



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)

程淑芬 主编

22-43



机械工业出版社



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 程淑芬
参 编 李 磊 柏 林
责任主审 匡奕珍
审 稿 薛 梅



机械工业出版社

本书是中等职业学校“制冷与空调设备运用与维修”专业的教材。全书内容由三部分组成：工程热力学，主要叙述基本概念、基本定律、热力过程、热力循环，并着重介绍蒸汽的热力性质；流体力学，主要说明流体的基本性质、流体静力学与动力学基础、液体流动阻力及简单管路计算；传热学，介绍了稳态导热、对流换热和热辐射三种基本传热方式以及传热过程的规律和计算；对换热器的种类、工作原理和传热温差计算作出了介绍。

本书也可作为中职相关专业的教材，也可作为从事制冷空调维修人员的自学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工与流体力学基础/程淑芬主编. —北京：机械工业出版社，2002.8
中等职业教育国家规划教材·制冷和空调设备运用与维修专业
ISBN 7-111-10446-3

I. 热... II. 程... III. ①热工学—专业学校—教材②流体力学—
专业学校—教材 IV. ①TK122②G35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 041996 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：高文龙 版式设计：冉晓华 责任校对：张媛
封面设计：姚毅 责任印制：路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·10.5 印张·1 插页·257 千字
0 001—3 000 册
定价：12.50 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

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

2001 年 10 月

前 言

本书是面向 21 世纪的中等职业教育国家规划教材,是根据“制冷和空调设备运行与维修”专业《热工与流体力学基础》教学大纲的要求而编写的。

本书分为三篇,共十五章。第一篇为工程热力学(第一~第六章),主要介绍工程热力学基础知识,热力学基本定律,热力过程,蒸汽、混合气体及湿空气的性质概念;第二篇为流体力学基础知识,主要介绍流体的基本性质,流体静力学基础,动力学基础及流动阻力损失和管路的水力计算;第三篇为传热学基础,介绍热量传递的基本方式、传热过程以及常用换热问题等内容。

本书在编写中遵循能力本位的主导思想,充分体现宽、浅、用、新的原则,避免过多的理论推导、计算,结合专业特点增加实用性内容。通过本课程的学习,使学生掌握从事制冷和空调设备运用与维修工作所必需的热工与流体力学的基本理论知识,为学习后续专业课程和职业技能打下基础。

本书可以作为三年制中等职业学校授课教材,也可作为社会职业培训教材。

本书由北京无线电动力技校程淑芬主编,其中:第一~第四章、第六章由北京正东电子动力有限公司技校柏林编写,第七~十章由北京无线电动力技校李磊编写,绪论、第五章、第十一~第十四章由程淑芬编写。本书在编写过程中,有关学校教师提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示感谢。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2002 年 1 月

目 录

前言			
绪论	1		
第一篇 工程热力学			
第一章 工质和热力系	4		
第一节 工质和热力系统	4		
第二节 工质的基本状态参数	5		
第三节 理想气体及状态方程式	7		
第四节 理想气体状态方程式的应用 举例	9		
习题	10		
第二章 热力学第一定律	12		
第一节 热力过程	12		
第二节 功和热量	14		
第三节 热力学第一定律	15		
第四节 稳定流动能量方程式	17		
第五节 理想气体的比热容	20		
习题	23		
第三章 理想气体热力过程	24		
第一节 基本热力过程	24		
第二节 理想气体热力学能、焓变化 量的计算	30		
习题	31		
第四章 热力学第二定律	33		
第一节 热力循环	33		
第二节 热力学第二定律	36		
第三节 卡诺循环、卡诺定理	38		
习题	43		
第五章 蒸汽的性质	44		
第一节 基本概念	44		
第二节 蒸汽定压生产过程	45		
第三节 蒸汽热力性质图表	47		
第四节 蒸汽的热力过程及循环	52		
习题	57		
第六章 混合气体和湿空气	58		
第一节 混合气体	58		
第二节 湿空气	60		
习题	67		
第二篇 流体力学基础			
第七章 流体及其主要物理性质	68		
第一节 流体基本概念	68		
第二节 流体主要物理性质	68		
第三节 作用在流体上的力	71		
习题	71		
第八章 流体静力学	72		
第一节 流体静压强及其特性	72		
第二节 流体静压强基本方程式	73		
第三节 流体静力学基本方程式的 应用	74		
习题	79		
第九章 流体动力学	81		
第一节 流体动力学基本概念与恒 定流连续性方程	81		
第二节 恒定流能量方程式	83		
第三节 能量方程式的应用	81		
习题	88		
第十章 流动阻力与管路计算	90		
第一节 流体流动的两类流态	90		
第二节 过流断面水力要素	92		
第三节 阻力损失的计算	94		
第四节 管路计算	99		
习题	102		
第三篇 传热学基础			
第十一章 稳态导热	103		
第一节 基本概念	103		
第二节 平壁的稳态导热	105		
第三节 圆筒壁的稳态导热	106		
习题	108		
第十二章 对流换热	109		
第一节 基本概念	109		
第二节 各种对流换热的特征	110		

习题	116	性质表 (按压力排列)	135
第十三章 辐射换热	118	附录 A-3 未饱和水和过热蒸汽热力性 质表	137
第一节 热辐射的基本概念	118	附录 A-4a R134a 饱和性质表 (按温度 排列)	144
第二节 热辐射的基本定律	119	附录 A-4b R134a 饱和性质表 (按压力 排列)	145
习题	121	附录 A-5 R134a 过热蒸汽热力性质 表	146
第十四章 传热过程与换热器	122	附录 A-6 干空气的热物理性质	149
第一节 复合换热的概念	122	附录 A-7 饱和水的热物理性质	150
第二节 传热基本方程	122	附录 A-8 常用流体的密度	152
第三节 通过平壁、圆筒壁的传热 计算	123	附录 A-9 常用各种管的局部阻力系数 表	152
第四节 传热的增强与削弱	125	附录 A-10 各种不同材料的密度、热导 率、比热容和热扩散率	155
第五节 换热器	128	附录 B	157
习题	131	参考文献	160
附录 A	132		
附录 A-1 常用单位换算表	132		
附录 A-2a 饱和水与饱和水蒸气热力 性质表 (按温度排列)	133		
附录 A-2b 饱和水与饱和水蒸气热力			

绪 论

一、热能及其利用

能源的开发和利用程度是人类社会生产发展的一个重要标志。所谓能源是指为生产和日常生活提供各种能量和动力的物质资源。目前,自然界中已为人们可利用的能源有:水力能、风能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。在这些能源中除水力能和风能是以机械能形式提供给人们外,其余的各种能源往往直接以热能的形式,或通过相应的设备转换成热能提供给人们。

热能的利用有两种基本方式,一是直接利用热能加热物体,能量的形式不发生变化,如取暖、烘干、冶炼、蒸煮以及化工过程利用热能进行分解或化合等。另一是间接利用,将热能转换为机械能或电能加以利用,如火力发电、交通运输及各种动力装置等。

社会和国民经济的发展、人民生活的不断改善都离不开能源。不但现代农业、现代工业和现代国防需要大量能源,而且随着现代物质生活的改善和精神文明生活的提高,各种现代家庭用能设备如:微波炉、电视机、音响、个人电脑、冰箱、空调等不断增加,进一步增加了能源的消费。但是,能源在开采、运输、加工、转换、利用和消费过程中,也对生态系统造成各种影响,成为环境污染的主要根源。例如:我国的电力能源目前大部分仍由火力发电厂提供,能量转换过程即从燃料的化学能转变为机械能,再转变为电能。燃烧过程中排放大量的二氧化碳会造成地球的温室效应,引起全球气候变暖;发电厂向周围环境排放大量的热也会影响生态平衡;燃烧所排放的 SO_2 和 NO_x 会产生酸雨,使土壤的酸度上升,影响树木、农作物的生长,并造成地下水和江河水酸度增加,直接影响人类和牲畜饮用水的质量。酸雨还会对建筑物、工业设备等产生腐蚀作用,缩短其使用寿命。

能源消费的迅速增加,也会造成能源短缺。在能源利用中比例很高的煤和石油都是非再生能源,它们随着人类的不断开发利用将会不复存在。所以节能是我国长期的一项重要的基本国策。所谓节能就是采用技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以接受的措施,减少能源利用各个环节的损失和浪费,提高能源利用率。同时节能也是减少污染、保护环境的一个重要方面。提高能源利用率不但能减少能源的消耗量,而且可以减少烟尘、烟雾、温室效应,同时使排放到环境中的废热量减少。

二、本课程研究的对象

《热工与流体力学基础》课程包括工程热力学、流体力学及传热学三部分内容。工程热力学主要研究热能与机械能相互转换的客观规律,分析工程中用来进行能量形式转换的介质的基本热力性质、热力过程特点,探讨提高能量转换效率的途径;流体力学部分为工程流体力学范畴,是研究流体的平衡和运动规律以及流体和固体之间互相作用的一门科学,在热工设备运行中工作介质的输送、冷与热的供应、除尘排毒等都是将流体作为工作介质,通过流体的各种物理作用对流体流动有效地加以组织来实现的。凡是有温差的地方,就有热量自发地由高温物体向低温物体传递;传热学通过对传热的基本方式和实际的传热过程进行分析,研究物体内部或物体之间的热量传递机理,从而找出提高传热效果或减少热损失的途径。

三、本课程与制冷空调专业的关系

工程热力学、流体力学基础和传热学课程是制冷空调专业的主要专业基础课。制冷空调设备的工作原理、生产运行、维护管理等许多技术问题都离不开本课程的基础理论知识。我们可以从下面几个实例看出他们之间的密切联系。

1. 蒸汽压缩式制冷系统

如图 0-1 所示, 制冷系统由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器四个主要设备以及各段管路组成一个封闭的系统, 系统内充注有工质(制冷剂)并不断循环。低温液态的制冷剂进入蒸发器中吸热气化, 使被冷却物冷却, 制取了冷量; 气化了制冷剂被压缩机回收并压缩至高压高温状态, 通过冷凝器向环境介质(空气或水)放热而液化; 高压液态制冷剂通过节流阀的作用成为低压低温状态, 再进入蒸发器继续吸热制冷从而完成制冷循环。目前工业、商用及家用制冷电器大多数都采用蒸汽压缩式制冷系统。

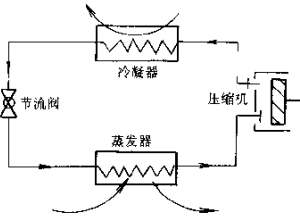


图 0-1 蒸汽压缩式制冷系统

2. 吸收式制冷系统

吸收式制冷机是利用溶液的特性来完成工作循环制取冷量的装置, 它是蒸发制冷的另一种形式。与压缩式制冷不同, 它是用吸收器和发生器等代替了压缩机, 而其他部件的作用和原理相同。以溴化锂-水吸收式制冷机为例, 制冷机采用两种工质, 其中低沸点的水为制冷剂, 高沸点的溴化锂为吸收剂。如图 0-2 所示, 自蒸发器出来的低压制冷剂蒸汽进入吸收器, 被吸收剂强烈吸收, 吸收过程中放出的溶解热被冷却水带走; 吸收器中的稀溶液由泵送入发生器中, 被热源加热后产生高压水蒸气, 发生器中的浓溶液经减压回到吸收器继续循环。制冷剂水在发生器、冷凝器、节流阀蒸发器、吸收器之间完成大循环。

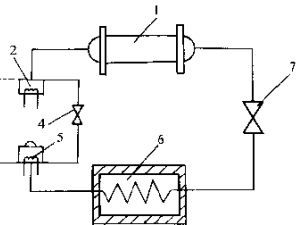


图 0-2 吸收式制冷原理图

- 1—冷凝器 2—发生器 3—溶液泵
4—溶液节流阀 5—吸收器 6—蒸发器
7—节流阀

3. 中央空气调节系统

空气调节是为了使环境空气参数即空气的温度、湿度、压力、流动速度均保持在一定范围内的工程技术。图 0-3 为较常用的一次回风空调系统。夏季时, 室外的新风经新风百叶窗进入空调系统, 经过过滤净化, 与室内的循环空气(一次回风)进行混合; 混合后的空气流经表面冷却器进行降温、去湿处理, 再经过加热器加热到送风状态后由送风机送入空

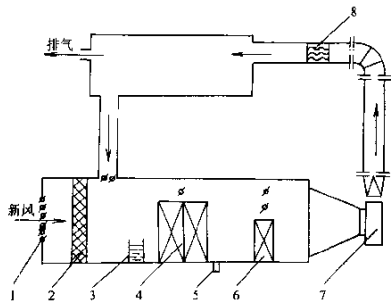


图 0-3 中央空调系统

- 1—新风口 2—过滤器 3—加热器 4—表面冷却器
5—排水口 6—二次加热器 7—风机 8—二次加热器

调房间吸收房间中的热量与湿量，从而保持空气的参数要求。表面冷却器所需要的冷源由制冷机提供。

以上三例是制冷空调典型的设备系统。系统中所用的设备如压缩机、冷凝器、蒸发器、表冷器、加热器、加湿器等统称为热工设备，系统中流动的流体——制冷剂、水、空气等称为工质。工质在系统中不断循环，压力、温度、相态要发生变化，出现了能量形式转换、热量传递和工质流动等一系列热力现象。这些现象必须遵循哪些规律？如何使设备在最有利的条件下工作？如何提高设备的工作效率？这些问题都需用热工及流体力学基础理论来阐明。

四、本课程的主要内容及学习方法

本课程主要有三部分内容。工程热力学主要叙述工质的性质、状态变化、热量计算、热力学第一、第二定律及能量转换定律；流体力学基础主要说明流体的基本性质，流体静力学、流体动力学基础知识和简单管路流动阻力计算；传热学部分将分析三种传热方式基本规律、传热机理，提出增强传热与削弱传热的方法。

由于本课程是制冷空调专业重要的基础理论，且内容较多，所以要求学生要正确掌握学习方法。热工学及流体力学基础研究的是热、功转换，流体平衡及运动规律和热量传递等宏观现象。在学习中从宏观现象出发，对这些现象进行直接的观察和实验，总结出自然界一些普遍的基本规律。然后再以这些定律为基础，通过分析、推理，得到具有高度普遍性的规律。

第一篇 工程热力学

第一章 工质和热力系

我们在本章中介绍热力学的一些基本概念，这些概念包括工质、热力系统、外界环境、气体的基本状态参数和理想气体的概念。对于气体的状态参数和理想气体还要求掌握它们的基本计算。本章的重点是了解并掌握气体状态参数和理想气体的概念、特点和基本计算。

第一节 工质和热力系统

一、工质

在空调通风和制冷工程中，使用的各种热力设备，如空调、制冷机等，要利用一些气体或液体通过状态变化来传递、转移能量。这些工作在各种热力设备中的气体或液体，我们称为工作物质，简称为工质。如通风系统中的空气、空调和制冷机中的制冷剂、热机中的水蒸气等。

工质由于工作的需要，要求具有良好的膨胀性与流动性。另外还要具有价格便宜、容易获得、无毒、无腐蚀性等。制冷、空调通风中使用的工质为制冷剂和空气，制冷剂为气、液两相，空气为气体。都具有良好的膨胀性和流动性。

二、热力系统

在热力学中为了分析问题方便起见，常将要分析的对象从周围大物体中分离出来，研究它通过分界面和周围物体之间的能量交换。这种被人为分离出来的分析对象，称为热力系统，简称为热力系。热力系统外的一切称为外界或环境。热力系与外界之间的分界面可以是实际存在的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是大小、形状变化的，或者是运动的。

在热力系和外界中存在着能量的传递和物质的交换，我们根据能量传递和物质交换的情况可以将热力系分为以下几类：

封闭热力系（简称闭系）——系统与外界可以传递能量，但没有物质的交换，即没有物质的流入和流出。系统内部的工质质量保持不变。

开口热力系（简称开系）——系统与外界既可以有能量的交换，也可以有物质的交换，即有物质从分界面上流入和流出。因而这类系统内部的质量，可以保持恒定或发生变化，所以又为流动热力系。

根据系统与外界的能量交换情况，热力系还可以分为：

绝热热力系——系统与外界只有功的交换而没有热量传递的热力系。

孤立热力系——系统与外界不发生任何相互作用，既无能量交换也无质量交换的热力系。

实际上，绝对的绝热系统和孤立系统是不存在的，但在某些系统中，在某一段时间内与

外界的热量传递很少，对于系统的影响可以忽略不计，则这样的热力系可以近似看成绝热系统；同样，如某些热力系与外界之间的能量和物质交换很少，对系统的影响都可以不加考虑，则可以将这样的系统看成孤立系统。

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表现的宏观物理状态称为热力状态或状态。热力状态是系统各种宏观物理性质的表现，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，状态参数具有如下特征：

1) 任意的一个热力过程中，工质从初状态到末状态时，任意状态参数的变化量（增量）只等于初状态与终状态下的状态参数的差值，与热力过程的路径无关。

2) 热力系统进行一个热力过程后又回到原来的初状态，它所有的状态参数都没有改变。即状态参数的改变量为零。

热力学中主要的状态参数有：温度、压力、密度、热力学能、焓、熵等。其中温度、压力和密度（或比体积）称为基本状态参数。基本状态参数是可测量的，其他的状态参数都不能测量，必须由基本状态参数导出，称为导出状态参数。

二、平衡状态

只有在系统中工质内部各点都有相同的状态参数时，我们才可以用一个状态参数来描述整个系统的状态。工质内部各点的状态参数都是一致的状态称为平衡状态。平衡状态是一个动态平衡。如与外界的能量和质量交换发生改变，则原来的平衡就会被打破，去建立一个新的平衡，此时的状态参数与原来的已经不同，发生了改变。

三、基本状态参数

1. 温度

温度是从宏观上描述工质冷热程度的物理量。当一定量的工质都有相同的温度时，则称这些工质处于热平衡状态，只有处于热平衡的工质，才有相同的温度。而在微观上，温度则反映了大量工质分子运动的快慢程度，是分子平均动能的体现。

测量温度的尺度称为温标，温标是人为规定的，它由零点和一定间隔的刻度构成。常见的温标有三种：热力学温标、摄氏温标和华氏温标。我们只介绍热力学温标和摄氏温标。

(1) 热力学温标（国际温标） 热力学温标规定的温度称为热力学温度，符号为 T ，单位为开尔文（K），简称开。热力学温标选取纯水的三相点为基本定点，定义纯水的三相点温度为 273.16K，单位开尔文就是纯水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

(2) 摄氏温度 摄氏温标规定的温度称为摄氏温度，也就是我们日常所说的温度，符号为 t ，单位是摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。规定一个大气压下水在凝固点的温度 0°C ，在沸点时的温度为 100°C 。摄氏温度的零度相当于热力学温度的 273.15K。在一般情况下不要求太高的精度，则认为相当于热力学温度的 273K。

(3) 两种温标的关系 热力学温度与摄氏温度的刻度大小是相等的。所以有：

$$T = t + 273 \quad (1-1)$$

2. 压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力。以符号 p 表示。对于气体工质来说, 气体的压力是大量气体分子作不规则运动时撞击容器壁的结果。由于气体中包含的分子数量极多, 撞击的次数很频繁, 只能大致观察到大量分子撞击的平均结果。气体压力就是大量气体分子撞击容器壁时, 在单位面积上所产生的垂直方向上的平均作用力。在物理学上此概念称为压强。

工程上容器中气体工质的压力通过压力表来测定。大气环境中的气体压力称为大气压力, 大气压力用 p_0 表示。测量压力的压力表一般为弹簧管式压力计或 U 形管式压力计, 这些表计的测量原理都是建立在力平衡的基础上的。测压的基准为大气压力。测压表计上的读数为容器内所测气体真实压力与大气压力的差值。

工质的真实压力称为绝对压力, 以 p 表示。如气体的绝对压力大于大气压力时, 超出大气压力的部分就是压力表的读数, 称为表压力, 用 p_k 表示。则有:

$$p = p_0 + p_k \quad (1-2)$$

当容器中的气体绝对压力低于大气压力时 ($p < p_0$), 测压仪表指示的读数称为负压或真空度, 用 p_v 表示。则有:

$$p = p_0 - p_v \quad (1-3)$$

由于大气压力的数值随时间和地点而变, 不是恒定值。所以, 表计所测的值会随着大气压力的改变而改变, 所以只有绝对压力才能作为状态参数, 而表压力和真空度都不是状态参数。如果没有特殊说明, 本书中的压力均指绝对压力。

压力的单位: 在法定计量单位中, 压力的单位为 N/m^2 , 称为帕斯卡 (Pa), 即 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。在工程上, 帕斯卡是一个较小的单位, 习惯上常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 作为实用单位。

法定计量的单位压力还可以用液柱高度来表示。有 mmHg、mH₂O、mmH₂O 等。

$1\text{mmHg} = 133.3\text{Pa}$, $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.8\text{Pa}$ 。

除了这两种表示方法, 还可用大气压来表示。有物理大气压 (又称为标准大气压) (atm) 和工程大气压 (at) 两种。

$1\text{atm} = 1.01325 \times 10^5\text{Pa}$, $1\text{at} = 9.8 \times 10^4\text{Pa}$ 。

在工程计算中, 为了方便起见, 大气压力 p_0 近似可取 $p_0 = 1\text{at}$ 或 $p_0 = 1 \times 10^5\text{Pa}$ 。

3. 密度和比体积

(1) 密度 系统中工质占有的空间称为体积, 用 V 表示, 单位为 m^3 。系统内工质的质量用 m 表示, 单位为 kg。单位体积内的工质质量称为密度, 用 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 , 即:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(2) 比体积 单位质量的工质占有的体积称为比体积, 用 v 表示, 单位为 m^3/kg , 即:

$$v = \frac{V}{m}$$

从上两式可见, 密度和比体积互为倒数。即:

$$\rho v = 1$$

密度和比体积均为描述分子密集程度的物理量。

例 1-1 一个容器中气体的体积为 3m^3 ，质量是 1.5kg ，气体的温度为 20°C ，大气压力等于 $1 \times 10^5\text{Pa}$ ，用测压计测得的表压力为 $4 \times 10^5\text{Pa}$ ，求该系统内气体的热力学温度、绝对压力、密度和比体积？

解：已知 $m = 1.5\text{kg}$ $V = 3\text{m}^3$ $t = 20^\circ\text{C}$ $p_b = 1 \times 10^5\text{Pa}$ $p_e = 5 \times 10^5\text{Pa}$

$$T = t + 273 = (20 + 273)\text{K} = 293\text{K}$$

$$p = p_b + p_e = (1 \times 10^5 + 4 \times 10^5)\text{Pa} = 5 \times 10^5\text{Pa}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1.5}{3}\text{kg}/\text{m}^3 = 0.5\text{kg}/\text{m}^3$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{3}{1.5}\text{m}^3/\text{kg} = 2\text{m}^3/\text{kg}$$

系统内工质的热力学温度为 293K ，绝对压力为 $5 \times 10^5\text{Pa}$ ，密度为 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ ，比体积为 $2\text{m}^3/\text{kg}$ 。

第三节 理想气体及状态方程式

一、理想气体与实际气体

由于工质大多为气体，所以需对气体的性质、运动规律要有所了解。根据气体分子运动论，大量的气体分子不停的进行热运动。气体分子的热运动是无规则的。分子本身具有一定的体积，气体分子之间还存在着相互作用力。所以，气体的性质是非常复杂的。为了研究问题方便起见，提出了理想气体的概念。

理想气体是一种实际上并不存在的假想气体。理想气体的两个条件为：

1. 分子为不占有体积的质点；
2. 分子之间不存在相互作用力。

凡是不符合这两个条件的气体为实际气体。

气体的三个基本状态参数是相互制约的，气体的温度越高，则分子的热运动速度就越快，则产生的压力就越大。气体的密度越大，气体的相互碰撞的机会也就越多，碰撞容器壁的次数也越多，同样压力也就越大。但由于气体分子要占据运动空间以及分子之间的相互作用力对分子的运动也会产生影响。这样，导致三个状态参数的函数关系变得很复杂。引入理想气体的概念可使问题简化，各状态参数之间可以得出简单的函数关系。对于有些实际气体而言，压力越低、温度越高，则气体的密度就越小，分子间的距离较大，分子本身的体积相对于分子运动空间所占的比例很小，完全可以忽略；而分子间的相互作用力由于距离的增大也变得很小。这些实际气体也就越接近理想气体。此时，忽略气体分子体积和分子间相互作用力所产生的误差不大，完全可以满足工程上的要求。因此这样的气体可以看成理想气体。在常温常压下，工程上常用的气体有氧气、氮气、氢气、一氧化碳、二氧化碳等。以及由这些气体组成的空气、燃气、烟气等都可以看成是理想气体。空气中的水蒸气由于密度很小也可以看成是理想气体。但锅炉中产生的水蒸气由于密度很大就不能作为理想气体来处理。

二、理想气体状态方程式

理想气体在任何平衡状态下，它的三个状态参数满足这样的关系：压力和比体积的乘积与温度的比值为一个常量。即：

$$\frac{pv}{T} = R \quad (1-4)$$

式中, p 为气体的绝对压力 (N/m^2); v 是气体的比体积 (m^3/kg); T 是气体的热力学温度 (K); R 是气体常数 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)。

此式称为理想气体状态方程式, 该式是对 1kg 的气体而言。式中的 R 是一个常数, 称为气体常数。气体常数 R 与状态无关, 只决定于气体的种类。不同的气体有不同的气体常数。但对于同一种气体, 不论在什么状态下, 气体常数恒为常量。

从公式中可见, 由于对一定的气体, R 值一定。三个状态参数中任意两个为已知, 就可以求出第三个参数。这就是说, 对于一定状态的气体, 只要知道三个参数中的两个, 气体的状态就确定了。即已知两个状态参数就能确定气体的状态。

如气体的质量是 $m\text{kg}$, 则理想气体方程式可写为:

$$\frac{pV}{T} = mR \quad (1-5)$$

式中, $V = mv$, 即 $m\text{kg}$ 气体所占有的体积。

同一种气体从一个平衡状态变到另一个平衡状态, 气体常数并没有改变, 我们可以将理想气体状态方程写为另一种形式, 即:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad (1-6)$$

对于 $m\text{kg}$ 的气体, 则可写为:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1-7)$$

式(1-7)要求过程中气体的质量保持不变, 如果在状态改变的过程中发生质量的变化, 该式不成立。

表 1-1 列出了几种常见气体的气体常数。

表 1-1 几种常见气体的气体常数

气体名称	化学式	分子量	气体常数 R ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)
氢	H_2	2	4124.0
氧	O_2	32	259.8
一氧化碳	CO	28	296.8
二氧化碳	CO_2	44	188.9
水蒸汽	H_2O	18	461.5
空气		28.9	287.0
氮	N_2	28	296.8
氨	NH_3	17	488.2

例 1-2 已知空气的压力为 $1 \times 10^5 \text{Pa}$, 温度为 27°C , 空气的气体常数 $R = 287 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。求空气的比体积?

解: 已知 $t = 27^\circ\text{C}$ $p_b = 1 \times 10^5 \text{Pa}$ $R = 287 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$$T = t + 273 = (27 + 273) \text{K} = 300 \text{K}$$

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{287 \times 300}{1 \times 10^5} \text{m}^3/\text{kg} = 0.861 \text{m}^3/\text{kg}$$

空气的比体积为 $0.86\text{m}^3/\text{kg}$ 。

第四节 理想气体状态方程式的应用举例

一、通用气体常数

气体的气体常数一般情况下我们可以通过查表求得。但有时不方便查表时则可以通过计算得到。对于不同的气体，气体常数的数值是不同的。但是它们的分子量与气体常数的乘积则为一个常量，我们将其称为通用气体常数。通用气体常数是由气体的物质的量的特点导出的，对于各种物质，只要它们的质量数等于分子量，则就有同样的分子数目，称为阿佛加德罗常数，其数值为 6.023×10^{23} 个，用 1mol 表示，称为物质的量。对于各种气体，在相同的压力和温度下，有着相同的体积，称为物质的量体积 V_M 。根据理想气体方程式， 1mol 物质的量，其质量称为摩尔质量，用 M 表示，在数值上等于物质的分子量。所以 1kmol 物质的量，其质量为 $M\text{kg}$ 。对于 1kmol 各种气体在相同的压力和温度下，有着相同的体积，称为物质的量体积，用 V_M 表示。根据理想气体状态方程式，压力与体积 V_M 乘积与热力学温度的比值为常数，等于气体质量 M 和气体常数 R 的乘积。由于各种气体的 V_M 值相等，所以 M 与 R 的乘积也相等，用 R_M 表示，则有：

$$\frac{pV_M}{T} = MR = R_M$$

$$R_M = MR = 8314\text{J}/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

这样，只要已知气体的分子量就能求出该气体的气体常数。即

$$R = \frac{R_M}{M} \quad (1-8)$$

二、气体的标准状态

在工程上规定，在压力为一个大气压、温度为 0°C 时，气体所处的状态称为标准状态。这样在说明气体处于标准状态时，则气体的压力和温度就是已知的。标准状态下的压力用 p_0 表示，温度用 t_0 (或 T_0) 表示。比体积用 v_0 表示。

三、使用理想气体状态方程式的注意事项

- 1) 在方程式中的温度为热力学温度，而测得的温度都是摄氏温度，需要将摄氏温度换算成热力学温度。
- 2) 公式中的压力为气体的绝对压力，同样，测量得到的压力读数为压力表的读数，即为表压力，也需要换算为绝对压力。
- 3) 在计算气体从一个热力状态到另一个状态时，应注意气体的质量不能发生改变，在用比体积计算时可以不考虑这一点。

例 1-3 已知氮气的分子量为 28，求氮气的气体常数？

解：已知 $M=28$ ， $R_M=8314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$

$$R = \frac{R_M}{M} = \frac{8314}{28}\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 296.9\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

氮气的气体常数为 $296.9\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

例 1-4 已知一氧气瓶的体积为 0.05m^3 ，瓶上测压表的读数为 $149 \times 10^6\text{Pa}$ ，温度 20°C 。求

瓶内氧气的质量?

解: 已知 $V=0.03\text{m}^3$ $p=p_b+p_e=(1\times 10^5+149\times 10^5)\text{Pa}=150\times 10^5\text{Pa}$

$$T=t+273=(20+273)\text{K}=293\text{K} \quad M=32$$

$$R=\frac{R_M}{M}=\frac{8314}{32}\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})=259.8\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$m=\frac{pV}{RT}=\frac{150\times 10^5\times 0.03}{259.8\times 293}\text{kg}=9.85\text{kg}$$

瓶中氧气的质量为 9.85kg 。

例 1-5 空气的气体常数 $R=287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 求空气在标准状态下的比体积 v_0 ?

解: 已知 $t=0^\circ\text{C}$ $T=t+273=(0+273)\text{K}=273\text{K}$, $p_0=1\times 10^5\text{Pa}$

$$v_0=\frac{RT}{p}=\frac{287\times 273}{1\times 10^5}\text{m}^3/\text{kg}=0.784\text{m}^3/\text{kg}$$

空气在标准状态下的比体积为 $0.784\text{m}^3/\text{kg}$ 。

例 1-6 求空气在 $p=1\times 10^5\text{Pa}$, $t=20^\circ\text{C}$ 时的比体积和密度?

解: 已知 $p=1\times 10^5\text{Pa}$ $T=(20+273)\text{K}=293\text{K}$ $R=287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$$v=\frac{RT}{p}=\frac{287\times 293}{1\times 10^5}\text{m}^3/\text{kg}=0.84\text{m}^3/\text{kg}$$

$$\rho=\frac{1}{v}=\frac{1}{0.84}\text{kg}/\text{m}^3=1.19\text{kg}/\text{m}^3$$

空气在 20°C 时的比体积为 $0.84\text{m}^3/\text{kg}$, 密度为 $1.19\text{kg}/\text{m}^3$ 。

例 1-7 0.05m^3 氮气压力为 $3\times 10^5\text{Pa}$, 温度为 27°C , 如加热到 227°C , 压力增大到 $4\times 10^5\text{Pa}$, 问此时的体积是多少?

解: 已知 $V_1=0.05\text{m}^3$ $T_1=t_1+273=(27+273)\text{K}=300\text{K}$ $p_1=3\times 10^5\text{Pa}$ $p_2=5\times 10^5\text{Pa}$ $T_2=t_2+273=(227+273)\text{K}=500\text{K}$

$$V_2=\frac{p_1V_1T_2}{p_2T_1}=\frac{3\times 10^5\times 0.05\times 500}{4\times 10^5\times 300}\text{m}^3=0.0625\text{m}^3$$

氮气的体积为 0.0625m^3 。

习 题

- 1-1 什么是工质? 工质有哪些特点?
- 1-2 什么是热力系? 为什么要提出热力系的概念?
- 1-3 什么是工质的状态参数? 表压力和真空度是不是状态参数?
- 1-4 热力学温标与摄氏温标有什么关系?
- 1-5 什么是理想气体? 什么样的实际气体可以看成是理想气体?
- 1-6 从气压计上读得的大气压为 $1\times 10^5\text{Pa}$, 求下面几种状态的气体绝对压力:
 - (1) 表压力为 $2\times 10^5\text{Pa}$ 时绝对压力;
 - (2) 真空表上的读数为 $0.3\times 10^5\text{Pa}$ 。