



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

REGONG JICHU

热工基础

陈忠海 主 编
刘明福 副主编



中国电力出版社

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



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

要 录 容 内

热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)

REGONG JICHU

热工基础

主 编 陈忠海
副主编 刘明福
编 写 杨秀芹 卢春萍 王雪锦
主 审 赵三元 赵 军

ISBN 978-7-308-09106-5
中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第121256号
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)

中国电力出版社出版

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

中国电力出版社印刷

北京印刷厂印刷

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 31印张 208千字 3册装

定价 33.00元



中国电力出版社

http://jc.cepp.com.cn

热工基础 (高职高专教育) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)

Thermal Engineering Foundation

内 容 提 要

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）。本书是遵照供热通风与空调工程专业高等专科培养目标与基本要求的精神，根据供热通风与空调专业高等专科《热工基础》课程教学基本要求编写的。本书分工程热力学和传热学两篇。作为教材，本书在内容取舍和结构安排上，既注意到深入浅出，讲清基本概念和基本方法，又注意到联系实际使学生深入理解基本规律的普遍适用性。为便于学生学习使用，每章均附有例题、思考题及习题。

本书可作为高职高专院校燃气工程、建筑设备工程等相近专业教材，也可作为从事通风空调、热能供应及锅炉设备工作的专业技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

热工基础/陈忠海主编. —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 978-7-5083-6106-2

I. 热… II. 陈… III. 热工学-高等学校：技术
学校-教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 157556 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>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 508 千字 3 插页
定价 33.00 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

本书遵照供热通风与空调工程专业高等专科学校培养目标与基本要求的精神,根据供热通风与空调工程专业高等专科学校《热工基础》课程教学基本要求编写。

本书分为工程热力学和传热学两篇。编写时特别考虑到高等专科学校的特点,在内容取舍和结构安排上,既注意到深入浅出,讲清基本概念和基本方法,又注意联系实际使学生深入理解基本规律的普遍实用性,使学生获得解决实际工程问题的能力。

本书作为一本教材,应有一定的系统性和完整性,某些章节的内容虽略超过《课程基本要求》的范围。但教材内容适当扩充些,可以使教师有选择的余地,教师可以按不同专业不同学时数及不同层次的要求进行选择。

为了帮助学生复习以及培养学生独立思考和解决问题的能力,本书每章附有例题、思考题及习题,这些题的代表性、启发性和工程性较强。

本书一律采用国际单位制,并在本书附录中列出各种单位制的换算表。

本书主审河北建筑工程学院赵三元教授和天津大学赵军教授仔细审阅了书稿,提出了许多宝贵意见,对提高书稿质量帮助极大,在此表示衷心感谢。

全书由陈忠海任主编,刘明福任副主编。参加本书的编写工作的有陈忠海(工程热力学:第九章、第十章;传热学:绪论)、刘明福(工程热力学:绪论、第一章、第二章、第五章、第六章)、杨秀芹(工程热力学:第八章;传热学:第四章、第五章)、卢春萍(工程热力学:第三章、第四章、第七章;传热学:第三章)、王雪锦(传热学:第一章、第二章)。

鉴于编者水平有限,难免疏漏与不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2007年9月

本书主要符号

工 程 热 力 学

英文符号 名称

a	修正分子间相互作用力的常数
B	大气压力
b	修正分子本身体积的常数
c	流速; 质量比热容
c'	容积比热容
c_p	定压质量比热容
c_v	定容质量比热容
COP	工作性能系数
d	直径; 含湿量
E	能量; 储存能
E_K	动能
E_p	位能
e	单位质量能量
e_K	单位质量动能
e_p	单位质量位能
F	力
f	截面积
g	质量成分
H	焓
h	单位质量焓
M	分子量; 千摩尔质量
M_c	摩尔比热容
m	质量
N	分子数目
n	多变指数; 摩尔数
p	压力
Q	热量
q	单位质量热量
R	气体常数
R_0	通用气体常数

英文符号 名称

r	汽化潜热; 容积成分
S	位移; 熵
s	单位质量熵 (比熵)
T	热力学温度
t	摄氏温度
U	热力学能 (内能)
u	比热力学能 (单位质量内能)
V	容积
v	比容
W	膨胀功; 总功
W_s	轴功
w	单位质量膨胀功
w_s	单位质量轴功
w_t	单位质量技术功
x	干度; 摩尔成分
z	压缩因子; 高度

希腊文符号 名称

β	临界压力比
ε	热湿比
ε_1	制冷系数
ε_2	供热系数
η_t	循环热效率
κ	比热比 (绝热指数)
ρ	密度
ρ_v	绝对湿度
τ	时间
φ	相对湿度

下脚码

名称
a 干空气
C 卡诺

下脚码	名称
c	临界
cv	控制体积
d	露点
f	流动
irr	不可逆
iso	孤立

下脚码	名称
re	可逆
s	饱和; 轴
sur	环境
sys	系统
w	湿

传 热 学

英文符号	名称
A	温度振幅; 表面积
a	热扩散率
B	大气压强
C	辐射系数
C _A	组分 A 的质量浓度
c	比热容
d	直径
E	辐射力
f	摩擦系数
G	投射辐射
g	重力加速度
H	焓; 高度
I	辐射强度
J	有效辐射
K	传热系数
l	长度
M	质流量; 质量
m	质流密度
NTU	传热单元数
P	压强
Q	热流量; 换热量
q	热流密度; 热流通量
R	热阻
r	半径; 汽化潜热
S	距离
T	热力学温度
t	摄氏温度
U	周边长度

英文符号	名称
u	速度
V	容积
v	速度
w	速度
X	角系数
Z	周期
希腊文符号	名称
α	吸收率; 对流换热表面传热系数
β	肋化系数; 体积膨胀系数
δ	厚度
Δ	差值
ϵ	发射率; 换热器效能
η	效率
Θ	无量纲过余温度
θ	过余温度
λ	导热系数
μ	分子量; 动力黏度
ν	运动黏度
ξ	延迟时间
ρ	密度; 质量浓度; 反射率
τ	时间; 透射率; 剪应力
ϕ	换热量; 单位时间的辐射能
ω	角速度
下脚码	名称
f	流体
w	壁面
c	临界
e	当量, 等效

下脚码	名称
s	饱和
m	平均
min	最小 (Minimum)
max	最大 (Maximum)

相似准则名称

$Bi = \frac{al}{\lambda}$ ——毕渥 (Biot) 准则 (λ 为固体的导热系数)

$Co = \alpha \left[\frac{\lambda^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right]^{-1/3}$ ——凝结 (Condensation) 准则

$Fo = \frac{a\tau}{l^2}$ ——傅里叶 (Fourier) 准则

$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$ ——伽利略 (Galileo) 准则

$Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta t}{\nu^2}$ ——格拉晓夫 (Grashof) 准则

$Le = \frac{\alpha}{D}$ ——刘伊斯 (Lewis) 准则

相似准则名称

$Nu = \frac{al}{\lambda}$ ——努谢尔特 (Nusselt) 准则
(λ 为流体的导热系数)

$Pr = \frac{\nu}{a}$ ——普朗特 (Prandtl) 准则

$Pe = Re \cdot Pr = \frac{ul}{a}$ ——贝克利 (Peclet) 准则

$Ra = Gr \cdot Pr$ ——瑞利 (Rayleigh) 准则

$Re = \frac{ul}{\nu}$ ——雷诺 (Reynolds) 准则

$Sc = \frac{\nu}{D}$ ——施米特 (Schmidt) 准则

$Sh = \frac{\alpha_D l}{D}$ ——舍伍德 (Sherwood) 准则

$St = \frac{Nu}{Pe \cdot Pr} = \frac{\alpha}{uc \rho}$ ——斯坦登 (Stan-
ton) 准则

目 录

前言

本书主要符号

第一篇 工程热力学

绪论	1
第一节 热能及其利用	1
第二节 研究对象及主要内容	2
第三节 研究方法	3
第一章 基本概念	4
第一节 热力系	4
第二节 工质的状态及其基本状态参数	5
第三节 平衡状态、状态方程式及参数坐标图	10
第四节 热力过程、准平衡过程与可逆过程	11
第五节 功与热量	13
第六节 热力循环	15
小结	17
习题	19
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 储存能与热力学能	22
第三节 热力学第一定律解析式	23
第四节 推动功与焓	24
第五节 稳定流动能量方程	25
第六节 稳定流动能量方程的应用	28
小结	30
习题	31
第三章 理想气体及其混合物	33
第一节 理想气体及其状态方程式	33
第二节 理想气体的比热容	35
第三节 理想气体的热力学能、焓和熵	40
第四节 混合气体的性质	42
小结	46
习题	46

第四章 理想气体的热力过程	48
第一节 研究热力过程的目的和一般方法	48
第二节 气体的典型热力过程	49
第三节 多方过程	55
小结	59
习题	59
第五章 热力学第二定律	62
第一节 概述	62
第二节 不可逆性与热力学第二定律的表述	63
第三节 卡诺循环与卡诺定理	65
第四节 克劳修斯不等式与熵	68
第五节 孤立系统熵增原理	72
第六节 能量品质的基本概念	75
小结	78
习题	80
第六章 水蒸气	83
第一节 概述	83
第二节 水蒸气的等压发生过程	84
第三节 水蒸气热力性质表	86
第四节 水蒸气的 h - s 图	91
小结	92
习题	93
第七章 湿空气	95
第一节 湿空气的性质	95
第二节 湿空气的焓湿图	100
第三节 湿空气的基本热力过程	102
小结	105
习题	106
第八章 气体和蒸汽的流动	108
第一节 稳定流动的基本方程	108
第二节 管内流动的基本特性	109
第三节 滞止参数与临界参数	112
第四节 喷管流动的计算	116
第五节 绝热节流	125
小结	128
习题	129
第九章 蒸汽动力循环	132
第一节 朗肯循环	132
第二节 再热循环	138

第三节 回热循环	139
第四节 热电联产循环	142
小结	145
习题	145
第十章 制冷循环	148
第一节 空气压缩制冷循环	148
第二节 蒸汽压缩制冷循环	151
第三节 吸收式制冷循环与气流引射压气式制冷循环	154
第四节 热泵循环	156
小结	157
习题	157

第二篇 传 热 学

绪论	160
第一节 传热学的研究对象	161
第二节 热量传递的基本方式	162
第三节 传热过程及传热系数	164
小结	165
习题	166
第一章 导热基本原理及稳态导热	167
第一节 导热基本概念和基本定律	167
第二节 导热微分方程及定解条件	171
第三节 一维稳态导热	175
第四节 二维稳态导热问题	189
小结	191
习题	192
第二章 非稳态导热	195
第一节 概述	195
第二节 集总参数法	200
第三节 一维非稳态导热的图算法	202
小结	205
习题	205
第三章 对流换热	207
第一节 对流换热过程简介	207
第二节 描写对流换热过程的微分方程式	208
第三节 边界层的概念	210
第四节 对流换热系数 α 的确定方法	214
第五节 相似理论基础及实验准则关联式的获得	215

第六节	单相流体对流换热实验准则关联式	221
第七节	自然对流换热及实验准则关联式	228
第八节	流体有相变时的换热	230
小结		234
习题		235
第四章	辐射换热	238
第一节	热辐射的基本概念	238
第二节	热辐射的基本定律	241
第三节	物体间辐射换热的计算	248
第四节	气体辐射	263
第五节	太阳辐射	270
小结		273
习题		275
第五章	换热器	278
第一节	换热器概述	278
第二节	换热器的热计算	286
小结		297
习题		298
附录		300
参考文献		321

第一篇 工程热力学

绪 论

第一节 热能及其利用

从人类学会用火到蒸汽机、内燃机的发明应用,人类文明前进的每一步,都和能源的开发利用息息相关。人类文明前进的过程,是开发利用能源的规模与水平不断提高的过程。从推动生产力提高的作用来看,是能源的开发利用将人类社会飞速推进到了现代文明时代。在当代,能源的开发利用水平仍是衡量一种社会形态、一个国家经济发展、科技水平与民众生活质量的重要标志。科学技术的发展、国民经济的繁荣、国防建设的加强、社会生活质量的提高、人类文明的进步等等,都必须以充足的能量供应为支柱。现在以至将来,社会发展对能源的开发利用势必依赖性更强,需求更大;开发利用能源的规模将越来越大,水平将越来越高,速度将越来越快。

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。二次能源中包括: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。在这些种类繁多的能源中,无论从种类数目上,还是从提供的能量数量上来说,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。

热能利用的方式可分为直接利用与间接利用。直接利用就是不对其能量形式加以转换而直接利用;间接利用就是将热能转换为其他能量形式之后再进行利用。虽然,在生产以及生活中热能是直接利用也极为广泛,但应用最广的能量形式是机械能和电能。绝大多数的机械能和电能由热能转换而来,水能和风能的利用却极为有限。将热能转换为机械能或电能再间接应用是能量生产与利用结构体系的主干线。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却是有条件

的,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,热能与机械能或电能之间的相互转换是能量生产与利用结构体系的关键。

第二节 研究对象及主要内容

热力学是研究与热现象有关的能量转换规律的科学。将热力学的基本原理应用于不同的领域相应有不同的热力学分支。工程热力学是热力学最先发展的一个分支,是热力学的基本原理在工程上的具体应用。工程热力学的主要研究对象是热能和机械能及其他形式的能量之间相互转换的规律。工程热力学的基本目的是:改进和完善诸如热力发动机、制冷机、热泵、压气机等实现能量传递与转换的热工设备,提高热功转换效率或能量利用效率。在这些热工设备中的能量传递与转换均是通过某种媒介物质的状态变化过程而实现的。这种实现能量传递与转换的媒介物质称为工质。

热力发动机是利用热能获得机械能的设备装置,简称热机。工程上最常见的热力发动机有蒸汽动力装置、燃气轮机装置和内燃机。蒸汽动力装置中是用水蒸气作为工质,燃气轮机装置和内燃机是用燃料燃烧产生的烟气作为工质。蒸汽动力装置的基本工作过程为:水在锅炉内吸收燃料燃烧释放出的热能成为过热蒸汽,然后进入汽轮机膨胀做功,机械能通过汽轮机的轴输出,做功后的乏汽流入凝汽器放热凝结为水,所放出的热能以循环冷却水为媒体最终排给大气环境,凝结水由给水泵加压送入锅炉,如此周而复始,连续不断地将燃料燃烧释放的热能一部分转换为机械能而另一部分排给大气环境。燃气轮机装置的基本工作过程为:空气和燃料分别经压气机与泵加压后送入燃烧室,在燃烧室内燃料燃烧将化学能转换为热能,燃烧释放的热能被产生的烟气吸收形成高温烟气,然后进入燃气轮机膨胀做功,机械能通过燃气轮机的轴输出,做功后的废气排给大气环境,与此同时废气所携带的一部分由燃料燃烧得到的热能也排给了大气环境。如此不断地吸入空气与燃料,排出废气,也同样连续不断地将燃料燃烧释放的热能的一部分转换为机械能,而另一部分排给大气环境。内燃机的基本工作过程为:打开进气阀,吸入燃料和空气后关闭进气阀,对燃料和空气的混合气体进行压缩。压缩终了,燃料和空气的混合气体在气缸中燃烧(点燃或压燃)产生高温高压的烟气,推动活塞膨胀做功。烟气膨胀做功后,排气阀打开,活塞将废气推出气缸排给大气环境。然后再次吸入燃料和空气,重复上述过程,不断地将燃料燃烧释放的热能一部分转换为机械能,而另一部分排给大气环境。

与热力发动机相反,制冷机和热泵是通过氟利昂、氨蒸气等制冷工质的循环过程,消耗机械能来实现由低温物体取热向高温物体放热的热能迁移过程。无论是热力发动机,还是制冷机和热泵,都是通过工质的状态变化来实现预期的能量传递与转换。压气机是另外一类热工设备,是通过消耗机械能来获得预期的高压气体。这些热工设备的具体结构并不是基础学科工程热力学深入研究的内容。但为了寻求提高这些热工设备能量转换经济性的途径与技术措施,工质的状态变化、能量的传递与转换却是工程热力学的主要研究内容。

工程热力学的主要研究内容,归纳起来,包括以下三个方面:

(1) 能量转换的基本原理。其主要内容是热力学第一定律与第二定律。热力学第一定律描述了能量传递与转换时的数量守恒关系,指出了热能的同一性;热力学第二定律描述了能

量传递与转换时的品质贬值趋势,指出了热能的特殊性。工程热力学是以这两个定律为基础而建立的一门工程技术基础理论。

(2) 工质的热力性质。其主要内容是理想气体、水蒸气、湿空气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) 各种热工设备的热力过程。其主要内容有理想气体的热力过程、喷管及扩压管内的流动过程、动力循环及制冷循环等热力过程的分析计算。这些典型热工设备热力过程的分析计算,是工程热力学应用基本定律,结合工质特性和过程特性分析计算具体能量传递与转换过程完善性的方法示例。任何一类热工设备的热力过程可能有很多种,作为一门工程技术基础理论课程不可能一一详述,所侧重介绍的是热力过程的分析计算方法。某类热工设备热力过程的进一步详细研究则属于相应专业课程的研究内容。

第三节 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)。

宏观研究方法不考虑物质的微观结构和微观运动规律,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。

工程热力学是关于热现象的宏观理论,研究方法是宏观研究方法为主;仅对一些物理现象、物质的性质,引用微观的气体分子运动论和统计热力学的某些观点进行说明和解释,帮助理解宏观现象和物质性质的物理本质。作为应用科学之一的工程热力学普遍采用抽象、概括、简化和理想化的方法,将复杂的实际现象与问题,突出本质,抓住主要矛盾,略去细节,抽出共性,建立合理的物理模型。这种科学合理的抽象,使复杂的实际问题的研究简洁有效,而且可以更深刻地反映问题的本质,是科学研究普遍采用的基本方法。

第一章 基 本 概 念

本章的主要内容是介绍工程热力学的研究对象以及描述这一研究对象的一系列术语和概念。这些内容是工程热力学的重要基础。

第一节 热 力 系

一、热力系、外界、边界

热力学中,研究各种热力设备(如内燃机、汽轮机)的能量转换时,首先要根据研究问题的需要而人为划定一定范围内的物质(如燃气、水蒸气)作为研究对象。这种人为划定的热力学研究对象称为热力系,简称系统。热力系以外的物质称为外界。热力系与外界的分界面称为边界。边界可以是真实存在的实际界面,也可以是实际不存在的假想界面;可以是静止的固定界面,也可以是活动的胀缩界面;还可以是这几种界面的组合。

例如:选择封闭在活塞气缸内的气体为热力系时(如图 1-1 所示),它的边界是真实存在的实际界面,而且可以膨胀或压缩;选择汽轮机内的水蒸气为热力系时(如图 1-2 所示),边界是静止的固定界面,而且在进出口处它的边界是实际不存在的假想界面。

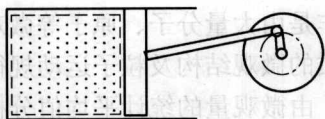


图 1-1 活塞气缸

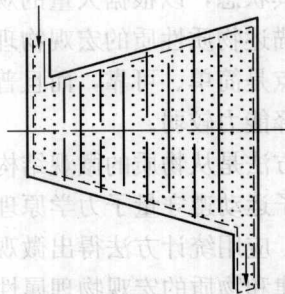


图 1-2 汽轮机

二、热力系与外界的作用

与其他学科的不同之处在于热力学研究的是能量转换。所谓热力系与外界间的作用,不是指作用力的大小、方向等问题,而是指热力系与外界间通过边界的物质交换和能量交换。热力系与外界间的能量交换又分为热量交换和功量交换两类。

外界一般指的是与热力系有相互作用关系的物质,而与没有作用关系的物质无关。

三、热力系的分类

按照系统与外界间的物质交换情况,可将热力系分为两类:闭口系与开口系。与外界无物质交换的系统称为闭口系。闭口系是取一定数量的物质为研究对象,所以又称为控制质量。如图 1-1 所示,取封闭在活塞气缸内的气体为热力系时,系统与外界没有物质交换,所以是闭口系统。与外界之间有物质交换的系统称为开口系。开口系是取一定空间范围内的物质为研究对象,所以又称为控制容积。如图 1-2 所示,取汽轮机内的水蒸气为热力系时,因

为有蒸汽不断地流进流出汽轮机,所以它是一个开口系统。闭口系统内部质量保持不变,开口系统内部的质量可以变化,也可以不变。

按照系统与外界的能量交换情况,可将热力系分为多种类型。下面,主要介绍一些常见的系统。与外界无热量交换的系统称为绝热系。绝热系可以是闭口系,也可以是开口系。与外界仅交换热量,且具有无穷大热容量的系统称为热源。对外放热的热源又称高温热源;对外吸热的热源又称冷源或低温热源。与外界既无物质交换,又无能量交换的系统称为孤立系。孤立系与外界没有任何作用关系,它是把有作用关系的物质都取在系统之内而构成的一种特殊系统。

工程热力学主要讨论的系统是由可压缩流体构成,如空气、燃气、水蒸气等,而且将热转换为功的能量转换毫无例外地都是通过体积膨胀而实现的。这种通过体积变化与外界间交换的功量称为体积变化功。这种仅通过体积变化功而实现热能转变为机械能的系统称为简单可压缩系。

以上是按照热力系与外界间的相互作用所作的分类。按照热力系内部物质的状况,也可将热力系分为不同的类型。按照热力系内各部分物质的物理化学状况是否相同可分为均匀系与非均匀系;按照热力系内部物质的组成成分可分为单元系与多元系;按照热力系内部物质的相态可分为单相系与多相系。在以后的内容中,没作特别说明的热力系都可看作是均匀、单元、单相系。

热力系是人为划定的热力学研究对象,其目的是明确研究对象,为进一步研究提供方便。同一个问题,热力系选择得当,进一步研究简单易行;反之,则可能给进一步研究带来很大困难。系统的选取是人为的,但一经选定,系统是闭口系还是开口系、绝热系还是孤立系,就取决于研究对象本身的特性。

第二节 工质的状态及其基本状态参数

一、状态与状态参数

1. 定义

热力系在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称作系统的热力学状态,简称状态。由于工程热力学研究的是热功转换,对于作为工质的可压缩流体的状态,主要讨论的是直接或间接与热功转换有关的由物质微观热运动所呈现的宏观物理属性。例如,系统对外膨胀做功的推动力——压力、系统膨胀做功的标志性参数——比容、热量传递的推动力——温度,等等。对于系统的应力、极性等与物质热运动无关的物理属性并不是工程热力学所研究的内容。

热力学中,描述系统所处状态的宏观物理量称为热力状态参数,简称状态参数或参数。常用的状态参数有:比容(v)、压力(p)、温度(T)、热力学能(U)、焓(H)、熵(S)等。

2. 状态参数的分类

状态参数分为强度量和广延量。强度量是一种对于系统内任意一点都具有意义的物理量。压力和温度就是两个工程热力学主要讨论的强度量。强度量是能量交换的推动力。如前所述,压力是系统对外膨胀做功的推动力,温度是热量传递的推动力。所以又称强度量为广义力或势。强度量与系统质量多少无关,不具有可加性。假如一个系统由两部分组成,一部

分温度为 20°C ，另一部分为 30°C ，不能说系统的整体温度为 50°C 。与强度量相对应，广延量是一种对于系统整体或某一部分才具有意义的物理量。广延量与系统质量多少有关，具有可加性。体积、热力学能、焓、熵等都是广延量。如整个系统的体积是系统内各部分体积之和，而对于系统内的某一点说有多大的体积是无意义的。广延量是能量传递的标志性参数。体积是体积变化功的标志性参数，熵是热量传递的标志性参数。由于广延量类似于力学中的位移，又称为广义位移。由于广延量与系统的质量有关，而不同的系统，质量往往不同，为了方便，同时也为了使我们的讨论具有代表性，我们常常以系统的单位质量物质为主要讨论对象进行分析讨论。这样就又形成了一种参数——比参数。比参数是广延量与系统质量之比，也即单位质量的广延量。比参数具有强度量的性质。如比容、比热力学能、比焓、比熵等。在符号表达上，广延量用大写字母表达，比参数用相应广延量的小写字母表达。在称呼上，除比容外，习惯常将其余比参数的“比”字忽略，而用符号的大、小写字母来区分广延量和比参数。

3. 状态参数的特性

系统的状态一定时，状态参数都有唯一确定的数值。系统的状态不变，则状态参数也不变。系统的状态发生变化时，状态参数也发生相应变化。也就是说状态参数与状态之间存在有一一对应的关系，状态参数是系统状态的单值函数，这是状态参数的基本特性。不符合这一特性的物理量，就不是状态参数；只有符合这一特性的物理量，才可以作为状态参数。状态参数的这一基本特性表现在数学上，状态参数具有如下积分特征：

(1) 热力系由状态 1 变化为状态 2 时，状态参数的变化量只取决于初、终状态，而与过程路径无关，即

$$\Delta x = \int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

(2) 当系统经历一系列状态变化而恢复到初态时，其状态参数的变化量为零，即

$$\oint dx = 0 \quad (1-2)$$

以上两式既可以作为状态参数变化量的计算式，也可作为判别状态参数的依据。某物理量，只要满足任何一式，就意味着该物理量符合状态参数的基本特性，可以作为一个状态参数；反之，只要违背任何一式，就意味着该物理量不符合状态参数的基本特性，不能作为一个状态参数。

二、基本状态参数

状态参数中比容、压力、温度是可以由仪表直接测量得到的参数，称作基本状态参数。

1. 比容与密度

单位质量工质所占有的体积称作比容，也称比体积，用符号 v 表示，单位是 m^3/kg 。

对于均匀系，如工质的体积为 V (m^3)，质量为 m (kg)，则它们之间的关系为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-3)$$

单位体积内所含工质的质量称作密度，用符号 ρ 表示，单位是 kg/m^3 。即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-4)$$