

高等学校教材

热工基础及热力设备

上册

华北电力学院 王加璇 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书分为上、下两册。上册为热工基础,包括工程热力学及工程传热学两个部分。工程热力学主要讲述热力学的基本概念、基本定律,水蒸汽和理想气体的热力学性质、基本热力过程、工质流动和喷管以及蒸汽动力循环。而工程传热学则主要讲述热传递的三个基本方式:导热、对流和辐射的基本概念,传热过程的分析 and 计算,传热过程的增强和减弱以及面式换热器的分析和热力计算等。下册为热力设备,主要讲述电站用锅炉设备、汽轮机设备、电厂热力系统和经济运行以及电站用水泵和风机等。

本书是为“生产过程自动控制”、“电厂化学”以及其它热能动力专业以外的热动类专业编写的教材。亦可供在此领域中工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

热工基础及热力设备

上 册

华北电力学院 王加康 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河第5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印张 358千字

1987年10月第一版 1987年10月北京第一次印刷

印数0001—9720册

ISBN 7-120-00010-1/TK·5

15143·6477 定价 2.70元

前 言

《热工基础及热力设备》是按照水利电力部热能动力类教材编审委员会于1982年确定的任务,为“生产过程自动控制”、“电厂化学”等专业编写的四年制本科高校通用教材,分上、下两册编写。上册为热工基础,包括工程热力学及工程传热学两个部分,应满足教学大纲90学时的授课内容。下册为热力设备,包括电厂用动力锅炉、汽轮机及其热力系统和泵与风机等,应满足教学大纲80学时的授课内容。

本书工程热力学部分由王加璇编写;工程传热学部分由张鸿坚编写;锅炉设备部分由姚文达编写;汽轮机设备和电厂热力系统和运行部分由陈汝庆编写;泵与风机由郭秉昌编写,姚文达进行了修改补充。全书由王加璇主编。在编写本书过程中注意了满足教学大纲要求的同时,力求文字简练、难点分散、便于自学。在体系上与传统讲法略有不同,比如在工程热力学中,先讲水蒸汽等实际气体,然后再以理想气体引出理论分析和结论,以求符合从特殊到一般的认识规律,并增强系统性。国外教材已有这种编排,但在我国可能还是一种尝试。在传热学方面,考虑专业需要,以讲稳态定常状态下的传热过程为主,也适当地介绍了非稳态导热的内容。在精选内容的基础上,本书重视了理论深度,并强调精讲多练。除每章每节后附有例题外,每章后都附有思考题和习题。

本书的下册强调了理论结合实际的原则,讲述的各种设备都以200MW国产发电设备为典型,讲深讲透,然后再适当介绍国内外其它设备。为满足专业需要,侧重讲清工作原理和热力过程的动态特性。

1960年第十一届国际计量会议通过的SI国际单位制,已为世界绝大多数国家和一些国际性的科学技术组织所重视和接受,我国也已以它为基础构成了法定计量单位。本书上、下册一律采用法定计量单位。但考虑到此计量单位在世界范围内,仍有一个过渡的过程,即使全过渡了,也还会有参看以前文献的问题,因此在必要的地方仍辅以工程单位及其它单位制,并附有换算表,以便学生也能熟悉。

本书编写过程中,由教材编委会热力发电厂编审组几度讨论编写大纲,提出了非常宝贵的意见。在工程热力学方面由华北电力学院热工教研室许多同志协助搜集资料、精选例题和习题,特别应提及的是王清照和郭民臣两位同志作了大量工作。本书由太原工业大学谢益荣教授主审,他根据多年在热工理论和热力设备方面的教学经验,提出了许多宝贵意见。编者在此一并致谢。

由于编者的水平和经验所限,本书必然还会有不少缺点,在此诚恳希望并欢迎读者提出批评意见,以便得到改正。

编 者

1986年9月

主要符号表

A 功的热当量	q 单位体积发热量, W/m^3
a 音速, m/s ; 导热系数(热扩散率), m^2/s	R 半径, m ; 气体常数, $J/(kg \cdot K)$; 传热面积参数
B 大气压力, Pa 或 N/m^2	R_l 热阻, $^{\circ}C/W$
b 煤耗率, $kg/(kW \cdot h)$	r 汽化潜热, J/kg ; 混合气体容积份额
B₀ 热焓, J	r_l 比热阻, $m^2 \cdot ^{\circ}C/W$
C 总热容量 $J/(^{\circ}C \cdot s)$; 速度, m/s	S 总焓, $J/^{\circ}C$
c 比热, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$	s 比焓, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$
c_f 平壁阻力系数	T 热力学温度, K
D 直径, m	t 摄氏温度, $^{\circ}C$
d 直径, m ; 含湿量, g/kg ; 汽耗率, $kg/(kW \cdot h)$	U 内能, J
E 宏观能量, J ; 辐射力, W/m^2	u 比内能, J/kg
E₀ 热焓, J	V 容积, m^3
e 单位质量能量, J/kg	v 比容, m^3/kg
F 表面积, m^2	W 总功, J
f 横截面积, m^2	w 比功, J/kg
C 辐射能流密度, $J/(m^2 \cdot s)$	x 干度, 混合气体摩尔分数
g 重力加速度, m/s^2 ; 混合气体质量份额	α 抽汽份额; 换热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$; 吸收率
H 总焓, J	β 体积膨胀系数, K^{-1}
h 比焓, J/kg	γ 绝热指数; 定压、定容比热的比值
I 辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$	δ 厚度, m
J 有效辐射, W/m^2	ε 制冷系数; 湿度; 换热器有效度
K 燃料(或热量)利用系数	ε' 供热系数
k 传热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	η 效率
L 长度, m	θ 过余温度, $^{\circ}C$
M 分子量, 马赫数	λ 导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$; 波长
m 质量, kg	μ 动力粘度, $kg/(m \cdot s)$
ṁ 质量流量, kg/s	ν 运动粘度, m^2/s
N (NTU) 传热单元数	ν 能量损失系数
n 多变指数; 摩尔数	ρ 密度, kg/m^3 ; 反射率
P 总作用力, kg ; 传热温差参数; 横截面周长, m	σ 表面张力, N/m
p 压力(压强), Pa 或 N/m^2	σ₀ 黑体辐射常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
Q 热流量, J/s 或 W	τ 时间, s ; 透射率
Q₀ 总发热量, J/s 或 W	τ 透射系数; 相对湿度, 平面角; 辐射角系数
q 热流密度, W/m^2	ψ 传热温差修正系数
q 热流密度向量, W/m^2	ω 电能生产率; 角频率, rad/s ; 立体角, sr

目 录

前 言

主要符号表

第一篇 工程热力学

概 述	1
第一章 基本概念和定义	2
1.1 热力系的概念	2
1.2 工质及其状态参数	3
1.3 平衡状态	6
1.4 状态方程和状态参数坐标图	7
1.5 准平衡过程、可逆过程、不可逆过程	8
思考题	10
习题	10
第二章 能与热力学第一定律	12
2.1 能的概念	12
2.2 热力系与外界的能量交换	13
2.3 封闭系统的热力学第一定律	16
2.4 开口系统的热力学第一定律	18
思考题	21
习题	22
第三章 工质及其热力学性质	24
3.1 液体、蒸汽和气体	24
3.2 蒸汽图表的使用	26
3.3 理想气体	30
思考题	36
习题	37
第四章 工质的热力过程	39
4.1 典型的可逆过程	39
4.2 多变过程	49
4.3 不可逆过程	54
思考题	57
习题	57
第五章 熵与热力学第二定律	60
5.1 热机循环与热力学第二定律	60
5.2 卡诺循环与卡诺定理	64
5.3 熵	66

5.4 焓湿图与水蒸汽的焓湿图	70
5.5 烟	78
思考题	81
习题	82
第六章 气体和水蒸汽的流动	86
6.1 稳定流动基本方程式	86
6.2 流体流动的基本规律	88
6.3 喷管计算	90
6.4 有摩擦的流动	94
6.5 绝热节流	95
思考题	96
习题	97
第七章 蒸汽动力循环	99
7.1 朗肯循环	100
7.2 蒸汽参数对循环效率的影响	103
7.3 再热循环	104
7.4 回热循环	106
7.5 热电联产循环	108
思考题	111
习题	111
第八章 混合气体和湿空气	113
8.1 混合气体	113
8.2 湿空气	117
8.3 绝对湿度与相对湿度	118
8.4 含湿量	118
8.5 相对湿度的测定	119
8.6 湿空气的热-湿图	120
8.7 湿空气的热力过程	121
思考题	122
习题	122

第二篇 工程传热学

概 述	124
第九章 热传导	126
9.1 热流方向及导热的基本定律	126
9.2 通过大平壁的一维稳态导热	128
9.3 通过长圆筒壁的一维稳态导热	133
9.4 准一维稳态导热	135
9.5 导热微分方程式	139
9.6 非稳态导热	142

思考题	153
习题	153
第十章 对流换热	156
10.1 对流换热过程分析	156
10.2 雷诺分析法及其在对流换热研究中的应用	158
10.3 流体无相变时的对流换热	161
10.4 流体有相变时的对流换热	173
思考题	179
习题	179
第十一章 热辐射和辐射换热	181
11.1 热辐射的基本概念	181
11.2 黑体与黑体辐射的基本定律	182
11.3 实际物体的表面辐射特性	185
11.4 辐射角系数	188
11.5 漫射灰表面辐射换热的计算	194
11.6 气体辐射	203
思考题	208
习题	208
第十二章 传热过程和换热器	210
12.1 传热过程	210
12.2 传热的增强或减弱	214
12.3 换热器及其分类	219
12.4 面式换热器的热计算	220
思考题	231
习题	232
附录	233
附表1 单位换算关系	233
附表2 饱和水与饱和水蒸汽表(按压力排列)	234
附表3 饱和水与饱和水蒸汽表(按温度排列)	236
附表4 未饱和水与过热蒸汽简表	239
附表5 气体的平均定压摩尔比热[SI]	240
附表6 金属材料的密度、比热和导热系数	241
附表7 保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	242
附表8 干空气的热物性性质($p \approx 1.01325 \times 10^5 \text{Pa} = 760 \text{mmHg}$)	242
附表9 在标准大气压力下烟气的热物性性质	243
附表10 饱和水的热物性性质($p = 101325 \text{Pa}$)	243
附表11 干饱和水蒸汽的热物性性质	244
附表12 几种饱和液体的热物性性质	245
附表13 各种材料的辐射黑度 ϵ	246
附图1 湿空气的 $h-d$ 图	247

第一篇 工程热力学

概 述

热力学是研究伴有热效应的自然界中一切物理及化学过程的能量关系和能量转换的科学。它是建立在人类对能的本性、能的转换规律的系统而深入研究的基础上，经过反复实践和认识，逐步地完善和总结出来的。这种系统而深入的研究是在热机问世之后才开始的。最初只是着重研究热能与机械能之间的关系，至上世纪的中叶建立了热力学的基本定律，以这些基本定律为骨干，形成了一门基础学科，称为热力学。它和其他物理学科一样，是基于对自然现象的观察，概括了大量经验的基本定律形成的，所以它更具有朴素的直观性。它是物理学的一个分支，是物理学中热学的宏观理论，而其微观学科则为统计物理学。

工程热力学是热力学在热能工程及其它，如石油、化工、冶金等工程中的具体应用，其中心任务是研究热能和机械能的相互转换以及与此转换有关的物质的热物理特性。热能通过工质膨胀做功才能转换为机械能。能是指这种做功的能力，而功则是能的作用结果，功和热是两种能量传递和转换的基本形式。

经验证明，热能不可能百分之百地转换为机械能，这是由热力学第二定律所决定的。从理论上阐明使热能以更高的百分比转换成机械能的途径是工程热力学的主要任务。这种转换的最高极限为卡诺循环的效率。也可以说整个工程热力学是在人类对于热能向机械能转换的极限的追求中发展和完善起来的。

第一章 基本概念和定义

学习和掌握一门基本科学,必先掌握其基本概念和定义,这就象要入门必先掌握钥匙一样。何况热力学是从实践经验中总结概括起来的学科,它所使用的一些名词术语,如能量、平衡、参数、系统、过程、功和热等等,既是热力学中使用的术语,也是日常生活用语。但是在日常生活用语中,这些词的涵义广泛,界限不清,它们与科学用语自然有别。因此确切地掌握这些概念和术语,以防与日常用语混淆是非常必要的。当然我们不可能把一切概念都在这里一次掌握,只能就几个主要的概念和定义作些说明,以利入门。其余的,只能在本课的学习过程中慢慢地体会,逐步掌握,以求能更准确地掌握这门课程的基本理论和方法。

1.1 热力系的概念

一切研究的首要任务是明确研究的对象和其范围,这是研究一切物理学科的共同方法。我们研究热力学也不例外,首先把研究的对象与环绕着它的周围物体划分开来,把研究的对象叫做“热力系”或“系统”,而把环绕着它的周围物体叫做“外界”或“环境”。系统和环境的分界叫做“界面”。热力系如何划分,划分范围的大小完全取决于研究的任务。热力系可以是很大的,也可以是很小的。但是,热力学是宏观理论,如果所划的热力系小到只包括几个分子,就会违背宏观理论的基础——热力学统计的平均规律。区分系统和外界的界面可以是真实的,也可以是假想的,可以是固定的,也可以是变化的。这一切都取决于研究的目的和任务。热力系的划分体现着热力学研究方法的灵活性。

经过系统和外界的划分,我们就可以集中精力研究系统内部发生的变化以及研究系统如何穿过界面与外界发生作用,即研究系统与外界之间发生的物质和能量的交换。这是热力学的基本研究方法。

根据热力系和外界的作用不同,又可以把热力系区分成若干类型,比如:当热力系与外界只有能量交换,而无物质交换时,就构成了“封闭系”;相反,热力系与外界既有能量交换又有物质交换,就叫做“开口系”;与外界不发生热交换的热力系,叫做“绝热系”;当热力系与外界之间既无能量交换又无物质交换时,则为“孤立系”。不言而喻,绝热系和孤立系都是一种科学的抽象。因为世界上的一切事物都是互相联系和互相制约的,绝对绝热和绝对孤立的系统是不存在的。但是绝热系与孤立系做为一种科学抽象,在热力学研究中是很重要的概念。另外根据系统内部的组成成分的不同,又可分成“单元系”和“多元系”、“单相系”和“复相系”以及“均匀系”和“非均匀系”。这些在研究化学热力学时是很有用的。在本书里只做简单的介绍。今后遇到热力学问题涉及系统的组成成分时,可以在此基础上自行研究和增补这方面的知识。

1.2 工质及其状态参数

热学的微观理论告诉我们，热是物质运动的表现，是能的一种形式。因此它不能脱离物质而独立存在。承载热能的物质叫做载热质或工作介质，简称为“工质”。在热力学研究中，我们常常要分析工质所处的状态。所谓热力系或工质的状态系指在某一瞬间里热力系或工质所呈现的宏观物理状况。热力系的状态可以用状态参数来描述。凡是能从任何一个方面来说明物体或系统所处的状态的物理量都是状态参数。对应于物体的每一状态的各項状态参数都具有确定的数值。我们根据任何一个状态参数的变化，都可以断定物体的状态发生了变化。研究热力系的状态，就是为了分析系统的内部以及它与外界发生作用而进行的变化过程。在工程热力学中常见的状态参数有：

(1) 压力，常以符号 P 来表示总压力，而以 p 表示压力；

(2) 比容，常以符号 v 来表示比容，而 V 表示总容积；

(3) 温度，常以符号 t 来表示摄氏温度，在热力学中常用热力学温度（或叫“开氏温度”），以符号 T 来表示；

(4) 内能，常以符号 u 表示比内能， U 表示总内能；

(5) 焓，常以符号 h 表示比焓， H 表示总焓；

(6) 熵，常以符号 s 表示比熵， S 表示总熵。

除这六个常用参数外，还有其它参数，将在后面的章节中引用时再加以讨论。压力、比容和温度是可以直接测量出来的状态参数，叫做基本状态参数。内能不能直接测量出来，但可以计算出来，而且我们不可能求得内能的绝对值，只能求得其相对的差值。焓是包括内能、压力和比容的状态参数，故叫“复合状态参数”，而熵是通过分析和推导得出的参数，叫做导出状态参数。

一、压力

压力的微观解释是大量的流体的分子在紊乱的分子运动中对容器的器壁频繁撞击的总效应。在宏观分析中，我们把单位面积上所承受的垂直作用力叫做压力。在物理学中，我们把这种单位面积上所承受的垂直作用力叫“压强”，而把容器器壁上承受的总力叫做压力。而在工程上，习惯地把物理学上的压强叫压力，而把它的压力叫做总压，这点必须提出注意，不应造成混淆。我们在工程热力学及传热学中，顺从工程上的习惯叫法。

1. 压力的表达式

压力的表达式为

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

式中 P —— 垂直作用于器壁上的总力；

F —— 容器壁的总面积。

2. 绝对压力与表计压力

式 (1-1) 所表示的压力为绝对压力，这是我们用逻辑推导出来的压力。但是当我们

利用表计直接测量压力时,因为压力计是处在大气环境中,故不可能直接测出绝对压力的数值,而只能测出欲测的绝对压力与当地大气压力的差值。当所测对象的压力高于大气压力时,表计指示的是超出大气压力的部分,叫做表压力。当所测对象的压力低于大气压力时,表计的指示走向反向,在工程单位制中,我们称低于大气压力的指示值为“真空度”,以 p_v 表示之。但在法定单位中,因计量压力的起点定在绝对零度,故已不存在真空度的概念。令 B 代表大气压力,那么绝对压力 P 可以通过下式求出

$$p > B \text{ 时} \quad p = B + p_g \quad (1-2)$$

$$p < B \text{ 时} \quad p = B - p_v \quad (1-3)$$

以液柱式的压力计和真空计测量压力,可参见图 1-1 表示的绝对压力与大气压力的关系。

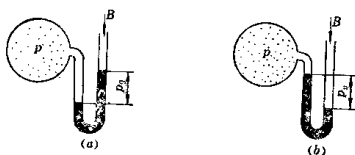


图 1-1 绝对压力与大气压力

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

3. 压力的单位

法定单位规定,压力的单位为“帕斯卡”,简称为“帕”,以Pa表示。 $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。为了使与过去采用过的单位制连贯,本书也介绍一些其它压力单位,详见附表1。常见的几种压力单位的相互换算关系如下:

$$1\text{atm}=760\text{mmHg}=1.03323\text{at}=1.01325\text{bar}=0.101325\text{MPa}$$

$$1\text{at}=735.559\text{mmHg}=0.967841\text{atm}=0.980665\text{bar}=0.0980665\text{MPa}$$

因为以Pa做压力单位,其数值很小,不便工程上使用,故西方科技著作又采用了“巴”(bar)作单位, $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$ 。而我国法定单位则采用“兆帕”(MPa), $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$ 。

二、密度和比容

单位容积的质量为物质的密度,以符号 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。

单位质量物质的容积叫做“比容”,以符号 v 表示,单位为 m^3/kg 。比容和密度互为倒数,即

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

三、温度

温度表示物体的冷热程度。因为人们初期测量温度是以某些液体在玻璃管中膨胀的程度来测定的。这种膨胀与温度的关系是线性的,所以我们可以用“物体冷热之间的一维

变化的度量”来定义温度。热力学中把测定温度起点，即零度定在绝对零度。这叫做热力学的第零定律。因此我们也有热力学温度或温标之说。温度的微观解释为分子运动的强弱程度。对于理想气体，其内能是温度的函数。温度在一定程度上可以表示热，但我们绝不能因日常用语中把冷热说成是温度，而把温度与热混为一谈。法定单位规定以摄氏温标和热力学温标为测定温度的标准。摄氏温度符号记为 t ，其单位为“摄氏度”，记为 $^{\circ}\text{C}$ ；热力学温度记为 T ，其单位为 K 。两种温标的中间刻度相同，仅是计量的起点，即零度不同。摄氏温标起点为纯水在标准大气压力（ 0.101325MPa ）下的冰点，而热力学温标则把绝对零度定做起点，两者的换算关系为

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

西方文献中，采用英制计量单位，以华氏温度为其温度单位，记做 $^{\circ}\text{F}$ 。

四、内能

内能是热力系内部自身所具有的能量。它包括分子运动的动能和由于分子之间的吸引力和排斥力所形成的位能。分子运动动能又可分成移动能、转动动能和振动动能三种。热力系本身宏观运动的能量和外场作用的能量都不能计入内能之中。

对于理想气体，由于我们假定其分子之间没有引力，因而不存在引力位能，其内能仅仅是分子运动的动能。温度反映分子运动的强弱程度，因此理想气体的内能仅仅取决于温度，即只是温度的函数

$$u = u(T) \quad (1-6)$$

我们这里说的内能是指单位质量的物质所含能量，应该叫“比内能。”如果要知道均匀系统的总内能 U ，就需乘以系统的总质量，即

$$U = mu \quad (1-7)$$

在法定单位中内能的单位为焦耳，记做 J ，比内能的单位为 J/kg 。在工程单位制中内能单位为大卡，记做 kcal ，比内能的单位为 kcal/kg 。

$$1\text{kcal} = 4186.8\text{J} = 4.1868\text{kJ}$$

详细换算关系见附表 1。

五、焓

焓是一个复合状态参数，它的基本数学表达式为

$$h = u + pv \quad (1-8)$$

式中 h —— 比焓， J/kg ；

u —— 比内能， J/kg ；

p —— 压力， Pa ；

v —— 比容， m^3/kg 。

式（1-8）中的焓是指单位质量的焓，又叫“比焓”。和内能一样，如果要计算物体或系统的总焓，需乘以总质量 m ，即

$$H = mh = m(u + pv) = U + pv \quad (1-9)$$

焓与内能一样，单位为 J ，比焓的单位为 J/kg 。在工程单位制中它们分别为 kcal 和 kcal/kg 。在以前使用工程单位制时，焓的表达式为 $h = u + ApV$ ，式中 A 是单位换算系数，

叫做功的热当量。这是因为在工程单位制中，功与热各用自己专有的单位，因此必须由此当量系数进行换算，而在法定单位中，把一切能量单位都统一起来，这种当量系数就失去其存在的意义了，但为阅读不同文献还应记住其换算关系。

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 426.936 \text{ kcal}$$

$$\text{所以} \quad A = \frac{1}{426.936} \approx \frac{1}{427} \text{ kcal}/(\text{kgf} \cdot \text{m})$$

如果功的单位为kW，则

$$A = 860 \text{ kcal}/\text{kW}$$

六、熵

熵是一个导出参数。它不能直接测量，而是由基本状态参数推导出来的，其表达式为

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1-10)$$

式中 dQ ——过程中物质的吸热量。

$$S = \int dQ/T + \text{const} \quad (1-11)$$

对于单位物质有

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-12)$$

$$s = \int dq/T + \text{const} \quad (1-13)$$

上述四式中， S 、 s 分别代表熵和比熵，相应的常量分别是 S_0 、 s_0 ，其单位分别为 J/K 和 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。以上我们初步地熟悉了工程热力学中常见的六个状态参数。其中焓与熵在热力学分析与计算中是非常有用的，我们在后面的有关章节中还将进一步讨论。特别是熵的概念，当代热力学分析中，比较重视“热力学第二定律分析”，它有别于“热力学第一定律分析”。第一定律分析法是建立在能平衡的基础上的，而第二定律分析法则是建立在熵平衡的基础上的。其实热力学第二定律分析也不是单纯用第二定律，而是联合使用第一和第二定律。

1.3 平衡状态

热力系的状态系指在某一瞬间，该热力系所呈现的宏观物理状况，此状况是可以利用状态参数做数学描述的。但是这种描述必须在热力系处在一种稳定的、各项参数在全系统中处处都均匀一致的前提下才可以进行。这种均匀一致就是我们所说的平衡状态。如果要给平衡状态下一个比较严密的定义，那么就应该说：“在系统与环境之间不发生任何物质和能量交换的前提下，热力系内的物质的各部分在长时间内不发生任何物理状况的变化，各处都具有均匀一致的温度、压力、内能等状态参数。”否则系统内部就将发生变化。比如，系统内各部分的温度不是均匀一致的，就是说有温差存在，有温差就是不平衡，就会引起热自发地由高温部位向低温部位的传递，这就会引起系统内部能量分布的变化。这种变化一直到各处温差消失，即达到新的平衡为止。又比如，系统内部各部位的压力不一致，也

会出现压差,有了压差就会引起压力由高压区向低压区的转移,一直达到新的平衡状态为止。此外密度差、化学势差等等都是引起变化的动因,而这些势差的消失又意味着变化的终止和新的平衡状态的建立。各种势差:温度差、压力差、密度差以及化学势差的存在就会引起平衡状态的破坏,相应地引起温度不平衡(或叫热不平衡)、机械不平衡、物质不平衡和化学不平衡。不平衡就将引起变化,就将驱动过程的进行,同时伴随着系统内部的能量交换和新的能量分布。我们对热力系进行分析和计算,就是要分析系统内部、系统和环境之间的这些能量交换,不仅是定性的分析,还要进行定量的计算,就要通过热力系的各种状态参数的变化进行定量分析,而这些量只有在平衡状态下才有确定的值。所以我们才强调平衡状态的重要。分析和计算一个过程所引起的能量转移和变化,就得考察热力系从一个平衡状态到另一个平衡状态的过渡,考察各项状态参数由一个平衡状态到另一个新的平衡状态之间的变化。通过这些状态参数的变化来计算能量转移、传递和转换。

在平衡状态下,描述热力系只要用两个互相独立的状态参数便可,不必要全部的状态参数。而这些参数之间都可以通过一定的函数关系式计算出来。比如,已知压力和比容两个状态参数,就可以依照一定的函数关系,计算出温度、内能、焓和熵等状态参数

$$\left. \begin{aligned} T &= T(p, v) \\ u &= u(p, v) \\ h &= h(p, v) \\ s &= s(p, v) \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

一个热力系可能呈现各种不同的状态,其中具有特别意义的是“平衡状态”。因为只有对于完全平衡态的热力系我们才可以用确定的 T 、 p 、 v 等物理量即状态参数来描述。这是在经典热力学中进行热力学分析和计算的基础,所以说平衡状态是至关重要的概念。从这一观点出发,人们常常把经典热力学叫做“平衡热力学”,以区别于近代刚刚发展起来的“非平衡热力学”。后者也常被叫做“现代热力学”,它已超出本书要讨论的范围内。

1.4 状态方程和状态参数坐标图

一、纯物质

凡是组成同一的、化学结构处处都一致的物质叫做“纯物质”。在发电厂的蒸汽动力装置中主要以水做工质,纯水和纯水蒸气都可被看做纯物质。空气虽然是各种气体的混合物,但它混合得均匀,化学结构处处一致,当然也应视为纯物质,但是如一部分为气态而另一部分为液态的空气,因在液体中氮的含量较在蒸汽中少,使其化学结构不能维持一致,因此不能视为纯物质。1摩尔氢和半摩尔氧的混合物,当没有液态或固态出现时,可当做纯物质;一旦出现了液态(或固态),则不能当成纯物质了,此时虽然其组成成分相同,但化学结构不一致。

二、纯物质的状态方程式

由纯物质所构成的热力系叫做简单热力系。简单热力系的热力学状态只要用两个独立的(即其中的一个不能是另一个的函数)状态参数便可确定。原则上说,可以选取任意一

对独立的状态参数当做自变量，其它状态参数则为因变量，即

$$x = f(x_1, x_2)$$

常用的基本状态参数为 P 、 v 、 T ，从其中选择任何一对自变量，便可写成

$$P = P(v, T)$$

$$v = v(P, T)$$

$$T = T(P, v)$$

或综合写成

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

理想气体的状态方程式为 $Pv = RT$ ，就是物质的状态方程式的一个例子。各种不同的物质都有自己的状态方程式。热力学理论只能告诉我们，对于一般物质存在着 $f(P, v, T) = 0$ 的关系式，但却不能给出任意物质的具体形式。各种物质的具体关系式只能由实验和对物质结构的具体分析给出。

三、状态参数坐标图

平衡状态反映着三个基本状态参数 P 、 v 、 T 之间的关系，而在状态变化的过程中仍然体现着三个状态参数的相互制约的关系。在三个状态参数中，只有两个是彼此独立的。因此可以用三个状态参数中的任意两个来组成一个平面的坐标图。由坐标图上的两个状态参数绘出一个确定的平衡状态点。

这种由热力状态参数所组成的坐标图叫做“热力状态坐标图”。可以用任意两个独立的状态参数构成，如 $p-v$ 坐标图、 $p-T$ 坐标图……，图1-2所示的 $p-v$ 坐标图是热力学研究中常用的热力状态坐标图之一。

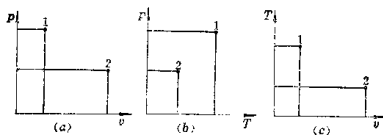


图 1-2 热力状态坐标图
(a) $p-v$ 图; (b) $p-T$ 图; (c) $T-v$ 图

1.5 准平衡过程、可逆过程、不可逆过程

工质是能量转换所必须的中间媒介物质，并且具有一定的状态。虽然分子是运动的，但是工质处于一个状态是不会对外作功的，必须进行状态的变化才能对外界输出能量。工质从一初始状态，经历一系列中间状态，达到某一最终状态，我们就说工质经历了一个热力过程。

一、准平衡过程

图1-3中，气缸内的工质完成一个热力过程。将重物分割成许多块。初始时，全部重

物 P 的作用,使工质处于平衡状态“1”;取下一小块重物,则由于 P 减小,力的平衡遭到破坏,在这个不平衡势差的作用下,经过足够的时间后又重新达到平衡状态“ A ”;当一块块地拿下重物,可以得到 B 、 C 、 D ……等许多的平衡状态点。

如果我们把重物分割成无限多块,一次拿下一块,那么每次所形成的不平衡势差就会成为无限小,这样在1-2状态之间可以描述出无限多的平衡状态点,每两点之间都是不平衡的状态,但是都以无限小的数值偏离平衡状态,所以从“1”到“2”所经历的一系列状态都不平衡,但都无限接近于平衡状态。热力系所经历的变化过程都无限接近平衡状态的过程,而且从一个平衡状态到下一个平衡状态经历的时间又足够长,这个过程就叫准平衡过程。

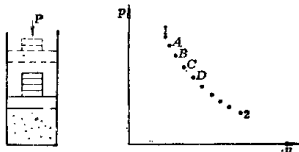


图 1-3 准平衡过程

实际中的过程虽然不是完全符合准平衡过程条件的,但有很多过程经过简化后都可以认为是准平衡的过程。例如汽油发动机活塞内部的工质,其分子的运动速度是相当高的,虽然活塞的运动速度也可达到 10m/s 左右,但比分子运动的速度还是低得多的,活塞所产生的不平衡势,每时每刻都由于工质分子的高速混合而趋于零,不平衡状态便无限接近于平衡状态,这时工质内部的参数每时每刻都具有可以确定的数值,所以这种过程可以看成是一个准平衡的过程。准平衡过程只着眼于工质内部的平衡,只要由分子运动使工质各点参数趋于一致,就可以认为是准平衡过程。由于准平衡过程工质内部参数一致,所以准平衡过程可以在状态参数图中描述。

二、可逆过程与不可逆过程

当工质发生热力过程时,如果工质在该过程结束时,仍按照原来所经历的状态变化的“路径”反方向地回复到初始状态,并且对外界不留任何影响,则这一过程叫可逆过程,否则,就是不可逆过程。

为了满足可逆过程的条件,首先要求过程是平衡过程,因为只有平衡过程才可能对其经历的状态变化加以描述。其次,要求过程进行时,不存在摩擦,因为摩擦将消耗功并转化为热,这一现象在过程进行时以及过程反方向进行时都存在。不能指望,在过程沿原来途径返回时,所产生的热会自动地、完全地转化成功。因此,有摩擦存在的过程是不可逆的过程。再其次,过程中工质与外界存在热交换时,不允许存在传热温差,因为当存在传热温差时,热只能从高温物质传到低温物质,当过程进行时,若是工质吸热,“外界”温度必然高于工质温度,这样,当工质状态按逆向的过程返回时,所放出的热量便不可能放给温度比它高的外界了。因此,有热交换存在的过程,不允许存在有限温差的传热是可逆过程的第三个要求。

可逆过程在实际中是不存在的,是一个理想化的过程,是根据热力学分析的需要而进行的科学抽象。实际上,通过前面的分析,我们知道,某些实际过程作为准平衡过程分析是可能的,这样,当我们分析过程时,如果摩擦的作用可以忽略,而在有有限温差的传热

时，我们想像有一中间的介质，“外界”首先把热传给中间介质，而中间介质的温度是随时与工质温度相等的，如果我们不去管“外界”，只看中间介质与工质间的经历，那就成为可逆过程了，也就是说，用这种观点去看，把不可逆留在“外界”，而过程内部被看成可逆的了。为区别于真正的可逆过程，而把这种可逆过程，称之为“内可逆过程”。内可逆过程概念的建立，使我们有可能对许多实际过程进行热力学分析。

思 考 题

- 1-1 什么是热力系？为什么要提出热力系这个概念来？
- 1-2 什么是状态参数？状态参数都有什么性质？
- 1-3 绝对压力和表压力有什么关系？
- 1-4 划分热力系时，对一个研究对象是否只能划成一种类型的热力系？
- 1-5 假设容器中的压力没有改变，试问安装在该容器上的压力表读数会改变吗？
- 1-6 为什么在热力学中引用平衡状态这个概念？
- 1-7 何谓准可逆过程和内可逆过程？

习 题

1-1 用水银压力计测量容器中气体的压力，在水银柱上加一段水，结果水柱高1020mm，水银柱高900mm，如图1-4所示。当地大气压力为水银柱高 $B=755\text{mm}$ ，求容器中气体的压力。

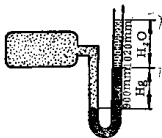


图 1-4 习题1-1示意图

1-2 从气压计上读得当地的大气压是765mmHg，试换算成以Pa、at、atm和mmH₂O表示时的压力数值。

1-3 容器中的真空表读数为 $p_v=600\text{mmHg}$ ，气压计上水银柱高度为 $B=755\text{mm}$ ，求容器中的绝对压力（以Pa和at表示）。如果容器中的绝对压力不变，而气压计上水银柱高度为 $B'=770\text{mm}$ ，求此时真空表上的读数（mmHg表示）是多少？

1-4 某电厂锅炉出口蒸汽压力由压力计读得为13.6MPa，汽轮机进口的蒸汽压力由压力计指示为13.3MPa，凝汽器的真空为718mmHg、炉膛内烟气的真空10mmH₂O、送风机出口的表压力为350mmH₂O。若当时当地大气压为755mmHg，试求各处的绝对压力。

1-5 有一高度为30m的烟囱，其内部烟气的平均密度为 0.735kg/m^3 ，若已知大气压