

高等学校教学用书

工程热力学及传热学

丁国玺 编

煤炭工业出版社

内 容 简 介

本书根据矿业学院《矿井建设》专业的《工程热力学及传热学》40学时教学大纲编写。全书分两篇，第一篇工程热力学，内分九章；第二篇传热学，内分七章，共计十六章。

本书除重点阐明热力学传热学的基本理论和概念外，还结合《矿井建设》、《煤矿通风与安全》、《矿业机械工程》等专业的需要，着重讲述制冷原理、不稳定导热、相似原理和化学热力学的基础知识。本书采用中华人民共和国法定计量单位。

本书可作为矿业学院《矿井建设》、《煤矿通风与安全》、《矿业机械工程》等专业和其他非动力专业的教科书，亦可供煤矿工程技术人员参考。

责任编辑：莫 国 震

高 等 学 校 教 学 用 书 工 程 热 力 学 及 传 热 学

丁 国 玺 编

煤炭工业出版社 出版

（北京安定门外和平北路16号）

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $10^{1/2}$ 插页 2
字数 245 千字 印数 1—5,800
1986年 3 月第 1 版 1986年 3 月第 1 次印刷
书号 15035·2780 定价 1.80 元

前 言

本书根据矿业学院《矿井建设》专业的工程热力学及传热学40学时教学大纲编写。全书分两篇，第一篇工程热力学，内分九章；第二篇传热学，内分七章，共计十六章。

本书主要讲述热力学、传热学的基本定律，热力过程、循环和传热过程的分析计算和气体蒸汽的热力学性质。除重点阐明热力学、传热学的基本理论和基本概念外，还结合《矿井建设》、《煤矿通风与安全》、《煤矿机械工程》等专业的需要和传热学在近代工程中的应用，着重讲述制冷原理、不稳定导热、相似原理和化学热力学的基础知识。本书采用中华人民共和国法定计量单位。

本书可作为矿业学院《矿井建设》、《煤矿通风与安全》、《煤矿机械工程》等专业和其它非动力专业的教科书，亦可供煤矿工程技术人员参考。本书第二篇中的第十五章由张维廉编写，其余篇章由丁国玺编写。在编写过程中，余力、王树仁、王文龙、张萌、马英明、王家澍等同志提出了许多宝贵意见，在此仅向他们表示衷心的感谢。由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳切希望使用本书的同志提出批评指正。

编 者

1985年3月于中国矿院

目 录

前言

绪论..... 1

第一篇 工程热力学

第一章 理想气体的性质 2

第一节 工质及其热力学基本状态参数 2

第二节 理想气体的状态方程式 4

第三节 理想气体的比热 6

第四节 工质的膨胀功和压缩功 9

第二章 热力学第一定律 11

第一节 热力学第一定律 11

第二节 简单能量方程式, 内能 11

第三节 稳定流动方程式, 焓 14

第三章 气体的热力过程 18

第一节 可逆过程与不可逆过程 18

第二节 热力过程的分析 18

第四章 气体的热力循环及热力学第二定律 26

第一节 热力循环及热效率 26

第二节 加诺循环 26

第三节 热力学第二定律 28

第四节 熵 28

第五节 不可逆过程中熵的变化 32

第五章 压气机工作原理 36

第一节 单级活塞式压气机的工作原理 36

第二节 单级活塞式压气机所消耗的机械功和容积效率 37

第三节 两级活塞式压气机的工作过程 40

第六章 水蒸汽 44

第一节 实际气体 44

第二节 蒸汽的发生过程及其压容图和温熵图 44

第三节 蒸汽状态参数的确定 46

第四节 蒸汽的焓熵图 49

第五节 蒸汽的热力过程 50

第六节 气体和蒸汽的节流过程 52

第七节 蒸汽动力厂循环 53

第七章 制冷原理 56

第一节 概论 56

第二节 空气压缩制冷 56

第三节	蒸汽压缩制冷	59
第四节	吸收式制冷	62
第五节	蒸汽引射式制冷	63
第八章	化学热力学基础	64
第一节	热力学第一定律在化学反应中的应用	64
第二节	生成焓	66
第三节	稳定流动系统中化学反应热效应的计算	68
第四节	热力学第二定律在化学反应中的应用	69
第九章	湿空气	72
第一节	湿空气的概念	72
第二节	绝对湿度、相对湿度、含湿量和湿空气的焓	72
第三节	湿空气的焓湿量图	75

第二篇 传 热 学

引言	78
第十章 导热	78
第一节 温度场	78
第二节 导热基本定律 (傅立叶定律)	79
第三节 导热系数	80
第四节 平壁导热	80
第五节 圆筒壁导热	82
第六节 球壁导热	87
第十一章 对流换热	89
第一节 基本概念	89
第二节 相似概念	90
第三节 相似倍数关系式、相似准则、准则等式	91
第四节 对流换热中的准则等式和准则方程式	93
第五节 相似理论三定理	95
第六节 准则形式的经验公式	96
第十二章 辐射换热	101
第一节 基本概念	101
第二节 辐射的计算公式	101
第十三章 传热和换热器	103
第一节 基本概念	103
第二节 通过壁的传热	103
第三节 换热器计算的基本原理	105
第四节 对数平均温差	105
第十四章 二维稳定导热的解法	116
第一节 导热微分方程式	116
第二节 二维稳定导热分析解法	117
第三节 二维稳定导热数值解法	122
第十五章 不稳定导热	129

第一节	不稳定温度场的概念	129
第二节	单值性条件	129
第三节	无限大平板不稳定导热	130
第四节	无限长圆柱不稳定导热	135
第五节	半无限大物体不稳定导热	138
第六节	不稳定导热的数值解法	141
第十六章	热模拟	145
第一节	基本概念	145
第二节	电热模拟	146
第三节	水热模拟	147
附录 1	饱和蒸汽表 (按温度编排)	150
附录 2	水与过热蒸汽表	151
附录 3	氨 (NH_3) 的饱和蒸汽表	154
附录 4	氟里昂-12 (CF_2Cl_2) 的饱和蒸汽表	154
附录 5	在 101325 Pa (1 atm) 下干空气的热物理性质	155
附录 6	饱和水的热物理性质	156
附录 7	饱和线上蒸汽的热物理性质	157
附录 8	液体的热物理性质	158
附录 9	Bessel 函数表	159
附录 10	高斯误差函数表	160
附图 1	水蒸汽的 h - s 图	
附图 2	氨 (NH_3) $\lg p$ - h 图	
附图 3	湿空气 H - d 图	
附图 4	氟里昂-22 $\lg p$ - h 图	

绪 论

“热力学”是由物理学中的热学发展而形成的学科，是研究热能与其它形式能量（如机械能、化学能、电能等）互相转换规律的科学。“工程热力学”是“热力学”的一个分支，它研究热能与机械能互相转换的规律。例如内燃机气缸内的燃料经过燃烧将化学能变为热能又经过内燃机的工作循环将热能转化为机械能，后者的转化即为“工程热力学”研究的内容。又如制冷装置将低温热源的热量传向高温热源时必须消耗外界机械功，这是机械功与热能的转化规律，也是“工程热力学”研究的内容。

“传热学”是研究具有不同温度物体之间热量传递的速率和条件的。例如在压气机的中间冷却器中，热压缩空气与冷却水之间的热量传递规律，即为“传热学”研究的内容。

“工程热力学”研究的主要内容包括以下三部分：

1. 工程热力学基础理论的两个基本定律，即热力学第一定律和第二定律。
2. 介绍热力机械常用的工质如空气、燃气、氨气、水蒸汽和氟里昂的热力学性质。
3. 根据热力学基本定律、工质热力学性质，分析和计算各种热力过程和循环的热量和功量，并且指出提高热效率的途径。

结合《矿井建设》、《煤矿通风与安全》、《煤矿机械工程》等专业的需要，本书“传热学”的主要内容包括：

1. 传热的三种基本方式：导热、对流和辐射的基本概念、原理和计算。
2. 热交换器的原理、计算和选型设计。
3. 不稳定导热和二维稳定导热。

“工程热力学”与“传热学”的研究采用宏观方法，其特点是运用严密的逻辑推理，对物质的宏观现象进行分析研究而不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动情况。

学习本课程的目的，是为《矿井建设》、《矿井通风与安全》、《煤矿机械工程》等专业的专业课程建立必要的理论基础，同时也为节约热能和有效利用热能奠定必需的基础知识。

第一篇 工程热力学

“工程热力学”是动力工程的一门重要基础技术课程,是现代工程热物理中的主要学科之一,在大力提倡有效利用能量和节约能量的今天,该课程具有重要的现实和长远意义。

因为热力机械的循环是由热力过程组成,而热力过程又由热力状态的连续变化组成,所以工程热力学研究的次序是由状态到过程再到循环。在热力循环中,热能转变为机械能需要通过一种介质,这种介质以具备良好的膨胀性和流动性的气体为最好,因此,在研究气体的状态时,必须先懂得气体的性质和规律。

第一章 理想气体的性质

第一节 工质及其热力学基本状态参数

“工质”是热能转化为机械能的介质。一般用空气、燃气和水蒸汽作为工质。

为了研究方便,常常假设一种理想气体,即组成该种气体的分子是不占体积的质点,分子之间无作用力,分子为完全弹性体。事实上没有一种实际气体完全符合这种条件。它是实际气体的极限状态。当空气的压力不超过20MPa,温度不低于 -20°C 时,按理想气体状态方程式进行计算,误差不会超过4%,这种误差在工程上是允许的。因此,由理想气体导出的一些公式适用于空气、燃气和二原子气体。这样在工程热力学中研究理想气体的规律,不但方便而且有实际的意义。水蒸汽由于分子间作用力较大不能当做理想气体处理。

由以上所述,当热能转换为机械能时,需要通过工质的状态改变。描写工质状态的基本物理量有温度 t 、压力 p 和比容 v 。这三个变数可以通过仪器测出,称为基本状态参数。

1. 温度: 是表示物体冷热程度的物理量,用摄氏温度表测量,写成 $t[^{\circ}\text{C}]$ 。在工程热力学计算时用热力学温度(开尔文) $T[\text{K}]$,其换算关系式如下:

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

热力学温度 T 与摄氏温度 t , 每一度的间隔相等,即温度差相等,而所取的零度基点不同。

2. 比容: 是指单位质量的物质所占有的容积,如有 $m\text{kg}$ 质量气体其占有的总容积为 $V\text{m}^3$,其比容 v 表示如下式:

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

比容的倒数称为物质的密度,即:

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

3. 压力: 容器内气体分子对于器壁单位面积的垂直作用力称为压力。测量其大小用压力计、压力表和真空表。压力计的工作原理见图1-1。

图1-1表示矿用离心式通风机,其进风管空气绝对压力 p_1 为:

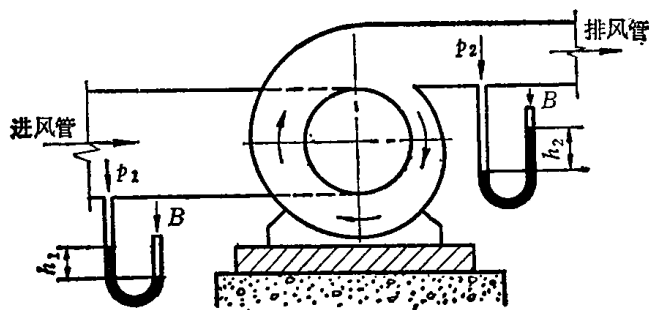


图 1-1 通风机进风管和排风管中的表压力

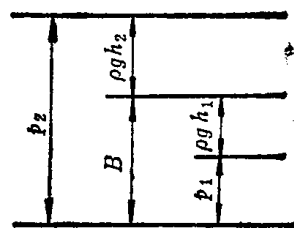


图 1-2 表压力、真空度与绝对压力的关系

$$p_1 = B - \rho g h_1 \quad (1-4)$$

其排气管空气绝对压力 p_2 为:

$$p_2 = B + \rho g h_2 \quad (1-5)$$

式中 B ——当时当地大气压, 由气压计测得;

$\rho g h_1$ ——真空度, 负压;

$\rho g h_2$ ——过压, 表压 (相对压力, 测量值)。

各种压力的关系见图1-2。上式中压力单位的变换如下式:

$$p = \rho g h \quad (1-6)$$

公式 (1-6) 的单位表示如下:

p ——Pa(N/m²); ρ ——kg/m³; h ——m液柱高度。

h 表示 U 形管中液柱高度, 其单位过去用 mm 表示。 ρ 表示液体的密度。 B 的单位常用 mmHg 表示。因此在用公式 (1-6) 计算时, 需要变成统一单位。我国法定计量单位中压力单位是帕 (Pa), 即:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

由于“帕”这个单位较小, 工程中常用兆帕 (MPa) 作为压力单位。

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

过去, 常用 atm、at、kgf/cm²、mmH₂O、mmHg、bar 作为压力的单位。它们与国家法定计量单位 Pa 的换算关系是:

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.806375 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.3224 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa}$$

由以上分析得出以下结论:

1. 工程大气压和物理大气压是人们假定的数值, 不因地而异。而当时当地的大气压 B 的数值是因地而异的。

2. 式(1-4)、(1-5)中, B 、 h 是辅助值, 而 p 是代表气体真正压力的绝对值, p 称为绝对压力, 而 $\rho g h$ 称为相对压力。

为了熟悉压力的计算和单位的变化, 举下例供参考。

$R = \frac{2}{3} N' B$, 其单位为 $N \cdot m / (kg \cdot K)$ 或 $J / (kg \cdot K)$ 。

$N' = n v$ ——1kg质量气体的分子数目, 对某种气体为常数, 不同气体其值亦异,

n ——分子浓度, 即单位容积内气体的分子数;

B ——分子运动能与热力学温度的比例系数。

上式中 R 称为气体常数。因为 $N'B$ 不随气体压力 p 、比容 v 和温度 T 的变化而变化, 只随气体性质而改变。所以 R 也具有这种性质。

如将气体常数 R 式两边乘以气体分子量 M , 则得:

$$MR = \frac{2}{3} MN'B$$

气体质量采用 kmol (千摩尔) 为单位时, 则 MN' 代表 1kmol 气体中包含的分子数 N_M , 并由亚佛加得罗定律可以证明 1kmol 的各种理想气体中所包含的分子数都相等, 即:

$$N_M = 6.022 \times 10^{26}$$

N_M ——亚佛加得罗常数。

所以 $MR = \frac{2}{3} N_M \cdot B = R_0 = \text{const}$

R_0 ——通用气体常数, 其值不随 p 、 v 、 T 而改变, 也不随气体性质而改变。其值计算如下:

上式中 B 与玻尔兹曼常数 K 有如下的关系:

$$K = \frac{2}{3} B$$

又因

$$K = 1.3806 \times 10^{-23}, J/K$$

故得 $MR = R_0 = \frac{2}{3} N_M B = K N_M = 1.3806 \times 10^{-23} \times 6.022 \times 10^{26}$

$$R_0 = 8314 J / (kmol \cdot K) = 8.314 kJ / (kmol \cdot K)$$

如已知某种气体的分子量 M 可用下式求出其气体常数 R :

$$R = \frac{R_0}{M} = \frac{8314}{M}, J / (kg \cdot K) \quad (1-10)$$

表 1-1 几种常见气体的气体常数

物质名称	化 学 式	分 子 量	R , J/(kg·K)	物质名称	化 学 式	分 子 量	R , J/(kg·K)
氢	H ₂	2.016	4124.0	氮	N ₂	28.013	296.8
氦	He	4.003	2077.0	一氧化碳	CO	28.011	296.8
甲 烷	CH ₄	16.043	518.3	二氧化碳	CO ₂	44.010	188.9
氨	NH ₃	17.031	488.2	氧	O ₂	32.0	259.8
水 蒸 汽	H ₂ O	18.015	461.5	空 气	—	28.97	287.0

对于 1kmol 气体的状态方程式可表示如下:

$$pV_M = R_0 T = MRT \quad (1-11)$$

式中 V_M ——1kmol 气体的容积。

在工程问题计算中, 过去常用MKS单位, 采用此单位制时, G kgf气体的状态方程式可写成如下形式:

$$pV = GRT \quad (1-12)$$

式中 p ——气体的绝对压力, kgf/m²;
 V ——气体的总容积, m³;
 G ——气体的总重量, 其单位为千克力, kgf;
 T ——热力学温度, K;
 R ——气体常数, 单位是m·kgf/(kgf·K)。

理想气体状态方程式, 在热力计算中有着广泛的用途, 今举例如下:

例1-3 当压气机停止运转时, 风包内压气的绝对压力 $p_1 = 7 \text{ ata}$, 温度 $t_1 = 80^\circ\text{C}$, 到夜晚温度降为 $t_2 = 15^\circ\text{C}$, 压力变为 $p_2 = 5.2 \text{ ata}$ (绝对), 风包容积为 3 m^3 , 求由于风包和阀门不严密而损失的空气量为多少?

解: 由公式(1-12)知漏气前风包内空气重量:

$$G_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{7 \times 10^4 \times 3}{29.27 \times (273 + 80)} = 20.32 \text{ kgf}$$

漏气后风包内空气重量:

$$G_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{5.2 \times 10^4 \times 3}{29.27 \times (273 + 15)} = 18.51 \text{ kgf}$$

漏失的空气重量:

$$G_1 - G_2 = 20.32 - 18.51 = 1.81 \text{ kgf}$$

例1-4 某活塞式压气机将某种气体压入风包中。压气机每分钟吸入温度 $t_0 = 15^\circ\text{C}$ 、压力为当地大气压力 $B = 0.1 \text{ MPa}$ 的气体 $V_0 = 0.2 \text{ m}^3$, 风包的容积为 9.5 m^3 。问经过多少分钟后压气机才能把风包压力提高到 $p_2 = 0.9 \text{ MPa}$ (绝对) 和温度 $t_2 = 50^\circ\text{C}$ 。压气机开始工作以前, 风包压力表指示 $p_1 = 0.05 \text{ MPa}$, $t_1 = 17^\circ\text{C}$ 。

解: 风包原有气体质量:

$$m_1 = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(0.1 + 0.05) \times 10^6 \times 9.5}{287 \times (273 + 17)} = 17.12 \text{ kg}$$

风包内最后气体质量:

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{RT_2} = \frac{0.9 \times 10^6 \times 9.5}{287 \times (273 + 50)} = 92.23 \text{ kg}$$

压风机每分钟排气量:

$$m_0 = \frac{p_0 V_0}{RT_0} = \frac{0.1 \times 10^6 \times 0.2}{287 \times (273 + 15)} = 0.24 \text{ kg/min}$$

所需时间:

$$\tau = \frac{m_2 - m_1}{m_0} = \frac{92.23 - 17.12}{0.24} = 312.96 \text{ min}(5.22 \text{ h})$$

第三节 理想气体的比热

在工程热力学中主要是研究把热量如何转变为功量, 因此需要计算热量和功量。计算

热量方法之一是用比热。比热是物质的重要热力性质之一。理想气体比热的定义是“单位数量的理想气体温度上升或下降 1°C 所吸收或放出的热量”。按照计量单位，比热可分为三种。取 1kg 质量作计量单位时，所得比热称为质量比热，用符号 c 表示，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。取标准状态下 1m^3 气体的容积作为计量单位时，所得比热称为容积比热，用符号 c' 表示，单位为 $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ 。取千摩尔作为计量单位时，所得比热称为千摩尔比热，用符号 μ_c 表示，其单位为 $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。三者之间的关系式为：

$$\mu_c = \mu \cdot c = 22.4c' \quad (1-13)$$

由于加热条件不同，所需要的热量亦异。在热工计算中，通常应用以下两种质量比热。

1. 气体的定压比热： 1kg 气体，在压力不变情况下，温升 1°C 所吸收之热量称为质量定压比热，用符号 c_p 表示。

2. 气体的定容比热： 1kg 气体，在容积不变情况下，温升 1°C 所吸收的热量，称为质量定容比热，用符号 c_v 表示。

根据实验指出：理想气体的比热与压力无关，但与温度有关，因此，又有真实比热和平均比热之分。

1. 真实比热：设 1kg 气体，温度由 t 升高到 $t + \Delta t$ 时所需热量为 Δq ，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，则：

$$c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}, \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}) \quad (1-14)$$

c 称为 $t^{\circ}\text{C}$ 时，气体的真实质量比热。理想气体的真实比热与温度是曲线关系，可用下式表示：

$$c = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots \quad (1-15)$$

式(1-15)的曲线关系见图1-4。

在温度不高的热力工程计算中，常常把比热与温度的关系当作直线处理，表示如下：

$$c = a_0 + a_1 t \quad (1-16)$$

式中 c ——真实比热；

a_0 、 a_1 ——系数，因不同气体其值亦异；

t ——温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

公式(1-16)的曲线关系见图1-5。

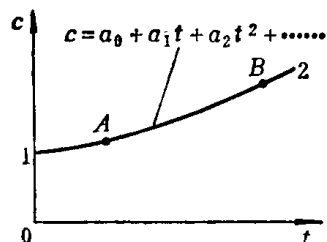


图 1-4 比热与温度的曲线关系

A、B 两点的气体真实比热表示如下：

$$c_A = a_0 + a_1 t_1$$

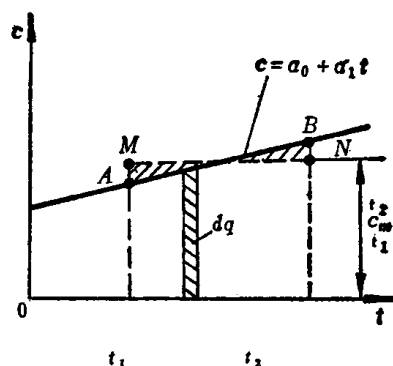


图 1-5 比热与温度的直线关系

$$c_B = a_0 + a_1 t_2$$

用真实比热 c 计算气体从 t_1 到 t_2 的加热量如下式所示:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt = \text{面积 } A t_1 t_2 B$$

为了计算热量的方便, 采用气体平均比热 c_m 计算热量。

2. 平均比热 气体平均比热 c_m 计算公式推导如下:

令

$$\begin{aligned} q &= \text{面积 } A t_1 t_2 B = \text{面积 } M t_1 t_2 N \\ &= \int_{t_1}^{t_2} c dt = c_m (t_2 - t_1) \\ c_m &= \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (a_0 + a_1 t) dt}{t_2 - t_1} \\ c_m &= a_0 + \frac{a_1}{2} (t_1 + t_2) \end{aligned} \quad (1-17)$$

公式 (1-17) 表示气体从温度 t_1 到 t_2 的质量平均比热。为了绘制比热表的方便, 常取从 0°C 到某一温度 t 的平均比热, 即:

令

$$t_1 = 0, t_2 = t$$

代入公式 (1-17), 变成如下形式:

$$c_m = a_0 + \frac{a_1}{2} t \quad (1-18)$$

如果要求得从 t_1 温度到 t_2 温度的气体平均比热, 只要把公式 (1-18) 中的 $t = t_1 + t_2$ 代入后即可求出 c_m 。

各种气体的平均比热 c_m 见表 1-2。

表 1-2 气体的平均比热 c_{pm} 、 c_{vm} 的直线式 ($0 \sim 1500^\circ\text{C}$ 适用)

气 体	c_{pm} 和 c_{vm} , $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	c'_{pm} 和 c'_{vm} , $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
O_2	$c_{pm} = 0.9203 + 0.0001065t$ $c_{vm} = 0.6603 + 0.0001065t$	$c'_{pm} = 1.3138 + 0.0001577t$ $c'_{vm} = 0.9429 + 0.0001577t$
N_2	$c_{pm} = 1.02410 + 0.0000886t$ $c_{vm} = 0.7272 + 0.0000886t$	$c'_{pm} = 1.2799 + 0.0001066t$ $c'_{vm} = 0.9090 + 0.0001066t$
CO	$c_{pm} = 1.0304 + 0.0000969t$ $c_{vm} = 0.7331 + 0.0000969t$	$c'_{pm} = 1.2870 + 0.0001210t$ $c'_{vm} = 0.9160 + 0.0001210t$
空 气	$c_{pm} = 0.9956 + 0.0000930t$ $c_{vm} = 0.7088 + 0.0000930t$	$c'_{pm} = 1.2866 + 0.0001201t$ $c'_{vm} = 0.9157 + 0.0001201t$
H_2O	$c_{pm} = 1.8334 + 0.0003111t$ $c_{vm} = 1.3716 + 0.0003111t$	$c'_{pm} = 1.4733 + 0.0002498t$ $c'_{vm} = 1.1024 + 0.0002498t$
CO_2	$c_{pm} = 0.8725 + 0.0002406t$ $c_{vm} = 0.6837 + 0.0002406t$	$c'_{pm} = 1.7132 + 0.0004723t$ $c'_{vm} = 1.3423 + 0.0004723t$

当温度变化范围不大或作粗略计算时, 为了计算方便, 可用定值比热计算热量。定值千摩尔比热值如下:

对单原子气体:

$$\mu c_p = 20.9 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\mu c_v = 12.6 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$$

对双原子气体或空气:

$$\mu c_p = 29.3 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\mu c_v = 20.9 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$$

例1-5 求100kg空气在定压下从900℃加热到1300℃所需热量

解: 查表1-2

$$\begin{aligned} c_{pm} &= 0.9956 + 0.0000930 t \\ &= 0.9956 + 0.0000930(1300 + 900) \\ &= 1.2002 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

所需热量:

$$\begin{aligned} Q_p &= m c_{pm} (t_2 - t_1) \\ &= 100 \times 1.2002 \times (1300 - 900) \\ &= 48008 \text{ kJ} \end{aligned}$$

第四节 工质的膨胀功和压缩功

在图1-6中, 假定在气缸内有1kg工质, 其作用在活塞面积 F 上的压力为 p 。当作用在活

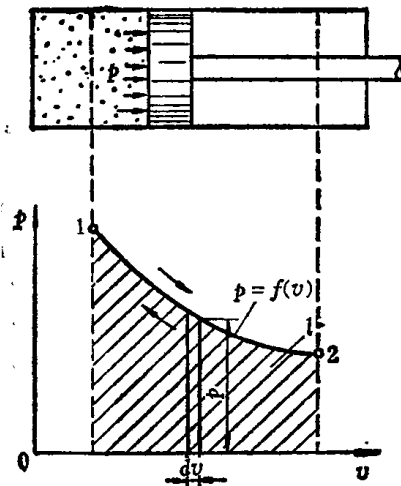


图 1-6 工质的膨胀功和压缩功

塞右面的压力小于 p 时, 工质即开始膨胀对活塞做功称为膨胀功。反之, 当活塞左面压力小于右面压力时, 活塞则对工质做功称为压缩功。当工质作微小膨胀功时, 活塞移动距离 ds , 此功量可依下式计算:

$$dl = pFds = p dv$$

当工质从初态 1 膨胀到终态 2 时, 整个过程的膨胀功可用下式计算:

$$l = \int_1^2 p dv, \text{ N}\cdot\text{m/kg} \quad (1-19)$$

欲求全过程的膨胀功, 需要知道该过程曲线方程式, 即 $p = f(v)$, 才能积分公式(1-19)。1 → 2 曲线下的面积表示该过程的膨胀功。在气体终态体积 v_2 大于初态体积 v_1 时, 积分后功量 l 为正值, 即工质对活塞作膨胀功。反之, 当 $v_2 < v_1$ 时, 积分后 l 为负值, 即活塞对工质作压缩功。如果气缸内的工质质量为 $m \text{ kg}$ ($m > 1$), 其膨胀功可依下式计算:

$$L = ml = m \int_1^2 p dv, \text{ N}\cdot\text{m} \quad (1-20)$$

如果不考虑工质本身分子摩擦以及活塞与气缸壁的摩擦, 工质的膨胀功就是外功。所谓工质的外功就是工质膨胀功减去摩擦损失功后, 工质对外界所作的功量, 表示如下式:

$$L_{\text{膨胀}} - L_{\text{损失}} = L_{\text{外功}} \quad (1-21)$$

在工程热力学中, 为了研究、计算的方便, 常常假定膨胀功等于外功, 这种假定带来的误差用热机效率校正。

第二章 热力学第一定律

第一节 热力学第一定律

能量转换及守恒定律是人们长期实验总结出的一条规律。它指出：在自然界，一切物质都具有能量。能量有各种形式，它能从一种形式转化为另一种形式。在转化中，能的总量保持不变。

能量守恒和转换定律在热力学中的应用就是热力学第一定律。在工程热力学中，热力学第一定律可以表述为：“热可以变为功，功也可以变为热。一定热量的消失，必产生与之数量相当的功；消耗一定量的功时，也必出现相应数量的热。”它的数学表达式为：

$$\begin{aligned} Q &= AL, \text{ kcal} \\ \text{或 } L &= JQ, \text{ kgf} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中 Q ——热量，kcal；

A ——功的热当量， $A = \frac{1}{427} \text{ kcal}/(\text{kgf} \cdot \text{m})$ ；

L ——功， $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ；

J ——热的功当量， $J = 427 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{kcal}$ 。

在我国法定计量单位中，热与功采用相同的单位，即焦耳(J)。上式中 $A = \frac{1}{J} = 1$ ，公式(2-1)则变成如下形式：

$$Q = L, \text{ kJ} \quad (2-2)$$

热力学第一定律确定了热能和机械能可以互相转换，在转换时存在着确定的数量关系，所以热力学第一定律也称为当量定律。

在工程上常用的功的热当量有以下两种：

$$1 \text{ 马力小时} = \frac{75 \times 3600}{427} \approx 632 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = \frac{102 \times 3600}{427} \approx 860 \text{ kcal}$$

第二节 简单能量方程式，内能

为了研究热力机械循环的方便，常把热力机械分为开口体系和闭口体系来研究。热力学第一定律应用在闭口体系时得出的解析式称为简单能量方程式。热力学第一定律应用在开口体系时得出的解析式称为稳定流动方程式。

所谓体系就是把热机规定了一定的范围，此范围内被研究的工质叫“体系”。此范围称为界限。界限以外称外界。图2-1表示一个燃气轮机的体系与外界的示意图。

体系分为两种：一为闭口体系，即体系与外界只有能量交换而无工质交换（图2-2）；