

内 容 提 要

本书是根据高等工业学校四年制动力类专业《工程热力学教学大纲》(草案)(70~90学时),在1980年版的基础上修订而成的。

全书共四部分:热力学基本定律;工质的热力性质;热力过程及热力循环;化学热力学基础。与我国现行的同类型教材相比,本书体系变动较大。本书注意加强理论基础,对如何运用热力学理论解决实际问题的方法给予了较多的注意。根据教学要求,本书在第一版的基础上对内容作了进一步的精选、调整,基本内容更加突出。内容阐述简明扼要,便于自学。各章均附有例题、思考题及习题。全书采用我国法定计量单位。

本书经高等学校工科热工教材编委会工程热力学编审小组审订,可作为热能动力、锅炉、汽轮机、工程热物理及能源工程等专业的教材,也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)

曾丹苓 敖 越 合编
朱克雄 李清荣

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 17.125 字数 411,000

1980年7月第1版 1986年5月第2版 1986年5月第1次印刷

印数 00,001—4,135

书号 15010·0727 定价 3.05元

序

本书是根据热工教材编审委员会审订的高等工业学校四年制动力类各专业的《工程热力学教学大纲》(草案)(70~90学时),在1980年版本的基础上修订而成的。

本书保持了原有的体系。在编写中注意加强理论基础,注重理论的系统性和严密性,力图使理论紧密联系实际,同时强调热力学研究方法的特点,使学生有较为坚实的理论基础和分析解决工程问题的能力。在修订版中,根据教学实际情况,对内容作了进一步的精选和调整,以达到突出基本内容,减轻学生负担的目的。在基本理论的阐述上,力求简明扼要,便于学生自学。在内容的组织安排上,注意了各部分的相互联系和内容的有层次的发展。对某些不属于教学基本要求的内容作了较大的变动。例如,在修订版中删去了原书中第十五章能量直接转换和其它动力循环,对第二部分工质的热力性质及第四部分化学热力学的内容也作了一些精简。同时,为加强工程实际的联系,保留并适当充实了第三部分热力过程及热力循环的某些内容。此外,在内容的叙述和文字上也力求浅显易懂,以适应初学者的需要。

全书内容分为四大部分。第一部分着重阐明热力学的基本概念和基本定律;第二部分集中研讨工质的热力性质,其中除对理想气体及水蒸气的性质进行了具体介绍外,也论述了热力学理论在物质热力性质研究中的指导作用;第三部分分析了工程上常见的一些热力过程和热力循环;第四部分简单介绍了热力学基本定律在化学反应系统中的应用。

为了适应不同专业教学的需要,使教与学能有所取舍,除基本

教学内容外,书中还编入了一些在教学上可供选择的部分,这些内容均用*号标出。

为帮助学生复习,书中各章均配有一定数量的例题、思考题及习题。本书未附详细的水和水蒸气性质表和图,有关内容可参阅南京工学院庞麓鸣、陈军健编《水和水蒸气热力性质图和简表》。

全书采用“中华人民共和国法定计量单位”,并附有各种单位的换算公式。

本书由华中工学院罗干辉教授主审,并经热工教材编委会工程热力学编审小组复审通过。在此,对编委会、主审人、参加审稿的同志及对本书修订提供宝贵意见和建议的各兄弟院校,谨致感谢。

参加本书编写和修订工作的有重庆大学曾丹苓、敖越、朱克雄、李清荣,由曾丹苓担任主编。由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

1985年7月

符 号 表

拉 丁 字 母

A	面积; 功热当量
a	加速度; 声速
A_i	可用能损失
a_i	比可用能损失
C	摩尔热容
C'	容积热容
c	质量比热容; 流速
E	总储存能量
e	比储存能量
E_x	焓
e_x	比焓
F	自由能(亥姆霍兹函数)
f	比自由能
G	自由焓(吉布斯函数)
g	比自由焓; 重力加速度
ΔG_f°	标准生成自由焓
H	焓
h	比焓
ΔH_b°	标准燃烧焓
ΔH_f°	标准生成焓
K_e	化学平衡常数
K_p	化学平衡常数
k	比热容比; 绝热指数
L	长度
M	摩尔质量; 马赫数

m	质量
$\dot{m}$	质量流量(率)
N	功率
n	摩尔数; 多变指数
p	<u>绝对压力</u>
p_b	<u>大气压力</u>
p_θ	<u>表压力</u>
p_v	<u>真空度</u>
p_s	<u>饱和压力</u>
Q	总热量
$\dot{Q}$	热流率
Q_u	<u>热量的可用能</u>
q	<u>比热量</u>
R	气体常数
R_M	通用气体常数
r	潜热
S	熵
S_M^Δ	标准摩尔绝对熵
s	比熵
T	热力学绝对温度
t	摄氏温度
T_s, t_s	沸点温度(饱和温度)
U	内能
u	比内能
V	容积
V_M	摩尔容积
v	比容

W	容积变化功;循环净功
w	比容积变化功;比循环净功
W_{net}	净功
w_{net}	比净功
W_t	技术功
w_t	比技术功
x	干度
x_i	混合物的质量成分
y_i	混合物的摩尔成分
Z	压缩因子
z	高度

希腊字母

α_p	热膨胀系数
β_s	绝热压缩系数
β_T	定温压缩系数
ε	制冷系数; 气体循环压缩比; 热湿比
η	效率
η_i	热效率
η_o	卡诺循环热效率
$\eta_{o,s}$	压气机绝热效率
η_N	喷管效率
η_{rl}	汽轮机和燃气轮机相对内效率
η_{ex}	热力学第二定律效率(烟效率)
κ	压力的温度系数
λ	气体循环定容增压比
μ	化学势
μ_J	绝热节流系数
π	压气机增压比
ρ	密度; 内燃机循环预胀比

σ	表面张力
φ	喷管的速度系数
ϕ	相对湿度
ω	含湿量

角注符号

a	湿空气中干空气的参数
c	临界点参数
cr	临界流动状况下的参数
$c.v$	控制容积(开系)
f	液体的参数
g	气体的参数
i	序号
in	进口参数
$i.s$	孤立系统
j	序号
M	每摩尔物质的物理量
0	周围环境的参数
out	出口参数
p	定压过程的物理量
r	对比参数
s	定熵过程的物理量; 固体的参数; 饱和状态的参数
T	定温过程的物理量
v	定容过程的物理量
B	锅炉
C	压缩机
con	冷凝器
P	管道
T	汽轮机; 燃气轮机
$*$	滞止状态下的参数

目 录

符号表	1
绪论	1
0-1 热能及其利用	1
0-2 能量转换装置的工作过程	3
0-3 工程热力学研究的对象及主要内容	8
0-4 法定计量单位简介	10
思考题	14

第一部分 热力学基本定律

第一章 基本概念及定义	15
1-1 热力学	15
1-2 热力系	19
1-3 热力系的描述	20
1-4 基本状态参数	23
1-5 状态方程式, 状态参数坐标图	34
1-6 热力过程及热力循环	37
思考题	43
习题	43
第二章 能量与热力学第一定律	16
2-1 热力学第一定律的实质	46
2-2 功	47
2-3 热	54
2-4 循环过程热力学第一定律的表达式	55
2-5 热力学第一定律的推论, 状态参数内能	56
2-6 热力系与外界的物质交换	59
2-7 热力学第一定律的表达式	62
2-8 能量方程式的应用	69

思考题	75
习题	76
第三章 熵与热力学第二定律	79
3-1 概述	79
3-2 热过程的不可逆性	80
3-3 可逆过程	82
3-4 热力学第二定律的几种表述	84
3-5 卡诺定理	87
3-6 热力学第二定律推论 I, 热力学温度标尺	90
3-7 卡诺循环	95
3-8 热力学第二定律推论 II, 克劳修斯不等式	97
3-9 热力学第二定律推论 III, 状态参数熵	100
3-10 热力学第二定律推论 IV, 熵增原理	102
3-11 热力学第二定律的表达式, 熵方程	108
3-12 热力系的可用能	112
*3-13 热力学第二定律的统计解释	117
3-14 热力学第二定律的局限性, “热寂说”批判	120
思考题	121
习题	122

第二部分 工质的热力性质

△ 第四章 一般热力学关系	125
4-1 二元函数的数学性质	126
4-2 基本热力学关系	127
4-3 热系数	131
4-4 熵、内能和焓的一般关系式	131
4-5 比热容和绝热节流系数的一般关系式	140
思考题	144
习题	145
第五章 气体的热力性质	147
5-1 理想气体性质	147

5-2	理想气体的比热容及参数计算	151
5-3	实际气体状态方程	158
*5-4	根据实验数据组成状态方程式的方法	164
*5-5	对比态方程,通用压缩因子图	166
	思考题	171
	习题	171
第六章	相转变及相平衡	174
6-1	纯物质的相图及相转变	174
6-2	平衡判据	179
6-3	单元系相平衡条件	182
*6-4	平衡的稳定性	186
6-5	克劳修斯-克拉贝龙方程式	188
*6-6	曲界面的气-液平衡	191
	思考题	199
	习题	199
第七章	水蒸气	201
7-1	概述	201
7-2	定压下水蒸气的发生过程	202
7-3	水蒸气的状态方程式及比热容	206
7-4	水和水蒸气的热力性质表	209
7-5	水蒸气的焓-熵图	212
7-6	水蒸气图表的应用	215
	思考题	221
	习题	222
第八章	理想气体混合物及湿空气	224
8-1	混合物的成分、摩尔质量及气体常数	225
8-2	分压定律与分容积定律	227
8-3	理想气体混合物的内能、焓、比热容和熵的计算	230
8-4	湿空气及其状态参数	236
8-5	干-湿球温度计	242
8-6	焓-湿图	244
8-7	湿空气过程	246

思考题	254
习题	255

第三部分 热力过程及热力循环

第九章 气体的热力过程 258

9-1 概述	258
9-2 四种典型热力过程的分析	261
9-3 多变过程	275
9-4 热力过程的热力学第二定律分析(焓分析)举例	285
思考题	289
习题	290

第十章 气体与蒸汽的流动 293

10-1 概述	293
10-2 稳定流动的基本方程	293
10-3 定熵流动的基本特性,声速与马赫数	296
10-4 气体在喷管和扩压管中的定熵流动	303
10-5 喷管中气体的流速和流量	306
*10-6 理想气体定熵流动表解法	316
10-7 水蒸气的定熵流动	321
10-8 工作条件变化时喷管内流动过程的分析	323
10-9 有摩擦的绝热流动	326
10-10 绝热节流	327
X *10-11 稳定流动的一般规律	331
思考题	338
习题	339

第十一章 气体的压缩 340

11-1 压气机的工作原理	340
11-2 压缩过程的热力学分析	343
11-3 活塞式压气机余隙容积的影响	348
11-4 多级压缩及中间冷却	350
11-5 引射器	355

思考题	356
习题	356
第十二章 分析动力循环的一般方法	358
12-1 概述	358
12-2 热力学第一定律分析方法	358
12-3 可逆循环的热力学分析	360
12-4 热力学第二定律分析方法	363
12-5 两种分析方法的运用和比较	368
思考题	369
第十三章 蒸汽动力循环	370
13-1 概述	370
13-2 蒸汽卡诺循环	371
13-3 朗肯循环	372
*13-4 蒸汽动力装置热力学分析举例	375
13-5 蒸汽参数对循环热效率的影响	385
13-6 蒸汽再热循环	389
13-7 回热循环	392
13-8 热电循环	403
13-9 工质性质对循环热效率的影响	404
思考题	408
习题	408
第十四章 气体动力循环	411
14-1 燃气轮机装置定压加热理想循环	411
*14-2 考虑不可逆损失时燃气轮机装置定压加热循环的分析	416
14-3 具有回热的燃气轮机装置循环	422
14-4 活塞式热气发动机理想循环	425
14-5 往复式活塞式内燃机理想循环	428
14-6 喷气式发动机简介	436
14-7 蒸汽-燃气联合循环	438
思考题	439
习题	440

第十五章 制冷循环	442
15-1 逆卡诺循环	442
15-2 空气制冷循环	444
15-3 蒸气压缩制冷循环	449
15-4 蒸气喷射制冷循环	456
15-5 吸收式制冷装置循环	457
15-6 热泵供热循环	459
思考题	461
习题	461

第四部分 化学热力学基础

第十六章 化学热力学基础	464
16-1 概述	464
16-2 热力学第一定律在化学反应中的应用	465
16-3 化学反应的功和热	467
16-4 赫斯定律	469
16-5 反应热效应与温度的关系——基尔霍夫定律	474
16-6 理论燃烧温度	478
16-7 热力学第二定律在化学反应中的应用	478
16-8 化学反应方向的判据	479
16-9 反应的最大功	480
16-10 化学平衡	484
*16-11 热力学第三定律	495
思考题	500
习题	501
附录	503
附录表 I 一些物质的临界参数	503
附录表 II 一些气体的摩尔质量、气体常数和低压下的比热容	503
附录表 III 理想气体摩尔热容公式	504
附录表 IV 气体的平均热容	505
附录表 V 饱和水与饱和蒸汽表	511

附录表 VI	未饱和水与过热蒸汽表	513
附录表 VII	饱和氨(NH_3)蒸气性质表	516
附录表 VIII	饱和氟里昂-12(CCl_2F_2)蒸气性质表	517
附录表 IX	气体动力函数表($k=1.4$)	518
附录表 X	物质在 1 atm、25°C 下的燃烧焓 ΔH_f°	519
附录表 XI	物质在 1 atm、25°C 下的生成焓 ΔH_f° , 生成吉布斯函数 ΔG_f° 及绝对熵 S_M°	519
附录表 XII	生成 $\text{H}_2\text{O}(g)$ 、 $\text{CO}(g)$ 及 $\text{CH}_4(g)$ 反应的平衡常数 K_p 及其对数值 $\lg K_p$	520
附录图 I	通用压缩因子图	521
主要参考书		522
索引		524

绪 论

0-1 热能及其利用

自然能源的开发和利用是人类走向繁荣的起点，而能源开发和利用的程度是生产发展的一个重要标志。所谓能源，是指为人类生产与日常生活提供各种能量和动力的物质资源。迄今为止，自然界中已为人们发现的可被利用的能源主要有：风能、水能、太阳能、地热能、海洋能、核能和燃料的化学能等。在这些能源中，除风能、水能和海洋潮汐能是以机械能的形式（指空气的动能和水的势能）提供给人们之外，其余各种能源都往往以热能的形式提供给人们。太阳以热辐射的方式向地球传送大量的热能；地热能可以将水加热成为热水或蒸汽以传送热能；煤、石油和天然气等的化学能，常通过燃烧转换为热能；核能无论通过裂变反应或聚变反应释放出来的能量，都是高温热能的形式。以上事实说明，人们从自然能源中获得能量的主要形式是热能。据统计，经过热能形式而被利用的能量，在我国占 90% 以上，世界其它各国也超过 85%。因此，热能的研究和利用对于整个人类的生产与生活有着重要的意义。各种能源与热能的转换以及热能的利用情况如图 0-1 所示。

热能利用有以下两种基本方式：一种是直接利用，即将热能直接用于加热物体，如烘干、蒸煮、采暖、熔化等等；另一种是间接利用，通常是指将热能转变为其它形式的能量，如机械能或者电能而加以利用，火力发电厂、车辆、船舶、飞机等的动力装置皆属此类。

直接用热能加热物体，为生产工艺或生活服务固然重要，然而间接使用热能，使之变为机械能或者电能的形式向人类提供动力

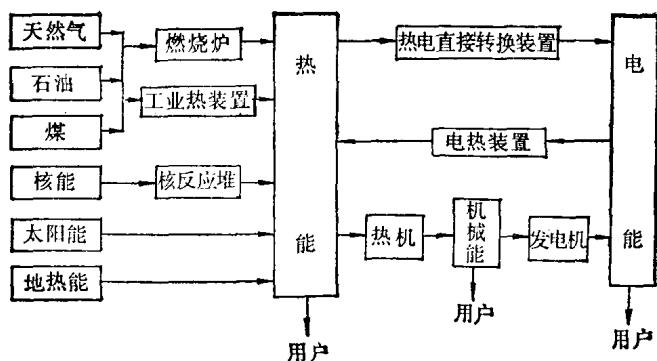


图 0-1

或电,其意义更为重要。特别是,由于电能具有传输和使用方便等许多优点,一般常将热能最终转变为电能的形式使用。对于一个国家而言,按人口平均的能量耗用水平,可直接反映其国民经济发展的水平、生产水平和科学技术水平。而在总的能量消耗中,用电比重的大小,则可以说明其能源使用效率的高低。

在十八世纪以前,能的主要来源是人力、畜力以及风力和水力等自然动力。十八世纪中叶出现了蒸汽机,实现了热能对机械能的转换,开创了使用矿物燃料能源的新途径。蒸汽机的广泛应用促进了工业的迅速发展,并促使人们对水蒸气和其它物质的热力性质作深入的研究,从而大大促进了热力学学科的形成和发展。随着工业的发展,人们对动力的要求日趋迫切,各种各样的热动力装置应运而生。十九世纪发明了蒸汽机、蒸汽轮机和内燃机,二十世纪又发明了燃气轮机、喷气发动机等,尤其是近年来核动力装置的利用,为人类开辟了利用能源的新纪元。在热力工程的发展过程中,同时也使热力学发展成一门成熟的广泛应用于各领域的科学。

在热能的间接利用中,能量的转换往往是能量利用的前提。各种热动力装置工作的实质,都是将热能转化为机械能,或再通过动

力机带动发电机将热能最终转换为电能的形式使用,即是说,采用热能 $\rightarrow$ 机械能,或热能 $\rightarrow$ 机械能 $\rightarrow$ 电能的间接利用方式。至于热能 $\rightarrow$ 电能的热电直接转换装置,它既可提高转换的效率,又可免去庞大的热力机械。例如,磁流体发电就是这种方式,它目前正处于积极试验研究之中,尚未能达到成熟的工业应用的阶段。

目前,各种热能动力装置仍然是为人类提供动力的主要形式。在动力需求日益增长的今天,如何开发新的能源,如何更有效地实现能量转换,这是摆在能量转换学科及力能工作者面前的一个十分迫切而又重要的课题。为了使热能更加有效、更加经济地转换为机械能或电能,研制出优良的热动力装置,这就需要掌握有关能量及其相互转换的规律的知识——即工程热力学的知识。

0-2 能量转换装置的工作过程

工程热力学是研究热能与其它形式能量相互转换规律的学科。在学习本课程的过程中,将要涉及各种能量转换装置,如蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置、喷气发动机以及制冷装置,等等。为了从这些装置中总结出能量转换的基本规律,更好地了解工程热力学所研究的内容,在本节中将简要地介绍一些主要热力设备的实际工作过程。

首先介绍一些常见的热能动力装置。

实现释放热能并将热能转换为机械能的一整套设备,称为热能动力装置。无论从我国或从世界范围来看,还是从现实或从发展的观点来看,在动力工业中,热能动力装置都占据着主要的地位。在可移动的动力装置(一般用作交通运输工具的动力机)中,绝大部分是各种型式的热能动力装置,而在固定式的动力装置(如发电厂)中,热力发电亦占主要地位,热力发电约占世界总发电量

的 80% 以上这一事实就说明了这一点。随着原子能发电比例的上升, 预计热力发电的比例还将增大。

本节简介的热能动力装置是: 内燃机、蒸汽动力装置、核能蒸汽动力装置、燃气轮机动力装置和喷气发动机等。

1. 内燃机的工作原理

这类热机的主要特点是燃料在气缸内燃烧, 通过活塞和曲柄连杆机构变往复运动为回转运动, 如汽油机、柴油机等。现以图 0-2 所示的汽油机为例, 说明其工作过程如下:

活塞下行时, 进气阀打开, 排气阀关闭, 雾化汽油与助燃空气的混合物被吸入缸内。

活塞上行时, 进、排气阀关闭, 使缸内气体受到压缩, 此为缸内气体压缩的过程。

电火花将燃料引燃后, 缸内气体的温度和压力迅速增高, 此燃烧过程可视作缸内气体吸热的过程。

高温高压气体推动活塞下行, 对外作功。对于缸内气体而言, 这是它的容积膨胀的过程。

活塞再次上行, 排气阀打开, 进气阀关闭, 作功后的废气被排出缸外。废气同时也带走了热量, 故可视作缸中气体的放热过程。

这样, 缸内的气体通过压缩、吸热、膨胀和放热四个过程, 周而复始地工作, 即可连续不断地将热能转换为机械能。

2. 蒸汽动力装置的工作原理

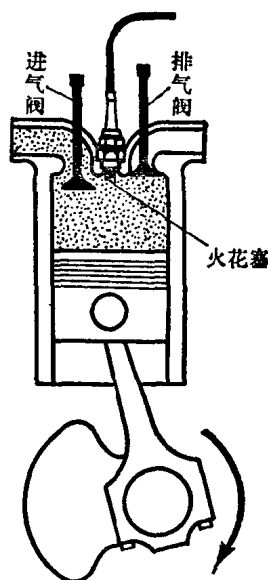


图 0-2

这类动力装置采用蒸汽轮机作原动机。蒸汽轮机的主要特点是它的转轮受蒸汽的作用力而直接产生回转运动，从而没有曲柄连杆机构。近代热力发电厂中绝大部分采用蒸汽动力装置，它的工作过程如 0-3 图所示。

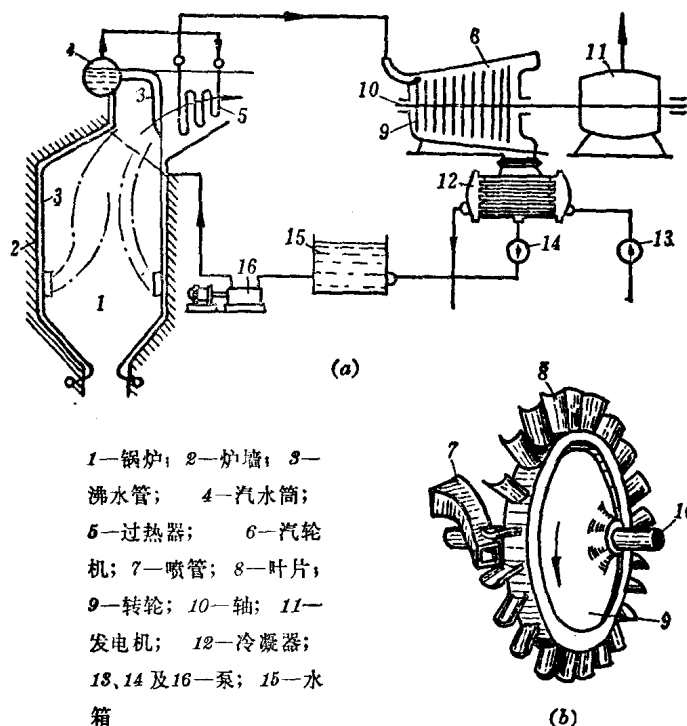


图 0-3

燃料在锅炉 1 中燃烧，产生大量的热能，并通过传热，使锅炉中的水变为蒸汽。由于此蒸汽的压力、温度远高于大气环境的压力与温度，故具有做功的能力。此过程为水和蒸汽的吸热过程。

压力、温度较高的蒸汽进入汽轮机 6，在流经汽轮机喷管 7 时，由于蒸汽降压膨胀而在喷管出口处形成一股高速气流。气流冲击转轮 9 上的叶片 8，使转轮转动并在转轴 10 上输出机械能，带