

吴君理 袁荣坤 项新耀 编

工程热力学

石油工业出版社

高等学校教学用书

工程热力学

吴君理 袁荣坤 项新耀 编

9C12/21

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 简 介

本书是根据石油院校热工教材编审组审订的石油非动力类专业《工程热力学》教学大纲编写的。全书分三部分。第一部分为热力学的基本原理,着重从能的量与质的观点来阐述热力学的两条基本定律。第二部分为物质的热力性质,主要阐述理想气体、实际气体、水蒸气、湿空气的热力性质。第三部分为热力学理论的工程应用,介绍了热力过程、动力循环和制冷循环的热力计算及分析方法。本着加强理论基础、重视应用实践的原则,以如何科学地、合理地利用能量为核心组成了理论、教学体系,以利于学生掌握能量转换的基本规律,确立科学的用能观点,培养初步的能量分析能力。

本书可作为石油院校钻井、采油、储运、化机及矿机等专业教材,亦可供石油厂、矿有关工程技术人员参考。

高等学校教学用书

工程热力学

吴君理 袁荣坤 项新耀 编

*

中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 $14\frac{7}{8}$ 印张 1 插页 389 千字 印 1-4,000

1992 年 4 月北京第 1 版 1992 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0625-1/TE·594 (课)

定价: 5.00 元

前 言

本书是根据 1985 年石油院校热工教材编审组审订的非热工专业《工程热力学》教学大纲编写的,适用于石油院校矿机、化机、储运、钻井、采油各专业。

工程热力学是一门重要的技术基础课,不仅有丰富的经典理论,而且还有不断发展的应用领域。本书力图在内容上体现热力学的科学性及其鲜明的工程实践性,以使读者能较全面地认识、掌握能量的性质、热力学的基本定律和工程应用方法等知识。

本书在编写过程中,除参考国内外一些同类型的优秀教材外,还总结、汲取了编者多年积累的教学经验,并在理论体系、内容选择、教学法等方面都有所体现。

本着加强理论基础、重视应用实践的原则,本书确立了以如何科学地、合理地利用能量为核心的理论体系。全部内容围绕这一核心组成三个部分:第一部分为热力学的基本原理,着重从能的量与质的观点来阐述热力学第一、第二定律,以建立起对能量性质的全面、深刻的认识;第二部分为物质的热力性质,主要从参与用能过程的物质(工质等)的本身性质来论述、分析合理用能的内部条件;第三部分为热力学的工程应用,旨在介绍如何采用有效的工程方法(如实施热力过程、热力循环等),以获得合理用能的外部条件。实践告诉我们,只有遵循能量转换的客观规律,而又创造最佳的转换条件,能量才能得以合理利用。因此,上述三部分内容的结合是一个完整的、有机的理论、教学体系。

本书在内容选择上注意了两点:一是在明确以经典理论为主体的同时,适当补充了一定量的近代热力学新内容,如能质概念、焓参数等;二是力求与石油工程应用实际相结合,如 BWR 物态方程、热电联供等,都是近年来石油工业技术的新内容。

为了适应不同专业的教学需要，本书将内容分为必讲和选讲两部分，选讲部分以*号标出。

在教学法方面，本书体现了由浅入深、由感性深化为理性、便于自学的特点，并注意引导学生运用所学知识解决工程实际问题。

为了帮助学生加深理解热力学的重要概念和训练计算能力，每章末都附有一定数量的思考题和习题，认真完成这些作业是教学的一个重要组成部分。

本书承石油大学研究生部杨延昕教授主审，经1988年7月召开的第二次石油院校热工学科会上审定。参加审稿的同志提出了不少有益的建议，特别是主审认真、细致地审阅了全书初稿，提出了很多对提高本书质量有重要作用的宝贵意见，编者愿借此机会向他们致以衷心的感谢。

本书是由大庆石油学院热工教研室组织集体编写的。其中项新耀编写绪论、第一、第二、第三章，袁荣坤编写第四、第五、第六、第七章，吴君理编写第八、第九、第十、第十一章。由项新耀完成全书的统稿工作。全书习题由姜羨英选编。

在编写过程中我们虽然作了不少主观努力，但限于编者的学术和认识水平，书中定有谬误、欠妥之处，恳请读者予以批评指正。

编者

1989年12月

主 要 符 号 表

A 面积	Q 热量; 热值
a 音速	$\dot{Q}$ 热流率
C 热容量	q 比热量; 单位质量的传热量
c 流速; 质量比热	Q_0 制冷量
C 容积比热	q_0 单位质量的制冷量
μc 摩尔比热	R 气体常数
d 直径; 含湿量	R_m 通用气体常数
E 能量	r 汽化潜热
E_x, e_x 焓及比焓	S, s 熵、比熵
E_{xl} 焓损失	S_f 熵流
F 力;	S_g 熵产
f 截面; 截面积	t 摄氏温度
G 重量	T 热力学温度 (或绝对温度)
g 重力加速度	U, u 内能及比内能
H 焓; 高度	V, v 容积及比容
h 比焓	V_m 摩尔容积及千摩尔容积
J 热功当量	W_s, w_s 轴功、单位质量轴功
k 绝热指数	W, w 容积功及单位质量容积功
L 长度; 位移	W_t 技术功
M 马赫数	
m 质量	
$\dot{m}$ 质量流率	
N 功率	
n 多变指数	
p 压力	

x	参数	x_i	摩尔成分
x	干度	ψ	过程因子
Z	压缩因子, 位高	ω_i	质量成分
	希腊字母		下角标
β	增压比	b	锅炉
γ	重度	b	大气 (压力)
ε	压缩比; 致冷系数	c	压缩
ε	供热系数或供暖系	ds	寂态
数		ef	有效
η_t	热效率	Ek	动能
η_{ex}	烟效率	Ep	位能
η_{oi}	相对内效率	f	摩擦
η_i	绝对内效率	G	发电机
η_{TL}	低温蒸汽循环热效	Hg	汞柱
率		H_2O	水柱
η_{TSG}	联合循环热效率	i	组分
η_I	热力学第一定律效	in	输入
率		out	输出
η_{II}	热力学第二定律效	o	标准状态; 环境状
率			态; 滞止状态
η_{is}	卡诺循环热效率	kp	临界状态
μ	摩尔质量	p	定压过程
τ	时刻	s	定熵过程
π	循环增压比	T	定温过程
ρ	密度	v	定容过程
Φ	能质; 相对湿度		

目 录

绪 论	(1)
第一节 能源科学与能量利用	(1)
第二节 热力工程与热力学	(2)
第三节 工程热力学的研究对象 及主要内容	(6)
第四节 热力学的研究方法	(9)

第一部分 热力学的基本原理

第一章 基本概念	(12)
第一节 能量在热机中的转换过程	(12)
第二节 热力系	(13)
第三节 平衡状态及其描述	(15)
第四节 基本状态参数	(16)
第五节 状态方程与状态参数坐标图	(24)
第六节 热力过程及其描述	(26)
第七节 热力循环及其评价指标	(31)
第二章 能量与热力学第一定律	(38)
第一节 能量与能量方程的一般表达式	(38)
第二节 热力系的状态能	(39)
第三节 热力系的传递能	(43)
第四节 热力系的能量方程	(51)
第五节 稳流开系的输出功与作功能力	(61)
第六节 能量方程的工程应用	(64)
第三章 能质与热力学第二定律	(77)
第一节 能质与能质蜕变	(77)

第二节	热力学第二定律及其实质	(81)
第三节	热力学第二定律的推论 ——卡诺定理	(91)
第四节	卡诺循环	(94)
第五节	熵与熵产	(101)
第六节	熵方程与熵分析	(111)
* 第七节	状态参数 焓及 焓分析	(126)
* 第八节	热力学温标简介	(134)

第二部分 物质的热力性质

第四章	理想气体的性质	(142)
第一节	理想气体与实际气体	(142)
第二节	理想气体状态方程	(144)
第三节	理想气体的比热	(149)
第四节	理想气体的内能、焓和熵 的计算式	(163)
第五节	理想气体混合物	(168)
第五章	实际气体的性质	(190)
第一节	概述	(190)
第二节	理想气体状态方程用于实际气体的偏差	(191)
第三节	范德瓦尔状态方程	(193)
第四节	其它实际气体状态方程	(200)
第五节	对比态定律和通用压缩因子图	(212)
* 第六节	热力学微分方程	(218)
第六章	水蒸气	(238)
第一节	基本概念	(238)
第二节	水蒸气的定压发生过程	(239)
第三节	水蒸气图表及其应用	(246)
第四节	水蒸气的热力过程	(256)
第七章	湿空气	(266)

第一节	湿空气的基本概念	(266)
第二节	湿空气的湿度	(270)
第三节	湿空气的焓和熵	(274)
第四节	湿空气的焓—湿图	(276)
* 第五节	湿空气压缩后水分的析出	(283)
第六节	湿空气过程及其应用	(285)

第三部分 热力学的工程应用

第八章	热力过程的计算及分析	(296)
第一节	研究热力过程的目的与一般方法	(296)
第二节	四种典型热力过程的分析	(298)
第三节	多变过程	(316)
第四节	压气机的压气过程	(327)
第九章	气体与蒸汽的流动	(346)
第一节	稳定流动的基本方程式	(346)
第二节	喷管内气流参数变化和喷管 截面变化的关系	(348)
第三节	喷管的计算	(352)
第四节	水蒸气的定熵流动	(365)
第五节	绝热节流	(368)
第十章	动力循环及其热力学分析	(372)
第一节	动力循环的基本分析方法	(372)
第二节	气体动力循环	(380)
第三节	蒸汽动力循环	(398)
第四节	蒸汽—燃气联合循环	(408)
第十一章	制冷循环	(415)
第一节	基本原理	(415)
第二节	蒸汽压缩制冷循环	(416)
* 第三节	热泵	(426)
工程热力学的附表及附图		(433)

附表 1	压力单位换算表	(433)
附表 2	常用能量单位的互换常数表	(434)
附表 3	功率单位换算表	(435)
附表 4	低压时一些气体的热力特性	(436)
附表 5	气体的真实定压摩尔比热公式	(437)
附表 6	气体的平均比热 (直线关系式)	(438)
附表 7	气体的平均定压质量比热	(439)
附表 8	气体的平均定压摩尔比热	(440)
附表 9	饱和水与饱和水蒸气的热力 性质表 (按温度排列)	(441)
附表 10	饱和水与饱和水蒸气的热力 性质表 (按压力排列)	(444)
附表 11	未饱和水与过热水蒸气的 热力性质表	(446)
附表 12	1bar 时的饱和空气状态参数表	(453)
附表 13	饱和氨 (NH ₃) 蒸汽性质表	(456)
附表 14	饱和氟里昂-12 (CCl ₂ F ₂) 蒸汽性质表	(457)
附图 1	水蒸气焓—熵图 (装袋)	
附图 2	湿空气焓—湿图	(458)
附图 3	氨的压焓图	(459)
附图 4	F ₂₂ 的压—焓图	(460)
主要参考文献		(461)

绪 论

第一节 能源科学与能量利用

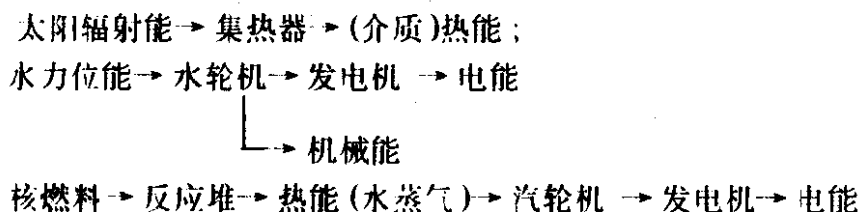
能源是重要的自然资源，是人类赖以生存，社会得以发展的重要物质基础。

能源的极端重要性，促使人们致力于对能源进行广泛的探索与研究，并取得了丰富的实践经验和理论知识，从而形成了一门重要的技术科学——能源科学。

能源科学的内容十分丰富，但归结起来，不外乎两个方面，一是如何合理地开发各种能源，包括以煤和石油、天然气为主的常规能源，以及核能、太阳能和生物能等新能源；二是如何科学地利用各种能源，以充分发挥能量的效用。实践证明，这些问题能否妥善地获得解决，对人类的生活，生产的发展，以至整个国民经济的增长速度，都会产生至关重要的影响。

近年来，随着可供开发的煤炭、石油、天然气资源的大力开发和利用，对能量的科学利用就越越来越引起人们的重视和兴趣。

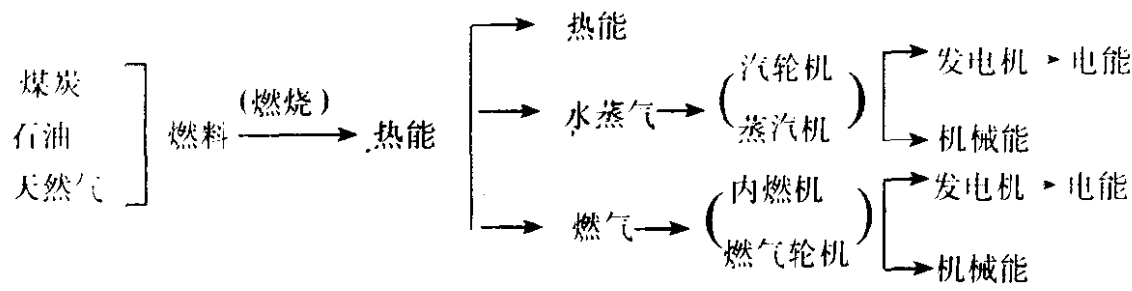
人们对能源的利用，通常总是通过各种方式，使其变为某种便于实际应用的能量形式。例如：



从上述几种能量转换途径中不难看出，能量最普遍的应用形态是机械能、热能和电能。其中热能与其它形式能量相比，又是最易取得而又便于应用的一种能量。同时，绝大部分能源在其转换为机械能和电能的过程中，又常常以热能的形式出现。因此，

在为人们广泛利用的各种形式的能量中，热能的利用具有更普遍的意义。

例如：



第二节 热力工程与热力学

人类对能源的利用，先是易于取得的太阳能、风能、水力能等。热能的开发利用是人类用能史上的一个巨大成就。历史上以燃烧燃料来获得热能的简单用热方式一直沿用了很长时间。直到18世纪中期发明了蒸汽机，才揭开了用能史上新的一页，开始了工业史上的蒸汽时代。蒸汽机以一种崭新的技术，实现了热能与机械能的转换，为工业生产提供了动力，热力工程的概念也由此产生。

热力工程是热能动力工程的简称，它是使热能通过某种转换装置以获得机械能，从而为生产提供动力的理论与全部设施的总称。现代化的热力工程是技术复杂、设备完善、自动化水平很高的系统工程。

蒸汽动力的出现，有力地推动了工业发展，大工业随之兴起。到19世纪后半期，蒸汽机已不能适应工业及运输业迅速发展的动力需要，因而从19世纪70年代起，至19世纪末，内燃机、蒸汽轮机等动力装置相继发明，建立了一批用火力发电的动力工厂，内燃机在运输工业中也获得广泛应用，从而使热力工程趋于完善。现以蒸汽动力装置为例，来说明热力工程的基本组成部分。

如图0-1所示，蒸汽动力装置有三个基本部分组成：锅炉设备是使燃料的化学能通过燃烧变为热能，并传递给蒸汽的设

备，习惯上称之为产热设备；汽轮机是使蒸汽的热能转换为机械能以驱动各种工作机械的设备，我们称它为能量转换设备；用来将上述设备连接起来，从而构成循环的设备，我们称它为辅助设备，如图中的冷凝器、泵、蓄水池等。

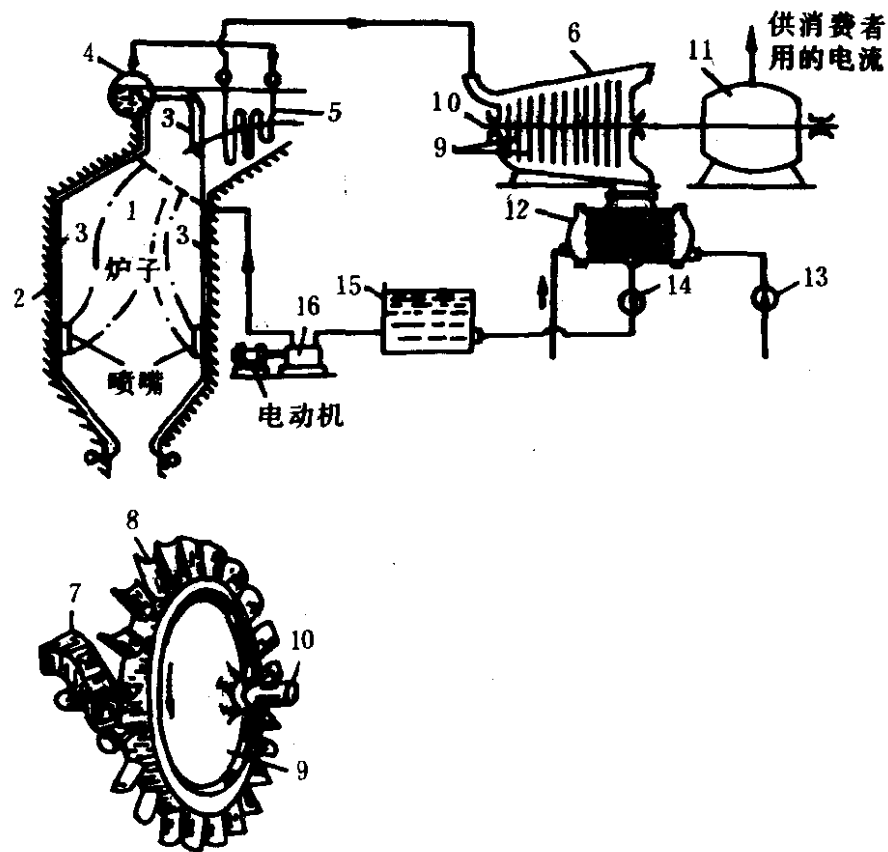


图 0-1 蒸汽动力装置系统

1—炉子；2—炉墙；3—沸水管；4—汽锅；5—过热器；6—汽轮机；7—喷嘴；
8—叶片；9—叶轮；10—轴；11—发电机；12—冷凝器；13、14、16—泵；15—蓄水池

产热设备、能量转换设备和辅助设备，是各种蒸汽动力装置都具备的三个基本组成部分。

近代出现的燃气动力装置、核动力装置以及磁流体发电装置，在形式上虽与蒸汽动力装置有很大差别，但就其能量转换的

过程及系统的基本组成来说大体上是相同的。

热能的广泛利用与热能动力的工程实践，为热力学的理论研究提供了有利条件。

早期的蒸汽机，由热能转换为机械能的效率极低，这就促使人们研究如何才能提高转换效率。卡诺（Carnot）深入地研究了这一问题，又汲取了前人的经验，于1824年提出了“可逆循环”与“理想热机”的概念，后人将其命名为“卡诺循环”和“卡诺定理”。其后不久，德国医生梅耶（Mayer）于1842年阐述了热功当量原理，率先在理论上确立了能量守恒定律。英国人焦耳（Joule）于1843年至1848年间，通过大量的实验研究，终于以实验方式测定了热功当量值，在与梅耶毫无联系的情况下，独立地依据实验结果获得了能量守恒定律。后人公认梅耶与焦耳同为热力学第一定律的创立者。

当热力学第一定律在理论与实践方面得以证实，并为人们公认之后，这一重要定律又反过来推动了对热机循环及热效率的研究，并取得了显著成就。表0-1列出了现代某些动力装置的典型热效率。这与当年热效率仅为1%的原始蒸汽机相比，不能不说是一个巨大的进步。

需要指出，热力学第一定律的理论及实践意义并不只限于指导热机的研究与改进，它的作用和意义极其广泛，这将在第二章中论述。

差不多是与热力学第一定律同时期，1850~1851年间，克劳修斯（Clausius）与汤姆逊（Thomson）分别从不同的方面提出了热力学第二定律的表述，指出能量在传递和转换过程中的方向性问题，揭示了过程中能量品质——能质的变化规律。

热力学第一、第二定律的发现，标志着一门独立的学科——热力学的诞生。概括地说，热力学是一门研究与热现象有关的能量转换规律及物质的热性质的科学。而热力学第一、第二定律以及与之相关的一些概念则是热力学的理论基础。

热力学具有广阔的研究范围，可以说凡是涉及热现象的任何

表 0-1 现代某些动力装置的典型热效率

装置类型	工况	效率, %
点燃式汽车汽油机	最佳工况	25
压燃式载重卡车柴油机	满负荷	35
	半负荷	31
柴油机车		30
小型燃气轮机 (100hp)		
无回热	最佳工况	12
有回热	最佳工况	16
>7500kW 燃气轮机		
无回热	最佳工况	30
有回热	最佳工况	34
大型蒸汽动力装置	最佳工况	41
磁流体发电装置		
本体部分		30~35
联合循环		55

能量转换过程都是热力学的研究对象。运用热力学的基本理论研究某种领域或范围内的能量转换热现象,就构成了具有不同研究方向的热力学。如研究大气流热现象的气象热力学,研究生物体内热现象的生物热力学,研究流体热力学性质的流体热力学,研究化学工艺过程中热现象的化工热力学,研究热机循环的发动机热力学等等。工程热力学也是其中之一。

热力学是能源科学中的一个重要理论学科,它的巨大意义,在于指导用能的实践。一百多年来,特别是近数十年以来,在热力学理论的指导下,用能实践获得了前所未有的发展,一些新型热机,以及能量直接转换的新技术不断出现,例如由燃料的化学能转换为电能的燃料电池,由燃气热能直接转换为电能的磁流体发电等,都大大地提高了人类科学用能的水平。

第三节 工程热力学的研究对象及主要内容

工程热力学是热力学的一个分支，但由于其系统的完整性和应用的广泛性，已使其成为一门独立的学科。

工程热力学是研究工程中热能与其他形式能量的转换规律以及影响转换的各种因素的技术科学，其中对热能与机械能的转换规律的研究，一直被列为工程热力学的研究重点。

凡是涉及热现象的过程、装置以及系统都是工程热力学的研究对象。而热机中进行的过程和循环则是工程热力学的传统研究对象。

众所周知，任何工程特别是现代化工程，在其建设和使用过程中，总是与能量的利用紧密联系着的。更值得我们注意的是，工业生产耗能在国家的总能耗中占有很大的比重（我国工业能耗约占总能耗的 65%）。如何合理地有效地利用能量，使之在工业生产过程中尽可能降低能耗，具有重要的经济意义。

工程热力学的基本任务就是通过对各种用能设备及系统中的能量转换过程及影响因素的研究，探求有效用能的技术途径和基本方法。

为了衡量能量是否获得了有效利用以及有效利用的程度，工程热力学建立了相应的评价方法。

以能量平衡理论，即以热力学第一定律为依据的传统用能理论，用热力学第一定律效率作为能量有效利用的评价指标。热力学第一定律效率表示被系统有效利用的能量占系统所耗费能量的百分率，即：

$$\eta_1 = \frac{\text{有效能量}}{\text{耗费能量}} \times 100\%$$

一百多年来，工程技术界习惯于只用热力学第一定律效率作为评价用能设备或系统的主要的甚至是唯一的技术指标。而实际