

供热通风 热工理论基础

天津大学 哈尔滨建筑工程学院
西安冶金建筑学院 重庆建筑工程学院编
太原工学院 湖南大学 同济大学

中国建筑工业出版社

供 热 通 风

热 工 理 论 基 础

天津大学 哈尔滨建筑工程学院
西安冶金建筑学院 重庆建筑工程学院 编
太原工学院 湖南大学 同济大学

借 期	借 书 人	借 期	借 书 人

本书是供热通风专业技术基础理论读物。书中结合供热通风工程的特点,介绍了工程热力学和传热学的基本内容,阐述了热能转换、热量传递以及随之产生的工质状态变化或物态变化等过程的实质和规律。根据现代科学技术的发展,书中对传质现象也作了概要的介绍。

本书可供从事供热通风工作及有关专业的科技人员、教师、学员和工人学习参考。

供 热 通 风

热 工 理 论 基 础

天津大学 哈尔滨建筑工程学院
西安冶金建筑学院 重庆建筑工程学院 编
太原工学院 湖南大学 同济大学

*

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

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 13 5/8 插页: 3 字数: 366 千字

1978年6月第一版 1978年6月第一次印刷

印数: 1—22,290册 定价: 1.40元

统一书号: 15040·3472

前 言

工程热力学和传热学是从事供热通风科学技术工作的人员必须学习和掌握的热工基础理论。在供热通风工程中所遇到的诸如供热、通风、空调、制冷等各种生产实践问题,大都涉及到热能的转换和热量的传递,而热能的转换规律和热量的传递规律,正是热工理论所要研究和回答的问题。因此,扎扎实实地学好热工理论,就成为做好供热通风科技工作,并使这门应用技术不断进步和革新的重要条件。为此,我们编写了这本《供热通风热工理论基础》,供有关的工人、科技人员、教师和学员学习参考。

对于内容的取舍,主要从供热通风工程的当前需要出发,同时也注意远近结合,适当照顾长远发展的需要。对于每一个概念的引出和定律的论证,力求做到从实际到理论,以理论指导实践,注意防止“从概念到概念”的叙述方法。在文字叙述上,力求深入浅出,说理清楚,每章都有小结和复习思考题,以便于读者自学。由于我们的思想水平和业务水平所限,书中肯定会存在一些问题,诚恳地希望读者予以批评指正,以便我们进一步修改提高。

在编写过程中,得到了清华大学、北京建筑工程学院、天津地毯四厂、天津机电设备安装公司七·二一大学、西安交通大学、西安五〇三厂、中国人民解放军后勤工程学院以及各编写单位的教师和工人的热情帮助,提供了许多宝贵意见,在此谨致衷心的感谢。

本书由天津大学主编。各编写单位的执笔人有:天津大学章熙民、齐锡龄,哈尔滨建筑工程学院左垂纪、李力能,西安冶金建筑学院田中保、张斐利,重庆建筑工程学院张惠迪、周书鹏、刘书林,太原工学院谢益棠、胡连祯,湖南大学银炉明、李林清,同济大学梅飞鸣。

基本符号

物理量

- A 功热当量, 千卡/公斤·米 ($\text{kcal/kg}\cdot\text{m}$)
- α 容积成分, (百分数%); 导温系数, 米²/时 (m^2/h)
- B 大气压力, 公斤/厘米² (kg/cm^2), 绝对气压 (ata), 毫米汞柱 (mmHg)
- C 辐射系数, 千卡/米²·时·度⁴ ($\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K}^4$); 体积浓度, 公斤/米³ (kg/m^3)
- c 音速, 米/秒 (m/s); 重量比热, 千卡/公斤·度 ($\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
- c' 容积比热, 千卡/标米³·度 ($\text{kcal/Nm}^3\cdot^\circ\text{C}$)
- D、 d 直径, 米 (m), 毫米 (mm); 扩散系数, 米²/时 (m^2/h)
- E 辐射力, 千卡/米²·时 ($\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}$)
- F 表面积, 米² (m^2)
- f 断面积, 米² (m^2), 毫米² (mm^2); 沿程阻力系数
- G 重量, 吨 (t), 公斤 (kg); 重量流量, 公斤/秒 (kg/s), 吨/时 (t/h)
- g 重力加速度, 米/秒² (m/s^2); 扩散质流量, 公斤/米²·时 ($\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$)
- h 高度, 米 (m); 液柱高, 米水柱 (mH_2O), 毫米水柱 (mmH_2O), 毫米汞柱 (mmHg)
- I 湿空气的焓, 千卡/公斤干空气 (kcal/kg 干空气)
- i 焓, 千卡/公斤 (kcal/kg)
- K 传热系数, 千卡/米²·时·度 ($\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$)
- k 绝热指数 (比热比)
- L 功量, 公斤·米 ($\text{kg}\cdot\text{m}$), 马力·时 ($\text{HP}\cdot\text{h}$), 千瓦·时 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)
- l 功量, 公斤·米/公斤 ($\text{kg}\cdot\text{m/kg}$); 长度, 米 (m)
- M 公斤分子数, 莫耳 (mol); 马赫数

- m 质量, 公斤·秒²/米 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$)
 N 功率, 公斤·米/秒 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$), 马力 (HP), 千瓦 (kW)
 n 多变指数
 p 压力, 公斤/米² (kg/m^2), 公斤/厘米² (kg/cm^2), 气压 (at), 标准气压 (atm), 绝对气压 (ata), 表气压 (atg), 米水柱 (mH_2O), 毫米水柱 (mmH_2O), 毫米汞柱 (mmHg), 巴 (bar)
 Q 热量, 千卡 (kcal); 传热量, 千卡/时 (kcal/h)
 q 热量, 千卡/公斤 (kcal/kg); 热流量, 千卡/米²·时 ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$)
 R 半径, 米 (m); 气体常数, 公斤·米/公斤·度 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$); 热阻, 米·时·度/千卡 ($\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}/\text{kcal}$), 米²·时·度/千卡 ($\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}/\text{kcal}$)
 r 半径, 米 (m); 潜热, 千卡/公斤 (kcal/kg)
 S 距离, 米 (m)
 s 熵, 千卡/公斤·度 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{K}$); 蓄热系数, 千卡/米²·时·度 ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$)
 T 绝对温度, 开尔文 (K)
 t 摄氏温度, 度, ($^\circ\text{C}$)
 U 内能, 千卡 (kcal); 周边长度米 (m)
 u 内能, 千卡/公斤 (kcal/kg)
 V 容积, 米³ (m^3); 容积流量, 米³/时 (m^3/h)
 v 比容, 米³/公斤 (m^3/kg)
 W 水当量
 w 速度, 米/秒 (m/s)
 x 干度
 z 位能, 公斤·米 ($\text{kg}\cdot\text{m}$); 周期, 时 (h)
 α 放热系数, 千卡/米²·时·度 ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$)
 β 容积膨胀系数, 1/度 ($1/\text{K}$); 压力比; 肋化系数
 γ 重度, 公斤/米³ (kg/m^3)
 δ 厚度, 米 (m)
 ϵ 制冷系数; 角系数; 黑度; 校正系数; 换热器效能
 ζ 能量损失系数

η 效率

θ 过余温度, 度 ($^{\circ}\text{C}$)

λ 导热系数, 千卡/米·时·度 ($\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$);

波长, 米 (m), 微米 (μ)

μ 分子量; 引射系数; 动力粘度, 公斤·秒/米² ($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)

ν 运动粘度, 米²/时 (m^2/h), 米²/秒 (m^2/s)

ξ 延迟时间, 时 (h)

ρ 密度, 公斤·秒²/米⁴ ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$);

τ 时间, 时 (h), 秒 (s); 摩擦力, 公斤/米² (kg/m^2)

φ 相对湿度; 速度系数; 角系数

ω 角速度; 弧度/秒 (rad/s)

相 似 准 则

$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_b}$ —— 毕渥 (Biot) 准则

$Fo = \frac{a\tau}{l^2}$ —— 付立叶 (Fourier) 准则

$Gr = \frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2}$ —— 格拉晓夫 (Grashof) 准则

$Le = \frac{a}{D}$ —— 刘伊斯 (Lewis) 准则

$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ —— 努谢尔特 (Nusselt) 准则

$Pr = \frac{\nu}{a}$ —— 普朗特 (Prandtl) 准则

$Re = \frac{wl}{\nu}$ —— 雷诺 (Reynolds) 准则

$Sc = \frac{\nu}{D}$ —— 施米特 (Schmidt) 准则

$Sh = \frac{\alpha_D l}{D}$ —— 宣乌特 (Sherwood) 准则

$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{\alpha}{w c_p \gamma}$ —— 斯坦登 (Stanton) 准则

$St_D = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{\alpha_D}{w}$ —— 质交换斯坦登准则

通用注角

m 平均 (<i>mean</i>)	max 最大 (<i>maximum</i>)
min 最小 (<i>minimum</i>)	

汉语拼音注角

b 表 (压力); 壁	bh 饱和
$b\hat{s}$ 本身	c 层 (流)
$\hat{c}$ 初	$\hat{c}d$ 传动
$\bar{d}$ 电; 对 (流)	dl 当量
dx 等效	
f 分 (压力); 辐 (射)	$f\hat{s}$ 反射
g 干	gl 过冷
gr 过热	h 混 (合)
$j\bar{d}$ 绝对	jx 机械
kq 空气	l 肋; 流 (体)
$l\bar{d}$ 露点	lj 临界
lx 理想	mc 摩擦
nj 凝结	$p\hat{z}$ 膨胀
q 气; 球	r 入 (口)
$\hat{s}$ 湿	ys 压缩
yx 有效	w 紊 (流); 污 (垢)
z 总	$\hat{z}$ 终; 轴; 柱
$\hat{z}f$ 蒸发	$\hat{z}q$ 蒸汽
$\hat{z}\hat{s}$ 指示	

请读者注意, 本书某些章节还使用基本符号作为注角, 如 $\hat{q}_x$ 表示湿蒸汽干度; q_l 表示单位长度圆筒壁的热流量等。

目 录

绪 论	1
第一篇 工程热力学	5
引 言	5
第一章 气体的热力性质及热量计算	6
第一节 分子运动论基本概念	6
第二节 工质的基本状态参数	11
第三节 理想气体状态方程式	18
第四节 混合气体的性质	25
第五节 气体的比热及热量计算	32
第二章 热力学基本定律	45
第一节 热力学第一定律	45
第二节 热力学第一定律的能量方程式	48
第三节 气体的热力过程	64
第四节 热力学第二定律	74
第三章 水蒸汽	88
第一节 液体的汽化	88
第二节 水蒸汽的定压发生过程	93
第三节 水蒸汽图表及其应用	98
第四章 湿空气	107
第一节 湿空气的状态及状态参数	108
第二节 湿空气的焓湿图	115
第三节 焓湿图的应用	118
第五章 气体和蒸汽的流动	133
第一节 气体在喷管中流动的基本规律	134
第二节 喷管截面变化的分析	137
第三节 考虑能量损失的流速计算和喷管尺寸的计算	150
第四节 喷管流量	156

第五节	扩压管和引射器	160
第六节	气体和蒸汽的节流	164
第六章	气体的压缩和制冷原理	172
第一节	气体的压缩	172
第二节	蒸气压缩式制冷循环	187
第三节	其他制冷装置和热泵的工作原理	195
第二篇	传热学	201
引 言		201
第七章	稳定导热	206
第一节	导热的基本定律	206
第二节	导热系数	210
第三节	通过平壁的导热	213
第四节	通过圆筒壁的导热	216
第五节	通过肋壁的导热	222
第六节	通过复合壁的导热	226
第八章	对流换热	233
第一节	边界层概念及求解对流换热方法简述	234
第二节	流体自由流动时的放热	242
第三节	流体受迫流动时的放热	247
第四节	沸腾与凝结时的放热	258
第五节	相似理论基础	265
第九章	热辐射	279
第一节	基本概念	279
第二节	基本定律	232
第三节	辐射换热的计算	289
第四节	气体辐射	300
第十章	稳定传热	310
第一节	复合换热	310
第二节	通过平壁和圆筒壁的稳定传热计算	312
第三节	通过肋壁的传热计算	316
第四节	增强传热	321
第十一章	换热器	328
第一节	间壁式换热器基本构造	328

第二节	平均温度差	333
第三节	换热器传热计算基本方法	339
第十二章	不稳定传热	352
第一节	不稳定传热的一般概念	352
第二节	导热微分方程和单值性条件	356
第三节	恒热流作用下不稳定传热	362
第四节	周期性热作用下不稳定传热	369
第十三章	质交换	382
第一节	质交换的基本方式	382
第二节	扩散的基本定律	383
第三节	对流质交换和对流换热的类似	391
第四节	雷诺类似律应用于对流质交换	394
第五节	对流质交换的准则方程式	397
参考文献		404
附录		406

绪 论

在供热通风和其他一切工程技术领域里，在人们的生活中，一刻也不能离开能量。能量的形式多种多样，诸如：热能、机械能、电能、化学能、原子能、风能、太阳能、水能、地热能等等。由燃料的化学能通过燃烧发出的热能，则是目前应用十分广泛的一种。热能的利用不外两种形式，一是将热能转变为机械能、电能；一是直接利用热能作为加热用。尽管热能的利用方式在各个领域中有所不同，但根本的一个问题是如何合理有效地利用，因此，就提出了研究和掌握热能利用中的规律问题。

《供热通风热工理论基础》一书的任务就是要分析研究热能利用中的普遍规律及其在供热通风工程中所特有的矛盾。它的主要内容及其与供热通风专业的关系，可从以下四个实例中获得梗概的了解。

1. 蒸汽喷射热水采暖系统 如图 0-1 所示，水在锅炉中被加热变成一定压力、一定温度的蒸汽，蒸汽进入蒸汽喷射器，由于压力蒸汽的喷射作用将水加热并送至车间，再通过各种散热设

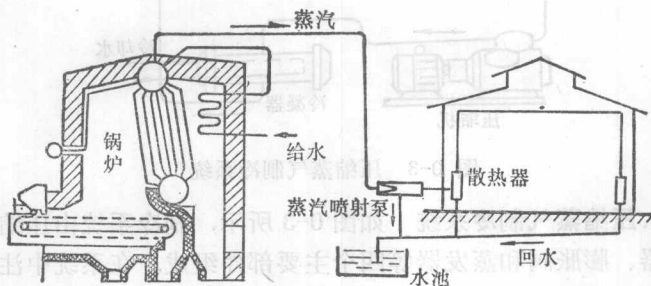


图 0-1 蒸汽喷射热水采暖系统

备，如散热器、热风机、辐射采暖板等等向车间供热，热水则依靠喷射器中蒸汽产生的喷射作用在供暖系统中进行循环。

2. 空气调节系统 如图 0-2 所示，为了保持车间的温度及湿度，采用空调室处理空气，使之具备一定的温度及湿度，再用风机送入车间。在冬季，气温低，空气干燥，则须在空调室内对空气进行加热与加湿处理；在夏季，气温高，空气有时湿度较大，就必须在空调室中进行降温及去湿处理，降温所需冷却水，大都采用冷冻机制备。

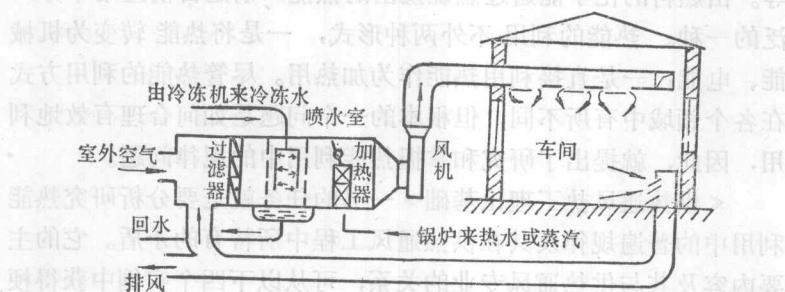


图 0-2 空气调节系统

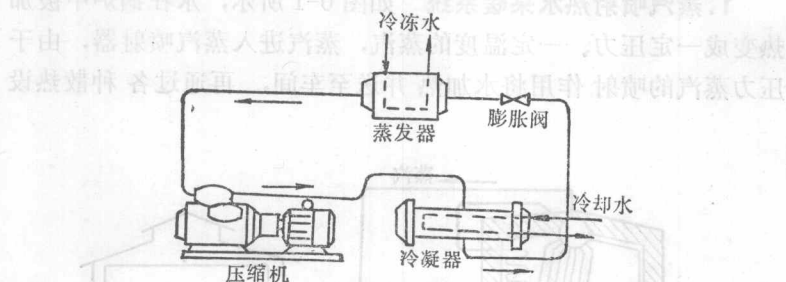


图 0-3 压缩蒸气制冷系统

3. 压缩蒸气制冷系统 如图 0-3 所示，制冷系统由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器等四个主要部件组成。在系统中注入制冷剂（氨或氟利昂），首先，压缩机由蒸发器吸入气态制冷剂，然后进行压缩，压力升高进入冷凝器，在冷凝器中高压的气态制

制冷剂被冷却水冷凝成液体状态，液态制冷剂再经膨胀阀减压后进入蒸发器，在蒸发器中低压的液态制冷剂蒸发，吸取冷冻水热量，使冷冻水温度降低。从蒸发器出来的气态制冷剂再进入压缩机，制冷剂在系统中不断循环。

4. 蒸汽动力循环 图 0-4 是一般火力发电厂的生产过程。水在锅炉中被加热，产生高温高压蒸汽，进入汽轮机推动叶轮，把热能转变为机械能，带动发电机发出电能。做完功的乏汽，进入冷凝器，被冷却水冷凝成水，再经给水泵重新打到锅炉中去。这就是蒸汽动力循环，它使热能转变为电能。锅炉、汽轮机、冷凝器、给水泵是循环中的主要设备。对于热电厂，则从汽轮机中部抽出一部分具有一定压力的蒸汽，供给热网用户使用，这样可以提高热能利用率。

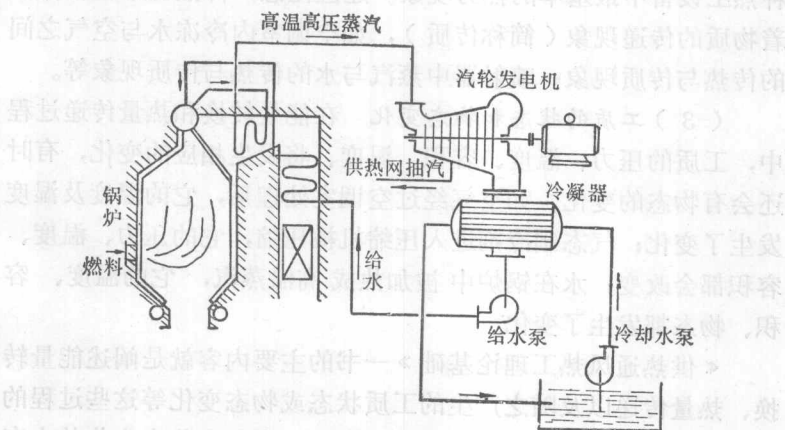


图 0-4 蒸汽动力循环

以上所举都是与供热通风专业有关的几个典型设备系统。在这些系统中，锅炉、喷射器、压缩机、冷凝器、蒸发器、汽轮机等称为热工设备。在这些系统中，使用了不同的工作物质，如水、空气、蒸汽、制冷剂等，这些工作物质统称工质。工质在系统中不断循环，循环中工质的压力、温度及容积将发生相应的变化，出现一系列的热力现象，这些现象概括起来有以下几方面。

(1) 能量的转换 在蒸汽动力循环中，加进锅炉的煤燃烧

产生的热能，通过循环，一部分变成了电能。在压缩制冷系统中，压缩机消耗了电能，其结果是从低温物体（冷冻水）取出热量，并把它排到高温物体（冷凝器的冷却水）中去。在蒸汽喷射热水采暖系统中，蒸汽进入喷射器后发生膨胀产生高速汽流，推动供暖热水不断流动，这中间发生了热能转变为动能的过程。凡此等等，都是能量形式的转换。

（2）传热现象与传质现象 在这些系统中，存在着大量的热量传递过程，如锅炉的烟气通过管壁把热量传给水；冷凝器内蒸气把热量传给了冷却水；供暖热水通过散热器向室内散热；空调室内，冷水与空气直接接触，从而使空气温度下降。凡此等等，都是温度高的工质向温度低的工质传递热量。传热现象是各种热工设备中最基本的热力现象。还应注意，传热现象往往伴随着物质的传递现象（简称传质），如空调室内冷冻水与空气之间的传热与传质现象；喷射器中蒸汽与水的传热与传质现象等。

（3）工质的状态和物态变化 在能量转换和热量传递过程中，工质的压力、温度、容积、湿度、将发生相应的变化，有时还会有物态的变化。如空气经过空调室处理后，它的温度及湿度发生了变化；气态制冷剂进入压缩机被压缩，它的压力、温度、容积都会改变；水在锅炉中被加热成高温蒸汽，它的温度、容积、物态都发生了变化。

《供热通风热工理论基础》一书的主要内容就是阐述能量转换、热量传递以及随之产生的工质状态或物态变化等这些过程的实质和规律。例如，工质的压力、温度、容积和物态变化的内在规律是什么？工质在放热或吸热时热量如何计算？能量转换时的规律如何？怎样评价能量利用的效率？热量的传递过程又应如何分析及计算？等等。所有这些方面，都是热能利用领域中经常遇到的问题，也是本书试图阐明和回答的问题。

本书第一篇工程热力学将叙述工质状态变化、热量计算及能量转换的基本规律。第二篇传热学为热量传递问题的分析与计算，同时还将对传质现象作一概述。

第一篇 工程热力学

引言

工程热力学主要是研究热能与机械能之间相互转换的规律和工质的热力性质的一门科学。

对供热通风专业来说, 工程中常遇到的是工质在加热、冷却, 蒸发、凝结, 加湿、去湿等过程中的状态变化和热量计算, 以及工质在流动或压缩、膨胀过程中的状态变化和能量转换问题。而对于作为动力装置理论基础的工作循环的研究则是次要的。因此, 本篇的主要内容是论述气体、水蒸汽和湿空气等各种工质的热力性质, 热量计算, 热力学的基本定律, 气体的流动, 以及气体的压缩和制冷原理。

工程热力学的研究方法是宏观的方法, 即通过工质受热或冷却、膨胀或压缩时所呈现出来的宏观特征(如压力、温度、比容、速度等), 用已被无数事实所证明了的热力学第一定律和热力学第二定律这两条基本规律为基础, 对工质的状态变化和能量转换等进行分析推理。这种研究方法不涉及工质内部的分子和原子的微观结构和这些微粒的运动规律。宏观的研究方法比较简单, 结论可靠, 但它对与物质内部结构有关的一些具体现象则无法解释。因此, 工程热力学中对个别有关的热现象有时要用分子运动理论, 即微观的方法来补充说明其本质及内在原因。

工程热力学中, 常常要对所研究的对象作某些假定, 使之理想化, 以略去次要因素的影响, 突出主要矛盾。例如提出了理想气体、平衡状态、可逆过程、绝热过程等一些概念。这样就可以减少所考虑的因素, 简化分析计算的过程, 从而容易得出概括性的结论和比较简单的数学表达式。这些在理想条件下得出的结论和数学表达式, 揭露了事物的本质, 具有普遍意义。至于与实际条件的偏差, 则可根据工程上应用时的具体情况加以必要的修正。

第一章 气体的热力性质及热量计算

从绪论中介绍的几个典型的热力系统可以看到,燃料在炉膛中燃烧产生高温的烟气,用来加热锅炉中的水,使它转变成水蒸汽。在供热通风工程中可以利用水蒸汽作为热媒加热空气,以满足室内所需要的热量;在蒸汽动力循环中可以利用水蒸汽推动汽轮机带动发电机发电。烟气、水蒸汽、空气等都是携带热能的工作物质,统称为工质。在工程中遇到的工质是多种多样的,有处于气体或蒸汽状态,也有处于液体状态的。本章着重介绍理想气体(如空气、烟气等一般可视为理想气体)的热力性质,以及理想气体热力状态发生变化时的热量计算。至于其他工质将在以后章节介绍。

为了说明热力现象及热力学定律的本质,本章首先对分子运动论作一简单介绍。

第一节 分子运动论基本概念

恩格斯在《自然辩证法》中指出:“发现热是一种分子运动,这是划时代的。”分子运动论的基本观点揭示了各种热力现象和热力学定律的本质。

现将分子运动论基本观点简述如下:

1-1 物质由分子组成

在我们周围存在着各种各样的物质,如空气、水、煤、金属等等。所有的物质都可以分割成很小的微粒,坚硬的钢铁可以用锉刀锉成很细的粉末,水可以喷成雾状的小颗粒……。还可以把