

中等专业学校轻工专业试用教材

轻工业热力设备

轻工业部广州轻工业学校 编

中国轻工业出版社

中等专业学校轻工专业试用教材

轻工业热力设备

轻工业部广州轻工业学校编

中国轻工业出版社

(京)新登字 034 号

图书在版编目 (CIP) 数据

轻工业热力设备/轻工业部广州轻工业学校编:—北京:
中国轻工业出版社, 1995. 5

中等专业教材

ISBN 7-5019-1722-1

I. 轻… I. 轻… III. 轻工业-热力工程-设备-专业
学校-教材 IV. ①TK17②TS04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 03172 号

责任编辑 孟寿萱

*

中国轻工业出版社出版
(北京市东长安街 6 号)
三河市宏达印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 1/16 印张: 17 插页: 1 字数: 393 千字

1995 年 5 月 第 1 版第 1 次印刷

印数: 1—2, 000 定价: 10.05 元

前 言

本书是根据原轻工业部专业教材“八五”出版规划，按照轻工业中等专业学校《轻工业热力设备》课程教学大纲而编写的。

能源是为人类生产与生活提供能量与动力的物质资源，是人类赖以生存和发展的重要物质基础。热能工程是推动社会生产的巨大动力。热力设备不但在冶金、机械、交通化工等企业不可缺少，在轻工业企业中，也是到处可见。

本书以轻工业热力设备为研究对象，探讨热能有效开发和合理利用的方法，介绍设备的原理、构造及运行知识。

通过本书的学习，可掌握热能转换的基本规律，蒸汽动力循环的基本理论，热力设备的工作原理、构造和一般运行、维护知识，热电站的主要内容，以及热能有效利用的方法和节能技术的基本原则。

在教学内容上，注重加强能力的培养，注重理论和实际的结合，力图使学生修完本课程后，具备管理热能设备，分析和解决热电站、锅炉等运行中实际问题的初步技术能力。

本书的编写分工为：张钊锋编写第一至第八章，谭辉平编写第九至第十二章，何源编写第十三章。全书由万雍然主编，钟耀南修改和统稿，朱舒堂主审。

由于编者的水平和经验有限，书中如有错漏，恳切希望读者指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 基本概念	3
§ 1-1 工质及其状态参数	3
§ 1-2 理想气体及其状态方程式	9
§ 1-3 热力学第一定律	11
§ 1-4 气体的热力过程	19
§ 1-5 稳定流动能量方程式	32
第二章 水蒸气及热力循环(附混合气体)	36
§ 2-1 水蒸气及其定压产生过程	36
§ 2-2 水蒸气图表及其应用	40
§ 2-3 热力学第二定律及热力循环	46
§ 2-4 混合气体	53
第三章 锅炉设备概述	62
§ 3-1 锅炉设备的组成	62
§ 3-2 锅炉的特性指标及分类	64
§ 3-3 锅炉的型号	68
第四章 燃料与燃烧	72
§ 4-1 锅炉的燃料	72
§ 4-2 煤的组成与性能	74
§ 4-3 燃烧计算	82
第五章 锅炉的热平衡	88
§ 5-1 锅炉的热平衡方程式	88
§ 5-2 锅炉热效率	88
§ 5-3 锅炉的各项热损失	90
§ 5-4 锅炉热平衡查定简介	92
第六章 锅炉的燃烧设备	96
§ 6-1 炉子的分类和要求	96
§ 6-2 层燃炉	97
§ 6-3 悬燃炉	103
§ 6-4 沸腾炉	114

§ 6-5 炉子热强度及燃烧情况判断	115
第七章 锅炉的传热设备	119
§ 7-1 汽锅发展简况	119
§ 7-2 蒸发设备	120
§ 7-3 辅助受热面	124
§ 7-4 锅炉的安全附件	127
§ 7-5 典型锅炉示例	130
第八章 锅炉的热力估算及强度计算	136
§ 8-1 锅炉的热力估算与选型	136
§ 8-2 锅筒、集箱及管子的强度计算	140
§ 8-3 封头强度计算	147
第九章 气体与蒸汽的流动	156
§ 9-1 喷管流动的基本特性	156
§ 9-2 喷管出口的流速与流量	160
§ 9-3 斜切喷管的流动特性及选择	163
§ 9-4 绝热节流	166
第十章 汽轮机的工作原理及分类	168
§ 10-1 汽轮机的工作原理	168
§ 10-2 汽轮机的分类及型号	171
§ 10-3 级内工作过程及多级汽轮机	173
§ 10-4 汽轮机的效率及功率	181
第十一章 汽轮机的结构与凝汽设备	187
§ 11-1 汽缸、喷管与隔板	187
§ 11-2 动叶片、叶轮与主轴	190
§ 11-3 汽封、滑销与轴承	193
§ 11-4 凝汽器与抽气器	199
§ 11-5 汽轮机结构示例	201
第十二章 汽轮机的调节、保安与油系统	206
§ 12-1 调节系统	206
§ 12-2 全液压调节系统	208
§ 12-3 保安装置	213
§ 12-4 油系统	216
第十三章 热电站	218
§ 13-1 热电站动力循环	218
§ 13-2 热电站热力系统	223
§ 13-3 热电站水处理	230
§ 13-4 热电站通风除尘及输煤除灰系统	241
§ 13-5 锅炉运行及故障预防	249

§ 13-6 汽轮机运行及故障预防	252
附录	255
表 I 饱和水与饱和水蒸气表 (按压力排列)	255
表 II 饱和水与饱和水蒸气表 (按温度排列)	257
表 III 未饱和水与过热水蒸气表	259

绪 论

一、能源及热能在轻工业生产的利用

能够提供热、光和动力等各种能量的自然资源称为能源。它是人们进行生产和赖以生存的重要物质基础。在自然界中，蕴藏着极为丰富的能源。人们常把煤炭、石油、天然气等燃料及水能、生物能等称为常规能源，而把目前应用较少或正处于试验研究阶段的能源，如太阳能、地热能、原子能等称为新能源。

我国能源资源丰富，发展前景广阔。已探明的煤储量为 6500 亿吨，居世界第 3 位；已探明的石油储量居世界第 8 位；已探明的天然气储量居世界第 16 位；已探明可供开发的水能蕴藏量为 378GW，居世界首位；铀、钍和其他新能源的资源也比较丰富。如此丰富多样的能源，为我国能源事业的发展奠定了雄厚的基础。

新中国成立以来，能源开发的速度很快，1993 年我国原煤年产量已跃居世界首位，电力、原油产量也进入了世界前列。我国的能源工业取得了全球公认的进步。但是，由于我国人口众多，人均能源实际上只相当于世界平均数的一半。与发达国家相比，我国的能源消耗存在着利用率低、浪费大、经济效益差等问题。能源生产和需求之间的矛盾，已成为我国经济建设能否保持高速发展的关键。我国当前的能源政策是开发与节约并重。由于新能源的开发正处在初级阶段，所以，节约能源是我国经济建设全局的战略任务。

按照物质运动形式的不同，能源也可以相应地分为热能、机械能、电能、化学能、辐射能和原子能等多种形式。组成物质的所有粒子作各种不规则热运动时的总能量称为热能。热能的利用包括两种方式：一种是直接地把热能用于加热、采暖、蒸煮和烘干等工艺用途；另一种是间接地把热能转换为发动机的机械能，作为生产上的动力，或进一步转变为电能。由于电能具有输送及使用方便、易于转变成为其他形式能量的优点，几乎是国民经济中所有技术生产过程的原动力。

轻工业是一个多行业、多品种的国民经济部门，热能的利用存在于轻工业如制糖、造纸、塑料、食品、发酵、陶瓷、皮革等的每一个生产环节中。物料的输送、破碎、加热、蒸发、浓缩、分离、保温和制冷等过程，都需要大量热能和电能等能量。

由于轻工业生产耗热、耗电的用能特点，使轻工业热电站的建设和发展在国民经济中具有很重要的地位。目前，大多数的制糖、造纸等轻工行业建起了中大型热电合供热电站，电能除供全厂用电外，还可向外输送并入电网；同时，利用在汽轮机中做过功的蒸汽（抽汽或排汽）热量供给热用户，作为轻工业生产的工艺用汽。实践证明，建设热电合供的轻工业热电站，是目前行之有效的可以大量节约能源的好措施。

二、轻工业热电站概况

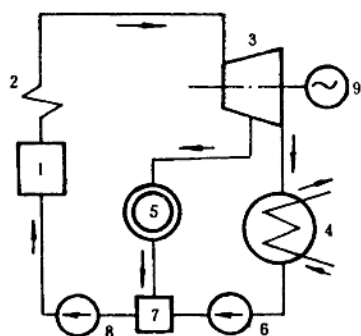


图 0-1 轻工业热电站系统简图

- 1—锅炉 2—过热器 3—凝汽式汽轮机
4—凝汽器 5—凝结水泵 6—热用户
7—加热器 8—给水泵 9—发电机

轻工业热电站的生产过程，如图 0-1 所示。燃料在锅炉中燃烧，使燃料的化学能转化为热能，加热锅炉汽锅中的水，产生具有一定压力和温度的蒸汽。蒸汽进入汽轮机内膨胀做功，使汽轮机的转子转动，带动发电机产生电能。在汽轮机内做过功的蒸汽（称为乏汽），进入凝汽器中冷凝成水，重新作为锅炉的给水。也可以在设计时将乏汽压力适当提高，利用其作为加热介质，满足一般的工艺需求。轻工业生产中大多数场合需要较高的加热温度，这时也可以利用从汽轮机的中段抽出一部分蒸汽来供热。在轻工业生产过程中，这种既能供电又能供热的动力装置，称为轻工业热电站。

三、本课程的任务与主要内容

综上所述，轻工业热电站是由许多热力设备和电气设备所组成的整体。本课程的任务就在于学习和研究热能和其他能量（如机械能、电能、化学能等）之间的转换关系，主要热力设备（锅炉和汽轮机）及有关辅助设备的基本原理、构造及主要性能等。通过本课程的学习，要能够掌握热力学基本原理，全面地认识轻工业热电站的生产过程，较好地了解主要热力设备的工作原理、构造特点和一般运行知识，并通过参观和实习等教学环节，对轻工业热电站建立起较为完整的概念，进而具备管理热力设备，分析和解决实际问题的能力。

为达到以上要求，本课程的基本内容包括热工理论基础、锅炉设备、汽轮机设备及热力发电站等部分。由于本课程的内容和发电生产实际是密切相联系的，所以，学习本课程除应重视基本理论的掌握外，还须充分注意理论联系实际。

目录中有“*”号的部分，可根据教学需要取舍。

第一章 基本概念

§ 1-1 工质及其状态参数

在热力过程中，能不断供给热能的物体称为高温热源，简称热源。

热力工程所利用的热源，主要是燃料所蕴藏的化学能。燃料在锅炉设备中燃烧，产生热能，并借助适当的热力设备将热能转化为机械能。这种能将热能转化为机械能的热力设备称为热力发动机，简称热机。蒸汽机、汽轮机、内燃机、燃气轮机等都是常见的热机。

在热机中，要实现热能转化为机械能，必须借助能够携带和转移热能的工作物质才能实现，这种实现热能和机械能相互转化的媒介物质称为工质。如汽轮机或蒸汽机的工作需要水蒸气，内燃机的工作需要燃气。

为了获得更多的功，要求工质具有良好的膨胀性；为了使工质不断地流过热机连续做功，要求工质具有良好的流动性，这是工质必须具备的必要条件。在热力工程中，还要求工质具有易得、热力性能稳定、无毒、对设备无腐蚀作用等性质。由于经处理后的水汽化成水蒸气所携带的热能多，受热膨胀的能力大，流动性好，而且易得、稳定、无毒、不易腐蚀，所以目前热力工程（如火力发电厂等）主要以水蒸气做为工质。

热力学理论认为，单一热源的热机是不能实现的，工质携带的热能，一部分在热机中转化为机械能，而将余下的热能排入大气或冷却水。这种接受工质排出剩余热能的物体叫做低温热源，简称冷源。如汽轮机的凝汽器就是一个冷源。热能动力装置的工作过程，就是工质从热源吸取热能，然后在热机中将其一部分转化为机械能，并把余热传给冷源的过程。

工质在进行热量传递和能量转换过程中，将发生状态的变化。所谓状态就是指工质在某一时刻的物理特性。描述工质状态特性的物理量称为工质的状态参数。工质有了一组确定的状态参数，就可确定工质的状态。当工质的各部分具有相等的状态参数时，称工质处于平衡状态。这种平衡包括热平衡（即温度平衡）与力平衡（即压力平衡），反之就是不平衡状态。处于不平衡状态的工质各部分由于温度、压力不相等，必然会产生热和位移，最终使温度和压力均匀一致。所以说，不平衡状态在没有外界条件影响下，总会自发地趋于平衡状态。只有处于平衡状态的工质，各部分才具有确定不变的状态参数。

热力工程常用的状态参数有6个：温度 T 、压力 p 、比容 v 、内能 u 、焓 h 、熵 s 。由于前面3个可以直接或间接由仪器测出，并且容易理解其物理意义，故称为基本状态参

数。其他 3 个是由基本状态参数导出的，称为导出参数。

一、温 度 T

温度是表示物体冷热程度的物理量。温度的高低确定了热的传递方向。根据气体分子运动理论，温度是大量分子平均移动动能的量度，分子运动的速度越快，物体温度就越高。它们之间的关系是：

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

式中 m ——分子的平均质量；

$\bar{\omega}$ ——分子平移运动的均方根速度；

$\frac{m\bar{\omega}^2}{2}$ ——分子平均移动动能；

B ——比例常数；

T ——气体的绝对温度。

由此可见，分子运动学说揭示了物质冷热程度的本质。

测量温度的标尺叫做温标。习惯上常用的一种温标是摄氏温标，其温度用符号“ t ”表示，测量单位用“ $^{\circ}\text{C}$ ”表示。它规定在 1 标准大气压下冰的熔点为 0°C ，水的沸点为 100°C ，中间等分 100 分度，每一分度称为摄氏 1°C 。在通用的国际单位制中，把水的三相点（即冰、水、汽平衡共存）温度定为摄氏温度的零度。

在热力学的分析计算中，国际单位制以热力学温标作为基本温标，叫做开氏温标，也称为绝对温标，其温度用符号“ T ”表示，测量单位用开尔文，单位代号为“ K ”。它与摄氏温标的分度相同，因而凡涉及到温差的地方，用 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 在数值上是相同的，即 $\Delta t = \Delta T$ ，但起点不同。绝对温标的起点是把分子停止运动时的温度作为零度。根据式 (1-1)，当 $\bar{\omega} = 0$ 时， $T = 0\text{K}$ 。

这个温度相当于摄氏温标零下 273.15°C 。实际上，这种状态的温度是达不到的。但因这种温标与测温物质的性质无关，便于统一，所以被广泛使用。

绝对温标和摄氏温标都是国际单位制中所规定使用的温标，它们间的换算关系为：

$$T = t + 273.15, \text{ K}$$

通常在工程计算中，取 273 已够准确，所以两个温度间的换算关系可用下式计算：

$$T = t + 273, \text{ K} \quad (1-2)$$

少数欧美国家还习惯采用华氏温标 $t^{\circ}\text{F}$ 。它是将水的冰点和水的沸点分别规定为 32°F 和 212°F ，中间等分成 180 分度，与摄氏温标之间的关系为：

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1-3)$$

二、压 力 p

装在容器中的气体分子，不断运动时对容器壁碰撞的总结果，形成了气体对壁面的

压力。由分子运动理论可推导出如下关系式：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{\omega}^2}{2} \quad (1-4)$$

式中 p ——气体分子作用在单位面积上的绝对压力；

n ——分子浓度，即单位容积内含有气体的分子数， $n = N/V$ ；

N ——容积为 V 时，容器中气体的分子总数。

由式 (1-4) 可见，气体的压力等于单位容积内所有分子平均动能的 $\frac{2}{3}$ ，气体的压力取决于分子浓度 n 和平均动能 $\frac{m\bar{\omega}^2}{2}$ 的大小。将式 (1-1) 代入式 (1-4)，可得：

$$p = \frac{2}{3} nBT \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可见，当气体压缩 (n 增大)、温度升高时，压力就增加；反之，当气体膨胀 (n 减小)、温度降低时，压力就降低。

压力表示为单位面积上所承受的垂直作用力 (物理上称为压强)，并以下式计算：

$$p = \frac{F}{A}, \text{ N/m}^2 \quad (1-6)$$

式中 F ——整个器壁受到的垂直作用力，N；

A ——器壁的总面积， m^2 。

1. 压力的单位

压力的单位 N/m^2 称为帕斯卡，简称帕，用符号 Pa 表示。因帕的单位太小，常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 表示。工程上还曾用巴、大气压和液柱等作为单位。各单位之间的换算关系如表 1-1 所示。

表 1-1 各种压力单位与帕的换算关系

单位名称	单位代号	换算关系
巴	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa 或 0.1MPa
标准大气压	atm	1 atm = 1.01325 × 10 ⁵ Pa
工程大气压	at	1 at = 1 kgf/cm ² = 9.80665 × 10 ⁴ Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O = 9.80665Pa
毫米汞柱	mmHg	1 mmHg = 133.322Pa

压力单位之间的关系如下：

$$1\text{atm} = 1.0332\text{at} = 760\text{mmHg} = 10332\text{mmH}_2\text{O} = 101325\text{Pa}$$

$$1\text{at} = 735.6\text{mmHg} = 10^4\text{mmH}_2\text{O} = 98066\text{Pa}$$

2. 大气压力

地球表面存在着很厚的大气，因其自身的重量而对地面上的物体产生的压力叫做大

气压力，简称大气压，用 B 表示。离地面越高，大气越稀薄，大气压力越小。此外，大气压也随当地空气的湿度和温度的变化而有所变化。大气压力可用气压计测定。

在纬度 45° 海平面上的全年平均大气压力是 760mmHg (0°C)，国际上将其规定为标准大气压或物理大气压。工程上为了计算简便，规定 1 千克力/厘米² (kgf/cm^2) 的压力为 1 工程大气压。标准大气压和工程大气压都是压力的计量单位，不要与所在地区的实际大气压相混淆。实际工程中提到的大气压，除特别指明外，一般都是指工程大气压。按法定计量单位规定，大气压力单位均为 Pa 。

3. 绝对压力、表压力、真空

容器内气体的真实压力称为绝对压力，用 p 表示。它可能高于或低于当时当地的大气压 B ，当绝对压力 p 高于 B 时，称为正压，反之则称为负压。火力发电厂中处于正压状态下工作的设备有锅筒、汽缸等，处于负压状态下工作的设备有负压炉膛、凝汽器等。

容器内气体的压力通常用弹簧管式压力表测得，压力不大时可以用 U 形管压力计测量（见图 1-1）。因为压力表本身处在大气压力作用之下，因此，所测得的压力值是绝对压力 p 与大气压力 B 间的差值。

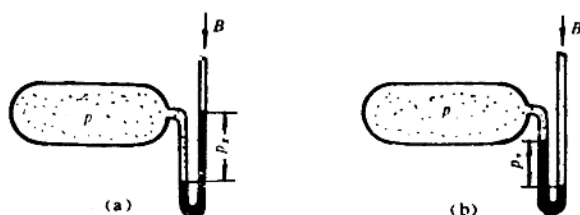


图 1-1 U 形管压力计测量压力示意图

(a) $p > B$

(b) $p < B$

如图 1-1 (a) 所示，正压时，压力表指示的压力值，即绝对压力 p 高于大气压力 B 的数值，称为表压力，用 p_x 表示。显然：

$$p = B + p_x \quad (1-7)$$

如图 1-1 (b) 所示，负压时，真空表测得的数值，即绝对压力 p 低于大气压力 B 的数值，称为真空，用 p_v 表示。显然：

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

绝对压力 p 与表压力 p_x 、真空 p_v 之间的关系也可用图 1-2 说明。

大气压 B 是指当时当地气压计的读数。所以，即使绝对压力不变，表压力和真空也会随大气压的不同而变化。因此，表示工质状态参数的压力，只能用绝对压力。只有绝对压力才可以参加计算或查取各种图表。表压力和真空都不是状态参数。在工程计算中，当表压力较大时，因 B 在绝对压 p 中所占的比例甚小，可将 B 当成 1 个工程大气压（或

0.1MPa) 来处理。工程制的绝对压力单位代号常用 (ata) 表示, 表压力则用 (atg) 表示。计算压力时, 要使用同一单位, 在 SI 制中, 换算成帕 (Pa) 较为方便。

三、比 容

单位质量的工质所占有的容积称为工质的比容, 以符号“ v ”表示, 单位是 m^3/kg 。即

$$v = \frac{V}{m}, \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-9)$$

式中 v ——工质的容积, m^3 ;

m ——工质的质量, kg 。

反之, 单位容积的工质所具有的质量称为密度, 以符号“ ρ ”表示, 单位是 kg/m^3 。即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}, \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-10)$$

显然, v 和 ρ 互成倒数, 实质上是同一个参数。

工质的容积常因所处温度和压力的不同而变化, 使比容也随之变化。实用上往往规定压力为 101325Pa (1atm), 温度为 0°C (或 273K) 的状态为标准状态, 并将此状态下的参数在右下角注上符号“0”。如 p_0 、 t_0 、 v_0 , 容积记做 V_0 。

四、内 能

气体内部具有的各种能量的总和称为气体的内能。它包括气体分子的内动能、内位能、化学能和原子能等。1kg 气体的内能, 以符号“ u ”表示, 单位是 kJ/kg 。mkg 气体的内能, 以符号“ U ”表示, 单位是 kJ 。即

$$U = mu, \text{kJ}$$

因我们研究的能量转换过程中不发生化学变化和原子反应, 可以认为气体内部的化学能和原子能保持不变。所以可认为, 气体的内能包括内动能和内位能两部分。

气体分子的移动、振动、转动等热运动的动能之和称为内动能。气体温度越高, 分子热运动的动能越大, 所以内动能是温度 T 的函数。

由于分子之间的相互引力而形成的位能称为内位能。气体的比容越小, 分子间的距离越近, 内位能就越大, 所以内位能是比容 v 的函数。

既然气体的内能决定于它的温度 T 和比容 v , 也就是决定于气体所处的状态, 所以内能也是一个状态参数。即

$$u = f(T, v)$$

在气体状态变化过程中, 气体的内能一般会随状态的变化而变化, 其变化值用“ Δu ”表示:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (1-11)$$

式中 u_1 ——初态点的内能;

u_2 ——终态点的内能。

当气体的内能增加时， Δu 为正值；内能减少时 Δu 为负值。

五、焓

焓是一个导出状态参数，可以理解为单位量的工质所含有的全部热能，以符号“ h ”表示，单位是 kJ/kg。焓的定义式为：

$$h = u + pv \quad (1-12)$$

焓的物理意义可理解为：在某一状态下气体所具有的总能量，它等于内能 u 和流动功 pv 的代数和。内能是工质所具有的能量，而流动功 pv 则是随工质流动而转移来的能量。焓的引用对工质热力状态的分析 and 热力计算带来很大的方便。我们将在 § 1-4 中作详细讨论。

六、熵

熵也是一个导出状态参数。工程上许多变化过程是复杂的。为了研究方便，可将无限接近的两个状态点的热量变化以“ dQ ”表示，此处“ Q ”表示热量，单位是 J。状态变化中与热量转移有关的另一个重要参数就是温度 T ，因而常把 $\frac{dQ}{T}$ 作为一个状态参数的变量“ dS ”。这个参数是热量与温度的比值，称为熵，以符号“ S ”表示，单位是 J/K。熵的定义式为：

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1-13)$$

熵除以质量，称为比熵，符号 S ，单位是 J/(kg·K)。

所以，熵的物理意义是：工质不可用能的增加正比于工质熵的增加，工质的熵大小是工质的不可用能大小的一种量度。它在工质的热力状态的分析 and 热力计算中有着重要的作用。

【例 1-1】 从工程单位制水蒸气表中查得，水蒸气在 450°C、30atm 时的比容为 0.10998m³/kg，求在国际单位制中上述各参数的值。

【解】 在国际单位制中

温度为 $T = t + 273.15 = 450 + 273.15 = 723.15\text{K}$

压力为 $P = 30 \times 98066.5 = 2942000\text{Pa} = 2.942\text{MPa}$

比容为 $v = 0.10998\text{m}^3/\text{kg}$

【例 1-2】 某热电厂新蒸汽的表压为 100atg，凝汽器的真空度为 94620Pa，送风机表压为 145mmHg，当时气压计读数为 755mmHg。试问以 Pa 为单位的绝对压力为多少？

【解】

大气压力为

$$B = 755 \times 133.322 = 100660\text{Pa}$$

新蒸汽的绝对压力为

$$p_1 = B + p_k = 100660 + 100 \times 98066.5 = 9907300 \text{ Pa}$$

凝汽器中蒸汽的绝对压力为

$$p_2 = B - p_v = 100660 - 94620 = 6040 \text{ Pa}$$

送风机送出的空气，其绝对压力为

$$p = B + p_k = 100660 + 145 \times 133.322 = 119990 \text{ Pa}$$

§ 1-2 理想气体及其状态方程式

一、理想气体与实际气体

自然界实际存在的气体称为实际气体，其分子具有一定的体积，相互之间具有作用力。因此，实际气体性质复杂，很难找出气体分子运动的规律。为了使气体的分析得到简化，在热力学上提出了理想气体的概念。

所谓理想气体，是人们经过长期观察自然界的气体以后，所提出的一种假想气体，它的分子是弹性的、不占体积的质点，分子相互之间没有作用力。

实际气体的压力越低，比容越大，越接近理想气体。工程上常用的气体（如空气、燃气、烟气、氧气、氮气等）在压力不是很高、温度不是很低的条件下（由于它们的液化温度很低，离液态很远），都可以看成理想气体。空气中和烟气中含有的水蒸气分子，因其含量少，比容大，也可以当作理想气体看待。

锅炉产生的水蒸气，以及制冷剂（如氨、氟利昂等）蒸汽、石油气等，由于它们距离液态不远，不能忽略蒸汽分子本身所占有的体积和分子间相互作用力，因而不能当成理想气体，否则在工程计算中会产生很大的误差。

理想气体的提出，无论是对工程实践或是对理论研究都具有重要的意义。以后章节中所提到的“气体”，如不特别说明，都指的是理想气体。

二、理想气体状态方程式

在物理学中已经知道，理想气体的 $p v$ 乘积与绝对温度 T 的比值为—常数，即：

$$\frac{p v}{T} = R \quad \text{或} \quad p v = R T \quad (1-14)$$

式中 p ——气体的绝对压力， N/m^2 或 Pa ；

v ——气体的比容， m^3/kg ；

T ——气体的绝对温度， K ；

R ——气体常数， $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

上式即为理想气体的状态方程式。它表明了理想气体在任一平衡状态时 p 、 v 、 T 之

间的函数关系。应用上式时应注意各物理量的度量单位。

式 (1-14) 是针对 1kg 气体, 若气体为 $m\text{kg}$, 则:

$$pV = mRT \quad (1-15)$$

式中 V —— $m\text{kg}$ 气体所占有的容积, m^3 。

几种常见气体的气体常数, 见表 1-2。

表 1-2 常见气体的气体常数

物质名称	化学式	分子量	R [J/(kg·K)]
氢	H_2	2.016	4124.0
氦	He	4.003	2077.0
甲烷	CH_4	16.043	518.3
氨	NH_3	17.031	488.2
水蒸气	H_2O	18.015	461.5
氮	N_2	28.013	296.8
一氧化碳	CO	28.011	296.8
二氧化碳	CO_2	44.010	188.9
氧	O_2	32.0	259.8
空气		28.97	287.0

如果用 μ 代表气体的分子量, 其单位为 kg/kmol , 将式 (1-14) 两边各乘以 μ 则得:

$$p(\mu v) = (\mu R) T$$

式中 μv 为气体的千摩尔容积。并以 V_m 表示, 则上式可写成:

$$pV_m = \mu RT \quad (1-16)$$

根据阿伏加德罗定律知: 在同温同压下, 1mol 的任何气体都具有相同的容积。且由实验测得, 在标准状态下 1kmol 任何气体的容积都是 22.4m^3 。

现将标准状态下的压力、温度及千摩尔容积代入式 (1-16) 可得:

$$\begin{aligned} \mu R &= \frac{p_0 \cdot \mu v_0}{T_0} \\ &= \frac{101325 \times 22.4}{273} \\ &= 8314\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (1-17)$$

由此得出结论, 对于各种气体, μR 值都等于 $8314\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。它与气体的性质 and 状态无关。故称 μR 为通用气体常数, 并以 R_m 表示。

由式 (1-17) 可得: