

高等学校试用教材

工 程 热 力 学

吉林工业大学热工教研室华自强等编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据一九七七年十二月教育部委托召开的高等学校工科基础课机械原理、机械零件、机械设计、工程热力学、传热学教材会议讨论的《工程热力学》(内燃力类)编写大纲编写的。

本书主要讲述热力学基本定律、热力过程和热力循环的分析计算以及⁴的热力性质等内容。除重点讲述热力学的基本理论及基本概念外,也注意实际问题,阐明热力分析的基本方法。此外,还通过燃烧反应的分析计算介绍⁵学热力学的基础知识。各章末均附有习题。

本书于一九七八年十一月召开了审稿会,由天津大学何志迈同志主审,参加审稿会的还有西安交通大学、上海交通大学、华南工学院、浙江大学、哈尔滨工业大学、华东石油学院、山东工学院和海军工程学院等院校的代表。本书可作为机械制造类内燃(燃气)动力装置各专业及其它相近专业的教材或教学参考书,亦可供有关工程技术人员参考。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日,上级同意恢复“高等教育出版社”。本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校试用教材

工 程 热 力 学

吉林工业大学热工教研室华自强等编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张12.5 插页1 字数302,000

1979年5月第1版 1985年4月第7次印刷

印数46,360—53,360

书号15010.0158 定价2.65元

目 录

前言	viii
本书所用的主要符号	ix
第一章 绪论	1
1-1 能的利用与生产力的发展	1
1-2 几种热力设备工作原理的简单介绍	3
1-3 工程热力学的研究对象及研究方法	8
1-4 工程热力学所用的单位制	9
第二章 气体的状态及状态方程式	12
2-1 热力系统	12
2-2 状态及状态参数	14
2-3 平衡状态	19
2-4 气体状态方程式	20
2-5 理想混合气体	24
习 题	29
第三章 功和热量	32
3-1 准静态过程	32
3-2 功	35
3-3 热量	40
3-4 熵	41
3-5 热力循环	44
习 题	46
第四章 热力学第一定律	48
4-1 热力学第一定律	48
4-2 内能	50
4-3 闭口系统能量方程式	53
4-4 开口系统能量方程式及稳定流动能量方程式	55

4-5	焓	63
4-6	开口系统能量方程式应用举例	65
	习 题	67
第五章	理想气体的内能、焓、熵和比热	69
5-1	比热的定义	69
5-2	理想气体的内能、焓和比热	72
5-3	理想气体的熵	81
5-4	理想混合气体的内能、焓和比热	84
	习 题	87
第六章	理想气体的热力过程	89
6-1	热力过程的分析	89
6-2	定容过程	90
6-3	定压过程	92
6-4	定温过程	93
6-5	绝热过程	94
6-6	多变过程	101
6-7	轴功的计算	106
	习 题	110
第七章	热力学第二定律	113
7-1	热机循环和制冷循环	113
7-2	热力学第二定律	117
7-3	可逆过程与不可逆过程	119
7-4	卡诺循环	122
7-5	卡诺定理	124
7-6	热力学温标	126
	习 题	129
第八章	熵	131
8-1	熵的性质	131
8-2	不可逆过程中熵的变化	135
8-3	熵增原理	141
8-4	不可逆过程中功的损失	144

8-5 最大有用功和烟	147
习 题	154
第九章 气体的流动	156
9-1 稳定流动的基本方程式	156
9-2 喷管截面的变化规律	158
9-3 气体的流速和临界流速	162
9-4 气体的流量和喷管截面积的计算	167
9-5 喷管效率	174
9-6 绝热滞止	175
9-7 合流	178
习 题	179
第十章 压气机的压气过程	181
10-1 压气机的压气过程	181
10-2 活塞式压气机的压气过程	186
10-3 多级压缩	190
10-4 压气机效率	193
习 题	195
第十一章 气体动力循环	197
11-1 活塞式内燃机的理想循环	197
11-2 燃气轮机装置循环	210
11-3 增压内燃机及其循环	223
11-4 自由活塞式发动机及其循环	225
11-5 喷气式发动机及其循环	227
11-6 活塞式热气发动机及其循环	229
习 题	232
第十二章 实际气体	233
12-1 实际气体的性质	233
12-2 范德瓦耳斯方程式	235
12-3 对比态方程	239
12-4 实际气体性质的近似计算	240
12-5 热力学关系式	243

12-6 绝热节流及焦耳-汤姆生系数	254
习 题	258
第十三章 水蒸汽及蒸汽动力循环	259
13-1 基本知识	259
13-2 水蒸汽的发生过程	260
13-3 水蒸汽热力性质表和图	266
13-4 水蒸汽的热力过程	268
13-5 蒸汽动力循环	275
习 题	281
第十四章 制冷循环	283
14-1 制冷系数及制冷能力	283
14-2 空气压缩制冷循环	286
14-3 蒸汽压缩制冷循环	291
14-4 蒸汽喷射制冷循环及吸收式制冷循环	296
14-5 制冷剂及其热力性质	300
习 题	303
第十五章 湿空气	305
15-1 湿空气的基本概念	305
15-2 绝对湿度、相对湿度和含湿量	307
15-3 湿空气的密度、气体常数及焓	311
15-4 湿空气的焓湿图	313
习 题	316
第十六章 化学热力学基础	317
16-1 燃烧反应	317
16-2 热力学第一定律在化学反应中的应用	321
16-3 理论燃烧温度	325
16-4 热力学第二定律在化学反应中的应用	327
16-5 化学平衡	330
16-6 离解和离解度	335
16-7 热力学第三定律	341
习 题	343

本书所用的主要符号

A	面积	T	热力学温度
c	声速	t	摄氏温度
c_p	定压比热容	U, u, u	内能、比内能及摩尔内能
c_v	定容比热容	V, v	容积及比容
C_p	定压摩尔热容	$\bar{v}$	流速
C_v	定容摩尔热容	W, w	膨胀功及单位质量物质作的膨胀功
d	含湿量	W_s, w_s	轴功及单位质量物质作的轴功
D	过热度	W_0, w_0	循环净功及单位质量物质作的循环净功
E, e	总能及比总能	$\dot{W}$	单位时间的轴功
F	力	x	质量成分
F	自由能	x	距离
G, g, g	自由焓、比自由焓及摩尔自由焓	y	摩尔成分
H, h, h	焓、比焓及摩尔焓	Z	离地高度
K	平衡常数	z	压缩因子
m	质量	希腊字母	
$\dot{m}$	质量流量		
M	分子量及千摩质量	α	离解度
n	千摩数	τ	增温比
n	多变指数	ε	压缩比
p	压力	ε	制冷系数
Q, q	吸热量及单位质量物质的吸热量	η	效率
$\dot{Q}$	单位时间的吸热量	η_t	热效率
R, R_m	气体常数及通用气体常数	κ	比热比或绝热指数
r	容积成分	λ	压力升高比
r	汽化潜热	μ	回热度
S, s	熵及比熵		

ξ	制冷循环的热量利用系数	n	多变过程的
π	增压比	p	定压过程的
ρ	密度	P	生成物的
ρ	预胀比	r	对比状态的
Φ, ϕ	最大有用功参数(或可用度参数)	R	反应物的
φ	相对湿度	s	定熵过程的
Ψ, ψ	可用度参数及焓参数	s	饱和状态的
下角标		T	涡轮机(透平)的
c	临界状态的	T	定温过程的
C	压气机的	v	定容过程的
m	平均数值的	0	周围物质的或周围物质状态的
m	每摩尔物质的	0	理想气体状态的
		0	滞止状态的

附 录	344
附表 1 常用气体的热力性质	344
附表 2 理想气体状态下的定压摩尔热容与温度的关系式	344
附表 3 空气的热力性质表	346
附表 4 氧的热力性质表	351
附表 5 氮的热力性质表	353
附表 6 氢的热力性质表	354
附表 7 二氧化碳的热力性质表	356
附表 8 一氧化碳的热力性质表	358
附表 9 水蒸汽的热力性质表(理想气体状态)	359
附表 10 饱和水与饱和水蒸汽热力性质表(按温度排列)	362
附表 11 饱和水与饱和水蒸汽热力性质表(按压力排列)	366
附表 12 未饱和水与过热水蒸汽热力性质表	371
附表 13 各种物质的热值及生成焓	386
附表 14 化学平衡常数的对数值 $\ln K_p$	387
附表 15 各种单位的换算关系	388
附图一 水蒸汽的焓-熵图	
附图二 湿空气的焓-湿图	

第一章 绪 论

1-1 能的利用与生产力的发展

人类社会的发展是和生产力的发展密切相关的。而人们对自然界中能源的利用程度则是社会生产力发展水平的一个重要标志。在能的利用方面大致可分为三个阶段：

(1) 利用人力、牲畜力、简陋的水力机械及风力机械的阶段。在此阶段中，前期的生产不仅生产率很低，而且生产规模也较小，基本上是手工生产方式。在后期虽然有一些水力机械和风力机械，但还是比较简陋，并且也只限于在有水力或风力资源的地区使用。

(2) 利用燃料燃烧所获得的热能产生动力的阶段。随着生产力的发展，使用的机械日益增多，这就迫切要求有一定功率的原动机。1782年瓦特制成了一种通用的蒸汽机。它的功率比较大，并且不受地区条件的限制，所以很快得到了广泛的应用。蒸汽机利用蒸汽来推动机器，实质上就是利用热能使之转换成机械能。这在能的利用上是一个很大的飞跃，因而生产力得到很大的发展，掀起了历史上有名的“工业革命”。到十九世纪末，由于大工业的出现，特别是电力工业的发展，需要有一种转速高、功率更大的原动机，因而产生了蒸汽轮机，并得到了很快的发展和广泛的应用。现在蒸汽轮机的单机功率已达上百万千瓦的水平，成为固定式动力装置最主要的大型原动机。

在制造和使用蒸汽机的实践中，人们进一步从理论上认识了热功转换的规律，同时生产上也需要更便宜的原动机，特别是交通

运输工具需要装备重量轻、体积小的原动机。因而从十九世纪下半叶起一种新的原动机即内燃机就出现了。到十九世纪末，它已经发展得比较完善，并得到广泛的应用。现在在运输工具和移动式中小型动力机械方面，绝大部分是用内燃机作为动力机械的。同时大型内燃机的单机功率也已达到数万千瓦。

(3) 原子能和太阳能等新能源的利用开始了动力工业的新阶段。由于社会生产力的不断提高，对动力的需要量也不断增加，但是有限的地下燃料资源是难于满足动力工业如此飞速发展的需要的。显然可见，有着巨大能量的原子能是一种极好的新能源。从二十世纪五十年代起人们就开始研究原子能发电，经过二十多年的努力，现在原子能发电站已经在全世界迅速地发展起来了。此外人们对受控的热核反应有着更大的兴趣，因为热核反应物质在地球上的储存量极大，足以满足动力工业长远发展的需要。目前在这方面的研究工作已经取得了很大的进展，可望在不久的将来付诸实用。另外，太阳能也是一个取之不尽的能源，正吸引着人们在这方面进行更深入的研究。

可以看到动力工业直接地影响到生产力的发展。反之，动力工业的发展也正是社会生产力发展的直接结果。这充分说明了动力工业在社会生产中的重要地位。

中华人民共和国成立以来，在党和人民政府的领导之下，充分发挥社会主义制度的优越性，生产力的发展一日千里。在热能动力工业方面也发生了根本的变化。解放前，我国基本上没有动力设备制造工业。现在我国已能生产三十万千瓦的蒸汽动力装置的全套设备、上万马力的船用柴油机、数千千瓦的机车内燃机、六千千瓦的燃气轮机以及航空喷气发动机等重要动力设备，标志着我国基本上有了比较完整的热能动力工业。近年来在原子能工业及太阳能利用等方面我国也取得了不少成就。

但是，我国的科学技术和世界先进水平相比，差距还很大，这和我国社会主义建设及作为社会主义国家的地位很不相称。为了在二十世纪内，全面地实现农业、工业、国防和科学技术的现代化，把我国建设成为伟大的、繁荣富强的社会主义现代化强国，我国人民正高举马列主义、毛泽东思想的伟大旗帜，沿着党中央指引的正确航道进行新的长征。

1-2 几种热力设备工作原理的简单介绍

本节将简单介绍蒸汽动力装置、内燃机，燃气轮机装置及蒸汽压缩制冷装置的工作原理。

（一）蒸汽动力装置

虽然蒸汽动力装置最早被使用，但它现在仍然是一种极重要的动力设备。现在它主要用作热力发电厂的动力，有些也用在大型船舶上。蒸汽动力装置的功率一般为数十千瓦到数十万千瓦，也有一些数千瓦的小型机组。

图 1-1 为简单蒸汽动力装置的示意图。它由锅炉、汽轮机、冷

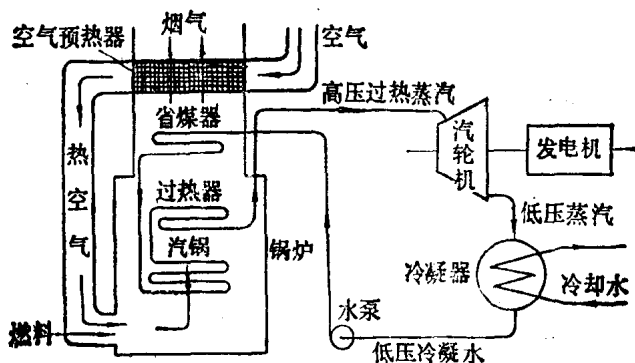


图 1-1

凝器及给水泵四部分组成。水蒸汽是蒸汽动力装置的工作物质，称为工质。锅炉是水蒸汽的发生器。从锅炉产生的高温高压的过热蒸汽被送往蒸汽轮机作功。如图 1-2 所示，在蒸汽轮机中，蒸汽先在喷管中降压膨胀增加流速，然后它以高速冲击在涡轮的叶片上，推动转子转动，使蒸汽轮机输出机械功，驱动发电机发电。从汽轮机排出的乏汽被引入冷凝器。在冷凝器中，蒸汽被冷却水吸走热量而凝结成水，其容积骤然降为原容积的数千分之一，因而在冷凝器中及汽

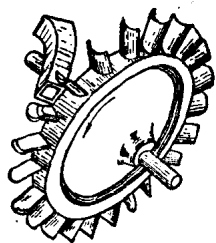


图 1-2

轮机出口处造成很高的真空。当蒸汽在汽轮机中膨胀到这么低的压力时，蒸汽能推动涡轮作出更多的机械功。从冷凝器出来的冷凝水被给水泵加压后，重新被送回锅炉加热产生蒸汽。在锅炉中，供燃料燃烧用的空气从大气吸入后，先在锅炉的空气预热器中受热提高温度，然后送入炉膛和燃料混合并进行燃烧，把燃料的化学能转变成热能，产生高温的烟气。由于高温烟气的加热，进入锅炉的水先在省煤器中受热升高温度，然后进入汽锅中受热蒸发而生成水蒸汽，并进一步在过热器中继续受热升高温度成为过热水蒸汽。于是过热蒸汽又可送往汽轮机膨胀作功，重复上述循环过程。

（二）内燃机

内燃机可应用在各种生产部门作为动力。内燃机重量轻、体积小、使用方便，因此在运输工具和中小型移动机械上得到了极为广泛的使用。现在以柴油机为例说明内燃机的工作原理。

图 1-3 为内燃机的示意图。内燃机的工质为燃料燃烧所生成的高温燃气。其工作过程分为吸气、压缩、燃烧、膨胀及排气几个阶段。吸气开始时进气门打开，活塞向下运动把空气吸入气缸。活

塞到达下死点即活塞位移的最低点时，进气门关闭而吸气过程结束。然后让进气门和排气门都关闭着，活塞向上运动压缩气缸内空气，空气受压缩其温度与压力都不断增高，直到活塞到达上死点即活塞位移的最高点时，压缩过程结束。由于这时气缸内空气的温度已超过燃料的自燃温度，因而及时地向气缸喷入适量燃料，燃料便在空气中发生燃烧。燃烧过程进行得很快，当活塞仅稍

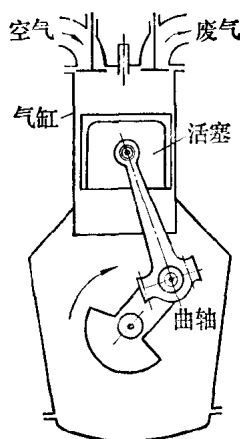


图 1-3

有移动时，燃烧即已结束。接着是高温的燃气发生膨胀，推动活塞向下运动作出机械功。活塞到达下死点时，排气门打开，气缸内压力和温度还较高的燃气立即通过排气门排至大气中，剩下的气体则在活塞向上运动时被推出气缸排至大气中，直到活塞到达上死点时排气完毕。当活塞再一次自上死点向下运动时，又重新吸气重复上述工作循环。

汽油机的工作过程基本上与柴油机差不多。只是汽油预先在化油器内蒸发汽化并和空气形成混合气体，而在吸气过程中一起被吸入气缸。在压缩过程结束时，混合气体的温度仍低于其自燃温度，必须用电火花点燃后，才能开始燃烧过程。其他则和上述柴油机的工作过程完全一样。

(三) 燃气轮机装置

燃气轮机装置是近三十年来才得到很快发展的新型动力装置。燃气轮机装置是旋转式机械，具有功率大，重量轻、体积小的优点。因而广泛地被用作航空发动机及舰艇发动机。近年来，它又

逐渐被应用到发电及其他工业部门。如图 1-4 所示，燃气轮机装

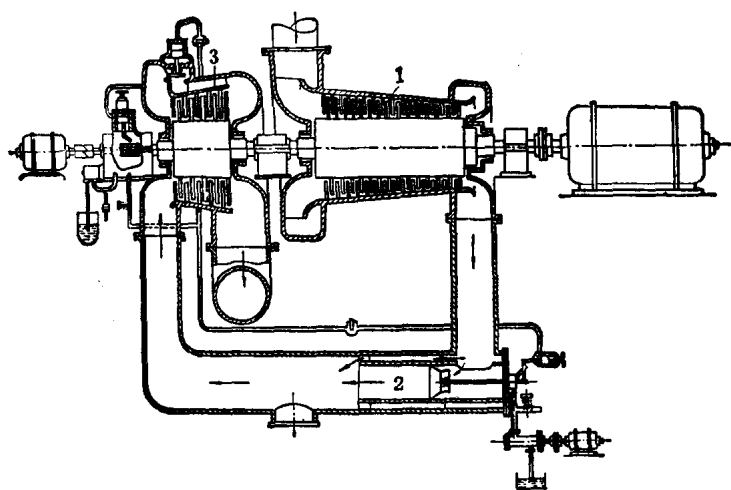


图 1-4

置乃是由压气机 1、燃烧室 2 及涡轮机(透平)3 三部分组成。它的工质亦是燃料燃烧生成的燃气。工作时，从大气中吸入空气，然后在压气机中对空气进行压缩提高其温度和压力。压缩后的空气被送入燃烧室，一部分空气和喷入燃烧室的燃料一起燃烧，另一部分用来和高温燃气混合以降低其温度，使工质温度和燃气轮机叶片允许的最高工作温度相适合。然后工质流入涡轮机在其中膨胀而推动转子作出机械功，其工作原理与汽轮机相同。作功后的高温废气则直接排到大气中。

(四) 蒸汽压缩制冷装置

蒸汽压缩制冷机是最常用的一种制冷设备。其工质是氟里昂或氨等。图 1-5 为蒸汽压缩制冷装置简图。工质的低压蒸汽先在压缩机中被压缩而提高压力及温度，然后工质被送往冷凝器，在其中向冷却水放热而凝结成高压的液体。最后让液态工质通过节流阀节流降压而使其降温到所需的低温。当把低温工质送入蒸发器

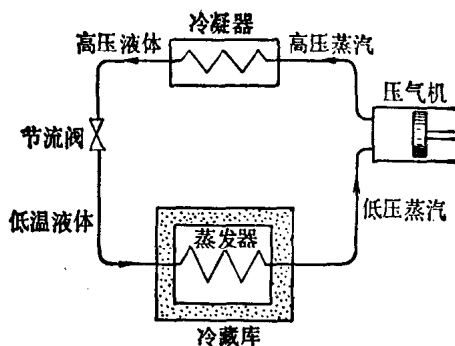


图 1-5

中吸热汽化时,就可以在蒸发器周围的冷藏库中造成低温,以利用来冷冻制冰或生产低温介质。吸热后,工质汽化而成为低压蒸汽并从蒸发器流出。于是工质的低压蒸汽又被送往压缩机压缩升压,重复上述循环过程。

综上所述,在热动力装置中,利用工质吸收燃料燃烧产生的热能,其体积膨胀而推动机器作出机械功。但是同时总是有一部分热量被废气带出或者间接地通过冷却水而消散到自然环境中。也就是说燃料燃烧生成的热不是全部转变成为机械功,而只利用了一部分。因此应合理设计动力设备以使尽可能多的热转变为机械功。

在制冷装置中利用由较高的压力膨胀到低压时所获得的低温工质,使它在低温下蒸发吸热,从而实现制冷的目的。但为了得到高压的工质,就必须利用压缩机压缩工质,即必须消耗机械功。因此应合理地设计制冷机,以尽可能减少机械功的消耗而仍能达到制冷的目的。

为了合理地设计各种热力设备,改善其能量利用的效果,必须掌握热功转换的规律及热力分析的方法,这些正是工程热力学所要讲述的内容。

1-3 工程热力学的研究对象及研究方法

热力学,或称经典热力学,是研究热能的性质以及它与其它能量相互转换规律的科学。

虽然人类很早就已经在生产和生活中利用了各种热现象,但在很长时间内,人们并不认识热的本质,甚至错误地认为热是一种没有质量及没有形状的热素。通过长时间的实践,特别是在热力工程方面的实践,加上许多科学家的实验验证,直到十九世纪中下叶才认识了热的本质,并相继确立了热力学第一定律及热力学第二定律。以无数的实践经验为基础而总结得到的这两条热力学基本定律,直到今天仍然不断地被生产和科学的实践所证实和丰富。

热力学的两条基本定律是整个热力学的理论基础。从这个基础出发,人们又推导得到了有关各种热现象的基本规律,使热力学形成为一门系统完整的学科。

热力学采用宏观的研究方法,它完全从直接观察的宏观现象出发来描述客观规律,这时把由大量分子组成的物质看成是连续均匀的整体,采用一些宏观物理量来描述物质所处的状况,并且根据两个基本定律,导出这些物理量间的普遍关系。由于有些量如温度、压力、比容等是可以直接或间接地测量的物理量,于是我们就可以通过实验的方法,找出某种热现象中这几个可测物理量的相互关系,并从而进一步推导得到其它各种物理量的变化规律。

统计热力学是研究热现象的微观理论。它应用力学定律来研究分子的运动,并用统计的方法说明大量分子紊乱运动的统计平均性质。因而它能够从物质内部分子运动的微观机理,更好地来说明宏观热现象的物理实质。但它的分析过程较为复杂,不象宏观理论那样直观、简单,故主要用于理论研究工作。