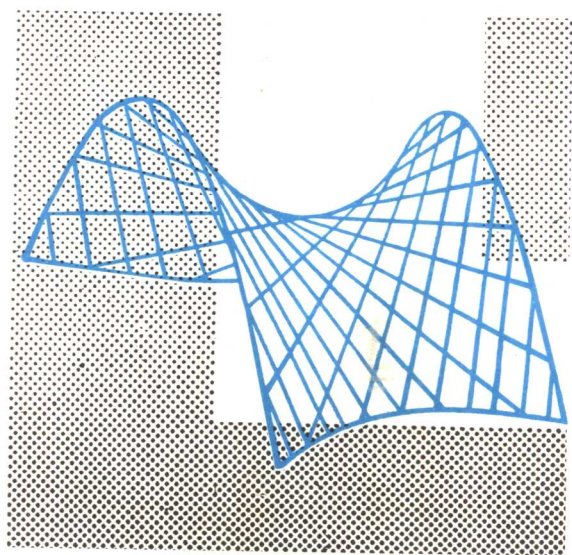


高等专科学校试用教材

热工理论基础

刘芙蓉 杨珊璧 编

● 中国建筑工业出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

热工理论基础/刘芙蓉, 杨珊璧编. -北京: 中国建筑工业出版社, 1997

高等专科学校试用教材

ISBN 7-112-03180-X

I. 热… I. ①刘… ②杨… II. 热力工程-理论-高等学校: 专业学校-教材 N. TK12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 03736 号

本书根据全国高等专科供热通风与空调工程专业教学指导小组制订的《热工理论基础》课程教学基本要求编写。

全书分为工程热力学和传热学两篇。在内容取舍与结构编排上, 充分考虑到高等专科的特点, 对于工程热力学和传热学的基本概念、基本定律和基本方法都作了较为详细的论述, 力求作到深入浅出、简明扼要。同时还较多地注意到如何运用热工理论的基本原理解决实际问题的方法, 以便使学生在掌握基本理论和基本方法的基础上, 获得解决实际工程问题的初步能力。为了帮助学生理解所学内容和进行复习, 全书每章都有例题、思考题与习题, 以及内容小结。

本书为供热通风与空调工程专业高等专科的《热工理论基础》教材, 也可用于其它相关专业的高等专科教材, 或者供有关工程技术人员参考。

高等专科学校试用教材

热 工 理 论 基 础

刘芙蓉 杨珊璧 编

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京云浩印制厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24¼ 插页: 3 字数: 596 千字

1997 年 12 月第一版 1999 年 8 月第二次印刷

印数: 2001—5000 册 定价: 24.70 元

ISBN 7-112-03180-X

TU · 2449 (8320)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书遵照 1992 年 4 月制订的供热通风与空调工程专业高等专科培养目标与基本要求的精神,根据供热通风与空调工程专业高等专科《热工理论基础》课程教学基本要求编写。

全书分为工程热力学和传热学两部分。在内容取舍与结构编排上,充分考虑到高等专科的特点,对于工程热力学和传热学的基本概念、基本定律和基本方法都作了较为详细的论述,力求作到深入浅出、简明扼要。对于如何提高热能的直接利用和间接利用的经济性,如何合理地利用能源等问题也作了一些阐述。同时还较多地注意到如何运用热工理论的基本原理解决实际问题的方法,以便使学生在掌握基本理论和基本方法的基础上,获得解决实际工程问题的初步能力。

为了帮助学生理解所学内容和进行复习,每章主要内容都有例题,各章后面均附有内容小结、复习思考题与习题。全书按 100~110 学时教学内容编写。

本书采用我国的法定单位,并在书末附有各种单位制常用单位的换算表。

本书承清华大学任泽霁教授主审,并提出了许多宝贵意见和建议,对提高书稿质量有很大帮助,在此谨致以深切谢意。

本书绪论和第一篇工程热力学由青岛建筑工程学院刘芙蓉编写,第二篇传热学由石家庄铁道学院杨珊壁编写。在编写过程中,西安建筑科技大学顾瑞英教授、张强副教授,青岛建筑工程学院解鲁生教授,石家庄铁道学院王力军副教授都对本书给予了很多帮助和支持,在此向他们表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免会有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者 96.5.

基本符号

符 号	物 理 量	国际单位制 (SI)	
		中文名称	代 号
<i>A</i>	温度波振幅	度	℃
<i>a</i>	范德瓦尔常数	兆帕·米 ⁶ /千摩尔 ²	MPa·m ⁶ /kmol ²
	音速	米/秒	m/s
	热扩散率	米 ² /秒	m ² /s
<i>B</i>	当地大气压力	兆帕	MPa
<i>b</i>	范德瓦尔常数	米 ³ /千摩尔	m ³ /kmol
<i>C</i>	辐射系数	瓦/米 ² ·开 ⁴	W/m ² ·K ⁴
<i>c</i>	速度	米/秒	m/s
	质量热容	千焦耳/公斤·度 (开)	kJ/kg·K
	余隙百分比		
<i>c'</i>	容积热容	千焦耳/标米 ³ ·度 (开)	kJ/Nm ³ ·K
<i>c_p</i>	比定压热容	千焦耳/公斤·度 (开)	kJ/kg·K
<i>c_v</i>	比定容热容	千焦耳/公斤·度 (开)	kJ/kg·K
<i>d</i>	直径	米	m
	含湿量	克/公斤 (干空气)	g/kg (d·a)
<i>E</i>	能量、储存能	焦耳·千焦耳	J·kJ
	辐射力	瓦/米 ²	W/m ²
<i>e</i>	单位质量能量、储存能	焦耳/公斤 千焦耳/公斤	J/kg kJ/kg
<i>E_k</i>	动能	焦耳 千焦耳	J kJ
<i>e_k</i>	单位质量动能	焦耳/公斤 千焦耳/公斤	J/kg kJ/kg
<i>E_p</i>	位能 (势能)	焦耳 千焦耳	J kJ
<i>e_p</i>	单位质量位能 (势能)	焦耳/公斤 千焦耳/公斤	J/kg kJ/kg
<i>Ex</i>	工质焔	焦耳 千焦耳	J kJ
<i>ex</i>	单位质量工质焔	焦耳/公斤 千焦耳/公斤	J/kg kJ/kg
<i>EX_q</i>	热量焔	焦耳 千焦耳	J kJ
<i>ex_q</i>	单位质量热量焔	焦耳/公斤 千焦耳/公斤	J/kg kJ/kg
<i>F</i>	力	牛顿	N
	表面积	米 ²	m ²
<i>f</i>	截面积	米 ²	m ²
	摩擦系数		
<i>G</i>	质流量	千克/秒	kg/s
<i>g</i>	重力加速度	米/秒 ²	m/s ²
	质量成分		
<i>I</i>	辐射强度	瓦/米 ² ·球面度	W/m ² ·sr
<i>H</i>	真空度	帕	Pa
	焓	焦耳 千焦耳	J kJ
	高度	米	m
<i>h</i>	单位质量的焓	焦耳/公斤 千焦耳/公斤	J/kg kJ/kg
<i>J</i>	有效辐射	瓦/米 ²	W/m ²
<i>K</i>	热能利用系数 (率)		

续表

符 号	物 理 量	国际单位制 (SI)	
		中文名称	代 号
	传热系数	瓦/米 ² ·度	W/m ² ·℃
<i>l</i>	长度	米	m
<i>M</i>	分子量		
	马赫数		
	质量	千克	kg
<i>m</i>	质量	公斤	kg
<i>m</i>	质量流量	公斤/秒	kg/s
<i>N</i>	分子数目		
<i>NTU</i>	传热单元数		
<i>n</i>	摩尔数、千摩尔数		
	多变指数		
<i>P</i>	功率	瓦 千瓦	W kW
<i>p</i>	压力	帕	Pa
<i>Q</i>	热量	焦尔 千焦尔	J kJ
Φ	热流量	瓦	W
<i>q</i>	单位质量传递热量	焦尔/公斤 千焦尔/公斤	J/kg kJ/kg
	热流密度	瓦/米 ²	W/m ²
<i>R</i>	气体常数	焦尔/公斤·度 (开)	J/kg·K
	热阻	度/瓦	℃/W
<i>R₀</i>	通用气体常数	焦尔/千摩尔·度 (开)	J/kmol·K
<i>r</i>	汽化潜热	千焦尔/公斤	kJ/kg
	容积成分		
	半径	米	m
<i>S</i>	位移、距离	米	m
	熵	千焦尔/开	kJ/K
<i>s</i>	单位质量熵	千焦尔/公斤·开	kJ/kg·K
<i>T</i>	热力学温度	开	K
	周期	秒 小时	s h
<i>t</i>	摄氏温度	度	℃
<i>U</i>	内能	焦尔 千焦尔	J kJ
	周边长度	米	m
<i>u</i>	单位质量内能	焦尔/公斤 千焦尔/公斤	J/kg kJ/kg
<i>V</i>	容积	米 ³	m ³
<i>v</i>	比容	米 ³ /公斤	m ³ /kg
<i>W</i>	膨胀功 (容积功)	焦尔 千焦尔	J kJ
<i>w</i>	单位质量传递膨胀功 (容积功)	焦尔/公斤 千焦尔/公斤	J/kg kJ/kg
	速度	米/秒	m/s
<i>W_t</i>	流动功	千焦尔	kJ
<i>w_t</i>	单位质量流动功	千焦尔/公斤	kJ/kg
<i>W_s</i>	轴功	千焦尔	kJ

续表

符 号	物 理 量	国际单位制 (SI)	
		中文名称	代 号
w_s	单位质量轴功	千焦耳/公斤	kJ/kg
W_t	技术功	千焦耳	kJ
w_t	单位质量技术功	千焦耳/公斤	kJ/kg
x	摩尔成分		
	干度		
z	高度	米	m
α	吸收率		
	换热系数	瓦/米 ² ·度	$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
β	临界压力比		
	压气机增压比		
	容积膨胀系数	1/开	1/K
	肋化系数		
δ	厚度	米	m^2
Δ	差值		
ϵ	角系数 (热湿比)		
	发射率		
	换热器效能		
ϵ_1	制冷系数		
ϵ_2	制热系数 (供热系数)		
ζ	能量损失系数		
η	效率		
η_d	扩压管效率		
η_n	喷管效率		
η_t	循环热效率		
κ	比热比 (绝热系数)		
θ	过余温度	度	$^\circ\text{C}$
λ	导热系数	瓦/米·度	$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
	射线波长	米 微米	$\text{m} \quad \mu\text{m}$
λ_v	容积效率		
μ	动力粘度	牛顿·秒/米 ²	$\text{N} \cdot \text{s/m}^2$
μ_j	绝热节流系数	开/兆帕	K/MPa
ξ	热能利用率		
	延迟时间	秒 小时	$\text{s} \quad \text{h}$
ν	运动粘度 (动量扩散系数)	米 ² /秒	m^2/s
ρ	密度	公斤/米 ³	kg/m^3
	反射率		
ρ_{vap}	绝对湿度	公斤/米 ³	kg/m^3
τ	时间	秒 小时	$\text{s} \quad \text{h}$
	透射率		
	剪应力	帕	Pa

续表

符 号	物 理 量	国际单位制 (SI)	
		中文名称	代 号
φ	相对湿度		
	辐射角系数		
ω	分子运动速度	米/秒	m/s
	角速度	弧度/秒	rad/s

目 录

基本符号

绪 论

第一篇 工程热力学

第一章 气体的性质	4
1-1 热力系统	4
1-2 工质热力状态及基本状态参数	5
1-3 热力平衡状态、状态方程及坐标图	9
1-4 理想气体状态方程	10
1-5 理想混合气体	12
第二章 热力学第一定律	19
2-1 热力过程	19
2-2 系统与外界的能量交换	21
2-3 热力学第一定律闭口系统能量方程及内能	22
2-4 热力学第一定律开口系统能量方程及焓	24
2-5 稳定流动能量方程及应用	27
2-6 气体的比热容及热量计算	31
第三章 气体的热力过程及气体的压缩	41
3-1 分析热力过程的一般方法	41
3-2 气体的基本热力过程	41
3-3 气体多变过程	48
3-4 气体压缩过程	52
3-5 活塞式压气机的余隙容积	55
3-6 多级压缩及中间冷却	58
第四章 热力学第二定律	63
4-1 热力循环	63
4-2 卡诺循环与卡诺定理	65
4-3 热力学第二定律	68
4-4 熵	69
4-5 孤立系统熵增原理	74
4-6 热量熵与工质熵	79
第五章 水蒸汽性质及蒸汽动力循环	90
5-1 实际气体	90
5-2 水蒸汽的形成	91
5-3 水和水蒸汽图表	94

5-4 水蒸汽的基本热力过程	97
5-5 蒸汽动力基本循环	100
5-6 实用蒸汽动力循环	103
第六章 湿空气的性质	114
6-1 湿空气的状态参数	114
6-2 湿空气的焓湿图	120
6-3 湿空气的热力过程	123
第七章 气体和蒸汽的流动	131
7-1 喷管与扩压管概述	131
7-2 稳定流动基本方程、音速与马赫数	131
7-3 喷管和扩压管中的定熵流动特性	134
7-4 喷管中定熵流动的计算	136
7-5 具有摩擦的绝热流动	146
7-6 气体和蒸汽的绝热节流	149
第八章 制冷循环	154
8-1 空气压缩式制冷循环	154
8-2 蒸气压缩式制冷循环	158
8-3 蒸汽喷射式制冷循环	162
8-4 吸收式制冷循环	164
8-5 热泵供热循环	165

第二篇 传 热 学

0-1 热量传递的基本方式	168
0-2 传热过程	170
第九章 导热的理论基础	172
9-1 基本概念	172
9-2 傅立叶定律	173
9-3 导热系数	173
9-4 导热过程的数学描写	176
第十章 稳态导热	182
10-1 通过平壁的导热	182
10-2 通过圆筒壁的导热	186
10-3 通过肋片的导热	189
10-4 接触热阻	195
10-5 二维稳态导热问题	196
第十一章 非稳态导热	201
11-1 非稳态导热的概念	201
11-2 集总参数法	202
11-3 一维非稳态导热的分析解	205
11-4 周期性非稳态导热	212
第十二章 导热问题数值解基础	219
12-1 离散化和差商	219

12-2 稳态导热问题的数值计算	220
12-3 非稳态导热问题的数值计算	225
第十三章 对流换热基础	231
13-1 流体的流态和热能传递机理	231
13-2 影响对流换热过程的因素	232
13-3 描写对流换热过程的微分方程组	233
13-4 边界层概念及边界层微分方程组	235
13-5 相似理论基础及实验关联式的获得	240
第十四章 单相流体的对流换热	250
14-1 管内受迫对流换热	250
14-2 流体在管外横向流动时换热	254
14-3 自然对流换热	259
第十五章 凝结换热与沸腾换热	268
15-1 凝结换热	268
15-2 沸腾换热	274
第十六章 辐射换热的理论基础	281
16-1 热辐射的基本概念	281
16-2 黑体辐射的基本定律及吸收特性	283
16-3 实际物体的辐射与吸收、灰体及基尔霍夫定律	289
第十七章 辐射换热计算	295
17-1 辐射角系数	295
17-2 用网络法计算物体间辐射换热	301
17-3 遮热板	309
17-4 气体辐射	311
第十八章 传热过程与换热器	321
18-1 通过平壁、圆筒壁、肋壁的传热	321
18-2 换热器的型式与平均传热温差	325
18-3 换热器的热计算	331
18-4 换热器传热过程的强化	340
参考书目	346
习题答案	347
附录	353
附表 1 各种单位制常用单位换算表	353
附表 2 几种气体在理想状态下的平均质量定压热容表 (曲线关系) $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	354
附表 3 饱和水与饱和蒸汽表 (按温度排列)	354
附表 4 饱和水与饱和蒸汽表 (按压力排列)	356
附表 5 未饱和水与过热蒸汽表	358
附表 6 0.1MPa 时的饱和空气状态参数表	364
附表 7 干空气的热物理性质 ($P=1.013\text{bar}$)	366
附表 8 饱和水的热物理性质	367
附表 9 干饱和蒸汽的热物理性质	368
附表 10 几种饱和液体的热物理性质	369

附表 11	几种油的热物理性质	369
附表 12	各种材料的密度、导热系数、比热及蓄热系数	370
附表 13	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	371
附表 14	常用材料表面的法向发射率 ϵ_n	372
附表 15	不同材料表面的绝对粗糙度 K_s (mm)	373
附表 16	换热设备的 α 及 K 概略值	373
附表 17	污垢系数的参考值 ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)	374
附表 18	双曲函数表	375
附表 19	高斯误差补函数的一次积分值	376

绪 论

自然界蕴藏着丰富的能源，如：风力能、水力能、太阳能、地热能、原子核裂变和聚变能以及煤、石油等有机矿物质燃料的化学能等等。这些能源的开发利用是人类发展生产、提高自身生活水平的重要物质保证。近几十年来世界经济发展情况表明，一个国家或地区的国民生产总值的增长，始终与其能源消耗量的增长成正比。显然能源的开发利用对于发展国民经济是十分重要的。

我国的能源资源是比较丰富的，就目前已经探明的煤炭、石油储量及其产量，均居世界各国的前列。但是能源的人均占有量，却远远低于世界的平均数，并且能源的利用率低。这样随生产的发展和人民生活水平的提高，在今后相当长时期内，能源的供需关系将处于紧张状态。针对这种现状，我国提出了“能源的开发与节约并重”、“近期内要把节能放在优先地位”的能源政策。因此合理而有效地利用能源，不断提高能源的利用率，减少燃料消耗，将具有深远的意义。

0-1 热能及其利用

人类从能源中所获得能量的主要形式是热能，这些热能大多来自煤、石油、天然气等燃料。通过燃烧过程，这些燃料的化学能转变为热能释放出来，被人类所利用。对于热能的利用可分为两种基本方式，一种是热能的直接利用，即将热能用于直接加热，如：冶炼、蒸发、烘干、采暖等。这些直接加热过程，必须在各种加热设备或热交换器中进行。另一种是热能的间接利用，即将热能转变为其它形式的能量加以利用，如：将热能转变为机械能、或者进一步转变为电能或其它形式，然后加以利用。热能转变为机械能的过程，必须在热力发动机（或简称热机）中进行。

在工农业生产的各部门及日常生活中，热能利用是很广泛的。在供热通风与空调工程中也是这样，热能利用的设备是很多的。锅炉设备是供热工程的热源，在锅炉中，燃料燃烧释放出大量热能，该热能加热了给水，使水变为具有一定压力温度的水蒸汽（或高温水）。这些携带了一定热能的水蒸汽可以在生产过程中起加热或加湿等作用，也可用于房屋采暖或其它生活用热。在热电厂中，锅炉产生的高温高压水蒸汽，通过汽轮机将其热能转变为机械能，进而转变为电能；同时将一定量作过部分功的蒸汽用于供热。显然这里既有热能的直接利用、也有热能的间接利用。

空调系统中为使空气达到一定温度要求，常常需要用水蒸汽或热水对空气加热，或者用低温冷冻水对空气冷却。这些加热或冷却过程是在各种热交换器中进行的，这些属于热能直接利用的范畴。产生低温冷冻水的制冷装置，是空气调节系统的冷源。常用的压缩式制冷系统，是消耗机械能，将热能从低温物体转移到高温物体，从而实现制冷，产生了冷冻水。这里有一系列的能量形式转换：首先在电厂中，将热能转变为机械能、又转变为电能；然后在制冷装置中，将电能转变为机械能，机械能又消耗于压缩过程，转变为热能而排出去，从而进行制冷循环，才能产生低温冷冻水。显然这里又是热能的间接利用。

0-2 热工理论基础与热力工程的发展

为了更好地直接利用热能,必须研究热量传递的规律。传热学就是研究热量传递过程规律的学科。为了更好地间接利用热能,必须研究热能与其它能量形式间相互转换的规律。工程热力学就是研究热能与机械能间相互转换规律及方法的学科。由工程热力学和传热学共同构成了热工理论基础,可见热工理论基础就是研究热能在工程上有效利用的规律和方法的。

热工理论的建立和发展与热力工程的发展是分不开的。热现象是人类最早接触到的自然现象之一,早在远古时期人类就学会了取火和用火。但在其后的漫长时期内,人类对于热能的利用仅限于直接加热的方式,从事生产所需要的动力,主要依靠人力、畜力,后来又使用了风力与水力。风力与水力的使用受到地理条件和季节气候的限制,无法满足日益发展的生产对动力的需求。终于在18世纪后半期,英国人瓦特发明了比较完善的蒸汽机,实现了热能向机械能的转换,开始了热能的间接利用,为人类的生产活动提供了动力,大大促进了社会生产力的发展。同时也开拓了使用矿物质燃料的新途径。

由于初期的蒸汽机效率很低,所以人们对其进行了长期的分析研究,其中卡诺循环的研究卓有成效。经过焦尔、卡诺、迈耶、克劳修斯、开尔文等许多人的不懈努力,不仅找到了提高热机效率的基本途径,而且逐渐总结出热能与机械能间相互转换的基本规律,从而确立了热力学第一和第二定律,为工程热力学成为一门独立学科而奠定了基础。

传热学是从热的一般学说的基础上发展起来的。人们对于热机的研究发现,减少各种热损失,改善热量传递过程,也是提高热机效率的重要方面。同时在冶炼、建筑、机械制造、电工和制冷等工程中,均涉及到热量传递过程。这些都使得有关传热问题的研究进展很快,相继提出了有关对流换热的牛顿公式;有关导热的傅立叶定律和有关热辐射的四次方定律等等。自本世纪以来,传热学无论是基础理论,还是研究方法上都获得迅速发展,使之很快成为一门独立的学科。

热力工程的发展促使了热工理论的形成和发展,而热工理论反过来又推动了热力工程的发展。由于交通运输业的发展,需要高效而轻巧的热机,同时由于机械制造业与电机电器制造业的发展,尤其有了正确的热工理论的指导作用,在19世纪末期相继出现了各种类型的内燃机,以及适用于电力工业需要的汽轮机。汽轮机使用高参数蒸汽,其效率高、转矩均匀、运行可靠、单机容量大等优点,使之至今仍为所有固定式热动力装置所采用。汽轮机的出现和应用,又促使了对高参数蒸汽性质及高速气流的研究,同时与之配套的锅炉设备也获得了很大发展。

本世纪30年代以来,由于高速飞行、宇宙航行及火箭导弹武器的发展,并且飞跃发展的科学技术为新型热机在设计理论、燃料、结构材料和制造工艺等各方面都创造了相应的条件,使得燃气轮机、喷气式发动机、以及发射人造地球卫星和航天飞机所用的强大的火箭发动机,都获得了应用和发展。与此同时,常规的热机以及各种换热器在性能和结构上也有了很大的改进和创新。

由于热能广泛而大量的利用,燃料的消耗量日益增加,燃料的供需矛盾也日益突出,同时煤、石油、天然气等有机矿物燃料也是塑料、合成纤维等化工产品的重要原料,烧掉未免可惜。另外在燃料燃烧过程中所排出的废气又污染了人类生存的环境,严重危害人们的健康。因此探索和开发廉价而清洁的新能源已经成为人类面临的重要课题,如:太阳能、地

热能的开发利用等，已经得到实现。如果原子核聚变反应的动力装置能够研制成功，将为人类提供几乎是取之不尽的能源。这些探索 and 开发新能源的工作，将大大推动热工理论的发展，并为其增添新内容。

0-3 热工理论基础的研究对象及主要内容

热工理论基础是研究热能利用规律和方法的，包括物质的热力性质、热能和机械能相互转换的规律、热量传递过程的规律等。其内容分为工程热力学和传热学两部分。

工程热力学部分的主要内容有

1. 工质性质 工质是实现热能与机械能相互转换或热能转移的工作物质。因此要研究热能利用问题，必须先研究工质的热力性质。在工程热力学中所研究的是气体（包括湿空气等混合气体）和蒸气的热力性质。

2. 热力学基本定律 说明能量转换或转移中的数量守恒关系的热力学第一定律；说明热过程的方向、条件、深度等问题的热力学第二定律；以及与这两个定律有关的概念。

3. 热力过程 气体和蒸气的主要热力过程、流速发生显著变化的流动过程的分析和计算。

4. 热力循环 蒸汽动力循环和制冷循环的分析和计算。

传热学部分的主要内容有

1. 导热 导热的基本理论，稳态导热和非稳态导热的数学描述、一般求解方法及有关概念。

2. 对流换热 对流换热的基本概念，对流换热过程的物理和数学模型的建立，一般求解方法；相似理论基础及对流换热过程的求解、包括单相流体的对流换热与集态改变时的对流换热的经验公式的选择和使用。

3. 辐射换热 热辐射基本概念及有关定律，物体间辐射换热的一般计算及气体辐射。

4. 传热过程及换热器 传热过程的分析计算，换热器概述及一般计算，传热过程的强化。

可以看出，热工理论基础所涉及内容十分广泛，是研究热能利用所必需的技术基础知识。由于热能利用问题涉及各种科学技术领域，使得热工理论基础成为现代技术科学的主要基础理论学科之一。显然热工理论基础也是供热通风与空调工程的一门重要的技术基础课，是后续的各专业课，如供热工程、工业通风、锅炉与锅炉房设备、空气调节、制冷技术等课程的理论基础。学好热工理论基础，是学好这些专业课，以及进一步研究热力工程中的各种问题、合理而有效地利用能源、不断提高能源利用率的必要前提。

第一篇 工程热力学

工程热力学是从工程技术观点出发,研究热能与机械能相互转换的规律和方法。它采用的是宏观的研究方法、即经典热力学的方法,就是以从无数实践中归纳总结出来的热力学第一定律和第二定律作为分析推理的依据,把物质看作连续的整体,对其宏观现象和宏观过程进行研究。这样就不必要深入到物质内部去考查分子、原子等的微观行为,也不必要对物质的内部结构进行假设,因此这种分析推理的条理清晰,其研究结果具有高度可靠性和普遍性,适宜于工程上应用。但是由于宏观的研究方法并不涉及物质的内部结构,就不能解释与微观结构有关的宏观现象的本质及其内在原因。这些问题的解决,需要依靠微观的研究方法,即统计热力学的研究方法。

微观的研究方法是从物质的微观结构出发,运用统计的方法对大量分子的无规则运动进行研究。从而用物质内部分子运动的微观机理来解释有关热现象的本质,并进一步说明物质的宏观性质。这些是宏观研究方法所不能够的。然而微观的方法也有局限性,由于在研究中对物质的内部结构采用了一些假设模型,这些假设模型又只是物质内部实际结构的近似描述,因此分析研究的结论往往与实际不能完全相符合,也不及宏观的研究方法所得的结论更为可靠;同时统计热力学的研究方法还需要使用繁复而深奥的数学工具,这些都使得在应用上受到一定的限制。

第一章 气体的性质

能量的转换和转移必须通过物质的状态变化来实现,因而必须研究这些物质的热力性质。

用以实现热能与机械能相互转换、或热能转移的工作物质,称为工质。例如:汽轮机中的水蒸汽、制冷系统中的制冷剂、以及供热管网中的水蒸汽等。在热力工程中一般采用气态物质作为工质。这是由于在相同的外界条件下,气态物质的容积变化最灵敏、最显著,最容易受热膨胀而对外作功,且具有良好的流动性。本章将研究气体的热力性质,包括工质的热力状态及其描述,气体状态方程及有关概念。

1-1 热力系统

在分析研究问题时,往往将研究对象取为系统。在工程热力学中也是这样,把研究对象从周围物体中划分出来,将研究对象的总合称为热力系统,或简称为系统。将与系统发生相互作用的周围物体称为外界或环境。系统与外界的分界面称为边界。

系统的边界可以是真实存在的,也可以是假想的;可以是固定不变的,也可以是移动变化的。在图 1-1 (a) 中,当我们研究气缸内的气体进行热能转换为机械能的问题时,气缸内的气体就是热力系统。活塞的左端面、气缸的部分内壁面就是边界。显然该系统的边

界是真实存在的，并且有部分边界是可以移动变化的。

图 1-1 (b) 是汽轮机工作原理示意图。如果研究汽轮机中的热能与机械能转换问题时，可以取汽轮机外壳及进、出口截面所包围的部分为系统。显然该系统的边界是固定不变的，并且有部分边界是真实存在的，如：汽轮机外壳；还有部分边界是假想的，如：汽轮机的进口截面 1-1 和出口截面 2-2。

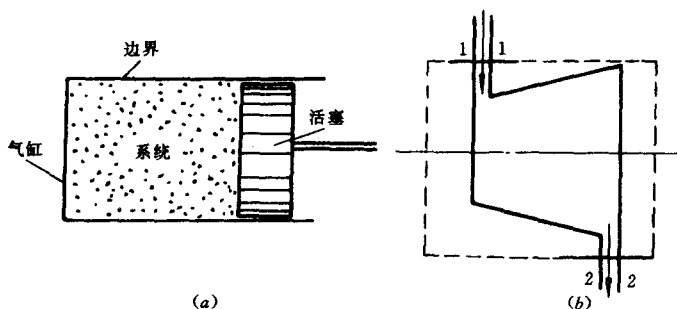


图 1-1 热力系统

根据系统与外界的物质或能量交换的特点，可以有不同类型的系统。下面介绍在工程热力学中常用的几种系统。

若系统与外界没有物质交换，则称为闭口系统或封闭系统。由于没有物质通过系统的边界，系统的质量保持不变，故闭口系统又称为定质量系统，或称控制质量系统。图 1-1 (a) 所示气缸内的气体，就是闭口系统。

若系统与外界有物质交换，则称为开口系统或流动系统。由于物质通过了开口系统的边界，所以开口系统的质量可以是变化的，也可以是不变的。图 1-1 (b) 所示正在运行的汽轮机，在进口截面 1-1 和出口截面 2-2 处总有物质流进流出，故为一开口系统。同样，正在运行的风机、锅炉、换热器等，都是开口系统。在取开口系统时，可将研究对象所在的空间，用一边界包围起来，称该空间为控制体积，相应的边界称为控制体界面，或简称控制面，如图 1-1 (b) 中虚线方框所示。显然控制体积与外界交换的能量和物质，必须越过控制面。

若系统与外界没有热量交换，则称为绝热系统。一个用完全隔热的材料包围起来的系统，就是绝热系统。显然，实际上并不存在完全隔热的材料，也没有真正的绝热系统。但是工程上有许多系统与外界交换的热量很少，可以忽略不计，就可将其视为绝热系统，如：汽轮机、叶轮式压气机等等，当它们运行时均可当作绝热系统对待。

若系统与外界既无物质交换，又无能量交换，则称为孤立系统。由于自然界的一切事物都是互相联系互相制约的，所以与外界没有任何联系的真正的孤立系统是不存在的。假如系统与外界的作用很小，可以忽略不计，那么该系统可当作孤立系统来对待。这是抓住事物本质，忽略次要因素进行研究分析的一种科学方法。在后面的研究中，我们将常常对此加以应用。值得注意，孤立系统在研究热力学第二定律时，将是一个重要的研究对象。

最后指出，系统的选取是重要的。尽管如何选取系统对分析问题的结果并无影响，但是合理地选取系统会给分析研究问题带来方便。系统选取不当，将会使问题变得复杂繁琐。这些在今后的分析计算中可以看到。

1-2 工质热力状态及基本状态参数

1-2-1 工质热力状态及其描述

在热工设备中，工质通过吸热或放热，膨胀或压缩等变化，来完成热能与机械能的相

互转换、或热能的转移。例如：水在锅炉中吸收燃料燃烧所释放出的热量，变为具有一定压力和温度的水蒸汽，即完成了热量的转移。高温高压的水蒸汽通过汽轮机膨胀做功后，变为低温低压的水蒸汽，即完成了热能与机械能的转换。在这些过程中，作为工质的水蒸汽，其物理特性发生了变化，或者说工质的热力状态发生了变化。

工质在某瞬间的宏观物理状况称为工质的热力状态，或简称为状态。描述工质热力状态的一些宏观物理量，称为热力状态参数，或简称为状态参数。显然状态参数与状态间有一一对应的关系。工质的状态一定，其状态参数就一定；工质的状态发生了变化，其状态参数也相应变化，且初、终态的参数变化值，仅与初、终态有关，而与状态变化的过程无关。若以 x 表示状态参数，有

$$(1) \quad \int_{1-a-2} dx = \int_{1-b-2} dx = x_2 - x_1$$

$$(2) \quad \oint dx = 0$$

工程热力学中常用的状态参数有：温度 (T)、压力 (p)、比容 (v)、焓 (h)、熵 (s)、内能 (u)、焔 (ex) 等。根据它们与系统质量的关系，一般将它们分为两类：强度性参数和广延性参数。

强度性参数与系统的质量无关，反映了系统的内在性质。如：温度、压力。它们不具有可加性，系统中任何一点的强度性参数与整个系统的强度性参数相等。

在热力过程中，强度性参数起着推动力作用，故又称之为广义力或势。一切过程都是在某种势差的作用下进行的。如：有温度差存在时，就会发生热量传递过程；有压力差存在时，就会发生功量传递过程。

广延性参数又称为尺度性参数，与系统的质量有关，反映了系统的外延性质。如：容积、焓、熵等。它们具有可加性。系统的广延性参数等于其各部分的广延性参数之和。在热力过程中广延性参数起着位移作用，又称之为广义位移。如：在压力差作用下，系统发生了膨胀或收缩，与外界进行了功量传递。在此过程中系统的容积发生了改变，即发生了广义位移。显然有无广义位移也是系统与外界间是否发生了功量传递的标志。

广延性参数除以系统的质量，得到的单位质量广延性参数，称为比参数。如：容积除以质量得到比容，还有比内能、比焓等，它们具有强度性参数的性质，均不具有可加性。这些比参数用小写字母表示，为了书写方便，除比容外，其余往往将“比”字省略。

1-2-2 基本状态参数

在常用的状态参数中，温度、压力、比容是可以用仪表测量的，故称为基本状态参数，其余均为导出状态参数。

1. 温度 温度是表示工质冷热程度的物理量。当两个冷热程度不同的物体发生相互作用时，热物体变冷、冷物体变热，最终达到相同的冷热程度，这就是热平衡。显然，处于热平衡的两个物体具有相同的温度。如果两个物体都与第三个物体处于热平衡，那么这三者彼此均处于热平衡，也具有相同的温度。这个基本的实验事实又称为热力学第零定律。可以看出，温度概念的建立和定量测量，都是以热力学第零定律为基础的。

根据分子运动论学说，温度是物质分子热运动激烈程度的标志。对于气体，有

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