



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等工程 热力学

陈则韶 编著



高等教育出版社
Higher Education Press

TK123/35

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等工程热力学

陈则韶 编著

高等教育出版社

内容提要

本书是高等院校工科研究生教学用书、普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分6篇:热力学基础,流体工质的热力性质,多组分系统的热力学基础,特殊系统的热力学基础,热力循环,不可逆热力学基础。热力学基础篇浓缩了热力学的经典理论,强化了能量品位概念;流体工质的热力性质篇顺着科学研究的脉络,展示了对工质性质研究从理论关系到实验、计算和推算的全历程;多组分系统、特殊系统的热力学基础篇拓展了热力学研究领域,对多组分系统、磁介质系统、化学燃烧系统和辐射系统等进行了描述;热力循环篇是应用篇,涉及蒸汽动力循环、燃气循环和制冷热泵,强调应用热力学理论于实际,书中吸纳了最新工程实例;其他篇介绍了不可逆热力学基础。本书内容融汇了国内外有关教材的精华,吸纳了新的科研成果,并经多年教学实践和修改。书末有习题和附表。

本书可作为热能工程、动力机械及工程、制冷与低温工程、工程热物理及能源工程等专业的研究生教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等工程热力学/陈则韶编著. —北京:高等教育出版社,2008.6

ISBN 978-7-04-023616-3

I. 高… II. 陈… III. 工程热力学-研究生-教材 IV. TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第050430号

策划编辑 宋晓 责任编辑 宋晓 封面设计 张志奇 责任绘图 朱静
版式设计 余杨 责任校对 王超 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 涿州市京南印刷厂
开 本 787×1092 1/16
印 张 30.5
字 数 740 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>
版 次 2008年6月第1版
印 次 2008年6月第1次印刷
定 价 49.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23616-00

序

科教兴国战略促进了研究生教育的发展,近几年研究生的人数急剧增加。高等工程热力学是动力机械、制冷与低温工程、工程热物理、化工等与能源有关专业研究生的重点基础课程,其理论对高效利用能源、节约能源以及开发新能源有重要指导意义。由于研究生的教育灵活有余,规范不足,全国不仅缺乏统编教材,甚至参考教材也很少。本人执教本课程十多年,头几年还能买到杨思文教授主编《高等工程热力学》(高等教育出版社出版)教材,以后就买不到了。教材的缺乏令执教者头痛,更让学生犯难。为了教学两便,只好鼓起勇气自编高等工程热力学教材。本教材试用了多年,不断纠错并逐渐得到完善,特别是有目的地针对教材不足开展了相应科研,所喜略有所得,终于对教材有所补充,得以完稿自慰。本教材虽然有许多不尽人意之处,但承蒙同行厚爱,被推选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

“高等工程热力学”的书名决定了本书的内容、性质和深度。首先,本书的主题是热力学,即揭示热与功的转换规律,研究热功转换的方法,寻求热转换为功的最大化,追求最省功的制热制冷原理。其次,本书的内容应当体现工程特点,内容要与实际相结合,与最新成熟技术相结合。再者,本书在内容的深度和广度上应高于和宽于大学本科工程热力学教材,适度体现“高等”的含意。

基于上述观点,全书共6篇22章。第一篇热力学基础篇(第一~四章),简要阐述基本概念和热力学第一、二定律,重点在于“熵”和“有效能”。第二篇流体力质的热力性质(第五~九章),展示了四个方面的内容。首先建立起热力函数的一般关系,为利用可测的热力参数导出不能直接测量的热力函数奠定了理论基础;其次介绍了热力学参数 $p-v-T$ 的典型测试方法,为学生提供一些基本的热力学实验知识;而后介绍了若干常用的实际状态方程,以及应用状态方程计算热力参数的方法;最后,鉴于因流体力质种类繁多、测试工作的繁重所产生的流体力质热力性质的精确推算的重要性,著者根据多年研究的成果增写了第九章工质热力性质的推算。第三篇多组分系统的热力学基础(第十~十一章),讲述了多组分系统的热力学函数及其关系的特点、表征方法,引出了逸度、活度、偏摩尔参数等概念,讨论了多组分多相平衡的热力学问题,为研究当今活跃的混合工质的动力循环和制冷循环奠定了基础。第四篇特殊系统的热力学基础(第十二~十七章),是气体工质膨胀做功系统的拓展,其拓展表现在系统的工质和功的表达式不同。本书介绍的特殊系统有简单弹性力系统、表面薄层系统、简单磁介质系统、化学反应与燃烧系统、燃料电池系统、辐射光子气系统。已有的辐射光子气系统的理论,揭示了不同频率光子的能量大小的热力学第一定律属性,没有确定其能量品位高低的热力学第二定律属性,讨论方法局限于与辐射源的热平衡态,与实际应用有一定距离。作者凝聚了约2年时间的研究心得,找到了表征光谱有效能函数和光子熵常数,写出了第十七章辐射热力学基础,希望对太阳能的开发利用,特别是充分利用太阳能的有效能有一定指导作用。当然,有关光谱辐射能热力性质及其热力学的研究还在继续,也有不同意见,本书给出的内容仅为作者研究结果,供读者参考。第五篇热力循环(第十八~二十一章)是应用篇。这一篇对蒸汽动力机、内燃机、喷气发动机、火箭发动机、压缩

式制冷机和热泵、空气低温液化和分离流程等循环进行了热力分析,保留了本科教材的基本内容,但注重与现代先进装置的结合,增强工程实用性,在不断更新发展的各类循环中体现了热力学第一、二定律的活的灵魂。这一篇的内容有浅有深,构筑了理论与实际联系的桥梁,浅者可检验 $T-s$ 图与装置流程的相互变换的能力,深者可对现代工业动力循环进一步探讨,各得其所。第六篇其他篇(第二十二章),这是本书的未了篇和发展篇,吸收了热力学进展的新研究成果。因时间紧迫和对热力学新研究成果研究不深,本版仅在第二十二章介绍了不可逆热力学基础。其目的是试图把热力学与传热学有机地结合起来,探索有时间尺度的热力学关系的新特点。书末附有习题和附表。

本书内容较多,全部讲授的可能性不大,只能根据具体情况适当选用,或讲授其框架与精髓,相当部分可留给学生自学,特别是动力循环篇。

本书是在中国科学技术大学能源工程和热科学系研究生多年教学经验的基础上,参考国内外多本参考教材,吸纳了著者和其他教授的研究成果写成的。书稿写成后,高等教育出版社委托西安交通大学何雅玲教授和东南大学施明恒教授对书稿进行了审阅。作者十分感谢两位教授在百忙中花费许多宝贵时间对书稿进行了认真评审,并提出宝贵意见。作者根据审稿人的意见,对书稿进行了修订。虽然本人尽了努力,但由于时间仓促,精力和水平有限,错误和不足之处在所难免,敬请读者指正,以便再版时更正。

编著者

2007年10月5日

主要符号表

拉丁字母

A	面积, m^2	G	吉布斯函数
B	磁感应强度, T(特[斯拉])	G	吉布斯自由能(自由焓), kJ
C_m	摩尔热容, $kJ/(mol \cdot K)$	g	比自由能, kJ/kg ; 重力加速度, m/s^2
c	比热容, $kJ/(kg \cdot K)$	ΔG_f^0	标准生成自由焓, J/mol
c_p	比定压热容, $kJ/(kg \cdot K)$	H	焓, kJ
c_v	比定容热容, $kJ/(kg \cdot K)$	H_m	摩尔焓, J/mol
d	耗汽率, $kg/(kW \cdot h)$	H_L	燃料低热值, kJ/kg
E	系统储存能量, kJ	\hat{H}	磁场强度, A/m
E	辐射力, W/m^2	h	比焓, kJ/kg
E_λ	光谱辐射力, W/m^3	h_c	临界点比焓, kJ/kg
$E_{b,\lambda}$	黑体光谱辐射力, W/m^3	h'	饱和液体比焓, kJ/kg
E_k	宏观动能, kJ	$h'_{r,c-b}$	对比态饱和液体比焓, kJ/kg
E_p	宏观势能, kJ	h'_b	标准沸点饱和液体比焓, kJ/kg
E_m	传质能, kJ	h''	饱和蒸气比焓, kJ/kg
E_u	有效能, kJ	h''_b	标准沸点饱和蒸气比焓, kJ/kg
E_n	无效能, kJ	$h''_{r,c-b}$	对应态饱和蒸气比焓,
$E_{u,c}$	闭口系有效能, kJ	Δh	蒸发潜热, kJ/kg
$E_{u,o}$	开口系有效能, kJ	Δh_b	标准沸点蒸发潜热, kJ/kg
e	系统比能, kJ/kg	$\Delta h_{r,b}$	对应态蒸发潜热, kJ/kg
e_k	比动能, kJ/kg	ΔH_f^0	标准生成焓, J/mol
e_p	比势能, kJ/kg	i	电流, A
e_m	比传质能, kJ/kg	I	磁矩, $A \cdot m^2$
e_u	比有效能, kJ/kg	J_s	熵流, $kJ/(s \cdot K)$
e_n	比无效能, kJ/kg	K_c	以浓度表示的化学平衡常数
$e_{u,c}$	闭口系比有效能, kJ/kg	K_p	以分压力表示的化学平衡常数
$e_{u,o}$	开口系比有效能, kJ/kg	L	长度, m
F	亥姆霍兹自由能, kJ	L_{ii}	自唯象系数
F	力, N	L_{ij}	互唯象系数
$F_{u,b,(0-\lambda),T}$	黑体的光谱积分有效能率	M	摩尔质量, kg/mol ; 磁化强度(比容积磁矩), A/m
f	比自由能, kJ/kg	Ma	马赫数
f	逸度, Pa		

m	质量, kg	u'	辐射密度, kJ/m^3
n	物质的量, mol	V	体积, m^3
P	功率, kW; 对比态物性方程焓差比例变换数	V_m	摩尔体积, m^3/mol
p	绝对压力, Pa	v	比体积, m^3/kg
p_i	分压力, Pa	W	体积变化功, 循环净功, kJ
p_s	饱和压力, Pa	W_{net}	净功, kJ
p'	辐射压力, Pa/m^2	W_c	闭口系循环净功, kJ
Q	热量, kJ	W_o	开口系循环净功, kJ
q	比热流量, W/kg	W_f	流动功, kJ
q_m	质量流量(质量流率), kg/s	W_t	技术功, kJ
R	摩尔气体常数, $\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	W_u	有用功, kJ
R_g	气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	W_n	无用功, kJ
r_w	功比	W_{ir}	不可逆损失功, kJ
S	熵, kJ/K	W_L	损失功, kJ
s	比熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	w	比净功, kJ/kg
S_λ	光子熵, J/K	w_{net}	比净功, kJ/kg
$s'_{b,\lambda,T}$	黑体光谱辐射力的熵函数, J/K	w_c	闭口系的比循环净功, kJ/kg
S_m	摩尔熵, $\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	w_o	开口系的比循环净功, kJ/kg
ΔS	熵变, kJ/K	w_f	比流动功, kJ/kg
ΔS_g	熵增, kJ/K	w_t	比技术功, kJ/kg
Δs_g	比熵增, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	w_u	比有用功, kJ/kg
T	热力学温度, K	w_n	比无用功, kJ/kg
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$	w_{ir}	比不可逆损失功, kJ/kg
t_F	华氏温度, $^{\circ}\text{F}$	w_L	比损失功, kJ/kg
T_λ	光谱特征温度, K	w_i	组分 i 的质量分数
T_s	饱和温度, $^{\circ}\text{C}$	x	干度
T_c	临界温度, $^{\circ}\text{C}$	x_i	组分 i 的摩尔分数
$T_{c,r}$	对临界温度的对应态温度	\bar{Y}	偏摩尔参数表示法
$T_{r,c-b}$	对应态温度	Z	压缩因子
$\hat{T}_{s,r}$	对饱和温度的对比温度	Z_r	对临界点对应态压缩因子
U	热力学能, kJ	\hat{Z}_r	对应态压缩因子差
U_m	摩尔热力学能, kJ/mol	$\hat{Z}_{s,r}$	对应饱和态压缩因子差
u	比热力学能, kJ/kg		

希腊字母

α	离解度, 抽气率	μ_J	焦耳 - 汤姆逊系数, K/Pa
α	活度(相对逸度)	π	压力比
α_V	体胀系数, K^{-1}	ρ	密度, kg/m^3
β	比应力系数, $N/(m \cdot K)$	$\rho'_{r,b-c}$	对应态饱和液体密度
γ	活度系数, mol^{-1}	σ	表面张力, N/m ; 应力, Pa; 熵源强度, $kJ/(s \cdot K \cdot m^3)$
η	热效率	Φ	热流量, W
η_C	卡诺机效率, 压缩机效率	$\Psi_{u,c}$	闭口系有效能函数, kJ
η_T	透平机效率	$\Psi_{u,o}$	开口系有效能函数, kJ
η_N	喷嘴效率	$\psi_{u,c}$	闭口系比有效能函数, kJ/kg
η_{the}	循环净效率	$\psi_{u,o}$	开口系比有效能函数, kJ/kg
η_{tho}	理论效率	ϕ_s	偏离熵函数
η_u	有效能利用效率(热力完善度)	ϕ	逸度系数, mol^{-1}
κ	绝热指数	ξ	光谱有效能率
κ_T	等温压缩率, Pa^{-1}	ω	偏心因子
κ_S	等熵压缩率, Pa^{-1}	ε	制冷系数, 化学反应度, 应变
μ	化学势, kJ/kg ; 磁导率, H/m		
μ_0	真空磁导率, H/m		

下脚注符号

i	序号	T	透平机
j	序号	N	喷嘴
in	进口	min	最小值
out	出口	max	最大值
b	标准沸点; 黑体	λ	光谱
c	闭口系; 临界点	u	有效能
o	开口系;	0	基准环境参数
B	锅炉	r	对应态
C	压缩机; 卡诺循环	R	反应系; 可逆
P	泵, 生成系		

上角注符号

'	饱和液	"	干饱和蒸气
---	-----	---	-------

目 录

主要符号表	1
绪论	1
第一篇 热力学基础	
第一章 基本概念	3
1.1 热力系·边界·环境	3
1.2 状态·状态参数	4
1.3 热力学第零定律·温度测定与 温度计·温标	5
1.4 相·组分·相律	10
1.5 平衡态·状态方程	10
参考文献	12
第二章 热力学第一定律	14
2.1 作用·功·热量·传质能· 传递势	14
2.2 过程·准静态过程·可逆过程	17
2.3 热力学第一定律	18
参考文献	26
第三章 热力学第二定律和熵	28
3.1 自发过程·能量传递与转换的 方向性	28
3.2 热力学第二定律	29
3.3 卡诺定理	30
3.4 熵	32
3.5 热力学第一定律与第二定律结合	
第二篇 流体工质的热力性质	
第五章 热力学函数间的普遍关系式	69
5.1 热力学函数的分类	69
5.2 建立热力学函数普遍关系式 的基础	70
5.3 热力学基本关系式和麦克斯韦 方程	75
的表达式	34
3.6 熵变·熵增·熵流	34
3.7 熵增原理	36
3.8 熵变的计算	37
3.9 $T-s$ 线图	42
3.10 自发过程·平衡态及平衡稳定 性的判据	44
3.11 自发过程的速率与催化	49
参考文献	55
第四章 有效能和功函数	56
4.1 能量的品质	56
4.2 有用功	57
4.3 有效能(可用能)与无效能	60
4.4 等温等容过程的功函数——亥姆 霍兹自由能 F	62
4.5 等温等压过程的功函数——吉布 斯自由能 G	63
4.6 等温物理变化中 ΔG 计算示例	64
4.7 不可逆过程造成的有用功(焓)损 失·焓平衡式	65
参考文献	67
5.4 热系数	76
5.5 比热容的普遍关系式	77
5.6 比熵 s 、比热力学能 u 、比焓 h 的普遍关系式	79
5.7 绝热节流系数的一般关系式	81
参考文献	82

第六章 热力性质的实验测定	83	8.2 从状态式 $p(v, T)$ 计算 u, h, s, c_p, c_v	112
6.1 单一物质的 $p-v-T$ 热力学关系图	83	8.3 偏离函数算法	113
6.2 $p-v-T$ 关系的实验测定方法	85	8.4 绝热指数 κ	116
6.3 $p-v-T$ 测试系统	90	8.5 工质性质的实用线图	121
6.4 饱和蒸气压测定	90	8.6 工质性质的计算机软件	126
6.5 饱和气液密度和临界密度的测定	91	参考文献	128
6.6 音速测定·球共鸣声学法测试原理	91	第九章 流体工质热力性质的推算	129
参考文献	94	9.1 对应态原理	129
第七章 实际气体的状态方程	95	9.2 通用压缩因子	130
7.1 实际气体与理想气体的偏差	95	9.3 通用对应态方程的判别规则	133
7.2 建立实际气体状态方程的基本方法	96	9.4 通用对应态方程的改进	133
7.3 范德瓦尔方程	97	9.5 选择对应态参数变换的方法	134
7.4 维里方程	99	9.6 通用饱和和液体焓的对应态方程	135
7.5 R-K 方程	101	9.7 蒸发潜热的通用方程	137
7.6 R-K-S 方程	101	9.8 饱和蒸气焓的通用方程	138
7.7 P-R 方程	103	9.9 通用饱和和液体密度的对应态方程	139
7.8 B-W-R 方程	104	9.10 通用饱和蒸气压对应态方程	140
7.9 M-H 方程	104	9.11 通用饱和蒸气密度的对应态方程	142
7.10 MBWR 方程	106	9.12 通用饱和液体和饱和蒸气焓的对应态方程	144
7.11 蒸气压方程式	106	9.13 几个重要基准参数 $\Delta h_b, h'_b$ 和 h_c 的计算	146
7.12 饱和性质表·湿蒸气热力函数关系	108	9.14 流体 $p-v-T$ 的一般性对应态关系	147
参考文献	110	参考文献	151
第八章 工质热力性质的计算	111		
8.1 从状态式 $v(p, T)$ 计算 u, h, s, c_p, c_v	111		
第三篇 多组分系统的热力学基础			
第十章 多组分单相混合物系统	153	系式	160
10.1 多组分系统热力函数的基本方程与化学势	153	10.5 偏摩尔参数的性质与吉布斯-杜亥姆方程	161
10.2 混合物的广延性质与偏摩尔参数	156	10.6 偏摩尔参数的求法	162
10.3 偏摩尔参数的可加式	158	10.7 气体混合物的 $p-V-T-x$ 关系与混合法则	164
10.4 用偏摩尔参数表示的热力学关系		10.8 非理想混合气体的化学势	

逸度	167	特殊性	191
10.9 稀溶液中的拉乌尔定律和亨利定律	173	11.5 具有共沸点的混合物	194
10.10 理想溶剂及其热力性质	175	11.6 部分可互溶的二元混合物系统的相图	196
10.11 实际溶液的化学势——活度	177	11.7 简单的低共熔混合物分析法	198
参考文献	180	11.8 沸点升高与凝固点降低	199
第十一章 多组分系统的相平衡	181	11.9 一阶相变·高阶相变	203
11.1 多相系统的热力函数的基本方程	181	11.10 多元混合物气液相平衡特性探讨	205
11.2 相平衡的一般平衡条件·相图	182	11.11 混合物状态方程拟合及其在热物性计算中的应用	208
11.3 理想完全互溶二组分气液系统的相平衡关系·精馏原理·杠杆原则	184	11.12 混合物的对应态关系	209
11.4 临界区二组分混合溶液的参考文献	214		
第四篇 特殊系统的热力学基础			
第十二章 简单弹性力系统	215	14.6 退磁制冷	237
12.1 一维弹性力系统的功	215	14.7 室温磁制冷研究	240
12.2 一维弹性力系统的热力学定律表达式	216	参考文献	244
12.3 一维弹性力系统的熵和其他参数的微分式	216	第十五章 含有化学反应和燃烧的系统	245
12.4 一维弹性力系统的状态方程	217	15.1 化学计量与离解	245
参考文献	219	15.2 化学反应的热力学第一定律分析	247
第十三章 表面薄层系统	220	15.3 化学反应方向的判据与平衡条件	252
13.1 液体表面层与表面张力	220	15.4 化学反应的平衡常数及平衡成分	257
13.2 表面张力功	220	15.5 最大可用功·范托夫方程·平衡转移原理	263
13.3 表面薄层的热力学基本微分方程	221	15.6 热力学第三定律	269
13.4 表面薄层系的状态方程	222	15.7 平衡常数的计算	271
13.5 弯曲表面层的系统	223	15.8 绝热燃烧温度与平衡火焰温度	275
参考文献	227	15.9 燃料和燃气	280
第十四章 简单磁介质系统	228	15.10 燃烧的不可逆损失	285
14.1 磁介质系统的基本概念	228	15.11 燃烧的效率 and 有效率	286
14.2 磁系统的功	229	参考文献	286
14.3 磁系统的热力学关系式	230		
14.4 顺磁体的热力学状态方程	231		
14.5 顺磁体的热容	233		

第十六章 燃料电池的热力学基础	288	17.5 光子气的分布律	312
16.1 燃料电池的原理	288	17.6 黑体光谱辐射密度 u'_{ba} 和光谱辐	
16.2 燃料电池输出的电功	289	射力 E_{ba}	313
16.3 燃料电池的端电压和输出		17.7 热辐射能的光谱有效能与光谱	
特性	292	等效温度	316
16.4 几种类型的燃料电池	293	17.8 辐射系的熵 S	321
16.5 燃料电池系统	297	17.9 平衡态空腔内辐射系的热力学	
参考文献	300	函数	323
第十七章 辐射热力学基础	301	17.10 稳态开口辐射系的热力学	
17.1 热辐射系的热力学基础	301	函数	324
17.2 辐射能密度 u' 与黑体辐射力 E		17.11 开放系辐射换热中吸收器的	
的关系	302	辐射熵流	324
17.3 辐射粒子气的频率分布规律	306	参考文献	325
17.4 辐射热力学的量子理论基础	306		

第五篇 热力循环

第十八章 热力循环组织及其性能评价		19.5 再热回热循环	358
方法	326	19.6 二流体循环	359
18.1 组织热力循环的基本原则	326	19.7 超临界和超超临界压力锅炉的	
18.2 热力循环的分类	326	动力循环新技术	360
18.3 能量利用的效率与热力经济		参考文献	361
分析	327	第二十章 气体动力循环	362
18.4 热力完善度的计算和有效能		20.1 燃气轮机循环	362
分析法	329	20.2 内燃机循环	370
18.5 热电联供与最大经济利益		20.3 气体流推进式发动机循环	377
分析法	331	参考文献	386
18.6 环境和谐综合平衡分析法	333	第二十一章 制冷和热泵循环	387
18.7 功损法则	333	21.1 逆卡诺循环及其性能比较	
18.8 主要热力设备的热力性能		基准	387
评价方法	336	21.2 实际制冷循环	388
参考文献	343	21.3 热泵循环及其节能原理	390
第十九章 蒸汽动力循环	344	21.4 压缩制冷设备的节能途径与	
19.1 现代蒸汽发电厂的主系统		空调热水机	391
流程	344	21.5 压缩机的循环	394
19.2 朗肯循环	347	21.6 低温技术基础	401
19.3 蒸汽再热循环	351	参考文献	413
19.4 回热循环	353		

第六篇 其 他 篇

第二十二章 不可逆过程热力学基础	414	22.5 唯象系数的获得与昂色格 倒易定律	422
22.1 不可逆过程热力学问题的 提出	414	22.6 不可逆热力学解题思路	422
22.2 局部平衡假设	415	22.7 应用举例——热电耦合问题	423
22.3 熵产率·熵源强度	416	参考文献	427
22.4 线性唯象方程	421		
习 题			
习题一 热力学基础篇习题	428	习题四 特殊系统的热力学基础篇 习题	440
习题二 流体工质的热力性质篇习题	433	习题五 热力循环篇习题	444
习题三 多组分系统的热力学基础篇 习题	436	习题六 不可逆热力学学习题	449
附 表			
附表 1 各种常用单位制换算表	450	附表 6 饱和水与饱和蒸汽表(按压力 排列)	464
附表 2 常用物理常数表	453	附表 7 几种制冷工质饱和液、气的物 性表	466
附表 3 制冷工质的基本参数表	454	附表 8 几种新制冷混合工质的几个 特征点主要参数	469
附表 4 若干流体物质的特征参数与安托 万常数	456	附表 9 平衡常数 K_p	470
附表 5 一些物质标准生成焓等的热化学 数据	460		

绪 论

能源是人类的一切活动的基础。在人类所利用的热电、功能(机械能)、电能、光能、磁能等各种形式的能源中热能是最主要的,因为许多种能,例如矿物、植物燃料的化学能,原子核燃料的核能,都要通过热能才能转化为其他形式的能被利用,而各种形式的能利用之后都要转换为热能,热能是能源利用的基础和归宿。人类利用热能有两种方式:一种是热能的直接利用;另一种是把热能转换为机械能(功能)、电能等。机械能是人类改造自然直接用作动力的能量;电能是输运最方便和转换最容易的能量。因此,人类追求把各种可转换为热能的能量再转换为电能或功能。为了掌握热能与其他形式能相互转换的规律,使热能转换为功能、电能的效率更高,诞生了热力学。因此,热力学的基本任务是研究能量转换以及与转换有关的热物性之间的相互关系。

热功互相转换要通过设备来实现,这种设备常称为动力设备。把热能转换为功能的设备称为热力设备,典型的有锅炉-蒸汽轮机、燃气轮机或其混合动力设备。以消耗功能来获取其他能量的设备称为耗功装置,典型的有压缩机、风机、泵、制冷机和热泵。能量转换通过工质流体来实现的设备又统称为流体机械。以研究这类设备工作过程、热功转化为目的的热力学称为工程热力学。

所有热功转换的设备都要通过在设备内的工质状态变化来实现。因此,工程热力学用极大的篇幅去研究工质的性质。离开工质性质的研究,热力学就失去了存在的基础。一般地说,热功转换所用的工质应是受热易膨胀的物质,通常选用气体。循环使用的工质可以在气体和液体之间转换。热功转换设备的性能与所用的工质有极大的关系,性能优良的工质可以提高热功转换的效率。制冷技术的进步与制冷工质的研究进展和新工质的开发是同步的。工程热力学基础理论在研究热功转换规律时,是以理想气体为工质进行演绎的,但实际气体的性质与理想气体有很大差别。因此,如何架设理想气体与实际气体之间的桥梁,把以理想气体为工质的研究成果顺利地应用于以实际气体为工质的情况,将是高等工程热力学要解决的一项重要任务。

热力学是物理学的一个分支,它最初是对大量宏观的热功转换实践经验的总结。焦耳用下落重锤搅拌水的功转换为热的实验,为能量守恒的普遍定律奠定了坚实基础。当人们用能量守恒定律考察热机工作过程中热与功的交换和工质状态变化时,总结出了在热力分析中更方便使用的热力学第一定律。人们在设法把热量尽可能多地转化为功的各种努力实践中,认识到无法在单一热源条件下把海水的热量转换为功,也认识到,即使有两个热源也无法使热量全部转化为功的客观规律,由此总结出热力学第二定律。热力学第二定律是能量守恒定律的深化和发展,它揭示了能量转化的方向性和条件,提出了能量不能只是用量来度量,还应用其品质来度量的问题。热力学第一和第二定律的诞生,是热力学对物理学乃至整个科学的重大贡献,具有极其重要的意义。

热力学作为一门学科,它不能只停留在人类实践经验的认识上,所以需要把感性经验上升为抽象的概念,总结出规律,而后对研究对象定义描述的术语和度量的参数,在能反映热力过程主流规律的假定下,借助有关的数学知识进行严密的逻辑推理,导出对热功转换实践有指导意义的

结论。这就是人们熟悉的经典热力学的一般研究方法。经典热力学的基本定律和研究方法及通过逻辑推导得出的结论,经大量实践证明具有高度的普遍性和可靠性。爱因斯坦(A. Einstein)说,“经典热力学给我以十分深刻的印象,它是仅有的具有普遍意义的物理理论。我确信在其基本概念所适用的范围内,它是决不会被推翻的。”值得注意的是,在研究时建立正确的基本概念是不容易的,而学习时对基本概念的正确理解又是十分重要的。正确的概念使认识得到飞跃升华,可以导出有指导实践意义的结论,而错误概念会阻碍认识的进展。从“热质说”到认识“热”是一种运动的表现,从感知冷热到建立温度的概念,经历了漫长的过程。记住:实践是检验真理的唯一标准,鉴别所建立的概念是否正确,是否有改进的地方,应当由实践决定。

在庆贺热力学为科学作出贡献同时,也不能把热力学从有限领域研究中得到的规律作为宇宙普遍规律应用。例如,据热力学第二定律推出宇宙在运动过程中最终都成为热的“热寂论”是片面的,不正确的。因为,宇宙中还存在着许多人类尚未认识的现象和规律,例如,地下矿产的煤、石油为何能从分散、无序到集中而有序,深海的甲烷冰又如何聚起高密度的能量等,许多问题还有待研究。

随着人类实践活动的深入和发展,热力学的理论和研究方法也应当与时俱进,有所发展。例如,不可逆过程热力学、传热过程与热力过程结合、多种能量转换过程耦合等都是当前热力学研究的新动向。传统工程热力学较多地集中于对气体工质的热能转换为机械能的热力学的研究,且多以单成分工质的热力机为主。现在,由于环保需要,已出现采用混合工质的制冷技术。另外,在整个热功转换的系统工程中,燃烧是极重要的过程。再者,燃料电池问世和深冷技术发展,热力学研究的工质不只局限于气体工质,热力过程得到的功,可以是气体膨胀功以外的功,如电功、磁功等。因此,有关多组分混合工质、化学反应过程、广义功等内容将补充到高等工程热力学中。太阳能是最洁净、最丰富、最永久的能源,开发利用太阳能,从太阳能中大量获取廉价的电能、氢能,是人类社会可持续发展的必须,是环境保护的必须。太阳能是辐射能,其与热能、功能的性质有何异同,辐射能的品质如何表征,它转换为电能、热能、化学能和不同频率的辐射能的规律如何等,值得人们研究。

经典热力学把工作介质视为连续体,以宏观物理量描述物质的行为,用宏观的唯象方法进行研究,并取得了与宏观实际十分一致的效果。但是,经典热力学对于工质的性质,例如比热容等不能提供直接计算的理论。作为经典热力学的补充,统计热力学却把工作介质视为大量分子的集合体,各分子运动受集体分子的影响,特别是相邻分子的影响,工质热力学能的改变是大量分子综合作用的结果。因此,它借助微观粒子运动的力学定律和统计概率理论来描述热现象,较好地解释了物质的比热容等,还可以导出热力学的基本定律。但是,统计热力学所作的物质结构的假定与实际情况有较大偏差,对多组分工质更难建模描述,考察分子数量也有限,所以统计热力学的结果往往与实际不符。

学以致用,为了培养有研究和创新能力的科学家型的热能工程师,高等工程热力学有必要让学生在深刻理解热力学基本概念和基本定律的基础上,能够进行热力系统的流程设计和热力计算,能用可用能分析法对热力系统进行评价和性能改进,能开展工质热力性质的研究。因此,可用能分析法的理论,若干具体循环分析,工质 pvT 实验,工质性质的演算和推算理论,也都是高等工程热力学内容的一部分。

第一篇 热力学基础

要学好高等工程热力学,需要对热力学的基本概念、基本定律深入理解。为此,本篇简要汇总了大学本科已学过的工程热力学基础知识,希望通过复习和深化,为学习后面的高等工程热力学的新内容奠定基础。

第一章 基本概念

热力学在建立研究体系时,首先要对热现象和热过程进行抽象,抽象出研究对象的时空域,其次要建立起能描述研究对象的必要基本参数及其相关量的概念,再次要约定可以反映事物本质主流特征的研究方法,继而由此可以利用现有的数学知识相对简明地导出基本参数间的相互变化关系。在研究过程中,产生了许多热力学基本概念与术语。正确地掌握这些基本概念对于学好用好热力学是有帮助的。

1.1 热力系·边界·外界

热力系 热力学中,把研究的对象用某种边界包围起来,边界内的特定物质称为热力学系统,简称热力系或系统。热力系可以是指定量的一种物质或几种物质的组合体,也可以是空间一定区域内的物质。取一定量物质集合体为讨论对象的热力系称为**封闭系**或**闭口系**,例如以气缸和活塞为封闭边界的气缸内气体为讨论对象的热力系。取一定体积内的物质集合体为讨论对象的热力系称为**开口系**,例如以汽轮机进出口内的气体为讨论对象的热力系。与外界无任何热交换的热力系称为**绝热系**。与外界无任何交换的热力系称为**孤立系**,这是虚拟的系统。

边界 包围热力系的控制面称为边界。边界以方便研究的原则进行划定。边界可以是真实的,也可以是假想的。封闭系的边界上不能进行工质流动,但边界可移动;开口系边界上允许工质流动,但边界不可移动;封闭系边界和开口系边界都可允许系统与外界有热能交换和功能交换;绝热边界只允许系统与外界有功能交换;透热边界只允许热能交换。

外界 边界以外的一切物质和空间称为外界。

图 1-1(a)为系统、边界和外界示意图,图 1-1(b)、(c)分别为闭口系和开口系示意图。

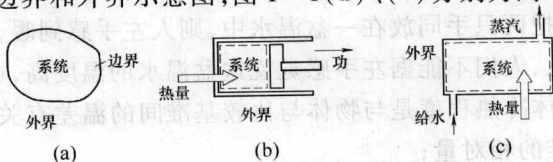


图 1-1 系统、边界和外界

1.2 状态·状态参数

状态 热力系在某一瞬间的宏观物理状况称为系统的状态,简称状态。构成热力系的物质集合体一般以凝聚态的形式存在,细分有气态、液态和固态,气态和液态统称流体态。

状态参数 描述热力系的物理状况的量称状态参数。依据状态参数的功能性质来区分,描述系统状态的物理量可分为强度量和尺度量(又称广延量)两类。凡与物质质量无关的物理量称为强度量,如压力 p 、温度 T 和化学势 μ ;与物质质量成比例的物理量称为尺度量,如体积 V 、热力学能 U 、焓 H 和熵 S 等。单位质量的尺度量也可看作强度量,这类强度量是在尺度量前面冠以“比”字,并用相应的小写字母表示,比如体积 v 、比热力学能 u 、比焓 h 和比熵 s 等。冠以“比”字的参数是1 kg质量的相应参数值。与物质质量无关的强度量又称为势强度量,或力强度量,如压力 p 、温度 T 和化学势 μ ;除以质量后成为强度量的量可以称为比强度量,或流强度量。比强度量都是物性,但与势强度量有关。在系统处于平衡态时,系统各部分的强度量是相等的。

状态参数是系统状态的单值函数,或点函数,即状态参数的变化只取决于系统给定的起始和最终状态,而与系统变化过程中所经历的一切中间过程无关。这一性质是判断一个物理量是否可作为状态参数的判据。状态参数在无限接近的相邻状态之间的无限小变化,数学上用全微分表示。它在两个给定状态之间的积分值与所经历的路径无关。

一些可以用仪器直接测定的参数,例如压力 p 、温度 T 和比体积 v ,称之为基本状态参数;另一些状态参数,如热力学能 U 、焓 H 和熵 S ,则要利用可测参数计算得到。

压力 单位面积边界上所受的热力系物质的垂直作用力称为压力,符号 p ,单位为Pa,1 Pa = 1 N/m²。压力定义式为: $p = F/A$, F 为力, A 表示面积。压力是热力系的内部属性,是与功的交换有关的势强度量状态参数。在热力系内,物质比体积为无穷大时压力为零。微观上,压力与单位面积上分子作用数和作用强度成正比。

比体积和密度 单位质量物质所占的体积称为比体积,也称为质量体积,以符号 v 表示,单位为m³/kg;比体积的倒数称为密度,以 ρ 表示,单位为kg/m³。实际气体的比体积 v 或密度 ρ 与理想气体有差别,特别是在饱和态和临界点附近。所以,研究实际气体工质的 v 或 ρ 与压力 p 、温度 T 的关系是极重要而艰巨的任务。

温度 温度可以理解为是物质分子热运动激烈程度的度量,以符号 T 表示,单位为K。温度是确定一个系统与其他系统是否处于热平衡的共同特性函数,它对于相互处于热平衡的所有系统都具有相同的数值。温度是热力系的内部属性,是与热交换有关的势强度量。

对于温度概念的认识至今还有争论,通常理解为物体冷热程度的标志。冷热乃人体的一种感觉,它实际与热流的流出与流入有关。有人做过实验,一个人先把左手和右手分别插在两盆冷水和热水中数分钟,而后把两只手同放在一盆温水中,则人左手感到暖,而右手感到凉,但这盆温水的温度是相同的。可见,人们不能据左手感觉说这盆温水的温度高,也不能据右手感觉说这盆温水的温度低。因此,物体冷热程度是与物体与比较基准间的温差有关的。由此得出几点认识:

- (1) 温度是要有基准的相对量;
- (2) 温度是与热量传递有关的量,热量会从高温物体传向低温物体;