

中等专业学校交流讲义

热工学理论基础

重庆电力学校热专业科編

只限学校内部使用



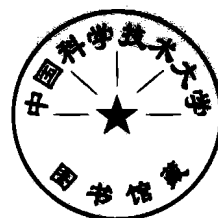
中国工业出版社

中等专业学校交流讲义



热工学理论基础

重庆电力学校热专业科編



中国工业出版社

本书系根据水利电力部于1960年召开的中等专业学校热工学教学研究会议所制订的教学大纲编写成。

书中包括工程热力学和传热学两篇。在工程热力学部分，着重讲水蒸汽性质和蒸汽动力装置循环，精简了理想气体中不合实用的部分，增加了化学热力学、热能利用的发展等新内容。在传热学部分，内容比过去的传热学教材有了充实和提高。在对流换热、热辐射换热的计算中采用了锅炉机组热力计算标准所推荐的计算方法。

本书可作为中等专业学校三、四年制的热能动力装置专业的教材。

热工学理论基础

重庆电力学校热专业科编

*

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证出字第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787×1092¹/₁₆·印张13 7/8·插页1·字数332,000

1961年7月北京第一版·1961年7月北京第一次印刷

印数0001—4,533·定价(9-4)1.40元

统一书号: 15165·540 (水电-73)

目 录

緒論

第一篇 工程热力学

第一章 工质及其状态变化	5
1-1 工质的概念	5
1-2 工质的状态参数和理想气体的状态方程	5
1-3 热力学的第一定律和第二定律	14
1-4 工质的状态变化	15
1-5 水蒸汽的性质	24
1-6 气体和蒸汽的流动, 节流过程	41
第二章 循环	56
2-1 蒸汽动力装置的循环	57
2-2 两汽循环	72
2-3 气体循环	74
2-4 燃气-蒸汽联合装置及其循环	92
2-5 原子能发电站的概念及热力循环	95
第三章 化学热力学基本概念	99
3-1 热力学第一定律应用于化学反应	99
3-2 热力学第二定律应用于化学反应	102
3-3 热力学第三定律的概念	103
第四章 热能利用的发展	105
4-1 低温热源热量的利用	105
4-2 未来的发电方法	109

第二篇 傳 热 学

概述

第五章 稳定热传导	111
5-1 热传导的基本概念	111
5-2 温度场	112
5-3 温度梯度	112
5-4 傅立叶定律	112
5-5 平壁的热传导	116
5-6 圆筒壁的热传导	118
第六章 对流换热	124
6-1 对流换热的特征和影响因素	124
6-2 相似理论及其在对流换热中的应用	126
6-3 流体受迫运动时的放热	131
6-4 流体集态改变时的放热	143

6-5 对流换热的新成就	150
第七章 热辐射	152
7-1 热辐射的基本概念	152
7-2 热辐射的基本定律	155
7-3 物体間的辐射换热(二平板間的换热)	158
7-4 气体的热辐射	161
7-5 火炬辐射	163
7-6 气体与外壳間的热辐射	165
第八章 传热	170
8-1 复杂换热	170
8-2 多层壁的傳热	171
8-3 傳热的增强	175
8-4 热絕緣	180
第九章 换热器	184
9-1 换热器的基本概念	184
9-2 换热器的計算原理	185
9-3 平均溫度差的計算	187
9-4 换热器最有利的組合和换热器效率	190
附录:	
表1 饱和蒸汽表(按压力編排)	197
表2 饱和蒸汽表(按溫度編排)	199
表3 水与过热蒸汽	200
表4 定压下气体的平均比热(大卡/公斤·度)	210
表5 各种不同材料的重度、导热系数、热容量和导温系数	212
表6 在大气压力 $B=760$ 毫米汞柱下干空气的物理参数	214
表7 在大气压力 $B=760$ 毫米汞柱下烟气的物理参数	215
表8 在饱和綫上蒸汽的物理参数	215
表9 在饱和綫上水的物理参数	216
表10 各种不同材料的总正常辐射黑度	217
表11 $\theta = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$ 的数值	219
表12 对数平均溫压 $\frac{\Delta t}{\Delta t'} = f\left(\frac{\Delta t''}{\Delta t'}\right)$	219
表13 工业换热设备里 α 和 K 的数值的大致范围	220
附图 水蒸汽的 $i-s$ 图	

緒 論

热工学研究的内容

热工学研究的内容，包括工程热力学和传热学两大部分。

工程热力学是研究热能与机械能相互转换的科学，着重研究热能转变为机械能的一般规律，从而确定热机工作的最经济条件。

传热学主要研究物体间由于有温度差而引起的热量传递的科学。

热工学发展简史

热工学的发展是和热机的每一进展相伴随的，是和当时的社会生产以及劳动人民的贡献分不开的。

远古时代，人类就有摩擦取火的实践活动，但对火的本质当时还不能认识。至于将热转变为功的可能，也是很早就知道的。例如，使蒸汽从一个圆球中喷出，便会使圆球旋转；利用蜡烟便可使走马灯转动。由于当时人类的生产水平很低，对于热变功的问题还不曾引起注意。

随着社会的进展，水力和风力的利用日益增加，在十七至十八世纪初，水力已成为当时的主要动力资源。但是，随着生产的进一步发展，水力受地区和气象条件限制的弱点就显得突出，它已不能满足生产部门的需要。这时，对一种不受地区及季节限制的新型原动机的要求更显得迫切，于是在十七世纪末就出现了专门用来排水的蒸汽动力装置。

在十八世纪中叶以前，人们对热的认识是不正确的。他们把热看成是一种无重量的不生不灭的物质，称为“热素”。但这种看法不能解释摩擦生热等各种现象。只有俄国学者罗蒙诺索夫才给热的本质以唯物的正确的解释，他在一篇论热与冷的原因的论文中指出：热的本质就是物质的分子运动，从而驳斥了热素论。随着对热现象的正确认识和对热机工作的详细考查和总结，在十九世纪中叶便建立了热力学第一定律和热力学第二定律。这两个定律为研究热能与机械能转换的工程热力学奠定了基础，促进了热工学的向前发展。为了减少蒸汽机汽缸的热量散失以提高工作能力，传热学也引起了人们的注意和研究。

从十九世纪后半叶起，当交通运输上需要轻巧的发动机时，内燃机出现了；同时汽轮机也在工业上获得了应用。热力学及流体力学的新成就，使汽轮机得到了很快的发展。在二十世纪汽轮机已发展到比较完善的阶段，逐渐代替了蒸汽机。

近年来，由于高速高空飞行的要求，又促进了燃气轮机和喷气式发动机的使用和研究，现在燃气轮机已越过试验阶段而逐渐在工业和运输上应用，其中喷气式发动机尤其获得了迅速的发展。

原子能的发现和利用，更为热机的发展开辟了一个无比巨大的新领域。燃气-蒸汽联合装置的出现和热能直接转换成电能的研究，使热工学的内容更加丰富，更向前发展。

了。

在傳热学方面，在近数十年中，由于热机和动力事业的发展和要求，才有了很大的进展，并創立了相似理論，使傳热学的发展获得了可靠的基础。最近几十年来相似理論获得很大的发展，它已成为一套关于研究修訂和綜合实验数据的一般方法論。在苏联，以相似理論为基础建立了“热模化”的理論。其次，近来物理学上的成就，特别是对流体层流和湍流的研究及边界层理論的逐漸充实，更深刻地闡明了对流换热过程的物理本质，也促进了傳热学更进一步的发展。現在傳热学已成为一門独立的科学，与热力学共同組成“热工学理論基础”这門課程。

我国热工方面的成就和解放后的发展

我国的热工科学，早在十世紀左右，对于热力利用已有許多創造。如隋唐时代的霹雷炮、火箭，南宋时代的走馬灯以及清康熙年間利用蒸汽力量作推动小車和小船的試驗等。可是，我們祖先的这些宝貴成就，由于我国人民长期受封建統治势力的压迫和我国长期处在半殖民地、半封建的社会地位，未能获得应有的发展，致使解放前我国热工方面的科学技术比較落后。

解放后，在中国共产党的正确领导下，我国劳动人民掌握了自己的政权，又加以苏联等兄弟国家的无私援助，在科学技术工作上具备了优越的发展条件，成立了有关的研究机构。各研究院对燃气性质、高参数蒸汽热力性质、新型热力循环和傳热理論等方面的研究工作正在大力开展，并已取得了一定成績。我們深信，在不久的将来，我国的各項科学技术将会取得更加輝煌的成就。

第一篇 工程热力学

第一章 工质及其状态变化

1-1 工质的概念

凡是将热能变为机械能的设备，称为热机。在工业上，将燃料的热能，通过一种媒介物质来转变成机械能，这种媒介物，称为工质。

工质是被加热后，可以作功的物质。要求工质在受热或冷却时，体积的膨胀或收缩能力很大，这样才能有效地作功。要热机不断的作功，必须将新鲜工质不断引入热机，工作完后立即排出，这就要求工质有良好的流动性。由于气态物质具有良好的膨胀性和流动性，故热机常采用气体或蒸汽作为工质。例如蒸汽原动机中系采用蒸汽作为工质；在内燃机中系采用燃料燃烧生成的燃气，作为工质。

对工质性质的要求，除膨胀性和流动性外，还应具有价廉易得、热力性稳定、对设备不起腐蚀作用和转变最大可能的功等条件，力求热功转换的经济性和可靠性的不断提高。因此随着动力事业的发展，新工质就不断被发现和采用。例如水银蒸汽已被采用于两汽循环中。

在热力学里，为了研究方便，假想出一种气体。这种气体完全没有分子吸引力，而且分子本身又是不占有体积的质点，就称为理想气体。当然在自然界中，理想气体是不存在的。实际的气体，分子具有一定的体积，分子间是有吸引力的。在对气体问题进行分析 and 计算时，要考虑这两个因素是很麻烦的。为了对气体的研究得到简化，故将气体结构简化为理想气体的结构，便于从复杂现象中找出气体的普遍规律。

实际气体，当容积趋近于无限大时，也可看作理想气体。因为此时分子间的吸引力随着距离的无限增大而消失；分子本身的体积比起气体的极大容积，也可忽略了。在热力工程中，如空气、燃气和烟气中的水蒸汽，与理想气体性质接近，可以近似的当作理想气体。在蒸汽动力装置和加热器里的水蒸汽，由于压力较高，接近液态，不能作理想气体看待。

以上所提到的燃气和烟气，它们是二氧化碳、氧、氮、水蒸汽等混合而成，这种混合物，叫做混合气体。

1-2 工质的状态参数和理想气体的状态方程

一、工质的基本状态参数

工质的状态，可以用压力、温度、比容等参数表示出来。对应于工质的每一个状态，这些状态参数都有一定的数值。当一个状态参数值有了改变，就意味着工质的状态发生了变化。故状态参数就是表明工质状态的物理量。压力、温度和比容就是工质的基本状态参数。如前所述工质均采用气态物质，以下我们均以气体表之。

压力：压力是气体分子运动，碰撞容器壁的平均效果。它是用每单位面积上的垂直

作用力来度量的。根据气体分子运动理论，知气体的压力 p 为：

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

式中 n ——分子浓度，即单位容积内的分子数，

$$n = \frac{N}{V};$$

$\frac{mw^2}{2}$ ——每个气体分子的平均动能。

上式就说明了气体的压力，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。当单位容积内分子数目愈多，平均动能愈大，则气体的压力就愈大。

上面的概念，同样可用于几种理想气体所组成的混合气体中。当容器内放的是混合气体时，则这时容器壁的总压力为组成混合气体的各种气体的分压力的和。（分压力是指与混合气体具有相同容积和温度时各组成气体的压力。）

压力的单位，有公斤/厘米²、公斤/米²等；也有用液柱高低来表示的；如毫米汞柱，毫米水柱等。在工程上，以1公斤/厘米²称为“工程大气压”，或简称“大气压”。它和其他压力单位的换算关系如下：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10^4 \text{ 公斤/米}^2 \\ &= 10 \text{ 米水柱} = 735.6 \text{ 毫米汞柱} \\ &= 0.986 \text{ 物理大气压} \end{aligned} \quad (1-2)$$

或者：1 物理大气压 = 760 毫米汞柱 = 1.0332 公斤/厘米²。

测量气体压力，可用装有某种液体（如水银或水）的弯管连接到容器上，如图 1-1 所示。在图(a)中，容器内气体的压力，是用弯管内液柱高度 $P_{\text{剩余}}$ 来表示，它代表容器内气体压力超过大气压力的数值，称为“表压力”或“剩余压力”；而气体的绝对压力为：

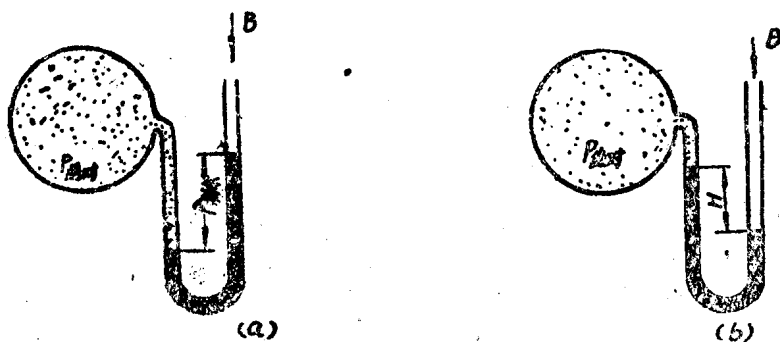


图 1-1

(a) 液柱式压力计；(b) 液柱式真空计。

$$p_{\text{绝对}} = p_{\text{表压}} + B \quad (1-3)$$

式中： B ——当时当地的大气压力，即气压计所指示的压力。

如容器内的气体压力低于大气压力，弯管内的液柱就如图 1-1b 所示。液柱高度 H 表示容器内气体压力，小于大气压力的数值；我们称为“真空度”。气体的绝对压力为：

$$p_{\text{绝对}} = B - H \quad (1-4)$$

因此，绝对压力才是表明气体的实在压力；由压力表或真空计得出的表压力，必须用式

(1-3)或式(1-4)算出绝对压力,才是气体的状态参数。

温度: 温度表示物体的冷热程度,也就是气体分子平均移动动能的度量标准。两者间的关系是:

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

式中 $\frac{mw^2}{2}$ —— 分子平均移动的动能;

T —— 绝对温度;

B —— 比例常数。

在热力工程上,温度的单位,采用百度温标($^{\circ}\text{C}$)与绝对温标($^{\circ}\text{K}$),两者间的关系为:

$$T = (t + 273)^{\circ}\text{K} \quad (1-6)$$

两种温标中,每一度的间隔是相同的,不同的是读数的起点;百度温标以 0° 作为起点,而绝对温标是以百度温标 0° 下的 273 度作为起点。但两种温度的差数是一样的,即:

$$T_2 - T_1 = t_2 - t_1$$

比容: 单位重量气体所占的容积,称为比容。其单位为 $\text{米}^3/\text{公斤}$ 。比容的倒数就是重度。故得:

$$\left. \begin{aligned} \text{比容 } v &= \frac{V}{G} \\ v\gamma &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

和

式中 V —— 气体的总容积;

G —— 气体的总重量;

γ —— 气体的重度,又称比重。

二、理想气体的状态方程式

表示气体的三个基本状态参数(p, v, T)间,在平衡状态时存在着的一定关系式,称为状态方程式。从分子运动理论,可以得出理想气体的状态方程式:

$$\left. \begin{aligned} pv &= RT, \\ \text{或 } \frac{pv}{T} &= R = \text{常数}. \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

上式的获得,可根据式(1-1)和式(1-5)得到下式:

$$p = \frac{2}{3}nBT; \quad (a)$$



图 1-2 气体在具有运动活塞的汽缸中

如 N 为一公斤气体内的分子数, 它的容积为 v , 则 $n = \frac{N}{v}$; 将 n 代入式(a), 得:

$$p = \frac{2}{3} \times \frac{N}{v} BT. \quad (b)$$

现在如将一公斤气体放入具有运动活塞的气缸内, 它的状态参数为 p_1, v_1 及 T_1 。加热气体和移动活塞, 气体的状态变为 p_2, v_2 , 及 T_2 ; 利用式(b), 可得始态和末态的式子为:

$$p_1 v_1 = \frac{2}{3} N B T_1,$$

及

$$p_2 v_2 = \frac{2}{3} N B T_2;$$

两式相除可得:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \frac{2}{3} N B = \text{常数 } R.$$

公式(1-8)为一公斤气体的状态方程式, 又称为克拉贝隆方程式。对于任意重量 G 公斤气体来说, 可用 $v = \frac{V}{G}$ 代入, 即得:

$$pV = GRT. \quad (1-9)$$

状态方程式(1-8)和(1-9)中的 R , 称为**气体常数**。其数值与气体所处的状态无关, 而仅决定于气体的性质及 p, v, T 的单位。在热工计算时, 状态方程式中各个数据的单位, p 为公斤/米², v 为米³/公斤, T 为绝对温度 $^{\circ}K$; 故得 R 的单位为:

$$[R] = \frac{[p][v]}{[T]} = \frac{\frac{\text{公斤}}{\text{米}^2} \times \frac{\text{米}^3}{\text{公斤}}}{^{\circ}K} = \frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{公斤} \cdot ^{\circ}K}$$

同一种气体的 R 是不变的, 例如空气的 R 值为29.27。 R 的单位里, 分母上的公斤和分子上的公斤, 在概念上有区别。分母的公斤是工质的重量单位, 分子的公斤是力的单位, 为了便于理解 R 的意义, 故不能将它消去。

人们通过实验发现, 在相同温度和相同压力下, 不同气体的比容 v 和各该气体的分子量 μ 成反比, 即 μv 为一常数。在标准状态下(即760毫米汞柱的压力和 $0^{\circ}C$ 时) μ 公斤的每一种气体的 $\mu v = 22.4$ 米³。当气体重量的公斤数等于一个分子量时, 叫做**公斤分子**, 或称为**莫尔**。在标准状态下, 一莫尔的理想气体的容积, 均为22.4米³; 即:

$$(\mu v)_{\text{标准}} = 22.4 \text{ 米}^3 / \text{莫尔}. \quad (1-10)$$

有了式(1-10), 对于计算标准状态的比容很方便, 因为:

$$v_{\text{标准}} = \frac{22.4}{\mu}. \quad (1-11)$$

如果气体为 μ 公斤时, 它的状态方程即为1莫尔理想气体的状态方程, 又称为**门捷列夫方程**, 形式为:

$$p\mu v = \mu RT. \quad (1-12)$$

式中 μv 为莫尔容积;

μR 称为通用气体常数。

将标准状态下的已知数据代入式(1-12), 可得:

$$\mu R = \frac{p(\mu v)}{T} = \frac{10332 \times 22.4}{273} = 848 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{莫尔} \cdot \text{度} \quad (1-13)$$

上式表明对于各种理想气体在任何状态下, μR 的值都相同, 故称为通用气体常数。有了式(1-13), 只要知道一种理想气体的分子量 μ , 即可根据它计算出这种气体的气体常数 R 。

状态方程式是表明 p, v, T 间的关系式。而 p, v, T 的关系, 也可用坐标图来表示。在热工中, 常用压力与比容的直角坐标图, 即 $p-v$ 图来表示任两参数之关系。由于状态方程中包括三个未知数 (R 为常数), 当 p, v 一定时, 则 T 也一定; 故 $p-v$ 图中一点, 虽然是表示 p, v 两个值, 实际就代表 p, v, T 三个值了。如图1-3所示。当气体的初态为 p_1, v_1, T_1 时, 绘于 $p-v$ 图; 即得 A 点; 如气体受热力作用,

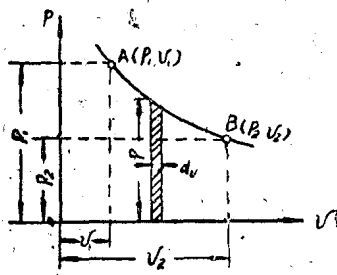


图 1-3 $p-v$ 图

状态发生变化到另一状态, 其状态参数为 p_2, v_2, T_2 , 在图上可得 B 点; 再将变化过程 A, B 间不同的状态点得出, 连接各点为 AB 曲线, 即为气体在热力变化中 p, v 的关系曲线。由数学中, 知道 AB 曲线与横坐标轴间所包括的面积为: $\int_{v_1}^{v_2} p dv$, 即代表气体膨胀时所作的外功, 故 $p-v$ 图可作为表示功的图。即:

$$dl = p dv, \quad \text{或} \quad l = \int_{v_1}^{v_2} p dv. \quad (1-14)$$

因此以后研究功的问题, 就常用 $p-v$ 图了。

例题1-1 封闭容器内装有压缩空气, 当大气压力 $B_1 = 745$ 毫米汞柱时, 压力表上读数为 2 大气压。如大气压力变化到 $B_2 = 770$ 毫米汞柱时, 问压力表上读数为多少?

解: 因 $p_1 = p_{\text{表}} + B_1$ $p_2 = p_{\text{表}} + B_2$

由于容器内的压力不变, 所以得到:

$$p_{\text{表}} = p_1 - B_1 = p_2 - B_2 = 2 + \frac{745 - 770}{735.6} = 1.966 \text{ 大气压(表压)}.$$

例题1-2 将二氧化碳气送入容积为 3 米³ 的储气筒内, 原有压力 $p_1 = 0.3$ 大气压(表压), 终了压力 $p_2 = 3$ 大气压(表压), 温度由 $t_1 = 45^\circ\text{C}$ 增加到 $t_2 = 70^\circ\text{C}$, 求被压入的二氧化碳气体的重量。当时大气压力 $B = 700$ 毫米汞柱。

解: 储气筒内原有气体为: $G_1 = \frac{p_1 v}{RT_1}$

充入气体后筒内气体为: $G_2 = \frac{p_2 v}{RT_2}$

两者之差, 即为送入气体的重量 G 为:

$$\begin{aligned} G &= G_2 - G_1 = \frac{p_2 v}{RT_2} - \frac{p_1 v}{RT_1} = \frac{v}{R} \left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1} \right) \\ &= \frac{3}{\frac{848}{44}} \left(3 + \frac{700}{735.6} - \frac{0.3 + \frac{700}{735.6}}{45 + 273} \right) \times 10^4 = 11.8 \text{ 公斤}. \end{aligned}$$

三、气体的内能，焓和熵

在热力学中，除前面介绍的三个基本状态参数外，还常用到内能、焓和熵三个状态参数；因此在下面分别简单介绍。

内能：物质的内能，是各种形式能量的总和，有热能、化学能、电磁能、原子能……等。但在热工中，气体的内能，只有热能有较大的变化，其它各种能量可视为不变。因此，气体的内能，系内动能与内位能的和。

内动能是指分子作直线运动同时又作旋转运动的动能，再加上组成分子的原子的振动能。这三种形式的能，仅与温度有关。即 $u_{\text{动}} = f(t)$ 。而内位能是因分子的吸引力所引起的。当气体吸热膨胀，一部分热能将克服分子引力而作功，成为内位能形式储存下来。相反，压缩气体时，容积减小，分子间的距离缩短，内位能将通过热能形式释放出来，故内位能的大小与气体的分子间距离有关，即与比容有关。故得：

$$u_{\text{位}} = f(v).$$

因此，实际气体的内能 u 为：

$$u = (\text{内动能}) + (\text{内位能}) = f(v, t)$$

由于理想气体分子间无吸引力，故无内位能的存在；因此理想气体的内能，仅具有内动能，也仅为温度的函数，即 $u = f(t)$ 。因为内能是气体分子所具有能量的总和，它决定于气体所处的状态，故内能也是一个状态参数，它的单位为大卡/公斤。

焓：焓是一个复合的状态参数，它是内能 u 与压力位能 pv 的和。即：

$$h = u + A p v. \quad (1-15)$$

式中： h ——焓，大卡/公斤；

u ——内能，大卡/公斤；

p ——压力，公斤/米²；

v ——比容，米³/公斤；

A ——功的热当量，为 $\frac{1}{427}$ 大卡/公斤·米。

对理想气体而言，内能仅与温度有关；而压力位能 pv 也随温度而变（因 $pv = RT$ ），所以理想气体的焓，也仅是温度的函数。即 $h = f(t)$ 。由于 u 与 pv 也仅决定于气体的状态，故焓 h 也是一个状态参数。

熵：熵是一个导出的状态参数，它通过其他可以直接测量的数量间接计算出来的。它和热量及温度的关系如下式表出：

$$dS = \frac{dq}{T},$$

或

$$S = \int \frac{dq}{T} + \text{常数}. \quad (1-16)$$

式中 S ——熵，大卡/公斤·°K；

q ——1 公斤气体所获得的热量，大卡/公斤；

T ——气体在获得热量时的绝对温度，°K。

由此可见，在一个过程中，加进去微小热量 dq 与加热时的绝对温度 T 的比值，就是熵的微增量 dS 。

由式(1-16)，得：

$$dq = T dS.$$

因为绝对温度 T 值永为正数, 即 $T>0$; 故由上式, 当气体状态变化时, 有下面两种情况:

如熵增加, 即 $dS>0$ 时, 则 $dq>0$; 此时表示工质在吸收热量。

如熵减少, 即 $dS<0$ 时, 则 $dq<0$; 此时表示工质在放出热量。

因此, 我们可以由熵的变化, 可以判断热流的方向, 即工质在吸热或是放热。

在热力学中研究气体状态变化时, 除应用 $p-v$ 图外, 还常用温熵直角坐标图, 即 $T-S$ 图, 如图1-4所示。应用这种图后, 不仅可以由图上了介气体的状态变化情况, 而且状态变化过程中工质是加热或排热, 热量的多少, 均可由图上清楚的显示出来。例如气体状态是由 A 变化到 B , 熵在增加, 故知系加热。相反的由 B 到 A , 熵是减少, 则知系放热。在 AB 曲线下的面积, 为面积 $ABB'A' = \int_{S_1}^{S_2} T dS = q$, 它就代表加入(或排出)的

热量的多少; 故 $T-S$ 图又叫“示热图”。研究状态变化过程的热量时, 就常利用它。我们有了焓和熵, 对于热工的研究, 有了很大的方便和简化, 今后将不断地用到它们。

在研究状态变化中, 对内能、焓和熵三个参数, 不计算其绝对值; 只研究其变化, 计算相对值, 即求:

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

$$\Delta i = i_2 - i_1$$

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

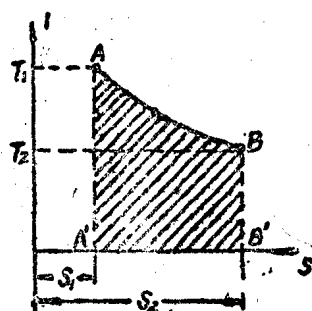


图 1-4 $T-S$ 图

因此计算时, 可以任何状态开始。通常取标准状态作为计算的起点, 即在标准状态时, 气体的内能、焓和熵的数值取为零(或者从绝对零度时起算亦可)。

上面讲内能、焓和熵时, 均系以一公斤气体来考虑; 如气体为 G 公斤时, 在上面计算所得数值, 乘以 G 公斤即可。

在工程中, 热量的求法, 常常利用工质的单位热容量和加热前后的温度差来计算。即:

$$q = C(t_2 - t_1). \quad (1-17)$$

“单位热容量”的意义, 是单位量的物质, 当温度升高(或降低) 1°C 时所加入(或放出)的热量; 又叫做“比热”。

由于单位量所取的不同, 故有不同的比热。如单位量取为一公斤, 就得“重量比热” C (大卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$); 如取一标准米³的工质^①, 则得“容积比热” C' (大卡/标准米³ $\cdot^\circ\text{C}$); 如取为一莫尔, 则得“莫尔比热” μC , (大卡/莫尔 $\cdot^\circ\text{C}$)。三者间的关系如下:

$$C = \frac{\mu C}{\mu}; \quad C' = \frac{\mu C}{22.4}; \quad C' = \gamma C. \quad (1-18)$$

因此, 只要知道任何一种比热的数值, 由上面的关系式, 即可求出其他的比热数值。

气体的比热与气体加热或放热时的条件有关。如加热(或放热)是在容积不变下进行的, 此时的比热称为“定容比热”; 在比热符号右下角加注“ v ”, 如 C_v , C'_v , μC_v 等。如

① 因体积受温度影响, 计算中常以标准状态的容积为计算的标准。

1 标准米³的工质系指标准状态下1米³容积的工质。

果气体加热(或放热)是在压力不变下进行的,此时的比热称为“定压比热”;分别以 C_p , C'_p , μC_p 表示。

同为一公斤重的气体,一在定容下加热,一在定压下加热,并同时均升高温度 1°C ,此时在定压下所需的热量是大于定容下所需的热量。因为在等压下,多化了一些能量去做了外功;即 $C_p > C_v$ 。

比热与温度的关系:气体的比热和温度的关系很大,温度不同,比热也不同;一般是随温度升高而增大;即 $C=f(t)$ 。当温度不太高(约在 150°C 以下)的情况下,比热随温度的变化,可不必考虑;此时的比热称为“定值比热”,即不随温度而变的比热。如在热工计算上需要有高度准确性,就要考虑比热随温度而变化的情况,这就得到“真实比热”。

在近似计算中应用定值比热,使计算很简便。下表给出不同原子数的定容及定压的莫尔比热数值。我们根据原子数在表中查出莫尔比热数值,除以该气体的分子量 μ ,即可得出该气体的重量比热数值。

原子数 \ 比热	μC_v 大卡/莫尔 $\cdot^\circ\text{C}$	μC_p 大卡/莫尔 $\cdot^\circ\text{C}$
单原子气体	3	5
双原子气体	5	7
三及多原子气体	7	9

例如求 N_2 的定压重量比热。

因氮气双原子气体,在表中查出 $\mu C_p = 7$,而氮的分子量为28,故 $C_p N_2 = \frac{7}{28} = 0.25$ 大卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$ 。

在精确计算中采用查比热表的方法如对一个公斤气体加热,由温度 t_1 升至 t_2 ,供给的热量 q_{1-2} 大卡,则平均每升高 1°C 所需的热量为 $\frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}$ 大卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$ 。这个数值,就是在温度范围 $t_1 \sim t_2$ 间的“平均比热”。以 $C_m^{t_1}$ 或 C_m 表示之。如由 0°C 升至 $t_1^\circ\text{C}$ 所需热量为 q_1 ,则

$$C_m^{t_1} = \frac{q_1}{t_1},$$

同理,由 0°C 升至 $t_2^\circ\text{C}$ 时,所需热量为 q_2 ,则

$$C_m^{t_2} = \frac{q_2}{t_2};$$

因此,由 t_1 升至 t_2 所加入的热量 q_{1-2} 为:

$$q_{1-2} = q_2 - q_1 = C_m^{t_2} t_2 - C_m^{t_1} t_1 = C_m^{t_1} (t_2 - t_1). \quad (1-19)$$

通常即由平均比热表中,根据温度 t_1 和 t_2 ,查出 $C_m^{t_1}$ 和 $C_m^{t_2}$ 值,代入(1-19)式中,即可算出所需热量 q_{1-2} 。

下面我们再研究一下关于求混合气体比热的问题。设已知混合气体的各组成气体的

重量为 $G_1, G_2, \dots, G_n$; 则当混合气体温度由 t_1 升高到 t_2 时所吸收的热量为:

$$Q_{\text{混合}} = G_{\text{混合}} \times C_{\text{混合}}(t_2 - t_1). \quad (1-20)$$

由式(1-20)可得:

$$\begin{aligned} C_{\text{混合}} &= \frac{Q_{\text{混合}}}{G_{\text{混合}}(t_2 - t_1)} = \frac{G_1 C_1(t_2 - t_1) + G_2 C_2(t_2 - t_1) + \dots + G_n C_n(t_2 - t_1)}{G_{\text{混合}}(t_2 - t_1)} \\ &= \frac{G_1}{G_{\text{混合}}} C_1 + \frac{G_2}{G_{\text{混合}}} C_2 + \dots + \frac{G_n}{G_{\text{混合}}} C_n \\ &= g_1 C_1 + g_2 C_2 + \dots + g_n C_n. \end{aligned} \quad (1-21)$$

式(1-21)中, $g_1, g_2, \dots$ 等称为相对重量成分。由该式, 可知混合气体的重量比热, 等于各组成气体的相对重量成分与重量比热乘积的总和。

同理可得:

$$C'_{\text{混合}} = r_1 C'_1 + r_2 C'_2 + \dots + r_n C'_n. \quad (1-22)$$

式(1-22)中, $r_1, r_2, \dots$ 称为相对容积成分, 即 $r_i = \frac{V_i}{V_{\text{混合}}}$. 其中 V_i 称为分容积, 即指与混合气体具有相同压力和温度时的组成气体容积。

例题1-3. 氧气 $V_1 = 5$ 米³, 在定容下被加热, 气体的初态 $p_1 = 5$ 大气压(表压), $t_1 = 20^\circ\text{C}$, 加热到 $t_2 = 120^\circ\text{C}$, 求供给的热量(取比热为定值)。

(解) 供给的热量, 可用公式 $Q_v = v_n C'_v(t_2 - t_1)$ 计算, 但式中应该用标准状态的容积代入, 所以须利用公式 $\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_n v_n}{T_n}$, 先将 V_1 化成标准状态时的容积, 即:

$$V_n = \frac{p_1}{p_n} \times \frac{T_n}{T_1} \times V_1 = \frac{(5+1)}{1.0332} \times \frac{273}{(20+273)} \times 5 = 27 \text{ 米}^3;$$

于是: $Q_v = 27 \times \frac{5}{22.4} (120 - 20) = 604 \text{ 大卡}.$

[此题也可用 $Q_v = G C_v(t_2 - t_1)$ 来解]

例题1-4. 当 $p = \text{常数}$ 时, 求加热 1,000 标准米³ 空气自 200 至 400°C 所需的热量。

(解) 由附录的比热表, 查定压下气体的平均容积比热, 可以得到:

在 200°C 时, 空气的 $C_{p,0}^{200} = 0.3123$ 大卡/标准米³·°C,

在 400°C 时, 空气的 $C_{p,0}^{400} = 0.3175$ 大卡/标准米³·°C;

故得:

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= 0.3175 \times 400 - 0.3123 \times 200 \\ &= 64.6 \text{ 大卡/标准米}^3; \\ Q &= V q_{1-2} = 1000 \times 64.6 \\ &= 64600 \text{ 大卡}. \end{aligned}$$

例题1-5. 锅炉内的烟气容积比率为: $r_{\text{CO}_2} = 12\%$, $r_{\text{O}_2} = 6\%$, $r_{\text{H}_2\text{O}} = 8\%$, $r_{\text{N}_2} = 74\%$ 求 2 标准米³ 的烟气, 在定压下由温度 $t_1 = 200^\circ\text{C}$ 升高到 $t_2 = 1200^\circ\text{C}$ 时所加入的热量。(热容量以随温度变化的曲线关系进行计算)。

(解) 应用公式:

$$Q_p = V_n (C_{p,m}^{t_2} t_2 - C_{p,m}^{t_1} t_1)$$

$$\text{而 } C_{p,m}^{t_2} = r_{\text{CO}_2} \times C'_{p,m \text{ CO}_2} + r_{\text{O}_2} \times C'_{p,m \text{ O}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} \times C'_{p,m \text{ H}_2\text{O}} + r_{\text{N}_2} \times C'_{p,m \text{ N}_2}$$

$$=0.12 \times 0.5433 + 0.06 \times 0.3584 + 0.08 \times 0.4244 + 0.74 \times 0.3380$$

$$=0.371 \text{ 大卡/标准米}^3 \cdot \text{度},$$

$$C_{pm}^{t_1} = 0.12 \times 0.4290 + 0.06 \times 0.3190 + 0.08 \times 0.3635 + 0.74 \times 0.3106$$

$$=0.33 \text{ 大卡/标准米}^3 \cdot \text{度};$$

$$\begin{aligned} \text{故得: } Q_p &= 2(0.371 \times 1200 - 0.33 \times 200) \\ &= 758.4 \text{ 大卡}. \end{aligned}$$

式中的比热数值, 系在附录 IV 气体比热表查出 1200°C 与 200°C 时的平均比热数值。

1-3 热力学的第一定律和第二定律

热力学第一定律: 人们从无数的实际经验总结出一条规律: 各种能量可以相互转换, 但它们的总量保持不变。这就是能量守恒与转换定律。将这定律应用在热力学上, 便是热力学第一定律。它是说明机械能和热能在转换时的守恒。



图 1-5 一个带有活塞的容器图

假设在一个带有活塞的容器内装有 1 公斤的气体, 如图 1-5 所示。当外面加入热量为 q 后, 气体膨胀, 容积增大, 推动活塞将重物举起。此时气体对外界作了 l 公斤·米的功。在气体受热做功的过程中, 由于气体状态的变化, 一般将引起气体内能的改变。因此, 对于气体不流动时, 加给气体的热量除一部分用于改变气体内能外, 其余部分即作了膨胀功。故得:

$$q = \Delta u + Al. \quad (1-23)$$

式中 q ——加入的热量, 大卡/公斤;

Δu ——气体内能的变化, 大卡/公斤;

l ——气体对外作的功, 公斤米/公斤;

A ——功的热当量 $= \frac{1}{427}$, 大卡/公斤·米。

当过程为微小变化时, 式(1-23)变为:

$$dq = du + Adl \quad (1-24)$$

式(1-23)和(1-24)均为不流动系中热力学第一定律的数学表达式。它说明吸收的热量是用来改变工质的内能和对外做功。

在讲比热时, 曾说过在容积不变情况下加热, 热量的计算, 应利用定容比热 C_v 进行, 即 $q_v = C_v(t_2 - t_1)$; 同时由于定容下加热, 气体容积不变, 它的外功为零; 根据热力学第一定律, 可知此时加进热量只增加了内能, 即 $q_v = \Delta u$ 。因此, 可得 $\Delta u = C_v(t_2 - t_1) = C_v \Delta t$ 。它也就是计算理想气体内能的一般公式。因为理想气体的内能, 只取决于温度, 而与比容及压力无关。即是说理想气体从一个状态变化到另一任意状态, 经过不同的热力过程, 只要它的温度变化相同, 它的内能变化都是相同的。均可按 $\Delta u = C_v \Delta t$ 进行计算, 故不流动系热力学第一定律的数学式, 可写为:

$$q = C_v(t_2 - t_1) + Al.$$

或者

$$dq = C_v dt + Adl = C_v dt + APdv. \quad (1-25)$$

例 1-6 汽缸内储有空气 0.8 公斤, 今加热 20 大卡, 空气做功为 10000 公斤·米。问每公