



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGCHENG RELIXUE

工程热力学

尚玉琴 主 编
杨小琨 吴 珂 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power Technology



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGCHENG RELIXUE
工程热力学

主 编 尚玉琴
副主编 杨小琨 吴 珂
编 写 刘明福 杜雅琴
主 审 张天孙 张明智



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

本书主要讲述工程热力学的基本概念、基本定律，工质的热力性质，各种热力过程和循环的分析计算等。

本书注意联系工程实践，编写时按照高职高专教育“必需、够用”原则编写，突出实用性和针对性；另外，在选取例题、思考题和习题时，力求使其有代表性、启发性和灵活性。每章有小结、思考题、习题，书后附有常用的各种图表。本书还配有电子教案，可以作为教师授课的参考和学生学习的指导。

本教材主要作为高职高专电厂热能动力工程、火电厂集控运行、供热通风与空调工程等专业的教材，也可作为电力行业的培训教材，还可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程热力学/尚玉琴主编. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5083-5864-2

I. 工… II. 尚… III. 工程热力学-高等学校：技术学校-教材 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 121958 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 11 月第一版 2007 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 304 千字 2 插页

定价 21.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育)。

本书主要讲述工程热力学的基本概念、基本定律,气体及蒸汽的热力性质,各种热力过程和循环的分析计算等。除此之外还简要阐述熵产、烟及烟损等内容。本教材注意联系工程实践,讲述热工理论在生产实践中的具体运用。

本书按照必需、够用原则编写,突出实用性、针对性,重视应用基本理论解决工程实际问题,注意学生创新能力的培养。本书参考了国内外同类教科书的特点,博采众长,力图使所叙述的内容寓理深刻且表述浅明,做到雅俗共赏。本书在选取例题、思考题和习题时,力求使其具有代表性、启发性和灵活性。为便于学生的学习,每章都有总结概括的小结,起到提纲挈领的作用,达到融会贯通的目的。本书带有*号的内容是相对独立的,可根据教学的具体情况部分或全部删减,并不影响全书的系统性。本书配有电子教案,这是作者多年教学工作与经验的积累,可以作为教师授课的参考和学生学习的指导。

本书一律采用国际单位制。书中的名词术语、单位均符合国家标准。

参加本书编写工作的有:郑州电力高等专科学校尚玉琴(绪论,第四、六、八章);郑州电力高等专科学校杜雅琴(第一、二、七章);郑州电力高等专科学校吴珂(第三、五章);太原电力高等专科学校刘明福(第九、十章)。尚玉琴任主编并负责全书的统稿工作。本书电子教案由郑州电力高等专科学校杨小琨主持编制。

本书由保定华北电力大学张明智教授和山西大学工程学院张天孙教授担任主审,编者十分感谢主审人对本书的仔细审阅及提出的宝贵意见,使编者受益匪浅。南京工程学院李笑乐教授对本书的内容也做了详细审阅,令本书更加严谨。

在本书的编写过程中,得到郑州电力高等专科学校王丙照、杨建华的大力帮助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,难免有疏漏与不妥之处,恳请广大同行专家和读者批评指正。

编 者

2007年10月

符 号

拉丁字母

A	面积, m^2
a	声速, m/s
c	质量热容(比热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 流体流速, m/s
c'	体积热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
d	汽耗率, kg/J , 含湿量, g/kg
E	总能(储存能), J
e	比总能, J/kg
E_L	焓损, J
e_L	比焓损, J/kg
E_x	焓, J
e_x	比焓, J/kg
$E_{x,Q}$	热量焓, J
$e_{x,q}$	比热量焓, J/kg
E_k	宏观动能, J
E_p	宏观位能, J
F	力, N
H	焓, J
h	比焓, J/kg
M	摩尔质量, kg/mol
Ma	马赫数
m	质量, kg
n	物质的量, mol ; 多变指数
P	功率, W
p	绝对压力, Pa
p_b	大气压力, 背压, Pa
p_g	表压力, Pa
p_i	分压力, Pa
P_s	饱和压力, Pa
p_v	真空值, Pa ; 湿空气中水蒸气的分压力, Pa
Q	热量, J
q	比热量, J/kg

q_m	质量流量, kg/s
R	普适气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
S	熵, J/K
s	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
S_g	熵产, J/K
s_g	比熵产, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
S_f	熵流, J/K
s_f	比熵流, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
T	热力学温度, K
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
t_d	露点温度, $^{\circ}\text{C}$
t_s	饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
U	热力学能, J
u	比热力学能, J/kg
V	体积, m^3
v	比体积, m^3/kg
V_c	余隙容积, m^3
V_m	摩尔体积, m^3/mol
W	体积功, J
w	比体积功, J/kg
W_{net}	循环净功, J
w_{net}	比循环净功, J/kg
W_t	技术功, J
w_t	比技术功, J/kg
W_s	轴功, J
w_s	比轴功, J/kg
w_i	质量分数
x	干度
x_i	摩尔分数
希腊字母	
α	抽汽率
γ	汽化潜热, J/kg
ε	制冷系数
ε'	供热系数(热泵系数)
η_c	卡诺循环热效率
η_i	循环热效率

号符

κ 质量热容比(比热容比); 定熵指数
 φ 相对湿度; 喷管速度系数
 φ_i 体积分数

π 增压比
 β 压力比
 β_{cr} 临界压力比

率效热机面衝
 率效热机衝

1. 量
 2. 量

目 录

前言

符号

绪论	1
第一节 能源及热能的利用	1
第二节 能量转换装置的工作过程	1
第三节 热力学发展简史	3
第四节 工程热力学的研究内容及研究方法	4
第一章 基本概念	5
第一节 工质和热力系统	5
第二节 状态与基本状态参数	6
第三节 状态方程式和状态参数坐标图	10
第四节 准平衡过程和可逆过程	11
第五节 功和热量	13
第六节 热力循环	16
小结	17
思考题	18
习题	18
第二章 热力学第一定律	21
第一节 热力学第一定律的实质	21
第二节 闭口系统的能量方程	23
第三节 开口系统稳定流动能量方程	25
第四节 稳定流动能量方程式的应用	30
小结	33
思考题	34
习题	34
第三章 理想气体及其热力过程	37
第一节 理想气体的概念及状态方程式	37
第二节 理想气体的比热容	39
第三节 理想气体热力学能、焓、熵的变化量的计算	42
第四节 理想气体混合物	44
第五节 理想气体的热力过程	46
小结	52
思考题	54

习题	54
第四章 热力学第二定律	56
第一节 自发过程的性质	56
第二节 热力学第二定律的表述	57
第三节 热力学第二定律的数学表达式	58
第四节 卡诺循环和卡诺定理	60
第五节 热力过程熵变化分析	64
第六节 烟及烟损失	67
第七节 热力学第二定律的应用	72
小结	75
思考题	75
习题	76
第五章 水蒸气	78
第一节 水蒸气的基本概念	78
第二节 水蒸气的产生过程	79
第三节 水和水蒸气的热力性质表和图	82
第四节 水蒸气的热力过程	85
小结	87
思考题	87
习题	87
第六章 气体与蒸汽的流动	89
第一节 稳定流动的基本方程式	89
第二节 气体在喷管中流动的基本规律	91
第三节 绝热滞止	94
第四节 喷管的计算	96
第五节 有摩擦阻力的绝热流动和绝热节流	102
小结	106
思考题	107
习题	107
* 第七章 压气机的压气过程	109
第一节 压气机的压缩过程	109
第二节 压气机级的实际循环	110
第三节 多级压缩和级间冷却	112
第四节 压气机的热力性能	114
小结	117
思考题	117
习题	117
第八章 蒸汽动力循环	119

第一节 朗肯循环	119
第二节 再热循环	125
第三节 回热循环	127
第四节 热电联产循环	131
* 第五节 燃气—蒸汽联合循环	132
小结	133
思考题	134
习题	135
第九章 制冷循环	136
第一节 逆向卡诺循环	136
第二节 空气压缩制冷循环	137
第三节 蒸汽压缩制冷循环	140
第四节 蒸汽喷射式制冷循环及吸收式制冷循环	143
* 第五节 热泵采暖循环	145
* 第六节 制冷剂及其热力性质	146
小结	148
思考题	148
习题	149
第十章 湿空气	150
第一节 概述	150
第二节 湿空气的湿度	151
第三节 湿空气的焓、露点温度与湿球温度	153
第四节 湿空气的焓—湿图	155
第五节 湿空气的典型过程	157
小结	161
思考题	161
习题	162
附 录	163
附表 1 常用气体的某些基本热力性质	163
附表 2 气体的真实摩尔定压热容	163
附表 3 某些常用气体在理想状态下的平均摩尔定压热容	164
附表 4 某些常用气体在理想状态下的平均摩尔定容热容	165
附表 5 某些常用气体在理想状态下的平均比定压热容	165
附表 6 某些常用气体在理想状态下的平均比定容热容	166
附表 7 某些常用气体在理想状态下的平均体积定压热容	167
附表 8 某些常用气体在理想状态下的平均体积定容热容	168
附表 9 298~1500K 气体的摩尔热容公式 (曲线关系式)	168
附表 10 0~1500℃ 气体的平均比热容与平均体积比热容 (直线关系式)	169

附表 11	理想气体状况下空气的热力性质	169
附表 12	饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按温度排列)	170
附表 13	饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按压力排列)	172
附表 14	未饱和水与过热蒸汽的热力性质	174
附表 15	氨 (NH_3) 饱和液和饱和蒸汽的热力性质	180
附表 16	氨 (NH_3) 过热蒸汽的热力性质表	181
附表 17	氟里昂 134a 的饱和性质 (按温度排列)	184
附表 18	氟里昂 134a 的饱和性质 (按压力排列)	185
附表 19	氟里昂 134a 过热蒸汽的热力性质表	186
附图 1	水蒸气的焓熵图	
附图 2	湿空气的焓湿图	

参考文献	192
------	-----

绪 论

第一节 能源及热能的利用

一、能源

人类生产需要能源,日常生活也离不开能源。能源是指能为人类生活与生产提供某种形式能量的物质资源。随着能源科学技术的发展,新能源的不断加入,能源种类日益增多,分类方法也种类繁多。世界能源委员会推荐的能源类型分为:固体燃料、液体燃料、气体燃料、水能、电能、太阳能、生物质能、风能、核能、海洋能和地热能。这是按能源的形态特征或转换与应用的层次对它进行的分类。其中,煤炭、石油和天然气是当今世界能源的三大支柱,这些埋藏在地下不能再生的燃料资源统称为化石能源。按能源的形成是否经过加工,又可将能源分为一次能源和二次能源。一次能源包括化石能源、太阳能、水能、风能、地热能、核能、海洋能、生物质能等。一次能源按其能否循环使用和不断得到补充,又分为非再生能源和可再生能源。二次能源包括煤气、焦炭、洁净煤、蒸汽、液化气、酒精、汽油、柴油、重油、电力、激光和沼气等等。

二、热能的利用

在种类繁多的能源中,无论从种类数目上,还是从能量数量上来说,绝大多数都是首先经过热能形式而被利用的。例如,石油、煤炭、天然气等燃料的化学能常通过燃烧将其转换为热能;太阳能常通过集热器将其辐射能转换为热能;核能通过裂变反应或聚变反应释放出热能;海洋温差发电利用的也是热能;地热能本身提供的就是热能。因此,热能在能量利用中有着极其重要的意义。热能的利用有两种基本方式。

(1) 热能的直接利用。直接利用就是不对其能量形式加以转换而直接利用。

(2) 热能的间接利用。间接利用就是将热能转换为其他能量形式之后再行利用。

虽然在生产以及生活中热能的直接利用也极为广泛,如在冶金、化工、采暖等生产部门,但应用最广的能量形式是将热能转化为机械能和电能,如热力发电厂、机动车辆、船舶、飞机的热动力装置均属于此类。绝大多数的机械能和电能是由热能转换而来,水能和风能的利用却极为有限。机械能与电能之间的能量转换在理论上可以无条件 100% 地相互转换,而且实现也较为简单;但将热能转换为机械能或电能的有效利用程度较低。早期蒸汽机效率只有 1%~2%,目前,燃气轮机装置热效率大约只有 20%~30%,内燃机为 25%~35%,较为先进的大型热力发电机组热功转换效率仅为 40% 左右,而且实现热功转换的设备系统和过程也较为复杂。因此,如何更有效的实现热能与机械能的转换,是一个十分重要而迫切的课题。

第二节 能量转换装置的工作过程

热能的转换与利用离不开能量转换装置,如蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机、制冷装

置、空调装置等。

一、蒸汽动力装置的工作过程

热能转化为机械能是通过热动力装置实现的，目前在工程上热动力装置使用较多的有两种，即蒸汽动力装置和燃气动力装置。

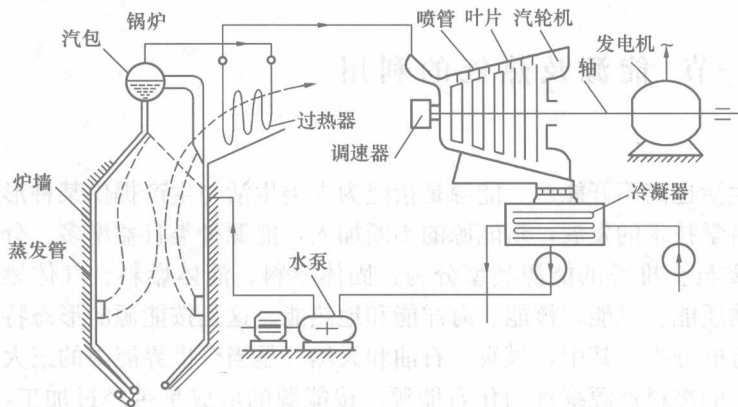


图 0-1 火力发电厂蒸汽动力装置示意图

在火力发电厂中，热能转化为机械能是由蒸汽动力装置实现的。图 0-1 为火力发电厂蒸汽动力装置示意图，它的主要设备包括锅炉、汽轮机、冷凝器、水泵等。

燃料在锅炉炉膛内燃烧而产生高温烟气，燃料的化学能转变为烟气的热能。烟气的热能传递给锅炉的省煤器、水冷壁、过热器内的工质，工质受热变为高温的过热蒸汽，过热蒸汽经管道输送至汽轮机。在汽轮机的喷管中，蒸汽的压力降低，速度提高，利用蒸汽所获得的动能冲动汽轮机转子上的叶片，使汽轮机转子旋转，从而将蒸汽的热能转变为机械能，通过轴转动向外做功；汽轮机再带动发电机转子旋转而发出电能。做功后的蒸汽在冷凝器中放热而凝结成水，再由水泵经低压加热器、除氧器、高压加热器送回锅炉，如此周而复始，就使燃料燃烧时释放的热能连续不断地变为电能。

从火电厂生产过程可以看出，省煤器、过热器、水冷壁、冷凝器等热力设备中进行的是热量的传递，而在汽轮机中进行的是热能向机械能的转化。

二、制冷装置的工作过程

创造一个低温环境并维持低温是利用制冷装置来实现的。制冷装置通过工质的循环将热从低温物体移出并排向高温物体。图 0-2 为采用氟里昂为制冷剂的蒸汽压缩式制冷装置示意图。低温低压的氟里昂蒸汽从蒸发器被吸入压缩机后，经压缩机压缩变为高温高压的过热蒸汽，送到冷凝器冷凝为高压液态氟里昂，再经膨胀机降压降温后送回蒸发器，吸收热量后汽化为蒸汽，蒸发器室则形成并保持低温环境。在这个制冷装置中，压缩机需要消耗机械能循环才能够不断进行。

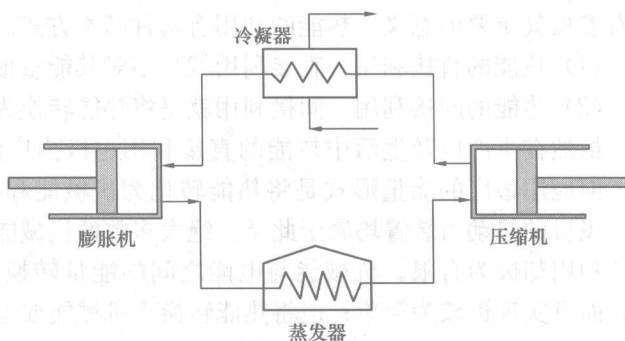


图 0-2 蒸汽压缩式制冷装置示意图

三、能量转换装置的共同特性

蒸汽动力装置、制冷装置等能量转换装置的结构与工作方式虽然不同，但它们却有共同的特性。

(1) 能量转换装置在工作中都需要工作介质（工质）的参与，尽管装置中使用的工质物

性不同,但在能量转换中的作用是相同的。

(2) 能量转换是在工质状态不断的变化中实现的。各种能量转换装置中要实现能量转换,工质都必然经历压缩、吸热、膨胀、放热等热力过程。

(3) 能量转换是在周而复始的循环中完成的。蒸汽动力循环中将吸热量的一部分转变为机械能,制冷循环则消耗机械能,将热量从低温物体排向高温物体。

能量的转换及热量的传递是能量转换设备中的主要过程。如何使能量转换在最有利的条件下进行,直接关系到能量转换装置的经济性,而这些内容正是工程热力学所讨论的内容。

第三节 热力学发展简史

热现象是人们最常接触到的自然现象之一。人类最早利用热现象为自己服务,虽可追溯到钻木取火,但研究热现象并使之成为一门科学,则直到 19 世纪中叶才得以完成。

18 世纪中叶瓦特发明蒸汽机,实现了大规模的热能到机械能的转换,推动了欧洲的工业革命,也激发了人们研究热现象的兴趣。但是直到 18 世纪末,一种错误的热素说仍广为流传。热素说认为:热是一种没有质量的、不生不灭的物质,称为“热素”,它可以透入一切物体,物体的热和冷取决于所含热素的多少。由于热素说无法解释诸如摩擦生热等现象,人们开始认为热应该是和物质运动相关联的。伦福德于 1798 年首先提出,制造大炮时炮筒和切屑都产生高温,但并没有热素流入,因此,热必定与切屑时的运动有关。

1842 年迈耶首先提出热是一种能量形式,它可以和机械能相互转换,但总的能量保持不变。到 1850 年,焦耳以多种实验方法测定了热和功的当量关系。至此,关于能量守恒和转换的原理,即热力学第一定律,终于取代热素说而得以确认。

关于热力学第二定律,卡诺于 1824 年在研究提高蒸汽机效率的基础上最先指出,只要有温差存在,就能产生动力,热机必须不同温度的热源之间工作,而热机的工作效率取决于高温热源和低温热源的温度,就像水轮机的效率取决于高、低水位的落差一样。卡诺的研究涉及热能转变为机械能的条件和效率(即热力学第二定律的内容),但卡诺所处的时代,热素说还占统治地位,卡诺也不例外,他的结论虽然是正确的,但他对热能本质的理解却是错误的,他只是猜到了热力学第二定律。

热力学第二定律的确立,应归功于克劳修斯。他于 1850 年提出了热力学第二定律的如下表述:热不可能自发地、不付任何代价地由低温物体传向高温物体,并以这一表述为前提正确论证了卡诺定理。

热力学两个基本定律的建立,构建了热力学理论的框架,指导了热机的发展和不断完善,并被推广应用于其他科技领域。

此后,能斯特于 1912 年在研究低温现象的基础上,提出了绝对零度不可能达到的原理,也被称作热力学第三定律。

如上所述,热力学理论在生产实践和科学实验中建立并充实,反过来它又推动了生产和科学技术的发展。在初期它所涉及的主要是热能和机械能的转换,以后由于热力学在化工、冶金、制冷、空调以及低温、超导、反应堆以及气象、生物等各个方面获得了越来越广泛的应用,因而它的研究范围目前已扩大到化学、物理化学、电、磁、辐射等现象。

第四节 工程热力学的研究内容及研究方法

一、工程热力学的研究对象和主要内容

热力学是研究与热现象有关的能量转换规律的科学,工程热力学是热力学最早发展起来的一个分支,侧重于热力学基本原理在工程上的具体应用,其主要研究对象是热能与机械能及其他形式的能量之间相互转换规律的一门学科,其目的是改进和完善实现能量转换的热工设备,提高能量转换效率或能量利用效率。归纳起来,主要包含以下几部分内容。

(1) 能量转换的基本原理,即热力学两大基本定律。热力学第一定律描述了能量转换时的数量守恒关系。热力学第二定律描述了能量转换时的质量不守恒关系,指出了热力过程进行的方向性。

(2) 工质的热力性质。其主要内容是理想气体、水蒸气、湿空气、制冷剂等常用工质的基本热力性质。工质热力性质的研究是工程热力学的主要研究内容之一,是具体分析计算能量传递与转换过程的前提。研究工质的热力性质主要是研究工质与能量传递及转换有关的各种属性及关系。

(3) 各种热工设备中能量传递、转换的热力过程。其主要内容有理想气体的热力过程、喷管内的流动过程、动力循环及制冷循环等热力过程的分析计算。这些分析计算是热力学基本定律结合工质性质和过程特性在工程实际中的具体应用,通过计算分析影响能量转换的因素,从而找出提高能量转换的途径。

二、工程热力学的研究方法

热力学有两种不同的研究方法:一种是宏观研究方法;另一种是微观研究方法。应用宏观研究方法的热力学称为宏观热力学(或经典热力学或唯象热力学)。应用微观研究方法的热力学称为微观热力学(或统计热力学)。

宏观研究方法把物质看作是连续的整体,用宏观物理量描述其状态,以根据大量的观察和实验所总结出的基本定律为依据,进行逻辑演绎和推理,得出描述物质性质的宏观物理量之间的关系式,以及能量传递与转换的结论。宏观研究方法的特点是简单、可靠,而且普遍适用。但这种方法对于一些物理现象和物质属性的本质,说明解释能力较弱。

微观研究方法是从物质的微观结构出发,把物质看作是由大量分子、原子等微观粒子组成,以微观粒子运动遵守量子力学原理为依据,在对物质的微观结构及粒子运动规律作某些假设的基础上,应用统计方法得出微观量的统计平均值,由微观量的统计平均值分析研究热现象的基本规律和物质的宏观物理属性。微观研究方法的特点是可以更深刻地解释一些物理现象和物质属性的本质,但由于所假设的简化模型与实际往往相差较远,其可靠性与适用性较差。

本课程主要采用宏观方法进行讨论,但为了对某些热现象的进一步理解,必要时也从微观方面作适当的解释。在本课程的学习中应注意以下几点。

(1) 明确本课程的研究对象和任务。

(2) 掌握本课程的学习方法。注意对复杂事物进行抽象、概括、理想化和简化,并注重理解和掌握所应用的一些基本定律和公式的具体研究方法。

(3) 重视基本技能的训练。本课程具有很强的工程应用性。基本技能的训练是学习过程中的一个重要环节,应予以重视,决不能放松。

第一章 基本概念

工程热力学是研究热能和机械能相互转换规律的一门学科,本章围绕这一内容介绍热力系统、状态参数、热力过程、功和热量以及热力循环等基本概念。学习中应重点注意对基本状态参数及其特点,准平衡过程和可逆过程的特点和条件,功和热量的概念和计算的掌握。

第一节 工质和热力系统

一、工质

热机是实现热能向机械能转换的设备,如汽轮机、燃气轮机、内燃机等。无论哪一种热机,总是用某种物质从某个能源获取热能,使它具有高能量而对机器做功,最后又把余下的热能排向大气或冷却水。在能量转换装置中实现热能与机械能相互转换的媒介物质称为工质。能量的转换,依赖于工质吸热、膨胀等变化过程,要实现连续转换,必须不断将新鲜工质引入能量转换装置中,并将工作完了的工质排出,因此要求工质要有良好的膨胀性和流动性,此外还要求工质的热力性能良好,价廉、易得、无毒、无腐蚀性等。在火力发电厂中绝大多数是用水蒸气作工质。

二、热力系统

在热力学中分析一个现象或过程时,常将研究的对象用一些边界与周围有关的其他物体相分隔,这种人为分离出来的研究对象称为热力学系统,简称热力系统。热力系统以外的其他有关物体统称为外界或环境。热力系统与外界的分界面就是边界。边界可以是真实的(图 1-1 和图 1-2 中,取气体工质为热力系统时,汽缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的界面),也可以是虚构的(图 1-2 中进口截面和出口截面可以认为是虚构的界面);可以是固定的,也可以是变化的(图 1-1 中活塞内壁的截面是移动的)。热力系统与外界之间的一切相互作用(物质交换、热和功的传递)都通过边界来完成。

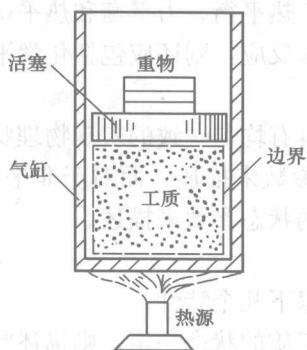


图 1-1 闭口热力系统

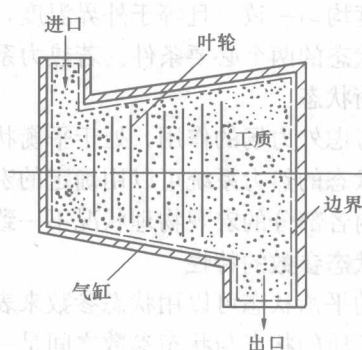


图 1-2 开口热力系统

按热力系统与外界进行物质和能量交换的情况,可将热力系统分类如下:

闭口热力系统——热力系统与外界无物质交换,或者说没有物质穿过边界。闭口热力系统简称为闭口系统,也可称为封闭热力系统。如图 1-1 所示取边界内的全部工质为热力系统时即为闭口热力系统。

开口热力系统——热力系统与外界有物质交换,或者说有物质穿过边界。开口热力系统简称为开口系统。如图 1-2 所示的取边界内的工质为热力系统时即为开口热力系统。

绝热热力系统——热力系统与外界无热量交换。在工程研究中,对许多虽有热量交换,但热量相对于通过边界的其他能量可忽略其数量时,也常作为绝热热力系统来对待。如水蒸气在汽轮机中的膨胀、流体流过阀门等。绝热热力系统简称为绝热系统。

孤立热力系统——热力系统与外界既无能量交换也无物质交换。孤立热力系统的一切相互作用都发生在系统内部。显然,孤立热力系统一定是绝热热力系统、闭口热力系统,但绝热热力系统、闭口热力系统却不一定是孤立热力系统。孤立热力系统简称为孤立系统。

正确选择热力系统是对问题进行热力学分析的前提。热力系统的选取主要取决于所提出的研究任务和所采用的分析方法。例如,要计算某蒸汽轮机的功率,那么将蒸汽轮机或流过蒸汽轮机的蒸汽作为热力系统就可以了;要研究如何提高火力发电厂的热效率,那就应该将与之相关的蒸汽锅炉、蒸汽轮机、水泵、冷凝器、回热加热器等都包括进热力系统才能进行分析;要研究该电厂对环境的污染,那么整个电厂,包括它的煤场、水源以及周围的大气都应该包括在热力系统中。

第二节 状态与基本状态参数

在热现象研究过程中,确定了热力系统后,需要对其状态进行描述。

一、状态、状态参数与平衡状态

工质的状态是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。从各个不同方面描写这种宏观物理状况的物理量便是工质的各个状态参数。

在热工分析和计算中所研究的状态常常指平衡状态。平衡状态,是指一个热力系统如果不受外界影响的条件下,其宏观性质不随时间而变化的状态。一个热力系统,当其内部无不平衡力,且作用在边界上的力和外力相平衡,则该热力系统处于力平衡;若热力系统内各部分的温度均匀一致,且等于外界温度,则该热力系统处于热平衡。力平衡和热平衡是工质处于平衡状态的两个必要条件。若热力系统内部还存在化学反应,则还应包括化学平衡,否则为不平衡状态。

若不考虑外力场的作用,处于平衡状态的热力系统应具有均匀一致的宏观物理状况,故对于平衡状态的热力系统可以用确定的宏观物理量即状态参数来描述。而对于非平衡状态,热力系统内各部分的宏观物理状况不一致,就不能用确定的状态参数来描述。

二、状态参数的特性

工质的平衡状态可以用状态参数来表示,状态参数有以下几个特性。

(1) 工质的状态与状态参数之间是一一对应的关系。工质的状态一定,则描述状态的各个状态参数都具有唯一确定的数值;状态参数一旦确定,工质的状态也就确定了,状态参数的全部或一部分发生变化,即表明物质所处的状态发生了变化。

(2) 状态参数的变化量只取决于给定的初始和最终状态, 而与变化过程中所经历的一切中间状态和路径无关。即初终状态相同, 经历不同的变化过程, 状态参数的变化量是相等的。若用 x 表示某一状态参数, 该特性用积分式表示为

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1$$

(3) 若工质由某一状态经历一系列变化又回到原状态时, 状态参数的变化量为零。用积分式表示为

$$\oint dx = 0$$

三、基本状态参数

在工程热力学中常见的状态参数包括压力、比体积、温度、热力学能、焓、熵等, 其中压力、比体积、温度可以直接测量, 有明确的物理意义, 称为基本状态参数, 其他几个参数不能直接测量, 需要利用可测量参数进行计算或导出才能确定。在这里先介绍压力、比体积和温度这三个基本的状态参数, 热力学能、焓、熵在后续内容中介绍。

(一) 压力

压力是指单位面积上所承受的垂直指向作用面的作用力。气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中对容器壁频繁撞击的总效应。在物理学中, 把这种单位面积上所承受的垂直作用力叫做“压强”, 而把容器壁上承受的总作用力叫做压力。而在工程上, 习惯地把物理学上的压强叫做压力, 而把它的压力叫做总压力。

1. 压力的表达式

根据压力的定义可知, 其表达式为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中 p ——压力;

F ——垂直作用于器壁上的总压力;

A ——容器壁的总面积。

2. 压力的表示

根据表示压力零基准点选取的不同, 压力有绝对压力与相对压力两种表示。式 (1-1) 所表示的压力为工质对容器壁产生的真实压力, 通常称绝对压力。但是当利用表计测量压力时, 因为压力计是处于大气环境中, 故通常测出的是欲测的绝对压力与当地大气压力 p_b 的差值, 称相对压力。

如图 1-3 所示, 当所测对象的压力高于大气压力时, 表计指示的是超出大气压力的部分, 称为表压力, 用 p_g 表示, 即

$$p_g = p - p_b \quad (1-2)$$

工程上将绝对压力低于大气压力的状态称为真空状态。此时大气压力与绝对压力的差值称为真空压力, 以 p_v 表示, 即

$$p_v = p_b - p \quad (1-3)$$

绝对压力、大气压力、表压力和真空压力之间的关系可由图

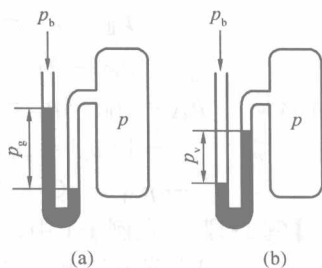


图 1-3 压力测量原理
(a) 表压力; (b) 真空压力