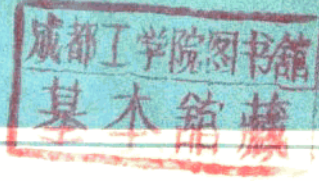


281732



中等专业学校试用教科书

发电厂动力设备

上册

西安电力学校热能教研组编



中国工业出版社

中等专业学校試用教科书



发电厂动力設備

上册

西安电力学校热能教研組編

中国工业出版社

987115

本书分上、下两册。上册讲述热力发电厂的动力设备，下册讲述水力发电厂的动力设备。

上册包括热工学理论基础、锅炉设备、汽轮机和凝汽设备及热力发电厂四篇，供“发电厂电网及其系统”和“电厂化学”两专业做为发电厂动力设备课的教材。

发电厂动力设备

上册

西安电力学校热能教研组编

*

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $13 \frac{5}{8}$ ·插页6·字数313,000

1961年7月北京第一版·1961年7月北京第一次印刷

印数0001—3,033·定价(9-4)1.55元

统一书号: 15165·165(水电-31)

目 录

第一篇 热工学理论基础

第一章 工质及其计算	5
1-1. 工质、理想气体和实际气体	5
1-2. 气体的基本状态参数	5
1-3. 理想气体的诸定律	7
1-4. 理想气体的状态方程式	8
1-5. 混合气体	9
1-6. 理想气体的比热	11
第二章 热力学第一定律及基本热力过程	16
2-1. 气体的内能与功	16
2-2. 热力学第一定律及其分析式	17
2-3. 热力过程的研究方法	18
2-4. 定容过程	18
2-5. 定压过程、气体的焓	19
2-6. 等温过程	21
2-7. 绝热过程	22
第三章 热力学第二定律	25
3-1. 循环(封闭过程)及其热效率	25
3-2. 加诺循环	26
3-3. 热力学第二定律	28
3-4. 熵	29
3-5. $T-S$ 图	32
3-6. 绝热系统的熵	33
第四章 水蒸汽	35
4-1. 在 $P-V$ 图上蒸汽发生的过程	35
4-2. 在 $T-S$ 图上蒸汽发生的过程	36
4-3. 蒸汽图表	39
4-4. 水蒸汽的热力过程	40
4-5. 气体与蒸汽的流动	41
4-6. 气体和蒸汽的节流	46
第五章 热交换理论的基础	47
5-1. 热交换的定义及其基本方式	47
5-2. 经过壁的热传导	48
5-3. 对流放热	49
5-4. 放热系数的求法	51
5-5. 热辐射	52
5-6. 经过壁的传热	55
5-7. 热交换器受热面的计算	57

第二篇 鍋 炉 設 备

第一章	鍋炉设备的一般概念	60
第二章	鍋炉的燃料和燃烧	62
2-1.	燃料的种类	62
2-2.	燃料的成分及其换算	62
2-3.	燃料的物理性能及分类	63
2-4.	我国的煤炭工业	64
2-5.	燃料的燃烧	65
第三章	鍋炉本体	67
3-1.	概述	67
3-2.	层燃炉(火床炉)	70
3-3.	室燃炉(煤粉炉)	73
3-4.	鍋筒(汽包)及其内件	79
第四章	鍋炉的輔助受热面	81
4-1.	过热器的作用	81
4-2.	过热器的类型和构造	81
4-3.	过热汽温的調节	83
4-4.	省煤器的功用	85
4-5.	省煤器的类型和构造	86
4-6.	省煤器的维护	87
4-7.	空气预热器的功用	88
4-8.	空气预热器的构造和分类	88
4-9.	空气预热器的维护	90
第五章	鍋炉的輔助设备	91
5-1.	煤粉制备系统	91
5-2.	煤粉制备系统的设备	92
5-3.	通风设备	95
5-4.	除尘设备	97
5-5.	除灰设备	100
第六章	鍋炉设备的热平衡	102
6-1.	概述	102
6-2.	鍋炉的主要损失	102
6-3.	鍋炉的效率和燃料消耗量	103
第七章	鍋炉的运行	104
7-1.	鍋炉升火前的准备工作	104
7-2.	升火	105
7-3.	并汽	105
7-4.	鍋炉正常运行中的监督和安全装置	106
7-5.	停炉	106
7-6.	鍋炉的事故与维修	106

第三篇 汽輪机和凝汽設備

第一章 汽輪机装置的一般概念	109
1-1. 汽輪机的优越性及其在现代工业中的地位.....	109
1-2. 汽輪机的发展簡史和現况.....	110
1-3. 汽輪机和汽輪机装置.....	111
1-4. 汽輪机的型式和分类.....	113
第二章 汽輪机工作的基本原理和热力过程	114
2-1. 冲动式汽輪机的工作原理及热力过程.....	115
2-2. 反动式汽輪机的工作原理及热力过程.....	118
2-3. 单級与多級汽輪机.....	120
第三章 汽輪机的损失和效率	122
3-1. 汽輪机的损失.....	122
3-2. 汽輪机的相对效率和绝对效率.....	127
3-3. 汽輪机的汽耗量和汽耗率.....	129
第四章 汽輪机的工况和調节	129
4-1. 汽輪机的工况概念.....	129
4-2. 汽輪机的蒸汽配給.....	130
4-3. 汽輪机的調速.....	131
4-4. 汽輪机的变速装置(同步器).....	136
4-5. 調速器的靜力性能曲线.....	137
4-6. 汽輪机的并列運轉.....	133
4-7. 汽輪机的油系統.....	139
4-8. 汽輪机的自动超速保險装置.....	140
第五章 汽輪机的构造	141
5-1. 汽輪机的主要組成部件.....	141
5-2. 汽輪机整体构造示例.....	148
第六章 凝汽装置	151
6-1. 凝汽装置的功用及其工作的一般情况.....	151
6-2. 凝汽器的构造.....	152
6-3. 凝汽器冷却水量的計算.....	154
6-4. 凝汽器的抽气设备.....	156
第七章 汽輪机的运行和维护	157
7-1. 汽輪机运行工作概述.....	157
7-2. 汽輪机的冷机启动.....	158
7-3. 汽輪机装置运行的观察与维护.....	161
7-4. 汽輪机的停車.....	163

第四篇 热 力 发 电 厂

第一章 热力发电厂的主要生产程序及其基本要求	165
1-1. 热力发电厂的分类.....	165
1-2. 热力发电厂的生产程序和組成.....	167

1-3. 对热力发电厂的基本要求	163
第二章 发电厂的基本热力循环及其热经济性的改进	169
2-1. 发电厂的基本热力循环——朗肯循环	169
2-2. 蒸汽参数对循环热效率的影响	171
2-3. 蒸汽的中间再过热	173
2-4. 给水的回热加热	174
2-5. 热化	176
第三章 发电厂的热系统及其设备元件	178
3-1. 回热加热系统	179
3-2. 对外供热系统	182
3-3. 工质的损失及其补充	184
3-4. 主管路系统	190
3-5. 发电厂热力系统举例	191
第四章 发电厂的供水和燃料管理	192
4-1. 发电厂的供水及其系统	192
4-2. 发电厂的燃料管理	195
第五章 发电厂的厂房和总平面布置	197
5-1. 发电厂的主厂房布置	197
5-2. 发电厂厂址的选择及其总平面布置	204
第六章 发电厂的主要经济指标	206
附录 1: 饱和蒸汽(变数为温度)表	209
附录 2: 水及过热蒸汽表	212
附录 3: 水蒸汽的 $i-s$ 图	214

第一篇 热工学理論基础

热工学理論基础包括工程热力学及傳热学两部分。

工程热力学是普通热力学的一部分。普通热力学研究能的各种形态相互間的轉換，工程热力学則仅研究热能和机械功之間的轉換。

由热能轉化为机械功，可在蒸汽发动机——蒸汽机及汽輪机中以及內燃机中进行；由机械功轉化为热能則可在制冷装置內进行。

为了找出热能轉化为机械功（此是热力发电厂电能生产过程的一部分）的最有利条件。工程热力学研究了說明轉化中数量关系及轉化所需条件的热力学第一定律及第二定律；轉化中所需的工作物质——气体的性质；实现轉化的措施——循环；以及和工作情况有关的流动等内容。

由于温度差引起的两个物体間或同一物体各部分之間热量的傳遞叫做热交换。傳热学的任务正是从研究热交换过程中找出加强或减弱热交换的理論依据。

第一章 工质及其計算

1-1 工质、理想气体和实际气体

在热机中，利用热能轉化为功，这热是由工作物质（简称工质）带入热机的。在各种物态中，气体状态受热时膨胀能力最大，故气体状态最适于做为工质。

在对气体作理論研究时，首先規定出一种简单形式的气体。所谓简单形式的气体，就是构成这种气体的各分子之間沒有內聚力而分子本身可視為沒有容积的质点。这种假想的气体叫做理想气体。在自然界中存在的每一种气体，都是由容积微小的分子組成的，而各分子之間都有內聚力作用着。虽然如此，研究上述简单形式的气体还是具有很大的实际意义的。因为我們常見状态下的实际气体，其分子間的內聚力与分子本身的容积都是很小的。因此我們就可以把理想气体这一概念加以推广：所谓理想气体也可以理解为在自然界中实际存在的每一种气体而其分子間的內聚力和分子本身的容积可以忽略不計。可知气体距液体状态愈远（也就是說气体变为液体愈难），这种气体愈接近于理想气体。热工計算中很多气体（如空气、燃气、烟气等）都可以近似的当做理想气体进行分析与計算。

当蒸汽作为蒸汽原动机的工质或热交换器的热介质时，其状态非常接近于液体状态（蒸汽很容易变为液体）。在这种情况下，分子間的內聚力与分子本身的容积已不能再忽略，应做为实际气体。

1-2 气体的基本状态参数

气体状态的参数，就是用以說明气体状态特征的数量。本节仅介紹三个基本参数：压力、温度及比容。

一、压力：气体的压力是构成气体的大量分子，在紊乱的运动中不断冲击容器壁的结果。用在单位面积上所受的力来表示。

假如把装有液体两头开口的弯管(U形管)连到有气体的容器上，则液体在管中的位置将如图1-1或图1-2所示。很显然的，在第一种情形下，容器中气体的压力比大气压力大 l ，液柱高；这压力叫表压力(有时叫作剩余压力或工作压力)，用 $P_{表}$ 来表示；在第二种情形下，容器中气体的压力比大气压力小 l ，液柱高，这个值叫做真空度，用 h 来表示。容器中气体的压力，称为绝对压力，用 $P_{绝对}$ 来表示。令 B 表示大气压力，则由图1-1所示的情形可得下列平衡方程式：

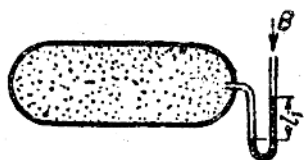


图 1-1

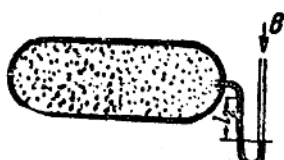


图 1-2

$$P_{绝对} = B + P_{表} \quad (1-1)$$

而由图1-2所示的情形，得：

$$P_{绝对} + h = B$$

或

$$P_{绝对} = B - h \quad (1-2)$$

由公式(1-1)与(1-2)可以知道，表压力(用压力表量得的)和真空度(用真空表量得的)是决定绝对压力的辅助数值。而只有绝对压力才是状态参数。

气体压力的大小可用单位面积上所受力的大小来表示，或用液柱的高度来表示。假如用 P 表示它单位面积上受力的大小、 H 表示液柱高、 γ 表示液体的比重，则可求出表示压力的各种数值之间的关系。

假如有一直立的液体柱，其底面积为 Ω ，这时很明显作用在这面积上的力等于液体的重量，即：

$$F = P\Omega = H\Omega\gamma$$

或得

$$P = H\gamma \quad (1-3)$$

在热力工程中，一个工程大气压(简称大气压)定为10,000公斤/米²。用工程气压来测量绝对压力时，我们用(绝对大气压)来表示，而压力表读出的压力叫表大气压。

由公式(1-3)可以得出1大气压等于735.6毫米水银柱高(当水银的温度为0°C时)或等于10米水柱高(水银的比重 $\gamma_{水银} = 13595$ 公斤/米³，水的比重 $\gamma_{水} = 1,000$ 公斤/米³)，如是1工程大气压=1公斤/厘米²=10,000公斤/米²=735.6毫米水银柱=10米水柱。

在物理学上通常采用稍大一点的值，作为测量压力的单位，以760毫米水银柱高为标准。这种压力近似于海平面上大气的平均压力。此种压力单位称为物理大气压。在工程上不使用它，可是压力等于1[物理大气压]是合于所谓气体标准状态的规定的(760毫米水银柱，0°C)。很容易求得：

1物理大气压=1.0333工程大气压=10333公斤/米²=760毫米水银柱=10.333米水柱。

二、温度：物体的温度就是其冷热的程度。可用温度计测定物体的温度。当温度计

与物体接触时，等到它們之間达到热平衡状态(不再进行热交换)时，温度计即确定了物体的待测温度。在苏联，采用百分温度标以测定温度，这种温标用汞作为测温物质，两个固定点选为：清洁的冰的熔解点和标准大气压力下的清洁水的沸点。

在百分温标上，冰的熔点以 0°C 表示，而沸点则以 100°C 表示。在这个温度之間采用了一百个刻度。

这种温标上的温度以 $t^{\circ}\text{C}$ 表示。

0°C 以下及 100°C 以上的温度，由百分温标两端的相应延长而获得。

热力学中除了百分温标外，也采用所谓绝对温度的温标，其零度是在百分温标零下 273.16°C 处。

绝对温度以 $T^{\circ}\text{K}$ 表示，并作为气体的状态参数。

把绝对温度换算为百分温度或进行相反的换算时，可借助下式进行：

$$\left. \begin{aligned} t &= T - 273.16^{\circ}\text{C} \\ T &= t + 273.16^{\circ}\text{C} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

三、比容：比容 v 是 1 公斤的物质所占容积的米³数。比重 γ 是物质每 1 米³重量的公斤数。此二值互为倒数。即：

$$v\gamma = 1. \quad (1-5)$$

1-3 理想气体的諸定律

一、波义耳和馬辽特定律

波义耳和馬辽特各从試驗中得到下列同一定律：当温度不变时，定量 G 公斤理想气体的压力 P 和容积 V 的乘积为一常数。即：

$$P \cdot V = \text{常数}. \quad (1-6)$$

这样，当气体具有同一温度时，不同状态的压力和容积間有如下关系：

$$P_1 V_1 = P_2 V_2,$$

或

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (1-6a)$$

即理想气体在温度不变时容积和它的压力成反比。或得：

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{Gv_1}{Gv_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}. \quad (1-6b)$$

二、盖-呂薩克定律：

当压力不变时，定量理想气体的容积和绝对温度成正比。即：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1-7)$$

三、查理定律：

当容积不变时，定量理想气体的压力和绝对温度成正比，即：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1-8)$$

四、阿佛迦德罗定律：

不同的气体在相同的容积、温度与压力下，两种气体中所含的分子数必相等。即：

$$P_1 = P_2, \quad T_1 = T_2, \quad V_1 = V_2 \text{ 时,}$$

則

$$N_1 = N_2, \quad \text{或} \quad n_1 = n_2.$$

式中 N ——分子数;

n ——单位容积内的分子数, 称为分子浓度。

因单位容积气体的重量等于每一分子的重量与所含分子数的乘积, 故各种气体的比重与各该气体的分子量成正比。用 μ 表示分子量, 则对任意两种气体可得下列公式:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}.$$

若用比容代替比重:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1},$$

从而

$$\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2. \quad (1-9)$$

$\mu_1 v_1$ 及 $\mu_2 v_2$ 各表示分子量那么多公斤气体的容积, 为便利起见就把与分子量数目相等的那么多公斤气体定为一新的重量单位, 叫做 1 摩尔 (或叫公斤分子) 故 (1-9) 式说明在相同的状态下所有气体的摩尔容积均相同。

现以氧为例来求标准状况下的摩尔容积, 在标准状况下: 因为

$$T = 273^\circ K \quad P = 1.0333 \text{ 工程大气压}$$

$$\mu_{O_2} = 32 \text{ 公斤} \quad v_{O_2} = 0.7 \text{ 标准米}^3/\text{公斤},$$

所以 $\mu_{O_2} v_{O_2} = 32 \times 0.7 = 22.4 \text{ 标准米}^3/\text{摩尔}。$

因在同一状态下, 各种气体一摩尔的容积都相等, 所以所有理想气体在标准状况下一摩尔的体积都等于 22.4 标准米³。

1-4 理想气体的状态方程式

确定气体状态的参数 P 、 v 和 T , 在它们之间存在着一定的关系, 如

$$f(P, v, T) = 0.$$

这样的分析方程式叫做状态方程式。

若有一公斤的理想气体密闭在容器中, 由压力 P_1 、温度 T_1 、比容 v_1 变为 P_2 、 T_2 、 v_2 。为了便于研究起见, 可把变化看成是由两个特殊过程连续变化的结果。

第一步: 设 T_1 不变, 压力由 P_1 变为 P_2 , 若变化后的比容为 v' , 根据波义耳定律知:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{v'}{v_1},$$

則

$$v' = \frac{P_1 v_1}{P_2}$$

第二步: 设 P_2 不变, 温度由 T_1 变为 T_2 , 若变化后的比容为 v_2 , 根据盖-吕萨克定律

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v'}.$$

将 v' 之值代入上式

$$v_2 = v_1 \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \text{ 則}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \text{常数} = R$$

所以有

$$PV = RT. \quad (1-10)$$

对 G 公斤气体:

$$Pv = GRT. \quad (1-11)$$

式(1-10)、(1-11)便是理想气体的状态方程, 很有用处。

R 称为气体常数, 各气体都有自己的气体常数, 不随气体的状态发生变化, 故可由标准状况来求 R :

$$R = \frac{PV}{T} = \frac{10333 \times 22.4}{273 \times \mu} = \frac{848}{\mu} \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度},$$

或

$$\mu R = 848. \quad (1-12)$$

故 R 随气体的分子量而定。 μR 称为通用气体常数。即对所有气体其 μR 均为 848 公斤·米/摩尔·度。

1-5 混合气体

在热工学中也广泛的应用由数种不同的且不起化学作用的理想气体所组成的混合气体, 如空气(由氧 O_2 、氮 N_2 、氩 Ar 及其它种成分组成), 燃烧产物(由氮 N_2 、氧 O_2 、二氧化碳 CO_2 、水蒸汽 H_2O 及其它种成分所组成)等等。

在计算混合气体时, 为了尽可能利用单纯气体所得出的诸计算式, 必须给出根据混合气体组成成分计算比容、气体常数、比重、平均分子量等的计算公式。

一、混合气体的分压力与分容积

假设在压力 P 、温度 T 下, 有由两种成分组成的混合气体, 其容积为 V , 其中 $(+)$ 号代表第一种成分分子, $(\circ)$ 代表第二种成分分子。在温度不变的情况下假定用人为的方法把两种成分分开, 分的方法可有以下两种:

一种方法: 分别给予每一部分以原来整个混合气体所占的容积 V , 这时若在第一种气体内的压力为 P_1 , 在第二种气体内压力为 P_2 , 这些压力称为分压力(图1-3, 6、e)。

另一种方法: 分别使每一部分具有同一的压力 P 。因此第一种气体的容积将为 V_1 , 第二种气体的容积将为 V_2 , 这些容积称为分容积(图1-3, 7、d)。

二、道尔顿定律

根据实验结果, 得知混合气体的总压力等于各个分压力之和。

即

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i$$

式中 P ——混合气体的总压力;

P_i ——所有混合气体组成成分的分压力。

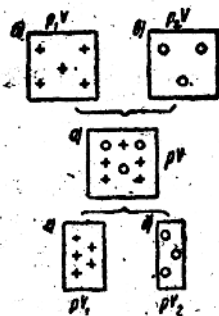


图1-3 两种划分混合气体组成物方法的图解

根据道尔顿定律可以推出混合气体的总容积也等于各个分容积之和(图 1-3, a、b、c、d), 由于在分开两种成分时, 温度没有变化, 所以由波义耳-马辽特定律及分压力、分容积的定义可得下边关系式:

$$\begin{aligned}PV_i &= P_i V, \\ \sum_i PV_i &= \sum_i P_i V, \\ P \sum_i V_i &= V \sum_i P_i, \\ V &= \sum_i V_i.\end{aligned}$$

三、混合气体组成的表示法

通常用下列方式给出混合气体的绝对成分:

1. 各组成物的重量—— $G_1, G_2, \dots, G_i$ (公斤)。
2. 在任何共同的 P 及 T 下各组成物的容积—— $V_1, V_2, \dots, V_i$ (米³)。
3. 各组成物的摩尔数—— $M_1, M_2, \dots, M_i$ (摩尔)。

此外, 计算中更多应用的是给出混合物相对成分的方法, 即重量百分数和容积百分数。

某成分的重量 G_i 与混合气体总重量 G 的比, 称为混合物中该成分的重量百分数 (或相对重量) 并以 g_i 来表示。

$$g_1 = \frac{G_1}{G}, \quad g_2 = \frac{G_2}{G}, \dots, g_i = \frac{G_i}{G}$$

并且所有重量百分数的和等于:

$$\sum_i g_i = \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_n}{G} = \frac{\sum G_i}{G} = \frac{G}{G} = 1.$$

某成分的分容积与所有分容积的和 $\sum V_i$ (等于混合物的总容积 V) 的比, 称为混合物中该成分的容积百分数。并以 γ 表示之:

$$\gamma_1 = \frac{V_1}{V}, \quad \gamma_2 = \frac{V_2}{V}, \dots, \gamma_i = \frac{V_i}{V}.$$

并且所有容积百分数的和等于:

$$\sum \gamma_i = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_i}{V} = \frac{\sum V_i}{V} = \frac{V}{V} = 1;$$

四、混合气体的平均分子量 (有时称为相当分子量)

严格的說, 混合气体是没有所谓分子量的数值的。因为分子量是用来代表实际存在的分子质量的, 可是在混合气体中, 同时存在着许多种气体分子。当然, 我们决不能只用一个数值同时来代表各种分子的质量。可是为了计算上的方便, 我们就假想用一种单纯的气体来代替混合气体。这种假想气体的总重量和分子数, 恰与混合气体的总重与分子数相等, 这样在对混合气体进行分析计算时, 就可以把它看做一种单纯的气体, 而这种假想气体的分子量, 就是所谓混合气体的平均分子量。

现根据重量百分数求混合气体的分子量,

因为:

$$M = \frac{G}{\mu} \text{ 或 } \mu = \frac{G}{M}. \quad (1-13)$$

式中 G ——气体的公斤数；

μ ——分子量；

M ——模尔数。

所以由式(1-13)可得：

$$\begin{aligned}\mu_{c.m.} &= \frac{G}{M_{c.m.}} \\ \therefore M_{c.m.} &= \sum_1^n M_i, \\ \therefore \mu_{c.m.} &= \frac{G}{\sum_1^n M_i},\end{aligned}$$

又因 $M_i = \frac{Gg_i}{\mu_i}$ 代入上式

$$\mu_{c.m.} = \frac{G}{\sum_1^n \frac{Gg_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\frac{g_1}{\mu_1} + \frac{g_2}{\mu_2} + \dots + \frac{g_n}{\mu_n}} \quad (1-14)$$

混合气体的其它计算公式已推出列于表1-1：

表 1-1 混合气体的计算公式表

已知混合气体的组成成份	换算为另一种成份	混合气体的比重及比容	混合气体的平均分子量	混合气体的气体常数	部分压力
给的是重量百分数	$\frac{g_i}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$v_{c.m.} = \frac{\sum_1^n \frac{g_i}{\gamma_i}}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}$ $\gamma_{c.m.} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\gamma_i}}$	$\mu_{c.m.} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R_{c.m.} = \sum_1^n g_i R_i$	$P_i = g_i P \frac{R_i}{R_{c.m.}}$
给的是容积百分数	$\frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$\gamma_{c.m.} = \frac{\sum_1^n r_i \gamma_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$ $v_{c.m.} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \gamma_i}$	$\mu_{c.m.} = \frac{\sum_1^n r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \gamma_i}$	$R_{c.m.} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{r_i}{R_i}}$	$P_i = r_i P$

1-6 理想气体的比热

理想气体的比热，为1公斤理想气体温度变化1°C时所需要的热量。实验与理论证明：理想气体的比热与压力无关，但在不同的温度其数值也不同。换言之，理想气体的比热为温度的函数：

$$c = f(t).$$

式中 c ——气体的比热；

t ——温度。

上述关系在图1-4上用曲线AB来代表，由图可找出一定温度下的气体比热。这比热称为真实比热。

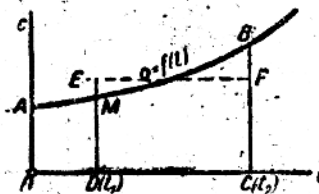


图 1-4 理想气体的真实比热与其温度变化的关系曲线

假如在某一温度 t 之下給予 1 公斤气体无限小的热量 dq ; 则气体升高无限小的温度 dt , 二者之比就是气体在温度 t 时的真实比热:

$$C = \frac{dq}{dt},$$

$$dq = C dt.$$

由此

在温度由 t_1 变到 t_2 的范围内加給气体的热量可用积分来表示:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} C dt.$$

为了求得热量, 需要知道比热与温度的关系 $C = f(t)$ 。

我們知道图 1-4 上的面积 $MBCDM$ 就是用此积分求得的。假如我們作一个以 DC 为底的矩形, 令其面积等于面积 $MBCDM$, 則得到:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} C dt = \text{面积 } MBCDM = \text{面积 } EFCDE = ED(t_2 - t_1).$$

矩形的高度 ED 表示所謂在 $t_1 - t_2$ 范围中的平均比热。将此值乘以温度差即可求出热量 q 。

在 $t_1 \sim t_2$ 范围中的平均比热, 普通用 $\bar{C}_m$ 表示, 如温度的界限很显明时, 可简单地用 C_m 来表示。因此

$$q = \bar{C}_m(t_2 - t_1) = C_m(t_2 - t_1). \quad (1-15)$$

但是, $\bar{C}_m$ 之值是随二界限温度 t_1 与 t_2 而变的。因此把每一气体的 $\bar{C}_m$ 值在表上給出是很麻煩的。其实不必算出 t_1 与 t_2 间的平均比热, 而用下面的方法可以使計算简化并精确地計算出热量 q 。表示热量 q 的面积 $MBCDM$ 可用面积 $ABCOA$ 与面积 $AMDOA$ 之差来表示(图 1-4), 这两个面积都是代表从 0°C 加热到对应温度 t_2 或 t_1 所要的热量。因此

$$q = \text{面积 } ABCOA - \text{面积 } AMDOA = \bar{C}_m t_2 - \bar{C}_m t_1. \quad (1-16)$$

若在表上已給出由 0°C 到任意温度 t 的平均比热 $\bar{C}_m$ 数值时, 則用上边所得的式子, 可以算出 q 值。

不管比热曲线的轨迹性质如何, 都可利用公式(1-16)。通常这关系是一曲线(图 1-4), 这曲线是由比热表得来的。

在热工学計算中常把比热与温度的曲线关系用接近于它的直线关系来代替, 这样便可以不用詳細的比热表。在这种情况下, 可用下列的直线方程式(图 1-5)来代替曲线方程式 $C = f(t)$:

$$C = a + bt. \quad (1-17)$$

式中 a —— $t = 0^\circ\text{C}$ 时的比热;

b ——直线傾斜角的正切, 它代表温度升高 1°C 时比热的增加。

各气体的 a 与 b 值可由手册或其它的热力学书中查得。

矩形 $EFCDE$ 的面积等于梯形 $MBCDM$ 的面

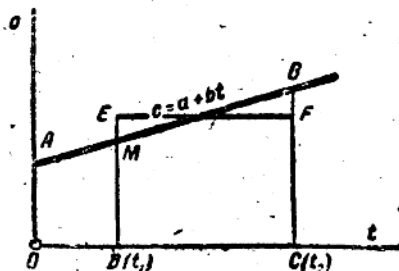


图 1-5 真实比热与温度的直线关系

积, 其高度 ED 表示在 $t_1 \sim t_2$ 范围内的平均比热, 很容易由等式

$$C_m = \frac{a_1 + bt_1 + a + bt_2}{2}$$

求得。因此

$$C_m = a + b \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1-18)$$

将此方程式与真实比热方程式 (1-17) 相比较, 可得出下面的规则: 要用直线关系 $c = f(t)$ 来计算 $t_1 \sim t_2$ 范围内的平均比热时, 须将公式 (1-17) 中的 t 代以加热过程 (或冷却过程) 的二界限温度之和的一半。

为了用公式 (1-18) 求 $0 \sim t^\circ\text{C}$ 的平均比热或一般简称为“平均比热”, 我们可以利用上述的规则, 令 $t_1 = 0^\circ\text{C}$, $t_2 = t^\circ\text{C}$, 此时用 (1-18) 得:

$$C_m = a + \frac{b}{2}t \quad (1-19)$$

比较 (1-17) 与 (1-19) 可知求 $0 \sim t^\circ\text{C}$ 的平均比热的公式与求真实比热的公式所不同之点, 是在 t 的系数, 后者的系数为前者之半。我们比较一下 (1-17) 与 (1-19) 就可以知道了。

表1-2 气体在定压下的平均容积比热([大卡]/标准[米]³[度])(曲线关系)

$t^\circ\text{C}$	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空气	湿空气①
0	0.3116	0.3088	0.3103	0.3805	0.3567	0.414	0.3093	0.3150
100	0.3145	0.3096	0.3108	0.4092	0.3596	0.433	0.3106	0.3163
200	0.3190	0.3106	0.3123	0.4290	0.3635	0.451	0.3123	0.3181
300	0.3240	0.3122	0.3146	0.4469	0.3684	0.468	0.3147	0.3206
400	0.3291	0.3146	0.3174	0.4628	0.3739	0.482	0.3175	0.3235
500	0.3329	0.3173	0.3208	0.4769	0.3796	0.496	0.3207	0.3268
600	0.3385	0.3203	0.3243	0.4895	0.3856	0.505	0.3241	0.3303
700	0.3426	0.3235	0.3278	0.5008	0.3920	0.514	0.3275	0.3338
800	0.3464	0.3266	0.3312	0.5110	0.3985	0.522	0.3307	0.3371
900	0.3498	0.3297	0.3344	0.5204	0.4050	0.529	0.3338	0.3403
1000	0.3529	0.3325	0.3375	0.5288	0.4115	0.535	0.3367	0.3433
1100	0.3548	0.3354	0.3405	0.5363	0.4180	0.540	0.3396	0.3463
1200	0.3584	0.3380	0.3431	0.5433	0.4244	0.544	0.3422	0.3490
1300	0.3608	0.3406	0.3446	0.5495	0.4306		0.3448	0.3517
1400	0.3631	0.3430	0.3470	0.5553	0.4367		0.3472	0.3542
1500	0.3652	0.3453	0.3492	0.5606	0.4425		0.3494	0.3565
1600	0.3673	0.3473	0.3513	0.5655	0.4482		0.3515	0.3587
1700	0.3693	0.3493	0.3532	0.5701	0.4537		0.3534	0.3607
1800	0.3712	0.3511	0.3551	0.5744	0.4590		0.3552	0.3625
1900	0.3720	0.3529	0.3578	0.5783	0.4640		0.3570	0.3644
2000	0.3747	0.3545	0.3593	0.5820	0.4689		0.3586	0.3661
2100	0.3764	0.3560	0.3608	0.5855	0.4736		0.3602	0.3678
2200	0.3781	0.3574	0.3623	0.5887	0.4780		0.3616	0.3693
2300	0.3796	0.3588	0.3636	0.5919	0.4822		0.3631	0.3708
2400	0.3810	0.3601	0.3649	0.5947	0.4864		0.3644	0.3722
2500	0.3825	0.3613	0.3660	0.5974	0.4903		0.3657	0.3735

①其湿度一般为1[公斤]干空气含10[克]的水份。

因为比热与气体数量单位有关，所以分为摩尔比热 (μC ——大卡/摩尔·度)、重量比热 (C ——大卡/公斤·度)和容积比热 (C ——大卡/标准米³·度)。

在这些比热之间，有下面简单的关系：

$$C = \frac{\mu C}{\mu}, \quad (1-20)$$

$$C' = \frac{\mu C}{22.4}. \quad (1-21)$$

$$C' = c\gamma. \quad (1-22)$$

以后将要进一步谈到，比热与物质加热或冷却过程进行的条件有极重要的关系，尤其是气体容积不变的过程(所谓定容过程)和气体压力不变的过程(所谓定压过程)，在热工上有很重要的意义。因此把比热分为定容比热 C'_v 和 定压比热 C'_p 。此二者之间的关系将在以后叙述。

根据全苏热工学院(BTH)的资料，在表 1-2 中列举几种工业上重要气体当 $P =$ 常数时，每一标准米³ 气体由 0~t°C 的平均比热。表中诸值说明比热与温度是曲线关系。表上数据的中間值可用直线插入法来求。

表 1-3 中举出方程式(1-19)型的若干式子，这些式子表示 1 公斤和 1 标准米³ 气体的平均比热与温度的直线关系。

表 1-3 气体的平均比热(直线关系)

0~1500°C 范围内		
气体	重量比热 大卡/公斤·度	容积比热 大卡/标准米 ³ ·度
O ₂	$C_{pm} = 0.2198 + 0.0000254t$	$C'_{pm} = 0.3138 + 0.0000376t$
	$C_{vm} = 0.1577 + 0.0000254t$	$C'_{vm} = 0.2252 + 0.0000376t$
N ₂	$C_{pm} = 0.2446 + 0.00002115t$	$C'_{pm} = 0.3057 + 0.00002643t$
	$C_{vm} = 0.1737 + 0.00002115t$	$C'_{vm} = 0.2171 + 0.00002643t$
CO	$C_{pm} = 0.2461 + 0.00002315t$	$C'_{pm} = 0.3074 + 0.00002891t$
	$C_{vm} = 0.1751 + 0.00002315t$	$C'_{vm} = 0.2188 + 0.00002891t$
空气	$C_{pm} = 0.2378 + 0.00002221t$	$C'_{pm} = 0.3073 + 0.00002869t$
	$C_{vm} = 0.1693 + 0.00002221t$	$C'_{vm} = 0.2187 + 0.00002869t$
H ₂ O	$C_{pm} = 0.4379 + 0.0000743t$	$C'_{pm} = 0.3519 + 0.00005967t$
	$C_{vm} = 0.3276 + 0.0000743t$	$C'_{vm} = 0.2633 + 0.00005967t$
CO ₂	$C_{pm} = 0.2084 + 0.00005747t$	$C'_{pm} = 0.4092 + 0.00001128t$
	$C_{vm} = 0.1633 + 0.00005747t$	$C'_{vm} = 0.3206 + 0.00001128t$

在不需要精确的计算中，一般可不考虑比热随温度而变的关系；在这种情况下，可设比热为不变(定值比热)。

表 1-4 摩尔比热 (μC)

原子数	μC_v 大卡/摩尔·度	μC_p 大卡/摩尔·度
一 原子气体	3	5
二 原子气体	5	7
三 原子气体 和多原子气体	7	9