

高等学校试用教材

工程热力学

(第二版)

邱信立 廉乐明 编
李力能 刘书林



中国建筑工业出版社

本书是高等院校供暖通与空调工程专业“工程热力学”课程试用教材的第二版。

本版教材是在总结近几年教学实践经验及第一版教材使用情况的基础上,按照1983年通过的新的教学大纲(70~80学时)的要求而重新编写的。与第一版教材相比,本版教材对大部分章节的内容作了调整和充实,对一些重要概念、内容和教学中的疑难点,都作了更加严密而深入的阐述。本版还增加了每章的思考题,并对原有习题进行了调整和补充,在书后附有答案,以便于自学和检查。

全书包括工质及气体状态方程式、热力学第一定律、气体的主要热力过程及气体压缩、热力学第二定律、纯物质的热力学一般关系式、水蒸汽的性质、混合气体和湿空气、气体和蒸汽的流动、动力循环、致冷循环、化学热力学基础、溶液热力学基础等十二章。书末附有九种主要热力学图表。全书采用国际单位制(SI)。

本书也可供从事供暖通风和空调工程、热能利用工程等方面的科技人员参考。

高等学校试用教材
工 程 热 力 学
(第二版)

邱信立 康乐明 编
李力能 刘书林

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 19 插页: 3 字数: 461 千字
1985年12月第二版 1985年12月第四次印刷
印数: 29,841—45,140册 定价: 3.10元
统一书号: 15040·4893

第一版前言

本书是根据1978年在天津召开的供热通风专业“工程热力学”教材会议拟订的70学时的大纲进行编写的。初稿写出后,经有关兄弟院校讨论,提供意见,集中修改而成。此书也兼顾了城市燃气热能供应工程专业及其他有关专业对这一课程的要求。

全书内容以热力学宏观理论为基础,联系工程实际,反映供热通风工程的特点,同时,尽可能吸取了国内外本门学科的新内容和先进技术。因而对于基本概念、热力学第一定律和热力学第二定律都有较详细的论述。全书有关各章大都用能量方程式和熵方程式阐明热力学的基本理论,教材体系和内容比过去的有所更新和充实。有些章节的论述采用了新体系,如热力学第一定律在化学过程中的应用,就以能量方程式取代了盖斯定律和克希荷夫定律。在编写时注意由浅入深,难点分散,重点深入。为了加深理解和培养分析解决问题的能力,各章都编有一定数量的例题和习题。

为了不使学生负担过重,凡书中注有*号的章节,由任课教师按实际情况决定取舍。

书中单位以国际单位制(SI)为主,但鉴于国内当前的规范、标准、技术资料等仍然使用公制单位的实际情况,也编入一部分公制单位的例题和习题,以利过渡。书中释意性的下角码采用了缩写英文字母,这是一个初步尝试,今后通过教学实践,根据效果再作调整。

本书由同济大学、哈尔滨建筑工程学院和重庆建筑工程学院三校的热工教研室合编,由同济大学和哈尔滨建筑工程学院担任主编。参加编写者有:同济大学蒋汉文、邱信立、章成骏,哈尔滨建筑工程学院廉乐明、孟宪吉、李力能,重庆建筑工程学院张惠迪、刘书林。

本书承太原工学院谢益棠同志细致审阅,提供了很多宝贵意见,谨致感谢。

编者 1979年2月

第二版前言

本书第一版自1979年问世以来,五年间曾三次印刷,满足了高等学校工科供热、通风与空气调节工程专业教材的要求,并还得到了国内其他有关专业及广大工程技术界的广泛使用。

本书第二版是在总结近几年来教学实践经验及第一版教材使用情况的基础上,按照1983年通过的供热、通风与空气调节工程专业《工程热力学》教学大纲(70~80学时)的要求,依据“教材应使其具有本门学科发展的水平,吸收国内外其他同类教材的长处,应恰当地更新内容,形成适合本专业具有一定特色的教材”的原则而编写的。

本书保持了第一版原有的体系,反映供热、通风及空调工程的特点。根据上述大纲对一些重要概念、内容和课程的疑难点,如平衡与可逆、焓与热量、嫡的定义式、嫡流、嫡产与嫡增等内容,这次都作了更加严密而深入的阐述。考虑到能源利用及节能技术的重要性,对热力学第二定律进一步扩展和深化,加强了状态参数烟、可用能、系统作功能力及能量的有效利用等内容,并在动力循环中进行了循环期效率的分析讨论。此外,本书对一些章节的内容进行了调整和完善,如纯物质热力学一般关系式、化学热力学基础、溶液热力学基础、扩压管和变热器等,使理论与实践紧密结合。还将第一版公制的致冷工质的压-焓图更换为国际单位制,解决了第一版的不足。

本版增加了每章的思考题,并本着循序渐进、难易结合的原则,对原有习题进行了调整 and 补充,并在书后附有答案,便于学生自学和检查。

考虑到本书的系统性及比较广泛的适应性,在编写时适当地超出了教学大纲的范围,这些内容均注有*号,可根据具体的教学时数及实际情况取舍。

遵照1984年2月27日国务院发布的“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”的规定,本教材一律采用国际单位制(SI),但考虑到目前国内工程实际情况,在书后附录中列出各单位制之间的换算表以备查用。

本书的绪论、第四章、第五章、第八章、第十一章及第十二章由同济大学邱信立编写,第二章及第十章由哈尔滨建工学院廉乐明编写,第一章、第三章及第九章由哈尔滨建工学院李力能编写,第六章及第七章由重庆建工学院刘书林编写,全书由邱信立定稿。在编写过程中得到同济大学蒋汉文教授的指导,重庆建工学院张惠迪同志参加了全书的讨论和部分章节的修订工作。

本书由太原工业大学谢益棠同志主审,提供了很多宝贵的意见,谨致感谢。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者 1984年12月

基本符号表

英文符号	名 称		名 称
a	修正分子间相互作用力的常数; 音速	l	长度
B	大气压力, 比例系数	M	分子量, 马赫数
b	修正分子本身体积的常数	Mc	摩尔比热
C	非平衡浓度; 组分数目	m	质量
c	流速; 质量比热; 余隙百分数; 平衡浓度	$\dot{m}$	质量流量
c'	容积比热	N	分子数目
c_p	定压质量比热	N_A	亚佛加德罗常数
c_v	定容质量比热	n	分子浓度; 多变指数; 摩尔数
d	直径; 含湿量	P	功率
d_a	干空气	p	压力
E	能量; 储存能	Q	热量; 反应热; 反应热效应
E_k	动能	q	单位质量热量
E_p	位能	R	气体常数
Ex	焓	R_0	通用气体常数
Ex_s	热量焓	r	汽化潜热; 容积成份
e	单位质量能量	S	位移; 熵
e_k	单位质量动能	s	单位质量熵
e_p	单位质量位能	T	热力学温度; 绝对温度
ex	单位质量焓	t	摄氏温度
ex_s	单位质量热量焓	U	内能
F	力; 自由度数目; 自由能	u	单位质量内能
f	截面积; 单位质量自由能	V	容积
G	自由焓	v	比容; 反应速度
g	质量成分; 单位质量自由焓	W	膨胀功; 总功
H	真空值; 焓	W_s	轴功
H_{100}°	标准状态下的生成焓	w	单位质量膨胀功
H_T°	任意温度下的生成焓	w_s	单位质量轴功
h	单位质量焓; 普朗克常数	w_t	单位质量技术功
h_{100}°	千摩尔物质标准生成焓	x	干度; 摩尔成份; 摩尔浓度
h_T°	千摩尔物质任意温度下生成焓	z	压缩因子; 高度
K	热能利用率	希腊文符号	名 称
K_c	用浓度表示的化学平衡常数	α	压力温度系数
K_p	用分压力表示的化学平衡常数	β	容积膨胀系数; 临界压力比; 压力比
k	玻尔兹曼常数	ϵ	压缩比; 热温比(角系数)
L	产液率	ϵ_1	致冷系数
		ϵ_2	供热系数
		ξ	能量损失系数

η_d	扩压管效率
η_e	喷管效率
η_r	循环热效率
γ	比热比(绝热指数)
λ	定容升压比
λ_v	容积效率
μ	定温压缩系数
μ_j	焦耳-汤姆生系数
ξ	热能利用率; 质量浓度
ρ	密度; 内汽化潜热; 定压膨胀比
ρ_{sat}	绝对湿度
τ	时间
ϕ	相对湿度; 相数; 速度系数
ψ	外汽化潜热
w	分子运动速度
下角码	名称
a	有用
b	背
C	卡诺
c	临界
ch	化学
dew	露点

dry	干
exp	膨胀
f	流动; 燃料
g	表计; 气体; 产生
h	高; 供热
irr	不可逆
iso	孤立
l	低; 损失; 液体
M	摩尔
m	平均
N	标准
n	正向
P	生成物
ph	物理
R	反应物
τ	对比; 逆向
rev	可逆
s	饱和; 固体; 轴
sur	环境
sys	系统
vap	蒸气
wet	湿

目 录

绪 论	1
第一章 工质及气体状态方程式	5
第一节 热力系统	5
第二节 工质的热力状态及其基本状态参数	7
第三节 热力平衡状态及状态方程	11
第四节 理想气体状态方程式	12
第五节 范德瓦耳方程式	16
第六节 对比态定律及压缩因子图	20
第二章 热力学第一定律	25
第一节 热力过程及热力循环	25
第二节 功量和热量	29
第三节 系统的储存能	33
第四节 闭口系统热力学第一定律能量方程	35
第五节 开口系统热力学第一定律能量方程	36
第六节 稳定流动能量方程的应用	43
第七节 气体的比热及其热量的计算	45
第三章 气体的主要热力过程及气体压缩	58
第一节 气体的基本热力过程	58
第二节 多变过程	66
第三节 压气机的理论压缩功	69
第四节 多级压缩及中间冷却	73
第五节 活塞式压气机的余隙影响	76
第四章 热力学第二定律	82
第一节 热力循环	82
第二节 热力学第二定律的实质及表述	84
第三节 卡诺循环与卡诺定理	86
*第四节 热力学温标	91
第五节 熵	93
第六节 孤立系统熵增原理	99
第七节 烟	108
*第八节 焓方程	113
*第五章 纯物质的热力学一般关系式	120
第一节 主要数学关系式	120
第二节 热物性系数	122
第三节 麦克斯韦关系式	124
第四节 焓、熵及内能的微分方程式	126

第五节 c_p 与 c_v 的微分关系式	130
第六章 水蒸汽的性质	134
第一节 液体的蒸发与沸腾	134
第二节 水蒸汽的定压发生过程	135
第三节 水蒸汽状态参数的确定及水蒸汽图表	138
第四节 水蒸汽的基本热力过程	144
第五节 水的相图及三相点	147
第六节 克拉贝龙-克劳修斯方程	148
第七章 混合气体和湿空气	152
第一节 混合气体的基本概念	152
第二节 混合气体的比热、内能、焓和熵	156
第三节 湿空气的状态参数	158
第四节 湿空气的焓湿图及热湿比	163
第五节 湿空气的露点和湿球温度	166
第六节 湿空气的基本热力过程	168
第八章 气体和蒸汽的流动	175
第一节 绝热稳定流动的基本方程	175
第二节 定熵流动的基本特性	178
第三节 喷管中流速及流量的计算	181
第四节 扩压管	190
第五节 具有摩擦的流动	192
第六节 绝热节流	194
第九章 动力循环	201
第一节 蒸汽动力基本循环——朗肯循环	201
第二节 回热循环与再热循环	204
第三节 热电循环	209
第四节 简单蒸汽动力装置烟分析	212
*第五节 内燃机循环	217
*第六节 简单燃气轮机理论循环	222
*第七节 喷气发动机工作原理简介	223
第十章 致冷循环	226
第一节 空气压缩致冷循环	226
第二节 蒸气压缩致冷循环	228
第三节 蒸汽喷射致冷循环	233
第四节 吸收式致冷循环	234
第五节 热泵与变热器	235
*第六节 气体的液化	238
第十一章 化学热力学基础	242
第一节 燃烧基本方程式及所需的空气量	242
第二节 热力学第一定律在化学反应中的应用	244
第三节 反应热与反应热效应的计算	248
第四节 热力学第二定律在化学反应中的应用	255

第五节	化学平衡和平衡常数	258
第六节	化学反应定温方程式	261
*第七节	热力学第三定律	263
*第十二章	溶液热力学基础	266
第一节	溶液的一般概念	266
第二节	二元溶液的温度-浓度图和焓-浓度图	269
第三节	相律	275
参考书目		278
习题答案		279
附录		282
附表1	饱和水与饱和水蒸汽表(按温度排列)	
附表2	饱和水与饱和水蒸汽表(按压力排列)	
附表3	未饱和水与过热蒸汽表	
附表4	在1000mbar时的饱和空气状态参数表	
附表5	压力换算表	
附表6	功、能和热量换算表	
附图1	水蒸汽的 $h-s$ 图	
附图2	湿空气的 $H-d$ 图	
附图3	氨 (NH_3 , R717) 的 $\lg p-h$ 图	
附图4	氟里昂-12 (CCl_2F_2 , R12) 的 $\lg p-h$ 图	
附图5	氟里昂-22 (CHCl_2F , R22) 的 $\lg p-h$ 图	

绪 论

一、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。由于人类不断地开发和利用各种能源：风力、水力、燃料的化学能、太阳能、地热能和原子核能等，人类社会才得到发展。从最近三十多年来世界各国的国民经济发展来看，各工业发达国家的能源消费量的增加与国民生产总值的增加成正比关系。所以能源消费水平在一定程度上能够反映社会生产力发展的水平。

就目前技术水平而论，在今后相当长的时期内，主要能源仍将是煤炭、石油、天然气等矿物燃料为主，也就是利用燃料燃烧所释放的化学能为主，这种燃料的化学能将转变为燃烧产物的热能。

热能的利用不外乎两种方式：一种是直接利用，如工业生产中的冶炼、加热、蒸煮、烘干及分馏等，又如日常生活中的热水供应及采暖等。另一种是间接利用，把热能转换为机械能，或者进一步把机械能转换为电能，这种间接利用的方式在交通运输及电力工业中得到了广泛的应用。

热能的直接利用固然重要，然而热能的间接利用更有重大意义。其重大意义不仅仅是由于热能间接利用所占能源消耗的比例很大，而且还存在着热能转换为机械能或电能过程中的有效利用问题。如在热力发电厂中，在较理想的情况下，热能的有效利用率也只能达到40%左右，将有60%以上的热能无法利用而被排放到大气或江河湖海中去，这部分无法利用的热能称为废热。再如在交通运输中的汽车、火车、船舶及飞机等，热能的有效利用率更低，一般低于35%，将有65%以上的热能随废气排放到大气环境中去。这些废气中还带有大量有害物质，造成环境污染。

我国目前利用热能的技术水平还不很高，尚未达到物尽其用的地步。我国的燃料资源虽然蕴藏量较丰富，但按人口占有量来说并不富足。整个地球上的矿物燃料资源毕竟有限，如何提高热能的利用率，减少热能消耗，不仅是我国科技界的一个重大课题，也是一个世界性的学术问题。因此，对物质热力性质及热能转换规律的研究，仍具有十分重要的意义。

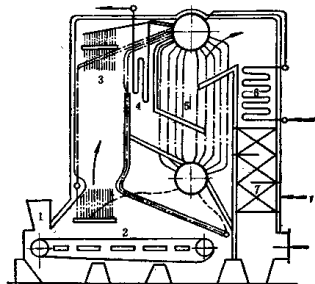


图 0-1 采用链条炉排的供热锅炉
1—煤斗；2—链条炉排；3—炉膛；4—过热器；5—汽
钢管束；6—省煤器；7—空气预热器

二、供热通风工程中的主要热能利用设备

1. 锅炉设备

图0-1是一台采用链条炉的供热锅炉。燃料自煤斗1自动落到链条炉排2上，燃料燃烧释放出大量的化学能，这些化学能转化为热能储藏在燃烧产物——烟气之中，使得烟气处于高温状态。烟气在锅炉中依次从炉膛3经过热器4、汽锅管束5、省煤器6及空气预热器7，最后经除尘器及烟囱排入大气。汽锅中的水被高温烟气加热而汽化为水蒸汽，此时水蒸汽就具有大量热能可供利用。在锅炉设备中，烟气将热能传递给水而产生水蒸汽，水蒸汽的热能可直接用于供热，这就是热能的直接利用，也可将水蒸汽的热能通过汽轮发电机组而间接利用于发电。

2. 压缩致冷系统

图0-2是直接蒸发式压缩致冷系统的流程图，是空调系统中直接产生冷风的一种致冷装置。在这种致冷系统中，一般采用氟利昂作为致冷剂。当低温低压的氟利昂蒸气从蒸发器4被吸入压缩机1的气缸后，经压缩变为高温高压的过热蒸气，然后送至冷凝器2冷凝为高压液态氟利昂，再经膨胀阀3绝热节流降温降压后送回蒸发器4。液态氟利昂在蒸发器中蒸发时，在相应压力下其蒸发温度较低，将吸收大量热量，此时流经蒸发器外壁的热风7便被冷却而成为冷风8，此冷风就可作为夏季室内降温之用。压缩致冷系统中必须消耗一定量的机械能才能使压缩机工作，使得热风将热量释放出来而成为冷风。所消耗的机械能是将热能通过一系列的转换而得到的，这些转换的途径是：燃料燃烧所产生的热能→水蒸汽的热能→汽轮机的机械能→发电机的电能→电动机的机械能。人们用电动机的机械能拖动压缩机工作才能达到致冷的目的，这就是热能的间接利用。

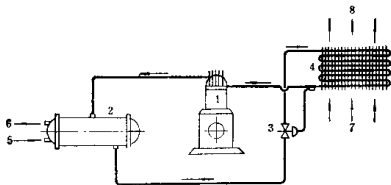


图 0-2 压缩致冷系统

1—压缩机；2—冷凝器；3—膨胀阀；4—蒸发器；5—冷却水入口；6—冷却水出口；7—热风；8—冷风

3. 空调系统

图0-3是一次回风空调系统示意图。空气的处理流程如下：新风与来自空调房间7的回风先在混合室1按一定比例混合，接着经空气过滤器2流入淋水室3，在此受低温水喷淋降温降湿，然后再流经后挡水板4进入加热器5，使空气加热到送风所需的温度，最后经送风机6送入空调房间7，使夏季得到冷风。空调系统所需低温水的制取是热能的间接利用，而加热器如采用热水或蒸汽作为热源，则属于热能的直接利用。

从上面的三个例子可以看出，供热与通风工程中，不论是供热、通风、致冷、空气调节等都离不开热能的直接利用和间接利用。当然，国民经济各个领域中也同样离不开热能

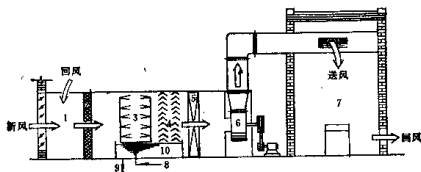


图 0-3 一次回风空调系统

1—混合室；2—空气过滤器；3—淋水室；4—后挡水板；5—加热器；6—送风机；7—空调房间；8—低温水送水管；9—回水排出管；10—冷水池

的利用。

三、工程热力学的研究对象及主要内容

热力学是一门发展较早而又应用十分广泛的学科。自从18世纪工业革命大量使用蒸汽机后，人们就不断地探索研究热能的本质，蒸汽机的效率及如何提高效率等一系列有关热现象的问题，因而在19世纪中叶建立了热力学第一定律及热力学第二定律。当时热力学的研究范围仅局限于热能与机械能之间的关系，随着工业的发展和科学技术的进步，热力学研究的范围已涉及到化工、冶金、冷冻、空调以及近代的低温、超导、电磁、生物等各个领域。由于热力学的应用日益广泛，随着科学技术的发展还在日益扩大，因而如何来定义热力学研究的对象是一个比较复杂的问题，但我们可以概括地认为：热力学是研究物质的热力学性质、能量和能量之间相互转换的一门基础理论学科。

工程热力学属于应用科学的范畴，它从工程技术观点出发，去研究物质的热力学性质，热能转换为机械能的规律和方法，以及有效而合理地利用热能的途径等。

工程热力学的主要内容有二个方面：一是基本理论部分；二是基本理论在工程技术领域中的应用部分。气体及蒸汽的热力学性质，热力学第一定律和能量方程，热力学第二定律和熵，热力学微分方程式等，均属于工程热力学的基本理论。气体和蒸汽的流动，动力循环，致冷循环以及化学热力学等，则属于应用部分。为了适应近代工程技术的发展，将燃料热能有效而合理地利用，并防止污染环境，把化学热力学中的部分内容放在工程热力学的应用部分范围之内，是很有必要的。

四、热力学的研究方法

热力学的研究有二种方法：一种是宏观的方法，即经典热力学方法；另一种是微观的方法，即统计热力学方法。宏观方法的特点，是把物质看作是连续的整体，从宏观现象出发，对热现象进行直接的观察和实验而总结出自然界的一些普遍的、基本的规律，这些规律就是热力学基本定律。然后再以这些基本定律为基础进行演绎、推论而得到具有高度普遍性的结论。宏观的方法建立在大量观察及实验的基础上，不是依靠个别条件下的个别实验，而是人类通过长期观察自然界的经验总结，它的正确性为无数经验所证明，直到目前为止，在宏观世界中的热现象均遵守热力学基本定律。因此，宏观的方法所得到的规律是可靠的和具有普遍意义的，工程热力学主要采用宏观的方法。但宏观的方法也有其缺点，组成物质的分子不是连续的而具有微粒的性质，因此，宏观的方法无法解释热现象的本

质，不能解释微观物质结构中个别分子的个别行为。因而宏观的方法只能适用于自然界中有限的宏观尺寸的物质和现象。

微观方法的特点，是从物质内部微观结构出发，借助物质的原子模型及描述物质微粒行为的量子力学，利用统计方法去研究大量随机运动的分子，从而得到统计的平均性质，最后得出描述物质热现象的基本规律。微观的方法是从物质内部分子运动的微观机理来更深刻地解释热现象的本质，从而进一步解释物质的宏观特性。统计热力学还能解释经典热力学不能解决的比热理论，熵的物理意义及熵增原理等物理本质。但微观的方法也有其局限性，其原因是所采用的物质结构的物理模型，只是物质实际结构的近似，统计结果与实际不能完全一致，因而它的结论不及宏观的方法所得到的可靠。微观的方法要以繁复和深奥的数学为工具，因此在工程热力学中主要采用宏观的方法。

五、本书中所用的单位制

国务院于1984年2月27日发布“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”，我国的法定计量单位基本上采用国际单位制，其国际代号为SI。国际单位制是1960年第十一届国际计量大会所通过，其基本单位共七个，即长度的米(m)；质量的千克(kg)；时间的秒(s)；电流的安培(A)；热力学温度的开[尔文](K)；物质的量摩尔(mol)；发光强度的坎[德拉](cd)。另有二个辅助单位，即平面角的弧度(rad)，立体角的球面度(sr)。利用这些基本单位和辅助单位可以导出一系列具有专门名称的导出单位，这样就可以构成不同科学技术领域中所需要的全部单位。国际单位制是在米制基础上发展起来的米制现代化形式。

国务院规定我国的计量单位一律采用“中华人民共和国法定计量单位”，要求在1990年前过渡完毕并在全中国实行。并要求从1984年到1987年底的四年中，在国民经济各主要部门，特别是政府、工业交通、文化教育、宣传出版和科学技术部门，要大体完成其过渡，一般只准使用法定计量单位。为此，本书一律采用法定计量单位，即采用国际单位制。但考虑到目前国内工程实际情况，在书后附录中列出各种单位制之间的换算表以备查用。

第一章 工质及气体状态方程式

在热力工程中,实现热能与机械能的转换,或热能的转移,都要借助于一种携带热能的工作物质,简称工质。各种气体、蒸气及其液体是工程上常用的工质。在热力过程中,一方面工质的热力状态不断地发生变化;一方面工质与外界之间有能量的输入或输出。因此,工质的热力性质及热能转换规律都是工程热力学的主要研究内容。

本章介绍有关气态工质的热力状态特性,如工质状态的描述方法、状态方程式等内容。

第一节 热 力 系 统

取系统的方法是物理、力学等许多学科常用的分析方法。同样,在热力学中我们把研究对象所包含的物体用边界从周围的环境中划分出来,边界内部的所有物体就是热力系统,或简称为系统。边界外部与系统发生联系的物体统称为外界或环境。如图1-1气缸中的气体就是我们的研究对象——热力系统;边界以外的物体,如活塞及外界空气都称为外界。

系统的边界可以是实际存在的,也可以是假想的,可以是固定不变的,也可以是运动的或可变形的。如图1-1中的边界就是与气缸壁、气缸头及活塞端面等实物界面相一致的实际边界。又如图1-2,一个真空的容器,当与外界连接的阀门打开时,外界空气在大气压力作用下将流入容器,直至它们的压力平衡为止。我们可以把大气中流入容器的那部分空气用一个假想的边界从大气中划分出来,那么,容器内壁以及假想的边界所包围的空气便是我们研究的热力系统。当阀门打开后,随着空气流入容器,假想的边界受外界空气压缩,这时边界及整个系统都发生收缩。

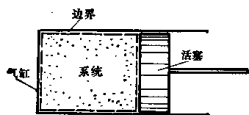


图 1-1 热力系统

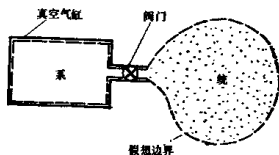


图 1-2 闭口系统

一、闭口系统与开口系统

在热力过程中,系统与外界之间通过边界可以有能量的传递(例如功或热量),也可以有物质的流入或流出。

没有物质穿过边界的系统称为闭口系统,系统的质量保持恒定。取系统时应把所研究

的物质都包括在系统中，有时又称闭口系统为控制质量。如图1-1及图1-2都是闭口系统的实例。

有物质流穿过边界的系统称为开口系统。取系统时只需把所要研究的空间范围用界面分割开来，故又称开口系统为控制体积（简称控制体），其界面称为控制界面。热力工程中遇到的开口系统多数都有确定的空间界面，界面上可以有一股或多股工质流过。如图1-3A、B两股流体的混合室便是开口系统的一个实例。

闭口系统与开口系统都可能通过边界与外界发生能量的传递。



图 1-3 开口系统实例（混合室）

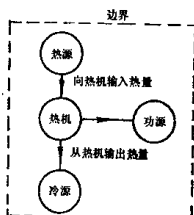


图 1-4 孤立系统

二、绝热系统与孤立系统

如果系统边界是由完全隔热材料构成的实际边界，那么，热量就不可能穿过边界，系统与外界之间便没有热量的传递，这种系统称为绝热系统。事实上，自然界不存在完全隔热的材料，因此，绝热系统只是当系统与外界传递的热量小到可以忽略不计时的一种简化模式。热力工程中有许多系统如汽轮机、喷管等都常可当作绝热系统来分析。

如果系统与外界不发生任何能量传递和物质交换，这种系统称为孤立系统。当然，自然界中各种现象相互之间或多或少都要发生一定的联系，绝对孤立的东西是不能存在的。然而，一切热力现象所涉及的空间范围总是有限的，我们把研究对象连同与它直接相关的外界用一个新的边界包围起来。这个新的、扩大了边界就是孤立系统的边界，此时，原系统内部的研究对象及与它相互作用的物体都可以看作孤立系统中的一个组成部分。孤立系统与其外界之间的相互作用可以忽略不计。由此可见，一切热力系统连同相互作用的外界都可以抽象为孤立系统。如图1-4，可作为孤立系统的实例。

绝热系统与孤立系统都是抽象的概念，它们都反映客观事物的本质，能够表达事物基本的、主要的一面，与实际事物有着很大程度的近似性。这种科学的抽象将给热力系统的研究带来很大的方便。在工程热力学中，我们还会遇到很多从客观事物中抽象出来的基本概念，如理想气体、平衡状态、准静态过程和可逆过程等。学习中不应该把这些抽象概念绝对化，而应该把它们看作一种可靠的、科学的研究方法来掌握。

三、系统的内部状况

系统内部工质所处的状况通常可有如下不同的形态：

1. 均匀系与非均匀系：系统内各部分的化学成分和物理性质都均匀一致的系统称为均匀系；否则，称为非均匀系。

2. 单相系与复相系：系统中工质的物理、化学性质都均匀一致的部分称为一个相，相与相之间有明显的界限。由单一物相组成的系统称为单相系。由两相以上组成的系统称为

复相系，如固、液、气组成的三相系统。

3. 单元系与多元系：由一种均匀的和化学成分恒定不变的物质组成的系统称为单元系。纯物质就是单元系，例如，纯氧、纯氮、纯水等，不管它们是单相还是复相都是纯物质。化学上稳定的混合物，例如空气、烟气，只要它们保持单相就可当作纯物质看待。但是，气态空气和液态空气组成的系统就不是纯物质，因为气态和液态的化学成分不相同。由两种以上化学成分组成的系统称为多元系，化学反应系统及溶液等就属多元系统。

最后还应当指出，系统必须根据实际情况来选择，以能给解决问题带来方便为原则。系统选取方法对研究问题的结果并无影响，仅与解决问题的繁复程度有关。

第二节 工质的热力状态及其基本状态参数

一、状态与状态参数

系统与外界之间能够进行能量交换（传热或作功）的根本原因，在于两者间的热力状态存在差异。例如，锅炉中的热量传递是由于燃料燃烧生成的高温烟气与汽锅内汽水之间存在着温度差；又如热力发动机中能量的转换是由于热力发动机中的高温高压工质与外界的温度、压力有很大的差别。可见，这种热力状态的差异，就是如压力、温度等这样一些标志工质物理特性的数值的不同。我们把系统中某瞬间工质表现在热力现象方面的总状况称为工质的热力状态，简称为状态。热力状态反映着系统工质大量分子热运动的平均特性。我们把描述工质状态特性的各种物理量称为工质的状态参数。状态参数值只取决于工质的状态，一定的状态，各状态参数有确定的数值。工质状态变化时，初、终状态参数之间的差值，仅与初、终状态有关，而与状态变化的途径无关。状态参数是点函数，它的数学特征表示为

$$\oint dx = x_2 - x_1 \\ \oint dx = 0$$

循环积分

式中 x ——表示某一状态参数。

热力学中常见的状态参数有：温度（ T ）、压力（ p ）、比容（ v ）或密度（ ρ ）、内能（ u ）、焓（ h ）、熵（ s ）、焈（ ex ）、自由能（ f ）、自由焓（ g ）等。其中温度、压力，比容或密度可以直接或间接地用仪表测量出来，称为基本状态参数，其余参数为导出状态参数。

二、基本状态参数

1. 温度

众所周知，两个冷热状态不同的物体相互作用，冷的物体要变热，热的物体要变冷。经过相当长时间，在没有其他外来影响的情况下，两物体终将达到相同的冷热状态，称为两物体的热平衡状态。实践证明，如两个物体分别和第三个物体处于热平衡，则它们彼此之间也必然处于热平衡。这一规律的发现先于热力学第一定律，而把它命名为基本实验定律却在其后，故称为第零定律。从这一定律可以推证，互为热平衡的系统必然具有一个在数值上相等的热力学参数来描述热平衡的特性，这个参数就定义为温度。由此可知，温度是描述热力系统冷热状态的物理量。

在物理学中，把温度的概念与气体大量分子平移运动的平均动能联系起来，并导出了理想气体热力学温度与分子平移运动平均动能的关系式

$$\frac{m\bar{\omega}^2}{2} = BT \quad (1-1)$$

式中 $\frac{m\bar{\omega}^2}{2}$ ——分子平移运动的平均动能，其中 m 是一个分子的质量， $\bar{\omega}$ 是分子平移运动均方根速度，

B ——比例常数，

T ——气体的热力学温度。

上式说明气体分子的平均动能仅与温度有关，并与热力学温度成正比。可见温度标志着物质内部大量分子热运动的强烈程度。

工程上常要定量地测定系统的温度，第零定律提供了测温的依据，当被测系统与已标定过的带有数值标尺的温度计达到热平衡时，温度计指示的温度值就等于被测系统的温度值。

温度的数值标尺，简称温标。任何温标都要规定基本定点和每一度的数值。国际单位制 (SI) 规定热力学温标，符号用 T ，单位国际代号为 K (Kelvin)，中文代号为开。热力学温标规定纯水三相点温度 (即汽、液、固三相平衡态时的温度) 为基本定点，并定义为 $273.16K$ 。每 $1K$ 为水三相点温度的 $1/273.16$ 。热力学温标是理论温标，详见第四章。

SI 还规定摄氏 (Celsius) 温标为实用温标，符号用 t ，单位为摄氏度，代号为 $^{\circ}C$ 。摄氏温标的每 $1^{\circ}C$ 与热力学温标的每 $1K$ 完全相同，它的定义式为

$$t = T - 273.15 \quad (1-2)$$

式中 273.15 的值是按国际计量会议规定的。可见，摄氏温度与热力学温度差值为 $273.15K$ ，当 $t = 0^{\circ}C$ 时，则 $T = 273.15K$ 。两种温标换算，在工程上采用下式计算已足够准确。

$$T = 273 + t \quad (1-2a)$$

应当指出，1954 年以前摄氏温度是由标准大气压力下水的冰点 ($0^{\circ}C$) 和沸点 ($100^{\circ}C$) 来定义的。采用新的定义式 (1-2) 后，在通常测量精度范围内，以上数值仍然相同，但它们的定义却有原则的区别。

2. 压力

(1) 压力和压力单位 我们取一个充满气体的容器作为系统，系统中气体分子总是不停地作不规则的热运动，这种不规则的热运动不但使系统中气体分子之间不断地相互碰撞，同时也使气体分子不断地和容器壁 (即边界面) 碰撞，大量分子碰撞器壁的总结果，就形成了气体对器壁的压力。通常用垂直作用于边界面单位面积上的力来表示压力的大小 (或称压强)，也称为气体的绝对压力。对于理想气体，可以从理论上导出作用于单位面积上的压力与分子浓度及分子平移运动平均动能之间的关系式

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{\omega}^2}{2} \quad (1-3)$$

式中 p ——单位面积上的绝对压力，

n ——分子浓度，即单位容积内含有气体的分子数， $n = \frac{N}{V}$ ；