

高等学校教学用书

热工基础及其应用

冶金工业出版社

高等学校教学用书
热工基础及其应用
昆明工学院 何德广 主编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 12 3/4 插页 1 字数 297千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷

印数 00,001~5,000册

统一书号: 15062·4122 定价 1.40元

前 言

本书是根据冶金部教材会议制订的矿山机械专业《热工基础及其应用》教学大纲编写的。

本书内容包括工程热力学、传热学、内燃机和压气机四部分。为了加强理论基础，本书着重叙述了工程热力学、传热学和内燃机、压气机的有关理论，并对内燃机和压气机的结构和使用也作了详细的介绍。本书除可作矿山机械专业《热工基础及其应用》课程教材外，亦可作其它专业有关课程的教材，并可供有关工程技术人员参考。书中有*号部分可根据需要由教师安排讲授。

本书由昆明工学院何德广、倪铸鼎、梁灵芝，东北工学院陈信基，中南矿冶学院谢邦新、林树鸾编写，由何德广担任主编。

本书在1979年和1982年曾两次召开审稿会。到会同志提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。

由于水平有限，书中不当之处，请批评指正。

· 编者

1983年2月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 工程热力学基础

概述	3
第一章 理想气体的性质	3
第一节 理想气体状态方程式	3
第二节 理想气体的比热	7
第三节 理想混合气体	10
第二章 热力学第一定律及理想气体状态变化过程	12
第一节 热力学第一定律	13
第二节 可逆过程和不可逆过程	15
第三节 理想气体的状态变化过程	17
第四节 气体的流动	25
第三章 热力学第二定律和热力循环	33
第一节 热力循环	33
第二节 卡诺循环及其热效率	35
* 第三节 隔绝体系的熵增原理	39
第四节 热力学第二定律	40
第四章 水蒸气和湿空气	41
第一节 定压下水蒸气的发生过程	41
第二节 水蒸气状态参数的确定	43
第三节 水蒸气的基本过程分析	44
第四节 湿空气	46

第二篇 传热学基础

概述	50
第五章 导热	50
第一节 导热的基本定律	50
第二节 平壁和圆筒壁的稳态导热	52
第六章 对流换热	56
第一节 影响对流换热的因素	56
第二节 相似理论及其在对流换热中的应用	58
第三节 流体受迫流动换热	60
第四节 流体自然对流换热	64
* 第七章 辐射换热	65
第一节 热辐射的一般概念	65
第二节 热辐射的基本定律	66
* 第三节 辐射换热计算	67

第八章 传热和换热器	69
第一节 稳定传热	69
第二节 换热器	72
* 第三节 热管概念	74

第三篇 内 燃 机

概述	76
第九章 内燃机的工作过程	77
第一节 内燃机的工作原理	77
第二节 内燃机的理论循环	81
第三节 内燃机的实际循环	84
第十章 内燃机的构造	91
第一节 内燃机的机体组	93
第二节 内燃机的曲柄连杆机构	96
第三节 内燃机的配气机构	100
第四节 内燃机的供给系统	103
* 第五节 汽油机的点火系统	112
第六节 内燃机的调速器	114
第七节 内燃机的润滑系统	116
第八节 内燃机的冷却系统	120
第九节 内燃机的起动系统	123
第十一章 内燃机的功率、效率和特性	127
第一节 内燃机的指示功率和指示效率	127
第二节 内燃机的有效功率和有效效率	129
第三节 内燃机的摩擦损失	130
第四节 内燃机的特性	132
第十二章 柴油机废气净化与增压	136
第一节 柴油机废气净化	136
* 第二节 柴油机的增压	138
第十三章 内燃机的使用	140
第一节 内燃机的功率标定和型号	140
第二节 内燃机的燃料与润滑油	141
第三节 内燃机的起动、运行与停机	143

第四篇 压气机设备

概述	145
第十四章 往复式空气压缩机的基本理论	147
第一节 单级往复式压气机的理论工作循环	147
第二节 单级往复式压气机的实际工作循环	151
第三节 多级压缩	153
第四节 压气机的功率、效率	156
* 第五节 海拔高度对压气机的影响	158

* 第六节 螺杆式压气机	161
第十五章 压气机的结构与选择	162
第一节 往复式压气机的主要零部件	162
第二节 往复式压气机的气阀	165
第三节 往复式压气机的调节	166
第四节 往复式压气机的润滑	168
第五节 往复式压气机的冷却	169
* 第六节 压缩空气设备的选择	170
自习思考题和计算题	172
附录	179
附表 1-1 热力学常用国际制单位	179
附表 1-2 力的国际制单位与米制单位的换算	179
附表 1-3 压力的国际制单位与米制单位的换算	179
附表 1-4 功、能、热的国际制单位与米制单位的换算	180
附表 1-5 功率的国际制单位与米制单位的换算	180
附表 2 气体常用物理常数	180
附表 3 气体平均定压摩尔比热	181
附表 4 饱和蒸汽表 (以压力为独立变数)	182
附表 5 饱和蒸汽表 (以温度为独立变数)	184
附表 6 过热蒸汽表	185
附表 7 保温、建筑材料的密度和导热系数	187
附表 8 几种金属的热性质	188
附表 9 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	188
附表10 空气的热性质	189
附表11 润滑油的热性质	189
附表12 饱和水的热性质	190
附表13 常用材料的表面黑度	191
附表14 国产中、小功率内燃机的主要参数和指标	191
附表15 国产往复式空气压缩机部分产品参数表	192
附图 1 湿空气的 H - d 图	193
附图 2 换热器的温差校正系数	194
附图 3 水蒸气的 h - s 图	书末

绪 论

“热工基础及其应用”这门课程实际就是一般说的“热工学”。热工学主要是研究工程技术上各种热力设备及其基础理论的综合性技术科学。

热力设备包括各种热机（热力发动机的简称）、制冷机、压气机、风动机械等。

热机是将热能转换为机械能的设备，是一种动力机械。动力是国民经济的一个重要组成部分。由于生产发展的需要，有了动力机械的发明和发展，而动力机械的发明和发展又成为生产发展的重要推动力。众所周知，由于生产发展的需要，瓦特发明了蒸汽机，而蒸汽机的出现又促进了产业革命，成为资本主义大生产的物质基础。以后，由于生产进一步发展的需要，又出现了汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气式航空发动机、火箭以及原子能电站等。现在，无论工业、农业、国防或科学技术无不以动力为先行，没有现代的动力机械的大量生产和各种动力机械的广泛应用，就谈不上现代工业、现代农业、现代国防和现代科学技术。因此，工程技术人员不论从事何种专业，均可能遇到动力机械的选择、使用和管理问题，都有必要掌握热机知识。

热机分为两大类，一类是蒸汽动力设备，以水蒸气作为工质。它又有蒸汽机和汽轮机两种。蒸汽机是往复式热机，一般用作蒸汽机车和一些船舶及小型热力发电站的动力。汽轮机是旋转式热机，一般用作大型热电站的动力。热机的另一类是内燃机，以空气及燃气作为工质，是目前普遍而大量应用的热机。汽车、拖拉机、飞机、内燃机车、船舶、军舰和坦克等均以它作为动力。一般说的内燃机是指往复式的。近年来发展的旋转活塞式内燃机尚未得到广泛应用。另有一种属于内燃机范畴的热机是燃气轮机，它是一种旋转式热机，但应用也不普遍，仅在喷气式航空发动机上应用较多。

就矿山的情况而言，矿山用的热机以内燃机特别是内燃机中的柴油机为最多。在矿山无轨运输得到大力发展的今天，不仅很多铲运机、挖掘机是以柴油机作为动力，各种装卸机械、运输机械也往往以柴油机作为动力。由于柴油机在矿山上广泛应用，而且有愈来愈多的趋势，故本书对其它热机不作介绍，只介绍内燃机，尤其着重介绍内燃机中的柴油机。

制冷机是消耗机械功使热能从低温转移到高温的设备。它是冷藏工业、生产过程和劳动保护等不可缺少的设备。但在矿山却应用很少，因而本书也不作介绍，仅在最基本理论上简略讲述。

压气机是消耗机械功以产生高压气体的设备。它是化学工业、生产工艺和矿山广泛应用的设备。尤其在矿山，很多采掘机械如风镐、风钻以及其他风动机械都是用压缩空气来推动的，而压缩空气则是由空气压缩机产生，所以几乎所有的矿山都设有空气压缩机站，空气压缩机是矿山极其重要的设备，本书也把它作为重要内容。

热力设备的理论基础为工程热力学及传热学。工程热力学是研究热能和机械能相互转换的科学，传热学是研究热能传递规律的科学。在热力设备中，一方面存在热能和机械能的相互转换过程，同时又存在热能的传播过程，所以，不掌握工程热力学和传热学就不可

能掌握热力设备，因此，本书在介绍内燃机和压气机之前，首先介绍工程热力学和传热学的基础知识。

本书介绍工程热力学及传热学的目的，还在于扩大知识面，为矿机专业人员从事科研工作提供理论基础。因此，本书对工程热力学和传热学有所侧重。本课程之所以不称为热工学而称为热工理论基础及其应用，其原因就在于此。

第一篇 工程热力学基础

概 述

工程热力学是研究工程技术上有关热能和机械能相互转换，特别是热能转换为机械能的规律的一门科学。它是热机、制冷机、压气机等“热力设备”的理论基础。

从本质上讲，使热能和机械能相互转换的不是热力设备本身，而是在热力设备中流动着的物质。例如：内燃机工作时，其中必须有烟气流动；蒸汽动力装置工作时，其中必须有水蒸气流动；制冷机工作时，其中必须有氨或其它蒸汽流动。否则这些热力设备就不可能实现热能和机械能的相互转换。这种在热力设备中使热能和机械能相互转换的物质称为“工质”。工质将热能转换为机械能是利用工质受热而膨胀的特性，所以工质必须有良好的膨胀性。工质必须在热力设备中流动，所以工质又必须有良好的流动性。由于气体和蒸汽具有良好的上述特性，因此在热力设备中用作工质的都是气体或蒸汽。研究气体和蒸汽的热力性质、功和热的转换规律及其计算方法，以及如何使这种转换更加有效，以提高热力设备的效率等就是工程热力学的内容。

工程热力学的研究是宏观的，即根据工质的温度、压力、比容等宏观现象的变化以分析和计算工质与其外界的功和热的交换，而不深究工质分子运动的微观行为；工程热力学还普遍采用抽象、概括的方法。这种方法可揭示复杂客观事物的本质，从而把感性认识提高到理性认识。

研究工程热力学的目的在于使学者掌握热力设备的基本理论和必要的计算知识，为学习热力设备打下理论基础。同时，由于工程热力学的知识不仅用于热力设备，而且还广泛用于其它科技领域，故研究工程热力学的目的还在于扩大知识面，为其它科技工作提供必要的理论基础。

第一章 理想气体的性质

第一节 理想气体状态方程式

一、工质的热力状态及其基本参数

1. 热力状态和状态参数 工质的状态就是工质存在的状况，它是通过工质的一些物理量如温度、压力、比容等来认识或描述的。确定了这些物理量，工质的状态也就确定了。这些物理量的一部分或全部发生了变化，就意味着工质的状态发生了变化。因此，我们称这些物理量为工质的“状态参数”。它仅与工质的状态有关而不计工质质量的多少。

工质的状态是指工质的“热力状态”，它不同于工质的位置、声、光等所反映的状态，它的变化与热能和机械能的相互转换有紧密的联系；同时，工质的状态一般是指工质的“平衡状态”，它是工质内部各部分的状态参数如温度、压力等均匀一致的状态。在平

衡状态下, 如无外界的影响, 工质的状态不会自动发生变化。显然, 我们只能说明和分析工质的平衡状态, 对于不平衡状态不能说明, 因而也不便进行分析。

2. 工质的基本状态参数 工质的状态参数, 除已经提到的温度、压力和比容外, 还有后面将提到的比内能、比焓、比熵等。但后三者以及其它的状态参数均可用前三者来表示, 而且前三者是最易测量和最常用的, 故前三者称为基本状态参数。下面首先介绍这三个基本状态参数。

(1) 压力 工质对容器壁单位面积所作用的垂直力称为压力, 以 p 表示。根据分子运动论, 气体的压力就是进行热运动的气体分子对容器壁单位面积进行碰撞的总效果。

气体对容器壁作用的真实压力称为绝对压力 p_{abs} ; 当绝对压力高于当地大气压力 p_{atm} 时, 高出 p_{atm} 的部分称为表压力 p_{gage} ; 当绝对压力低于当地大气压力 p_{atm} 时, 低于 p_{atm} 的部分称为真空度 p_{vac} (图1-1)。按此定义得:

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{gage}; \quad p_{abs} = p_{atm} - p_{vac} \quad (1-1)$$

工程技术上用一般压力计测出的压力都是 p_{gage} 或 p_{vac} 。由于只有绝对压力才是气体的真实压力, 故只有绝对压力才是气体的状态参数。下面提到的压力, 如不特别指明, 均指绝对压力。

压力的单位为 [Pa] (帕斯卡)。1 [Pa] 的压力等于每 [m²] (平方米) 的面积上作用1 [N] (牛顿) 的力, 即: 1 [Pa] = 1 [N/m²]。除 [Pa] 外, 还常以 [bar] (巴)

和 [atm] (标准物理大气压) 作为压力单位。

1 [bar] = 10⁵ [Pa], 1 [atm] = 101325 [Pa]。

[N]、[Pa]、[bar] 和 [atm] 都是国际单位 (SI) 或与国际单位并用的单位 (1 [N] = 1/9.80665 [kgf])。[kgf] 是以公斤计的力的单位, 这是米制单位中力的单位。本书所用的单位如不加说明, 一律为国际单位或与国际单位并用的单位。但为了方便, 本书的附表 1 不仅列出了本书常用的国际单位, 而且还列出了国际单位与米制单位的换算关系, 以供参考。

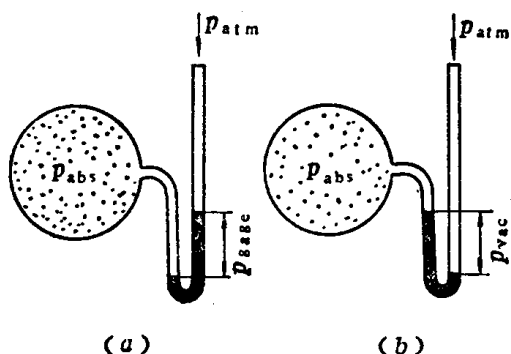


图 1-1 压力的测量
a— $p_{abs} > p_{atm}$; b— $p_{abs} < p_{atm}$

当压力较小时, 常以垂直的液柱 (水柱或汞柱) 来测定并表示气体的压力 (图1-1), 此时

$$p = h\rho g \text{ [Pa]} \quad (1-2)$$

式中, h 为液柱的垂直高度 [m] (米)。 $g = 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$ (米/秒²), 为标准重力加速度。 ρ 为液体的密度 [kg/m³] (公斤/米³), 在“标准状态” (温度为 0°C, 压力为 1 [atm] 的状态) 下的水和汞的密度分别为 999.972 [kg/m³] 和 13595.1 [kg/m³]。严格说来, 水和汞的密度是随温度和压力的不同而稍有变化的, 但一般都忽略不计。

例 1-1 用压力计测得压气机贮气罐内的压力为 8 (bar), 当地大气压力为 730 (mmHg) (毫米汞柱)。试求以 [Pa] 表示的贮气罐内的绝对压力。

解: 根据式 (1-1) 和式 (1-2) 得

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{gage} = 0.73 \times 13595.1 \times 9.80665 + 8 \times 10^5 = 897325 \text{ [Pa]}$$

(2) 温度 温度是物体的冷热程度。根据分子运动论, 气体温度是气体分子平均直

线运动动能的量度。温度可表示为开尔文温度 T [K] 或摄氏温度 t [°C]。 T 和 t 的刻度相等而零点不同, t 是以标准大气压力下纯水的冰点作为零度, T 是以 t 的零下 273.15 度作为零度, 故对同一温度

$$t = T - 273.15 \text{ [°C]} \quad (1-3)$$

开尔文温度又称绝对温度。

(3) 比容 单位质量的工质所占有的容积 v 称为比容, 气体的比容是单位质量气体分子运动所及的空间。以 m [kg] (公斤) 表示气体的质量, V [m³] (米³) 表示气体的容积。则

$$v = \frac{V}{m} \text{ [m}^3/\text{kg]} \text{ (米}^3/\text{公斤)} \quad (1-4a)$$

比容的倒数 ρ 称为密度, 它是单位容积内气体的质量, 即

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ (公斤/米}^3\text{)} \quad (1-4b)$$

v 和 ρ 都是状态参数, 但不是相互独立的。另外, V 可在 v 不变的条件下因 m 的改变而改变, 故 V 的变化不一定表明气体的状态发生了变化, 因此 V 不是状态参数^①。

二、理想气体状态方程式

1. 状态方程式的一般形式 工质同一状态的状态参数之间存在着一定的关系, 就工质的三个基本状态参数而言, 此关系为

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-5)$$

称为工质的“状态方程式”。实际气体的状态方程式是十分复杂的, 因而实用上往往以图表代替。但“理想气体”的状态方程式却较简单。

2. 理想气体和理想气体状态方程式 分子本身不占容积, 分子之间无作用力的气体称为理想气体。理想气体在客观上是不存在的, 但常见的气体如氧、氢、氮、二氧化碳、空气、烟气等在常温常压下距液态很远的气体, 在压力不太高, 温度不太低的条件下都可视为理想气体, 原因是在此条件下, 这些气体分子之间的距离很大, 因而分子本身占有的容积和分子之间的作用力都相对很小, 可忽略不计。通常将这些气体看作理想气体。

对于理想气体, 其状态方程式为

$$pv = RT \quad (1-6a)$$

或作

$$pV = mRT \quad (1-6b)$$

式中, p 为绝对压力 [N/m²] (或 Pa); v 为比容 [m³/kg]; T 为开尔文温度 [K]; m 为质量 [kg]; $V = mv$ 为容积 [m³]; R 称为气体常数 [N·m/(kg·K)], 其值仅取决于理想气体的分子量 M 而与理想气体的状态无关。[N·m] (牛顿米) 为功的单位, 而 1 [N·m] 的功称为 1 [J] (焦耳)、即: 1 [N·m] = 1 [J], 故 R 的单位可写作 [J/(kg·K)]。

当理想气体的量为 1 公斤或 m 公斤时, 用式 (1-6a, b) 是方便的。但有时气体的量

^① 有的书上把状态参数分为强度量和广度量两种, 前者与工质质量无关, 即本书所指的状态参数。后者与工质的质量有关, 例如 V 。广度量被工质的质量 m 除得的商就是强度量, 如 $V/m = v$ 。强度量是不能相加的, 广度量是可以相加的。

是以[kmol]① (千摩尔)表示,此时将理想气体状态方程式写作以下形式较为方便:当以 M 表示气体的分子量时,则1[kmol]气体的质量为 M 公斤。故若理想气体的量为1[kmol],则在式(1-6b)中, $V = Mv$, $m = M$, 得理想气体的 p 、 T 、 Mv 的关系为

$$pMv = MRT \quad (1-6c)$$

根据亚佛加德罗定律,当 p 、 T 一定时,不同理想气体的 Mv 是相等的,故由上式可知,当 p 、 T 一定时,不同理想气体的 MR 必然相等。而且,由于 M 和 R 都是不随气体温度和压力而变的常数,因而 M 和 R 的乘积也就必然不随温度和压力而变化。换言之, MR 是与理想气体性质和状态无关的常数,称为“通用气体常数”。 MR 的值可任选一理想气体在任一状态下,根据其 p 、 T 、 Mv 而由式(1-6c)求得。已知在标准状态下,任一理想气体的 Mv 为 $22.4145 \text{ [m}^3/\text{kmol}]$ 故

$$MR = \frac{pMv}{T} = \frac{101325 \times 22.4145}{273.15} = 8314.66 \text{ [J/(kmol} \cdot \text{K)]} \quad (1-7)$$

由此,任何理想气体的气体常数可用下式求得:

$$R = \frac{MR}{M} = \frac{8314.66}{M} \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \quad (1-8)$$

常见气体的分子量 M 可查附表 2。应注意,分子量本来是无单位的,但以上各式中的 M 为以公斤计的 1[kmol]的气体的质量,单位为 $[\text{kg/kmol}]$ 。

根据以上理想气体状态方程式可知:当理想气体温度不变时,其比容与绝对压力成反比,这就是波义耳定律;当理想气体的比容不变时,其绝对温度与绝对压力成正比,这就是查理定律;当理想气体的绝对压力不变时,其比容与绝对温度成正比,这是盖·吕萨克定律。

例 1-2 被长久放置在室内的氧气瓶,其容积为 $0.025 \text{ (m}^3\text{)}$,压力表读数为 5 (at) (at 为工程大气压,这是公制的压力单位,它相当于每平方厘米 1 公斤的压力)。若室温为 20°C ,当地大气压为 1 (bar) ,求: 1) 氧气的比容; 2) 氧气的质量和摩尔数。

解 1. 根据附表 1-3 和式 (1-1), 得瓶中氧气的压力为

$$p = (0.980665 \times 5 + 1) \times 10^5 = 5.903325 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

根据式 (1-3) 得

$$T = 273.15 + 20 = 293.15 \text{ (K)}$$

根据附表 2 查得氧的分子量为 32, 代入式 (1-8) 得

$$R = \frac{8314.66}{32} = 259.83 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$$

将以上各值代入式 (1-6a) 得

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{259.83 \times 293.15}{5.903325 \times 10^5} = 0.12903 \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

2. 根据式 (1-6c) 得

① 摩尔和公斤一样是物质质量的单位,但公斤是物质质量的量度单位,而摩尔则是物质结构基本单元数的量度单位。按国际单位制的有关规定,当物质结构的基本单元为分子时,则以克计的物质质量等于其分子量 M 的物质称为 1 [mol]。本书以摩尔的一千倍即 [kmol] 作为物质基本单元数的量度单位,故 1 [kmol] 的物质的质量为 M 公斤。

$$Mv = \frac{MRT}{p} = \frac{8314.66 \times 293.15}{5.903325 \times 10^5} = 4.129 \text{ (m}^3/\text{kmol)}$$

故摩尔数为

$$n = \frac{V}{Mv} = \frac{0.025}{4.129} = 6.055 \times 10^{-3} \text{ (kmol)}$$

第二节 理想气体的比热

一、比热的定义

热量是在加热过程中加热物质传给被加热物质的能量。在国际单位中，热量以及其它能量都和功一样以[J]作单位（在公制单位中，热量的单位为[kcal]即千卡。1[kcal]=4.1868[kJ]，[kJ]为[J]的一千倍，称为千焦耳）。

当工质被加热或使之放热时，若以 T_1 、 T_2 或 t_1 、 t_2 分别表示加热或放热前和加热或放热后工质的温度，则单位量工质所吸收或放出的热量为

$$dq = cdT = cdt \quad (1-9a)$$

$$\text{当 } c \text{ 为定值时,} \quad q = c(T_2 - T_1) = c(t_2 - t_1) \quad (1-9b)$$

c 为单位量工质温度变化 1°C 时所需要吸收或放出的热量，称为工质的比热。

二、比热的分类

1. 质量比热、容积比热和摩尔比热 单位量的工质当其温度变化 1°C 时所需吸收或放出的热量随所用工质量的单位的不同而不同，故工质的比热分为质量比热 c [J/(kg·K)]，容积比热 c' [J/(Nm³·K)] 和摩尔比热 Mc [J/(kmol·K)] 三种，分别用于工质量的单位为 [kg]、[Nm³] 和 [kmol] 三种情况下的热量计算。[Nm³] 代表标准立方米，它是标准容积的单位。所谓标准容积就是气体在标准状态下的容积。三种比热显然存在以下关系：

$$c = \frac{Mc}{M} \text{ [J/(kg·K)]}; \quad c' = \frac{Mc}{22.4145} \text{ [J/(Nm}^3\text{·K)]} \quad (1-10)$$

式中，22.4145 为 1 [kmol] 工质的标准容积，单位为 [Nm³/kmol]； M 为 1 [kmol] 工质的质量 [kg/kmol]，数值上等于工质的分子量。

2. 定容比热和定压比热 当工质被加热或放热时，保持容积不变和保持压力不变所需吸收或放出的热量是不相等的。因此，上述三种比热又各分为定容比热和定压比热，分别用于工质保持容积不变和压力不变两种加热条件下的热量计算，并分别以下角标“ v ”和“ p ”表示。于是比热就有六种，即： c_v 、 c_p 、 c'_v 、 c'_p 、 Mc_v 、 Mc_p 。当然，定容比热和定压比热的单位是相同的。

理想气体的定容比热和定压比热有以下的重要关系：

$$\begin{aligned} c_p - c_v &= R \text{ [J/(kg·K)]}; \\ Mc_p - Mc_v &= MR = 8314.66 \text{ [J/(kmol·K)]} \end{aligned} \quad (1-11)$$

上式称为“迈耶公式”，将在后面证明。

三、理想气体的比热值和热量计算

计算热量时，除应根据工质量的单位和加热条件选取相应的比热外，还要确定所选比热的具体数值。

根据式 (1-9)，工质的比热为

$$c = \frac{dq}{dt}$$

它是当工质温度为 t 时的工质的比热，称为工质的真实比热。工质的真实比热随工质的状态而变化，即

$$c = f(p, t)$$

但理想气体的真实比热则仅与温度有关而为温度的单值函数，即

$$c = f(t) \quad (1-12)$$

上式实际是很复杂的，通常近似地以一曲线表示（图1-2）。当已知式（1-12）的具体函数关系时，单位量理想气体的热量就可按下式计算：

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (1-13)$$

但利用上式求 q 时需积分，计算复杂，为此，可将上式写成：

$$q = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \int_0^{t_2} f(t) dt - \int_0^{t_1} f(t) dt = c_{m|0}^{t_2} t_2 - c_{m|0}^{t_1} t_1 \quad (1-14)$$

式中

$$c_{m|0}^{t_2} = \frac{\int_0^{t_2} f(t) dt}{t_2}; \quad c_{m|0}^{t_1} = \frac{\int_0^{t_1} f(t) dt}{t_1}$$

称为平均比热。它是当理想气体温度由 0°C 上升至 t_2 或 t_1 时，温度平均上升 1°C 所需吸收的热量。工程技术上常将各种理想气体从 0°C 到各种温度的平均比热制成表，求 q 时，只需从表中查得相应的平均比热代入式（1-14）即可。本书附表 3 为常见理想气体从 0°C 到 t 的平均定压摩尔比热 $Mc_{pm|0}$ ，若需其它比热可根据迈耶公式换算。迈耶公式对真实比热，平均比热和即将提到的定值比热都是正确的。

以上是将理想气体的真实比热看成与气体温度成曲线关系的，所得结果较为准确。如果要求的准确性不太高，可将理想气体的真实比热进一步近似地看作与气体温度成直线关系（图1-3），即

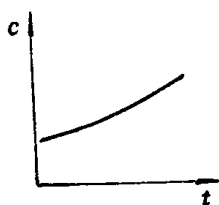


图 1-2 理想气体的真实比热（曲线关系）

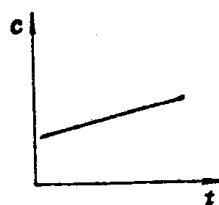


图 1-3 理想气体的真实比热（直线关系）

表 1-1 理想气体平均质量比热 $c_m \Big|_0^t \times \frac{1}{4186.8} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$, 0°C 到 1500°C

O_2	$c_{pm} = 0.2198 + 0.00002544t$ $c_{vm} = 0.1577 + 0.00002544t$	空气	$c_{pm} = 0.2378 + 0.00002221t$ $c_{vm} = 0.1693 + 0.00002221t$
N_2	$c_{pm} = 0.2446 + 0.00002115t$ $c_{vm} = 0.1737 + 0.00002115t$	H_2O	$c_{pm} = 0.4379 + 0.0000743t$ $c_{vm} = 0.3276 + 0.0000743t$
CO	$c_{pm} = 0.2461 + 0.00002315t$ $c_{vm} = 0.1751 + 0.00002315t$	CO_2	$c_{pm} = 0.2084 + 0.00005747t$ $c_{vm} = 0.1633 + 0.00005747t$

表 1-2 理想气体的定值摩尔比热

比 热	单 原 子	双 原 子	多 原 子
$Mc_p \times \frac{1}{4186.8} [\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$	5	7	9
$Mc_v \times \frac{1}{4186.8} [\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$	3	5	7
$k = Mc_v / Mc_p$	1.666	1.4	1.2857

$$c = a + bt \quad (1-15)$$

式中, a 、 b 是随理想气体和比热之不同而不同的常数。当真实比热与温度成直线关系时, 根据式 (1-13) 很易证明理想气体温度由 t_1 上升至 t_2 时的平均比热为

$$c_m|_{t_1}^{t_2} = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2) \quad (1-16)$$

$$\text{从而} \quad q = c_m|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) \quad (1-17)$$

应当指出, 要列出理想气体不同的 t_1 、 t_2 的平均比热是困难的。但理想气体从 0°C 至 t 的平均比热可以 $t_1 = 0^\circ\text{C}$, $t_2 = t$ 代入式 (1-16) 而求得为

$$c_m|_0^t = a + \frac{b}{2}t \quad (1-18)$$

将式 (1-16) 和式 (1-18) 比较可知, t_1 到 t_2 的平均比热和 0°C 到 t 的平均比热的计算式的不同之处, 仅是前者的温度为 $(t_1 + t_2)$, 后者为 t 。因此一般的书籍或手册上都是列出 0°C 到 t 的平均比热, 即列出式 (1-18), 如需 t_1 到 t_2 的平均比热, 只需将 t 代以 $(t_1 + t_2)$ 即可。表1-1列出了几种常见理想气体的 0°C 到 t 的平均质量比热^①。

在实际应用上, 当进行估算或温度较低而又不要准确时, 可根据分子运动论中关于比热的理论, 将理想气体的摩尔比热看成只与构成气体分子的原子数有关, 而与气体温度和气体种类无关的定值。这一定值称为定值比热。理想气体的定值摩尔比热 Mc 见表1-2。知道了定值比热就可利用式 (1-9b) 求 q 。

例 1-3 当空气在管道中流动时, 温度由 100°C 降低到 50°C , 略去管道的阻力不计, 试求每公斤空气从管壁传走的热量。假定: 1) 空气的真实比热与温度成曲线关系; 2) 空气的真实比热与温度成直线关系; 3) 空气的比热为定值。已知空气为双原子气体, 分子量为 28.96。

解 按题意, 空气的压力保持不变, 故应采用定压质量比热。

1. 当空气的真实比热与温度成曲线关系时, 根据式 (1-10) 和附表 3 查得的数据得空气的平均定压质量比热为

$$c_{pm}|_0^{50} = \frac{Mc_{pm}|_0^{50}}{M} = \frac{6.9475 \times 4186.8}{28.96} = 1004.4 [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

$$c_{pm}|_0^{100} = \frac{Mc_{pm}|_0^{100}}{M} = \frac{6.962 \times 4186.8}{28.96} = 1006.5 [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

代入式 (1-14) 得

^① 本书所选用的图表原为公制单位, 为了使之能用于国际制单位, 一般是在表头上乘以一单位换算系数。以表1-1为例, 换算系数 $1/4186.8$ 是这样使用的: 当单位为国际制单位时, c_m 的值在乘以 $1/4186.8$ 以后才得到表中列出的值, 因此, 应用时, 必须反过来将表中列出的值除以 $1/4186.8$ 后才能得到单位为国际制单位时的 c_m 值。其它的图表类似。

$$q = c_{pm}|_{t_0}^{t_2} t_2 - c_{pm}|_{t_0}^{t_1} t_1 = 1004.4 \times 50 - 1006.5 \times 100 = -50430 \text{ (J/kg)}$$

2. 当空气的真实比热与温度成直线关系时, 根据表1-1得

$$c_{pm}|_{100}^{50} = 4186.8(0.2378 + 0.00002221(50 + 100)) = 1009.6 \text{ (J/(kg·K))}$$

代入式(1-17)得

$$q = c_{pm}|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 1009.6(50 - 100) = -50480 \text{ (J/kg)}$$

3. 当将空气的比热看作定值时, 根据表1-2及式(1-10)得

$$c_p = \frac{Mc_p}{M} = \frac{7 \times 4186.8}{28.96} = 1012 \text{ (J/(kg·K))}$$

代入式(1-9b)得

$$q = c_p(t_2 - t_1) = 1012(50 - 100) = -50600 \text{ (J/kg)}$$

第三节 理想混合气体

两种以上气体的混合物称为混合气体。由理想气体混合而成的混合气体也满足理想气体的条件, 仍为理想气体, 称为理想混合气体。工程技术上常遇到的混合气体如空气、烟气等是 O_2 、 N_2 、 CO_2 、水蒸气等的不同组合, 而 O_2 、 N_2 、 CO_2 等在一般情况下都是理想气体, 水蒸气在此条件下, 由于分子间的距离很大, 亦可作为理想气体处理, 故空气、烟气等在一般情况下都是理想混合气体。

理想混合气体既然是理想气体, 它就必然服从理想气体状态方程式、理想气体各定律及其它有关理想气体的特性, 关于这些就不再重复。本节要解决的问题是组成混合气体的成分气体的状态参数(基本的)与混合气体的状态参数之间的关系, 如何表示和计算混合气体的成分, 以及如何确定混合气体的气体常数和比热等。

一、分压力和道尔顿定律、分容积和阿麦加特定律

很明显, 所有各成分气体的分子都充满着整个混合气体所占有的容积, 故所有各成分气体的实际容积都彼此相等并等于混合气体的容积; 所有各成分气体的温度彼此相等并等于混合气体的温度, 否则各成分气体之间就会发生能量交换, 使之最终相等。但各成分气体的压力和混合气体的压力之间的关系及未混合前的各成分气体容积和混合后气体的容积之间的关系又是什么呢? 以下回答这一问题:

1. 分压力和道尔顿定律 某成分气体在其温度等于混合气体温度(即自身温度)和容积等于混合气体容积(即自身容积)下单独存在时的压力称为该成分气体的分压力。

理想混合气体的各成分气体既为理想气体, 则各成分气体在混合气体中就各自运动, 互不干扰, 而与其单独存在时的运动情况一样。因此, 各成分气体在混合气体中各自对容器壁作用的压力就各等于其分压力。而混合气体的压力显然为所有各成分气体对容器壁作用压力的总和, 故理想混合气体的压力为所有各成分气体的分压之和。以“ i ”表示各成分气体的编号, “ m ”表示混合气体, 则

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i = p_m \quad (1-19)$$

此即道尔顿定律。由于实际混合气体的各成分气体在混合气体中有相互干扰, 故道尔顿定律仅适用于理想混合气体。

按分压力的定义, 理想混合气体的各成分气体应服从下式:

$$p_i V_m = m_i R_i T_m \quad (1-20)$$

2. 分容积和阿麦加特定律 前面提到的各成分气体的容积是指其真实容积。实际应用中, 各成分气体的容积往往以分容积表示。某成分气体的分容积就是该成分气体在混合气体的温度(即自身温度)和混合气体的压力下单独存在时的容积。按此定义得

$$p_m V_i = m_i R_i T_m \quad (1-21)$$

式中 V_i 为第 i 种成分气体的分容积。比较以上两式得

$$V_i = \frac{p_i V_m}{p_m} \text{ 或 } p_i = \frac{V_i p_m}{V_m} \quad (1-22)$$

从而得

$$\sum_{i=1}^n V_i = \frac{V_m}{p_m} \sum_{i=1}^n p_i = V_m \quad (1-23)$$

即所有各成分气体分容积之和等于混合气体容积, 此即阿麦加特定律。此定律亦仅适用于理想气体。显然, 若各成分气体在未混合前与混合后的混合气体处于同一温度和压力之下, 则成分气体未混合前的容积即分容积。而且, 由阿麦加特定律可知, 气体混合后的容积为未混合前所有各成分气体容积之和。

二、混合气体的成分

混合气体的成分常以相对成分表示, 即将某成分气体在混合气体中的含量表示为该成分气体的量与混合气体总量之比。由于气体量的单位不同, 各成分气体在混合气体中的含量分为相对质量成分 g_i 、相对容积成分 r_i 和相对摩尔成分 x_i 三种。按定义以 n 代表摩尔数得

$$g_i = \frac{m_i}{m_m}; \quad r_i = \frac{V_i}{V_m}; \quad x_i = \frac{n_i}{n_m} \quad (1-24)$$

因 V_i 、 V_m 都是在同一温度 T_m 和同一压力 p_m 下的容积, 故根据亚佛加德罗定律得 $V_i/n_i = V_m/n_m$, 从而得 $n_i/n_m = V_i/V_m$, 即

$$x_i = r_i \quad (1-25)$$

即各成分气体的相对容积成分和相对摩尔成分相等。

另外, 很明显, 混合气体中所有各成分气体的同一相对成分之和等于1。

相对容积成分或相对摩尔成分与相对质量成分的换算关系如下:

根据式(1-24)、(1-25), 并由 $m_i = M_i n_i$ 得

$$g_i = \frac{m_i}{m_m} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{M_i n_i}{\sum_{i=1}^n M_i n_i} = \frac{M_i r_i n_m}{\sum_{i=1}^n M_i r_i n_m} = \frac{M_i r_i}{\sum_{i=1}^n M_i r_i} \quad (1-26)$$

根据式(1-24)、(1-25), 并由 $n_i = m_i/M_i = m_m g_i/M_i$ 得

$$x_i = r_i = \frac{n_i}{n_m} = \frac{m_m g_i}{M_i} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{m_m g_i}{M_i} = \frac{g_i}{M_i} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{M_i} \quad (1-27)$$

三、理想混合气体的分压力、平均分子量、气体常数和比热的计算

1. 分压力计算 根据式(1-22)、(1-24)、(1-25)和(1-27)得

$$p_i = p_m \frac{V_i}{V_m} = p_m r_i = p_m x_i = p_m \frac{g_i}{M_i} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{M_i} \quad (1-28)$$

2. 理想混合气体的平均分子量和气体常数 分子量是与分子质量成比例的数值, 混