

热工基础

傅秦生 何雅玲 编著



西安交通大学出版社

TK12
29

热 工 基 础

傅秦生 何雅玲 编著

4F37/13



02

西安交通大学出版社



C0312795

内容提要

本书是根据国家教育委员会制定的《热工课程教学基本要求》编写的,适用于非动力类各专业本科生和动力类各专业大专生使用,也可供有关工程技术人员参考。

本书围绕热能的有效利用,对热能间接利用和直接利用所涉及的“工程热力学”、“传热学”以及主要“热工设备”等内容进行了阐述。结合编者长期教学实践,本书打破了把“热工基础”严格分为“工程热力学”篇和“传热学”篇的体系,并将所增加的必要的“热工设备”有关内容融入有关章节进行阐述。

本书各章均有例题和习题。书后附有必要的附表和附图供教学使用。所选附表附图注意尽量反映最新研究成果。

(陕)新登字 007 号

热 工 基 础

傅泰生 何雅玲 编著

责任编辑 孙文声

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁路 28 号 邮政编码 710049)

西安市德力彩印厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:14 插页:1 字数:334 千字

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—5000

ISBN7-5605-0688-7/TK·55 定价:10.80 元

前 言

本书是根据国家教委热工课程指导委员会制定的高等工业学校《热工课程基本要求》的精神编写的。本书适用于非动力机械专业和非热工类各专业本科生使用,如:作为应用力学,经济管理,科技外语等专业的“热工基础”和“热工概论”课教材;也适用于动力类专业专科生使用,如:作为能源与动力学院各专业专科生的“工程热力学”和“传热学”课的教材。

“热工基础”所研究的是如何有效地利用热能,以提高热能利用的完善程度。众所周知,能源的开发和利用在很大程度上是热能的开发和利用,它是决定我国经济发展的重要因素。根据我国国情,确定了“实行开发和节约并重,近期把节能放在优先地位”的总方针。作为一个工程技术人员,即使不属于动力类专业,也应具备一定的热工基础知识。这是因为热工设备不但在动力工业中,而且在几乎所有的工业中都有,型式多样,五花八门。掌握一定的热工基础知识,在实际工作中采取有效的措施,以降低能耗和成本,提高劳动生产率是势在必行。在科学技术突飞猛进的今天,学科交叉不可避免,掌握一定的热工理论,对于许多学科的深入研究,必然会有较大的促进。对于从事力学、机械、经济、管理和科技外语等方面的高级人才而言,热工基础是他们工程科学知识中不可缺少的重要组成部分之一。当然,对于动力类的大专生而言,热工基础是他们进一步学习专业课程的基础。因此,为使高等理工科学校非动力类专业的本科生掌握必要的热工基础知识,为使动力类专科生具备坚实的热工理论基础,特编写此书。

本书在编写过程中,结合教学实践打破了传统的把热工基础严格分为工程热力学篇和传热学篇的体系,以热能的利用,包括直接利用和间接利用为线索,阐述热能利用中所涉及的基本定律,基本概念,主要热力循环装置和主要热工设备。

为使本书适用面广,编写中涉及内容相对较多。教师在授课时可根据不同专业的具体要求选取所需要的内容,并决定详授还是略讲。

本书由傅秦生(绪论,第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ章)和何雅玲(第Ⅰ、Ⅴ、Ⅵ章)合编,傅秦生任主编。刘英哲教授审阅了全稿,他的宝贵意见对提高本书质量起了积极作用,编者深表谢意!同时对西安交通大学热工教研室许多老师和同事在本书编写中给予的支持和帮助表示感谢!

由于编者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者不吝赐教。

编者

1995年4月于西安交通大学

主要符号表

A	截面积; 表面积; 干空气	T	热力学温度
a	声速; 热扩散率(导温系数)	t	摄氏温度
Bi	毕渥准则	U	总内能; 周长
c	速度; 比热容	u	单位质量内能; 速度
D	过热度; 透射率	V	容积
d	含湿量; 直径	V_m	摩尔容积
E	总能量; 辐射力	v	比容
e	单位质量总能量	W	总功;
F	作用力; 传热面积	W_0	净功
G	投入辐射	\dot{W}	功率
Gr	格拉晓夫准则	w	单位质量功
g	重力加速度	x	干度; 质量成分
H	焓; 高度	X	角系数
h	比焓	y	摩尔成分
J	有效辐射	z	高度; 容积成分
k	传热系数	α	对流换热系数; 吸收率; 回热抽汽系数
M	分子量(摩尔质量); Ma	β	肋化系数
m	质量	δ	厚度; 微小量
Q_m	质量流量	ε	压缩比; 黑度; 制冷系数
N	摩尔数; 组元数	η	热效率; 效率; 肋片效率
Nu	努谢尔特准则	η_c	循环热效率
n	多变指数; 物理量个数	θ	过剩温度; 温度量纲
p	压力	κ	比热比(绝热指数)
Pr	普朗特准则	λ	导热系数; 波长; 定容升压比;
Q	热量; 热流量	μ	动力粘度
q	单位质量热量; 热流密度	ν	运动粘度
R	气体常数; 热阻; 半径	γ_{cr}	临界压比
R_m	通用气体常数	π	增压比
Re	雷诺准则	ρ	密度; 绝对湿度; 定压预胀比; 反射率
r	半径; 汽化潜热; 基本量纲数; 单位面积 热阻	σ_b	黑体辐射系数
S	熵	τ	时间; 穿透率; 粘性力
s	比熵	φ	相对湿度

角 码

a	空气;干空气	max	最大
ad	绝热系	min	最小
b	大气(压力);黑体	n	多变指数
c	临界;卡诺循环;冷凝	o	流出;标准态
D	露点	P	势(能)
f	流体;(熵)流	p	定压
g	表的;(熵)产	s	饱和
HR	热源(高温热源)	s	定熵
in	流进	sh	轴
iso	孤立系	T	定温
K	动能	t	技术
LR	冷源(低温热源)	v	真空;蒸汽
L	液体;长度	v	定容
m	平均;机械	w	壁面;水;湿球(温度)

目 录

主要符号表

绪论

1 热能转换的基本概念

- 1.1 热力系、状态和状态参数..... (4)
 - 1.1.1 热力系与工质 (4)
 - 1.1.2 平衡状态 (4)
 - 1.1.3 基本状态参数 (5)
 - 1.1.4 状态方程式 (5)
- 1.2 热力过程、功和热量..... (7)
 - 1.2.1 热力过程 (8)
 - 1.2.2 功和热量 (9)
 - 1.2.3 热力循环..... (11)

习题 (12)

2 热力学基本定律

- 2.1 热力学第一定律..... (14)
 - 2.1.1 热力学第一定律的实质..... (14)
 - 2.1.2 储存能——内能和总能量..... (14)
 - 2.1.3 热力学第一定律的一般表达式..... (15)
 - 2.1.4 闭口系的能量方程..... (15)
 - 2.1.5 稳定流动系统的能量方程..... (17)
 - 2.1.6 能量方程的应用..... (20)
- 2.2 热力学第二定律..... (23)
 - 2.2.1 热力过程的方向性..... (23)
 - 2.2.2 热力学第二定律的表述..... (25)
 - 2.2.3 卡诺循环和卡诺定理..... (26)
 - 2.2.4 状态参数熵..... (29)
 - 2.2.5 不可逆过程的熵变、熵流和熵产 (30)
 - 2.2.6 孤立系的熵增原理..... (32)
 - 2.2.7 能量的品质与能量贬值原理..... (35)

习题 (36)

3 工质的热力性质

- 3.1 物质的三态及相变过程..... (39)
- 3.2 理想气体的热力性质..... (40)
 - 3.2.1 理想气体及其状态方程..... (40)

3.2.2	理想气体的比热容	(42)
3.2.3	理想气体的内能、焓和熵	(45)
3.3	理想气体混合物	(48)
3.3.1	分压力定律和分容积定律	(48)
3.3.2	理想气体混合物的成分	(49)
3.3.3	折合摩尔质量和折合气体常数	(49)
3.3.4	理想气体混合物的内能、焓和熵	(50)
3.4	蒸气的热力性质	(52)
3.4.1	定压下水蒸气的发生过程	(52)
3.4.2	蒸气热力性质图表	(54)
3.4.3	蒸气热力性质图表的应用	(56)
3.5	湿空气	(58)
3.5.1	湿空气的状态参数	(58)
3.5.2	干湿球温度计	(60)
3.5.3	焓湿图(60h-d图)	(61)
3.5.4	湿空气的基本热力过程	(61)
	习题	(63)
4	工质的热力过程	
4.1	理想气体的热力过程	(65)
4.1.1	四种基本热力过程	(66)
4.1.2	多变过程	(71)
4.2	气体和蒸气的压缩	(74)
4.2.1	单级活塞式压气机的工作过程及耗功分析	(74)
4.2.2	多级压缩、级间冷却	(76)
4.2.3	叶轮式压气机的工作过程及耗功计算	(78)
4.3	气体与蒸气的流动	(79)
4.3.1	一元稳定流动的基本方程	(79)
4.3.2	音速和马赫数	(81)
4.3.3	气体在喷管中的定熵流动	(81)
4.3.4	喷管的计算	(82)
4.3.5	绝热节流	(88)
	习题	(89)
5	热量传递的基本定律及应用分析	
5.1	热量传递的三种基本方式简介	(91)
5.1.1	热传导	(91)
5.1.2	热对流	(92)
5.1.3	热辐射	(92)
5.2	导热	(93)
5.2.1	导热的基本概念	(93)

5.2.2	稳态导热的计算	(94)
5.2.3	非稳态导热	(101)
5.3	对流换热	(111)
5.3.1	对流换热概述	(111)
5.3.2	量纲分析与准则方程式	(114)
5.3.3	强迫对流换热及其实验关联式	(118)
5.3.4	自然对流换热及其实验关联式	(126)
5.3.5	凝结和沸腾时的对流换热	(128)
5.4	辐射换热	(130)
5.4.1	热辐射的基本概念	(130)
5.4.2	热辐射的基本定律	(132)
5.4.3	黑体间的辐射换热和角系数	(134)
5.4.4	灰体表面间的辐射换热	(138)
	习题	(144)
6	换热器及其热计算	
6.1	换热器的分类	(150)
6.1.1	按工作原理分类	(150)
6.1.2	按结构分类	(150)
6.1.3	按流动形式分类	(152)
6.2	传热过程	(152)
6.2.1	通过平壁的传热	(152)
6.2.2	通过园筒壁的传热	(154)
6.2.3	通过肋壁的传热	(155)
6.3	换热器的热计算	(158)
6.3.1	平均温差	(158)
6.3.2	换热器的热计算	(162)
6.4	传热的增强和削弱	(164)
6.4.1	增强传热	(164)
6.4.2	削弱传热	(165)
	习题	(166)
7	热力循环与主要热工设备	
7.1	蒸汽动力循环及装置	(171)
7.1.1	朗肯循环	(171)
7.1.2	再热循环	(173)
7.1.3	抽汽回热循环	(173)
7.1.4	锅炉设备的组成与工作特性	(174)
7.1.5	汽轮机	(175)
7.2	内燃机的基本构造及循环	(176)
7.2.1	内燃机的基本构造	(177)

7.2.2	活塞式内燃机的工作过程与原理	(177)
7.2.3	定容加热理想循环	(177)
7.2.4	混合加热理想循环和定压加热理想循环	(178)
7.3	燃气轮机循环及装置	(180)
7.3.1	设备与流程	(180)
7.3.2	能量分析计算	(181)
7.4	制冷循环及装置	(182)
7.4.1	概述	(182)
7.4.2	蒸气压缩制冷循环	(182)
习题	(185)

附录表

附表 1	常用单位换算表	(187)
附表 2	一些常用气体的热力特性	(189)
附表 3	理想气体的真实定压摩尔比热公式	(189)
附表 4	气体的平均定压比热 C_{pm}	(190)
附表 5	气体的平均定容比热 C_{vm}	(191)
附表 6	气体的平均比热(192 直线关系式)	(192)
附表 7	饱和水与饱和水蒸气表(196 按温度排列)	(193)
附表 8	饱和水与饱和水蒸气表(206 按压力排列)	(195)
附表 9	未饱和水与过热蒸汽表	(197)
附表 10	金属和非金属材料的物性参数	(204)
附表 11	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	(206)
附表 12	干空气的热物理性质($p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	(207)
附表 13	未饱和水($1.013 \times 10^5 \text{Pa}$)与饱和水的热物理性质	(208)
附表 14	干饱和水蒸气的热物理性质	(209)
附表 15	几种饱和液体的热物理性质	(210)
附表 16	气体的热物理性质($p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	(211)
附表 17	常见工程材料的辐射黑度	(212)
附表 18	双曲线函数值	(213)

参考文献

- 附图 1 湿空气焓湿图($p_0=0.1 \text{MPa}$)
 附图 2 氨压焓图
 附图 3 水蒸气焓熵图

绪 论

0.1 热能的利用

翻开人类的发展史,不难看到人类社会的发展和人类对能源的开发、利用息息相关。能源的开发和利用水平是衡量社会生产力和物质文明的重要标志。

所谓能源是指可向人类提供各种能量和动力的物质资源。迄今为止,由自然界提供的能源有:水力能,风能、太阳能,地热能,燃料的化学能、原子核能以及其它一些形式的能量。在上述几种主要的能量形式中,除水力能和风能是机械能外,其余都是直接或间接向人类提供热能形式的能量。例如:太阳能是直接的热能;燃料的化学能,包括固态的煤、液态的石油和气态的天然气,主要是通过燃烧将其化学能释放并转变为热能供人类利用的。统计资料表明,以热能形式提供的能量占了能源相当大的比例。因此从某种意义上讲,能源的开发和利用就是热能的利用。

热能的利用可分为直接利用和间接利用。热能的直接利用是指直接用热能加热物体,热能的形式不发生变化。如:取暖、烘干、冶炼、蒸煮以及化工过程利用热能进行分解和化合等等,以满足人类生产和生活的需要。热能的间接利用是指把热能转换为机械能(或再转变为电能)以满足人类生产和生活对动力的需要。如:交通运输,石油化工,机械制造和其它各种工程中的动力需要。在热能的间接利用中,热能的能量形式发生了转换。

人类对热能的直接利用可以追溯到远古时代钻木取火和对火的利用。火的利用是人类利用热能的第一步,它开拓了人类物质文明生活的新局面。从此人类可以用火来蒸煮、烤食物、取暖和照明。此后人类又利用热能来冶炼矿石,制造金属工具,使农业和手工业生产得以发展。虽然人类对热能的利用有着漫长的历史,但是直到18世纪中叶,热能的利用仍局限于作为加热热源的直接利用。

随着生产的不断发展,人们对动力的需求日益增长。这就迫使人们寻求一种不受气象、地理等自然条件限制的动力源。1784年英国人瓦特在前人研究基础上制成了工业上通用的性能良好的蒸汽机。它实现了热能向机械能的能量转换,开创了热能间接利用的新纪元,使社会生产力得以突飞猛进,导致了“第一次工业革命”。从此,热能的间接利用得到了广泛深入的发展。继蒸汽机后,相继出现了内燃机、燃气轮机和蒸汽轮机装置,从而出现了汽车、飞机和大型火力发电设备等等。随着热能和机械能转换的深入研究,各种制冷设备如:冰箱、冷冻机和空调等也相继出现和发展。随着科学技术和社会生产力的发展,人类已开始利用原子核能为人类服务。

瓦特蒸汽机的出现和第一次工业革命,推动了热工理论的研究。为了提高各种动力机的能量利用的经济性,人们对热的本质、热能和机械能之间转换的基本规律以及各种工质热力性

质进行了不懈地深入研究和探讨,从而导致涉及热能间接利用的“工程热力学”的出现、发展和完善。对“工程热力学”创立和发展作出过突出贡献的有:法国工程师卡诺,德国科学家迈耶尔,英国科学家焦耳,德国科学家克劳修斯和英国科学家开尔文,以及范德瓦尔,朗肯,喀喇提奥多利和凯南等其他一些科学家。

在人们探讨提高热机功率和效率的研究中,发现传热过程引起的热损失是阻碍提高热机效率和功率的原因之一。在工程技术的其它领域,也广泛存在着热量传递引起的问题:有些需要增强传热,有些则需要削弱传热。因此无论在热能的间接利用中,还是热能直接利用本身,都迫切需要对热量传递的基本规律进行深入研究,以便有效地利用热能。这样导致了“传热学”的出现和发展。在“传热学”的发展中,许多科学家都作出了卓越的贡献。其中有:傅里叶(法国),牛顿(英国),雷诺(美国),努谢尔特(德国),普朗特(德国)和施密特(德国)等。

我们中华民族祖先在热能利用方面曾有过辉煌的成就。早在商、周时代,我国就有了高水平的冶炼和铸造技术。隋朝已在民间流行有流星焰火。北宋时代已出现走马灯,它是现代燃气轮机的雏形,比欧洲同类记载至少早 400 年。宋朝我们祖先已发明了火药,火箭。17 世纪创造了原始的两级火箭。但在近 200 年来,在国外热工事业突飞猛进发展之时,我国却由于受到长期封建制度的束缚和帝国主义侵略等种种原因,生产力非但没得到发展,反而遭到一定程度的破坏,也几乎谈不上什么自己的热工事业。

解放以后,我国政府十分重视能源、动力工业。改革开放以来,更是把能源交通作为支柱产业予以优先发展,从而使能源动力工业得到了长足的进展。我国不但自行设计制造了万吨级船用柴油机和数千千瓦的内燃机车用内燃机,而且还能制造 60 万千瓦的全套火力发电设备。我国自行研制的多级火箭已开始进入国际市场,秦山和大亚湾核电站已并网发电。所有这一切都说明我国的热工事业正蓬蓬勃勃朝着现代化迅速发展。

0.2 热工基础的研究对象、内容和研究方法

回顾人类利用热能的历史,尤其是在瓦特蒸汽机出现以后,无论是在热能的间接利用还是在直接利用中,人们一直在孜孜探求如何有效地利用热能以提高能量利用的完善程度,节约有限的资源。

在热能的间接利用中,为实现热能和机械能之间的转换,在各种热机相继出现的同时,人们提出了如何才能实现热能和机械能之间的转换;转换的普遍规律是什么;如何提高热机的热效率;以及如何实现制冷和提高制冷循环的制冷系数等一系列问题。在热能的直接利用中,为了增强或削弱热量的传递,人们提出了类似的问题:热量是如何传递的;热量传递遵循怎样的规律;为增强和削弱传热,提高热能利用经济性应采取怎样的措施。这些问题就是本门学科所要研究解决的。因此,包括研究热能间接和直接利用在内的“热工基础”是研究热能利用的基本规律,以提高热能利用经济性的一门学科。

前已述及,热能和机械能的转换是工程热力学的研究范畴。在热能的间接利用中,热能和机械能之间的转换所必须遵循的普遍规律是热力学第一定律和第二定律。这两大定律是本课程所要研究的主要内容之一。虽然在涉及热现象的能量转换过程中,热力学第一和第二定律不能违背,但是人们可以通过选择工质(能量转换所凭借的物质)和合理安排热力过程以提高热能利用的经济性。这样,工质的热力性质、热力过程和热力学两大定律一起,构成了工程热力学

的理论基础。运用这些理论基础,对实际工程中的热力过程和热力循环进行分析,提出提高能量利用经济性的具体途径和措施是研究热能和机械能转换的一主要目的和内容。

工程热力学主要采取经典热力学的研究方法,即宏观和唯象的研究方法。这种方法把物质视为连续体,用宏观物理量描述物质的行为,以大量观察、实验中总结出的热力学定律为依据,通过推理、演绎得出具有可靠性的和普遍适用的结论、公式,以解决热力工程中的能量转换问题。宏观、唯象的研究方法简单、可靠,但由于这种方法不考虑物质的微观结构和运动规律,故对于许多物理现象及其本质,对物质的一些性质等不能说明。为此,工程热力学在必要时引用微观的气体分子运动论和统计热力学的方法、观点和理论对一些物理现象、物质的性质等进行说明和解释。

在研究热能直接利用的传热学中,热量传递可以以三种方式进行,即:热传导、对流换热和辐射换热。三种传热方式遵循着各自不同的基本定律。传热过程中,为提高热能利用的经济性而采取的增强或削弱传热的种种措施皆来源于对三种基本传热方式基本规律的研究。当然,三种传热方式在工程实践中常常是耦合在一起的,例如:在蒸气动力循环的锅炉设备中,燃烧产生的烟气和水蒸气间的传热过程,有通过管壁的导热,还有烟气和管外壁的辐射换热和对流换热,以及水蒸气和内管壁间的对流换热。因此,综合应用三种传热方式的普遍规律,对实际工程中的热工设备和传热过程进行分析是本课程研究的另一重要目的和内容。

传热学的研究方法有解析法、实验研究法和数值解法。解析法就是对描述热传递的方程用数学分析的方法求解,实验研究法是利用实验对复杂的热传递过程进行测定,在传热理论指导下建立实验方程进行求解。另外,对难以利用解析法求解的热传递方程可以用数值求解原理和电子计算机进行计算求解,这就是数值解法。这几种方法针对各自的研究问题虽各自独立,但又相辅相成,互相补充,并且随着科学技术的发展而不断发展和完善。

当然,热能的利用离不开热工设备,诸如锅炉、汽(燃气)轮机、内燃机和各种换热器均属热工设备。它们承担着热能直接利用或能量转换的具体任务。因此,本课程在允许的篇幅内尽可能多地对常用的热工设备原理、构造和性能进行介绍。

1 热能转换的基本概念

研究任何一门学科必须首先掌握该学科的基本概念和术语。本章就是介绍研究热能和机械能相互转换规律所涉及的基本概念和术语,它是后续内容的基础。

1.1 热力系、状态和状态参数

1.1.1 热力系与工质

1.1.1.1 热力系

热力学中,根据研究任务的具体要求,可人为选取一定范围内的物体作为研究对象,称此研究对象为**热力系统**,简称**热力系**或**系统**。热力系以外的物体称为**外界**,热力系与外界的界面称为**边界**。边界可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以是运动的。图 1-1 (a)所示的气缸活塞机构,若把虚线包围的气体取作热力系,则其边界就是真实的,其中有一条边界是移动的。图 1-1(b)所示的汽轮机,若取 1-1、2-2 截面及汽缸所包围的空间作为热力系,那么 1-1、2-2 截面所形成的这一部分边界就是虚构的。



图 1-1

在一般情况下,热力系与边界总是处于相互作用之中,它们彼此可以通过边界进行物质和能量的交换。根据热力系与外界相互作用情况的不同,热力系可分为:

闭口系——热力系与外界无物质交换。即此时热力系内部的质量保持不变,称为**控制质量(CM)**。对于闭口系,通常用控制质量法来研究。

开口系——热力系与外界有物质交换。这种热力系内部的质量可以是变化的。这里,我们可以把研究对象规划在一定的空间范围内,该空间范围叫作**控制容积(CV)**。对于开口系,通常用控制容积法来研究。

绝热系——热力系与外界无热量交换。

孤立系——热力系与外界无任何能量和物质交换。

简单可压缩系——由可压缩流体构成,热力系与外界交换的可逆功(参见 1.2.1.2 和 1.2.2.1)的模式只有容积变化功(膨胀功或压缩功)一种。工程热力系中所讨论的热力系,在不涉及化学反应时都是简单可压缩系。

热源——热力系与外界仅有热量交换,而且有限热量的交换不引起热力系的温度变化。根据热源的温度高低和作用,热源可分为**高温热源**和**低温热源**,又称为**热源**和**冷源**。

另外还可以根据热力系的其它特点定义许多不同性质的热力系,如多元系、多相系、均匀系等。

1.1.1.2 工质

能量的转换必须通过物质来实现。我们把**用来实现能量相互转换的媒介物质称为工质**。它是实现能量转换必不可少的内部条件,如在内燃机中,凭借燃气的膨胀把热转化为功,燃气就是工质;在蒸汽动力装置中的工质是水蒸气。

原则上,气、液、固三态物质都可作为工质,但是,本课程研究的热能和机械能的相互转换是通过物质体积变化来实现的,对体积变化敏感、有效而迅速的是气(汽)态物质。因此,在热力学中的工质是气(汽)态物质以及涉及气态物质相变的液体。

不同性质的物质对能量转换效果有直接影响,所以,物质性质的研究也是本学科的重要内容之一。

1.1.2 平衡状态

为了分析热力系中能量转换的情况,首先必须能够正确地描述系统的热力状态。所谓**热力状态**(简称**状态**)是指热力系在某一瞬间所呈现的**宏观物理状况**。

热力系可能呈现各种不同的状态,其中具有特别重要意义的是平衡状态。所谓**平衡状态**是指在**没有外界影响的条件下,系统各部分在长时间内不发生任何变化的状态**。

处于平衡状态的热力系,各处应具有均匀一致的温度、压力等参数。试设想各物体之间有温差存在而发生接触时,则必然有热自发地从高温物体传向低温物体,这时系统不会维持状态不变,而是不断产生状态变化直至温度差消失而达到平衡。这种平衡称为**热平衡**。可见,温差是驱动热传递的不平衡势,而温差的消失则是系统建立热平衡的必要条件。同样,如果物体间有力差的作用,则将引起物体的宏观位移变化,这时系统的状态不断变化直至力差消失而建立起平衡。这种平衡称为**力平衡**。所以,力差是驱使系统状态变化的一种不平衡势,而力差的消失是使系统建立起力平衡的必要条件。对于有相变或化学反应的系统,因这些现象是在不平衡化学势推动下发生的,所以,化学势差的消失是使系统建立平衡的另一必要条件。

综上所述,**系统内部以及系统与外界之间各种不平衡势的消失是系统建立起平衡状态的充要条件**。

1.1.3 基本状态参数

描述系统宏观状态的物理量称为**状态参数**。在工程热力学中常用的状态参数有六个,即压力、比容、温度、内能、焓和熵。这些参数可分为**强度量**和**尺度量**。与物质质量无关的参数称为强度量,如压力、温度等;与物质质量成比例的参数称为尺度量或广延量,如容积 V 、内能 U 、焓 H 、熵 S 等。尺度量具有可加性。尺度量除以质量可以转化为强度量,通常在其对应的尺度量名称前冠以“比”字,用相应的小写字母表示,比如容 v 、比内能 u 、比焓 h 和比熵 s 等。

要强调指出的是,**状态参数是热力状态的单值函数**,即状态参数的值仅取决于给定的状态,而与达到这一状态的路径无关。状态参数的这一特性在数学上的表现是:它的微分是恰当

微分,恰当微分的循环积分等于零。若以 x 代表任一状态参数,则上述数学性质可表示为

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad \text{或} \quad \oint dx = 0 \quad (1-1)$$

常用的六个状态参数中,压力 p 、比容 v 和温度 T 可以直接或容易用仪表测定,称为基本状态参数。下面逐一介绍这三个参数。

1.1.3.1 比容

比容就是单位质量的物质所占的容积。若以 m 表示质量, V 表示所占容积, 则比容

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-2)$$

比容的倒数称为密度 ρ 。密度表示单位容积的物质所具有的质量,即

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

比容的单位为 m^3/kg ,密度的单位为 kg/m^3 。

1.1.3.2 压力

压力是指单位面积上承受的垂直作用力。如用 A 表示面积, F 表示垂直于 A 的均匀作用力,则压力

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-4)$$

气体的压力是组成气体的大量分子对容器壁碰撞的统计平均效果。

流体的压力常用压力表或真空表来测量。常用的测压计有弹簧管测压计和 U 型管测压计。不论那种压力计,通常测定的都是压差。如图 1-2(a)是弹簧管式测压计的基本结构,它利用弹簧管内外压差的作用产生变形带动指针转动,指示被测介质与环境间的压差。图 1-2(b)是 U 型管测压计, U 型管中盛有测压液体,如水或汞。U 型管的一端与被测物质相连,另一端敞开在环境中,测压液体的高度差即指示被测物质和环境的压差。

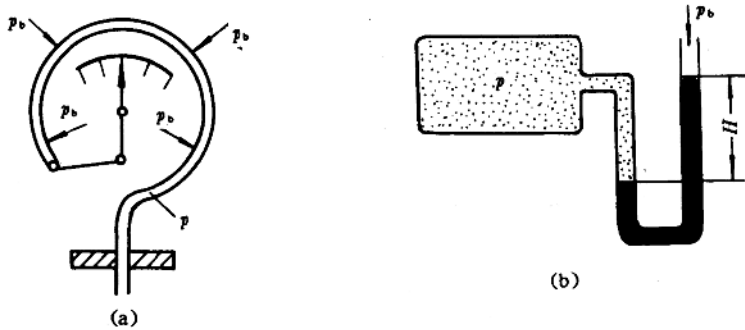


图 1-2

物质的真实压力称为绝对压力,以 p 表示。如以 p_0 表示大气压力,则当 $p > p_0$ 时,测压计称为压力表,压力表上的读数称为表压力 p_x ,于是

$$p = p_x + p_0 \quad (1-5)$$

当 $p < p_0$ 时,测压计称为真空计,真空计上的读数称为真空度 p_v ,于是

$$p = p_a - p_v \quad (1-6)$$

由于大气压力随时间、地点不同而不同,因此,即使表压力或真空度不变,绝对压力也要随大气压力的变化而变化。在下面的分析与计算中,所要用的压力均为绝对压力。

国际单位制中压力的单位是帕(Pa), $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 由于“帕(Pa)”这个单位过小,工程上常用千帕(kPa)或兆帕(MPa)作为压力单位。 $1\text{kPa}=10^3\text{Pa}$ $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$ 各种压力单位之间的换算关系参见附表 1。

1.1.3.3 温度

通俗地讲,温度是物体冷热程度的标志,它来源于人们对冷、热的感觉。但是,单凭感觉往往会产生错觉。关于温度概念的建立以及温度的测量是以热力学第零定律(或称热平衡定律)为依据的。该定律表明:处于热平衡的两个物体,如果分别和第三个物体处于热平衡,则三个物体之间必然处于热平衡。处于热平衡的系统,必然具有一个彼此相同的宏观性质,而描写这一宏观性质的物理量就是温度。换言之,温度是决定系统间是否存在热平衡的物理量。温度是一个状态参数,一切处于热平衡的系统其温度值均相等。

热力学第零定律不但为建立温度概念提供了实验基础,还为温度的测量奠定了理论依据。人们可以选择一个称为温度计的参考系统,只要温度计与被测物体处于热平衡,就可用测温物质的温度来表示被测物体的温度。当比较两个物体的温度时,它们无需直接接触,只要使用温度计分别与它们接触即可。

温度的数值表示法称为温标。温标的建立一般需要选定测温手段、规定基准点及分度方法。

在国际单位制中,温度采用热力学温标,也叫开尔文温标或绝对温标,符号为 T ,单位为开尔文(K)。热力学温标是取水的三相点为基准点,并定义其温度为 273.15K ,热力学温标的每 1K 是水的三相点温度的 $\frac{1}{273.15}$ 。与热力学温标并用的还有摄氏温标,符号为 t ,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标的定义式为

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (1-7)$$

即规定了热力学温度 273.15K 为摄氏温度的零点,同时规定了以 $^{\circ}\text{C}$ 和 K 为单位的两种温度间隔相同,因而用 K 表示的温度差也可用 $^{\circ}\text{C}$ 表示,即 $\Delta t(^{\circ}\text{C}) = \Delta T(\text{K})$ 。

1.1.4 状态方程式

热力系的各状态参数分别从不同角度描述系统的某一宏观特性,这些参数并不都是独立的。那么,要想确定系统的平衡状态,需要多少独立参数呢?状态公理指出,对于简单可压缩系,只要给出两个相互独立的状态参数就可以确定它的平衡状态。例如,一定量的气体在固定容积内被加热,其压力会随着温度的升高而升高。若容积和温度规定后,则压力就只能具有一个确定不变的数值,而状态即被确定。

既然给出两个相互独立的状态参数就能完全确定简单可压缩系的一个平衡状态,那么其它状态参数也必然随之而定。于是可以有如下关系式

$$u = u(T, v)$$

$$h = h(p, T)$$

等。对于基本状态参数,就有

$$v = v(p, T)$$