

高等学校教材

工程热力学

(第二版)

沈维道 郑佩芝 蒋淡安 合编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书系根据现行的高等工业学校《工程热力学教学大纲(草案)》(70~90学时),在1965年版本的基础上修订而成的。本书主要讲述热力学基本概念、基本定律,理想气体及实际气体的热力性质,各种热力过程和热力循环的分析与计算以及化学热力学基础知识等内容。本书保持了原有的体系,并发扬了原书简明扼要、便于自学的特点,同时根据现行教学大纲增删了一些内容,特别是针对本门课程存在的疑难点,加强了熵的导出、熵与第二定律关系、不可逆过程中熵变分析等内容的阐述。本书既注重加强基础理论,又注意联系工程实际,注意培养学生的能力。全书采用国际制单位。

本书经高等学校工科热工教材编审委员会审订作为动力机械及能源工程各专业教材,亦可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

工程热力学

(第二版)

沈维道 郑佩芝 蔡汝安 合编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海新华印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 16.5 插页 2 字数 398,000

1965年12月第1版

1983年10月第2版 1984年4月第4次印刷

印数 71,501—82,000

书号 15010·0540 定价 2.00元

前 言

本书是根据高等学校工科热工教材编审委员会审订的、四年制动力类专业试用的《工程热力学教学大纲(草案)》(70~90学时),在1965年版本的基础上修订而成。

本书保持了原有的体系,并发扬了原书精简扼要、便于自学的特点。同时,本书根据上述大纲增删了一些内容,对于原书中过于简略的地方进行了必要的补充和改进,增添了广义功、三相点、音速、热力学绝对温标等基本概念,以及开口系统能量方程一般表达式的导出、实际气体状态方程式、通用压缩因子图及其应用、燃气轮机装置最大循环净功与最佳增压比的分析等方面的内容。对于准平衡过程等一些比较抽象的热力学概念,多变过程能量关系规律的分析,理想气体比热理论及计算热量的各种方法等内容本书均有较多的论述。考虑到本门课程存在的疑难点,本书还特别对熵的导出、熵与第二定律的关系、不可逆过程中熵变的分析、熵增与机械能损失的关系等方面的内容给以详尽的阐述。此外,本书还增加了焓的简介、蒸汽动力装置循环的焓分析以及蒸汽-燃气联合循环,删去了原有的定容加热燃气轮机装置循环,并简化了定压加热内燃机循环。

本书对基本概念、基本定律、过程计算、循环分析等主要内容都作了较详细的论述,力求帮助读者能较好地掌握这些内容的基本原理及相互关系。对联系工程实际,提高设备热效率,提高经济性,从而节约能源的这类问题也论述得比较详细。

为了帮助学生复习所学的知识,以及培养学生独立思考和解

决问题的能力,每章都有例题、思考题和习题。编撰这些思考题和习题时,注意到使其具有启发性和灵活性。这些题目一部分可以作为学生的课外作业,一部分则可用作课堂讨论的题材。书中的主要概念、结论和公式在文下加了着重点或以黑字排印,以便于学生分清主次,抓住重点。

全书采用国际单位制。

本书未附水和水蒸汽性质的图和表,有关内容可参阅南京工学院庞麓鸣、陈军健编《水和水蒸汽热力性质图和简表》。

参加本书修订工作的有沈维道、郑佩芝、蒋智敏、张志良和吉留霖,蒋淡安因病未参加修订工作。全书由沈维道定稿。

本书承热工教材编审委员会委托苏长荪同志主审,严家骝、蔡祖恢同志也参加了审稿工作,最后并经编委会复审通过。

对编委会、审稿同志及各兄弟院校同志提出的很多宝贵的改进意见,谨致感谢。书中还会有不妥之处,希望读者给予帮助和指正。

对教学大纲上有单星标 * 和双星标 * * 的内容,本书也加上相应的星标。对于少量大纲上所不包括的内容,书中也加了双星标。根据教学大纲规定,带双星标的是作为高学时(90 学时)课程的加深、加宽内容,带单星标的是作为低学时(70 学时)课程的加深、加宽内容。

编 者

1983 年 9 月

主要符号

拉丁字母

A	截面积
A_J	热功当量
C	热容量; 浓度
c	质量比热; 速度
c'	容积比热
μc	摩尔比热
E	总储存能量
e	比储存能量
E_x, e_x	焓; 比焓
F	自由能 (亥姆霍兹函数); 力
f	比自由能
G	自由焓 (吉布斯函数)
g	比自由焓; 重力加速度
H	焓; 高度
h	比焓
HV	热值
ΔH°	标准燃烧焓
I	作功能力损失
K_c, K_p	化学平衡常数
k	波尔茨曼常数
M	马赫数
m	质量
\dot{m}	质量流量
N	1米 ³ 气体中分子数; 功率

N'	1千克气体中分子数
n	摩尔数; 千摩尔数; 多变指数
p	压力
p_b	大气压力; 背压
p_g	表压力
p_r	对比压力; 相对压力
p_v	真空度; 湿空气中水蒸汽分压力
Q	传热量
\dot{Q}	热流量
Q_v	定容热效应
Q_p	定压热效应
q	比热量
R	气体常数
R_m	通用气体常数
S	熵; 面积
s	比熵
T	绝对温度
t	摄氏温度
U, u	内能, 比内能
V, v	容积, 比容
V_m	摩尔容积, 千摩尔容积
W, w	过程功, 比过程功
W_t, w_t	技术功, 比技术功
w_i	比内部功
w_s	比循环净功

w'_0	实际循环比内部净功
α	干度
x_i	质量成份

y_i	摩尔成份
z_i	容积成份
κ	压缩因子; 高度

希腊字母

α	压力的温度系数; 抽气量; 离解度
β	容积的温度系数
γ	重度
ϵ	制冷系数; 压缩比; 化学反应程度
ϵ'	热泵系数
η_t	循环热效率
η_K	卡诺循环热效率
η_{oi}	相对内部效率
η_{oe}	相对有效效率
η_i	循环的内部效率
η_e	循环的有效效率

η_T	透平的相对效率
κ	绝热指数
κ_{av}	平均绝热指数
μ	分子量; 摩尔质量; 千摩尔质量; 定温压缩系数
ν_{0P}	临界压力比
π	增压比
ρ	密度; 预胀比
ϕ	温度的函数积分项
	$\int_0^T c_p \frac{dT}{T}$
φ	速度系数; 相对湿度

目 录

主要符号	1
绪论	1
0-1 热能及其利用	1
0-2 热力工程及热力学发展简史	1
0-3 工程热力学的研究对象及主要内容	3
0-4 热力学的研究方法	4
第一章 基本概念	8
1-1 热能在热机中转变成机械能的过程	8
1-2 工质,热源,热力系统	10
1-3 工质的热力学状态及其基本状态参数	12
1-4 平衡状态,状态方程式,坐标图	20
1-5 工质的状态变化过程	23
*1-6 广义功简介	30
1-7 热力循环	32
思考题	33
习 题	33
第二章 热力学第一定律	36
2-1 热力学第一定律的实质	36
2-2 内能	38
2-3 能量的传递和转化	43
2-4 焓	46
2-5 热力学第一定律的基本能量方程式	47
2-6 稳定流动能量方程式,开口系统能量方程一般表达式	50
2-7 能量方程式的应用	55
思考题	60
习 题	61
第三章 理想气体的性质	64

3-1 理想气体和实际气体	64
3-2 理想气体状态方程式	66
3-3 理想气体的比热	72
3-4 理想气体的内能和焓	81
3-5 理想气体的熵	84
3-6 理想气体混合物	90
思考题	102
习 题	103
第 四 章 理想气体的热力过程	106
4-1 研究热力过程的目的及一般方法	106
4-2 定容过程	108
4-3 定压过程	111
4-4 定温过程	115
4-5 绝热过程	118
4-6 多变过程	126
4-7 过程综述	131
*4-8 变比热可逆的绝热过程图表算法	136
思考题	140
习 题	141
第 五 章 热力学第二定律	144
5-1 循环	144
5-2 热力学第二定律	152
5-3 卡诺循环, 概括性卡诺循环	156
5-4 卡诺定理	165
5-5 多热源的不可逆循环	170
5-6 状态参数熵的导出	173
5-7 不可逆过程中熵变的分析	177
5-8 孤立系统熵增原理, 过程进行的方向	185
5-9 热量的作功能力, 孤立系熵增与作功能力的损失	191
*5-10 工质的作功能力, 焓	197
5-11 热力学绝对温标	199
**5-12 热力学第二定律和熵的统计意义	202

思考题	206
习 题	207
第 六 章 实际气体的性质,热力学一般关系式	211
6-1 理想气体状态方程用于实际气体的偏差	213
6-2 实际气体的状态方程式	216
6-3 用于实际气体时理想气体状态方程式的修正,通用压缩因子图	224
*6-4 热力学一般关系式	228
*6-5 热力学一般关系式在求实际气体 h, s 等函数时的应用	240
思考题	244
习 题	244
第 七 章 水蒸汽	246
7-1 饱和温度和饱和压力	246
7-2 水的定压加热、汽化过程	248
7-3 水的三相点	252
7-4 水和水蒸汽状态参数	255
7-5 水蒸汽表和图	259
7-6 水蒸汽的基本过程	264
*7-7 克拉贝隆-克劳修斯方程式	269
思考题	271
习 题	271
第 八 章 气体和蒸汽的流动	274
8-1 稳定流动的基本方程式	274
*8-2 音速	277
8-3 促使流速改变的条件	280
8-4 喷管的计算	284
*8-5 有摩阻的绝热流动	295
*8-6 绝热滞止	297
8-7 绝热节流	299
8-8 流动混合	304
思考题	306

习 题	307
第九章 压气机的热力过程	308
9-1 单级活塞式压气机的工作原理	308
9-2 单级活塞式压气机所需的功	310
9-3 余隙容积的影响	313
9-4 多级压缩和级间冷却	316
9-5 叶轮式压气机的工作原理	320
**9-6 引射式压缩器简述	324
思考题	324
习 题	325
第十章 活塞式内燃机循环	327
10-1 概说	327
10-2 汽油机实际工作循环和理想循环	328
10-3 柴油机的实际工作循环和理想循环	333
10-4 活塞式内燃机各种理想循环的比较	341
*10-5 二冲程活塞式内燃机的循环	344
*10-6 增压式内燃机及其循环	345
**10-7 活塞式热气发动机及其循环	347
思考题	349
习 题	350
第十一章 燃气轮机装置循环	352
11-1 定压加热理想循环	354
11-2 定压加热实际循环	359
11-3 定压加热回热循环	363
**11-4 提高热效率的其他途径	366
11-5 喷气式发动机及其循环简介	368
思考题	371
习 题	372
第十二章 蒸汽动力装置循环	374
12-1 水蒸汽作为工质的卡诺循环	374
12-2 简单蒸汽动力装置循环——朗肯循环	376

12-3	再热循环	387
12-4	回热循环	389
12-5	热电合供循环	397
12-6	应用高参数蒸汽的优点	399
**12-7	两汽循环	400
*12-8	蒸汽-燃气联合循环	405
**12-9	蒸汽动力装置循环的焓分析	406
	思考题	416
	习题	417
第十三章 制冷循环		420
13-1	制冷装置的理想循环——逆向卡诺循环	420
13-2	压缩空气制冷循环	421
13-3	压缩蒸汽制冷循环	425
*13-4	汽流引射压汽式制冷装置	430
*13-5	吸收式制冷装置	432
	思考题	433
	习题	433
第十四章 湿空气		435
14-1	概述	435
14-2	绝对湿度和相对湿度	437
14-3	湿空气的状态参数	439
14-4	湿空气的焓-湿图($h-d$ 图)	442
14-5	湿空气的过程及应用举例	445
	思考题	449
	习题	450
第十五章 化学热力学基础		451
15-1	热力学第一定律应用于化学反应, 可逆与不可逆化学反应	453
15-2	热力学第一定律在计算反应热效应时的应用——盖斯定律	461
15-3	应用生成焓计算反应热效应	463
*15-4	反应热效应和温度的关系——基尔希霍夫定律	466
*15-5	绝热理论燃烧温度的计算	469

15-6	化学平衡与平衡常数	472
15-7	离解与离解度, 平衡移动原理	478
*15-8	热力学第二定律在化学过程上的应用, 反应方向的判据与平衡的条件, 最大有用功	483
**15-9	平衡常数与最大有用功的关系	491
**15-10	热力学第三定律, 熵的绝对值	492
	思考题	494
	习题	495

附录

附表 1	各种单位制常用单位换算表	497
附表 2	低压时一些气体的热力特性	498
附表 3-1	气体的真实定压摩尔比热公式[SI]	499
附表 3-2	气体的真实定压摩尔比热公式[公制]	499
附表 4	气体的平均定压质量比热[SI]	500
附表 5	气体的平均定压质量比热[公制]	501
附表 6	气体的平均定压摩尔比热[SI]	502
附表 7	气体的平均比热(直线关系式)[SI]	503
附表 8	空气的热力性质表[SI]	503
附表 9	1bar 时的饱和空气状态参数表	505
附表 10	物质在 1atm、25°C 下的燃烧焓 ΔH°	508
附表 11	物质在 1atm、25°C 下的生成焓 Δh_f° , 生成吉布斯函数 Δg_f° 及绝对熵 S_M°	508
附表 12	气体的热焓 h_T	509
附表 13	平衡常数 K_p 的对数(log)值	510
	主要参考书	511
	索引	513
附图 1	氨的温-熵图[公制]	
附图 2	湿空气 $h-d$ 图[SI]	
附图 3	湿空气 $h-d$ 图[工程制]	

绪 论

§ 0-1 热能及其利用

自然界中可被人们利用的能源主要有煤、石油等燃料的化学能,以及风能、水力、太阳能、地热、原子核能等等。在这些能源中,除风能和水力是以机械能的形式直接被利用以外,其他各种能源或是直接以热能的形式存在,或是经过燃烧反应、原子核反应等,使能量先转化成为热能的形式,然后再予以利用。所以人们从自然界获得的能源,其主要形式是热能。

热能的利用通常有下列两种基本形式:

(1) 热能的动力利用。在十八世纪以前,人类所利用的动力主要是人力、畜力以及风车、水轮等。十八世纪中叶以后,蒸汽机的发明首先实现了热能转化成机械能,使工业生产和科学文化得到了高速度的发展。所以,热能的动力利用是现代工业和科学文化的基础。现代大型热力发电厂中使热能大量地转化成为动力。飞机、船舶、火车也都是以燃料燃烧所发生的热能作为动力源。

(2) 热能的直接利用。热能可直接用于冶金、化工等生产过程中的加热,用于烘干、供暖等方面,其数量上也相当可观。

节约能源消耗,提高热能利用率,开发新能源是发展社会主义农业生产,实现我国四个现代化的一个重要条件。

§ 0-2 热力工程及热力学发展简史

当社会生产力发展到一定水平的时候,生产上出现了应用动力机的需要与可能,这是促成热动力机发明的根本因素和动力。在十八世纪初期,由于煤矿开采工业对动力抽水机的需要,最初在英

国出现了带动往复水泵的原始蒸汽机。1763~1784年间，英国瓦特对当时的原始蒸汽机作了巨大改进，且研制成功了应用高于大气压力的蒸汽和有独立凝汽器的单缸蒸汽机。此后蒸汽机为纺织、冶金等工业普遍所采用，使生产力得到了很大的提高。以后，蒸汽机又被不断加以改进。到了十九世纪初，发明了以蒸汽机作为动力的铁路机车和船舶。

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年卡诺提出了卡诺定理与卡诺循环，发现了热转变为机械能的根本条件，即必须有温度不同的热源与冷源，这在本质上说出了热力学第二定律。1840~1851年间，迈耶、焦尔等人建立了热力学第一定律，即能量守恒及其转换定律在热力学上的表现。这定律以后成为热力学以及热工计算最根本的依据。

恩格斯认为能量守恒及其转换定律最主要的是发现了各种运动形态可以互相转换这一客观规律，认为这一定律是辩证唯物主义在自然科学方面的重要基础之一。以后恩格斯建立了辩证唯物主义关于物质及其运动的根本观点：物质与运动是不可分割的，没有不运动的物质，也没有非物质的运动，各种形态的运动可以互相转化。

在卡诺所作研究的基础上，1850~1851年间克劳修斯和汤姆逊先后提出了热力学第二定律。由于热能（物质分子等粒子杂乱运动的能量）与机械能等其他能量本质上的不同，因此，任何热过程都具有一定的方向性。热力学第二定律本质上是指明热过程方向性的定律。

热力学第一定律和第二定律的发现标志着热力学的建立。这两个定律以及一些其他基本概念构成了热力学的基础。热力学的建立与理论研究上的成就，反过来又促进了热动力机的不断改进

与发展。

到了十九世纪后半期，蒸汽机已经不能满足工业生产对动力的巨大需要。十九世纪末发明了汽轮机，它具有适于应用高参数蒸汽、高效率、大功率等主要优点，成为现今热力发电厂最主要的动力设备。汽轮机的发明与应用，对工程热力学的发展提供了新的内容，促进了对高参数蒸汽的性质、气体与蒸汽及其流动等问题的研究。

随着生产不断地发展，在十九世纪末期还发明了内燃机，因为它具有重量轻、热效率较高等优点，所以，以后成为汽车、飞机、船舶、机车等交通运输工具的主要动力机。在发明内燃机的同时，也发展了对内燃机热力过程和热力循环，以及对提高热效率的研究。

最近二、三十年中，燃气轮机已经发展并改进成为适合实际应用的一种重要的热动力设备，特别是普遍应用于燃气涡轮喷气推进式的飞机。随之，在热力学中也发展了相应的研究内容。

近年来出现了能量直接转化的新技术，热力学上也出现了相应的研究课题，例如化学能直接转化成为电能的燃料电池、热能直接转化成为电能的温差电池和磁流体发电等。

§0-3 工程热力学的研究对象及主要内容

工程热力学的研究对象主要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。无论是对于热能转化成为机械能或电能的热动力设备，或是对于热能直接利用于工艺上的加热过程，都要研究如何提高热能利用的效率，减少热能利用中的损失，以提高热能利用的经济性。

工程热力学的主要内容包括：

(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、第二定律、卡诺循环、卡诺定理等。这些基本概

念和基本定律是全部工程热力学的基础。

(2) 因为热能转化成为机械能通常是经过工质在热动力设备中的吸热和膨胀作功等状态变化过程，以及由这些过程所组成的循环而实现的，所以这些过程和循环的分析研究及其计算方法是工程热力学的主要内容之一。

(3) 常用工质(如气体和水蒸汽)的性质。因为在分析计算工质的状态变化过程和循环时必须应用到工质的性质。

(4) 通常热工设备中还牵涉到燃料的燃烧、化学平衡、燃烧产物的分解等物理化学方面的问题，以及近年来关于燃料电池的研究，所以工程热力学中还包括化学热力学方面的有关内容。

计算机计算技术的应用，改进了热力学计算方法及提高了计算的准确性。例如，应用计算机便于根据准确度高但极为复杂的状态方程式来编制水蒸汽性质表。又例如，应用计算机便于计算复杂循环的最佳参数。

§ 0-4 热力学的研究方法

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、第二定律等少数基本定律作为总的依据（这些定律最初也是根据实际经验得到的），并根据各项问题的具体条件，推导出很多有用的公式，得到若干重要的结论。例如，根据工质的压力、温度、容积等宏观量的变化来计算工质在各种状态变化过程中所吸收的热量，所作出的膨胀功，以及求得各种循环热效率的公式。

由于热力学基本定律的可靠性以及它们对各种情况的普遍适用性，所以应用热力学宏观研究方法可以得到很可靠的结果。

应用宏观研究方法的热力学叫做宏观热力学，也叫做经典热

力学或唯象热力学。工程热力学主要应用宏观研究方法。

在热力学和工程热力学中,还普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法,例如:

将锅炉中的高温烟气以及各种可能的热源概括化,简化成为具有一定温度的抽象热源。

将空气、锅炉中的烟气、内燃机和燃气轮机的燃气等气体理想化为理想气体以便于计算,而仍可得到工程计算上必要的准确度。

将实际上都是不可逆的过程理想化成为可逆过程,以便于分析计算,计算结果有需要时可按实际上的不可逆程度予以校正。可逆过程又可作为实际过程的理想化目标,因在可逆过程中不发生机械能的损失。

简化、抽象化的思维发展过程通常也就是抽出共性,略去细节,突出本质,突出主要矛盾的过程。一切科学的正确的抽象都能更深刻、更正确、更完全地反映客观事物。例如,任意闭合循环这一概念,能够突出地表明经过循环使热能转化成为机械能的最根本原理,而同时略去了各种具体循环的各别特点和细节,在分析热动力循环的最根本原理时是有用的。

然而,什么时候可以应用理想化和简化方法,应用到怎样程度,则要看分析研究的具体目的和所要求的准确度而定。例如,目的在于分析研究什么是决定各种实际循环热效率最主要的热力学因素时,可以把实际循环理想化成为可逆的闭合的理想循环。但如果目的在于详细计算实际循环,如进行燃气轮机装置设计的热计算,则必须按照实际循环中的各实际过程作详细的计算,这时工质(燃气)也必须按混合气体计算,但这混合气体仍可近似作为理想气体。

热力学宏观研究方法也有它的局限性和缺点。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,所以根据热力