



石油技工学校试用教材

热工理论基础

华东输油管理局技工学校 陈雅梅 主 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合输油专业的需要,讲述了有关工程热力学、传热学及输油加热炉的热工基础知识。各章均编有一定的例题和一定数量的思考题和习题,以便于自学。

本书为石油技工学校输油专业教材,亦可供输油职工技术培训、职业高中、现场输油工人和技术人员参考。

热工理论基础

华东输油管理局技工学校 陈雅梅 主编

•

石油工业出版社出版发行
(北京安定门外安华里二区一号楼)
通县向阳印刷厂排版印刷

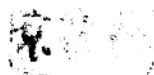
•

787×1092毫米 16开本 10.5印张 256千字 印1—5,000

1988年5月北京第1版 1988年5月北京第1次印刷

书号:15037·2934 定价:1.60元

ISBN 7-5021-0082-2/TE·82



前 言

本书是根据石油部劳资司1984年审定的石油技工学校输油专业《热工理论基础》教学大纲编写的。

本书由工程热力学与传热学两部分组成。工程热力学是研究与热力工程有关的热能和机械能的相互转换的规律,以使热能有效开发和合理利用。传热学是研究热量传递过程的学科。热量传递现象普遍存在于自然界里和各个生产部门。

本书是石油技工学校输油专业技术基础课教材,通过本课程的学习,使学生初步掌握输油专业所需要的热工理论、传热原理以及输油加热炉的热平衡计算等基础知识。书中力图采用通俗易懂的文字向学生介绍热工原理和传热原理,计算公式亦选用简单、实用的表达式说明。本书重要公式的应用都有举例,每章都附有思考题及习题,以培养学生分析问题、解决问题的能力,使学生能够学以致用,为节约能耗作出贡献。

本书由华东输油管理局技工学校陈雅梅编写第一、二、三、四、九章、石油管道局技工学校何森章编写第五、六、七、八章,并于1986年7月在锦州召开了审定会。参加本书审稿的除编者外,还有东北输油管理局技工学校李英新、石油管道局技工学校黄春芳。全书由陈雅梅统稿。

在教材审定会上得到东北输油管理局技工学校张瑞春供给第九章的部分习题。谨在此向所有给予支持和协助的同志表示诚挚的谢意。

本书为石油技工学校输油专业的试用教材,也可供职工培训、职业高中以及自学者选用。限于编者水平,书中错误之处在所难免,恳切希望读者批评指正,以便再版时修改补充。

编 者

1986年12月

目 录

绪论	(1)
第一篇 工程热力学	(5)
第一章 气体的性质	(5)
第一节 工质、理想气体与实际气体	(5)
第二节 工质的热力状态及其基本参数	(7)
第三节 理想气体状态方程式	(12)
第四节 热量和气体的比热	(16)
第五节 应用比热计算热量	(18)
第六节 混合气体	(23)
第二章 热力学基本定律	(34)
第一节 能量守恒与转换定律	(34)
第二节 热力学第一定律的解析式	(35)
第三节 稳定流动能量方程式, 焓	(38)
第四节 稳定流动能量方程式的应用	(40)
第五节 热力学第二定律	(42)
第六节 熵和温熵图	(46)
第七节 卡诺循环	(47)
第三章 气体的热力过程	(52)
第一节 热力过程	(52)
第二节 定容过程	(54)
第三节 定压过程	(56)
第四节 定温过程	(58)
第五节 绝热过程	(59)
第四章 水蒸气	(64)
第一节 水蒸气的形成过程及其有关名词解释	(64)
第二节 蒸汽状态的确定及水蒸气表	(68)
第二篇 传热学	(73)
第五章 导热	(74)
第一节 导热的基本概念	(74)
第二节 傅立叶定律	(76)
第三节 平壁的导热	(77)
第四节 圆筒壁的导热	(80)
第六章 对流换热	(84)
第一节 对流和对流换热	(84)
第二节 影响对流换热的诸因素	(84)
第三节 流体在流动时的放热	(87)

第四节	传热系数及单层平壁传热的计算	(89)
第五节	多层平壁传热的计算	(90)
第六节	通过圆筒壁传热的计算公式	(91)
第七节	增强或削弱传热的讨论	(93)
第七章	热辐射	(96)
第一节	热辐射的基本概念	(96)
第二节	热辐射的基本定律	(98)
第三节	实际物体的辐射和吸收及黑度的概念	(100)
第四节	特殊排列的两物体之间的辐射换热	(101)
第五节	遮热原理	(104)
第六节	气体辐射和火焰辐射	(105)
第八章	复合换热及换热器	(109)
第一节	复合换热	(109)
第二节	换热器的种类	(111)
第三节	间壁式换热器的构造特点	(112)
第四节	间壁式换热器的传热计算	(114)
第五节	顺流与逆流的比较	(116)
第九章	加热炉的工作原理及热平衡计算	(118)
第一节	加热炉的工作原理及热平衡计算	(118)
第二节	热平衡计算	(122)
第三节	如何提高加热炉的热效率	(132)
附录		(139)
附表一	常用气体的热力性质	(139)
附表二	气体的平均定容质量比热	(140)
附表三	气体的平均定压质量比热	(141)
附表四	气体的平均定压容积比热	(142)
附表五	气体的平均定容容积比热	(143)
附表六	饱和水与饱和水蒸气热力性质表(按温度排列)	(144)
附表七	饱和水与饱和蒸汽热力性质表(按压力排列)	(146)
附表八	未饱和水与过热蒸汽热力性质表	(149)
附表九	各种不同材料的密度、导热系数、比热和导热系数	(159)
附表十	空气的物性参数	(160)
附表十一	几种常用液体的热物理性质	(161)
附表十二	烟气的物理参数(在 $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 下)	(161)
附表十三	各种单位换算关系表	(162)
本书所用的主要符号		(163)
主要参考书目		(164)

绪 论

热工理论基础是由工程热力学及传热学这两门学科组成的。工程热力学是热力学的一个分支,着重应用热力学第一定律和第二定律作为基础,研究与热力工程有关的热能和机械能相互转换即热功转换的规律、方法及提高转换效率的途径。此外,热功转换过程中所用工质的热力性质,也是研究的重要内容之一。传热学是关于热的传递过程的科学。它的研究对象为热的传递规律,方法及提高传热效果的途径,以及为了工程实际的需要,力求换热的削弱,以减少热损失或改善劳动条件。

虽然人类很早就已经在生产和生活中利用了各种热现象,但在很长时间内,人们并不认识热的本质,甚至错误地认为热是一种没有质量没有形状的热素。通过长期的实践,特别是在热力工程方面的实践,加上许多科学家的验证,直到十九世纪中下叶对热的本质才有了认识。热是系统与外界之间仅仅由于温度差而交换的能量,相继地确立了热力学第一定律及热力学第二定律。这两条基本定律是整个热力学的理论基础。

当人们运用工程热力学知识找出了蒸汽动力装置最理想的工作状况以后,发现实际的蒸汽机,虽然经过长期的改造,但其经济性与同样条件下最理想情况仍差得很远,这时,才引起人们进一步去研究运行中实际蒸汽机里的各种损失,包括最主要的一项热损失,即汽缸内部由传热问题所引起的各种损失。联系到各种技术领域里很多方面也都广泛存在有传热问题,自然促使人们去努力研究热量传递的规律。正是在这种情况下,本世纪以来“传热学”开始形成为一门独立的科学,至今还在不断地丰富和发展着。

根据传热过程的物理本质不同,热量的传播有热传导、对流和辐射三种方式。工程上遇到的问题,往往是几种方式同时出现的,因而实际的换热过程往往是这三种方式的组合,是一个复杂的传热现象。但是事物的统一体总要分解为若干不同的部分来研究,传热学的研究也是这样。后面我们将分别研究热传导、对流换热和辐射换热的规律。最后,还要研究三者的综合作用,归结到一个具体设备的统一体上。

工程热力学是采用宏观的研究方法,但为了更好地说明现象的物理实质,在必要时也适当引用物质内分子运动的微观理论。

在生产实践中,功很容易变为热。比如移动一个重物,即在对重物做功的过程中,由于摩擦的关系,就使所做的功有一部分转化为热。但在逆转过程中,若想将热复变为功,就很不容易办到,必须利用一定的设备才能达到目的。蒸汽机的出现说明了热同样可以转化为机械功。

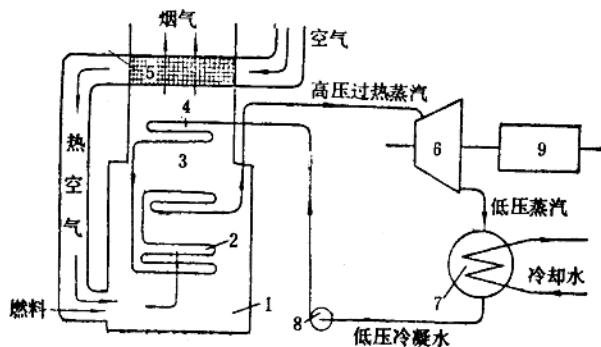
一切将热能转变为机械能的机械系统,称为热机。从燃料燃烧中得到热能,以及利用热能得到动力的整套设备,包括燃烧设备(如锅炉、燃气轮机装置的燃烧室等)、热机和一切辅助设备统称为热能动力装置。热能动力装置由于燃料性质,燃烧设备不同,以及其他因素的影响,可分为蒸汽动力装置及内燃动力装置两大类。热机可分为内燃机、蒸汽机和燃气轮机等。

下面简单介绍蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置的工作原理。

一、蒸汽动力装置

虽然蒸汽动力装置使用最早,但它现在仍然是一种极重要的动力设备。主要用作热力发

电厂的动力,在大型船舶上也有使用。蒸汽动力装置的功率一般为数十千瓦到十万千瓦,也有一些数千瓦的小型机组。

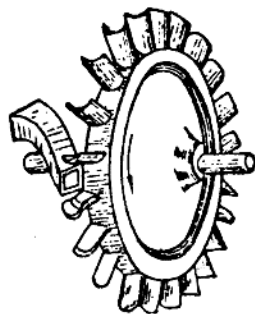


图绪-1 蒸汽动力装置示意图

1—锅炉；2—汽锅；3—过热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—汽轮机；7—冷凝器；8—水泵；9—发电机

图绪-1为简单的蒸汽动力装置示意图。它由锅炉、汽轮机、冷凝器及给水泵四部分组成。水蒸气是蒸汽动力装置的工作物质,称为工质。锅炉是水蒸气的发生器,从锅炉产生的高温高压的过热蒸汽被送往蒸汽轮机作功。如图绪-2所示,在蒸汽轮机中,蒸汽先在喷管中降压膨胀,增加流速,然后它以高速冲击在涡轮的叶片上推动转子转动,使蒸汽轮机输出机械功,驱动发电机发电。从汽轮机排出的乏汽被引入冷凝器,在冷凝器中,蒸汽被

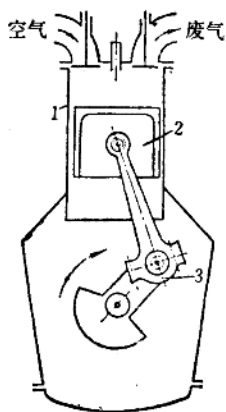
冷却水吸走热量而凝结成水,其容积骤然降为原容积的数千分之一,因而在冷凝器中及汽轮机出口处造成很高的真空。当蒸汽在汽轮机中膨胀到这么低的压力时,蒸汽能推动涡轮作出更多的机械功,从冷凝器出来的冷凝水被给水泵加压后,重新被送回锅炉加热产生蒸汽。在锅炉中,供燃料燃烧用的空气从大气吸入后,先在锅炉的空气预热器中受热提高温度,然后送入炉膛和燃料混合并进行燃烧,把燃料的化学能转变成热能,并产生高温的烟气。由于高温烟气的加热,进入锅炉的水先在省煤器中受热升高温度,然后进入汽锅中受热蒸发而生成水蒸气,并进一步在过热器中继续受热升高温度成为过热水蒸气。于是过热蒸汽又可送往汽轮机膨胀作功,重复上述循环过程。



图绪-2 蒸汽轮机作功示意图

二. 内燃机

内燃机可应用在各种生产部门作为动力。比较起来内燃机的重量轻,体积小,使用方便,因此在运输工具和中小型移动机械上得到极为广泛的应用。现以四冲程柴油机为例,说明内燃机的工作原理。



图绪-3 内燃机示意图

1—气缸；2—活塞；3—曲轴

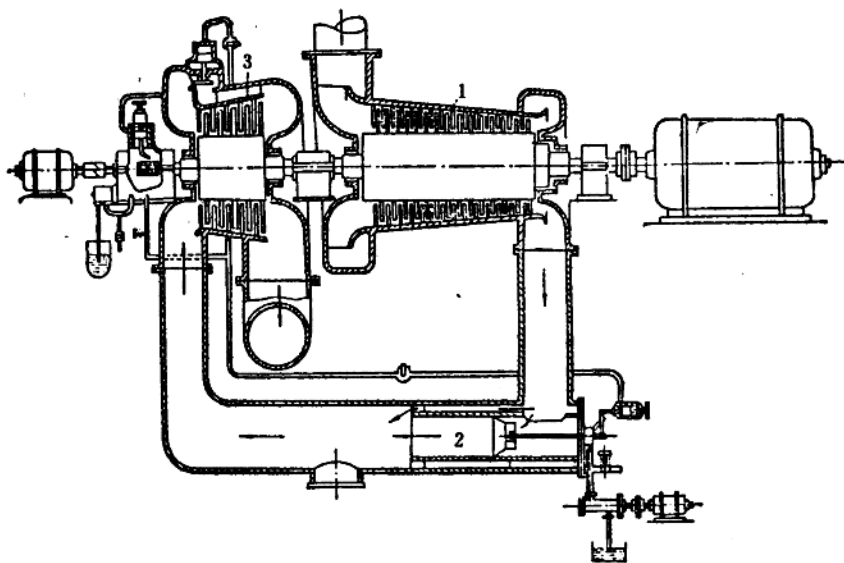
图绪-3为四冲程内燃机(柴油机)的示意图。内燃机的工质为燃料燃烧所产生的高温燃气,其工作过程分为吸气、压缩、燃烧、膨胀及排气几个阶段。吸气开始时气门打开,活塞向下运动把空气吸入气缸。活塞到达下死点即活塞位移的最低点时,进气门关闭而吸气过程结束。然后让进气门和排气门都关闭着,活塞向上运动压缩气缸内空气,空气受压缩其温度与压力都不断增高,直到活塞到达上死点即活塞位移的最高点时,压缩过程结束。由于这时气缸内空气的温度已超过燃料的自燃温

度,因而及时地向气缸喷入适量燃料(柴油),燃料便在气缸中发生燃烧.燃烧过程进行得很快,当活塞仅稍有移动时,燃烧即已结束.接着是高温的燃气发生膨胀,推动活塞向下运动作出机械功.活塞到达下死点时,排气门打开,气缸内压力和温度还较高的燃气立即通过排气门排至大气中,剩下的气体则在活塞向上运动时被推出气缸排至大气中,直到活塞到达上死点时排气完毕.当活塞再一次自上死点向下运动时,又重新吸气重复上述工作循环。

汽油机的工作过程基本上与柴油机相同.只是汽油预先在化油器内蒸发气化并和空气形成混合气体,而在吸气过程中一起被吸入气缸.在压缩过程结束时,混合气体的温度仍低于其自燃温度,须用电火花点燃后,才能开始燃烧过程.其他则和上述柴油机的工作过程完全一样。

三、燃气轮机装置

燃气轮机装置是近三十年来才得到很快发展的新型动力装置.燃气轮机装置是旋转式机械,具有功率大,重量轻,体积小的优点.因而广泛地被用作航空发动机及舰艇发动机.近年来,它又逐渐被应用到发电及其他工业部门.如图绪-4所示,燃气轮机装置是由压气机,



图绪-4 燃气轮机装置示意图

1—压气机; 2—燃烧室; 3—涡轮机

燃烧室及涡轮机(透平)组成.它的工质亦是燃料燃烧生成的燃气.工作时,从大气中吸入空气,然后在压气机中对空气进行压缩提高温度和压力.压缩后的空气被送入燃烧室,一部分空气和喷入燃烧室的燃料一起燃烧,另一部分用来和高温燃气混合以降低其温度,使工质温度和燃气轮机叶片允许的最高工作温度相适合.然后工质流入涡轮机在其中膨胀而推动转子作机械功,其工作原理与汽轮机相同.作功后的高温废气直接排放到大气中。

综上所述,在热能动力装置中,利用工质吸收燃料燃烧产生的热能,使其体积膨胀而推动机械作出机械功.但是,同时总是有一部分热量被废气带出,或者间接地通过冷却水而消散在自然环境中,也就是说燃料燃烧生成的热不是全部转变成机械功,而只利用了其中一部

分。因此，应合理设计动力设备，以便使尽可能多的热能转变为机械功。

为了合理地设计各种热力设备，改善其能量利用的效果，必须掌握热功转换的规律及热力分析的方法，这些正是工程热力学所要讲述的内容。

研究一个物理现象，不仅要正确地掌握各个物理量的定义及概念，而且还要正确地掌握各个物理量的实验、测定及分析计算方法，这就涉及物理量的计量单位。本书中以法定计量单位为主，但鉴于目前正处于向法定计量单位过渡的阶段，特别是在有些工厂和设计单位仍采用工程单位制的情况下，本书有些地方也使用工程单位制，或将两种单位制并列，书后附录有单位换算表。

第一篇 工程热力学

第一章 气体的性质

气球内的气体受热时,它的压力和比容●都要增大,用气筒快速打气时,随着比容的减小,气体的压力和温度都要升高,可见压力、温度、比容三个基本状态参数之间存在着内在的联系。在动力设备中,气体被加热或冷却常常需要进行热量计算。本章比较详细地介绍气体的性质、气体的三个基本状态参数以及如何以气体比热●为工具计算气体热量的问题。

第一节 工质、理想气体与实际气体

一、分子和分子运动

一切物质都是由不断运动的分子组成的,这是分子运动论最通俗的解释。分子由原子组成,原子又由一些更小的粒子组成。在热力学中,许多地方要用分子运动论才能解释清楚,例如压力、温度等,所以我们现在以分子为基本粒子,讨论一些有关问题。

分子的质量和体积都很小,而数量却非常多,例如一个氧分子的质量只有 5.31×10^{-28} 克,在标准状态下1厘米³氧气含 2.7×10^{19} 个氧分子。这些分子不是挤得很紧,而是相互之间存在一定的空隙。煤油的气味散布在空间,就是由于煤油分子扩散到空气分子空隙中的缘故;糖能溶解在水中就是糖分子分散到水分子空隙中了。固体的热胀冷缩就是因为分子间距离改变的结果。可见,无论气体、液体和固体,它们的分子间都有空隙,其中以气体的空隙最大,固体的空隙最小。

分子之间除存在空隙以外,还存在一种引力。物质内无数分子所以能结合在一起,就是因为分子之间存在着引力的缘故。液体和固体很难压缩,说明分子之间同时又有斥力。分子间的引力和斥力统称为分子力。对外呈现出来的是它们的合力,即分子间引力和斥力的合力。引力和斥力的大小与分子之间的距离有关,当它们相距某一距离时,引力等于斥力,当距离减小时,引力和斥力都要增大,但斥力较引力增加得快,所以分子力表现为斥力,这时较难压缩。当分子间距离增大时,斥力较引力减小得更快,所以分子力表现为引力;这时较容易压缩,当分子间距离很大时,分子力十分薄弱,简直可以忽略不计,气体就属于这种情况。

物体中的分子是在不停地作无规则的运动,具有动能。这就是分子运动论的理论基础。由于各个分子的运动速度不同,它们的动能也不相等。物体中所有分子的动能的平均值,叫做分子的平均动能。

物体的温度与分子的平均动能有直接关系,物体的温度越高,则分子运动得越激烈,分

●比容又称比体积,其意义为单位质量气体所占有的容积。

●比热为单位数量的物质温度每升高一度时所需要的热量。

子的平均动能也就越大,所以温度是分子平均动能的标志。由于物体的温度跟大量分子的这种无规则运动有关,所以这种运动又叫做分子的热运动。

在物体内部,一方面分子的热运动总是要使分子杂乱地分散开来,另一方面分子间的引力又总是要使分子聚集在一起,这两方面的因素是一对矛盾。由于矛盾的主要方面不同,所以物质可以分为固体、液体和气体三种状态。在固体物质中,由于分子间距离小,它们之间的引力很大,引力是矛盾的主要方面,而分子热运动是矛盾的次要方面。由于固体物质的分子不大容易离开它原来的位置,只能在固定位置的附近作幅度较小的振动。所以固体有固定的形状和体积。在液体物质中,矛盾的主要方面仍然是分子的引力,但这个作用要小一些,热运动的范围要大一些。于是液体物质的分子可以在平衡位置附近作幅度较大的振动,还可以成群结队地缓慢移动。所以液体没有固定的形状,可以流动,但有固定的容积,基本上不可压缩。气体物质分子间距离较大,引力很小,这对矛盾的主要方面是分子的热运动,它的分子可以不受什么约束地到处乱跑,作杂乱无章的运动,总是力图充满整个容器。所以,气体物质不仅可以流动,而且没有固定的容积,既容易膨胀,也容易压缩。

上述概念很重要,在以后的章节中要多次运用到。

二、工质、理想气体与实际气体

我们知道,汽轮机利用具有一定热能的蒸汽做功,把热能转变成机械能,燃气轮机利用具有一定热能的燃气做功,热能转变成机械能,这里的蒸汽和燃气起了媒介的作用,把这种将热能转变为机械能的媒介物质叫做工质。

为了使热机不断地做功,就要求工质连续不断地流过热机,所以要求工质有良好的流动性。同时为了获得更多的功,还要求工质有良好的膨胀性。在固体、液体、气体三者中,以气体的流动性和膨胀性为最好,所以目前都采用气体作为工质,又由于水蒸气具有价廉易得,不易腐蚀、无毒等优点,所以水蒸气更是热工技术上最为广泛应用的工质。

为了研究上的方便,又把气体分为理想气体和实际气体。

分子之间不存在引力,分子本身不占体积的气体叫做理想气体。我们知道,气体与固体、液体不同,它的分子之间的距离很大,当气体容积增大时,随着分子间距离的增大,气体分子间的引力就减小,同时分子本身的体积在总容积中所占的比例也减小。当分子间的距离很大很大时,这个比例就变得很小很小。在极限情况下,分子间的引力变为零,分子本身也不占体积了,这样的气体就成了理想气体。

反之,分子之间存在着引力,分子本身占有体积的气体,称为实际气体。

理想气体实际上并不存在,它是一种假想的气体。

我们实际遇到的气体,大致上可以分成两大类:一类是距离它的液体状态很近,如烧水时产生的水蒸气,水银面上的水银蒸气,酒精面上的酒精蒸气等;另一类距离它的液体状态很远,如空气、烟气(包括其中含有的水蒸气)等。前者必须以实际气体看待,后者则很接近理想气体。

就拿水来说,水沸腾时产生水蒸气。这种水蒸气是刚从液体变来的,距离液体很近。由于水蒸气分子间的距离较小,所以引力较大,分子本身的体积在总体积中所占的比例也较大,这些都不容忽略,因此,必须以实际气体对待。若把这样的水蒸气拿出来加热降压,即一方面加热升高温度,一方面降低压力,那么在加热时,它的容积要增大,这就是常说的热胀;降压时,它的容积也要增大,就好象蒸汽通过汽轮机时压力降低而容积增大一样,温度

越高,压力越低,则容积越大,越远离液体。而容积越大,分子间的引力以及分子本身的体积在总容积中所占的比例越小,换句话说,越接近理想气体。这一结论也适用于其它气体。

在热力计算中,例如在分析和计算气体时,要考虑分子引力和分子本身体积这两个因素,这就使计算变得很复杂,同时,对于接近理想气体的气体来说,影响又很小;因此在一定的条件下,忽略上述两个因素,把接近理想气体的实际气体看作为理想气体。这样,既可以使计算和分析大大简化,又可以保证足够的准确性。所以提出理想气体的概念使复杂的问题合理地简化了。

自然界的一切气体,根据不同的条件,有的可以近似地看作理想气体,有的必须作为实际气体。条件是接近液态的作为实际气体,越远离液态的越接近理想气体。例如在标准大气压力下,液态空气在 -191.4°C ,液态氧气在 -182.5°C 时才沸腾,所以在常温下的空气和氧气都远离液态,均可看作为理想气体。水蒸气则不然,在标准大气压力下,在 100°C 时沸腾,故它很接近液态,须以实际气体对待。在通常情况下,把空气、烟气看作理想气体;锅炉汽包中、管道中的水蒸气,均应作为实际气体。习惯上常把实际气体称为汽体,如水蒸气、水银蒸气等,而把可以作为理想气体的氧气或空气等称为气体。理想气体可以用理想气体定律进行计算。对于实际气体,因其性质与理想气体相差很大,而不能用理想气体的公式计算。由于其分子运动的规律极为复杂,不能以简单的数学式表示,在工程中常将其性质列成备查的图表。

第二节 工质的热力状态及其基本参数

工质在热力设备中,必须通过吸热、膨胀、排热等过程才能完成将热能转变成机械能的工作。在这些过程中,工质的物理特性随时在起变化,或者说,它们的状态随时在起变化,所谓状态,就是指在某一瞬间,用以表示物质物理特性的总标志。在给定的状态下,表明物理特性的所用的各个量,称为状态参数。例如温度、压力等。状态参数的全部或一部分发生变化,即表明物质所处的状态起了变化,而物质状态的变化,也必然由参数的变化所标志出来。为了说明热力设备中的工作过程,必须研究工质所处的状态和它所经历的状态变化过程。在研究热力过程时,采用温度、压力、比容作为工质的基本状态参数,另外还有内能、焓、熵等参数,以后将陆续介绍。

一、比容(比体积)

设有 m 千克质量的工质所占有的容积 V 立方米,则其比容为

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

比容的单位名称为立方米每千克,其中文符号为米³/千克。

例如某状态下空气的比容为 $0.775 \text{ m}^3/\text{kg}$,就是说1千克空气占有 0.775 立方米的容积。若 8 立方米的容器内装有 4 千克工质,则其比容为

$$v = \frac{8}{4} = 2 \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

反之,单位容积中所容纳工质的质量称为密度,用符号 ρ 表示,单位名称为千克每立方米,其中文符号为千克/米³。按定义可得

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-2)$$

二、压力(压强)

气体的压力就是气体在单位面积(容器壁面上)所受到的垂直作用力,称为“压力”。用符号 p 表示。按气体分子运动学说,气体的压力是由于大量分子与容器壁碰撞而产生的结果。由于气体的分子数目极多,撞击频繁,以致我们无法知道每次撞击的情况,而只能观察全部撞击的结果,所以气体的压力是标志大量分子在一段时间内撞击容器壁总的平均结果。而压力的方向是垂直于容器内壁的。

在法定计量单位中,压力的单位名称为帕[斯卡],其中文符号为帕(Pa),1帕就是1平方米的面积上作用1牛顿的力,1帕=1牛/米²。

暂时与法定计量单位并用的单位有千克每平方厘米, 其中文符号为千克力/厘米², 亦称工程大气压(at), 还可以以“巴”为压力单位, 因为帕的单位较小, 所以常用兆帕作单位。有时

压力的数值也可以用液柱高度 h 表示。由液体组成的柱体称为液柱，如水柱、汞柱等，液柱是有重量的，若液柱的面受到一个向上的压力与液柱的重量相平衡（见图1-1），它所能托住的液柱越高，则压力越大，所以可以用液柱的高度表示压力的大小。在这类单位中，常用的有毫米汞柱（mmHg），毫米水柱（mmH₂O）。如风压为380毫米水柱，凝汽器真空度为730毫米汞柱，水泵扬程为9米水柱等。

大气的压力亦作为压力的单位，物理学上把北纬 45° 海平面上常年平均气压定做“标准大气压”或称为“物理大气压”，用符号“*B*”表示。其值为 760 毫米汞柱 (0°C) 时，单位符号为 atm。

工程大气压和物理大气压都是度量压力的单位，并不是真正的大气压力。

暂时与法定计量单位并用的其它一些压力单位，它们的名称，代号等见表1-1。它们的相互间换算关系如表1-2。

图 1-1 用液柱表示压力的示意图

液柱表示压力的示意图

锅炉的汽化
小，以毫

压力之所以要选用不同的单位,是为了应用的方便,一般压力较大时用工程大气压做单位,压力较小或小于大气压力时用汞柱或水柱表示。如锅炉的给水和压力,以工程大气压为单位,凝汽器真空以毫米汞柱为单位,风压和炉膛负压较水柱为单位。

表 1-1 暂时与法定计量单位并用的压力单位

单 位 名 称	单 位 符 号		与Pa间的换算关系	备 注
	中 文	国 际		
巴	巴	bar	1bar=10 ⁵ Pa	
标准大气压	标准大气压	atm	1atm=101325Pa	
毫米汞柱 (托)	毫米汞柱		1mmHg=1Torr =133.32Pa	mmHg及Torr为 习惯上常用的符号
工程大气压 (公斤力每平方米)	工程大气压 (公斤力/厘米 ²)	at (kgf/cm ²)	1at=1kgf/cm ² =9.80665×10 ⁴ Pa	
毫米水柱	毫米水柱		1mmH ₂ O=9.80665Pa	mmH ₂ O为习惯上 常用的符号

表 1-2 压力单位换算表

帕, Pa N/m ² (牛顿/米 ²)	工程大气压 kg/cm ² (公斤/厘米 ²)	标准大气压 atm (760mmHg)	毫米汞柱 mmHg	毫米水柱 mmH ₂ O
1	1.0197×10^{-5}	0.9869×10^{-5}	0.7510×10^{-2}	0.10197
0.9807×10^5	1	0.9678	735.56	1.00003×10^4
1.0133×10^5	1.03323	1	760.00	1.0333×10^4
9.806	0.9997×10^{-4}	0.9678×10^{-4}	7.3554×10^{-2}	1
1.3332×10^2	1.3595×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	1	13.5955

说明容器的工质的压力, 实际上可有两种不同的方法, 一种是直接指明工质施于器壁上的压力的实际数值, 叫做“绝对压力”。记作 $p_{\text{绝}}$; 另一种是指明用压力表测量这一压力时压力表的读数, 叫做“表压力”, 记作 $p_{\text{表}}$, 参看图 1-2a。

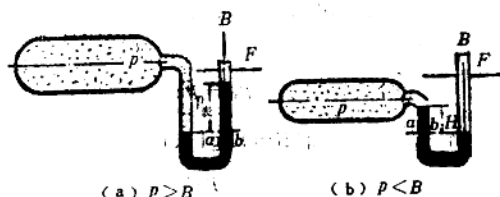


图 1-2 表压力概念的示意图

表压力是绝对压力高出当时当地的大气压力的数值, 或

$$p_{\text{绝}} = B + p_{\text{表}} \quad (1-3)$$

例如, 图中U形管压力表的读数设为0.5大气压, 而当时当地的大气压力计上所读出的大气压力是758毫米汞柱, 则容器内工质的绝对压力就应该是 $0.5 + \frac{758}{735.6} = 0.5 + 1.03 = 1.53$ 大气压。

当容器内工质的绝对压力比大气压力还低时, 表压力就应该是负值。若这时只取它的数值, 称之为“真空度”, 并记作 H , 或

$$p_{\text{绝}} = B - H \quad (1-4)$$

参看图 1-2b, 设U形管压力表上的读数表明容器内的压力比当时当地的大气压力低15毫米汞柱, 则称容器内有15毫米汞柱的“真空度”。

例1-1 某空调设备中通风机排出管处 U 形压力计测得 $p_{\text{表}} = 250 \text{ mmHg}$, 设当地大气压力 $B = 758 \text{ mmHg}$, 求排出管中空气的绝对压力 $p_{\text{绝}}$ 是多少?

解 按照公式(1-3)

$$p_{\text{绝}} = B + p_{\text{表}} = \frac{758}{735.6} + \frac{250}{10000} = 1.03 + 0.025 = 1.055 \text{ kgf/cm}^2$$

例1-2 在例1-1所说的通风机吸入管上安装的U形压力计测得的真空度为100毫米水柱, 设 $B = 758$ 毫米汞柱, 求吸入管内空气的绝对压力 p 是多少?

解 按照公式(1-4)

$$p_{\text{绝}} = B - H = \frac{758}{735.6} - \frac{100}{10000} = 1.03 - 0.01 = 1.02 \text{ kgf/cm}^2$$

在绝对压力、表压力和真空度这三者中; 绝对压力是工质真正作用在容器内壁的实际数值, 而表压力和真空度是压力表和真空表的读数, 都只是相对于当时当地的大气压力而言

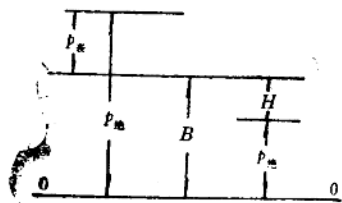


图1-3 绝对压力概念的示意图

的，是测量时应用的相对数值，所以也称相对压力。作为气体热力状态参数的气体的实际压力 p_a 显然是绝对压力。 B 因为随时随地可有变化，所以即使气体的绝对压力不变， p_g 和 H 仍可能有变化。绝对压力示意图见图 1-3。

式(1-3)和(1-4)中的 B 应从当时当地的气压表上读出，当表压数值较大时，因 B 在总压力 p_a 中所占比例甚小，在工程计算中常简单地把 B 当作 1 工程大气压来处理。而当绝对压力 p_a 的数值较小时，例如只在 1 大气压

左右或小于 1 大气压时， B 不能作此简化，这可从下面示例中明显地看出来。

例1-3 汽包压力表读数为 98 kgf/cm^2 ，当地气压计读数为 765 mmHg ，求汽包内工质的绝对压力，要求用工程大气压表示

解法一

$$p_a = p_g + B = 98 + \frac{765}{735.6} = 99.04 \text{ kgf/cm}^2$$

解法二 近似取 $B = 1 \text{ kgf/cm}^2$

$$p_a = p_g + B = 98 + 1 = 99 \text{ kgf/cm}^2$$

由于 B 取近似值，所以引起的相对误差为

$$\frac{99.04 - 99}{99.04} = 0.0404\%$$

可见这样计算的相对误差是微不足道的。

例1-4 凝汽器水银真空表的读数为 730 mmHg ，气压表读数为 765 mmHg ，求工质的绝对压力，用 mmHg 表示。

解

$$p_a = B - H = 765 - 730 = 35 \text{ mmHg}$$

若也近似取 $B = 1 \text{ kgf/cm}^2$ ，

则

$$p_a = B - H = 735.6 - 730 = 5.6 \text{ mmHg}$$

由此引起的相对误差为

$$\frac{35 - 5.6}{35} = 84\%$$

显然，这么大的误差是不能允许的，所以在这种情况，不允许近似取 $B = 1 \text{ kgf/cm}^2$ 。

三、温度

温度是表示物体的冷热程度，当一个物体处于较热的状态时，称为温度较高，而当该物体变化到较冷的状态时，称为温度较低。物体的冷热程度常可以通过一些物理量的温度效应来说明。例如，当物体较热时，其体积较大，而当它较冷时，体积较小；又如物体较热时，其电阻较大，而当它较冷时电阻较小，因而可以按这些物理量的数值来说明物体温度的高低，两个不同性质物体的冷热程度，可以通过互相接触进行比较，若两个物体互相接触后，甲物体由热变冷，而乙物体由冷变热，则说明甲物体原来的温度较高，而乙物体原来的温度较低。若两物体互相接触时，它们两者的冷热程度都不发生变化，就表明这两个物体具有相同的温度。同样，如果几个物体相接触，或者一个物体分别和几个物体相接触，若它们各自的冷热程度都不变，则这些物体都具有相同的温度。

按分子运动学说，温度是物质分子运动的平均移动动能的量度，温度高即气体分子平均

移动动能大，温度低即分子平均移动动能小，当两气体的分子平均移动动能相同时，两者的温度相同。如有两个分子运动平均动能不同的物体相接触，则由于接触而分子互相碰撞的结果，能量就由具有分子运动平均动能较大的物体传给平均动能较小的物体，直到两物体的平均动能相等为止。换句话说，就是高温物体把热量传给低温物体，直到两者温度相等时传热才停止。因此可以认为温度乃是物质内部分子平移运动的平均动能的标志。它们之间的关系如下：

$$\frac{m\omega^2}{2} = BT \quad (1-5)$$

式中 T ——绝对温度，K；

m ——一个分子的质量，g；

B ——比例常数；

ω ——分子平移运动的均方根速度。

如以 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ……代表理想气体各个分子的平移运动速度，于是各速度的均方根值为

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \dots + \omega_n^2}{n}}$$

式中 n ——代表第 n 个分子。

温度的概念是人们从对物体冷热程度的感觉中产生的。为了表示温度的数值，即想要定量地确定温度，需要有作为量度温度的标尺即温标。常用的温标有二种：摄氏温标和热力学温标。现分述如下：

1. 摄氏温标

摄氏温标又名国际百度温标，目前比较通用。摄氏温标取标准大气压下冰融化时的温度为零度(0°C)，水沸腾时的温度为一百度(100°C)如图 1-4 所示。将上述两点之间分成一百个刻度，每一个刻度为 1 度，这种温标称为摄氏温标，用摄氏温标量度的温度用符号 $t^\circ\text{C}$ 表示，称为摄氏温度。即摄氏温度的符号为 t ，单位名称为摄氏度，单位的符号为 $^\circ\text{C}$ ，例如，50 摄氏度可以写为 50°C ，或 $t=50^\circ\text{C}$ ，若温度比 0°C 低，则在温度数字前面加一个负号，读作零下多少摄氏度。例如， -20°C ，读作零下 20 摄氏度，表示比零摄氏度低 20 摄氏度。

2. 热力学温标

热力学温标，也称绝对温标，它是热力学的基本温标，它所定义的温度为热力学温度，亦称绝对温度，其符号为 T ，单位名称为开尔文，单位符号常写为开(K)。例如热力学温度为 80 度，可写为 $T=80\text{K}$ 。

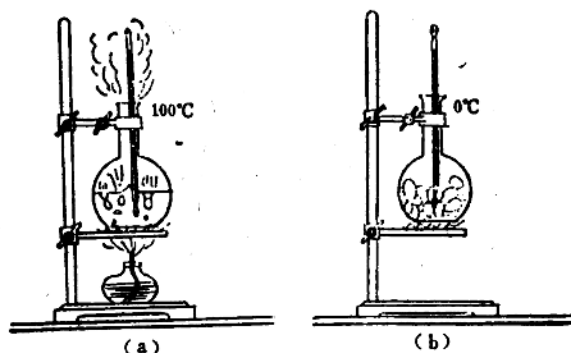


图 1-4 摄氏温标概念示意图

A—取标准大气压下纯水沸腾的温度为 100°C ；

B—取标准大气压下纯水结冰的温度为 0°C

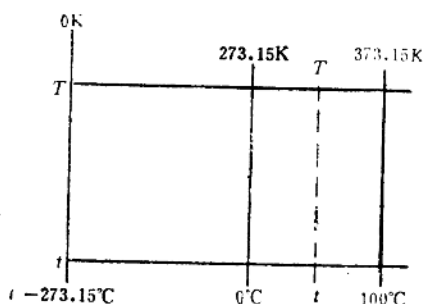


图 1-5 热力学温度与摄氏温度的关系

热力学温标是这样规定的：取零下 273 摄氏度，即 -273°C 为零度（准确一些，应为 -273.15°C ），而每个间隔与摄氏温标相同。

可见，热力学温标和摄氏温标都是量度物体温度的。只是它们所取的零点不同，二者的关系如图 1-5 所示，任意摄氏温度 t 与热力学温度 T 的关系为

$$t = T - T_0 \quad (1-6)$$

式中 t ——用摄氏温标表示的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T ——用热力学温标表示的温度，K；

T_0 ——用热力学温标表示的纯水冰点温度，K。

$$T_0 = 273.15 \text{ K}$$

例如，在 101325Pa （即标准大气压）下，纯水的冰点为 273.15K ，纯水的沸点为 373.15K 。而人体的正常体温为 310.15K （即 37°C ）。

实际上处于零 K 的物体是没有的，因为它是物质分子停止运动时的温度。热力学温度在工程和基础科学中都有着重要的作用。

第三节 理想气体状态方程式

在建立分子运动学说以前，人们已对气体的基本状态参数之间的关系作过大量实验研究，建立了一些经验定律，如波义耳-马略特定律、盖·吕萨克定律和查理定律。

这三个定律所反映关于气体的三个基本状态参数 p 、 v 、 T 之间的关系，我们在日常生活和实际工作中是常遇到的。

例如，船上日用的海水压力柜或淡水压力柜中充有压缩空气，当水泵向水柜充水时，空气被压缩，使压力升高、比容减小，此时空气的温度可以近似看作是不变的。“在温度不变的条件下，气体的压力和比容成反比”，即当 $T_1 = T_2$ 时

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

或

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (1-7)$$

这定律是经过大量的实验所证实，亦称为“波义耳-马略特定律。”

自行车的内胎在炎热夏天的日光照射下，常常易“放炮”（爆裂），这是因为自行车内胎内的空气（表压力约为 4 千克力/厘米^2 ）受日光照射而被加热，使温度升高，而空气容积受外胎的限制可以看作是不变的，即比容 v 不变。因此内胎中的空气压力随温度升高而增高，当压力大于外胎所能承受的压力时，外胎破裂，内胎就在破裂处被空气鼓胀而爆裂。再如，气焊用的氧气瓶上写有“不得近火”字样，也是因为一定质量的高压氧气储藏在氧气瓶中的容积一定。当氧气瓶靠近高温物体时，瓶内的氧气被加热，温度上升，因而压力也要上升，当压力上升到超过氧气瓶的强度时，就有爆炸的危险。经大量实验证明：“在比容不变的条件下，气体的压力和绝对温度成正比”。即当 $v_1 = v_2$ 时