



教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
职业教育电力技术类专业教学用书

# 电厂热力设备 及系统

王 祥 主 编  
魏惠芳 李如秀 屠长环 副主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
职业教育电力技术类专业教学用书

# 电厂热力设备 及系统

主 编 王 祥  
副主编 魏惠芳 李如秀 屠长环  
编 写 陶素娥  
主 审 叶 涛 冯海鹏



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书是教育部职业教育与成人教育司推荐教材。全书分为四篇，共十二章。第一篇热工理论及应用，主要介绍热力学基本概念与基本定律、水蒸气及其动力循环、热传递的基本原理；第二篇流体力学泵与风机，主要介绍流体的基本物理性质、流体静力学、流体动力学及泵与风机的工作原理、结构及运行；第三篇锅炉设备及系统，主要介绍锅炉的主要设备及系统；第四篇汽轮机设备及系统，主要介绍汽轮机的工作原理、主要设备及系统。为便于学生复习，每章都附有复习思考题。

本书可作为发电厂及电力系统、电厂检测技术及自动化、热力过程自动化等专业的动力设备课程教材，亦可作为从事以上专业的生产一线工人的培训教材和自学教材，也可供相关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电厂热力设备及系统/王祥主编. —北京: 中国电力出版社, 2006

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7 - 5083 - 4513 - 4

I. 电... II. 王... III. 火电厂—热力系统—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 074133 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 23 印张 498 千字  
印数 0001—3000 册 定价 29.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 前言

---

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书由武汉电力职业技术学院王祥主编，并编写绪论和第十、第十一章；山西电力职业技术学院魏惠芳任副主编，并编写第一、二、三章；江西电力职业技术学院李如秀任副主编，并编写第十二章；保定电力职业技术学院屠长环任副主编，并编写第八、九章；武汉电力职业技术学院陶素娥编写第四至第七章。

本书由华中科技大学叶涛教授、华电青山热电有限公司总经理高级工程师冯海鹏主审，编者十分感谢两位主审在百忙之中对本书仔细审阅，并提出宝贵的意见，使编者受益匪浅。同时，在编写过程中，参考了有关院校和企业的诸多文献、资料，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

**编者**

2006年5月于武汉

前言	1
绪论	1

## 第一篇 热工理论及应用

<b>第一章 热力学基本概念与基本定律</b>	4
第一节 热力学基本概念	4
第二节 热力学基本定律	10
第三节 理想气体的热力性质	16
思考题	20
<b>第二章 水蒸气及其动力循环</b>	22
第一节 水蒸气的定压形成过程	22
第二节 水蒸气的典型热力过程	27
第三节 水蒸气动力循环	33
思考题	39
<b>第三章 热传递的基本原理</b>	41
第一节 导热	41
第二节 对流换热	45
第三节 辐射换热	48
第四节 传热过程与换热器	52
思考题	58

## 第二篇 流体力学 泵与风机

<b>第四章 流体的基本物理性质</b>	60
第一节 流体的概念	60
第二节 密度和重度	61
第三节 压缩性和膨胀性	61
第四节 黏性	62
思考题	64
<b>第五章 流体静力学</b>	65
第一节 流体静压强及其特性	65

第二节	流体静力学基本方程式 .....	67
第三节	流体静力学基本方程式的应用 .....	69
思考题	.....	72
<b>第六章</b>	<b>流体动力学</b> .....	<b>74</b>
第一节	流体运动的描述方法 .....	74
第二节	流体动力学的基本概念 .....	75
第三节	流体的连续性方程 .....	79
第四节	流体的能量方程式 .....	80
第五节	流体流动阻力及管道计算 .....	88
思考题	.....	95
<b>第七章</b>	<b>泵与风机基础</b> .....	<b>98</b>
第一节	泵与风机的作用、主要参数及工作原理 .....	98
第二节	离心式泵与风机的基本理论及结构 .....	104
第三节	离心式泵与风机的性能 .....	124
思考题	.....	135

### **第三篇 锅炉设备及系统**

<b>第八章</b>	<b>锅炉主要设备</b> .....	<b>137</b>
第一节	锅炉的分类与型号 .....	137
第二节	锅炉本体主要结构 .....	140
第三节	锅炉主要辅助设备 .....	162
第四节	典型锅炉设备简介 .....	173
思考题	.....	177
<b>第九章</b>	<b>锅炉主要系统</b> .....	<b>178</b>
第一节	输煤系统 .....	178
第二节	制粉系统 .....	182
第三节	燃烧系统 .....	190
第四节	风烟系统 .....	200
第五节	汽水系统 .....	202
思考题	.....	213

### **第四篇 汽轮机设备及系统**

<b>第十章</b>	<b>汽轮机工作原理</b> .....	<b>214</b>
第一节	汽轮机的一般概念 .....	214
第二节	汽轮机的工作原理 .....	216
第三节	多级汽轮机工作过程 .....	231

思考题 .....	238
<b>第十一章 汽轮机主要设备</b> .....	239
第一节 汽轮机本体主要结构 .....	239
第二节 汽轮机主要辅助设备 .....	257
第三节 典型汽轮机设备简介 .....	263
思考题 .....	274
<b>第十二章 汽轮机组的主要系统</b> .....	275
第一节 主蒸汽与再热蒸汽系统 .....	275
第二节 蒸汽旁路系统 .....	279
第三节 回热加热系统 .....	282
第四节 除氧系统 .....	285
第五节 主凝结水系统 .....	287
第六节 汽轮机的轴封系统 .....	289
第七节 供水系统 .....	291
第八节 汽轮机的调节保护及供油系统 .....	294
思考题 .....	316
<b>参考文献</b> .....	318

# 绪 论

## 一、电力工业在国民经济中的地位和作用

电力工业是国民经济的重要基础工业，是国家经济发展战略中的重点和先行产业。我国早在建国初期就确立了电力工业先行的地位。从各时期电力生产与经济增长的比较来看，大部分时期电力生产的增长超过了 GDP 的增长，并且往往在经济持续增长的年份，电力生产弹性系数要接近或大于 1，电力工业作为国民经济的重要先行产业的作用十分明显。

从电力能源消费在一次能源中的比重和在终端能源消费的比重来看，发电能源占一次能源消费的比重已由 1980 年的 20.60% 上升到 2000 年的 41.72%，同期电能在终端能源消费中的比重由 1980 年的 4.81% 上升到 2000 年的 11.2%，电力行业已成为能源工业中的支柱产业。电力工业成为国民经济重要的基础产业的作用，呈现逐渐增强的趋势。

纵观 20 世纪的社会和经济发展，一个突出特点是：电力的使用已渗透到社会经济、生活的各个领域。由于电力具有便于转换能源型式，能高度集中和无限划分，清洁干净和易于控制，可大规模生产和远距离输送等特性，使电力发展和应用的程度，即一个国家的电气化程度成了衡量其社会现代化水平高低，以及物质文明和精神文明高低的重要标志之一。

特别是在进入以信息、电子、生物技术为代表，从集中到分散，从等级结构到网络结构，从简单选择到多种选择的 21 世纪，电力将继续发挥其他能源形式所不能替代的作用，而且对电力的依赖程度将更高，对电力供应的数量和品质也将提出更大、更高的要求。

## 二、火电厂的生产过程

在我国，发电量比例最高的是火力发电厂，火电设备容量占总装机的 75% 左右。截止 2000 年底，我国水电、火电、核电和风电装机容量分别达到 7934 万 kW、23753 万 kW、210 万 kW 和 34.5 万 kW，占总装机容量的比重分别为 24.8%、74.4%、0.7% 和 0.1%。“十五”计划末期，全国发电装机容量预计达到 3.9 亿 kW，其中水电 9500 万 kW，火电 28600 万 kW，核电 870 万 kW，风力、太阳能等新能源发电 120 万 kW，占总装机容量的比重分别为 24.3%、73.3%、2.1% 和 0.3%。

火力发电厂是指利用煤、石油或天然气等作为燃料生产电能的工厂，简称火电厂。我国的火电厂以燃煤为主，过去曾建过一批燃油电厂，当前尽量压缩烧油电厂，新建电厂全部为燃煤电厂。

火电厂从能量转换的观点分析，其生产过程是基本相同的，其实质是一个能量转换的过程。首先在锅炉中，燃料的化学能通过燃烧转换为蒸汽的热能，接着在汽轮机中将蒸汽的热能转换为机械能，最后在发电机中将机械能转换为电能。由于锅炉、汽轮机和发电机三大设备分别完成了能量形式的三次转换，所以锅炉、汽轮机和发电机又称为火电厂的三大主机。

图 0-1 是以煤为燃料的火电厂生产过程示意图。

下面结合图 0-1 介绍火电厂的生产过程。

### (一) 燃料运输

燃料运输是火电厂的辅助生产系统，其过程是：煤利用运输工具（火车、汽车、轮船



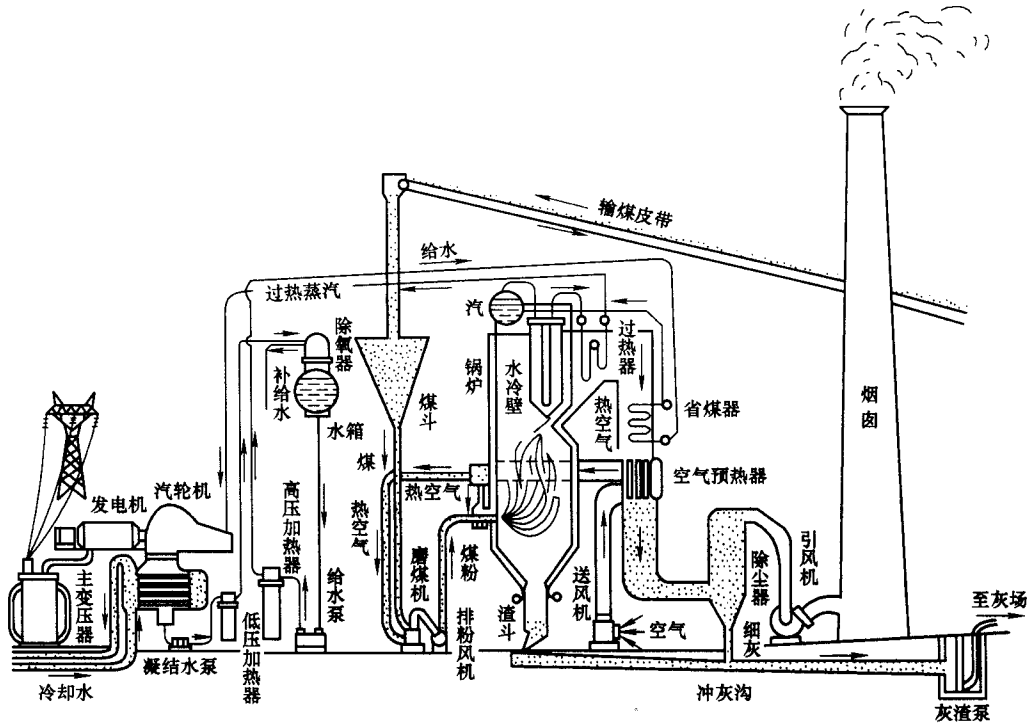


图 0-1 火电厂生产过程示意图

等) 运入电厂的储煤场进行储存。使用时, 再利用扒煤机等煤场设备把煤送上输煤皮带, 经转运、碎煤到锅炉的原煤斗 (或原煤仓)。

#### (二) 制粉系统

制粉系统的任务是将原煤干燥, 磨成一定细度的煤粉, 送入炉膛进行燃烧。

制粉系统的工作过程是: 煤从原煤斗落入磨煤机, 在其中研制成煤粉, 同时送入热空气来干燥和输送煤粉。磨制好的煤粉, 由排粉机经燃烧器喷入炉膛内进行燃烧。

#### (三) 燃烧系统

燃烧系统的任务是供给锅炉所需的燃料及空气, 并保证燃料在炉膛内进行良好燃烧, 同时将燃料燃烧时放出的热量传递给锅炉各受热面, 使受热面内部的水、汽温度压力提高, 成为高热能蒸汽。

燃烧系统的工作过程是: 燃烧器将合格的煤粉混以适量的热空气喷入炉膛进行燃烧, 燃烧后的热能传递给燃烧室的水冷壁, 水冷壁内部的水吸收热量后变成蒸汽。煤粉在炉膛内燃烧时, 需要充足的空气, 空气由送风机送来, 先在空气预热器内预热后, 然后送入炉膛内。这种热空气有三个作用: 即供给燃料燃烧、煤的干燥和煤粉输送。煤在炉内燃烧产生的产物——高温烟气在引风机的作用下, 沿着锅炉本体烟道依次流过炉膛、过热器、省煤器和空气预热器, 将热量逐步传递给水、蒸汽和空气。降温后的烟气流入除尘器进行净化, 净化除尘后的烟气则被引风机抽出, 排入大气。

#### (四) 汽水系统

汽水系统包括主蒸汽系统、给水系统、回热抽汽系统、主凝结水系统等, 其主要设备包括锅炉、汽轮机、凝汽器、给水泵、除氧器、加热器、凝结水泵等。

锅炉的给水先进入省煤器，利用烟气的余热加热后进入汽包，再从下降管经炉墙外侧流入下联箱，而后进入由许多水管组成的水冷壁。水在水冷壁内吸收炉膛内热量，被加热直到汽化，汽水混合物沿水冷壁再次进入汽包，经汽水分离器使汽和水分离。分离后的水又进入下降管，再进入水冷壁继续吸热；而分离出的饱和蒸汽再经过热器继续吸热成为过热蒸汽，然后送入汽轮机做功。

锅炉产生的新蒸汽进入汽轮机后逐级进行膨胀，蒸汽的热能就转换成汽流的动能；高速汽流作用于汽轮机的动叶片上，推动了叶轮连同整个转子旋转，汽流的动能于是被转换成汽轮机轴上的机械能。汽轮机带动发电机，利用切割磁力线感应原理，将机械能转换为电能。

在汽轮机中做完功的蒸汽（常称为乏汽）排入凝汽器，在凝汽器中放热而凝结成水，再经凝结水泵打入低压加热器、除氧器，经给水泵压入高压加热器，经省煤器送入锅炉汽包，使水重新在锅炉受热面吸收热量变成高温高压的蒸汽。

#### （五）电气系统

火电厂的电气系统包括发电机、主变压器、高压配电装置等。电气系统中，一路是把发电机产生的电能经主变压器使电压升高，再经高压配电装置和升压站将电能输出；另一路是经厂用变压器通过厂用配电装置送给电厂的各用电设备。

从火电厂的生产过程可见，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和从机械能转变为电能的部分。前者称为发电厂的热力部分，后者称为发电厂的电气部分。

### 三、本教材的主要内容

本教材共分四篇：第一篇为热工理论及应用；第二篇为流体力学泵与风机；第三篇为锅炉设备及系统；第四篇为汽轮机设备及系统。

“热工理论及应用”部分主要介绍热力学基本概念与基本定律，水蒸气及其动力循环和热传递的基本原理。重点掌握热力学中的基本概念、热力学第一定律、热力学第二定律、水蒸气动力循环以及导热、对流换热和辐射换热的基本概念与基本规律。

“流体力学泵与风机”部分主要介绍流体的基本物理性质，流体静力学，流体动力学，泵与风机基础。重点掌握流体的概念和性质、流体静压力及其特性、流体静力学基本方程式、流体连续性方程式和能量方程式以及离心式泵与风机的工作原理、结构和性能。

“锅炉设备及系统”部分主要介绍锅炉的主要设备和系统。重点掌握锅炉的生产过程、锅炉主要设备的工作原理与结构特点，以及锅炉制粉系统、燃烧系统和汽水系统的工作过程。

“汽轮机设备及系统”部分主要介绍汽轮机的主要设备和系统。重点掌握汽轮机工作原理、汽轮机本体结构、汽轮机主要辅助设备的结构以及主蒸汽和再热蒸汽系统、回热加热系统、给水除氧系统、凝结水系统和汽轮机调节保护及油系统的工作过程。

本教材包括的内容较多，涉及的知识范围较广，理论和实际联系紧密。学习中应以基本概念、基本理论和基本结构为重点，努力培养分析问题和解决问题的能力，只有这样才能在将来电厂实际工作中，取得较快的进步，真正成为电力生产技术应用型人才。

# 第一篇 热工理论及应用

## 第一章 热力学基本概念与基本定律

### 内容提要

本章将首先介绍热力学中的一些基本概念,如工质、状态参数、平衡状态、可逆过程等。然后介绍热力学中的两个基本定律,即热力学第一定律和热力学第二定律,重点分析两个基本定律的具体内容、实质以及在实际中的应用。最后分析理想气体的性质及状态方程式。

### 第一节 热力学基本概念

热力学中的一些基本概念,如工质、状态参数、平衡状态、可逆过程等,在热力学中非常重要,几乎随时都会遇到,因此,必须准确理解和掌握这些概念。

#### 一、工质

热力学中,将热能转变为机械能的设备称为热机,汽轮机、蒸汽机、内燃机等都是热机。将在热机中完成能量转换的媒介物质称为工质。

为了将热能最大限度地转变为机械能,在热机中工作的工质应具有良好的流动性和膨胀性。因此常选用气态物质作为工质,如:空气、水蒸气、燃气等。

在火力发电厂中工作的热机为汽轮机,汽轮机中的工质是水蒸气。

#### 二、工质的热力状态及其状态参数

工质的热力状态,是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理特性。用来描述和说明工质热力状态的一些宏观物理量则称为工质的状态参数。热力学中常用的状态参数有:压力、温度、比体积、热力学能、焓和熵。其中压力、温度和比体积可以直接测量或经简单计算求得,称为基本状态参数。其他三个参数可根据基本状态参数间接求得,称为导出状态参数。

工质的状态参数只取决于工质的状态,所以当工质的状态发生变化时,状态参数的变化量只与初、终状态有关,与状态变化过程无关。

#### 三、基本状态参数

##### (一) 压力

物体单位面积上所承受的垂直作用力称为压力。气体压力是指容器中的气体作用在容器内壁单位面积上垂直方向的平均作用力。

工质的压力常用压力表或真空表测量。工程上常用的压力表有:弹簧管式压力计(如图1-1所示)和用来测量较小压力的U形管式压力计(如图1-2所示)。

弹簧管式压力计管内承受被测工质的压力,管外承受外界大气压力。在内外压差作用下弹簧管变形,带动指针转动,显示被测工质与外界大气间的压差值。U形管式压力计的一端与被测工质相连,另一端敞开在大气中,U形管式压力计两侧测压液体的高度差就是被测工质与外界大气间的压差值。

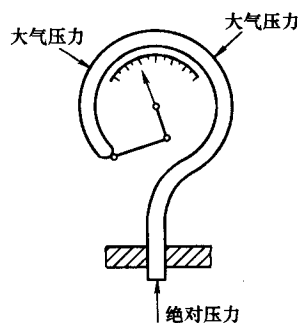


图 1-1 弹簧管式压力计

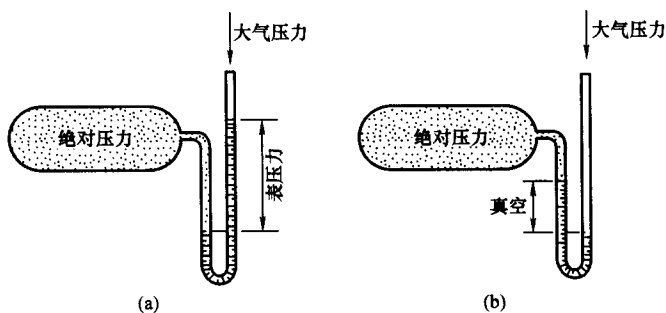


图 1-2 U形管式压力计

工质的真实压力称为绝对压力，用符号  $p$  表示。显然，用压力计测得的是绝对压力与大气压力的差值。

当绝对压力大于大气压力时，压力计的指示值为“正”值，我们将该压力计称为压力表，该表指示的压差值称为表压力，用符号  $p_g$  表示。若大气压力用符号  $p_a$  表示，则绝对压力与表压力之间的关系式为

$$p = p_g + p_a \quad (1-1)$$

当绝对压力小于大气压力时，压力计的指示值为“负”值，我们将该压力计称为真空表，该表指示压差的绝对值称为真空，用符号  $p_v$  表示。真空与绝对压力之间的关系式为

$$p = p_a - p_v \quad (1-2)$$

在此需要强调的是，只能用绝对压力作为工质的状态参数。

在国际单位制中，力的单位是牛顿 (N)，面积的单位是平方米 ( $m^2$ )，则压力的单位是牛顿每平方米 ( $N/m^2$ )，又称为帕斯卡，简称帕，用符号“Pa”表示，显然  $1Pa = 1N/m^2$ 。由于帕的单位太小，工程上常用兆帕 (MPa) 或千帕 (kPa) 作为压力单位，其换算关系为

$$1MPa = 10^3 kPa = 10^6 Pa$$

在工程单位制中，力的单位是千克力 (kgf)，面积单位是平方厘米 ( $cm^2$ )，则压力的单位是千克力每平方厘米 ( $kgf/cm^2$ )，又称为工程大气压，用符号“at”表示，显然  $1at = 1kgf/cm^2$ 。它与 Pa 之间的换算关系为

$$1at = 9.81 \times 10^4 Pa$$

此外压力还可以用液柱高度作单位，常见的有 mmHg (毫米汞柱) 和 mmH<sub>2</sub>O (毫米水柱)，它们与 Pa 之间的换算关系分别为

$$1mmHg = 133.3Pa \quad 1mmH_2O = 9.81Pa$$

物理学中，把纬度 45° 海平面上的常年平均气压定为标准大气压或称物理大气压，用符号“atm”表示，其值为 760mmHg，显然

$$1atm = 760mmHg = 1.01325 \times 10^5 Pa$$

## (二) 温度

温度是用来表示物体冷热程度的物理量。

工质的温度可以用温度计测量。工程上常用的温度计有：热电偶温度计和热电阻温度计。各种温度计测出的温度数值应该用统一的方法来表示，我们将表示温度数值的方法称为温标。常用的有摄氏温标和热力学温标。

用摄氏温标表示的温度称为摄氏温度，符号为  $t$ ，单位为摄氏度 ( $^{\circ}C$ )。用热力学温标表

示的温度称为热力学温度，符号为  $T$ ，单位为开尔文 (K)。它们之间的换算关系为

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

### (三) 比体积

单位质量的工质所占有的体积，称为工质的比体积，符号为  $v$ ，单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。工质的比体积可以用式 (1-4) 进行计算

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

式中  $V$ ——工质的体积， $\text{m}^3$ ；

$m$ ——工质的质量， $\text{kg}$ 。

密度是比体积的倒数，定义为单位体积工质具有的质量，符号为  $\rho$ ，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。它们之间的关系式为

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

## 四、平衡状态、状态方程和参数坐标图

平衡状态，是指在没有外界影响的情况下，工质可以长期保持的状态。平衡状态下工质各部分的同一状态参数相同，即各点的压力、温度、比体积等参数都相同，此时的各参数值就可用来描述整个工质的状态。热力学中只对处于平衡状态的工质进行分析研究。

虽然描述工质热力状态的基本状态参数有三个，表面上看必须给出所有的基本状态参数，才能确定工质的状态。实际上三个基本状态参数之间是存在内在联系的，具体可用状态方程表达如下：

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

显然，用热力学基本方程，在已知任意两个基本状态参数的情况下，可求得另一个基本状态参数，即两个基本状态参数就可确定工质的状态。

状态方程的具体形式取决于工质的性质。一般理想气体的状态方程可由理论分析求得，实际气体的状态方程则由实验测出。

实际上只要已知工质的任意两个状态参数，其他的四个状态参数就都可求出了，因此描述工质的热力状态只需用两个独立的状态参数即可。

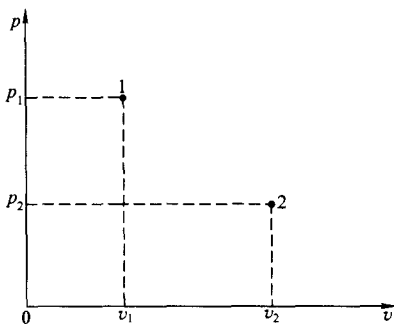


图 1-3 参数坐标图示例

为了方便、直观地分析问题，热力学中引入了参数坐标图，它是用任意两个独立的状态参数组成的平面直角坐标图。热力学中，分析问题的角度不同，选用的参数坐标图也有所不同。如分析工质对外界做功时，一般选用  $p-v$  图（称为压容图，该图以压力为纵坐标，比体积为横坐标），而分析工质与外界的热量交换时，一般选用  $T-s$  图（称为温熵图，该图以温度为纵坐标，熵为横坐标）等。

在参数坐标图中，既可根据图中的已知点确定该状态下的状态参数，也可根据已知的状态参数确定该状态在图中所处的位置。如图 1-3 中，点 1 状态下，工质的压力为  $p_1$ ，比体积为  $v_1$ ；若工质的压力为  $p_2$ ，比体积为  $v_2$ ，在图中对应的点为 2 点。

## 五、工质的热力过程

工质在受到外界作用时,原有的平衡状态会被破坏,状态会发生变化。我们将工质从一个状态过渡到另一个状态所经历全部状态的总和称为热力过程。

若某一热力过程所经历的每一个热力状态均为平衡状态,则该热力过程就称为准平衡过程。

严格地说,实际的热力过程都不是准平衡过程。但如果工质受到外界作用,平衡状态被破坏后,能迅速建立新的平衡状态,我们就可以将热力过程看作是外界对工质产生作用时,平衡状态不断被破坏,同时又不断迅速建立平衡状态的过程,就可以看作是准平衡过程。热机中工作的气体工质运动速度极大,几乎可达  $400 \sim 500 \text{m/s}$ ,恢复平衡所需要的时间极短,所以热机中工质的热力过程可以看作为准平衡过程。

只有准平衡过程才可以在参数坐标图中用连续的实线表示。

工质完成某一热力过程后,如果仍能沿原来的路径逆行恢复至原状态,且使与之相关的外界也恢复至原状态而没有留下任何痕迹,那么该过程就称为可逆过程。

如图 1-4 所示的装置中,气缸中的工质在从热源吸热的同时,对外膨胀做功。工质从状态 A 经一准平衡过程到达状态 B,假如活塞与气缸壁之间不存在摩擦的话,工质在这一过程中对外所做的功就全部用来推动飞轮,将能量以动能的形式储存在飞轮中。此时如果利用飞轮的动能推动活塞逆行,在气缸中的工质从状态 B 沿原路径逆向回到状态 A 的同时,活塞恢复到了原位置,工质也向热源放出了与工质膨胀时吸收的等量的热量,即使与之相关的气缸、活塞和飞轮均恢复到了原来的状态,这一过程就可以理解为可逆过程。

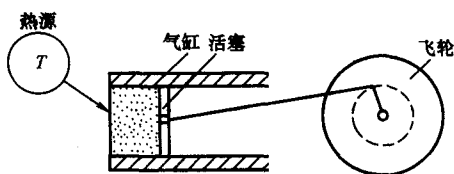


图 1-4 可逆过程示例图

可逆过程必须具备以下条件:

- (1) 工质受到外界作用后进行的热力过程为准平衡过程;
- (2) 在过程进行期间,工质没有与外界产生摩擦,也没有与外界产生温差传热。

显然,可逆过程也是实际过程的理想化模型。在热力学中先将实际过程看作可逆过程进行分析计算,这样既可使计算得到简化,又可突出主要矛盾,由此产生的误差再引用经验系数进行修正。因此本篇提到的热力过程均看作为可逆过程。

**【例 1-1】** 某锅炉出口蒸汽管道上安装的压力表读数为  $18.2 \text{MPa}$ ,当地大气压力为  $1 \text{atm}$ ,试求该处蒸汽的绝对压力。

解:由绝对压力与表压力的关系式 (1-1),可直接求得绝对压力为

$$p = p_a + p_g = 1 \times 1.01325 \times 10^5 + 18.2 \times 10^6 = 18.3 \times 10^6 \text{Pa} = 18.3 \text{MPa}$$

答:该处蒸汽的绝对压力为  $18.3 \text{MPa}$ 。

## 六、热力学能

热力学能指的是工质内部微观粒子本身所具有的各种微观能量的总和,符号为  $U$ ,单位为  $\text{kJ}$  或  $\text{J}$ 。在热力学中也常用到比热力学能的概念,所谓比热力学能就是  $1 \text{kg}$  工质的热力学能,用符号  $u$  表示,显然  $u = U/m$ ,单位为  $\text{kJ/kg}$  或  $\text{J/kg}$ 。

热力学中的热力过程不涉及化学反应和原子核变化,所以不需要考虑化学内能和原子能。因此认为热力学能只包括内动能和内位能。内动能指的是工质内部粒子热运动的能量,

能量的大小取决于工质的温度，温度越高，内动能越大。内位能指的是工质内部粒子由于相互作用而产生的能量，能量的大小取决于工质内部粒子间的距离，而粒子间的距离又与工质的比体积有关，也就是说内位能是比体积的函数，具体关系是比体积越大，内位能越小。

由前面的分析可知，工质热力学能的大小取决于它的温度和比体积，当工质处于某一状态时，有确定的温度和比体积，也就有确定的热力学能，因此热力学能也是工质的状态参数，具有状态参数的一切特性。

到目前为止，我们还不能直接测定工质的热力学能。而且计算某一状态下工质的热力学能值也没有太大的实用价值，所以通常只计算热力过程中热力学能的变化量  $\Delta U$  或  $\Delta u$ 。

## 七、功

在物理学中，如果某物体在其受力方向上产生了位移，我们就说该力对某物体做了功。在物理学中物体的受力和位移，我们能很直观地看出，所以功的概念比较容易理解。但热力学中工质与外界作用时未必有可见的力和位移，它们是通过工质体积的变化（膨胀或压缩）来实现能量转换的。

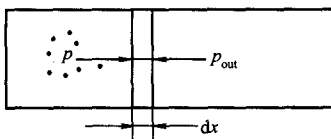


图 1-5 气体做功图

热力学中，将通过工质体积变化而实现的能量转换的数量称为体积变化功，简称为体积功，符号为  $W$ ，单位为 J（焦耳）或 kJ（千焦）。1kg 工质的体积功用符号  $w$  表示，单位为 kJ/kg。

如图 1-5 所示，设气缸中盛有 1kg 的气体，缸内装有一个截面积为  $A$  的可移动但不产生摩擦的活塞。若气缸内气体的压力为  $p$ ，则工质作用在活塞上的力为  $F = pA$ ，当气体在压力不变的情况下膨胀推动活塞向右移动  $\Delta x$ （工质进行等压过程）时，工质的比体积由  $v_1$  增加到  $v_2$ ，此时 1kg 工质对外界所做的体积功可用式（1-6）计算：

$$w = F \times \Delta x = pA \Delta x = p \Delta v = p(v_2 - v_1) \quad (1-6)$$

将该热力过程表示在  $p-v$  图上可得图 1-6。由图可见，体积功  $w$  就是等压过程线 1-2 下面图形 12341 的面积，即  $w = \text{面积 } 12341$ ，因此， $p-v$  图又称为示功图。

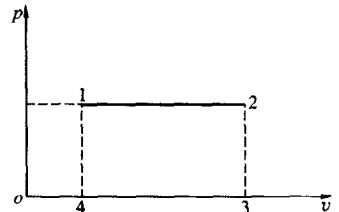


图 1-6 等压过程的  $p-v$  图

对其他任何一个热力过程，可以将该热力过程看成是由无数个微小的过程组成，每个微小过程又都可看成是等压过程，如图 1-7 所示，每个微元过程的体积功都可用式（1-7）进行计算：

$$\delta w = p dv \quad (1-7)$$

从状态 1 到状态 2 整个过程的体积功可对式（1-7）积分求得：

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1-8)$$

从上式可以看出：当工质膨胀比体积增大（ $dv > 0$ ）时，工质对外界所做的体积功为“正”值；当工质被压缩比体积减小（ $dv < 0$ ）时，工质对外界所做的体积功为“负”值。

利用  $p-v$  图，可清楚地看出功的大小不仅与工质的

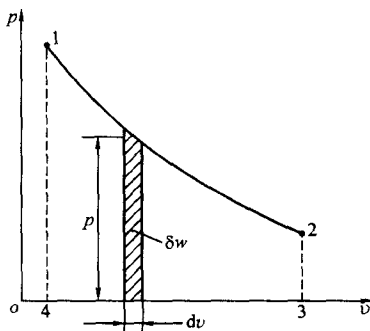


图 1-7 任意热力过程的  $p-v$  图

初、终状态 1、2 有关，而且与热力过程（过程线的形状）有关，因此功不是状态参数，而是与过程有关的过程量。

### 八、热量和熵

工质不仅可以通过体积变化，而且可以通过传热来实现与外界的能量转换。热量指的就是工质与外界之间仅仅由于温差而传递的能量，符号为  $Q$ ，单位为 J（焦耳）或 kJ（千焦），1kg 工质与外界交换的热量，用符号  $q$  表示，显然  $q=Q/m$ ，单位为 kJ/kg 或 J/kg。

热量和功都是工质与外界传递能量的量度，只是传递能量的方式不同而已，所以热量的计算公式可以用功的计算公式进行类比得到。

我们先来分析功的计算公式  $\delta w = p dv$ 。从图 1-5 所示的装置图中很容易看出，只要气缸内工质的压力与外界大气压不同，活塞就有可能移动，因此压力是工质对外做功的推动力。而工质是否对外界做功，还要看活塞是否发生了移动即工质的比体积是否发生了变化，因此比体积变化是工质对外做功的标志。显然，工质对外界的做功量等于“推动力  $p$ ”与“标志量  $dv$ ”的乘积。

众所周知，工质与外界存在温差就会传递热量，温差就是工质与外界交换热量的推动力。而工质与外界交换热量的标志量又是什么呢？通过长期的分析研究，发现是状态参数“熵（用符号  $S$  表示，单位质量工质的熵称为比熵，用符号  $s$  表示，很明显  $s=S/m$ ）”的变化量。因此 1kg 工质与外界交换的热量的计算式就可写为

$$\delta q = T ds \quad (1-9)$$

或

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

将式 (1-9) 变形，可得比熵的定义式为

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

显然，比熵的单位是 kJ/(kg·K) 或 J/(kg·K)，不难导出熵的单位是 kJ/K 或 J/K。

和热力学能一样，熵也是不能用仪表直接测量的状态参数，一般也不计算某一状态下熵或比熵的值，只计算热力过程中熵或比熵的变化量  $\Delta S$  或  $\Delta s$ 。

和工质对外界做功过程可以在  $p-v$  图上表示一样，工质与外界交换热量的过程也可以表示在  $T-s$  图上，见图 1-8。图中过程线 1-2 下面的面积 12341 也是工质与外界交换的热量值，所以  $T-s$  图也称为示热图。

由式 (1-9) 或式 (1-10) 也可看出，当工质的熵值增大 ( $ds>0$ ) 时，工质与外界交换的热量为“正”值，此时工质从外界吸热；当工质的熵值减小 ( $ds<0$ ) 时，工质与外界交换的热量为“负”值，此时工质向外界放热。

热量和功一样，不是状态参数，其大小也不仅取决于初、终状态，而且与所经历的过程有关，是一过程量。

### 九、焓

在热力设备中，工质的吸热和做功过程往往伴随着工质的流动而进行，如火力发电厂

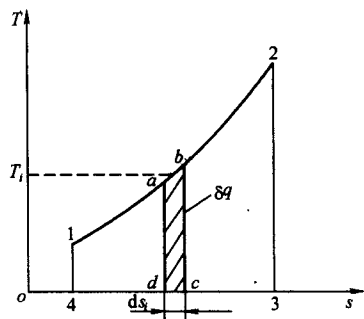


图 1-8 任意热力过程的  $T-s$  图



中, 给水在锅炉中的吸热过程, 蒸汽在汽轮机中的做功过程等。

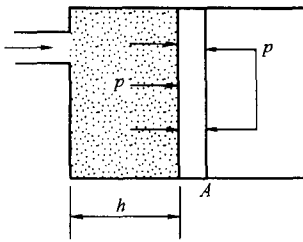


图 1-9 推动功示意图

我们先来分析图 1-9 所示的系统中的工质, 假设气缸内活塞的面积为  $A$ , 外界在活塞单位面积上作用一水平向左的压力  $p$ 。外界要将工质送入该气缸就必须克服活塞的阻力而做功, 此功称为推动功。如果将  $m\text{kg}$  工质送入气缸, 且使活塞向右移动了  $hm$ , 则推动功为

$$pAh = pV = mpv$$

所以, 推动功的表达式为  $pV$ , 单位为 J 或 kJ。1kg 工质的推动功称为比推动功, 表达式为  $pv$ , 单位为 J/kg 或 kJ/kg。推动功可看作是伴随工质的流动而带入 (或带出) 系统的能量, 它使系统能量增加 (或减少)。

再来分析图 1-10 所示系统中的工质, 假设 1-1 为进口截面, 该处工质的压力为  $p_1$ ; 2-2 为出口截面, 该处工质的压力为  $p_2$ 。外界将  $m\text{kg}$  工质通过 1-1 截面送入系统中需做推动功  $p_1V_1$ ;  $m\text{kg}$  工质通过 2-2 截面从系统中流出则需克服阻力对外界做推动功  $p_2V_2$ 。我们将工质流过该系统时与外界交换的推动功的差值, 称为流动净功。显然其值为

$$\Delta(pV) = p_2V_2 - p_1V_1 = m(p_2v_2 - p_1v_1)$$

如果流过图 1-10 所示系统的工质为 1kg, 则其对应的流动净功称为比流动净功, 其值为

$$\Delta(pv) = (p_2v_2 - p_1v_1)$$

流动净功可认为是流动过程中系统与外界由于工质的进出而交换的能量。

从以上分析可以看出, 工质流过系统时, 不仅将热力学能带入 (或带出), 也将推动功带入 (或带出) 了, 这两者通常是同时出现的。为了分析、计算方便起见, 将热力学能和推动功合在一起, 定义了一个新的物理量“焓”, 符号为  $H$ , 单位为 J 或 kJ, 定义式为

$$H = U + pV \quad (1-12)$$

单位质量工质的焓称为比焓, 用符号  $h$  表示, 单位为 J/kg 或 kJ/kg, 定义式为

$$h = u + pv \quad (1-13)$$

焓的定义式中,  $u$ 、 $p$ 、 $v$  都是状态参数, 即工质处于某一确定状态时, 三者都有确定的值, 此时  $(u + pv)$  即焓也有确定的值, 因此焓也是状态参数, 也具有状态参数的一切特性。

同热力学能、熵一样, 焓的值也无法用仪表测定, 在实际计算时也只计算工质焓的变化量。

## 第二节 热力学基本定律

热力学基本定律包括热力学第一定律和热力学第二定律。热力学第一定律是能量转换和守恒定律在热力学中的应用, 它确定了热能与机械能之间相互转换时的数量关系。热力学第二定律则解决能量传递与转换过程中的条件、方向和限度问题。

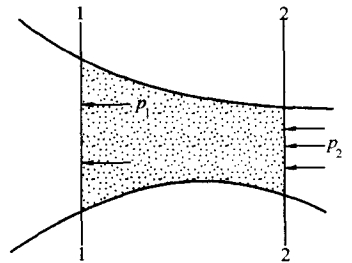


图 1-10 流动净功示意图