

工程硕士学位课教材系列—1

# 高等工程热力学

上海交通大学机械与动力工程学院组织编写

童钧耕 吴孟余 王平阳 编著

 科学出版社  
www.sciencep.com

工程硕士学位课教材系列 1

# 高等工程热力学

上海交通大学机械与动力工程学院组织编写

童钧耕 吴孟余 王平阳 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是工程热力学的扩展和延伸,共 11 章。内容以工程实用理论为主,同时兼顾热工科技的新成果。第 1 章到第 4 章是工程热力学基本概念和基本理论的拓展,并把对工质热物理性质的研究扩展到实际气体和溶液;第 5 章综合了几种对热系统的分析评价的方法;第 6 章是不可逆过程热力学基础;第 7 章到第 9 章是热力学理论在生物过程、燃料电池和太阳能工程中的应用;第 10 章和第 11 章分别对导热和对流换热过程进行较深入的讨论。

本书可作为动力机械和工程热物理类二级学科专业、反应堆技术和工程类二级学科专业、能源管理与利用专业研究生、工程硕士研究生的学位课程教材和高年级大学生选修课程教材,也可供教师、科技工作者和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高等工程热力学/童钧耕,吴孟余,王平阳编著. —北京:科学出版社, 2006

(工程硕士学位课教材系列1)

ISBN 7-03-017723-1

I. 高… II. ①童… ②吴… ③王… III. 工程热力学 IV. TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第083994号

责任编辑:林 鹏 吕 虹 赵彦超/责任校对:邹慧卿

责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006 年 10 月 第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2006 年 10 月 第一次印刷 印张: 23 3/4

印数: 1—3 000 字数: 452 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

## 前 言

自 20 世纪下半叶以来,世界科技发展速度愈来愈快,学科之间的交叉、渗透促使新学科不断出现,高新技术加速发展,知识更新速度加快,人们认识到市场的竞争归根到底是人才的竞争,是知识的竞争,许多工作多年的业务骨干纷纷重返高校,加入硕士研究生的行列。

工程热力学是动力工程、化学工程、机械工程、电力工程等专业的一门重要的技术基础课,它不仅为学习有关专业课打下基础,而且是今后在涉及能源,特别是热能的各领域中深入研究、开发、创新的基础。据统计,我国现阶段的能源中有 95%左右来自天然矿物燃料,通过燃烧或核裂变把储藏在燃料中的能量转换成热能,以直接利用或转换成其他形式的能量。我国政府在“中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书”中,提出了“可持续发展”的总体战略政策,指出在能源利用上必须走资源节约型道路。目前我国单位产值的能耗是发达国家的数倍,在能源利用方面具有很大的节能潜力,而且日常生活及各个技术领域中几乎任何一种形式的能量最终都是以热能的形式耗散于环境及宇宙中,可以预见在今后的年月里,工程热力学的研究仍将在高科技发展中占有重要地位。因此,在本科的基础上进一步加强工程热力学的理论学习是动力和能源工程、航空航天工程、化学工程及机械工程等专业的研究生和专业人员提高知识层次和自身素质所不可缺少的。

工程热力学涉及的范围非常广泛,在 20 世纪下半叶取得较大的进展。考虑到高等工程热力学还是基础技术类的课程,本教材在材料的取舍、编排上以工程实用理论为主,同时兼顾热工科技的新成果。教材没有列入统计热力学等理论性很强的经典内容,也没有很深入地讨论一些专题,如烟概念的环境模型等,但是引入了工程热力学前沿的一些研究成果的基本思想,如热机在输出功率最大时的热效率等。本书的第 1 章和第 2 章是本科阶段工程热力学基本概念和基本理论的延伸;第 3 章和第 4 章则是把对工质的热物理性质的研究从本科的理想气体和水蒸气扩展到实际气体和溶液;第 5 章综合了几种对热系统的分析评价的方法,其中既包括经典的第一定律分析法,也包括第二定律分析法、输出功率最大时的热效率和热经济学等较新的理论;第 6 章是不可逆过程热力学基础;第 7 章到第 9 章是热力学理论在生物过程、燃料电池和太阳能工程中的应用;第 10 章和第 11 章分别对导热和对流换热过程进行较深入的讨论,以满足读者进一步加强传热基础的需求。为避免篇幅过大,教材仅保留少量必要的推导,没有附上大量的图表,

读者需要了解这些过程和有关数据可参阅相关的资料。

本书的第 1 章到第 7 章由童钧耕教授撰写，第 8 章和第 9 章由吴孟余教授撰写，第 10 章和第 11 章由王平阳副教授和童钧耕教授一起撰写，全书由童钧耕教授最后统稿。

在本书编写过程中得到了上海交通大学的杨强生教授、浦保荣教授、洪春华教授、吴慧英教授、刘振华教授无私帮助，在此一并致谢。

鉴于学识有限，教材中难免会有疏漏甚至错误的地方，敬请拨冗赐教。

童钧耕 吴孟余 王平阳

2006 年 1 月于上海

## 符 号 表

$a$	活度; 热扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$
$A$	自由能(亥姆霍兹函数), J; 面积, $\text{m}^2$
$c$	光速
$C_f$	(局部)阻力系数
$c_p$	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$c_V$	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$E$	物系(总)储存能, J
$E_x$	焓、物流焓, J
$E_{x,Q}$	热(冷)量焓, J
$E_{x,U}$	热力学能焓, J
$E_{x,H}$	焓焓, J
$f$	逸度, Pa
$G$	自由焓(吉布斯函数), J;
$H$	焓, J
$h$	表面换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ; 比焓, $\text{J}/\text{kg}$
$H_{f,m}^0$	标准摩尔生成焓, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
$J$	流(单位时间内通过单位面积迁移的量)
$k$	玻尔兹曼常数, $1.38\times 10^{-23}\text{ J/K}$ ; 紊流动能, $\text{J}/\text{kg}$
$n$	单位容积光子数
$p$	压力 Pa; 光子动量
$P$	功率, W
$p_\nu$	频率为 $\nu$ 的光子气分压
$p_r$	对比压力
$q$	热流密度, $\text{W}/\text{m}^2$
$q_m$	质量流量, $\text{kg}/\text{s}$
$Q$	热量, J
$R$	通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
$R_g$	气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$s$	比熵, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$S$	熵, J/K
$S_g$	熵产, J/K
$S_f$	熵流, J/K
$T$	热力学温度, K
$t$	国际摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
$T_r$	对比温度
$u$	比热力学能, J/kg; 比体积热力学能, $\text{J}/\text{m}^3$ ; 速度矢量在 $x$ 上的分量, m/s
$u_r$	剪切速度, m/s
$u_{\infty}$	边界层外的主流速度, m/s
$\bar{u}$	紊流速度的时均值, m/s
$u'$	紊流速度的脉动分量, m/s
$v_r$	对比体积
$V$	体积, $\text{m}^3$
$W$	功, J
$Z$	压缩因子
$\hbar$	普朗克常数, $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
$\alpha_V$	体积膨胀系数, $\text{K}^{-1}$
$\kappa_T$	等温压缩系数, $\text{Pa}^{-1}$
$\Phi$	热流量, J/s
$\varepsilon$	光子能; 发射率; 紊流动能耗散率, W/m
$\varepsilon_m$	紊流动量扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$
$\mu$	化学势
$\Omega$	立体角
$\theta$	熵产率 $\text{J}/(\text{K}\cdot\text{s})$ ; 过余温度 $^{\circ}\text{C}$
$\theta_v$	单位体积的熵产率 $\text{J}/(\text{K}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^3)$
$\vartheta$	无量纲温度;
$\omega$	偏心因子
$\eta_T$	相对内部效率
$\gamma$	活度系数; 相变潜, J/kg
<b>上角标:</b>	
0	简单流体; 纯组元在与混合物相同的温度和压力下的参数
$R$	参考流体

## 下角标:

cr	临界
CM	控制质量
CV	控制体积
iso	孤立系统
b	黑体
s	太阳
w	壁面
$\nu$	单位频率间隔
$\infty$	边界层外主流状态



# 目 录

<b>第 1 章 基本概念</b> .....	1
1.1 工程热力学的研究对象及其特点.....	1
1.2 温度.....	3
1.3 平衡状态.....	6
1.4 平衡的判据.....	7
1.5 准平衡(准静态)过程和可逆过程.....	12
1.6 热量和功.....	14
习题.....	18
<b>第 2 章 热力学基本定律和能量的可用性</b> .....	20
2.1 热力学第一定律.....	20
2.2 开口系统热力学第一定律表达式.....	25
2.3 非稳态流动过程.....	28
2.4 过程的方向性与热力学第二定律.....	36
2.5 熵与孤立系熵增原理.....	38
2.6 熵方程.....	41
2.7 能量的可用性.....	45
2.8 烟.....	48
2.9 烟平衡方程.....	54
习题.....	61
<b>第 3 章 实际气体状态方程及热力性质</b> .....	63
3.1 实际气体分子间相互作用力.....	63
3.2 实际气体状态方程式的一般热力学特性.....	66
3.3 维里方程.....	69
3.4 二常数方程.....	71
3.5 多常数半经验方程.....	79
3.6 对应态原理及气体对比态状态方程.....	81
3.7 实际气体混合物状态方程.....	88
3.8 湿空气的维里方程.....	91
3.9 热力学一般关系.....	93
3.10 余函数方程.....	99

3.11 实际气体热力过程分析方法 .....	110
习题 .....	115
<b>第 4 章 溶液与相平衡</b> .....	<b>117</b>
4.1 吉布斯方程 .....	117
4.2 偏摩尔参数 .....	119
4.3 多元系统的逸度 .....	127
4.4 理想溶剂的一般性质 .....	132
4.5 稀溶液 .....	137
4.6 非理想溶液 .....	139
4.7 多元系统相平衡 .....	143
4.8 单元系的克拉珀龙方程 .....	148
4.9 蒸汽压方程 .....	152
4.10 有弯曲分界面的相平衡 .....	154
4.11 二元气—液系统 .....	159
4.12 共沸混合物 .....	164
4.13 稀溶液的沸点升高和凝固点降低及渗透压 .....	167
习题 .....	171
<b>第 5 章 热系统评估与分析方法</b> .....	<b>174</b>
5.1 热工设备或装置的焓效率和焓损失系数 .....	175
5.2 动力车间热电合产方案的经济分析 .....	181
5.3 热经济学概要 .....	186
5.4 输出功率最大时内可逆热机的效率 .....	193
5.5 输出功率最大时内可逆热机联合循环的热效率 .....	199
习题 .....	202
<b>第 6 章 不可逆过程热力学基础</b> .....	<b>205</b>
6.1 概述 .....	205
6.2 不可逆过程热力学方程 .....	206
6.3 昂萨格倒易关系 .....	209
6.4 最小熵产率 .....	212
6.5 绝热扩散 .....	213
习题 .....	217
<b>第 7 章 生物热力学基础</b> .....	<b>219</b>
7.1 能量和热力学第一定律 .....	219
7.2 赫斯定律和基尔霍夫定律 .....	223
7.3 绝对熵 .....	226

7.4	自由焓和生物化学反应的平衡常数	228
7.5	代谢过程	232
7.6	ATP 的合成和膜离子梯度的建立	236
7.7	渗透	238
7.8	生物中的负熵流	240
	习题	243
<b>第 8 章</b>	<b>燃料电池</b>	<b>245</b>
8.1	概述	245
8.2	燃料电池工作原理	246
8.3	燃料电池熵产率	252
8.4	各类燃料电池简介	255
8.5	燃料电池运行经济分析	259
<b>第 9 章</b>	<b>太阳能技术的热力学基础</b>	<b>263</b>
9.1	热辐射的性质	263
9.2	辐射系统的可逆过程和循环	271
9.3	不可逆过程	272
9.4	封闭黑体辐射的最大有用功	279
9.5	集热器优化	281
9.6	对流式冷却集热器	284
<b>第 10 章</b>	<b>热传导</b>	<b>287</b>
10.1	导热问题的数学描述	287
10.2	导热问题的求解方法	296
10.3	导热反问题简述	298
10.4	用分离变量法求解稳态导热问题	299
10.5	用分离变量法求解非稳态导热问题	309
10.6	拉普拉斯变换法	317
10.7	导热问题的近似解法	321
10.8	集总热容系统	325
10.9	一维固液相变导热	328
	习题	331
<b>第 11 章</b>	<b>对流换热理论基础</b>	<b>332</b>
11.1	对流换热的基本方程组	333
11.2	边界层积分方程组	339
11.3	层流和紊流	341
11.4	紊流两方程模型( $k-\varepsilon$ 模型)	349

---

11.5 管内充分发展区的对流换热 .....	351
11.6 外掠平壁层流换热的相似解 .....	358
习题 .....	362
<b>参考文献</b> .....	<b>363</b>
<b>索引</b> .....	<b>365</b>

# 第 1 章 基本概念

## 1.1 工程热力学的研究对象及其特点

热物理学(简称热学)是研究有关物质的热运动以及与热相联系的各种规律的科学,它渗透到自然科学的各个领域。工程热科学是热物理学在工程领域的分支和应用,工程热科学涉及的内容很多,主要有工程热力学、传热学、物质的热物理性质以及这些性质在工程领域和新技术方面的应用等等。热力学研究的是由数量很大的微观粒子所组成的系统,例如 1mol 物质中就包含有  $6 \times 10^{23}$  个分子,由于数量极其庞大,即使采用计算机也无法描述实际体系中每一个气体分子的“行为”,因此我们关心的是气体的宏观性质,即相应微观量的统计平均值。正因为如此,热力学的研究方法有宏观与微观两种不同方法。

气体分子的热运动造成分子之间频繁地相互碰撞,对于个别分子来说,其运动速度的方向和大小完全是随机的,因而每个分子的动能也随时在变。但在一定宏观条件下,其整体有一定的统计规律可循。例如,在一定的温度下,气体分子的平均动能具有确定的数值。微观分子运动越剧烈,分子平均动能越大,在宏观上反映出气体的温度就越高,所以组成宏观物体的大量微观粒子的运动是杂乱无章的,但宏观整体却存在着统计相关性。这种相关性反映出由大量粒子组成的系统遵从一定的统计规律,其统计平均值就是平衡态系统的宏观可测定的物理量。系统的粒子数越多,统计规律的正确程度也越高。粒子数少的系统的统计平均值与宏观可测量之间的偏差较大,有时失去实际意义。热力学的宏观描述方法(经典热力学方法)与微观描述方法(统计物理学的方法)就是分别从不同角度去研究问题,它们自成独立体系,相互间又存在密切的联系,相互补充。宏观描述方法与微观描述方法的紧密结合,使热力学成为联系微观世界与宏观世界的一座桥梁。

热力学从对热现象的大量的直接观察和实验测量所总结出来的普适的基本定律出发,应用数学方法,通过逻辑推理及演绎,得出有关物质各种宏观性质之间的关系、宏观物理过程进行的方向和限度等结论。任何宏观的物质系统包括化学的、生物的系统,只要与热运动有关,总应遵循热力学规律。热力学基本定律是自然界中的普适规律,只要在数学推理过程中不加上其他假设,这些结论也具有同样的可靠性与普遍性。20 世纪伟大的物理学家爱因斯坦(Alber Einstein, 1879—1955)说过:“一个理论,如果它的前提越简单,而且能说明各种类型的问

题越多,适用的范围越广,那么它给人的印象就越深刻。因此,经典热力学给我留下了深刻的印象。经典热力学是具有普遍内容的唯一的物理理论,我深信,在其基本概念适用的范围内是绝对不会被推翻的。”热力学是具有普遍性的一门科学,可应用于任何的宏观的物质系统。但是热力学也有它的局限性。第一,它只适用于粒子数很多的宏观系统;第二,它主要研究物质在平衡态下的性质;其三,它把物质看作连续体,不考虑物质的微观结构。它只能说明应该有怎样的关系,而不能解释为什么有这种基本关系。

统计物理学则是热力学的微观描述方法,它从物质由数量巨大的分子、原子组成的前提出发,运用统计的方法,把宏观性质看作微观粒子热运动的统计平均值,由此找出微观量与宏观量之间的关系。这种描述方法弥补了热力学方法的不足,使热力学的理论具有更深刻的意义。微观描述方法的局限性在于它需对研究的体系作出简化假设(微观模型),使得所得到的理论结果常与实验不能完全符合。

工程热力学是热力学在工程领域的分支,是研究能量(特别是热能)的性质及其转换规律的科学,所以热力学引用的概念常与能量及其转换有关。能量和物质不可分割,能量的转换有赖于物质状态的改变,而且能量具有数量和质量的双重属性。因此热力学中引入了与物质有关的概念,如理想气体、实际气体和蒸汽等;与描写状态和过程有关的概念,如平衡态、可逆过程等;又有熵、热能与机械能、热量与功量等对应的概念。另外,工程热力学是一门应用科学,围绕工程应用还引进表征能量利用经济性的概念,如热效率、炯效率等。热力学中的概念有些是建立热力学基本理论必不可少的,例如温度、平衡态、可逆过程、能量、熵、热量与功等,称为基本概念。基本概念中,温度是为研究热现象引进的物理量,平衡态与可逆过程是经典热力学的研究前提,因此这三个基本概念尤其重要。

传热学是研究由于温差而实现的热量传递规律的科学。热力学指出,凡是有温差的地方,就有热量自高温物体传向低温物体(或从物体的高温部分传向低温部分)。由于自然界到处存在温差,所以热量传递是普遍的现象。由于热量传递的推动力是温差,所以温度分布对热量传递有重大影响。采用数学的手段研究、分析热量传递过程,一般要假定研究对象是连续体,由于热科学研究对象由数量十分庞大的微观粒子所组成,所以只要被研究对象的几何尺度大于微观粒子的平均自由程,连续体的假定即可成立,温度等参数即可认为是连续函数。

本书在本科工程热力学和传热学的基础上对工程热力学(包括导热和对流换热)理论及应用作进一步的讨论。

## 1.2 温 度

### 1.2.1 温度的热力学定义

众所周知,平衡态的简单可压缩系,只有两个独立参数(如压力  $p$  和比体积  $v$ )。设有定量的“冷热程度”不同的 A 和 B 两种气体分置于两个绝热刚性容器中,它们的状态分别为  $p_A$ 、 $V_A$  及  $p_B$ 、 $V_B$ 。此时,两物系间并无热、力或其他任何作用。若用透热壁连接二容器, A 和 B 气体间将发生热的相互作用,因是刚性容器,  $V_A$  和  $V_B$  保持不变。经验指出,此时它们的压力将按一定规律改变,  $p_A$  增加时  $p_B$  必然下降,反之亦然。只要时间足够长,两物系的压力最终分别变到某一确定值  $p'_A$  与  $p'_B$  后将不再改变,此时两物系达热平衡。由此可知,处于热平衡的两物系的状态间存在着一定的制约关系。若用一个状态参数作为物系间是否处于热平衡的判据,这个参数就是温度。所以,温度的热力学定义叙述为:

物系的温度是用以判别它与其他物系是否处于热平衡状态的参数。

温度的热力学定义明确给出了温度的物理意义。温度和热平衡概念直接联系,两物系只要温度相同,它们间就处于热平衡,而与其他状态参数如压力、体积等的数值是否相同无关,只有温度才是热平衡的判据。

### 1.2.2 热力学温标

温度测量的理论依据是据热平衡概念建立的热力学第零定律。这个定律指出: A, B 两物体如分别与另一个物体 C 处于热平衡,则 A, B 物体间也处于热平衡。根据这个定律把 C 物体作为温度计,无需 A, B 直接接触,就可比较 A 和 B 的温度了。测温时先使温度计与被测物体达到热平衡,然后通过测温物质标志温度的物理量读出物体的温度。经验指出,实际测温物质标志温度的物理量( $x$ )和温度( $\theta$ )的关系,严格地讲都是非线性的,这一函数随测温物质的性质而定。

建立温标时,首先要规定温度和标志温度的物理量的函数关系  $\theta = f(x)$ , 这一关系不受具体测温物质的限制,可以任意规定。为使温度和标温物理量成正比,通常取成线性关系:

$$\theta(x) = ax, \quad (1.1)$$

式中,  $a$  为一待定常数;  $\theta(x)$  是相应物理量;  $x$  为尚待标定的温度。

为了确定待定常数  $a$ , 要选定温标的标准点,并规定标准点的温度数值。确定待定常数  $a$  实质上就是规定温度计量单位的大小和温度的计数起点。

国际上用水的汽、液、固共存的三相点为标准点,并规定三相点的温度为 273.16K。国际单位制(SI)中温度的计量单位称为“开尔文”,单位符号为 K。标

定温度的公式如下：

$$\{T\}_K = 273.16 \frac{x}{x_{tp}}, \quad (1.2)$$

上式中  $x_{tp}$  是某种标志温度的物理量相应于三相点状态之值。

上面以水的三相点为标准点，并规定其温度为 273.16K，而建立的温标称为国际温标，用  $T$  表示。如标准点和温度计量单位的大小保持不变，而把标准点(三相点)的温度规定为 0.01℃时，所得温标称为国际摄氏温标，温度表示为  $t$ ，单位符号为℃。不难看出，国际温标与国际摄氏温标的关系是

$$\{t\}_{\text{C}} = \{T\}_K - 273.15。 \quad (1.3)$$

建立温标时，对标定温度的物理量仅要求它和温度的变化成线性关系，除此以外，不受其他的限制。因此，标温的物理量可以和物质的性质有关，也可以和物质的性质无关，甚至实际中是否真正有这种性质的物理量存在也无关紧要。例如理想气体体积不变时，它的压力和温度成线性变化，即

$$\theta(p) = ap,$$

故可将理想气体当作标温物质，而把压力作为标温物理量，如仍以水的三相点为标准点，温度规定为 273.16K，仿照式(1.2)可得

$$\{T\}_K = 273.16 \frac{p}{p_{tp}},$$

因此可得理想气温标公式如下：

$$\{T\}_K = 273.16 \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{p_{tp}}。 \quad (1.4)$$

除理想气体的压力外，还可以用与物性无关的热量  $Q$  作为标温的物理量。由两个可逆等温和两个可逆绝热过程组成的卡诺循环，其热效率  $\eta_C$  为

$$\eta_C = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{\theta(Q)_L}{\theta(Q)_H},$$

由此可得

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{\theta(Q)_L}{\theta(Q)_H},$$



式中, 下标  $H, L$  代表高、低温热源,  $\theta(Q)$  是以热量为标温物理量尚待标定的温度。从上式可知, 卡诺循环热源放出或吸入的热量与热源的温度成正比, 亦即

$$\theta(Q) = aQ,$$

仿前可得

$$\{T\}_K = 273.16 \frac{Q}{Q_{tp}}, \quad (1.5)$$

这种应用热力学原理建立的温标称为热力学温标。但是, 可逆循环难以实现, 精确地测量  $Q$  和  $Q_{tp}$  也有困难, 所以热力学温标无法直接实施。尽管如此, 热力学温标的建立有着深远的理论价值, 它是最科学、最严密的基本温标。

采用理想气体温标的气体温度计虽与采用的某种气体种类无关, 但温度读数必须校正到理想气体状态( $p \rightarrow 0$ )时读数。这种测量和修正都是极为精确和繁重的工作, 只有极少数实验室有此条件, 因此, 目前气体温度计仅作为一级标准温度计。实用的二级温度计采用国际实用温标, 它所得出的温度偏离热力学温标极小, 广泛用于校核科研或工业用温度计。

1990 国际温标(ITS-90)规定: ①容易复现的固定点的气体温标温度和用以检定仪器的二级参考点的温度; ②二级温度标准的仪器仪表的度数用于根据固定点进行内插的公式。表 1.1 列出了规定的热力学温标固定温度点。(ITS-90)将适用于温度测量和内插的方法概括为四个分区:

(1) 从 0.65K 到 5.0K 根据  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  的蒸气压测量;

表 1.1 ITS-90 的固定温度点

$^3\text{He}$ 和 $^4\text{He}$	VP	3 到 5K
e- $\text{H}_2$	TP	13.8033K
e- $\text{H}_2$ (或 He)	VP(或 CVGT)	$\approx 17\text{K}$
e- $\text{H}_2$ (或 He)	VP(或 CVGT)	$\approx 20.3\text{K}$
Ne	TP	24.5561K
$\text{O}_2$	TP	54.3584K
Ar	TP	83.8058K
Hg	TP	234.3156K
$\text{H}_2\text{O}$	TP	273.16K
Ga	MP	302.9146K
In	FP	429.7485K
Sn	FP	505.078K
Zn	FP	692.677K
Al	FP	933.473K
Ag	FP	1234.93K
Au	FP	1337.33K
Cu	FP	1357.77K

注: 1. 除  $^3\text{He}$  外, 其他物质均为自然同位素成分, e- $\text{H}_2$  为正、仲分子态处于平衡浓度的氢。

2. VP 表示蒸气压点, CVGT 表示定容气体温度计点, TP 代表三相点, FP 和 MP 分别代表 1atm(101325 Pa)凝固点和熔点。同位素组成是自然存在的状态。