



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

工程热力学

第三版

沈维道 蒋智敏 童钧耕 合编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

工程热力学

第三版

沈维道 蒋智敏 童钧耕 合编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/沈维道,蒋智敏,童钧耕主编. —北京:
高等教育出版社,2001
面向 21 世纪课程教材
ISBN 7-04-009314-6

I. 工… II. ①沈…②蒋…③童… III. 工程热力学—
高等学校—教材 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 025589 号

工程热力学 第三版
沈维道 蒋智敏 童钧耕 合编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

电 话 010-64054588

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

邮政编码 100009

传 真 010-64014048

开 本 787×960 1/16

印 张 28.5

字 数 530 000

版 次 1982 年 5 月第 1 版

2001 年 6 月第 3 版

印 次 2001 年 6 月第 1 次印刷

定 价 23.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”中“热工课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和教育部热工课程“九五”规划教材。

本书系根据国家教育委员会制定的多学时“工程热力学课程教学基本要求”(1995 年修订版),在第二版的基础上,考虑到 21 世纪初叶的教学需要修订而成的。本书保持了第二版的体系,主要讲述了工程热力学的基本概念、基本定律,气体及蒸汽的热力性质,各种热力过程和循环的分析计算及化学热力学基础知识等内容,在阐明工程热力学的基本内容的同时,吸收了当今热工科技的新成果,加强了熵产与不可逆过程作功能力损失等内容的阐述,增加了熵方程、焓、焓平衡方程等内容。本书在加强基础理论的同时,注意联系工程实践,注意学生创新能力的培养。

本书既继承了第二版便于自学的特点,又在内容的深度与广度方面有所充实。经教育部热工课程教学指导委员会审订,可作为能源、热能机械、核工程及化学工程等专业的工程热力学教材,也可供有关工程技术人员参考。

前 言

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”中“热工课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目的研究成果,教育部热工课程“九五”规划教材。

本书是根据国家教育委员会制定的多学时“工程热力学课程教学基本要求”(1995 年修订版)以及多年来工程热力学课程教学内容和课程体系改革的实践经验,并考虑到 21 世纪初叶的教学需要,在第二版的基础上修订而成的。编写中特别注意到热工科技的发展及高等教育的发展趋势,在加强基础理论的同时注意吸收当今热工科技的新成果,注意联系工程实践,注意学生创新能力的培养。

本书保持了第二版的体系,对工程热力学的基本概念、基本定律,气体及蒸汽的热力性质,各种热力过程和循环的分析计算及化学热力学基础知识等内容作了比较详细的论述,力求帮助读者能较好地掌握能量守恒原理、能量贬值原理以及基本热力过程和循环的计算和分析方法。同时,本书根据上述基本要求增删了一些内容以满足 21 世纪初叶的教学需要。本书增加了非稳态流动过程、焓方程、焓、焓平衡方程、通用焓图与通用熵图、饱和蒸气压方程、单元系相平衡及水和水蒸气热力性质程序简介等内容;精简了热力学第二定律和熵的统计意义、热力学一般关系式在求实际气体的 h 和 s 等函数时的应用、二冲程活塞式内燃机的循环、增压式内燃机及其循环等内容。为了更好地培养学生的自学能力,一些内容让学生通过独立思考自己去解决,如流动混合改写成例题或习题。为了帮助学生复习掌握所学的理论知识,本书各章的例题、思考题和习题有较大的加强。编撰这些例题、思考题和习题时,力求使其有代表性、启发性和灵活性。这些题目中有些也可作为课堂讨论的题材。

本书中水和水蒸气的热力性质采用我国学者严家骏教授等编制的《水和水蒸气热力性质图表》中的数据。书中的名词术语、单位均符合国家标准。

参加本书修订工作的有沈维道教授、蒋智敏教授(第三、四、五、十三章)和童钧耕教授(绪论及第一、二、六、七、八、九、十、十一、十二、十四章),受沈维道教授和蒋智敏教授委托,全书最后由童钧耕统稿。

本书主审人哈尔滨工业大学严家骏教授仔细审阅了书稿,提出了许多宝贵意见。1999 年 7 月教育部热工课程教学指导委员会会议对书稿进行了认真审

阅。对热工课程教学指导委员会和严家骏教授,以及对本书的编写给予过帮助的各位同志和教研室同仁,在此一并表示衷心感谢。

由于水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝指正

编者

2000年9月

主要符号

A	面积, m^2	M_r	相对分子质量
c_f	流速, m/s	M_{eq}	平均摩尔质量(折合摩尔质量), kg/mol
c	比热容(质量热容), $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 浓度, mol/m^3	n	多变指数;物质的量, mol
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	p	绝对压力, Pa
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	p_0	大气环境压力, Pa
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	p_b	大气环境压力, 背压力, Pa
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	p_e	表压力, Pa
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	p_i	分压力, Pa
d	耗汽率, kg/J ; 含湿量, kg/kg (干空气)	p_s	饱和压力, Pa
E	总能(储存能), J	p_v	真空度, 湿空气中水蒸气分压力, Pa
E_x	焔, J	Q	热量, J
$E_{x,Q}$	热量焔, J	q_m	质量流量, kg/s
$E_{x,U}$	热力学能焔, J	q_v	体积流量, m^3/s
$E_{x,H}$	焓焔, J	Q_p	定压热效应, J
E_k	宏观动能, J	Q_v	定容热效应, J
E_p	宏观位能, J	R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
F	力, N ; 亥姆霍兹函数, J	R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
G	吉布斯函数, J	$R_{g,\text{eq}}$	平均气体常数(折合气体常数), $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
H	焓, J	S	熵, J/K
H_m	摩尔焓, J/mol	S_g	熵产, J/K
ΔH_c^0	标准燃烧焓, J/mol	S_f	(热)熵流, J/K
ΔH_f^0	标准生成焓, J/mol	S_m	摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
I	作功能力损失(焔损失), J	S_m^0	标准摩尔绝对熵, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
K_c	以浓度表示的化学平衡常数	T	热力学温度, K
K_p	以分压力表示的化学平衡常数	T_i	转回温度, K
M	摩尔质量, kg/mol	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
Ma	马赫数	t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$

U	热力学能, J	κ	等熵指数
U_m	摩尔热力学能, J/mol	κ_T	等温压缩率
V	体积, m^3	λ	升压比
V_m	摩尔体积, m^3/mol	μ	化学势
W	膨胀功, J	μ_J	焦耳-汤姆逊系数(节流微分效应)
W_{net}	循环净功, J	π	压力比(增压比)
W_i	内部功, J	ν	化学计量系数
W_s	轴功, J	ν_{cr}	临界压力比
W_t	技术功, J	ρ	密度, kg/m^3 ; 预胀比
W_u	有用功, J	σ	回热度
w_i	质量分数	φ	相对湿度; 喷管速度系数
x	干度(专指湿蒸汽中饱和干蒸汽的质量分数)	φ_i	体积分数
x_i	摩尔分数	下脚标	
z	压缩因子	a	空气中干空气的参数
α	抽汽量, kg; 离解度	c	卡诺循环; 冷库参数
α_V	体膨胀系数	C	压气机
γ	质量热容比(比热比); 相变潜热(汽化潜热), J/kg	cr	临界点参数; 临界流动状况参数
ε	制冷系数; 压缩比	CV	控制体积
ε'	供暖系数	in	进口参数
η_c	卡诺循环热效率	iso	孤立系统
$\eta_{C,s}$	压气机绝热效率	m	物质的量
η_{e_x}	炯效率	s	饱和参数; 相平衡参数
η_T	蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率	out	出口参数
η_t	循环热效率	v	湿空气中水蒸气的物理量
		0	环境的参数; 滞止参数

目 录

主要符号	1
绪论	1
0-1 热能及其利用	1
0-2 热力学发展简史	2
0-3 工程热力学的主要内容及研究方法	3
第一章 基本概念	5
1-1 热能在热机中转变成机械能的过程	5
1-2 热力系统	7
1-3 工质的热力学状态及其基本状态参数	8
1-4 平衡状态、状态方程式、坐标图	12
1-5 工质的状态变化过程	14
1-6 过程功和热量	17
1-7 热力循环	23
思考题	26
习题	26
第二章 热力学第一定律	29
2-1 热力学第一定律的实质	29
2-2 热力学能和总能	29
2-3 能量的传递和转化	31
2-4 焓	33
2-5 热力学第一定律的基本能量方程式	33
2-6 开口系统能量方程式	36
2-7 能量方程式的应用	40
思考题	45
习题	46
第三章 理想气体的性质	48
3-1 理想气体的概念	48
3-2 理想气体状态方程式	49
3-3 理想气体的比热容	52
3-4 理想气体的热力学能、焓和熵	60
3-5 理想气体混合物	67

思考题	75
习题	76
第四章 理想气体的热力过程	80
4-1 研究热力过程的目的及一般方法	80
4-2 定容过程	82
4-3 定压过程	83
4-4 定温过程	89
4-5 绝热过程	90
4-6 多变过程	95
*4-7 非稳态流动过程	107
思考题	113
习题	114
第五章 热力学第二定律	120
5-1 热力学第二定律	120
5-2 可逆循环分析及其热效率	123
5-3 卡诺定理	127
5-4 熵参数、热过程方向的判据	130
5-5 熵增原理	139
5-6 熵方程	144
5-7 焓参数的基本概念 热量焓	150
*5-8 工质焓及系统焓平衡方程	159
*5-9 热力学温标	167
思考题	169
习题	170
第六章 实际气体的性质及热力学一般关系式	175
6-1 理想气体状态方程用于实际气体的偏差	175
6-2 范德瓦尔方程和 R-K 方程	177
6-3 对应态原理与通用压缩因子图	181
6-4 维里方程	185
6-5 麦克斯韦关系和热系数	186
6-6 热力学能、焓和熵的一般关系式	193
6-7 比热容的一般关系式	198
*6-8 通用焓图与通用熵图	200
*6-9 克劳修斯-克拉贝隆方程和饱和蒸气压方程	203
*6-10 单元系相平衡条件	206
思考题	209
习题	209
第七章 水蒸气	212

7-1 饱和温度和饱和压力	212
7-2 水的定压加热汽化过程	213
7-3 水和水蒸气的状态参数	216
7-4 水蒸气表和图	218
7-5 水蒸气的基本过程	223
*7-6 水及水蒸气热力性质程序简介	227
思考题	229
习题	229
第八章 气体与蒸汽的流动	232
8-1 稳定流动的基本方程式	232
8-2 促使流速改变的条件	235
8-3 喷管的计算	239
8-4 背压变化时喷管内流动过程简析	246
8-5 有摩阻的绝热流动	247
8-6 绝热节流	248
思考题	253
习题	254
第九章 压气机的热力过程	256
9-1 单级活塞式压气机的工作原理和理论耗功量	256
9-2 余隙容积的影响	258
9-3 多级压缩和级间冷却	260
9-4 叶轮式压气机的工作原理	262
*9-5 引射式压缩机简述	264
思考题	265
习题	265
第十章 气体动力循环	268
10-1 分析动力循环的一般方法	268
10-2 活塞式内燃机实际循环的简化	269
10-3 活塞式内燃机的理想循环	272
10-4 活塞式内燃机各种理想循环的热力学比较	279
*10-5 活塞式热气发动机及其循环	281
10-6 燃气轮机装置循环	283
10-7 燃气轮机装置的定压加热实际循环	288
*10-8 提高燃气轮机装置循环热效率的措施	290
*10-9 喷气式发动机简介	292
思考题	293
习题	294
第十一章 蒸汽动力循环装置	297

11-1 简单蒸汽动力装置循环——朗肯循环	297
11-2 再热循环	305
11-3 回热循环	307
*11-4 热电合供循环	313
*11-5 蒸汽-燃气联合循环	314
*11-6 蒸汽动力装置循环的焓分析	316
思考题	322
习题	323
第十二章 制冷循环	326
12-1 概况	326
12-2 压缩空气制冷循环	327
12-3 压缩蒸气制冷循环	331
12-4 制冷剂的性质	334
*12-5 其他制冷循环	335
12-6 热泵循环	338
思考题	339
习题	339
第十三章 湿空气	341
13-1 概述	341
13-2 相对湿度和含湿量	343
*13-3 相对湿度测定	348
13-4 湿空气的焓湿图	351
13-5 湿空气过程及其应用	355
思考题	362
习题	362
第十四章 化学热力学基础	365
14-1 概述	365
14-2 热力学第一定律在有化学反应系统内的应用	367
14-3 绝热理论燃烧温度	372
14-4 化学平衡与平衡常数	375
14-5 离解与离解度,平衡移动原理	378
14-6 化学反应方向判据及平衡条件	381
*14-7 热力学第三定律,熵的绝对值	387
思考题	389
习题	390
附录	391
附表1 各种单位制常用单位换算	391

附表 2 一些常用气体的摩尔质量和临界参数	393
附表 3 低压时一些常用气体的比热容	394
附表 4 几种理想气体的真实摩尔定压热容公式	396
附表 5 理想气体的平均比定压热容	397
附表 6 理想气体的平均摩尔定压热容	399
附表 7 气体的平均比定压热容的直线关系式	401
附表 8 空气的热力性质	402
附表 9 气体的热力性质	409
附表 10 氨(NH ₃)饱和液和饱和蒸气的热力性质	413
附表 11 过热氨(NH ₃)蒸气的热力性质	415
附表 12 氟里昂 134a 的饱和性质(温度基准)	418
附表 13 氟里昂 134a 的饱和性质(压力基准)	420
附表 14 过热氟里昂 134a 蒸气的热力性质	422
附表 15 0.1 MPa 时饱和空气的状态参数	427
附表 16 一些物质在 25 ℃ 时的燃烧焓 ΔH_C^0	429
附表 17 一些物质的标准生成焓、标准吉布斯函数和 25 ℃、100 kPa 时的绝对熵	430
附表 18 一些反应的平衡常数 K_p 的对数(lg)值	432
主要参考文献	433
部分题目答案	434

绪 论

0-1 热能及其利用

能源是人类社会不可缺少的物质基础之一,人类社会的发展史与人类开发利用能源的广度和深度密切相连。

所谓能源,是指提供各种有效能量的物质资源。自然界中可被人们利用的能量主要有煤、石油等矿物燃料的化学能以及风能、水力能、太阳能、地热能、原子能等。其中风能和水利能是自然界以机械能形式提供的能量,其他则主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用,可见能量的利用过程实质上是能量的传递和转换过程。据统计,世界上经过热能形式而被利用的能量平均超过 85%,我国则占 90% 以上,因此热能的开发利用对人类社会的发展有着重要意义。

热能的利用通常有下列两种基本形式:一种是热利用,如在冶金、化工、食品等工业和生活上的应用;另一种是热能的动力利用,即把热能转化成机械能或电能,为人类社会的各方面提供动力等。18 世纪中叶以后,蒸汽机的发明实现了热能大规模、经济地转换成机械能,使工业生产、科学技术和人们的生活有了突飞猛进的变化。

在当今科技条件下,利用得最多的能源是燃料的化学能。通过燃烧,燃料的化学能转换成热能,再将热能转换成机械能或电能供人们使用。20 世纪 60 年代以来,人们已开始把原子能内部蕴藏的巨大能量通过裂变反应释放出来,加以和平利用。目前,世界上已有包括中国在内的数十个国家的数百座核电厂正在源源不断地输出电力。此外,人们也在努力地把太阳能、地热能等转化为动力,供人们利用。热能通过热能动力装置转换为机械能的效率较低,即使是当代最先进的大型蒸汽动力装置的热效率也只稍超过 40%。因此,人们一直在寻求使热能或燃料化学能直接转换为电能的方法,如磁流体发电、太阳能电池、燃料电池等。

能源的开发利用一方面为人类社会的发展提供了必需的能量,另一方面也造成了对自然环境的破坏和污染。与能源开发利用密切相关的温室效应、酸雨、核废料辐射等对地球的生态系统造成了严重威胁,因此人们正以极大热情关注

节能、可再生能源的开发等,努力在满足人类社会对能量需求的同时不破坏或少破坏自然环境,实现可持续发展,为后代留下良好的生存空间。

热力学是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。工程热力学是热力学的工程分支,是在阐述热力学普遍原理的基础上,研究这些原理的技术应用的学科,它着重研究的是热能与其他形式能量(主要是机械能)之间的转换规律及其工程应用。掌握工程热力学的基本原理,必将为能源、动力、化工及环境工程等领域内的深入研究打下坚实的基础。

0-2 热力学发展简史

人类的生产实践和探索未知事物的欲望是科学技术发展的动力。热现象是人类最早广泛接触到的自然现象之一,但是直到18世纪初,在欧洲,由于煤矿开采、航海、纺织等产业部门的发展,产生了对热机的巨大需求,才促使热学的发展得到积极的推动。1763~1784年间,英国人瓦特(James Watt, 1736—1819)对当时用来带动煤矿水泵的原始蒸汽机作了重大改进,且研制成功了应用高于大气压的蒸汽和配有独立凝汽器的单缸蒸汽机,提高了蒸汽机的热效率。此后,蒸汽机为纺织、冶金、交通等部门广泛采用,使生产力有了很大的提高。

蒸汽机的发明与应用,刺激、推动了热学方面的理论研究,促成了热力学的建立与发展。1824年,法国人卡诺(Sadi Carnot 1796—1832)提出了卡诺定理和卡诺循环,指出热机必须工作于不同温度的热源之间,并提出了热机最高效率的概念,这在本质上已阐明了热力学第二定律的基本内容。但是,卡诺用当时流行的热质说作为其理论的依据,因而虽然他的结论是正确的,但证明过程却是错误的。在卡诺所做工作的基础上,1850~1851年间克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)和汤姆逊(William Thomson, 即开尔文 Lord Kelvin, 1824—1907)先后独立地从热量传递和热转变成功的角度提出了热力学第二定律,指明了热过程的方向性。

在热质说流行的年代,一些研究者用实验事实驳斥了其错误,但由于没有找到热功转换的数量关系,他们的工作没有受到重视。1842年,迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)提出了能量守恒原理,认为热是能量的一种形式,可以与机械能相互转换。1850年,焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)在他的关于热功相当实验的总结论文中,以各种精确的实验结果使能量守恒与转换定律,即热力学第一定律得到了充分的证实。能量守恒与转换定律是19世纪物理学的最重要发现。1851年,汤姆逊把能量这一概念引入热力学。

热力学第一定律的建立宣告第一类永动机(即不消耗能量的永动机)是不可能实现的。热力学第二定律则使制造第二类永动机(只从一个热源吸热的永动

机)的梦想破灭。这两个定律奠定了热力学的理论基础。

热力学理论促进了热动力机的不断改进与发展,而人类生产实践又不断为热力学的前进提供新的驱动力。1906年,能斯特(Walter Nernst, 1869—1941)根据低温下化学反应的大量实验事实归纳出了新的规律,并于1912年将之表述为绝对零度不能达到原理,即热力学第三定律。热力学第三定律的建立使经典热力学理论更趋完善。1942年,凯南(Joseph Henry Keenan, 1900—1977)在热力学基础上提出有效能的概念,使人们对能源利用和节能的认识又上了一个台阶。近代能量转换新技术,如等离子发电、燃料电池等及1974年人们确定了作为常用制冷剂的氯氟烃物质CFC和含氢氯氟烃物质HCFC与南极臭氧层空洞的联系等,向热力学提出了新的课题。热力学理论将在不断解决新课题中发展。

0-3 工程热力学的主要内容及研究方法

工程热力学的研究对象主要是能量转换,特别是热能转化成机械能的规律和方法,以及提高转化效率的途径,以提高能源利用的经济性。它的主要内容包括:

(1) 基本概念与基本定律,如热力系统、状态参数、平衡态、热力学第一定律、热力学第二定律,等等。这些基本概念和基本定律是全部工程热力学的基础。

(2) 能量的转化过程特别是热能转化为机械能是由工质的吸热、膨胀、排热等状态变化过程实现的,因此过程和循环的分析研究及计算方法是工程热力学的重要内容。

(3) 常用工质的性质。工质性质对其状态变化过程有着极重要的影响。

(4) 通常的热工设备中涉及到燃烧,而且近年来关于燃料电池等新型能量转换技术及有关环境问题的研究与化学过程有关,所以工程热力学中还包括化学热力学方面的有关内容。

热力学有两种不同的研究方法:一种是宏观的研究方法;另一种是微观的研究方法。

宏观研究方法的特点是以热力学第一定律、第二定律等基本定律为基础,针对具体问题采用抽象、概括、理想化和简化的方法,抽出共性,突出本质,建立分析模型,推导出一系列有用的公式,得到若干重要结论。由于热力学基本定律的可靠性以及它们的普适性,所以应用热力学宏观研究方法可以得到可靠的结果。但是,由于它不考虑物质分子和原子的微观结构,也不考虑微粒的运动规律,所以由之建立的热力学宏观理论并不能说明热现象的本质及其内在原因。

应用宏观方法研究的热力学叫做宏观热力学,也叫做经典热力学。工程热

力学主要应用宏观研究方法。

应用微观的研究方法的热力学叫做微观热力学,也称统计热力学。气体分子运动学说和统计热力学认为,大量气体分子的杂乱运动服从统计法则和概率法则,应用统计法则和概率法则的研究方法就是微观的研究方法。由于它是从物质是由大量分子和原子等粒子所组成的事实出发,将宏观性质作为在一定宏观条件下大量分子和原子的相应微观量的统计平均值,利用量子力学和统计方法,将大量粒子在一定宏观条件下一切可能的微观运动状态予以统计平均,来阐明物质的宏观特性,导出热力学基本规律,因而能阐明热现象的本质,解释“涨落”现象。在对分子结构作出模型假设后,利用统计热力学方法还可对这种物质的具体热力学性质作出预测。但统计热力学也有局限性,因为对分子微观结构的假设只能是近似的,因此尽管运用了繁复的数学运算,所求得理论结果往往不够精确。

工程热力学主要应用热力学的宏观方法,但有时也引用气体分子运动理论和统计热力学的基本观点及研究成果。随着近代计算机技术的发展,计算机愈来愈多地介入工程热力学的研究中,成为一种强有力的工具。

学好工程热力学首先要掌握学科的主要线索——研究热能转化为机械能的规律、方法以及怎样提高转化效率和热能利用的经济性。其次是在深刻理解基本概念的基础上运用抽象简化的方法抽出各种具体问题的本质,应用热力学基本定理和基本方法进行分析研究。第三是必须重视习题、实验等环节,通过习题等环节可以培养抽象、分析问题的能力,加深对基本概念的理解。