

早期三校统编教材

高等学校试用教科书

工 程 热 力 学

上 册

西 北 工 业 大 学
南 京 航 空 学 院 合 编
北 京 航 空 学 院

赠
南航文庫
趙永龍
07.9.21

西 北 工 业 大 学

一九八〇年元月

TK123/1024-A



2008047809

TK123
1024-A1

说 明

本书是为高等航空院校动力类各专业编写的教科书，由西北工业大学、南京航空学院和北京航空学院联合编写。全书共十三章，分上、下两册。

上册在介绍热力学的基本概念以后，根据热力学的两个定律阐述了一般原理，接着叙述了气体的主要过程和气体的动力循环。下册在上册所述内容的基础上，着重介绍了实际气体的热力学和化学热力学，最后简单地介绍了气体分子运动论和经典统计力学的基本概念。

上册中的绪论、第一、二、三、五章，由西工大欧阳榭编写，第四章由南航赵承龙编写，第六章由南航李立国编写。

下册中的第七、八、十、十一章，由北航董耀德编写，第九章由西工大欧阳榭编写，第十二、十三章由北航李继坤编写。



2008047809

上册 目 录

绪 论	1
§0-1 自然界中的能源及能的利用	1
§0-2 热力学及热力发动机的发展简史	2
§0-3 涡轮喷气发动机的简单工作原理	3
§0-4 工程热力学的研究对象	4
§0-5 研究热现象的两种方法	4
第一章 气体的性质及其计算	6
§1-1 热力学体系	6
§1-2 热力学状态 平衡状态	6
§1-3 单位制	7
§1-4 气体的基本状态参数	8
§1-5 气体状态参数的特性 状态方程式 参数坐标图	15
§1-6 完全气体与实际气体	16
§1-7 完全气体的诸定律及状态方程式	17
§1-8 完全气体温标	23
§1-9 完全气体的混合物	24
习题	29
第二章 热力学第一定律	31
§2-1 热力学第一定律 当量原理	31
§2-2 热力学第一定律解析式	33
§2-3 总能量 内能	35
§2-4 可逆过程和不可逆过程	36
§2-5 容积功(膨胀功或压缩功)	38
§2-6 焓	39
§2-7 气体的比热 热量的计算	40
习题	47
第三章 气体的热力过程	50
§3-1 分析热力过程的目的、方法及内容	50
§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	58

§ 3—6 定熵过程	62
§ 3—7 多变过程	65
§ 3—8 活塞式压气机的工作过程	69
§ 3—9 完全气体的热力学性质表	73
习题	76

第四章 热力学第二定律 79

§ 4—1 热力循环	79
§ 4—2 热力学第二定律各种说法	83
§ 4—3 卡诺定理	85
§ 4—4 热力学温标	88
§ 4—5 在两个极限温度范围内工作的循环热效率	90
§ 4—6 熵	92
§ 4—7 孤立体系熵增原理	95
习题	99

第五章 气体的流动 100

§ 5—1 连续方程式	100
§ 5—2 能量方程式	101
§ 5—3 伯努利方程式	103
§ 5—4 音速和马赫数	105
§ 5—5 气流的滞止参数和临界参数	107
§ 5—6 管道截面积与流速的关系	111
§ 5—7 喷管与扩压管	112
§ 5—8 绝热节流	116
§ 5—9 叶轮机	117
§ 5—10 燃烧室	124
习题	125

第六章 气体的动力循环 127

§ 6—1 活塞式内燃机的理想循环	127
§ 6—2 燃气涡轮装置的理想循环	134
§ 6—3 空气喷气发动机的理想循环	142
§ 6—4 液体燃料火箭发动机的理想循环	148
习题	150

附录 A 参数“焓”简介 152

附录 1 SI 制与工程制的压力单位换算表	156
附录 2 气体常数 R 的数值表	156
附录 3 SI 制与工程制的能量单位换算表	157
附录 4 完全气体的定压比热方程式中的系数	157
附录 5 空气的热力学性质表	158
附录 6 气体的平均定压比热表	160

绪 论

§ 0—1 自然界中的能源及能的利用

自然界中可以被人们利用产生动力以供生活上和生产上使用的能源主要有风力、水力、太阳能、地下热、燃料的化学能及原子核能等。

风力的利用，在很久以前被用来代替人力，虽然仅限于小规模装置，但是它的设备简单，不需燃料，适用于农村戽水，磨面或小型发电之用；它的缺点是不够稳定，因为风的速度和方向变化无常。

水力的特点在于利用天然水位所具有的位能，运行中不需要燃料，因此利用水力发电，虽然基本建设的投资较大，建设速度较火力发电稍慢，不过建成后的运行费用较低，发电成本亦低。我国水力资源丰富，开发潜力很大，这是社会主义建设、实行四个现代化过程中的一个重要能源。

现在利用最多的还是燃料的化学能，通过燃料的燃烧，使燃料的化学能以热的形式释放出来，再将热能转换为机械能或电能，供生活上和生产上的需要。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**。例如火力发电厂和交通运输工具中所用的蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机和喷气发动机等等都是热力发动机。

近四十年内人们发现原子核内蕴藏着巨大的能量，因此使原子核能绝大部分转变成热能，再将热能转换成机械能或电能，例如原子能热电站及原子能舰艇中的动力装置。原子能飞机及原子能火箭也在研究中，预计原子核能的动力装置将会有很大的发展，并成为动力的主要来源。

由于热能转换为机械能在热效率上有一定的限度，即在目前最好的动力装置中，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，所以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，但是目前它仍是从这些能源取得大量动力的唯一切实可行的办法。不过最近也正在将燃料的化学能与原子核能直接变成电能的燃料电池和原子能电池的研究，在小型小能量的设备上已经颇为成功，转换的效率亦很高，但尚不能成为工业上取得大量动力的方法。将来如能成功，热动力生产的面貌将发生根本的变革。

太阳能是地球上一切能源的来源，风力、水力和燃料的化学能都间接地来自太阳。但人类直接加以使用太阳能却是不久以前的事情。目前已有利用太阳能产生高温的高温炉，对水进行加热，供取暖及医疗设备应用，并且也用来建造小型太阳能发电厂；此外，在宇宙运载工具中，尚有利用太阳能的电池。

目前世界各国所使用的能源，大多数都是来自煤和石油等燃料的化学能。根据已探得的煤和石油蕴藏量，人们担心，这些燃料资源将被逐渐用完，因此一方面加紧进行地质勘探，

发现新的煤田和油田，另一方面则设法提高现有燃料的利用率，减少浪费。此外，就是开发新的能源，例如利用地下热和太阳能，目前也都在积极研究试验中，并已小规模地应用。至于原子能热电站的动力装置，在许可的条件下，各国也都相继建立。据初步估计，地球上核燃料铀 235 等裂变物质的能量储藏量超过全部燃料的能量储藏量的二十倍，将来氢原子核聚变反应的动力装置成功以后，那末重氢等聚变物质的能量储藏量更是非常巨大，差不多永远是用不完的。

§ 0-2 热力学及热力发动机的发展简史

上一节所述的大部分能源都是与热现象有关的，所以现在先谈谈有关热现象的热力学及热力发动机的发展简史。

热现象是人类生活中最早接触的现象之一。随着人类社会的发展，人们在生活上和生产上的需要，到了十八世纪下半期，遂发明了蒸汽机，蒸汽机的广泛使用，促进工业的迅速发展，同时又推动了热能转换成机械能的理论研究，促使热力学的建立与发展，热力学反过来又促使热力发动机的不断改进以及新型动力机的创造与发明。

在十八世纪上半期以前，很多人错误地把热看成是一种无重量的流质，名叫热质，它渗透在一切物体之中，热质的流来流去，使物体变得热些或冷些。这一学说不能解释摩擦和撞击生热现象。后来随着蒸汽机的出现，卡诺对如何提高热机的效率，迈耶、焦耳等人对热与功的转换规律进行大量的实验，建立了热力学两个基本定律以及热的分子运动论。热的分子运动论认为热是物质分子不规则运动的结果，能够很好地解释摩擦生热等现象，并牢固地建立了能量守恒与转换定律，即热力学第一定律。克劳修斯从卡诺研究热机效率的工作中，引出了状态参数熵的概念，并用熵来说明热与功转换的方向问题和条件问题，进一步明确了热力学第二定律。

热力学两个基本定律不仅广泛地应用于物理学各部门中去，而且也被广泛应用于化学中去，因而建立了化学热力学。廿世纪初，能斯特根据低温下化学反应的许多实验事实总结出热力学第三定律，这使宏观热力学的系统更加完善。

在热力学发展的同时，即十九世纪中期，麦克斯韦开展了气体分子运动的理论研究，并且应用统计概念研究气体分子的运动，得到了气体分子运动的速度分布定律；玻尔兹曼利用统计概念给出了热力学第二定律的统计解释，初步把热力学的微观物理基础建立起来。后来吉布斯、浦朗克等人的进一步研究，把热力学的微观理论——即统计物理提高到较完善的地步。到 1924—1927 年期间，由于量子力学的发展，统计物理就有了一个全新的出发点，形成了量子统计物理。

热力学的形成与发展，推动了热力发动机的不断改进与发展，因而提高了生产力。由于蒸汽机的笨重、庞大、效率不高等缺点，而且不宜于用在运输工具上，所以在十九世纪后半期，促使人们利用其他工质——气体来代替蒸汽，并在热力发动机的内部实施燃烧过程，这就是所谓内燃机，它具有效率高，重量轻的优点。内燃机的发明，不仅可以作为交通运输工具的动力机，而且也促进并发展热力学对内燃机热力过程和循环的研究，这就更加丰富了工程热力学的内容。

随着工业生产的不断发展与高度集中,蒸汽机不能满足巨大动力的需要,在十九世纪后半期遂发明了蒸汽轮机,它具有效率高、功率大的优点,这又推动了工程热力学中高参数蒸汽性质及高速气流等问题的研究。

第二次世界大战期间出现的喷气飞机和远射程火箭,其中所用的喷气发动机,由于能产生巨大的动力及其他优点,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的主要动力。对涡轮喷气发动机作部分的改造,即得出地面上所用的燃气涡轮,在发电站、机车和轮船中已广泛使用,并在工程热力学中也发展了相应的研究内容。

§ 0—3 涡轮喷气发动机的简单工作原理

为了更好地理解本门课程是研究热能与机械能转换规律的一门学科以及它在工程上的应用,下面先介绍涡轮喷气发动机的简单工作原理。

图 0—1 为一轴流式压气机的涡轮喷气发动机的简图,它由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管五个部件所组成。

进气道设置在发动机的前面,除了用来引导足够数量的空气顺利地进入压气机以外,在飞机飞行时,还可起到提高空气压力的作用。

压气机是压缩空气的重要部件。依靠压气机的高速旋转叶轮,对进气道流来的空气作功,提高空气的压力。目前所使用的涡轮喷气发动机中,压气机能将空气的压力提高 5~25 倍,此时,空气的温度亦有所提高。

燃烧室是不断地给高压空气加热的部件。压气机流来的高压空气进入燃烧室,与喷嘴喷出适量的煤油混合,并进行燃烧,提高空气的温度。目前所使用的发动机中,燃烧室流出的燃气温度可高达 900—1160℃,先进的发动机甚至可达 1350℃。

涡轮是带动压气机叶轮旋转的部件。涡轮安装在燃烧室的后面,它的工作叶轮受着燃烧室流来的高压、高温燃气的作用而旋转,由于涡轮与压气机安装在同一根轴上,所以涡轮带动压气机的工作叶轮旋转。

尾喷管在发动机的后部。从涡轮流出来的高压、高温燃气在尾喷管中继续膨胀,燃气的压力和温度均降低,而速度却增加,将燃气的热能转换为动能,使燃气以高速(500—700 米/秒)地自尾喷管中喷出,因而产生推力。

涡轮喷气发动机在飞行中,流经发动机内的气体压力 p , 温度 T 和速度 V 等参数的变化情况如图 0—1 所示。

图中采用下列符号表示发动机的各个截面: 0—0 为进气道入口处的截面; 1—1 为进气道出口或压气机进口的截面; 2—2 为压气机出口或燃烧室进口的截面; 3—3 为燃烧室出口或涡轮进口的截面; 4—4 为涡轮出口或尾喷管进口的截面; 5—5 为尾喷管出口的截面。

通过上述发动机工作过程的介绍,可以看出,它是利用气体作为媒介物质或工作介质,

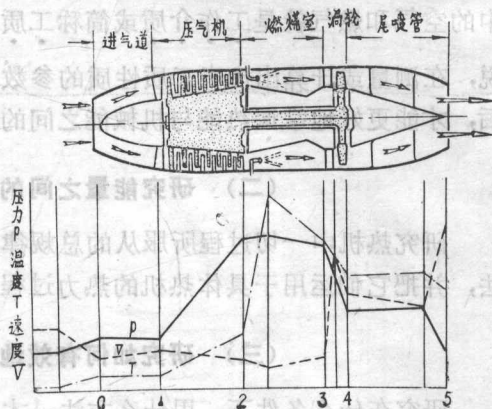


图 0—1

将燃料燃烧所释放的热能转换为机械能的热力发动机，此机械能表现为发动机推力所作的功；此外，人们总是期望燃烧较少的燃料得到较大的机械功，也就是说，如何更加有效地利用燃料燃烧所释放出来的热能。

§ 0—4 工程热力学的研究对象

工程热力学是热力学的一个重要分支，除了研究热能与机械能的转换规律外，还研究热力学定律在工程上的应用，目的在于改进和创造更为完善的热力发动机与制定热机理论。具体地说，工程热力学包括的内容如下：

(一) 研究工质的性质

热能转换为机械能必需通过媒介物质或工作介质的作用才能实现，例如涡轮喷气发动机中的空气和燃气就是工作介质或简称工质。只有对工质的热物理性质有深刻的认识，或者说，在测量或计算出代表工质性质的参数，如温度、压力、密度、比热和它们之间的关系以后，才能更好地掌握热能与机械能之间的转换规律。

(二) 研究能量之间的转换规律及其应用

研究热机中一切过程所服从的总规律，即热力学第一定律，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。

(三) 研究如何有效地利用热能

研究在什么条件下，用什么方法，才能使热量最大限度地或最经济地、连续不断地转换为机械能，即热力学第二定律，这就为分析循环，提高其经济性，奠定了理论基础。

由于热机中包括燃料的燃烧以及现代利用燃料直接产生电能，所以目前的工程热力学中也介绍一些化学热力学的基本理论，即在化学反应中的能量转换规律、化学反应方向和化学平衡。

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，在工程热力学中也简单地介绍了气体分子运动论和经典统计力学的基本概念。

§ 0—5 研究热现象的两种方法

通过上述内容的介绍，我们可以把研究热现象的方法，归结为下面两种：一是宏观方法，又叫做热力学的方法；另一是微观方法，又叫做统计物理学的方法。两者都是解释热现象和热有关的物质的物理性质的，但是所用的观点和方法不同。

热力学方法是根据观察到的无数次客观事实，总结出来的自然界的基本规律，从而根据实际问题的具体条件推导出许多有用的公式和结论。由于热力学中的定律不是由某些个别实验直接证明的，而是无数次经验的总结，因此这些定律及其推论具有高度的可靠性和普遍的适应性。但是它也有不足之处，由于不考虑物质内部的微观结构，对于用热力学方法所建立

的定律和理论，不能给以本质的说明。

统计物理学的方法是从物质的原子和分子结构出发，认为物质是由大量的粒子——分子和原子所组成，它们都处在不停的运动中，在对物质的分子结构模型作某些简化假定以后，大量粒子运动的统计平均值就构成了物质的宏观性质。因此，统计物理的方法对宏观现象的本质和内在原因可以解释得比较透彻，但是，统计物理学的方法，也不是完美无缺的，它还是比较繁复，而且对物质的分子结构模型所作的若干简化假定，只是实际的近似代表，所以得到的结果与实际情况还存在着一些偏差。当然，随着人们对物质结构的认识逐步深入，用统计物理学方法所得的结果，也将更加接近于实际。

综上所述，可见这两种方法实际上是相辅相成的，相互充实的。本门课程是研究热能、机械能和物质特性等宏观现象之间的相互规律，因此，所用的方法主要是宏观的方法，但同时也用微观的方法来辅助说明一些本质的问题。

在外界条件发生变化的情况下，由平衡态过渡到平衡态，而完成这一过程所需的时间通常很短，因此所研究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，因为不考虑宏观状态随时间变化的因素，所以进行分析计算时，就方便得多。



为了得到热力学中所需的计算数据，并清楚各个物理量之间的关系，所以把其中某些量作为基本量，其余的物理量作为导出量。通常有以下三个基本量：温度、内能和熵。温度是表示物体冷热程度的物理量，内能是物体内部所有分子无规则运动的动能和势能的总和，熵是表示物体内部无序程度的物理量。这三个基本量之间的关系可以用热力学第一定律和第二定律来描述。热力学第一定律是能量守恒定律在热力学中的体现，它指出：在一个热力学过程中，系统吸收的热量等于系统对外做的功加上系统内能的增加。热力学第二定律是热力学中的一个基本定律，它指出：不可能从单一热源吸热，使之完全变为功，而不产生其他影响。这两个定律是热力学的基础，也是统计物理学的基础。

热力学平衡 热力学定律

第一章 气体的性质及其计算

§ 1—1 热力学体系

在分析热力学问题时，按研究任务的具体要求，选取一定的物质作为研究对象，该研究对象叫做热力学体系或简称体系。与体系发生作用并不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着的。图 1—1 表示封闭在气缸中的气体作为研究对象时，气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着的分界面。图 1—2 表示气体不断地从截面 1—1 流进，在受到叶轮的作用下，压力升高，并不断地从截面 2—2 流出。若选取进、出口截面之间的气体作为研究对象，那末进、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。

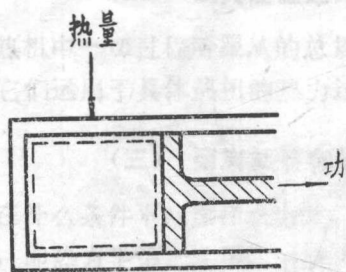


图 1—1

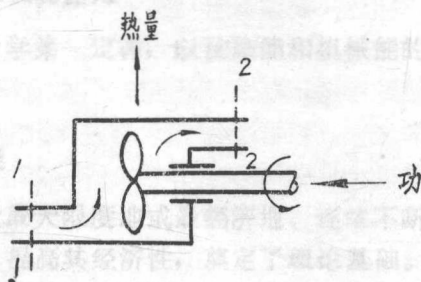


图 1—2

体系和外界的作用总是通过分界面进行的。图 1—1 所示的体系和外界之间，可以有功与热量的交换，但没有质量的交换，这种体系叫做封闭体系。图 1—2 所示的体系和外界之间，不仅可以有功与热量的交换，而且还有质量的交换，这种体系叫做开口体系或控制体，开口体系的分界面也叫做控制面。若体系和外界之间没有热量交换，则叫做绝热体系。若体系和外界之间，既没有功和热量的交换，又没有质量的交换，则叫做孤立体系。

自然界中的事物都是普遍联系的，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。当体系和外界的作用在某一方面或某些方面无限削弱，或该作用的影响小到可以略去不计时，那末就可以把它看作某一特定的体系，将复杂的问题进行了简化，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，热力学体系所处的状况，或者是所具

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况，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况。像温度、压力等这类的物理量，就叫做状态参数。

如图 1—1 所示的封闭体系，当外界条件不变时，如果体系的状态不随时间而改变，即说明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时进行比较，其结果是一样的，那末该体系就是处于热力学平衡状态或简称平衡状态，否则就叫做不平衡状态。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，所以这样的平衡是动态平衡。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的各组成成分不变。假若外界的温度和压力改变为另一数值时，体系与外界将有温度差和压力差，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，这时的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，但在经过相当时间以后，体系的温度和压力到处又均匀一致，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要的时间通常都很短，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，因为不考虑宏观状态随时间改变的因素，所以进行分析计算时，就方便得多。

§ 1—3 单 位 制

为了得到热力学中准确的计算数据，弄清楚各个物理量的单位是很重要的。由于各个物理量之间存在着一定的关系，所以把其中某些量作为基本量，其余的物理量作为导出量，顾名思义，导出量是根据物理定律从基本量推导出来的。

最近国际上正在推广和采用的国际单位制，简称国际制或SI制，与本课程有关的基本量有长度 L 、质量 m 、时间 τ 和温度 T ，它们的基本单位分别为：米（ m ）、公斤或千克（ kg ）、秒（ s ）和开（ K ）。在国际制中，力是导出量，它的单位是导出单位，用“牛顿”表示。它是根据牛顿运动第二定律推导出来的。牛顿运动第二定律的关系式为：

$$P = ma \quad (1-1)$$

式中 P —作用力；

m —质量；

a —加速度。

使 1 公斤质量的物体产生 1 米/秒²的加速度时所受的作用力，就叫做 1 个“牛顿”，以符号 N 表示，即

$$\begin{aligned} 1N &= 1kg \times 1m/s^2 \\ &= 1kg \cdot m/s^2 \end{aligned} \quad (1-2)$$

目前我国工程界采用的重力单位制或工程单位制，简称工程制，其中基本量取长度 L 、

力 P ，时间 τ 和温度 T ，它们的基本单位分别为：米(m)、公斤或千克(kg)、秒(s)和开(K)。与SI制不同，质量 m 在工程制中是导出量，因此它的单位是导出单位，根据式(1-1)，质量 m 的单位应是作用力的单位除以加速度的单位，即

$$m = \frac{P}{a} \quad \text{kg/m/s}^2$$

$$= \frac{P}{a} \quad \text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m} \quad (1-3)$$

质量单位是个复合单位，不容易有个具体概念，以致于很多其他的导出量，例如密度等的单位也都是复合单位，也很难有个具体概念，此外，工程制中的功与热量用两种不同的计量单位，彼此间要进行换算，需要一个换算常数，而在国际制中，功与热量都是取功的单位，不存在换算关系，所以计算式比较简单些。因此，国际单位制是世界公认的比较先进的单位制，各个国家都在逐步采用。目前国内工厂和研究所多采用工程制，所以本书以国际单位制为主，然而对工程制亦作些介绍。

1公斤力是1公斤质量的物体在纬度为 45° 的海平面受到重力加速度为 g 的地心吸力，由于 $g=9.80665 \approx 9.81$ 米/秒²，因此

$$1 \text{ 公斤力} = 1 \text{ 公斤质量} \times 9.81 \text{ 米/秒}^2$$

$$= 9.81 \text{ 牛顿}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{或} \\ 1 \text{ 牛顿} = \frac{1}{9.81} \text{ 公斤} \end{array} \right\} (1-4)$$

表 1-1

SI制和工程制的基本单位和导出单位

物 理 量	SI 制	工 程 制
长 度 L	米(m)	米(m)
质 量 m	公斤或千克(kg)	公斤·秒 ² /米(kg·s ² /m)**
时 间 τ	秒(s)	秒(s)
温 度 T	开(K)	开(K)
力 P	牛顿(N)*	公斤或千克(kg)

注：其中标号者为导出单位。

§ 1-4 气体的基本状态参数

说明物质宏观性质的物理量，例如比容、压力和温度的物理概念比较明确，并且可以直接测定，所以叫它们为基本状态参数，以后还将陆续介绍其他状态参数，如内能、焓、熵等。

(一) 比容、密度和重度

单位质量的气体所占有的容积，叫做比容，以符号 v 表示。若质量为 m 的气体所占有的容积为 V ，则其比容 v 为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

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

一定质量的气体所占的容积变大, 即气体膨胀时, 分子间的距离增大, 比容变大; 反之, 若容积变小, 即气体被压缩时, 分子间的距离缩短, 比容变小, 因此对于同一种气体来说, 比容的大小乃是说明气体分子的疏密程度。

除比容能表明气体分子的疏密程度外, 有时还可以用密度和重度来表示。单位容积内含有气体的质量, 叫做密度, 以符号 ρ 表示。若质量为 m (kg) 的气体占有的容积为 V (m^3), 则其密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

显然, 它的单位是公斤/米³ (kg/m^3)。

根据比容及密度的定义式 (1-5) 和式 (1-6), 可知气体的比容和密度互为倒数, 即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-7a)$$

单位容积内含有气体的重量, 叫做重度, 以符号 γ 表示。质量为 m (kg) 的气体其重量为 mg 牛顿 (N), 若其占有的容积为 V (m^3), 则其重度 γ 为

$$\gamma = \frac{mg}{V} \quad (1-8)$$

显然, 重度的单位为牛顿/米³ (N/m^3)。

式 (1-8) 除以式 (1-6), 可得 γ 与 ρ 的关系式

$$\gamma = \rho g \quad (1-7b)$$

式 (1-7a) 与式 (1-7b) 合并, 得

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{g}{\gamma} \quad (1-7)$$

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, 所以它们实质上是一个说明气体物理性质的参数。式 (1-7) 表明了这三者之间的依赖关系, 只要知道其中之一, 其他两个参数即可决定。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 60 升的氧气瓶内, 盛氧气 0.8 公斤, 求氧气的比容和重度。

解 因为 $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ 升}$

故

$$60 \text{ 升} = 0.06 \text{ m}^3$$

那么

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

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

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

解 利用式 (1-7) 得:

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

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

在工程制中，比容定义为单位重量气体占有的容积，若重量为 G 公斤的气体占有的容积为 V ，则其比容 v 为

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

重度定义为单位容积内含有气体的重量，即

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

密度定义为单位容积内含有气体的质量，由于 $m = \frac{G}{g}$ ，所以

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{Vg} = \frac{\gamma}{g} \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

综合以上三式，可得

$$v = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\rho g} \quad (1-9)$$

质量 m 的公斤数与该质量的重量 G 的公斤数是相同的，所以 SI 制与工程制中的比容数值也是相同的，但是密度和重度的数值并不相同，而是交叉的，即 SI 制中的密度数值与工程制中的重度数值是相同的，等等。

(二) 压力或压强

垂直作用在单位面积上的力，叫做压力或压强，以符号 p 表示。气体的压力乃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。

气体的分子运动论指出气体作用于容器壁上的压力为

$$p = \frac{2}{3} n \frac{mw^2}{2} \quad (1-10)$$

式中 p —压力；

n —分子浓度，即单位容积的分子数，若容积 V 内有 N 个分子，则 $n = N/V$ ；

$\frac{mw^2}{2}$ —分子的平均移动动能；

m —分子的质量；

w —分子的均方根移动速度，自下式求得；

$$w = \sqrt{\frac{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_1^N w_i^2}{N}}$$

其中 $w_1, w_2, \dots, w_N$ 表示各个分子的移动速度。

式 (1-10) 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。

若气体作用于器壁面积 F 上的垂直作用力为 P ，那末压力为

$$p = \frac{P}{F} \quad (1-11)$$

在 SI 制中，力的单位是牛顿 (N)，面积的单位是平方米 (m²)，因此压力的单位是牛顿/米² (N/m²)。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、以符号 Pa 表示，即

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

采用帕 (Pa) 作为压力单位，嫌得太小，而数值太大，所以实用上采取千帕 (kPa) 或巴 (bar) 作为压力的实用单位，它们与帕 (Pa) 的关系为

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ kPa} &= 1000 \text{ Pa} \\ 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} \\ &= 100 \text{ kPa} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

压力的大小有时也用液柱 (常用的有汞柱或水柱) 的高度表示，如图 1—3 所示，设液柱的截面积为 F ，高度为 h ，密度为 ρ ，则作用于底面积 F 上的总作用力 P 应为该液柱的重量，即

$$P = hF\rho g$$

那末作用于底面积上的压力

$$p = \frac{P}{F} = h\rho g = h\gamma \quad (1-13)$$

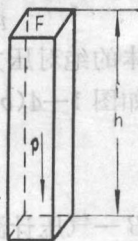


图 1—3

由于液体的密度 ρ 为一定值，所以液柱的高度与压力成正比，因此用液柱的高低就可以代表压力的大小。

水的密度 $\rho_{H_2O} = 1000$ 公斤/米³ (4℃时)，汞的密度 $\rho_{Hg} = 13595$ 公斤/米³ ≈ 13600 公斤/米³ (0℃时)，所以根据式 (1—13)，得

1 米高度的水柱代表的压力为

$$p = h\rho g = 1 \times 1000 \times 9.81 = 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

1 毫米高度的水柱代表的压力为

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

1 毫米高度的汞柱代表的压力为

$$p = 0.001 \times 13595 \times 9.81 = 133.3 \text{ N/m}^2$$

从上可得 $1 \text{ Pa} = \frac{1}{9.81} = 0.102$ 毫米水柱

$$= \frac{1}{133.3} = 750 \times 10^{-5} \text{ 毫米汞柱}$$

或 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 750$ 毫米汞柱

物理学上把纬度为 45°、大气温度为 0℃ 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，通过气压计测定 1 个物理大气压为 760 毫米汞柱高，即

$$1 \text{ 物理大气压} = 760 \text{ mm Hg} = 0.76 \text{ m Hg}.$$

若把物理大气压换算成 SI 制中常用的单位，即得

$$\begin{aligned} 1 \text{ 物理大气压} &= 760 \times 133.3 = 101300 \text{ N/m}^2 \\ &= 1.013 \text{ bar} \end{aligned}$$

在热力学中描写气体的状态时，压力应是气体的真实压力或绝对压力，它的数值是不能用测压仪表直接测得的，而是根据力平衡的概念利用气压计与压力表或 U 形管两者综合求

得。如果气体的绝对压力 p_{abs} 高于大气压力，如图 1—4(a) 所表示的那样，则

$$p_{abs} = B + p_{gage} \quad (1-14)$$

式中 B —气压计测出的当地大气压力，

p_{gage} —用液柱测出或用弹簧管式的压力表测出，它是容器内的气体压力高于当地大气压力的数值，所以叫做超出压力或相对压力，在图 1—4(a) 中

$$p_{gage} = h\gamma$$

如果气体的绝对压力 p_{abs} 低于大气压力，如图 1—4(b) 所表示的那样，则

$$p_{abs} = B - p_{vacu} \quad (1-15)$$

式中 B —气压计测出的当地大气压力；

p_{vacu} —用液柱测出或仪表测出的气体压力，它是容器内的压力低于当地大气压力的数值，其值愈大，则气体的绝对压力愈小，亦即愈接近真空，所以叫 p_{vacu} 为真空度，测定真空度的仪表叫做真空表。在图 1—4(b) 中

$$p_{vacu} = h'\gamma$$

上述的 p_{abs} 、 B 、 p_{gage} 和 p_{vacu} 的关系可用图 1—5 表示。

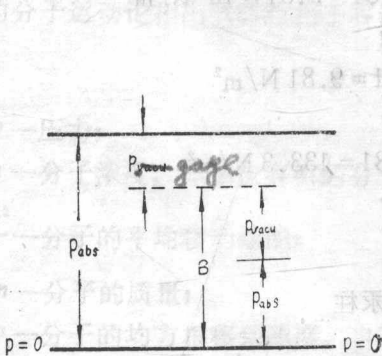


图 1—5

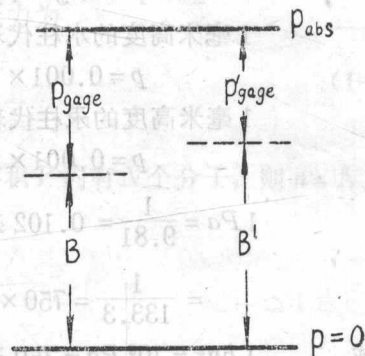


图 1—6

在某一确定的状态下，气体的绝对压力保持不变，但是由于外界环境的变化，例如气候的突变，气压计的读数将发生变化，因此 p_{gage} 亦将发生变化，所以 p_{gage} 不是单值地与此确定状态对应，因而它不是一个状态参数，这可自图 1—6 看出。

气压计读出的汞柱高度与当时大气温度有关，这由于汞的重度与温度有关，所以作精确计算时，需将测得的汞柱高度 h 利用下式换算成 0°C 时的汞柱高度。

$$h_0 = h(1 - 0.000172 t) \quad (1-16)$$

式中 t —大气温度， $^\circ\text{C}$ 。

当 p_{gag} 数值颇大时, 因大气压力在绝对压力中所占的比例甚小, 可不作温度修正, 这时, 即使简单地把 B 当作 1 个物理大气压或者 1 巴来处理, 也已足够准确。若绝对压力的数值接近一个物理大气压或 1 巴时, 则大气压力就不能作此简化。

例 1—3 某发动机在地面试车时, 用 U 形管测出压气机出口压力是 1.5 米汞柱, 而试车室内的气压计读数为 750 毫米汞柱, 求压气机出口绝对压力是多少巴?

解 利用式 (1—14) 式得压气机出口的绝对压力是

$$\begin{aligned} p_{abs} &= 750 + 1.5 \times 1000 = 2250 \text{ mm Hg} \\ &= 2250 \times 133.3 = 3 \times 10^5 \text{ Pa} \\ &= 3 \text{ bar} \end{aligned}$$

例 1—4 氧气瓶上安装的压力表指示的压力为 47.5 巴, 这时气压计上的读数为 755 毫米汞柱, 求氧气瓶内的绝对压力是多少?

解 气压计上的读数 755 mm Hg 换算为

$$\frac{755}{750} = 1.007 \text{ bar} \approx 1 \text{ bar}$$

代入式 (1—14) 得氧气瓶内的绝对压力为

$$p_{abs} = 1.007 + 47.5 = 48.507 \approx 48.5 \text{ bar}$$

例 1—5 图 1—4(b) 中的 U 形管内的液体是水, 测出 $h' = 2.5$ 米, 此时气压计上的读数为 750 毫米汞柱, 求该容器内的绝对压力合多少毫米汞柱? 合多少巴? 若容器内的压力不变, 而大气压力下降至 735 毫米汞柱, 问 U 形管内的水柱有无变化, 若有, 变化了多少?

解

$$h' = 2500 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$= \frac{2500}{13.595} = 184 \text{ mm Hg}$$

所以利用式 (1—15) 得

$$p_{abs} = 750 - 184 = 566 \text{ mm Hg}$$

$$= \frac{566}{750} = 0.755 \text{ bar}.$$

容器内压力不变, 而大气压力下降至 735 mm Hg 时, 利用式 (1—15) 可得容器内的真空度为

$$p_{vacu} = 735 - 566 = 169 \text{ mm Hg}$$

$$= 169 \times 13.595 = 2298 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$= 2.3 \text{ m H}_2\text{O}.$$

工程制中力的单位是公斤, 面积的单位是平方米, 于是压力的单位是公斤/米²(kg/m²)。这个单位亦嫌得太小, 所以工程上取公斤/厘米²(kg/cm²) 作为实际应用的单位, 显而易见

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

工程制中的压力单位公斤/厘米², 与物理大气压很接近, 所以把公斤/厘米²又叫做工程大气压或简称大气压。如不特别说明是物理大气压, 一般都是指工程大气压。它们之间的换算关系如下: