

21世纪能源与动力系列教材
Textbook Series of Energy & Power for 21st Century

工程热力学

Engineering Thermodynamics

◇ 主 编 / 徐生荣



东南大学出版社

21 世纪能源与动力系列教材

工 程 热 力 学

主编 徐生荣

主审 姜慧娟

东南大学出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部制定的多学时“工程热力学课程教学基本要求”并参照热能工程、热动力工程、建筑环境与设备等专业的大纲及在多年教学实践的基础上编写而成,同时吸收了国内外同类教材的经验 and 优点。

本书主要讲述热力学第一定律和热力学第二定律,气体及蒸汽的热力性质,各种热力过程和热力循环、制冷循环分析计算以及热力学的其他工程应用。本书充实并强化了基本概念与基本定律的论述,力求简明扼要地阐明热功能量转换的基本规律。全书突出工程观点,理论联系实际,注重培养学生灵活分析问题的能力。在编排方面注意与“物理”、“化学”等课程的衔接,避免不必要的重复。为了引导学生加深对热力学基本规律的理解、掌握与运用,安排了较多的例题和习题。全书取材广泛,内容有所拓宽;由浅及深,便于自学;着重反映一些最新科技进展,加强了概念、计算及应用的叙述。

本书可作为高等学校能源动力工程、建筑环境与设备工程、环境工程、机械工程、石油和化学工程、航空航天工程以及生物工程等专业的教科书或参考书,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/徐生荣主编. —南京:东南大学出版社,
2004. 2

(21 世纪能源与动力系列教材)

ISBN 7-81089-531-1

I. 工... II. 徐... 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(2004)第 007197 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 扬中市印刷有限公司印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.5 字数:362 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—4000 定价:24.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-83795801)

21 世纪能源与动力系列教材编委会

主任 侯小刚

编委 侯小刚 赵孝保 丁轲轲

徐生荣 张 奕 周 欣

郭恩震 卢 平 余跃进

辛洪祥 李传统

序

热现象是自然界中最普遍的物理现象。工程热力学、传热学是以热现象为研究对象的学科,主要研究热能与机械能或其他形式能量之间的转换与传递规律,研究热能的合理、有效利用技术及方法。热能的转换、传输、控制、优化与利用的各环节都离不开对流体流动规律的认识与利用,离不开燃烧理论与技术的研究与运用。因此,工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等几门课程成为能源与动力类专业的主要技术基础课。

古人云:巧心、劳力、成器物者曰工。作为工程技术学科的教材,要体现探求规律,认识规律,运用规律,物化成果的要求。针对应用型工程技术专业的实际需要,南京师范大学等院校开展了对能源与动力学科系列课程的建设与改革,在此基础上组织编写了工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等课程教材,作为能源动力类系列教材推出。几本教材既相互联系,又各具特色。随着教育、教学改革的深入,将陆续出版能源动力类系列教材。

工程专业是关于科学知识的开发应用和关于技术的开发应用的,在物质、经济、人力、政治、法律和文化限制内满足社会需要的,一种有创造力的专业。因此,对于工程应用专业人才,需要他们具备宽广的专业面、全面的工程素质。上述几本教材,还可以作为大多数工程技术专业的公共技术基础课程用书,在培养全面发展的工程技术人才方面发挥作用。

侯小刚

2003年10月于南京师范大学

前 言

工程热力学是热能与动力工程、建筑环境与设备工程和环境工程等专业必修的技术基础课程。本课程是研究热能与其他形式能量相互转换的一门科学。它是一门较为古老的学科,某些教学内容甚至是19世纪末在探索过程中建立的体系,例如热力学第一定律、热力学第二定律均建立于19世纪中期。科学的发展,为这门课程的应用开创了广阔的前景。因此,在有限的教学学时数的条件下如何处理好传统内容与现代内容的关系就显得十分重要。本书对于一些较为陈旧的、在构成热力学体系中显得无关紧要的内容,在编写中加以删除;对于较新的内容例如熵方程、有效能这些目前在能源工程中应用较为广泛的知识,则着重指出其概念建立的基础、基本原理及其应用范围和方法。

工程热力学的基础部分由热力学第一定律、热力学第二定律、工质的热物理特性等三大块构成。在此基础上针对不同的热力过程以及由不同的热力过程所构成的循环,分析热功转换的基本规律。本书第1章为基本概念;第2章为热力学第一定律;第3章为理想气体及其混合物;第4章为理想气体的热力过程;第5章为热力学第二定律;第6章为实际气体、水蒸气的性质;第7章为气体和蒸汽的流动;第8章为气体动力循环;第9章为蒸汽动力循环;第10章为制冷循环;第11章为湿空气;第12章为化学热力学基础。其中第3、6章构成工质的热物理特性;第4、7章重点介绍热力过程的特点,功、热转换规律;第8~10章针对能源动力类专业不同的方向,分析了不同装置及系统的热功转换规律,可根据相关专业的需要取舍。

本书是根据教育部制定的多学时“工程热力学课程教学基本要求”并参照热能与动力工程、建筑环境与设备工程和环境工程等专业的教学大纲,在自编讲义及多年教学实践的基础上编写而成,同时吸收了国内外同类教材的经验和优点。

本书充实并强化了基本概念与基本定律的论述,力求简明扼要地阐明热功相互转换的基本规律。全书突出工程观点,理论联系实际,注重培养学生灵活分析问题的能力。在编排方面注意与“物理”、“化学”等课程的衔接,避免不必要的重复。为了引导学生加深对热力学基本规律的理解、掌握与运用,安排了较多的例题和习题。全书取材广泛,内容有所拓宽;由浅及深,便于自学;着意反映一些最新科技进展,加强了概念、计算及应用的叙述。

在教材的编写过程中得到了南京师范大学动力工程学院领导的支持和鼓励及南京师范大学热能与动力工程重点学科的赞助。本书主审东南大学动力工程系姜慧娟老师仔细审阅了书稿,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。由于编者水平所限,书中错误在所难免,敬请读者赐教和指正。

编者

2004 年 1 月

主要符号表

A	面积, m^2	S	熵, J/K
c_f	流速, m/s	S_f	熵流, J/K
c	比热容(质量比热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 浓度, mol/m^3	S_g	熵产, J/K
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	T	热力学温度, K
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
c_m	比摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
c_{mp}	比摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	U	热力学能, J
c_{mv}	比摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	V	体积, m^3
d	汽耗率, $\text{kg 汽}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 含湿量, $\text{kg}/\text{kg}(\text{干空气})$	W	膨胀功, J
E	总能(储存能), J	W_0	循环净功, J
E_k	宏观动能, J	W_i	内部功, J
E_p	宏观位能, J	W_s	轴功, J
$E_{x,Q}$	热量烟, J	W_t	技术功, J
E_x	烟, J/kg	w_i	质量成分
H	焓, J	x	干度(专指湿蒸汽中饱和干蒸汽的质量分数)
K_c	以浓度表示的化学平衡常数	x_i	摩尔成分
K_p	以分压力表示的化学平衡常数	ε	制冷系数;压缩比
M	摩尔质量, kg/mol	ε'	供热系数
n	多变指数;物质的量, mol	$\eta_{c,s}$	压气机绝热效率
P	功率, W	η_t	循环热效率
p	绝对压力, Pa	η_c	卡诺循环热效率
p_b	大气环境压力, 背压力, Pa	η_r	蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率
p_e	表压力, Pa	κ	绝热指数
p_i	分压力, Pa	λ	升压比
p_s	饱和压力, Pa	μ_T	焦耳—汤姆逊系数(节流微分效应)
p_v	真空度, 湿空气中水蒸气分压力, Pa	π	压力比(增压比)
Q	热量, J	β_{cr}	临界压力比
q_m	质量流量, kg/s	ρ	密度, kg/m^3 ; 预胀比
R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	φ	相对湿度; 喷管速度系数
R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	φ_i	体积成分
r	汽化潜热, J/kg	α	抽汽率

目 录

主要符号表	(1)
■ 绪 论	(1)
0.1 能源及热能利用	(1)
0.2 工程热力学的研究对象及任务	(3)
0.3 工程热力学的研究方法	(4)
0.4 工程热力学的学习方法	(5)
■ 基本概念	(6)
1.1 热力系统	(6)
1.1.1 热力系统、边界与外界	(6)
1.1.2 封闭热力系和开口热力系	(6)
1.1.3 绝热热力系与孤立热力系	(7)
1.2 工质的热力状态及其基本状态参数	(7)
1.2.1 平衡状态	(7)
1.2.2 状态参数	(8)
1.2.3 温度	(8)
1.2.4 压力	(9)
1.2.5 比体积及密度	(9)
1.2.6 强度参数与广延参数	(10)
1.3 状态方程、状态参数坐标图	(10)
1.4 准静态过程与可逆过程	(11)
1.4.1 准静态过程	(11)
1.4.2 可逆过程	(11)
1.5 功与热量	(13)
1.5.1 功	(13)
1.5.2 热量	(15)
1.5.3 过程函数与状态参数的区别	(15)
1.5.4 功和热量的比较	(15)
1.6 热力循环	(16)
思考题	(17)
习 题	(18)
■ 热力学第一定律	(20)
2.1 热力学第一定律的实质	(20)

2.2 状态参数——热力学能	(20)
2.3 热力学第一定律解析式	(21)
2.4 推动功和状态参数焓	(23)
2.4.1 推动功	(23)
2.4.2 状态参数焓	(24)
2.5 开口系统能量方程式	(24)
2.5.1 开口系统能量一般表达式	(24)
2.5.2 稳定流动能量方程式	(26)
2.5.3 稳定流动能量方程分析	(27)
2.5.4 关于功	(27)
2.5.5 热力学第一定律第二解析式	(28)
2.6 稳定流动能量方程的应用	(28)
2.6.1 锅炉及各种换热器	(28)
2.6.2 汽轮机和燃气轮机	(29)
2.6.3 泵与风机	(29)
2.6.4 喷管和扩压管	(29)
思考题	(31)
习 题	(32)
理想气体及其混合物	(34)
3.1 理想气体状态方程式	(34)
3.1.1 理想气体与实际气体	(34)
3.1.2 理想气体状态方程式	(34)
3.1.3 通用气体常数 R	(35)
3.2 理想气体比热容	(36)
3.2.1 比热容的定义及单位	(36)
3.2.2 比热容与过程特性的关系	(36)
3.2.3 比热容与气体性质的关系	(38)
3.2.4 比热容与温度的关系	(38)
3.3 理想气体热力学能、焓和熵的计算	(39)
3.3.1 热力学能和焓的计算式	(40)
3.3.2 熵的计算式	(40)
3.4 理想气体混合物	(42)
3.4.1 理想气体混合物的特性	(42)
3.4.2 混合气体的分压力和道尔顿分压力定律	(42)
3.4.3 混合气体的分体积和分体积定律	(43)
3.4.4 混合气体的成分表示方法及换算	(43)
3.4.5 混合气体的平均气体常数和平均摩尔质量	(44)
3.4.6 混合气体的比热容、热力学能、焓和熵	(45)
思考题	(47)

习 题	(48)
■ 理想气体的热力过程	(50)
4.1 分析热力过程的目的、方法及内容	(50)
4.2 四种典型的热力过程分析	(51)
4.2.1 定容过程	(51)
4.2.2 定压过程	(52)
4.2.3 定温过程	(53)
4.2.4 绝热过程	(54)
4.3 多变过程	(58)
4.3.1 多变过程过程方程及功的计算式	(58)
4.3.2 多变过程的多变比热容	(59)
4.4 热力过程的图示综合分析	(60)
4.5 压气机的热力过程	(63)
4.5.1 单级活塞式压气机的理论压缩功	(63)
4.5.2 多级压缩和级间冷却	(65)
4.5.3 其他型式的压气设备简介	(67)
4.5.4 压气机的效率	(68)
思考题	(69)
习 题	(70)
■ 热力学第二定律	(73)
5.1 热力学第二定律的实质及表述	(73)
5.1.1 过程的方向性与不可逆性	(73)
5.1.2 热力学第二定律的表述	(73)
5.2 卡诺循环和卡诺定理	(74)
5.2.1 卡诺循环	(74)
5.2.2 逆向卡诺循环	(76)
5.2.3 概括性卡诺循环	(77)
5.2.4 卡诺定理	(77)
5.3 熵	(79)
5.3.1 熵的导出	(79)
5.3.2 不可逆过程中的熵变化	(80)
5.3.3 熵产和熵流	(81)
5.3.4 熵的性质	(82)
5.4 熵增原理和熵方程	(82)
5.4.1 孤立系统熵增原理	(83)
5.4.2 熵方程	(84)
5.5 可用能和火用	(85)
5.5.1 热的可用性——热量烟	(85)

5.5.2 冷量烟	(86)
5.5.3 孤立系统熵增与做功能力损失	(86)
5.5.4 开口热力系能量的可用性——热力烟	(89)
思考题	(91)
习 题	(92)
■ 实际气体、水蒸气的性质	(96)
6.1 实际气体的状态方程式	(96)
6.1.1 理想气体状态方程用于实际气体的偏差	(96)
6.1.2 范德瓦耳方程式	(97)
6.1.3 其他状态方程	(100)
6.2 热力学微分方程式	(101)
6.2.1 特性函数	(101)
6.2.2 热物性参数	(102)
6.2.3 热力学能、焓及熵的一般关系式	(104)
6.2.4 有关比热容的热力学关系式	(104)
6.2.5 焦耳—汤姆逊系数	(106)
6.2.6 克拉贝龙方程	(107)
6.3 水蒸气的性质	(108)
6.3.1 水蒸气的概念	(108)
6.3.2 水的定压加热、汽化过程	(108)
6.4 水蒸气参数的确定、水蒸气图表的应用	(111)
6.4.1 水蒸气 u 、 h 及 s 的零点的规定	(111)
6.4.2 水和蒸汽热力性质表	(111)
6.4.3 湿饱和蒸汽参数的确定	(113)
6.4.4 水蒸气性质图	(114)
6.5 水蒸气的基本热力过程	(116)
思考题	(119)
习 题	(119)
■ 气体和蒸汽的流动	(122)
7.1 稳定流动的基本方程	(122)
7.1.1 连续性方程	(122)
7.1.2 稳定流动能量方程	(122)
7.1.3 过程方程	(123)
7.1.4 音速及马赫数	(123)
7.2 促使气体流速改变的条件	(125)
7.2.1 力学条件	(125)
7.2.2 几何条件	(126)
7.3 喷管的计算	(127)

7.3.1 绝热滞止	(127)
7.3.2 流速的计算	(128)
7.3.3 临界状态和临界压力比	(129)
7.3.4 流量的计算	(130)
7.3.5 喷管的设计	(131)
7.4 有摩阻的绝热流动	(133)
7.5 绝热节流	(135)
7.6 绝热混合流动	(137)
思考题	(138)
习 题	(138)
■ 气体动力循环	(141)
8.1 分析动力循环的一般方法	(141)
8.1.1 概说	(141)
8.1.2 比较任意可逆循环热效率的方法	(141)
8.1.3 分析不可逆循环效率的方法	(143)
8.2 内燃机的基本构造及循环	(143)
8.2.1 内燃机的基本构造	(143)
8.2.2 汽油机的实际工作循环与理想循环	(144)
8.2.3 柴油机的实际工作循环与理想循环	(146)
8.3 燃气轮机装置循环	(148)
8.3.1 流程与设备	(148)
8.3.2 定压加热理想循环	(149)
8.3.3 有摩阻的实际循环	(150)
8.4 喷气式发动机简介	(152)
思考题	(153)
习 题	(153)
■ 蒸汽动力循环	(155)
9.1 蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环	(155)
9.1.1 蒸汽卡诺循环的局限性	(155)
9.1.2 水蒸气基本循环——朗肯循环	(156)
9.1.3 朗肯循环的计算	(156)
9.2 蒸汽参数对循环热效率的影响	(158)
9.2.1 初温 t_1 的影响	(158)
9.2.2 初压 p_1 的影响	(159)
9.2.3 背压 p_2 的影响	(159)
9.3 再热循环	(160)
9.4 回热循环	(162)
9.5 热电联产循环	(165)

9.6 蒸汽—燃气联合循环	(167)
思考题	(168)
习 题	(169)
■ 制冷循环	(170)
10.1 逆向卡诺循环	(170)
10.2 空气压缩制冷循环	(170)
10.3 蒸汽压缩制冷循环	(174)
10.4 蒸汽喷射制冷循环	(176)
10.5 吸收式制冷循环	(177)
思考题	(178)
习 题	(178)
■ 湿空气	(180)
11.1 空气与水蒸气的混合物——湿空气	(180)
11.2 湿空气的湿度	(181)
11.2.1 绝对湿度	(181)
11.2.2 相对湿度	(181)
11.2.3 相对湿度的测定	(182)
11.3 湿空气的状态参数	(184)
11.3.1 含湿量(比湿度)	(184)
11.3.2 湿空气的焓	(184)
11.3.3 湿空气的熵	(185)
11.3.4 湿空气的其他参数	(185)
11.4 湿空气的焓—湿图	(185)
11.5 湿空气的应用实例	(187)
11.5.1 湿空气的基本热力过程	(187)
11.5.2 烘干	(188)
11.5.3 冷却塔	(189)
思考题	(191)
习 题	(192)
■ 化学热力学基础	(193)
12.1 概述	(193)
12.1.1 有化学反应的热力系统	(193)
12.1.2 燃料燃烧的基本方程式	(193)
12.1.3 理论空气量与实际空气量	(194)
12.2 热力学第一定律在化学反应中的应用	(194)
12.2.1 具有化学反应的热力学第一定律表达式	(194)
12.2.2 反应热与反应热效应	(196)
12.3 反应热与反应热效应计算	(197)

12.3.1 生成焓	(197)
12.3.2 理论燃烧温度	(199)
12.4 热力学第二定律在化学反应中的应用	(200)
12.4.1 概述	(200)
12.4.2 自由能与最大有用功	(200)
12.4.3 自由焓与最大有用功	(201)
12.5 化学平衡与平衡常数	(203)
12.6 热力学第三定律	(204)
思考题	(205)
习 题	(205)
附录	(207)
附录 1	(207)
附录 2	(208)
附录 3	(209)
附录 4	(210)
附录 5	(211)
附录 6	(212)
参考文献	(213)

0.1 能源及热能利用

能源是发展生产和提高人类生活水平的重要物质基础。人类先后开发了风力、水力、燃料的化学能、太阳能、地热能和原子核能等。目前,应用最广泛的能源是燃料的化学能。在今后相当长的时期内,主要能源仍将以煤炭、石油及天然气等矿物燃料的化学能为主。

人类利用燃料的化学能一般有两种方式:一种是转换为热能直接应用于生产与生活,如烘干、蒸煮、采暖、熔化等;另一种则是先转换为热能,然后再将热能转换为机械能或电能用做动力,如蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机动力装置等。无论是日常生活或工业部门都需要动力,所以机械能或电能显得特别重要。目前,机械能多半是由燃料的化学能转变为热能,再由热能转换而来。各种能源与热能的转换以及热能的应用如图 0.1 所示。

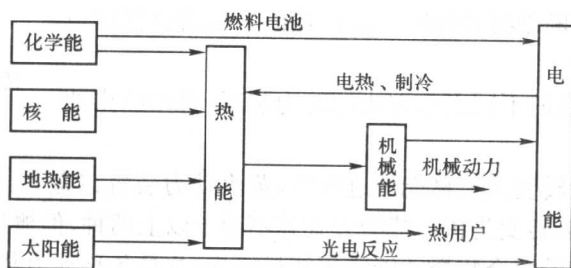


图 0.1 热能的转换及其应用

下面简单介绍两种典型的热能转变为机械能以至电能的动力装置的工作原理。

图 0.2(a)为蒸汽动力装置的流程图,其主要设备有锅炉、汽轮发电机组、凝汽器、水泵等。

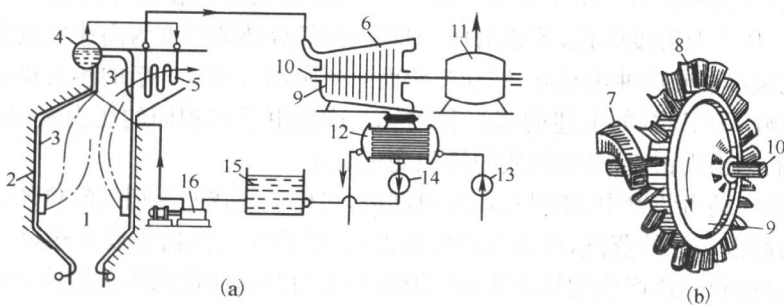


图 0.2 蒸汽动力装置流程图

- 1—锅炉;2—炉墙;3—水冷壁管;4—锅筒;5—过热器;
6—汽轮机;7—静叶;8—动叶;9—叶轮;10—轴;
11—发电机;12—凝汽器;13、14 及 16—泵;15—水箱

燃料(煤、油或气)在锅炉炉膛内燃烧,生成高温烟气,燃料的化学能转变为烟气所具有的热能。锅炉管内的高压水吸取烟气的热能变为水蒸气,水蒸气在过热器中进一步吸热提高温度,变成过热蒸汽。此时由于蒸汽的温度、压力比外界介质高,因此具有做功能力。高温、高压的水蒸气被导入汽轮机中,在静叶内膨胀使热能转变为动能,以推动汽轮机转子上的动叶而做功,使汽轮机的轴转动,如图 0.2(b)所示。轴转动的机械能带动发电机而转变为电能。做功后的蒸汽在凝汽器中放热而凝结为水,再由给水泵将凝结水送回锅炉,完成一个循环。冷却水由循环水泵不断地送入凝汽器中吸热后排出,带走部分热能,这部分热能没有得到利用。同时,给水泵和循环水泵消耗了发电机发出的部分电能。

内燃机也是使用最广泛、为人们所熟悉的一种动力装置。内燃机有汽油机和柴油机之分,现以汽油机为例进行讨论。其主要组成部分如图 0.3 所示。燃料(油)和空气混合后进入气缸,点火燃烧。由燃料的化学能转变而来的热能使燃气的温度和压力瞬时急剧上升,大大高于周围环境的温度和压力。于是,燃气膨胀推动活塞做功,并通过连杆、曲柄机构使由热能转变而来的机械能储于飞轮,飞轮所储存能量的大部分通过各种方式,或以机械能、或由机械能转变成电能传递出去;飞轮所储存能量的一小部分使活塞逆行,将做功后的燃气排至大气环境,完成一个循环。重复上述过程,这样不断地将燃烧时放出的热能转变为机械能或电能。

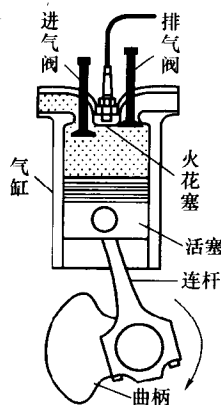


图 0.3 内燃机示意图

分析上述两种典型的不同的工作方式的动力装置,可归纳出如下一些普遍规律。

首先,在实现热能转变为机械能的过程中,蒸汽动力装置以蒸汽、内燃机以燃气作为媒介。虽然用以实现热能转变为机械能的方式并不限于以上两种,但概括来看,无论何种动力装置,都必须借助一定的媒介物质才能实现能量转换,这是各种动力装置的共同之处。工程上将实现能量转换的媒介物质称为工质。

其次,就动力装置范围而言,欲使热能转变为机械能,必须通过工质的膨胀才能实现。如上述的内燃机中,含有大量热能的高温高压燃气,在气缸内膨胀,推动活塞而使部分热能转变为机械能,由活塞传出。至于蒸汽轮机中,蒸汽膨胀大部分在静叶内进行,高温高压蒸汽流经静叶时,压力及温度降低,流速增加,即蒸汽的部分热能转变为高速气流的动能(机械能),高速气流流出静叶后冲击动叶、转动叶轮而对外做功。所以一般的热力机械(或简称热机)都以气态物质为工质,如上述的蒸汽和燃气。这是由于在相同的压力及温度变化条件下,与固态和液态物质相比,气态物质的体积变化最大。

此外,在蒸汽动力装置中,燃料在炉膛内燃烧,将化学能转变为烟气的热能,水从烟气中吸取热能变为高温高压的蒸汽,推动汽轮机而做功,然后在凝汽器内放出热量;在内燃机气缸内,则是通过燃料燃烧产生的热能使燃气温度及压力升高而推动活塞做功,然后排入大气放出热量,在汽轮机内膨胀做功。虽然两种热机使用的工质不同,经历却相同,即工质经历吸热、膨胀做功、放热、压缩等一系列变化。至于燃料的燃烧,推究其作用,无非是产生热能。对于工质而言,所吸取的热能由何而来并无关系,或从燃烧,或从其他物体传入,效果相同,故完全可用一个温度恒定的高温物体来代替燃烧对工质的加热,而撇开化学能转变为热能