

热工学理论基础

西北建筑工程学院 王天富
长春冶金建筑学校 范惠民 编



中等专业学校试用教材

中国建筑工业出版社

本书是建筑类中等专业学校水暖与通风专业的试用教材之一。全书包括工程热力学和传热学两部分，共分十五章。书中结合水暖与通风工程的特点以及本专业的实际需要，叙述了工质的状态参数和气体状态方程，热力学基本定律，气体的热力过程及热量计算，混合气体、水蒸汽和湿空气的性质，气体和蒸汽的流动与节流，以及气体的压缩和制冷循环等基础理论知识；同时还阐述了导热、对流和辐射换热过程以及稳定传热的基本理论，换热器的计算，并对不稳定传热的基本概念作了简要的介绍。书中注意了基本概念和基础理论的阐述以及在本专业的实际应用，各章均编有一定数量的例题和习题，便于自学。

本书也可供从事水暖与通风工作的技术人员参考，并可供技术工人学习。

中等专业学校试用教材
热 工 学 理 论 基 础

西北建筑工程学院 王天富
长春冶金建筑学校 范惠民 编

*

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(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：15¼ 插页：2 字数：380 千字

1982年7月第一版 1982年7月第一次印刷

印数：1—14,400 册 定价：1.45 元

统一书号：15040·4287

前 言

“热工学理论基础”是建筑类中等专业学校水暖与通风专业的主要技术基础课之一，是从事本专业工作的中等技术人员必须掌握的基础理论知识。

本书是根据1981年1月修订的“热工学理论基础”教学大纲（送审稿）进行编写的，内容包括工程热力学和传热学两部分。编写时充分考虑到既要加强基础理论教学和基本技能训练，又要紧密结合本专业的实际需要和便于学生自学。同时，也注意到本书与其它专业课教材的衔接，避免了不必要的重复。在文字叙述上力求通俗易懂，深入浅出，说理清楚，并编有一定数量的例题。全书共有习题 266 道，供选做。本书以采用米制单位（即工程单位制）为主，并相应地介绍国际单位制，以便逐步地向国际单位制过渡。

本书由西北建筑工程学院王天富担任主编。第一篇工程热力学部分由王天富同志执笔；第二篇传热学部分由长春冶金建筑学校范惠民同志执笔。并由黑龙江省建筑工程学校卜广林同志主审。由于我们水平所限，书中难免有缺点甚至错误，请读者批评指正，以便再版时修改补充。

编 者

1981年8月

基 本 符 号

英文符号	名 称
A	功的热当量; 吸收率
a	音速; 导温系数
B	大气压力
C	辐射系数
C_0	绝对黑体辐射系数
c	重量比热; 临界点
c'	容积比热
μc	摩尔比热
D	直径; 穿透率; 热惰性指标
d	直径; 含湿量
E	辐射力
E_0	绝对黑体辐射力
E_λ	单色辐射力
F	表面积; 散热面积
f	截面积
G	重量; 重量流量
g	重力加速度; 重量成分
h	高度; 液柱高
i	焓
K	传热系数; 辐射线减弱系数
L	功量
l	单位功
M	马赫数
N	功率; 分子数目
n	多变指数
P	压力
p	压力
Q	热量; 传热量
q	热量; 热流量
R	气体常数; 半径; 反射率; 热阻; 传热阻

英文符号	名 称
r	半径; 汽化潜热; 容积成分
S	总熵; 辐射线平均行程
s	熵; 蓄热系数
T	绝对温度
t	摄氏温度
U	总内能
u	单位重量内能
V	气体体积; 体积流量
v	比容
W	水当量
w	流速
x	干度
z	位能; 周期

希腊文符号	名 称
α	放热系数
β	体积膨胀系数; 压力比; 形状修正系数
γ	重度
δ	厚度
ε	黑度
ε_1	制冷系数
ε_2	供热系数
ε_{dt}	温差校正系数
η	效率; 制冷机效率
η_t	热循环效率
κ	绝热指数 (比热比)
λ	导热系数; 波长
λ_v	容积效率
μ	分子量; 动力粘度
ν	运动粘度

希腊文符号	名 称
ξ	延迟时间
ρ	密度
τ	时间
φ	相对湿度; 角系数
σ	辐射常数
θ	温度系数; 过余温度

相 似 准 则

$$\text{Bi} = \frac{\alpha l}{\lambda_b} \quad \text{——毕渥准则}$$

相 似 准 则

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{l^2} \quad \text{——付立叶准则}$$

$$\text{Gr} = \frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2} \quad \text{——格拉晓夫准则}$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad \text{——努谢尔特准则}$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \quad \text{——普朗特准则}$$

$$\text{Re} = \frac{wl}{\nu} \quad \text{——雷诺准则}$$

目 录

基本符号

绪 论	1
-----------	---

第一篇 工程热力学

第一章 工质及理想气体定律	2
第一节 工质的基本状态参数	2
第二节 理想气体定律	9
第二章 混合气体	20
第一节 分压力与总压力	20
第二节 分容积与总容积	21
第三节 混合气体成分的表示方法	22
第四节 混合气体的平均分子量、气体常数及分压力	23
第三章 气体的比热和热量	27
第一节 热量与比热的概念	27
第二节 真实比热与平均比热	31
第三节 应用比热进行热量计算	33
第四节 混合气体的比热	35
第四章 热力学第一定律和气体的热力过程	38
第一节 热力学第一定律	39
第二节 稳定流动能量方程式及工质的焓	42
第三节 气体的热力过程	44
第五章 热力学第二定律	56
第一节 循环及热效率	56
第二节 热力学第二定律的内容	59
第三节 熵和温熵图	60
第四节 卡诺循环	62
第六章 水蒸汽	67
第一节 水的物态变化	67
第二节 定压下水蒸汽的生产过程	70
第三节 水蒸汽状态参数的确定和水蒸汽表	73
第四节 水蒸汽的焓熵图 ($i-s$ 图)	79
第七章 湿空气	84
第一节 概述	84
第二节 湿空气的性质及其状态参数	85
第三节 湿空气的焓湿图 ($i-d$ 图)	94
第八章 气体和蒸汽的流动与节流	103
第一节 气体在喷管中的流动规律	103

第二节 通过喷管流速和流量的计算	106
第三节 气体和蒸汽的节流	111
第九章 气体的压缩和制冷循环	114
第一节 气体压缩的基本原理	114
第二节 蒸气压缩式制冷循环	119

第二篇 传 热 学

概 述	128
第十章 稳定导热	129
第一节 温度场和温度梯度	129
第二节 导热基本定律	130
第三节 单层和多层平壁的导热	132
第四节 圆筒壁的导热	135
第五节 通过复合壁的导热	140
第十一章 对流换热	144
第一节 对流换热的特征和影响因素	144
第二节 相似理论及其在对流换热中的应用	145
第三节 流体自由运动时的放热	149
第四节 流体受迫运动时的放热	155
第五节 流体集态改变时的放热	167
第十二章 辐射换热	175
第一节 热辐射的基本概念	175
第二节 热辐射的基本定律	177
第三节 物体间的辐射换热	180
第四节 气体辐射	186
第十三章 稳定传热	193
第一节 复合换热	193
第二节 通过平壁的传热	194
第三节 通过圆筒壁的传热	196
第四节 传热的增强	199
第五节 热绝缘	203
第十四章 换热器	207
第一节 换热器的型式及工作原理	207
第二节 换热器的热力计算原理	208
第三节 平均温度差的计算	210
第四节 换热器设计计算	213
第十五章 不稳定传热	216
第一节 不稳定传热的基本概念	216
第二节 导热微分方程式	218
第三节 恒热流作用下的不稳定传热	220
第四节 周期性热作用下的不稳定传热	222
附 录	227

绪 论

《热工学》是水暖与通风专业的主要技术基础课之一，它包括工程热力学和传热学两大部分。

大家知道，无论是工农业生产、科学实验还是人们的日常生活，都是一刻也不能离开能量的。在自然界中存在着各种形式的能量，例如：机械能、热能、电能、化学能、原子能、太阳能、水能和地热能等等，其中热能是所有能量形式中最主要并且使用最广泛的一种能。

人们对于热能的利用，概括地说主要有两种形式：一种是将热能转变为机械能或电能而加以利用，这种能量形式的转换是通过热机（汽轮机、蒸汽机和内燃机等）来实现的。例如，在火力发电厂，煤在锅炉中燃烧，放出热量，使锅炉内的水受热汽化变为高温高压的蒸汽，这种水蒸汽进入汽轮机内，推动汽轮机的转子旋转，把热能转变为机械能；与此同时，汽轮机带动同一轴上的发电机旋转而发出电力，这时又把机械能转换为电能。另一种是把热能直接当作加热的能量来源而加以利用。在供热通风工程中所涉及到的主要是直接利用热能的问题。例如，寒冷地区冬季室内的采暖装置，就是将锅炉中产生的热水或蒸汽输送到设在房间里的散热器中，热水或蒸汽通过散热器把热量传递给室内空气，提高空气的温度，以补偿通过房屋围护结构（墙壁、屋顶、地面、门、窗等）的热损失。

工程热力学主要是研究热能与机械能之间相互转换规律的一门科学。这种能量转换是通过某种工作物质（简称工质）的热力状态变化来实现的。在工程上，实现这种能量转换的最适宜工质就是气体介质（例如水蒸汽），因此除研究能量转换规律外，还要研究有关气体工质的热力学性质。工程热力学从工程技术观点出发，把热力学基本定律——热力学第一定律和第二定律应用到工程技术领域中去，讨论热能转换为机械能的规律和方法，以及有效利用热能的途径。

传热是自然界中普遍存在的现象，凡有温度差的地方，就有传热现象发生，而热量总是自发地从高温物体传到低温物体。传热学就是研究热量传递过程规律的一门科学。把传热学应用于工程实践中，不仅要掌握传热过程的基本规律，从而认识、控制传热过程的方法，而且还要解决工程技术中遇到的如何增强传热或减弱传热的问题。

对于水暖与通风专业来说，在学习“供热工程”、“通风工程”、“工业管道工程”和“锅炉与锅炉房设备”等专业课时，大量遇到的是工质在加热、冷却、蒸发、凝结、加湿和除湿等过程中的状态变化和热量的计算，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。高温工质以不同的方式向低温工质传递热量，则是本专业各种热能利用设备（例如锅炉设备、采暖系统、空气调节系统和压缩制冷系统等）的最基本热工现象，有效地增强热工设备的传热，或者减弱热力管道或其它用热设备的对外传热，这对于提高换热设备的生产能力（或缩小热工设备的尺寸），减少热量损失，节约能源具有重要的意义。因此，通过本课程的学习，要求学生掌握有关热力学基本定律、气体工质性质、工质的状态参数以及变化时的热量计算等基础理论知识；要求掌握导热、对流和辐射换热过程以及稳定传热的基础理论，了解不稳定传热的基本概念，为专业课的热工计算和热力分析打下理论基础，并获得初步的计算和分析能力。

第一篇 工程热力学

第一章 工质及理想气体定律

当煤或其它气体、液体燃料在锅炉中燃烧时，产生高温烟气，烟气把热量传递给锅炉中的水，使它转变为高温高压的水蒸汽，而具有热能的水蒸汽可用来推动汽轮机带动发电机发电。在这里，烟气和水蒸汽在实现将热能转变为机械能的过程中起了媒介作用；在采暖系统中，可将水蒸汽或热水送入散热器中，加热室内空气，以补偿室内所需的热量，此时水蒸汽、热水和空气就成为传递热能的媒介物质。总之，凡是用来将热能转变为机械能的或者用来传递热能的媒介物质统称为工质。

工程上所遇到的工质是多种多样的，有处于气体状态（或蒸汽状态）的，也有处于液体状态的。本课程主要研究气体工质（例如空气、烟气和水蒸汽）的热工性质以及工质状态发生变化时的热量计算等问题。

第一节 工质的基本状态参数

工质在进行能量转换和热量传递的过程中将发生状态的变化。工质的状态是通过描述状态特性的各种物理量来表示的，这些物理量称为工质的状态参数。对于某一确定的热力状态来说，它的状态参数便有确定的数值，若工质状态发生变化，其状态参数的数值也起变化。

常用的工质状态参数有温度、压力、比容（或重度）、内能、焓和熵等六个。其中温度、压力和比容是可以直接或间接地用仪器测量出来的，称为工质的基本状态参数，而其余三个参数则是由基本状态参数通过计算方法导出来的，所以把内能、焓和熵称为导出状态参数。

在介绍基本状态参数之前，需要说明一下工程热力学的研究方法。在自然界中，凡人们看得见的并可用简易办法度量的物体称为宏观物体。一切宏观物体都是由微小粒子——分子所组成，而分子又由原子组成。这些看不见的而又无法用普通方法度量的物体叫做微观物体。工程热力学只研究宏观物体和通过工质受热或冷却、膨胀或收缩所呈现出来的宏观现象，如压力、温度和比容等一些物理量，通常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。然而，分子运动理论告诉我们，分子在作不停顿的无规则的运动是一切热现象的本质。因此，为了更好地阐明气体工质的宏观现象，有时要用分子运动理论，即用微观的方法来说明其本质及内在的原因。

一、温度

温度用来表示物体的冷热程度，物体温度的高低确定了热量传递的方向，例如温度高

的物体就会自发地把热量传递给温度低的物体。

根据物理学中分子运动理论可知,组成气体的分子总是在不停地作无规则运动的,运动着的分子具有动能。由于各个分子平移运动速度的大小和方向各不相同,它们的动能也不相等,因此需要确定分子运动的平均动能来阐明大量分子热运动的情况。

设单位容积内气体分子的数目为 n 个,气体中各个分子平移运动的速度分别用 w_1 、 w_2 、 w_3 、…… w_n 表示,而气体分子平移运动平均速度可取其均方根速度,即

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2}{n}} \quad (1-1)$$

理论研究表明,气体温度愈高,分子运动就愈强烈,分子运动的平均速度(即均方根速度)就愈大,分子的平均动能也就愈大。因此,从分子运动论的观点来看,温度是物质分子平移运动平均动能的度量标准。换句话说,温度的高低,实质上反映了大量分子热运动平均动能的大小。它们的关系是:

$$\frac{m\bar{w}^2}{2} = BT \quad (1-2)$$

式中 $\frac{m\bar{w}^2}{2}$ ——分子平移运动的平均动能,其中 m 为分子的质量, $\bar{w}^2$ 为分子平移运动的均方根速度;

B ——比例常数;

T ——气体的绝对温度。

上面这个关系式是用微观的方法进一步揭示了物体冷热程度的本质。说明气体的温度与大量分子热运动的平均动能成正比。

下面分别来讨论温标和温度测量的一般知识。

(一) 温标

物体的温度常用各种测温仪表来测量。要测出物体的温度,首先必须确定温标。所谓温标是指衡量温度高低的标尺,它规定了温度的起点(零点)和测量温度的单位。

目前国际上常用的温标有摄氏温标和绝对温标两种:

1. 摄氏温标:又名百度温标,是我国使用最广泛的一种温标。这种温标规定:在标准大气压下(760mmHg)把纯水的冰点定为零度,沸点定为100度,在冰点与沸点之间等分为100个分格,每一格的刻度就是摄氏温度1度,用符号 t 表示,其单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。此外,还可以用同样的间隔继续标出 0°C 以下和 100°C 以上的刻度。

2. 绝对温标:即热力学温标,又名开尔文温标,用符号 T 表示,其单位符号为 K 。这种温标是以气体分子热运动平均动能趋于零的温度为起点,定为 0K ,并以水的三相点温度为基本定点,定为 273.16K ,于是 1K 就是水三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ 。

绝对温标 1K 与摄氏温标 1°C 的间隔是完全相同的。在一个标准大气压下,纯水冰点的热力学温度为 273.15K ,它比水的三相点热力学温度低 0.01K ,水的沸点为 373.15K 。绝对温标与摄氏温标的关系是

$$T = 273.15 + t \quad \text{K} \quad (1-3)$$

在不需要精确计算的情况下,可以近似地认为,同一物体的绝对温度比摄氏温度大 273 度,即 $T = 273 + t$ 。

此外,在英、美等国家还习惯采用华氏温标,用符号 t 表示,其单位符号为 $^{\circ}\text{F}$ 。这种温标规定,在标准大气压下,纯水的冰点和沸点分别定为 32°F 和 212°F 。若将摄氏温标与华氏温标相对照,不难看出水的冰点摄氏 0°C 相当于华氏 32°F , 水的沸点摄氏 100°C 相当于华氏 212°F 。显然,摄氏温标100度的间隔相当于华氏温标180度的间隔,所以摄氏温标1度的间隔相当于华氏温标 $\frac{9}{5}$ 度的间隔。

摄氏温标与华氏温标之间的换算关系如下:

$$t^{\circ}\text{F} = 32 + \frac{9}{5} t^{\circ}\text{C} \quad (1-4)$$

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

在国际单位制中,是用热力学温度的开尔文温标来代替摄氏温标和华氏温标。

(二) 温度测量的一般知识

测量温度的仪表叫温度计。物体的温度测量是通过观察某些测温物质(例如水银和酒精)以及热电偶和热电阻等感温元件在受热时物理性质的变化间接地加以确定的。测温物质或感温元件的这种物理性质有:热膨胀性、热电效应和物体受热时的电阻变化等。

按照测温物质的测温原理不同,温度计可分为很多种,主要的有玻璃管温度计、热电偶温度计和热电阻温度计等。

1. 玻璃管温度计 它是利用玻璃管内的液体(如水银或酒精)受热膨胀、受冷收缩的特性来测量温度的,这种温度计如图1-1所示。当物体温度发生变化时,玻璃管内的液面随之上升或下降,根据液面所处的位置,从标尺上即可读得温度的数值。由于水银到 -39°C 时就要凝结成固体,酒精到 78°C 时就要沸腾成气体,所以水银温度计的测温范围为 $-30 \sim 700^{\circ}\text{C}$, 酒精温度计的测温范围为 $-100 \sim 75^{\circ}\text{C}$ 。

2. 热电偶温度计 它是根据物体热电效应特性制成的测温仪表,其测温原理如图1-2所示。根据物理学可知,将两种不同性质的金属(例如铜与康铜,铂-铑-铂等)线的一端焊在一起,另一端与测温毫伏计联接构成一闭合回路,若两端所处的温度不同,则在闭合回路中就会有热电势产生,这种现象称为热电效应。由图1-2可以看出,将两根不同的金



图 1-1 玻璃管温度计

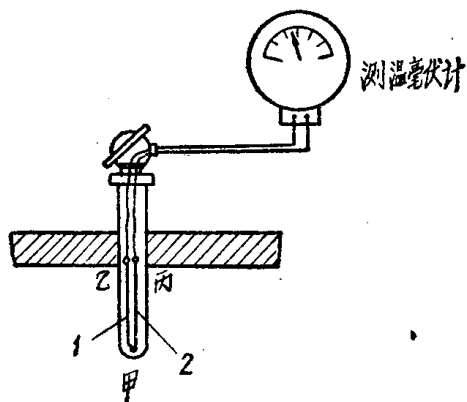


图 1-2 热电偶测温示意图

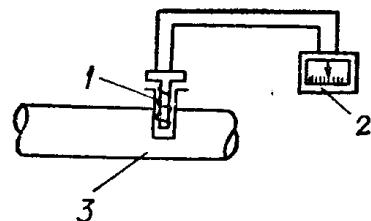


图 1-3 热电阻温度计示意图
1—热电阻测温元件; 2—测温比率计; 3—被测物体

属线1和2的一端甲焊在一起,放在被测的高温处作为热端,另一端乙和丙放在室温处作为冷端。再用导线与测温毫伏计相连,就构成测温装置。

测量物体温度时,由于热端与冷端的温度不同而产生热电势,毫伏计的指针移动指示出热电势的数值。被测物体的温度越高,热电偶热端与冷端的温差就越大,因而产生的热电势也越大,指针移动的距离也就越大。这样就可以从毫伏计上直接读出被测物体的温度。铜-康铜热电偶的测温范围为 $-50\sim 350^{\circ}\text{C}$,铂-铑-铂的测温范围为 $-20\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。

3. 热电阻温度计 它是根据某些金属的电阻值随着温度的升高而增大的特性制成的。通常可将热电阻测温元件(如铂、铜和镍等)放在被测的介质中,再用导线接到测温比率计。当被测介质的温度变化时,测温元件的电阻值也随之发生变化,这时比率计的指针偏转,指示出温度的读数,这种温度计的工作原理如图1-3所示。热电阻温度计的测温范围约为 $0\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

二、压力

(一) 压力的概念

根据物理学知识,流体作用于容器壁单位面积上的垂直作用力称为压强,而在工程上人们往往习惯地把压强简称为压力。今后凡在本课程和其他专业课中涉及到压力的概念,都是指单位面积上承受的作用力而言的。

气体分子运动论告诉我们,在充满气体的容器中,大量分子总是永远不停地在作无规则的热运动,并且从各个方向不断地撞击着容器的壁面,其结果在宏观上形成了气体对器壁的作用力。这个作用力的大小取决于单位时间内受到分子撞击的次数,以及每次撞击的力量大小。单位时间内的撞击次数越多,每次撞击的力量越大,作用于容器壁的压力也越大。因此,气体的压力就是气体分子对容器壁碰撞的平均效果。

根据理论推导结果,作用于器壁上的压力 p 与分子的数目、分子平移运动的平均动能有关,并由下式求得:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \bar{w}^2}{2} \quad (1-6)$$

式中 n ——分子浓度,即单位容积内的分子数 $n = \frac{N}{V}$;

N ——容器为 V 时,容器中气体的分子总数。

由式(1-6)可以看出,气体的压力等于单位容积所含的分子平均动能的三分之二。若单位容积内所含的分子数目愈多,平均动能愈大,则气体的压力也就愈大。该式是气体分子运动理论的基本方程式,它的重要意义在于把宏观量 p 和微观量 n 和 $\frac{1}{2} m \bar{w}^2$ 联系起来,阐明了气体压力的本质。

(二) 压力的单位

在工程单位制即米制中,工质的压力大小有以下三种表示方法:

1. 以单位面积上所受的作用力来表示,例如公斤/厘米² (kg/cm^2)或公斤/米² (kg/m^2)。

2. 用液柱高度来表示,例如米水柱(mH_2O)、毫米水柱(mmH_2O)和毫米汞柱(mmHg)。

3. 用大气压来表示。地球表面包围着一层厚达几百公里的大气层。大气重量对地球表

面上所造成的压力称为大气压力，用符号 B 表示，常用单位是 mmHg。大气压力的数值随着所在地区海拔高度的升高而降低，也就是说，海拔越高，空气越稀薄，大气压力也就越低。就是在同一地区，大气压力的数值也因季节、晴雨等气候变化而稍有变化。例如，北京市冬季的平均大气压力为 767mmHg，夏季平均为 751 mmHg，而在海拔很高的拉萨市全年平均大气压力为 488mmHg。

国际上规定，将纬度 45° 海平面上测得的全年平均大气压力 760mmHg 定为一个标准大气压，或者称为物理大气压。它与其它压力单位的换算关系是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 标准大气压 (atm)} &= 760 \text{ mmHg} \\ &= 1.0332 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 10332 \text{ kg/m}^2 \\ &= 10332 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

工程上为了计算方便，规定 1 kg/cm^2 作为一个工程大气压，简称气压 (at)，于是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压 (at)} &= 1 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 10000 \text{ kg/m}^2 \\ &= 10 \text{ mH}_2\text{O} \\ &= 10000 \text{ mmH}_2\text{O} \\ &= 735.6 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{由此可得 } 1 \text{ mmH}_2\text{O} &= 1 \text{ kg/m}^2 \\ 1 \text{ mmHg} &= 13.6 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

应当注意，“标准大气压”和“工程大气压”都是压力的计量单位，不要与所在地区的实际大气压相混淆。在锅炉、氧气瓶以及高压容器中，工质的压力相当高，往往是几倍或几十倍于大气压的，因此，对这些设备中工质的压力计量单位通常用工程大气压表示。通风机的送风压力、风道和烟道中工质的压力较小，通常用毫米水柱表示。在实际工程中提到的大气压，除了特别注明是物理大气压外，一般都是指工程大气压。

在国际单位制中，压力的单位是帕斯卡，其代号为 Pa。1 帕斯卡是指 1 平方米表面上作用 1 牛顿 (N) 的力，即

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

由于帕斯卡的数值较小，它的 1000 倍称为千帕斯卡 (kPa)

$$1 \text{ kPa} = 1000 \text{ N/m}^2$$

暂时与国际单位制并用的压力单位还有巴 (bar)。巴的千分之一叫毫巴 (mbar)

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mbar} = 10^2 \text{ Pa}$$

米制与国际单位制压力换算关系如下：

$$1 \text{ 标准大气压} = 1.0332 \text{ kg/cm}^2 = 101325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 1.0 \text{ kg/cm}^2 = 98066 \text{ Pa} = 98.066 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ mH}_2\text{O} = 9806.6 \text{ Pa} = 9.8066 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 9.8066 \text{ Pa} \approx 9.81 \text{ Pa}$$

(三) 绝对压力、表压力和真空度

工质的压力可以通过测压仪表直接测出来，最简单的测压仪表是“U”形管压力计。

这种压力计的管内装有水银或水，当U形管的两端均通大气时，由于两侧压力平衡，两侧的液面高度相等。测量时可将其一端与被测容器相连，另一端通大气。这里，存在着以下两种情况：

1. 当容器内压力高于外界大气压时（图1-4），该压力将一部分液体从左管压向右管，形成了液柱差。这段液柱高度表示容器内的工质压力超过大气压力的数值，称为表压力或相对压力，以符号 P_b 表示，若以气压表示的表压力单位记作atg。

容器内工质压力的实际数值叫做绝对压力，以符号 P_{jd} 表示，若以气压表示的绝对压力单位记作ata。于是

$$P_{jd} = B + P_b \quad (1-7)$$

式中 B ——当时当地的大气压力。

2. 当容器内压力低于外界大气压时（图1-5），大气压力将液柱从右管压向左管，形成了液柱差。这段液柱高度表示容器内工质的压力比大气压力低的那部分数值，称为真空度，以符号 P_k 表示。显然，此时容器内工质的绝对压力为：

$$P_{jd} = B - P_k \quad (1-8)$$

为了进一步理解绝对压力、表压力和真空度与大气压力之间的相互关系，可用图1-6来加以说明。图中0—0线表示绝对真空线，所谓绝对压力是指以绝对真空为计算起点的压力。A—A线表示大气压力线，它比绝对真空线高出 B 的值。1—1线代表被测容器的压力大于外界大气压的情况，即处于正压状态；2—2线表示小于大气压的情况，即处于负压状态。由此可见，表压力和真空度都是以大气压力为计算起点，前者是高出大气压力的那一部分，后者是低于大气压力的那一部分。

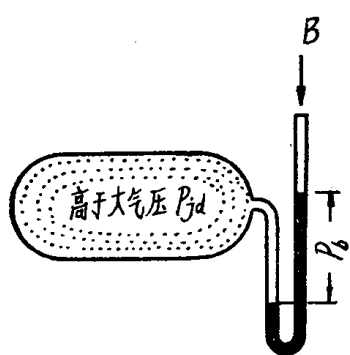


图 1-4 当容器内压力高于大气压力时的情况

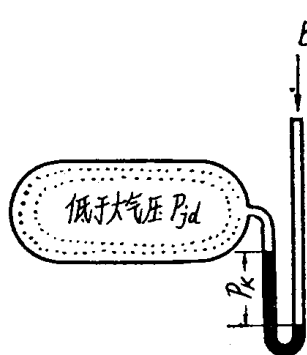


图 1-5 当容器内压力低于大气压力时的情况

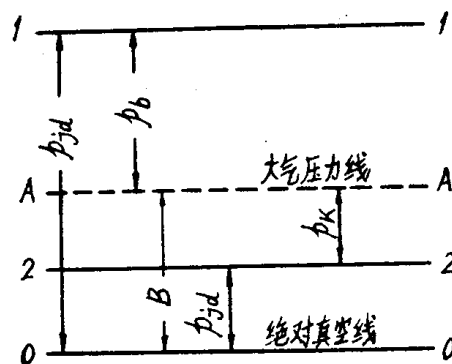


图 1-6 三种压力的关系图式

必须指出，在绝对压力、表压力和真空度这三者中，绝对压力才是真正代表工质所具有的实际压力，而表压力和真空度则是用压力计或真空表测得的相对数值。知道了工质的表压力和真空度后，便可按公式（1-7）和（1-8）求出绝对压力的数值。这里就有一个如何确定所在地区大气压力 B 的问题。

所在地区的大气压力的数值，可用水银气压计测出或查有关气象资料。在工程计算中，当容器内工质压力较高时，则往往把大气压力 B 值近似地取为 1 kg/cm^2 ，这样处理在计算中所引起的误差微不足道，可以忽略不计。当容器内工质压力较低时，特别是计算处于负压状态的容器绝对压力时，若取 $B = 1 \text{ kg/cm}^2$ 或 735.6 mmHg ，则会引起较大的

误差, 因此应采取当时当地实测的大气压力数值。

有关压力测量的一般知识, 在“流体力学”课程中已作介绍, 这里不再重复。

【例 1-1】某锅炉上压力表指出蒸汽压力为 3 kg/cm^2 , 当时水银气压计上的读数为 700 mmHg , 试求锅炉中蒸汽的绝对压力。

【解】按公式 (1-7), $P_{jd} = B + P_b$

$$\text{当地大气压力 } B = \frac{700}{735.6} = 0.95 \text{ kg/cm}^2$$

所以锅炉中蒸汽的绝对压力为

$$P_{jd} = 0.95 + 3 = 3.95 \text{ kg/cm}^2$$

【例 1-2】某蒸汽锅炉压力表读数 $P_b = 40 \text{ kg/cm}^2$, 当地气压计读数为 750 mmHg , 试求该锅炉中蒸汽的绝对压力, 并用工程大气压表示。

【解】锅炉中的绝对压力可按式 (1-7) 计算

$$P_{jd} = B + P_b = \frac{750}{735.6} + 40 = 1.02 + 40 = 41.02 \text{ kg/cm}^2$$

在计算高压容器中绝对压力时, 可以近似地取 $B = 1 \text{ kg/cm}^2$, 这样

$$P_{jd} = B + P_b = 1 + 40 = 41 \text{ kg/cm}^2$$

由于 B 取近似值所引起的相对误差

$$\frac{41.02 - 41}{41.02} = 0.049\%$$

可见, 这个相对误差是很微小的。

【例 1-3】某凝汽器的真空表读数为 720 mmHg , 当地气压计读数为 750 mmHg , 试求工质的绝对压力, 并用毫米汞柱来表示。

【解】凝汽器中工质的绝对压力, 可按式 (1-8) 计算

$$P_{jd} = B - P_k = 750 - 720 = 30 \text{ mmHg}$$

如果将当地大气压力 B 也近似地取为 1 kg/cm^2 或 735.6 mmHg , 则

$$P_{jd} = B - P_k = 735.6 - 720 = 15.6 \text{ mmHg}$$

由此引起的相对误差为

$$\frac{30 - 15.6}{30} = 48\%$$

显然, 这个误差是很大的, 因此在计算低压容器时, 就不允许用 1 工程大气压来代替当时当地的大气压力。

三、比容和重度

比容是指单位重量的工质所占有的容积 (即体积), 用符号 v 表示, 单位是 m^3/kg 。设容器内有 $G(\text{kg})$ 的工质, 所占的容积为 $V(\text{m}^3)$, 则该工质的比容为:

$$v = \frac{V}{G} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-9)$$

单位容积内工质所具有的重量称为重度, 用符号 γ 表示, 其单位是 kg/m^3 , 即

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ kg/m}^3 \quad (1-10)$$

比较一下公式 (1-9) 和 (1-10), 不难看出, 比容与重度两者互为倒数关系:

$$v = \frac{1}{\gamma}$$

或

$$v\gamma = 1 \quad (1-11)$$

比容和重度都是用来说明工质状态的物理量，在这两个参数中，只要知道其中一个，另一个也就被确定了。

在国际单位制中，质量 M 作为基本单位用公斤 (kg)，工质的体积为 V (m^3)，则单位体积所具有的质量称为密度，用符号 ρ 表示，其单位是 kg/m^3 。

相反，单位质量所占有的体积称为比体积(或比容)，用符号 v 表示，其单位是 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{M} \text{m}^3/\text{kg}$$

密度和比体积互为倒数，在国际单位制中取消重度 γ 。今后凡按米制的计算公式中出现的 γ 均可用密度乘重力加速度 ρg 代替，这样就把计算公式换算成国际单位制的了。

【例 1-4】 某容器的体积为 0.6m^3 ，其中储存 0.72kg 的空气，试求这时空气的比容和重度。

【解】 空气的比容

$$v = \frac{V}{G} = \frac{0.6}{0.72} = 0.833\text{m}^3/\text{kg}$$

空气的重度

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{0.72}{0.6} = 1.2\text{kg}/\text{m}^3$$

按国际单位制，空气的密度 $\rho = 1.2\text{kg}/\text{m}^3$

第二节 理想气体定律

前面介绍了气体工质的温度、压力和比容这三个基本状态参数，它们之间必然存在着一定的内在联系，而本节要讨论的理想气体状态方程式及理想气体基本定律，正是表达了三个基本状态参数之间的内在联系。

一、理想气体和实际气体

在热工学中研究气体的性质时，为了使问题简化便于研究起见，通常提出理想气体的概念。

所谓理想气体是指分子之间完全没有引力，而且分子本身不占有体积的一种假想气体。相反，凡是不能将分子之间的引力和分子本身占有的体积忽略不计的气体，称为实际气体。虽然，自然界中并不存在真正的理想气体，但是作那样的假定，其目的就是在复杂的现象中抓住主要矛盾，忽略枝节问题，便于从中找出气体的普遍规律。事实上，根据理想气体得出的规律，应用于一般工程中常用的气体，例如氧、氢、氮、一氧化碳、二氧化碳以及由这些气体混合而成的空气和烟气等，并没有产生多大的偏差。这说明这种假定经实践检验后还是可行的。

那么，在工程上应怎样来区分理想气体和实际气体呢？一般说来，当气体的压力不很高，温度不很低，比容（或者说容积）较大，并且距离它的液体状态越远时，该气体的性质就越接近于理想气体。这是因为气体的比容大，分子之间的距离较大，分子之间的吸引

力很微小，同时分子本身的体积相对于气体分子运动所占有的体积来说也是很小的，这两个因素都可以忽略不计。工程上属于按理想气体对待的有空气、烟气、氧气和氮气等气体。例如，在标准大气压下，液态空气在 -191.4°C 、液态氧气在 -182.5°C 时才开始沸腾，所以常温下的空气和氧气都远离它们的液体状态，把它们当作理想气体看待是有理由的。

当气体的压力很高，温度很低，比容较小，并且距离它的液体状态较近时，这种气体分子本身占有的体积以及分子间的引力就不可以忽略，因此必须把它们当作实际气体来对待。例如锅炉中产生的水蒸汽、制冷剂蒸气（氨、氟里昂）等都属于这一类。水蒸汽是由水沸腾产生出来的（在标准大气压下水在 100°C 时就沸腾），它距离液态很近，分子间距离小，分子间引力较大，分子本身的体积在总体积中所占的比例较大。如果对水蒸汽进行加热升温，同时降低压力，那么它的容积就要增大，这种水蒸汽距离液态较远，比较接近于理想气体，例如大气中的水蒸汽和烟气中的水蒸汽都可看作理想气体。总之，能否看作理想气体，要由该气体所处的状态以及工程计算要求的精确程度如何而定。

二、理想气体状态方程式

气体状态方程式，最先是由克拉贝龙根据前人进行的大量实验所获得的一些气体实验定律，经过归纳整理而提出来的。后来特别是当分子运动学说发展起来后，人们又从理论上证明了它的正确性。下面根据气体分子运动理论来推导气体状态方程式。

根据公式（1-6），理想气体作用于容器壁面上的压力为：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \bar{w}^2}{2}$$

设 1 公斤某种气体的分子总数为 N' ，气体的比容为 v ，则每公斤气体体积中所含有的分子数，即分子浓度 $n = \frac{N'}{v}$ ，于是

$$p = \frac{2}{3} \frac{N'}{v} \frac{m \bar{w}^2}{2}$$

将式（1-2）中分子运动的平均动能的值代入上式，则得

$$p = \frac{2}{3} \frac{N'}{v} B T$$

或者

$$p v = \frac{2}{3} N' B T$$

对于一定的气体来说， N' 是一个常数，而 B 是一个不变的数。这样可用另一个常数 $R = \frac{2}{3} N' B$ 代入上式，可写出对于 1 公斤理想气体的状态方程式：

$$p v = R T \quad (1-12)$$

式中 p ——气体的绝对压力， kg/m^2 ；

v ——气体的比容， m^3/kg ；

T ——气体的绝对温度， K ；

R ——气体常数，对于某种气体来说，它是一个不变的数值。但对不同的气体，则有不同的数值。

方程式（1-12）说明了理想气体的压力、比容和绝对温度三个基本状态参数之间存在