



中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 热工与流体力学基础

(制冷和空调设备运用与维修专业)

主编 叶学群




高等教育出版社

中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 热工与流体力学基础

(制冷和空调设备运用与维修专业)

主 编 叶学群  
责任主审 匡奕珍  
审 稿 薛 梅

 高等教育出版社

## 内容提要

本书是根据教育部2001年颁发的《制冷和空调设备运用与维修专业教学指导方案》中主干课程《热工与流体力学基础教学基本要求》,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级标准编写的中等职业教育国家规划教材。

本书共分三篇:第一篇为工程热力学基础,主要介绍了工质与理想气体状态方程、热力学第一定律、理想气体的热力过程、热力学第二定律、蒸汽的性质、混合气体和湿空气;第二篇为流体力学基础,主要介绍了流体及其基本性质、流体静力学基础知识、流体动力学基础知识、流动阻力和管路的水力计算;第三篇为传热学基础,主要介绍了稳态导热、对流换热、辐射换热、传热与换热器。为了提高学生分析问题和解决问题的能力,每章后面均附有一定数量的思考题与习题。

本书可作为中等职业学校制冷和空调设备运用与维修专业及相关专业热工与流体力学基础课程的教材,也可作为相关行业岗位培训教材或自学用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

热工与流体力学基础/叶学群主编. —北京:高等教育出版社,2002.7

中等职业学校制冷和空调设备运用与维修专业

ISBN 7-04-010914-X

I. ①热... II. 叶... III. ①热工学—专业学校—教材 ②流体力学—专业学校—教材 IV. ①TK122②O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第037712号

热工与流体力学基础

叶学群 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 人民教育出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 12

字 数 280 000

插 页 1

版 次 2002年7月第1版

印 次 2002年7月第1次印刷

定 价 15.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

## 中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向21世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1号)的精神,我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写,从2001年秋季开学起,国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想,从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发,注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本,努力为教材选用提供比较和选择,满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地,各部门积极推广和选用国家规划教材,并在使用过程中,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

# 前 言

本书是根据教育部 2001 年颁发的《中等职业学校制冷和空调设备运用与维修专业教学指导方案》中主干课程《热工与流体力学基础教学基本要求》，并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级标准编写的中等职业教育国家规划教材。

本教材共有十四章。第一章~第六章介绍工程热力学的基础知识；第七章~第十章介绍流体力学的基础知识；第十一章~第十四章介绍传热学的基础知识。这些基础知识是学生从事制冷和空调设备运用与维修工作所必需的基础理论，也是继续学习专业知识和职业技能的基础。

本教材是按 85 学时要求编写的，使用时建议按下表分配各章教学课时。

课时分配建议表

章次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	小计
课时	4	8	7	4	8	5	2	4	7	7	4	4	4	7	75
机动课时															10
总计															85

本书中水和水蒸气的热力性质采用我国学者严家骅教授等编制的《水和水蒸气热力性质图表》中的数据。书中的名词术语、单位均符合新的国家标准。

本教材由辽宁阜新市财贸学校叶学群主编，参编人员有浙江工程学院姜守忠（第一章~第五章）、江苏省商业学校黄敏（第六章）、辽宁阜新市财贸学校叶学群（第七章~第十章）、山东商业职业技术学院李丰桐（第十一章~第十四章）。在编写过程中曾受到各有关学校领导和任课教师的大力支持和帮助，在此表示感谢。

本书通过全国中等职业教育教材审定委员会审定，由山东商业职业技术学院匡奕珍教授担任责任主审，薛梅副教授审稿。他们对书稿提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2002 年 4 月

# 目 录

## 第一篇 工程热力学基础

第一章 工质与理想气体状态方程	1
第一节 工质、热力系统	1
第二节 工质的基本状态参数	3
第三节 理想气体状态方程	7
思考题与习题	11
第二章 热力学第一定律	12
第一节 热力过程的基本概念	12
第二节 热力学第一定律	14
第三节 稳定流动能量方程及工质的焓	17
第四节 理想气体的比热容及热量计算	21
思考题与习题	25
第三章 理想气体的热力过程	27
第一节 理想气体的基本热力过程	27
第二节 多变过程	33
思考题与习题	36
第四章 热力学第二定律	38
第一节 热力循环的基本概念	38
第二节 热力学第二定律	40
第三节 焓和温焓图	40
第四节 卡诺循环与卡诺定理	43
思考题与习题	46
第五章 蒸汽的性质	48
第一节 蒸汽的基本概念	48
第二节 蒸汽的定压产生过程	49
第三节 蒸汽图表及其使用方法	51
思考题与习题	61
第六章 混合气体和湿空气	62
第一节 混合气体的基本概念	62
第二节 湿空气的状态参数	66
思考题与习题	70

## 第二篇 流体力学基础

第七章 流体及其基本性质 .....	73
第一节 流体的概念 .....	73
第二节 流体的主要力学性质 .....	74
第三节 作用在流体上的力 .....	77
思考题与习题 .....	77
第八章 流体静力学基础知识 .....	79
第一节 流体静压强及其特性 .....	79
第二节 流体静压强基本方程 .....	80
第三节 流体静压强基本方程式的应用 .....	84
思考题与习题 .....	88
第九章 流体动力学基础知识 .....	92
第一节 流体动力学的基本概念 .....	92
第二节 恒定流连续性方程 .....	96
第三节 伯努利方程 .....	98
思考题与习题 .....	108
第十章 流动阻力和管路的水力计算 .....	111
第一节 流动阻力与能量损失的两种形式 .....	111
第二节 流体流动的两种流态 .....	111
第三节 沿程损失的计算 .....	116
第四节 局部损失的计算 .....	118
第五节 管路的水力计算 .....	123
思考题与习题 .....	127

## 第三篇 传热学基础

第十一章 稳态导热 .....	130
第一节 导热的基本概念及定律 .....	130
第二节 通过平壁的稳态导热 .....	132
第三节 通过圆筒壁的稳态导热 .....	135
思考题与习题 .....	138
第十二章 对流换热 .....	139
第一节 对流换热的基本概念 .....	139
第二节 准则和准则方程式 .....	141
思考题与习题 .....	147
第十三章 辐射换热 .....	148
第一节 热辐射的基本概念 .....	148
第二节 热辐射的基本定律 .....	150
思考题与习题 .....	152
第十四章 传热与换热器 .....	154
第一节 复合换热 .....	154

---

第二节 传热过程 .....	155
第三节 传热的增强和削弱 .....	160
第四节 换热器的基础知识 .....	162
思考题与习题 .....	167
<b>附录</b> .....	169
附表一 未饱和水与过热水蒸气的热力性质 .....	170
附表二 饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按温度排列) .....	174
附表三 饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按压力排列) .....	176
附表四 R717 的饱和热力性质(按温度排列) .....	178
附表五 干空气的热物理性质( $p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa) .....	179
附表六 饱和水的热物理性质 .....	180
<b>参考文献</b> .....	181



# 第一篇

## 工程热力学基础

热力学是研究与热现象有关的能量转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个重要分支,是研究热能与机械能之间相互转换规律的学科。本篇主要讲授热力学的基本定律(热力学第一定律、热力学第二定律等);常用工质的性质;热力过程、热力循环等工程热力学基础知识。

### 第一章 工质与理想气体状态方程

#### 第一节 工质、热力系统

##### 一、工质

能量是物质运动的量度,能量与物质是不可分割的。在热力工程中,完成热能与机械能之间相互转换必须借助于某种工作介质——工质来实现。工质并不直接参与能量的转换,只是在能量转换中起着媒介的作用,即在热力过程和热力循环中,伴随着工质热力状态的不断变化,使得热力系统与外界之间通过界面而发生能量的转换与传递。所以说工质是实现能量转换的内部条件,合理地选用工质能提高能量转换的效率。在热机循环中,为获得较高的热功转换效率,常选用可压缩、易膨胀的气体——水蒸气、空气或燃气等作工质。在制冷循环和热泵循环中,同样为提高从低温热源吸热向高温热源放热的工作效率,常选用被称为制冷剂的易汽化、易液化的水、氨、氟里昂等物质作为工质。

##### 二、热力系统

根据热力学分析的需要,在相互作用的各物体中,选取某一范围内的物体作为热力研究的对

象,称为热力系统或热力系,简称系统。将与热力系统相互作用的周围物体称为外界或环境。热力系统与外界的分界面称为界面或边界。所以说热力系统只是由界面包围着的作为研究对象的物体总和。

热力系统与外界之间的界面可以是真实的,也可以是虚拟的;可以是固定的,也可以是可变的甚至是运动着的。边界的确定完全由研究的需要确定。例如,研究工质在活塞式压气机中的压缩特性时,以工质为热力系统,与其相关的其他物体就是外界,其分界面就是活塞机的气缸内壁面、活塞端面以及气缸盖面所组成的分隔面(图 1-1a)。这个界面是真实有形的,并随着活塞的运动,界面发生周期性的变化。

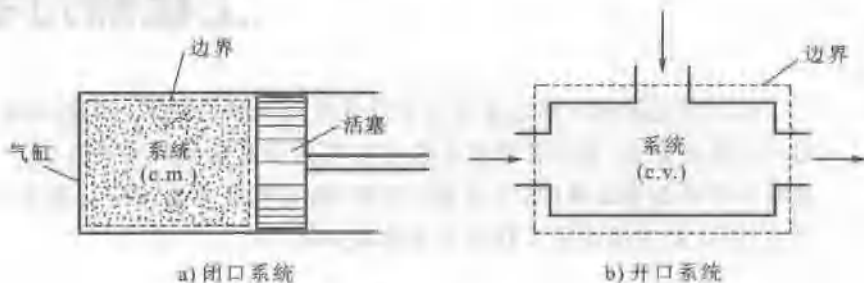


图 1-1 热力系统,外界与边界

热力系统只是在研究中为简化讨论而人为设立的分隔体。热力系统的选择方法不同并不影响热力研究的结果,只是决定了研究方法的繁简程度。分析时,根据界面上系统与外界间能、质交换的情况不同,来称谓不同的热力系统。称界面上无质量交换的系统为闭口系统(闭口系或闭系);称界面上有质量交换的系统为开口系统(开口系或开系);称界面上无热量交换的系统为绝热系统(绝热系);称界面上既无质量交换,又无能量交换的系统为孤立系统(孤立系)。因为在闭口系统内质量保持恒定,故又称为控制质量(c. m.),如图 1-1a 所示。由于开口系统与外界有质量交换,因而只能将系统控制在一定的空间范围内,故又称为控制体或控制容积(c. v.),如图 1-1b 所示。自然界中的物体都是相互联系、相互制约和相互作用的,因此绝对的绝热系统和孤立系统都是不存在的,只有当系统与外界间的热量、功量、质量的交换无限小或该作用的影响可忽略不计时,就可看作是某一特定条件下的简化系统,以利于热力学的分析。

根据热力系统内部状况的不同来区分,还有单元系与多元系,单相系与复相系、均匀系与非均匀系等。同样,根据工质的压缩特性,称由可压缩流体构成的热力系统为可压缩系统。若可压缩系统与外界间只有准静容积变化功(膨胀功或压缩功)的交换,则称该系统为简单可压缩系统。在本教材讨论范围内的热力系统除特殊说明外是均匀的简单可压缩系统。

另外,在热力学分析中还有一些特殊的系统,像具有无限大热容量的系统,它们在放出或吸收有限量热能时不改变系统自身的温度,被称为热源或热库,例如高温热源、低温热源等。

## 第二节 工质的基本状态参数

### 一、热力状态与状态参数

分析热力系统能量转换的前提是描述热力系统的热力状态变化。热力系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为热力状态,简称状态。热力状态是系统各种宏观物理特性的表现,能描述这种宏观特性的物理量称为系统的热力状态参数或状态参数。状态参数是状态的宏观描述,热力状态的单值性决定了热力状态参数满足点函数的数学特征;在任意热力过程中,系统从初态 1 变化至终态 2 时,任意状态参数  $x$  的变化量(增量)仅是初态、终态下的状态参数的差值,与变化路径无关;当系统进行一个封闭的状态变化过程而恢复到初始状态时,其状态参数的增量为零。即:

$$\Delta x_{1-2} = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

和 
$$\Delta x_{1-2-1} = (x_2 - x_1) + (x_1 - x_2) = 0 \quad (1-2)$$

在本书中讨论的状态参数主要有温度( $T$ )、压力( $p$ )、比体积( $v$ )或密度( $\rho$ )、热力学能( $U$ )、焓( $H$ )、熵( $S$ )等。其中,温度( $T$ )、压力( $p$ )、比体积( $v$ )或密度( $\rho$ )是可以直接测量的,被称为基本状态参数;而其余的状态参数都不能直接测量,必须由基本状态参数导出,所以称为导出参数。

平衡状态是指系统在不受外界影响的条件下,系统宏观性质不随时间变化的状态。若仅系统内部各部分特性趋于一致,称为系统的内平衡;当系统内各处温度相同时,称为热平衡;当系统内压力相同时,称为力平衡;当系统内温度和压力都相同时,称为热力平衡;一个没有化学反应的系统,称为化学平衡。热平衡、力平衡、热力平衡、化学平衡等都是实现平衡状态的必要条件。实现平衡状态的充要条件是系统内部及系统内外之间的一切不平衡势的消失。因此,处于平衡状态中的热力系统,各处具有均匀一致的状态参数,在外界条件不变的情况下,将永远保持这种宏观特性。平衡状态是热力学的一个重要概念。本书除特殊说明外,仅讨论平衡状态。

状态参数间的关系可用状态方程和状态坐标图表示。只有平衡状态才能在状态坐标图上用确定的点来表示,不平衡状态由于没有确定的热力状态参数,无法在坐标图上表述。

### 二、基本状态参数

温度  $T$ 、压力  $p$ 、比体积  $v$  或密度  $\rho$  是基本状态参数。

#### 1. 温度

温度是描述热力系统冷热状态的物理量。温度高显示系统较热的状态,温度低显示系统较冷的状态。从分子运动理论观点看,温度标志着物质内部大量分子热运动的强烈程度,对于理想气体,热力学温度与分子平移运动的平均动能成正比,即

$$\frac{m\bar{c}^2}{2} = BT \quad (1-3)$$

式中:  $\frac{m\bar{c}^2}{2}$  为分子平移运动的平均动能, 其中  $m$  是一个分子的质量,  $\bar{c}^2$  是分子平移运动的均方根速度;  $B$  为比例常数;  $T$  为理想气体的热力学温度。

凭人的感觉判断物体的冷热程度是不准确的。为了使温度测量准确一致, 就要有一个衡量温度的标尺, 简称温标。在国际单位制 SI 中, 以热力学温标为基本温标。由热力学温标所确定的温度称为热力学温度(习惯称绝对温度), 以符号  $T$  表示, 单位为 K, 读作开或开尔文。热力学温标选取纯水的三相点(固、液、气三相平衡共存状态)为基本定点, 定义纯水的三相点温度为 273.16 K, 每 1 K 就是纯水三相点热力学温度的  $1/273.16$ 。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标, 简称摄氏温标。摄氏温标所确定的温度称为摄氏温度, 以符号  $t$  表示, 单位是  $^{\circ}\text{C}$ , 读作摄氏度。摄氏温标  $t$  的定义式直接由热力学温标导出, 即

$$t = T - 273.15 \text{ K} \quad (1-4a)$$

摄氏温标仍以纯水的三相点为基本定点, 水的三相点摄氏温度为  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标的每  $1^{\circ}\text{C}$  与热力学温标的每 1 K 完全相等。两种温标换算在工程上采用下式已足够准确:

$$T = t + 273 \text{ K} \quad (1-4b)$$

## 2. 压力

热力学中的压力是指垂直作用于单位作用面上的力, 即物理学中的压强, 以符号  $p$  表示。压力  $p$  的大小等于作用于界面的垂直作用力  $F$  与作用面积  $A$  之比, 即

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-5)$$

压力的实质是热力系统中大量气体分子不断地作无规则热运动而碰撞壁面的结果。根据气体运动学说, 作用于单位面积上的理想气体的压力值  $p$  与分子浓度(单位体积包含的分子数)及分子平移运动的平均动能成正比, 即

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

式中:  $p$  为压力, Pa;  $n$  为理想气体分子浓度,  $n = \frac{N}{V}$ , 其中  $V$  是容器容积,  $N$  是容器内气体分子总数。将式(1-3)代入得

$$p = \frac{2}{3} nBT \quad (1-7)$$

式(1-6)、(1-7)充分说明了系统压力是分子热运动的结果和压力这个宏观物理量与微观量间的关系。在工程热力学中采用宏观的研究方法, 所以用式(1-5)来表达系统的压力。

在国际单位制中, 压力的单位为 Pa, 读作帕或帕斯卡, 并且

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

由于 Pa 单位太小, 工程上还采用 kPa 与 MPa, 有  $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$ ,  $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

工程中过去还曾采用其他压力单位, 如巴(bar)、标准大气压(atm)、工程大气压(ar)、毫米汞柱(mmHg)、米水柱(mH<sub>2</sub>O)等。并有

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa}$$

其他换算关系见表 1-1。

表 1-1 压力单位换算表

单位名称	帕斯卡 (Pa)	工程大气压 (at)	标准大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)	米水柱 (mH <sub>2</sub> O)
帕斯卡(Pa)	1	$1.01972 \times 10^{-5}$	$0.98692 \times 10^{-5}$	$750.06 \times 10^{-5}$	$10.1972 \times 10^{-5}$
工程大气压(at)	$0.980665 \times 10^5$	1	0.96784	735.56	10.000
标准大气压(atm)	101325	1.03323	1	760.00	10.3325
毫米汞柱(mmHg)	133.322	$1.3595 \times 10^{-3}$	$1.3158 \times 10^{-3}$	1	$13.595 \times 10^{-3}$
米水柱(mH <sub>2</sub> O)	9806.65	0.1	0.096784	73.556	1

系统的真实压力称为绝对压力。系统的压力可用各种压力计来测定,压力计的测量原理是建立在力的平衡原理上的,所以压力计不能直接测得系统的状态参数——绝对压力,只能测得系统绝对压力与大气压力(或另一系统压力)间的相对压力。实用的压力计都是压差计,如图 1-2 中所示的弹簧式压力计和 U 型管压力计。

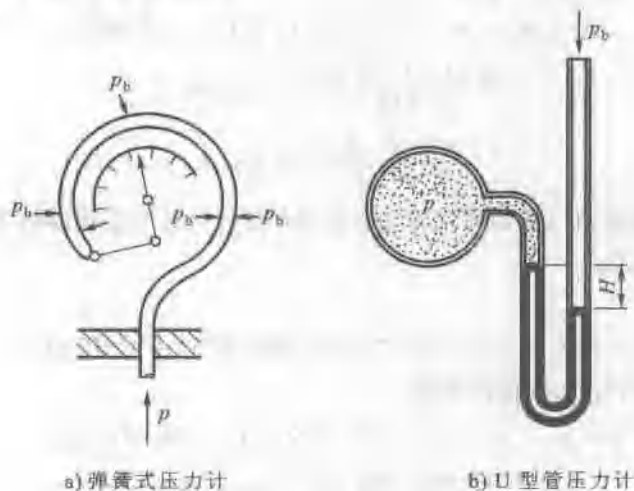


图 1-2 压力计

当系统内压力  $p$  大于大气压力  $p_b$  时,压力计上测得的压力值称为表压力或工作压力,用符号  $p_e$  表示;当系统内压力  $p$  低于大气压力  $p_b$  时,此时压力计上测得的压力值称为真空度,用符号  $p_v$  表示。

$$\text{当 } p > p_b \text{ 时} \quad p_e = p - p_b \quad (1-8)$$

$$\text{当 } p < p_b \text{ 时} \quad p_v = p_b - p \quad (1-9)$$

$p$ 、 $p_e$ 、 $p_v$  与  $p_b$  间的关系可通过图 1-3 形象地表示。

大气压力  $p_b$  随地球上的位置及气候条件等因素而变化,可由气压计测得。在绝对压力  $p$  相同的系统中,由于  $p_b$  的变化,压力计上所测得的  $p_e$  或  $p_v$  是不同的。在热力计算时,须用式 (1-8)或(1-9)将表压力  $p_e$  或真空度  $p_v$  转换成绝对压力  $p$ 。为简化计算,在一定条件下(如绝

对压力值较大,计算精度要求不高时)可近似地认为大气压力  $p_b = 0.1 \text{ MPa}$ 。但在系统压力较低,尤其在计算真空度时,假设  $p_b$  等于  $0.1 \text{ MPa}$  会引起较大的计算误差,这时必须采用真实的大气压力  $p_b$  值来计算,见例 1-1、例 1-2。

**例 1-1** 测得两系统内的表压力分别为  $0.015 \text{ MPa}$  和  $1.5 \text{ MPa}$ ,当时气压计读数为  $0.1013 \text{ MPa}$ ,试计算两系统的绝对压力。

**解:**已知两系统的表压力分别为  $p_{g1} = 0.015 \text{ MPa}$ 、 $p_{g2} = 1.5 \text{ MPa}$ ,当时气压计读数为  $0.1013 \text{ MPa}$ ,所以两系统的绝对压力分别为

$$p_1 = p_{g1} + p_b = (0.015 + 0.1013) \text{ MPa} = 0.1163 \text{ MPa}$$

$$p_2 = p_{g2} + p_b = (1.5 + 0.1013) \text{ MPa} = 1.6013 \text{ MPa}$$

若取  $p_b = 0.1 \text{ MPa}$ ,近似计算得

$$p_1 = p_{g1} + p_b = (0.015 + 0.1) \text{ MPa} = 0.115 \text{ MPa}$$

$$p_2 = p_{g2} + p_b = (1.5 + 0.1) \text{ MPa} = 1.6 \text{ MPa}$$

计算误差分别为

$$\frac{0.1163 - 0.115}{0.1163} = 1.12\%$$

$$\frac{1.6013 - 1.6}{1.6013} = 0.08\%$$

**例 1-2** 测得某系统内气体的真空度为  $53.329 \text{ kPa}$ ,当时气压计读数为  $101.325 \text{ kPa}$ ,试计算系统内工质的绝对压力。

**解:**

$$p = p_b - p_v = (101.325 - 53.329) \text{ kPa} = 47.996 \text{ kPa}$$

若取  $p_b = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$ ,近似计算得

$$p = p_b - p_v = (100 - 53.329) \text{ kPa} = 46.671 \text{ kPa}$$

计算误差为

$$\frac{47.996 - 46.671}{47.996} = 2.76\%$$

由此可见,在低压下采用近似方法取值所引起的计算误差是较大的,在工程计算时应加以注意。

### 3. 比体积与密度

工质所占有的系统空间称为容积(体积)。其包括了物质微粒本身占有的体积和微粒运动的空间。系统的比体积就是单位质量物质所占有的容积,以  $v$  表示。系统的密度就是单位体积内物质的质量,以  $\rho$  表示。有关系式:

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-10)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-11)$$

式中: $v$  的单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $\rho$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $m$  为物质的质量,  $\text{kg}$ ;  $V$  为物质的体积,  $\text{m}^3$ 。

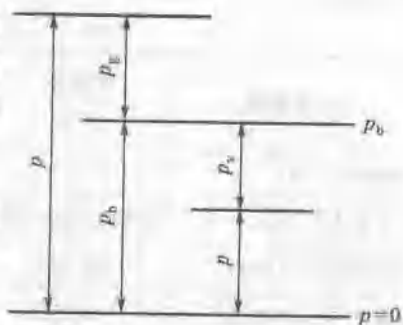


图 1-3  $p$ 、 $p_g$ 、 $p_v$  与  $p_b$  间关系图

显然,比体积与密度互为倒数,即

$$pv = 1 \quad (1-12)$$

因此,比体积与密度不是两个相互独立的状态参数,只有一个( $v$  或  $\rho$ )是独立状态参数。

## 第三节 理想气体状态方程

### 一、理想气体与实际气体

理想气体是一种经过科学抽象的假想气体模型。假设理想气体分子是一些弹性的、不占体积的质点,分子之间没有相互作用力(引力和斥力)。实验证明,随着组成系统的气体压力和密度的降低,系统内分子间的平均距离就会增大。当气体的压力和密度降低到一定程度时,气体分子本身所占的体积就会远远小于分子所活动的空间,分子间的相互作用力较系统分子与边界的作用力相比,也极为弱小。尤其当压力趋近于无限小,比体积趋近于无限大时,分子本身所占的体积和分子间相互作用力对系统的影响就可忽略不计。所以说,理想气体是实际存在的气体当压力趋近于无限小,比体积趋近于无限大时的极限气体模型。理想气体的两个假设条件大大简化了气体分子运动规律的描述,使得气体某些宏观物理量与微观运动得到了有机的联系。理想气体的模型也在本质上解释了实际气体特性偏离理想气体状态方程的原因和理想气体状态方程的适用条件。

自然界中完全符合理想气体假设条件的气体是不存在的,但在实际热力工程分析中,若采用理想气体研究时,产生的误差不超过精度范围时,就可以作为理想气体看待,例如常况下的氧气( $O_2$ )、氮气( $N_2$ )、二氧化碳( $CO_2$ )及空气等。当气体的物态接近液态,气体具有较高的密度,分子本身所占的体积和分子间相互作用力产生的效应对系统的宏观特性有较大的影响时,就应以实际气体看待,例如水蒸气、制冷剂蒸汽等。在描述实际气体特性时,必须以正确的方式修正这两个因素的影响。

在本书后续章节中,除特殊说明外,“气体”的含义一般指理想气体,实际气体则根据其接近液态的程度,以“汽体”或“蒸汽”来表述。

### 二、理想气体状态方程

#### 1. 理想气体基本定律

由实验可以得到理想气体的基本定律,它们是:

(1) 波义耳-马略特定律 一定量的理想气体,当温度保持不变时,其压力与比体积(或容积)成反比。即

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad \text{或} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (1-13)$$

(2) 查理定律 一定量的理想气体,当比体积(或容积)保持不变时,其压力与热力学温度成正比。即

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-14)$$

(3) 盖·吕萨克定律 一定量的理想气体,当压力保持不变时,其比体积(或容积)与热力学温度成正比。即

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-15)$$

## 2. 理想气体状态方程

以上三个定律都是理想气体在特定条件下,状态变化的规律。当气体的三个基本状态参数  $p$ 、 $v$ 、 $T$  都发生变化时,克拉贝龙根据前人的实验把上述三个定律综合整理成

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \dots = \frac{pv}{T} = \text{常数} \quad (1-16)$$

上式是大量实验的总结,它表明了理想气体在状态变化时三个基本状态参数  $p$ 、 $v$ 、 $T$  之间的关系。

随着分子运动理论的发展,人们又从理论上推导出了上述关系式。根据分子运动理论,气体分子作用于器壁上的压力  $p$  (即式 1-6) 为

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

等式两边同乘以比体积  $v$ ,并以  $N'$  表示 1 kg 气体分子数,得

$$pv = \frac{2}{3} nv \frac{m\bar{c}^2}{2} = \frac{2}{3} N' BT$$

对于一定量的气体  $N'$  是常数,  $B$  是恒量。因此上式可写成

$$pv = R_g T \quad (1-17)$$

式中:  $p$  为气体的绝对压力, Pa;  $v$  为气体的比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $T$  为气体的热力学温度, K;  $R_g$  ( $= \frac{2}{3} N'B$ ) 称为气体常数,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

式(1-17)是质量  $m = 1 \text{ kg}$  时的理想气体状态方程,它与克拉贝龙实验总结出的结论式(1-16)是一致的,都反应了理想气体在某一平衡状态下  $p$ 、 $v$ 、 $T$  三者之间的关系。

对于质量为  $m$  (单位为 kg) 的气体,其状态方程式为

$$pmcv = mR_g T \quad (1-18a)$$

或

$$pV = mR_g T \quad (1-18b)$$

式中:  $V$  是质量为  $m$  的气体所占有的容积,  $\text{m}^3$ 。

SI 单位制规定物质的量以摩尔 (mol) 为基本单位。1 mol 物质的质量称为摩尔质量,以  $M$  表示,单位为  $\text{kg}/\text{mol}$ 。如果用  $M_r$  表示气体的相对分子质量。则 1 kmol 物质的质量在数值上等于气体的相对分子质量  $M_r$ 。例如,氧气的相对分子质量  $M_r$  为 32,氧气的摩尔质量  $M$  就是  $32 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{mol}$ 。将式(1-17)两边同乘以  $M$ ,得 1 mol 质量理想气体的状态方程

$$pMv = MR_g T \quad (1-19a)$$

或

$$pV_m = RT \quad (1-19b)$$

式中:  $V_m (= Mv)$  为 1 mol 气体的体积,称摩尔体积,  $\text{m}^3/\text{mol}$ ;  $R (= MR_g)$  称为摩尔气体常数(也常被称为通用气体常数),  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

对于  $n$  (单位为 mol) 物量的气体其理想气体状态方程为



$$pV = nRT \quad (1-20)$$

### 三、摩尔体积、摩尔气体常数及气体常数

由阿佛加德罗定律推论可知,任何气体在同温同压下具有相同的摩尔体积,即  $M_1 v_1 = M_2 v_2 = \dots = Mv = \text{常数}$ ,并由实验证明,在标准状态下(压力  $p_0 = 101\,325\text{ Pa}$ ,温度  $T_0 = 273.15\text{ K}$ ),1 kmol 任何气体的体积均为  $22.4\text{ m}^3$ ,即

$$V_{m0} = Mv_0 = 22.4 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{mol}$$

由此可得任何气体在标准状态下的比体积和密度为

$$v_0 = \frac{22.4 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{mol}}{M} \quad (1-21)$$

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{mol}} \quad (1-22)$$

将标准状态下的参数  $p_0, T_0, V_{m0}$  代入式(1-19b)可得摩尔气体常数  $R$  值

$$R = \frac{p_0 V_{m0}}{T_0} = \frac{101\,325 \times 22.4 \times 10^{-3}}{273.15}\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \quad (1-23)$$

可见,对于任何气体  $R$  都等于  $8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ,它与气体的性质和状态无关。正因为如此, $R$  才又被称为通用气体常数。

由摩尔气体常数  $R$  及气体的摩尔质量  $M$  可求得气体常数

$$R_g = \frac{R}{M} = \frac{8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{M} \quad (1-24)$$

可见,气体常数  $R_g$  仅与气体的性质有关,与气体所处的状态无关。不同的气体具有不同的  $R_g$  值。几种常用理想气体的  $R_g$  值如表 1-2 所示。

表 1-2 常用气体常数  $R_g$  J/(kg·K)

物质名称	化学式	相对分子质量	气体常数	物质名称	化学式	相对分子质量	气体常数
氢	H <sub>2</sub>	2.016	4 124.0	氮气	N <sub>2</sub>	28.013	296.8
氦	He	4.003	2077.0	一氧化碳	CO	28.011	296.8
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.043	518.2	二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.010	188.9
氨	NH <sub>3</sub>	17.031	488.2	氧气	O <sub>2</sub>	32.000	259.8
水蒸气	H <sub>2</sub> O	18.015	461.5	空气		28.970	287.0

例 1-3 求下列情况下空气的密度:

- (1) 在 15 MPa 及 200℃ 时;
- (2) 在物理标准状况时。

解: 由表 1-2 可知,空气的相对分子质量  $M_r = 28.970$ ,即摩尔质量  $M = 28.97 \times 10^{-3}\text{ kg/mol}$ ,据式(1-24)得空气的气体常数为

$$R_g = \frac{R}{M_r} = \frac{8.314}{28.970 \times 10^{-3}}\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 287\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

- (1) 求 15 MPa 及 200℃ 时空气密度