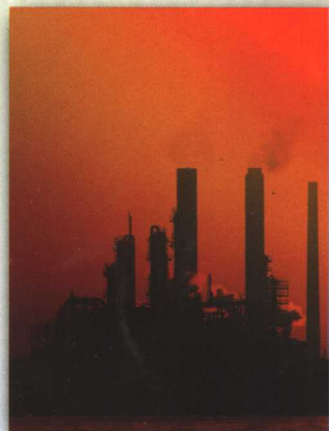
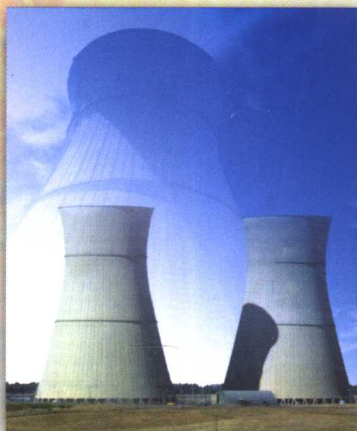




高等学校“十一五”精品规划教材

发电厂动力部分

主 编 李文胜



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等学校“十一·五”精品规划教材

发电厂动力部分

主 编 李文胜
副主编 王祥薇 赵世明
主 审 易大贤



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是为高等学校非热动专业学生编写的“十一五”精品规划教材。全书内容分为三篇：火力发电厂基本原理（包括工程热力学基础、传热学基础），火力发电厂动力部分（包括锅炉系统及设备、汽轮机系统及设备、火力发电厂的运行），其他能源发电（包括水力发电与核能发电、新能源发电技术）。其中，火力发电厂动力部分是本书的重点。各篇分别阐述了各电厂动力部分的基本理论和基本知识，主要动力设备的工作原理、结构、系统流程等。

本书可供非热动专业的相关专业师生阅读，也可供发电厂有关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂动力部分/李文胜主编. —北京：中国水利水电出版社，2007

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978 - 7 - 5084 - 4366 - 9

I. 发… II. 李… III. 发电厂—动力系统—高等学校—教材 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 003226 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 发电厂动力部分
作 者	主编 李文胜
出版 发行	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号 100044） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：(010) 63202266（总机）、68331835（营销中心）
经 售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：(010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 10 印张 237 千字
版 次	2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	19.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

近年来,电力生产管理技术发展很快,对人员素质要求越来越高,从事与发电厂相关专业的人员也迫切需要了解热动专业的基本知识,《发电厂动力部分》就是专为这些非热动专业人员编写的教材与学习参考用书。

本书内容分为三篇:第一篇火力发电厂基本原理(包括工程热力学基础、传热学基础),第二篇火力发电厂动力部分(包括锅炉系统及设备、汽轮机系统及设备、火力发电厂的运行),第三篇其他能源发电(包括水力发电与核能发电、新能源发电技术)。其中火力发电厂动力部分是本书重点。由于新能源的应用技术发展较快,本书在第七章中对各类新能源发电专门作了简单介绍。各篇重点阐述了火电厂动力部分的基本理论和基本知识,主要动力设备的工作原理、结构、系统流程等,同时为了满足不同岗位人员对热动知识的需求,书中也编写了部分较深的内容(以“*”注明),并介绍了新技术在电厂中的应用。

本书内容翔实,通俗易懂,突出火电,展示新技术,可供非热动专业的相关专业师生阅读,也可供发电厂有关技术人员参考。

本书由李文胜任主编,王祥薇、赵世明任副主编,易大贤任主审。李文胜编写了绪论、第一章、第二章、第六章、第七章,赵世明编写了第三章,王祥薇编写了第四章、第五章。华中科技大学项军、武汉大学李培生、大唐田家庵发电厂徐文功、皖能铜陵发电厂钟智辉参与了部分编写工作。

由于作者水平有限,对于书中的缺点和错误,恳请广大师生和读者给予批评指正。

作 者

2007年2月

目 录

前言

绪论..... 1

第一篇 火力发电厂基本原理

第一章 工程热力学基础	7
第一节 工程热力学基本概念	7
第二节 热力学基本定律.....	12
第三节 水蒸气	14
第四节 蒸汽动力装置循环	17
第二章 传热学基础	23
第一节 传热学的基本概念	23
第二节 导热	24
第三节 对流换热	25
第四节 辐射换热	26
第五节 传热过程与换热器	28

第二篇 火力发电厂动力部分

第三章 锅炉系统及设备	33
第一节 锅炉燃料与燃烧.....	33
第二节 火电厂锅炉类型及工作原理	36
第三节 制粉燃烧系统及设备	40
第四节 锅炉汽水系统及设备	46
第五节 输煤与灰渣系统.....	49
第六节 通风除尘系统及设备	50
第四章 汽轮机系统及设备	56
第一节 汽轮机工作原理及效率	56
第二节 汽轮机本体	63
第三节 汽轮机调节保护供油系统	72
第四节 汽轮机热力系统及辅助设备	80

第五章 火力发电厂的运行	90
第一节 火力发电厂的热经济性指标	90
第二节 单元机组的运行方式和自动控制	92
第三节 机组正常运行的监视与调整	95
第四节 单元制发电机组的启停	97
第五节 典型事故及处理	102

第三篇 其他能源发电

第六章 水力发电与核能发电	109
第一节 水力发电的基本原理	109
第二节 水电站系统与设备	110
第三节 水电站的运行与调节	113
第四节 核能发电的基本原理	115
第五节 核电站系统与设备	115
第六节 核电站的运行与安全保护	117
第七节 正确认识核能	119
第七章 新能源发电技术	123
第一节 风力发电技术	123
第二节 太阳能发电技术	127
第三节 生物质能发电技术	133
第四节 地热发电技术	136
第五节 潮汐能发电技术	140
第六节 燃料电池发电技术	142
附录	146
附表 I 饱和水与干饱和蒸汽表 (按压力编排)	146
附表 II 饱和水与干饱和蒸汽表 (按温度编排)	147
附表 III 未饱和水与过热蒸汽表	148

绪 论

一、我国能源利用与特点

(一) 我国能源使用状况

1. 能源的分类

能源，是指能产生各种能量的自然资源，是人类赖以生存和发展的燃料和动力来源。它可分为一次能源和二次能源：

(1) 一次能源指以现成形式存在于自然界中、能直接获得又不改变其基本形态的能源，如煤炭、石油、天然气和核燃料等。它包括：

- 1) 非可再生能源：短期内不会再生的能源，如煤炭、石油、天然气。
- 2) 可再生能源：由于太阳辐射产生的能源或形成的载体，如风能、太阳能、潮汐能等。

(2) 二次能源指通过消耗一次能源而制取得到的能源，如电能、酒精等。

能源的分类见表 0-1。

表 0-1 能源分类表

类 别		来自地球内部的能源	来自地球以外的能源		地球与其他天体相互作用
一次能源	可再生能源	地热能	太阳能、风能、水能、生物质能	……	潮汐能
	非再生能源	核能	煤炭、石油、天然气	……	
二次能源		电力、焦炭、煤气、氢、酒精、汽油、柴油			……

2. 我国能源消费中存在的问题

(1) 资源压力。我国能源消费持续增长，但能源储量有限，能源需求与资源有限之间的矛盾越来越大。

1) 我国人均能耗低，仅是世界人均能耗的 1/2，近年来随着改革开放的深入，中国经济发展较快，同时居民收入水平的提高使人们的消费观念和消费水平也有很大的变化和提 高，能源需求旺盛。

2) 我国石油、天然气、煤炭等可燃矿物燃料占能源消费的比重较高，而人均资源占有量很低。我国主要能源储量见表 0-2。

常规能源非常有限，可替代能源暂时还无法替代常规能源大规模进入商业和民用领域。中国和世界一样，面临着越来越突出的能源短缺问题。

表 0-2 1999 年末主要能源可采期限

单位：年

种 类	煤 炭	石 油	天 然 气
世界	230	44	62
中国	111	21	56

(2) 环境压力。煤炭占我国能源消费比重近 70%，在 TSP (total suspend particulate, 总悬浮颗粒物) 排放总量中煤炭占 70%，造成越来越严重的酸雨、温室效应等危害。而发电用煤占煤炭消费量的 38% 左右，随着这一比重的不断增加，有效控制发电污染排放将备受关注。

3. 我国的能源发展战略

应实行“节能优先，结构多元，环境友好”的可持续能源发展战略。结构多元，就是逐步降低煤炭消费比例，加速发展天然气，依靠国内外资源满足国内市场对石油的基本需求，积极发展水电、核电和可再生能源利用。

(二) 电能的作用与特点

电能是二次能源，它输送、使用方便，可以方便地转变为其他形式的能量，使用时易于操作和控制。

(三) 电站的作用

电站是将一次能源转变为电能的企业。

二、现代电厂的基本生产过程

(一) 发电厂的工作原理

1. 法拉第电磁感应定律

电路中感应电动势的大小，与穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。

2. 电能的生产

人类在法拉第定律基础上发明了发电机和电动机，从此进入“电气时代”。

只要设法使发电机转轴转动，发电机就会产生电能。现代各类电站就是在这个基础上建立起来的。

火力发电厂的发电机可采用蒸汽机、汽轮机、燃气轮机驱动。汽轮机具有功率大、热效率高、直接应用固体燃料、运行稳定可靠等优点，在现代大中型火力发电厂中得到广泛应用。水电站采用水轮机驱动，核电站采用汽轮机驱动，风力发电则采用风力机驱动，从而源源不断地产生电能。

3. 各类电站的特点

根据转换为电能的一次能源的种类或转换方式不同，电站可分为火力发电站、水电站、核电站、风力发电站、太阳能发电站。它们的特点见表 0-3。

表 0-3 各类电站的特点

项目	火 电	水 电	核 电	风 电	太阳能发电
电能来源	燃料化学能	水的机械能	核能	风的机械能	太阳能
投资	大	巨大	大	小	小
建设周期	中 (2~3 年)	长	中	短	短
发电原料	煤等燃料	水	铀	风	太阳能
优点	燃料取得方便、便宜	原料可再生	铀等原料取之不尽	原料可再生	原料可再生
缺点	燃料储存量和开采量有限，不可再生；污染 (SO ₂ 、酸雨)	受气候、地理条件制约	核废料产生污染的风险大	相对发电成本高；受气候、地理条件制约	相对发电成本高；受气候、地理条件制约

(二) 火电厂生产相关知识

目前世界上电站以火力发电为主,同时火电厂生产相对复杂。下面以火电厂为例,介绍其生产流程与特点,让大家对现代电站的生产有个初步的总体认识。其他电站相关过程将在各具体章节中介绍。

1. 火电厂的生产流程

火电厂的生产流程可分为燃料和汽水系统两条线。如图 0-1 所示。

(1) 燃料:煤→煤仓→经磨煤机磨成煤粉→与热空气混合经喷燃器在锅炉内燃烧,生成烟气并产生煤渣。

1) 烟气将热量传给水冷壁→经过水平和垂直烟道继续将热量传给过热器、再热器、省煤器和空气预热器中→由引风机从烟囱排入大气。

2) 炉内落下的灰渣和除尘器排出的飞灰送至灰厂。

(2) 汽水系统流程:→给水通过给水泵升压经过高压加热器送入锅炉省煤器→汽包→下联箱进入水冷壁→汽水混合物进入汽包进行汽水分离→过热器内吸热成为过热蒸汽→汽轮机内膨胀作功推动汽轮机转子转动→作功后的乏汽经凝汽器凝结成水→经低压加热器被加热→除氧器除氧→给水→,它是一个循环的过程。

2. 火电厂的三大主机及功能

(1) 锅炉:保证炉内燃料燃烧,燃烧后的烟气及灰渣排出炉外;保障工质(水)的流动,热能传递给工质使其变为过饱和和再热蒸汽。

(2) 汽机:过热蒸汽在汽机内膨胀作功,保证汽机在额定转速转动,带动发电机转动。

(3) 电机:输出电能,保证电压和频率合格。

3. 火力发电厂的能量变化过程

(1) 锅炉:燃料化学能转化为热能→被工质吸收→工质的热能。

(2) 汽机:工质膨胀,推动汽机转动,工质的热能转化为汽机动能。

(3) 发电机:发电机转动,动能(机械能)转换为电能。

锅炉、汽机及相关过程称为动力部分,发电机等相关过程称为电气部分。

三、我国电力工业的发展变化

我国电力工业发展飞快,1949年发电总装机容量仅185万kW,发电量43亿kW·h;2003年发电总装机容量达到38212万kW,发电量19110亿kW·h;到2004年,我国电力装机总容量已达4.4亿kW。

我国装机容量中,火电占主导地位。2003年火电、水电、核电装机容量分别是28674万kW、8871万kW、619万kW,所占比重分别为75%、23.2%、1.6%。

我国已制定21世纪电力工业发展战略:火电为主,大力发展水电,适当发展核电和再生能源发电。

四、本课程性质、内容和要求

本课程主要包括三部分:第一部分火力发电厂基本原理(包括工程热力学基础、传热学基础),第二部分火力发电厂动力部分(包括锅炉系统及设备、汽轮机系统及设备、火力发电厂的运行),第三部分其他能源发电(包括水力发电与核能发电、新能源发电技术)。

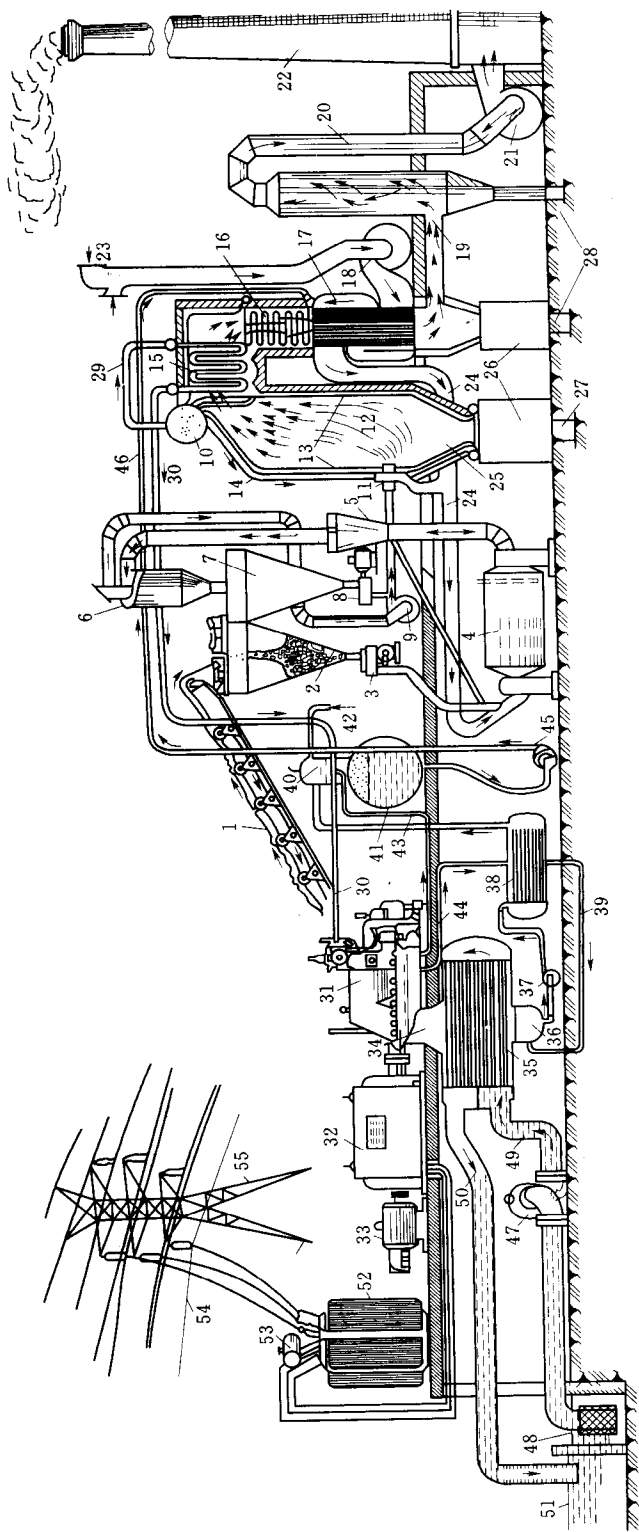


图 0-1 火力发电厂基本生产流程示意图

1—运煤皮带机;2—原煤仓;3—圆盘式给煤机;4—钢球慢速磨煤机;5—粗粉分离器;6—细粉分离器;7—煤粉仓;8—给粉机;9—排粉机;10—汽包;11—燃烧器;12—炉膛;13—水冷壁;14—下降管;15—过热器;16—省煤器;17—空气预热器;18—送风机;19—除尘器;20—烟道;21—引风机;22—烟囱;23—烟卤;24—一次热风风道;25—冷灰半;26—排渣排灰设备;27—冲渣沟;28—冲灰沟;29—饱和蒸汽管;30—主蒸汽管;31—汽轮机;32—发电机;33—励磁机;34—乏汽口;35—凝汽器;36—热井;37—凝结水泵;38—低压加热器;39—低压回热器疏水管;40—除氧器;41—给水箱;42—化学补充水入口;43—除氧抽汽;44—回热加热抽汽;45—给水泵;46—给水管;47—冷却水道;48—吸水滤网;49—冷却水泵;50—凝汽器冷却水出水管;51—江河或冷却水水池;52—主变压器;53—油枕;54—高压输电线;55—铁塔

重点是第二部分。

通过本课程的学习，要求学生较全面地认识火力发电厂生产的各主要环节，了解主要热力设备的工作原理、基本构造和一般运行知识，并通过生产实习对现代大中型火电厂有一完整的概念。



第一篇 火力发电厂基本原理

第一章 工程热力学基础

学习目标

通过本章的学习，了解工程热力学的基本概念，熟悉工程热力学基本定律，熟悉水蒸气的产生过程，掌握电厂的实际循环过程。

第一节 工程热力学基本概念

热能转换为机械能是火力发电站热力部分的主要生产过程。工程热力学是一门主要研究热能与机械能相互转换问题的科学。工程热力学是学习热能动力设备必须具备的基础理论知识。

一、基本概念

1. 热机

将热能转变为机械能的设备，称为热机，如蒸气机、汽轮机、内燃机、燃气轮机。

2. 工质

热机中参与热功转换的媒介物质，称为工质，如汽轮机中的蒸汽，柴油机中的柴油等。

3. 平衡状态

若无外界影响系统保持状态参数值不随时间而改变的状态。热力学通常只研究平衡状态。

4. 热力系统

被分割出来作为热力学研究的对象称为热力系统，简称系统。如研究汽轮机中的蒸汽，则汽轮机内部的蒸汽此时称为一个系统。如图 1-1 (a)、(b) 中用虚线框住的部分所示。

5. 闭口系统

与外界无物质交换的系统，称为闭口系统。如图 1-1 (a) 所示，该系统为闭口系统。

6. 开口系统

与外界有物质交换的系统，称为开口系统。如汽轮机不断有蒸汽进入和流出，若以汽轮机为一系统研究，则它属于开口系统。图 1-1 (b) 中系统属开口系统。工程实践中，

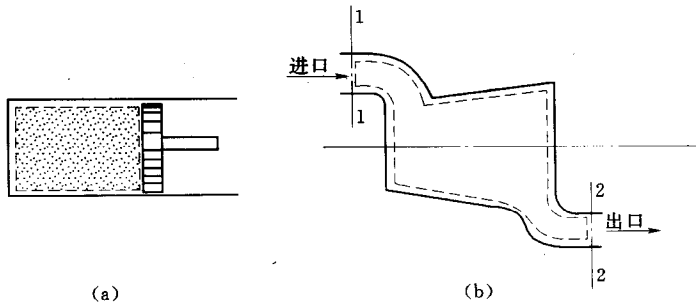


图 1-1 热力系统
(a) 闭口系统；(b) 开口系统

绝大部分都属于开口系统。

7. 绝热系统

与外界无热量交换的系统，称为绝热系统。

8. 孤立系统

与外界无物质交换又无能量交换的系统，称为孤立系统。

二、工质的状态参数

描述物系所处状态的宏观物理量称为工质的状态参数。状态参数是宏观量，是大量粒子的平均效应，只有平衡态才有状态参数。系统有多个状态参数，如压力、温度、比体积等。状态参数只与状态有关，而与过程无关。工质的基本状态参数包括温度、压力和比体积，还有三个导出状态参数内能、焓和熵。

(一) 温度

1. 概念

温度是表示物体冷热程度的物理量，它反映了分子平均移动动能的大小。

2. 单位

(1) 摄氏温标 t ：以水的冰点为零点的温度计量制，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 热力学温标 T ：以绝对零度作为零点的温度计量制，单位为 K。

(3) 关系：

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

3. 测量

测量温度的仪表称为温度计。常用的有水银温度计、热电偶温度计、电阻温度计、辐射温度计、光学温度计。

(二) 压力

1. 概念

压力表示工质作用于器壁或一假想表面单位面积上的垂直力，物理学中称为压强。工质的压力是大量分子对容器壁面频繁撞击的平均结果。

2. 单位

以符号 p 表示，单位为 Pa (帕斯卡)。常用 MPa、bar (巴)、物理大气压。它们的关系是：

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}, 1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

3. 测量

常用仪器是弹簧管压力表或 U 形管压力表, 如图 1-2 和图 1-3 所示。

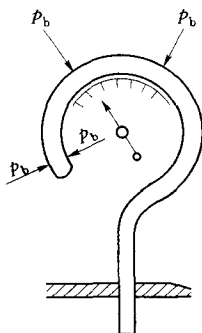


图 1-2 弹簧管压力表

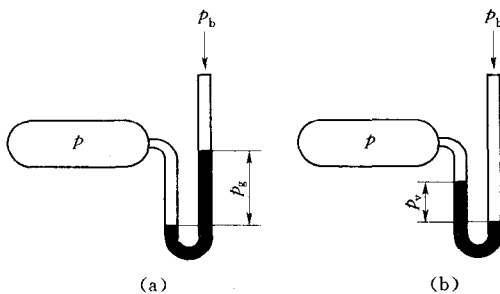


图 1-3 U 形管压力表

(a) $p > p_b$; (b) $p < p_b$

可以看出, 以上两种测压装置测得的数据是真实压力与当地大气压的差值, 称为表计压力, 简称表压。在工程热力学分析计算中, 只有真实压力才是系统压力的状态参数。

当容器内真实压力大于当时当地环境压力时, 测压表计称为压力表。公式为:

$$p = p_b + p_g \quad (1-2)$$

当容器内真实压力小于当时当地环境压力时, 测压表计称为真空表。真空表的指示值称为真空度, 有:

$$p = p_b - p_v \quad (1-3)$$

式中 p ——容器内真实压力 (又称绝对压力), Pa;

p_b ——当地环境压力, Pa;

p_g ——压力表指示值 (又称表压力), Pa;

p_v ——真空计指示值, Pa。

绝对压力、表压力、真空和大气压力之间的关系见图 1-4。

例 1-1 某电厂汽包压力表读数为 13.6MPa, 凝汽器真空表读数是 94000Pa, 当地大气压读数为 101300Pa, 请问汽包和凝汽器中的绝对压力是多少?

汽包中绝对压力:

$$\begin{aligned} p &= 13.6 \times 10^6 + 101300 = 13701300(\text{Pa}) \\ &= 13.7(\text{MPa}) \end{aligned}$$

凝汽器中的绝对压力:

$$p = 101300 - 9400 = 7300(\text{Pa})$$

(三) 比体积

1. 概念

单位质量工质的体积称为比体积, 单位为 m^3/kg 。

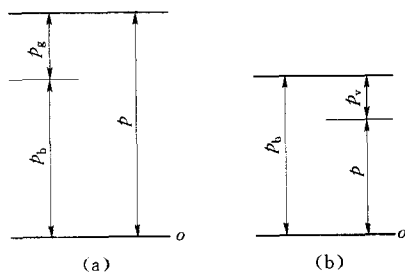


图 1-4 绝对压力、表压力、真空和大气压力间的关系

(a) $p > p_b$ (b) $p < p_b$

$$v = V/m \quad (1-4)$$

2. 密度

密度是单位体积工质的质量，单位为 m^3/kg 。

$$\rho = m/V \quad (1-5)$$

(四) 内能

1. 概念

工质在某一状态下内部蕴藏的总能量称为内能，它包括内动能和内势能。

内动能由分子移动动能、转动动能以及振动动能三者组成。根据分子运动论，分子运动动能越大，工质温度越高，故工质内动能是温度 T 的函数。内势能是由于分子间相互作用力而具有的能量，与工质平均距离有关，即与工质的比体积有关，是比体积的函数。

2. 特性

1kg 工质的内能以符号 u 表示，单位为 J/kg 。 $m\text{kg}$ 工质的内能以符号 U 表示， $u = f(T, v)$ ，其中 T 、 v 是状态参数，故 u 也是状态参数。

3. 测量

工质的内能无法直接测出，通常也无需直接算出其绝对值，一般只需求出从一状态到另一状态内能的变化量 ΔU （或 Δu ）。

(五) 焓

1. 概念

焓是工质的内能和体积能之和。

$$h = u + pv \quad (1-6)$$

2. 特性

1kg 工质的焓称为比焓，以符号 h 表示，单位为 J/kg 。 $m\text{kg}$ 工质的总焓以符号 H 表示，单位 J ， $H=U+PV$ ， $h=u+pv$ ， u 、 p 、 v 均是状态参数，故 h 也是状态参数。

3. 测量

工质的焓无法直接测出，通常只需求出从一状态到另一状态内能的变化量 ΔH （或 Δh ）。

(六) 熵

1. 概念

熵是表达有无传热的状态参数，以 s 表示：

$$ds = dq/T \quad (1-7)$$

1kg 工质在可逆过程中的微小换热量与工质温度 T 之比为熵的全微分，故有：

$$\Delta s = \int_1^2 dq/T \quad (1-8)$$

2. 特性

1kg 工质的熵称为比熵，以符号 s 表示，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。 $m\text{kg}$ 工质的总熵以符号 S 表示，单位 J/K ， s 也是状态参数。

3. 测量

工质的熵无法直接测出，通常只需求出从一状态到另一状态内能的变化量 ΔS （或 Δs ）。

以上 6 个参数中，温度、压力、比体积称为基本状态参数，内能、焓、熵称为导出状态参数。

三、 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

两个独立的状态参数就可确定工质的状态。我们可以任意选择两个相互独立的状态参数构成平面坐标系，通常选择 p 和 v 构成 $p-v$ 图，选择 T 和 s 构成 $T-s$ 图，图中任意一点表示工质所处的状态，如图 1-5 中点 1、点 2 所示。

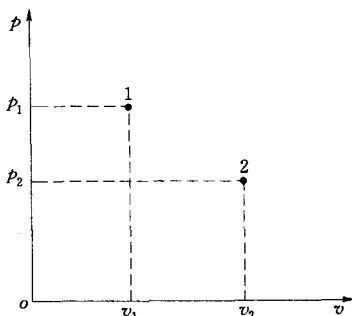


图 1-5 参数坐标图 ($p-v$ 图)

四、功和热能

(一) 功

1. 概念

物体间由于力的作用而传递的能量称为功。一般用 W 表示，单位为 J (kJ)，1kg 工质所作的功用 w 表示，单位是 J/kg (kJ/kg)。

2. 特性

(1) 功不是状态参数，但外界对工质做功（或工质对外界做功）可使工质状态发生变化。

(2) 功是过程量，和具体过程有关。

$$W_{12} = \int_1^2 p dv \quad (1-9)$$

功可以用 $p-v$ 图上过程线与 v 轴包围的面积表示，如图 1-6 所示。

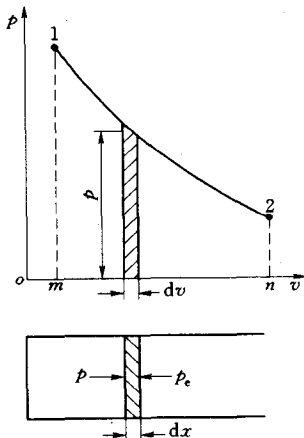


图 1-6 气体的功与压容图

$$w = S_{1-2-n-m}$$

(3) 功的符号约定。气体膨胀时， $dv > 0$ ，系统对外做功为“+”；气体被压缩， $dv < 0$ ，外界对系统做功为“-”。

(二) 热量

1. 概念

由于温差而通过边界传递的能量。一般用 Q 表示，单位为 J (kJ)，1kg 工质所作的功用 q 表示，单位是 J/kg (kJ/kg)。

2. 特性

(1) 热量不是状态参数，但外界对工质加热（或工质对外放热）可使工质状态发生变化。

(2) 热量是过程量，和具体过程有关。

$$q = \int_1^2 T ds \quad (1-10)$$

热量可以用 $T-s$ 图上过程线与 s 轴包围的面积表示，如图 1-7 所示。

$$q = S_{1-2-s_2-s_1}$$

(3) 热的符号约定：工质吸热时热量为“+”，工质放热时热量为“-”。

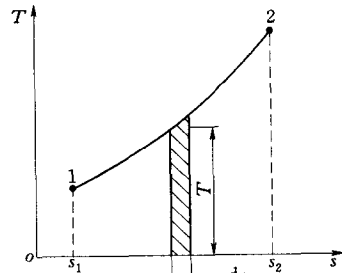


图 1-7 气体的热量