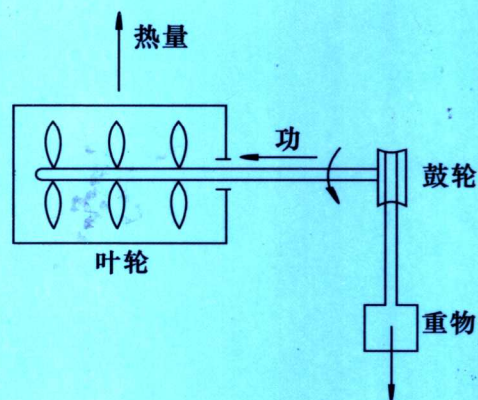
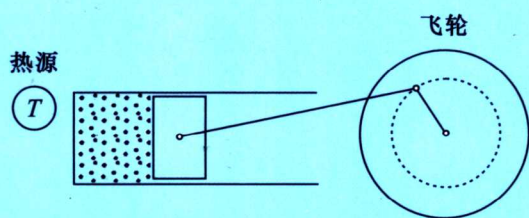


高等学校教材

工程热力学

何立明 骆广琦 王旭 编著



航空工业出版社

工 程 热 力 学

何立明 骆广琦 王旭 编著

航空工业出版社

2004

内 容 提 要

本书是按照飞机与发动机专业《工程热力学》教学大纲的要求编写的。

本书主要介绍了热力学的基本概念和气体的热力性质与计算、热力学第一定律、热力学第二定律,并结合工程实际,分析讨论了气体的主要热力过程和发动机的理想循环。同时,对完全气体混合物及湿空气进行了介绍。为了加深对工质有关性质的理解,对气体分子运动论亦作了简单的介绍。

在教材内容体系的构架上,做到由浅入深,讲清物理概念,力求联系工程实际,紧密结合专业需求,为学习本专业后续课程奠定坚实的基础理论知识。为了巩固所学知识,培养学生分析问题和解决问题的能力,各章都编入了一定数量的例题和习题。

本书可用于航空院校飞机与发动机专业的教材或参考书,亦可作为航空动力工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学 / 何立明主编. —北京: 航空工业出版社,
2004. 10
ISBN 7-80183-474-7

I. 工… II. 何… III. 工程热力学 IV. TK123
中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第102150号

工程热力学 Gongcheng Relixue

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话: 010-84926529 010-64978486

西安翔云印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2004年10月第1版

2004年10月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 9.625

字数: 246千字

印数: 1-2200

定价: 26.00元

前 言

本书是按照飞机与发动机专业《工程热力学》教学大纲的要求编写的。

本书主要讲述热力学的基本概念和气体的热力性质与计算、热力学第一定律、热力学第二定律,并结合工程实际,分析讨论了气体的主要热力过程和发动机的理想循环。同时,考虑到航空发动机使用工质的实际及使用条件的变化,对完全气体混合物及湿空气进行了介绍。而且还简单地介绍了气体分子运动论的基本知识,以便加深对工质有关性质的理解。

本书在取材和广度上,侧重于飞机与发动机专业的需要,故对水蒸气及蒸汽动力循环、制冷循环等未作详细介绍。在教材内容体系构架上,根据以往教学实践经验,注意由浅入深,讲清物理概念,又力求理论联系实际,紧密结合专业需求。同时,为了加深对教材基本内容的理解,巩固所学内容,启迪思想,培养学生分析问题和解决问题的能力,各章都编入了一定数量的例题和习题。

本书由何立明主编。书中的绪论、第1、2、3、4章由何立明编写,第5、6章由骆广琦编写,第7章由王旭编写。由何立明对全书进行统稿。

陶增元教授全面审查了本教材,并提出了许多宝贵的意见和建议。在教材的编写过程中得到了程邦勤、陈鑫同志的大力帮助。金涛、李名魁、陈超、邓新发、蒋永健、汪伟、于锦禄等博士、硕士研究生制作了本书的全部插图和完成文稿输入及排版工作,为之付出了艰辛的劳动。在本书的出版过程中,还得到了空军工程大学工程学院教保科的大力支持。编者谨在此向以上同志和单位一并表示衷心的感谢和敬意。

向参考文献的作者表示深深的敬意和衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中不足之处敬请读者批评指正。

编 者

2004年8月

目 录

绪 论

0.1 自然界中的能源及其利用	1
0.2 热力学及热力发动机的发展简史	1
0.3 工程热力学的研究对象及其主要内容	2
0.4 研究热现象的两种方法	3

第1章 基本概念及气体的基本性质与计算

1.1 热力学体系	5
1.2 热力学状态 平衡状态	6
1.3 气体的基本状态参数	6
1.4 气体状态参数的特性	13
1.5 完全气体与实际气体	15
1.6 完全气体诸定律及状态方程式	15
习 题	21

第2章 热力学第一定律

2.1 热力学第一定律 当量原理	24
2.2 热力学第一定律解析式	25
2.3 总能量 内能	27
2.4 可逆过程和不可逆过程	28
2.5 闭口体系能量方程式	30
2.6 开口体系能量方程式	31
2.7 气体的比热 热量的计算	38
习 题	46

第3章 气体的热力过程

3.1 分析热力过程的目的和方法及内容	49
3.2 熵 温熵图 焓熵图	50
3.3 定容过程	53
3.4 定压过程	56
3.5 定温过程	59
3.6 可逆绝热过程(定熵过程)	62
3.7 多变过程	65
习 题	73

第4章 热力学第二定律

4.1 热力循环	76
4.2 热力学第二定律的两种表述	80
4.3 卡诺定理	82
4.4 两个极限温度范围内工作的循环热效率	85

4.5	热力学第二定律与熵·····	88
4.6	孤立体系熵增原理·····	92
	习 题·····	97
第5章 完全气体混合物及湿空气		
5.1	分压力 and 道尔顿定律·····	100
5.2	分容积 and 阿麦加特定律·····	101
5.3	混合气体的成分表示法及其换算·····	101
5.4	混合气体的平均分子量和气体常数·····	102
5.5	混合气体的分压力与质量成分和容积成分的关系·····	104
5.6	混合气体的比热、内能、焓和熵·····	105
5.7	湿空气及其湿度和湿空气的其他参数·····	108
	习 题·····	117
第6章 发动机的理想循环		
6.1	活塞式发动机的理想循环·····	120
6.2	喷气式发动机的理想循环·····	125
	习 题·····	129
第7章 气体分子运动论简介		
7.1	基本假设·····	131
7.2	气体的压力·····	131
7.3	麦克斯韦速度分布律·····	133
7.4	分子的平均自由度·····	138
7.5	气体黏性力与黏性系数·····	140
7.6	导热系数·····	142
7.7	扩散系数·····	144
	习 题·····	146
参考文献 ·····		147

绪 论

0.1 自然界中的能源及其利用

自然能源的开发和利用是人类走向繁荣的起点，能源开发和利用的程度又是生产发展的一个重要标志。因地制宜地充分利用我国的能量资源，是实现我国四个现代化的一个重要条件。所谓能源，是指为人类生产与日常生活提供各种能量和动力的物质资源。迄今为止，已为人们所发现的自然界中可被利用的能源主要有：风能、水能、太阳能、地热、燃料的化学能和原子能等。

风能和水能是以机械能的形式（指空气的动能和水的位能）提供给人们，主要用来发电等。太阳以热辐射的方式向地球传送大量的热能，可以说太阳能是地球上一切能源的来源，风能、水能和燃料的化学能都间接地来自太阳。但是人类直接使用太阳能还是不久以前才付诸实施的，例如太阳能加热器和太阳能电池，已在日常生活、医疗设备或工业上以及人造卫星和宇宙运载工具中得到应用。地热可将水加热成为热水或蒸汽以传送热能。

煤、石油和天然气等燃料的化学能是通过燃烧，以热的形式释放出来，再将热能转换为机械能和电能，这是当前人们利用最多的能源。利用燃料的化学能，由热能转换为机械能的动力装置叫做热力发动机或简称热机。例如，蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机和喷气发动机等都是热力发动机。核能是通过裂变反应或聚变反应释放出来的能量，是一种高温形式的热能。

热能转换为机械能在热效率上有一定的限度。在目前性能最好的动力装置中，也只能将供给该装置的热能中的 40% 左右变为机械能，即热效率只有 40% 左右。可见，将燃料的化学能先转换成热能，再转换成机械能的这一办法是很不经济的。但是，目前它还是从这些能源取得大量动力的惟一切实可行的办法。

目前世界各国使用的能源，大部分还都是来自煤和石油等燃料的化学能。由于这些燃料是不可再生的，且其蕴藏量总是有限的。因此，为了满足动力工业飞速发展的需要，一方面应加紧进行地质勘探，努力发现新的煤田、油气田；另一方面应从技术上改造原有设备，节约能源消耗，提高热能利用率，这是人们长期的战斗任务。此外，就是开发新能源，例如地热能、太阳能和原子能等，使之更加有效地进行能量转换。因为太阳能是一个取之不尽的能源，而进行热核反应的物质在地球上的储存量也是极大的。为了提高热力发动机的热效率，开发、利用新能源，这就要求从事能量转换学科及热能工作者必须掌握有关能量及其相互转换规律的知识——即工程热力学的知识。

0.2 热力学及热力发动机的发展简史

自然界中大部分能源的利用都与热现象有关，因而热现象是人类生活中最早接触到的自然现象之一。相传远古时代的钻木取火，使木头温度升高而发生燃烧，这是机械能转换为热能的例子。随着人类在生活上和生产上的需要，对热的利用和认识不断加深，产生了不少发明创造，在此基础上，逐步形成了热力学理论萌芽。但是，人类对热的本质的认识并逐渐形成热力学这门学科，只是近 300 年的事。18 世纪以前，动力的来源主要是人力、畜力以及风

力、水力等自然动力。随着人类社会的发展，人们迫切地要求解决生产上动力不足的问题，因此，在 18 世纪发明了蒸汽机，实现了热能向机械能的转换。蒸汽机在工业上的广泛使用，促进了工业的迅速发展。但是，由于蒸汽机存在笨重、效率不高等缺点，而促使人们对水和蒸汽以及其他物质的热力性质进行研究；与此同时，卡诺对如何提高热效率，迈耶、焦耳等人对热与功的转换规律进行了大量的实验，从而建立了热力学两个基本定律，大大地促进了热力学这门学科的形成和发展，并促使热力发动机不断地发展与改进，以及新型动力机的创造与发明。例如，由于蒸汽机具有笨重、庞大、效率低等缺点，尤其是不宜用在运输工具上，而且也不能满足由于工业生产的不断发展与高度集中所需要的巨大动力，因此促使人们利用其他工质——气体来代替蒸汽，并在热力发动机内部实施燃烧过程。在热力学有关理论的指导下，于 19 世纪末期，遂发明了内燃机及蒸汽轮机。内燃机具有效率高、重量轻的优点，蒸汽轮机则具有效率高及功率大的优点。内燃机及蒸汽轮机的出现，不仅可以作为交通运输工具的动力机，而且也极大地促进并发展了热力学中热力过程和热力循环的研究，而蒸汽轮机又推动了高参数蒸汽性质及高速气流等问题的研究，使热力学两个定律应用于工程实践中去，从而形成了工程热力学学科。

第二次世界大战期间出现的喷气式飞机和远程火箭所用的喷气发动机，由于能产生巨大的动力等优点，所以能满足高速、高空飞行的要求，目前已成为进入宇宙空间飞行器的主要动力装置。对航空燃气轮机进行部分改造，即成为地面上所使用的燃气轮机，在发电站、机车和船舶中已得到广泛的应用，它的出现，更加丰富了工程热力学的研究内容。

近年来原子能动力装置的利用，为人类开辟了利用能源的新纪元。此外，还出现了能量直接转换的新技术，它既可提高能量转换的效率，又可免去庞大的热力机械，例如化学能直接转化成为电能的燃料电池，热能直接转化为电能的温差电池和磁流体发电等。这些都极大地丰富了工程热力学的研究内容。

0.3 工程热力学的研究对象及其主要内容

工程热力学是热力学的一个重要分支，主要研究热能与机械能相互转换的规律及其在热力工程中的应用，为研究热力设备（特别是热动力装置）中的能量转换提供理论基础，同时，提供提高能量利用经济性的方法和途径。具体地说，工程热力学的主要研究内容包括以下几个方面。

（一）研究热力学的基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律

热力学第一定律和热力学第二定律是工程热力学的理论基础。其中，热力学第一定律规定了热能与机械能相互转换时的数量关系；热力学第二定律指出能量转换的方向性，并由此说明热能与机械能之间存在着质的差别。应用这两个定律可以从量和质两个方面综合地研究热力设备中的能量转换。

（二）研究工质的热物理性质

在热力设备中，热能转换为机械能必须通过工质参与工作才能实现，故只有对工质的热物理性质有深刻的认识，或者说，在测量、计算出代表工质性质的热物理参数（如温度、压力、密度和比热等）和掌握它们相互之间的关系后，才能更好地掌握热能与机械能之间的转换规律。

（三）研究能量之间的转换规律及其应用

研究热力设备（热机）中一切过程中热能与机械能进行转换时所服从的规律，即能量守恒和转换定律或热力学第一定律，以及热能和机械能的计算方法，并把它们运用于具体热机的热力过程中去。此外，还研究在什么条件下，用什么方法，才能使热能最大限度地或最经济地、连续不断地转换为机械能，亦即分析影响能量转换效果的因素，探讨提高转换效果的途径，减少热能利用中的损失，以提高热能的利用率，此即热力学第二定律。这就为分析热力循环，提高其经济性，奠定了理论基础。

为了能深刻地认识热现象的本质、能量转换规律的物理意义和考虑到今后发展的需要，在本课程中也简单地介绍了气体分子运动论的基本概念。

0.4 研究热现象的两种方法

工程热力学是研究热现象的理论在工程上的应用。因此，讨论它的研究方法，将涉及研究热现象的一般方法。

研究热现象有两种截然不同的方法：一是宏观研究方法，又叫做热力学的方法；另一种是微观研究方法，又叫做统计物理学的方法。两者都是用来解释热现象的规律和物质的热力性质，但是所用的观点和方法不同。工程热力学主要采用热力学的宏观研究方法。

热力学方法不考虑物质的微观结构，把物质看成连续的整体，并且用宏观物理量来描述它的状态。这种方法不研究物质内部微观粒子的运动，而是通过对大量宏观热现象的直接观察和实验，总结出有关热现象的基本规律，即热力学的基本定律，再以热力学基本定律为依据，进行严密的逻辑推理，根据实际问题的具体条件导出描述物质性质的宏观物理量之间的普遍关系及其他一些重要的推论。由于热力学基本定律不是由某些个别实验直接证明的，而是无数经验的总结，因此这些定律及其推论具有高度的可靠性和普遍性。将热力学基本定律及其推论与各项实际问题的具体条件结合，可以导出与这些具体条件相适应的很多有用的公式和结论。例如，可以导出气体在各种状态变化过程中吸热量的计算式、各种热机循环效率的计算式等。热力学方法有其局限性，由于它不涉及物质的微观结构，因此用这种方法建立的热力学宏观理论不能解释热现象的本质及其发生的内部原因。微观研究方法及其研究成果正好弥补了这个不足。

统计物理学方法是从物质的微观结构出发，即从分子、原子的运动和它们的相互作用出发，去研究热现象的规律。微观理论认为，宏观热现象是组成物质的大量粒子（由分子和原子所组成）作无规则运动的结果。虽然每个微观粒子的运动具有极大的偶然性，但大量微粒在总体上却存在确定的规律性。统计物理学在对物质的微观结构及微粒的运动规律作某些假设的基础上，应用统计的方法，将宏观物理量解释为微观量的统计平均值。因此，微观理论可以解释热现象的本质及其发生的内部原因。由于统计物理学对物质的微观结构作了某些简化假定，所以，其推论结果与实际并不完全符合，这是它的局限性。但是，随着人们对物质结构认识的深入，用统计物理学方法所得的研究结果也将逐步地更接近于实际。

综上所述，可见这两种研究方法实际上是相辅相成的，相互充实的。作为应用学科之一的工程热力学，主要是研究热能、机械能和物质特性等宏观现象之间的相互规律，因此，所用的研究方法主要是宏观方法，但同时也用微观的研究方法来辅助说明一些本质的问题。

工程热力学是热力学的一个分支，所以它的研究方法除上述的宏观方法以外，还要结合工程实际的特点，掌握以下研究问题的方法。

(1) 对实际问题进行抽象、概括、理想化和简化，只有这样，才能去粗取精、抓住本质，正确地利用热能转化为机械能的普遍规律以及所引出的一些基本定律和有关计算公式，从而培养分析问题和解决实际问题的能力。例如，在航空发动机燃烧室中燃料燃烧产生的高温燃气这一实际问题，往往采取简化为具有一定温度的抽象热源对气体进行加热，并看作是定压加热过程；又如空气、内燃机和燃气轮机的燃气等实际气体理想化为完全气体或理想气体，这都有助于计算，而仍可得到工程计算上必要的准确度。

(2) 本课程是一门专业基础课，应强调热力学基本定律在工程上的应用，所以一定要重视解题和实验，这不仅有助于巩固、深入理解热力学的基本定律及其与物质宏观性质的相互关系，而且也有助于培养工程计算能力和实际的基本技能，掌握正确的取得计算结果和实验结果合理性和准确性的方法。

第 1 章 基本概念及气体的基本性质与计算

热力发动机实现热能转换为机械能时，必须借助于某种媒介物质，这种媒介物质叫做工作介质，简称工质。例如，航空发动机工作时的空气或燃气，蒸汽机或蒸汽轮机工作时的蒸气，经过吸热、膨胀而作功。

热力发动机一般都选用气态物质作为工质。热力发动机为什么不采用液态物质或固态物质作工质，而采用气体作工质，原因在于：通过许多物理现象的观察和实验，认识到一切实际存在的物质是由大量的分子所组成，每个分子具有一定的质量和体积；所有的分子都在作不停的无规则运动，这叫做分子的热运动；分子与分子之间存在着空隙；彼此之间有相互的作用力——吸引力或排斥力。与液态物质和固态物质相比，气态物质的分子运动得最快，分子间的空隙最大，分子间的作用力最小。这表明了气态物质具有显著的流动性和膨胀性的特点，受热后，它能很快地膨胀而推动物体做功，所以气态物质是热力发动机中最理想的工质。依据气态物质离液态的远近可分为气体和蒸汽两大类。蒸汽作为蒸汽动力装置的工质，气体作为燃气动力装置的工质。

既然热力发动机是借助于气体为工质，将燃料燃烧产生的热能转换为机械能的，在阐述热能转换为机械能的规律以前必须先介绍一些基本概念和气体的基本性质。

1.1 热力学体系

在分析热力学问题时，按照研究任务的具体要求，选取某一特定范围内的物质作为研究对象，该研究对象就叫做**热力学体系**或简称**体系**。与体系发生作用，但不被列为研究对象的物质叫做**外界**。体系与外界之间的界限，叫做**分界面**。分界面可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是胀缩的或是运动的。图 1-1 表示选取封闭在汽缸中的气体作为研究对象时，汽缸和活塞的内壁面就是真实的分界面，而活塞顶部却又是可以胀缩的或运动的分界面。图 1-2 为一个叶轮装置，表示气体不断地从 1-1 截面流入，在叶轮的作用下，压力升高，并不断地从 2-2 截面流出。若选取进、出口截面之间的气体作为研究对象，那么进、出口截面 1-1 和 2-2 是假想的、固定的分界面，壳体的内壁是真实的、固定的分界面。

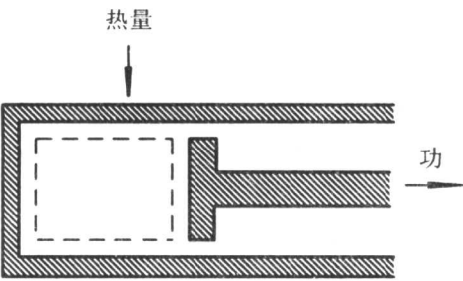


图 1-1 封闭体系

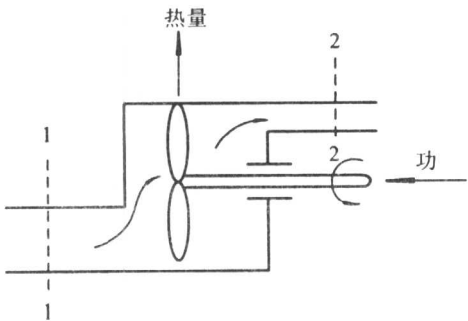


图 1-2 开口体系

体系与外界之间的作用总是通过分界面进行的，按体系与外界之间进行能量和质量交换的情况，可将热力学体系分成下述不同的类型。图 1-1 所示的体系和外界之间，可以有功的交换和热量的交换，但没有物质的交换，这种体系叫做**封闭体系**或简称**闭口体系**。图 1-2 所示的体系与外界之间，不仅可以有功和热量的交换，而且还有物质的交换，这种体系叫做**开口体系**。由于开口体系中能量的交换和物质的交换是在某一划定的空间范围内进行的，所以开口体系又叫做控制容积或控制体，相应地，开口体系的分界面也叫做**控制面**。如体系与外界之间没有热量交换，则叫做**绝热体系**。若体系与外界之间既没有功和热量的交换，又没有物质的交换，则叫做**孤立体系**。

自然界中的一切事物都是普遍联系、相互制约的，所以绝对的封闭体系、绝热体系、孤立体系实际上是不存在的。当体系与外界的作用在某一方面或某些方面被无限削弱，或作用的影响小到可以忽略不计时，那么就可以把它看作某一特定的体系，将复杂的问题简化，这就有利于热力学问题的分析研究。

1.2 热力学状态 平衡状态

热力学状态或简称状态，乃是在某一指定的瞬间，热力学体系所处的宏观物理状态，或者是热力学体系所具有的物理特性的总标志。如果不是研究热力学体系内的每一个分子的状态，而是把体系内大量的气体分子看作一个整体，则可用温度、压力等物理量来描述该体系的状态。因此，像温度、压力等这类物理量，就叫做**状态参数**。

如图 1-1 所示的闭口体系，在没有外界影响的条件下，如果体系各部分的状态不随时间而改变，即反映体系宏观性质的物理量，例如压力和温度等，在任意两个不同的瞬间进行比较，其结果是一样的，那么该体系就是处于**热力学平衡状态**或简称**平衡状态**，否则就处于**不平衡状态**。平衡状态时，虽然气体的每个分子仍然在不停地运动，但是这些分子运动的统计平均值并不随时间而改变，所以这样的平衡为**动态平衡**。平衡状态必须满足热平衡、力平衡和化学平衡的条件。热平衡必须是体系内部的温度均匀一致，并且等于外界的温度；力平衡必须是体系内部的压力均匀一致，并且也等于外界的压力；化学平衡是指体系内各部分之间不发生化学反应和扩散等物质变化。假若外界的温度和压力改变为另一数值时，体系与外界之间将有一定的温度差和压力差，首先发生变化的是体系与外界接触的地方（即分界面附近），然后才涉及到体系的内部。显而易见，这时体系的分界面与体系内部的物质性质就不是均匀一致的，所以它是不平衡状态。但是经过相当时间以后，体系的温度和压力又到处均匀一致，并且也等于外界的温度和压力，这时的体系又重新达到了新的平衡状态。

在外界条件发生变化的情况下，由于气体分子运动得很快，体系会自动地由不平衡状态过渡到平衡状态，而且完成这一过渡所需的时间通常都很短，因此所遇到的体系往往处于平衡状态或非常接近于平衡状态。平衡状态下的体系，不考虑宏观状态随时间改变的因素，所以进行分析计算时，要方便得多。

1.3 气体的基本状态参数

描述物质宏观性质的某些物理量，例如比容、压力和温度具有明确的物理意义，而且可以直接测定，所以称它们为气体的**基本状态参数**。以后还将陆续介绍其他的气体状态参数，

如内能、焓和熵等。

1.3.1 比容、密度和重度

单位质量的气体所占的容积，叫做**比容**，用符号 v 表示。若质量为 m 的气体占有的容积为 V ，则比容 v 为

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

在 SI 制中，容积的单位是立方米 (m^3)，质量的单位是千克 (kg)，因此比容的单位是米³/千克 (m^3/kg)。

单位容积内含有气体的质量，叫做**密度**，用符号 ρ 表示。若质量为 m (kg)的气体占有的容积为 V (m^3)，则密度 ρ 为

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

显然，它的单位是千克/米³ (kg/m^3)。

根据比容和密度的定义式 (1-1) 和 (1-2)，可知比容和密度互为倒数，即

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

由于密度的大小说明气体分子的密集和松散程度，因此比容的大小也说明气体分子的疏密程度。

单位容积内含有气体的重量，叫做**重度**，重度也叫**比重**，用符号 γ 表示。质量为 m (kg)的气体其重量为 mg (N)，若其占有的容积为 V (m^3)，则重度 γ 的定义为

$$\gamma = \frac{mg}{V} \quad (1-4)$$

重度的单位为牛顿/米³ (N/m^3)。

式 (1-4) 除以式 (1-2)，可得 γ 与 ρ 的关系式

$$\gamma = \rho g \quad (1-3b)$$

将式 (1-3a) 与式 (1-3b) 合并，得

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{g}{\gamma} \quad (1-3)$$

比容、密度和重度都是说明气体在某一状态的分子疏密程度，所以他们实质上是一个说明气体物理性质的参数。式 (1-3) 表明了这三者之间的依赖关系，只要知道其中之一，就可确定其他两个参数。在实际应用时，究竟选用哪一个，可根据需要而定。在工程热力学中多用比容。

例 1-1 容积为 60L 的氧气瓶内，盛氧气 0.8kg，求氧气的比容和重度。已知重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

解： 因为 $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$

故 $60 \text{ L} = 0.06 \text{ m}^3$

因而

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0.06}{0.8} = 0.075 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\gamma = \frac{g}{v} = \frac{9.81}{0.075} = 130.8 \text{ N/m}^3$$

例 1-2 空气在某一状态下的重度为 12.26 N/m^3 ，求它的比容和密度。已知重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

解： 利用式 (1-3)，得

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{12.26}{9.81} = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1.25} = 0.8 \text{ m}^3/\text{kg}$$

1.3.2 压力或压强

垂直作用在单位面积上的力，叫做**压力或压强**，用符号 p 表示。气体分子运动论指出，**气体的压力是气体分子作不规则运动时频繁地撞击容器内壁的平均总结果**。由于气体分子的撞击极为频繁，因而人们不可能分辨出单个分子的撞击，只能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的平均作用力。由气体分子运动论求得

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \omega^2}{2} \quad (1-5)$$

式中： p ——压力；

n ——分子浓度，即单位容积内的气体分子数，若容积 V 内有 N 个分子，则 $n = \frac{N}{V}$ ；

$\frac{m_0 \omega^2}{2}$ ——分子的平均移动动能；

m_0 ——分子的质量；

ω ——分子的均方根移动速度，由下式求得

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \omega_i^2}{N}}$$

其中， ω_1 、 ω_2 、...、 ω_N 分别表示各个分子的移动速度。

式 (1-5) 说明，**气体的压力在数值上等于单位容积内气体分子平移运动的平均动能的三分之二**。显然，对于单个分子来说压力是没有意义的。

(1) 压力的测量 表压力、真空度和绝对压力

工质的压力用压力计测量。工程上常用的压力计有两种，即弹簧管式压力计和测量微小压力的 U 形管压力计。由于压力计本身总处在某种环境（通常是大气环境）中，因此，由压力计测得的读数所代表的是被测工质压力与当地环境压力之间的差值，故又称**压差计**。

弹簧管压力计的基本结构如图 1-3 所示。它是利用弹簧管在内外压差作用下产生变形，从而拨动指针转动来指示工质与环境间的压差的。

U 形管压力计如图 1-4 所示。主要部件为一 U 形玻璃管，管内盛有用来测压的液体，例如，水银或水。U 形管的一端与被测工质相连，另一端与环境（例如大气）相通。当工质压力与环境压力不等时，即可由 U 形管两边液柱的高度差读出工质与环境之间的压差。

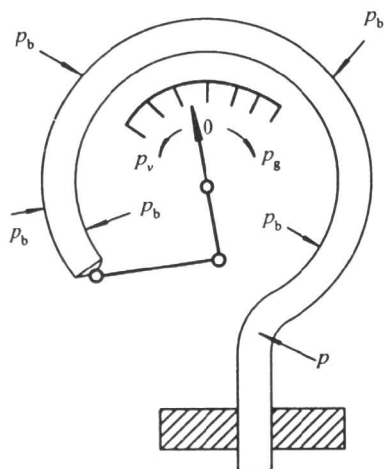


图 1-3 弹簧管压力计

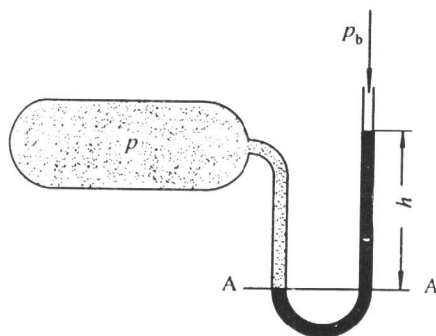


图 1-4 U 形管压力计

根据流体静力学原理，在连通容器内同一高度上其压力相等。取 A-A 等压面，可写出如下力平衡方程

$$p = p_b + \gamma h \quad (1-6)$$

式中： h ——U 形管两边的液柱高度差，m；

p ——被测工质的压力， N/m^2 ；

p_b ——环境压力，通常为气体压力， N/m^2 ；

γ ——测压液体的重度， N/m^3 。

由式 (1-6) 可见，当选择一定的测压液体且将其 γ 视为常数时，液柱高度差 h 与压差 ($p - p_b$) 成正比，故可用高度差单值地度量压差 Δp ，这就是 U 形管压差计的工作原理。

由以上分析可见，由于测压仪表本身常处于大气压力的作用下，其所指示的压力并非工质的真实压力，而是工质压力与当时当地大气压力的差值。

工质真实的压力常称为**绝对压力**，用 p 表示。当地的大气压力用 p_b 表示。当绝对压力高于大气压力（即 $p > p_b$ ）时，压力计指针指示的数值称为**表压力**或**超出压力**，用 p_g 表示，如图 1-5 (a) 所示，显然

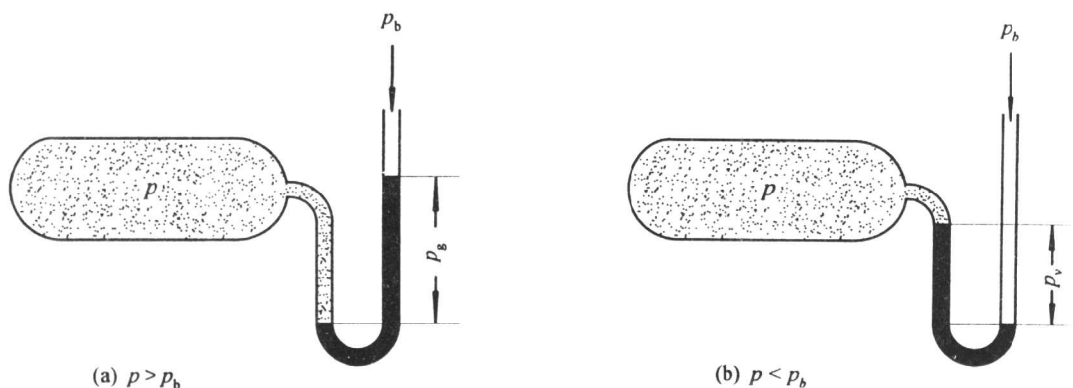


图 1-5 表压力、真空度定义图

$$p_g = p - p_b$$

即

$$p = p_g + p_b \quad (1-7)$$

当工质的绝对压力低于大气压力（即 $p < p_b$ ）时，测压仪表指示的读数称其为**真空度**，用 p_v 表示，如图 1-5（b）所示，显然

$$p_v = p_b - p$$

则

$$p = p_b - p_v \quad (1-8)$$

若以绝对压力为零作基线，可将表压力、真空度、绝对压力、大气压力间的关系用图 1-6 表示。

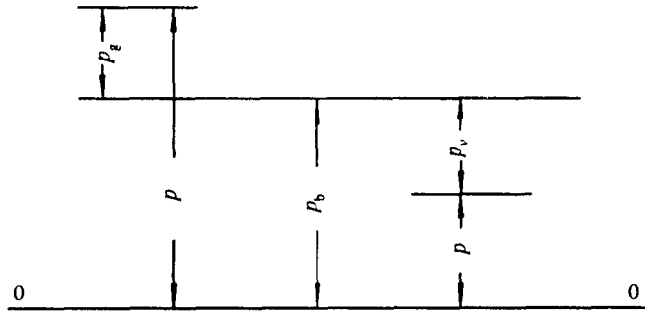


图 1-6 p_g 、 p_v 、 p 、 p_b 关系图

由此可见，为确定工质的绝对压力除使用压力计外还应同时使用大气压力计，以确定当时当地的大气压力。但由于大气压力变化不大，若被测工质压力值很高，大气压力数值的变化相对地说影响甚小，在工程计算中可将大气压力视为常数。但当被测工质压力值较小，与大气压力相近时，则不能将大气压力视为常数，而应利用大气压力计测定其具体数值。

需要说明的是，表压力和真空度只是确定工质绝对压力所需的辅助参数，绝对压力才是工程计算中所应用的状态参数。如果无特殊说明，本书中的压力均指绝对压力。

（2）压力的单位

若气体作用于容器壁面积 A 上的垂直作用力为 P ，那么该壁面上的压力为

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-9)$$

可见，压力的单位由力和面积所取的单位而定。在 SI 制中，力的单位是牛顿（N），面积的单位是平方米（ m^2 ），则压力的单位是牛顿/米²（ N/m^2 ）。1969 年国际计量大会上把这个压力单位定名为**帕斯卡**，简称**帕**。用符号 Pa 表示，即

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

采用帕（Pa）作为压力单位，在工程应用上显得太小，而数值太大，读数不方便，所以实际上取千帕（kPa）、兆帕（MPa）和巴（bar）作为压力的单位，它们与帕（Pa）的关系为

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ kPa} &= 1000 \text{ Pa} \\ 1 \text{ MPa} &= 10^6 \text{ Pa} \\ 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 0.1 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

压力的大小也可以用液柱高度来度量,如图 1-7 所示。设液柱的横截面积为 A , 高度为 h , 液体的密度为 ρ , 则作用于底面积 A 上的总作用力 P 应为该液柱的重量, 即

$$P = \rho g A h$$

因而作用于底面积上的压力为

$$p = \frac{P}{A} = \rho g h = \gamma h \quad (1-11)$$

对于选定的液体 (通常是汞或水), ρ 视为常数, 这样, 液柱的高度与产生的压力成正比, 所以, 可用液柱的高度代表压力的大小, 也就是说, 可以用单位高度的液柱所产生的压力作为度量压力的单位。常用的有毫米汞柱 (mmHg) 和毫米水柱 (mmH₂O)。

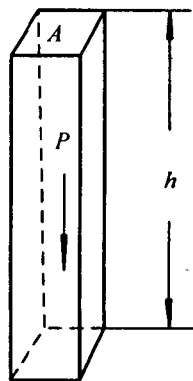


图 1-7 液柱高度

水的密度 $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ (4°C 时), 汞的密度 $\rho_{\text{Hg}} = 13595 \text{ kg/m}^3$ (0°C 时), 依据式 (1-11) 得:

1mm 高度的水柱代表的压力为

$$p = \rho g h = 1000 \times 9.81 \times 0.001 = 9.81 \text{ N/m}^2$$

1mm 高度的汞柱代表的压力为

$$p = 13595 \times 9.81 \times 0.001 = 133.32 \text{ N/m}^2$$

从上可得

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa} &= \frac{1}{9.81} = 0.102 \text{ mmH}_2\text{O} \\ &= \frac{1}{133.32} = 750 \times 10^{-5} \text{ mmHg} \end{aligned}$$

或 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 750 \text{ mmHg} = 1.02 \times 10^4 \text{ mmH}_2\text{O}$

物理学中, 将纬度 45° 、大气温度为 0°C 的海平面上的大气常年平均压力, 叫做**物理大气压**或**标准大气压** (atm)。以此作为度量压力的一种单位。它与其他单位的换算关系如下

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.01325 \text{ bar} \\ &= 760 \text{ mmHg} = 1.0332 \times 10^4 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

在工程制中, 力的单位为千克力 (kgf), 面积的单位为平方米 (m^2), 因而压力的单位为千克力/米² (kgf/m^2)。此单位在工程实用中亦嫌太小, 故常取工程大气压 (at) 作为压力单位, 即

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

它与其他单位的换算关系为

$$\begin{aligned} 1 \text{ at} &= 0.980665 \text{ bar} = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa} = 0.9678 \text{ atm} \\ &= 735.559 \text{ mmHg} = 1 \times 10^4 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$