

# 热工基础

韩振兴  
曹玉璋

编

航空工业出版社

# 热 工 基 础

曹玉璋 韩振兴 编

航空工业出版社

1993

(京)新登字161号

## 内 容 简 介

本书共分两篇，第一篇为工程热力学共十章，第二篇为传热学共五章。工程热力学部分包括基本概念、热力学第一定律、气体性质、热力过程、热力学第二定律、水蒸汽、气体的流动、动力循环、致冷循环、湿空气；传热学部分包括导热、对流换热、辐射换热、传热及换热器等。每章都配有例题、附页习题和思考题。

本书为高等院校非热工类及机械类非动力专业的热工基础教材，也可作为动力专业少学时热工教材或供有关工程技术人员参考。

## 热 工 基 础

曹玉璋 韩振兴 编

---

航空工业出版社出版发行  
(北京市安定门外小关东里14号)  
— 邮政编码: 100029 —  
全国各地新华书店经售  
北京地质印刷厂印刷

---

1993年9月第1版      1993年9月第1次印刷  
开本: 787×1092 1/16      印张: 19.25  
印数: 1—1600      字数: 480 千字

ISBN 7-80046-552-7/G·090

定价: 8.50 元

## 前 言

本书是参照1987年国家教委批准印发的少学时工程热力学及传热学教学基本要求编写的。为了兼顾到航空院校非动力专业的特点及少学时动力专业的需要，本书除适当加强基本概念、基本定律、基本方法方面的内容外，还选编了多学时大纲中的部分内容以扩大其应用范围，如工程热力学中的气体流动、动力循环、致冷循环、湿空气、用自由能及自由焓表述的热力学第二定律以及传热学中的相似理论、相变换热、高速气流换热和换热器计算的单元数法等。为了便于不同学时不同专业的教学选择，这些内容以独立的章节编写，并以\*号标在每节之前，去掉这些章节不影响内容的系统性。全书按76学时的教学内容编写，其中工程热力学为42学时，传热学为34学时。

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，又注意联系实际，使学生深入理解基本规律的普遍适用性。每章不仅配有例题；而且选编了较多的习题和思考题，力求通过本课程的学习使学生较深入地掌握工程热力学及传热学的基本概念和基本方法，获得应用热力学及传热学知识分析解决工程实际问题的初步能力。

本书第一篇工程热力学中第一至第九章和第二篇传热学中相似理论、相变换热、习题及思考题由韩振兴编写，其它内容由曹玉璋编写。

本书是在北京航空航天大学多届本科生教学实践的基础上，吸收了历届教材内容和教学经验，由曹玉璋及韩振兴执笔合作编写的。

本书在编写过程中，参考了王竹溪、王补宣、杨世铭、沈维道、严家驛、庞麓鸣、曾丹苓、欧阳榘、邱信力、华自强、蒋汉文、张正荣以及雷诺兹、霍尔曼和威尔蒂等有关热力学和传热学方面论著，还参考了朱谷君、冀守礼、康滢、陆大有合编的传热学讲义。在初稿编写过程中，北京航空航天大学的李继坤、邱绪光和康滢提出了很多有益的建议。全书完稿后，由清华大学林兆庄、王维诚教授审稿，并提出了很多宝贵意见，谨向他们表示深切的谢意。

由于水平所限，书中难免有错误及不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

1991年3月

# 目 录

绪论	1
<b>第 1 篇 工程热力学</b>	
<b>第 1 章 基本概念</b>	4
1.1 热力学体系	4
1.2 热力学状态及状态参数	5
1.3 平衡状态与非平衡状态	8
1.4 状态方程及状态参数坐标图	9
1.5 热力过程与循环	10
思考题	12
习题	12
<b>第 2 章 热力学第一定律</b>	14
2.1 热力学第一定律的实质	14
2.2 能量	14
2.3 能量的传递	15
2.4 热力学第一定律表达式	19
2.5 功和热量的计算及其在状态参数坐标图中的表示	25
2.6 稳定流动体系中能量转换过程讨论	29
思考题	33
习题	34
<b>第 3 章 气体的热力性质</b>	36
3.1 实际气体和完全气体	36
3.2 完全气体状态方程	36
3.3 完全气体的比热、内能、焓、熵	38
3.4 实际气体的状态方程	41
3.5 实际气体的比热、内能、焓、熵	43
3.6 完全气体混合物的性质	45
思考题	47
习题	48
<b>第 4 章 热力过程</b>	50
4.1 完全气体的定容过程、定压过程、定温过程和定熵过程	50
4.2 完全气体的多变过程	55
4.3 活塞式压气机的工作过程	57
思考题	61
习题	61

<b>第5章 热力学第二定律</b> .....	63
5.1 热力学第二定律的任务及实质 .....	63
5.2 卡诺循环及卡诺定理 .....	65
*5.3 热力学温标 .....	69
5.4 定量描述热力学第二定律的状态参数——熵 .....	70
5.5 熵方程—热力学第二定律的表达式 .....	73
5.6 能量的品质及其可用性 .....	78
*5.7 流动工质的焓 .....	79
5.8 热力学第二定律对工程实践的指导意义 .....	82
*5.9 用其它参数表示的热力学第二定律 .....	83
思考题.....	84
习题.....	85
<b>第6章 水蒸汽</b> .....	87
6.1 水蒸汽的饱和状态 .....	87
6.2 水的定压气化过程 .....	88
6.3 水蒸汽表及焓熵图 .....	90
6.4 水蒸汽的热力过程 .....	92
*6.5 克拉贝龙—克劳修斯方程 .....	95
思考题.....	96
习题.....	96
<b>第7章 气体的流动</b> .....	98
7.1 一维稳定流动基本方程 .....	98
7.2 滞止参数与临界参数 .....	102
7.3 管道截面变化与流速的关系、喷管与扩压管 .....	105
7.4 叶轮机中的流动 .....	109
7.5 燃烧室及换热器 .....	111
7.6 绝热节流 .....	112
思考题.....	115
习题.....	115
<b>第8章 动力循环</b> .....	117
8.1 活塞式内燃机循环 .....	117
8.2 燃气轮机循环 .....	123
8.3 涡轮喷气发动机循环 .....	127
*8.4 蒸汽燃气联合循环 .....	130
思考题.....	131
习题.....	132
<b>第9章 致冷循环</b> .....	133
9.1 空气压缩式致冷循环 .....	133
9.2 蒸汽压缩式致冷循环 .....	135

*9.3 致冷剂的性质 .....	137
*9.4 蒸汽喷射式致冷循环 .....	138
*9.5 吸收式致冷循环 .....	141
思考题 .....	142
习题 .....	143
<b>第10章 湿空气</b> .....	144
10.1 概述 .....	144
10.2 绝对湿度与相对湿度 .....	145
10.3 湿空气的状态参数 .....	145
10.4 湿空气的焓湿图 .....	148
10.5 湿空气的热力过程 .....	149
思考题 .....	152
习题 .....	152

## 第2篇 传热学

<b>第11章 传热学概述</b> .....	153
11.1 概述 .....	153
11.2 热流和热阻 .....	153
11.3 三种基本的换热方式 .....	153
11.4 传热 .....	155
思考题 .....	155
<b>第12章 导热</b> .....	156
12.1 傅里叶定律 .....	156
12.2 导热系数 .....	157
12.3 导热微分方程式 .....	158
12.4 一维平板的稳定导热 .....	162
12.5 多层平板的稳定导热 .....	163
12.6 单层圆筒壁的稳定导热 .....	167
12.7 多层圆筒壁的稳定导热 .....	168
12.8 不稳定导热问题 .....	171
12.9 导热问题的数值求解简介 .....	179
思考题 .....	183
习题 .....	184
<b>第13章 对流换热</b> .....	186
13.1 边界层和换热方程 .....	186
13.2 能量微分方程式的建立 .....	188
13.3 动量微分方程式及连续方程式 .....	190
13.4 边界层微分方程组 .....	191
13.5 对流换热微分方程组的意义 .....	193

13·6	对流换热微分方程组的无因次化	194
*13·7	相似理论	196
13·8	准则及实验数据的整理	200
13·9	常用的强迫对流换热准则方程式	202
*13·10	高速气流换热	210
13·11	自然对流换热	211
13·12	凝结换热	215
13·13	沸腾换热	218
	思考题	220
	习题	221
<b>第14章</b>	<b>辐射换热</b>	224
14·1	热辐射的基本概念	224
14·2	普朗克定律、维思定律和斯蒂芬—玻尔兹曼定律	226
14·3	实际物体的辐射和黑度	228
14·4	基尔霍夫定律	229
14·5	无限大黑体平板之间的辐射换热	230
14·6	任意放置的灰表面之间的辐射换热	230
14·7	角系数及其性质	232
14·8	两个灰体表面所组成的封闭腔内的辐射换热	234
14·9	由多个灰体表面所组成的封闭腔内的辐射换热	236
14·10	遮热板(热屏)	239
14·11	气体辐射	240
	思考题	245
	习题	246
<b>第15章</b>	<b>传热与换热器</b>	247
15·1	复合换热	247
15·2	传热	248
15·3	传热的强化与削弱	251
15·4	换热器的基本概念	253
15·5	换热器的换热计算	260
15·6	冷热流体的平均温差 $\overline{\Delta T}$	261
15·7	换热器计算的传热单元数法	264
	思考题	267
	习题	267
<b>附录</b>		269
附表 1	常用气体的某些基本热力性质	272
附表 I-1	压力单位换算表	269
附表 I-2	常用能量单位互换常数表	270
附表 I-3	气体热力性质	271



附表 I-4	某些常用气体在完全气体状态下的定压比热容与温度的关系式···	272
附表 I-5	某些常用气体在完全气体状态下的平均压比热容表·····	273
附表 I-6	饱和水与饱和水蒸汽热力性质表 ( $t$ ) ······	274
附表 I-7	饱和水与饱和水蒸汽热力性质表 ( $p$ ) ······	277
附表 I-8	未饱和水与过热水蒸汽的热力性质表·····	279
附表 I-9	饱和氨 ( $\text{NH}_3$ ) 蒸汽性质表·····	286
附表 I-10	饱和氟里昂12 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) 蒸汽性质表 ······	287
附表 II-1	金属材料的密度、比热容和导热系数·····	288
附表 II-2	保温、建筑、其它材料的密度和导热系数·····	289
附表 II-3	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系·····	290
附表 II-4	干空气的热物理性质 $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ·····	291
附表 II-5	在大气压力 ( $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ) 下烟气的热物理性质 ······	292
附表 II-6	饱和水的热物理性质·····	292
附表 II-7	几种材料在表面法线方向上的辐射黑度·····	294
附表 II-8	双曲线函数值·····	295
附图 1	湿空气的焓湿图·····	296
附图 2	氨的压焓图·····	297
附图 3	R 12压焓图·····	298

## 绪 论

能源在国民经济中占有重要地位。自然能源的开发利用水平，是一个国家生产力发展水平的重要标志之一。

自然界可供人类利用的能源有风能、水能、太阳能、地热能、燃料的化学能、原子能等。这些能源中，除风能和水能是以机械能的形式（风的动能、水的势能）供人们利用以外，其它各种能源都直接或间接地以热能形式供人们利用，如太阳的辐射热以及地热直接提供热能，各种矿物燃料（煤、石油、天然气）通过燃烧把化学能转化为热能，原子能通过核裂变或聚变释放出巨大的热能。

热能的利用方式主要有两种，一种是直接利用，例如用热能加热、蒸煮、冶炼、熔化、烘干、分馏、采暖等；另一种是间接利用，即通过各种热机（蒸汽机、汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等）把热能转变为机械能或进一步转变为电能供生产和生活利用。机械能和电能可以直接为各种机械提供动力，特别是电能又具有便于传输，使用方便的优点，所以它们是比热能具有更高级形式的能量。

能量转换和热量传递是热能利用中（包括直接和间接利用）的两个核心问题。而热工基础正是研究能量转换与热量传递规律的学科，其中工程热力学侧重于研究能量转换规律，而传热学则侧重于研究热量的传递规律。

能量的传递与转换通常是在一些典型的热工设备（如炉锅、压气机、内燃机、汽轮机、致冷机、换热器等）中进行的。把热工基础与热工设备结合在一起的热能工程学（简称热工学）是研究热能在工程上合理有效利用的一门综合技术科学。

从能源利用的现状来看，目前世界各国实际利用的自然能源主要是燃料的化学能，但地球上矿物燃料的储量是有限的。因此，开发利用太阳能、地热能、原子能等新能源的工作越来越受到各国的重视。在一些先进国家，核能的利用已有很大发展。核燃料较之矿物燃料的能量密度大得多，一公斤核燃料释放出的热能相当于2000吨标准煤的发热量，核聚变释放的热量就更多。太阳是连续进行核聚变的天然核反应堆，是无限大的热能库。太阳的核心温度近亿度，表面温度约6000K，太阳每年投射到地球表面的辐射能相当于130万吨标准煤的发热量，可以说是取之不尽，用之不竭的能源。

我国的矿物燃料资源虽然比较丰富，但人均能源占有量和能量利用率都低于世界平均水平。随着工农业生产的发展和人民生活水平的提高，能源紧张的状况将更加尖锐。

新能源的开发和常规能源利用技术与科学管理是能源工程的两个重要方面。在开发新能源的同时，必须提高常规能源的利用技术水平与科学管理水平，开展节能工作，提高能量的利用率。从我国的国情出发，我国的能源政策是开发与节能并重，而当务之急是提高热工设备的能量利用率。因此，各省市、各厂、矿都相继成立了节能办公室，以加强对节能工作的领导。

开发新能源和提高能量利用率涉及到广泛的科学领域，但是，其核心是需要掌握能量转换和能量传递的机理和规律。这样才有可能找到提高热工设备运行效率、高效传递热量

和减少热损失的途径。这正是《热工基础》所论述的基本内容。

本书论及的工程热力学和传热学知识，不仅是能源工程的基础知识，而且还广泛地应用于化工、交通、冶金、制冷、航空、航天、生物医学以及环境工程等领域。特别是近几十年来，一些尖端技术的发展，对热工技术提出更艰巨的任务，如航天技术中的温度控制及重返大气层的热防护、核反应堆的安全运行及换热强化、大规模集成电路的冷却等等，这些都是急待发展的尖端技术。因此，热工基础特别是传热学已成为现代技术科学中充满活力的主要基础学科之一。

# 第 1 篇 工程热力学

工程热力学主要研究热能转变为机械能的规律和方法，由于能量的传递和转换必须通过工作物质(简称“工质”)的状态变化来实现，所以工程热力学也对工质的性质进行研究。

研究热现象可以采用不同的方法。热现象本身是物质大量分子运动的集中表现。因此，可以从物质内部的微观结构出发，运用概率统计方法说明大量分子无规则运动的统计平均性质，从物质内部微观运动机理来说明物质宏观热现象的物理本质。这种方法称之为统计物理学方法。也可以直接从宏观的能量观点出发研究物质热运动的宏观现象及其表现出来的各种宏观特性和规律，这种方法称为热力学方法。热力学方法所依据的基本定律是由无数客观事实和宏观现象总结出来的自然界的基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。依据这两个定律进行推理分析得到的有关公式结论具有高度的可靠性和普遍的适用性。两种方法相辅相成，互为补充。工程热力学属于应用科学的范畴，传统地采用宏观的方法进行研究，但必要时也采用微观方法对某些现象概念进行定性的解释。

# 第1章 基本概念

## 1.1 热力学体系

分析研究任何问题时首先要明确所研究的对象。分析热力学问题时的研究对象称为热力学体系。与体系发生作用的周围物体称为“外界”或环境，体系与环境之间的分界面称为边界。边界可以是真实的，也可以是假想的，可以是固定的，也可以是移动变化的。

热力学体系的选取应根据分析问题的需要及具体情况而定。可以是单一化学成分的单元系，也可以是多种化学成分的多元系；可以是单相系（如气相或液相），也可以是复相系（如气液两相或气液固三相）；可以是各部分性质一致的均匀系，也可以是各部分性质不一致的非均匀系。

体系与外界之间一般可以进行质量交换和能量交换，它们的相互作用总是通过边界进行的。根据体系与外界作用情况的不同可分为：

“闭口体系”——与外界无质量交换，但可以有热和功的交换。闭口体系内的质量保持一定，故也称为控制质量系，这在连续介质力学中对应于拉格朗日法。

“开口体系”——与外界不仅可以有热和功的交换，而且有质量交换。开口体系所划定的空间范围一定，故又称为控制容积系，这在连续介质力学中对应于欧拉法。

“绝热体系”——与外界无热量交换，但可以有功和质量交换。

“孤立体系”——与外界无任何相互作用，既无热、功交换，也无质量交换。图 1-1 及图 1-2 分别为闭口体系及开口体系的例子。

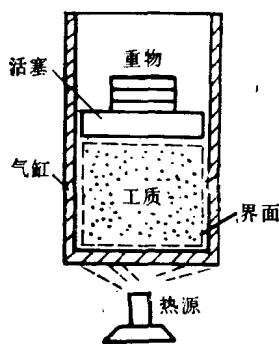


图 1-1 闭口体系

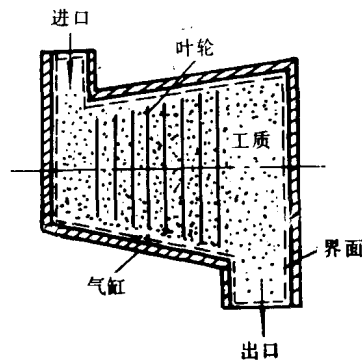


图 1-2 开口体系

自然界的事物都是相互联系和相互制约的，绝对的闭口体系、绝热体系及孤立体系都是不存在的。但是，当某一方面的作用很弱或该作用的影响可以忽略时，就可把它简化为某一特定体系。

为了研究问题的方便，对于同一个问题可以从不同的角度出发选用不同的体系处理，有时选用闭口体系方便，有时选用开口体系方便。如研究流动问题，既可以用开口体系处

理，也可以用闭口体系处理。不同的体系对应于不同的外界，体系与外界的相互作用也因体系的不同而不同。在热力学第二定律一章中，常用孤立系统熵增原理处理问题。这时把彼此有相互作用的物体都划在体系内，这样就成了与外界无任何作用的孤立体系。如果只选其中的某一物体作为研究对象，那就不是孤立体系，体系与外界也就有了相互作用。当然，无论怎样选取体系，都不应改变事物的本来面貌。

## 1.2 热力学状态及状态参数

热力学状态是在某一指定瞬间热力系所处的宏观物理状态的总称。从不同方面描述这种物理状态的物理量就是状态参数；各宏观状态参数是微观运动状态相应物理量统计平均值的度量。

工程热力学中常用的状态参数有压强（工程习惯上称“压力”）、温度、比容、内能、焓、熵、自由能、自由焓等。其中，压力、温度、比容可以直接测量，称为“基本状态参数”。

1. 压力—气体的压力是大量分子无规则运动时撞击器壁，垂直作用于单位面积上力的统计平均效果，用符号  $p$  表示：

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

式中， $A$  为面积， $F$  为垂直作用力， $p$  为压力。由分子运动论导出：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 W_0^2}{2} \quad (1-2)$$

其中， $m_0$  为分子质量， $W_0$  为均方根速度， $n$  为单位体积中的分子数。

作为状态参数的压力  $p$  称为绝对压力。但在测量压力时，由于压力表一般都处于大气环境中，所测得的压力不是真正的绝对压力  $p$ ，而是绝对压力  $p$  与大气压力  $B$  的差值。

当  $p$  高于大气压力  $B$  时，其读数  $p_g = p - B$  称为“表压”（如图1-3的排出端）。

$$p = B + p_g \quad (1-3 a)$$

当  $p$  低于大气压力  $B$  时，其读数  $p_v = B - p$  叫“真空度”（如图1-3的吸入端）。

$$p = B - p_v \quad (1-3 b)$$

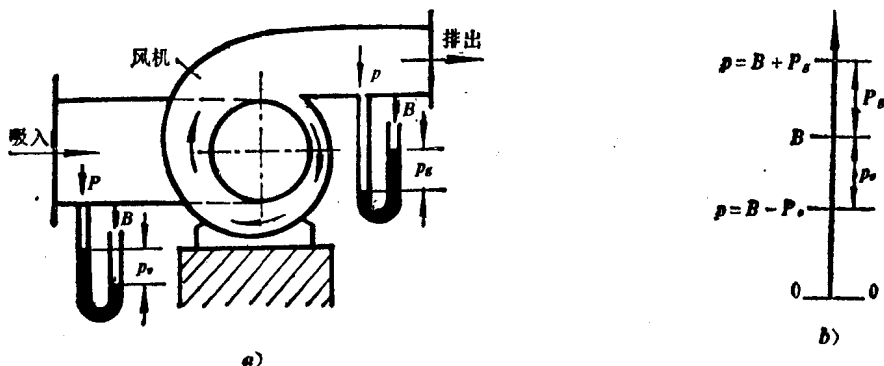


图 1-3 绝对压力与表压真空度的关系

在国际单位制 (SI) 中, 压力的单位为帕 (Pa),  $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ , 由于该单位过小, 实用中常用巴 (bar)、千帕 (kPa)、兆帕 (MPa)

$$1\text{bar}=10^5\text{Pa}, 1\text{kPa}=10^3\text{Pa}, 1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$$

在工程单位制中, 压力的单位为工程大气压 (at),  $1\text{at}=1\text{kgf/cm}^2$ 。

其它常用压力单位还有标准大气压 (atm)、毫米汞柱 (mmHg)、毫米水柱 (mmH<sub>2</sub>O) 等。其换算关系为:

$$1\text{atm}=760\text{mmHg}=1.03323\text{at}=1.01325\text{bar}=1.01325 \times 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{bar}=750\text{mmHg}=0.987\text{atm}=1.0197\text{at}=10^5\text{Pa}$$

$$1\text{at}=735.56\text{mmHg}=0.9678\text{atm}=0.9807\text{bar}=0.9807 \times 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{mmH}_2\text{O}=9.807\text{Pa}$$

$$1\text{mmHg}=13.595\text{mmH}_2\text{O}=133.33\text{Pa}$$

显然,  $1\text{atm}>1\text{bar}>1\text{at}$ 。

〔例 1-1〕 氧气瓶上安装的压力表读数为 46.5 bar, 当地大气压力为 757.5 mmHg, 求瓶内绝对压力。

解: 压力表读数为表压  $p_g=46.5\text{bar}$ 。

将大气压力换算为国际单位:

$$B = \frac{757.5}{750} = 1.01\text{bar}$$

瓶内绝对压力为:

$$p = B + p_g = 1.01 + 46.5 = 47.51\text{bar}$$

〔例 1-2〕 用 U 形管测量压气机进口压力, U 形管两端液面差为 0.5 mH<sub>2</sub>O, 且通大气的一端液面低, 大气压力  $B=748\text{mmHg}$ , 求压气机进口绝对压力为多少巴? 多少工程大气压? 多少物理大气压? 该 U 形管是压力表还是真空表?

解: 由于 U 形管通大气一端的液面低, 可知压气机进口绝对压力  $p$  小于大气压  $B$ , U 形管为真空表, 其读数为真空度  $p_v=0.5\text{mH}_2\text{O}$ 。

$$p_v = 0.5\text{mH}_2\text{O} = 500\text{mmH}_2\text{O} = \frac{500}{13.595} = 36.78\text{mmHg}$$

$$p = B - p_v = 748 - 36.78 = 711.22\text{mmHg}$$

$$= \frac{711.22}{750} = 0.9483\text{bar}$$

$$= \frac{711.22}{760} = 0.9358\text{atm}$$

$$= \frac{711.22}{735.56} = 0.9669\text{at}$$

2. 温度——表示物质的冷热程度。如果两个物体接触, 彼此间无热量传递, 则称该二物体处于“热平衡”。处于热平衡的两个物体具有相同的温度, 即它们的冷热程度相同。若某物体分别与其它两个物体处于热平衡, 则该两个物体的温度也必定相等。这就是热力学第零定律。温度概念的建立及温度的测定都是以热平衡及热力学第零定律为依据的。

温度的高低通常用温度计测量, 即利用物质的某一物理量 (如体积、蒸汽压力、电阻、

电动势等)随温度变化的特性进行测量的。但温度计的刻度必须依据温度的数值表示法,即温标来确定。老摄氏温标规定,在标准压力下纯水的冰点为 $0^{\circ}\text{C}$ ,沸点为 $100^{\circ}\text{C}$ ,其间的温度数值按温度与测温物质的物理量成线性关系确定。由于选定的测温物质及作为温度标志的物理量不同,确定的温标除冰点及沸点外,其它温度往往有较小的差异。为了避免这种差异,1960年国际计量大会上通过了热力学温标,又称绝对温标或开尔文温标。这种温标完全不依赖于测温物质的性质,其温度用 $T$ 表示,单位为 $K$ 。热力学温标取水的“三相点”(气、液、固三态平衡共存状态)温度为单一固定点,规定水的三相点温度为 $273.16\text{K}$ 。热力学温度的单位取为水的三相点温度的 $1/273.16$ ,叫做 $1\text{K}$ 。水的冰点温度比三相点低 $0.01\text{K}$ ,在热力学温标中为 $273.15\text{K}$ 。

新的摄氏温标,单位仍为 $^{\circ}\text{C}$ ,其温度仍用 $t$ 表示。仍取标准压力下水的冰点为 $0^{\circ}\text{C}$ ,但其温度间隔与热力学绝对温标相同,即 $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ 。因此,也有称之为“热力学摄氏温标”的。由于热力学绝对温标与摄氏温标的温度间隔相同,只是零点不同,所以,其换算关系为:

$$T(\text{K}) = 273.15 + t(^{\circ}\text{C}) \quad (1-4)$$

气体的绝对温度是分子热运动平均移动动能的度量。由分子运动论导出绝对温度 $T$ 与分子平均移动动能的关系为:

$$\frac{m_0 W_0^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (1-5)$$

其中,  $k$  为波尔兹曼常数,其值等于 $1.380662 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

3. 比容—比容为单位质量的物质所占容积,用 $v$ 表示,单位为 $\text{m}^3/\text{kg}$ ,即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-6)$$

比容 $v$ 的倒数称为密度,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ,即

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (1-7)$$

比容和密度都是物质稀密程度的量度。

4. 内能—指与体系中大量粒子的微观运动状态和物质结构有关的能量。它包括分子的动能(移动动能、转动动能、振动动能)、分子力所形成的势能、构成分子的化学能、原子能等。工程热力学中一般不涉及化学能及原子能的变化,所以通常只考虑分子的内动能和内势能。内能用符号 $U$ 表示。单位质量的内能称为比内能,用 $u$ 表示,一般为 $T$ 和 $v$ 的函数。

$$u = \frac{U}{m} = f(T, v) \quad (1-8)$$

$U$ 和 $u$ 的单位分别为 $[\text{J}]$ 、 $[\text{kJ}]$ 、 $[\text{kcal}]$ 和 $[\text{J}/\text{kg}]$ 、 $[\text{kJ}/\text{kg}]$ 、 $[\text{kcal}/\text{kg}]$

5. 焓—焓是一个组合状态参数,用 $H$ 表示,

$$H = U + pV \quad (1-9)$$

单位质量的焓称为比焓,用 $h$ 表示

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \quad (1-10)$$

焓和比焓的单位分别与内能和比内能的单位相同。



6. 熵—熵是一个导出状态参数。对于简单的均匀可压缩热力系，熵及比熵由下式定义：

$$S = \int \frac{dU + p dV}{T} + S_0, \quad dS = \frac{dU + p dV}{T} \quad (1-11)$$

$$s = \frac{S}{m} = \int \frac{du + p dv}{T} + s_0, \quad ds = \frac{du + p dv}{T} \quad (1-12)$$

式中  $S_0$ 、 $s_0$  为熵常数。熵和比熵的单位分别为  $[J/K]$ 、 $[kJ/K]$ 、 $[kcal/K]$  和  $[J/kg \cdot K]$ 、 $[kJ/kg \cdot K]$ 、 $[kcal/kg \cdot K]$ 。

7. 自由能  $F$ 、比自由能  $f$  都是组合状态参数，分别定义为，

$$F = U - TS \quad [J] \quad (1-13)$$

$$f = \frac{F}{m} = u - Ts \quad [J/kg] \quad (1-14)$$

8. 自由焓  $G$ 、比自由焓  $g$  也都是组合状态参数，分别定义为：

$$G = H - TS \quad [J] \quad (1-15)$$

$$g = \frac{G}{m} = h - Ts \quad [J/kg] \quad (1-16)$$

关于焓、熵、自由能及自由焓的物理意义将在以后的有关章节介绍。

状态参数是状态的单值函数，在数学上具有点函数的特性，其微分为全微分，积分与路径无关，循环积分为零。若用  $Z = f(x, y)$  表示任意状态函数，则

$$dZ = \frac{\partial Z}{\partial x} dx + \frac{\partial Z}{\partial y} dy$$

$dZ$  成为全微分的充要条件是：

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 Z}{\partial y \partial x} \quad (1-17)$$

或 
$$\int_{A-C}^B dZ = \int_{A-D}^B dZ = \int_{A-E}^B dZ = Z_B - Z_A \quad (1-18)$$

或 
$$\oint dZ = 0 \quad (1-19)$$

上述状态参数可分为两类：一类是代表体系内在性质，与体系的总质量无关的量，称为“强度量”，如压力  $p$  和温度  $T$ ；另一类代表体系的外延性质，与体系的总质量成正比，称为“广延量”，如总体积  $V$ 、内能  $U$ 、焓  $H$ 、熵  $S$ 、自由能  $F$  及自由焓  $G$ 。广延量与总质量的比值，如比容  $v$ 、比内能  $u$ 、比焓  $h$ 、比熵  $s$ 、比自由能  $f$  及比自由焓  $g$  等具有强度量的性质。

### 1.3 平衡状态与非平衡状态

一个系统在不外界影响的条件下，如果系统各部分的宏观状态参数不随时间变化，那么，该系统就处于热力学平衡状态，简称平衡状态。否则，就是非平衡状态。显然，平衡状态必须满足热平衡、力平衡及化学平衡的条件。热平衡要求系统内部的温度均匀一致