



21 世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

# 热工基础 及流体力学

郁 岚 主 编  
卫运钢 尚玉琴 副主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

# 热工基础 及流体力学

主 编 郁 岚  
副主编 卫运钢 尚玉琴  
编 写 杨小琨 李 琳  
主 审 王松岭



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书包括工程热力学、工程流体力学和传热学三部分。其主要内容有：气体的热力学性质、热力学基本定律、水蒸气及湿空气、气体和蒸汽的流动、蒸汽动力循环、流体的基本物理性质、流体静力学、流体动力学基础、黏性流体管内流动的能量损失、边界层概述、热量传递的基本方式概述、导热、对流换热、热辐射及辐射换热、传热过程与换热器。

本书可作为高等学校热工控制及自动化、电厂化学、热工测量仪表、建筑环境与设备工程、环境工程等专业转科教材，也可作为能源动力类短训班、培训班教材和工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

热工基础及流体力学/郁岚主编. —北京：中国电力出版社，  
2006

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 7 - 5083 - 4645 - 9

I. 热... II. 郁... III. ①热工学—高等学校—教材  
②流体力学—高等学校—教材 IV. ①TK122②035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 099401 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 523 千字  
印数 0001—3000 册 定价 32.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

# 前 言

本书是按照简明、易读和突出实用性的原则编写的,在编写过程中侧重于基本理论的物理描述,尽量减少复杂的理论推导,重视应用基本理论解决工程实际问题。本书包括工程热力学、工程流体力学和传热学三部分,可作为电厂热工控制及自动化、电厂化学、热工测量仪表、环境工程、建筑环境与设备工程等专业教学用书,也可作为能源动力类短训班、培训班使用教材。

本书主要内容包括气体的热力性质、热力学基本定律、水蒸气及湿空气、气体和蒸汽的流动、蒸汽动力循环、流体的基本物理性质、流体静力学、流体动力学基础、黏性流体管内流动的能量损失、边界层概述、热量传递的基本方式概述、导热、对流换热、热辐射及辐射换热和传热过程与换热器,共十五章。

本书第一、二章由杨小琨编写,第三、四、五章由尚玉琴编写,第六、八、九、十章由郁岚编写,第七章由李琳编写,第十一~十五章由卫运钢编写,郁岚担任主编。

华北电力大学博士生导师王松岭教授对书稿进行了认真的审阅,提出了许多宝贵意见和建议,使本书质量有了较大提高。

由于编者水平有限,本书难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006.5

## 目 录

前言

## 第一篇 工程热力学

<b>第一章 气体的热力性质</b> .....	1
第一节 热力系.....	1
第二节 热力学状态参数 .....	2
第三节 理想气体及其状态方程式.....	8
第四节 理想气体的比热容 .....	10
第五节 理想气体混合物.....	13
复习思考题 .....	14
习题 .....	15
<b>第二章 热力学基本定律</b> .....	16
第一节 可逆过程 .....	16
第二节 功 .....	17
第三节 热量 .....	19
第四节 热力学第一定律.....	20
第五节 理想气体的热力过程 .....	28
第六节 热力学第二定律.....	35
第七节 卡诺循环及卡诺定理 .....	36
第八节 孤立系统熵增原理 .....	41
复习思考题 .....	50
习题 .....	51
<b>第三章 水蒸气及湿空气</b> .....	54
第一节 基本概念 .....	54
第二节 水蒸气的产生 .....	55
第三节 水和水蒸气热力性质表和图 .....	58
第四节 水蒸气的热力过程 .....	60
第五节 湿空气 .....	63
复习思考题 .....	68
习题 .....	68
<b>第四章 气体和蒸汽的流动</b> .....	70
第一节 稳定流动的基本方程式 .....	70
第二节 气体在喷管中流动的基本规律 .....	72

第三节 喷管的计算 .....	74
第四节 有摩擦阻力的绝热流动和绝热节流 .....	79
复习思考题 .....	82
习题 .....	82
<b>第五章 蒸汽动力循环</b> .....	<b>84</b>
第一节 朗肯循环 .....	85
第二节 再热循环 .....	89
第三节 回热循环 .....	92
第四节 热电联产循环 .....	94
第五节 蒸汽—燃气联合循环 .....	95
复习思考题 .....	96
习题 .....	97

## 第二篇 工程流体力学

<b>第六章 流体的基本物理性质</b> .....	<b>98</b>
第一节 流体力学的任务、发展概况及研究方法 .....	98
第二节 流体的特征和连续介质假设 .....	99
第三节 流体的主要物理性质 .....	100
第四节 作用在流体上的力 .....	106
复习思考题 .....	107
习题 .....	107
<b>第七章 流体静力学</b> .....	<b>109</b>
第一节 流体的静压强及其特性 .....	109
第二节 流体的平衡微分方程 等压面 .....	111
第三节 静力学基本方程 .....	113
第四节 液柱式测压计 .....	114
第五节 静止液体作用在平面上的总压力 .....	119
第六节 静止液体对曲面的总压力 .....	122
复习思考题 .....	126
习题 .....	126
<b>第八章 流体动力学基础</b> .....	<b>129</b>
第一节 描述流体运动的两种方法 .....	129
第二节 流体运动的基本概念 .....	131
第三节 流体流动的连续性方程 .....	136
第四节 理想流体的运动微分方程 .....	139
第五节 理想流体微元流束的伯努里方程 .....	140
第六节 黏性流体总流的伯努里方程 .....	142
第七节 伯努里方程的应用 .....	145

第八节 定常流动的动量方程 .....	148
复习思考题 .....	151
习题 .....	152
<b>第九章 黏性流体管内流动的能量损失</b> .....	<b>156</b>
第一节 黏性流体流动的两种状态——层流及紊流 .....	156
第二节 黏性流体流动的能量损失 .....	158
第三节 均匀流中切应力的表达式 .....	159
第四节 圆管中流体的层流运动 .....	160
第五节 圆管中的紊流运动 .....	162
第六节 沿程阻力系数的计算 .....	167
第七节 非圆形截面管道沿程损失的计算 .....	170
第八节 局部损失的分析 and 计算 .....	171
第九节 总阻力损失的计算及减小措施 .....	175
第十节 管道的水力计算 .....	179
复习思考题 .....	182
习题 .....	182
<b>第十章 边界层概述</b> .....	<b>187</b>
第一节 边界层的基本概念 .....	187
第二节 曲面边界层的分离和卡门涡街 .....	188
第三节 绕流阻力和升力 .....	190
复习思考题 .....	194
习题 .....	194

### 第三篇 传热学

<b>第十一章 热量传递的基本方式概述</b> .....	<b>195</b>
第一节 传热学的基本任务 .....	195
第二节 导热 .....	195
第三节 对流换热 .....	196
第四节 热辐射及辐射换热 .....	198
第五节 复合换热 .....	200
复习思考题 .....	202
习题 .....	202
<b>第十二章 导热</b> .....	<b>204</b>
第一节 导热的基本概念和理论 .....	204
第二节 稳态导热 .....	208
第三节 非稳态导热 .....	213
复习思考题 .....	222
习题 .....	222

<b>第十三章 对流换热</b> .....	224
第一节 对流换热概述 .....	224
第二节 相似理论 .....	226
第三节 无相变对流换热 .....	230
第四节 相变换热 .....	240
复习思考题 .....	248
习题 .....	249
<b>第十四章 热辐射及辐射换热</b> .....	251
第一节 热辐射的基本概念 .....	251
第二节 热辐射的基本定律 .....	254
第三节 辐射换热的基本计算 .....	261
第四节 气体辐射及太阳辐射简介 .....	271
复习思考题 .....	277
习题 .....	277
<b>第十五章 传热过程与换热器</b> .....	279
第一节 传热过程 .....	279
第二节 换热器概述 .....	285
第三节 间壁式换热器的热计算 .....	293
第四节 传热的强化与削弱 .....	296
复习思考题 .....	300
习题 .....	301
<b>附录</b> .....	303
附录 1 气体的摩尔质量、气体常量和定比热容 .....	303
附录 2 气体的真实摩尔定压热容 .....	303
附录 3 气体的平均摩尔定压热容 .....	304
附录 4 气体的平均摩尔定容热容 .....	305
附录 5 气体的平均比定压热容 .....	305
附录 6 气体的平均比定容热容 .....	306
附录 7 气体的平均体积定压热容 .....	307
附录 8 气体的平均体积定容热容 .....	307
附录 9 298~1500K 气体的摩尔比热公式 (曲线关系式) .....	308
附录 10 0~1500℃ 气体的平均比热与平均体积比热 (直线关系式) .....	309
附录 11 理想气体状况下空气的热力性质 .....	309
附录 12 饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按温度排列) .....	310
附录 13 饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按压力排列) .....	312
附录 14 未饱和水与过热水蒸气的热力性质 .....	314
附录 16 几种保温、建筑等材料的密度和导热系数 .....	323
附录 17 几种保温、耐火材料的密度和导热系数 .....	324
附录 18 饱和水的热物理性质 .....	324



附录 19	干饱和水蒸气的热物理性质·····	325
附录 20	大气压力 ( $p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) 下过热水蒸气的热物理性质·····	326
附录 21	大气压力 ( $p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) 下烟气的热物理性质·····	326
附录 22	大气压力 ( $p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) 下干空气的热物理性质·····	327
附录 23	黑体辐射函数表·····	328
附录 24	几种物体表面的法向黑度·····	328
附录 25	换热器中一些流体的污垢热阻的参考值·····	329
附录 26	湿空气的焓—含湿量图·····	330
附录 27	传热学主要符号表·····	331
<b>参考文献</b>	·····	<b>334</b>

# 第一篇 工程热力学

## 第一章 气体的热力性质

工程热力学是热力学最早发展起来的一个分支,它侧重热力学在工程中的应用,主要研究的对象是工程技术上有关热能和机械能相互转换的规律。工程热力学开始形成于19世纪上半叶,与当时生产实践迫切需要改进且已被广为利用的蒸汽机——实现热能向机械能转换的动力机械,有密切的联系。工程热力学理论体系在随后的热机实践中起到了指导作用,使内燃机、蒸汽轮机、燃气轮机和喷气推进机等热机相继得到发展。随着科学的发展,现代工程热力学的研究范围进一步扩展到了燃烧、溶解等一些热化学现象。归根到底,热工理论的发展是受生产发展推动的。正确的热工理论总要从生产实践中产生,而又为解决生产实践中的热工问题服务,并接受实践的进一步检验。

各种不同形式的能量可以相互转换,但总要保持能量总量的恒定。这是公认的能量守恒和转换定律。“任何永动机都是不可能存在的”,热机发展中的经验教训再次证明这个客观存在的真理。

热能向机械能转换要通过热机实现。概括地看来,无论哪一种热机,总是用某种媒介物质从某个物体获取热能,使它具有高能量而对机器做功,最后又把余下的热能排向大气或冷却水等。我们将热机中用于携带热能,并实现热能转变为机械能的媒介物质称为“工质”;把工质从中吸取热能的物体叫做“高温热源”,或称为“热源”;把接受工质排出热能的物体叫做“低温热源”,或称为“冷源”。热机的工作过程实质就是工质从高温热源吸取热能,将其中一部分转化为机械能而做功,并把余下的另一部分热能传递给低温热源的过程。

热能向机械能的转化是通过工质在热机中的膨胀实现的。由于气态物质具有良好的流动性和膨胀性,体积最容易发生变化,所以热机使用的工质都是气体,或者由液态过渡为气态时的“蒸气”,水的蒸汽习惯上称为“蒸汽”。蒸汽机和蒸汽轮机,都是用蒸汽做工质的“蒸汽发动机”。而内燃机和燃气轮机则用燃料燃烧所生成的气体作为工质,可以叫做“燃气发动机”。

### 第一节 热力系

分析任何事物均需选择一定的对象,在热力学中分析一个现象或过程时,常把研究对象与周围有关的一切其他物体相分隔,这种人为分离出来的研究对象称为“热力学系统”,简称“热力系”。热力系以外的其他有关物体统称为“外界”或“环境”。而热力系与外界的分界面就是“边界”。边界可以是真实的,也可以是虚构的;可以是固定的,或是可变的。例如当研究汽油机气缸中燃气的膨胀过程时,如图1-1(a)所示,可以取气缸壁和活塞内壁面为边界,此时的边界是真实的,工质和气缸壁之间的边界是固定不动的,但工质和活塞之间的边界却可以移动而不断改变位置。又如当取汽轮机中的工质作为热力系时,如图1-1(b)所示,在进口前后和出口前后的工质并无实际的边界,而是人为设想一个边界把系统

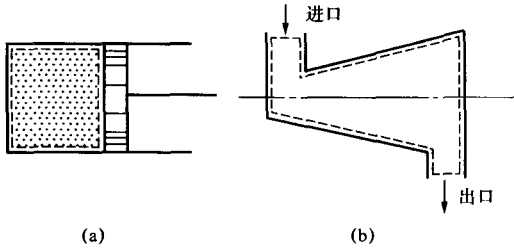


图 1-1 闭口热力系和开口热力系

中的工质和外界分隔开，此时的边界就是虚构的。热力系与外界之间的一切相互作用，如物质交换和能量的传递都通过边界进行。

按热力系与外界进行物质交换的情况，可将热力系分类为：

闭口热力系——热力系与外界无物质交换，或者说没有物质穿过边界。闭口热力系简称为“闭口系”，也可称为“封闭热力系”。此时，热

力系内部的质量恒定，故又可称为“定质量热力系”或“控制质量热力系”。

开口热力系——热力系与外界有物质交换，或者说有物质穿过边界。开口热力系简称为“开口系”。由于热力系内部的质量是可变的，但这种变化通常在某一划定的空间范围内进行，故又称为“变质量热力系”或“控制体积热力系”。

相应地，此时控制质量或控制体积与外界的分界面也称为“控制面”。

按热力系与外界进行能量交换的情况，可将热力系分类为：

绝热热力系——热力系与外界无热量交换。绝热热力系简称为“绝热系”。在工程研究中，对许多虽有热量交换，但热量相对于通过边界的其他能量可忽略其数量的系统，也常作为绝热热力系来对待。如蒸汽在汽轮机中的膨胀、流体流过阀门等。

孤立热力系——热力系与外界既无能量交换也无物质交换。孤立热力系简称为“孤立系”。孤立系的一切相互作用都发生在系统内部。

热力系的选取取决于所研究对象的特点以及研究的目的和任务。例如我们可以把整个蒸汽动力装置划作一个热力系统，计算它在一段时间内从外界投入的燃料、向外界输出的热量，以及冷却水带走的热量等。这时整个蒸汽动力装置中工质的质量不变，是闭口热力系；如果只分析其中某个设备，比如锅炉或汽轮机的工作过程时，它们不仅有吸热做功等能量交换的过程，还有工质流进或流出的物质交换的过程，这时的锅炉或汽轮机就是开口热力系。同样地，内燃机在气缸进排气阀门都关闭时，取封闭于气缸和活塞间的工质为系统就是闭口热力系；而把内燃机进排气及燃烧膨胀过程一起研究时所划定的空间就是开口热力系。

在分析热力系时，不仅要考虑热力系内部的变化，同时还需考虑热力系通过边界与外界发生的能量和物质交换，而对外界的变化则不必追究。因此，边界的划定、热力系的选择，对分析研究能量的交换甚为重要，选取不当，势必难以获得正确的结论。

## 第二节 热力学状态参数

### 一、状态参数和热力过程

工质在某一瞬间所呈现的全部宏观物理特性，称为“热力状态”，简称“状态”。用于描述工质状态的宏观物理量叫做“热力学状态参数”，简称“状态参数”，如压力、温度、体积等，这些物理量反映了大量分子运动的宏观统计效果。工程热力学只从总体上去研究工质所处的状态及其变化规律，所以我们只采用宏观量来描述工质所处的状态。状态参数一旦完全确定，工质的状态也就确定了；状态参数的全部或一部分发生变化，即表明物质所处的状态

发生了变化。

密闭容器内密度不均的气体，在不受外界影响时，由于物体各部分之间的热量传递及气体内部各部分之间的相对位移，使它们的状态随时间而变化，逐渐达到一种静止状态，称此种静止状态为“平衡状态”。所以，平衡状态是指热力系在无外界影响下，宏观性质不随时间而变化的状态。一个热力系，当其内部无不平衡力，且作用在边界上的力和外力相平衡，则该热力系处于力平衡。若热力系内的温度各部分均匀一致，且等于外界温度，则该热力系处于热平衡。力平衡和热平衡是工质处于平衡状态的两个必要条件。若热力系内部还存在化学反应，则尚应包括化学平衡。

处于平衡状态的系统，若受到外界影响，就不能保持平衡状态。例如系统和外界间因温度不平衡而产生热量交换，因压力不平衡而产生功的交换，都会破坏系统原来的平衡状态。系统和外界间相互作用的结果，会导致系统和外界共同达到一个新的平衡状态。此时，系统和外界又处于相互平衡之中，即工质从一个平衡状态经过一系列中间状态过渡到另一个平衡状态，则称工质经历了一个“热力过程”。

各种热机的运转都是由于工质在特定的条件下不断地改变其压力、温度、体积等一些宏观特性，依赖于工质吸热、膨胀、放热、压缩等热力过程来实现的。若工质从初状态出发，经过吸热、膨胀、放热、压缩等热力过程又回到原态，称工质经历了一个“热力循环”。要说明热机的工作过程，就必须研究工质所处的状态和它所经历的热力循环中的各个状态变化过程。

本书只对平衡状态进行研究，因为处于不平衡状态时的热力系各部分的性质不尽相同，且随时间变化，无法用共同的宏观特性来简单描述热力系所处的状态。

实践的结果发现，对于气体、液体或者不引起化学变化的气体混合物，绝对压力  $p$ 、热力学温度  $T$  以及比体积  $v$  三项中任意给定两项，第三项的值就跟着被确定，即  $p$ 、 $T$ 、 $v$  这三个状态参数只有两个是彼此独立的，用公式表示时，则

$$f(p, v, T) = 0 \quad (1-1)$$

函数  $f$  的具体形式视物质的种类而定。式 (1-1) 叫作物质的状态方程式。这样，对于气态工质，就有可能以两个相互独立的状态参数构成“状态参数坐标图”。图中任意一个特定的点就表示相应的一个热力状态，任意一条特定的曲线就代表相应的一个热力过程。状态参数坐标图对热力过程的分析 and 比较提供了某种直观性，有很大的实用意义。在工程热力学中，常使用以比体积  $v$  为横坐标，以压力  $p$  为纵坐标的压容图，又叫做  $p-v$  图；以熵  $s$  为横坐标，以热力学温度  $T$  为纵坐标的温熵图，也称为  $T-s$  图。例如已知工质的初始状态为  $p_1$ 、 $v_1$ ，经历一个熵不变的膨胀过程后，其终状态为  $p_2$ 、 $v_2$ ，则此过程表示在  $p-v$  图和  $T-s$  图上如图 1-2 所示。

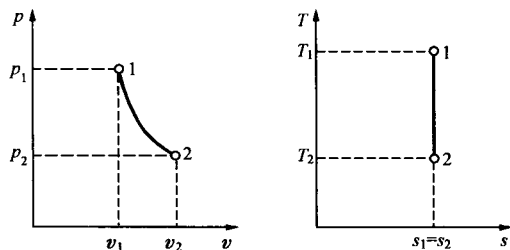


图 1-2 定熵膨胀过程的  $p-v$  图和  $T-s$  图

在研究热力过程时，由于温度、压力和比体积可以直接测量或通过简单计算求取，所以采用温度、压力、比体积作为工质的三个“基本状态参数”。另外在以后的学习中还有热力学能、焓、熵等常用状态参数。

## 二、比体积和密度

设有  $m$  kg 质量的工质占据体积  $V$  m<sup>3</sup>，则其比体积定义为

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

显然，比体积表示了工质的疏密程度，其单位是 m<sup>3</sup>/kg。若比体积增大表示工质膨胀，比体积减小表示工质被压缩。比体积的倒数，即单位体积中所容纳的工质质量，叫做“密度”，用  $\rho$  表示，单位是 kg/m<sup>3</sup>，即

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

密度与比体积互为倒数，即

$$v \cdot \rho = 1$$

## 三、压力

### 1. 压力的定义

压力即物理学中的“压强”，是工质在单位面积的容器壁面上所施加的垂直力，记作  $p$ 。按照分子运动论理论，气体的压力是大量分子撞击容器壁面的统计量。

压力的单位在国际单位制中为牛顿/平方米 (N/m<sup>2</sup>)，表示为帕斯卡 (简称为帕，Pa)。工程上因 Pa 作为单位过小，常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 表示。

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

此外，在工程上还常用巴 (bar)、标准大气压 (atm)、工程大气压 (at)、毫米汞柱 (mmHg)、毫米水柱 (mmH<sub>2</sub>O) 等度量单位，它们与帕的换算关系如表 1-1 所示。

表 1-1 常用压力单位换算

单位	Pa(帕)	bar(巴)	atm (标准大气压)	at (kgf/cm <sup>2</sup> ) (工程大气压)	mmHg (毫米汞柱)	mmH <sub>2</sub> O (毫米水柱)
Pa	1	1×10 <sup>-5</sup>	9.86923×10 <sup>-6</sup>	1.01972×10 <sup>-5</sup>	7.50062×10 <sup>-3</sup>	1.01972×10 <sup>-1</sup>
bar	1×10 <sup>5</sup>	1	9.86923×10 <sup>-1</sup>	1.01972	7.50062×10 <sup>2</sup>	1.01972×10 <sup>4</sup>
atm	1.01325×10 <sup>5</sup>	1.01325	1	1.03323	760	1.03323×10 <sup>4</sup>
at	9.80445×10 <sup>4</sup>	9.80665×10 <sup>-1</sup>	9.67841×10 <sup>-1</sup>	1	735.559	1×10 <sup>4</sup>
mmHg	133.322	1.33322×10 <sup>-3</sup>	1.31579×10 <sup>-3</sup>	1.35951×10 <sup>-3</sup>	1	13.5951
mmH <sub>2</sub> O	9.80665	9.80664×10 <sup>-5</sup>	9.67841×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	735.559×10 <sup>-4</sup>	1

### 2. 绝对压力、表压力和真空

绝对压力  $p$  是指以绝对真空为基准而算起的压力，又称为真实压力。表压力  $p_e$  和真空  $p_v$  是以大气压力为基准计算的，又称为相对压力。由于压力的测量原理一般都是建立在力平衡基础上的，而压力表 (计) 本身又处于大气环境中，因此压力表的读数都是相对压力。

工质的绝对压力  $p$  和大气压力  $p_b$ 、表压力  $p_e$  之间的关系可表示为

$$p = p_b + p_e \quad (1-4)$$

真空  $p_v$  为大气压力与绝对压力的差值，即

$$p_v = p_b - p \quad (1-5)$$

如图 1-3 所示,当工质的绝对压力  $p$  大于大气压力时,U形管压力表(计)所读出的压力为绝对压力与大气压力的差值,即表压力  $p_e$ ;如工质的绝对压力  $p$  低于大气压力,U形管压力表(计)所读出的压力为真空  $p_v$ ,此时的压力表常叫做“真空表”。

绝对压力、大气压力、表压力和真空之间的关系可由图 1-4 表示。

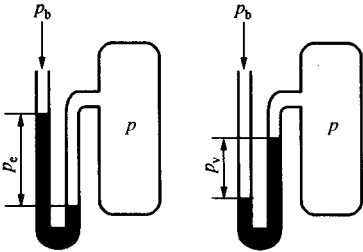


图 1-3 压力测量原理

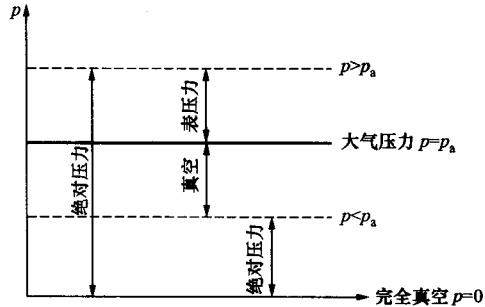


图 1-4 绝对压力、表压力和真空之间的关系

由于大气压随各地的纬度、高度和气候条件有所变化,因此即使工质的绝对压力不变,表压力和真空仍有可能变化,因此作为工质状态参数的压力应当是绝对压力。在用压力表进行热工测量时,必须同时用大气压力计测量当地大气压力,才能得到工质绝对压力的精确值。

#### 四、温度

温度是描述物体冷热程度的一个物理量。而在热力学中,是利用热平衡来定义温度。例如将冷热程度不同的两个物体相互接触,它们之间会发生热量交换。热物体逐渐变冷,冷物体逐渐变热,经过一段时间后,它们将达到相同的冷热程度而不再进行热量交换。所达到的这种状况称为“热平衡”,也称温度相同。也就是说,处于热平衡状态的两个热力系具有相同的温度。

从微观上看,温度标志物质分子热运动的强烈程度。气体的温度是气体内部分子不规则热运动激烈程度的度量,是与气体分子平均速度有关的一个统计量。气体温度越高,表明气体分子的平均动能越大。

温度的测量可以利用温度计,它具有随温度而变的某个特性(如体积受热膨胀、电阻受热增减等)。当被测物体和温度计处于热平衡时,被测物体就具有温度计某特性变化所表示的温度的高低。

为了定量地描述温度,需选定温度的基准点,规定温度计量单位的大小,也就是必须建立温标。工程上常用的温标有摄氏温标和华氏温标。摄氏温标用于公制系统,其符号表示为  $t$ ,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。它规定在标准大气压下纯水的冰点是  $0^{\circ}\text{C}$ ,汽点是  $100^{\circ}\text{C}$ ;华氏温标用于英制单位,单位是华氏度( $^{\circ}\text{F}$ )。它规定在标准大气压下纯水的冰点是  $32^{\circ}\text{F}$ ,汽点是  $212^{\circ}\text{F}$ 。华氏温度和摄氏温度的换算关系为

$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}t(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1-6)$$

摄氏温标和华氏温标都是经验温标。它们依赖于测温物质的性质,因此当选用不同的测温物质的温度计来测量温度时,除了冰点和汽点这两个基准点,其他的温度都有细小的差异。因此经验温标不能作为度量温度的标准。

在国际单位中,热力学温度是基本温度,以符号  $T$  表示,单位是开尔文(简称为开, K),热力学温度也常叫做“绝对温度”。它以水的三相点(即水的固、液、汽三态共存)为基本定点,并定义其温度为  $273.16\text{K}$ 。 $1\text{K}$  等于水的三相点热力学温度的  $1/273.16$ 。

1960 年国际权度会议对摄氏温标给予新的定义,即

$$t = T - 273.15 \quad (1-7)$$

这样,重新规定的摄氏温标的全名是热力学摄氏温标。由上式可知,热力学摄氏温标和热力学温标的温度间隔完全相同,只是零点的选择不同。摄氏温度  $0^\circ\text{C}$  相当于热力学温度  $273.15\text{K}$ 。由此可知,水的三相点温度就是热力学摄氏温度  $0.01^\circ\text{C}$ 。

## 五、热力学能

### 1. 热力学能

能量是物质运动的度量,运动具有各种不同的形式,相应地就有各种不同的能量。热力系中与物质内部分子结构、以及分子运动形式有关的微观能量,统称为“热力学能”,也叫做“内能”。热力学能是物质内部各种微观能量的总和,它包括了分子运动的内动能(包含分子的移动动能、转动动能和分子内部原子的振动动能)、分子间由于相互作用力而具有的内位能,此外还包括与分子结构或原子结构有关的化学能和原子核能。

在热力状态变化过程中,物质的分子结构和原子结构都不发生变化,化学能、原子核能等都不起作用,所以在热力学中认为热力学能仅由内动能和内位能组成。只有在涉及化学反应的化学热力学部分,才把化学能也包括在热力学能中。

从分子运动论可知,物质内部分子运动的动能越大,其温度也越高。因此内动能与热力系的温度有关,即内动能是温度的函数。而热力系的内位能则决定于分子间的平均距离,即决定于比体积。由于温度升高时分子间碰撞的频率增加,分子间相互作用增强,因而内位能也和温度有关。由此可见,热力系的热力学能决定于热力系的温度和比体积,即和工质的热力状态有关。一旦工质的状态发生变化,热力学能也就跟着变化,因此热力学能也是状态参数。

热力学能用符号  $U$  表示,其单位在国际制中为焦耳(简称焦, J)或千焦耳(简称千焦, kJ)。 $1\text{kg}$  工质的热力学能用  $u$  表示,称为比热力学能,其单位为  $\text{J/kg}$  或  $\text{kJ/kg}$ 。

### 2. 储存能

热力系本身所具有的总能量称为“储存能”,常用符号  $E$  表示。它分为两部分:一部分是考虑物质分子所具有的热力学能,还有一部分是相对于热力系以外的参考坐标系所具有的宏观能量,如宏观动能  $E_k$  和宏观位能  $E_p$ 。这两种能量形式与所选定的参考坐标系有关,并由质量、高度和速度等宏观参数确定,其变化量与变化途径无关,它们都属于机械能,而热力学能是热能,这表明热力系可以存储不同形式的能量。

$$E = U + E_k + E_p \quad (1-8)$$

对于闭口热力系,由于质量保持恒定,当把系统作为一个整体来计算它的宏观动能和宏观位能时,可按力学上的一个具有恒定质量的质点来处理。若系统质量为  $m$ ,速度为  $c$ ,在重力场中的高度为  $z$ ,则储存能可以写成

$$E = U + \frac{1}{2}mc^2 + mgz \quad (1-9)$$

$1\text{kg}$  工质的储存能可写为

$$e = u + \frac{1}{2}c^2 + gz \quad (1-10)$$

## 六、焓

一个闭口系统中，工质本身所具有的能量就是储存能。但在一个开口系统中，总是连续地（汽轮机和燃气轮机）或者周期性地（蒸汽机和内燃机）将已做过功的工质排出，并重新吸入新的工质，工质的热力循环要在整个动力装置中完成。对于热机或与之相配套的其他热力设备，就是有工质进出的开口热力系。那么，对于开口系统而言，工质进入或流出系统时携带的能量又是什么呢？

图 1-5 所示为一开口热力系。在状态变化期间，外界的工质推动  $\delta m_1$  kg 工质从 A-A 截面进入热力系而做功；与此同时，热力系内部质量为  $\delta m_2$  kg 的工质从 B-B 截面流出热力系而对外界做功。这种工质进入或流出热力系时对热力系或外界所做的功是为了维持工质的流动，叫做“推动功”，这种推动功通常是从泵或风机所加给被输送工质的功，跟着工质的流动而向前方转移的能量，因此有时被称为“流动功”或“移动功”。

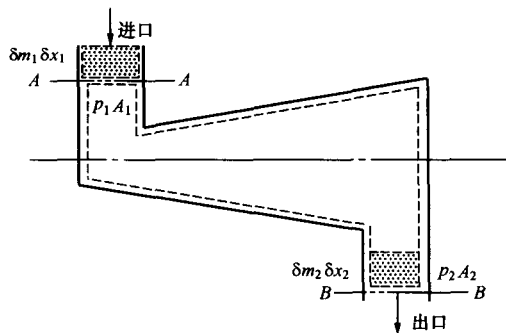


图 1-5 流动工质携带的能量

当工质进入热力系时，对热力系做的推动功为

$$p_1 A_1 \delta x_1 = \delta m_1 p_1 v_1$$

当工质流出热力系时，对外界做的推动功为

$$p_2 A_2 \delta x_2 = \delta m_2 p_2 v_2$$

由于在稳定工况下， $\delta m_1 = \delta m_2$ ，1kg 工质流过设备时，热力系从外界上游得到推动功  $p_1 v_1$  J/kg，而对外界下游工质做出推动功  $p_2 v_2$  J/kg，则热力系对外界做出的“推动净功”为

$$\Delta p v = p_2 v_2 - p_1 v_1 \quad (1-11)$$

由于流动工质除了本身具有热力学能以外，总随带推动功一起转移，因此规定

$$H = U + pV \quad \text{或} \quad h = u + p v \quad (1-12)$$

式中  $H$  称为“焓”，单位 J。  $h$  是 1kg 工质具有的焓，称为比焓，单位是 J/kg。焓或比焓是一个取决于工质热力状态的综合量，它们也是一个热力状态参数。焓代表了流动中的工质沿流动方向向前传递的总能量中取决于热力状态的部分。在热力设备中，工质总是不断地从一处流到另一处，在忽略动能和位能变化情况下，随着工质的移动而转移的能量不等于热力学能而等于焓，故在热力工程的计算中焓有更广泛的应用。

## 七、熵

工质热力状态发生变化时，会与外界交换功和热量，和外界交换的功和热量的多少具体取决于工质由初态到终态的过程性质。

对于可逆过程，令

$$ds = \frac{\delta q}{T} \quad (1-13)$$



或

$$\delta q = Tds \quad (1-14)$$

并且可以用热力学第二定律严格地证明  $s$  的确是一个热力状态参数,  $s$  被命名为“熵”, 单位  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。对于  $m\text{kg}$  工质的总熵用  $S$  表示, 单位  $\text{J}/\text{K}$ 。

在一个可逆过程 1-2 (见图 1-6) 中, 单位质量工质从外界吸热量为

$$q = \int_1^2 Tds \quad (1-15)$$

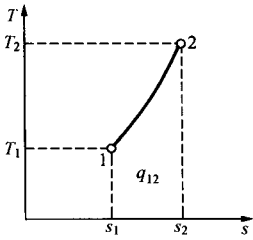


图 1-6 温熵图

若以热力学温度  $T$  作为纵坐标, 以熵  $s$  为横坐标绘制温熵图 ( $T$ - $s$  图), 则可逆过程线 1-2 与横坐标所包围的面积就代表可逆过程中工质与外界交换的热量, 因此温熵图常称作“示热图”。

### 第三节 理想气体及其状态方程式

各种热力设备中都是通过工质的状态变化来实现能量的传递和转换。但是, 能量的传递 (吸热或放热) 与转换 (做功) 不仅与工质的状态变化过程有关, 而且还与工质本身的热力性质密切相关, 要研究能量传递和转换, 就必须熟悉常用工质热力性质方面的基本知识。研究工质的性质, 主要是研究工质在一定状态下三个基本状态参数之间的关系, 即“状态方程式”。只有知道了工质的状态方程和比热容, 其他状态参数如热力学能、焓和熵才可以推算出来, 从而可根据热力学第一定律计算状态变化过程中工质传递的热量和功量。在热力设备中常用的工质是气态物质, 而气态物质根据其偏离液体的远近, 工程习惯上分为气体和蒸气, 本节只研究气体的性质。

#### 一、理想气体的概念

所谓理想气体, 是指状态变化完全遵循波义耳—查理定律的气体。从微观来看, 理想气体模型具有两层含义: ①其分子可视为是一些弹性的, 不占体积的质点 (即气体分子之间发生完全弹性碰撞且气体体积可以被无限压缩); ②分子之间不存在相互作用力 (即不考虑气体内部的分子位能)。因此理想气体也可以认为是气体压力趋于零, 比体积趋于无穷的情况。反之, 凡不符合波义耳—查理定律, 或不符合上述微观模型的气体则称为“实际气体”。

理想气体实际上是一种并不存在的假想模型, 之所以要提出理想气体这个概念, 主要是为了研究问题的方便。如果分析中考虑了气体分子之间的相互作用力和分子本身占据的体积, 则气体的性质非常复杂, 状态参数之间呈现极其复杂的函数关系, 这会给分析计算带来一定的困难。引入理想气体的概念后, 气体分子运动的规律大为简化, 各状态参数之间可以得出简单的函数关系, 简化了分析计算。最后, 再根据具体情况通过实验对分析计算结果进行修正, 就可以得到接近于实际气体的理想模型。因此, 对实际分析对象进行合理的简化、假想是必要的、有利的, 在科学研究和生产实践中常常作为分析问题的一种方法。

在判断一种气体是否是理想气体时, 常根据此气体偏离液态的程度而定。根据实验研究, 当气体的温度愈高、压力愈低时, 气体的比体积就愈大, 气体更远离液态。由于其分子间的距离很大, 与距离有关的分子之间的作用力就很小, 分子本身的体积相对气体分子运动