



“十三五”国家重点图书出版规划项目

ADVANCED ENGINEERING THERMODYNAMICS

高等工程热力学

● 谭羽非 主编

非外借



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等教育工科院校非动力类专业研究生教材

内容简介

谭羽非 主编

飛煙(912)目錄

常州大学图书馆
藏书章

哈爾濱工業大學出版社

内 容 简 介

本书是在高等学校本科工程热力学教材基础上的加深与拓宽,内容以工程实用理论为主,同时兼顾了热工科技领域的最新成果。全书共分7章,主要内容包括工程热力学基本概念和基本理论,变质量热力学及典型瞬变热力过程分析,基于能量品位分析合理用能原则,热力学一般关系式及应用,实际气体状态方程,以及线性不可逆过程热力学的基础知识等。本书重视分析热工问题的科学方法,在概念说明、原理论证、公式推导等方面力求严谨,全书采用我国法定计量单位,每章后面均附有习题。

本书可作为非动力类专业研究生必修课程教材、动力类专业研究生及高年级本科生选修课程教材,也可作为相应专业教师及有关科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高等工程热力学/谭羽非主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2018.3

ISBN 978-7-5603-7225-9

I. ①高… II. ①谭… III. ①工程热力学-高等学校-教材 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 018884 号

策划编辑 王桂芝
责任编辑 刘 瑶 张 瑞
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.25 字数 362 千字
版 次 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-7225-9
定 价 32.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

当今社会随着能源需求的急剧增长,一方面节约能源已经成为继煤炭、石油、天然气、电力四大能源之后的“第五能源”;另一方面控制和消除包括雾霾、温室效应、臭氧层减少和热障等对环境的影响破坏,也已经成为社会环保的迫切需求。因此节能环保理论和各项应用技术,是目前世界性的研究热点。

地球上常规能源的局限,已迫使人类联合应用工程热力学和其他工程学科来研究能源的有效转换与合理使用,指导热力过程的工程设计。因此从战略发展的高度考虑,高等工程热力学的理论与应用的重要方向,不再仅限于对热力学定律的简单分析,而是要结合诸如统计分析、热经济学、过程能量系统等学科,深入研究热力系统设计、可行性分析、最优化选择等多个方面,为节能环保理论和各项应用技术的提出,提供理论依据和指导作用。

本书是在高等学校本科工程热力学教材的基础上加深与拓宽,内容以工程实用理论为主,同时兼顾了热工科技领域的最新成果。全书共分7章:第1章是工程热力学基本概念和基本理论的加深和拓展,在梳理总结工程热力学基本概念和定律的基础上,深入讲述了如热力平衡状态及稳定性的判定依据、温标及热力学第二定律公理法等;第2章论述变质量热力学基本理论,并对典型的变质量瞬变热力学过程进行了分析;第3章从能量可用性的角度,论述按能量品位高低进行梯级利用的合理用能原则,实现了能量从量到质认识的飞跃;第4章介绍热力学一般关系式及应用,这是研究物质热力性质不可缺少的数学基础;第5章是实际气体状态方程,讨论了各类实际气体状态方程应用时的适用条件,这些方程在热工计算中,不仅能满足工程计算的要求,还可以推算目前没有准确实验数据的某些工质;第6章着重介绍了实际气体热力状态参数及热力过程的分析计算方法,目前由于大多数实际流体的热力性质图表非常缺乏,因此掌握热力过程的解析计算方法十分必要;第7章介绍了线性不可逆过程热力学的基础知识,包括不可逆过程的基本方程、线性唯象定律、居里定理和昂色格倒易关系等,为热质、热电等耦合传输过程及与其他交叉学科的理论研究奠定基础。

本书是作者在多年研究生课程教学及科研工作的基础上,为适应我国节能环保的专业人才培养需要而编写,可作为非动力类专业研究生必修课程教材、动力类专业研究生及高年级本科生选修课程教材,也可作为相应专业教师及有关科技人员的参考书。

本书重视热工问题的科学分析方法,密切联系工程实际,反映了国内外该领域科学技术的新成果,同时注意吸取国内外同类书籍编写方面的先进经验,以便更好地适应教学及各方面的实际需要。

本书在编写过程中参考了有关的文献资料,在此谨向这些文献的著作者表示衷心的感谢。此外,我的学生于克成、张金冬、王雪梅、金鑫、刘卓和王蕾等,对本书手稿做了认真的文字校订工作,在此深表谢意。

由于本书涉及面广,限于作者水平,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2018 年 1 月于哈尔滨

基本符号表

1. 英文符号

英文符号	名称	量或量纲单位	
a	修正分子间相互作用力的常数; 音速	能量/质量; 速度	M
A	横截面面积	长度 ²	m^2
A_n	炔	摩尔	mol
B	比例常数	能量/质量	J/kg
b	修正分子体积常数; 方程系数	能量/质量; 能量/质量 ²	J/kg
C	浓度; 组分数目	能量/质量	J/kg
c	流速; 质量比热容;	能量/质量	J/kg
c_p	比定压热容	能量/质量	J/kg
c_v	比定容热容	能量/质量	J/kg
d	直径	长度	m
E	储存能; 弹性模量	能量/质量	J/kg
En	能量	能量/质量	J/kg
E_k	动能	能量/质量	J/kg
E_p	位能	能量/质量	J/kg
Ex	焓	能量/质量	J/kg
e	单位质量能量; 应变量	能量/质量	J/kg
e_p	单位质量位能	能量/质量	J/kg
ex	单位质量焓	能量/质量	J/kg
F	力; 自由度数; 自由能	能量/质量	J/kg
f	函数; 自由能; 逸度	能量/质量	J/kg
G	吉布斯焓(自由焓)	能量/质量	J/kg
g	质量成分; 单位质量吉布斯自由焓	能量/质量	J/kg
H	真空值; 焓	能量/质量	J/kg
k	比热容比(绝热指数)	能量/质量	J/kg
h	单位质量焓	能量/质量	J/kg
l	单位质量焓损; 长度	能量/质量	J/kg
L	焓损; 长度	能量/质量	J/kg
M	相对分子质量; 千摩尔质量; 偏差函数	能量/质量	J/kg
m	质量	质量	kg
$\dot{m}$	质量流率	质量/时间	kg/s

N	分子数目
n	传递可逆功的形式;摩尔数
p	压力
Q	热量;反应热;反应热效应
q	单位质量热量
R	气体常数;导电系数
r	气化潜热;容积成分
S	位移;熵
s	单位质量熵
T	热力学温度;绝对温度
t	摄氏温度
U	热力学能
u	单位质量热力学能
V	体积
v	比体积(又称比容);反应速度
$\bar{w}$	分子平移运动的均方根速度
W	膨胀功;总功
w_t	单位质量技术功
W_s	轴功
w	单位质量膨胀功
x	气体摩尔成分
w_s	单位质量轴功
Z	压缩因子;高度

2. 希腊符号

α	热膨胀系数
β	容积膨胀系数
ε	压缩比;热湿比;势能
η_t	循环热效率
μ_j	焦耳 - 汤姆逊系数
λ	能质系数
μ	化学势
η_{ex}	炯效率
η_{ab}	绝热效率
σ	分子间距离;熵产率
ρ	密度;定压预胀比

τ	时间
φ	相对湿度;逸度系数
ω	分子运动速度;偏心因子
ξ	热能利用系数;溶液质量浓度
φ	纯物质系统平衡状态的独立参数
η_{pol}	多变效率
γ	定容压力系数

1.1 高等工程热力学研究对象

高等工程热力学课程的主要研究对象,是热力工程热力学,研究热质传递和流动以及各种热力循环和热力设备。热力学是一门基础学科,它是一门科学,也是一门技术。从科学的角度来看,热力学是研究热现象的规律,从技术的角度来看,热力学是研究热机的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的科学。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。热力学在工程热力学中的应用,主要是通过热力学定律和热力学性质,对热力系统进行分析和计算,从而为热力系统的设计、制造、运行、维护、故障诊断、性能评价、节能降耗、环境保护等问题的解决提供理论依据。

目 录

绪论	1
0.1 高等工程热力学的研究对象	1
0.2 宏观热力学和统计热力学	2
0.3 能量的分类	3
0.4 能量的损失分析	3
0.5 工程热力学的分析方法	4
习题	5
第1章 工程热力学基本内容概述	6
1.1 热力平衡状态及状态公理	6
1.2 热力系统内部工质的状况及化学势	12
1.3 温度与温标	14
1.4 热量和功	17
1.5 热力过程	22
1.6 能量与热力学第一定律	24
1.7 热力学第二定律与熵	27
习题	37
第2章 变质量系统热力学分析	39
2.1 变质量状态方程及参数热力性质	39
2.2 变质量系统质量守恒方程	40
2.3 变质量系统热力学第一定律表达式	44
2.4 变质量系统热力学第二定律表达式	47
2.5 典型变质量系统非稳定热力过程	52
习题	64
第3章 热力系统可用能分析	67
3.1 能量转换的规律和限度	67
3.2 烟和焓	69
3.3 烟方程	79
3.4 烟分析及合理用能	84
3.5 烟分析在工程中的应用	88

习题	99
第4章 热力学一般关系式及应用	101
4.1 数学基础	101
4.2 热力学基本关系式	103
4.3 热力性质的一般表达式	115
4.4 自由能与最大功定理	121
4.5 逸度及逸度系数的一般表达式	123
4.6 工质性质的计算软件	124
习题	126
第5章 实际气体状态方程	129
5.1 实际气体相互作用力及区分	129
5.2 实际气体的状态变化	132
5.3 实际气体状态方程的一般热力学特性	135
5.4 维里状态方程	137
5.5 二常数半经验状态方程	140
5.6 多常数半经验状态方程	145
5.7 对比态原理及气体对比态状态方程	148
5.8 实际气体混合物的混合法则	158
习题	165
第6章 实际气体热力性质参数的计算	167
6.1 偏差函数、余函数和余函数方程	167
6.2 确定热力学状态参数变化量的计算方法	181
6.3 实际气体热量和功的计算方法	185
习题	193
第7章 线性不可逆过程热力学基础	194
7.1 局域平衡假设和非平衡态热力学函数	194
7.2 不可逆过程的基本方程	195
7.3 线性唯象定律	198
7.4 居里定理及昂色格倒易定律	200
7.5 不可逆过程的熵产率	206
7.6 黏性流、电流、热流和物质流过程中的熵产率	208
7.7 不可逆热力学原理的应用	211
习题	214
参考文献	215

绪 论

0.1 高等工程热力学的研究对象

基于对各种热现象加以利用的需求,人类建立了热学,研究包括物质的热运动和各種与热现象相联系的规律。热力学属于热学理论的一个重要分支,它是在一系列实验结果的基础上,综合整理而形成的系统理论。热力学的研究对象包括能量、能量转化以及能量与物质性质之间的关系,热能与其他形式能量转换的规律与方法,以及提高热能转换效率的途径;而工程热力学则是热力学的普遍理论在工程上的具体应用,是热力学在工程领域的分支,是结合人类的生产实践活动发展起来的,其重要性在于它的实用性和广泛性。

人们在很早的时候就开始在生产和生活中利用各种热现象,19 世纪中后期,热的本质逐渐被认识,并且以无数的实践经验为基础,总结得出热力学第一定律和热力学第二定律,并成为热力学分析研究实际问题的理论基础。

热力学是在对热现象进行大量观测的基础上总结出的普遍的系统理论,具有普适性。对于一切与热运动有关的现象和物质都适用,热力学所研究的对象分布广泛,涉及自然界的各种现象,包括物理学、化学、工程学、气象学及生物学等领域。传统热力学主要研究的问题可以归纳为以下三个方面:

(1) 热现象过程中能够相互转化的规律性以及数量关系,如过程功、热量及热功转化效率的计算等。研究时常常需要以热力学第一定律为理论基础。

(2) 判断不可逆过程进行的方向。研究时常常需要以热力学第二定律为理论基础,其目的在于使过程沿所期望的方向进行,改善热能工程和能量转换装置的设计,以尽可能充分地提高能源效益。

(3) 物质的平衡性质。能量的转换必须以物质为媒介,因此对于物质性质的研究成为系统状态与系统性质研究的出发点,研究工质的一系列基本热力性质,并分析计算工质在各种热工设备中所经历的状态变化过程,探讨影响能量转换效果的实际因素。

由于能源需求的急剧增长及世界性的能源危机,目前国际上已把节约能源提高到一个全球性的战略高度,热力学节能理论和各项应用技术已成为世界性的研究热点,与能源生产和消费有关的技术发展提醒人们对能量从“量”到“质”认识的飞跃,在系统的高度上,按能量品位的高低进行梯级利用,而不是单一地提高某一生产设备或工艺的能源利用率和性能指标,目前联合循环、热电联产、余热利用、能源大系统等都已列入该领域范畴。

地球上常规能源的限度,迫使人类应用工程热力学和其他工程学科(如传热传质学、燃料学、化学动力学、流体力学等)来研究能源的有效转换与合理使用,指导热力过程的工程设计,尽可能地提供能源资源和物质资源,促进人类的发展与进步。因此从战略发展的高度考虑,高等工程热力学的理论研究与应用的的重要方向不再仅限于对热力学定律的简单分析,而且要深

入研究诸如统计分析法、热经济学、过程能量系统的综合优化等,对热力系统设计、可行性分析、最优化选择等方面起到理论指导作用。当前在国内外对节能研究与发展日益重视的情况下,跟踪热力学学科发展的这一新方向,积极进行热力学与其他学科的交叉课题研究,努力推进热力学理论的健全和发展,是目前热工领域科研工作者的主要任务之一。可以这样说,高等工程热力学理论必将在能源、社会、经济及环境综合的大体系中获得新的拓宽与发展。

目前高等工程热力学已从研究平衡体系和可逆过程,发展到研究有时空变化的非平衡体系和不可逆过程,这不仅拓宽了经典热力学的研究范畴,而且与其他学科的交叉又形成了许多新的分支学科,如生物热力学、化学热力学、环境热力学等。

我国在高等热力学基本理论及热力学现代应用与研究方面,如环境分析、非平衡热力学、有限时间热力学、变质量系统热力学、连续介质热力学等方面都有长足的进展。我国虽然国土辽阔、资源储量丰富,但人口众多,人均能耗水平低,能源资源已成为制约国家经济发展的突出因素。因而必须从我国的国情出发,依靠科技的进步和创新,节约与开发并重。为解决我国能源危机问题,落实我国能源战略,重点是如何提高热能的有效利用效率,减少燃料的消耗量,从而达到节能的目的。这不仅是我国面临的重要课题,也是世界性的学术课题。

0.2 宏观热力学和统计热力学

宏观观点和微观观点从不同角度看待物质。前者把物质看成连续介质,后者认为物质是由大量分子、原子等微观粒子所组成的,因而热力学有宏观热力学和统计热力学之分。

宏观热力学忽略了物质的原子结构,处理物质性质时把物质看成连续的整体,从而用确定的连续函数来表述物质的性质。宏观热力学利用宏观物理量来描述物质所处的状况,通过实验来确定一些物理量之间的变化关系,根据热力学的基本定律,推导出各宏观物理量之间的内在联系,并与实验结果相结合来研究热现象中的基本规律。宏观方法的优点是简单、可靠,只要少数几个宏观物理量即可描述系统状态。同时,所依据的基本定律已为人类实践所验证,具有极大的普遍性和可靠性,用以进行各种推导时,只要不做其他假定,所得结论同样是极为可靠的。但由于宏观热力学的研究过程未考虑物质内部的分子结构及其行为,因此无法深刻阐明热现象的本质。

统计热力学是从微观角度来分析研究热现象,因此可以弥补宏观热力学的缺陷,它应用力学理论来研究单个分子的运动,用统计方法来说明大量分子紊乱运动的统计平均性质,从而确定宏观热现象所服从的基本规律。因此微观统计热力学能够从物质内部分子运动的微观机理更好地说明各种热现象的物理实质。但由于其分析过程较为复杂、抽象,并且由于其对物质的分子结构模型所做的简化假设只是实际情况的某种近似,因此其分析结果与实际情况不能完全符合,在可靠性上往往存在一定局限。

可见,用宏观观点研究热现象,是以由经验总结的基本定律为依据,而统计热力学则以粒子运动遵守的经典力学或量子力学原理为依据,二者的理论依据是不同的,但两种方法相互补充、相辅相成,不能说一种绝对优于另一种。

众所周知,在无外界作用时,处于平衡态的物系状态不随时间变化,但常见的物系都是非平衡态的。无论是处于平衡态还是非平衡态的物系,都可用宏观或微观两种不同的观点进行研究,因此又有平衡态热力学和非平衡态热力学的区别。以宏观方法研究平衡态物系的热力

学称为平衡态热力学,又称经典热力学;用宏观方法研究偏离平衡态不远的非平衡态物系的热力学,称为非平衡态热力学或不可逆过程热力学。

就工程应用而言,简单可靠是首先要考虑的问题,因此本书的研究内容和方法,以宏观平衡的经典热力学为主,便于实际工程应用,同时适当利用微观理论的某些结论来帮助理解宏观现象的本质问题,本书最后还介绍一些不可逆过程方面的内容。

0.3 能量的分类

能量是物体或物质系统做功的能力或做功的本领,是物质运动的量度。早在1649年,法国著名哲学家伽桑狄提出“能量”一词,随后托马斯从势能、功、变形能等特殊运动能力的量度抽象出科学的能量概念,作为各种机械运动的共同量度。1851年,开尔文从热和机械运动能力之间内在的当量关系,抽象出机械能和热能的概念。能量的分类有以下几种。

(1) 能量根据来源可以分为一次能源和二次能源。所谓一次能源是指直接取自自然界没有经过加工转换的各种能量和资源,包括煤、原油、天然气、核能、太阳能、水力、风力、潮汐能、地热等。二次能源是指由一次能源经过加工转换以后得到的能源产品,如电力、煤气、汽油、沼气、氢气等。

一次能源可以进一步分为可再生能源和非再生能源两大类。可再生能源是指在自然界可以循环再生的能源,包括太阳能、水力、风力等。而非再生能源是不能循环再生的,包括原煤、原油、天然气等。

(2) 能量根据品质(即可利用度)可分为优质能和低质能两种。优质能是指经过一次能量转换得来的二次能源,如电能、机械能等。低质能是指自然资源和一次能源,如热能、热力学能等。

(3) 能量根据物质内部分子的运动形态可分为有序能和无序能。一切宏观整体运动的能量和大量电子定向运动的电能都是有序能;而物质内部分子杂乱无章的热运动所具有的能量是无序能。有序能可以完全地、无条件地转换为无序能;但无序能要转化为有序能则需要外界条件,并且转化不可能完全进行。能量还有其他很多分类方法,这里不做详述。

不同形式的能量在转换时,具有量和质的特性。自发进行的能量转换过程是有方向性的,当能量转换或传递过程中有无序能参与时,就会产生转换的方向性和不可逆问题。因此可以说有序能比无序能更有价值,具有更高的品质。例如,对于摩擦生热这种普遍的自然现象,由于摩擦机械能转换为热能,即有序能转换为无序能,能量的转化从量级上看没有变化,但从品质上看却降低了,即它的使用价值变小了,能量使用价值的降低称为能量贬值。摩擦使高品质能量贬值为低品质能量。

0.4 能量的损失分析

目前,世界性的能源危机仍然存在,节约能源势在必行。提高能量利用的经济性是工程热力学的主要任务。节约能量也就是减少能量的损失。

能量既具有高质能和低质能、有序能和无序能的分类,也具有量和质的双重属性。能量的损失也有纯数量损失和质量贬值两种情况,前者能量的质不变,纯属数量的减少,通常把容器

和管路的跑、冒、滴、漏等看作这类损失,后者包括温差传热、摩擦生热、自由膨胀及节流等。为避免混淆,热力学中把能量贬值的损失统称为不可逆损失。产生不可逆损失时,能量的数量未变,但能的质(也称作功能力)降低即能的质量贬值。能量贬值是自然界的普遍现象。

减少能量损失所用方法随损失的性质而异。对于漏液漏气等纯数量的损失,通常以改善设备结构、提高密封性等手段加以改进。但所有这些方法都不属热力学研究的范畴,也不是用热力学的方法能解决的。热力学是研究有关能量质量的科学,减少不可逆损失以节约能量才是我们努力的方向。但应看到,不可逆损失是各种能量贬值的统称,并不是所有的不可逆损失都在热力学研究之列。研究损失的目的在于减少损失,热力学中对不可逆损失的研究,归根到底取决于某种损失能否用热力学的方法加以改善。

一般来说,热力学所能采取的手段仅仅是工质和过程的合理选择与安排,所以凡是与工质和过程无关的不可逆损失均不能用热力学的方法使之减少,也就不在我们研究的范围之内。举例来说,摩擦生热视其产生的原因可分为机械摩擦和黏性摩擦两类。发生于刚体与刚体之间,例如活塞与气缸、轴与轴承间的摩擦称为机械摩擦,这类摩擦生热的损失因和工质无关,因此不属于热力学的研究范畴,仅在热力计算中以机械效率作为已知条件给出。至于黏性摩擦,产生于流体(工质)的流动,它和流体的黏性(工质性质)及流速的大小(过程)有关,有可能用热力学的方法使之减少。因此黏性摩擦的不可逆损失才是热力学要研究的内容,即我们所说的摩擦生热损失。除黏性摩擦不可逆损失外,还应指出,工质的过程是在外界热或力的作用下发生的,如果传热和膨胀做功是在工质和外界存在一定的温差与压差下进行的,则也会产生不可逆损失。温差传热所传递的能量数量不变,但温度降低了。绝热自由膨胀中,工质能量的总量并未减少,但压力下降而做功的能力变小了。这类不可逆损失都与工质和过程有关,因此也属于热力学研究之列。例如,可通过合理安排过程(如回热循环等)和选择恰当的工质(如双工质循环等)来减少温差传热的不可逆损失。可见,工程热力学中主要研究的就是黏性摩擦生热和因势差(如温差、压差等)而出现的这两类不可逆损失。

0.5 工程热力学的分析方法

热力学分析方法的特点是着眼于系统,分析系统的状态以及状态变化与系统和外界之间相互作用的关系。在工程上,虽然各种用途的热力系统在结构、组成和工作原理上有很大不同,但从能量传递和转换的本质来看,都是通过它们各自选定的工质状态变化(吸热、放热、膨胀和压缩),即各种不同过程来实现其特定目的。因此不管各种热力系统在结构和组成细节上有多少不同,对它们进行热力学分析的方法基本上都是相同的,其步骤如下:

(1) 根据所要求解的问题,选取便于分析求解的系统和边界,将与之相互作用的其他物体作为外界。

(2) 抓住影响所求问题的主要矛盾和必要的求解精度,对系统及其所处的外界条件建立模型。其中包括:

① 所选系统的工质是采用理想气体模型,还是采用其他模型;

② 系统与外界通过边界发生的质量交换、功量交换和热量交换的情况;

③ 与系统相互作用的外界的特性。

(3) 根据过程进行的特定条件,对过程做一些合理的抽象和简化,建立其过程方程数学模型。

(4) 对所选定的系统,将热力学第一定律、热力学第二定律和质量守恒原理等有关物理规律应用于该问题的数学模型,并进行求解。

可见,分析任何问题,选取合适的系统,建立恰当的模型,是求解问题的关键,需要通过不断的学习逐渐熟悉这些技巧。

习 题

1. 对高等工程热力学的“高等”二字如何认识?
2. 举例说明,怎样做才能真正达到节能的目的。
3. 简述宏观热力学和统计热力学的区别与联系。

第1章 工程热力学基本内容概述

热力学引用的概念很多,这些概念都与能量及其转换有关。本章对经典工程热力学的一些基本概念和定律进行梳理和集中论述,并适当进行了拓展和延伸。

本章主要包括:热力平衡状态及平衡状态的判定、温度及温标、热量和功、热力过程,以及能量与热力学第一定律、熵与热力学第二定律等。其目的是帮助读者回顾和梳理工程热力学的基本内容,深化和拓展基本概念和定律,为高等工程热力学的学习搭建承上启下的桥梁。

1.1 热力平衡状态及状态公理

1.1.1 热力平衡状态的概念及条件

平衡状态是研究热现象时,为简化物体状态随时间变化的复杂性而引用的基本概念。任何一个热力系统,在不受外界影响的条件下,系统的状态能够始终保持不变,系统的这种状态称为平衡状态。

当系统内部温度不等时,将有高温部分向低温部分传热的自发变化,因此系统具有热平衡是实现平衡的条件之一;当系统内部各处的压力不等时,高压部分将自发地压缩低压部分而产生能量的转移,可见,系统具有力平衡是实现平衡的另一条件。一个热和力平衡的两相系统,仍有自发相变的可能,如可以认为凝汽器中处于热力平衡状态,但水蒸气在不断转变为液态水。显然,相变的结果会改变系统的状态,所以对两相及多相系统,相平衡是实现平衡的第三个条件。最后,处于热和力平衡下的单相化学反应系统,反应物与生成物的互变也会使系统的状态产生变化,只有反应物和生成物的数量都不变时,系统的宏观状态才停止变化,因此化学平衡是实现平衡的第四个条件。可见,实现平衡的条件可以归结为热平衡、力平衡、相平衡和化学平衡四个条件。

处于热力平衡状态的系统,只要不受外界影响,它的状态就不会随时间改变,平衡也不会自发地破坏;相反,若系统受到外界影响,则不能保持平衡状态。经验指出,系统发生变化总是朝着削弱外界作用的方向进行。系统和外界间相互作用的最终结果,必然是系统和外界共同达到一个新的平衡状态。同样对处于不平衡状态的系统,由于各部分之间的传热和位移,其状态将随时间而改变。根据经验,改变的结果一定使传热和位移逐渐减弱,直至完全停止。故不平衡状态的系统,在没有外界影响的条件下,总会自发地趋于平衡状态。

热力学中的平衡是针对物系的宏观状态而言,由于组成物系的粒子总在永恒不息地运动,其微观状态是不能不变的,如平衡状态物系的温度不随时间变化,是指分子的平均移动动能为恒值。就单个分子而言,在频繁地相互碰撞下它的状态随时都在变化,所以处于热力学平衡状

态下的物系,其宏观状态不随时间变化,但其分子仍可以自由地相互作用。

1.1.2 平衡状态、稳定状态与均匀状态的区别

不平衡势是驱使状态变化的原因,而平衡物系的状态不随时间而变化是不平衡势差消失的结果。就平衡而言,没有势差是其本质,而状态不变仅是现象。物系是否处于平衡状态,应从本质而不能从现象来判别。

稳态下虽然热力系宏观性质不随时间变化,但外界的作用也是一种稳定的非平衡状态。例如,将分别处于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的两个物体用铜棒连接(图1-1),经过足够长的时间后,铜棒内温度分布稳定。此时以铜棒为一热力系统,虽然系统内各点宏观性质均不随时间变化,但由于铜棒两端点是受到处于不同的状态作用,因此系统只能是稳定状态。

再比如复合墙体的传热过程,虽然在稳态导热中,物系的状态不随时间而变,但需要在外界作用下维持,由于存在温差,该物系的状态只能称之为稳态,而不是平衡状态。因此,平衡一定稳定,但稳定不一定平衡。

平衡与均匀也是两种不同性质的概念,平衡是相对时间而言的,而均匀是相对空间而言的,是指系统的状态参数各处均一致,不随位置变化。图1-2所示的汽水空间,在经历了相当长的时间后,空间内的温度、压力状态参数均不随时间变化,因而该系统是平衡系统;但在空间范围内,系统内各处的温度和压力等参数是不同的,因而该系统并不均匀。所以均匀是空间范围内的参数不变,平衡是时间范围内的参数不变。平衡不一定均匀,均匀不一定平衡,但注意单相平衡态则一定是均匀的。

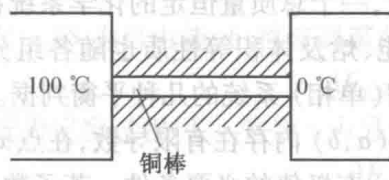


图1-1 铜棒稳定状态

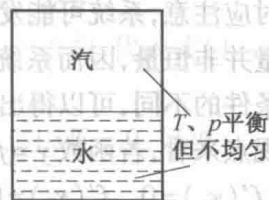


图1-2 汽水均匀状态

若使系统达到热力平衡,系统内部及相联系的外界,起推动力作用的强度性参数,如温度、压力等都必须相等,否则在某种势差作用下平衡将被破坏。显然,完全不受外界影响的系统是不存在的,因此平衡状态只是一个理想的概念。对于偏离平衡状态不远的实际状态按平衡状态处理将使分析计算大为简化。

1.1.3 局部平衡假设

在平衡状态下,由于势差消失,因此无论是热量传递还是其他能量传递的速率均趋于零。为了描述实际有限势差的作用过程,常引用局部平衡假设。这一假设的基本思路是:体系的整体是非平衡的,但可以将其看成是由无数个局部平衡的子系统构成的,而这些局部平衡的子系统必须满足以下三个条件:

(1) 微观足够大。子系统具有足够多的微观粒子(一般具有 10^3 的几十次方个微观粒子),以符合统计规律的要求。

(2) 宏观足够小。子系统宏观尺寸不能太大,否则不能保证子系统内是平衡的。