
第四节	水轮机的汽蚀、吸出高度和安装高程	247
第五节	水轮机的相似理论	249
第六节	水轮机的调速器	252
第七节	水电站的油、水、气系统	254

水蒸汽焓-焓图

## 绪 论

电力是现代化生产的基本动力，它广泛应用于国民经济的各个部门。随着国民经济的发展，电力工业必须相应得到发展。因此，电力工业的发展水平是衡量一个国家国民经济发展的一个重要标志。根据国外的发展经验来看，国民经济每增长1%，电力工业需要增长1%以上。据统计，解放前夕全国总发电能力仅1848MW，至1983年全国总装机容量达到76445MW，增长了40倍，跃居世界第八位，发电量为 $351.4 \times 10^9 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，居世界第六位。可见，我国解放三十多年来国民经济发展是十分迅速的。同样，根据中央制订的在2000年国民经济总产值较1980年“翻两番”的宏伟规划，可以预见到电力工业将出现突飞猛进的发展趋势。

电能是由其他能量转换而来的。目前，世界上主要是利用燃料的化学能和水能转换成电能，它们占整个用电能量的80%以上。一般把利用燃料的化学能转换成电能的工厂称为火力发电厂，而把利用水能转换成电能的工厂称为水力发电厂。根据我国水力和燃料资源都十分丰富的实际情况，制定了“大力开发水电，积极发展火电，适当发展核电”的能源开发方针。凡有水力资源的地区应多搞水力发电厂，在煤炭基地多建火力发电厂，对那些水力和煤炭资源都比较缺乏的地区，应注意发展一定数量的原子能发电站，为国民经济的快速起飞奠定基础，为早日实现四个现代化作出应有的贡献。

火力发电厂是用煤、石油、天然气作为燃料，在锅炉设备中通过燃烧和传热，把燃料的化学能转换成水蒸汽的热能，再借助于汽轮机设备将蒸汽的热能转换成机械能，然后再通过发电机将机械能转换成电能。截止到83年的统计，我国发电厂的总装机容量中，火力发电厂约占68%。根据我国煤炭资源较丰富的实际情况，制订了火力发电厂中以燃煤发电为主的能源政策。因此，全国火力发电厂中燃煤发电的占80%以上。

火力发电厂可分为单纯发电的凝汽式电厂和既供热又发电的供热式电厂两大类。它们之间的区别主要在于汽轮机有无对外供热抽汽，两者的生产过程是基本相同的。现以凝汽式火力发电厂为例来说明其生产过程，如图0-1所示。

煤由输煤皮带运至锅炉房的煤斗中，再进入磨煤机将其磨成煤粉，在热空气（又称一次风）的输送下，经由燃烧器送入炉膛燃烧。来自环境中的空气经送风机送入锅炉尾部烟道中的空气预热器进行加热，加热后的热空气一部分用来输送煤粉和助燃，另一部分直接进入燃烧器喷入炉膛，起搅拌作用，使煤粉和空气混合得更加均匀，以提高燃烧效率。人们称前者为一次风，后者为二次风。煤粉燃烧后所放出的热量，一部分传给水冷壁管加热锅水，另一部分随烟气进入烟道，加热过热器、省煤器、空气预热器中的汽、水、空气，被冷却后的烟气通过除尘器除尘，经引风机送入烟囱排入大气。另外，炉膛排出的煤渣和除尘器排出的细灰用水沿冲灰沟冲入灰渣泵房，由灰渣泵送至贮灰场。

在水冷壁管中的锅水被加热后产生蒸汽，蒸汽经汽包引入烟道中的过热器继续加热成

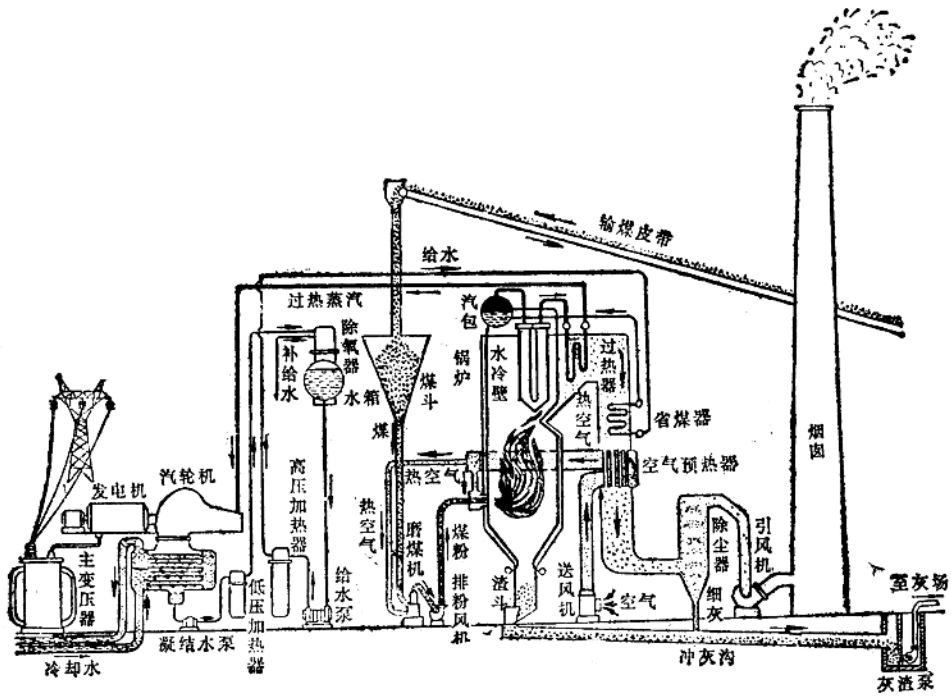


图 0-1 凝汽式火力发电厂生产过程示意图

过热蒸汽，再进入汽轮机中膨胀做功，把蒸汽具有的热能转换成旋转的机械能，带动发电机转动，最后转换成电能输出。在汽轮机中作完功以后的乏汽，进入凝汽器，经冷却水冷却成凝结水，用凝结水泵打入低压加热器加热，然后送入除氧器除氧，除氧后的水经给水泵打入高压加热器、省煤器加热后进入汽包。如此循环往复，不断将燃料的化学能转换成电能。

从凝汽式火力发电厂复杂的生产过程中，可以概括出一个简单的循环：即水在锅炉中获得热量变成蒸汽，蒸汽在汽轮机中膨胀做功，然后进入凝汽器，经冷凝放热再变成水，送入锅炉，如此循环往复。这样一简化就容易看出：在锅炉中把水变成汽所加入的热量是这个循环所付出的“代价”；蒸汽在汽轮机中膨胀所获得的机械功是这个循环的“收益”；而汽轮机乏汽在凝汽器中重新变成水所放出的热量是这个循环的“损失”。显然，衡量火力发电厂这个循环的经济效益，可以采用效率作为指标，即：效率 =  $\frac{\text{收益}}{\text{代价}}$  =

$\frac{\text{代价} - \text{损失}}{\text{代价}} = 1 - \frac{\text{损失}}{\text{代价}}$ 。由于上述分析考察的是热量，这个效率被称为热效率。一般火力发电厂的热效率最好也仅40%左右。工作介质在锅炉中所吸收热量的60%左右在循环过程中损失了。为了从本质上认识火力发电厂的生产过程，本书的第一篇《热工理论基础》部分，将对热能转换成机械能的循环规律、条件、方向等作较全面的阐述，以利读者从理



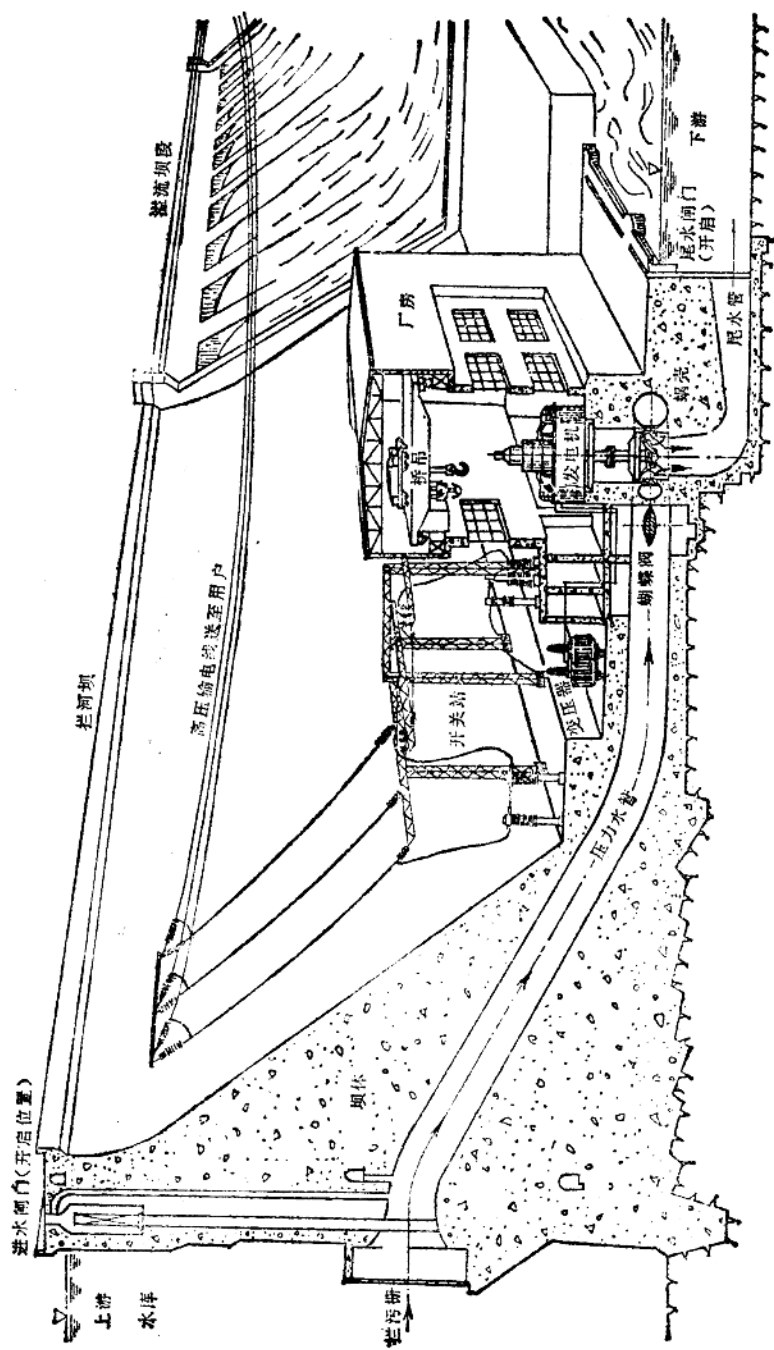


图 0-2 水力发电厂生产过程示意图

论高度上来认识火力发电厂。在此基础上，再在第二篇的《锅炉设备》和第三篇的《汽轮机设备》部分，对燃料的化学能转换成蒸汽的热能和蒸汽的热能转换成机械能的原理、系统、设备等作较具体的介绍，以便从理论和实际的结合上，进一步加深对火力发电厂的认识。

水力发电厂是利用水能转换成电能的工厂，其容量大小取决于上下游的水位差（又称水头）和流量的大小。因此，水力发电厂往往需要修建拦河大坝等水工建筑，以形成集中的水位差和具有一定容积的、可供调节的水库。根据地形、地质、水能资源特点等不同，水力发电厂的形式是多种多样的。

水力发电厂的简单生产过程，如图0-2所示。由拦河坝维持的高水位的水，经压力水管进入水轮机的螺旋形蜗壳推动转子旋转，将水能转换成机械能，水轮机带动发电机旋转，使机械能转换成电能。在水轮机中作完功后的水经尾水管排入下游。

水力发电厂和火力发电厂相比较，具有发电成本低；效率高；易于自动化；环境污染小；机组起动快；事故应变能力等优点。但是，水力发电厂需要建设庞大的水工建筑，建设投资大，工期长。从长远利益来看，发展水力发电必然是一个具有水力资源国家的一项基本国策。

我国水力资源十分丰富。新近统计表明，已开发的水力资源仅占可开发总量的4.3%。因此，中央决定在今后将把开发水力资源放在优先的位置上。据规划，将在长江中上游建造四个阶梯电站，总装机容量达30000MW以上，并以此为中心再在金沙江、大渡河、澜沧江、沅江、黄河中上游等河流兴建十来个大型水力发电基地，为我国四化事业提供充足、经济、稳定的电力。由此可见，一个电力工作者具备水能转换成电能的知识也是十分必要的。为此，本书第四篇《水力发电》将对此作较详细的介绍。

# 第一篇 热工学理论基础

热工学理论基础包括工程热力学和传热学两部分内容。工程热力学主要研究热能和机械能之间的转换规律及方法；传热学主要研究由于温差引起的热能传递规律。

热能转换成机械能，必须伴随着工作介质热力状态的连续变化。为了找出热能转换成机械能之间的数量关系及转换条件，需要对工作介质的热力状态，以及热力状态连续变化的热力过程和热力循环作较详细的研究。

热能的传递规律，随着传递方式的不同而不同。因此，必须对不同传递方式的特点作较深入的分析 and 比较。

## 第一章 工质及其热力状态

### 第一节 工质、理想气体和实际气体

将热能转换成机械能的设备，统称为热机。汽轮机、蒸汽机、燃气轮机、内燃机等都属于热机。热机中用来实现热能转换成机械能的工作介质，简称为工质。气体、液体、固体中，气体受热后膨胀性能最好，能最大限度地热能转换成机械能，同时它具有良好的流动性，易于流入和排出热机，所以气体最适宜于作为工质。

一切实际气体都是由气体分子所组成的。气体分子具有微小的体积，它们之间也存在着微小的吸引力。但是，当气体处在高温低压的状态时，气体分子本身的体积和气体分子所占有的体积相比，以及气体分子间的吸引力所具有的能量和气体分子剧烈的热运动所具有的能量相比，几乎小到可以忽略的程度。因此，为了研究方便，经常不考虑气体分子的体积和气体分子之间的吸引力，这种气体称为理想气体。在一般情况下，空气、高温燃气、高温低压蒸汽，都很接近于理想气体。因此，研究理想气体除了分析方便以外，也具有一定的实际意义。

### 第二节 工质的热力状态和基本状态参数

热能转换成机械能，必须使工质在热力设备中通过吸热、膨胀、放热等过程才能实现。在这些过程中，工质的物理特性随时在发生变化。也就是说，工质的热力状态随时在发生变化。所谓工质的热力状态，就是指在某一瞬间用来表示工质物理特性的总标志。在一定的热力状态下，表明工质特性的各个物理量，称为工质的状态参数。常用的状态参数有六个，即：温度、压力、比容、内能、焓、熵。其中温度、压力、比容是工质的基本状态参数，内能、焓、熵是导出的状态参数。本章先介绍基本状态参数，其他三个状态参数将在以后陆续介绍。

## 一、温度

温度是表示物体冷热程度的物理量。分子运动论指出：分子在作不规则的平移运动时，不断地互相碰撞，因此各个分子的运动速度是不同的，动能也各不相同。温度是大量分子平均动能的量度，它们之间的关系为

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

式中， $T$ 为绝对温度； $B$ 为比例常数； $\frac{1}{2}m\bar{c}^2$ 为分子平移运动的平均动能。由此可见，温度正比于分子的平均动能。物体温度愈高，分子运动的平均速度就愈快，分子平均动能就愈大。反之则相反。

测量温度的标尺称温标。常用的有百度温标和绝对温标两种。

百度温标又称摄氏温标。它规定在标准大气压下净水的沸点为100度，冰点为0度，这两个温度之间采用一百个分度。在0度以下及100度以上的温度，由每一个分度延长获得。这种温标的温度以符号 $t$ 表示，单位用 $^{\circ}\text{C}$ 。

绝对温标又称开氏温标。它与百度温标的分度相同，但起点不同。它把分子停止运动时的温度作为0度。根据(1-1)式，当 $\bar{c} = 0$ 时， $T = 0$ 。该点温度相当于百度温标的零下273.15 $^{\circ}\text{C}$ 。该温标的温度用符号 $T$ 表示，单位用 $\text{K}$ 。

显然，两种温标之间的关系为

$$t^{\circ}\text{C} = \text{TK} - 273.15 \quad (1-2)$$

通常计算时，上式中常数项取273已足够精确。在热工学中，一般都用绝对温度 $T$ 作为工质的状态参数。我国法定计量单位规定允许采用上述两种温标。

## 二、压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力。在物理学中称压强。用符号 $P$ 表示。在分子运动学中，把气体的压力看作是分子撞击容器壁面的结果。由于气体的分子数目很多，撞击又无规则，所以只能把压力看作是分子撞击容器壁面的平均总结果。压力的方向总是垂直于容器壁面的。

### (一) 压力的单位

压力的单位可以从上述压力的定义中得出，即

$$p = \frac{P}{F} \quad (1-3)$$

在国际单位中，作用力 $P$ 的单位为牛顿(N)，承受作用力的面积 $F$ 的单位为米<sup>2</sup>(m<sup>2</sup>)，则压力 $p$ 的单位为帕斯卡(Pa)，简称帕，1Pa=1N/m<sup>2</sup>。由于帕的单位太小，工程上常用兆帕(MPa)作为压力的单位。另外，在工程单位制中 $P$ 的单位常用千克力(kgf)表示，并将1kgf/cm<sup>2</sup>定为一个工程大气压(at)，1工程大气压(kgf/cm<sup>2</sup>)=98066.5帕(Pa)。

压力的单位也可以用液柱的高度来表示。如图1-1所示，液柱对底面积的总压力等于液柱的重量，即 $pF = \gamma FH$ ，故

$$p = \gamma H \quad \text{或} \quad H = \frac{p}{\gamma} \quad (1-4)$$

式中,  $H$ 为液柱高;  $\gamma$ 为液体的重度( $\text{N}/\text{m}^3$ )。由于水的重度 $\gamma = 9810\text{N}/\text{m}^3$ ; 汞的重度 $\gamma = 133367\text{N}/\text{m}^3$ , 根据(1-4)式可得出工程大气压与水柱高和汞柱高之间的换算关系为

$$10\text{mH}_2\text{O} = 9.81\text{N}/\text{cm}^2 = 98100\text{Pa} = 0.735\text{mHg}$$

$$1\text{mmHg} = 133.332\text{Pa}$$

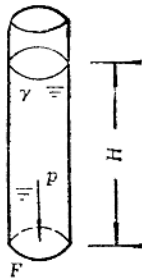


图 1-1 液柱对底面积的压力

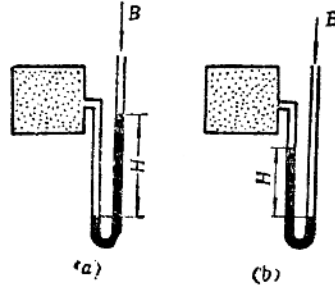


图 1-2 U形管测压示意图

## (二) 大气压力

地球表面包围着一层几百公里厚的空气层, 这层空气层由于其自身的重量而对地面上的物体产生压力, 这个压力称为大气压力, 简称大气压。它随海拔高度和气候等条件的变化而变化。大气压力用 $p_B$ 表示, 用大气压力计测量。

物理学上, 把纬度 $45^\circ$ 海平面上常年平均气压定为标准大气压或称为物理大气压, 其值为 $760\text{mmHg}$ 。换算成国际单位和工程单位为

$$1\text{物理大气压} = 0.1013\text{MPa} = 1.033\text{at}$$

## (三) 绝对压力、表压力、真空

在容器内的气体压力有可能高于或低于大气压力 $p_B$ 。当压力高于 $p_B$ 时, 称其为正压。如图1-2(a)所示。反之, 称其为负压或真空。如图1-2(b)所示。

不论是正压还是负压, 容器内气体的真实压力称为绝对压力, 用 $p_{\text{绝}}$ 表示。而把压力表测得的压力称为表压力, 用 $p_{\text{表}}$ 表示。如图1-2中 $H$ 所示。显然, 如果在图1-2中的U形管两边的等压面上, 列出压力平衡方程, 即可得出绝对压力和表压力之间的关系式。对正压容器来说, 压力平衡方程为

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

对于负压容器来说, 由于表压力往往用 $H$ 表示, 其压力平衡方程

$$p_B = p_{\text{绝}} + H \quad \text{或} \quad H = p_B - p_{\text{绝}} \quad (1-6)$$

有时真空的大小用百分数表示, 则称其为真空度。真空度是真空与大气压力比值的百分数, 即

$$\text{真空度} = \frac{H}{p_B} \times 100\% \quad (1-7)$$

**【例 1-1】** 锅炉出口处的蒸汽压力表读数为 $139\text{kgf}/\text{cm}^2$ , 当地气压计读数为 $756\text{mmHg}$ , 求蒸汽的绝对压力。

解: 
$$p_{\text{绝}} = p_{\text{表}} + p_{\text{B}} = 139 + \frac{756}{735} \approx 140 \text{at} = 13.73 \text{MPa}$$

【例 1-2】凝汽器水银真空表的读数为710mmHg, 大气压力计读数为750mmHg, 求凝汽器中蒸汽的绝对压力。

解: 
$$p_{\text{绝}} = p_{\text{B}} - H = 750 - 710 = 40 \text{mmHg} = \frac{40}{735} = 0.054 \text{at}$$

$$= 0.0051 \text{MPa}$$

### 三、比容和密度

单位质量的工质所占有的容积, 称为该工质的比容。用符号  $v$  表示, 其单位为米<sup>3</sup>/千克 (m<sup>3</sup>/kg)。如有  $m$  千克质量的工质占有  $V$  m<sup>3</sup> 的容积, 则其比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-8)$$

相反, 单位容积的工质所具有的质量, 称为该工质的密度。用符号  $\rho$  表示, 其单位为千克/米<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>)。显然, 比容和密度互为倒数, 即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-9)$$

比容和密度不是互相独立的两个参数, 而是同一个参数的两种不同的表示方法。在热工学中, 通常用比容作为状态参数。

## 第三节 平衡状态及理想气体的状态方程

### 一、平衡状态

所谓平衡状态, 就是指在没有外界作用的情况下, 工质可以长期保持的状态。工质处于平衡状态时, 其各个部分都具有相同的压力、温度和比容。比如, 一个竖立的气缸内具有某种气体, 其压力和活塞的重量相互平衡。如果不对气缸内气体进行加热或吸热, 也就是说, 没有外界作用的情况下, 该气缸内的气体就处于平衡状态。气体的各点都具有相同的压力、温度和比容。相反, 如果外界对气缸进行加热, 则靠近气缸内壁的气体温度就会大于处于气缸中心的气体温度, 气体处于不平衡状态。

为什么要提出平衡状态的概念呢? 因为只有平衡状态时, 才有可能用同一个状态参数描述整个工质的状态。这样, 才能在有两个状态参数的坐标图上 (比如  $p-v$  图), 用一个点来清晰地表明整个工质所处的状态, 以便于分析和研究问题。

### 二、理想气体的状态方程

当理想气体处于平衡状态时, 在确定的状态参数  $p$ 、 $v$ 、 $T$  之间, 存在着一定的关系。这种关系可以写成

$$f(p \cdot v \cdot T) = 0$$

该式被称为理想气体状态方程式。它的具体函数关系可推导如下, 理想气体的分子运动的基本方程为

$$p = \frac{2}{3} n \frac{\overline{mc^2}}{2}$$

式中,  $n$  为  $1\text{m}^3$  容积中的分子数;  $\frac{\overline{mc^2}}{2}$  为分子平移运动的平均动能。该式说明了大量分子撞击容器四壁的总结果与分子运动动能之间的关系。根据 (1-1) 式  $\frac{\overline{mc^2}}{2} = BT$ , 上式可写成

$$p = \frac{2}{3} nBT \quad \text{或} \quad pv = \frac{2}{3} nvBT$$

式中,  $nv = N$ , 为一千克质量的理想气体所包含的分子数, 它是一个常数。则

$$\frac{pv}{T} = \frac{2}{3} NB = KN = R \quad \text{或} \quad pv = RT \quad (1-10)$$

式中,  $K$  为波耳兹曼常数;  $N$  为阿佛加德罗常数;  $R$  为气体常数。对  $m$  千克质量的理想气体, 则

$$pV = mRT \quad (1-11)$$

气体常数  $R$  与状态无关, 只决定于气体的性质。不同的气体, 一般具有不同的气体常数。其单位为千克(力)米/千克·开 ( $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ) 或者焦耳/千克·开 ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )。

在应用状态方程时, 应特别注意各个量的单位的统一。

### 三、气体常数的计算

当应用理想气体状态方程式时, 往往需要先算出气体常数, 而不同气体, 一般具有不同的气体常数, 比较麻烦。本节将给出不同气体都可通用的气体常数, 这将给计算带来很大方便。

#### (一) 摩尔质量和摩尔容积

当气体质量的千克数等于其分子量时, 这个数量的气体称为 1 千摩尔 ( $\text{kmol}$ ) 气体。例如, 氧、氮的分子量各为 32 和 28, 因而  $1\text{kmol}$  氧等于  $32\text{kg}$ ,  $1\text{kmol}$  氮等于  $28\text{kg}$ 。

阿佛加德罗定律指出: 同温度同压力下, 同体积的各种气体具有相同的分子数。据此可以推得, 在同温度同压力状态下, 不同气体的摩尔容积都相等的结论。

因为密度是  $1\text{m}^3$  气体的质量, 也就是  $1\text{m}^3$  中  $n$  个气体分子的质量。所以, 如果以  $m$  表示每个气体分子的质量, 则密度  $\rho$  为

$$\rho = m \cdot n$$

处于同温同压下的两种同体积的不同气体, 它们的分子数相同, 即  $n_1 = n_2$ , 则有

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{m_1 n_1}{m_2 n_2} = \frac{m_1}{m_2}$$

又因为分子量与分子质量成正比; 密度和比容互为倒数, 则上式可写成

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\text{或} \quad \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad \text{或} \quad \mu_1 v_1 = \mu_2 v_2$$

写成一般形式则为

$$\mu v = \text{常数} \quad (1-12)$$

分子量和比容的乘积 $\mu v$ 表示1mol气体的容积，故称为摩尔容积。从上式的推导和结果表明：在同温同压下，不同气体的摩尔容积都相等，它是一个与气体性质无关，只决定于压力和温度的常数。

【例 1-3】 求氧在标准状态下的摩尔容积。

解：在标准状态下， $T=273.15\text{K}$ ； $p=0.1013\text{MPa}$ ；该状态下氧的比容 $v_{o_2}=0.7\text{m}^3/\text{kg}$ ；氧的分子量 $\mu_{o_2}=32\text{kg}$ 则

$$\mu_{o_2} \cdot v_{o_2} = 22.4\text{m}^3$$

实践表明：在标准状态下，任何气体的摩尔容积都等于 $22.4\text{m}^3$ 。同理，在标准状态下，任何气体的比容 $v = \frac{22.4}{\mu} \text{m}^3/\text{kg}$ 。

(二) 通用气体常数

已知1kg的理想气体状态方程为 $pv=RT$ ，则对于1mol质量的理想气体状态方程应为

$$p\mu v = \mu RT$$

在同温同压下，任何气体 $\mu v = \text{常数}$ 。因此，任何气体的 $\mu R = \text{常数}$ 。由于气体常数 $R$ 不随气体状态参数的变化而变化，所以 $\mu R$ 可由标准状态来求得。即

$$\mu R = \frac{p_B v_B \cdot \mu}{T_B} = \frac{10332 \times 22.4}{273.15} = 848 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

或

$$\mu R = 8314.41 \text{ J}/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

$\mu R$ 和气体常数 $R$ 不同， $R$ 随气体的不同而各有其不同的数值，而 $\mu R$ 却对所有气体都是相同的数值。因此，称 $\mu R$ 为通用气体常数。当然，气体常数 $R = \frac{848}{\mu}$ 或者 $R =$

$$\frac{8314.41}{\mu}$$

【例 1-4】 若大气压 $p_B=750\text{mmHg}$ 。求体积 $V=4\text{m}^3$ 的二氧化碳气体在 $t=80^\circ\text{C}$ 及 $p=0.4\text{at}$ （表压力）时的质量。

解：二氧化碳分子量 $\mu_{\text{CO}_2}=12+16 \times 2=44$

$$\begin{aligned} m &= \frac{pV}{RT} = \frac{\left(0.4 + \frac{750}{735}\right) \times 10^4 \times 4}{\frac{848}{44} \times (273+80)} \\ &= \frac{(0.0392+0.0999) \times 10^6 \times 4}{\frac{8314.41}{44} \times (273+80)} \\ &= 8.34\text{kg} \end{aligned}$$



## 习 题

1. 大气压力计上读得当地大气压是750mmHg, 将其换算成: (1) 物理大气压; (2) 工程大气压; (3) 帕。
2. 某氧气瓶, 容积为 $0.05\text{m}^3$ 。充满氧气后, 瓶上压力计读数为100MPa。用去氧气后, 瓶上压力计读数为10MPa。如大气压力计读数为745mmHg, 室温 $27^\circ\text{C}$ , 问氧气被用多少千克质量。

## 第二章 热力过程及热力学第一定律

### 第一节 工质的热力过程

#### 一、平衡过程

热能和机械能的相互转化, 必须通过工质热力状态的连续变化才能实现。一般把工质热力状态的这种连续变化过程, 称为工质的热力过程。

工质的热力状态发生连续变化, 是工质在热力设备中受到外界的作用, 其平衡状态被破坏的结果。因此, 热力过程都是不平衡的。比如, 工质在某个气缸中处于平衡状态, 如果外界对工质进行加热或压缩(吸热或膨胀亦相同), 则工质的原平衡状态被破坏, 工质热力状态发生连续不断地变化。而这些连续不断变化的热力状态都是不平衡状态, 所以这个热力过程亦叫不平衡过程。但是, 如果外界对气缸进行瞬间加热或压缩, 破坏了工质的平衡状态, 瞬间后, 工质从原平衡状态变化到新的状态下恢复平衡。待其恢复平衡后, 再对气缸工质进行瞬间加热或压缩, 如此下去, 工质的热力状态变化就接近于平衡状态的变化。也就是说, 倘若过程进行得很慢, 使外界对工质的作用时间(加热或压缩的时间)远大于工质从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的时间, 即在过程中工质有足够时间来恢复平衡, 随时都不致远离平衡状态, 这样的热力过程就称为平衡过程。

为什么要提出平衡过程这个概念呢? 和提出平衡状态的概念一样, 只有平衡过程才能在以两个状态参数为坐标的图上用连续曲线表示出来。这样, 给研究热力过程带来了方便。平衡过程是实际过程的理想化, 是实际过程进行得非常缓慢时的一个极限。实际过程都不是绝对平衡的。但在一般条件下, 可以近似地把实际过程当成平衡过程来研究。因为, 气体分子的运动速度极大, 几乎可达每秒 $400\sim 500\text{m}$ , 所以它恢复平衡所需的时间极短。对活塞式热机来说, 活塞移动的速度不及每秒 $10\text{m}$ , 即外界作用于工质的时间较工质恢复平衡的时间要长得多, 因此工质在活塞式热机的热力过程很接近于平衡过程。对于叶轮式热机, 由于工质在该热机中的状态变化过程较快, 具有较大的不平衡性, 但通常也当成平衡过程来研究, 最后给以某些修正。

#### 二、可逆过程

如果进一步分析上述平衡过程, 就可以看出它本身具有可逆性。只要在一台没有损失